



HAL
open science

Mines et environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration

L. L'Huillier, Tanguy Jaffré, A. Wulff, Michel Lebrun, Laurent Maggia, Nicolas Barré, Jean Chazeau, Herve Jourdan, Hamid Amir, M. Ducouso, et al.

► To cite this version:

L. L'Huillier, Tanguy Jaffré, A. Wulff, Michel Lebrun, Laurent Maggia, et al.. Mines et environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration. Laurent L'Huillier; Tanguy Jaffré; Adrien Wulff. Institut Agronomique Néo-Calédonien, 411 p., 2010, Etudes Synthèses, 978-2-9523950-8-3. ird-03039713

HAL Id: ird-03039713

<https://ird.hal.science/ird-03039713v1>

Submitted on 4 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Les substrats ultramafiques – ou terrains miniers – à l'origine du minerai de nickel, couvrent près du tiers de la Nouvelle-Calédonie, qui se place parmi les premiers producteurs de ce métal dans le monde. Mais l'exploitation minière à ciel ouvert nécessite d'importants décapages qui génèrent des problèmes d'érosion des sols, de dérèglement des débits hydriques, de pollution des cours d'eau et de perte de biodiversité.

Ces substrats datant de 37 millions d'années portent une flore riche et originale, qui a largement contribué au classement de la Nouvelle-Calédonie comme un des principaux hotspots de biodiversité de la planète. Elle comprend environ 2150 espèces végétales dont 82 % sont endémiques. Ces espèces sont en outre spécialisées, adaptées à des sols très pauvres en plusieurs éléments nutritifs et inversement très riches en magnésium, en nickel et en d'autres métaux. Ces milieux abritent également une faune d'une grande diversité.

Ainsi la Nouvelle-Calédonie est confrontée à un double défi : celui d'exploiter une ressource minière considérable à même d'assurer au pays un développement économique important, et celui de protéger cette biodiversité exceptionnelle au nom des principes fondamentaux édictés mondialement. Dans ce contexte, la conservation des milieux abritant la plus grande part de la biodiversité, ainsi que la restauration des sites dégradés par l'exploitation minière s'imposent comme des nécessités incontournables.

L'ouvrage décrit et illustre tout d'abord la variété des substrats ultramafiques, ainsi que la diversité des écosystèmes et de leurs composantes floristiques, zoologiques et microbiologiques. Le concept de restauration écologique des sites dégradés et les moyens nécessaires pour sa mise en œuvre sont ensuite développés ; puis les modes de collecte, de germination, de conservation des semences et de production de plants d'espèces locales sont décrits, de même que les méthodes de revégétalisation. Enfin près de 100 espèces végétales utiles pour la restauration sont présentées.

Cet ouvrage est destiné à un large public, allant des professionnels du secteur minier (sociétés minières, opérateurs de la revégétalisation, bureaux d'étude...) aux personnels des collectivités impliquées dans la gestion du patrimoine minier et biologique du pays, ainsi qu'aux scientifiques, enseignants, étudiants, et plus largement à toute personne intéressée par les terrains miniers et leur gestion environnementale.



Financement Sysmin 8^e FED
Projet n° 8 PTF NC 08

ISBN : 978-2-9523950-8-3



Tabi
ÉDITIONS



Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration

Laurent L'HUILLIER
Tanguy JAFFRÉ
Adrien WULFF



Études &
Synthèses

Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration

Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie :

les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration

Laurent L'HUILLIER
IAC

Tanguy JAFFRÉ
IRD / Amap

Adrien WULFF
IAC / UNC

Avec la collaboration de :

**Michel LEBRUN, Laurent MAGGIA,
Nicolas BARRÉ, Jean CHAZEAU, Hervé JOURDAN,
Hamid AMIR, Marc DUCOUSSO,
Gildas GÂTEBLÉ, Bruno FOGLIANI, Charly ZONGO, Casimir VÉA**

Éditions IAC
BP 73 - 98890 Païta
Nouvelle-Calédonie

© **Institut Agronomique néo-Calédonien**

BP 73, 98890 Païta, Nouvelle-Calédonie

1^{re} édition, 2010

ISBN : 978-2-9523950-8-3

Dépôt légal : 2010

Conception et réalisation :  / tabueditions@tabu.nc / Tél. : 24 91 11

Correction : Claudine Bousquet

Photographie de couverture : Laurent L'Huillier

Achévé d'imprimer : Imprimé et relié en Italie, sur papier sans chlore.

Citation de l'ouvrage :

L'Huillier L., Jaffré T. et Wulff A. 2010. *Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration*. Éditions IAC, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 412 p.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie, est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations – qui devront faire référence au présent ouvrage – justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1^{er} juillet 1992 – art. L. 122-4 et L. 122-5 et Code pénal art. 425).

Partenaires institutionnels de l'IAC :



PRÉFACE

Tout scientifique ayant la préoccupation de s'intéresser à l'étude de la Planète sait que l'érosion naturelle existe depuis l'époque de la Terre primitive voici environ quatre milliards d'années. Elle a vraisemblablement permis, par l'intermédiaire des argiles, le transfert de molécules carbonées des continents vers les océans, où, en s'assemblant à d'autres molécules, sur ce support minéral, des molécules plus complexes sont apparues, capables de s'auto-répliquer et d'être à l'origine de la vie.

L'érosion naturelle est donc présente depuis la nuit des temps. Elle est à l'origine des sédiments sans cesse engloutis et transformés, métamorphosés en d'autres roches au gré de la dynamique qui anime notre planète. C'est ainsi que la croûte continentale s'est formée, métissage de roches différentes mêlées à mille titres au fil du temps géologique. Et si la composition chimique de la croûte continentale est si complexe, elle aura permis à l'Homme depuis quelques millénaires d'en utiliser une partie pour son développement et sa grandeur.

Certes, l'analyse chimique de la croûte continentale montre que sa composition est pour l'essentiel silicatée. L'aluminium, le fer, les alcalins et alcalino-terreux viennent compléter la palette chimique. L'oxygène est ubiquiste, véritable marque de fabrique de notre planète, lié aux autres atomes, il apparaît comme le constituant essentiel de toute matière ordinaire vivante ou inerte, gaz, solides ou liquides. Étant donné sa taille, l'oxygène occupe la grande partie du volume de cette matière. Dans la croûte continentale, tous les autres éléments ne représentent que 1,5 % de la composition des roches, mais, grâce notamment à l'altération biogéochimique et à la pédogenèse, de tels éléments orphelins peuvent se concentrer en amas minéraux sur les premiers ou dizaines de premiers mètres de la surface des terres émergées jusqu'à constituer des gisements miniers exploités par l'homme. Bien des gisements sont de ce type dans la ceinture tropicale, là où les phénomènes d'altération sont particulièrement actifs pour produire d'épaisses altérations ou sols friables au cœur desquels se sont accumulés les éléments utiles. Le revers de la médaille est que leur exploitation en carrières entraîne dans ces formations meubles pour la plupart une destruction de la végétation naturelle engendrant une forte érosion tout à la fois liée à l'exploitation des horizons utiles. Et les paysages naturels originaux s'effacent à tout jamais, ou pour très longtemps, d'autant plus que ceux-ci sont accidentés, collinaires ou montagneux.

Les gîtes métallifères du Brésil, d'Afrique, d'Asie ou de Nouvelle-Calédonie sont à rattacher à ce type de genèse en milieu latéritique humide. Et l'érosion qui découle de leur exploitation par l'homme prend souvent un caractère sérieux, voire catastrophique, pour tout l'environnement. Car une fois l'érosion amorcée par l'action anthropique, c'est une dérégulation de tout l'écosystème local ou régional qui apparaît : les argiles ou les minéraux de taille minuscule (quelques dix milliardièmes de mètre) sont rapidement emportés par le vent ou le ruissellement vers les rivières, les fleuves, les lagunes, les mangroves, les chapelets récifaux qui ourlent le littoral, les océans. Ces argiles ou autres particules infimes sont chargées de métaux ou d'éléments nocifs à la vie de ces écosystèmes, et c'est toute la diversité biologique marine, lacustre et continentale qui est affectée, voire bouleversée, et en rétroaction l'homme lui-même en pâtit en termes de développement économique et de santé.

C'est là que se situe l'ambiguïté du comportement humain. Les plantes, les animaux, la terre, qui ont accompagné le développement de l'Humanité - qu'ils ont nourrie, qu'ils ont soignée -, sont mis en péril. L'homme en se multipliant s'impose partout, exploite les richesses naturelles sans se soucier des fragiles équilibres qui l'entourent, conduisant à une érosion des terres et à une érosion de la diversité du vivant sans équivalent historique. Non seulement l'action anthropique récente a multiplié par 2,4 l'érosion des sols, mais au rythme actuel de la disparition des espèces, ce sont des pans entiers du vivant qui sont voués à l'extinction. Certains scientifiques estiment qu'à la fin du XXI^e siècle, la moitié des plantes et des animaux peuplant océans et continents depuis l'apparition de l'Homme néolithique aura disparu. Et ce problème est bien sûr exacerbé et plus aigu sur les îles, dont la Nouvelle-Calédonie fait partie.

Réalisant qu'il s'est mis lui-même en situation délicate, car étant une partie intégrante des écosystèmes qu'il modifie profondément par une exploitation outrancière de leurs ressources naturelles, l'homme commence à réagir et à agir.

C'est dans ce contexte global que se situent la Nouvelle-Calédonie et l'exploitation de sa plus grande richesse minière, celle du minerai de nickel, indispensable au développement économique du pays et véritable fléau pour le devenir de tout l'écosystème insulaire. Des hommes, des scientifiques, ont décidé de concilier développement économique et durabilité de l'écosystème. Pour cela, comme ailleurs au Brésil, en Australie où d'autres s'y emploient, ils ont dédié leur recherche à la minimisation des impacts de l'exploitation minière de l'île sur le milieu naturel. Des chercheurs de l'IAC, de l'IRD, du Cirad et de l'UNC se sont employés à dresser un constat, celui de mieux connaître les milieux et les espèces, leurs interactions constantes,

PRÉFACE

leurs contraintes, leur fonctionnement naturel... afin de pouvoir envisager une gestion raisonnée de l'écosystème de Nouvelle-Calédonie, voire de restaurer celui-ci, là où les dégâts par l'exploitation du minerai sont majeurs. C'est un enjeu considérable, j'oserai dire vital, que cet engagement scientifique mené d'un bout à l'autre de la connaissance du milieu naturel et des solutions réparatrices aux plaies anthropiques causées par l'exploitation outrancière de ce même milieu. Connaître le substrat géologique et son histoire tectonique de mise en place, son altération biogéochimique en latérites nickélifères, siliceuses et magnésiennes, les implications sur l'évolution et la mise en place de la végétation puis, sur celles, concomitantes, de la faune, les espèces endémiques, la diversité génétique, toutes les interactions sol-plante à tous les niveaux d'organisation depuis le gène jusqu'à l'espèce et la population, leurs carences nutritives, les circuits d'alimentation et d'échanges hydriques, l'historique de l'action de l'homme et celui, plus récent, de l'exploitation du minerai avec ses méthodes, et enfin, après ces diagnostics encore bien incomplets, l'analyse des impacts et des risques, puis les solutions de restauration préconisées.

Cet ensemble consigné dans cet ouvrage va dans le sens du progrès. Celui de la connaissance certes, mais aussi de la prise de conscience par l'homme de son action et des raretés qu'il a générées. Il s'agit là d'une action scientifique et culturelle majeure. Elle permettra non seulement d'être une référence qui pourra régulièrement être mise à jour, mais constitue un soubassement moderne de connaissances devant servir à instaurer de nouveaux emplois de techniciens et d'ingénieurs dont le souci constant devrait être désormais le développement du bien-être de la population en harmonie avec son environnement. Ce sont ces hommes et femmes nouveaux qui seront chargés de concilier le développement de la société néo-calédonienne avec la vie qui l'entoure et dont elle fait partie intégrante. Ce livre est, grâce à la connaissance intégrée qu'il porte, à la base d'une obligation morale : celle de ne pas éliminer dans le Pays une grande part de vie naturelle diversifiée dont aura tant besoin sa descendance demain pour sa propre survie.

Daniel Nahon

Professeur émérite de l'Université Paul-Cézanne et de l'Institut Universitaire de France

CONTRIBUTEURS

Auteurs, éditeurs scientifiques

Laurent L'HUILLIER

Directeur adjoint et chercheur de l'Institut Agronomique néo-Calédonien (IAC).
Doctorat en physiologie végétale (Montpellier) (1994).

Laurent a d'abord travaillé à l'IRD (ex-Orstom) de Nouméa, de 1989 à 1999. Ses recherches ont porté sur la caractérisation des relations sol/plante sur les différents sols de Nouvelle-Calédonie, en particulier sur les sols ferrallitiques sur roches ultramafiques. Il s'est intéressé notamment aux risques de toxicité du nickel de ces sols pour les plantes, à sa mobilité, à sa biodisponibilité et aux mécanismes physiologiques de l'intoxication. Il a ensuite passé cinq années en tant que directeur adjoint de la Chambre d'agriculture où, en prise avec les réalités du terrain, il a accompagné plusieurs filières du développement agricole. Affecté à l'IAC en 2005, il dirige des recherches sur la restauration écologique des sites miniers. Ses travaux portent sur l'écologie et la physiologie des plantes endémiques des substrats ultramafiques de Nouvelle-Calédonie, sur l'étude des substrats et des topsoils en particulier, sur l'écologie des graines et les dormances. L'amélioration des connaissances et leur transfert pour le développement d'activités œuvrant pour la conservation de la flore indigène et la restauration des milieux demeurent ses principales préoccupations.

Tanguy JAFFRÉ

Directeur de recherche émérite de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Rattaché à l'UMR-AMAP. Titulaire d'un doctorat d'État en écologie végétale et de l'Habilitation à Diriger des Recherches.

Au terme d'études universitaires à Rennes, puis à Paris-VI et Paris-XI, Tanguy a été affecté en Nouvelle-Calédonie, où il sera en poste à l'IRD (ex-Orstom) de Nouméa, de 1968 à 1978, puis de 1984 à 2004. De 1980 à 1984, il participe en Côte d'Ivoire à l'évaluation de l'accroissement des stocks d'éléments minéraux et de carbone dans la biomasse végétale au cours de la succession secondaire après cultures sur brûlis. Ses travaux au Laboratoire de botanique et d'écologie appliquée de l'IRD à Nouméa, dont il a assuré la responsabilité, tout comme celle de l'herbier (NOU) de 1986 à 2004, ont porté sur la caractérisation de la flore et des groupements végétaux des terrains miniers et de la forêt sèche, sur lesquels il a acquis une très grande expérience. Il a aussi participé à l'étude des relations sol/plante : adaptation des plantes aux déséquilibres minéraux des sols, résistance à la toxicité du nickel, hyperaccumulation de métaux par certaines espèces, ainsi qu'à l'étude de la dynamique des maquis et des forêts denses humides des terrains miniers. La gestion et la conservation du patrimoine botanique demeurent au centre de ses préoccupations.

Adrien WULFF

Doctorant à l'Université de la Nouvelle-Calédonie (Laboratoire insulaire du vivant et de l'environnement) et à l'Institut Agronomique néo-Calédonien.

D'abord en poste à l'IAC en tant que VCAT de 2007 à 2009 au sein du projet Sysmin, Adrien conduit actuellement des travaux sur les interactions écologiques et les mécanismes évolutifs de la flore sur terrains miniers en Nouvelle-Calédonie avec une spécialisation dans l'étude et la conservation de la flore micro-endémique. Depuis 2006, il œuvre en Nouvelle-Calédonie pour la conservation de la flore indigène, d'abord par la mise en place d'une structure d'étude et de conservation de la flore rare et menacée, de type « Conservatoire botanique », puis par une implication dans la mise en place du programme « Jardin botanique » porté par la province Sud.

Co-auteurs

Michel LEBRUN

Professeur de biologie des plantes, Université Montpellier 2. Directeur du Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes. Depuis quinze ans, ses travaux concernent la caractérisation des mécanismes moléculaires de l'accumulation des métaux, et en particulier le nickel, chez les plantes hyperaccumulatrices. Depuis 2006, il s'intéresse aux déterminants de la tolérance aux métaux chez les champignons ectomycorhiziens associés aux plantes endémiques des maquis de Nouvelle-Calédonie pour la restauration des environnements miniers dégradés.

Laurent MAGGIA

Responsable de l'axe « Diversités biologique et fonctionnelle des écosystèmes terrestres » de l'IAC.

Doctorat en génétique des populations et évolution. Habilitation à Diriger des Recherches. Chercheur du Cirad affecté depuis février 2006 en Nouvelle-Calédonie au sein de l'IAC, Laurent étudie la diversité génétique dans ses composantes descriptives, organisationnelles et dynamiques spatiales et temporelles, pour des espèces forestières tropicales, avec pour objectif de déterminer les limites acceptables des pressions anthropiques pour une gestion durable des ressources.

Nicolas BARRÉ

Nicolas est docteur vétérinaire, docteur ès sciences naturelles. Il a fait toute sa carrière outre-mer comme parasitologue au Cirad puis à l'IAC. Naturaliste, ornithologue et écologue, il a été dix ans président de la Société Calédonienne d'Ornithologie et, ces dernières années, responsable de l'axe « Diversités biologique et fonctionnelle des écosystèmes terrestres » de l'IAC. Il s'est intéressé, notamment, aux relations entre les oiseaux et leur milieu, aux menaces qui pèsent sur cet équilibre et à la sauvegarde des espèces et des milieux.

Jean CHAZEAU

Directeur de recherche de l'IRD. Ingénieur agronome (Grignon).

Jean a commencé sa carrière à Madagascar, puis a été affecté à Nouméa où il a mené des recherches en entomologie appliquée, en particulier sur la taxonomie des Coccinellidés, puis sur la biologie et l'écologie des communautés d'insectes des milieux naturels. Il a été à l'initiative de la base de données de l'IRD « Fatercal » sur la faune terrestre de la Nouvelle-Calédonie.

Hervé JOURDAN

Ingénieur de recherche de l'IRD. Docteur ès sciences en entomologie/écologie des communautés.

Au cours des quinze dernières années, Hervé a d'abord travaillé sur la thématique du succès envahissant au travers du modèle *Wasmannia auropunctata* (fourmi électrique) en Nouvelle-Calédonie et sur l'écologie des communautés de fourmis. Au sein de l'UMR Biologie et Gestion des Populations, ses recherches s'étendent aujourd'hui à l'étude de l'origine et de l'évolution de l'endémisme en Nouvelle-Calédonie, développant une compétence plus généraliste sur la biodiversité des arthropodes terrestres de Nouvelle-Calédonie. Il assure aussi le maintien de la base de données « Fatercal ».

Hamid AMIR

Professeur des Universités en microbiologie, Université de la Nouvelle-Calédonie, directeur du Live. Doctorat d'État en écologie microbienne. Habilitation à Diriger des Recherches.

Hamid conduit des recherches en écologie microbienne des sols, sur les interactions bactéries/métaux et les champignons mycorhiziens à arbuscules, essentiellement sur les milieux miniers.

Marc DUCOUSSO

Chercheur du Cirad. Doctorat en microbiologie et écologie microbienne. Habilitation à Diriger des Recherches. Marc est microbiologiste et mycologue spécialiste des endo et des ectomycorhizes tropicales. Ses travaux en Nouvelle-Calédonie portent sur les symbioses ectomycorhiziennes en forêts et maquis sur substrats ultramafiques et sur roches acides.

Bruno FOGLIANI

Maître de conférences en bio-écologie végétale à l'UNC depuis 2004. Doctorat en phytochimie et écophysiologie. Habilité à Diriger des Recherches. Bruno développe des travaux de recherche sur les semences de Nouvelle-Calédonie dans le cadre de la restauration écologique (forêts sèches, maquis miniers...), sur l'optimisation de la germination, la conservation des graines, et sur les mécanismes d'adaptation des végétaux aux milieux secs et aux substrats ultramafiques.

Gildas GÂTEBLÉ

Ingénieur de recherche à l'IAC. Ingénieur horticole (Angers).

En poste au Cirad-Mandat entre 1998 et 2000, puis à l'IAC depuis 2003, Gildas conduit des travaux sur les plantes ornementales, les fleurs et feuillages coupés (tropicaux, tempérés, méditerranéens et indigènes) avec un intérêt particulier pour la valorisation des plantes endémiques de Nouvelle-Calédonie pour l'horticulture ornementale et les aménagements paysagers.

Charly ZONGO

Doctorant en biologie végétale appliquée, à l'Université de la Nouvelle-Calédonie (au Live).

Charly travaille sur les semences d'espèces endémiques de la Nouvelle-Calédonie avec un intérêt particulier pour les phénomènes adaptatifs développés par ces dernières face aux contraintes ultramafiques, ainsi que pour la biologie des semences et leur usage en restauration écologique.

Casimir VÉA

Ouvrier pépiniériste à l'IAC depuis 2002, Casimir s'occupe des protocoles de germination et de levée de dormance des graines d'espèces de maquis minier, et de la culture des jeunes plants en pépinière. Il participe également à la recherche et à l'identification sur le terrain des espèces utilisées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs remerciements à toutes celles et à tous ceux qui ont permis la réalisation de cet ouvrage. En tout premier lieu à l'Union européenne, qui a financé à travers les fonds Sysmin un projet de recherche confié à l'IAC sur la restauration des sites miniers, ainsi qu'une part importante de l'édition de cet ouvrage.

Nous tenons également à remercier tous ceux qui ont initié, accompagné et soutenu ce projet : Thierry Mennesson, directeur général de l'IAC, Fabrice Colin, directeur de l'IRD, Yves Horola, de la délégation régionalisée de la Commission européenne pour le Pacifique, les responsables de la Dimenc et tout particulièrement Rémy Desbordes, notre attentif interlocuteur.

Un grand merci également à Jean-Michel Sarrailh, chercheur du Cirad en poste à l'IAC à cette époque, qui s'est fortement impliqué dans l'élaboration du projet.

Nous remercions l'ensemble des personnels du Laboratoire de botanique et d'écologie appliquée de l'IRD (UMR-Amap), et plus particulièrement son responsable, Jérôme Munzinger, ainsi que Gilles Dagostini, pour leurs informations taxonomiques et de terrain, de même que Frédéric Rigault pour les nombreuses discussions et visites sur sites miniers. L'herbier (NOU) et ses personnels : Jacqueline Tinel, Williams Nigote, Michèle Komornicki, ainsi que les nombreux récolteurs et botanistes « crapahuteurs » sur terrains miniers, dont Maurice Schmid, Philippe Morat, Jean-Marie Veillon, Joseph Favier, Bernard Suprin, Gordon McPherson, Pete Lowry, Céline Grignon, Laure Barrabé, Yohan Pillon, Romain Barrière, Vanessa Hequet, Mickael Le Corre.

Nos remerciements s'adressent également aux personnels de l'IAC, impliqués dans les programmes de restauration des terrains miniers, notamment Jacques Tassin, Anthony Pain, Alexandre Bouarat, René Guiglion, Jean-Paul Lataï, Xavier Arcas pour leurs informations et acquisitions de données sur le terrain, ainsi que Richard Gallois, pour les relectures, Virginie Lemay, Jacqueline Ounémoa, Armelle Tardivel et Hélène Udo pour les illustrations, travaux passés et en cours sur la multiplication végétative.

Des échanges enrichissants ont été noués avec de nombreux pépiniéristes, opérateurs de la revégétalisation, sociétés minières, conseillers des collectivités, scientifiques, notamment : Stéphane McCoy, Thomas Leborgne, Olivier Ruiz, Jean-Louis Ruiz, Julia Ravillon, Stéphanie Cornaille, Minem et Henri Séchet, Émelyne Tuaiva, Bernard Pelletier, Sophie Luçon, Nathalie Ayrault, Marc-Henri Delrieu, Fabien Roumagnac, Alain Morisset, Etienne Waneissi, Denis Fayard, Pascal Pagand, Ross Sadlier. Qu'ils en soient ici remerciés.

Merci aussi à tous ceux qui, en plus des auteurs et coauteurs, ont aimablement mis à notre disposition quelques-unes de leurs plus belles photographies et illustrations : Stéphane McCoy (Vale Inco), Frédéric Bart et Bernard Pelletier (SLN,) Danielle Saintpierre et Alexandre Lagrange (Siras), Frédéric Desmoulins (ECCET), Pierre Bachy (SCO), Ross Sadlier (Australian Museum), Jérôme Munzinger, Frédéric Rigault, Céline Grignon, Laure Barrabé, Yohan Pillon (IRD), Anthony Pain (IAC), ainsi que Thierry Salesne.

Nos remerciements s'adressent également à l'agence Tabu, et plus particulièrement à Delphine Bize et à Jean-Brice Peirano pour leur minutieux travail de mise en page, ainsi qu'à Claudine Bousquet pour ses relectures attentives.

Nous exprimons notre affectueuse reconnaissance à nos épouses et compagne, Martine, Jeannette et Sandrine, pour leur patience ainsi que pour leurs avis et relectures.

Les auteurs tiennent enfin à rendre hommage au regretté Jean-Pierre Pierard, chargé d'affaires à la Délégation régionalisée de la Commission européenne pour le Pacifique, tragiquement disparu, qui a toujours vigoureusement soutenu le projet et permis son financement par des fonds européens.

SOMMAIRE

INTRODUCTION 17

CHAPITRE 1

**L'EXPLOITATION DES MINÉRAIS DE NICKEL
EN NOUVELLE-CALÉDONIE** (L'Huillier L. et Jaffré T.) 21

1. **IMPORTANCE DE L'EXPLOITATION MINIÈRE ET DE
LA MÉTALLURGIE DU NICKEL EN NOUVELLE-CALÉDONIE.** . . . 22

2. **HISTORIQUE DE L'ACTIVITÉ MINIÈRE ET MÉTALLURGIQUE** . . . 24

3. **LES MÉTHODES D'EXPLOITATION DU MINÉRAI DE NICKEL** . . . 26

4. **IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT** 28

5. **LA RÉGLEMENTATION** 30

5.1 Code minier 30

5.2 Délibération n° 104 et Fonds Nickel 30

5.3 Code de l'environnement de la province Nord 31

5.4 Code de l'environnement de la province Sud 31

CHAPITRE 2

CONDITIONS DE MILIEU DES TERRAINS MINIERS
(Jaffré T. et L'Huillier L.) 33

1. **NATURE ET ORIGINE DU SUBSTRAT GÉOLOGIQUE** 34

2. **GENÈSE ET CARACTÉRISTIQUES DES SOLS
ET DES MINÉRAIS DE NICKEL** 36

2.1. Les « terres rouges » ou « latérites » 36

2.2. Les sols bruns hypermagnésiens 39

2.3. Les minerais de nickel 40

3. **CONDITIONS DE NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES** 40

3.1. Les carences en éléments nutritifs 40

3.2. Teneurs excessives en magnésium 40

3.3. Risques de toxicité en certains métaux 41

4. **CONDITIONS D'ALIMENTATION HYDRIQUE DES PLANTES** . . . 42

4.1 Conditions hydriques liées au climat 42

4.2 Conditions hydriques liées à la nature du sol 44

CHAPITRE 3

LA VÉGÉTATION DES ROCHES ULTRAMAFIQUES OU TERRAINS MINIERES (Jaffré T. et L'Huillier L.) 45

1. LA FLORE	46
1.1. Caractéristiques, richesse et endémicité de la flore des terrains miniers	47
1.2. Origine de la flore	54
2. LES FORMATIONS VÉGÉTALES	55
2.1. Les forêts denses humides	56
2.2. Les maquis miniers	65
3. ADAPTATION DES PLANTES AUX CONDITIONS DE NUTRITION MINÉRALE.	81
3.1. L'adaptation des espèces aux carences du sol en phosphore, en potassium et en azote	84
3.2. L'adaptation aux faibles teneurs du sol en calcium.	85
3.3. L'adaptation des plantes aux teneurs excessives du sol en magnésium	85
3.4. L'adaptation des plantes aux teneurs élevées du sol en éléments potentiellement toxiques Ni, Mn, Cr et Co	86
4. ADAPTATION DES PLANTES DU MAQUIS À LA SÈCHERESSE . .	91
5. RÔLE DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE	92
6. DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION	93
7. CONCLUSION	97

CHAPITRE 4

LA FAUNE DES MILIEUX SUR ROCHES ULTRAMAFIQUES (Barré N., Chazeau J., Jourdan H.) . . . 105

1. RÔLE DES OISEAUX DANS LA DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION DU MAQUIS	106
1.1. Les oiseaux qui fréquentent le maquis.	106
1.2. La quête du nectar et la pollinisation	108
1.3. La consommation des fruits et la dissémination des semences . . .	112
1.4. La capture et le contrôle des insectes phytophages	114
1.5. Rôle des oiseaux en maquis minier : conclusion.	114
2. L'HERPÉTOFAUNE DES TERRAINS MINIERES	115
2.1. Isolement et radiation endémique des reptiles	115
2.2. Les ressources exploitées par les reptiles des terrains miniers . . .	116
2.3. Préservation des milieux et conservation des reptiles.	117

SOMMAIRE

3. LES ARTHROPODES DES MASSIFS MINIERES . . . . .	.118
3.1. L'intérêt faunistique des milieux sur terrains miniers	118
3.2. La guildes des fourmis sur les terrains miniers	121
3.3. Caractères des peuplements d'arthropodes des terrains miniers . . .	125
3.4. La frontière des milieux sur roches ultramafiques	126
3.5. Milieux ultramafiques et invasions biologiques	127
4. POUR CONCLURE SUR LA FAUNE DES TERRAINS MINIERES . . .	.128

CHAPITRE 5

LES BACTÉRIES ET LES CHAMPIGNONS DU SOL SUR ROCHES ULTRAMAFIQUES (Amir H. et Ducouso M.)129
--	-------------

1. INTRODUCTION . . . . .	.130
1.1 Les mycorhizes	131
1.2 Les bactéries	132
2. LES MYCORHIZES À ARBUSCULES (MA) . . . . .	.133
2.1 Rôles des mycorhizes à arbuscules dans le développement des plantes	134
2.2 Les mycorhizes à arbuscules dans les écosystèmes miniers de Nouvelle-Calédonie	134
3. LES ECTOMYCORHIZES . . . . .	.135
3.1 Rôles des ectomycorhizes dans le développement des plantes	136
3.2 Les ectomycorhizes des maquis miniers de Nouvelle-Calédonie	137
4. ASPECTS TECHNIQUES ET PRATIQUES DE LA MYCORHIZATION CONTRÔLÉE, APPLIQUÉE À LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DES TERRAINS MINIERES . . . . .	.138
5. LES SYMBIOSES FIXATRICES D'AZOTE. . . . .	.140
5.1 Les symbioses à <i>Frankia</i>	140
5.2 Les symbioses à <i>Rhizobium</i>	141
6. LES BACTÉRIES RHIZOSPHERIQUES STIMULATRICES DE LA CROISSANCE DES PLANTES . . . . .	.142
7. INOCULATION CONTRÔLÉE AVEC DES BACTÉRIES SYMBIOTIQUES OU RHIZOSPHERIQUES, APPLIQUÉE À LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DES TERRAINS MINIERES . . . . .	.142
8. PERSPECTIVES . . . . .	.144

CHAPITRE 6

LA RESTAURATION DES SITES MINIERES

(L'Huillier L., Wulff A., Gâteblé G., Fogliani B., Zongo C., Jaffré T.) **147**

1. INTRODUCTION	148
2. HISTORIQUE DE LA REVÉGÉTALISATION	148
3. PRINCIPES DE LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE	150
4. MÉTHODES APPROPRIÉES POUR LA REVÉGÉTALISATION	153
4.1. Le choix des espèces	154
4.2. La multiplication à partir de graines	162
4.3. La multiplication asexuée	196
4.4. Préparation des substrats à revégétaliser	206
4.5. Mise en œuvre et choix des techniques de revégétalisation	213
4.6. Suivi, évaluation et indicateurs	228

CHAPITRE 7

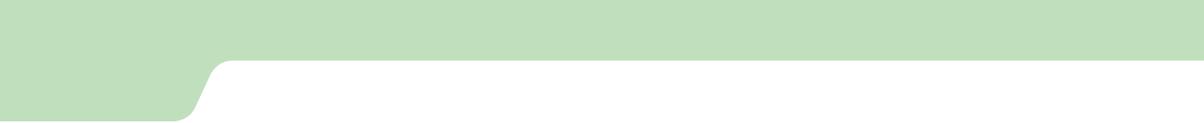
ESPÈCES INDIGÈNES UTILISABLES EN REVÉGÉTALISATION

(Wulff A., L'Huillier L., Véra C., Jaffré T.) **231**

1. INTRODUCTION	232
2. FICHES PAR ESPÈCE, CLASSÉES PAR FAMILLE	233
Araucariaceae	235
Casuarinaceae	241
Celastraceae	245
Cunoniaceae	249
Cyperaceae	257
Dilleniaceae	269
Fabaceae (ou Leguminosae)	273
Goodeniaceae	281
Joinvilleaceae	285
Malpighiaceae	289
Myodocarpaceae	293
Myrtaceae	297
Picrodendraceae	315
Proteaceae	321
Rhamnaceae	329
Sapindaceae	333
3. QUELQUES AUTRES FAMILLES, GENRES ET ESPÈCES POTENTIELLEMENT UTILES POUR LA REVÉGÉTALISATION	337

SOMMAIRE

ANNEXES	345
ANNEXE 1 - RÉGLEMENTATION	346
ANNEXE 2 - CHARTE DES BONNES PRATIQUES MINIÈRES	358
ANNEXE 3 - LISTE DES ESSAIS DE REVÉGÉTALISATION SUR SITES MINIERES (PAR LES ORGANISMES DE RECHERCHE) (1971-2010)	362
ANNEXE 4 - BILAN DES TRAVAUX DE REVÉGÉTALISATION PAR LES COLLECTIVITÉS ET LES MINEURS	366
ANNEXE 5 - CAHIER DES CHARGES DE PRODUCTION DE PLANTS	371
ANNEXE 6 - CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES (CCTP)	376
ANNEXE 7 - IMPACTS DU CERF SUR LE MAQUIS	385
ANNEXE 8 - LISTE DES ESPÈCES UTILISABLES EN REVÉGÉTALISATION DES SITES MINIERES	386
ANNEXE 9 - SCHÉMA RÉCAPITULATIF DES OPÉRATIONS À ENTREPRENDRE POUR UN LOT DE GRAINES D'UNE NOUVELLE ESPÈCE	390
BIBLIOGRAPHIE	391
GLOSSAIRE	404
LISTE DES SIGLES	409
INDEX	410



INTRODUCTION

L'accroissement des activités humaines s'accompagne de la dégradation des sols et de la couverture végétale, entraînant à l'échelon mondial des phénomènes d'érosion, la perturbation des régimes hydriques, la perte de fertilité des terres et la disparition de fractions importantes de la biodiversité. Face à cette situation, il est unanimement reconnu que des mesures urgentes de conservation des milieux naturels s'imposent. Mais bien souvent ces seules mesures ne suffisent pas pour maintenir les biens et les services offerts par les écosystèmes. Aussi la restauration de ces derniers est-elle devenue un complément essentiel afin de les réintégrer dans le paysage et de les réhabiliter dans leurs fonctions de régulation des facteurs environnementaux et de conservation de la biodiversité.

La Nouvelle-Calédonie, qui connaît un développement industriel sans précédent, n'échappe pas à ces problèmes et est en quête de solutions conciliant activité minière et industrielle et développement durable. Le présent ouvrage qui vise à faire émerger les solutions de restauration les mieux adaptées au contexte local s'inscrit aussi dans cette démarche. Il regroupe et analyse les connaissances dispersées dans de nombreux rapports, publications, recueils, ou inédites, traitant des milieux sur substrats ultramafiques (« terrains miniers ») en Nouvelle-Calédonie, ainsi que de leur restauration, et plus précisément de leur revégétalisation. Il prend aussi en compte les données plus générales sur les substrats issus de roches ultramafiques et sur la restauration de sites miniers divers à travers le monde.

En Nouvelle-Calédonie, les objectifs et les contraintes de la gestion des terrains miniers se posent en termes souvent différents de ceux qui prévalent dans d'autres régions minières, en raison notamment de sa biodiversité singulière et de l'étendue des zones minéralisées par rapport à la superficie du pays. Ainsi, la Nouvelle-Calédonie est confrontée au challenge paradoxal de devoir gérer à la fois une ressource minière considérable, exploitée à ciel ouvert, et une biodiversité terrestre reconnue comme une des plus originales et des plus précieuses de la planète.

L'ouvrage se décompose en sept chapitres. Les différents aspects de l'exploitation des minerais, et de l'activité métallurgique, sont abordés dans le premier. Facteur primordial du développement et de l'économie du pays, l'activité minière s'accompagne de la destruction de milieux naturels avec des conséquences néfastes sur l'intégrité spécifique, génétique et fonctionnelle de la biodiversité des milieux terrestres. Les améliorations progressives des techniques d'exploitation, ainsi que les mesures mises en œuvre pendant et après l'exploitation, pour atténuer ou enrayer les effets indésirables sur l'environnement, sont développées. Ce chapitre présente aussi la réglementation encadrant à ce jour cette activité.

Les conditions de milieux, tout à fait particulières sur substrats ultramafiques, font l'objet du deuxième chapitre. Résultant en grande partie des caractéristiques de la roche mère, elles sont globalement semblables à celles décrites pour les affleurements de roches ultramafiques dispersés sur 1 % de la superficie des terres émergées de la planète, mais représentent près du tiers de la superficie de la Nouvelle-Calédonie. Ces conditions sont marquées dans tous les cas par la carence des sols en éléments nutritifs pour les plantes et par des teneurs parfois élevées en métaux potentiellement phytotoxiques. En Nouvelle-Calédonie, les sols sont extrêmement variés, allant de sols ferrallitiques ferritiques, pouvant être très acides en altitude dans des zones recevant plus de 4 m de pluie par an, à des sols basiques hypermagnésiens à basse altitude dans les zones les plus arides de la côte ouest de la Grande Terre.

La flore et les différents groupements végétaux des substrats sur roches ultramafiques, tout à fait à part au sein de l'ensemble végétal de la Nouvelle-Calédonie, sont caractérisés dans le chapitre 3. Les maquis sont les mieux connus. Ils sont variés et diffèrent selon la composition chimique, la texture et la profondeur du sol, les conditions climatiques et altitudinales. Ils rassemblent plus d'un millier d'espèces de plantes vasculaires avec un taux d'endémisme de 90 %. Bien qu'occupant une surface quatre fois plus faible, les forêts sont plus riches en espèces que les maquis. En forte régression et très fragmentées, ces forêts font partie des écosystèmes les plus menacés du pays. La réduction des populations d'espèces forestières s'accompagne de phénomènes d'érosion génétique. Aussi le problème de leur conservation devient-il crucial, au même titre d'ailleurs que celui de certains maquis occupant des aires limitées. La spécialisation des espèces, parfaitement adaptées aux conditions de nutrition minérales et hydriques sur terrains miniers, est également présentée. Un développement est consacré aux espèces hyperaccumulatrices de nickel, ainsi qu'aux phénomènes génétiques au sein des populations d'espèces. Le rôle de la couverture végétale dans la lutte contre l'érosion ainsi que son évolution après perturbation sont successivement traités.

La faune des terrains miniers, moins bien connue que la flore, est décrite dans le chapitre 4. Les oiseaux, les reptiles et les fourmis sont à ce jour les mieux documentés ; des données importantes bien que fragmentaires existent sur plusieurs groupes d'arthropodes, montrant une adaptation aux substrats ultramafiques de certains d'entre eux et une totale indifférence pour d'autres. L'endémisme global est du même ordre que celui de la flore, et l'endémisme localisé à un seul massif apparaît très important chez certains groupes, dont celui des reptiles. La diversité de la faune, comme celle de la flore, est nettement plus accentuée en forêt que dans les maquis. La description des relations entre la faune et la flore montre que ces deux composantes de la biodiversité ne peuvent être dissociées et que leurs interactions interviennent dans le fonctionnement des écosystèmes des terrains miniers.

INTRODUCTION

Le chapitre 5 présente les mécanismes et le rôle des symbioses dans la nutrition des plantes des terrains miniers. Les connaissances dans ce domaine relatives aux endo et aux ectomycorhizes pour la nutrition des plantes en phosphore, aux actinomycètes du genre *Frankia* et aux bactéries du groupe des *Rhizobium* pour la nutrition azotée des plantes des terrains miniers sont exposées. Les résultats obtenus localement permettent de proposer aujourd'hui des solutions pour améliorer les méthodes de revégétalisation à l'aide d'espèces endémiques.

Les chapitres 6 et 7 traitent de la restauration des sites dégradés. Les concepts de la restauration écologique sont tout d'abord présentés, ainsi que les principes de la réhabilitation, de la revégétalisation ou encore du reboisement, permettant de clarifier le sens de ces différents termes. La restauration écologique est clairement affichée comme la pratique la plus pertinente pour la reconstitution des fonctions et des qualités des écosystèmes. La méthode, qui s'inspire du processus de la succession végétale, est basée sur l'implantation et l'accélération du développement d'une végétation pionnière, capable d'évoluer progressivement, par apports successifs de diaspores d'espèces provenant des formations végétales environnantes, vers des groupements végétaux de plus en plus complexes et biologiquement diversifiés.

Le chapitre 6 traite aussi des aspects pratiques de la restauration. Il présente les différentes méthodes utilisables et détaille largement celles appropriées à chaque cas, en fonction des caractéristiques topographiques, physico-chimiques et climatiques du site. Les points développés portent notamment sur le choix des espèces en fonction de leurs caractéristiques biologiques et physiologiques, sur les méthodes qui permettent de les multiplier, sur les modes de préparation des substrats, sur les différentes techniques de revégétalisation pouvant être mises en œuvre, et sur les règles de suivi et d'évaluation d'une opération de restauration.

Pour finir, les espèces utiles pour la revégétalisation des terrains miniers font l'objet de fiches très détaillées au sein du chapitre 7. La somme des connaissances, réactualisées, sur environ 70 espèces locales permet de les reconnaître aisément, de les collecter et de les multiplier. À ces espèces s'ajoutent une trentaine d'autres, qui, bien que moins documentées, sont toutefois potentiellement utilisables.

Les enseignements tirés de l'ensemble des données présentées et analysées permettront de structurer les futures opérations de restauration et les recherches associées, et de les orienter vers des voies plus convergentes. Ces opérations devraient être en parfaite adéquation avec les exigences qu'implique un développement harmonieux et durable de la Nouvelle-Calédonie, à savoir une activité minière aux effets maîtrisés, qui n'hypothèque pas ses possibilités de développement à long terme, lorsque les ressources « du vivant » devront pallier l'épuisement de la ressource minière.

L'EXPLOITATION DES MINERAIS DE NICKEL EN NOUVELLE-CALÉDONIE

Laurent L'HUILLIER et Tanguy JAFFRÉ

1. IMPORTANCE DE L'EXPLOITATION MINIÈRE ET DE LA MÉTALLURGIE DU NICKEL EN NOUVELLE-CALÉDONIE

2. HISTORIQUE DE L'ACTIVITÉ MINIÈRE ET MÉTALLURGIQUE

3. LES MÉTHODES D'EXPLOITATION DU MINÉRAI DE NICKEL

4. IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

5. LA RÉGLEMENTATION

5.1 Code minier

5.2 Délibération n° 104 et Fonds Nickel

5.3 Code de l'environnement de la province Nord

5.4 Code de l'environnement de la province Sud

1. IMPORTANCE DE L'EXPLOITATION MINIÈRE ET DE LA MÉTALLURGIE DU NICKEL EN NOUVELLE-CALÉDONIE

L'activité minière et industrielle du nickel occupe une place très importante dans l'économie de la Nouvelle-Calédonie : son poids dans le PIB représente près de 10 % en moyenne sur la période 1998-2008 et il pourrait atteindre 30 à 40 % avec la mise en œuvre des nouveaux projets métallurgiques. La contribution du nickel au PIB est cependant très variable, du fait de sa forte dépendance aux cours du London Metal Exchange (figure 1.1). Les exportations des produits de l'activité minière (minerais et produits de fusion) représentent, en valeur, plus de 95 % des exportations totales, soulignant à nouveau l'importance de ce secteur dans l'économie locale.

Située actuellement entre le 3^e et le 5^e rang mondial des producteurs de nickel, avec une part avoisinant les 10 % (les exportations néo-calédoniennes de nickel – minerais, mattes de nickel et ferronickel – sont globalement stables autour de 110 000 tonnes de nickel contenu par an), la Nouvelle-Calédonie possède vraisemblablement entre 20 et 30 % des ressources mondiales de ce métal (associé à du cobalt exploitable dans les minerais latéritiques), représentant entre 100 et 200 années d'exploitation.

Elle est aujourd'hui dans une phase de développement minier sans précédent, devant aboutir à une extraction annuelle d'environ 16 MTH (Millions de Tonnes de minerai Humide) et à une production métallurgique multipliée par trois, passant de 60 000 à environ 200 000 tonnes de nickel à l'horizon 2013-2015. Cette production repose sur une augmentation de la capacité de traitement de l'usine pyrométallurgique de la SLN à l'horizon 2015 (programme « 75 000 tonnes », révisé autour de 65 000 t/an), la construction d'une usine hydrométallurgique pour le traitement de minerais latéritiques par Vale Inco Nouvelle-Calédonie (ex-Goro Nickel) dans le massif du Sud pour une mise en route en 2010 (60 000 t de Ni + 5 000 t de Co par an), la construction d'une seconde usine pyrométallurgique par KNS (SMSP-Xstrata) en province Nord (production à partir de 2012, avec un objectif de 60 000 t de Ni par an), l'exportation de minerais pour l'approvisionnement de l'usine métallurgique de Gwangyang (SMSP-POSCO) en Corée du Sud, depuis 2008, et des exportations intermittentes notamment vers le Japon, Taïwan, l'Australie et la Chine (la figure 1.2 présente la répartition des sites miniers en activité en 2010).

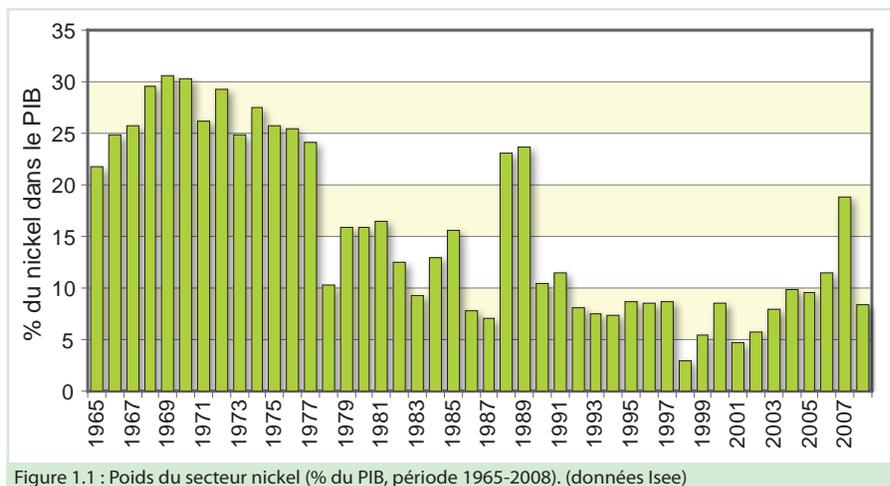


Figure 1.1 : Poids du secteur nickel (% du PIB, période 1965-2008). (données Isee)

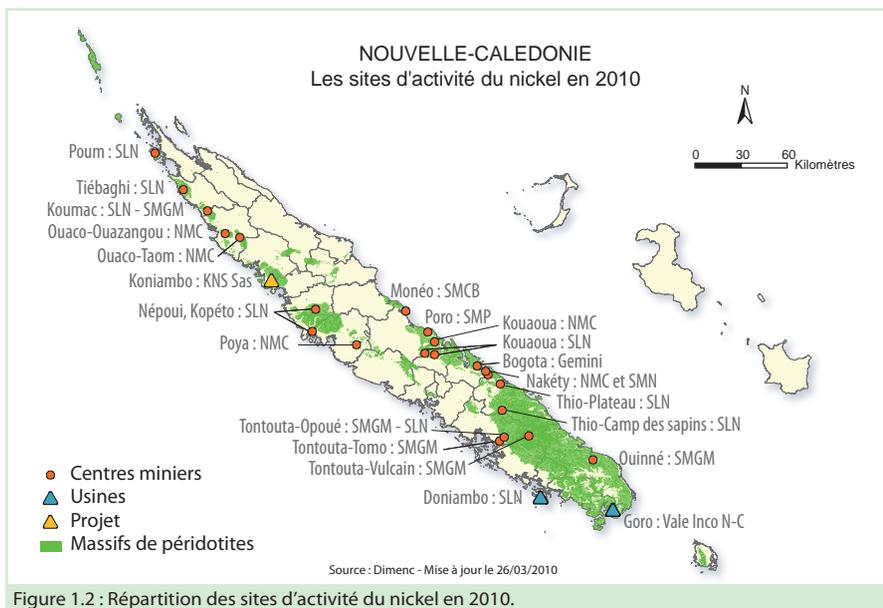


Figure 1.2 : Répartition des sites d'activité du nickel en 2010.

Le marché du nickel a montré à plusieurs reprises, et encore récemment, qu'il pouvait traverser des périodes très instables, avec des cours pouvant varier fortement (de 3 à plus de 18 US\$/Lb entre 2002 et 2007). Néanmoins, la tendance de la demande mondiale de nickel suit une augmentation soutenue, la croissance de sa consommation s'établissant autour de 4 % en moyenne par an sur la période des cinquante dernières années. Cette demande est tirée principalement par la production mondiale d'aciers inoxydables, qui est la principale destination du nickel (représentant 60 % de la production).

En termes d'emploi, l'industrie minière et métallurgique néo-calédonienne occupait en 2008 environ 3 500 salariés, soit près de 6 % de la population active. Avec les deux projets métallurgiques, Vale Inco et KNS, environ 2 000 emplois directs supplémentaires et 2 500 emplois indirects devraient être créés durant leur phase d'exploitation, ce qui générera au moins un doublement du nombre de salariés dans ce secteur.

Les recettes perçues au budget de la Nouvelle-Calédonie au titre de l'activité des sociétés minières et métallurgiques varient, selon les années, environ entre 1 (parfois 0) et 20 milliards de F CFP par an et peuvent ainsi représenter une part importante de son budget (jusqu'à 15 %). En outre, cette part augmentera avec la mise en place des nouveaux projets une fois soumis au régime de l'impôt sur les sociétés.

Au-delà des chiffres, le nickel en Nouvelle-Calédonie occupe une place hautement symbolique : moteur essentiel du tissu industriel, produisant d'importants effets primaires et induits sur l'économie, il a une influence déterminante sur la démographie, l'aménagement du territoire, les modes de vie et les comportements. À ce titre, l'implication des communautés prend une part de plus en plus importante dans la mise en place des projets miniers, générant souvent des conflits en raison des enjeux considérables qu'ils représentent et des changements qu'ils entraînent dans la société et sur l'environnement.

Le nickel constitue ainsi un enjeu majeur au cœur des questions de rééquilibrage économique et social entre les provinces. L'usine de la province Nord, fortement et longtemps attendue par la population, devrait y contribuer. Mais ce besoin existe également au sein des communes à l'écart des principaux pôles d'activités, pour lesquelles l'exploitation de gisements secondaires, par de petites ou moyennes entreprises d'extraction (les « petits mineurs »), constitue une opportunité de développement local et de maintien des populations, l'activité minière permettant de créer des emplois directs ainsi que des emplois indirects dans les domaines des transports, du commerce, de l'agriculture et des services.

2. HISTORIQUE DE L'ACTIVITÉ MINIÈRE ET MÉTALLURGIQUE

L'activité minière est indissociable de l'histoire de la Nouvelle-Calédonie. Les découvertes minérales se sont succédé (charbon, or, cuivre, cobalt, chrome, antimoine...) mais la richesse minière du pays repose en tout premier lieu sur l'extraction et le traitement des minerais de nickel. La production épisodique de minerais de chrome (chromite) et de cobalt (asbolane) est actuellement arrêtée, toutefois l'extraction du cobalt, lors du traitement hydrométallurgique des latérites nickélifères, devrait faire progresser la contribution de la Nouvelle-Calédonie à la production mondiale de ce métal.

L'histoire du nickel en Nouvelle-Calédonie commence en 1864, lorsque Jules Garnier, ingénieur des Mines, découvre à Dumbéa une roche alors inconnue de couleur verte. Identifiée comme constituée de silicate de nickel et de magnésium, elle sera baptisée plus tard « garniérite » (figure 2.12). En raison de ses teneurs élevées en nickel (jusqu'à 15 %), ce minerai particulier rencontré au niveau de la saprolite a été l'objet des toutes premières exploitations mais s'est rapidement raréfié. L'exploitation de nickel porte aujourd'hui sur des saprolites (appelées encore parfois « garniérites » par abus de langage) et des latérites titrant respectivement moins de 2,5 % et environ 1,5 % de nickel.



Figure 1.3A : Ancienne mine à Thio (mine Zizette), exploitée manuellement.

© IAC / L. Huillier



Figure 1.3B : Ancienne mine sur Koniambo (noter au-dessus de la carrière les traces de puits de prospection creusés à mains d'homme).

© IRD / T. Jaffré



Figure 1.3C : Mine de Méa (Kouaoua).

© IRD / T. Jaffré

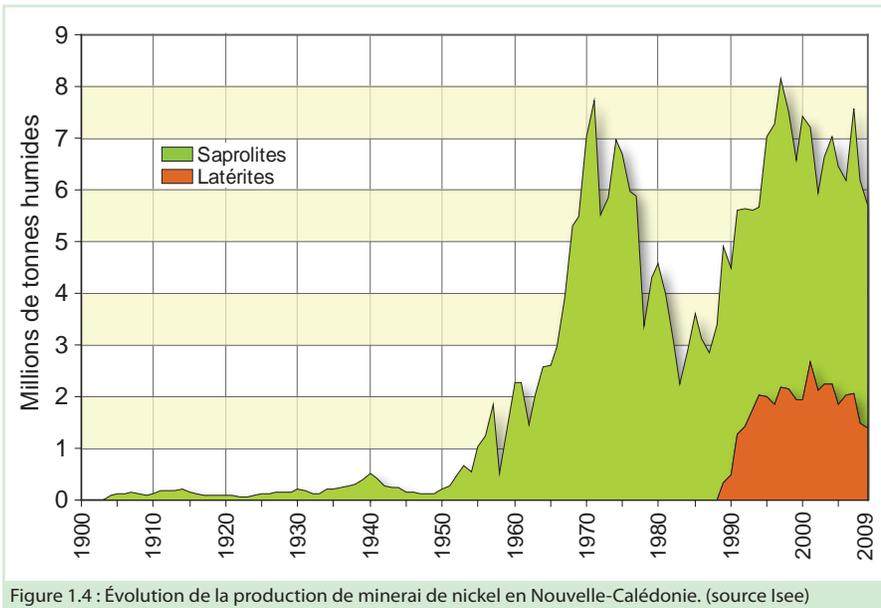
L'exploitation du minerai de nickel a débuté en 1873 par une première extraction au mont Dore (par M. Coste) (principalement de garniérite), et s'est étendue aux régions de Thio, Canala et Houailou. Elle a pris son véritable essor avec la création de la Société Le Nickel (SLN) en 1880. Depuis lors, l'activité minière, comprenant l'extraction du minerai et son traitement pour partie sur place, par des usines créées successivement à la Pointe Chaleix (Nouméa) en 1877, puis à Thio et enfin à Doniambo (Nouméa), n'a cessé globalement de s'accroître, en dépit de soubresauts liés aux variations de la demande internationale en nickel.

Les premières exploitations se faisaient par galeries souterraines le long de filons garniéritiques dont les teneurs en nickel étaient de l'ordre de 15 %. Les teneurs moyennes ont toutefois progressivement diminué pour atteindre environ 5 % en 1920. Les années qui ont suivi ont vu les exploitations à ciel ouvert se généraliser (cf. figures 1.3 A, B et C). À partir de la Seconde Guerre mondiale, la mécanisation s'est largement répandue et a permis d'augmenter progressivement les volumes extraits. De 1950 à 1957, la production minière annuelle (pour l'ensemble des mines de Nouvelle-Calédonie) est passée de 200 000 tonnes de minerai saprolitique à près de 2 millions de tonnes. En 1971, la production annuelle atteint un sommet avec 7,7 MTH (période du « boom » du nickel).

À partir de la fin des années 1980, les latérites prennent une part dans la production, pour atteindre un volume de 2 millions de tonnes par an, sur un total annuel qui varie depuis plusieurs années autour de 7 MTH de minerai (période 1995-2008 ; cf. figure 1.4).

Jusqu'à fin 2007, il a été produit au total 258 millions de tonnes humides de minerai de nickel (224 MTH sous forme silicatée, 34 MTH sous forme latéritique), correspondant à une quantité de métal contenu estimée à environ 5 millions de tonnes.

Avec l'arrivée des procédés hydrométallurgiques, moins coûteux en énergie, les gisements de nickel de moindre teneur pourront être exploités, offrant de nouvelles perspectives aux entreprises minières.



Le minerai de chrome, principalement sous forme de chromite massive primaire (amas rocheux à l'intérieur des massifs de péridotites), a été exploité de 1880 à 1962, puis de nouveau de 1982 à 1990, par différentes sociétés, dans le massif de la Tiébaghi, à l'origine d'environ 70 % de la production totale. De 1975 à 1981 et de 1990 à 1992, plusieurs petites exploitations ont été rouvertes dans les massifs du Sud, pour ensuite s'arrêter en raison d'un manque de rentabilité. La production totale est estimée à environ 3,76 millions de tonnes de minerai à 52 % de Cr_2O_3 .

Le cobalt, associé au nickel dans les latérites, dans des dépôts d'asbolane titrant de 4 à 5 % de Co, fut exploité dès l'année 1876, jusqu'au début du siècle suivant, à partir de galeries étroites ouvertes dans les latérites (« trous de cobaleurs »). La Nouvelle-Calédonie fut pratiquement le seul producteur de cobalt du monde avant les découvertes des gisements de cobalt du Canada et du Katanga. Le cobalt des minerais néo-calédoniens est aujourd'hui récupéré, comme sous-produit du nickel, principalement dans les latérites traitées par hydrométallurgie (par Queensland Nickel, en Australie, à partir de minerais exportés et, localement, par Vale Inco). La production totale de cobalt demeure mal connue. De 1876 à 1925, environ 103 000 tonnes de minerai à 5 % auraient été produites et, de 1983 à 2001, le cobalt contenu dans les minerais traités par Queensland Nickel en Australie aurait été de 29 600 tonnes.

Plus de 3 580 titres d'exploitation ont été institués en Nouvelle-Calédonie, dont environ 1 700 étaient encore valides en 2008. Sur ces titres, près de 96 % sont valables pour le nickel, le chrome et le cobalt, représentant une superficie de plus de 260 000 ha (Schéma de mise en valeur des richesses minières de la Nouvelle-Calédonie, 2008).

3. LES MÉTHODES D'EXPLOITATION DU MINÉRAI DE NICKEL

L'exploitation du minerai de nickel, de type saprolitique, effectuée par galeries souterraines jusqu'en 1920, est désormais essentiellement effectuée en carrières à ciel ouvert, ce qui nécessite le décapage de la végétation et des horizons supérieurs du sol à trop faible teneur, qui recouvrent les minerais. Les horizons décapés, ainsi que les fragments de roches peu altérés, triés du minerai, constituent les déblais, ou « stériles miniers », qui doivent être déplacés et stockés.

Aux premières extractions manuelles, sans grands impacts directs sur l'environnement, mais souvent accompagnées d'incendies de la végétation, ont succédé à partir de 1950 des extractions mécanisées permettant d'atteindre les minerais sous de plus grandes épaisseurs de stériles. Réalisées sans beaucoup de précautions environnementales, ces extractions mécanisées se sont révélées particulièrement destructrices pour l'environnement. Les stériles miniers (latérites à faible teneur et blocs rocheux) étaient en effet déversés sur les versants jusqu'en 1975, date à partir de laquelle de nouvelles méthodes d'exploitation, élaborées par la SLN, ont été appliquées par la plupart des sociétés minières. En outre, les travaux de prospection, encouragés par l'administration dans les années 1960-1970 pour une meilleure connaissance des ressources, ont ouvert des pistes sur la plupart des massifs parfois sans intérêt et surtout sans précaution en poussant au bulldozer les matériaux en aval, laissant de nombreuses cicatrices toujours visibles sur les versants montagneux.

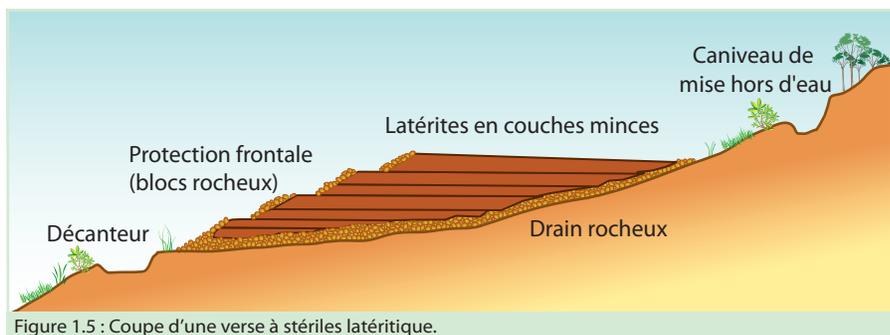


Figure 1.5 : Coupe d'une versée à stériles latéritiques.

Les nouvelles techniques utilisées, plus respectueuses de l'environnement, comprennent :

- l'utilisation de pelles hydrauliques et de camions d'évacuation, au lieu de pelles à chenilles et de bulldozers, pour les décapages et les ouvertures des pistes d'accès ;
- le transport des stériles et leur stockage en verses¹ stabilisées et drainées, protégées de l'érosion, dans des sites choisis (figures 1.5 à 1.8). Ainsi, de 1976 à 2008, il est estimé que plus de 300 millions de tonnes de stériles miniers ont été stockées dans des verses à stériles. Depuis le début des années 1990, l'épaisseur maximale initialement limitée à 40 m peut désormais être portée à 100 m environ, en réduisant légèrement la pente du talus frontal, ce qui doit permettre de limiter le nombre de sites ;



Figure 1.6 : Pistes de prospection (Koniambo).

© IRD / T. Jaffré



Figure 1.7 : Verse à stériles sur le Kopéto (K10).

© SLN



Figure 1.8 : Verse à stériles à Kouaoua.

© SLN

- la conservation d'un merlon de terrain naturel protecteur en bordure des pistes et des zones d'extraction ;
- la mise en place de caniveaux et de décanteurs pour réguler les flux hydriques et réduire la charge solide des eaux de ruissellement.

Ces nouvelles techniques minières ont été complétées par la mise en œuvre de nouvelles méthodes de prospection et de sondage, utilisant des moyens hélicoptérés, et par la réalisation de travaux de réhabilitation des anciennes zones exploitées (Pelletier 1990^{ab}, 2003).

Aujourd'hui, l'exploitation des minerais latéritiques de faible teneur en nickel implique la mise au point de nouvelles techniques d'extraction et de stockage, mises en œuvre par Vale Inco dans le Sud (figure 1.9). L'extraction du minerai, qui s'effectue en zone relativement plane, nécessite des excavations pouvant dépasser plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Elle s'accompagne du déplacement de quantités considérables de stériles à basse teneur et exige une gestion des eaux souterraines, dont les réseaux pourraient être perturbés (des études préalables sont actuellement en cours). Les résidus industriels « solides » ou épaisiss (de 5 à 7 millions de mètres cubes par an au total), issus du traitement des minerais à l'acide sulfurique et neutralisés par de la chaux et du calcaire, seront stockés dans les excavations successives (les « cellules minières »), puis recouverts par les stériles, pour enfin être revégétalisés.



Figure 1.9 : Zone de décapage à Goro.

© IRD / T. Jaffré

¹ Le terme « décharge minière » a souvent été employé dans le passé. Il est convenu de parler aujourd'hui de « verse à stériles latéritiques ».

4. IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

L'impact visuel des anciennes exploitations minières s'exprime dans le paysage par des zones dénudées mal délimitées, entourées de coulées de « terres rouges », de matériaux déplacés par érosion ou par déversement, tandis que les exploitations plus récentes se traduisent par des surfaces dénudées et des verses à stériles mieux circonscrites (figures 1.10 à 1.15).



Figure 1.10 : Ancienne mine sur le mont Dore.

À l'impact visuel, résultant de l'accumulation depuis plus d'un siècle de destructions du sol et de la couverture végétale, accélérées entre 1950 et 1975, sont associés des perturbations des régimes hydriques, un accroissement de l'érosion et des transports de matériaux sur les pentes et dans les creeks, une pollution et un engravement des cours inférieurs des rivières et des dépôts d'alluvions dans les zones basses et le long du rivage des centres miniers (Bird *et al.* 1984, Dupon 1986, Jaffré *et al.* 1977).

Les décapages, tout comme les recouvrements par des déblais terreux ou la pollution des rivières, entraînent inéluctablement la réduction de certains écosystèmes, ainsi que celle des effectifs de nombreuses populations d'espèces animales et végétales. Ces réductions peuvent entraîner une perte de biodiversité globale, ainsi qu'un dépérissement à plus long terme des populations et même des espèces dont les effectifs deviennent insuffisants pour assurer le maintien de la diversité génétique en leur sein (Honnay & Jacquemyn 2006, Oostermeijer *et al.* 2003). Des populations entières et parfois des espèces, lorsqu'elles sont très localisées, peuvent être aussi directement mises en danger d'extinction si des précautions ne sont pas prises à temps pour éviter leur destruction par arrachage ou ensevelissement.



Figure 1.11 : Impacts sur le versant nord-est du mont Dore.



© IRD / T. Jaffré

Figure 1.12 : Ancienne mine sur Boakaine (Canala).



La Dimenc a recensé en 2007 environ 20 000 ha de sols nus dégradés par l'activité minière, sur 21 communes impactées, soit 1,2 % de la surface du territoire. Les communes les plus touchées (Houaïlou, Thio et Kouaoua) représentent 40 % de ces surfaces.

De 1971 à 2008, 296 ha ont été revégétalisés, sachant qu'entre 2003 et 2006 le rythme était de 30 à 40 ha par an (cf. annexe 4).

Les risques de perte de biodiversité sont d'autant plus importants que l'écosystème touché par l'activité minière se trouve déjà dans une situation critique, en raison de sa faible étendue naturelle (cas de certains biotopes d'altitude, ou des zones humides, ou d'écosystèmes comportant des espèces à faible répartition, par exemple *Araucaria nemorosa* à Port Boisé) (Kettle *et al.* 2007) ou en raison de sa fragmentation et de sa réduction par des incendies répétés (cas des forêts rivulaires et des forêts de basse et de moyenne altitude sur la plupart des massifs miniers) (Jaffré *et al.* 2004, Jaffré *et al.* 2010).



© IAC / L. L'Huillier

Figure 1.13 : Ancienne mine sur Poro (Houaïlou).



© IAC / L. L'Huillier

Figure 1.14 : Mines sur Kouaoua.

5. LA RÉGLEMENTATION

L'histoire de la réglementation minière en Nouvelle-Calédonie est très liée à celle de l'exploitation du minerai de nickel. Les premiers textes datant des années 1870. Toutefois leurs dispositions ont toujours porté principalement sur des modalités d'obtention des concessions minières (surfaces, durées, redevances, permis de recherches...) et de classement des substances, mais jamais sur des questions d'environnement. Ainsi, jusqu'en 2008, il n'existait aucun moyen juridique efficace pour garantir la protection de l'environnement sur site minier, ce qui paraît inconcevable au regard du rôle protecteur de la couverture végétale dans un relief particulièrement montagneux et de la valeur tout à fait extraordinaire en termes d'originalité, de biodiversité et d'endémisme des biotopes sur terrains miniers.

5.1. Code minier

Après un travail de plusieurs années, le Schéma de mise en valeur des richesses minières, prévu dans la loi organique de 1999 et devant comporter notamment les principes directeurs en matière de protection de l'environnement pour l'exploitation des gisements, a finalement été adopté en 2008 par la Nouvelle-Calédonie¹. Il a ensuite servi de fondement à l'élaboration par le gouvernement du Code minier² applicable depuis le 1^{er} mai 2009, document unique regroupant l'ensemble des règles concernant le nickel, le chrome et le cobalt, dont l'objectif est de clarifier et de simplifier la réglementation minière, de donner les règles sur lesquelles doivent reposer l'essor et la consolidation du secteur de la mine et de la métallurgie.

Parmi les nombreuses dispositions nouvellement introduites en matière d'environnement, on peut citer :

- l'obligation de fournir une étude d'impact avant exploitation (état initial de la flore et de la faune, analyse des impacts, mesures prévues, mesures particulières pour les espèces rares et les écosystèmes protégés...);
- la constitution par l'exploitant d'un schéma de réhabilitation des zones dégradées (mesures prévues pour la remise en état), complété par un plan de restauration et de fermeture (décrivant les techniques de revégétalisation utilisées...);
- la soumission préalable à enquête publique et à la commission minière communale pour les centres d'exploitation;
- l'obligation de réparation des dégradations dues à l'activité minière, notamment par la constitution préalable de garanties financières destinées à assurer la remise en état et la réhabilitation des zones dégradées.

Tel que prévu dans la loi organique, il revient ensuite aux provinces de déterminer les modalités d'application de cette réglementation (celle-ci est présentée plus largement en annexe 1).

5.2. Délibération n° 104 et Fonds Nickel

Cette délibération, adoptée le 20 avril 1989, donne la possibilité aux entreprises minières de participer à la réhabilitation des sites ayant subi des dégâts environnementaux antérieurs à 1975, la plupart n'étant plus couverts par une concession (« mines orphelines »), en versant une fraction de leur impôt sur les bénéfices aux communes concernées. Au total, plus de 2 milliards F CFP ont ainsi été versés depuis 1990 à quatorze communes, dont 82 % durant la période 2000-2008, un maximum ayant été atteint en 2008 avec un total de 650,4 millions F CFP versés par neuf sociétés minières.

En 2008, des travaux de réhabilitation avaient été réalisés ou étaient en cours de réalisation sur dix-neuf sites miniers. Toutefois seule une partie de ces travaux concerne des opérations de revégétalisation, la majorité des fonds étant consommée pour des travaux de gestion des eaux.

Depuis 2009, le "Fonds Nickel" a été mis en place, avec reprise des missions et des financements de la délibération n° 104 (cf. annexe 1).

5.3. Code de l'environnement de la province Nord

Validé le 24 octobre 2008, ce code prévoit plusieurs dispositions en rapport avec l'exploitation minière. Il institue en province Nord un dispositif de protection des espaces naturels : les aires naturelles protégées, qui comportent six catégories. Il prévoit également une liste des espèces protégées en province Nord et une liste des espèces envahissantes. Ces listes sont appelées à évoluer rapidement, des genres protégés demandant notamment à être précisés (*Tristaniopsis* spp., *Xanthostemon* spp.) (cf. annexe 1).

5.4. Code de l'environnement de la province Sud

Adopté le 20 mars 2009, le Code de l'environnement de la province Sud est une révision et une compilation importante de textes de la province. Il comporte en particulier : la description des aires protégées ; la définition des écosystèmes d'intérêt patrimonial à des fins de conservation : les forêts denses humides, les forêts sèches, les mangroves, les herbiers et les récifs coralliens (on peut regretter que certaines formations particulières sur terrains miniers n'aient pas été prises en compte, telles que, au moins, les groupements des zones humides du Sud et certaines catégories de maquis rares ou très originaux) ; une liste des espèces protégées en province Sud ainsi qu'une liste des espèces envahissantes, qui sont également appelées à évoluer rapidement. Il convient de signaler aussi un nouveau texte important relatif à la récolte et à l'exploitation des ressources biologiques, qui concerne tout collecteur en province Sud (le texte est précisé en annexe 1).



Figure 1.15 : Verse à stériles sur le massif du Kopéto (K7).

¹ Le Schéma de mise en valeur des richesses minières a été adopté par le congrès de la Nouvelle-Calédonie le 18 mars 2009.

² La loi du pays n° 2009-6 relative au Code minier (partie législative) a été adoptée par le Congrès de la Nouvelle-Calédonie le 16 avril 2009. La partie réglementaire du Code minier a été adoptée par arrêté n° 2009-2205 du gouvernement de la Nouvelle-Calédonie le 28 avril 2009. Documents téléchargeables : <http://dimenc.gouv.nc>

CONDITIONS DE MILIEU DES TERRAINS MINIERS

Tanguy JAFFRÉ et Laurent L'HUILLIER

1. NATURE ET ORIGINE DU SUBSTRAT GÉOLOGIQUE

2. GENÈSE ET CARACTÉRISTIQUES DES SOLS ET DES MINÉRAIS DE NICKEL

- 2.1. Les « terres rouges » ou « latérites »
- 2.2. Les sols bruns hypermagnésiens
- 2.3. Les minerais de nickel

3. CONDITIONS DE NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES

- 3.1. Les carences en éléments nutritifs
- 3.2. Teneurs excessives en magnésium
- 3.3. Risques de toxicité en certains métaux

4. CONDITIONS D'ALIMENTATION HYDRIQUE DES PLANTES

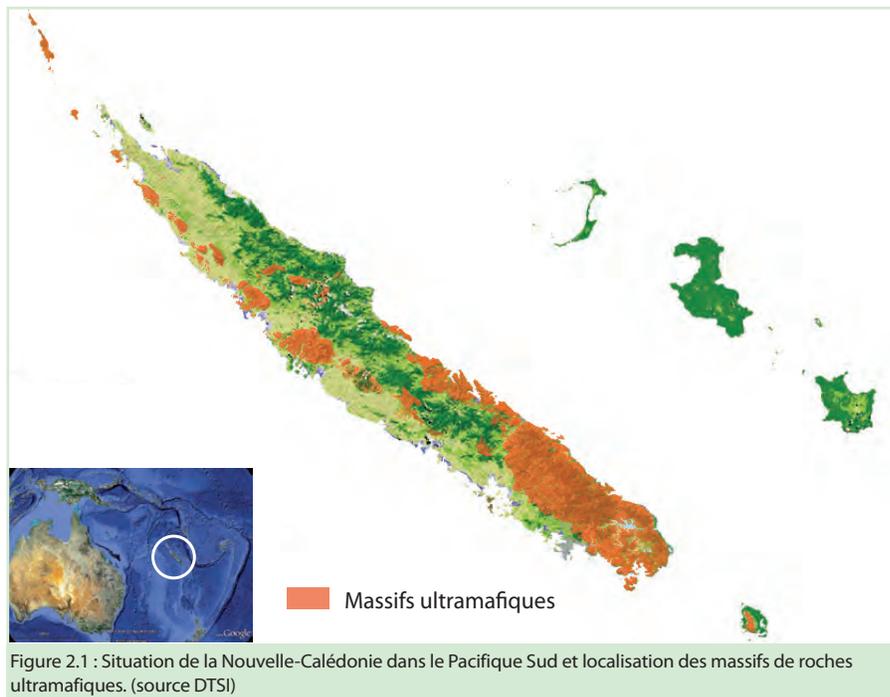
- 4.1 Conditions hydriques liées au climat
- 4.2 Conditions hydriques liées à la nature du sol

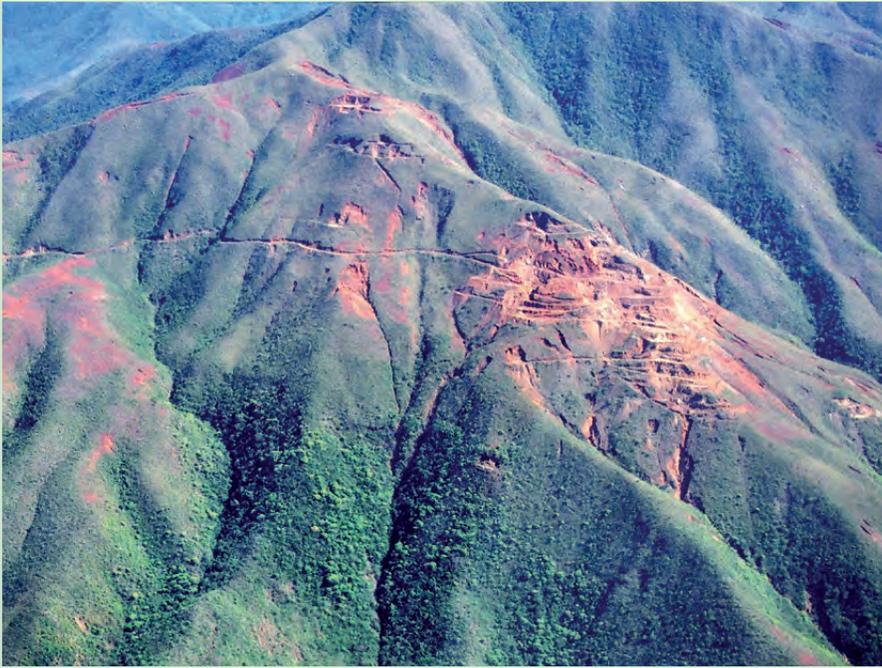
L'archipel néo-calédonien est situé dans le sud-ouest de l'océan Pacifique. D'une superficie émergée de 19 100 km², il s'étend sur environ 500 km de long et 50 km de large, entre le 18° et le 23° degré de latitude sud et entre le 163° et le 168° degré de longitude est (figure 2.1 a). Il est constitué d'une île principale, la Grande Terre, prolongée au nord par les îles Bélep et au sud par l'île des Pins, ainsi que des îles Loyauté à l'est, et de quelques îlots et récifs inhabités (figure 2.1b).

Les « terrains miniers » désignent en Nouvelle-Calédonie les substrats issus des roches ultramafiques (ultrabasiques), qui recèlent les minerais de nickel, de chrome et de cobalt.

1. NATURE ET ORIGINE DU SUBSTRAT GÉOLOGIQUE

Les roches ultramafiques proviennent d'un feuillet du manteau terrestre (partie située sous l'écorce terrestre) qui a recouvert la Grande Terre et ses prolongements (Bélep et île des Pins) à la fin de l'Éocène (37 millions d'années), pendant une phase de submersion totale, lors de la collision entre les plaques Pacifique et indo-australienne (Paris 1981, Pelletier 2006). Après l'émersion qui s'ensuivit, ce feuillet de roches ultramafiques a été érodé et fragmenté en plusieurs massifs (figure 2.1b). Ceux-ci occupent environ le tiers de l'île principale de l'archipel (la Grande Terre), soit une superficie de 5 500 km², s'étendent du bord de la mer à 1 618 m d'altitude (Jaffré 1993) et constituent des reliefs accidentés avec de très forts dénivelés (figure 2.2). Ils sont constitués majoritairement de péridotites, reposant le plus souvent sur une semelle de serpentinites laminées. Des affleurements de serpentinites s'observent également à l'intérieur des massifs où ils sont liés à des failles, et sous forme de filons, au sein des formations métamorphiques, où ils représentent des vestiges du recouvrement ultramafique initial (Guillon 1975, Paris 1981).





© IRD / T. Jaffré

Figure 2.2 : Vue aérienne illustrant le relief accidenté des massifs ultramafiques.

Les péridotites (comprenant des harzburgites et des dunites) ainsi que les serpentinites (forme hydratée des péridotites) sont constituées de silicates ferromagnésiens et sont caractérisées par des teneurs en silice < 45 %, des teneurs très faibles en aluminium, calcium et potassium, des teneurs très élevées en magnésium (40 %) et élevées en fer (6-8 %), ainsi qu'en certains métaux : nickel (0,3 %), chrome (0,6 %), cobalt (0,2 %), manganèse (0,3 %), rangés habituellement parmi les éléments traces des roches (Guillon 1975) (figure 2.3).



© IAC / L. L'Huilier

Figure 2.3 : Bloc de péridotite (harzburgite).

Au sein des affleurements de roches ultramafiques de la planète, ceux de Nouvelle-Calédonie ont une importance particulière. En effet, alors qu'ils ne représentent qu'environ 1 % de la surface de toutes les terres émergées (Brooks 1987), ils occupent, avec 5 600 km², près de 30 % de la superficie du pays et près du tiers de la Grande Terre. Bien que peu représentés à l'échelon mondial, les milieux issus de roches ultramafiques suscitent un grand intérêt scientifique, comme en témoignent les conférences internationales qui se tiennent régulièrement sur le sujet (Baker *et al.* 1992, Balkwill 2001, Boyd *et al.* 2004, Chiarucci & Baker 2007, Jaffré *et al.* 1997^b, Rajakaruna & Boyd 2009).

2. GENÈSE ET CARACTÉRISTIQUES DES SOLS ET DES MINÉRAIS DE NICKEL

Aux péridotites sont associés des sols appelés localement « terres rouges », qui peuvent contenir par endroits du minerai de nickel, et aux serpentinites, des sols bruns hypermagnésiens.

2.1. Les « terres rouges » ou « latérites »

Elles sont le résultat d'une transformation (altération) des péridotites sous climat chaud et humide depuis le Miocène (20 millions d'années), marquée par la lixiviation du magnésium et de la silice et par l'accumulation corrélative sur place du fer ainsi que du chrome (Colin *et al.* 1980, Trescases 1975). Les sols ainsi formés, qui sont les plus communs sur tous les massifs, sont des sols ferrallitiques ferritiques (Latham 1975^b), composés en grande partie d'oxydes et d'hydroxydes de fer (figure 2.4). Ils appartiennent au groupe des sols oxydiques (appelés aussi sols latéritiques, ferrallisols ou ferralsols), largement représentés en zone tropicale (Latham 1986, Latham *et al.* 1978, Quantin *et al.* 1997).

Les sols issus de roches ultramafiques se distinguent toutefois par l'absence d'aluminium et, de ce fait, d'argiles du type kaolinite (phyllosilicates d'aluminium) ainsi que par des teneurs élevées en nickel, chrome et cobalt. La présence d'argiles « granulométriques » (particules de taille < 2 µm) est due principalement aux oxydes de fer, celles-ci ne devant pas être confondues avec les véritables argiles d'un point de vue minéralogique. La profondeur de sol varie de moins d'un mètre sur pente à plus d'une dizaine de mètres en zone plane.



Figure 2.4 : Profil de sol ferrallitique ferritique, comportant un horizon épais de latérites rouges (Thio).

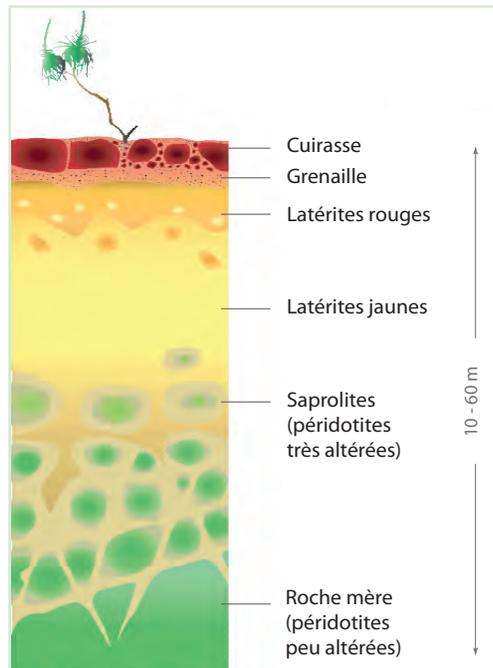


Figure 2.5 : Coupe schématique d'un profil type de sol issu de roches ultramafiques.

Sur un profil type (figure 2.5), non remanié par des phénomènes d'érosion ou de colluvionnement, on distingue un horizon supérieur, meuble, de texture graveleuse, parfois cuirassé en surface, appauvri en éléments fins. Il est constitué d'oxydes de fer (hématite) et d'oxy-hydroxydes de fer (goethite) bien cristallisés. Cet horizon, dit de « latérites rouges » en raison de sa couleur, passe progressivement à un horizon dit de « latérites jaunes ». Ce dernier, de texture argilo-limoneuse, est constitué d'amas très fins d'oxy-hydroxydes de fer (principalement de la goethite) peu ou mal cristallisés. Sous les latérites jaunes se trouvent les saprolites, constituées de la roche mère partiellement décomposée, mais ayant conservé la structure de la péridotite. Elles sont composées principalement d'oxy-hydroxydes de fer (amas très fins de goethite mal cristallisée) et contiennent aussi des argiles magnésiennes ou ferrifères du type smectites, résultant de la recombinaison de silice, de magnésium et d'hydroxydes de fer. Les teneurs en fer et en chrome décroissent de l'horizon supérieur à l'horizon saprolitique, tandis que l'inverse s'observe pour le magnésium, la silice et pour le nickel. Le cobalt et le manganèse ont leurs plus fortes teneurs dans la partie inférieure de l'horizon de latérites jaunes. Ces sols ont un pH fortement à moyennement acide dans les horizons supérieurs et aux alentours de 7 à la base du profil. Leur capacité d'échange (de rétention des cations échangeables) est réduite, mais s'accroît avec la présence d'argiles magnésiennes en profondeur et en fonction de l'importance de la matière organique, dans les horizons de surface. Les teneurs en bases échangeables sont très faibles, à l'exception de Mg^{++} à la base du profil (Jaffré *et al.* 1971, Jaffré & Latham 1974, Latham 1975^b, 1986).



Figure 2.6 : Sol ferrallitique ferritique remanié par érosion sur pente.



Figure 2.7 : Sol ferrallitique ferritique colluvionné de piedmont.

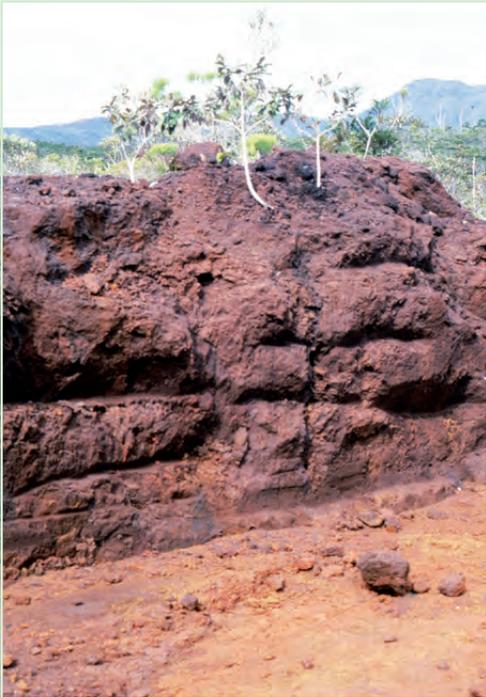
À l'échelon du paysage, les sols latéritiques (ferrallitiques ferritiques) présentent des faciès très influencés par l'histoire géomorphologique du massif (remaniement, rajeunissement) et leur position topographique actuelle (Bourdon *et al.* 1997, Latham 1975^{ab}, 1986). Les sols de crêtes et de pentes sont des sols érodés, rajeunis par troncature du profil initial. Ils sont en général peu profonds (souvent moins de 20 cm), parsemés de blocs rocheux, constitués, en proportions variables, de latérites jaunes, de saprolites et de roches en voie d'altération. Ils sont recouverts de manière inégale de colluvions ferrallitiques, formant par endroits des poches plus importantes entre les rochers (figure 2.6). Les zones de piedmonts possèdent des sols profonds constitués d'une accumulation de colluvions latéritiques (figure 2.7).

Ces derniers sols sont souvent légèrement enrichis en magnésium et plus fortement en manganèse du fait du lessivage oblique de ces éléments qui s'accumulent dans les zones plus basses (Jaffré & Latham 1974). Les sols de plaines sont généralement formés d'alluvions sablo-limoneuses et de colluvions (figure 2.8). Ils sont plus ou moins hydromorphes et sont enrichis en nickel et en magnésium (L'Huillier 1994, L'Huillier & Edighoffer 1996). Les sols en position de plateaux en zone basse ou intermédiaire, non remaniés et ayant subi une profonde évolution, sont caractérisés par des horizons de surface gravillonnaires ou cuirassés, fortement désaturés en éléments échangeables (figure 2.9) (tableau 2.1).



© IRD

Figure 2.8 : Sol latéritique alluvionné de plaine (région de la Madeleine, Sud).



© IRD / T. Jaffré

Figure 2.9 : Sol ferrallitique ferritique cuirassé (creek Pernod).



© IAC / L. L'Huillier

Figure 2.10 : Sol brun hypermagnésien sur serpentinite (mont Dore).

2.2. Les sols bruns hypermagnésiens

Ils se situent principalement à la base des massifs et sont généralement peu épais et caillouteux, de couleur brune, parfois rubéfiés par des apports de colluvions latéritiques (figure 2.10). Ils ont une texture argileuse, un pH faiblement acide à basique, en raison de fortes teneurs en magnésium. Leurs teneurs en nickel et en manganèse sont variables. Ils sont riches en argiles magnésiennes et ferrifères de type smectite, provenant de l'altération sans lessivage des éléments minéraux constitutifs des serpentinites. En zone de piedmont et de plaine, les serpentinites donnent des sols plus profonds, appartenant aux sols vertiques hypermagnésiens. Dans les deux cas, la présence d'argile leur confère une forte capacité d'échange qui est saturée en majorité par Mg^{2+} (Jaffré & Latham 1974, Latham *et al.* 1978, Proctor 2003) (tableaux 2.1 et 2.2).

Tableau 2.1 : Analyse chimique de l'horizon racinaire (0-20 cm) de quatre catégories de sols de maquis sur roches ultramafiques. (Jaffré, com. pers.)

	Sols ferrallitiques rajeunis par érosion		Sols ferrallitiques gravillonnaires ou cuirassés		Sols ferrallitiques hydromorphes sur alluvions		Sols bruns hyper- magnésiens	
	Moyenne (± écart type) (n = 43)		Moyenne (± écart type) (n = 55)		Moyenne		Moyenne (± écart type) (n = 80)	
pH	5,96	(0,32)	4,69	(0,39)	6,35		6,81	(0,45)
Cations échangeables (méq/100 g)								
Ca²⁺	0,93	(0,96)	0,60	(0,65)	2,53		2,35	(2,31)
Mg²⁺	2,04	(1,54)	0,52	(0,52)	10,26		33,50	(15,0)
K⁺	0,06	(0,04)	0,08	(0,12)	0,07		0,22	(0,17)
Na⁺	0,08	(0,07)	0,08	(0,08)	0,09		0,35	(0,19)
Capacité d'échange (méq/100 g)	8,15	(6,15)	7,65	(6,48)	15,56		40,90	(18,2)
P total (mg/kg)	83,00	(47)	185	(117)	460		108	(89)
SiO₂ (%)	5,20	(6,4)	1,37	(2,4)	11,49		30,20	(9,4)
Al (%)	2,63	(1,13)	3,00	(1,43)	7,03		1,84	(1,19)
Fe (%)	42,50	(9,84)	46,50	(4,60)	36,50		17,30	(7,75)
Mn (%)	0,47	(0,28)	0,46	(0,36)	0,72		0,43	(0,38)
Ni (%)	0,94	(0,26)	0,26	(0,11)	0,84		0,60	(0,27)
Cr (%)	2,11	(1,46)	4,24	(2,82)	4,62		1,20	(1,37)
Co (%)	0,09	(0,03)	0,03	(0,03)	-		0,06	(0,05)

2.3. Les minerais de nickel

Ils correspondent à des horizons pédologiques des sols latéritiques, localement plus fortement enrichis en nickel. Les latérites jaunes (limonite) constituent le minerai latéritique, ou minerai oxydé, lorsque les teneurs en nickel sont suffisantes pour être traitées par procédé métallurgique (à partir de 1,2 à 1,6 % actuellement). Les saprolites rentrent dans la catégorie des minerais silicatés (ou saprolitiques) lorsque les teneurs en nickel sont de l'ordre de 2,5 % (figure 2.11). Un minerai de couleur verte, pouvant contenir plus de 20 % de nickel et riche en silice, appelé garniérite, est parfois associé, au niveau de fissures, au minerai saprolitique (figure 2.12). Les premières extractions concernaient des minerais saprolitiques riches en garniérites, dont les teneurs en nickel étaient supérieures à 10 %. Elles étaient encore de plus de 3 % en 1980, avant de se stabiliser aux alentours de 2,5 % (Pelletier 2003). Le chapitre 6 donne davantage de détails sur la nature des substrats miniers à revégétaliser.



Figure 2.11 : Évacuation des latérites de surface pour accéder au minerai saprolitique (Tontouta).



Figure 2.12 : Garniérite (phyllosilicate double de nickel et de magnésium).

3. CONDITIONS DE NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES

3.1. Les carences en éléments nutritifs

Les sols ferrallitiques et les sols bruns sont fortement carencés, tant en éléments totaux (phosphore, potassium et calcium) qu'en bases échangeables (Ca^{2+} et K^+). Le calcium étant toutefois généralement sensiblement plus abondant dans les sols bruns que dans les sols ferrallitiques. Le phosphore est de surcroît fortement retenu par les oxydes de fer, la fraction assimilable étant très faible (généralement entre 0 et 30 mg/kg) (Bonzon *et al.* 1995, 1997, 2001, L'Huillier *et al.* 1998). Les teneurs en azote et en phosphore disponibles pour les plantes varient en fonction de l'importance de la matière organique dans les horizons supérieurs recouverts de végétation. En maquis, l'azote est présent en faible quantité, la matière organique étant peu abondante et se dégradant de surcroît très lentement. La carence assez générale en calcium est d'autant plus accentuée que le rapport des bases échangeables $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ est faible (< 1) (Jaffré 1976, Jaffré 1980, Proctor 2003) (tableau 2.1).

3.2. Teneurs excessives en magnésium

Les teneurs excessives en magnésium, qui pourraient avoir dans certains cas un effet toxique direct sur les végétaux (Proctor 1970), ont un effet antagoniste reconnu sur l'absorption du calcium (Kruckeberg 1954, Proctor & Nagy 1992, Walker & Walker 1955). Les fortes teneurs en magnésium vont de pair avec une élévation du pH, une prédominance de cet élément dans le complexe d'échange et dans la solution du sol. Elles s'observent principalement dans les sols bruns hypermagnésiens, les sols alluviaux, certains sols colluviaux de piedmonts secondairement enrichis en magnésium, ainsi que, plus rarement, dans des sols ferrallitiques peu évolués d'érosion (Jaffré & Latham 1974) (tableau 2.1).

3.3. Risques de toxicité en certains métaux

La toxicité, pour les plantes, des métaux (Ni, Mn, Cr, Co) contenus en excès dans ces sols dépend de leur « phytodisponibilité » (Ross 1994), communément appelée « biodisponibilité » (L'Huillier 1994). Celle-ci varie en fonction du pH et des équilibres ioniques de la solution aqueuse du sol ; ainsi les fortes teneurs en magnésium diminueraient-elles les risques de toxicité en nickel par effet antagoniste de l'absorption (Proctor & Gowan 1976). La toxicité du nickel dépend aussi de la nature des minéraux secondaires auxquels il est associé et des conditions de drainage du sol (Becquer *et al.* 1995^{ab}, 1997, 1998, L'Huillier 1994, Perrier *et al.* 2004).

La biodisponibilité des métaux est aussi largement influencée par les sécrétions racinaires des plantes, les micro-organismes du sol, et notamment par la présence de bactéries ou de mycorhizes formant des associations symbiotiques avec certaines espèces (Ducouso & Amir, chapitre 5).

Il a été montré que les risques de toxicité en nickel pour les plantes étaient importants sur les sols érodés laissant affleurer des roches en voie d'altération (matériaux saproliques) (Jaffré 1980), ainsi que sur les sols alluviaux hydromorphes (L'Huillier & Edighoffer 1996). Cela tient à la présence de nickel biodisponible, associé, dans le premier cas, à des minéraux silicatés secondaires des saprolites (Perrier *et al.* 2006^a) et, dans le second, à des argiles et à des oxy-hydroxydes de fer peu cristallisés ou à plus grande surface d'échange (goethite) formés à partir de limons et de sables d'origine ultramafique en milieu hydromorphe (Becquer *et al.* 1995^b, 1997). Les risques de toxicité en nickel sont faibles sur cuirasse et sur latérites rouges, la mobilité du nickel étant moindre dans ces matériaux, tout au moins dans de bonnes conditions de drainage. Ils sont modérés sur les sols bruns hypermagnésiens de pente, en raison du pH élevé et de l'excès en magnésium, mais sont plus importants en conditions d'hydromorphie de bas de pente, ainsi que sur les sols magnésiens d'alluvions contenant des minéraux en cours d'altération, libérant du nickel dans la solution du sol. Cela pourrait expliquer l'appauvrissement de la flore, ainsi que la richesse et l'abondance exceptionnelles des espèces hyperaccumulatrices de nickel dans la forêt sur alluvions, comparativement à la forêt sur sol ferrallitique sur pentes, dans le parc provincial de la rivière Bleue (Jaffré & Veillon 1990).

Des méthodes chimiques permettant d'évaluer rapidement la biodisponibilité du nickel dans les sols ferrallitiques ont été développées (L'Huillier & Edighoffer 1996, Becquer *et al.* 1997). Ainsi, des extractions à l'aide de DTPA 5 mM à pH 5,3 ont montré de grandes différences entre les sols de piedmonts constitués de colluvions latéritiques et les sols d'alluvions en plaine en conditions hydromorphes, les premiers libérant en général moins de 10 ppm (mg/kg) de nickel, tandis que les seconds libèrent environ 100 ppm, et parfois plus de 200 ppm. Ces niveaux se sont révélés nettement corrélés avec les teneurs en nickel dans des végétaux cultivés.

Il convient de noter que les risques de toxicité du nickel pour l'homme semblent relativement faibles : son absorption par voie alimentaire présente très peu de risques, l'homme étant capable de l'éliminer assez rapidement. Il n'est pas impossible, cependant, qu'une alimentation basée uniquement sur des produits anormalement riches en nickel ne puisse avoir à la longue des effets sur les voies digestives et urinaires, il ne s'agit toutefois que d'une hypothèse. Des effets néphrotoxiques ont été observés dans des cas d'exposition industrielle accidentelle à du carbonyle de nickel absorbé par voie respiratoire. L'hypersensibilité de contact est, en revanche, très largement documentée.

Les risques de toxicité en manganèse seraient les plus accentués sur les sols coluviaux de piedmonts et de plaines, en raison des fortes teneurs en Mn associées à un pH acide et parfois à des phénomènes d'hydromorphie (Jaffré 1980, L'Huillier & Edighoffer 1996).

Les risques de toxicité en chrome (liés à la présence de chrome soluble sous forme de chrome hexavalent Cr(VI)) et en cobalt n'ont pas été clairement mis en évidence. Toutefois la présence de chrome hexavalent, associée à un possible effet toxique de cet élément sur des mandariniers cultivés, a été constatée sur sols ferrallitiques amendés en phosphore, ce dernier entrant en compétition avec le Cr(VI) dans l'adsorption sur les oxydes de fer, provoquant sa désorption et son passage dans la solution du sol (Becquer *et al.* 2003).

4. CONDITIONS D'ALIMENTATION HYDRIQUE DES PLANTES

Elles varient pour un site donné, en fonction des conditions climatiques, principalement pluviométriques, et des caractéristiques édaphiques.

4.1. Conditions hydriques liées au climat

La Nouvelle-Calédonie jouit d'un climat tropical océanique chaud et humide (pluviométrie et température annuelles moyennes de 1 700 mm et de 23 °C), marqué par des variations pluviométriques saisonnières et interannuelles très importantes.

Les périodes de sécheresse se situent normalement de septembre à novembre, mais peuvent être plus précoces ou plus tardives et se prolonger sur les mois de décembre à mars, habituellement les plus pluvieux. Ces variations du régime pluviométrique entraînent l'existence d'épisodes de grande sécheresse ou d'années très humides. L'irrégularité de la pluviométrie est accentuée par le passage de dépressions cycloniques, qui peuvent être accompagnées de pluies torrentielles. Ainsi la station météorologique de Népoui, à la base du massif du Boulinda, n'a-t-elle enregistré entre juillet 1972 et juillet 1973 (période de 12 mois) que 168 mm de pluie, contre 1 400 mm pour la même période en 1974-1975.

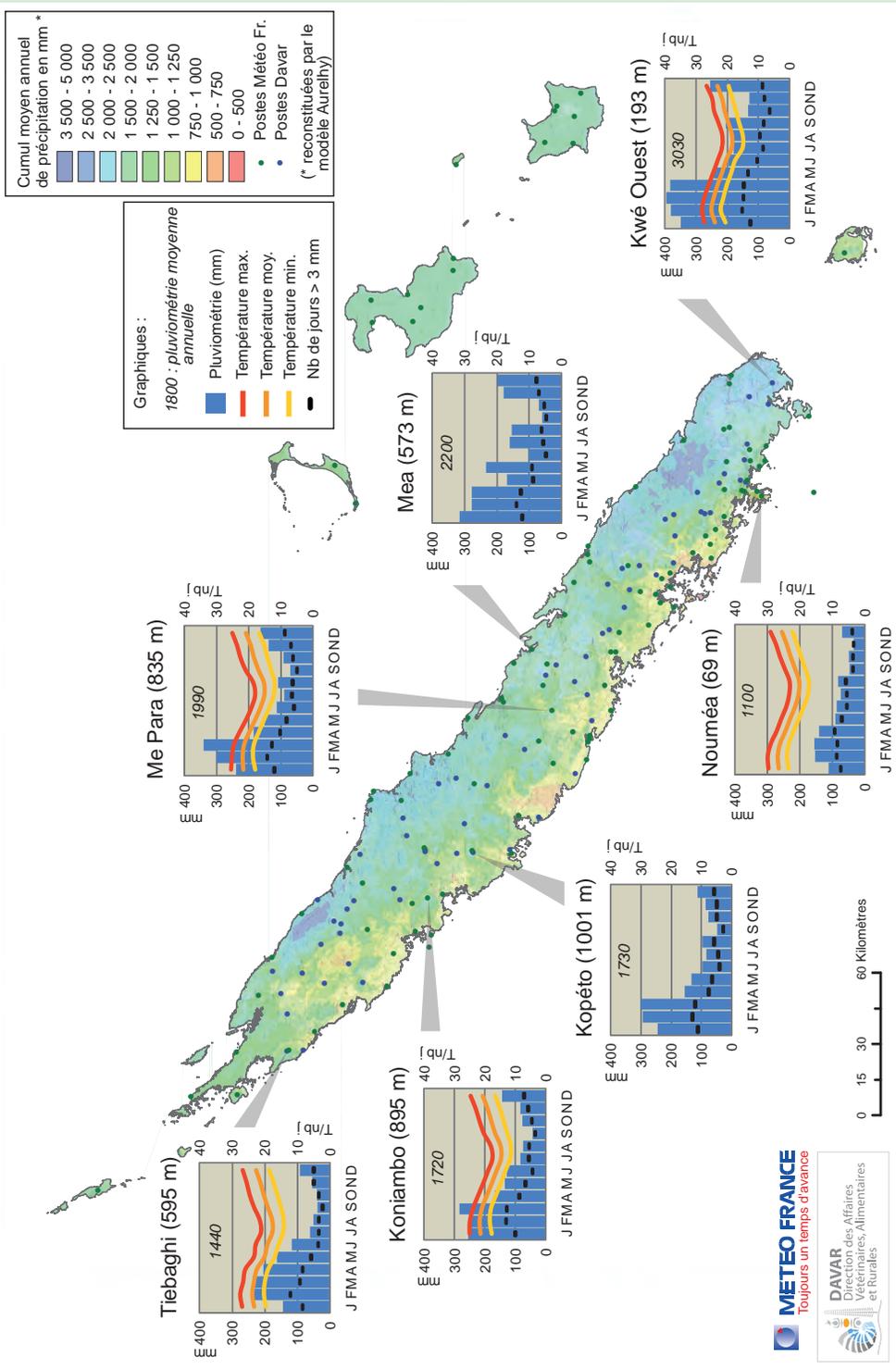
Les conditions climatiques et pluviométriques stationnelles sont largement fonction de l'altitude et de l'exposition. Les précipitations annuelles moyennes varient de l'ordre de 800 mm au niveau de la mer sur la côte ouest à plus de 4 000 mm sur les sommets de plus de 1 500 m d'altitude et dans le massif du Sud. D'une manière générale, les versants orientaux soumis aux alizés du sud-est sont plus arrosés que les versants occidentaux (communication Météo-France, Nouvelle-Calédonie).

Les variations de température sont également importantes, les mois les plus froids étant juillet et août, avec des minima souvent situés sous les 10 °C la nuit, tandis que les températures atteignent 30 à 38 °C aux heures les plus chaudes entre janvier et mars.

Ainsi, l'intervalle entre septembre et novembre, voire décembre selon les années et les localités, est une période critique pour les jeunes plants encore faiblement enracinés, en particulier ceux installés sur des sols filtrants à faible capacité de rétention en eau (la plupart des cas sur terrains miniers), le risque étant encore accentué par une forte exposition au vent et au soleil. Ces paramètres climatiques doivent être considérés soigneusement pour une gestion optimisée d'une opération de revégétalisation (disponibles à Météo-France, ou auprès de certaines sociétés minières en fonction des sites).

La figure 2.13 présente les précipitations moyennes annuelles, ainsi que les variations de pluviométrie et de température sur plusieurs sites miniers.

Figure 2.13 : Précipitations annuelles moyennes (1991-2000) et données climatiques de quelques stations, dont plusieurs sur sites miniers (données Météo-France).



4.2. Conditions hydriques liées à la nature du sol

Les sols ferrallitiques ont une réserve en eau très faible dans les horizons gravillonnaires, mais celle-ci augmente rapidement dans les horizons limono-argileux sous-jacents, qui possèdent une bonne microporosité. En outre, l'horizon gravillonnaire peut se comporter comme un « mulch » pour les réserves en eau des horizons sous-jacents. Les sols bruns hypermagnésiens ont, grâce à la présence d'argiles gonflantes (smectites), une réserve hydrique assez forte à pF 3 (capacité au champ), mais la quantité d'eau retenue au point de flétrissement (pF 4,2) est élevée, ce qui la rend difficilement utilisable pour la végétation (Jaffré 1980) (tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Caractéristiques physicochimiques de différents horizons de quatre sols de maquis sur roches ultramafiques. (D'après Jaffré *et al.* 1971)

	Sol ferrallitique rajeuni par érosion		Sol ferrallitique gravillonnaire à cuirassé			Sol ferrallitique hydromorphe sur alluvions		Sol brun hypermagnésien	
Horizons (cm)	0-15	45-50	0-15	18-24	27-32	0-15	25-35	0-5	5-10
Matière organique (%)	3,0	0,3	1,6	-	-	9,6	-	3,0	3,5
Argile (%)	27,9	22,9	11,9	17,2	27,8	41,8	50,9	46,5	49,2
Limon (%)	28,1	23,4	6,8	6,4	11,6	8,5	13,8	19,4	15,6
Sable fin (%)	23,1	31,2	24,5	30,0	34,0	33,8	17,0	19,6	17,9
Sable grossier (%)	17,9	22,1	55,2	46,0	26,5	6,2	17,4	11,5	13,7
Humidité à pF 3 (%)	29,4	37,1	12,8	16,8	23,7	86,3	59,9	31,2	38,5
Humidité à pF 4,2 (%)	22,0	15,5	9,3	11,7	16,4	59,5	43,0	22,5	28,4
Eau utile (%)	7,4	21,6	3,5	5,1	7,3	26,8	16,9	8,7	10,1
Capacité d'échange (méq/100 g)	7,6	2,4	5,1	2,0	1,2	10,1	2,7	30,7	35,3

LA VÉGÉTATION DES ROCHES ULTRAMAFIQUES OU TERRAINS MINIERS

Tanguy JAFFRÉ et Laurent L'HUILLIER

1. LA FLORE

- 1.1. Caractéristiques, richesse et endémicité de la flore des terrains miniers
- 1.2. Origine de la flore

2. LES FORMATIONS VÉGÉTALES

- 2.1. Les forêts denses humides
- 2.2. Les maquis miniers

3. ADAPTATION DES PLANTES AUX CONDITIONS DE NUTRITION MINÉRALE

- 3.1. L'adaptation des espèces aux carences du sol en phosphore, en potassium et en azote
- 3.2. L'adaptation aux faibles teneurs du sol en calcium
- 3.3. L'adaptation des plantes aux teneurs excessives en magnésium du sol
- 3.4. L'adaptation des plantes aux teneurs élevées du sol en éléments potentiellement toxiques Ni, Mn, Cr et Co

4. ADAPTATION DES PLANTES DU MAQUIS À LA SÈCHERESSE

5. RÔLE DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE

6. DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION

7. CONCLUSION

Comme dans d'autres régions du monde, la végétation des substrats issus de roches ultramafiques (souvent appelée « serpentine vegetation » en langue anglaise) se distingue en Nouvelle-Calédonie de la végétation de l'ensemble des autres substrats géologiques, par sa composition floristique globale, ainsi que par la physionomie de ses groupements ouverts et secondaires. Le contraste qu'on observe sur la côte ouest entre le couvert végétal secondaire des roches volcano-sédimentaires et celui des roches ultramafiques est à cet égard tout à fait saisissant (figure 3.1). La végétation des substrats ultramafiques est spécialisée et adaptée à des conditions édaphiques particulières héritées de la roche mère (Brooks 1987, Jaffré 1996). Elle est en outre la plus diversifiée du pays, à cause des variations importantes des caractéristiques chimiques et physiques des sols, de la topographie, de la pluviométrie, de l'altitude (du niveau de la mer à 1 618 m) et des stades d'évolution, ainsi que de l'isolement géographique de plusieurs massifs, favorisant des phénomènes de spéciations allopatriques (Jaffré 1992, Jaffré *et al.* 1987, Schmid 1982).



© SLN / B. Pelletier

Figure 3.1 : Zone de contact entre roches volcano-sédimentaires (savane en premier plan) et un massif de roches ultramafiques (maquis en second plan) (côte ouest).

1. LA FLORE

La flore de la Nouvelle-Calédonie comprend environ 3 350 espèces de plantes vasculaires autochtones et son taux d'endémisme est de 74 % (Morat *et al.* 2010). Ces valeurs varient sensiblement en fonction des révisions taxonomiques et du statut accordé (autochtone ou introduite) aux espèces à large répartition géographique (Jaffré *et al.* 2001⁹). Elle est reconnue comme une des flores les plus originales de la planète. D'ailleurs le classement de la Nouvelle-Calédonie parmi les 25 zones prioritaires (« hotspots ») pour la préservation de la biodiversité terrestre planétaire est en grande partie dû aux particularités de sa flore (Myers 1998, Myers *et al.* 2000, Lowry *et al.* 2004, Kier *et al.* 2009).

En outre, la flore des terrains miniers contribue pour une part majeure à la richesse et surtout à l'originalité de celle du pays, qui est de ce fait également reconnue comme un des principaux « hotspots » mondiaux des flores métallobytophytes (plantes capables de se développer sur des sols riches en certains métaux phytotoxiques) (Whiting *et al.* 2004).

1.1. Caractéristiques, richesse et endémisme de la flore des terrains miniers

La flore des terrains miniers rassemble approximativement 2 150 espèces de plantes vasculaires autochtones et a un taux d'endémisme proche de 82 %. Bien qu'elle n'occupe que 29 % de la superficie de l'archipel, elle est plus riche et plus originale que la flore de l'ensemble des autres substrats géologiques (2 120 espèces, taux d'endémisme 61 %). En outre, environ 1 160 espèces, dont 1 100 endémiques, ne se trouvent que sur terrains miniers. Ainsi la flore strictement liée à ces terrains représente-t-elle 35 % de la flore autochtone de l'archipel et 45,5 % de sa flore endémique totale (Jaffré *et al.* 2009^{ab}).

Au sein des grands groupes botaniques

Cette diversité floristique est répartie de manière inégale entre les grands groupes de la classification botanique (tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Nombre d'espèces et taux d'endémisme au sein des grands groupes botaniques sur substrats ultramafiques et sur l'ensemble des autres substrats.

	Substrats ultramafiques		Autres substrats	
	Nb d'espèces	Endémisme (%)	Nb d'espèces	Endémisme (%)
Ptéridophytes	175	41	225	35
Monocotylédones	360	57	440	34
Dicotylédones	1 575	91,5	1 435	73
Gymnospermes	42	100	18	94

Les ptéridophytes et les monocotylédones ont leurs taux d'endémisme les plus élevés sur substrats ultramafiques mais ont moins d'espèces sur ces derniers que sur l'ensemble des autres substrats. Chez les dicotylédones, aussi bien le nombre d'espèces que les taux d'endémisme sont les plus élevés sur substrats ultramafiques (Jaffré *et al.* 2009^a). La différence est encore plus marquée au sein des gymnospermes qui, avec un total de 46 espèces (45 conifères endémiques et une espèce indigène du genre *Cycas*), ont 42 espèces (toutes des conifères) sur roches ultramafiques et 18 espèces (dont l'unique *Cycas*) sur les autres substrats. Aussi apparaît-il que les conifères déjà exceptionnellement bien représentés à l'échelon du territoire, avec plus de 7 % du total des espèces de ce groupe sur la planète, le sont encore davantage à l'échelon des terrains miniers, d'autant plus que 28 espèces (62 % du total) leur sont strictement liées (figures 3.2 à 3.7). Cette affinité des conifères de Nouvelle-Calédonie pour les terrains miniers est attribuée à leur prédisposition à se développer dans des conditions de milieux extrêmes et contrastées, tant du point de vue climatologique qu'édaphique (Jaffré 1995, Manauté *et al.* 2004).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.2 : *Agathis ovata* (Araucariaceae).



© IAC / L. L'Huillier

Figure 3.3 : *Araucaria rulei* (Araucariaceae).



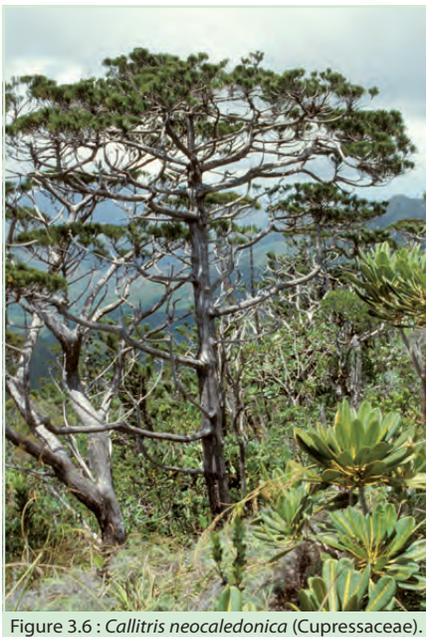
© IAC / L. L'Huillier

Figure 3.4 : *Neocallitropsis pancheri* (Cupressaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.5 : *Podocarpus novaecaledoniae* (Podocarpaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.6 : *Callitris neocaledonica* (Cupressaceae).



© IRD / F. Rigault

Figure 3.7 : *Podocarpus gnidioides* (Podocarpaceae).

À l'échelon des familles et des genres

La flore des substrats ultramafiques se répartit en moins de familles et de genres que la flore de l'ensemble des substrats différents (environ 150 familles et 550 genres contre 185 familles et 740 genres). Ces valeurs témoignent du pouvoir sélectif des substrats ultramafiques. Signalons à cet égard que l'espèce emblématique *Amborella trichopoda* (de la famille endémique monospécifique des Amborellaceae), qui représente à elle seule le groupe frère de toutes les autres plantes à fleurs actuelles (Qiu *et al.* 1999), n'a pas été recensée sur terrains miniers. Il en est de même de *Trimenia neocaledonica* de la famille primitive des Trimeniaceae. En revanche, la famille endémique des Oncothecaceae (2 espèces) se trouve uniquement sur terrains miniers et celle des Phellinaceae (14 espèces) sur différents substrats géologiques, tout comme la plupart des familles primitives (Annonaceae, Atherospermataceae, Chloranthaceae, Monimiaceae, Piperaceae, Winteraceae...) (figures 3.8 à 3.10).



© IRD / J. Munzinger

Figure 3.8 : *Oncotheca balansae* (Oncothecaceae).



© IRD / J. Munzinger

Figure 3.9 : *Phelline comosa* (Phellinaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.10 : *Zygogynum pancheri* (Winteraceae).

Les familles les plus riches en espèces de la flore des terrains miniers comprennent, dans l'ordre, avec plus de 180 espèces, les Myrtaceae et les Orchidaceae, suivies, avec plus de 130 espèces, par les Euphorbiaceae *sensu lato*¹ et les Rubiaceae. Viennent ensuite, avec plus de 50 espèces, les Cunoniaceae, Sapotaceae, Apocynaceae, Rutaceae, Cyperaceae, Araliaceae *sensu lato*, puis, avec plus de 20 espèces, les Fabaceae, Sapindaceae, Salicaceae, Lauraceae, Proteaceae, Elaeocarpaceae, Primulaceae, Pittosporaceae, Pandanaceae, Dilleniaceae, Palmae et Lamiaceae.

Toutefois les familles les plus caractéristiques, sur-représentées sur roches ultramafiques, par rapport à l'ensemble des autres substrats (en nombre total d'espèces comme en nombre d'espèces leur étant strictement liées), comprennent notamment, avec au moins 10 espèces, les Araucariaceae, Apocynaceae, Araliaceae, Argophyllaceae, Casuarinaceae, Cunoniaceae, Dilleniaceae, Euphorbiaceae *sensu lato*, Ericaceae, Lauraceae, Myrtaceae, Podocarpaceae, Proteaceae, Rutaceae, Salicaceae, Santalaceae, Sapotaceae, Thymelaeaceae et, avec moins d'espèces, la famille des Cupressaceae et celle des Nothofagaceae dont les espèces du genre *Nothofagus* dominent fréquemment les forêts. Au sein des ptéridophytes, seule la famille des Schizaeaceae, dont toutes les espèces se développent sur terrains miniers et dont 5 sur 9 y sont strictement liées, entre aussi dans cette catégorie.

Les familles des Clusiaceae, Cyperaceae, Ebenaceae, Fabaceae, Primulaceae, Orchidaceae, Pandanaceae, Sapindaceae, qui ont pour la plupart plus de 50 % de leurs espèces sur ce substrat, avec une forte proportion d'espèces ubiquistes et souvent un plus grand nombre d'espèces en dehors des terrains miniers, ne sont pas caractéristiques des substrats ultramafiques. Elles peuvent cependant posséder des genres qui leur sont largement associés. C'est le cas de *Costularia* et *Schoenus* (Cyperaceae), *Stortocalyx* (Sapindaceae), *Nephrodosmus* (Fabaceae), *Montrouziara* (Clusiaceae), ainsi que celui des genres *Acianthus* et *Dendrobium* chez les Orchidaceae (figures 3.11 et 3.13).

¹ Les familles *sensu lato* sont celles valides avant la nouvelle classification par APG3 2009.

Figure 3.11 : *Montrouziera gabriellae* (Clusiaceae).

© IRD / T. Jaffré

Figure 3.12 : *Greslania circinata* (Poaceae).

© IRD / F. Rigault

Figure 3.13 : *Dendrobium* sp. (Orchidaceae).

© IAC / L. L'Huilier

Les familles des Elaeocarpaceae, Lamiaceae, Pittosporaceae, Palmae et Rubiaceae, bien représentées sur substrats ultramafiques, rassemblent sensiblement le même nombre d'espèces sur l'ensemble des autres substrats.

Plusieurs familles, possédant en Nouvelle-Calédonie de nombreuses espèces pan-tropicales (Asteraceae, Convolvulaceae, Poaceae, Malvaceae, Moraceae, Solanaceae, Urticaceae), sont peu représentées sur substrats ultramafiques et apparaissent globalement peu pré-adaptées aux conditions de milieux réalisées sur ces substrats. Toutefois les trois espèces endémiques du genre *Greslania* (Poaceae) (figure 3.12) et environ le tiers des espèces du genre *Acropogon* (Malvaceae) sont strictement associées aux terrains miniers.

Le taux d'endémisme des genres présents sur substrats ultramafiques dépasse 15 %, tandis qu'il n'atteint pas 10 % pour la flore des autres substrats réunis. De plus, environ 40 genres endémiques sont strictement liés aux terrains miniers, contre 5 (actuellement répertoriés) uniquement en dehors (Jaffré *et al.* 2009^a). Les genres endémiques appartiennent majoritairement à la forêt et à l'ensemble forêt et maquis.

Parmi les genres ayant 20 espèces et plus dans la flore de la Nouvelle-Calédonie, les genres *Phyllanthus* (Phyllanthaceae), *Cunonia* et *Pancheria* (Cunoniaceae), *Planchonella* (Sapotaceae), *Dendrobium* (Orchidaceae), *Hibbertia* (Dilleniaceae), *Alyxia* (Apocynaceae), *Xanthostemon* (Myrtaceae) et *Xylosma* (Salicaceae) ont leur plus grand nombre d'espèces sur terrains miniers (figures 3.14 à 3.19). L'inverse s'observe pour les genres *Diopyros* (Ebenaceae), *Tapeinosperma* (Primulaceae), *Ficus* (Moraceae) et *Acropogon* (Malvaceae). Avec sensiblement le même nombre d'espèces sur substrats ultramafiques et sur substrats différents figurent les genres *Psychotria* (Rubiaceae), *Syzygium*, *Eugenia* et *Gossia* (Myrtaceae), *Pittosporum* (Pittosporaceae), *Oxera* (Lamiaceae), *Dubouzetia*, *Elaeocarpus* (Elaeocarpaceae), *Baloghia* (Euphorbiaceae), *Cupaniopsis* (Sapindaceae), *Schefflera*, *Polyscias* (Araliaceae), *Bulbophyllum* (Orchidaceae), *Atractocarpus* (Rubiaceae)

(figures 3.20 à 3.28). Avec un plus petit nombre d'espèces, mais une forte présence sur terrains miniers, il convient également de citer les genres *Bikkia* (Rubiaceae), *Cloezia*, *Metrosideros*, *Tristaniopsis* (Myrtaceae), *Codia* (Cunoniaceae), *Exocarpos* (Santalaceae), *Gymnostoma* (Casuarinaceae), *Grevillea*, *Beauprea* (Proteaceae), *Styphelia*, *Dracophyllum* (Ericaceae) (figures 3.29 à 3.35)...



Figure 3.14 : *Phyllanthus virgultiramus* (Phyllanthaceae).

© Cirad-IAC / M. Ducousso



Figure 3.16 : *Hibbertia altigena* (Dilleniaceae).

© IRD / C. Grignon



Figure 3.15 : *Pancheria confusa* (Cunoniaceae).

© Cirad-IAC / M. Ducousso



Figure 3.17 : *Cunonia atrorubens* (Cunoniaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.18 : *Planchonella crassinervia* (Sapotaceae).

© IRD / J. Munzinger



Figure 3.19 : *Xanthostemon ruber* (Myrtaceae).

© IAC / L. L'Huillier



© Cirad-IAC / M. Ducouso

Figure 3.20 : *Psychotria calorhamnus* (Rubiaceae).



© Cirad-IAC / M. Ducouso

Figure 3.21 : *Pittosporum kaalense* (Pittosporaceae).



© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.22 : *Oxera gmelinoides* (Lamiaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.23 : *Syzygium acre* (Myrtaceae).



© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.24 : *Elaeocarpus alaternoides* (Elaeocarpaceae).



© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.25 : *Baloghia deplanchei* (Euphorbiaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.27 : *Dubouzetia campanulata* (Elaeocarpaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.26 : *Polyscias pancheri* (Araliaceae).



Figure 3.28 : *Atractocarpus heterophyllus* (Rubiaceae).

© Cirad-IAC / M. Ducoussou



Figure 3.29 : *Bikkia campanulata* (Rubiaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.30 : *Codia montana* (Cunoniaceae).

© Cirad-IAC / M. Ducoussou



Figure 3.31 : *Metrosideros nitida* (Myrtaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.32 : *Tristaniopsis guillainii* (Myrtaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.33 : *Grevillea gillivrayi* (Proteaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.34 : *Styphelia pancheri* (Ericaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.35 : *Dracophyllum verticilatum* (Ericaceae).

© Cirad-IAC / M. Ducoussou

Globalement, les différences observées entre la flore des terrains miniers et celle des autres substrats géologiques traduisent une importante diversification des groupes spécialisés et pré-adaptés aux conditions des milieux ultramafiques et une exclusion relative des groupes moins adaptés, mieux représentés sur les autres substrats (Jaffré 1980, Jaffré *et al.* 1987, Pillon 2008, Pillon *et al.* 2009). Toutefois la présence, dans toutes les familles et tous les genres d'une certaine importance dans la flore néo-calédonienne, d'espèces adaptées aux substrats ultramafiques traduit la possibilité d'acquisition secondaire, au cours de phénomènes de spéciation, de caractères adaptatifs aux conditions de milieu sur ces substrats. À l'opposé, comme souligné pour le genre endémique *Codia* (Pillon *et al.* 2009), un groupe initialement adapté aux terrains miniers peut engendrer de nouvelles espèces ayant perdu cette particularité.

1.2. Origine de la flore

Jusqu'à cette dernière décennie, l'origine de la flore de la Nouvelle-Calédonie s'expliquait principalement par son histoire géologique. Le socle géologique calédonien est un fragment du Gondwana, qui se trouvait proche du Queensland (Australie), au Trias. Il en a été séparé lors de l'expansion de la mer de Tasman et se trouve dans sa position actuelle depuis environ 65 millions d'années. La faune et la flore de la Nouvelle-Calédonie étaient considérées comme résultant majoritairement de l'évolution, sur place, d'un stock gondwanien, dans des conditions d'isolement et de relative stabilité climatique (Lowry 1996, Morat 1993, Raven & Axelrod 1974). Celui-ci aurait subsisté, en dépit des transgressions marines du Paléocène et de l'Éocène inférieur, sur des terres refuges, en permanence ou tour à tour émergées, avoisinant le bâti calédonien. Cet héritage gondwanien direct expliquait donc parfaitement la plus grande affinité floristique de la Nouvelle-Calédonie avec l'Australie, suivie de la Nouvelle-Guinée, et des affinités moindres avec la Malaisie, l'Asie, Fidji et les Nouvelles-Hébrides (Morat *et al.* 1994, Morat *et al.* 1995).

Désormais, il semble acquis que la submersion du socle calédonien et de la ride de Norfolk ait été totale (Pelletier 2006). De plus, les connaissances acquises en phylogénie moléculaire (Bartish *et al.* 2005, Setoguchi *et al.* 1998, Swenson *et al.* 2001) plaident en faveur d'un peuplement post-Éocène de la Nouvelle-Calédonie (Grandcolas *et al.* 2008, Murielle *et al.* 2005), correspondant à la phase d'émergence du manteau péridotitique.

Le peuplement des substrats ultramafiques, comme celui de l'ensemble de l'archipel, se serait donc fait, depuis moins de 37 millions d'années, à partir d'espèces transportées à grandes distances, provenant des terres plus ou moins éloignées, dont certaines d'origine gondwanienne, comme l'Australie, n'ayant pas subi de submersion totale. En revanche, les flores gondwaniennes sur leurs terres d'origine ont été l'objet d'extinctions d'espèces au cours des périodes glaciaires. Celles-ci ont eu moins d'effet sur la flore de la Nouvelle-Calédonie, qui aurait gardé durant le Pléistocène des zones forestières refuges (Pintaud *et al.* 2001), permettant la conservation des taxa d'origine gondwanienne.

La flore importée, qui pour s'installer sur substrats ultramafiques devait posséder des caractéristiques de nutrition particulières, a ensuite subi une importante diversification, résultant de processus de spéciation par radiation adaptative. Ainsi s'expliquent la sélection et l'enrichissement d'une flore spécialisée sur ces substrats. Les phénomènes d'endémisme au sein de cette flore se sont trouvés accentués par la fragmentation des massifs de roches ultramafiques et par la diversification des conditions édaphiques résultant des évolutions géomorphologiques et pédologiques (Jaffré 1980, Jaffré *et al.* 1987, Pintaud & Jaffré 2001, Schmid 1982).

Le rôle de filtre joué par les substrats ultramafiques, en raison de leur nature particulière, a aussi, à une époque plus récente, protégé cette flore spécialisée de la concurrence des espèces introduites invasives (graminées diverses, *Lantana camara*, *Psidium guajava*, *Leucaena leucocephala*, etc.), inaptes (le pin des Caraïbes faisant exception) à se développer sur de tels substrats (Jaffré 1980, Morat *et al.* 1986). Le contraire a eu lieu sur roches sédimentaires, conduisant à l'installation de la savane et de fourrés secondaires, caractérisés par une flore banale et appauvrie (Jaffré *et al.* 1994^b, Jaffré *et al.* 2001^c).

2. LES FORMATIONS VÉGÉTALES

Elles sont regroupées en deux formations principales, l'une arborescente appartenant à la forêt dense humide, et l'autre, incluant l'ensemble des groupements non forestiers, appelés localement « maquis des terrains miniers » (figure 3.36). À ces derniers peuvent être rattachés les groupements végétaux des zones humides du sud de la Grande Terre (Jaffré 1980, Morat *et al.* 1981).



Figure 3.36 : Reliques de forêts (dans talwegs) et maquis, région de Yaté.

© IRD / C. Grignon

L'étendue des forêts et des maquis a varié au cours des époques géologiques. Des incendies d'origine naturelle ont très probablement sévi durant des millions d'années, favorisant des épisodes d'extension des formations héliophiles (maquis) et d'une flore associée, au détriment des forêts. Si cela reste une hypothèse tout à fait vraisemblable pour les temps les plus anciens, des études palynologiques sur des sédiments lacustres, datant du Pléistocène (40 000 ans BP) (Hope & Pask 1986), ont bien mis en évidence, dans le massif du Sud, l'existence de plusieurs épisodes de destruction de forêts par des incendies, suivis de leur reconstitution au bout de plusieurs siècles.

2.1. Les forêts denses humides

2.1.1. Généralités

Ce sont les formations végétales les plus complexes et les plus diversifiées. Les différentes strates de la forêt constituent une variété d'habitats pour la flore des plantes non vasculaires (mousses, lichens, champignons), ainsi que pour la faune. Elles se développent dans des zones recevant en moyenne entre 1 500 et 5 000 mm de pluie par an et ont été classées en fonction de l'altitude en deux grandes catégories : les forêts denses humides de basse et de moyenne altitude et les forêts denses humides d'altitude (Morat *et al.* 1981) (figures 3.37 et 3.38). Comme une étude récente l'a montré sur roches sédimentaires (Jaffré *et al.* 2008), il conviendrait aussi vraisemblablement de définir, en fonction des conditions climatologiques et hydriques, une catégorie « forêt mésophile » au sein de l'ensemble « forêts denses humides de basse altitude » sur roches ultramafiques.



Figure 3.37 : Forêt de Saille (Thio).

© IRD / C. Grignon



Figure 3.38 : Forêt du Ningua (Thio).

© IAC / L. L'Huillier

Bien que son extension exacte ne soit pas connue, il est vraisemblable que la forêt dense humide constituait la formation végétale la plus répandue sur tous les massifs miniers avant l'arrivée de l'homme (3 500-4 000 ans). Ces forêts initiales ont fortement

reculé sous l'action des incendies répétés d'origine anthropique, qui sévissent régulièrement au cours des années sèches. Plus récemment, les reliques forestières des talwegs, naturellement protégées des feux, ont aussi régressé à cause du stockage préférentiel des stériles miniers dans ces zones (figure 3.39). Localement, les forêts rivulaires de basse altitude, qui avaient survécu aux incendies, ont été détruites par l'effet conjugué de l'engrèvement du lit des rivières par des déblais miniers des exploitations anciennes et de l'aggravation des crues, les débits hydriques des cours d'eau n'étant plus régulés par un couvert végétal suffisant des reliefs (Bird *et al.* 1984, Dupon 1986).

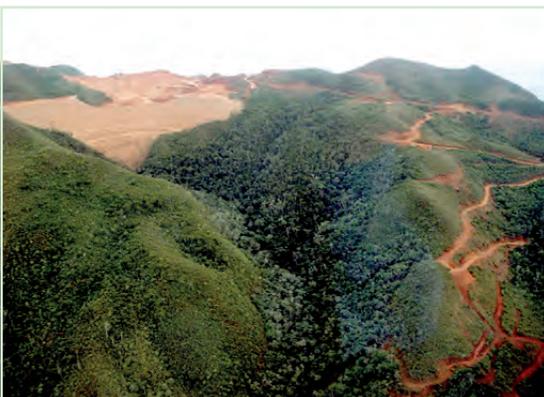


Figure 3.39 : Verse K10 sur le Kopéto : l'extension prévue en aval de cette verse n'a pas été réalisée pour épargner un des tout derniers fragments de forêt à caractère primaire sur le massif.

© IRD / T. Jaffré

Les forêts denses sur substrats ultramafiques et tout particulièrement celles situées à basse et à moyenne altitude, qui ont le plus fortement régressé, font actuellement partie des écosystèmes les plus menacés de Nouvelle-Calédonie. Leur réduction et leur fragmentation extrême, qui ont été probablement accompagnées d'extinctions brutales d'espèces ou de populations d'espèces animales et végétales, sont de nature à entraîner aujourd'hui une perte de la biodiversité globale forestière par érosion génétique des espèces réparties en petites populations isolées (figures 3.40 et 3.41). En effet, les populations d'espèces à effectifs trop réduits pour assurer la pérennité de leur intégrité génétique au travers de leurs descendances sont susceptibles de subir une perte de vitalité et de capacité d'adaptation, se traduisant par un dépérissement progressif à chaque nouvelle génération. De tels phénomènes ont été mis en évidence, en Nouvelle-Calédonie, chez *Araucaria nemorosa* (Kettle *et al.* 2007, 2008). Davantage d'études génétiques populationnelles seraient nécessaires pour identifier et analyser l'ampleur des phénomènes d'érosion génétique au sein des forêts sur les différents massifs miniers (cf. encadré de L. Maggia en fin de chapitre).



Figure 3.40 : Relique de forêt de talweg.

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.41 : Relique de forêt d'*Arillastrum gummiferum*.

© IAC / L. L'Huilier

Les forêts denses humides sur roches ultramafiques rassemblent environ 1 380 espèces de plantes vasculaires dont 82 % sont endémiques de la Nouvelle-Calédonie (Jaffré *et al.* 2009^{ab}). Elles constituent la formation végétale la plus riche en espèces par unité de surface. Des moyennes de 209 et de 138 espèces de phanérogames, par parcelle de 0,25 ha, ont été respectivement enregistrées dans la forêt sur pente et sur alluvions dans le parc provincial de la rivière Bleue (Jaffré & Veillon 1990), tandis que moins de 55 espèces sont recensées, pour une même superficie, dans les différentes catégories de maquis voisins.

De même que dans la flore forestière totale de l'archipel, les familles des Orchidaceae, Rubiaceae, Euphorbiaceae *sensu lato*, Myrtaceae et Apocynaceae sont, avec plus de 50 espèces chacune, parmi les plus riches des forêts sur terrains miniers. Quelques groupes sont assez nettement sur-représentés sur ce substrat par rapport à leur importance dans la flore forestière totale de l'archipel, ce sont les gymnospermes (toutes familles confondues), ainsi que les familles des Euphorbiaceae et des Myrtaceae. L'inverse s'observe notamment pour les Fabaceae, Moraceae, Pandanaceae, Primulaceae, Rubiaceae et Sapindaceae. Toutefois de nombreuses familles, comprenant les Apocynaceae, Araliaceae *sensu lato*, Cunoniaceae, Ebenaceae, Elaeocarpaceae, Lauraceae, Palmae, Proteaceae, Salicaceae, Sapotaceae, Rutaceae, ainsi que les fougères arborescentes (Cyatheaceae et Dicksoniaceae) ont sensiblement le même nombre d'espèces sur les deux catégories de substrats (Jaffré *et al.* 1997^b).

Les différences dans la distribution des familles sur terrains miniers et sur autres substrats apparaissent ainsi moins importantes entre les flores forestières qu'entre les flores totales. Ces résultats témoignent d'une atténuation en forêt des différences entre les deux catégories de milieux (Jaffré 1996).

Les forêts sur roches ultramafiques abritent plusieurs espèces renommées en raison de leur biologie originale. Ce sont *Parasitaxus usta*, le seul conifère parasite connu (Feild & Brodribb 2005), *Cerberiopsis candelabra*, une des très rares espèces monocarpiques du groupe des dicotylédones (Veillon 1971, Read *et al.* 2006^b, 2008), *Daenikera corallina* (Santalaceae), parasite racinaire du genre *Amphorogyne* (autre Santalaceae) (Schmid 1981) (figures 3.42 à 3.44), plusieurs espèces fortement accumulatrices de nickel (appartenant parfois à des genres partagés avec le maquis), au sein des genres *Geissois* (Jaffré *et al.* 1979^a), *Homalium*, *Xylosma* (Jaffré *et al.* 1979^b), *Hybanthus*, *Psychotria* (Jaffré & Schmid 1974), *Phyllanthus* (Kersten *et al.* 1979), *Argophyllum*, *Baloghia*, *Pancheria* (Jaffré 1980), *Pycnandra (ex-Sebertia)* (Jaffré *et al.* 1976), ou accumulatrices de manganèse (Mn > 5 000 ppm), appartenant aux genres *Alyxia*, *Maytenus* (Jaffré 1978, Fernando *et al.* 2008), *Gossia*, *Grevillea*, *Virotia* (Jaffré 1979), *Beaupreopsis*, *Exocarpos*, *Garcinia* (Jaffré 1980), *Apiopetalum*, *Pancheria* et *Polyscias* (Jaffré 1980 et non publié).



Figure 3.42 : *Parasitaxus usta* (Podocarpaceae).

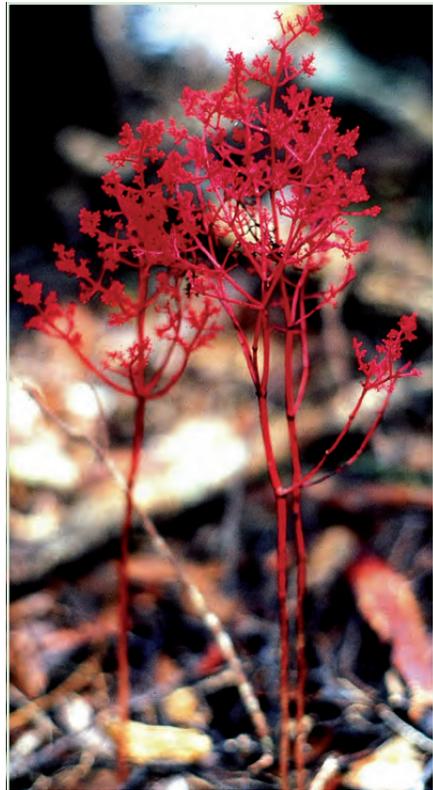


Figure 3.43 : *Daenikera corallina* (Santalaceae).

Les forêts denses des terrains miniers, qui ont été largement exploitées, notamment dans le massif du Sud, renferment de nombreuses espèces de bois d'œuvre (tableau 3.2), dont le kaori (figure 3.45) .

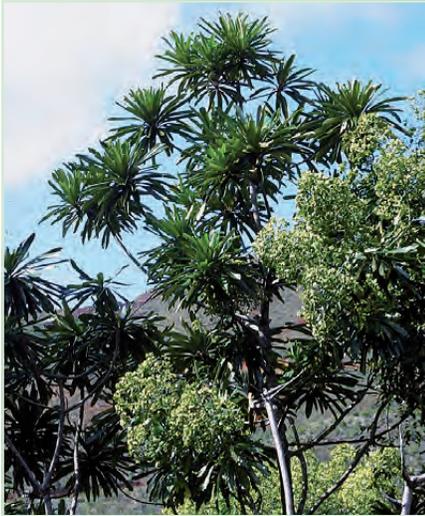


Figure 3.44 : *Cerberiopsis candelabra* (Apocynaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.45 : Kaori *Agathis lanceolata* (Araucariaceae) (Kouakoué, 400 m).

© IRD / F. Rigault

Tableau 3.2 : Espèces de bois d'œuvre des forêts sur substrats ultramafiques.
(D'après Cherrier 1983, Jaffré *et al.* 1994^b, Sarlin 1954)

Espèces	Familles	Noms communs
<i>Agathis lanceolata</i>	Araucariaceae	kaori
<i>Alphitonia neocaledonica</i>	Rhamnaceae	pomaderris
<i>Apodites clusiifolia</i>	Icacinaceae	faux ralia
<i>Araucaria</i> spp.	Araucariaceae	araucarias
<i>Archidendrops granulosa</i>	Fabaceae	acacia noir
<i>Arillastrum gummiferum</i>	Myrtaceae	chêne gomme
<i>Calophyllum caledonicum</i>	Clusiaceae	tamanou
<i>Canarium oleiferum</i>	Burseraceae	bois absinthe
<i>Carpolepis laurifolia</i>	Myrtaceae	faux teck
<i>Cryptocrya macrocarpa</i>	Lauraceae	fausse citronnelle
<i>Cryptocarya transversa</i>	Lauraceae	moustiquaire
<i>Dysoxylum rufescens</i>	Meliaceae	phatea
<i>Flindersia fourneri</i>	Rutaceae	chêne blanc
<i>Gastrolepis austrocaledonica</i>	Stemonuraceae	thi
<i>Hernandia cordigera</i>	Hernandiaceae	bois bleu
<i>Neoguillauminia cleopatra</i>	Euphorbiaceae	faux noyer
<i>Planchonella wakere</i>	Sapotaceae	yayouc
<i>Pycnandra acuminata (ex-Sebertia)</i>	Sapotaceae	sève bleue
<i>Pycnandra balansae (ex-Niemeyera)</i>	Sapotaceae	marronnier
<i>Retrophyllum comptonii</i>	Podocarpaceae	podocarpe
<i>Schefflera</i> spp.	Araliaceae	ralias
<i>Sloanea montana</i>	Elaeocarpaceae	(sloanea)
<i>Storckiella pancheri</i>	Leguminosae	frêne
<i>Syzygium</i> spp.	Myrtaceae	goyas
<i>Syzygium wagapense</i>	Myrtaceae	bois barre à mine

2.1.2. Les forêts denses humides de basse et de moyenne altitude

Elles se développent en dessous de 800-1 000 m d'altitude dans des zones recevant des précipitations annuelles moyennes comprises entre 1 500 et 3 500 mm (figures 3.46 à 3.48). Elles ont une hauteur comprise généralement entre 15 et 25 m. Elles ne subsistent le plus souvent qu'au-dessus de 500 m d'altitude, sur des sommets, des flancs escarpés de montagnes. En dessous de 500 m, elles couvrent rarement des versants entiers, restant localisées aux talwegs et hauts versants, dont les sols ferrallitiques plus ou moins érodés ou colluvionnés sont souvent recouverts d'éboulis rocheux, ainsi qu'à quelques secteurs privilégiés, bien exposés aux alizés ou le long des cours d'eau (Morat *et al.* 1981). Le sous-bois est généralement riche en palmiers et Pandanaceae (figures 3.47 à 3.49).



© IRD / C. Grignon

Figure 3.46 : Sous-bois de la forêt de Yaté, barrage.



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.47 : Sous-bois de la forêt de la rivière Bleue.



© IRD / C. Grignon

Figure 3.48 : Sous-bois de forêt galerie (Sud).



© IRD / C. Grignon

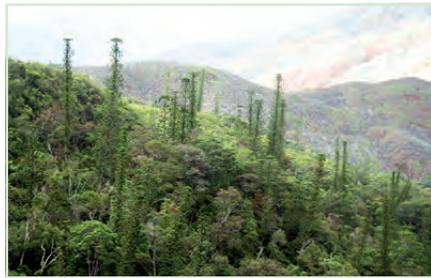
Figure 3.49 : *Pandanus balansae* (Pandanaceae).

Ces forêts constituent un ensemble dont la composition floristique varie en fonction de la situation topographique, de la pluviométrie, de la nature du sol et du degré de secondarisation, amenant à distinguer de nombreuses catégories (Barrabé 2005, Grignon 2006, Grignon *et al.* 2009, Jaffré & Veillon 1990, Jaffré *et al.* 2001^a, Jaffré *et al.* 2004, Munzinger *et al.* 2007, 2008^a, Oddi 2004). De plus, certaines espèces, par leur abondance (*Arillastrum gummiferum* ou « chène gomme »), par leurs floraisons spectaculaires (*Metrosideros nitida*, aux floraisons écarlates), par leur aptitude à former des peuplements à strate arborescente monospécifique (*Cocconerion* spp., *Gymnostoma* spp., *Dacrydium balansae*, *Nothofagus* spp.) ou par leur port caractéristique (*Agathis* spp., *Araucaria* spp., *Cerberiopsis candelabra*), créent autant de faciès particuliers assez représentatifs des forêts sur terrains miniers (Jaffré 1980, Jaffré *et al.* 2004, Morat *et al.* 1981, Papineau 1989, Read *et al.* 1995, 2000, Schmid 1981, Virot 1956) (figures 3.50 à 3.54).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.50 : Forêt dominée par *Metrosideros nitida* (Myrtaceae).



© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.51 : Forêt dominée par *Araucaria bernieri* (Araucariaceae).



© CIRAD-IAC / M. Ducousso

Figure 3.52 : Forêt à *Nothofagus codonandra* (Nothofagaceae).



© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.53 : Forêt à *Arillastrum gummiferum* (Myrtaceae).



© IRD / F. Rigault

Figure 3.54 : Forêt à *Agathis lanceolata* (Araucariaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.55 : Forêt littorale (Grand Sud).

Les forêts de talwegs demeurent les plus fréquentes, mais occupent le plus souvent des surfaces limitées à quelques hectares ou dizaines d'hectares. Les forêts sur sols bruns hypermagnésiens, les forêts des plateaux ferrallitiques gravillonnaires ou cuirassés, celles de piedmonts ou sur alluvions, ainsi que les forêts littorales (figure 3.55), toutes initialement moins étendues que les forêts de pentes et de talwegs, sont aujourd'hui très localisées et réduites.

En raison de leur caractère résiduel et de leur extrême fragmentation, les forêts des terrains miniers dans leurs ensemble nécessiteraient des mesures de protection et de restauration. Ces dernières viseraient à reconstituer des massifs forestiers plus étendus, ainsi qu'à créer des corridors forestiers reliant les reliques de forêts entre elles. Le but étant de constituer des unités forestières plus vastes, régulant mieux les débits hydriques et abritant des populations d'espèces végétales et animales associées, de taille viable.

2.1.3. Les forêts denses humides d'altitude



© IRD / C. Grignon

Figure 3.56 : Forêt d'altitude (pente du mont Humboldt, 1 250 m).

Elles se développent le plus souvent au-dessus de 900-1 000 m, dans des zones recevant des précipitations généralement supérieures à 3 500 mm par an, mais se trouvent aussi à partir de 700-800 m, notamment sur la façade orientale, la plus arrosée. Il s'agit de forêts basses (de 8 à 15 m), fréquemment surcimées par des espèces du genre *Araucaria* et passant souvent de manière imperceptible à des maquis hauts (figures 3.56 et 3.57).



Figure 3.57 : Forêt dense humide d'altitude (Kouakoué).

© IRD / C. Grignon

La flore est marquée par l'abondance des ptéridophytes, des conifères (*Acropyle*, *Callitris*, *Dacrydium*, *Libocedrus*, *Podocarpus*) et des espèces des genres *Metrosideros* (Myrtaceae) et *Cunonia* (Cunoniaceae), ainsi que par la présence de plusieurs espèces altimontaines appartenant à des familles variées : *Platyspermation crassifolium* (Alseuosmiaceae), *Apiopetalum velutinum* (Apiaceae), *Hibbertia baudouinii* (Dilleniaceae), *Endiandra neocaledonica* (Lauraceae), *Freycinetia* spp. (Pandanaceae), *Paracryphia alticola* (Paracryphiaceae), *Phelline* spp. (Phellinaceae), *Strasburgeria robusta* (Strasburgeriaceae) (Nasi et al. 2002) (figures 3.58 à 3.61)...



Figure 3.58 : *Platyspermation crassifolium* (Alseuosmiaceae).

© IRD / T. Jafré



Figure 3.59 : *Freycinetia* sp. (Pandanaceae).

© IRD / C. Grignon



Figure 3.60 : *Paracryphia alticola* (Paracryphiaceae).

© IRD / J. Munzinger



Figure 3.61 : *Strasburgeria robusta* (Strasburgeriaceae).

© CIRAD-IAC / M. Ducouso et IRD / L. Barrabé

L'accentuation de certains caractères de ces forêts, liée en partie aux conditions microclimatiques (stagnation des masses nuageuses), crée un faciès original, la « forêt à mousses », dite « forêt à mousse » (Jaffré 1980) (figures 3.62 à 3.64). D'une hauteur de l'ordre de 6 à 10 m, celle-ci se caractérise par un appauvrissement de la flore phanérogamique au profit d'une flore cryptogamique. La flore phanérogamique comprend des épiphytes (nombreuses Orchidaceae et *Astelia neocaledonica* de la famille des Asteliaceae) et des espèces ligneuses appartenant notamment aux genres *Metrosideros* (Myrtaceae), *Dracophyllum* (Ericaceae), *Quintinia* (Paracryphiaceae), *Weinmania* (Cunoniaceae), *Freycinetia* (Pandanaceae). Les lichens, bryophytes et Hymenophyllaceae, appartenant à de nombreuses espèces encore mal inventoriées, recouvrent les troncs et les branches des arbres, ainsi que le sol. Celui-ci est un ranker organique, d'une épaisseur de plusieurs dizaines de centimètres, reposant le plus souvent directement sur le substrat rocheux peu altéré (Latham 1975^a).



Figure 3.62 : « Forêt à mousses » (mont Humboldt).

© IRD / C. Grignon



Figure 3.63 : « Forêt à mousses » (mont Humboldt).

© IRD / C. Grignon



Figure 3.64 : Détail de « forêt à mousses », avec *Astelia neocaledonica* (Asteliaceae) (mont Humboldt).

© IRD / C. Grignon

2.2. Les maquis miniers

2.2.1. Généralités

Ils regroupent un ensemble de groupements végétaux à strate dominante inférieure à 5-6 m, sclérophylles (à feuilles dures et coriaces), sempervirents (dont les feuillages ne se renouvellent pas simultanément à une époque de l'année) et héliophiles (de pleine lumière) (figure 3.65). Ils présentent une grande variété physiologique structurale et floristique, sont parfois dominés par une strate lâche d'*Araucaria* ou d'*Agathis ovata* (figures 3.66 à 3.68) et possèdent de nombreuses formes de transition avec la forêt. Ils se développent du bord de mer, dans les zones les plus sèches de la côte ouest, aux plus hauts sommets (1 618 m) recevant plus de 3 000 mm de pluie par an. La grande majorité d'entre eux résultent de la destruction de la forêt par des incendies répétés et représentent des stades variés de la succession secondaire post-incendie (Barrière *et al.* 2007, 2008, Dagostini *et al.* 1997, Enright *et al.* 2001, Jaffré 1974, 1980, Jaffré *et al.* 1994^b, Jaffré *et al.* 2003, Morat *et al.* 1986, Virot 1956).



Figure 3.65 : Maquis minier (Dzumac, 850 m).



Figure 3.66 : Maquis arbustif dominé par *Araucaria rulei* (Poro).



Figure 3.67 : Maquis ligno-herbacé dominé par *Agathis ovata* (Dzumac).



Figure 3.68 : Maquis dégradé surcîmé par *Araucaria montana* (Koniambo).

Seuls quelques maquis des zones exposées à haute altitude et des zones côtières les plus sèches de la côte ouest pourraient être des formes dégradées par le feu de maquis primaires (Jaffré 1980). Ces derniers pouvant être aussi assimilés à des « forêts sèches rabougries », résultant de mauvaises conditions d'alimentation minérale qui viennent s'ajouter, sur sols bruns hypermagnésiens de la base des massifs, aux mauvaises conditions d'alimentation hydrique (Jaffré 2003). C'est le cas de certains « maquis littoraux » tels que ceux de Vavouto, Gatope, cap Deverd, Tinip, Paagoumène (figures 3.69 et 3.70)...



Figure 3.69 : Maquis de zone aride sur sol brun hypermagnésien (Vavouto).



Figure 3.70 : *Austrobuxus carunculatus* (Picodendraceae), vestige d'une végétation forestière basse, « maquis » ou « forêt sèche rabougrie » sur serpentinites (Vavouto).

L'ensemble des maquis, occupant plus de 80 % des terrains miniers, rassemble environ 1 140 espèces de plantes vasculaires, dont le taux d'endémisme est de 89 %. La richesse stationnelle calculée sur des parcelles homogènes de 0,1 hectare est très variable, allant de 35 espèces pour un maquis buissonnant à *Tristaniopsis guillainii* sur sol gravillonnaire du massif du Boulinda à 118 espèces pour un maquis haut sur sol brun hypermagnésien de la vallée de la Tontouta (Jaffré 1992).

Parmi les familles les plus caractéristiques du maquis minier, dont les principales sont traitées en détail dans le chapitre 7, figurent, par nombre décroissant d'espèces, les Myrtaceae avec plus de 130 espèces, suivies, avec environ 100 espèces, par les Euphorbiaceae *sensu lato* (incluant 57 espèces du genre *Phyllanthus* et 9 espèces de la famille des Picodendraceae), puis, avec plus de 50 espèces, les Rubiaceae, Apocynaceae, Cunoniaceae, Rutaceae, et enfin, avec plus de 20 espèces, les Orchidaceae, Sapotaceae, Fabaceae, Proteaceae, Salicaceae, Araliaceae, Sapindaceae, Dilleniaceae, Lauraceae et Pittosporaceae. À ces familles principales il convient d'ajouter quelques autres (Ericaceae, Celastraceae, Casuarinaceae, Argophyllaceae, Thymelaeaceae, Simaroubaceae et Santalaceae), moins fournies en espèces, mais parfois très caractéristiques en raison de la forte proportion de leurs espèces, certaines très abondantes, inféodées aux maquis miniers (Jaffré 1980, Jaffré *et al.* 2009^b).

La famille des Poaceae, habituelle des végétations ouvertes, est très faiblement représentée dans les maquis miniers, dont la composante herbacée est constituée principalement de Cyperaceae. Toutefois trois espèces du genre endémique *Greslania* (sous-famille des Bambuseae ou bambous) sont fréquentes dans certains maquis du massif du Sud et quelques espèces appartenant aux genres *Aristida*, *Cymbopogon*, *Schizachyrium* et *Setaria* se rencontrent dans des maquis de basse altitude sur serpentinites.

Du point de vue phytogéographique, les affinités floristiques (évaluées à partir d'un indice basé sur la distribution géographique des genres) de la flore des maquis avec l'Australie sont encore plus accentuées que celles observées pour la flore totale de la Nouvelle-Calédonie. Cela pourrait tenir à une certaine parenté entre les flores sclérophyllées des maquis calédoniens et des « heathlands » sur sols pauvres d'Australie (Morat *et al.* 1986, Morat *et al.* 1994).

Bien que d'origine secondaire, les maquis ont une flore originale (89 % d'endémisme) et ne contiennent pas, contrairement aux végétations secondaires sur les autres substrats géologiques, d'espèces introduites (graminées diverses, *Lantana camara*, *Leucaena leucocephala*, *Psidium guajava*, etc.). Cela est lié aux caractéristiques particulières des substrats ultramafiques, qui jouent le rôle de barrière écologique vis-à-vis des espèces non adaptées aux conditions édaphiques de ces substrats (Jaffré 1980).

Les maquis miniers, décrits ci-après, sont classés sur une base physionomique et pédologique en quatre grands groupements sur sols bien drainés, complétés par un cinquième sur sols hydromorphes (Jaffré 1980).

2.2.2. Les maquis arbustifs, à strate herbacée réduite, sur sols bruns hypermagnésiens



Figure 3.71 : Maquis arbustif sur sol brun hypermagnésien (Poro).

© IRD / T. Jaffré.

Ils sont situés le plus souvent en dessous de 350 m d'altitude, possèdent une flore diversifiée et spécialisée, formée d'espèces qualifiées de « magnésicoles » (adaptées aux fortes concentrations du sol en magnésium), qui doivent aussi résister à des déficits hydriques sévères en période sèche à cause de la faible épaisseur et de la forte rétention en eau du sol (figure 3.71).

Les espèces les plus caractéristiques, qui diffèrent selon les zones géographiques et les conditions microclimatiques liées au relief environnant et à l'altitude, comprennent : *Alstonia deplanchei*, *Cerberiopsis obtusifolia*, *Ochrosia mulsantii* (Apocynaceae), *Deplanchea sessilifolia* (Bignoniaceae), *Gahnia aspera*, *Fimbristylis ovata* (Cyperaceae), *Hibbertia deplancheana* (Dilleniaceae), *Diospyros revolutissima* (Ebenaceae), *Austrobuxus carunculatus*, *Baloghia drimiflora*, *Cleistanthus stipitatus*, *Longetia buxoides*, *Phyllanthus montrouzieri*, *P. peltatus*, *P. poumensis* (Euphorbiaceae sensu lato), *Archidendropsis lentiscifolia*, *Arthroclianthus* spp., *Cassia artensis*, *Storckiella pancheri* ssp. *pancheri* (Fabaceae), *Xanthostemon carlii*, *X. multiflorus*, *X. pubescens* (Myrtaceae), *Pittosporum collinum*, *P. croceum*, *P. poumense* (Pittosporaceae), *Grevillea meisneri*, *Stenocarpus milnei* (Proteaceae), *Bikkia artensis*, *Cyclophyllum deplanchei*, *Morinda deplanchei*, *Psychotria calorhamnus*, *Tarenna microcarpa* (Rubiaceae), *Oxanthera neocaledonica*, *Zanthoxylum pancheri* (Rutaceae), *Planchonella contermina*, *Pycnandra deplanchei*, *Pycnandra filipes* (Sapotaceae), *Soulamea muelleri*, *S. pancheri* (Simaroubaceae) (figures 3.72 à 3.79)...



Figure 3.72 : *Cerberiopsis obtusifolia* (Apocynaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.73 : *Deplanchea sessilifolia* (Bignoniaceae).

© CIRAD-IAC / M. Ducouso



Figure 3.74 : *Archidendropsis lentiscifolia* (Fabaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.75 : *Arthroclianthus* sp. (Fabaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.76 : *Storckiella pancheri* ssp. *pancheri* (Fabaceae).

© CIRAD-IAC / M. Ducouso



Figure 3.77 : *Grevillea meisneri* (Proteaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.78 : *Cyclophyllum deplanchei* (Rubiaceae).

© CIRAD-IAC / M. Ducouso



Figure 3.79 : *Oxanthera neocaledonica* (Rutaceae).

© IRD / T. Jaffré

Ces maquis peuvent être subdivisés en plusieurs unités selon le degré d'anthropisation, qui se traduit par une plus grande ouverture du couvert végétal ou par la dominance d'espèces grégaires à caractère invasif (*Acacia spirorbis*, *Casuarina collina*, *Croton insularis*).

Les maquis des zones les plus sèches se distinguent aussi par une flore plus spécialisée (Jaffré 2003), tandis que ceux des zones moins arides, souvent rivulaires, portent des maquis hauts fréquemment dominés par *Gymnostoma chamaecyparis* (figure 3.80).



Figure 3.80 : Groupement à *Gymnostoma chamaecyparis* (Casuarinaceae), sur sol brun hypermagnésien (Tontouta).

© IAC / L. L'Huillier

Les maquis arbustifs sur sols bruns hypermagnésiens sont les plus riches en espèces, les plus originaux et les plus diversifiés (Jaffré 1980), et possèdent le plus grand nombre d'espèces à distribution restreinte. La basse vallée de la Tontouta, avec un total de 438 espèces dont 252 endémiques et 17 endémiques locales, en est une illustration (Jaffré *et al.* 2003).

Ces maquis ne sont pas directement touchés par l'extraction minière, mais le sont de manière indirecte (ouverture de routes, implantation d'infrastructures industrielles et urbaines). Ils ont également régressé sous l'effet des incendies répétés, qui les ont largement transformés en maquis floristiquement appauvris dominés par des espèces grégaires (*Acacia spirorbis*, *Croton insularis*, *Rhamnella vitiensis*...).

2.2.3. Les maquis ligno-herbacés sur sols ferrallitiques remaniés par érosion ou colluvionnement



Figure 3.81 : Maquis ligno-herbacé (pic du Pin).

© IRD / T. Jaffré



© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.82 : Maquis ligno-herbacé (Kopéto).

Ils sont les plus communs et ont, à la même altitude, une composition floristique relativement homogène sur l'ensemble des massifs. Ils résultent de l'impact des feux répétés, et s'apparentent souvent, du point de vue physiognomique, à de la « savane cyperacéenne arbustive » (figures 3.81 et 3.82). La strate herbacée est formée de Cyperaceae cespiteuses des genres *Costularia* et *Schoenus*, et de *Lepidosperma perteres*, possédant des rhizomes, qui devient abondante après le passage du feu. Lorsque les feux sont répétés, il y a prolifération de la fougère aigle (*Pteridium esculentum*), dont l'abondance traduit un stade de dégradation extrême du maquis qui prend l'allure d'une lande et peut être qualifié de « maquis landiforme ». La strate arbustive est constituée d'espèces héliophiles, dont la majorité rejette de souche après le passage du feu. C'est le cas notamment de *Perypterygia marginata* (Celastraceae), *Garcinia amplexicaulis*, *Montrouzieria spharoides* (Clusiaceae), *Codia nitida*, *C. spatulata*, *Cunonia macrophylla*, *Pancheria alaternoides*, *P. ferruginea* (Cunoniaceae), *Hibbertia pulchella*, *H. trachyphylla* (Dilleniaceae), *Cloezia artensis*, *Tristaniopsis glauca* (Myrtaceae), *Grevillea exul* (Proteaceae)... Un plus petit nombre d'espèces, comprenant *Styphelia cymbulae*, *Cyathopsis floribunda*, *Dracophyllum ramosum* (Ericaceae), *Myodocarpus* spp., *Polyscias dioiscus* (Araliaceae), et plusieurs Cyperaceae cespiteuses des genres *Costularia* et *Schoenus* se renouvellent seulement à partir de semences (Jaffré *et al.* 1998^b) (figures 3.83 à 3.85).



© CIRAD-IAC / M. Durcouso

Figure 3.83 : *Montrouzieria spharoides* (Clusiaceae).

© IRD / Y. Pillon

Figure 3.84 : *Pancheria alaternoides* (Cunoniaceae).

© IRD / C. Grignon

Figure 3.85 : *Dracophyllum ramosum* (Ericaceae).

Sur les crêtes et les pentes escarpées, les conditions édaphiques très défavorables, associant pauvreté du sol, risque de toxicité en Ni et déficit hydrique, favorisent l'installation d'un maquis plus spécialisé. Il se caractérise par la présence d'un cortège floristique composé notamment de *Costularia pubescens*, *Schoenus juvenis*, *S. neocaledonicus* (Cyperaceae), *Cyathopsis albicans*, *C. floribunda* (Ericaceae), *Ficus asperula* (Moraceae), *Melaleuca dawsonii*, *Myrtastrum rufo-punctatum* (Myrtaceae) et *Normandia neocaledonica* (Rubiaceae) (figures 3.86 à 3.89).



Figure 3.86 : *Cyathopsis albicans* (Ericaceae).

© IAC / L. L'Huilier



Figure 3.87 : *Melaleuca dawsonii* (Myrtaceae).

© IAC / L. L'Huilier



Figure 3.88 : *Myrtastrum rufo-punctatum* (Myrtaceae).

© IAC / L. L'Huilier



Figure 3.89 : *Normandia neocaledonica* (Rubiaceae).

© IAC / L. L'Huilier

Les maquis ligno-herbacés, qui se sont largement étendus, au détriment de la forêt, depuis l'arrivée de l'homme, constituent aujourd'hui la composante la plus vaste, mais également la moins diversifiée de l'ensemble des maquis miniers de basse et de moyenne altitude. Leur devenir se pose en termes de possibilité d'évolution vers des groupements plus denses. Il serait vraisemblablement possible de les faire évoluer par des apports d'espèces locales améliorantes. Ces espèces sont à rechercher parmi celles retenues pour la restauration des sites miniers dégradés (chapitre 7).

Un faciès altitudinal des divers maquis miniers se développe au-dessus de 900-1 000 m dans des zones recevant des précipitations annuelles moyennes supérieures à 3 500 mm (figures 3.90 et 3.91). Il se distingue principalement par la présence d'espèces altimontaines incluant : *Apiopetalum velutinum* (Apiaceae), *Myodocarpus crassifolius* (Araliaceae), *Montrouzieria verticillata* (Clusiaceae), *Codia albifrons*, *Cunonia alticola*, *C. bullata*, *C. pseudoverticillata*, *C. rotundifolia*, *Pancheria humboldtiana*, *P. multijuga* (Cunoniaceae), *Libocedrus chevalieri* (Cupressaceae), *Hibbertia altigna*,



Figure 3.90 : Maquis d'altitude (Humboldt).

© IRD / C. Grignon.



Figure 3.91 : Maquis d'altitude (Humboldt, 1600 m).

© IRD / F. Rigault

H. nana (Dilleniaceae), *Dracophyllum alticola*, *D. mackeeanum* (Ericaceae), *Logania imbricata* (Loganiaceae), *Metrosideros humboldtiana*, *M. tetrasticha* (Myrtaceae), *Earina deplanchei* (Orchidaceae), *Greslania circinata*, *G. montana* (Poaceae), *Beauprea montisfontium*, *Beaupreopsis paniculata*, *Eucarpha deplanchei* (Proteaceae), *Bikkia pachyphylla* (Rubiaceae), *Soulamea pelletieri* (Simaroubaceae), *Xeronema moorei* (Xeronemataceae), *Xyris pancheri* (Xyridaceae) (figures 3.92 à 3.99)... Cette catégorie de maquis ainsi que les forêts d'altitude, dont l'ensemble occupe moins de 350 km², avec environ 250 km² dans le seul massif du Sud, possèdent une flore très originale et renferment de nombreuses espèces à distribution restreinte inscrites sur la liste rouge des espèces menacées de l'IUCN (Jaffré *et al.* 1998^a, Munzinger *et al.* 2008^b).



Figure 3.92 : *Codia albifrons* (Cunoniaceae).

© IRD / Y. Pillon



Figure 3.93 : *Cunonia rotundifolia* (Cunoniaceae).

© IRD / C. Grignon



Figure 3.94 : *Libocedrus chevalieri* (Cupressaceae).

© IRD / F. Rigault



Figure 3.95 : *Metrosideros humboldtiana* (Myrtaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.96 : *Metrosideros tetrasticha* (Myrtaceae).

© IRD / F. Rigault



Figure 3.97 : *Beuprea montisfontium* (Proteaceae).

© IRD / F. Rigault

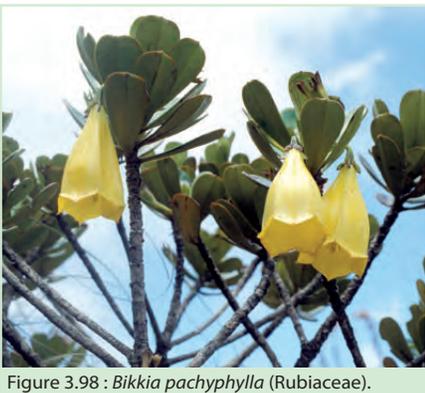


Figure 3.98 : *Bikkia pachyphylla* (Rubiaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.99 : *Xeronema moorei* (Xeronemataceae).

© IRD / T. Jaffré

2.2.4. Les maquis arbustifs à buissonnants sur sols ferrallitiques gravillonnaires ou cuirassés



Figure 3.100 : Maquis buissonnant sur sol cuirassé (plaine des Lacs).

© IRD / T. Jaffré

Ils sont situés le plus souvent entre 400 et 900 m d'altitude sur les massifs isolés et en dessous de 400 m dans le massif du Sud. Ils sont généralement dépourvus de strate herbacée (figures 3.100 à 3.102). Ils peuvent être surcimés par une strate arborescente d'*Araucaria*. La strate arbustive est souvent composée d'espèces grégaires des familles des Myrtaceae (*Tristaniopsis capitulata*, *T. guillainii*, *T. macphersonii*), des Cunoniaceae (*Codia montana*, *C. spatulata*), des Casuarinaceae (*Gymnostoma deplancheanum*), associées à un certain nombre d'espèces caractéristiques : *Lomandra insularis* (Asparagaceae), *Polyscias pancheri* (Araliaceae), *Pancheria confusa* (Cunoniaceae), *Hibbertia pancheri* (Dilleniaceae), *Dracophyllum involucreatum*, *D. verticilatum*, *Styphelia veillonii* (Ericaceae), *Gossia alaternoides*, *Eugenia rubiginosa*, *Syzygium kriegei*, *S. n'goyense* (Myrtaceae), *Garnieria spathulaefolia*, *Grevillea gillivrayi*, *Stenocarpus comptonii* (Proteaceae), *Dacrydium araucarioides* (Podocarpaceae), *Gardenia aubryi*, *Tarenna hexamera* (Rubiaceae), *Boronella pancheri*, *Myrtopsis selingii* (Rutaceae), *Elaphanthera baumannii*, *Exocarpos phyllanthoides*, *E. spathulatus* (Santalaceae), *Beccariella baueri*, *B. sebertii* (Sapotaceae), *Solmsia calophylla* (Thymelaeaceae) (figures 3.103 à 3.110)...



Figure 3.101 : Maquis buissonnant sur sol gravillonnaire (Boulinda).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.102 : Maquis arbustif dégradé sur cuirasse (Goro).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.103 : *Lomandra insularis* (Asparagaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.104 : *Boronella pancheri* (Rutaceae).

© CIRAD-IAC / M. Ducousso



Figure 3.105 : *Dacrydium araucarioides* (Podocarpaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.106 : *Garnieria spathulalefolia* (Proteaceae).

© CIRAD-IAC / M. Ducousso



Figure 3.107 : *Gardenia aubryi* (Rubiaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.108 : *Tarenna hexamera* (Rubiaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.109 : *Beccariella sebertii* (Sapotaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.110 : *Solmsia calophylla* (Thymelaeaceae).

© IAC / L. L'Huillier

Leur composition floristique varie en fonction de leur situation géographique et de la densité de la strate arbustive, qui reflète différents stades d'évolution. L'abondance des espèces de la famille des Myrtaceae, aux feuilles riches en essences facilement inflammables, et la présence d'une abondante litière mal décomposée au sol favorisent les incendies en saison sèche. Comme dans le groupement précédent, la majorité des espèces ligneuses – hormis celles des genres *Dacrydium*, *Dracophyllum*, *Styphelia*, *Gymnostoma*, *Polyscias* – rejettent de souche (McCoy *et al.* 1999). Elles sont adaptées à l'extrême pauvreté du sol et à la texture graveleuse de l'horizon supérieur, dépourvu de capacité d'échange et de réserve hydrique. Autant de conditions défavorables à l'implantation de germinations et au développement des plantules.

Ces types de maquis sont globalement relativement pauvres en espèces, mais sont floristiquement moins homogènes que les maquis ligno-herbacés. Leur flore comprend notamment plusieurs espèces endémiques locales. Comme les maquis ligno-herbacés, ils se sont étendus depuis l'arrivée de l'homme mais occupent des surfaces moins importantes sur les massifs isolés de la côte ouest car ils demeurent cantonnés à des zones relativement planes. Ils sont plus importants dans le grand massif du Sud où, en l'absence d'incendies, ils évoluent naturellement vers des formations préforestières dominées par une strate arbustive haute à *Gymnostoma deplancheanum*. L'évolution vers de la forêt semble toutefois entravée par le manque d'apports naturels de semences d'espèces forestières.

2.2.5. Les maquis paraforestiers et préforestiers



Figure 3.111 : Maquis paraforestier à *Gymnostoma deplancheanum* (Sud).

© IRD / T. Jaffré

Ce sont des maquis plus hauts et plus denses que ceux des catégories précédentes, dont ils sont souvent des faciès plus évolués, n'ayant pas subi l'action d'incendies récents ou étant placés dans une situation plus favorable, telle qu'en zone de piedmont bénéficiant de meilleures conditions d'alimentation hydrique et d'apports humifères et d'éléments minéraux fins transportés par les eaux de ruissellement, ainsi que de cendres à la suite des incendies affectant les versants (figures 3.111 et 3.112). Ils sont extrêmement diversifiés et sont souvent dominés par des peuplements de *Gymnostoma* (Casuarinaceae), par des espèces des genres *Alstonia* (Apocynaceae), *Polyscias* (Araliaceae), *Codia*, *Geissois* et *Pancheria* (Cunoniaceae), *Myodocarpus* (Myodocarpaceae), *Storthocalyx* (Sapindaceae), par *Garcinia henecartii* (Clusiaceae), *Hibbertia lucens* (Dilleniaceae), *Litsea triflora* (Lauraceae), *Dysoxylum* spp. (Meliaceae), *Eugenia stricta*, *Metrosideros nitida* (Myrtaceae), *Alphitonia neocaledonica* (Rhamnaceae) (figures 3.113 à 3.116)... Les maquis paraforestiers, dont l'évolution semble figée (probablement en raison de l'absence d'apports de semences forestières), se distinguent des maquis préforestiers dont l'évolution vers la forêt est perceptible à l'échelle humaine.



Figure 3.112 : Maquis paraforestier de bas de pente (Goro).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.113 : *Codia discolor* (Cunoniaceae).

© IRD / Y. Pillon et IAC / L. L'Huillier



Figure 3.114 : *Geissois pruinosa* (Cunoniaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.115 : *Myodocarpus involuocratus* (Myodocarpaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.116 : *Dysoxylum canalense* (Meliaceae).

© IRD / T. Jaffré

L'intérêt de ces maquis, qui ont une flore relativement riche, majoritairement composée d'espèces à répartition assez large, réside surtout dans leur capacité à évoluer vers des formations plus forestières. Pour certains maquis, l'évolution est possible selon un processus naturel de succession secondaire, en l'absence toutefois d'incendies, pour d'autres, qui semblent figés, l'évolution vers des formations plus hautes et plus denses nécessiterait un enrichissement en espèces préforestières et arborescentes.

2.2.6. Les groupements végétaux des zones humides du sud de la Grande Terre



Figure 3.117 : Zone humide (Sud).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.118 : Maquis ligno-herbacé en zone humide (Sud).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.119 : Maquis rivulaire (Sud).

© IAC / L. L'Huillier

Principalement représentés dans l'extrême sud de la Grande Terre, sur environ 250 km², ils peuvent être assimilés, en dehors de quelques liserés rivulaires arbustifs sur alluvions ou sur cuirasse, à du « maquis ligno-herbacé des zones humides » (figures 3.117 à 3.119). Ce sont des groupements végétaux très spécialisés, dont toutes les espèces sont adaptées aux conditions d'hydromorphie du sol et certaines à des périodes de submersion. La strate herbacée est constituée de Cyperaceae (*Machaerina juncea*, *Costularia xyrioides*, *Chorizandra cymbaria*, *Gahnia novocaledonensis*, *Schoenus brevifolius*, *Tricostularia guillauminii*). Les espèces les plus caractéristiques de la strate arbustive comprennent *Pancheria communis*, *Cunonia deplanchei*, *C. purpurea* (Cunoniaceae), *Styphelia longistylis*, *Dracophyllum balansae*, *D. cosmelioides* (Ericaceae), *Cloezia buxifolia*, *C. aquarum*, *Melaleuca gnidioides*, *M. brongniartii* (Myrtaceae), *Xyris pancheri*, *X. neocaledonica* (Xyridaceae) (figures 3.120 à 3.123).



Figure 3.120 : *Pancheria communis* (Cunoniaceae).

© IRD / Y. Pillon



Figure 3.121 : *Cunonia deplanchei* (Cunoniaceae).

© IRD / Y. Pillon



Figure 3.122 : *Dracophyllum balansae* (Ericaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.123 : *Melaleuca brongniartii* (Myrtaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.124 : *Codia nitida* (Cunoniaceae).

© IRD / T. Jaffré

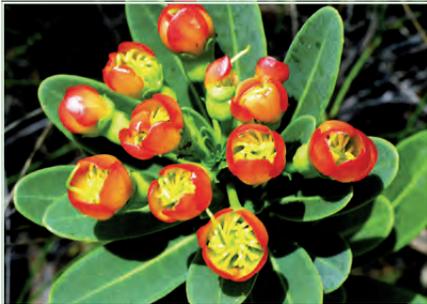


Figure 3.125 : *Xanthostemon aurantiacus* (Myrtaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.126 : *Stenocarpus umbelliferus* (Proteaceae).

© IAC / L. L'Huillier

Les zones à hydromorphie temporaire se distinguent par la présence, et souvent l'abondance, dans la strate arbustive, de *Codia nitida* (Cunoniaceae), *Dracophyllum ramosum* (Ericaceae), *Cloezia artensis*, *Xanthostemon aurantiacus* (Myrtaceae), *Grevillea gillivrayi*, *Stenocarpus umbelliferus* (Proteaceae) et *Homalium kanaliense* (Silicaceae) (figures 3.124 à 3.126). La strate herbacée est caractérisée par *Costularia stagnalis* et *C. comosa*, associées à d'autres Cyperaceae plus ubiquistes (*Lepidosperma perteres*, *Costularia arundinacea*).



© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.127 : *Retrophyllum minus* (Podocarpaceae).

Les berges des rivières de cette zone abritent quelques arbustes, notamment *Pandanus viscidus* (Pandanaceae), *Serianthes petitiiana* (Leguminosae), *Gymnostoma leucodon* (Casuarinaceae), et deux conifères très rares, *Retrophyllum minus* (bois bouchon) et *Dacrydium guillauminii*, ce dernier conifère étant l'un des plus rares de la planète (figures 3.127 et 3.128).

Bien qu'assez homogènes sur l'ensemble de leur étendue, les maquis ligno-herbacés des zones humides renferment plusieurs espèces à distribution restreinte, inscrites sur la liste rouge des espèces menacées d'extinction de l'IUCN. Leur conservation au cœur de secteurs riches en minerais latéritiques demeure un sujet d'autant plus préoccupant qu'il est ardu. Elle nécessitera la prise de mesures conservatoires adéquates, prenant en compte les plantes vasculaires mais également la faune et la flore des zones aquatiques qui parsèment le secteur. Une meilleure connaissance de la répartition et de la structure génétique populationnelle des espèces (cf. Herbert *et al.* 2002, sur le genre *Retrophyllum*) ainsi qu'une connaissance approfondie des conditions de milieux et des exigences et tolérances écologiques des espèces seraient nécessaires pour définir les solutions les mieux appropriées, tenant compte des exigences économiques et environnementales. La restauration écologique de zones humides pourrait être aussi envisagée, sur la base de connaissances approfondies et d'essais expérimentaux préliminaires.



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.128 : *Dacrydium guillauminii* (Podocarpaceae).

3. ADAPTATION DES PLANTES AUX CONDITIONS DE NUTRITION MINÉRALE

Le contraste entre la flore des savanes sur roches sédimentaires, métamorphiques ou basaltiques et celle des maquis sur substrats ultramafiques illustre parfaitement le comportement très différent des espèces de ces deux catégories de substrats. Les espèces des maquis miniers – pourtant capables de se développer, avec une croissance accrue en conditions expérimentales et sans compétition interspécifique, sur les sols « ordinaires » propices au développement de la savane – ne sont pas compétitives sur ces sols et sont éliminées au profit d'espèces communes. Ces dernières sont, en revanche, incapables de se développer sur substrats ultramafiques, dont les espèces sont dotées de caractéristiques biologiques et physiologiques particulières leur permettant de s'approvisionner en éléments minéraux nécessaires à leur développement à partir de sols pauvres. Certaines espèces sont, en outre, capables de résister à l'intoxication par des métaux, présents en quantités assimilables excessives dans certains sols. Les différences de composition minérale foliaire des espèces illustrent la diversité des comportements nutritionnels (tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Composition minérale foliaire¹ de quelques espèces représentatives des maquis miniers (classées par familles), d'après Jaffré (1980, et non publié). (Cf. chapitre 7 pour d'autres espèces.)

Genre espèce	Sol ²	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>Alstonia deplanchei</i> (n = 8)	B	1,76	0,034	1,34	1,13	0,69	105	37	0,49
		0,23	0,006	0,33	0,14	0,12	46	10	0,18
<i>Alyxia poyaensis</i> (n = 20)	FC	0,58	0,018	0,62	1,81	0,33	3968	19	0,12
		0,23	0,007	0,25	0,82	0,18	4045	26	0,08
<i>Rauvolfia semperflorens</i> (n = 12)	B	1,03	0,027	0,98	0,77	0,50	34	122	0,32
		0,26	0,005	0,37	0,37	0,21	33	108	0,11
<i>Myodocarpus fraxinifolius</i> (n = 12)	FF	0,98	0,035	1,00	1,05	0,22	239	30	-
		0,40	0,012	0,30	0,29	0,14	166	38	-
<i>Polyscias pancheri</i> (n = 6)	FF	0,86	0,025	0,44	0,72	0,34	5479	22	0,03
		0,09	0,003	0,14	0,24	0,14	1756	24	0,01
<i>Araucaria montana</i> (n = 2)	FF	0,66	0,031	0,27	2,03	0,23	315	52	0,27
		0,08	0,000	0,13	0,38	0,08	134	14	0,20
<i>Araucaria muelleri</i> (n = 10)	FF	0,45	0,016	0,37	1,17	0,14	143	4	0,05
		0,05	0,003	0,09	0,27	0,05	72	4	0,05
<i>Gymnostoma chamaecyparis</i> (n = 18)	B	0,91	0,023	0,38	0,77	0,21	508	23	0,12
		0,09	0,009	0,10	0,33	0,18	566	16	0,05
<i>Gymnostoma deplancheanum</i> (n = 28)	FF	0,76	0,016	0,45	1,06	0,25	306	30	0,21
		0,21	0,008	0,21	0,32	0,11	355	20	0,39
<i>Gymnostoma poissonianum</i> (n = 12)	B	0,90	0,021	0,53	0,82	0,23	128	20	-
		0,07	0,008	0,16	0,24	0,07	122	8	-
<i>Maytenus fournieri</i> (n = 12)	B	0,92	0,044	1,02	0,89	0,92	11528	138	0,38
		0,25	0,015	0,33	0,28	0,25	8245	147	0,29
<i>Peripterygia marginata</i> (n = 20)	FF	0,89	0,024	0,62	1,77	0,48	38	165	0,34
		0,13	0,005	0,19	0,54	0,23	21	140	0,25
<i>Garcinia amplexicaulis</i> (n = 71)	FF	0,69	0,020	0,54	0,67	0,20	3299	57	0,04
		0,17	0,005	0,26	0,19	0,10	2888	49	0,04
<i>Montrouzieria sphaeroidea</i> (n = 41)	FF	0,74	0,019	0,68	1,46	0,37	91	31	0,08
		0,09	0,004	0,22	0,35	0,16	76	29	0,08

Tableau 3.3 (suite).

Genre espèce	Sol ²	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>Codia discolor</i> (n = 42)	FF	0,59 0,20	0,021 0,009	0,45 0,28	0,83 0,45	0,29 0,16	338 468	118 143	1,21 1,27
<i>Codia montana</i> (n = 68)	FF	0,78 0,27	0,024 0,012	0,37 0,10	0,61 0,17	0,32 0,13	745 697	240 257	2,23 2,27
<i>Codia nitida</i> (n = 24)	FF	0,54 0,08	0,016 0,003	0,51 0,11	0,96 0,27	0,34 0,09	302 187	233 82	3,31 1,75
<i>Cunonia macrophylla</i> (n = 12)	FF	0,30 0,15	0,011 0,003	0,31 0,13	1,01 0,31	0,28 0,14	1799 1516	21 14	0,11 0,09
<i>Geissois pruinosa</i> (n = 46)	FF	0,89 0,13	0,035 0,009	1,11 0,42	1,04 0,31	0,59 0,21	230 317	6117 2748	3,07 1,44
<i>Pancheria alaternoides</i> (n = 62)	FF	0,57 0,10	0,016 0,013	0,31 0,08	0,62 0,26	0,35 0,11	422 542	308 283	0,61 0,56
<i>Pancheria billardierei</i> (n = 28)	FF	0,70 0,11	0,024 0,004	0,33 0,12	1,40 0,31	0,36 0,10	2650 1536	46 37	0,14 0,09
<i>Pancheria communis</i> (n = 14)	FH	0,45 0,09	0,012 0,002	0,25 0,07	0,53 0,11	0,32 0,06	128 155	285 122	0,36 0,24
<i>Pancheria hirsuta</i> (n = 13)	FF	0,50 0,10	0,015 0,005	0,27 0,10	1,66 0,22	0,27 0,08	3398 2106	78 43	0,21 0,15
<i>Costularia comosa</i> (n = 17)	FF	0,74 0,16	0,023 0,006	0,51 0,08	0,11 0,04	0,14 0,04	71 47	48 57	3,79 2,47
<i>Costularia nervosa</i> (n = 21)	FF	0,44 0,16	0,019 0,010	0,34 0,16	0,10 0,07	0,07 0,03	565 450	43 41	9,14 5,74
<i>Gahnia aspera</i> (n = 14)	B	0,86 0,22	0,032 0,010	0,53 0,15	0,19 0,12	0,18 0,08	56 41	23 14	10,47 2,77
<i>Lepidosperma perteres</i> (n = 57)	FF	0,44 0,16	0,013 0,012	0,72 0,23	0,22 0,07	0,09 0,04	1052 679	36 34	3,94 2,12
<i>Machaerina deplanchei</i> (n = 14)	B	0,67 0,18	0,021 0,005	0,58 0,19	0,20 0,10	0,18 0,08	118 79	29 26	10,57 4,09
<i>Schoenus juvenis</i> (n = 16)	FE	0,54 0,12	0,013 0,003	0,38 0,18	0,07 0,05	0,15 0,05	254 197	66 67	17,62 4,47
<i>Schoenus neocaledonicus</i> (n = 22)	FE	0,49 0,14	0,016 0,004	0,57 0,12	0,16 0,05	0,21 0,10	103 123	73 110	12,84 6,54
<i>Hibbertia pulchella</i> (n = 36)	FF	0,86 0,13	0,022 0,004	0,52 0,15	0,88 0,16	0,17 0,05	137 82	90 88	9,73 4,67
<i>Hibbertia trachyphylla</i> (n = 14)	FF	0,85 0,20	0,028 0,012	0,39 0,10	0,93 0,23	0,35 0,19	58 38	239 216	18,55 5,46
<i>Cyathopsis albicans</i> (n = 6)	FE	0,61 0,06	0,014 0,001	0,38 0,15	1,70 0,32	0,16 0,08	49 23	41 22	0,42 0,35
<i>Dracophyllum involucreatum</i> (n = 5)	FC	0,58 0,11	0,016 0,002	0,24 0,04	0,72 0,10	0,07 0,01	1338 893	16 8	0,02 0,01
<i>Dracophyllum ramosum</i> (n = 12)	FF	0,46 0,08	0,018 0,009	0,26 0,10	0,69 0,27	0,14 0,07	245 158	107 117	0,07 0,04
<i>Serianthes calycina</i> (n = 2)	FF	2,83 0,04	0,066 0,004	0,60 0,06	2,30 0,35	0,30 0,03	227 40	76 11	3,64 0,33
<i>Storckiella pancheri</i> (n = 1)	-	2,60 -	0,07 -	0,78 -	0,21 -	0,21 -	- -	31 -	0,40 -
<i>Joinvillea plicata</i> (n = 2)	FF	1,55 -	0,070 -	1,29 -	0,20 -	0,19 -	197 -	8 -	2,06 -
<i>Scaevola beckii</i> (n = 37)	FF	0,73 0,06	0,020 0,002	1,10 0,20	0,73 0,19	0,25 0,06	842 404	49 31	0,12 0,06
<i>Scaevola montana</i> (n = 33)	Mixtes	1,32 0,17	0,046 0,007	1,21 0,42	1,30 0,30	0,64 0,23	201 222	37 55	0,07 0,06

Genre espèce	Sol ²	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>Oxera neriifolia</i> (n = 8)	FF	1,72 0,02	0,061 0,018	1,08 0,02	1,44 0,60	0,82 0,29	201 188	36 30	0,57 0,45
<i>Geniostoma celastrineum</i> (n = 19)	B	1,06 0,23	0,027 0,007	0,30 0,13	0,49 0,26	1,45 0,55	71 70	60 39	1,59 0,92
<i>Cloezia artensis</i> (n = 50)	FF	0,82 0,10	0,024 0,006	0,73 0,28	1,01 0,38	0,53 0,19	148 131	250 260	0,20 0,19
<i>Eugenia stricta</i> (n = 9)	FF	0,73 0,05	0,021 0,004	0,50 0,19	2,27 0,76	0,10 0,03	90 35	23 8	0,15 0,08
<i>Myrtastrum rufo-punctatum</i> (n = 6)	FE	0,62 0,12	0,017 0,006	0,38 0,09	0,55 0,14	0,62 0,10	14 3	34 14	0,12 0,09
<i>Tristaniopsis calobuxus</i> (n = 9)	FF	0,69 0,07	0,020 0,003	0,47 0,10	0,80 0,18	0,13 0,08	583 330	22 22	0,29 0,41
<i>Tristaniopsis glauca</i> (n = 24)	FF	0,60 0,10	0,024 0,014	0,52 0,15	0,83 0,32	0,15 0,07	387 276	33 36	0,15 0,18
<i>Tristaniopsis guillainii</i> (n = 30)	FF	0,72 0,13	0,024 0,008	0,49 0,16	0,84 0,23	0,21 0,07	908 569	62 58	0,18 0,12
<i>Xanthostemon aurantiacus</i> (n = 13)	FF	0,64 0,07	0,020 0,003	0,71 0,09	1,43 0,21	0,17 0,06	129 69	29 37	0,31 0,34
<i>Xanthostemon multiflorus</i> (n = 8)	B	0,67 0,14	0,027 0,006	0,37 0,14	1,32 0,22	0,32 0,12	27 10	27 33	3,28 1,18
<i>Xanthostemon ruber</i> (n = 4)	B	0,68 0,06	0,022 0,002	0,44 0,12	0,89 0,13	0,32 0,06	20 4	14 2	2,13 0,40
<i>Austrobuxus carunculatus</i> (n = 8)	B	0,94 0,17	0,040 0,006	0,52 0,15	1,26 0,23	0,49 0,15	88 101	21 23	2,34 1,07
<i>Longetia buxoides</i> (n = 13)	B	0,73 0,12	0,025 0,014	0,69 0,20	0,82 0,27	0,27 0,10	129 56	26 21	0,23 0,18
<i>Phyllanthus aeneus</i> (n = 17)	FF	1,08 0,17	0,040 0,010	1,30 0,18	1,57 0,63	0,40 0,14	671 565	1187 565	0,35 0,28
<i>Phyllanthus montrouzieri</i> (n = 7)	B	0,94 0,18	0,031 0,003	1,20 0,27	0,91 0,16	0,38 0,15	138 26	823 201	1,67 0,59
<i>Phyllanthus peltatus</i> (n = 9)	B	0,77 0,25	0,034 0,007	1,00 0,17	1,51 0,44	0,38 0,09	277 131	1600 895	0,84 0,61
<i>Grevillea exul ssp. exul</i> (n = 39)	FF	0,86 0,15	0,032 0,007	0,50 0,14	0,62 0,20	0,21 0,09	2833 1477	130 124	0,08 0,17
<i>Grevillea gillivrayi</i> (n = 36)	FF	0,80 0,15	0,029 0,014	0,37 0,15	0,87 0,38	0,25 0,12	3296 2554	24 24	0,05 0,06
<i>Grevillea meisneri</i> (n = 13)	B	0,75 0,18	0,037 0,015	0,29 0,07	0,42 0,22	0,33 0,15	2590 1398	19 14	0,21 0,10
<i>Stenocarpus milnei</i> (n = 16)	B	0,81 0,19	0,027 0,007	0,52 0,14	0,32 0,12	0,16 0,08	1489 1031	19 12	0,87 0,42
<i>Stenocarpus umbelliferus</i> (n = 44)	FF	0,69 0,14	0,023 0,004	0,27 0,09	0,28 0,08	0,11 0,04	1082 729	15 11	0,39 0,44
<i>Alphitonia neocaledonica</i> (n = 67)	FF	1,03 0,21	0,030 0,010	0,63 0,18	1,02 0,60	0,27 0,13	367 221	54 50	0,17 0,15
<i>Dodonaea viscosa</i> (n = 17)	B	1,27 0,29	0,054 0,013	0,83 0,29	0,64 0,18	0,65 0,21	91 89	74 47	0,19 0,15
<i>Soulamea pancheri</i> (n = 4)	B	0,90 0,10	0,034 0,004	0,51 0,28	1,48 0,44	0,55 0,11	35 21	51 11	2,63 0,44

¹ Pour chaque espèce, première ligne = moyenne, deuxième ligne = écart-type.

² Sol : B = sol brun hypermagnésien ; FF = sol ferrallitique ferritique ; FC = sol ferrallitique cuirassé ; FH = sol ferrallitique hydromorphe ; FE = sol ferrallitique érodé.

3.1. L'adaptation des espèces aux carences du sol en phosphore, en potassium et en azote

Elle se traduit fondamentalement, pour la plupart des espèces, par une croissance relativement lente, un système racinaire très développé (figure 3.129), possédant parfois des racines spécialisées (racines protéoïdes chez certaines Proteaceae ; figure 3.130) et dauciformes chez les Cyperaceae) (Lambers *et al.* 2007), explorant largement les horizons supérieurs du sol. Ce sont généralement des espèces peu exigeantes en éléments nutritifs, qui peuvent être qualifiées d'« espèces oligotrophes » ou d'« espèces frugales ». Cette caractéristique s'exprime au travers des concentrations foliaires très faibles en phosphore, en potassium et bien souvent en azote de la majorité des espèces des terrains miniers. Cela est illustré dans le tableau 3.4 qui donne les teneurs foliaires de ces trois éléments pour un grand nombre d'espèces de plantes arbustives des maquis et des forêts sur substrats ultramafiques, ainsi que les teneurs les plus courantes de ces trois éléments chez les végétaux supérieurs.

Tableau 3.4 : Comparaison des teneurs foliaires en N, P et K des dicotylédones arbustives des maquis et des forêts sur substrats ultramafiques (D'après Jaffré 1980) et des teneurs foliaires les plus courantes en ces trois éléments minéraux chez les plantes à fleurs. (Heller 1969)

		N (%)	P (%)	K (%)
Maquis	Moyennes	1,01	0,031	0,72
	Extrêmes	0,34 - 2,86	0,008 - 0,089	0,10 - 2,02
	Nb d'échantillons	n = 255	n = 275	n = 277
Forêt	Moyennes	1,34	0,044	0,86
	Extrêmes	0,62 - 2,86	0,014 - 0,092	0,10 - 2,02
	Nb d'échantillons	n = 118	n = 139	n = 146
Teneurs les plus courantes chez les végétaux supérieurs		1 - 3	0,1 - 0,5	2 - 4

Il est également à noter que les teneurs en phosphore, potassium et azote sont sensiblement plus élevées chez les espèces forestières, dont les sols sont enrichis en ces éléments grâce aux apports et au recyclage de la matière organique. Les teneurs moyennes en phosphore foliaire sont pratiquement identiques dans les grandes catégories de maquis, tandis que les teneurs en potassium sont plus basses dans le maquis buissonnant sur sol ferrallitique désaturé (0,59 %) que dans le maquis arbustif sur sol brun hypermagnésien (0,81 %). La mobilisation des très faibles quantités de phosphore disponible pour les plantes dans les sols miniers est facilitée par des associations symbiotiques racinaires avec des champignons mycorhiziens et l'alimentation en azote chez certaines espèces par des associations symbiotiques (Casuarinaceae/*Frankia* et Fabaceae/*Rhizobium*), fixatrices de l'azote libre de l'atmosphère (cf. chapitre 5). Il est également vraisemblable, comme cela a été mis en évidence chez des plantes se développant sur des sols pauvres (Aerts & Chatain 2000), que chez certaines espèces des substrats ultramafiques les éléments minéraux foliaires soient fortement résorbés avant la chute des feuilles.

Les teneurs moyennes les plus basses en phosphore et en azote ont été enregistrées chez des espèces nettement sclérophylls des familles des Araucariaceae, Cunoniaceae, Cyperaceae, Ericaceae, Myrtaceae et Proteaceae. Les teneurs en potassium sont sensiblement plus élevées chez les Cyperaceae, comme c'est généralement le cas chez les monocotylédones par rapport aux dicotylédones, mais demeurent les plus faibles chez les espèces des familles des Araucariaceae, Cunoniaceae, Ericaceae, Myrtaceae et Proteaceae.



Figure 3.129 : Système racinaire de *Tristaniopsis guilainii* sur sol ferrallitique gravillonnaire (Boulinda).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.130 : Racines protéoides de *Grevillea exul* ssp. *rubiginosa* (Sud).

© Vale / S. McCoy

3.2. L'adaptation aux faibles teneurs du sol en calcium

La teneur moyenne en calcium foliaire des arbustes des maquis (1,10 %) se situe dans les valeurs basses de la fourchette des teneurs observées le plus couramment chez les végétaux supérieurs, de 1 à 2 % (Heller 1969). Elle est de 1,55 % pour les espèces des forêts, mais seulement de 1,04 % chez les arbustes des maquis sur sols bruns hypermagnésiens, pour lesquels le rôle de la carence en calcium est le plus souvent évoqué, en relation toutefois avec de fortes concentrations en magnésium (Jaffré 1976, Kruckeberg 1958, Proctor & Woodell 1975).

3.3. L'adaptation des plantes aux teneurs excessives du sol en magnésium

Elle se traduit chez la majorité des espèces par une limitation de l'absorption du magnésium par rapport au calcium, tendant ainsi à rétablir un rapport Ca/Mg > 1 dans la plupart des espèces (Jaffré 1980, Kruckeberg 1958, Walker & Walker 1955) (tableau 3.3). Chez les plantes croissant sur sols hypermagnésiens, les teneurs en magnésium foliaire se situent dans la fourchette des teneurs les plus habituelles chez les végétaux supérieurs, comprises entre 0,1 et 0,70 %. La valeur moyenne du quotient des teneurs Ca/Mg, exprimées en milliéquivalents pour 100 g de matière sèche, s'établit dans ce cas à 1,53 tandis qu'elle est supérieure à 3,5 chez les dicotylédones arbustives des sols ferrallitiques désaturés. Un certain nombre d'espèces appartenant à des familles variées, comprenant notamment *Geniosoma* spp. (Loganiaceae), *Agatea* spp. (Violaceae), *Myrtastrum rufo-punctatum*, *Sannantha* spp. (Myrtaceae), *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae), *Maytenus fouteri* (Celastraceae), s'accommodent parfaitement, sur sols hypermagnésiens, d'un rapport Ca/Mg foliaire nettement < 1 (Jaffré 1980).

3.4. L'adaptation des plantes aux teneurs élevées du sol en éléments potentiellement toxiques (Ni, Mn, Cr et Co)

Les teneurs en nickel foliaire des plantes sur les sols d'origine non ultramafique ne dépassent habituellement guère 5 ppm de la matière sèche. Les espèces des terrains miniers de Nouvelle-Calédonie ont des teneurs en nickel comprises entre 0,001 et 0,01 % (soit 10 et 100 ppm) pour 60 % d'entre elles, entre 0,01 % et 0,1 % pour 27 % (Jaffré 1980), soit dans ce cas des teneurs supérieures au seuil de toxicité de la plupart des plantes cultivées (Chapman 1966, L'Huillier *et al.* 1996, L'Huillier 1998) (tableau 3.3). Les premières sont qualifiées de « non accumulatrices » et les secondes d'« hémi-accumulatrices » (Boyd & Jaffré 2009). Une quarantaine d'espèces qualifiées d'« hyperaccumulatrices » (Brooks *et al.* 1977) peuvent avoir des teneurs en nickel > 0,1 % (Jaffré 1980) et neuf d'entre elles, appartenant aux genres *Geissois* (Cunoniaceae), *Homalium* (Silicaceae), *Hybanthus* (Violaceae), *Phyllanthus* (Phyllanthaceae), *Psychotria* (Rubiaceae) et *Sebertia* (Sapotaceae), qualifiées d'« hypernickelophores », ont des teneurs > 1 % (Jaffré & Schmid 1974, Boyd & Jaffré 2009). Les teneurs les plus élevées chez les hypernickelophores ont été relevées dans les tissus foliaires de deux espèces forestières, *Psychotria douarrei* (4,7 %) (Jaffré & Schmid 1976) et *Pycnandra acuminata* (*ex-Sebertia*) (> 20 %) (Jaffré *et al.* 1976), communément appelée « l'arbre à nickel », dont le latex est coloré en vert (figures 3.131 à 3.134). La Nouvelle-Calédonie demeure, avec Cuba (Reeves *et al.* 1999), l'une des régions du monde les plus fournies en espèces hyperaccumulatrices de nickel (Reeves 2003).



Figure 3.131 : *Psychotria douarrei* (Rubiaceae).



Figure 3.132 : *Pycnandra acuminata* (*ex-Sebertia*) (Sapotaceae), frondaison.

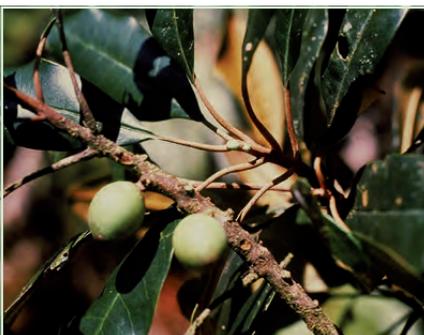


Figure 3.133 : *Pycnandra acuminata* (*ex-Sebertia*) (Sapotaceae), fruits.



Figure 3.134 : *Pycnandra acuminata* (*ex-Sebertia*) (Sapotaceae), latex coloré par le nickel (> 20 % ms).

Les teneurs en manganèse foliaire des végétaux supérieurs sont le plus souvent comprises entre 20 et 500 ppm et peuvent parfois dépasser 0,1 % (tableau 3.3) sans que l'on observe de signes de toxicité. Environ 20 % des espèces des terrains miniers de Nouvelle-Calédonie ont des teneurs en manganèse foliaire > 0,1 %, et 8 % des teneurs > 0,25 %. Des concentrations > 1 % ont été observées chez des espèces des genres *Virotia* (ex-*Macadamia*), *Beaupreopsis* (Proteaceae) (Jaffré 1979), *Alyxia* (Apocynaceae), *Gossia* (ex-*Eugenia*) (Myrtaceae), et chez *Maytenus fournieri* (Celastraceae) et *Garcinia amplexicaulis* (Clusiaceae) (Jaffré 1978, 1980) (figures 3.135 et 3.136). Bien que le manganèse soit surtout assimilable par les plantes sur sol acide, de très fortes concentrations de cet élément ont été enregistrées chez quelques espèces des genres *Gossia*, *Grevillea*, *Maytenus* sur des sols hypermagnésiens au pH basique.



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.135 : *Beaupreopsis paniculata* (Proteaceae).



© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.136 : *Garcinia amplexicaulis* (Clusiaceae).

Contrairement au nickel et au manganèse, le chrome n'a jamais été observé à des teneurs élevées dans les tissus aériens des espèces des terrains miniers. La teneur la plus élevée enregistrée dans des feuilles (non souillées par des poussières latéritiques) se rapporte à *Geissois pruinosa* avec une teneur de 430 ppm (Jaffré 1980). Le phénomène de résistance de la plante à l'égard de cet élément aurait principalement son siège au niveau racinaire (Grosman 1958).

Le cobalt, localement à des concentrations anormalement élevées dans les sols des terrains miniers, se trouve à des teneurs ≤ 10 ppm chez 90 % des espèces analysées, et une vingtaine d'entre elles (5 %) ont montré des teneurs ≥ 30 ppm. Cette valeur est supérieure au seuil de toxicité du cobalt signalé chez des espèces cultivées (Chapman 1966). À quelques exceptions près, les teneurs en cobalt les plus fortes ont été enregistrées chez les espèces hyperaccumulatrices de nickel (atteignant 450 ppm chez *Phyllanthus favieri*), montrant ainsi une similitude dans la répartition des teneurs en nickel et en cobalt dans la flore des substrats ultramafiques (Jaffré 1980).

D'une manière générale, la résistance des plantes à la toxicité du milieu réside à la fois dans leurs aptitudes à limiter l'absorption de l'élément toxique du sol et dans leur capacité à tolérer dans leurs tissus la présence de quantités plus ou moins importantes de cet élément, la valeur de cette quantité constituant un seuil de tolérance interne propre à chaque espèce. Ce seuil est, semble-t-il, fonction de la capacité de la plante à minimiser et probablement dans certains cas à anéantir les effets toxiques du métal concerné dans ses tissus. Il a été notamment montré que chez les espèces hyperaccumulatrices de nickel de Nouvelle-Calédonie, cet élément était stocké en grande partie sous forme de complexes organométalliques (Lee *et al.* 1977, Kersten *et al.* 1980) (cf. encadré de M. Lebrun).

MÉCANISMES DE L'HYPERACCUMULATION DES MÉTAUX CHEZ LES PLANTES

Par Michel Lebrun

L'hyperaccumulation de métaux observée chez un nombre très restreint de plantes est un mécanisme d'adaptation particulièrement original et intrigant. Original, car l'exclusion est le comportement massivement lié à la tolérance des plantes à la toxicité des métaux. L'association de la tolérance avec l'accumulation est intrigante et apparaît contradictoire à première vue : favoriser l'accumulation d'un métal toxique plutôt que de l'empêcher. Très peu de résultats permettent de comprendre la signification évolutive et écologique de ce phénomène, ainsi que les mécanismes mis en œuvre. La flore hyperaccumulatrice de métaux, particulièrement abondante en Nouvelle-Calédonie, représente une source potentielle remarquable pour identifier des modèles pertinents afin de contribuer à élucider ce phénomène.

1. L'hyperaccumulation des métaux : un phénomène rare et inexpliqué

Le seuil de 0,1-1 % PS d'accumulation dans les parties aériennes selon les métaux ainsi qu'un rapport d'accumulation parties aériennes/racines > 1 , sans symptôme de phytotoxicité, sont les critères usuels retenus de l'hyperaccumulation. Celle-ci a été observée principalement avec le nickel, le zinc, le cuivre, le manganèse, le cobalt, mais aussi avec des métaux comme le cadmium qui n'ont aucun rôle physiologique. Ce comportement concerne environ 450 espèces au niveau mondial, appartenant à 34 familles, soit 0,2 % des angiospermes. Les plantes sur roches ultramafiques hyperaccumulant le nickel sont très largement majoritaires dans cette liste. L'analyse de milliers d'échantillons a permis d'identifier environ 360 espèces de plantes qui accumulent de 100 à 1000 mg/kg de nickel (Reeves & Baker 2000), dont plusieurs dizaines en Nouvelle-Calédonie. L'exemple le plus extrême est la Sapotaceae endémique de Nouvelle-Calédonie *Pycnandra acuminata* qui contient jusqu'à 26 % (p/p) de nickel dans son latex (Jaffré *et al.* 1976). Cependant, moins de 2 % des plantes poussant sur substrats ultramafiques présentent ce comportement.

Les fonctions écologiques hypothétiques généralement avancées pour expliquer l'hyperaccumulation comprennent : la résistance à la sécheresse, la défense contre la compétition avec d'autres espèces, l'absorption par « inadvertance » de métal et la défense contre la prédation par les insectes ou les pathogènes. L'hypothèse de protection contre les herbivores et les pathogènes est généralement la plus populaire. Cependant, les études sont peu nombreuses et aucune de ces hypothèses n'a reçu à ce jour de confirmation (Kristy *et al.* 2005, Kazakou *et al.* 2008).

2. Les mécanismes de l'hyperaccumulation des métaux : une affaire de Brassicaceae

La famille des Brassicaceae est relativement riche en hyperaccumulateurs de nickel et comprend tous les hyperaccumulateurs de zinc et de cadmium. L'essentiel des études physiologiques et moléculaires a été réalisé sur les plantes de cette famille et particulièrement dans les genres *Alyssum*, *Thlaspi* et l'espèce *Arabidopsis halleri*. Les approches transcriptomiques permises par la proximité phylogénétique de ces espèces avec la plante modèle *Arabidopsis thaliana* (Becher *et al.* 2004, Weber *et al.* 2006) ont permis de mettre en évidence l'importance des mécanismes de transport et de détoxification des métaux dans l'hyperaccumulation. Trois processus physiologiques rendent compte de l'hyperaccumulation des métaux : (i) l'augmentation de l'absorption racinaire, (ii) le transfert et le chargement accru du xylème, (iii) la détoxification/compartimentation dans les parties aériennes. ● ● ●

L'hyperaccumulation du zinc a fait l'objet du plus grand nombre d'études. L'absorption accrue de zinc par les racines de *Thlaspi caerulescens* semble liée à la surexpression de transporteurs de la famille des ZIP (zinc-regulated transporter, iron-regulated transporter proteins). La surexpression du gène *ZNT1* chez *T. caerulescens* permet d'accroître le transport haute affinité du zinc dans les racines de cette plante et désigne ce gène comme un candidat majeur des processus d'absorption chez les hyperaccumulateurs de zinc (Krämer *et al.* 2007). Aucun transporteur candidat pour l'absorption du nickel n'a été identifié à ce jour chez des plantes hyperaccumulatrices de ce métal.

La translocation des métaux de la racine vers les parties aériennes nécessite un chargement accru du xylème et donc une séquestration plus faible dans la racine. Chez *T. caerulescens*, la chélation du nickel par l'histidine dans la racine réduit la séquestration vacuolaire dans cet organe, permettant ainsi une translocation accrue des racines vers les parties aériennes (Richau *et al.* 2009). Par ailleurs, en réponse à un traitement par le nickel de *T. caerulescens*, une accumulation de nicotianamine (NA) a été observée dans la racine permettant la formation de chélats NA-nickel et le transport vers le xylème de ces complexes (Mari *et al.* 2006). Dans cette plante, le transporteur TcYSL3 (yellow-stripe-like) de la famille des OPT (oligopeptides transporters) est exprimé dans le parenchyme du xylème et est capable de transporter des complexes NA-nickel (Gendre *et al.* 2007). Le transporteur FRD3 de la famille MATE est constitutivement surexprimé chez *A. halleri* et *T. caerulescens* et semble jouer un rôle dans la translocation du zinc (Talke *et al.* 2006). Enfin, la surexpression du gène *HMA4* qui code une ATPase de type P1B localisée sur la membrane plasmique des cellules de la stèle chez *A. halleri* est impliquée dans la translocation du zinc vers les parties aériennes (Hanikenne *et al.* 2008).

Au niveau cellulaire, l'accumulation vacuolaire du métal dans les parties aériennes apparaît comme une modalité générale de la détoxification, mais les mécanismes assurant le passage du xylème à la vacuole, et en particulier les ligands permettant ce transport intracellulaire des métaux, sont inconnus. Les acides organiques interviennent dans le transport xylémique et la séquestration vacuolaire des métaux où ils semblent jouer un rôle de contre-ions. Aucune évidence n'a montré l'implication de molécules présentant des groupements thiols, telles que glutathion, phytochélatines, metallothionéines, dans l'hyperaccumulation. L'histidine et la nicotianamine sont deux ligands que leurs caractéristiques physico-chimiques de complexation, en particulier la stabilité des complexes formés au pH neutre du cytosol, désignent comme des candidats particulièrement intéressants, au moins dans le cas de l'accumulation du nickel. Les mécanismes moléculaires qui permettent l'accumulation du métal dans les vacuoles des feuilles demeurent largement inconnus. Des transporteurs de la famille des CDF/MTP (cation diffusion facilitators/metal transporter proteins) pourraient être impliqués. Chez *A. halleri*, le gène *AhMTP1*, et chez *T. caerulescens*, son homologue *ZTP1* semblent impliqués dans la séquestration vacuolaire du zinc et joueraient ainsi un rôle dans l'hyperaccumulation. Des transporteurs CAX (cation exchanger) de la super-famille CaCA (Ca²⁺/cation antiporters) sont surexprimés chez *A. halleri* et *T. caerulescens* et pourraient être impliqués dans l'accumulation vacuolaire par des activités d'antiport cations/H⁺.

Les résultats fragmentaires des mécanismes moléculaires d'absorption, de transport et de détoxification liés à l'hyperaccumulation semblent faire ressortir qu'une surexpression constitutive des ARNm codant des transporteurs et des protéines impliquées dans la synthèse de complexant de métaux est généralement associée à l'hyperaccumulation (Verbruggen *et al.* 2009, Haydon & Cobbett 2007). Cette observation renforce l'intérêt d'utiliser des approches transcriptomiques afin d'identifier des candidats : transporteurs, enzymes de synthèse de bio-ligands, régulateurs.

• • •

Les avancées récentes dans le domaine de la biologie moléculaire, plus particulièrement les approches –omics, révolutionnent les perspectives dans l'étude de l'adaptation des plantes aux contraintes environnementales. Cette approche permet de mettre en œuvre sur potentiellement n'importe quelle plante une analyse transcriptomique dans des conditions variées d'environnement biotique (symbioses, pathogènes) ou abiotique (environnement hydrique, ionique) et de corrélérer ainsi potentiellement les programmes transcriptionnels aux adaptations de ces plantes aux conditions environnementales (Lister *et al.* 2009).

3. Les plantes hyperaccumulatrices de métaux de Nouvelle-Calédonie comme modèle

La plupart des résultats moléculaires des mécanismes de l'hyperaccumulation ont été obtenus chez les Brassicaceae et le zinc (Roosens *et al.* 2008), ce qui restreint considérablement l'analyse eu égard à la diversité des accumulateurs. La diversité floristique et ses caractéristiques adaptatives représentent une ressource majeure pour l'acquisition de connaissances potentiellement originales sur les mécanismes physiologiques qui sous-tendent les processus adaptatifs sous contraintes édaphiques fortes et contrastées. La connaissance approfondie des déterminants de l'adaptation des plantes est une nécessité pour parvenir à analyser au niveau des populations et des communautés de plantes les forces évolutives ayant permis de structurer les écosystèmes métallicoles (Pauwels *et al.* 2008).

De nombreuses études ont mis en évidence des caractéristiques adaptatives physiologiques communes à la flore des roches ultramafiques : faible exigence en éléments majeurs, absorption et accumulation sélective d'éléments minéraux, sclérophylle, résistance aux métaux, associations symbiotiques (cf. chapitres 5). Les plantes endémiques de ces écosystèmes, naturellement en contact depuis des millions d'années avec de fortes teneurs en métaux, en particulier en nickel, ont développé des adaptations spécifiques à long terme pour se protéger de leur effet toxique, laissant les nutriments disponibles conditionner leur vitesse de croissance. L'adaptation de plantes aux contraintes édaphiques extrêmes des sols ultramafiques, la grande diversité et l'endémisme observés, sans doute permis par l'isolement et l'absence de catastrophes climatiques à l'échelle géologique, font de la Nouvelle-Calédonie un modèle unique de diversité et de conditions environnementales avec un potentiel important pour mettre en évidence des mécanismes adaptatifs originaux liés à la toxicité et à l'hyperaccumulation des métaux et tout particulièrement du nickel. En Nouvelle-Calédonie, environ 2 150 espèces de plantes vasculaires se développent sur des substrats ultramafiques, représentant près des deux tiers de la flore totale de l'archipel, dont près de 82 % sont endémiques. En outre, 1 160 espèces appartiennent exclusivement à la flore des substrats ultramafiques. Le couple de Rubiaceae endémiques de Nouvelle-Calédonie *Psychotria douarrei*, hyperaccumulateur de nickel/*Psychotria baillonii*, tolérant et non accumulateur, s'est imposé comme un modèle partagé par de nombreuses équipes de Nouvelle-Calédonie et fait l'objet d'analyses intégrées par différentes approches écologiques, botaniques, physiologiques, biochimiques et moléculaires.

La connaissance des mécanismes moléculaires de l'hyperaccumulation permet d'envisager d'introduire ces déterminants, par sélection génétique ou transgénèse, dans des plantes à forte biomasse. De telles plantes présenteraient ainsi des capacités élevées de phytoextraction et seraient utilisables pour la restauration des sols faiblement contaminés ou l'extraction de métaux à forte valeur ajoutée (Chaney *et al.* 2007).

4. ADAPTATION DES PLANTES DU MAQUIS À LA SÉCHERESSE

Elle se traduit chez différentes espèces par des caractéristiques morphologiques (réduction de la taille, feuillage sclérophylle, systèmes racinaires très développés, présence d'associations symbiotiques mycorhiziennes), qui sont souvent des adaptations aux mauvaises conditions d'alimentation à la fois hydrique et minérale. La classification des types biologiques de Raunkiaer, appliquée aux maquis du massif du Koniambo, a montré une prédominance des nano et des microphanérophytes, avec un maximum d'espèces ayant de 30 cm à 2,50 m de hauteur. Certains de ces nano et microphanérophytes sont les représentants nains d'espèces qui en forêt, dans de meilleures conditions d'humidité et de fertilité des sols, atteignent 10 à 15 m de hauteur (ex. : *Tristaniopsis guillainii*, *T. calobuxus*, *Codia discolor*, *Alphitonia neocaledonica*, *Hibbertia lucens*, *H. pancheri*, *Styphelia pancheri*, *Carpolepis laurifolia*).

La grande majorité des espèces du maquis ont des feuilles scléreuses, à consistance coriace, à aspect vernissé, et une cuticule épaisse. Autant de caractéristiques sclérophylles qui permettent à la plante de limiter ses pertes hydriques (Read *et al.* 2006). La plupart des espèces ont des feuilles de petite taille, classées entre les nanophylles et les microphylles (surface du limbe comprise approximativement entre 25 et 2 000 mm²). Des feuilles de très petite taille ou leptophylles (surface du limbe inférieure à 25 mm²) se rencontrent notamment chez *Myrtastrum rufo-punctatum*, *Logania imbricata* et plusieurs espèces des genres *Alyxia*, *Cyathopsis*, *Gossia*, *Metrosideros*, *Sannantha* (figures 3.137 à 3.140). Les espèces présentant un tomentum plus ou moins dense, qui favorise aussi la limitation des pertes hydriques, s'observent chez de nombreux genres (*Argophyllum*, *Codia*, *Dubouzetia*, *Guioa*, *Hibbertia*, *Neoschmidia*, *Pancheria*, *Beccariella*, *Solmsia*, *Soulamea*...) (figures 3.141 à 3.143).



Figure 3.137 : *Logania imbricata* (Loganiaceae).

© IRD / F. Rigault



Figure 3.138 : *Alyxia sarasinii* (Apocynaceae).

© IRD / J. Munzinger



Figure 3.139 : *Cyathopsis floribonda* (Ericaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.140 : *Sannantha leratii* (Myrtaceae).

© IAC / L. L'Huillier

Figure 3.141 : *Pancheria ferruginea* (Cunoniaceae).

© IRD / Y. Pillon

Figure 3.142 : *Beccariella sebertii* (Sapotaceae).

© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.143 : *Soulamea pelletieri* (Simaroubaceae).

© IRD / T. Jaffré

Les examens de profils pédologiques, dans le massif du Boulinda et dans le massif du Sud, ont permis de constater que les espèces des maquis avaient des systèmes racinaires très développés, la longueur des racines étant souvent 4 à 5 fois supérieure à la hauteur de la partie aérienne. En outre, les espèces arborescentes (*Araucaria* spp., *Arillastrum gummiferum*) ont des systèmes racinaires pivotants très développés, leur permettant de puiser l'eau en profondeur.

5. RÔLE DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE

La végétation protège le sol contre l'érosion hydrique de surface, en empêchant l'ablation par réduction de l'énergie des agents érosifs (« effet splash » des gouttes d'eau, arrachement de sédiments par les eaux de ruissellement) (figures 3.144 et 3.145). Elle barre le cheminement de l'eau de pluie et freine son ruissellement, favorisant ainsi son infiltration. Elle est donc le facteur principal de la régulation des débits hydriques et du transport des sédiments, source de pollution, vers les rivières. De plus, la végétation améliore les propriétés physiques et chimiques des sols. C'est notamment le cas pour la végétation feuillue, considérée comme une formation « améliorante » pour les sols. La litière jouant le rôle d'éponge permet la rétention d'une certaine quantité d'eau, tandis que les résidus végétaux décomposés en acides humiques et fulviques associés aux argiles fixent les éléments minéraux du sol et créent des agrégats qui augmentent la porosité, la perméabilité et la rétention en eau du sol. La régulation hydrologique jouée par la végétation a pour effet de diminuer la quantité, la concentration et le débit du ruissellement, et d'augmenter le temps d'écoulement des précipitations. Elle permet donc de limiter l'importance des crues et des transports solides lors des fortes pluies.

Grâce à leurs systèmes racinaires, les végétaux améliorent la cohésion du sol et renforcent ses propriétés mécaniques. Cet effet de renforcement des sols par les systèmes racinaires est particulièrement apparent sur les berges des rivières. La végétation, par la biomasse de matière organique produite par la photosynthèse (assimilation chlorophyllienne), constitue des réservoirs de carbone ainsi que d'azote et d'éléments minéraux. La végétation peut aussi jouer un rôle de régulateur thermique, en atténuant l'échauffement du sol au cours de fortes insulations (Rey *et al.* 2004). En outre, elle constitue l'habitat pour une faune variée, qui participe au fonctionnement de la composante végétale de l'écosystème par le transport des semences et la pollinisation des fleurs, et à la régulation des équilibres biologiques des populations animales entre elles ainsi qu'entre les populations animales et végétales. En l'absence de couverture végétale les sols miniers s'érodent fortement (Figure 3.144 et 3.145).



Figure 3.144 : Phénomène d'érosion (Sud).



Figure 3.145 : Ravine d'érosion remontante (lavaka).

6. DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION

L'évolution de la végétation sur terrains miniers n'a guère fait l'objet de suivi sur de longues périodes. L'examen de la végétation des anciennes mines de nickel montre néanmoins que la recolonisation végétale est très lente et imparfaite (Jaffré *et al.* 1977). Ainsi, certaines mines abandonnées depuis plus de cinquante ans demeurent entièrement nues. Lorsque quelques touffes de Cyperaceae parviennent à s'implanter, au bénéfice de microsites plus abrités, elles sont trop éparpillées pour permettre l'amélioration des conditions stationnelles et l'amorce de la succession secondaire, qui normalement se traduit par l'implantation naturelle d'espèces supplémentaires.

La succession secondaire a été décrite dans le cas de maquis incendiés, qui se régénèrent principalement par phénomène d'autosuccession, régi par le rejet de souche (lignotubers ou bulbes ligneux) de la majorité des espèces ligneuses (figures 3.146 à 3.148), et par réimplantation progressive d'autres espèces (Araliaceae, Ericaceae, Cyperaceae cespiteuses) à partir de semences contenues dans le sol ou provenant de la végétation voisine (Jaffré *et al.* 1998^b, McCoy *et al.* 1999). Dans les maquis ligno-herbacés, les plus régulièrement soumis à des incendies, les Cyperaceae cespiteuses des genres *Costularia* et *Schoenus* sont largement détruites par le feu, tandis que *Lepidosperma perteres* (Cyperaceae junciforme) se régénère rapidement et prolifère à partir de rhizomes, devenant dominante après l'incendie (figures 3.151 et 3.152). Peu inflammable, elle empêche toute nouvelle destruction par le feu durant le temps nécessaire à la réinstallation des espèces cespiteuses (plus de dix ans), à condition toutefois qu'il n'y ait pas prolifération de la fougère aigle (*Pteridium esculentum*), très inflammable en période sèche (figure 3.149). L'abondance de cette espèce traduit un stade de dégradation extrême du maquis (figure 3.151).

Dans le grand massif du Sud, la prolifération de la fougère aigle sous les plantations de *Pinus caribaea* s'est traduite par une augmentation du nombre des incendies, qui, très rapprochés, finissent par détruire les lignotubers et empêchent la reconstitution du potentiel séminal du sol. Le phénomène d'autosuccession laisse la place à un stade figé, floristiquement appauvri, de la couverture végétale.



Figure 3.146 : Rejets de souche de *Garcinia amplexicaulis* (Clusiaceae).



Figure 3.147 : Rejets de souche de *Tristaniopsis glauca* (Myrtaceae).



Figure 3.148 : Rejets de souche de *Stenocarpus umbelliferus* (Proteaceae).



Figure 3.149 : Maquis dégradé à *Pteridium esculentum* (fougère aigle).

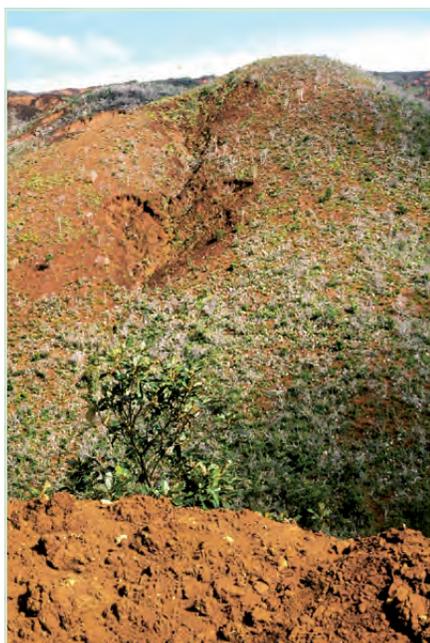
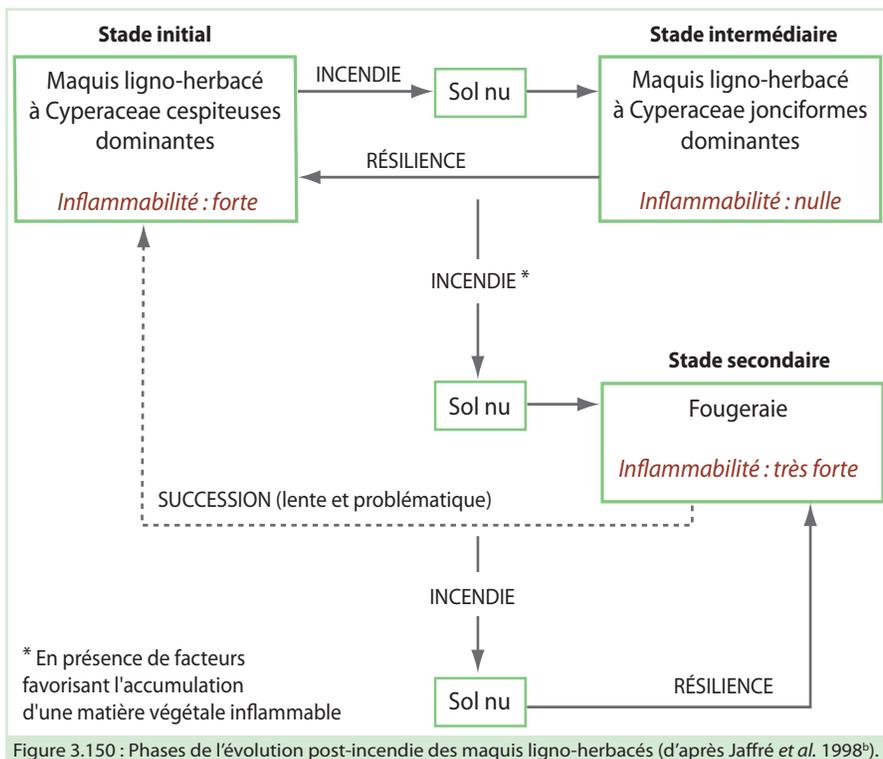


Figure 3.151 : Zone de maquis récemment incendié (Prony).

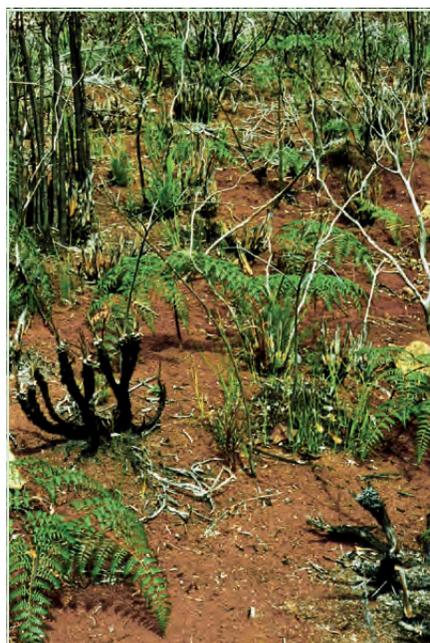


Figure 3.152 : Maquis ligno-herbacé, trois mois après incendie (plaine des Lacs).

Les formations préforestières, dominées, suivant la nature du sol, par différentes espèces du genre *Gymnostoma* de la famille des Casuarinaceae (*G. chamaecyparis* sur sols bruns hypermagnésiens, *G. deplancheanum* sur sols ferrallitiques gravillonnaires ou cuirassés, *G. poissonianum* sur sols ferrallitiques peu évolués d'érosion de basse et de moyenne altitude) (Jaffré *et al.* 1994^a), sont vraisemblablement des stades importants de la succession secondaire sur terrains miniers. Plusieurs autres espèces à comportement moins grégaire sont aussi caractéristiques des formations secondaires préforestières : *Alphitonia neocaledonica*, *Delarbrea* ssp., *Myodocarpus* spp., *Geissois* spp., *Alstonia balansae* et *Pagiantha cerifera*. En milieux plus forestiers, les formations à *Nothofagus* (Read *et al.* 1996, 2008) ainsi que celles à *Cerberiopsis candelabra* (Read *et al.* 2008), les populations de certains palmiers (Pintaud 2006), les fougères arborescentes et des espèces des genres *Codia* (Cunoniaceae), *Macaranga* (Euphorbiaceae) et *Beccariella* (Sapotaceae) (Grignon *et al.* 2009) sont des indicateurs de stades forestiers secondaires, installés à la suite de perturbations causées par des chablis d'origines diverses (chute de vieux arbres, effet de cyclones, exploitation forestière). Des études menées sur le mont Do ont montré qu'en l'absence d'incendies les populations d'*Araucaria* facilitent la succession du maquis vers la forêt en créant de meilleures conditions d'alimentation hydrique et minérale sous leur couvert, jouant ainsi le rôle d'espèce pionnière à longue durée de vie dans le maquis (Enright *et al.* 2001, Rigg *et al.* 1998, Rigg *et al.* 2010) (figure 3.153).



Figure 3.153 : Régénération d'*Araucaria laubenfelsii* en lisière de forêt, sur le mont Do, vingt-cinq ans après incendie.

© IRD / T. Jaffré

7. CONCLUSION

La végétation des terrains miniers de Nouvelle-Calédonie révèle une grande diversité de groupements végétaux, d'espèces végétales et de modes de fonctionnement, ainsi qu'une parfaite adaptation à des conditions de milieux très difficiles pour le développement des plantes. Des études taxonomiques et écologiques associées à des études génétiques seront toutefois encore nécessaires pour affiner les connaissances sur la diversité floristique, l'endémisme et la distribution des espèces, en relation avec la fragmentation des massifs de roches ultramafiques et la diversité des conditions édaphiques. Les études de biologie moléculaire, actuellement en expansion, devraient permettre de comprendre le comportement nutritionnel des espèces des substrats ultramafiques et de définir la base génétique de ces comportements.

Bien que composée d'espèces résistantes à des conditions de milieux fort contraignantes pour le développement des plantes, la flore des terrains miniers n'en demeure pas moins très vulnérable aux effets de l'activité minière, qui détruit les habitats initiaux et crée des conditions de milieux encore plus drastiques pour l'approvisionnement des plantes en nutriments et en eau, ainsi que pour leur reproduction. La revégétalisation des sites miniers dégradés ne peut, en Nouvelle-Calédonie, compte tenu de l'importance de la biodiversité associée aux substrats ultramafiques, s'en tenir à la simple installation d'une couverture végétale protectrice par l'implantation d'un nombre réduit d'espèces robustes sur des sols fortement amendés. Elle doit viser à la reconstitution à terme de la diversité des habitats, abritant une flore et une faune originales et diversifiées, assurant par là même la pérennité des processus biologiques nécessaires à l'évolution des groupements végétaux, ainsi qu'à la survie et à l'évolution des espèces. Les caractéristiques des groupements végétaux initiaux et les propriétés des espèces végétales associées aux substrats ultramafiques sont autant de paramètres à prendre en compte pour l'élaboration de plans de revégétalisation s'inscrivant dans une véritable démarche de restauration écologique.

Cela est d'autant plus justifié que les terrains miniers représentent près du tiers de la superficie du pays, et qu'ils ont, outre leur valeur économique en minerai de nickel – ressource importante mais non renouvelable –, une valeur patrimoniale, ressource potentielle pour l'avenir et durable si elle est convenablement gérée. Ce patrimoine réside dans les sites et les paysages dont la valeur esthétique est indéniable, ainsi que dans l'existence d'une flore unique et d'une biodiversité de renommée internationale.

Les meilleurs moyens de conservation du patrimoine environnemental sur les massifs miniers (esthétique, biologique et régulateur de la ressource en eau) résident dans la protection des formations forestières sur tous les massifs, ainsi que dans la revégétalisation des sites dégradés par des espèces adaptées, afin de favoriser le processus de la succession secondaire vers des formations denses et diversifiées. De plus, l'existence sur les massifs d'une couverture végétale pérenne à prédominance forestière offrira le meilleur rempart aux menaces de pollution des creeks, des plaines en contrebas, vouées à l'agriculture et à l'élevage, et du lagon inscrit au patrimoine mondial de l'Unesco. Elle assurera en outre le stockage d'une quantité non négligeable de CO₂ dans la biomasse végétale.

LES ESPÈCES, LEURS POPULATIONS, LEURS ENVIRONNEMENTS ET LEURS DEVENIRS

– Dynamiques spatiales d'espèces végétales et revégétalisation –

Par Laurent Maggia

Dans ce chapitre, il ne sera pas question de revenir une fois encore sur la grande richesse de la biodiversité néo-calédonienne, mais uniquement de s'attacher aux entités végétales qui la composent, à leur structuration et à leur évolution. L'objectif étant de mieux comprendre le fonctionnement de ces entités et des milieux qui les accueillent, de mieux appréhender les pressions environnementales qu'elles subissent, afin de contribuer à l'élaboration de règles acceptables dans un contexte de gestion durable.

L'espèce

L'usage de certains termes pouvant prêter à confusion, il est nécessaire de cadrer leur définition par rapport au texte qui suit. Ainsi, le vocable « espèce » se rapporte aujourd'hui à des entités biologiques différentes au sein de classifications pas toujours comparables (monde sexué et monde asexué par exemple) et dépendantes des méthodes et outils utilisés pour les définir.

Dans le monde du vivant, la définition la plus communément admise est celle du concept biologique énoncé par Ernst Mayr (1942) : « Une espèce est une population ou un ensemble de populations dont les individus peuvent effectivement ou potentiellement se reproduire entre eux et engendrer une descendance viable et féconde, dans des conditions naturelles. »

Cette définition admet cependant des limites ! En effet, dans l'énoncé présenté ci-dessus, il n'est fait référence qu'à une seule partie du monde du vivant, celle des organismes sexués. De plus, au sein de ce sous-ensemble des organismes sexués, tout est basé sur l'isolement reproductif qui rend impossibles les échanges de pool génétique entre ensembles d'individus. Ce qui, à terme, conduit, d'une part, à l'émergence d'espèces distinctes à partir de groupes isolés les uns des autres et, d'autre part, à la conservation, au sein de chacun des groupes, des caractères qui leur sont propres. Il en découle donc que les individus d'une même espèce partagent un patrimoine génétique commun différenciable de celui d'autres espèces dont ils sont génétiquement isolés du point de vue reproductif.

Différentes causes d'isolement reproductif peuvent être observées, ce sont de véritables barrières biologiques qui témoignent d'évolutions marquées et indépendantes entre deux groupes d'individus se différenciant. Theodosius Dobzhansky les classe en trois types :

- les barrières rendant impossible l'accouplement (barrières pré-copulatoires, ou de pré-pollinisation) ;
- les barrières rendant impossible la fécondation, bien que l'accouplement soit possible (barrières prézygotiques) ;
- et les barrières intervenant après la fécondation (barrières postzygotiques), qui, elles, vont empêcher le zygote hybride de devenir un adulte viable et/ou fécond.

Le dernier type se réfère à des espèces étroitement apparentées, pour lesquelles les barrières sont plus floues, moins définies, en cours d'élaboration. ● ● ●

C'est le cas, notamment, du cheval et de l'âne qui sont deux espèces interfécondes mais dont les descendances hybrides (mulet, bardot) ne le sont pas. Dans le règne végétal, il est difficile d'établir avec certitude la capacité d'un individu à se reproduire avec d'autres types d'individus. Dans de nombreux groupes de végétaux, il existe beaucoup d'espèces qui se croisent librement dans la nature sans que les taxonomistes les regroupent en une seule et même espèce. En Nouvelle-Calédonie, c'est probablement le cas du *Casuarina teres* qui pourrait être le produit hybride de deux autres Casuarinaceae.

Barrières biologiques et facteurs évolutifs

Les facteurs évolutifs liés à la genèse de ces barrières sont très divers. Il y a, par exemple, les facteurs géographiques, lorsque les entités se trouvent trop éloignées les unes des autres pour pouvoir entretenir des flux de gènes. Cela peut être dû à l'émergence de phénomènes physiques terrestres, tels que l'évolution de la géographie (mise en place d'archipels en milieu insulaire, apparition de barrières liée aux cycles orogéniques), ou climatiques (changements climatiques du quaternaire par exemple).

D'autres facteurs peuvent être d'ordre physiologique, comme pour des stades de maturation florale devenus asynchrones du fait d'une distribution spatiale de l'espèce ancestrale disposée le long d'un fort gradient environnemental.

Ou encore, des facteurs relevant de l'écologie des espèces, tels que l'occupation de niches écologiques différentes ou s'étant différenciées au cours du temps, et la capacité de s'adapter pour certains individus à différentes, ou nouvelles, conditions de milieu. Également, la disparition du vecteur de la pollinisation ou la dissémination de graines exceptionnellement trop éloignées de la population d'origine, qui induisent une rupture des flux de gènes entre groupes d'individus éloignés, peuvent illustrer ce dernier type de facteur.

L'espèce peut être ainsi considérée comme l'unité de base du classement du vivant, mais aussi comme la plus grande unité de population au sein de laquelle les flux génétiques sont possibles. C'est bien l'entité de base, constitutive de la biodiversité, dont il est question au début de ce chapitre. Elle ne doit pas être confondue avec l'hybride, niveau supra-spécifique dont il a déjà été question plus haut dans le texte, ni avec l'écotype, niveau infra-spécifique, qui définit une expression différenciée du phénotype pour une même espèce en relation avec des conditions de milieu particulières, des exemples seront donnés plus loin dans le texte.

Le patrimoine génétique, supporté par l'ensemble des individus d'une même espèce à l'échelle de son aire de distribution, caractérise la diversité génétique globale de l'espèce. La distribution de cette diversité génétique, entre et au sein des populations, est consécutive aux traits d'histoire de vie de l'espèce. Elle résulte, comme cité plus haut dans le texte, de multiples facteurs d'origine plus ou moins ancienne, mais aussi de facteurs plus actuels, sur des échelles de temps plus restreintes (quelques générations) et des aires géographiques plus réduites (comme le paysage). Ces facteurs sont étroitement liés à l'activité humaine et peuvent également expliquer une part de la dynamique et de la structure de la diversité génétique d'une espèce. C'est ainsi, notamment, que l'exploitation forestière, l'activité minière ou l'agropastoralisme participent à la fragmentation des forêts et impactent fortement la dynamique de la diversité génétique des peuplements. ● ● ●

Évaluation de la diversité génétique

La caractérisation et le suivi dans le temps des dynamiques de la diversité génétique des peuplements passent par la mesure des flux de gènes qu'ils engendrent, l'analyse de la distribution spatiale de leur diversité et l'analyse du régime de reproduction des espèces dont ils relèvent. L'intégration modélisatrice des réponses apportées par les espèces aux perturbations doit permettre de comprendre leur résilience et d'affiner leurs règles de gestion et de conservation. Pour ce faire et au regard des progrès techniques de la science, l'utilisation combinée des différents outils de description de la diversité (marqueurs moléculaires) devient un impératif incontournable.

Effet combiné de l'insularité et de la taille des populations en Nouvelle-Calédonie

Les milieux insulaires ont été considérés comme de remarquables laboratoires d'étude des questions liées à l'évolution (Emerson 2002). Leur isolement géographique rend difficiles et parfois quasiment impossibles, les échanges de gènes avec l'extérieur, favorisant ainsi fortement les effets de spéciation endémique.

La Nouvelle-Calédonie, connue pour ses richesses biologiques à grande majorité endémiques, affiche une compartimentation très prononcée de ses milieux de par sa géographie (dorsale montagneuse) et sa diversité pédologique (sols ultramafiques variés, sols volcano-sédimentaires...). Ce cloisonnement plus ou moins hermétique ne favorise pas les dynamiques spatiales à grande échelle des espèces végétales locales. Celles-ci se retrouvent le plus souvent confinées dans des espaces réduits limitant d'autant le nombre et la taille de leurs populations. De plus, les activités humaines qui y sont conduites, agropastorales et minières pour l'essentiel, ont un impact néfaste sur la biodiversité. C'est ainsi que les populations en déclin, ou les populations à fortes fluctuations d'effectifs, passent de manière plus ou moins prolongée par de forts goulots d'étranglement.

Ces conditions environnementales soutiennent l'existence :

- 1) d'un effet majeur à l'origine des dynamiques spatiales et temporelles des espèces végétales néo-calédoniennes, l'effet Wahlund (Sten Wahlund 1928) ;
- 2) et d'un effet moindre d'une manière générale mais très important au niveau des espèces en difficulté (déclin ou fortes fluctuations d'effectif), l'effet Allee (Stephens *et al.* 1999).

1) L'effet Wahlund fait référence à la réduction de l'hétérozygotie dans une population du fait de l'existence d'une structure en sous-populations. En effet, si deux ou plusieurs sous-populations présentent des fréquences alléliques¹ qui diffèrent, alors l'hétérozygotie globale s'en trouve réduite, même si les sous-populations elles-mêmes sont à l'équilibre de Hardy-Weinberg². L'existence de sous-populations peut être expliquée par la présence de barrières aux flux de gènes de type géographique, climatique, ou encore par l'activité humaine, lesquelles, à terme, sont susceptibles d'entraîner une dérive génétique au sein de ces sous-populations. ● ● ●

¹ On appelle allèles les différentes versions d'un même gène. Il y a deux allèles, héréditaires de chacun des parents, pour un site donné du génome, appelé locus, chez les organismes diploïdes. Les fréquences alléliques indiquent les proportions que chaque allèle admet pour un locus précis dans une population.

² Proportions liées à une distribution théorique de la diversité génétique pour une population idéale (non soumise à sélection, mutation ou migration, de taille illimitée, acceptant des croisements aléatoires entre les individus de générations non chevauchantes).

Des travaux récents portant sur *Melaleuca quinquenervia* (niaouli), en Nouvelle-Calédonie, (Lhuillier *et al.* 2009^{ab}) démontrent l'existence d'une structuration en sous-populations de l'espèce liée à un effet Wahlund. En effet, les résultats obtenus révèlent une différenciation marquée des populations analysées, peu inféodée au simple facteur d'éloignement par la distance. En revanche, les résultats indiquent la présence d'un excès en homozygotes pour l'ensemble des individus analysés à l'échelle du territoire, alors qu'au sein de chacune des populations l'équilibre de Hardy-Weinberg est mieux respecté. La géographie de la Nouvelle-Calédonie, comme déjà cité plus haut dans le texte, avec une dorsale montagneuse, véritable barrière à la dynamique spatiale de l'espèce, qui traverse le pays dans toute sa longueur, ainsi que la présence de vents dominants, vecteurs de la dispersion des graines, constituent, pour partie au moins, les causes génératrices de cet état de structuration en sous-populations. De même, la pratique régulière de feux de forêts et les défrichements importants (Cherrier 1974), effectués au profit notamment de l'agriculture locale, peuvent être impliqués dans la fragmentation des milieux et donc dans celle des populations de niaoulis.

D'autres travaux effectués notamment sur le santal, *Santalum austrocaledonicum*, mettent en évidence un effet Wahlund sur la structuration actuelle des populations de cette espèce en Nouvelle-Calédonie (Bottin 2005, 2006). L'impact de la fragmentation, anthropique ou naturelle, est un problème majeur pour les écosystèmes forestiers naturels compte tenu des risques d'érosion génétique et de menace de disparition des espèces. L'ouverture des milieux peut avoir un impact différent selon son intensité. Si elle est intense et répétée, on observe un changement de régime de reproduction (écart à la panmixie) et une structuration spatiale plus forte de la diversité génétique pour les espèces à faible dispersion des graines.

Cela a été mis en évidence pour le palissandre, *Dalbergia monticola*, à Madagascar, (Andrianoelina *et al.*, sous presse) et concerne en Nouvelle-Calédonie vraisemblablement de nombreuses populations d'espèces à faibles effectifs.

2) L'effet Allee³, attribué à un écologiste américain du début du XX^e siècle, Warder Clyde Allee, met en avant le fait que chez certaines espèces, en présence de populations à petits effectifs, la survie des individus et leur capacité à se reproduire déclinent notablement. Ce processus, se renouvelant de génération en génération, peut conduire à l'extinction des populations concernées, et par là de l'espèce si cette dernière n'est représentée que par des populations soumises au même phénomène. Ce processus de déclin en cercle vicieux est caractérisé par un seuil en effectifs en dessous duquel l'espèce est en péril.

Sous le vocable « effet Allee », il faut en réalité entendre une somme d'effets qui sont mesurables dans différents domaines de la biologie et de l'écologie. Au niveau international, certains travaux sur des espèces végétales ont révélé l'importance de la taille, ou densité, des populations :

- au niveau des systèmes de reproduction, notamment en ce qui concerne les succès de la pollinisation ou de la fécondation (Hackney & McGraw 2001, Davis *et al.* 2004, Reusch 2003), ou encore de l'augmentation de la disponibilité en partenaires pour la reproduction (Brys *et al.* 2008, Agren *et al.* 1986, Elam *et al.* 2007) ; ● ● ●

³ Hypothèse relative au fait que les individus peuvent tirer des bénéfices d'une augmentation du nombre de conspécifiques (Allee 1931), complétée par celle qui concerne la relation positive qui existe entre la fitness individuelle et la taille ou la densité de la population (Solomon 1958).

- au niveau de la capacité à modifier ou à améliorer de façon collective l'environnement (Marushia & Holt 2008) ;
- de façon indirecte, au niveau génétique, avec l'impact de la démographie sur la dépression de consanguinité, l'hybridation, ou encore avec ce qui est lié au système d'auto-incompatibilité (Wagenius *et al.* 2007).

Différents travaux conduits sur des espèces néo-calédoniennes révèlent l'importance de la taille des populations dans les niveaux de diversité génétique qui les caractérisent, sans avoir réellement testé les hypothèses relatives aux effets Allee. En ce qui concerne des travaux conduits sur l'espèce *S. austrocaledonicum*, indigène de la Nouvelle-Calédonie et du Vanuatu, l'analyse des diversités intra-population (Bottin 2006) a montré, à l'échelle insulaire de la Nouvelle-Calédonie, une hétérozygotie plus faible et un indice de fixation⁴ plus élevé par rapport aux populations d'espèces de zones continentales. Ils sont en accord avec d'autres études (Frankham 1997, 1998) qui évoquent des causes liées au petit nombre d'individus fondateurs et à la faible taille des populations fonctionnelles. Les très forts écarts aux proportions de Hardy-Weinberg chez certaines populations de *S. austrocaledonicum* (Bottin 2006) pourraient résulter aussi d'une évolution vers l'autofécondation comme déjà évoqué par Barrett (1998).

D'autres travaux relatifs à *Ixora margaretae* (*Captaincookia*), plante endémique des forêts sèches de Nouvelle-Calédonie, mettent en évidence également une menace sur son avenir au regard de la petite taille de ses populations qui entraîne une perte de diversité génétique d'une génération à l'autre (Serret 2007).

D'une manière générale, une baisse d'effectif affecte la survie et l'adaptation des espèces, de manière directe, comme pour les effets Allee liés aux systèmes de reproduction, ou indirecte, via la baisse de variabilité génétique. Ces problèmes se répercutent en retour sur la démographie, créant une rétroaction qui peut avoir des conséquences drastiques pour le destin des petites populations, tel le vortex d'extinction dans lequel peuvent être entraînées les populations en déclin.

L'intérêt de l'approche « génétique des populations » dans les actions de revégétalisation

Parmi les effets négatifs sur l'environnement liés aux activités humaines, et en particulier à celle de l'exploitation minière, la fragmentation des milieux et la perte de diversité génétique et biologique sont les plus connues (Kettle *et al.* 2007, 2008). Pour pallier ces effets, et particulièrement les effets Wahlund et Allee dont il a été question précédemment, il est aujourd'hui préconisé (Tewksbury *et al.* 2002) :

- la mise en préservation, en amont de l'exploitation minière, de sites choisis pour la qualité de la biodiversité qui y est présente (sites nodaux) ;
- ainsi que la mise en place de corridors écologiques les reliant, véritables voies de communication et d'échange entre les sites nodaux.

La production de plants et leur réinsertion se sont également avérées nécessaires pour pouvoir bénéficier d'effectifs conséquents sur le terrain, capables de jouer le rôle de « populations starters ». Il est aussi indispensable de maintenir, voire favoriser, la diversité génétique qui les caractérisera, afin de pouvoir garantir les flux de gènes essentiels à leur survie. ● ● ●

⁴ Indice permettant de mesurer la différenciation des populations à partir du polymorphisme génétique.

La restauration des sites dégradés ou floristiquement appauvris se doit donc également d'être effectuée en respectant au mieux l'état originel des sites concernés en termes de richesse spécifique et de diversité génétique. C'est pourquoi le renforcement en effectifs au sein des populations résiduelles natives doit nécessairement tenir compte de la diversité génétique présente dans la zone d'opération et aux alentours. L'identification génétique de sites semenciers à partir desquels seront prélevées les graines nécessaires aux productions de plants est incontournable, ainsi que la vérification de leur bonne correspondance avec les profils génétiques des zones à reboiser. L'intérêt des travaux scientifiques menant à l'évaluation de la biodiversité d'une unité végétale par une approche estimative de la diversité génétique des espèces qui la composent et des dynamiques qui la gouvernent s'avère essentiel dans ce type d'approche démo-génétique, qui bénéficie d'outils moléculaires de laboratoire bien adaptés.

C'est ainsi que parmi les espèces de milieux miniers néo-calédoniens, certaines espèces pionnières, comme celles du genre *Tristaniopsis*, sont déjà utilisées dans les campagnes de restauration, avec un succès qu'il conviendra d'évaluer sur le long terme. Dans le but d'optimiser leur emploi, il serait souhaitable d'approfondir nos connaissances sur leur dynamique spatiale, et plus particulièrement sur l'effet de l'impact de la fragmentation des milieux sur cette dernière. De même, leur dynamique temporelle devrait être abordée, en mettant en évidence, s'il y a lieu, l'érosion dans le temps de la diversité génétique que les populations naturelles peuvent subir en milieu minier.

D'une manière générale, les travaux évoqués ci-dessus montrent l'importance des approches démo-génétiques, pour une meilleure compréhension des dynamiques des populations, visant à mettre en œuvre les moyens nécessaires pour reconstituer les éléments manquants ou défailants des réseaux écologiques, soit l'ensemble des sites nodaux et corridors qui leur sont associés.

LA FAUNE DES MILIEUX SUR ROCHES ULTRAMAFIQUES

Nicolas BARRÉ, Jean CHAZEAU et Hervé JOURDAN

1. RÔLE DES OISEAUX DANS LA DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION DU MAQUIS

- 1.1. Les oiseaux qui fréquentent le maquis
- 1.2. La quête du nectar et la pollinisation
- 1.3. La consommation des fruits et la dissémination des semences
- 1.4. La capture et le contrôle des insectes phytophages
- 1.5. Rôle des oiseaux en maquis minier : conclusion

2. L'HERPÉTOFAUNE DES TERRAINS MINIERS

- 2.1. Isolement et radiation endémique des reptiles
- 2.2. Les ressources exploitées par les reptiles des terrains miniers
- 2.3. Préservation des milieux et conservation des reptiles

3. LES ARTHROPODES DES MASSIFS MINIERS

- 3.1. L'intérêt faunistique des milieux sur terrains miniers
- 3.2. La guildes des fourmis sur les terrains miniers
- 3.3. Caractères des peuplements d'arthropodes des terrains miniers
- 3.4. La frontière des milieux sur roches ultramafiques
- 3.5. Milieux ultramafiques et invasions biologiques

4. POUR CONCLURE SUR LA FAUNE DES TERRAINS MINIERS

L'idée qu'il existait un paradoxe de la nature néo-calédonienne, la richesse et la diversité d'une flore très originale contrastant avec la relative pauvreté d'une faune plus banale, a été définitivement écartée par les acquis scientifiques des dernières décennies. La découverte d'une importante faune fossile de vertébrés éteints à l'arrivée de l'homme, l'accroissement considérable de notre connaissance des reptiles et la prise en compte des arthropodes montrent que la diversité et l'endémisme de cette faune sont comparables à ceux de la flore (Chazeau 1993).

Les milieux sur les sols issus de roches ultramafiques contribuent fortement à l'originalité de cette faune. Le présent chapitre ne saurait faire la synthèse de l'ensemble des connaissances sur le monde animal des terrains miniers, connaissances d'ailleurs bien lacunaires pour de nombreux groupes faunistiques. On présentera donc les vertébrés, oiseaux et reptiles, pour lesquels des études particulières ont été conduites dans le domaine minier néo-calédonien, et on donnera une vue d'ensemble de la faune des arthropodes. On évoquera aussi certains acquis et quelques hypothèses quant au rôle de certains groupes dans le fonctionnement de ces milieux.

1. RÔLE DES OISEAUX DANS LA DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION DU MAQUIS

Un partenariat gagnant-gagnant

Les oiseaux tirent parti du milieu qu'ils occupent et avec lequel ils ont – notamment – des relations trophiques : arthropodes présents sur la végétation, nectar des fleurs, exsudats, fruits, graines... Dans la dynamique des maquis miniers, les oiseaux nectarivores ou frugivores ont un rôle majeur. Les premiers participent à la pollinisation, les seconds à la dissémination des semences (ornithochorie). Les oiseaux nectarivores, en introduisant leur bec à la base des pièces florales pour y collecter le nectar, assurent la pollinisation des fleurs. Du pollen prélevé sur les étamines à l'insu de l'oiseau, adhérant au bec ou sur les plumes de la tête, peut être déposé sur le pistil de la fleur suivante et assurer ainsi sa fécondation. Les graines consommées par les oiseaux granivores sont broyées dans le gésier, l'amande est détruite et digérée et les fientes ne contiennent plus d'éléments vitaux. Les oiseaux ayant ce régime alimentaire ne participent donc pas – ou de façon marginale pour des graines très petites ou particulièrement dures – à la dispersion des espèces. Il en va autrement pour les oiseaux frugivores. Le fruit est ingéré tel quel et seule la pulpe est digérée, le noyau ou les graines étant rejetés avec les fientes sur le sol où ils peuvent germer. Parmi les autres interactions entre l'avifaune et la végétation, certaines, telles que la prédation d'arthropodes phytophages (chenilles, pucerons...), sont bénéfiques pour les plantes, tandis que d'autres, incluant la prédation des pollinisateurs, sont naturellement néfastes.

1.1. Les oiseaux qui fréquentent le maquis

Une trentaine d'espèces, toutes natives, ont été répertoriées en Nouvelle-Calédonie dans les maquis étudiés (Goro et Koniambo), parmi lesquelles seules 11 ont un régime constitué essentiellement de matériel végétal (tableau 4.1). Parmi celles-ci, cinq espèces (trois Meliphagidae, un Psittacidae et un Zosteropidae) ont une fréquence supérieure à 20 % des points d'écoute réalisés et sont donc bien représentées dans cette formation. De plus, *Trichoglossus haematodus*, le Loricet à tête bleue, bien qu'assez peu fréquent en maquis, y est très attiré par les fleurs et les fruits. Citons encore le Méliphage toulou ou « méliphage noir » *Gymnomyza aubriana*, un grand mais rarissime Meliphagidae forestier qui vient occasionnellement sur des arbres en fleur en lisière de forêt. Évoquons également la Perruche de la chaîne *Eunymphicus cornutus* qui peut quitter la forêt pour exploiter les formations

paraforestières et la bordure du maquis. Ces dernières espèces n'ont pas été recensées lors des prospections en maquis sur le plateau de Goro (Desmoulins & Barré 2004). Parmi les espèces les plus impliquées dans une association avec les plantes de maquis, on compte quatre espèces assez strictement nectarivores appartenant à la famille des Meliphagidae et trois plus ubiquistes et en partie frugivores : deux Psittacidae et un Zosteropidae (tableau 4.1). Concernant les oiseaux typiquement frugivores, les deux Columbidae et le Stourne sont trop rares pour contribuer de façon significative à la dynamique du maquis. L'Échenilleur, qui consomme occasionnellement des fruits, est lui aussi peu fréquent dans ce milieu. Il n'existe, enfin, aucune espèce granivore particulièrement inféodée au maquis.

Tableau 4.1 : Fréquence (% de points où l'espèce a été contactée) et abondance (% d'individus de l'espèce par rapport au total des individus contactés) des oiseaux du maquis de Goro en saison sèche (152 points d'écoute) et en saison humide (147 des mêmes points), qui sont – ou pourraient être – impliqués dans la dynamique végétale. Les espèces qui entretiennent les interactions les plus significatives avec les plantes du maquis sont en gras. (D'après Desmoulins et Barré 2004)

Nom scientifique (et statut*)	Nom français et code	Famille	Fréquence d'occurrence		Abondance relative		Évolution SS/SH
			Saison sèche	Saison humide	Saison sèche	Saison humide	
<i>Glycifohia undulata</i>** (E)	Méliphage barré MÉBA	Meliphagidae	86,3	81,5	14,2	20,7	stable
<i>Lichmera incana ssp. incana</i> (sE)	Méliphage à oreillons gris MEOR	Meliphagidae	78,4	18,3	26,1	3,6	diminue
<i>Myzomela caledonica</i> (E)	Myzomèle calédonien MYCA	Meliphagidae	75,2	38,6	12,0	6,1	diminue
<i>Zosterops xanthochroa</i> (E)	Zostérops à dos vert ZODV	Zosteropidae	52,3	66,0	11,3	26,4	augmente
<i>Cyanoramphus saisseti</i> (E)	Perruche à front rouge PEFR	Psittacidae	17,0	20,9	1,5	3,2	stable
<i>Trichoglossus haematodus ssp. deplanchii</i> (sE)	Loriquet à tête bleue LOTE	Psittacidae	6,5	6,5	1,0	1,4	stable
<i>Ducula goliath</i> (E)	Carpophage géant (Notou) NOTO	Columbidae	4,6	4,6	0,5	0,6	stable
<i>Coracina caledonica</i> (sE)	Échenilleur calédonien ECCA	Campephagidae	2,0	2,0	0,2	0,3	stable
<i>Aplonis striatus</i> (E)	Stourne calédonien STCA	Sturnidae	1,3	0,6	0,1	0,1	stable
<i>Philemon diemenensis</i> (E)	Polochion moine POMO	Meliphagidae	0	7,2	0	1,0	augmente
<i>Columba vitiensis ssp. hypoenochroa</i> (sE)	Pigeon à gorge blanche	Columbidae	0	6,5	0	0,8	augmente

* Statut : E : espèce endémique ; sE : sous-espèce endémique. ** Nom de genre ayant changé récemment : il appartenait précédemment au genre *Phylidonyris*, qui n'est plus valide.

1.2. La quête du nectar et la pollinisation

Elle est surtout le fait d'une famille spécialisée, les Meliphagidae, bien représentée en Nouvelle-Calédonie (5 espèces, 5 genres), mais qui l'est encore mieux en Australie (73 espèces et 23 genres sur les 182 espèces et 42 genres que compte la famille). Ces oiseaux sont agiles et ont des adaptations anatomiques conformes à leur régime : un bec long et incurvé, une langue fendue à l'extrémité en quatre parties, effilochées sur les côtés et formant un pinceau qui collecte le nectar par capillarité (HANZAB 2001). Les méliphages sont considérés comme des pollinisateurs importants des plantes australiennes et néo-zélandaises appartenant en particulier aux familles des Myrtaceae, Proteaceae et Ericaceae (Armstrong 1979, Godley 1979, Ford & Paton 1986). Les essences exploitées ont un port buissonnant à arborescent, leurs inflorescences sont souvent rouges, jaunes ou blanches, les fleurs en forme de coupe, de tube ou de brosse. Plusieurs genres parmi les plus visités (*Xanthostemon*, *Grevillea*, *Geissois*, *Oxera*) ont des organes reproducteurs fins et proéminents facilitant le dépôt du pollen sur le plumage de la tête et du ventre de l'oiseau lors de la visite de la fleur, puis son transfert ultérieur sur le stigmate d'une autre fleur (figures 4.1 à 4.2). Les fleurs qu'exploitent les oiseaux possèdent des caractéristiques visuelles et anatomiques attirant ces pollinisateurs et assurant le contact avec les organes reproducteurs. Les oiseaux impliqués sont, eux, dotés d'adaptations comportementales et morphologiques spécialisées pour une collecte efficace du nectar. Leur capacité de vol assure ensuite la dissémination du pollen et donc des gènes des espèces végétales. C'est l'aboutissement d'une coévolution entre la plante et l'oiseau, permettant une interaction fonctionnelle bénéfique au profit des deux.



Figure 4.1 : Fleur de *Grevillea exul*. À maturité, et aidé par le passage d'un oiseau, le style se dégage des tépales et se dresse.



Figure 4.2 : Le stigmate à l'extrémité du style est enduit de pollen qui est directement accessible au plumage d'un oiseau, facilitant son transport vers une autre fleur, et permettant, outre une auto-fécondation, une fécondation croisée.

Parfois, ce ne sont pas les fleurs mais les autres organes producteurs de nectar qui sont recherchés, comme chez *Oxera robusta*, une liane de forêt dont les feuilles présentent des glandes nectarifères à la base du limbe, et qui sont soigneusement visitées par des méliphages.

Ces oiseaux effectuent des déplacements saisonniers conditionnés par la floraison, comme il ressort du tableau 4.1. Les fréquences dans le maquis sont plus élevées en saison sèche qu'en saison humide pour *Lichmera incana* le Méliphage à oreillons gris ou « suceur » (figure 4.3) et *Myzomela caledonica* le Myzomèle calédonien ou « sucrier écarlate » (figure 4.4). Ces deux espèces ont une gamme d'habitats variés : jusqu'à la côte pour le « suceur » et vers la forêt humide pour le « sucrier ».



Figure 4.3 : Méliphage à oreillons gris sur *Grevillea exul* ssp. *rubiginosa*. Le « suceur » est surtout présent en maquis en saison sèche et vient dans les formations de basse altitude le reste de l'année.

© ECCET / F. Desmoullins



Figure 4.4 : Mâle de Myzomèle calédonien sur *Grevillea exul* ssp. *rubiginosa*. La femelle de ce petit « sucrier » est plus terne. Cet oiseau est présent aussi en forêt humide.

© ECCET / F. Desmoullins



Figure 4.5 : Polochion moine sur *Syzygium multipetalum*. La « grive moine », espèce agressive et vocale, est surtout une espèce des forêts humides.

© SCO / P. Bachy



Figure 4.6 : Méliphage barré sur *Cunonia deplanchei*.

© SCO / P. Bachy



Figure 4.7 : Méliphage barré sur *Xanthostemon ruber*. C'est l'oiseau le plus spécifique du maquis.

© SCO / P. Bachy

Le Polochion moine, « oiseau » ou « grive moine » *Philemon diemenensis* (figure 4.5) est plutôt un oiseau des forêts humides sempervirentes qui ne vient en maquis qu'occasionnellement et, semble-t-il, seulement en saison humide. Finalement, le Méliphage barré ou « grive perlée » *Glycifohia undulata* (figures 4.6 et 4.7) est l'espèce la plus spécifique du maquis et la mieux adaptée à ce milieu où il est présent, avec une fréquence égale, toute l'année. C'est d'ailleurs l'oiseau le plus souvent observé visitant les plantes du maquis ; celui aussi ayant le plus large spectre avec 26 espèces exploitées sur les 35 sujettes à la nectarivorie (tableau 4.2).

D'autres espèces moins spécialisées ont tout de même une activité nectarivore importante : c'est le cas du Lorique à tête bleue *Trichoglossus haematodus* (figure 4.8) qui, en Australie, tire 87 % de sa nourriture des fleurs (Wyndham & Cannon 1985) et du Zostérops à dos vert ou « lunette à dos vert » *Zosterops xanthochroa* (figure 4.9), très commun dans tous les habitats néo-calédoniens dont les formations sur substrats ultramafiques (tableau 4.1).



Figure 4.8 : Lorique à tête bleue sur *Grevillea exul*.

© SCO / P. Bachy



Figure 4.9 : Zostérops à dos vert sur *Grevillea exul*.

© ECCET / F. Desmoulins



Figure 4.9 bis : Zostérops à dos vert sur *Syzygium multipetalum*.

© SCO / P. Bachy

Nos connaissances sur le rôle de ces oiseaux dans la pollinisation des plantes du maquis sont très fragmentaires et ne reposent que sur des relevés ponctuels (tableau 4.2). Trois genres de plantes, *Grevillea* (Proteaceae), *Storckia* (Fabaceae) et *Syzygium* (Myrtaceae), très florifères et communs dans le maquis, attirent le Lorique, les quatre méliphages et le Zostérops, qui peuvent se succéder sur un même arbuste en fleur (figures 4.3 à 4.5 et 4.8, 4.9). Il est probable que la plupart des espèces de ces familles de plantes ainsi que de nombreuses Cunoniaceae soient visitées par les oiseaux. Les fleurs tubulaires des *Oxera* (Lamiaceae) sont, elles, convoitées par la plupart des Meliphagidae (R. de Kok, obs. pers., in Mabberley & de Kok 2004) qui accèdent parfois au nectar en perforant la corolle plutôt que par l'ouverture (R. de Kok, G. Gateblé, F. Desmoulins, obs. pers.). Les oiseaux de petite taille que sont le Zostérops et le Myzomèle sont capables de butiner les fleurs des plantes robustes en concurrence avec les autres oiseaux, mais se réservent les plus graciles comme certains *Scaevola*. Une hiérarchie s'établit pour l'exploitation d'arbustes très convoités, généralement surveillés et défendus par les oiseaux les plus belliqueux (Polochion moine).

Tableau 4.2 : Plantes de terrains miniers dont les fleurs sont visitées par les oiseaux. (En partie d'après P. Bachy, A. Wulff, L. L'Huillier, J. Munzinger, com. pers. 2009, Kato *et al.* 2004, Mabberley & de Kok 2004, Nielsen *et al.* 2005) (Code des noms d'oiseaux au tableau 4.1 ; METO : Méliphage toulou.)

Espèce de plante	Famille	Habitat*	LO	PO	ME	ME	ME	MY	ZO
			TE	MO	BA	OR	TO	CA	DV
<i>Deplanchea speciosa</i>	Bignoniaceae	FM		●				●	
<i>Storckiella pancheri ssp. acuta</i>	Fabaceae	FM	●	●	●	●			●
<i>Cunonia deplanchei</i>	Cunoniaceae	FMR			●	●			●
<i>Geissois hirsuta</i>	Cunoniaceae	FN		●		●			●
<i>Geissois pruinosa</i>	Cunoniaceae	M		●	●	●			●
<i>Geissois magnifica</i>	Cunoniaceae	M			○	○			
<i>Geissois sp.</i>	Cunoniaceae		●						
<i>Pancheria alaternoides</i>	Cunoniaceae	M				●			
<i>Scaevola coccinea</i>	Goodeniaceae	M			●	●			●
<i>Scaevola cylindrica</i>	Goodeniaceae	MN			●				●
<i>Scaevola montana</i>	Goodeniaceae	LM							●
<i>Montrouziera rhodoneura</i>	Clusiaceae	M			●				
<i>Montrouziera sphaeroidea</i>	Clusiaceae	M							●
<i>Montrouziera sp.</i>	Clusiaceae	FM		●					
<i>Dubouzetia caudiculata</i>	Elaeocarpaceae	M			○	○			
<i>Dracophyllum verticillatum</i>	Ericaceae	M			●				
<i>Oxera baladica ssp. baladica</i>	Lamiaceae	FM			●				
<i>Oxera baladica ssp. nuda</i>	Lamiaceae	FM							●
<i>Oxera brevicalyx</i>	Lamiaceae	LM			●				
<i>Oxera coriacea</i>	Lamiaceae	FM			●				
<i>Oxera neriifolia</i>	Lamiaceae	M				●			
<i>Oxera palmatinervia</i>	Lamiaceae	FM		●	●			●	●
<i>Amyema scandens</i>	Loranthaceae	FM		●	●	●			●
<i>Serianthes calycina</i>	Fabaceae	FM			●				
<i>Carpolepis laurifolia</i>	Myrtaceae	FM			●				●
<i>Melaleuca dawsonii</i>	Myrtaceae	M			●				
<i>Melaleuca pancheri</i>	Myrtaceae	FM			●				
<i>Syzygium multipetalum</i>	Myrtaceae	FMR	●	●	●	●			●
<i>Tristaniopsis guillainii</i>	Myrtaceae	M			●				
<i>Xanthostemon aurantiacus</i>	Myrtaceae	MR			●	●			●
<i>Xanthostemon laurinus</i>	Myrtaceae	M			●	●			
<i>Xanthostemon ruber</i>	Myrtaceae	FM			●	●	○		●
<i>Grevillea exul ssp. exul</i>	Proteaceae	M	●	●	●	●			●
<i>G. exul ssp. rubiginosa</i>	Proteaceae	M	●	●	●	●			●
<i>Grevillea gillivrayi</i>	Proteaceae	MR		●	●	●			
<i>Trouettea lissophylla</i>	Sapotaceae	M							●

* Habitat d'après Jaffré *et al.* 2001. F : forêt dense humide ; L : forêt sclérophylle ; M : maquis ; N : fourrés secondaires ; R : végétation des zones humides.

● = identification certaine ; ○ = doute sur l'identité du méliphage.

Si les données sont encore limitées pour la Nouvelle-Calédonie, des observations très complètes sont disponibles en Australie pour des espèces d'oiseaux et de plantes proches des nôtres (tableau 4.3). Elles donnent une idée assez précise du spectre des plantes utilisées et de leur appartenance botanique. Il est probable que nos oiseaux utilisent également une large gamme de fleurs, en grande partie de ces mêmes familles.

Tableau 4.3 : Fleurs butinées en Australie par quatre espèces de Meliphagidae, une espèce de Zosteropidae et une de Psittacidae (incluant les fruits consommés pour ces deux dernières), de mêmes genres que les quatre Meliphagidae, le Zosterops et le Loriquet rencontrés dans le maquis néo-calédonien (d'après HANZAB 1999 et 2001).

Espèces	Monocotylédones		Dicotylédones			Total espèces
	Familles	Espèces	Familles	Espèces	Dont espèces par famille	
<i>Trichoglossus haematodus</i>	4	9	22	93	38 Myrtaceae 14 Proteaceae 1 Ericaceae*	102
<i>Glycifohia** novaehollandiae</i>	4	8	11	209	40 Myrtaceae 48 Proteaceae 4 Ericaceae	217
<i>Lichmera indistincta</i>	3	10	24	260	107 Myrtaceae 70 Proteaceae 18 Ericaceae	270
<i>Myzomela sanguinolenta</i>	0	0	11	33	12 Myrtaceae 5 Proteaceae	33
<i>Philemon citreogularis</i>	1	1	19	75	37 Myrtaceae 5 Proteaceae 1 Ericaceae	76
<i>Zosterops lateralis</i>	7	20	44	203	26 Myrtaceae 26 Proteaceae 8 Ericaceae	222

* Anciennement *Epacridaceae*. ** Anciennement *Phylidonyris*.

Plusieurs familles dont celles des Euphorbiaceae et des Dilleniaceae ne sont pas visitées par les oiseaux. Elles le sont, en revanche, par les insectes, qui participent également à la pollinisation, attirés comme les oiseaux par le nectar ou par le pollen. L'abeille domestique introduite est omniprésente dans tous les milieux, y compris le maquis, et aurait une influence sur les interactions plantes-pollinisateurs (Kato *et al.* 2004). Les abeilles autochtones, qui sont, elles, uniquement solitaires, sont également observées sur les fleurs de nombreuses familles (Cunoniaceae, Dilleniaceae, Myrtaceae, Goodeniaceae, Ericaceae...) (Pauly & Munzinger 2003, obs. pers.) (cf. encadré sur les abeilles, section 3.1). La présence de ces insectes sur les fleurs ne semble pas gêner les oiseaux, hormis par compétition alimentaire pour le partage de la ressource.

1.3. La consommation des fruits et la dissémination des semences

Pour permettre un transport efficace et un dépôt de la semence à une certaine distance, les fruits, ou au moins quelques graines, doivent être ingérés en entier. Des oiseaux frugivores qui ne consommeraient que la pulpe n'auraient pas d'interaction fonctionnelle avec la végétation. La frugivorie pour des plantes de maquis concerne essentiellement le Zosterops à dos vert et, dans une moindre mesure, les Psittacidae.

Le comportement alimentaire du Zostérops a été étudié en forêt sèche (Boissenin *et al.* 2006) où cet oiseau consomme les fruits de 18 espèces d'arbres et arbustes. Il est attiré par des fruits de couleur verte et de couleurs vives et foncées. Il est capable d'ingérer entièrement des drupes et des baies de neuf espèces végétales d'un diamètre polaire compris entre 5 et 11,2 mm et d'un diamètre équatorial compris entre 4,5 et 9,8 mm. Parmi ces neuf espèces, seules deux : *Jasminum didymum* (Oleaceae), dont la drupe est lie-de-vin, et *Premna serratifolia* (Lamiaceae), à la petite drupe noire, sont présentes également en maquis (Jaffré *et al.* 2001). Le transit intestinal des graines est généralement rapide, de 13 à 14 min, raccourci de 2 min si les fruits sont consommés en série. Pendant ce temps, l'oiseau, qui prospecte d'un buisson à l'autre, peut parcourir une centaine de mètres. Plusieurs observations ont montré que des graines débarrassées de leur pulpe au cours du transit intestinal avaient un taux de germination plus élevé que celui des fruits entiers ou dépulvés mécaniquement (Tassin *et al.* 2009). Il est probable que les groupes du Zostérops à dos vert, très commun, mobile et très éclectique, consomment une large gamme de fruits de petite taille, en plus des insectes et du nectar, et en assurent la dissémination. Les petites drupes jaunes charnues de 3-4 mm de diamètre de *Styphelia*, notamment *S. pancheri* et *S. veillonii*, communes dans les maquis miniers et recherchées par cet oiseau, sont de parfaites candidates à l'ornithochorie (figure 4.10).



© IAC / N. Barré

Figure 4.10 : Les petits fruits de *Styphelia veillonii* sont recherchés par les bandes vagabondes du Zostérops à dos vert.



© SCO / P. Bachy

Figure 4.11 : Perruche à front rouge venant au sol pour consommer les fruits d'*Uromyrtus emarginata*.



© SCO / P. Bachy

Figure 4.12 : Perruches de la chaîne *Eunymphicus cornutus*, venant au sol pour consommer les fruits d'*Uromyrtus emarginata*. Ces perruches sont également friandes de bourgeons et de fleurs, dont celles des *Grevillea*.

Parmi les Psittacidae, et par analogie avec sa congénère néo-zélandaise, la Perruche à front rouge *Cyanoramphus saisseti* est omnivore et mange des baies, des fruits, des graines, des bourgeons, des feuilles, des fleurs, du lichen, des morceaux de bois mort ou d'écorce et des invertébrés (HANZAB 1999). Elle a été notée mangeant des fruits à maturité de *Tristaniopsis glauca* (Myrtaceae) et des fleurs de *Grevillea*. Comme la Perruche de la chaîne, elle affectionne les baies, notamment celles d'un petit arbuste du maquis souvent prostré, *Uromyrtus emarginata* (Myrtaceae), dont elle ingère et propage probablement les petites graines (figures 4.11 et 4.12). Ces deux espèces pour lesquelles la durée de transit pourrait se rapprocher de celle de Columbidae de même taille, soit une trentaine de minutes à une heure (Boissenin *et al.* 2006), peuvent contribuer à une dissémination à plus longue distance. Bien que très rare en maquis (tableau 4.1), le Stourne calédonien *Aplonis striatus* a été vu consommant des fruits d'*Oxera neriifolia* (Mabberley & de Kok 2004) et pourrait en assurer la dissémination.

1.4. La capture et le contrôle des insectes phytophages

Nous ne citerons ce groupe trophique que pour mémoire, compte tenu du rôle probable de ces oiseaux dans le contrôle d'arthropodes phytophages. La plupart des oiseaux consomment des insectes, soit exclusivement ou presque : Gérygone mélanésienne *Gerygone flavolateralis* (57,5 % des points d'écoute en maquis en saison sèche et 72 % en saison humide), Rhipidure à collier *Rhipidura albiscapa* (34,6 et 30 %), Siffleur itchong *Pachycephala rufiventris* (46,5 et 6,5 %), Échenilleur pie *Lalage leucopyga* (41,8 et 18,9 %), salanganes (7,8 et 11,1 %)..., soit de façon opportuniste comme le font les méliphages et le Zostérops, en période de reproduction notamment. En effet, une partie des insectes du feuillage et des fleurs est aussi consommée par ces oiseaux nectarivores. Une étude sur le régime de *Glycifolia (Phylidonyris) novaehollandiae* dans la Victoria, portant sur 10 548 observations, a montré que 80,7 % des comportements alimentaires concernent la prise de nectar et 19,3 % la capture d'arthropodes (Paton 1982). Dans un travail conduit en Australie-Occidentale, Matthiessen & Springett (1973) ont rapporté que 43,5 % des 191 *Zosterops lateralis* examinés avaient consommé du matériel végétal, mais 68,6 % des lépidoptères et 49,2 % des hémiptères, attestant de leur rôle dans la régulation de ces insectes phytophages.

1.5. Rôle des oiseaux en maquis minier : conclusion

Même si le nombre d'espèces d'oiseaux néo-calédoniens fréquentant le maquis et ayant des relations trophiques avec les plantes est relativement faible, puisqu'on n'y rencontre régulièrement que quatre méliphages, trois Psittacidae et un Zostérops, ces oiseaux ont vraisemblablement une fonction de premier plan dans la dynamique des communautés végétales. Une famille spécialisée comme les Meliphagidae, qui assure la pollinisation de nombreuses plantes lors du prélèvement de nectar, a un rôle vecteur essentiel dans la propagation des gènes. La stratégie mise en œuvre procure un bénéfice mutuel. Peu d'espèces (deux perruches et le Zostérops) sont, en partie au moins, frugivores et capables d'assurer la dissémination des graines. S'agissant du Zostérops, c'est le cas pour des fruits de faible diamètre, tandis que les perruches peuvent disséminer des graines de très petite taille qui échappent au broyage, ou encore déplacer des fruits incomplètement consommés. On peut considérer qu'il est peu probable que des espèces frugivores de plus grande taille ayant occupé cet habitat aient aujourd'hui disparu. D'autres modes de dissémination auraient donc été privilégiés au cours de l'évolution des écosystèmes des maquis.

2. L'HERPÉTOFAUNE DES TERRAINS MINIERS

2.1. Isolement et radiation endémique des reptiles

Avec près d'une centaine d'espèces, la faune de reptiles (herpétofaune) de la Nouvelle-Calédonie est riche et originale. Les geckos sont des Gekkonidae (6 espèces) ou des Diplodactylidae (40 espèces endémiques) et les lézards sont tous des Scincidae (52 espèces, en majorité endémiques) (Bauer & Sadlier 2000, Sadlier *in lit.*) (figures 4.13 et 4.14).



Figure 4.13 : *Kanakysaurus zebratus* (lézard de la famille des Scincidae).

© R. Sadlier



Figure 4.14 : *Rhacodactylus auriculatus* (gecko de la famille des Diplodactylidae).

© IRD / H. Jourdan

Les massifs miniers abritent la plus grande partie de cette faune particulière à la Nouvelle-Calédonie, et leur intérêt comme zones d'endémisme a suscité plusieurs études dans la dernière décennie. Les spécialistes estiment que le tiers des espèces vivant dans ces milieux reste encore à découvrir et à décrire (Sadlier *et al.* 2008). Mais tous les milieux miniers ne sont pas également favorables à la vie des reptiles, qui sont tous des prédateurs et qui sont très sensibles à la dessiccation.

Ainsi, dans le grand massif minier du sud de la Grande Terre, la majorité des espèces recensées se rencontre dans les milieux forestiers (33 espèces). Les maquis paraforestiers et les maquis arbustifs ou ligno-herbacés abritent une faune beaucoup moins diverse (13 et 10 espèces respectivement). Dans ces maquis, créant sous leur couvert discontinu des conditions de milieu plus sèches, pauvres en abris convenables, la présence de blocs de cuirasse est un facteur favorable à la survie des espèces. De même, les maquis d'altitude, plus frais et plus humides, peuvent abriter des espèces habituellement observées en milieux forestiers (Sadlier *in lit.*). Les maquis miniers de moyenne et de haute altitude des massifs ultramafiques de la côte ouest semblent plus riches en espèces que ceux des massifs du Grand Sud (Sadlier *et al.* 2008).

Les espèces qui semblent restreintes aux milieux sur terrains miniers sont données dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Reptiles endémiques qui semblent restreints aux milieux sur terrains miniers. (Source : IRD - Base *Fatercal*)

Diplodactylidae	Scincidae
<i>Bavayia geitana</i>	<i>Graciliscincus shonae</i>
<i>Bavayia goroensis</i>	<i>Kanakysaurus zebratus</i>
<i>Bavayia pulchella</i>	<i>Lacertoides pardalis</i>
<i>Bavayia robusta</i>	<i>Lioscincus maruia</i>
<i>Bavayia septuiclavis</i>	<i>Lioscincus tillieri</i>
<i>Dierogekko kaalaensis</i>	<i>Lioscincus vivae</i>
<i>Dierogekko koniambo</i>	<i>Marmorosphax boullinda</i>
<i>Dierogekko nehoueensis</i>	<i>Marmorosphax kaala</i>
<i>Dierogekko poumensis</i>	<i>Marmorosphax montana</i>
<i>Dierogekko thomaswhitei</i>	<i>Marmorosphax taom</i>
<i>Rhacodactylus auriculatus</i>	<i>Nannoscincus garrulus</i>
<i>Rhacodactylus ciliatus</i> (aussi sur l'île des Pins)	<i>Nannoscincus manautei</i>
<i>Rhacodactylus sarasinorum</i>	<i>Nannoscincus mariei</i>
	<i>Sigaloseps deplanchei</i>
	<i>Sigaloseps ruficauda</i>
	<i>Simiscincus aurantiacus</i>
	<i>Tropidoscincus variabilis</i>

2.2. Les ressources exploitées par les reptiles des terrains miniers

Régime alimentaire

Il n'existe qu'une étude publiée sur la biologie d'une espèce, *Tropidocincus variabilis* (Shea *et al.* 2009). Les échantillons proviennent de la région de la plaine des Lacs, dans le Grand Sud ultramafique de la Nouvelle-Calédonie. Ce scinque de taille moyenne est principalement forestier, mais il se rencontre aussi en maquis.

L'analyse des contenus stomacaux révèle une activité prédatrice diurne et un régime carnivore à large spectre, composé d'invertébrés qui sont essentiellement des arthropodes, parmi lesquels une majorité d'araignées (surtout des Salticidae) et d'orthoptères (Gryllidae). Les lépidoptères, coléoptères, blattes, diptères, hyménoptères, hémiptères et isopodes sont aussi communs (constituant plus de 5 % des débris identifiés, ou présents dans au moins 15 % des contenus stomacaux analysés). Il apparaît que les juvéniles consomment proportionnellement plus d'araignées, d'hémiptères (punaises des végétaux) et d'isopodes (crustacés terrestres) que les adultes. Il semble que cela reflète la disponibilité des proies dans le milieu plutôt qu'une stratégie de chasse, mais certaines proies (punaises des végétaux, isopodes) semblent négligées ou évitées par les adultes. Cette espèce ne semble pas consommer d'autres lézards de taille plus modeste, contrairement à ce qui a été observé occasionnellement pour *Lioscincus nigrofasciolatus* ou *Caledoniscincus festivus*. Ces données confirment, en les précisant, les résultats généraux obtenus pour le groupe par Bauer et De Vaney (1987).

Une autre étude en cours, portant sur une vingtaine d'espèces de scinques et de geckos des maquis et des forêts de Nouvelle-Calédonie, témoigne de l'existence de régimes principalement insectivores. Mais plusieurs espèces, tant scinques que geckos,

consomment des nectars floraux, ce qui permet de supposer qu'elles jouent un rôle de pollinisateurs occasionnels. D'autres consomment aussi des fruits et peuvent participer à la dispersion des semences, bien qu'aucune étude n'ait vérifié la capacité germinative des graines rejetées. Dans l'état actuel des connaissances sur la biologie des reptiles en Nouvelle-Calédonie, il ne semble pas exister de différence qualitative marquée entre les régimes des espèces sur terrains miniers et hors de ces zones (Jourdan & Sadlier, en préparation).

Ressources disponibles et populations

Une étude des maquis de la basse Tontouta (Chazeau *et al.* 2003) a permis de recenser six espèces seulement de reptiles sur l'ensemble des sites prospectés : cinq espèces de scinques (*Caledoniscincus atropunctatus*, *C. austrocaledonicus*, *C. haplorhinus*, *Marmorosphax tricolor* et *Tropidoscincus variabilis*) et une espèce de gecko (*Bavayia septuiclavis*). La seule espèce commune à tous les milieux est *C. austrocaledonicus*, mais son abondance, qui varie avec les sites, n'est jamais grande. Les trois *Caledoniscincus* sont petits (longueur du corps environ 50 mm) et ils ont au sol une activité diurne. Deux *C. haplorhinus* seulement et un seul *T. variabilis* ont été observés. Les maquis ouverts ont la richesse spécifique la plus faible (trois espèces de scinques).

Ces milieux montrent donc, pour les populations reptiliennes, des niveaux d'abondance et de diversité modestes, niveaux qui peuvent simplement résulter de la nature particulière des habitats. En termes de micro-habitats, les maquis arbustifs ou les maquis ligno-herbacés sont des milieux relativement ouverts qui, comparés à la forêt humide, ont une diversité structurelle limitée pour les sites susceptibles d'abriter les geckos. En termes d'abondance des reptiles, la « capacité de charge » de ces milieux peut être limitée par la quantité des ressources trophiques qui y sont disponibles. En outre, ces milieux sont souvent dégradés (passage de feux, présence d'espèces envahissantes). La quantité des ressources alimentaires exploitables limite le nombre des espèces recensées dans une station, comme elle limite le nombre des individus observés. La relative pauvreté en reptiles des maquis de la basse Tontouta contraste fortement avec la richesse et l'originalité de la flore de cette zone (Jaffré *et al.* 2003). Dans ces milieux, la vie, ou la survie, des reptiles, situés en bout de la chaîne alimentaire, apparaît donc difficile.

2.3. Préservation des milieux et conservation des reptiles

L'étude des reptiles néo-calédoniens montre que le grand massif minier du Sud et les massifs du Centre et du Nord-Ouest sont des zones d'endémisme bien distinctes. Le Sud a ainsi l'exclusivité de 10 espèces de scinques des genres *Sigaloseps*, *Graciliscincus*, *Simiscincus*, *Lacertoides*, *Nannoscincus*, *Marmorosphax*, *Tropidoscincus* et *Lioscincus* (figure 4.15) et de 4 geckos des genres *Bavayia* et *Rhacodactylus*. Les massifs miniers de l'Ouest abritent six scinques endémiques appartenant aux genres *Marmorosphax*, *Kanakysaurus*, *Lioscincus* et *Nannoscincus*, six geckos du genre *Dierogecko* et plusieurs *Bavayia* non décrits (Sadlier *in. lit.*).



Figure 4.15 : *Nannoscincus gracilis* (scinque endémique).

© IRD / H. Jourdan

Cet endémisme localisé s'explique par l'isolement de ces massifs, pour lesquels on peut parler d'une structure d'îles dans l'île. Ainsi, les deux scinques endémiques du Kopéto (*Nannoscincus manautei* et *Lioscincus vivae*) sont confinés à cette localité et il en va de même pour *Dierogecko kaalensis* ou *Marmorosphax kaala* du Kaala, ou pour les deux autres espèces endémiques des mêmes genres qui vivent sur l'Ouazangou-Taom. Au sein du grand massif du Sud, le même phénomène est d'ailleurs observé pour les zones sommitales.

Au plan de la conservation, la restriction extrême des aires de répartition de plusieurs espèces endémiques est une donnée qui interpelle. Dans le domaine minier, l'exploitation du milieu par l'homme signifie sa destruction totale, ce qui implique l'extinction des espèces qui ne se retrouvent en aucune autre localité. Cette particularité doit donc être intégrée dans la définition des stratégies de conservation.

3. LES ARTHROPODES DES MASSIFS MINIERES

Des herbivores aux prédateurs, comment s'adapter au milieu

Lorsqu'un visiteur curieux de nature déambule dans un maquis minier ligno-herbacé, il ne peut manquer d'observer la discrétion de la faune : les oiseaux sont rares, les furtifs lézards encore plus, et l'amateur d'insectes doit se contenter des vols de mouches et de modestes papillons, ou des prospections inlassables de quelques fourmis dont le but n'apparaît guère. Lorsque ce visiteur gagne les maquis hauts, et plus encore les forêts, la vie animale s'exprime avec plus de vigueur. Mais, pour le zoologiste familier de l'exubérance tropicale, les milieux sur terrains miniers sont au premier abord des zones surprenantes sinon décevantes. Les premiers hommes qui ont vécu en Nouvelle-Calédonie ont sans doute perçu leur caractère hostile : ces terrains étaient traditionnellement des zones de parcours et de coupe, dans lesquelles l'homme ne s'établissait pas.

3.1. L'intérêt faunistique des milieux sur terrains miniers

Le naturaliste qui s'intéresse à ces milieux est cependant vite convaincu de leur grand intérêt scientifique : à la diversité et à l'originalité de la flore répondent une diversité et une spécificité comparables de la faune. Les zones ultramafiques participent fortement à l'endémisme de la Nouvelle-Calédonie. La contribution des divers groupes animaux à cet endémisme varie beaucoup et on se bornera à commenter les plus remarquables. Il faut aussi rappeler que la connaissance des invertébrés, compte tenu de leur nombre et du faible effectif des spécialistes mobilisés pour leur étude, est loin d'être aussi satisfaisante que celle des vertébrés (Chazeau 1993).

Un endémisme ultramafique aux niveaux générique et spécifique s'observe chez des parasites strictement inféodés à un hôte végétal. La faune des cochenilles (hémiptères, *Coccoidea*) est riche en espèces cryptiques à l'aisselle des feuilles de plantes endémiques du maquis minier du Sud : *Abrallaspis* sur *Cyperaceae* sp., *Chazeauana* sur *Gahnia* (*Cyperaceae*), *Neoclavicoccus* sur *Sannantha*, *Tessarobelus* sur *Tristaniopsis* (deux *Myrtaceae*), *Diaspis* et *Tessarobelus* sur *Gymnostoma* (*Casuarinaceae*). Une radiation endémique du groupe voisin des hémiptères *Aleyrodidae* (aleurodes, ou mouches blanches) est observée sur les *Araliaceae*, les *Cunoniaceae*, les *Ericaceae*, les *Myrtaceae* et les *Loranthaceae* (Cohic 1959^a, 1959^b, Dumbleton 1961, Matile-Ferrero 1988). Les thrips gallicoles du genre *Teuchothrips* (thysanoptères) montrent une spéciation endémique sur les *Hibbertia* (*Dilleniaceae*) et les *Codia* (*Cunoniaceae*). Le même phénomène est observé chez les coléoptères *Apionidae*, sur les *Hibbertia* (Wanat 2008).

Des groupes beaucoup plus mobiles, comme certains papillons (lépidoptères macro-hétérocères), présentent aussi sur les terrains miniers une radiation endémique, en rapport avec la phytophagie stricte qui les lie aux plantes hôtes de leurs chenilles : c'est le cas des genres *Adeixis*, *Codalithia*, *Scopula*, *Cofimpacia*, *Fabresema*. Les forêts denses sur terrains miniers, où le caractère ultramafique des sols est atténué par l'humus abondant, hébergent elles aussi des espèces qui ne se retrouvent pas sur roches sédimentaires (*Neola octofera*, *Stictoptera tridentifera*). Le beau *Compsulyx cochereaui* (Holloway 1979), puissant voilier comme tous les sphinx, est capturé le plus souvent en zone ultramafique, du fait de l'abondance de ses plantes hôtes, les *Tristaniopsis* (Myrtaceae) (figures 4.16 et 4.17). Les *Hibbertia* et les *Nothofagus* sont, dans ces milieux, les hôtes exclusifs de la superbe hépiale *Aenetus cohici* (Viette 1961), que l'on croyait très rare parce que sa vie adulte ne dure que quelques jours (deux au maximum, observé en conditions d'élevage), alors que son cycle larvaire dure de longs mois (T. Salesne, com. pers.) (figures 4.18 à 4.20).



© SENC / T. Salesne

Figure 4.16 : *Compsulyx cochereaui*, chenille au dernier stade.



© SENC / T. Salesne

Figure 4.17 : *Compsulyx cochereaui*, mâle en position de défense, ouvrant ses ailes.



© SENC / T. Salesne

Figure 4.18 : *Aenetus cohici*, émergence du papillon femelle.



© SENC / T. Salesne

Figure 4.19 : *Aenetus cohici*, femelle, une fois les ailes sèches.



© SENC / T. Salesne

Figure 4.20 : *Aenetus cohici*, émergence d'un mâle.

L'endémisme ultramafique s'observe aussi dans des groupes *a priori* moins strictement inféodés à un hôte végétal : les collemboles brouteurs d'épiphytes, qui vivent dans les sols suspendus des forêts du Grand Sud, certains floricoles aux larves mycétophages (Mycetophilidae, Keroplatidae), des diptères prédateurs, comme les syrphes (Syrphidae) ou les taons (Tabanidae), et les Ceratopogonidae, parasites de divers hôtes invertébrés ou vertébrés.

D'autres arthropodes contribuent fortement à l'endémisme des terrains miniers, telles les mygales Barychelidae et Dipluridae, toutes endémiques (figure 4.21). Une barychelide du genre *Idioctis* habite les crevasses de cuirasse, dans la zone intertidale du Sud néo-calédonien, où elle capture ses proies. La plupart vivent dans des terriers, fermés par un opercule soyeux, que l'on peut observer sur les côtés des routes forestières. La moitié des 32 espèces connues du genre *Encyocrypta* est restreinte aux substrats ultramafiques et les 6 espèces connues du genre endémique *Stenygrocerus* ne vivent que sur ces substrats (Raven 1991, 1994).



© IRD / H. Jourdan

Figure 4.21 : Mygale Barychelidae, typique des terrains miniers.

LES ABEILLES

Bien que les abeilles constituent un groupe très important parmi les hyménoptères, relativement peu d'études leur ont été consacrées en Nouvelle-Calédonie. Contrairement à la flore locale, les Apoidea apparaissent peu diversifiés. Ainsi, seulement 21 espèces, dont environ un tiers sont endémiques, ont été inventoriées par Pauly & Munzinger (2003). Certaines abeilles seraient strictement inféodées à une espèce végétale, alors que d'autres semblent nettement opportunistes. C'est le cas de l'abeille endémique *Austronomia sicheli* qui a été observée sur plusieurs espèces végétales, uniquement autochtones, dont certaines croissant sur substrats ultramafiques (*Sannantha leratii*, *Styphelia pancheri*...) (figure 4.22). L'abeille à miel introduite *Apis mellifera* est signalée dans tous les milieux, à toute altitude, sur la Grande Terre. Elle représente près de 90 % de l'ensemble des abeilles observées sur 95 espèces végétales indigènes, tandis que les abeilles natives n'ont été répertoriées que sur 11 espèces végétales (Kato & Kawakita 2004). Selon ces auteurs, la pollinisation est assurée principalement par les abeilles (46,3 %), puis par les papillons (20 %), les oiseaux (11,6 %), les coléoptères (8,4 %)... Les études ne permettent cependant pas de définir une répartition des abeilles en fonction des milieux ou d'entrevoir un particularisme associé aux terrains miniers.



© IRD / J. Munzinger

Figure 4.22 : *Austronomia sicheli* (abeille endémique) sur une inflorescence de *Dracophyllum verticillatum*.

3.2. La guilde des fourmis sur les terrains miniers

Les insectes sociaux et plus particulièrement les fourmis dominent la plupart des écosystèmes terrestres tropicaux ; ces dernières sont considérées comme un groupe « clé de voûte » pour les communautés animales et comme de bons marqueurs des habitats et de leur état de conservation (Agosti *et al.* 2000, Wilson & Hölldobler 2005). À l'échelle du globe, on considère qu'elles ont une action majeure dans la dispersion des graines (près de 35 % des plantes à graines) et qu'elles sont parmi les plus grands prédateurs et détritivores, consommant 90 % des arthropodes morts. Les communautés de Formicidae sont des indicateurs biologiques relativement fiables et sensibles (Lloyd *et al.* 2002). Elles offrent un fort potentiel pour l'évaluation de l'impact des changements globaux induits par l'homme (destruction d'habitat, propagation d'espèces envahissantes, changement microclimatique...). À travers des protocoles standardisés (protocole ALL : Agosti *et al.* 2000), elles sont utilisées comme indicateurs dans les pré-études et les études d'impact en milieu sur terrains miniers, notamment en Nouvelle-Calédonie.

LE PROTOCOLE ALL (Ants of the Leaf Litter)

Un outil pour l'évaluation et le suivi de la qualité des milieux

Il consiste en un double échantillonnage au sol, le long d'un transect à travers le milieu étudié. Deux méthodes complémentaires sont mises en œuvre de façon synchrone. Des échantillons de litière sont systématiquement prélevés le long du transect, tous les 10 m, sur une surface de 1 m², et la faune qu'ils abritent est récupérée au moyen d'extracteurs de Winkler. Des pièges d'interception de type Barber (*pitfall traps*) sont posés au voisinage des points de prélèvement de la litière et sont laissés en place pendant 48 heures. Dans la pratique, le marquage du transect et la pose des pièges de Barber sont faits le même jour ; le relevé des pièges est fait après 48 heures de capture et le prélèvement de la litière est fait immédiatement après. Les espèces capturées sont identifiées et les données d'occurrence et d'abondance sont traitées, pour obtenir des indices de richesse et de diversité qui complètent l'information et facilitent la comparaison des milieux (Agosti *et al.* 2000).

La longueur des transects dans le protocole ALL est variable et elle conditionne le nombre des échantillons : plus long est le transect, plus nombreux sont les échantillons. Le nombre d'échantillons préconisé est compris entre 20 et 50, ce qui implique des transects de 200 à 500 m (Fisher *et al.* 2000). Dans le cadre des études conduites dans les milieux miniers de la Nouvelle-Calédonie, la longueur retenue pour les transects est de 200 m, ce qui semble le maximum possible compte tenu de la taille des formations échantillonnées, souvent fragmentées, avec des changements de faciès sur de courtes distances. Pour que la caractérisation des milieux par leur diversité soit correcte, il faut traiter des stations écologiquement homogènes. C'est pourquoi, dans ces milieux, il s'avère parfois nécessaire de mener cet échantillonnage sur un layon non rectiligne ou sur 2 layons de 100 m, pour éviter de sortir de la station choisie sur la zone type étudiée, ou d'y inclure une zone trop altérée (piste, clairière trop vaste, layon) (Chazeau *et al.* 2004).

La myrmécofaune néo-calédonienne actuellement répertoriée compte 132 espèces et 4 sous-espèces taxonomiquement valides, réparties en 50 genres dont aucun n'est endémique. Les travaux en cours laissent penser que cette faune pourrait dépasser 180 espèces (Jourdan *in lit.*). Près de 85 % des espèces sont endémiques ou natives de Nouvelle-Calédonie. On y remarque de nombreuses fourmis primitives (Myrmeciinae : *Myrmecia apicalis* ; Cerapachyinae : 7 espèces ; présence du genre *Leptomyrme*, qui a connu une distribution mondiale il y a environ 90 millions d'années et qui ne se rencontre plus qu'en Australasia ; figure 4.23) (Baroni Urbani *et al.* 1987) et la grande contribution des Ponerinae (au moins 45 espèces de *Prionopelta*, *Amblyopone*, *Proceratium* et *Rhytidoponera*, pour ne citer que les plus remarquables). La myrmécofaune présente donc des caractères originaux, qui témoignent de son origine continentale ancienne (Ward 1985, Jourdan 2002). La diversité du genre *Discothyrea*, avec 5 espèces endémiques (description en préparation), est remarquable puisque ce genre, un des plus archaïques des Formicidae, ne compte que 7 espèces en Australie et 27 dans toute la ceinture tropicale (Bolton 1995). Ce sont des prédateurs spécialisés d'œufs d'arthropodes (surtout araignées) et on peut rapprocher leur radiation en Nouvelle-Calédonie de la grande diversité des arachnides sur substrats ultramafiques (Platnick 1993).

Au plan structurel, on remarque la faiblesse de la faune arboricole (quasi-absence de genres arboricoles dominants sous les tropiques, comme *Crematogaster* et *Polyrhachis* ; figures 4.24 et 4.25) et la dominance d'espèces terricoles qui occupent les niches de la strate intermédiaire, comme les *Paratrechina*.



Figure 4.23 : *Leptomyrme pallens* (fourmis araignées, indigènes) transportant une proie.

© IRD / H. Jourdan



Figure 4.24 : *Camponotus gambeyi* (endémique) sur nectaires extra-floraux de *Deplanchea* sp.

© IRD / H. Jourdan



Figure 4.25 : *Polyrhachis guerini* (espèce endémique) entretenant des cochenilles.

© IRD / H. Jourdan

Une étude récente a porté sur une gamme représentative des habitats de basse altitude d'un domaine minier du Sud néo-calédonien, préalablement à son exploitation (Chazeau *et al.* 2004). Les stations retenues ont échantillonné divers milieux naturels : maquis arbustifs à hydromorphie temporaire, maquis arbustifs ouverts, maquis arbustifs semi-ouverts sur cuirasse, maquis ligno-herbacés, maquis paraforestiers à chêne gomme, maquis paraforestiers à *Gymnostoma*, maquis paraforestiers de piedmont et sur éboulis, formations préforestières à *Metrosideros*, forêts rivulaires, forêts à chêne gomme et forêts de piedmont sur alluvions-colluvions. Ces stations ont été étudiées suivant le protocole ALL (voir encadré).

Tableau 4.5 : Identité et statut des espèces de la myrmécofaune recensées pendant une étude des habitats ultramaïques de la région de Goro (Chazeau *et al.* 2004).

Espèce	Statut	Espèce	Statut
<i>Adelomyrmex</i> sp. GA	E	<i>Ochetellus glaber</i>	N
<i>Anochetus graeffei</i>	N	<i>Odontomachus simillimus</i>	N
<i>Anonychomyrma</i> sp. GA	E	<i>Oligomyrmex sodalis</i>	N
<i>Anoplolepis gracilipes</i>	I	<i>Oligomyrmex</i> sp. GA	E
<i>Brachymyrmex obscurior</i>	I	<i>Orectognathus sarasini</i>	E
<i>Camponotus gambeyi</i>	E	<i>Paratrechina caledonica</i>	E
<i>Camponotus hoplites</i>	E	<i>Paratrechina foreli</i>	E
<i>Camponotus sommeri</i>	N	<i>Paratrechina longicornis</i>	I
<i>Cardiocondyla emeryi</i>	I	<i>Paratrechina</i> sp. GA	E
<i>Cerapachys</i> sp. GA	E	<i>Paratrechina</i> sp. GB	E
<i>Crematogaster</i> sp. GA	E	<i>Paratrechina</i> sp. GC	E
<i>Discothyrea</i> sp. GA	E	<i>Paratrechina</i> sp. GD	E
<i>Discothyrea</i> sp. GB	E	<i>Paratrechina vaga</i>	I
<i>Eurhopalothrix caledonica</i>	E	<i>Pheidole luteipes</i>	E
<i>Hypoponera</i> sp. GA	N	<i>Pheidole</i> sp. GA	E
<i>Iridomyrmex calvus</i>	E	<i>Pheidole</i> sp. GB	E
<i>Iridomyrmex</i> sp.	I	<i>Pheidole</i> sp. GC	E
<i>Leptomyrmex pallens</i>	N	<i>Pheidole</i> sp. GD	E
<i>Leptomyrmex pallens nigriceps</i>	E	<i>Podomyrma</i> sp.	E
<i>Lordomyrma rouxi</i>	E	<i>Polyrhachis guerini</i>	E
<i>Lordomyrma</i> sp. GA	E	<i>Pyramica (Glomyrmyrmex)</i> sp. GA	E
<i>Lordomyrma</i> sp. GB	E	<i>Rhytidoponera littoralis</i>	E
<i>Lordomyrma</i> sp. GC	E	<i>Rhytidoponera luteipes</i>	E
<i>Lordomyrma</i> sp. GD	E	<i>Rhytidoponera numeensis</i>	E
<i>Lordomyrma</i> sp. GE	E	<i>Rhytidoponera versicolor</i>	E
<i>Megalomyrmex</i> sp.	E	<i>Solenopsis geminata</i>	I
<i>Meranoplus levellei</i>	E	<i>Strumigenys lamia</i>	E
<i>Monomorium floricola</i>	I	<i>Strumigenys</i> sp. GA	N
<i>Monomorium longipes</i>	E	<i>Strumigenys</i> sp. GB	N
<i>Monomorium</i> sp. GA	N	<i>Tetramorium</i> sp. GA	N
<i>Monomorium</i> sp. GB	E	<i>Tetramorium tenuicrinis</i>	N
<i>Monomorium</i> sp. GC	E	<i>Tetramorium tonganum</i>	I
<i>Monomorium tricolor</i>	E	<i>Wasmannia auropunctata</i>	I

E : espèce endémique ; I : espèce introduite ; N : espèce native (indigène).

La faune myrmécologique recensée compte 66 espèces, appartenant à 32 genres (tableau 4.5) et présente un grand intérêt aux plans de la taxonomie et de la biogéographie. Elle est riche et diverse, avec plus du tiers des espèces de fourmis, décrites ou non, inventoriées en Nouvelle-Calédonie. L'endémisme spécifique est très élevé (deux tiers des espèces), une espèce sur cinq est native, et le caractère archaïque de plusieurs genres (*Leptomyrme*, *Discothyrea*, *Cerapachys*...) en accroît l'intérêt scientifique et patrimonial.

Plusieurs milieux sont de bonne qualité écologique. Sur les huit espèces les plus fréquentes (occurrence dans les stations), sept sont endémiques. En l'absence d'envahisseurs, l'originalité faunistique, la richesse spécifique et l'équilibre des peuplements se traduisent par une diversité élevée. Les différences faunistiques entre les grands ensembles sont assez bien marquées, richesse et originalité faunistiques allant croissant avec la complexité du milieu. Du fait de leur anthropisation sensible, les maquis ligno-herbacés sont de peu d'intérêt, au contraire des formations paraforestières, préforestières et forestières, dont plusieurs stations montrent une faune « en place » très équilibrée ; les maquis arbustifs eux-mêmes, malgré leur richesse encore modeste, montrent une originalité faunistique. Les différences entre ces ensembles sont d'ailleurs estompées par les différences entre les stations étudiées dans chacune des formations : plus du quart des espèces recensées pendant l'étude ne sont connues que d'une seule station. Ces milieux jouent donc le rôle de refuges pour une faune originale, aux caractères souvent archaïques.

L'ouverture des milieux s'accompagne d'une présence relative plus importante des espèces introduites (15 % des espèces recensées). Si certaines, comme *Cardiocondyla emeryi* ou *Monomorium floricola*, sont toujours discrètes malgré leur large répartition, d'autres, comme *Anoplolepis gracilipes* et surtout *Wasmannia auropunctata*, peuvent causer à la faune des dégâts irréversibles : la différence est très sensible entre les stations où la faune native est soumise à la pression des espèces introduites et les stations indemnes d'envahisseurs.

Ces résultats sont étayés par ceux d'une autre étude, menée sur les maquis de la basse Tontouta (Chazeau *et al.* 2003). Elle a fourni 27 espèces sur huit stations échantillonnées par le même protocole ; 4 espèces, parmi les 7 recensées qui ne se retrouvent pas dans l'inventaire du tableau 4.5, sont des espèces introduites ; les 9 endémiques recensées ne sont pas restreintes aux maquis, et aucun élément remarquable par son archaïsme n'y figure. La myrmécofaune des maquis miniers apparaît donc appauvrie par rapport à celle des milieux fermés sur substrats ultramafiques et, en particulier, à celle des milieux forestiers.

On remarquera, pour conclure, que sept genres récemment ajoutés à la faune des fourmis néo-calédoniennes ne sont connus que des habitats sur les terrains miniers. Ils montrent tous une affinité australasienne forte et sont interprétés comme des témoins de la faune ancienne du territoire. Les terrains miniers apparaissent donc bien comme un des milieux refuges pour les éléments originaux de la myrmécofaune (Jourdan 1997, 2002), mais ils constituent également l'environnement naturel soumis aux plus fortes agressions en Nouvelle-Calédonie. Tout fragment d'une formation haute fermée remarquable par sa richesse, son équilibre et la qualité de sa faune mérite donc *a priori* de retenir l'attention dans une perspective de conservation.

3.3. Caractères des peuplements d'arthropodes des terrains miniers

Associations d'espèces

Holloway (1979) a traité numériquement 118 espèces de lépidoptères macrohétérocères, provenant de 61 échantillons prélevés dans divers milieux néo-calédoniens, sur et hors terrains miniers. Ses résultats l'ont conduit à distinguer trois associations d'espèces principales (« Ultramafique », « Forêts denses et formations secondaires », « Formations de type Côte Ouest »). L'association ultramafique correspond aux stations de divers types de maquis sur terrains miniers.

L'originalité de cette association ultramafique est forte : elle compte 74 % d'espèces endémiques (trois fois plus que les deux autres), plus d'un tiers des espèces endémiques taxonomiquement isolées, avec une proportion inversée pour les familles Geometridae et Noctuidae (figures 4.26 et 4.27). Elle contient les éléments les plus particuliers de la Nouvelle-Calédonie et probablement les plus anciens éléments faunistiques des macro-lépidoptères. Elle inclut aussi les exemples les plus nombreux de radiation endémique. Ces milieux se distinguent nettement des milieux forestiers denses humides des zones sur terrains miniers, dont la faune apparaît comme une déclinaison appauvrie de celle des forêts sur roches sédimentaires, avec quelques espèces particulières.

La régularité de la répartition de la richesse en espèces des maquis miniers (courbe espèce/abondance) peut être interprétée comme l'indication d'un établissement ancien, le nombre d'espèces approchant le maximum possible pour les ressources disponibles. Cette richesse spécifique est faible en proportion des surfaces occupées et de la diversité floristique du milieu. Les espèces réellement ultramafiques sont en fait restreintes au maquis à *Sannantha* et exclues des maquis arbustifs et des forêts humides. Les faunes des maquis arbustifs et buissonnants à *Gymnostoma* (Casuarinaceae) sont les plus pauvres, ce qui peut être la conséquence de l'accentuation de certaines caractéristiques d'origine ultramafique de leurs sols (Holloway 1979).



Figure 4.26 : *Nadagara serpentina* (Geometridae).

© IRD / J. Chazeau



Figure 4.27 : *Oenochroma unifasciata* (Geometridae).

© IRD / J. Chazeau

Structures des peuplements des arthropodes forestiers

Les études conduites sur la structure des peuplements d'arthropodes dans les canopées de forêts néo-calédoniennes, en utilisant des techniques d'échantillonnage par thermonébulisation, montrent des différences sensibles dans la structure des guildes trophique entre les forêts de basse altitude sur substrats ultramafiques et les forêts denses humides sempervirentes « classiques » d'autres zones tropicales. Ce sont : la faiblesse des phytophages broyeur et des suceurs de phloème, l'importance des brouteurs d'épiphytes, la faiblesse des insectes prédateurs et l'importance des autres groupes prédateurs, la faiblesse des fourmis de la canopée.

En revanche, ces différences s'atténuent quand on compare ces forêts aux forêts sclérophylles (forêts sèches) ou sclérophylles-mésophiles de Nouvelle-Calédonie, bien qu'on observe toujours la faiblesse relative des suceurs de phloème en forêt sur roches ultramafiques. Mais la structure taxonomique des guildes diffère et l'étude des densités des peuplements montre que le substrat ultramafique supporte les densités les plus faibles (282 i/m² contre 472 en forêt sclérophylle et 543 en forêt mésophile, après exclusion de la fourmi pionnière *Wasmannia auropunctata*, envahisseur récent), cela bien que la hauteur de la canopée des forêts étudiées sur substrat ultramafique double ou triple le volume traité, par rapport à la forêt sclérophylle. La diversité spécifique et générique est cependant plus élevée : dans une étude comparative portant sur un échantillon de 20 familles de coléoptères, diptères et hyménoptères, on a dénombré 259 espèces en 111 genres en forêt dense sur sols issus de roches ultramafiques et seulement 111 espèces en 67 genres en forêt sclérophylle (Guilbert 1994, Guilbert *et al.* 1994, 1995).

Ces résultats pourraient indiquer que la structure trophique des peuplements des forêts denses humides sur terrains miniers se rapproche de celle des forêts sclérophylles. On manque cependant, en Nouvelle-Calédonie même, de données pour les forêts denses humides sur substrats différents (Chazeau 1997).

3.4. La frontière des milieux sur roches ultramafiques

Les milieux sur sols dérivés des roches ultramafiques présentent deux aspects défavorables pour un nouvel arrivant : leur productivité est faible et les ressources offertes peuvent être toxiques.

Les plantes qui poussent sur ces sols ont de faibles concentrations en éléments nutritifs (phosphore, azote, potassium) et possèdent dans certains cas des teneurs anormalement élevées en certains métaux potentiellement toxiques (cf. chapitre 3). Les faibles teneurs en azote et en phosphore des feuillages et leur caractère sclérophylle sont défavorables aux phytophages brouteurs, diminuant leur fécondité, leur vitesse de développement et leur taille. Ces espèces doivent donc s'adapter à la faible biomasse disponible, et on comprend que cette faible biomasse, à travers une adaptation à la parcimonie, se retrouve tout au long de la chaîne trophique, jusqu'aux niveaux supérieurs.

On sait aussi que les plantes accumulatrices de nickel ont un phloème toxique, qui les protège efficacement contre les phytophages : diminution de l'appétence, altération ou retard du développement larvaire (Boyd & Martens 1992, Boyd 2009). On observe ainsi que la défoliation d'*Alphitonia neocaledonica* par les chenilles est plus forte sur les individus installés hors des terrains miniers. Certains insectes ont aussi développé la capacité d'accumuler le nickel (Boyd *et al.* 2006), mais il ne semble pas que celle-ci améliore leur résistance aux pathogènes (Boyd 2002). On ignore si cette accumulation accroît la résistance aux prédateurs, ou si elle est seulement le produit d'une réaction de détoxication. Pour le phytophage, comme pour les échelons suivants de la chaîne alimentaire, l'acquisition d'une capacité d'utiliser des ressources toxiques (la réponse évolutive) est certainement un processus complexe et long.

Pour les animaux comme pour les végétaux, la barrière trophique est un filtre efficace à l'installation d'espèces concurrentes et facilite donc, dans un second temps, la réussite du pionnier et la radiation spécifique. La radiation endémique des lépidoptères est ainsi concentrée sur substrats ultramafiques et non sur substrats sédimentaires. Les autres radiations observées peuvent procéder du même phénomène. Le compartimentage des écosystèmes en Nouvelle-Calédonie peut avoir conservé certaines répartitions ultramafiques, en particulier chez des non-phytophages peu mobiles.

Un modèle d'établissement est suggéré par l'étude des lépidoptères macrohétérocères. Holloway (1979) émet l'hypothèse que les espèces réellement ultramafiques seraient exclues des maquis arbustifs et buissonnants en raison des caractéristiques de nutrition des sols (formations très pauvres en espèces), mais exclues aussi des forêts denses humides sempervirentes par la compétition avec les espèces de l'association forestière, plus nombreuses du fait de l'atténuation du caractère ultramafique des milieux forestiers par l'humus des sols. La dépendance trophique d'un hôte restreint aux substrats ultramafiques n'est pas le seul facteur en cause, comme on l'observe pour le genre *Adeixis* (Geometridae) : celui-ci compte trois espèces endémiques liées aux *Sannantha* du maquis minier, mais seule *A. major* se retrouve parfois sur d'autres *Sannantha* sur terrains sédimentaires, bien qu'elle puisse se développer sur ces nouvelles plantes hôtes ; son absence est attribuée à des phénomènes de compétition.

On peut ainsi supposer que la réussite d'une adaptation aux substrats ultramafiques implique souvent une situation de non-retour, l'acquisition des caractères nécessaires entraînant une perte de compétitivité hors de ces substrats. Pour de nombreux groupes animaux, les milieux sur roches ultramafiques marquent bien une frontière.

3.5. Milieux ultramafiques et invasions biologiques

Quels que soient les obstacles que la frontière ultramafique oppose aux nouveaux venus, certaines espèces pionnières ont la capacité de les franchir et d'en exploiter les ressources du milieu. Les milieux naturels sur terrains miniers ne sont donc pas à l'abri des invasions biologiques, et les activités que l'homme y développe multiplient les risques d'introduction d'espèces qui peuvent causer des dégâts irréversibles dans cet environnement fragile. La petite taille des arthropodes permet une diffusion facile lors du déplacement de gros matériel, dont la décontamination préalable est trop souvent négligée par les entrepreneurs qui n'en mesurent pas la nécessité.

Les fourmis sont certainement les envahisseurs les plus redoutables pour l'intégrité des milieux sur terrains miniers. Sur les 25 espèces de Formicidae considérées comme allochtones à la Nouvelle-Calédonie (Jourdan 2002), et qui pour la plupart se rencontrent en milieu dégradé, 3 espèces sont répertoriées parmi les plus envahissantes au niveau mondial et menacent véritablement la biodiversité locale : *Anoplolepis gracilipes*, *Pheidole megacephala* et *Wasmannia auropunctata* (figure 4.28). Deux d'entre elles sont très présentes sur les substrats ultramafiques.



© IRD / H. Jourdan

Figure 4.28 : Prédation de la fourmi électrique *Wasmannia auropunctata* sur une abeille.

Anoplolepis gracilipes, introduite en Nouvelle-Calédonie depuis plus d'un siècle, est fréquente dans les maquis miniers du Sud néo-calédonien. Il est difficile d'apprécier aujourd'hui ce qu'a pu être son impact sur la faune originelle. Sa discrétion relative ne doit pas faire oublier une réputation bien établie de fourmi destructrice (Haines & Haines 1978, Young *et al.* 2001, O'Dowd *et al.* 2003), et donc qu'elle demeure un problème pour le reste de la faune : les résultats d'une étude menée dans les maquis miniers du Sud conduisent à s'interroger sur son rôle dans la pauvreté surprenante de l'herpétofaune de certains habitats (Chazeau *et al.* 2004).

Plus récente, l'invasion des terrains miniers du Sud par la « fourmi électrique » *Wasmannia auropunctata* semble directement liée à des introductions ponctuelles d'origine anthropique, liées à l'histoire des zones d'exploitation, et en particulier aux défrichements de layons par des engins qui ont pu transporter ses nids avec des souches et de la terre. L'espèce montre des préférences mésophiles, mais elle peut facilement s'établir en milieu forestier dense humide comme dans des maquis plus arides. En traversant des sites contaminés, les cours d'eau peuvent faciliter l'invasion des milieux situés en aval (rivière Bleue). Les conséquences néfastes de sa présence dans différents milieux néo-calédoniens ont fait l'objet de constats très alarmants (Chazeau *et al.* 2002, Jourdan 1997, 1999, Jourdan *et al.* 2001, Le Breton *et al.* 2003).

4. POUR CONCLURE SUR LA FAUNE DES TERRAINS MINIERES

Les exemples ne manquent pas, dans la faune néo-calédonienne, qui conduisent le naturaliste à comparer les milieux ultramafiques à une île, ou à un chapelet d'îles pour les massifs miniers de l'Ouest. Y accéder, s'y établir suppose de passer une frontière, de s'adapter à un milieu médiocrement productif, à des ressources parfois toxiques. Mais ce milieu difficile est riche en nouvelles niches, créées par la spéciation des végétaux sur terrains miniers et par celle qu'elle induit, en cascade, le long de la chaîne alimentaire.

La vie animale sur substrats ultramafiques peut alors être comprise comme un équilibre entre, d'une part, l'avantage acquis par l'espèce établie sur les candidats potentiels non adaptés à ces substrats et, d'autre part, le double handicap de l'inadaptation aux caractères les plus extrêmes de ces milieux et d'un manque de compétitivité sur substrats moins contraignants (du fait de l'adaptation à la parcimonie : vitesse de développement et fécondité réduites). L'équilibre est fragile et les espèces envahissantes sont une redoutable menace pour la conservation de cette biodiversité.

Mais le monde animal est multiple : il y a loin du coup d'aile de l'oiseau chasseur à la déambulation limitée d'une mygale, de la polyphagie d'une blatte de litière au spectre alimentaire étroit d'un papillon, lié par sa chenille à une plante hôte localisée, ou aux conditions de vie d'une cochenille, tout à la fois fixée à son hôte et strictement monophage. Il n'est donc pas surprenant que les réponses que chaque groupe animal apporte au problème de son établissement en milieu minier amènent, chez les spécialistes de ces groupes, autant de positions sur la signification des terrains miniers dans l'évolution de la vie animale en Nouvelle-Calédonie.

LES BACTÉRIES ET LES CHAMPIGNONS DU SOL SUR ROCHES ULTRAMAFIQUES

Hamid AMIR et Marc DUCOUSSO

1. INTRODUCTION

- 1.1 Les mycorhizes
- 1.2 Les bactéries

2. LES MYCORHIZES À ARBUSCULES (MA)

- 2.1 Rôles des mycorhizes à arbuscules dans le développement des plantes
- 2.2 Les mycorhizes à arbuscules dans les écosystèmes miniers de Nouvelle-Calédonie

3. LES ECTOMYCORHIZES

- 3.1 Rôles des ectomycorhizes dans le développement des plantes
- 3.2 Les ectomycorhizes des maquis miniers de Nouvelle-Calédonie

4. ASPECTS TECHNIQUES ET PRATIQUES DE LA MYCORHIZATION CONTRÔLÉE, APPLIQUÉE À LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DES TERRAINS MINIERES

5. LES SYMBIOSES FIXATRICES D'AZOTE

- 5.1 Les symbioses à *Frankia*
- 5.2 Les symbioses à *Rhizobium*

6. LES BACTÉRIES RHIZOSPHÉRIQUES STIMULATRICES DE LA CROISSANCE DES PLANTES

7. INOCULATION CONTRÔLÉE AVEC DES BACTÉRIES SYMBIOTIQUES OU RHIZOSPHÉRIQUES, APPLIQUÉE À LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DES TERRAINS MINIERES

8. PERSPECTIVES

1. INTRODUCTION

Partenaires ou parasites, les espèces végétales vivent en permanence avec des micro-organismes. Depuis maintenant plus d'un siècle, des travaux sont menés afin de trouver les voies et moyens d'utiliser, notamment en agriculture et en foresterie, les bénéfiques que peuvent procurer certains de ces micro-organismes. En effet, l'azote et le phosphore sont des composants essentiels des acides aminés, des acides nucléiques, de la chlorophylle, des coenzymes... Or, les manques de phosphore et d'azote disponibles pour les plantes dans les sols dégradés et dans les matériaux terreux déplacés lors de l'exploitation du minerai de nickel constituent des facteurs limitants majeurs pour l'installation d'une couverture végétale. Dans ces conditions, les apports d'engrais chimiques sont coûteux et doivent être renouvelés car l'azote assimilable, apporté le plus souvent sous forme de nitrate, est lessivé ou dénitrifié et le phosphore, très fortement retenu par les oxydes de fer et de chrome, devient indisponible pour la plante. Ainsi, bien que l'azote constitue près de 80 % de l'air, les sols en sont fréquemment carencés et doivent être constamment réapprovisionnés en cet élément. Ce réapprovisionnement est en grande partie réalisé naturellement par des bactéries capables de réduire l'azote de l'air (N_2) en azote ammoniacal (NH_3) grâce à une réaction enzymatique réalisée par la nitrogénase ; l'ammonium est alors intégré sous forme d'acides aminés primaires dans le métabolisme de la plante. Ce processus est appelé fixation biologique de l'azote. La fixation biologique de l'azote peut être réalisée soit par des bactéries libres du sol, soit par des bactéries en symbiose avec certains groupes de plantes au sein d'un organe spécialisé, le nodule fixateur d'azote. Ce processus peut induire une véritable augmentation de la teneur en azote d'un sol, tout comme la photosynthèse enrichit celui-ci en matière organique. Pour ce qui concerne le phosphore, les quantités totales de cet élément dans un sol sont rarement limitantes ; c'est sa disponibilité pour la plante qui est le principal facteur limitant. Un des rôles les mieux documentés des champignons mycorhiziens est de rendre une partie du phosphore du sol disponible pour la plante. Dans ce processus, il s'agit uniquement d'un changement de forme ionique du phosphore et en aucun cas d'une augmentation de la quantité totale de phosphore dans le sol.

Les recherches sur les effets bénéfiques des micro-organismes vis-à-vis des plantes ont été portées tout d'abord sur les symbiotes, dont la relation avec la plante est si étroite qu'elle induit la transformation de certains organes. Les symbioses les plus connues dans le règne végétal sont les mycorhizes, qui associent les racines d'une plante aux hyphes d'un champignon, et les nodules fixateurs d'azote, qui associent des tissus transformés du cortex racinaire de certaines plantes à des bactéries de type *Rhizobium* ou *Frankia*. Plus récemment, des travaux ont été conduits sur les bactéries se développant à proximité des racines, dans leurs zones d'influence, et qui, pour certaines d'entre elles, ont un effet de stimulation de la croissance végétale. En règle générale, la plante nourrit le micro-organisme, essentiellement en composés carbonés, notamment des sucres issus de la photosynthèse, et celui-ci, en retour, fournit à la plante des éléments minéraux essentiels qu'il mobilise plus efficacement. Pour certaines plantes, le partenariat avec les micro-organismes est absolument indispensable et leur développement est totalement compromis en leur absence ; pour d'autres, ces partenariats améliorent la croissance et l'adaptation de la plante sans être totalement indispensables (Strullu 1991). D'une manière générale, la dépendance des plantes vis-à-vis des micro-organismes est variable en fonction des taxa considérés, mais également en fonction des contraintes environnementales et des différents stades de développement de la plante.

Ainsi, il n'y a pas de frontière fixe établie entre les plantes dépendantes des micro-organismes et celles qui ne le sont pas ; il faut considérer ces relations comme un continuum par ailleurs influencé par l'environnement (Brundrett 2009).

1.1. Les mycorhizes

Les mycorhizes, définies comme le résultat d'une symbiose associant des racines d'une plante avec certains champignons, présentent des spécificités suivant le groupe de champignons mycorhiziens impliqués. Selon les auteurs, sept ou huit types d'associations mycorhiziennes sont définis. Deux types principaux dominent en Nouvelle-Calédonie : les mycorhizes endotrophes à arbuscules et les mycorhizes ectotrophes ou ectomycorhizes (figure 5.1).

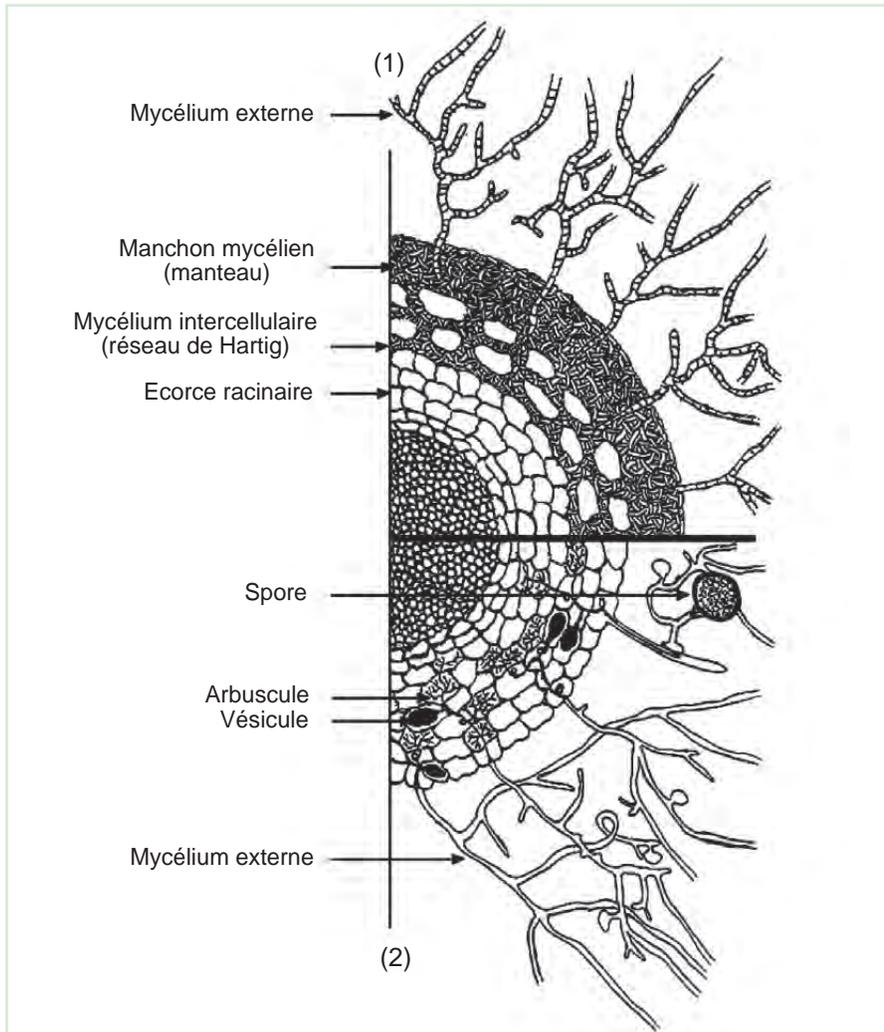


Figure 5.1 : Aspect en coupe transversale de racines mycorhizées par les deux principaux types de champignons mycorhiziens. (1) : ectomycorhizes ; (2) : mycorhizes à arbuscules.

© UNC / H. Amir

Les champignons mycorhiziens à arbuscules se développent initialement dans le sol, pénètrent dans les racines de la plante hôte pour s'insinuer dans les tissus des racines jusqu'au parenchyme cortical où le mycélium pénètre dans les cellules pour repousser le cytoplasme sans jamais le traverser. Le développement du champignon dans les cellules se fait par invaginations successives, donnant l'allure générale d'un petit arbuste à cette formation fongique intracellulaire, d'où le nom d'arbuscule (figure 5.2). Ces structures apoplastiques mixtes plante-champignon sont le siège des échanges symbiotiques. En fonction de la position systématique du champignon, d'autres structures formées par ce type de mycorhizes peuvent également être observées : il s'agit notamment des vésicules et des cellules auxiliaires. Les champignons ectomycorhiziens forment autour des racines un manchon mycélien dense, à partir duquel des hyphes s'insinuent entre les cellules du rhizoderme sans jamais y pénétrer pour former le réseau de Hartig, siège des échanges bidirectionnels entre la plante et le champignon (figure 5.3).

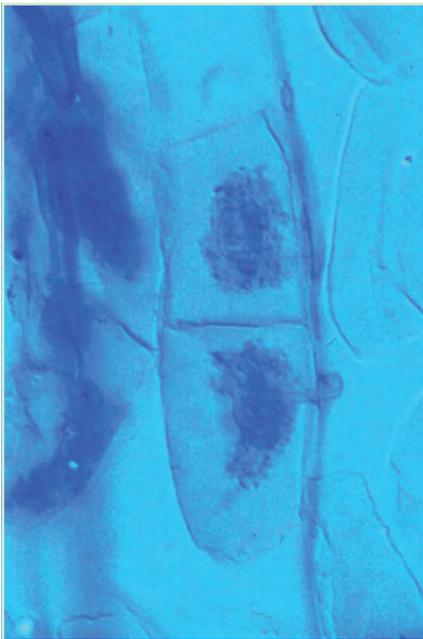


Figure 5.2 : Arbuscules endocellulaires formés par un champignon du genre *Glomus*.

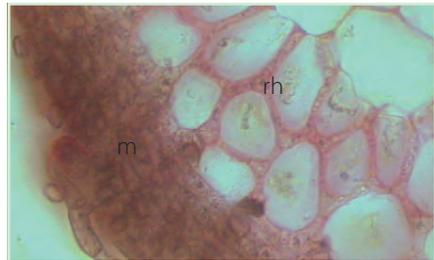


Figure 5.3 : Vue en coupe transversale d'une ectomycorhize (m : manteau fongique, rh : réseau de Hartig).

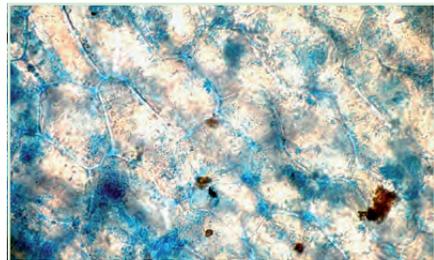


Figure 5.4 : Bactéroïdes de *Rhizobium* sp. présents dans le cytoplasme des cellules des nodules racinaires d'*Acacia spirorbis*.

1.2. Les bactéries

Les symbioses fixatrices d'azote associent des bactéries capables de réduire l'azote de l'air en azote assimilable par la plante. Cette propriété extrêmement importante pour les écosystèmes est propre à un nombre limité d'espèces bactériennes et n'existe chez aucun autre groupe d'êtres vivants. Les bactéries symbiotiques se développent dans le cytoplasme des cellules des nodules racinaires qui les nourrissent (figure 5.4). Même si ce type de symbiose concerne un nombre limité de taxa végétaux, il revêt localement dans certains maquis miniers de Nouvelle-Calédonie une importance particulière. C'est notamment le cas de la symbiose fixatrice d'azote à *Frankia* qui concerne les genres *Casuarina* et *Gymnostoma* et, dans une moindre mesure, de la symbiose fixatrice d'azote à *Rhizobium* avec les genres *Serianthes* et *Archidendropsis*.

Parmi les micro-organismes non symbiotiques, mais qui entretiennent des échanges à bénéfices réciproques avec les plantes, les bactéries à effet promoteur de croissance des plantes sont les plus étudiées. Ces bactéries sont dites rhizosphériques car elles se développent préférentiellement dans la zone d'influence des racines, mais sans la mise en place d'un organe spécialisé pour les échanges entre les partenaires, qui aurait permis de qualifier ces associations de symbiotiques. Enfin, très récemment, des travaux ont été initiés sur les bactéries associées aux manteaux fongiques des ectomycorhizes.

2. LES MYCORHIZES À ARBUSCULES (MA)

Les champignons MA sont classés dans le phylum des glomérormycètes, récemment séparé des zygomycètes (Schüßler *et al.* 2001). Ces champignons forment très rarement des fructifications visibles à l'œil nu. Ce sont des symbiotes obligatoires, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent pas se développer en l'absence de la plante. De ce fait, on ne peut les cultiver qu'en présence d'une plante. En revanche, ces symbiotes ne possèdent généralement aucune spécificité contrôlée génétiquement : la même souche de champignon peut être associée à de nombreuses familles de plantes depuis les bryophytes jusqu'aux angiospermes. Bien qu'ils soient des symbiotes obligatoires, les champignons MA peuvent se conserver et se propager dans le sol grâce à des spores résistantes qui se forment généralement sur ou à proximité des racines (figure 5.5). Il en résulte que l'abondance de spores viables dans les sols donne une indication sur la capacité d'un sol à produire des MA (potentiel mycorhizogène). Des travaux menés en Afrique du Nord visent à améliorer le potentiel mycorhizogène des sols en introduisant dans le milieu des espèces comme le thym et la lavande, très mycotrophes, qui enrichissent les sols en spores de champignons MA (Duponnois *et al.* 2007) ; ce procédé pourrait être adapté aux maquis miniers néo-calédoniens.



Figure 5.5 : Racine colonisée par un champignon MA du genre *Glomus* ; les spores sont formées dans le sol et à la surface de la racine.

© CIRAD-IAC / M. Ducousso

2.1. Rôles des mycorhizes à arbuscules dans le développement des plantes

Le rôle principal des champignons mycorhiziens est lié à leur position d'interface entre la plante et le sol. En effet, les champignons MA produisent beaucoup de filaments mycéliens dans le sol. Ces filaments forment un réseau qui explore un grand volume de sol autour de la plante, ce qui leur permet de récupérer les éléments nutritifs de façon plus efficace que les poils racinaires. Ces symbiotes interviennent de diverses façons dans le développement et l'adaptation des plantes :

- le rôle central le mieux documenté est leur intervention dans la nutrition phosphatée de la plante (Smith & Read 2008). Le phosphore est un élément souvent peu disponible dans les sols, même riches, car fortement lié aux particules argilo-humiques du sol. Les champignons récupèrent cet élément et le transfèrent vers les racines ;
- ils interviennent de façon plus ou moins importante selon les cas au niveau de l'assimilation des autres éléments minéraux : azote, potassium, calcium, oligo-éléments, etc. ;
- ils peuvent jouer un rôle considérable dans la gestion de l'eau par la plante et donc dans la résistance au stress hydrique ;
- divers travaux rapportent leur rôle dans la résistance des plantes aux pathogènes (Selosse *et al.* 2004) ;
- enfin, et c'est essentiel pour les sols miniers, les travaux des deux dernières décennies montrent leur intervention dans la tolérance aux métaux dans les sols métallifères ou les sols pollués en métaux lourds (*e.g.* : Khade & Adholeya 2007, Amir & Lagrange 2008).

2.2. Les mycorhizes à arbuscules dans les écosystèmes miniers de Nouvelle-Calédonie

Peu de travaux de recherche ont été réalisés sur les champignons mycorhiziens dans les écosystèmes miniers en général. En Nouvelle-Calédonie, les études ont été initiées assez récemment (Amir *et al.* 1997). De nombreux échantillons de sols ont été analysés pour leur richesse en spores MA. Ces analyses montrent que la plupart des sols miniers non perturbés contiennent des quantités appréciables de spores viables (entre 100 et quelques milliers pour 100 g de sol) ; elles montrent également que le genre *Glomus* est fortement dominant parmi les champignons MA. Une soixantaine d'espèces végétales de milieux ultramafiques ont été étudiées pour leur affinité vis-à-vis des champignons MA ; il en ressort que la très grande majorité des espèces de ces milieux forment des mycorhizes à arbuscules, mais le degré de mycorhization est très variable. Il dépend d'abord des espèces, certaines ayant une forte affinité avec ces symbiotes, comme les Cunoniaceae, les Myrtaceae et les Euphorbiaceae (familles importantes en Nouvelle-Calédonie), d'autres ayant peu d'affinité avec ceux-ci (Proteaceae, Cyperaceae). Toutefois, ces deux dernières familles, considérées classiquement comme non mycorhizées, ont souvent des systèmes racinaires partiellement colonisés par les champignons MA, indiquant probablement une adaptation particulière aux conditions locales des sols miniers (Perrier *et al.* 2006^b). Pour le genre *Costularia*, il a été montré que des taux de mycorhization assez faibles suffisaient pour améliorer significativement la croissance et l'adaptation aux métaux des plants (Lagrange *et al.* 2009). En outre, il apparaît de plus en plus clair que la forte carence des sols en éléments minéraux essentiels, P et N notamment, est un facteur d'inhibition de la mycorhization dans ces sols. En effet, une expérimentation sur le terrain a montré que l'apport de phosphore, d'azote et de potassium à dose modérée stimule nettement la colonisation des racines

de *Costularia* par les champignons mycorhiziens et que le développement de ces symbiotes *in situ* est alors corrélé à la croissance des plantes (Lagrange *et al.* 2009). Ainsi, le degré de mycorhization des espèces varie aussi largement selon les sols et les conditions environnementales. Les types mycorhiziens observés, *in situ*, d'une soixantaine d'espèces sont présentés dans le tableau 5.1. Ces observations ayant été réalisées plusieurs fois dans des conditions différentes pour ces espèces, les groupes d'affinité proposés traduisent assez bien l'importance de la symbiose mycorhizienne chez ces espèces.

Des souches de ces champignons, appartenant au genre *Glomus* (notamment *G. etunicatum*), ont été isolées et leurs effets sur la croissance des plantes ont été appréciés. On a montré que ces souches sont particulièrement tolérantes au nickel, en comparaison avec des souches provenant de sols non miniers (Amir *et al.* 2008), ce qui suggère que l'utilisation, pour la restauration écologique des terrains miniers, de souches commerciales de champignons MA provenant de terrains non miniers serait vouée à l'échec. La mycorhization des plantes endémiques de maquis miniers avec une souche locale sélectionnée non seulement améliore la croissance des plants, mais aussi augmente nettement leur tolérance aux métaux (Pupier 2006, Amir & Lagrange 2008).

Les plantes hyper-accumulatrices de Ni, souvent considérées comme non mycorhizées, se révèlent parfois fortement mycorhizées (*Geissois pruinosa*, *Phyllanthus faveri*). Dans d'autres cas, elles sont très peu ou pas du tout mycorhizées (*Sebertia acuminata*) et l'intensité de la mycorhization est alors négativement corrélée à la concentration en Ni dans les organes de la plante (Amir *et al.* 2007).

Les études en cours sont orientées, d'une part, vers la connaissance de la biodiversité des champignons MA (identification par séquençage de l'ADNr 18S), d'autre part, vers les applications pratiques. Ainsi, des essais de mycorhization sur le terrain et des essais d'enrobage de semences (*Alphitonia*, *Costularia*) avec des spores mycorhiziennes seront mis en œuvre au cours des prochaines années.

3. LES ECTOMYCORHIZES

Les champignons ectomycorhiziens, apparus au milieu de l'ère secondaire, donc très récemment par rapport aux champignons MA, apparus au début de l'ère primaire, appartiennent à plusieurs phylums, les basidiomycètes, les ascomycètes et les zygomycètes. Cependant, toutes les espèces de ces phylums ne sont pas capables de former des ectomycorhizes, de plus, il a été démontré (Hibbett & Donoghue 2000) que la capacité des champignons à former des ectomycorhizes était réversible. Ainsi, dans un ensemble d'espèces phylogénétiquement cohérent, il est possible que des espèces forment des ectomycorhizes et d'autres pas. De même, certaines espèces comme *Morchella esculenta* peuvent occasionnellement former des ectomycorhizes, mais sont également capables d'effectuer la totalité de leur cycle biologique en l'absence de plante hôte. À la différence des champignons MA qui sont strictement symbiotiques, la dépendance des champignons ectomycorhiziens vis-à-vis d'une plante hôte évolue de façon continue en fonction de la compatibilité génétique entre les partenaires, mais également en fonction de paramètres environnementaux et physiologiques, sans qu'une frontière absolue puisse être établie. De plus, au cours de l'année, une ectomycorhize peut avoir, à certaines périodes, un fonctionnement s'apparentant au parasitisme pour la plante ou pour le champignon ; le bilan global restant favorable (la croissance n'est pas le seul facteur à prendre en compte) pour les deux partenaires de la symbiose.

Les plantes qui forment des ectomycorhizes sont taxonomiquement peu nombreuses : environ 3 % des taxa, en général des arbres. Cette relative rareté traduit très mal l'importance écologique de cette symbiose. En effet, les espèces végétales capables de former des ectomycorhizes sont généralement des arbres grégaires, dominants de la canopée. Il faut donc raisonner à l'échelle de l'écosystème pour apprécier l'importance des ectomycorhizes qui dominent les forêts boréales, tempérées, méditerranéennes et certaines forêts tropicales comme le Miombo en Afrique, la forêt à Dipterocarpaceae en Asie du Sud-Est, les forêts littorales malgaches et l'ensemble des savanes australiennes à *Eucalyptus*. Les principales familles de plantes impliquées dans la symbiose ectomycorhizienne sont les Pinaceae avec, notamment, les genres *Pinus*, *Abies*, *Picea* et *Cedrus*, les Fagaceae (e.g. : *Quercus*, *Fagus*, *Nothofagus*), les Dipterocarpaceae (e.g. : *Shorea*, *Dipterocarpus*, *Marquesia*), les Salicaceae (e.g. : *Salix*, *Populus*), les Betulaceae (e.g. : *Betulus*, *Carpinus*), les Mimosaceae (e.g. : *Acacia*), une partie des Myrtaceae (e.g. : *Eucalyptus*, *Melaleuca*, *Tristaniopsis*, *Sannantha*), les Sarcocaulaceae (e.g. : *Sarcocaula*, *Leptolaena*, *Schizolaena*)... En Nouvelle-Calédonie, des travaux récents (Perrier 2006^b) ont permis de comprendre l'importance des ectomycorhizes dans les maquis miniers où des espèces structurantes de la végétation comme *Nothofagus* spp. ou *Tristaniopsis* spp., par exemple, sont à ectomycorhizes.

3.1. Rôles des ectomycorhizes dans le développement des plantes

D'un point de vue physiologique, l'ectomycorhize fonctionne de façon très similaire à la mycorhize à arbuscules, notamment pour ce qui concerne l'acquisition du phosphore et des éléments nutritifs en général (Brundrett 2008). De même, pour ce qui concerne la protection contre les pathogènes ou l'amélioration de la tolérance à des stress environnementaux, les ectomycorhizes agissent de façon sensiblement identique aux mycorhizes à arbuscules (Brundrett 2008). Cependant, deux caractéristiques propres aux ectomycorhizes sont particulièrement remarquables : les successions et le fonctionnement en peuplement. Au cours de sa vie, un arbre aura des partenaires fongiques ectomycorhiziens différents, ce qui a permis de décrire des espèces de stades précoces comme les *Pisolithus*, les *Laccaria* et des espèces de stades plus tardifs comme certaines *Russula* ou certains *Cortinarius* (figures 5.6 à 5.9).



Figure 5.7 : *Pisolithus albus*.



Figure 5.6 : Exemples de champignons ectomycorhiziens : *Russula* sp.

© CIRAD-IAC / M. Ducousso

© CIRAD-IAC / M. Ducousso



Figure 5.8 : *Amanita* sp.

© CIRAD-IAC / M. Ducouso



Figure 5.9 : *Cortinarius* aff. *magellanicus*.

© CIRAD-IAC / M. Ducouso

Les cortèges mycorhiziens et leurs évolutions sont maintenant bien documentés (e.g. : Ba 1990), cependant le rôle des champignons ectomycorhiziens dans le caractère grégaire des arbres ectomycorhizés reste inexpliqué. Au sein d'un peuplement, un arbre aura donc à un instant donné plusieurs espèces de champignons ectomycorhiziens qui elles-mêmes seront en symbiose avec d'autres arbres, le mycélium de certains champignons pouvant couvrir plusieurs centaines de mètres carrés (Bonello *et al.* 1998).

3.2. Les ectomycorhizes des maquis miniers de Nouvelle-Calédonie

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'importance des ectomycorhizes dans les maquis miniers de Nouvelle-Calédonie est une observation récente (Perrier *et al.* 2006^b). Depuis, des travaux non encore publiés ont permis de dresser une liste d'espèces végétales capables de former des ectomycorhizes (tableau 5.1) ; les champignons ectomycorhiziens commencent également à être mieux connus en Nouvelle-Calédonie où un cortège original et largement diversifié, notamment associé aux *Nothofagus* spp. et aux *Tristaniopsis* spp., est en cours de description (Eyssartier 2009, Eyssartier *et al.*, sous presse). Ces champignons ectomycorhiziens appartiennent à des genres classiquement connus des zones tropicales et tempérées comme *Russula*, *Lactarius*, *Boletus*, *Amanita*, *Cantharellus*, *Thelephora*, *Tomentella*, *Ramaria*, *Pisolithus*, *Cortinarius*... Notons, parmi les espèces déjà décrites des écosystèmes sur maquis miniers, *Cantharellus garnierii* (Ducouso *et al.* 2004) et surtout *Multifurca aurantiophylla* (Buyck *et al.* 2008) dont la position phylogénétique ancestrale des Russules et des Lactaires est tout à fait remarquable. D'une manière plus générale, les champignons associés aux *Nothofagus* spp. présentent de nombreuses affinités, espèces proches, voire espèces communes, avec la Nouvelle-Zélande tandis que les champignons associés au *Tristaniopsis* spp. présentent plus d'affinité avec les champignons décrits d'Australie. De ce fait, assez peu d'espèces communes entre les cortèges associés aux *Nothofagus* et aux *Tristaniopsis* ont été identifiées. Deux périodes de fructification ont été mises en évidence : une première période au cœur de la saison chaude et humide, de février à avril, avec une dominance des genres *Russula*, *Lactarius*, *Amanita*, *Boletus* notamment et une seconde période pendant l'hiver austral, quand les températures nocturnes, chutent. Cette seconde période est particulièrement originale du fait de l'abondance des espèces du genre *Cortinarius*. En effet, le genre *Cortinarius*, très largement répandu dans les zones tempérées et boréales, est presque absent des zones tropicales. Le maintien d'une diversité importante pour ce genre dans une zone tropicale pourrait être expliqué par les contraintes édaphiques fortes de la Nouvelle-Calédonie et la relative fraîcheur des températures hivernales.

4. ASPECTS TECHNIQUES ET PRATIQUES DE LA MYCORHIZATION CONTRÔLÉE, APPLIQUÉE À LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DES TERRAINS MINIER

Depuis maintenant plus de quatre décennies, des essais d'inoculation contrôlée sont réalisés de par le monde (Hacskailo & Vozzo 1967). En Nouvelle-Calédonie, la mise en place de tels essais sur maquis minier a été programmée à partir de 2010, avec un contrôle régulier de la mycorhization par des outils moléculaires pendant les trois premières années. Bien que nous n'ayons pas encore d'expérience approfondie de la mycorhization contrôlée sur terrain minier, notamment en Nouvelle-Calédonie, les connaissances actuelles nous permettent d'ores et déjà de proposer quelques pratiques pouvant améliorer la mycorhization des plantes.

D'une manière générale, les terrains miniers décapés, même anciens, ne comportent pas de spores MA ni de propagules ectomycorhiziennes et l'activité microbienne globale y est très réduite (Héry *et al.* 2005). Ainsi, la remise en place d'un fonctionnement biologique du sol superficiel est tout à fait essentielle à la réussite d'une plantation, étape incontournable pour tendre, à terme, vers un écosystème équilibré ayant des fonctions, notamment, de cohésion du sol, équivalent à la situation d'origine. Cette remise en fonction des activités microbiennes peut être obtenue soit par des apports de « top-soil », soit par la plantation d'espèces structurantes des maquis, espèces qui seront inoculées en pépinière avec des champignons mycorhiziens.

Il est donc nécessaire d'assurer la mycorhization des plants lorsqu'ils sont en pépinière, avant qu'on les transfère au champ. Pour cela, il faut d'abord vérifier si l'espèce en question possède une quelconque affinité vis-à-vis des champignons MA ou ectomycorhiziens. Si c'est le cas, on peut simplement prélever du sol riche en petites racines dans un maquis peu dégradé (figures 5.10 et 5.11), sous une espèce végétale réputée pour être bien mycorhizée (appartenant par exemple aux genres *Xanthostemon*, *Alphitonia*, *Phyllanthus*, *Geissois*, *Cunonia*, *Codia*, *Dodonaea*...) ou, dans le cas des ectomycorhizes, prélever de la litière sous l'espèce que l'on souhaite planter et en déposer quelques grammes sur les racines des semis. Il est également possible de faire une suspension avec de l'eau et du sol utilisé comme inoculum, et de l'apporter sous forme liquide, mais, dans ce cas, il ne faut pas laisser décanter la suspension, car les spores mycorhiziennes viables décanteront en moins d'une minute, de sorte qu'on perd une partie du potentiel mycorhizogène.



Figure 5.10 : Sol de surface (top-soil) riche en racines.



Figure 5.11 : Détail du sol prélevé, avec des racines mycorhizées.

Il est possible, après une année environ de croissance en pépinière, de vérifier si les plants sont mycorhizés ; cela nécessite une observation directe des racines fines caractéristiques (figure 5.12) et, dans le cas des champignons MA, une coloration spécifique au bleu Trypan des racines et leur observation au microscope.



© Cirad-IAC/M. Ducousso

Figure 5.12 : Aspect de racines ectomycorhizées. Remarquer la forme en Y typique des racines secondaires et les pointes racinaires plus ou moins arrondies.

Comme nous l'avons déjà précisé, le sol peut contenir des quantités de propagules MA très diverses, de 0 à plus d'un millier pour 100 g. Il importe donc, avant de décider d'une pratique pour favoriser la mycorhization, de connaître son statut en termes de richesse en propagules MA viables, ce qui doit être réalisé en conditions contrôlées en laboratoire, soit par tamisage (la taille des spores MA est comprise le plus souvent entre 40 et 350 μm) et observation sous loupe binoculaire, soit sur des dilutions de sol et culture de plante piège (Brundrett 2008). Si le sol est très pauvre en champignons MA, la mycorhization par un apport exogène d'inoculum peut s'avérer essentielle. L'analyse du potentiel mycorhizogène revêt une importance particulière dans le cas de l'utilisation de top-soil stocké sur mine. En effet, des travaux ont montré que le potentiel mycorhizogène d'un sol décroissait au cours de son stockage (Jasper *et al.* 1989) ; il est donc essentiel de vérifier que le top-soil permettra une mycorhization correcte des plants, sinon, il faudra procéder à une inoculation contrôlée.

En pépinière, il est possible d'avoir un inoculum mycorhizien dense et efficace en procédant à une phase préalable de multiplication d'un inoculum, soit par culture sur plante hôte dans le cas des MA, soit par culture *in vitro* d'une souche pure dans le cas des champignons ectomycorhiziens. Dans le cas des MA, en conservant d'une année sur l'autre des plants à forte affinité MA dont on sait qu'ils sont correctement mycorhizés, on obtient un inoculum suffisamment riche en spores et en fragments de racines infectées pour générer un inoculum fortement mycorhizogène. Cette pratique est généralement plus efficace que l'utilisation d'un sol récolté sous une plante, car la densité en spores MA est plus importante et le taux de viabilité des spores meilleur. Toutefois, les inoculum naturels ou produits dans des conditions insuffisamment contrôlées devront faire l'objet d'un suivi régulier de l'état de santé des plants afin de vérifier que l'inoculum ne véhicule pas de pathogènes.

La mycorhization contrôlée *in situ* a été tentée de nombreuses fois avec des résultats généralement décevants ; il est particulièrement difficile d'introduire une souche mycorhizienne sélectionnée dans un milieu déjà occupé par des souches locales. En effet, en plus d'être très compétitive, la souche introduite devra surmonter le stress de la transplantation, puis concurrencer les souches déjà établies pour les faire régresser et, enfin, prendre leur place. Dans la pratique, cette technique coûteuse n'est pas à recommander. L'inoculation en pépinière reste donc préférable.

L'enrobage de graines avec un inoculum mycorhizien pur ou non, notamment dans l'ensemencement hydraulique (*hydroseeding*), est une technique prometteuse bien qu'elle nécessite encore des mises au point, en particulier pour ce qui concerne le choix des souches et la nécessité d'utiliser des mélanges d'espèces pour améliorer la résilience de l'écosystème que l'on établit.

5. LES SYMBIOSES FIXATRICES D'AZOTE

Les symbioses fixatrices d'azote associant une plante et une bactérie font partie des plus anciennes symbioses apparues sur la planète. Toutefois, les symbioses concernant les végétaux supérieurs sont apparues très tardivement, vers la fin du Crétacé. Comme pour les ectomycorhizes, le nombre de taxa végétaux impliqués dans ces symbioses est réduit, mais l'importance écologique de ces symbioses est considérable, notamment dans les maquis néo-calédoniens où *Gymnostoma* spp. dominent.

5.1. Les symbioses à *Frankia*

Il existe de par le monde environ 260 espèces de plantes actinorhiziennes réparties en 24 genres et 8 familles d'angiospermes appartenant aux Fagales, Cucurbitales et Rosales. En Nouvelle-Calédonie, seule la famille des Casuarinaceae a été identifiée comme étant capable de former des symbioses fixatrices d'azote avec l'actinomycète *Frankia* (Jaffré *et al.* 1994^a) (figure 5.13).



© Vale Inco / S. McCoy

Parmi les familles présentes en Nouvelle-Calédonie, les familles des Rhamnaceae et des Myricaceae sont connues, ailleurs dans le monde, pour former ce type de symbiose. Des travaux ont bien démontré une présence et une abondance particulières de *Frankia* dans la rhizosphère d'*Alphitonia neocaledonica*, sans pour autant qu'il y ait formation de nodules fixateurs d'azote (Gauthier *et al.* 2000) ; de même, *Canacomyrca monticola* ne semble pas posséder de nodosités actinorhiziennes. Donc, dans les maquis miniers, les seules espèces avérées pour leur capacité à fixer l'azote de l'air en symbiose avec *Frankia* sont les *Gymnostoma* spp. et, dans une plus faible mesure, les

Casuarina spp. Pour ce qui concerne le micro-organisme, des travaux ont montré que les *Frankia* des nodules de *Gymnostoma* spp. constituaient un groupe de nodulation spécifique (Gauthier *et al.* 1999^a) et étaient largement diversifiés ; ainsi, sur 358 échantillons provenant de 8 espèces de *Gymnostoma*, 17 ensembles génétiquement distincts ont pu être identifiés (Navarro *et al.* 1999). La spécificité d'hôte de ces micro-organismes a également fait l'objet d'études approfondies. Les *Frankia* issus des nodules de *Gymnostoma* spp. sont phylogénétiquement différents des *Frankia* des *Casuarina* et des *Allocasuarina*, et ne nodulent pas les *Casuarina* spp. Inversement, les *Frankia* de *Casuarina* spp. ne nodulent pas les *Gymnostoma* spp. (Navarro *et al.* 1998). En revanche, les *Frankia* des *Gymnostoma* spp. sont compatibles avec la formation de nodules chez les espèces du genre *Elaeagnus* (Navarro *et al.* 1997). Tandis que dans les nodules de *Casuarina collina*, deux types de souches de *Frankia*, l'un capable d'infecter les *Casuarina*, ce qui était attendu, et l'autre compatible avec les *Elaeagnus* spp., ont été isolés (Gauthier *et al.* 1999^b). Aucune spécificité contrôlée génétiquement n'a pu être mise en évidence au sein de la symbiose *Gymnostoma-Frankia*. Cependant, les *Frankia* associés aux *Gymnostoma* des terrains sur substrats ultramafiques sont phylogénétiquement différents des *Frankia*

des *Gymnostoma* sur sols volcano-sédimentaires (Navarro *et al.* 1999). En outre, une plus grande diversité génétique a été observée chez les *Frankia* associés à *Gymnostoma deplancheanum* sur sols ferrallitiques désaturés que chez les *Frankia* associés à *Gymnostoma chamaecyparis* sur sols bruns hypermagnésiens, sols jugés plus sélectifs (Jaffré *et al.* 2001^b). Cette « préférence écologique » a une implication immédiate dans le choix des souches à utiliser avec les *Gymnostoma* spp. suivant le type de milieu à réhabiliter.

5.2. Les symbioses à *Rhizobium*

La fixation d'azote avec les *Rhizobium* concerne principalement les Fabaceae. En Nouvelle-Calédonie, cette symbiose est peu fréquente si l'on excepte *Acacia spirorbis* qui forme des peuplements importants dans les maquis secondarisés, notamment à la base des massifs miniers. En effet, à part cette espèce très fréquente, qui malgré son statut actuel d'espèce autochtone a un comportement de plante envahissante, on trouve seulement deux autres genres : *Archidendropsis*, un petit arbuste des sous-étages de certains maquis forestiers et paraforestiers, et *Serianthes* spp., de petits arbres souvent isolés ou en groupes de quelques individus qui fixent l'azote en symbiose avec *Rhizobium* (figure 5.14).

Le genre *Archidendropsis* possède sept espèces dont trois (*A. lentiscifolia*, *A. paivana* et *A. macradenia*) se rencontrent dans les maquis miniers de basse altitude. Les deux premières à la base de massifs du Nord-Ouest et *A. macradenia* dans le massif du Sud. L'espèce arborescente *A. granulosa* est fréquente et parfois abondante dans les forêts de basse altitude sur substrat ultramafique. *Serianthes* possède six espèces dont quatre (*S. calycina*, *S. germanii*, *S. petitiiana*, *S. margaretae*) se développent dans les maquis miniers de basse altitude, et deux en forêts littorales. L'une d'entre elles, *S. sachetae*, se trouve sur substrat ultramafique le plus souvent en pleine lumière et pourrait servir pour la revégétalisation. Deux espèces sont relativement rares : *S. germanii* est propre à l'île des Pins et *S. margaretae* se rencontre dans les maquis littoraux sur serpentines à la base du massif de la Tiébaghi. *Serianthes petitiiana* est assez commune dans les maquis rivulaires et parfois de piedmont de l'extrémité sud du massif du Sud. *Serianthes calycina* est présente à la base des massifs isolés du Nord-Ouest, en maquis préforestiers et en forêts basses de talwegs.

En ce qui concerne les bactéries associées à ces espèces, de récents travaux ont permis de montrer que le genre bactérien impliqué dans la symbiose avec *Serianthes calycina* est le genre *Bradyrhizobium* et que certaines souches, porteuses des opérons *cnr* et *nre*, tolèrent 15 mM de NiCl_2 en solution dans le milieu de culture (Chaintreuil *et al.* 2008). Nos connaissances des bactéries symbiotiques fixatrices d'azote en Nouvelle-Calédonie sont encore très fragmentaires et des études complémentaires doivent être menées pour engager un programme de sélection de souches afin de procéder à un essai d'inoculation contrôlée au champ.



Figure 5.14 : Nodules dus à *Rhizobium* sur *Serianthes calycina*.

© IAC / L. L'Huilier

6. LES BACTÉRIES RHIZOSPHÉRIQUES STIMULATRICES DE LA CROISSANCE DES PLANTES

Les bactéries rhizosphériques stimulatrices de la croissance des plantes sont souvent qualifiées de PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*). Il s'agit de bactéries qui se développent dans le volume du sol situé au voisinage immédiat des racines des plantes, volume caractérisé par la présence d'exsudats des racines. Les bactéries PGPR colonisent la rhizosphère en utilisant les exsudats des racines comme substrats nutritifs, mais à la différence des autres bactéries rhizosphériques, elles ont, en retour, un effet bénéfique sur la plante. Cet effet bénéfique peut être direct, lorsque la bactérie stimule la croissance des racines, ou indirect, lorsqu'elle contrôle des organismes phytopathogènes par exemple.

Ces bactéries PGPR ont un impact majeur sur le fonctionnement biologique de la rhizosphère, et donc sur les conditions de croissance et de développement de la plante. Ces particularités ouvrent des possibilités pour améliorer le fonctionnement de la rhizosphère et par là même des perspectives intéressantes pour la revégétalisation des sites miniers.

En Nouvelle-Calédonie, les premiers travaux sur ces bactéries des terrains miniers ont permis de montrer qu'elles étaient largement diversifiées (Mercky 1999). Récemment (Lagrange 2009), des travaux ont permis de préciser les taxa présents dans les rhizosphères de *Costularia arundinacea* et de *C. nervosa*. Pour 80 % d'entre elles, ces bactéries appartiennent aux genres *Bradyrhizobium*, *Burkholderia* et *Curtobacterium*.

Les bactéries associées aux ectomycorhizes ouvrent également des perspectives intéressantes en termes d'amélioration des techniques de revégétalisation (Duponnois *et al.* 1993). Très récemment, des travaux ont été initiés en Nouvelle-Calédonie sur les bactéries des ectomycorhizes des *Tristaniopsis* spp. (Waseem, non publié). À ce stade, les genres *Burkholderia*, *Bacillus* et *Pseudomonas* ont été identifiés sur des ectomycorhizes de *Russula* et de *Boletus*. Des sélections de souches pour leur capacité notamment à tolérer le nickel soluble ou à solubiliser le phosphore constituent les préalables nécessaires à la réalisation d'essais d'inoculation afin d'apprécier l'intérêt d'utiliser ces bactéries pour redynamiser l'activité microbienne du sol en vue d'une restauration écologique réussie.

7. INOCULATION CONTRÔLÉE AVEC DES BACTÉRIES SYMBIOTIQUES OU RHIZOSPHÉRIQUES, APPLIQUÉE À LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DES TERRAINS MINIERES

Les espèces végétales possédant des symbiotes bactériens ont la propriété d'enrichir le sol en azote, élément rare dans les milieux miniers, et sont donc d'une grande importance pour la restauration écologique. Jaffré et Pelletier (1992) ont préconisé, dans leur liste de plantes sélectionnées pour la revégétalisation des terrains miniers, des Fabaceae (plusieurs espèces des genres *Archidendropsis* et *Serianthes*) et des Casuarinaceae (plusieurs espèces de *Gymnostoma*), réparties dans diverses régions, ce qui permet de faire un choix selon les zones à restaurer. L'espèce *Serianthes calycina* est considérée comme particulièrement intéressante (Rigault *et al.* 2003), car elle est facile à produire en pépinière, capable de se développer sur un substrat très pauvre comme les stériles miniers et améliore nettement la fertilité du sol, favorisant ainsi l'implantation et la croissance des plantes autour d'elle. Par ailleurs, elle résiste bien au vent en raison de son enracinement important. C'est ce que montre notamment un essai réalisé sur le mont Dore (figures 5.15 et 5.16). *Serianthes sachetae* est également une espèce intéressante, mais non encore testée.

Ces différentes espèces doivent être plantées intercalées ou en mélange avec des espèces non fixatrices d'azote, afin de faire profiter ces dernières de l'azote incorporé dans le sol par l'activité bactérienne symbiotique. Toutefois, pour la plupart des espèces de Fabaceae, des essais sont encore nécessaires pour leur maîtrise en pépinière et sur le terrain.



Figure 5.15 : Essai de l'IRD sur le mont Dore avec *Serianthes calycina* (mis en place en 1993, photo prise en 2009) (voir chapitre 7 pour les analyses de sol de cet essai).



Figure 5.16 : De nombreux recrûs issus de graines sont sous et autour de *S. Calycina* (*Scaevola* sp., *Costularia comosa*, *Machaerina deplanchei*, *Dodonaea viscosa*, *Alphitonia neocaledonica*, *Hibbertia* sp., *Schoenus juvenis*, *Acacia spirorbis*...).

Les recherches sur les symbiotes bactériens en Nouvelle-Calédonie n'étant pas très avancées, il n'y a pas encore de techniques de « bactérisation » avec des souches sélectionnées adaptées au milieu ultramafique. Cependant, il n'est pas nécessaire d'utiliser des souches pures pour s'assurer que la symbiose avec les bactéries est fonctionnelle. En effet, les *Rhizobium* et les *Frankia* sont généralement présents dans tous les sols. Si l'on utilise un top-soil non stocké, ou stocké sur une courte période, il y a de fortes chances que les symbiotes soient présents. À l'inverse, si le top-soil a été stocké, il devient indispensable d'intervenir activement pour assurer l'apport des symbiotes. Dans tous les cas, en pépinière, il est recommandé de rajouter aux pots des Fabaceae ou des Casuarinaceae, de préférence au contact des racines, un peu de sol riche en fragments racinaires, prélevé sous les mêmes plantes en milieu naturel non perturbé. Il est également possible de garder en pépinière des pots de ces espèces pour les utiliser comme inoculum par la suite (sol et fragments racinaires), comme nous l'avons noté pour les mycorhizes. La vérification de la présence des symbiotes est relativement aisée : il suffit de s'assurer de la présence de nodules bactériens au niveau des racines. Toutefois, chez les Casuarinaceae, il peut y avoir confusion, car on peut trouver deux types de nodules. Les nodules de *Frankia* (symbiotes bactériens), qui sont généralement assez grands, 3 à 6 mm, et multilobés, et de très petits nodules d'environ 1 mm, de forme variable : sphérique, oblongue ou pyriforme, qui sont des myconodules produits par des champignons endomycorhiziens (Ducouso *et al.* 2001, Duhoux *et al.* 2001) ; il s'agit d'exceptions connues uniquement chez quelques taxa végétaux. Par ailleurs, il est probablement possible d'inclure un broyat de racines ou de nodules de Fabaceae ou de Casuarinaceae dans le mélange utilisé pour l'ensemencement hydraulique (*hydroseeding*), mais cela nécessite des essais préalables que les entreprises de restauration environnementale devront réaliser.

Enfin, on peut stimuler l'activité microbienne globale, garante de la fertilité du sol, grâce à des amendements organiques (compost végétal, réincorporation des végétaux grossièrement broyés lors de l'activité minière). Toutefois, dans les sols miniers, l'activité microbienne est soumise à un seuil imposé par la libération de métaux potentiellement toxiques (Ni, Co, Mn, Mg) à proximité immédiate des racines (Amir & Pineau 2003^{a, b}), de sorte que l'amendement organique est lui-même susceptible d'accentuer la toxicité. Cette activité bactérienne libératrice de métaux étant plus élevée en conditions de faible aération (Quantin *et al.* 2002, L'Huillier & Edighoffer 1996), il est préconisé de favoriser une bonne aération du sol, justement en incorporant de la matière organique grossièrement broyée et en réduisant les risques d'hydromorphie des sols.

8. PERSPECTIVES

Les travaux de recherche en écologie microbienne des sols miniers de Nouvelle-Calédonie ont pris un essor important depuis une décennie et figurent parmi les priorités affichées des différents opérateurs de la recherche publique en Nouvelle-Calédonie (Université de la Nouvelle-Calédonie, Institut Agronomique néo-Calédonien, Institut de Recherche pour le Développement, CNRT Nickel et environnement). Les conditions sont donc extrêmement favorables à l'acquisition de connaissances nouvelles pour la compréhension du fonctionnement microbiologique des sols miniers et notamment des interfaces sols-micro-organismes-plantes. Ces travaux permettront de comprendre, de façon plus générale, les rôles des micro-organismes, en particulier des mycorhizes, dans l'adaptation des plantes à leur environnement, mais aussi fourniront des pistes de travail pour réussir la revégétalisation des sites miniers dégradés. En effet, la réinitialisation des processus microbiologiques du sol a été identifiée comme un préalable incontournable à la réussite de la remise en place d'un couvert végétal. Pour cela, des recherches sont menées afin de caractériser la biodiversité des micro-organismes des sols ultramafiques et d'étudier les mécanismes moléculaires de leur adaptation, notamment au nickel.

L'objectif est, à terme, d'optimiser l'utilisation des micro-organismes dans les processus de restauration écologique des sites miniers, mais également, de façon plus générale, de tirer profit des micro-organismes naturellement en interaction avec les plantes pour améliorer l'adaptation de celles-ci à leur environnement. Ainsi, l'utilisation des micro-organismes amènera naturellement à un usage raisonné des intrants habituels (engrais, pesticides) et, par là même, réduira l'impact environnemental des pratiques agricoles et forestières.

Tableau 5.1 : État mycorhizien d'espèces végétales de milieux ultramafiques néo-calédoniens. (Liste non exhaustive)

Espèces généralement bien endomycorhizées (MA, forte affinité)	Espèces généralement peu endomycorhizées (MA, faible affinité)
<ul style="list-style-type: none"> • Dennstaedtiaceae (fougère) <i>Pteridium esculentum</i> • Araucariaceae (gymnospermes) <i>Agathis lanceolata</i> <i>Agathis ovata</i> <i>Araucaria columnaris</i> <i>Araucaria montana</i> • Podocarpaceae (gymnospermes) <i>Dacrydium araucarioides</i> • Argophyllaceae <i>Argophyllum laxum</i> • Casuarinaceae <i>Casuarina collina</i> <i>Gymnostoma chamaecyparis</i> <i>Gymnostoma poissonianum</i> • Clusiaceae <i>Garcinia amplexicaulis</i> • Cunoniaceae <i>Codia discolor</i> <i>Codia montana</i> <i>Cunonia macrophylla</i> <i>Geissois hirsuta*</i> <i>Geissois pruinosa*</i> <i>Pancheria alaternoides</i> • Ericaceae <i>Cyathopsis albicans</i> <i>Dracophyllum</i> sp. • Fabaceae <i>Serianthes</i> sp. • Flacourtiaceae <i>Homalium kanaliense*</i> • Goodeniaceae <i>Scaevola coccinea</i> <i>Scaevola montana</i> • Myrtaceae <i>Carpolepis laurifolia</i> <i>Cloezia artensis</i> <i>Tristaniopsis calobuxus</i> <i>Tristaniopsis guillainii</i> <i>Xanthostemon multiflorus</i> <i>Xanthostemon</i> sp. • Picrodendraceae <i>Longetia buxoides</i> • Phyllanthaceae <i>Phyllanthus favieri*</i> <i>Phyllanthus</i> spp. • Rhamnaceae <i>Alphitonia neocaledonica</i> • Rubiaceae <i>Psychotria douarrei*</i> • Rutaceae <i>Boronella koniamboensis</i> • Sapindaceae <i>Dodonaea viscosa</i> • Violaceae <i>Hybanthus austrocaledonicus*</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Cyperaceae <i>Costularia arundinacea</i> <i>Costularia comosa</i> <i>Costularia nervosa</i> <i>Costularia pubescens</i> <i>Schoenus neocaledonicus</i> • Proteaceae <i>Grevillea exul</i> <i>Grevillea gillivrayi</i> • Sapotaceae <i>Sebertia acuminata*</i> (inhibition de la mycorhization due uniquement aux teneurs élevées en Ni dans les racines en milieu naturel) <p>* Espèces hyperaccumulatrices de Ni.</p>
	<p>Espèces généralement très peu mycorhizées (MA) ou non mycorhizées (très faible affinité)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Cyperaceae <i>Gahnia</i> sp. <i>Lepidosperma perteres</i> <i>Machaerina deplanchei</i> • Proteaceae <i>Stenocarpus</i> sp.
	<p>Espèces ectomycorhizées</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Fabaceae <i>Acacia spirorbis</i> • Myrtaceae <i>Arillastrum gummiferum</i> <i>Melaleuca pancheri</i> <i>Melaleuca quinquerivaria</i> <i>Tristaniopsis calobuxus</i> <i>Tristaniopsis glauca</i> <i>Tristaniopsis guillainii</i> <i>Tristaniopsis macphersonii</i> <i>Tristaniopsis nimndoensis</i> <i>Tristaniopsis vieillardii</i> • Nothofagaceae <i>Nothofagus aequilateralis</i> <i>Nothofagus balansae</i> <i>Nothofagus codonandra</i>

LA RESTAURATION DES SITES MINIERS

*Laurent L'HUILLIER, Adrien WULFF, Gildas GÂTEBLÉ,
Bruno FOGLIANI, Charly ZONGO et Tanguy JAFFRÉ*

1. INTRODUCTION

2. HISTORIQUE DE LA REVÉGÉTALISATION

3. PRINCIPES DE LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE

4. MÉTHODES APPROPRIÉES POUR LA REVÉGÉTALISATION

- 4.1. Le choix des espèces
- 4.2. La multiplication à partir de graines
- 4.3. La multiplication asexuée
- 4.4. Préparation des substrats à revégétaliser
- 4.5. Mise en œuvre et choix des techniques de revégétalisation
- 4.6. Suivi, évaluation et indicateurs

1. INTRODUCTION

L'accentuation, à l'échelle planétaire, des effets destructeurs de l'activité humaine sur les milieux naturels a fait naître une prise de conscience internationale, qui se traduit aujourd'hui par une reconnaissance unanime de la nécessité de réaménager et de restaurer les milieux dégradés. Les moyens à mettre en œuvre pour y parvenir sont variés en raison de la diversité des situations (conditions écologiques, nature et importance relative des dégradations et de leurs effets sur les écosystèmes environnants, ainsi que sur les activités et les modes de vie des populations).

Cette prise de conscience a réellement pris corps en Nouvelle-Calédonie dans les années 1970, à la période dite du « boom du nickel », où les pollutions visuelles, très souvent appréhendées sous le vocable « eaux rouges », traduisant des apports de particules terreuses dans les creeks et les baies, ont alarmé les populations, les ONG environnementales, les pouvoirs publics et les sociétés minières. Ces premiers constats ont été à l'origine, d'une part, d'études sur les moyens géotechniques (stockage des déblais, gestion sur site de l'écoulement des eaux et de la sédimentation des particules terreuses transportées... ; cf. chapitre 2), permettant de limiter les dégâts sur l'environnement et, d'autre part, de recherches, qui se poursuivent, sur les moyens de remédier aux pertes et aux effets engendrés par la destruction de la couverture végétale.

La restauration des anciens sites miniers et des zones dénudées par l'activité minière, par les phénomènes d'érosion ou par le feu ne constitue cependant en Nouvelle-Calédonie qu'un des volets de la restauration de la couverture végétale des substrats ultramafiques. Celle-ci doit également prendre en compte la nécessité de protéger les formations forestières existantes, mais aussi d'augmenter leur étendue en redynamisant ou en accélérant la succession secondaire de groupements végétaux plus ou moins figés. Les recherches ont porté principalement sur l'installation d'une couverture végétale pionnière, toutefois d'autres secteurs dégradés devront aussi être revégétalisés. Les moins endommagés le seront directement à l'aide d'espèces secondaires, tandis que les zones complètement dénudées devront être plantées d'espèces pionnières, qui constitueront le point de départ d'une dynamique vers des groupements végétaux de plus en plus diversifiés et complexes, grâce à l'implantation naturelle, ou éventuellement assistée, d'espèces secondaires puis d'espèces forestières.

2. HISTORIQUE DE LA REVÉGÉTALISATION

Les premiers essais de revégétalisation ont été réalisés en 1971, pour le compte de la société Penamax, par le CTFT, avec la collaboration de l'Orstom. Ils portaient sur la revégétalisation de deux horizons de latérites (latérite rouge cuirassée et latérite jaune). Ces essais comme les suivants, réalisés par l'Orstom pour le compte de la SLN en 1974-1976 (Jaffré & Latham 1976), puis par le CTFT de 1975 à 1981, ont privilégié l'utilisation de nombreuses espèces exotiques (Poaceae diverses, Pin des Caraïbes, *Acacia* australiens), ainsi que celle de quelques espèces locales. Très peu ont donné de bons résultats, à part deux espèces locales, le gaïac (*Acacia spirorbis*) et le bois de fer (*Casuarina collina*) (Cherrier 1990), lesquelles ont montré de bonnes croissances, principalement à basse altitude sur des sols fertilisés ou recouverts de terre d'alluvions.

De 1988 à 1991, les recherches menées par l'Orstom, pour le compte de la SLN (Jaffré & Rigault 1991^{a,b}, Pelletier & Esterle 1995), ont eu pour but d'inventorier et de tester en laboratoire les espèces, majoritairement endémiques, potentiellement utilisables pour la

revégétalisation par plantation ou par semis. Ces premiers résultats ont fait l'objet d'un manuel publié par la SLN, donnant les caractéristiques de 67 espèces (Jaffré & Pelletier 1992). Dès 1990, ces espèces ont été testées lors d'essais en champs (avec différents apports de matière organique sous forme de top-soil, de paille, de pâte à papier...), d'abord en collaboration (Orstom, Cirad, SLN) pour le compte de la province Sud dans le cadre d'un contrat de plan (Jaffré *et al.* 1993 ; figure 6.1), ensuite par l'Orstom pour le compte de la SLN (Rigault *et al.* 1996), puis, à partir de 1994, par la Siras Pacifique pour le compte de la SLN (Luçon *et al.* 1997) et par le Cirad pour le compte de différentes sociétés minières (Sarrailh 2001). Ces essais ont permis de conforter les possibilités d'utilisation de mélanges d'espèces pionnières locales adaptées (Jaffré *et al.* 1994^c, 1997^a). Cela permet de limiter les apports d'engrais ainsi que les possibilités d'invasion d'espèces allochtones, mais aussi de réduire l'utilisation des espèces locales à caractère grégaire et invasif (*Acacia spirorbis* et *Casuarina collina*) qui ont une propension à créer des groupements monospécifiques figés.



© IAC / L. L'Huilier

Figure 6.1 : Essai à Thio (décharge « Crépuscule ») de différentes espèces endémiques (sur la photo, diverses espèces de *Gymnostoma*) (Jaffré *et al.* 1993).

Cette orientation en faveur de l'utilisation d'espèces natives a été progressivement mise en œuvre au cours des années suivantes, à la fois par les sociétés minières, la province Sud et les communes, avec une augmentation des surfaces revégétalisées depuis la fin des années 1990 (voir en annexe 4 le bilan des collectivités et des sociétés minières). La société Vale Inco a choisi de privilégier les espèces natives présentes dans la région de Goro, et a obtenu de meilleurs résultats avec ces espèces (incluant l'espèce actinorhizienne fixatrice d'azote *Gymnostoma deplancheanum*) qu'avec des plantations d'*Acacia spirorbis* et de *Casuarina collina*, les différences étant particulièrement significatives en termes d'enrichissement floristique et de recouvrement au sol par l'implantation spontanée sur les parcelles d'expérimentation de recrûs d'espèces variées (McCoy *et al.* 1997, 2002). Toutefois, l'utilisation d'espèces exotiques, d'*Acacia spirorbis* et de *Casuarina collina* est encore trop souvent adoptée pour revégétaliser de nombreux sites miniers, sans doute en raison de la facilité à se procurer des semences ou de jeunes plants et peut-être en raison d'habitudes malheureusement encore ancrées chez certains acteurs de la revégétalisation.

Un bilan des essais de revégétalisation sur le terrain conduits par les organismes de recherche, les sociétés minières ou les collectivités, qui ont fait l'objet de protocoles, de suivis et de rapports ou publications scientifiques, est présenté en annexe 3.

Les recherches et les expérimentations sont actuellement poursuivies, notamment par l'IAC et l'UNC, pour une meilleure domestication des espèces indigènes utilisées (étude des dormances, maîtrise de la germination et de la conservation des graines) (Wulff *et al.* 2008, Zongo *et al.* 2007), l'amélioration des techniques culturales, une meilleure connaissance des top-soils (L'Huillier 2007) et des symbiotes (Perrier *et al.* 2006, Lagrange *et al.* 2009).

Ces résultats permettent d'ériger un certain nombre de règles et de proposer des pratiques qui sont exposées plus bas dans ce chapitre et dans le chapitre 7.

3. PRINCIPES DE LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE

La restauration écologique, qui concerne la reconstruction de biotopes ou d'écosystèmes dégradés variés (terres agricoles surexploitées, milieux détruits ou endommagés par des événements catastrophiques naturels, zones dégradées par des extractions de matériaux ou de minerais...), est définie par la Society for Ecological Restoration (SER 2004) comme étant « le processus qui assiste l'autoréparation d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit ». L'application des principes de la restauration écologique des sites dégradés est largement prônée par les grandes sociétés industrielles et minières à travers le monde, regroupées dans l'International Council on Mining & Metals (ICMM) qui a édité le fascicule *Good Practice Guidance for Mining and Biodiversity*. Il est à ce jour très largement admis que les opérations de revégétalisation des zones dénudées ou endommagées par l'activité minière ou industrielle doivent avoir clairement pour objectif l'installation à terme d'une couverture végétale, qui puisse protéger les pentes contre l'érosion, réguler les débits hydriques, assurer la reconstitution et la protection de la diversité biologique ainsi que la réintégration des sites impactés dans le paysage.

Toute opération de restauration écologique doit au préalable définir le calendrier des objectifs à atteindre par la mise en œuvre de moyens qui influenceront sur la trajectoire évolutive (Le Floc'h & Aronson 1995) (figure 6.2). Cette trajectoire peut conduire, à travers des interventions correctives, à une réaffectation, c'est-à-dire à l'établissement d'une couverture végétale totalement différente et à vocation distincte de la couverture initiale, ou à une réhabilitation permettant à la couverture végétale de réguler les débits hydriques et les phénomènes d'érosion sans prise en compte des composantes biologiques initiales, ou encore à une restauration à plus ou moins long terme des écosystèmes dans leurs propriétés et fonctions, ainsi que dans leurs qualités biologiques (cf. les définitions en encadré ci-après).

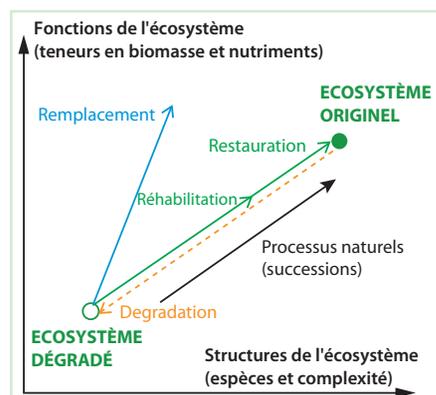


Figure 6.2 : Différentes approches de la mise en place d'une végétation sur terrain dégradé (Bradshaw 1997[®]).

QUELQUES DÉFINITIONS

(D'après la Society for Ecological Restoration (SER) 2004,
Le Floc'h & Aronson 1995, Bradshaw 1997^b)

Les termes et concepts usuels en écologie de la restauration sont utilisés, selon les auteurs et les circonstances, comme autant de synonymes ou de contraires. Il paraît dès lors important de proposer une terminologie de base, si possible, applicable à toutes les situations, pour tous les écosystèmes.

- **La restauration écologique** : processus qui assiste l'autoréparation d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit. La SER la définit aussi comme « la transformation intentionnelle d'un milieu pour y rétablir l'écosystème considéré comme indigène et historique. Le but de cette intervention est de revenir à la structure, à la diversité et à la dynamique de cet écosystème. » La restauration est considérée ici *sensu stricto*. Il est aussi proposé le terme de restauration *sensu lato*, qui qualifie le fait de stopper la dégradation et de tenter, en priorité, de rétablir les fonctions essentielles (production, autoreproduction, etc.) et la structure générale de l'écosystème préexistant. Remarque : la restauration écologique est la pratique qui consiste à restaurer les écosystèmes, mise en œuvre par les opérateurs et gestionnaires de projets, tandis que l'écologie de la restauration est la science sur laquelle se base la pratique.
- **La réhabilitation**, tout comme la restauration, se sert des écosystèmes historiques ou préexistants comme modèles ou références, mais les deux activités diffèrent au niveau de leurs buts et de leurs stratégies. La réhabilitation insiste sur la réparation des processus, de la productivité et des services de l'écosystème, tandis que la restauration vise en plus à rétablir l'intégrité biotique préexistante en termes de composition spécifique et de structure des communautés.
- **La remédiation** est le fait de remédier, de rectifier, d'améliorer. Elle concerne plus le procédé que l'objectif final à atteindre.
- **La récupération** (*reclamation* en anglais) : ce terme, communément utilisé dans le contexte des paysages miniers en Amérique du Nord et en Grande-Bretagne, a une plus large application que la réhabilitation. Les principaux objectifs de la récupération comprennent la stabilisation du terrain, la sécurité publique, l'amélioration esthétique, et généralement un retour à un paysage considéré comme utile dans un contexte régional, sans obligation de retour à un état originel. Sa finalité ne répond pas aux exigences qu'implique la biodiversité remarquable de certaines régions.
- **Le remplacement** (ou substitution) est une alternative possible à la récupération. Il consiste à installer une végétation de substitution à la couverture végétale préexistante.
- **La réaffectation** : de sens analogue aux deux termes précédents, elle décrit ce qui se passe lorsqu'un écosystème est transformé par l'homme et qu'un nouvel usage en est fait. Le nouvel état est éventuellement sans relation de structure ou de fonctionnement avec l'écosystème qui préexistait (ex. : espace mis en culture). . . .

- **La revégétalisation** (ou végétalisation), vise à reconstituer un couvert végétal d'un terrain dénudé par l'action de l'homme ou par l'effet de catastrophes naturelles. Les espèces végétales utilisées devraient être adaptées aux conditions du site à revégétaliser et suffisamment diversifiées, toutefois ce concept ne précise pas les objectifs à atteindre et les moyens à mettre en œuvre, laissant la voie ouverte à diverses interprétations. Ce terme est couramment et abusivement employé en Nouvelle-Calédonie, autant dans le sens de la restauration que dans celui de la réhabilitation ou de la récupération.
- **Le reboisement** (ou reforestation) : le terme est souvent utilisé sans distinction de la restauration ou de la réhabilitation, alors que ce sont des concepts différents. Le reboisement est une opération qui consiste à créer des zones boisées ou des forêts sur des terrains qui étaient autrefois occupés par des forêts.
- **Le reverdissement** : ce terme est souvent employé sans discernement et confondu avec la restauration ou la réhabilitation. Le reverdissement est la simple action de reverdir, ou l'état de ce qui reverdit.

L'importance des moyens à mettre en œuvre pour la restauration d'un écosystème dépend largement de son niveau de dégradation, qui se traduit par des ruptures d'équilibres et le franchissement de seuils biotiques et physico-chimiques (figure 6.3). S'il s'agit d'un écosystème assez peu dégradé, des améliorations portant sur sa gestion (par exemple l'élimination des espèces envahissantes nuisibles) peuvent suffire pour rétablir un écosystème intact et pleinement fonctionnel. Si la dégradation est plus importante et que la barrière biotique est franchie (baisse de diversité biologique, par exemple), l'effort de restauration devra porter sur l'élimination du facteur à l'origine de la dégradation et sur le réajustement des composantes biotiques de l'écosystème. Une dégradation encore plus poussée, au-delà de la « barrière abiotique » (modification de paramètres physiques ou chimiques, comme l'érosion du sol), nécessitera la mise en œuvre de moyens très importants visant à améliorer d'abord les conditions abiotiques (remodeler le relief, rétablir les régimes hydrologiques...) avant de pouvoir procéder à des manipulations biotiques utiles (Hobbs & Harris 2001).

Le principe préconisé en Nouvelle-Calédonie, s'appuyant sur les résultats des recherches et des expérimentations réalisées, consiste à amorcer le processus de la succession primaire ou à accélérer et parfois à redynamiser le processus de la succession végétale

secondaire, par l'implantation d'espèces pionnières dans le premier cas et d'espèces secondaires dans le second. Dans toutes les situations, le processus de la succession doit permettre à la couverture végétale d'évoluer vers des groupements végétaux de plus en plus complexes et biologiquement diversifiés, grâce à l'implantation naturelle et progressive d'espèces supplémentaires provenant des groupements végétaux de zones préservées ou sites nodaux (cf. encadré de L. Maggia, chapitre 3), représentatives des écosystèmes de la zone.

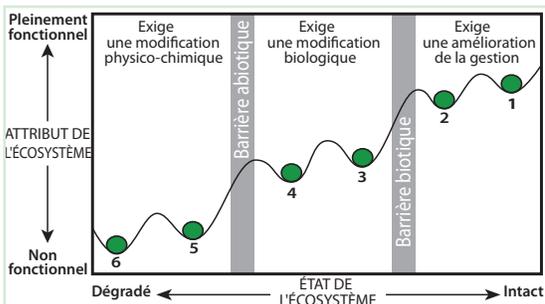


Figure 6.3 : Modèle conceptuel de la dégradation et de la restauration d'un écosystème (adapté de Hobbs & Harris 2001).



Succession végétale dans les maquis miniers de Nouvelle-Calédonie

L'étude de l'évolution de la végétation, après passage du feu sur terrain minier (sol ferrallitique cuirassé du Sud), basée sur l'analyse, en fonction du temps, des changements de structure et de composition floristique des groupements végétaux, a permis d'identifier et de dater des stades successifs de la succession végétale secondaire après incendie (McCoy *et al.* 1999). Il est ainsi estimé que la durée nécessaire pour passer d'un maquis ouvert à un maquis fermé serait de 40 à 75 ans, qu'elle serait de 75 à 100 ans pour atteindre un stade préforestier et supérieure à 250 ans pour atteindre le stade de forêt dense humide. L'étude a montré le rôle clé de *Gymnostoma deplancheanum* en tant qu'espèce pionnière qui assure un ombrage, produit l'essentiel de la litière et enrichit le sol en azote grâce à une symbiose racinaire avec l'actinomycète du genre *Frankia* (cf. chapitre 5). Bien que la majorité des espèces des sites étudiés aient la capacité de rejeter à partir de souches – cas de 70 % des espèces pionnières –, seulement 39 persistent après le passage du feu tandis que 114 autres colonisent le milieu à des stades ultérieurs de la succession.

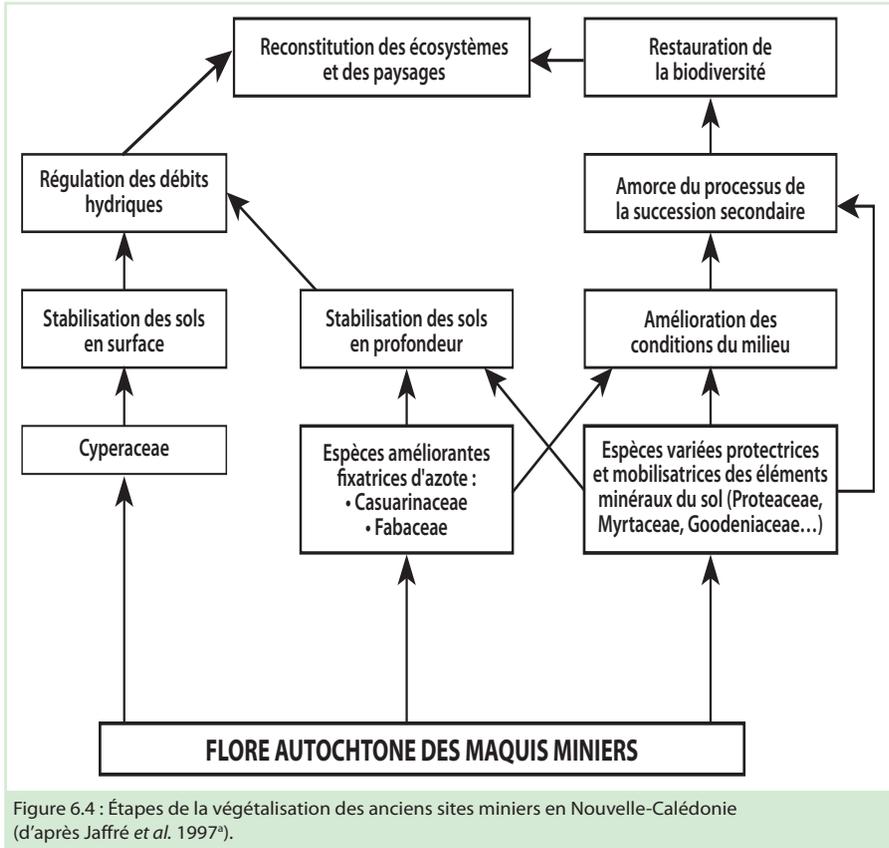
Une modélisation a permis d'estimer l'impact de la fréquence des feux sur la structure de la végétation : une probabilité de feu $< 0,1$ par décennie se traduirait par le maintien d'une couverture majoritairement forestière dense humide, tandis qu'une probabilité d'incendie entre 0,1 et 0,4 modifierait radicalement la végétation, transformant la forêt en un maquis dominant. Avec une probabilité d'incendie $> 0,6$, toute forêt serait exclue.

Avec l'augmentation récente de la fréquence des feux, les maquis ont vu leur surface considérablement augmenter au détriment des forêts, et leur évolution vers des stades plus évolués est malheureusement régulièrement remise en cause par de nouveaux incendies.

4. MÉTHODES APPROPRIÉES POUR LA REVÉGÉTALISATION

Les méthodes appropriées pour la revégétalisation des sites dégradés varient selon les situations envisagées. Elles reposent néanmoins sur une connaissance aussi précise que possible des caractéristiques physico-chimiques des terrains et matériaux à revégétaliser (Jaffré *et al.* 1994^c, 1997^a), ainsi que des conditions climatiques et microclimatiques du site (cf. chapitre 2). La connaissance des groupements végétaux et des espèces de la zone impactée et de ses alentours devra également guider le choix des espèces à utiliser. Les caractéristiques biologiques et physiologiques des espèces appartenant à la flore locale devront également être connues, afin de pouvoir choisir les espèces les mieux adaptées à chaque substrat et à chaque site à revégétaliser.

Pour les expérimentations les plus récentes mises en place par l'Orstom (IRD), le Cirad et l'AC, la méthode s'appuie sur l'utilisation de diverses espèces du maquis minier pouvant avoir des actions complémentaires, comprenant la lutte contre l'érosion du sol, la fixation en profondeur de celui-ci, ainsi que l'amélioration de sa fertilité, facilitant de ce fait l'implantation d'espèces plus exigeantes, formant un couvert plus dense, plus efficace pour la régulation des débits hydriques et devenant de plus en plus diversifié au fil des années (cf. figure 6.4 ; Jaffré *et al.* 1997^a).



Les parties qui suivent, allant du choix des espèces à leur multiplication, leur installation sur le terrain et leur suivi, visent à aider les acteurs de la revégétalisation à mettre en œuvre des procédés adaptés aux conditions auxquelles ils doivent faire face.

4.1. Le choix des espèces

Le choix des espèces végétales dans un objectif de restauration écologique revêt une importance capitale, qui conditionnera pour une grande part la réussite de tout projet. Les chapitres précédents ont décrit l'extrême diversité des milieux sur terrains miniers, tant du point de vue biologique que pédo-climatique. Ils constituent au niveau édaphique, comme cela a été démontré (Jaffré 1980), une véritable barrière écologique à l'égard de la plupart des espèces introduites (exception faite du Pin des Caraïbes). Ainsi s'expliquent les échecs de nombreux essais d'implantation d'espèces non adaptées. Aussi le premier principe de base à respecter pour tout projet de restauration sur ces milieux repose-t-il sur l'impérieuse nécessité d'utiliser les espèces indigènes de la flore des terrains miniers du pays.

Plusieurs exigences sont à prendre en compte dans le choix des espèces : utiliser des espèces adaptées, pionnières ou secondaires, diversifier les espèces retenues, éviter les espèces exotiques, et tenir compte d'un certain nombre de caractéristiques biologiques (enracinement, vitesse de croissance et de germination...), détaillées ci-après.

• Utiliser des espèces adaptées

Les programmes de restauration requièrent le choix d'espèces végétales particulièrement adaptées et résistantes aux contraintes du milieu. Ainsi, **seules des espèces indigènes** se développant naturellement sur terrains miniers devraient être utilisées, étant à même de répondre aux exigences du milieu de manière durable, sans nécessité d'interventions répétées pour soutenir leur développement.

En outre, il est nécessaire de tenir compte des caractéristiques propres à chaque site : ainsi, par exemple, certaines espèces étroitement adaptées aux basses altitudes ne pourront pas se développer correctement à des altitudes élevées. Cela implique donc une caractérisation préalable des composantes biologiques et écologiques du milieu (Jaffré & Rigault 1998), qui passe par :

- un **inventaire de la flore du site**. Les espèces choisies devront faire partie du cortège floristique des associations végétales locales ;
- une **description des conditions pédo-climatiques** : les espèces devront être adaptées aux conditions de milieu (nature du substrat édaphique, conditions hydriques, altitude...).

Le fonds floristique de restauration devra ainsi être constitué d'espèces dont la plus grande part possible devra être originaire du massif, permettant l'intégration des zones revégétalisées dans la dynamique de la végétation environnante.

Des exceptions à ces règles peuvent être admises dans certains cas, tout en privilégiant les espèces natives des terrains miniers. Il a été notamment observé que certaines espèces du genre *Gymnostoma*, bien qu'étant rivulaires en milieu naturel, donnaient de bons résultats dans des essais sur mine (cf. chapitre 7). D'autres espèces ont une amplitude écologique assez large et devraient pouvoir être implantées dans diverses situations (par exemple plusieurs espèces de Cyperaceae : *Machaerina deplanchei*, *Costularia comosa*...).

Le cas particulier du bois de fer (*Casuarina collina*) et du gaïac (*Acacia spirorbis*) est traité plus bas (cf. encadré en fin de section 4.1). D'une manière générale, ces deux espèces ne doivent pas être utilisées massivement comme par le passé, car elles ont une fâcheuse tendance à former des peuplements figés monospécifiques.

S'agissant d'espèces exotiques, quelques exceptions peuvent être tolérées, notamment pour certains ensemencements hydrauliques ou dans des conditions particulières (cf., plus bas, « Éviter les espèces exotiques »).

• Utiliser des espèces pionnières ou secondaires

Le principe de la restauration consiste à implanter des **espèces facilitatrices de la succession** (cf. section 3 dans ce chapitre). Sur terrains dénudés, il s'agira d'espèces pionnières (Cyperaceae, espèces héliophiles arbustives, buissonnantes ou arborescentes), particulièrement résistantes et peu exigeantes, assurément les mieux adaptées pour les travaux de restauration sur les anciens sites miniers très dégradés. Sur sites moins endommagés, il s'agira d'espèces secondaires, permettant de redynamiser la succession de groupements végétaux plus ou moins figés.

Ces espèces, par enrichissement et protection du sol, faciliteront l'implantation naturelle et progressive de nouvelles espèces plus exigeantes provenant des zones environnantes, permettant à la couverture végétale d'évoluer vers des groupements végétaux de plus en plus diversifiés.



Figure 6.5 : Colonisation d'un terrain dénudé à partir de Cyperaceae (*Costularia comosa*, *Schoenus neocaledonicus*, *Schoenus juvenis*...), à proximité d'un maquis arbustif.

Ce principe n'impose donc pas de maîtriser la multiplication de toutes les espèces des terrains miniers ayant été dégradés. Si un tel objectif était fixé, il demanderait un travail de recherche considérable étant donné la forte diversité spécifique de la flore des substrats ultramafiques. Il serait en outre en partie voué à l'échec si l'échelonnement des stades de succession décrit précédemment n'était pas scrupuleusement respecté.

L'étude des espèces pionnières, entreprise en 1989 par l'Orstom avec la participation de la SLN, poursuivie, depuis environ 2000, par l'UNC et l'IAC, a permis de recenser environ 80 espèces majeures, qui peuvent être aujourd'hui produites

par germination pour la plupart ou par bouturage pour certaines (présentées dans le chapitre 7 et section 4.3 de ce chapitre), parmi 1 140 espèces environ qui se rencontrent dans les maquis miniers (Jaffré *et al.* 2001). Ces espèces pionnières ont été retenues pour leur capacité d'adaptation à plusieurs catégories de milieux sur terrains miniers, leur caractère relativement commun, leur abondance et leur facilité à être multipliées. Des efforts sont conduits également par des pépinières privées, celle de Vale Inco, par exemple, maîtrise assez bien, à ce jour, la multiplication d'environ 120 espèces de maquis, pour environ 400 espèces inventoriées dans la zone d'impact du projet industriel (McCoy, com. pers.).

• Diversifier les espèces

La diversification des espèces implantées sur un même site est un des autres points clés de la réussite d'un projet de restauration (figure 6.4). Des espèces variées pourront avoir des actions complémentaires :

- lutte contre le ruissellement des eaux et l'érosion du sol, par des systèmes racinaires plus ou moins profonds ou fasciculés, des frondaisons de forme variable qui atténueront l'impact des gouttes d'eau sur le sol, et aussi grâce aux effets absorbants et structurants du sol dus à la matière organique déposée à sa surface ;
- amélioration de la fertilité du sol, par enrichissement en nutriments à partir d'une litière provenant d'espèces variées : fixatrices d'azote atmosphérique (notamment des genres *Gymnostoma*, *Serianthes*, *Archidendropsis*), ou fortement mycorhizées, facilitant l'absorption du phosphore (cf. chapitre 5), ou encore possédant des teneurs relativement élevées en certains éléments minéraux (potassium, calcium) dans leur feuillage (cf. tableau 3.3 et chapitre 7). L'utilisation de ces espèces permet d'éviter, ou du moins de limiter, l'apport d'engrais souvent coûteux et rapidement lessivés (surtout l'azote) ;
- diminution des risques de pertes importantes dans le cas de plantations monospécifiques ou peu diversifiées (mortalités suite à une maladie, à une attaque sélective de ravageurs phytophages, à un stress hydrique, à l'abrutissement par des cerfs...) ;

- facilitation de l'implantation d'espèces plus exigeantes, devenant de plus en plus diversifiées au fil des années et plus efficaces pour la régulation des débits hydriques.

Le nombre d'espèces à planter sur un site est délicat à prévoir. Il dépend notamment de la diversité de la flore environnante et de la surface à revégétaliser. Au début des années 2000, la plupart des opérations de revégétalisation utilisaient moins de 10 espèces, parfois moins de 5, ce qui est très faible (en comparaison, l'entreprise minière Alcoa, dans le Sud-Ouest australien, utilise au départ environ 100 espèces plantées ou semées). Il s'agira, à l'avenir, de veiller à ce que la diversité soit à chaque fois la plus élevée possible et, assurément, de tendre vers une augmentation progressive du nombre d'espèces, au fur et à mesure que s'améliorent à la fois les connaissances acquises par les travaux des instituts de recherche et la maîtrise technique des espèces par les pépiniéristes et les sociétés de revégétalisation et de restauration, l'objectif étant de s'approcher de la diversité présente dans la flore des espèces pionnières des alentours.

• Éviter les espèces exotiques

Les différents essais de revégétalisation de sites miniers à partir d'espèces exotiques ont tous montré qu'elles n'étaient pas capables (excepté *Pinus caribaea*) de se développer convenablement sans assistance, du fait des contraintes pédologiques très fortes de ces substrats. Seuls des apports minéraux importants, notamment en phosphore, qui constitue le premier facteur limitant pour ces espèces (Bonzon *et al.* 1997), leur permettent de s'implanter pendant plusieurs années, mais avec un développement généralement de plus en plus médiocre au fil des années. Le principe de la restauration n'étant pas compatible avec des apports massifs et répétés de fertilisants (cf. sections 3 et 4), il convient donc de ne pas utiliser d'espèces exotiques.

L'utilisation de *Pinus*, notamment l'espèce *P. caribaea*, est à proscrire sur les terrains miniers : celle-ci montre en effet une capacité inquiétante à s'installer très rapidement en milieu ouvert et en lisière de forêt, à partir de plantations forestières, comme celles réalisées dans le Sud (figure 6.6). Des densités très élevées ont été relevées, de l'ordre de 10 plants/m² pour des jeunes plants de plus de 1 m de haut (L. L'Huillier 2009, obs. pers.). Sa haute productivité en graines anémochores se dispersant facilement, son caractère hautement inflammable (cas de beaucoup de résineux) favorisant le départ et la propagation du feu, sa propension à appauvrir la flore endémique sous son couvert (Le Mire Pécheux 1996) sont autant de raisons pour classer cette espèce invasive « à très haut risque » pour la biodiversité sur substrat ultramafique et pour tous les milieux fragiles.

L'utilisation d'espèces exotiques peut être exceptionnellement envisagée, mais uniquement pour la méthode d'ensemencement hydraulique (*hydroseeding*), qui nécessite des quantités importantes de semences et doit souvent faire face à des contraintes de disponibilité en graines d'espèces locales. La méthode consiste à utiliser des espèces végétales « nourrices », espèces exotiques à développement rapide mais à courte durée de vie, devant favoriser ensuite le développement des espèces locales pérennes dont la croissance est plus lente. Dans ce cas, les exceptions à la règle d'emploi d'espèces indigènes doivent être solidement argumentées et parfaitement raisonnées :

- des réglementations provinciales dressent des listes d'espèces réputées envahissantes et en interdisent l'utilisation (Code de l'environnement de la province Sud 2009, Code de l'environnement de la province Nord 2008) ;

- l'utilisation de semences exotiques non interdites doit prendre en compte une étude de risque d'invasion du milieu par ces espèces. De nombreuses informations sont disponibles sur des sites internet officiels (ex. : Global Invasive Species Database, Pacific Island Ecosystems at Risk, HEAR...) : les espèces qui présentent un risque, même faible, doivent impérativement être évitées ; de même que les espèces des substrats ultramaïques d'autres régions du monde, qui ne figurent généralement pas sur les listes d'espèces invasives, car peu documentées ;
- les espèces à cycle annuel devront être privilégiées (des Poaceae pérennes ont été observées encore dix ans après leur implantation sur certains sites). Des essais avec du blé et de l'avoine ont donné des résultats intéressants (L. L'Huillier 2008, obs. pers. ; cf. section 4.6) ;
- elles ne devront pas non plus être utilisées massivement, les graines d'espèces exotiques devront être en plus petites quantités que celles des espèces natives, de façon à limiter les effets de compétition entre ces deux catégories d'espèces ;
- elles devront également être évitées dans les sites soumis à des pressions fortes d'herbivores (cerfs...) ou d'insectes phytophages ;
- elles ne devraient pas être projetées avec un mélange trop riche en fertilisants, ce qui aurait pour conséquence de favoriser leur maintien à long terme (cf. section 4.5 sur l'ensemencement hydraulique). En outre, plusieurs groupes de la famille des Poaceae sont connus pour leur capacité à s'adapter, par modification génétique et sélection, à un environnement donné : un risque existe donc de trouver parmi les graines projetées, ou au sein de leurs descendances, des génotypes adaptés susceptibles de devenir envahissants ;



© IAC / L. L'Huillier

Figure 6.6 : Implantation naturelle de *Pinus caribaea*, nécessitant d'intervenir pour tenter de l'éradiquer (Sud, Madeleine).

- enfin, ces pratiques doivent rester transitoires, le temps que davantage de semences natives soient disponibles sur le marché et que les techniques de germination *in situ* s'améliorent.

• **Autres caractéristiques diverses**

Outre leur très bonne adaptation à différentes catégories de maquis miniers, leur diversité et leur caractère pionnier, les espèces peuvent également être sélectionnées en fonction d'autres caractéristiques :

- **enracinement** : choisir des espèces à système racinaire diversifié. Les horizons superficiels sont fixés par des enracinements diffus (Cyperaceae), les horizons inférieurs par des enracinements plus profonds (espèces arbustives). Le mélange de ces espèces est important dans les zones pentues à risque d'érosion élevé ;
- **croissance** : les espèces à croissance relativement rapide sont à privilégier également sur les zones pentues. Les espèces à croissance plus lente sont à réserver pour les zones moins pentues (cf. les fiches espèces en chapitre 7) ;
- **recouvrement** : de la même manière, privilégier les espèces recouvrant rapidement la surface du sol pour les zones pentues, de façon à limiter l'effet érosif des gouttes de pluie (ex. : *Machaerina deplanchei*, *Costularia comosa*, *Schoenus juvenis*, *Scaevola cylindrica*, *Joinvillea plicata*, *Alphitonia neocaledonica*...) ;
- **floraison et fructification** : certaines espèces ont la capacité de fleurir et de fructifier précocement et en abondance (notamment parmi les Cyperaceae, avec des floraisons possibles chez des plants âgés de 2 ans seulement). Elles devront être privilégiées sur les sites dénudés et les sites pentus, afin de permettre la colonisation du milieu par des plants issus de leur descendance ;
- **germination** : de manière générale, les espèces dont les semences germent facilement sont à privilégier, afin de permettre aux plants arrivant à un stade adulte de produire des graines qui pourront générer plus facilement de nouveaux plants (c'est le cas de nombreuses espèces, cf. chapitre 7) ;
- **génétique** : les graines sont à privilégier par rapport aux boutures, leur diversité génétique étant généralement supérieure (cf. section 4.2). En outre, des consignes en matière de collecte sont à respecter afin de prélever des génotypes adaptés à l'écosystème et suffisamment diversifiés pour une meilleure adaptation aux variations de l'environnement (cf. encadré à la sous-section 4.2.2.2) ;
- **appétence** : les sites revégétalisés peuvent être visités par des herbivores, notamment les cerfs (nombreux dégâts observés sur certains massifs : Kopéto, Méa, Ningua...). Des différences importantes d'appétence entre espèces natives ayant été mises en évidence (Dionisio 2008), il paraît préférable d'éviter la plantation d'espèces très à moyennement abruties (*Alphitonia neocaledonica*, *Machaerina deplanchei*, *Costularia comosa*, *Grevillea exul* ssp. *exul*...) dans les zones fréquentées par les cerfs, au profit d'espèces refusées ou moins appétentes (*Austrobuxus carunculatus*, *Carpolepis laurifolia*, *Schoenus juvenis*...) (cf. liste en annexe 7). Les graminées étant réputées pour leur appétence vis-à-vis des herbivores, il conviendra d'éviter de les implanter dans ces zones.

UTILISATION DU GAÏAC ET DU BOIS DE FER

Si le gaïac (*Acacia spirorbis* subsp. *spirorbis*, variété autochtone signalée aussi à Vanuatu) et le bois de fer (*Casuarina collina*, espèce endémique) ont été largement étudiés, préconisés et utilisés depuis la fin des années 1970 pour la revégétalisation de sites miniers, du fait de leur multiplication aisée et de leur croissance rapide dans diverses conditions de milieu, il n'est pas souhaitable d'envisager leur utilisation à grande échelle.

En effet, ce sont des taxa à comportement grégaire, qui se développent naturellement à basse altitude (en dessous de 400-550 m) sur des substrats variés. Ils montrent un comportement invasif dans les groupements végétaux dégradés, qu'ils tendent à transformer en peuplements stables à caractère monospécifique, peu favorables à l'implantation naturelle d'espèces variées sous leur couvert. La raison en serait apparemment, dans le cas de *Casuarina collina*, la production d'une litière épaisse mal décomposée (figure 6.7). De nombreuses observations font ressortir ce comportement en milieux secondarisés. Ainsi, sur environ trente ans, le maquis très riche en espèces qui était visible dès le début de la route de mine de La Tontouta s'est transformé, à la suite d'incendies, en maquis appauvri dominé par *Acacia spirorbis*. De même observe-t-on à 250 m d'altitude, sur le massif du Boulinda, une formation à gaïacs qui n'a absolument pas évolué, demeurant comme figée, sur une période de plus de trente ans (T. Jaffré, obs. pers. ; figure 6.8). Ainsi s'explique le fait que ces deux espèces aient été traitées comme espèces « indigènes invasives » dans l'expertise collégiale sur les plantes envahissantes de Nouvelle-Calédonie (Meyer *et al.* 2006). Des cas d'espèces indigènes devenant invasives dans des milieux perturbés ne sont pas rares et ont été décrits dans d'autres régions du monde (Valéry *et al.* 2009).



Figure 6.7 : Plantation de *Casuarina collina*, produisant une litière épaisse.

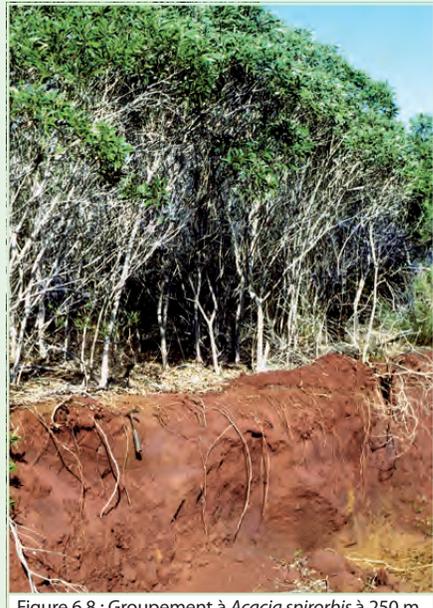


Figure 6.8 : Groupement à *Acacia spirorbis* à 250 m d'altitude environ sur le massif du Boulinda, n'ayant pas changé en plus de trente ans.

Il convient également de souligner qu'en raison de leurs caractéristiques morphologiques et de leur comportement largement ubiquiste et grégaire, ces espèces sont très proches des espèces australiennes (*Casuarina cunninghamiana* et *Acacia spirorbis* subsp. *solandri*) et que leur indigénat demeure de ce fait sujet à caution. *C. cunninghamiana* est signalé comme espèce invasive par le PIER (Pacific Island Ecosystems at Risk) et les *Acacia* australiens, extrêmement diversifiés, sont connus pour contenir de nombreuses espèces invasives (cas d'*Acacia auriculiformis*, d'*A. dealbata*, d'*A. mearnsii*... ; Kotiluoto *et al.* 2009, Kull *et al.* 2008).

Toutefois, il a été observé sur d'anciennes plantations que quelques espèces indigènes préforestières (*Myodocarpus* sp., *Alstonia balansae*...) pouvaient s'implanter localement au sein de plantations de gaïacs et de bois de fer (par exemple sur la mine De Rouvray, au mont Dore, revégétalisée depuis 1994). Un examen des sites concernés révèle qu'il s'agit de cas isolés, dans des conditions de milieu naturellement favorables à une évolution progressive de la végétation, en raison de meilleures conditions d'alimentation hydrique, géographiquement limitées (petite dépression, talweg...). De plus, l'apport d'une fumure ou d'un sol plus fertile, lors de la plantation des gaïacs et bois de fer, a vraisemblablement eu un effet positif sur le développement des espèces préforestières. Dans le plus grand nombre des sites examinés, seuls quelques plants, souvent chétifs, de *Machaerina deplanchei*, de *Costularia comosa* et de *Scaevola cylindrica* ont été observés.

Le gaïac et le bois de fer peuvent servir à masquer les paysages dégradés des secteurs miniers de basse altitude (effet de rideau de verdure) et s'opposer à l'érosion du sol sur pentes. Il faudrait néanmoins éviter leur extension, qui risquerait d'entraîner une homogénéisation des paysages, avec un fort risque d'échappement et d'invasion du maquis, qui se solderait par une perte de biodiversité. Ce phénomène étant déjà manifeste dans le cas du gaïac, qui à la suite d'incendies est devenu omniprésent et dominant à la base des massifs miniers. En raison du caractère monospécifique et stable de leurs populations, l'utilisation non maîtrisée du gaïac et du bois de fer nuira à la reconstitution de la biodiversité, l'un des trois buts recherchés dans la restauration écologique, et pourrait de plus, en cas d'échappement massif, nuire à la biodiversité des maquis existants.

Il semble prudent de ne les utiliser que de manière très limitée, sur de faibles surfaces, à des densités pas trop élevées, à basse altitude, et uniquement dans des milieux où ils sont déjà présents et où leur extension peut être contrôlée. À des altitudes supérieures à 600 m, des essais ont montré qu'ils pouvaient se développer correctement pendant plusieurs années, puis dépérir brutalement (figure 6.9).

Des propositions ont été faites consistant à planter du gaïac et à le couper après qu'il a joué son rôle de plante nourrice (apport de matière organique et d'azote).

Il reste, dans ce cas, le problème des graines stockées dans le sol, qui germeront sur plusieurs années. Des essais seraient nécessaires avant de valider cette technique.



Figure 6.9 : Plants de *Casuarina collina* ayant dépéri, après s'être bien développés (essai mis en place en 1992 sur le Ningua, à 730 m d'altitude ; mortalités constatées après environ dix ans).

© IAC / L. L'Huillier

4.2. La multiplication à partir de graines

Les plantes peuvent se régénérer et se multiplier selon deux voies possibles : sexuée (à partir de graines) et asexuée (ou végétative). Si la seconde a été largement développée pour la multiplication d'espèces comportant des graines difficiles à faire germer, la multiplication sexuée demeure la voie principale, à privilégier pour la restauration (cf., section 4.6, « Choix des techniques de revégétalisation »), pour plusieurs raisons :

- les graines constituent des entités génétiques uniques, résultant d'un mélange du matériel génétique des parents. Les variations génétiques générées au sein des descendance se traduisent par une diversification des capacités d'adaptation de l'espèce aux conditions écologiques ;
- généralement, les graines sont produites en grand nombre et, pour beaucoup d'espèces, sont disponibles chaque année (avec de nouvelles combinaisons génétiques) ;
- les graines de nombreuses espèces peuvent être stockées sur de longues périodes, sous conditions sèches et froides (c'est le cas de la majorité des graines des maquis miniers ; cf. la section 4.2.3 dans ce chapitre), et dans un faible volume ;
- sauf quelques rares cas, les virus ne sont pas transmis par les graines. La multiplication par semis est donc un moyen simple d'obtenir des plantes saines ;
- les graines contiennent les cellules embryonnaires et les réserves de nutriments nécessaires aux premiers stades de développement de la plante, et sont généralement plus résistantes aux stress environnementaux que les propagules végétatives.

La science de la biologie des graines se rapporte au développement et à la physiologie des graines jusqu'à ce qu'elles arrivent – ou n'arrivent pas – à germer. La connaissance de ces deux composantes est cruciale, tant pour une bonne gestion des ressources en graines que pour leur manipulation (collecte, stockage, prétraitement, germination...). Les paragraphes qui suivent font le point sur les connaissances nécessaires et essentielles sur la biologie des graines, l'accent étant mis sur les espèces indigènes des maquis miniers de Nouvelle-Calédonie chaque fois que cela est possible.

4.2.1. Structures des fruits et des graines

Les termes « fruit » et « graine » sont souvent employés indifféremment, pourtant ils ne doivent pas être confondus. En effet, ces deux structures ne dérivent pas des mêmes pièces florales.

Le fruit résulte du développement de l'ovaire après fécondation. Il renferme donc la ou les graines. Au terme des transformations, la paroi du fruit ou péricarpe – qui provient directement de la paroi de l'ovaire – comporte généralement trois parties, à savoir, de l'extérieur vers l'intérieur : l'épicarpe (ou exocarpe), le mésocarpe et l'endocarpe (figures 6.10 et 6.11). Le fruit peut être sec (péricarpe sec) ou charnu (péricarpe chargé d'eau à maturité). Les fruits secs peuvent être déhiscents (s'ouvrant à maturité, comme les gousses ou les capsules) ou indéhiscents (ne s'ouvrant pas à maturité, c'est le cas des akènes) (figure 6.10). Quant aux fruits charnus, toujours indéhiscents, ils sont divisés en deux groupes : les drupes, contenant un noyau (endocarpe lignifié) et un mésocarpe charnu entourant la ou les graines, et les baies, sans noyau (avec un endocarpe et un mésocarpe charnus) (figure 6.10). La principale fonction du fruit est de protéger les graines jusqu'à leur complet développement et, souvent, de contribuer à leur dispersion.



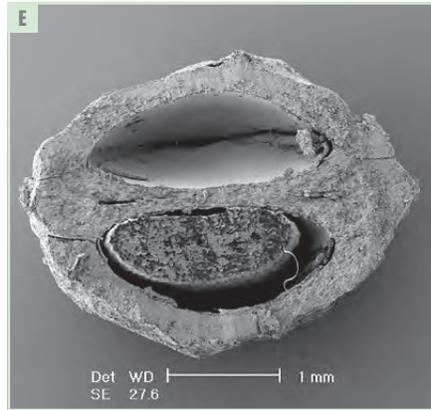
© IRD / J. Munzinger



© IAC / A. Wulff



© IAC / L. L'Huilier



© UNC / B. Fogliani



© IAC / L. L'Huilier



© IAC / L. L'Huilier

Figure 6.10 : Différents types de fruits : **A** : Fruits secs déhiscents en gousses de *Storckia pancheri* (Fabaceae). **B** : Fruits secs déhiscents en capsules de *Xanthostemon gugerlii* (Myrtaceae). **C** : Fruits secs indéhiscents, akènes de *Machaerina deplanchi* (Cyperaceae). **D** : Fruits charnus (drupes) de *Scaevola coccinea* (Goodeniaceae) : fruits avec pulpe et endocarpe (noyau). **E** : Coupe transversale de *Scaevola coccinea* : endocarpe (noyau) entourant deux loges dont l'une contient une graine (observation au microscope électronique à balayage). **F** : Fruits charnus (baies) de *Myrtastrum rufo-punctatum* (Myrtaceae).

La graine, *stricto sensu*, définit le stade ultime de développement de l'ovule après fécondation. Elle ne comporte pas d'annexes provenant d'autres structures florales, mais peut être munie d'une excroissance (arille, caroncule...) ou de structures de dissémination (ailes, soies...). Malgré leur diversité morphologique, les graines sont toutes fondamentalement constituées de la même façon. Elles comprennent un embryon, noyé (graine albuminée) – ou non (graine exalbuminée) – dans un tissu de réserve de nature variable, entouré d'un ou de deux téguments (figure 6.11).

L'embryon est la structure essentielle de la graine, car c'est lui qui donnera naissance à la nouvelle plante lors de la germination. Les réserves, qu'elles soient localisées dans les cotylédons de l'embryon (graine exalbuminée) ou dans des tissus spécialisés (endosperme haploïde chez les gymnospermes, périsperme diploïde et albumen triploïde chez les angiospermes), assurent la croissance hétérotrophe de la plantule issue de la germination. Les téguments protègent plus ou moins efficacement l'embryon et jouent un rôle physiologique très important en contrôlant sa germination. Les différentes organisations et structures sont présentées sur la page ci-après (figure 6.11).

4.2.2. Collecte, tri et conditionnement des graines

Les graines peuvent être achetées auprès de quelques collecteurs, pépiniéristes, ou encore à l'IAC (Cres de Port Laguerre). Toutefois, il est toujours préférable de collecter soi-même : en effet, l'offre à la vente est souvent limitée en termes de diversité et de quantité disponibles, en outre, c'est la meilleure façon d'obtenir des graines fraîches de qualité et de provenance précise. Cela permet également de progresser dans l'identification des espèces et le repérage des meilleurs sites et des meilleures périodes de collecte, ce qui est essentiel pour obtenir les semences appropriées.

4.2.2.1. Encadrement juridique

La collecte de matériel biologique dans le milieu est soumise à réglementation, édictée dans les Codes de l'environnement de la province Sud et de la province Nord. Le premier exige le dépôt d'une demande d'autorisation annuelle de collecte, tandis que le second définit les aires géographiques dans lesquelles les collectes sont autorisées (les textes sont détaillés en annexe 1).

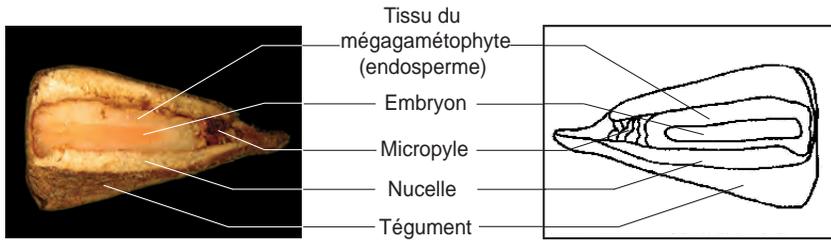
4.2.2.2. Période de collecte

Quelle que soit l'espèce, il est nécessaire de bien identifier la période susceptible de fournir la meilleure collecte. Il est possible de se référer aux fiches techniques (chapitre 7) et aux tableaux récapitulatifs (cf. annexe 8) pour plus de précisions sur la phénologie des espèces recommandées.

Il faut garder à l'esprit que, pour une espèce, les périodes de floraison et de fructification peuvent varier en fonction de l'altitude. De même, les conditions microclimatiques, ainsi que les variations climatiques interannuelles, souvent importantes en Nouvelle-Calédonie, induisent des variations dans les périodes de maturation des fruits et des graines (figure 6.12). Il est donc nécessaire de réaliser de nombreuses sorties sur le terrain pour identifier des individus qui produisent de bonnes quantités de graines et de faire le point sur les stades de maturité.

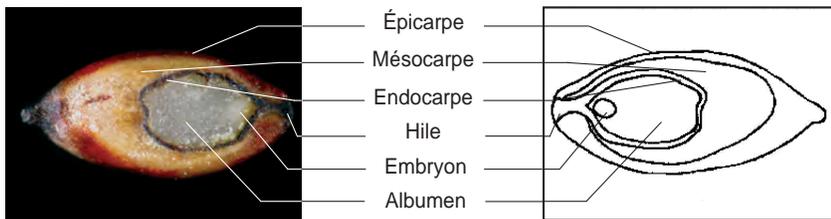
La prise de notes sur le terrain est indispensable car elle permettra de programmer les collectes ultérieures.

Structure d'une graine d'*Araucaria montana* (Araucariaceae)



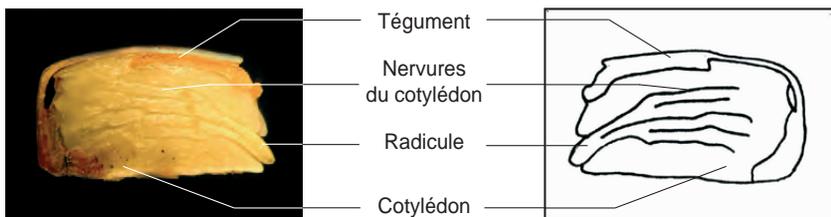
Cas d'une graine de gymnosperme où l'endosperme constitue le tissu de réserve (haploïde) de l'embryon. Ces structures sont enveloppées dans le nucelle (tissu de réserve diploïde), délimité extérieurement par le tégument. Il existe une ouverture apicale appelée micropyle.

Structure d'un akène de *Gahnia aspera* (Cyperaceae, monocotylédone)



Cas d'une graine dite albuminée, où l'albumen (triploïde) constitue un tissu de réserve qui sera tôt ou tard consommé par l'embryon. La graine, en réalité, n'est formée que du tégument (ici confondu avec l'endocarpe), de l'albumen et de l'embryon. Les autres structures constituent le fruit, appelé aussi dans ce cas akène.

Structure d'une graine de *Stenocarpus umbelliferus* (Proteaceae, dicotylédone)



Cas d'une graine dite exalbuminée, où l'embryon (diploïde) a consommé l'albumen (triploïde). L'embryon est formé de cotylédons, de l'épicotyle (qui va constituer la première tige de la plantule) et de la radicule (future racine). Sur la figure, l'épicotyle est caché par un cotylédon.

Figure 6.11 : Structures internes de différents types de graines (IAC, A. Wulff).

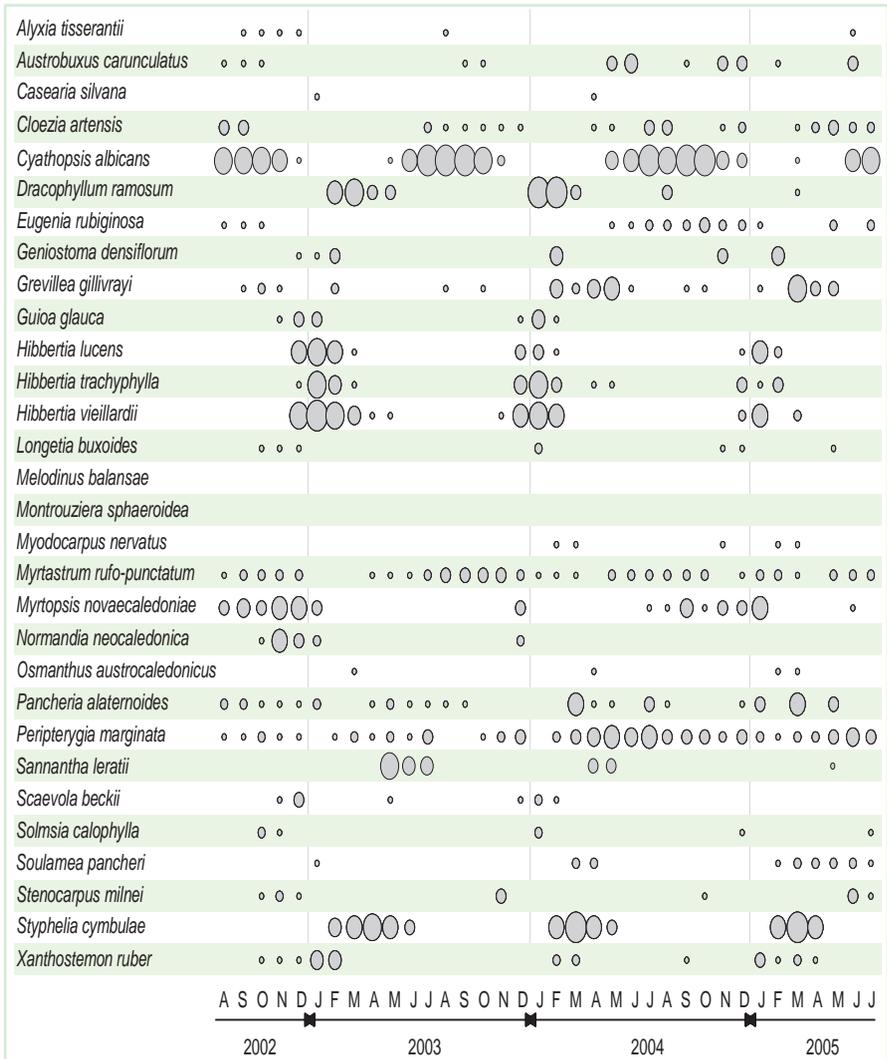


Figure 6.12 : Cycles phénologiques de fructification pour 30 espèces étudiées (maquis de la région du mont Dore). La taille du cercle augmente avec le pourcentage des individus en fructification dans le mois correspondant (Derroire *et al.* 2008).

Pour la majorité des espèces des maquis, les pics de floraison se manifestent en fin de saison sèche (octobre-novembre) et les pics de fructification apparaissent au début de la saison humide (décembre-février) (figure 6.12). Les auteurs ont mis en évidence une variation importante du synchronisme de fructification entre les espèces (valeur variant entre 0 et 1 : plus la valeur est proche de 1, plus l'espèce a des individus qui fructifient en même temps) : les synchronismes les plus élevés (jusqu'à 0,50) ont ainsi été observés pour *Babingtonia leratii* (renommé *Sannantha leratii*), *Dracophyllum ramosum*, *Guioa glauca*, *Hibbertia lucens*, *H. vieillardii*, *Myrtastrum rufo-punctatum*, *Myrtopsis novaecaledoniae*, *Styphelia albicans* (renommé *Cyathopsis albicans*), *S. cymbulae* (Derroire *et al.* 2008).

4.2.2.3. Techniques de collecte

Dans le maquis, la collecte reste relativement aisée car les fruits sont souvent à portée de main, nécessitant uniquement l'utilisation d'un sécheur. Pour les fruits en hauteur, il est conseillé de se munir d'un échelle. Le toit d'un véhicule peut aussi se révéler utile, devenant ainsi une plateforme de collecte. Pour les personnes qualifiées uniquement, il est possible de grimper aux arbres avec le matériel approprié (cordes, baudriers...).

Dans le cas de certaines espèces à fruits déhiscents (notamment de la famille des Myrtaceae), la collecte doit être faite délicatement, de manière à ne pas perdre les graines contenues dans les capsules lorsqu'elles sont ouvertes. Il est possible d'envelopper un rameau dans un sac et d'y faire tomber les graines par battage ou en secouant la branche (figure 6.13). Il est possible également de collecter ces fruits juste avant qu'ils ne s'ouvrent, il faut toutefois que les fentes de déhiscence soient bien marquées et qu'une coloration brune commence au moins à apparaître. La collecte peut se faire directement sous les arbres et, dans certains, cas il peut être utile d'étendre des bâches ou du tissu sous les arbres afin de récupérer les graines. Des collectes de graines à l'aide d'un aspirateur à graines (appareil spécial dédié à cet usage, utilisé par Vale Inco et parfois à l'IAC) peuvent donner de bons résultats pour certaines espèces (par exemple pour les espèces des genres *Costularia* et *Schoenus*).

Des pertes de semences et de plants peuvent être plus ou moins importantes au cours des différentes étapes (stockage, germination, repiquage, élevage des plants en pépinière), ce qui nécessite de prévoir au moment de la collecte un nombre de graines suffisant pour compenser ces pertes.

Les infrutescences doivent être coupées avec des outils tranchants pour minimiser les blessures sur l'arbre et éviter des dommages ultérieurs causés par des champignons ou des bactéries. Certaines espèces possédant du latex urticant (Apocynaceae, Moraceae, Euphorbiaceae, Anacardiaceae) doivent être manipulées avec précaution.

Les graines collectées doivent être rassemblées dans des sacs en papier, de type kraft, ou en tissu aéré. Il faut éviter les sacs en plastique car le séchage est irrégulier et entraîne un risque de condensation, qui peut favoriser un pourrissement des semences. Si le matériel végétal est humide au moment de la collecte, il est préférable de laisser le sac ouvert et de mettre le lot dans un endroit sec et ventilé le plus rapidement possible.



Figure 6.13 : Collecte de fruits secs déhiscents de *Xanthostemon gugerlii* (Poro).

© IAC / C. Vêta

LA PRODUCTION EN CHAMPS SEMENCIERS

Face à une demande croissante de graines pour restaurer les milieux dégradés, notamment pour l'ensemencement hydraulique qui nécessite des quantités très importantes de semences, le marché s'est organisé pour y répondre, à la fois par des efforts accentués de collecte dans le milieu et par la mise en place de champs semenciers, sites sur lesquels des espèces indigènes sont cultivées pour produire des graines.

Les arguments en faveur de la mise en place de champs semenciers sont multiples : augmenter la quantité et la qualité des graines récoltées, faciliter la collecte pour en diminuer le coût, fournir une source de revenus au producteur.

Après quelques tentatives qui se sont soldées par des échecs dans le passé, le premier champ semencier a été installé en 2006 au mont Dore, sur un terrain de la société Siras, en partenariat avec l'IAC. Le champ occupe près d'un hectare en maquis minier, dont plus de la moitié est planté (le reste est conservé en végétation naturelle pour limiter l'érosion au sein du champ) (figure 6.14). Après un an de culture en pépinière, ce sont environ 15 000 plants de cinq espèces de Cyperaceae qui ont été implantés (*Baumea deplanchei*, *Costularia comosa*, *C. pubescens*, *Schoenus juvenis*, *S. neocaledonicus*), sur un sol ferrallitique fertilisé (avec un engrais complet à libération lente) et irrigué (par goutte-à-goutte). Trois autres champs ont été installés en province Nord (un avec la société KNS, au pied du Koniambo, les autres chez deux pépiniéristes, à Pouembout et à Ouaco). Les surfaces vont de quelques ares à un hectare et sont plantées majoritairement de *Machaerina* (ex-*Baumea*) *deplanchei* et de quelques autres Cyperaceae.

Après environ trois ans d'observations, des résultats intéressants ont pu être constatés, en même temps que certaines difficultés sont apparues. La fructification débute dès la fin de l'année de plantation, soit lorsque les plants sont âgés d'environ deux ans (depuis leur germination). La première récolte significative peut néanmoins être faite la deuxième année (plants de trois ans), et celle-ci augmente nettement l'année suivante : sur le champ du mont Dore, le nombre moyen de graines par plant de *Machaerina deplanchei* atteint 590 la deuxième année et 1 800 la troisième année.

Pour *Costularia comosa*, les nombres atteignent respectivement 1 000 puis 5 000, et pour *Schoenus neocaledonicus*, ils atteignent 150 la deuxième année, puis restent stables. L'accès facilité du champ permet de récolter plus rapidement et en plusieurs passages sur un même plant pour sélectionner à chaque fois les graines les plus mûres, ce qui est plus difficile à réaliser en milieu naturel. La qualité s'en trouve ainsi améliorée. Par ailleurs, une expérimentation sur une partie du champ basée sur des apports croisés d'azote et de phosphore (0 - 100 et 500 kg/ha) a montré un effet synergique significatif de ces nutriments sur le développement de *Costularia comosa* (figure 6.15).



Figure 6.14 : Champ semencier de Siras Pacifique (mont Dore), après 18 mois de culture (décembre 2007).

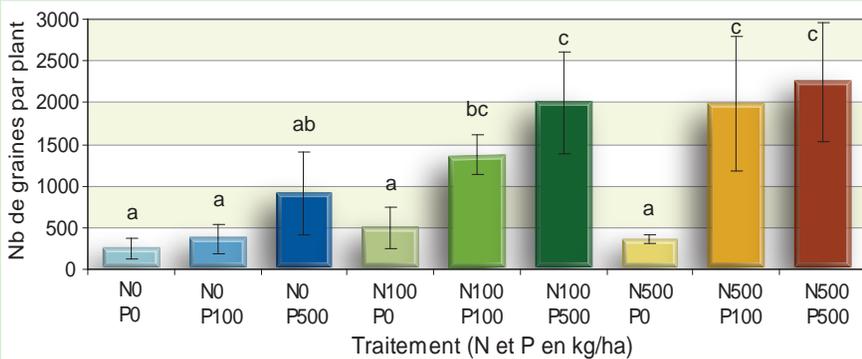


Figure 6.15 : Nombre de graines produites par plant de *Costularia comosa* selon le traitement (azote x phosphore). Moyenne de 5 répétitions, comportant chacune 18 plants. Des lettres différentes indiquent des différences significatives ($P < 0,05$) (Lagrange 2009).

En revanche, certaines difficultés ont été rencontrées, variables selon les champs semenciers : installation de graminées envahissantes nécessitant un désherbage en grande partie manuel (un champ sur site minier permettrait de limiter le problème), installation de cochenilles au niveau du collet des *Schoenus neocaledonicus*, visite par des cerfs nécessitant l'emploi de clôtures électriques.

À l'avenir, les champs qui se développeront pourront bénéficier de ces premières expériences, mais il faudra s'attacher à diversifier les espèces implantées et surtout à prendre en compte l'origine géographique des semences cultivées, ce qui n'est pas fait actuellement.

4.2.2.4. Respect des populations d'espèces récoltées

Si le nombre d'individus est suffisant, il est possible de collecter les graines sans causer de dommages aux populations. Si ces dernières semblent être parasitées, en mauvaise santé, il est préférable de ne pas collecter leurs graines. Les collecteurs doivent laisser les populations dans le même état que celui dans lequel ils les ont trouvées en arrivant, afin de minimiser l'impact de la collecte sur leur santé et de pouvoir revenir collecter les prochaines saisons. En général, il est conseillé de collecter uniquement 20 % des graines d'une population. C'est une règle qui évite d'impacter trop fortement la population et qui permet sa régénération naturelle (Sweedman & Merritt 2006).

4.2.2.5. Prise en compte de la diversité génétique

La collecte dans le milieu doit être réalisée de manière aléatoire et les lots provenant de différents milieux (humide, sec, sols différents...) doivent être traités séparément pour garder l'intégrité des caractéristiques populationnelles propres à chaque provenance. Il est préférable d'échantillonner un nombre important de plants, au sein de populations assez grandes (plusieurs centaines d'individus), et de ne pas collecter toutes les graines sur un seul plant. Cela permettra de conserver une bonne diversité génétique au sein de l'espèce ciblée, au travers des plants produits. Ceux-ci seront à même de mieux répondre aux changements environnementaux (parasitisme, agents pathogènes, climat...). La gestion de la diversité génétique des populations lors de la collecte nécessite la prise en compte de différents paramètres (cf. encadré suivant).

PRISE EN COMPTE DE LA DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE POUR LA RESTAURATION

(Points essentiels retenus, applicables en Nouvelle-Calédonie, d'après des extraits des recommandations de la Society for Ecological Restoration, Falk *et al.* 2001)

Importance de la diversité génétique

La reproduction entre individus proches d'un point de vue génétique peut conduire à terme à l'expression de caractères néfastes, qui peuvent compromettre la capacité d'une descendance à survivre ou à se reproduire (croissance réduite, sensibilité accrue aux maladies, fonctions physiologiques modifiées, stérilité...). Ainsi, la diversité génétique des plants utilisés lors de programmes de restauration de sites dégradés peut fortement influencer le taux de réussite des programmes engagés.

La corrélation entre la diversité génétique et l'amplitude écologique d'une espèce étant en général positive, une population d'espèces à faible diversité génétique n'a de chances de survivre que dans des conditions écologiques de faible amplitude. Ainsi, des populations génétiquement uniformes, capables d'un bon développement tant que les conditions du milieu demeurent stables et favorables à leur génotype, dépériront lorsque les conditions environnementales changeront, atteignant un seuil qu'elles ne pourront pas supporter.

Il est donc essentiel de prendre conscience de l'importance de la diversité génétique du matériel végétal utilisé pour la restauration de sites dégradés. Cela implique de connaître la provenance des semences, de savoir comment elles ont été produites, pour s'assurer *in fine* qu'elles possèdent une variété suffisante de génotypes.

Importance de l'origine géographique du matériel collecté

La question de savoir d'où doit provenir le matériel génétique (graines, fruits, boutures...) utilisé pour la restauration est régulièrement débattue. L'approche la plus commune consiste à déterminer une limite géographique autour de la zone à restaurer, au sein de laquelle les collectes peuvent être faites, en postulant que les populations voisines se développent dans des conditions écologiques relativement homogènes. Des ouvrages recommandent ainsi de collecter au sein de zones précises, par exemple, dans l'ouest des États-Unis, une amplitude en altitude de moins de 300 m et un éloignement latéral maximal de 150 km de la zone à replanter doivent être respectés, ou encore un éloignement de moins de 50 km dans le Sud-Ouest australien. Malheureusement, il n'y a pas de règle simple de distance qui puisse s'appliquer à toutes les espèces, car celles-ci ont chacune des caractéristiques qui leur sont propres, en matière de dispersion, de flux de gènes, de diversité génétique...

Ce qu'il convient de retenir : en l'absence de règle simple, le choix des populations sources devrait s'appuyer sur des critères raisonnés, et notamment :

1. Les espèces ont des taux et des distances de dispersion très variables, à l'origine de différences de diversité génétique entre les populations. Il est donc impératif, lors de la collecte de semences, de tenir compte des caractéristiques biologiques des espèces (modes de reproduction et de dissémination).
2. Le critère de distance géographique et de conditions pédo-climatiques homogènes, autour de la zone à restaurer, peut être une alternative raisonnable, bien qu'approximative, au modèle de diversité entre populations (point 1). Il faut savoir toutefois que, dans une aire fragmentée, de petites populations isolées peuvent être génétiquement peu diversifiées et ne pas comporter les génotypes adaptés aux conditions du site à restaurer.



3. Les collectes dans de grandes populations, génétiquement diversifiées, sont généralement préférables aux collectes dans de petites populations, même si ces dernières sont plus proches du site à restaurer. Il peut être préférable de mélanger le matériel collecté dans différents sites appropriés, de façon à capter une gamme plus large de génotypes, qui auront d'autant plus de chances de s'installer avec succès dans leur nouvelle zone d'implantation. Les mélanges utilisés devront néanmoins provenir de milieux aux conditions écologiques proches de celles du site à restaurer.
4. De petites populations d'espèces présentes sur le site à restaurer peuvent être « noyées » par des génotypes introduits. Si ces petites populations locales doivent être maintenues et renforcées, le nombre d'individus introduits dans le site à partir d'autres localités doit être limité de façon à ne pas submerger le pool génétique initial existant, notamment s'il possède des adaptations locales qui risqueraient d'être perdues chez les descendances.

Comment collecter la diversité des populations sources ?

De nombreux ouvrages traitent de ces questions et émettent des recommandations qui portent sur plusieurs questions fondamentales :

- 1) Combien de populations faut-il échantillonner ?
- 2) Combien d'individus faut-il collecter dans chaque population ?
- 3) Faut-il collecter en une seule fois, ou sur plusieurs années ?

Nombre de populations : d'une manière générale, la diversité cumulée du pool génétique d'une espèce prélevée augmente avec le nombre de populations échantillonnées, jusqu'à atteindre une limite à partir de laquelle toute nouvelle population prélevée apporte très peu de nouveaux gènes ou de nouveaux allèles. Cette limite est fortement dépendante du niveau de diversité au sein même des populations : si cette diversité est forte, il sera nécessaire de collecter des semences dans de nombreuses populations afin de recueillir le maximum de diversité (tout en respectant le principe de similarité de leurs conditions écologiques avec le site à restaurer) ; inversement, si cette diversité est faible, des collectes dans seulement quelques populations suffiront. Cela nécessite donc des études préalables de la structuration génétique des espèces au sein des différentes populations et entre celles-ci.

Nombre d'individus à échantillonner au sein des populations : une population n'étant pas génétiquement homogène, il est nécessaire de collecter sur plusieurs individus afin de recueillir au mieux la diversité génétique populationnelle. Plusieurs ouvrages recommandent de collecter au moins 10 à 50 individus au sein d'une population, mais il n'y a pas, là encore, de règle simple et générale.

Nombre d'années d'échantillonnage : pour la plupart des espèces, il est nécessaire de collecter des semences pendant plusieurs années ou plusieurs cycles de reproduction, pour diverses raisons : les plantes produisent des semences qui peuvent être génétiquement différentes d'une année sur l'autre ; le succès reproducteur d'une espèce peut être très variable selon les années ; les petites populations ou les espèces à faible succès reproducteur génèrent des semences relativement peu diversifiées au cours d'un cycle.

4.2.2.6. Identification

Il est indispensable de pouvoir identifier avec certitude l'espèce collectée ou qu'il est prévu de collecter. Les fiches descriptives du chapitre 7, décrivant les familles, les genres et les espèces utiles pour la revégétalisation, ont été réalisées à cet effet et doivent permettre d'orienter la détermination. En cas de doute sur le nom de l'espèce, il est préférable de collecter un échantillon (feuilles, fleurs et/ou fruits en même temps si possible) et de le faire identifier par un spécialiste, ou de le déterminer à l'aide de *Flore de la Nouvelle-Calédonie* ou de l'herbier de l'IRD. Le site internet Endemia (www.endemia.nc) peut aussi fournir de précieuses indications. Il est possible (et conseillé) de constituer un herbier de référence avec des échantillons authentifiés pour confirmer plus rapidement les collectes ultérieures.

4.2.2.7. Contrôle de la collecte

Il est nécessaire de vérifier l'état des graines que l'on souhaite collecter. Elles doivent être bien formées et à maturité. Une coupe transversale de la graine permettra de voir si l'embryon et/ou l'albumen ne présentent pas d'anomalies. Un fruit mûr est plutôt de couleur sombre, du rouge au marron. Si le fruit se détache facilement de l'arbre, cela signifie qu'il a atteint sa maturité. Il faut savoir que des graines cueillies trop jeunes peuvent avoir des difficultés à germer et seront difficiles à conserver au froid car elles n'auront pas développé de tolérance à la dessiccation (pour les graines orthodoxes). Si des fruits présentent des traces de prédation par des phytophages, il sera nécessaire de contrôler la qualité du lot et d'éviter de contaminer le reste des graines avec des parasites (figure 6.16).



Figure 6.16 : Graine de *Tristaniopsis calobuxus* parasitée par une larve d'insecte.



Figure 6.17 : Séchage à l'air libre de fruits sur des tamis.

4.2.2.8. Séchage, tri et nettoyage des graines

Dans le cas de fruits secs déhiscents récoltés un peu trop tôt, une phase de séchage à l'air libre (sec de préférence) est recommandée (figure 6.17). Il suffira ensuite de tapoter les fruits pour en extraire les graines. Pour les drupes ou les baies, il est préférable de retirer la pulpe directement après la collecte. Sinon, il est possible de les tremper ultérieurement

dans de l'eau pendant une période suffisante pour les ré-imbiber. Pour les akènes (Cyperaceae), il est préconisé de retirer les fruits par un battage des épis ou par frottement entre les mains. Les graines sont ensuite triées par un passage au travers de tamis de mailles différentes. Un passage par un « vacuum cleaner » est recommandé pour pratiquement toutes graines afin de se débarrasser des dernières matières inertes. Une méthodologie précise est donnée dans les fiches de chaque espèce en chapitre 7.

4.2.2.9. Conditionnement des lots de graines

Après le tri et le nettoyage des graines, il sera nécessaire de les conditionner dans des récipients hermétiques, afin d'éviter des variations d'humidité trop grandes, souvent mal supportées (Rao *et al.* 2006). Pour les graines orthodoxes (cf. section 4.2.3), il convient de les sécher préalablement, faute de quoi elles perdront rapidement leur viabilité. Le conditionnement doit être fait immédiatement après nettoyage et séchage. Il permettra aussi de séparer les différents lots et de protéger les graines contre les organismes pathogènes et phytophages. Les récipients de stockage peuvent être de natures diverses, le plus important étant qu'ils soient imperméables et faciles d'utilisation. Chaque contenant doit être étiqueté pour que l'on puisse avoir une traçabilité du lot de graines stocké (numéro d'enregistrement, renvoyant à l'espèce, au poids, à l'année de collecte, au lieu de collecte, etc.). Ces récipients sont ensuite placés dans un environnement de conservation (chambre froide, cf. partie conservation en 4.2.3).

4.2.2.10. Compilation des données

Toutes les données produites au cours d'une collecte doivent être conservées et si possible informatisées en tant que base de données. Les éléments les plus importants à relever au cours des collectes sont :

- nom de l'espèce récoltée ;
- date de la collecte ;
- lieu de la collecte (positionnement GPS) ;
- caractéristiques phénologiques de la population (% d'individus en fleur, % en fruit) ;
- nombre de plants échantillonnés ;
- durée de la collecte et quantité récoltée ;
- nom du collecteur ;
- attribution d'un numéro d'enregistrement au lot collecté.

Ces données permettront d'identifier les meilleures périodes de collecte pour chaque espèce par localité (sachant que la période peut varier en fonction des conditions climatiques) et de programmer des collectes groupées. Il sera aussi possible de mieux calculer les coûts de la récolte et de les intégrer dans le prix de vente des graines ou des plants produits.

4.2.3. La conservation des graines

L'apparition des graines au cours du règne végétal chez les gymnospermes (plantes à graines nues) puis chez les angiospermes (plantes à graines protégées dans un fruit) est une des évolutions les plus importantes, ayant permis en particulier aux angiospermes de coloniser la quasi-totalité des milieux existants. La semence est de ce fait un organe à part entière qui a acquis des adaptations spécifiques au milieu dans lequel elle se développe. L'une de ses caractéristiques essentielles réside dans sa capacité de conservation pendant de longues périodes. Il a ainsi été possible de faire germer après 1 300 ans certaines graines de lotus de Chine. De nombreux facteurs affectent la longévité naturelle des graines, les plus importants étant l'eau et la température.

4.2.3.1. Types de graines

La teneur en eau des graines, en particulier, définit différents types de semences : orthodoxes, intermédiaires ou récalcitrantes (Côme & Corbineau 2000).

- Les premières subissent une phase de déshydratation au cours de leur formation et peuvent tolérer une déshydratation importante, jusqu'à 5 % d'humidité, sans perte de viabilité. Plus encore, leur déshydratation permet d'accroître leur longévité. Elles représentent une très grande partie des semences existantes : une estimation de 88,7 % a été faite pour près de 12 000 espèces répertoriées à travers le monde (Yoshinaga & Walters 2004).
- Les semences intermédiaires sont en fait des semences de type orthodoxe mais dont la déshydratation en dessous de 8 % d'humidité est néfaste, avec une perte de viabilité constatée. Il s'agit souvent de graines tropicales albuminées huileuses contenues dans des fruits charnus de certaines plantes (caféier, papayer, palmier à huile...).
- Enfin, s'agissant des graines récalcitrantes, certaines espèces, en particulier de forêts tropicales à subtropicales, possèdent des semences riches en eau à maturité (35 à 70 %, par exemple, pour les graines d'*Araucaria* au moment de leur collecte) et qu'une forte dessiccation conduit très rapidement à la mort.

Le caractère orthodoxe ou récalcitrant est déterminé par le procédé préconisé par Mackay *et al.* (2002), méthode adaptée de celle mise en place par l'ISTA (International Seed Testing Association) 1999. Cela consiste à déterminer la teneur en eau des semences. Celle-ci est mesurée en pesant un échantillon de semences fraîchement récolté et d'aspect fertile, ce qui donne la masse de matière fraîche (MF), puis en pesant cet échantillon après séchage (en général à 103 °C pendant 17 heures, selon l'ISTA), ce qui donne la masse de matière sèche (MS). La teneur en eau (TE) se calcule alors simplement :

$$TE (\%) = (MF - MS) \times 100 / MF$$

Les travaux menés par l'équipe du LIVE (UNC) (Fogliani 2008) et par l'IAC (Wulff *et al.* 2008) ont permis de montrer que la quasi-totalité des graines d'espèces pionnières de maquis miniers étaient de type orthodoxe (tableau 6.1). Plus encore, plusieurs de ces semences présentent un profil lipidique particulier, avec pour certaines des quantités de lipides importantes (tableau 6.2), et sont caractérisées par la présence au sein des réserves séminales de nombreux corps lipidiques observables en microscopie électronique à transmission (figure 6.18). Ces derniers joueraient un rôle important dans leur mode de conservation. Ainsi, il est à noter que l'analyse des acides gras constitutifs a montré une forte proportion des acides gras insaturés (acides gras possédant des doubles liaisons, comme les acides oléique, linoléique, linoléique...), ce qui rendrait ces graines sensibles à l'oxydation et aurait un effet direct sur les phénomènes de vieillissement qu'elles subissent à l'état naturel. Par ailleurs, des espèces comme *Alphitonia neocaledonica* (Rhamnaceae) ou *Grevillea exul* var. *rubiginosa* (Proteaceae) présentent des compositions en acides gras particulières qui en font des sources potentielles d'oméga 5 (Zongo *et al.* 2008^b).

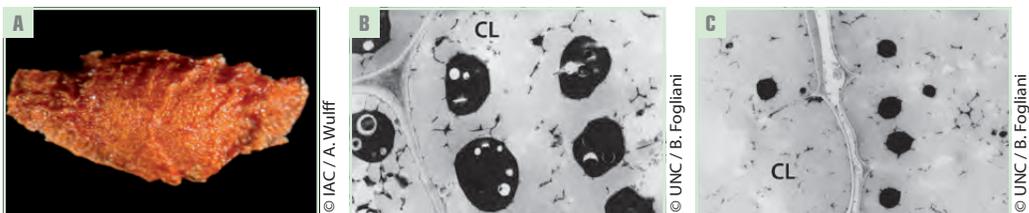


Figure 6.18 : Graines de *Cunonia macrophylla* (Cunoniaceae) : observation, à la loupe binoculaire, d'une graine entière (A) et, en microscopie électronique, de cellules de l'albumen (B) et de l'embryon (C). CL : corps lipidiques.

Tableau 6.1 : Classes de dormance et comportement des graines d'espèces de terrains miniers. (L'Huillier *et al.*, Fogliani *et al.*, obs. pers., Wulff *et al.* 2008)

Famille	Genre / Espèce	Dormance ¹	Comportement des graines ²	Milieu ³
Apocynaceae	<i>Alstonia balansae</i>	ND	Op	FLM
Apocynaceae	<i>Artia balansae</i>	ND	Op	M
Apocynaceae	<i>Rauvolfia sevenetii</i>	-	Op ou I	M
Araliaceae	<i>Polyscias pancheri</i>	PD?	-	M
Araucariaceae	<i>Agathis lanceolata</i>	ND	R	F
Araucariaceae	<i>Agathis ovata</i>	ND	R	FM
Araucariaceae	<i>Araucaria montana</i>	ND	R/I	FM
Araucariaceae	<i>Araucaria rulei</i>	ND	R/I	FM
Asparagaceae	<i>Lomandra insularis</i>	PY/MPD?	Op	M
Casuarinaceae	<i>Gymnostoma chamaecyparis</i>	ND	O/I	M
Casuarinaceae	<i>Gymnostoma deplancheanum</i>	ND	O/I	M
Casuarinaceae	<i>Gymnostoma poissonianum</i>	ND	O/I	FM
Celastraceae	<i>Peripterygia marginata</i>	ND	Op	M
Cunoniaceae	<i>Cunonia macrophylla</i>	ND	O	M
Cunoniaceae	<i>Geissois hirsuta</i>	ND	Op ou I	FN
Cunoniaceae	<i>Geissois pruinosa</i>	ND	O	M
Cunoniaceae	<i>Pancheria alaternoides</i>	ND	O	M
Cunoniaceae	<i>Pancheria billardierei</i>	ND	O	M
Cunoniaceae	<i>Cunonia deplanchei</i>	ND lumière	Op ou I	FMR
Cyperaceae	<i>Costularia arundinacea</i>	ND	O	MN
Cyperaceae	<i>Costularia comosa</i>	ND	O	MR
Cyperaceae	<i>Costularia nervosa</i>	MD?	O	M
Cyperaceae	<i>Costularia pubescens</i>	ND	O	M
Cyperaceae	<i>Gahnia aspera</i>	PY	O	LM
Cyperaceae	<i>Lepidosperma perteres</i>	-	Op	MR
Cyperaceae	<i>Machaerina deplanchei</i>	PY (+ MPD?)	O	MN
Cyperaceae	<i>Schoenus juvenis</i>	ND	O	M
Cyperaceae	<i>Schoenus neocaledonicus</i>	ND	O	M
Dilleniaceae	<i>Hibbertia lucens</i>	MD/MPD?	Op	FMN
Dilleniaceae	<i>Hibbertia pancheri</i>	MD/MPD?	Op	FMN
Dilleniaceae	<i>Hibbertia trachyphylla</i>	MD/MPD?	-	MN
Ebenaceae	<i>Diospyros umbrosa</i>	ND	R	FM
Elaeocarpaceae	<i>Dubouzetia</i> sp.	-	-	M
Ericaceae	<i>Cyathopsis albicans</i>	PD/MPD?	Op	M
Euphorbiaceae	<i>Baloghia</i> sp.	-	-	-
Fabaceae	<i>Serianthes sachetae</i>	PY	Op	FM
Goodeniaceae	<i>Scaevola cylindrica</i>	PD?	Op	MN
Goodeniaceae	<i>Scaevola montana</i>	PD?	Op	LM
Joinvilleaceae	<i>Joinvillea plicata</i>	MPD?	Op	MN
Malpighiaceae	<i>Acridocarpus austrocaledonica</i>	ND	Op	M
Malvaceae	<i>Maxwellia lepidota</i>	PY/MPD?	Op	FLM
Myodocarpaceae	<i>Myodocarpus fraxinifolius</i>	ND	Op / I	FM
Myodocarpaceae	<i>Myodocarpus nervatus</i>	ND	Op/I	FM
Myrtaceae	<i>Arillastrum gummiferum</i>	ND	O	FM
Myrtaceae	<i>Carpolepis laurifolia</i>	ND	O	FM

suite tableau page suivante...

... suite tableau 6. 1

Famille	Genre / Espèce	Dormance ¹	Comportement des graines ²	Milieu ³
Myrtaceae	<i>Cloezia artensis</i>	ND	O	LM
Myrtaceae	<i>Cloezia floribunda</i>	ND	Op	MR
Myrtaceae	<i>Melaleuca pancheri</i>	ND	O	FM
Myrtaceae	<i>Myrtastrum rufo-punctatum</i>	ND	Op	M
Myrtaceae	<i>Sannantha leratii</i>	ND	O	MRS
Myrtaceae	<i>Tristaniopsis calobuxus</i>	ND	O	M
Myrtaceae	<i>Tristaniopsis glauca</i>	ND	O	M
Myrtaceae	<i>Tristaniopsis guillainii</i>	ND	Op	M
Myrtaceae	<i>Uromyrtus emarginata</i>	-	O?	M
Myrtaceae	<i>Xanthomyrtus hienghenensis</i>	ND	O?	FM
Myrtaceae	<i>Xanthostemon aurantiacus</i>	ND	O	MR
Myrtaceae	<i>Xanthostemon francii</i>	ND	O	M
Myrtaceae	<i>Xanthostemon gugerlii</i>	ND	O	M
Myrtaceae	<i>Xanthostemon longipes</i>	ND	O	M
Myrtaceae	<i>Xanthostemon multiflorus</i>	ND	Op	FM
Myrtaceae	<i>Xanthostemon ruber</i>	ND	Op	FM
Oleaceae	<i>Osmanthus austrocaledonicus</i>	PY	R?	MR
Picrodendraceae	<i>Austrobuxus carunculatus</i>	ND	Op/l	FM
Picrodendraceae	<i>Longetia buxoides</i>	ND	Op/l	M
Pittosporaceae	<i>Pittosporum gracile</i>	MPD?	R?	FM
Pittosporaceae	<i>Pittosporum pronyense</i>	MPD?	Op ou l	FM
Primulaceae	<i>Tapeinosperma</i> sp.	-	Op ou l	-
Proteaceae	<i>Beauprea</i> sp.	ND?	-	-
Proteaceae	<i>Eucarpha deplanchei</i>	ND	?	M
Proteaceae	<i>Grevillea exul</i> ssp. <i>exul</i>	ND	O	M
Proteaceae	<i>Grevillea exul</i> ssp. <i>rubiginosa</i>	ND	O	M
Proteaceae	<i>Grevillea gillivrayi</i>	ND	O	MR
Proteaceae	<i>Stenocarpus milnei</i>	ND	O	M
Proteaceae	<i>Stenocarpus umbelliferus</i>	ND	O	M
Rhamnaceae	<i>Alphitonia neocaledonica</i>	PY	O	FLMN
Rhizophoraceae	<i>Crossostylis grandiflora</i>	-	O	F
Rubiaceae	<i>Atractocarpus heterophyllus</i>	ND	R? ou l	F
Rubiaceae	<i>Gardenia urvillei</i>	ND	Op	LM
Rubiaceae	<i>Psychotria baillonii</i>	PY	O	F
Rubiaceae	<i>Psychotria douarrei</i>	PY	O	F
Rutaceae	<i>Comptonella drupacea</i>	PY+MPD?	-	FM
Rutaceae	<i>Geijera cauliflora</i>	PY	Op ou l	LM
Rutaceae	<i>Melicope lasioneura</i>	PY	?	F
Sapindaceae	<i>Dodonaea viscosa</i>	PY	O	LMN
Sapindaceae	<i>Guioa glauca</i> var. <i>vulgaris</i>	-	l?	FM
Smilacaceae	<i>Smilax</i> sp.	MPD?	Op	-
Thymelaeaceae	<i>Solmsia calophylla</i>	-	-	M
Thymelaeaceae	<i>Wikstroemia indica</i>	ND	-	FLMN
Winteraceae	<i>Zygogynum pancheri</i>	-	Op ou l	F

1. Dormance (selon Baskin & Baskin, 1998) : MD : morphologique ; MPD : morphophysique ; ND : non dormante ; PD : physiologique ; PY : physique ; ? : supposée.

2. Comportement (selon Kew, SID) : O : orthodoxe ; Op : orthodoxe probable ; l : intermédiaire ; l? : probablement intermédiaire, orthodoxe possible ; R : récalcitrante ; R? : récalcitrante possible.

3. Milieu (Jaffré et al. 2001) : F : forêt dense humide ; L : forêt sclérophylle ; M : maquis ; R : végétation des zones humides ; S : savane ; N : fourrés secondaires et végétation rudérale.

Tableau 6.2 : Pourcentage d'humidité après collecte, proportion de lipides neutres et composition en acides gras des graines de sept espèces de maquis minier candidates à la revégétalisation. (D'après Zongo *et al.* 2007)

	Md	Sc	Gc	Tg	Cl	Cm	Ac
Taux d'humidité	7,70	13,47	8,54	8,77	16,84	9,16	5,32
% de lipides neutres	16,65	11,48	14,76	39,02	5,27	37,65	46,34
Nom et % des acides gras constitutifs (nombre de carbone)							
A. palmitique (C16 :0)	6,96	8,33	6,34	6,25	8,70	11,77	15,48
A. palmitoléique (C16 :1Δ9)	0,48	-	0,12	-	-	0,27	3,44
A. stéarique (C18 :0)	2,69	3,75	5,73	7,62	3,24	3,40	3,28
A. oléique (C18 :1Δ9)	59,61	26,58	10,40	20,29	9,99	15,04	46,88
A. vaccénique (C18 :1Δ11)	1,64	0,90	0,71	-	-	2,06	-
A. linoléique (C18 :2Δ9,12)	11,86	57,70	74,69	59,52	70,46	65,23	19,80
A. α-linolénique (C18 :3Δ9,12,15)	-	1,82	0,69	0,18	1,26	0,44	0,25
A. arachidique (C20 :0)	0,48	0,21	0,53	0,58	1,21	0,25	0,27
A. éicosénoïque (C20 :1Δ11)	0,99	-	-	2,90	0,21	0,06	0,11
A. béhénique (C22 :0)	0,18	0,14	0,29	-	1,20	0,14	0,09
A. lignocérique (C24 :0)	0,07	0,10	-	-	-	-	0,16
% des acides gras insaturés	74,58	87,00	86,61	82,89	84,61	83,10	70,48

Md : *Machaerina deplanchei* (Cyperaceae) ; **Sc** : *Scaevola cylindrica* (Goodeniaceae) ; **Gc** : *Gymnostoma chamaecyparis* (Casuarinaceae) ; **Tg** : *Tristaniopsis guillainii* (Myrtaceae) ; **Cl** : *Carpolepis laurifolia* (Myrtaceae) ; **Cm** : *Cunonia macrophylla* (Cunoniaceae) ; **Ac** : *Austrobuxus carunculatus* (Picrodendraceae).

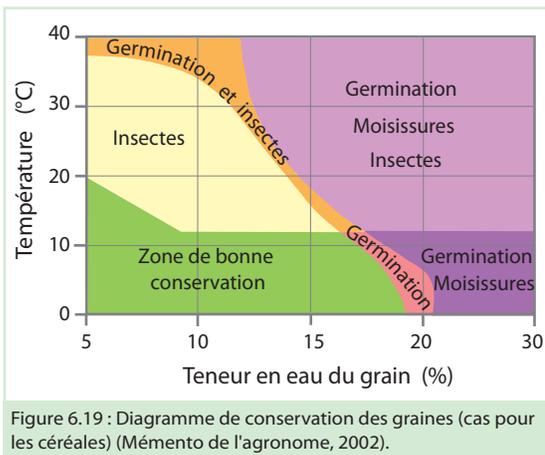
4.2.3.2. Stockage

Ces caractéristiques naturelles régissent par définition la façon dont les semences doivent être traitées depuis la collecte jusqu'à leurs conditions de stockage pour une conservation à plus ou moins long terme. Ainsi, une fois le type orthodoxe ou récalcitrant de la graine déterminé, l'étape de séchage apparaît essentielle ainsi que le choix de la température et de l'humidité de conservation.

- Les graines orthodoxes, de par leur capacité à supporter une forte déshydratation, apparaissent comme les plus aisées à conserver, y compris à des températures allant jusqu'à -20 °C en conteneur hermétique. Pour certaines, un stockage dans l'azote liquide peut même être envisagé (Côme & Corbineau 2000). Il est généralement admis qu'un abaissement de 5 °C de la température de conservation ou que la diminution de 1 % du taux d'humidité des graines doublerait leur temps de stockage (Sweedman & Merritt 2006). La pratique aujourd'hui conseillée pour des conservations à très long terme (plusieurs décennies à plusieurs siècles) de graines de type orthodoxe est une température de -18 °C avec des graines stabilisées à 3-7 % d'humidité, méthode utilisée par le projet du Millenium Seed Bank en Angleterre. Cependant, pour une conservation à moyen terme (plusieurs mois à plusieurs années), il est possible d'utiliser un froid à 4 °C, après séchage et conditionnement hermétique. Idéalement, une étude approfondie comme celle engagée sur *Gahnia aspera* (Cyperaceae) par l'UNC devrait être réalisée pour déterminer les conditions optimales de conservation de chacune des semences d'intérêt (cf. encadré ci-après) ;

- Les graines dites intermédiaires se conservent idéalement à des taux d'humidité avoisinant les 10-15 %. Il existe cependant une grande variabilité entre espèces de ce type quant à la température idéale de conservation. Il semblerait que les graines de milieu tempérés puissent être stockées à des températures proches de 0 °C alors que celles de milieu tropicaux se conserveraient mieux entre 10 et 15 °C. Des essais préliminaires de conservation à différentes températures et humidités s'avèrent donc nécessaires pour chaque espèce étudiée ;
- Les graines récalcitrantes (par exemple celles des Araucariaceae) ne peuvent être conservées que dans des conditions d'humidité relativement importantes, sans, cependant, que cela permette la germination (environ 20 à 30 %). Malgré tout, le temps de conservation n'excède, dans le meilleur des cas, que très rarement les trois mois. Il est donc conseillé de les mettre en germination quasiment dès la collecte ou dans les jours qui suivent.

Un des problèmes rencontrés au cours de la conservation des semences réside dans les attaques microbiennes ou d'insectes. En général, l'activité microbienne est inhibée à des températures et à des taux d'humidité ambiants faibles (figure 6.19). Il est cependant conseillé de prétraiter les graines avec un fongicide avant le stockage pour éviter un développement microbien qui pourrait s'avérer néfaste au moment de la mise en germination. De la même façon, en cas d'infestations constatées par des insectes ou larves d'insectes, il est conseillé d'utiliser des produits chimiques appropriés, bien que certaines larves soient naturellement tuées par l'abaissement de température.



Malgré tout, force est de constater que de nombreux facteurs interviennent dans la conservation des semences et qu'un vieillissement des graines est constaté au cours du temps, jusqu'à une perte de viabilité à plus ou moins long terme. Il est cependant intéressant de noter qu'un traitement de prégermination, ou « priming », peut revigorer des semences âgées (cf, section 4.2.4.3). Il consiste à imbiber les graines pendant une période définie correspondant au temps qui précède la percée de la radicule. Les graines sont ensuite séchées puis mises à germer ou de nouveau mises en conservation. Ce prétraitement permet, outre une revigoration,

une germination quasi synchrone des graines avec un temps de latence plus faible (Ozbingol *et al.* 1998). Un suivi régulier de la capacité germinative des graines par mesure du taux de viabilité ou par des expériences de germination s'avère essentiel au cours du temps (section suivante).

Enfin, au moment d'utiliser les graines après une période de conservation, en particulier à des taux d'humidité faibles, il est essentiel d'éviter des dommages irréversibles qui peuvent intervenir du fait d'un influx d'eau rapide et important. Pour cela, il est conseillé dans un premier temps de placer les graines dans un environnement humide mais pas au contact direct de l'eau, afin de permettre une stabilisation régulière du taux d'humidité interne. Dès lors, les graines pourront être mises à germer.



Étude de la conservation de *Gahnia aspera*

Cette espèce native de la famille des Cyperaceae, se développant en Nouvelle-Calédonie, est considérée comme étant une bonne candidate en revégétalisation par la société minière KNS (Koniambo Nickel SAS) (figure 6.20). L'étude de sa



© IAC / G. Gateblé

Figure 6.20 : Inflorescence de *Gahnia aspera*.

conservation fait partie intégrante du processus qui consisterait à l'utiliser prioritairement au cours des opérations d'ensemencement hydraulique. Ainsi, l'investigation a été menée sur des graines conservées à différentes températures (ambiante, 15 °C, 5 °C) et à différents taux d'humidité ambiants (5 %, 11-12 %). Les résultats présentés sur la figure 6.21, après quatre mois de stockage, montrent clairement l'effet positif sur le taux de germination maximal (33 %) d'une conservation à basse température et à une humidité de 5 %, confirmant le caractère orthodoxe de cette semence dont le taux d'humidité a été déterminé à 7,29 % (Zongo *et al.* 2009). Les analyses effectuées après six et neuf mois de conservation confirment cette tendance.

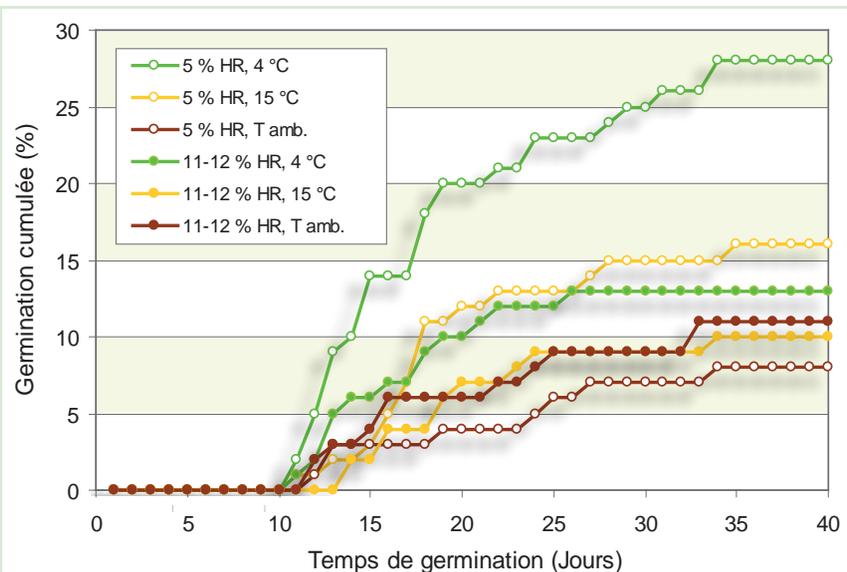


Figure 6.21 : Courbes de germination de *Gahnia aspera* : graines stockées selon différentes conditions (cf. légende).

4.2.4. Germination

4.2.4.1. Processus de germination

La germination est la phase de développement végétal qui permet de passer du stade de graine quiescente au stade de jeune plant. La germination *stricto sensu* est terminée lorsque la longueur de la radicule émergente est de 1 mm.

L'ensemble du processus de germination se déroule en trois phases successives (figure 6.22) :

- imbibition (phase 1) : la germination débute par une intense absorption d'eau conduisant à une forte hydratation des tissus lors de la phase 1. Les activités métaboliques reprennent et la respiration est très active ;
- germination *stricto sensu* (phase 2) : cette deuxième phase est caractérisée par une stabilisation de l'hydratation et de la respiration à un niveau élevé. Pendant cette phase, la graine peut être réversiblement déshydratée et réhydratée sans dommage apparent pour sa viabilité. Cette phase s'achève avec l'émergence de la radicule hors des téguments séminaux ;
- croissance (phase 3) : phase caractérisée par la reprise de l'absorption de l'eau et par l'augmentation de la consommation d'oxygène, équivalant à un processus de croissance affectant la radicule puis l'épicotyle (tigelle).

Pour germer, une graine doit donc se trouver dans un environnement favorable caractérisé par un taux d'humidité élevé, une plage de température particulière, la présence d'oxygène et la présence ou l'absence de lumière.

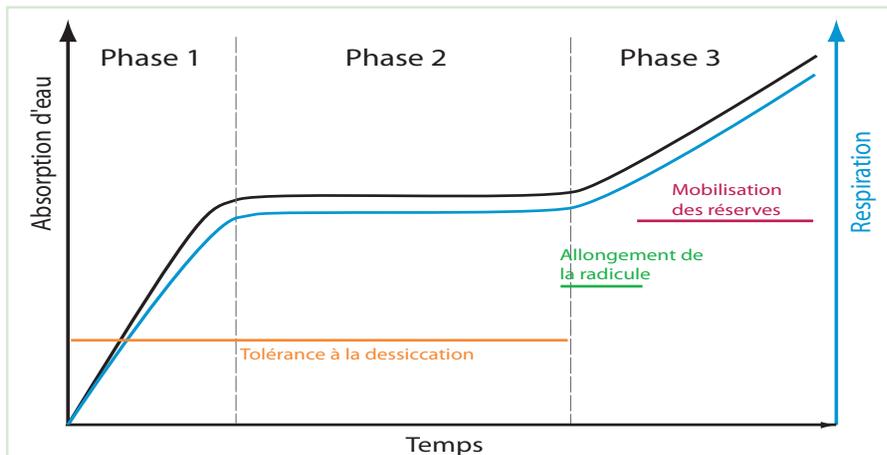


Figure 6.22 : Les différents processus dans la germination des graines (Côme 1982, Bewley 1997).

4.2.4.2. Dormances

Une graine viable est qualifiée de dormante lorsqu'elle n'a pas la capacité de germer dans des conditions environnementales qui devraient apparemment permettre la germination (Baskin & Baskin 2004). On parle de dormance lorsqu'il faut attendre plus de quatre semaines avant la première percée radiculaire et/ou que la germination est étalée dans le temps (plus de deux mois pour un lot de graines) (Baskin & Baskin 1998). Ce blocage provient de la semence et non des conditions environnementales, ce qui distingue la dormance de la quiescence.

Les espèces végétales ont développé des stratégies de dormance afin de permettre à leurs graines de germer seulement quand les conditions optimales pour leur développement sont réunies. Ces stratégies permettent également de faciliter la dispersion des graines. Il existe, selon Nikolaeva (1969, 1977), deux grands types de dormance organique, à savoir les dormances endogènes, qui sont induites par des caractéristiques particulières de l'embryon, et les dormances exogènes, engendrées par des caractéristiques particulières des structures entourant l'embryon (albumen, péricarpe...). La photosensibilité est relevée comme un troisième type de dormance par certains auteurs (Côme & Corbineau 2002) : dans ce cas, la germination dépend de la lumière (peut être stimulée, ou inhibée, ou ne pas être influencée), et seules les structures dans lesquelles l'embryon se trouve enfermé sont responsables de cette dormance (les embryons dénudés peuvent germer indifféremment en présence ou en absence de lumière).

Plus récemment, de nombreux auteurs se sont accordés pour distinguer cinq classes de dormance : physiologique, morphologique, morpho-physiologique, physique et combinée (physique + physiologique) (Baskin & Baskin 1998, 2004, Black *et al.* 2006). D'autres dormances font toujours l'objet de discussions quant à leur statut. Ces classes sont détaillées ci-dessous :

- **Physiologique (PD) :** Cette dormance est causée par un mécanisme physiologique d'inhibition de l'embryon empêchant l'émergence de la radicule. C'est la forme de dormance la plus commune, qui peut être divisée en trois niveaux : PD profonde, intermédiaire et non profonde. Il a été mis en évidence que, dans certains cas, c'est le ratio entre l'acide abscissique (ABA) et l'acide gibbérellique (GA_3) qui peut être à l'origine de cette dormance (Finch-Savage *et al.* 2006). Ce ratio peut varier en fonction de facteurs environnementaux tels que la température. Cette dormance peut être levée de différentes manières, sachant que chaque espèce peut nécessiter un ou plusieurs des traitements suivants. Une première méthode utilise les techniques de stratification, qui consistent à mettre les graines dans un environnement humide et froid ou chaud pendant une certaine période (de cinq jours à plusieurs mois), puis à changer la température (en fonction du climat dans lequel se développe l'espèce). Cette dormance peut également être levée par l'utilisation d'agents chimiques, tels que le nitrate de potassium (KNO_3), la thio-urée, la kinétine et les gibbérellines (GA_3), mais aussi par celle de certains gaz comme le CO_2 et l'éthylène.
- **Morphologique (MD) :** Dans ce cas, c'est l'embryon de la graine qui n'est pas encore totalement développé (figure 6.23). La graine nécessite une période de maturation après avoir été détachée du pied mère afin de permettre le développement total de l'embryon. Cette maturation doit s'effectuer dans un environnement humide avec une plage de températures comprises entre 15 et 30 °C en fonction des espèces. Certaines espèces présentant ce type de dormance nécessitent soit de la lumière, soit de l'obscurité pour germer. Les acides gibbérelliques (GA_3) peuvent augmenter le pourcentage et la vitesse de germination (Wulff *et al.* 2009).



© IAC / A. Wulff

Figure 6.23 : Coupe longitudinale d'une graine d'*Hibbertia pancheri* (Dilleniaceae) : l'embryon, noyé dans l'albumen, se trouve en bas à droite (Wulff *et al.* 2009).

- **Morpho-physiologique (MPD) :** Certaines espèces soumises à une dormance morphologique peuvent aussi présenter une dormance physiologique combinée. Cette double dormance est présente chez de nombreuses familles. Pour la lever, il est nécessaire de mettre en place des stratifications au froid et/ou au chaud, avant ou après la maturation de l'embryon. Pour certaines graines, il faut même une stratification alternant le chaud et le froid pendant plusieurs années.
- **Physique (PY) :** Cette forme de dormance est induite par une imperméabilité du tégument de la graine ou du péricarpe du fruit, empêchant l'embryon de s'hydrater et/ou de s'oxygéner et de commencer sa germination. Dans le milieu naturel, cette dormance est levée par l'action des micro-organismes du sol, par des alternances de périodes humides et sèches permettant la fragilisation du tégument ou du péricarpe, mais aussi par l'ingestion du fruit par un animal. Cette dormance peut être levée par une scarification mécanique (papier abrasif, scarificateur mécanique, scalpel...), chimique (H_2SO_4 , H_2O_2 , solvants organiques...) ou bien par chauffage à sec ou humide (bain d'eau chaude).
- **Physique et physiologique (PY + PD) :** Dans ce type de dormance combinée, le tégument de la graine ou le péricarpe du fruit sont imperméables à l'eau (dormance physique) et l'embryon est également physiologiquement dormant.

Cette classification de Baskin & Baskin (2004) ne considère pas les dormances chimique et mécanique en tant que véritables dormances alors qu'elles étaient identifiées comme telles par le passé. Ces auteurs indiquent qu'il est difficile de les distinguer de la dormance physiologique dans la plupart des cas. D'autres auteurs, au contraire, semblent les maintenir comme dormances à part entière :

- **Chimique :** Nikolaeva (1969) avait introduit la notion de dormance chimique résultant de la présence d'inhibiteurs dans le péricarpe. Dans ce cas, la graine peut germer seulement après que le péricarpe a été enlevé ou lessivé. Baskin & Baskin (1998) avaient repris cette notion mais, plus tard, ils ont préféré la regrouper avec la dormance physiologique (Baskin & Baskin 2004). Cette dormance peut avoir comme origine la présence d'ABA dans les tissus du fruit et de la graine. Les acides phénoliques, les tannins et les coumarines peuvent aussi bloquer la germination de certaines graines, toutefois leurs rôles spécifiques n'ont pas été mis en évidence. Certains phénols peuvent bloquer l'entrée de l'oxygène dans la graine, ne permettant pas la germination. Il est possible que certaines substances inhibitrices aient un rôle de protection contre la prédation ou les infections bactériennes.
- **Mécanique :** Nikolaeva (1969, 1977) avait décrit cette dormance sur des fruits à endocarpe induré, pouvant permettre l'imbibition de la graine mais bloquant l'expansion de l'embryon (observé parmi les Apocynaceae, Anacardiaceae, Elaeocarpaceae...). Certains fruits sont imperméables à l'eau, ce qui les rapproche de la dormance physique. D'autres fruits sont perméables à l'eau mais ne germent pas jusqu'à ce qu'ils reçoivent un traitement de levée de dormance (stratification au froid par exemple). Pour l'auteur, aucune évidence ne suggère que l'endocarpe soit un obstacle mécanique à la germination. En d'autres termes, une fois que la dormance de l'embryon est levée, ce dernier a la capacité de germer.

Baskin & Baskin (2004) considèrent que ce type de dormance est à intégrer dans la dormance physiologique. En effet, la majorité des graines de ce type présentent également une dormance physiologique, les deux dormances étant difficiles à distinguer. Toutefois, la germination de quelques espèces peut être bloquée par une restriction mécanique des structures du fruit (endocarpe, mésocarpe).

La consultation de la bibliographie montre que des tendances de dormance peuvent être mises en évidence selon la famille. Dans le tableau suivant (tableau 6.3) sont regroupées les familles de la zone inter et subtropicale dans lesquelles le statut de dormance des graines d'une ou de plusieurs espèces a été caractérisé (seules les familles présentes sur terrains ultramaïques de Nouvelle-Calédonie ont été retenues). Bien que toutes les espèces n'aient pas été étudiées au sein de chaque famille, des hypothèses peuvent être émises sur le type de dormance que peut présenter une graine en connaissant sa famille taxonomique. Les dormances d'espèces locales de terrains miniers ont été présentées précédemment (tableau 6.1).

Tableau 6.3 : Familles de plantes de la zone inter et subtropicale dans lesquelles une ou plusieurs espèces ont été caractérisées au niveau du statut de dormance de leurs graines. (D'après Baskin & Baskin 1998, complété par Fogliani, L'Huillier, Wulff & Zongo, 2009, obs. pers.)

Famille	Dormance	Famille (suite)	Dormance	Famille (suite)	Dormance
Acanthaceae	PD, ND	Erythroxyloaceae	PD	Orchidaceae	MD
Anacardiaceae	PD, PY, ND	Euphorbiaceae	PD, PYA	Piperaceae	MD
Annonaceae	MD, MPD, ND	Fabaceae	PY, PD, ND	Pittosporaceae	MD, MPD
Apocynaceae	PD, ND	Flacourtiaceae	PD, ND	Poaceae	PD, ND
Aquifoliaceae	MD	Goodeniaceae	PD	Podocarpaceae	MD, MPD
Araliaceae	MD, MPD	Hippocrateaceae	PD	Proteaceae	ND
Araucariaceae	PD, ND	Lamiaceae	PD, ND	Rhamnaceae	PY, ND
Balanophoraceae	MD	Lauraceae	PYA, PD, ND	Rhizophoraceae	PD
Bignoniaceae	PD, ND	Lecythidaceae	ND	Rubiaceae	PYA, PD, ND
Burseraceae	PD, ND	Liliaceae	MPD	Rutaceae	PD, ND
Casuarinaceae	ND	Loranthaceae	MD	Santalaceae	MD, PD, ND
Celastraceae	PD, ND	Malpighiaceae	ND	Sapindaceae	PY, ND
Chloranthaceae	MD	Malvaceae	PY, ND	Sapotaceae	PD, PYA, ND
Clusiaceae	PD, ND	Meliaceae	PD, PYA, ND	Simaroubaceae	PD, ND
Combretaceae	PD, ND	Monimiaceae	MD	Smilacaceae	MD
Cyperaceae	MD, PY	Moraceae	PYA, PD, ND	Solanaceae	PYA, PD, ND
Dilleniaceae	MD, MPD	Myrsinaceae	PD	Taxaceae	MD
Ebenaceae	PD, PYA, ND	Myrtaceae	PD, ND	Thymelaeaceae	ND
Elaeocarpaceae	PD, ND	Oleaceae	PD, ND	Tiliaceae	PY, ND
Ericaceae	MD, PD	Oleaceae	MD, PYA, MPD	Winteraceae	MD

Abréviations des types de dormance : MD : morphologique ; MPD : morpho-physiologique ; ND : non dormante ; PD : physiologique ; PY : physique ; PYA : physique, levée par une ingestion animale.

4.2.4.3. Prétraitements et prégerminations

Avant tout prétraitement, pour éviter des contaminations fongiques ou bactériennes, l'utilisation de désinfectants peut s'avérer utile, voire nécessaire. Néanmoins, cela est inutile dans la plupart des cas, dès lors que la collecte, le nettoyage et le stockage des graines ont été réalisés dans de bonnes conditions. Parmi les traitements possibles :

- un des plus utilisés consiste en un trempage dans une solution d'hypochlorite de sodium (eau de Javel) à 1 % de chlore actif, ou d'hypochlorite de calcium à environ 1-2 % de chlore (w/v), jusqu'à 4 % pour les fortes contaminations. Le temps de trempage peut aussi varier en fonction du type de graine (entre 5 et 30 minutes en général). Un rinçage final à l'eau est nécessaire ;
- un trempage des graines dans une solution contenant un fongicide pour le traitement des semences peut éliminer les champignons pathogènes qui pourraient venir contaminer les graines. Toutefois, de nombreux produits commerciaux existent, chacun avec des usages spécifiques, qu'il faut donc adapter en fonction des graines et des contaminations pouvant survenir.

Prétraitement pour accélérer l'imbibition

- Trempage dans de l'eau : ce traitement est préconisé pour accélérer l'imbibition de la graine. Il ne lève pas une dormance mais accélère la germination. En fonction du type de graine, il faut éviter les trempages trop prolongés, le manque d'oxygène pouvant dégrader l'embryon.

Prétraitements pour lever une dormance endogène (physiologique ou morphologique, voire chimique)

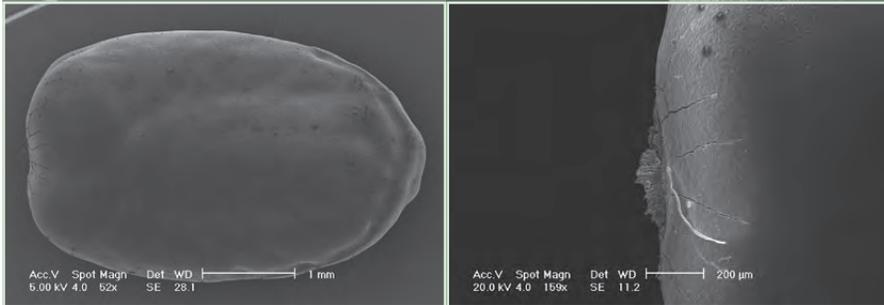
Les méthodes suivantes sont envisageables :

- Trempage dans des solutions contenant de l'acide gibbérellique (GA_3), généralement utilisées dans le cas de dormances physiologiques. L'hormone est diluée dans de l'eau à une concentration de 0,3 g/L (concentration et durée de trempage variables selon l'espèce). Ce traitement peut être utilisé en complément d'une scarification, d'un traitement au KNO_3 ou d'un trempage à l'eau fumigée.
- Trempage dans des solutions contenant du nitrate de potassium (KNO_3) à une concentration de 1 g/L (variable selon l'espèce). Il peut être utilisé en combinaison avec une scarification ou un trempage dans une solution de GA_3 .
- Trempage des graines dans une solution diluée d'eau fumigée (liquide composé d'éléments issus de la combustion de matériel végétal, comprenant notamment des karrikinolides). Ce traitement permet de promouvoir la germination de certaines espèces. Il peut être combiné avec une scarification ou un trempage dans une solution de GA_3 .
- Fumigation à l'aide d'un combustible dans une enceinte fermée (préconisée dans le cas de graines dont la germination est favorisée par le passage d'incendies dans le milieu naturel, cas de nombreuses espèces en Australie). Ce traitement combine l'action des karrikinolides et d'autres composés contenus dans la fumée à un choc thermique, pouvant lever une dormance physiologique.
- Lessivage des graines dans de l'eau renouvelée. Il permet de lever des dormances liées à la présence d'inhibiteurs de la germination dans une partie de la graine ou du fruit.

Prétraitements pour lever une dormance exogène (physique ou mécanique)

Plusieurs techniques sont efficaces :

- Trempage dans des bains d'eau chaude (de 60 à 100 °C). La durée et la température optimales sont déterminées par expérimentation pour une espèce donnée et varient en fonction de la dureté du tégument et de la taille de la graine (durée de quelques secondes à quelques heures). Ce traitement fragilise les tissus tégumentaires, levant l'inhibition mécanique, et/ou permet l'entrée de l'eau préférentiellement au niveau du hile, levant la dormance physique (figure 6.24). Ce traitement peut être renouvelé plusieurs fois pour des graines présentant des téguments externes très durs.



© UNC / B. Fogliani

Figure 6.24 : Observation au microscope électronique à balayage de la surface d'une graine d'*Alphitonia neocaledonica* (Rhamnaceae) préalablement traitée à l'eau chaude à 80 °C. À gauche, en vue générale, à droite, zoomée sur la zone proche du hile, révélant des craquelures.

- Passage au chaud et à sec à des températures allant de 60 °C à 100 °C pendant un temps à déterminer pour chaque espèce considérée.
- Trempage dans une solution aqueuse de cellulase à 1,25 g/L à 25 °C pendant 24 heures (ces conditions peuvent varier selon l'espèce considérée). Ce traitement permet la digestion partielle de l'enveloppe externe. D'autres enzymes digestives peuvent également être utilisées (mannase, glucanase...).
- Scarification du tégument ou de l'endocarpe : cette technique peut s'appliquer à l'aide d'un scalpel, de préférence à l'opposé du hile pour ne pas endommager l'embryon. Ce traitement est préconisé dans le cas de graines relativement grosses présentant une enveloppe imperméable autour de la graine. En revanche, il est peu reproductible à grande échelle étant donné le temps nécessaire pour scarifier les graines. Il est possible aussi d'utiliser du papier de verre (placer les graines entre deux feuilles de papier à poncer ; cf. figure 6.25). Ce traitement est préconisé dans le cas de petites graines ne pouvant être scarifiées au scalpel. Pour des quantités importantes, il existe sur le marché différents types de scarificateurs mécaniques.
- Trempage dans de l'acide sulfurique (H_2SO_4) pur ou dilué. Le temps de trempage est fonction du type de graine. Il faut toutefois faire attention, un trempage trop long peut atteindre et endommager l'embryon.



© IAC / C. Vêta

Figure 6.25 : Système de scarification manuelle avec papier de verre.

Prégermination

La prégermination (ou « priming » en anglais) est un traitement pour semences orthodoxes (cf. section 4.2.3) permettant une amélioration significative en termes de vitesse et d'uniformité de la germination. De plus, ce traitement permet à la graine de germer dans une plus large gamme de températures et dans de mauvaises conditions d'oxygénation. Il permet aussi d'augmenter la vigueur germinative de lots vieillissants (Bailly *et al.* 1998).

Les graines sont tout d'abord imbibées pour une période inférieure à celle nécessaire au démarrage de la croissance de la racine (avant la fin de la phase 2 ; cf. figure 6.22) ; si les graines sont imbibées trop longtemps avant séchage, des dommages peuvent apparaître au niveau des méristèmes de la racine. Elles sont ensuite séchées (lentement et à température modérée) et éventuellement stockées (Hegarty 1978) pendant un temps plus ou moins long (de 1 à 3 mois, même s'il a été montré chez certaines espèces « primées » des capacités de stockage de près de 12 mois ; Corbineau 1996).

Plusieurs techniques de « priming » sont utilisées aujourd'hui :

- L'« **osmopriming** » ou « priming osmotique » est un procédé qui hydrate les graines au niveau voulu en les plaçant dans des solutions assurant un faible potentiel hydrique. Les graines sont rincées à la fin du priming. Le mannitol ou des sels inorganiques (KH_2PO_4 , KCl , KNO_3 ...) sont souvent utilisés, mais, de par leur petite taille moléculaire, ils peuvent pénétrer dans les graines et présenter des effets secondaires toxiques. Le polyéthylène glycol (PEG) est préférentiellement utilisé dans la recherche et l'industrie semencière, dans des fractions de poids moléculaires comprises entre 6 000 et 8 000 daltons, taille empêchant la pénétration dans les cellules vivantes de la graine. Une aération en continu est nécessaire pour assurer un bon échange gazeux avec les graines en solution.
- Le « **matriming** » ou « priming matriciel » est un procédé qui mélange des graines, de l'eau et une matrice de particules insolubles (vermiculite, polymères absorbants d'eau...) dans des proportions déterminées. Les graines s'imbibent lentement pour arriver à un niveau d'hydratation voulu. Après cette opération, les particules sont retirées ou incorporées partiellement par un procédé d'enrobage.
- L'« **hydropriming** » est un procédé qui consiste soit à plonger les graines dans de l'eau durant une période définie, soit à apporter une quantité d'eau connue qui leur permet d'atteindre le degré d'hydratation voulu.

À ces techniques, des auteurs (Black *et al.* 2006) ajoutent parfois certains procédés, qui s'apparentent plus à des prétraitements :

- Le « **biopriming** » est une technique utilisant les micro-organismes « utiles » de la rhizosphère, afin de les incorporer dans le champ de culture ou pour éviter la prolifération d'agents pathogènes pendant le priming. Cette technique est difficile à mettre en œuvre industriellement. Des essais sont développés en Nouvelle-Calédonie (par la société Siras, en collaboration avec l'UNC) pour enrober des graines de Cyperaceae, utilisées lors d'opérations d'ensemencement hydraulique, avec des spores de mycorhizes afin de faciliter la mycorhization aux premiers stades de développement des racines.

- L'utilisation d'éléments promoteurs ou retardants, qui se traduit par d'adjonction de régulateurs de croissance ou hormones (acide gibbérélique, éthylène), affectant la germination des graines.

4.2.4.4. Tests de viabilité

Une absence de germination assez rapide peut s'expliquer soit par la présence de dormance, soit par une absence de viabilité. Il est donc important de bien distinguer ces deux états, ce qui peut être fait à l'aide d'un test de viabilité, qui permet de connaître rapidement la proportion de graines viables, capables de germer (toutefois, ces tests ne permettent pas de révéler une dormance ou pas). En fonction de l'espèce, de la biologie de la reproduction, des conditions environnementales, certains lots de graines d'une même espèce, voire d'un même individu, récoltés d'une année sur l'autre, ne vont pas avoir les mêmes taux de viabilité. Ces informations sont essentielles dans le cas de campagnes d'*hydroseeding* (ensemencement hydraulique), où il est important, dans un souci de rentabilité économique, de mettre la quantité de graines nécessaire à l'obtention d'un bon recouvrement par la végétation. Le taux de viabilité peut aussi être utile aux pépiniéristes qui pourront mettre la quantité exacte de graines pour obtenir un nombre de plants voulu, dès lors que les conditions de levée de dormance auront été déterminées. Il existe plusieurs techniques pour mettre en évidence la viabilité, à adapter en fonction de l'espèce.

Test de viabilité à la coupe

Ce test est facilement applicable pour de nombreuses graines. Pour cela, il faut prendre un échantillon représentatif (en général, 100 graines dans un lot homogène) et couper les graines en deux (dans le sens longitudinal ou transversal selon l'espèce) à l'aide d'un scalpel pour mettre en évidence les structures internes. Pour les graines présentant un tégument dur, il sera peut-être nécessaire de percer le tégument pour faciliter l'imbibition et le ramollissement des tissus. Il faut garder à l'esprit que la structure la plus importante dans une graine est l'embryon. Celui-ci doit être de couleur uniforme, blanche, jaunâtre ou verdâtre. Aucune partie ne doit être nécrosée (couleur marron à noire) (figure 6.26). On effectue ensuite un comptage des graines semblant être viables et de celles qui ne le sont pas et on rapporte le résultat en pourcentage. Le test à la coupe est la méthode la plus simple et la plus rapide, mais dans certains cas elle manque de fiabilité car une graine semblant viable à la coupe ne va pas forcément germer.

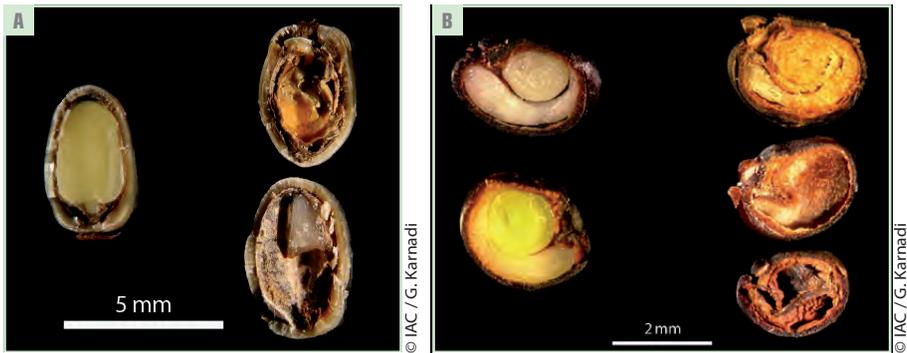
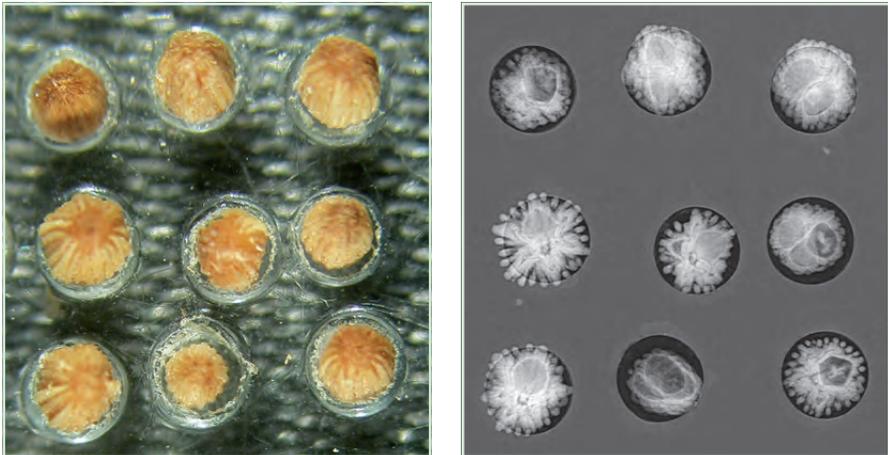


Figure 6.26 : Exemples de test à la coupe. Photo A : graines d'*Alphitonia neocaledonica* (une graine viable à gauche). Photo B : graines de *Dodonaea viscosa* (deux graines viables à gauche).

Test de viabilité aux rayons X

L'utilisation des rayons X pour caractériser la viabilité d'un lot de graines peut se révéler très intéressante, toutefois l'acquisition du matériel reste onéreuse. Cette technique permet de mettre en évidence les graines ou loges de fruit vides, parasitées, et même de révéler des anomalies morphologiques de l'embryon ou des tissus de réserve. Cette technique est non destructive, à la différence des autres tests, et rapide à mettre en place. Les radiographies obtenues sont les images des tissus traversés par les rayons X : les zones les plus sombres de ces images correspondent à celles qui laissent passer facilement ces rayons et les plus claires à celles que le rayonnement pénètre difficilement. Les enveloppes séminales, les régions détruites ou fracturées de l'embryon ou des tissus de réserve sont généralement aisément traversées par les rayons X et apparaissent donc sombres. Les tissus vivants non altérés sont plus opaques et donnent des zones claires (Côme 2006) (figure 6.27). Cette technique permet de se positionner sur la viabilité d'un lot au niveau structurel. Toutefois, certaines graines visiblement bien structurées ne germeront pas si une partie indispensable à leur développement est dégradée.



© S. Turner / Kings Park, Perth

Figure 6.27 : Fruits poly-embryonnés de *Stiphelia cymbulata* (Ericaceae). À gauche, on retrouve la disposition des fruits avant passage aux rayons X. À droite, la radiographie RX permet de mettre en évidence la présence de graines dans les loges des fruits : ainsi, le premier fruit en haut à gauche est vide, celui au-dessous contient une graine et celui à droite en contient deux.

Test de viabilité au chlorure de tétrazolium

Le test au chlorure de tétrazolium (plus précisément chlorure de 2,3,5-triphényl-tétrazolium, ou TTC) est un moyen rapide pour déterminer la viabilité d'un lot de graines par le marquage des parties vivantes. Ce sel peut pénétrer par imbibition dans les cellules de l'embryon des semences. Dans les tissus vivants, il est réduit en un composé rouge (triphényl-formazan) par les coenzymes réduits des déshydrogénases (NADH, NADPH) produites par la respiration de la graine et par d'autres activités métaboliques (Côme & Corbineau 2006). Le formazan étant insoluble, la coloration reste au niveau des tissus vivants. Plusieurs faciès de coloration sont possibles pour un même lot de graines, et ne sont considérées viables que les graines pour lesquelles au moins la radicule, l'hypocotyle et l'épicotyle de l'embryon sont colorés (figure 6.28).

Une des difficultés rencontrées réside dans la lecture du faciès de la graine colorée ; celui-ci ne va pas forcément être le même d'une espèce à l'autre (fonction de la structure de la graine, albuminée, exalbuminée, etc.). Il est conseillé de mettre ce test au tétrazolium en relation avec un test de germination classique, car le niveau d'activité enzymatique des déshydrogénases révélé par le TTC ne traduit pas toujours la capacité d'une graine à germer. Une étude sur plusieurs espèces de maquis minier (Karnadi 2008) a montré que le test au tétrazolium donne un taux de viabilité égal ou supérieur au taux de germination. De plus, ce test ne permet pas de déterminer si une semence va ou non germer, car un embryon dormant a la même activité respiratoire que le même embryon non dormant (Côme 2006).

Protocole : après avoir récupéré un échantillon représentatif (normalement, 100 graines), laisser les graines s'imbiber dans de l'eau (environ 24 heures) afin d'activer le métabolisme. De plus, cette imbibition va permettre d'assouplir les tissus et de faire des coupes de graines plus nettes. En fonction du type de graine (tégument externe imperméable par exemple), il sera peut-être nécessaire de scarifier la graine ou bien de la couper en deux pour permettre l'imbibition des tissus. Pour les graines albuminées, la coupe doit nécessairement passer au travers de l'embryon, sachant que l'albumen n'est pas censé se colorer, sauf dans certains cas. Pour les graines exalbuminées, la coupe doit prendre en compte un maximum de structures de la graine pour mettre en évidence de possibles nécroses de tissus. Après imbibition dans l'eau, il s'agira de couper la graine en deux, si ce n'est pas déjà fait, et de la tremper dans une solution tamponnée (pH compris entre 6,5 et 7,5) de TTC à 1 % pour une durée comprise entre 4 et 24 heures en fonction des espèces et du type de graine (ISTA 2003). Le test doit se dérouler dans l'obscurité (le TTC est réduit par les rayons UV) et à une température de l'ordre de 30 °C pour activer le métabolisme et donc accélérer le développement de la coloration.

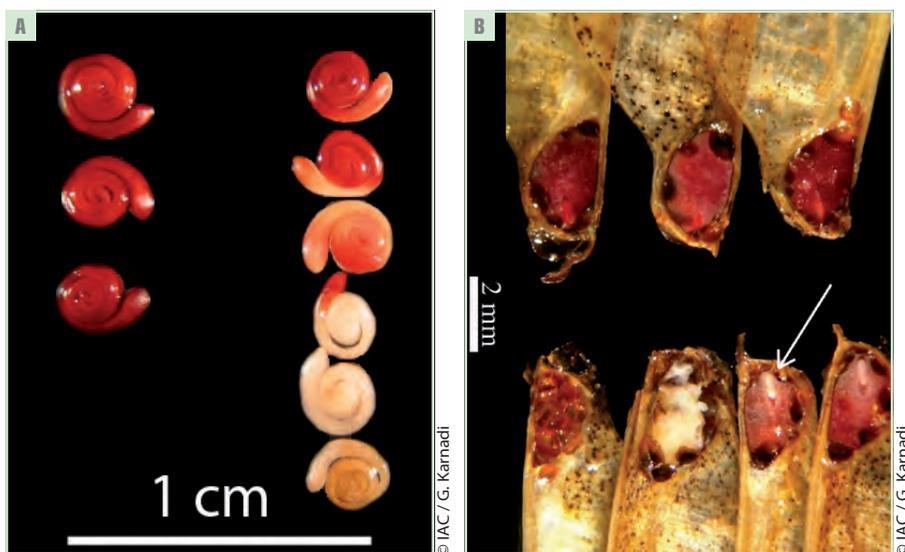


Figure 6.28 : Exemples de test au TTC. Photo A : à gauche, des embryons viables de *Dodonaea viscosa*, à droite, des embryons non viables. Photo B : en haut, des graines viables de *Myodocarpus involuocratus*, en bas, des graines non viables (pas de coloration de l'embryon qui reste clair (cf. flèche), ou absence d'embryon).

Test de germination

Le test le plus fiable, mais qui peut nécessiter une longue période d'attente en fonction de l'espèce, consiste à mettre un échantillon de graines à germer. Pour cela, il faut placer un lot homogène à germer dans des boîtes de Petri (en général, 4 boîtes x 25 graines, ou 3 x 50), tapissées de coton hygrophile ou de papier filtre (ou d'Agar) (figure 6.29). On placera ensuite ces boîtes, idéalement, dans une enceinte de germination ayant une plage de températures comprises environ entre 22 et 30 °C. En l'absence de ce matériel, il est possible de conduire ce test à température ambiante, mais il sera préférable de le faire en été pour bénéficier des températures plus élevées. Les graines sont arrosées de façon à maintenir constamment une humidité élevée. Pour les espèces à graines dormantes, il convient de lever d'abord les inhibitions afin d'accélérer le processus de germination (cf. section 4.2.4.3). Une étude sur 70 espèces de terrains miniers de Nouvelle-Calédonie a permis de caractériser les graines et de mettre en évidence les meilleurs protocoles de germination pour chaque espèce (Wulff *et al.* 2008 ; cf. chapitre 7).



Figure 6.29 : Mise en place de tests de germination.

© IAC / L. L'Huillier

4.2.5. Le semis en pépinière

4.2.5.1. Moment de semer

Le moment de semer dépend en tout premier lieu du type de semences. Les graines récalcitrantes ne pouvant se conserver longtemps, il est préférable de les semer rapidement après la récolte. En revanche, les graines intermédiaires et, surtout, les graines orthodoxes peuvent être conservées, ce qui permet d'attendre le meilleur moment pour les mettre à germer. Un premier paramètre à prendre en compte concerne les fortes variations saisonnières de pluviométrie et de température en Nouvelle-Calédonie (cf. chapitre 2). La majorité des graines des espèces indigènes des terrains miniers germeront beaucoup plus rapidement à des températures comprises entre 25 et 35° C. Qui plus est, certaines germeront très mal, voire pas du tout, en saison fraîche (par exemple les graines d'*Araucaria montana*, d'*A. rulei*, de *Geissois pruinosa* ; celles des genres *Grevillea*

et *Costularia* ont une germination très ralentie à moins de 15 °C et *Cunonia macrophylla* ne germe pas à moins de 15 °C). Quelques espèces peuvent néanmoins germer correctement à des températures plus froides (voir les fiches espèces du chapitre 7). Il est possible néanmoins d'équiper les tables de culture de nappes chauffantes thermostatées, permettant de démarrer des germinations quelle que soit la température extérieure.

La durée de culture en pépinière et la période prévue de plantation sont également des facteurs essentiels à considérer. La durée de culture dépend de l'espèce, ainsi que du volume du pot et du substrat : les plus courtes durées sont d'environ de 8 mois, tandis que les plus longues atteignent environ 18 mois (cf. chapitre 7). La meilleure période de plantation se situe normalement durant la saison humide, c'est-à-dire à partir de janvier (voire décembre) jusqu'au mois de juin environ. À partir de ces éléments, il est possible de déterminer le calendrier fixant la ou les dates de semis, afin de produire des plants de bonne qualité pour la meilleure période de plantation, ce qui se prépare au moins un an à l'avance.

En outre, si la quantité à produire est importante (figure 6.30), il peut être avantageux de ne pas mettre toutes les graines à semer en même temps, de procéder par périodes décalées de quelques jours, de façon à pouvoir ensuite étaler de la même manière le travail de repiquage. Cela peut également faciliter le travail de plantation sur le terrain.



Figure 6.30 : Semis de *Gymnostoma deplancheanum* (serres de Vale Inco).

© Vale Inco / S. McCoy

4.2.5.2. Le substrat

Le substrat a en général peu d'incidence sur le processus même de germination. En revanche, il aura une grande importance sur l'émergence et la croissance initiale de la plantule. D'une manière générale, le substrat pour semis doit être sain, assez fin, drainant mais retenant suffisamment l'eau. Un substrat du commerce pour semis peut convenir, tout comme un mélange à base de sable de rivière ou de sol ferrallitique de texture moyenne à fine, additionné de tourbe fine, de perlite ou de vermiculite afin d'augmenter la capacité de rétention en eau.

Le sable de rivière et le sol ferrallitique, qui peuvent être prélevés sur le terrain, rendent le substrat drainant et évitent les problèmes liés à des excès d'eau (asphyxie, champignons). En revanche, il faut éviter d'en mettre trop, le substrat risquant alors de se dessécher trop vite. La tourbe apporte quelques nutriments, et permet d'alléger et d'aérer le substrat, ce qui est essentiel pour faciliter la pénétration et le bon développement des racines. Elle présente également une bonne capacité de rétention en eau. Son pH généralement acide convient assez bien aux espèces des terrains miniers. La fibre de coco présente des caractéristiques similaires en termes de drainage et de rétention en eau, tout en étant disponible à un faible coût. La perlite, la vermiculite ou la pierre ponce augmentent la perméabilité du substrat et possèdent une assez bonne capacité de rétention en eau. Ces matériaux, par contre, n'apportent pas de nutriments et peuvent être assez chers à l'achat.

Généralement, les graines de petite taille devraient être mises à germer dans un substrat fin et compact, les grosses graines se contentant d'un substrat plus grossier.

4.2.5.3. Conditions environnantes

Le substrat, généralement mis en terrine, devra rester constamment humide afin de favoriser l'imbibition des graines et leur germination. Il faut toutefois éviter de le maintenir gorgé d'eau, un manque d'air dans le substrat limitant la respiration des racines, et un excès d'eau pouvant favoriser le développement de maladies fongiques. Le substrat doit donc être drainant, aéré et fréquemment arrosé.

La température extérieure doit être soigneusement prise en compte. Il est ainsi préférable de réaliser ses semis en saison chaude, comme cela a été vu plus haut. L'arrosage devra également être plus soutenu en saison chaude et sèche.

Les semis se développent en général mieux dans un endroit légèrement ombragé. Un excès de lumière accélérera le dessèchement du substrat et exigera un arrosage plus fréquent. Inversement, un excès d'ombre favorisera un étiolement des plantules qui deviendront alors plus fragiles. Les espèces pionnières des maquis miniers sont héliophiles et supportent donc un éclairage relativement fort (toutefois, un léger ombrage protégera efficacement les plantules au départ). Certaines graines présentent une photosensibilité positive et ont donc besoin de lumière pour germer (par exemple *Machaerina deplanchei*, Léon 2005). Dans ce cas, elles ne doivent pas être semées trop profondément.

Le milieu devra également être légèrement aéré : un excès d'aération entraînera un dessèchement trop rapide, tandis qu'un manque d'aération entraînera un excès d'humidité permanente, lequel favorisera des développements fongiques.

4.2.5.4. Méthodes de semis

On considère deux grands types de semis : le semis direct et le semis indirect.

Le semis direct consiste le plus souvent à mettre la graine à germer directement dans un godet, ou dans une alvéole de plaque de culture. Cela limite les problèmes de déformations racinaires, de stress et de pertes qui apparaissent parfois après le repiquage. Ce type de semis est toutefois à réserver aux graines de taille moyenne à grosse, faciles à manipuler, et qui présentent un taux de germination élevé (plus de 50 %).

Le semis indirect se pratique en terrines ou en caissettes. Les graines sont alors mises en place soit en ligne, soit à la volée. La méthode en ligne – plus fastidieuse car consistant à placer les semences dans une petite rigole et à les espacer assez régulièrement en fonction de leur taille, ce qui permet de récupérer ensuite plus facilement les plantules avec une petite motte – sera réservée aux graines les plus précieuses (espèces rares, ou difficiles à collecter, ou produisant peu de graines...). La méthode à la volée consiste à lancer des pincées ou des poignées de graines à la surface du substrat de façon homogène. Les plantules pouvant être serrées, leur récupération sera plus délicate. Cette méthode est rapide mais doit être réservée aux graines les plus communes et les plus abondantes, ou à celles ayant un faible taux de germination.

4.2.5.5. La profondeur de semis

L'enfouissement des graines sert surtout à permettre un bon contact avec l'eau contenue dans le substrat. La profondeur d'enfouissement optimale varie en fonction de l'espèce. D'une manière générale, les graines devraient être semées à une profondeur d'environ deux à quatre fois leur diamètre ou leur épaisseur. Certaines graines doivent obligatoirement rester en surface, telles que les graines photosensibles et celles de taille très petite qui ont peu de réserves et qui ne parviennent pas à percer la couche de substrat au moment de l'émergence.

4.2.5.6. Fonte de semis et ravageurs

Les graines en phase de germination et les jeunes plantules sont particulièrement sensibles aux insectes et aux champignons. Ceux-ci sont facilement disséminés dans la pépinière où les plants sont cultivés sur des petits espaces. Si le même substrat est utilisé à plusieurs reprises sans désinfection, des pathogènes peuvent également être transmis d'une culture à la suivante.

D'une manière générale, ces problèmes peuvent être limités avec une bonne gestion en amont. Des graines de qualité, des conditions optimales de germination et de croissance permettront aux plantes d'avoir un développement vigoureux, ce qui les rendra plus résistantes aux attaques de pathogènes. En outre, un substrat bien aéré et arrosé sans excès, un bon éclairage et une bonne ventilation limiteront les risques de développement de champignons. Dans ce cas, une désinfection du substrat est souvent inutile. Un tel traitement devrait être évité, sauf nécessité absolue. On privilégiera alors des traitements non polluants sans fongicide : le substrat peut être stérilisé par la chaleur, par exemple à 80 °C pendant 15-30 min, ou partiellement stérilisé en l'exposant au soleil quelques heures en couche fine de 2-3 cm et recouvert d'un film plastique noir. Il faut penser, dans ce cas, que des micro-organismes bénéfiques, comme les mycorhizes, seront également probablement éliminés.

Les insectes doivent être surveillés quotidiennement avec attention. Quelques chenilles dans un bac à semis peuvent causer d'importants dégâts en une seule nuit. Il en est de même pour les rongeurs qui peuvent consommer les graines avant qu'elles ne germent (observé par exemple sur *Hibbertia* et *Grevillea*). Les terrines peuvent être recouvertes d'un grillage à maille fine, qui empêchera les rongeurs de passer et la plupart des insectes d'y pondre. En cas d'attaque de chenilles, l'application rapide d'un insecticide sera nécessaire.

4.2.6. Le repiquage

4.2.6.1. Stade de repiquage

Le plant peut être repiqué dès qu'il est assez grand et robuste pour être manipulé sans trop de risque de blessures. La durée nécessaire pour atteindre ce stade est très variable d'une espèce à l'autre (voir les fiches espèces au chapitre 7). Un bon repiquage est une étape essentielle pour permettre aux plants de poursuivre leur développement normalement. En cas de repiquage trop tardif, les racines seront trop développées et difficiles à placer correctement lors du repiquage.

4.2.6.2. Le substrat et les conteneurs

Le substrat dans lequel les plants seront repiqués servira à leur développement pendant toute la phase d'élevage, jusqu'au moment où ils seront implantés sur le terrain. Il est donc important qu'il permette à la fois un bon développement des plants en pépinière et un bon démarrage sur le terrain une fois la plantation faite. Des différences significatives entre substrats ont été relevées (figure 6.31), le choix d'un bon mélange est donc important.

Il devra présenter des caractéristiques proches de celles des substrats pour semis, en termes de capacité de rétention en eau et de drainage, tout en comportant des matériaux différents. Les matières organiques fibreuses devront représenter une part assez importante (par exemple tourbe et fibre de coco), afin de permettre, une fois le système racinaire développé, de former une motte cohérente, facile à récupérer et à manipuler lors de la plantation.

Pour la même raison, on évitera de mettre trop de sable, la motte pouvant se briser lors du transport et lors de la manipulation. En revanche, un excès de matière organique augmente le risque de dessèchement de la motte et peut être fatal lors de la plantation.

Il est important également que le substrat contienne une part de sol latéritique de bonne qualité (top-soil fraîchement récupéré), non seulement pour que les plants s’y habituent, mais également pour permettre autant que possible la formation d’associations mycorhiziennes, essentielles au développement des plantes indigènes des terrains miniers (cf. chapitre 5, d’autres méthodes de mycorhization y sont décrites). Une part d’environ 20 à 30 % est recommandée, au-delà, le substrat aura l’inconvénient d’être trop lourd (Lagrange *et al.* 2004).

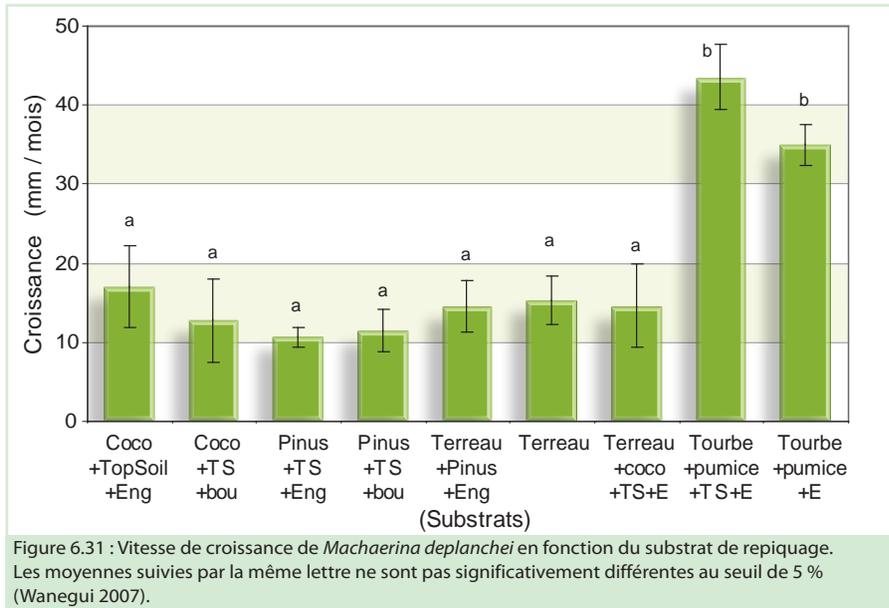


Figure 6.32 : Plaque de culture (35 alvéoles de 250 ml).

L’usage de plaques de culture est de plus en plus courant ; celles-ci, en effet, permettent un transport plus facile des plants. Le nombre et le volume des alvéoles dépendent du type d’espèce, la moyenne se situant autour de 40 alvéoles d’un volume individuel de 250 ml. Pour des espèces de la famille des Cyperaceae, le volume peut être légèrement inférieur. Pour les autres, mieux vaut privilégier des alvéoles profondes d’au moins 250 ml. Par ailleurs, les alvéoles devraient de préférence présenter des fentes d’aération, qui servent également au cernage des racines (cela évite qu’elles ne se concentrent le long de la paroi).

4.2.6.3. Le repiquage

La qualité du repiquage sera déterminante pour assurer un bon développement du plant en pépinière et une bonne reprise sur le terrain. Le risque le plus important est celui de la déformation du pivot. Un pivot courbé lors du repiquage aura tendance à former une crosse qui, en se développant, va se resserrer et ralentir la croissance de la plante. Il est donc important de bien positionner les racines verticalement lors du repiquage.

Le repiquage se fera dans un endroit encore ombragé, le temps de s'assurer de la reprise des plants. Les espèces conseillées pour la revégétalisation étant héliophiles, elles pourront être placées ensuite dans un endroit plus éclairé le temps de leur élevage.

4.2.7. L'élevage des plants

Les plants doivent être arrosés régulièrement mais sans excès. La fréquence et la quantité d'arrosage sont à adapter en fonction de la saison et de la localisation de la pépinière. Avant la fin de l'élevage, un sevrage devra se faire en diminuant progressivement l'arrosage, de façon à ce que les plants deviennent de plus en plus résistants au manque d'eau. La qualité de l'eau d'arrosage est à vérifier également : bien souvent, en Nouvelle-Calédonie, les eaux sont magnésiennes et basiques (par exemple, à Port Laguerre, le pH est de 8,3). Dans ce cas, il est important de s'équiper d'appareils permettant de diminuer le pH par injection d'acide dans l'eau d'arrosage.

L'usage de fertilisants montre que les espèces des terrains miniers répondent en général de manière très positive à des apports de nutriments. Toutefois, ces fertilisants devront être, de préférence, de type « libération lente », la croissance des espèces des terrains miniers étant relativement lente elle aussi.

Un désherbage régulier est important pour une bonne croissance des plants en pépinière et pour éviter d'introduire des espèces indésirables sur site lors de la plantation.

Quelques espèces montrent une sensibilité à certains ravageurs : des cochenilles sont souvent observées sur *Xanthostemon multiflorus* ou sur les espèces du genre *Serianthes*. Dans ce cas, des insecticides à spectre large ont été testés avec succès (L'Huillier, obs. pers.). La pépinière peut aussi être équipée de toiles d'ombrage pour les parois latérales, qui permettent de limiter l'introduction de nombreux insectes (figure 6.33).



Figure 6.33 : Serre de culture (Port Laguerre).

© IAC / L. L'Huillier

4.3. La multiplication asexuée

4.3.1. La multiplication végétative en revégétalisation des sites miniers

La multiplication végétative est une technique de reproduction des végétaux permettant de produire des plantes filles à partir de pieds mères. D'un point de vue génétique, les plantes filles sont identiques à la plante mère et constituent donc des clones.

Bien que la multiplication sexuée soit à privilégier pour les espèces dont la collecte de graines et la germination sont possibles, les nombreux avantages conférés par la multiplication végétative font qu'elle est souvent utilisée de par le monde dans les techniques dites de génie écologique pour la restauration de sites dégradés ou la réhabilitation de zones à stabiliser pour lutter contre l'érosion. En plus du bouturage, principale technique employée, d'autres méthodes de multiplication végétative sont utilisées en restauration écologique ou pour la stabilisation des sols. C'est le cas pour le marcottage (Saley *et al.* 2003), le drageonnage (Bellefontaine *et al.* 2003) et la division de touffes.

La multiplication des plantes par la voie végétative permet notamment de reproduire des végétaux ne produisant pas ou peu de graines, ou bien des végétaux produisant des graines mais dont la germination n'est pas maîtrisée. La famille des Myrtaceae, avec ses 234 espèces endémiques, dont 136 recensées en maquis minier et 71 qui y sont exclusivement inféodées (Jaffré *et al.* 2001), offre à ce titre une bonne illustration. En effet, cette famille botanique, la plus représentée en nombre d'espèces en Nouvelle-Calédonie et une des plus structurantes des maquis miniers, reste relativement sous-utilisée en revégétalisation car plusieurs de ses espèces produisent des graines de façon aléatoire et sont parfois sujettes à de fortes mortalités durant la phase de germination (S. McCoy, com. pers.). Un autre avantage du bouturage est la multiplication des plantes toute l'année, ce qui n'est pas toujours le cas en multiplication sexuée, notamment pour les espèces dont les semences ne peuvent se conserver plus de quelques mois (toutefois, la majorité des semences des espèces de maquis peuvent se conserver plusieurs années). En outre, pour un certain nombre d'espèces, le bouturage permet de raccourcir le cycle de production en pépinière et donc d'abaisser les coûts de production. Un autre intérêt du bouturage dans la restauration écologique des sites miniers est le raccourcissement de la période entre la plantation d'un végétal et sa fructification potentielle. En effet, pour un grand nombre de plantes, la floraison peut avoir lieu dès les premiers mois qui suivent la multiplication (figure 6.34). Il pourrait, par exemple, être intéressant de tester le développement de champs semenciers de végétaux ligneux à partir de plants produits par bouturage (Jaffré & Rigault 1991).

Comme toute technique, la multiplication végétative présente également des inconvénients. Parmi ceux-ci, l'impossibilité ou l'extrême difficulté pour certaines espèces ou pour certains clones d'être bouturés (figure 6.35) et la transmission de maladies et virus déjà présents dans les pieds mères peuvent être des facteurs limitants. Tout comme pour la multiplication sexuée, il faudra avoir accès au matériel végétal, à moins de disposer d'un parc de pieds mères constitué d'individus génétiquement diversifiés, qu'il faudra alors entretenir. Dans une optique de restauration, la multiplication végétative présente aussi l'inconvénient de réduire la base génétique des populations végétales multipliées, notamment si le matériel végétal n'est collecté que sur un nombre restreint de pieds mères. Enfin, peu d'études ont été conduites pour connaître le comportement à moyen et à long terme *in situ* de plantes multipliées par bouturage. En effet, l'appareil racinaire adventif caractéristique des plantes bouturées pourrait les rendre moins compétitives pour l'absorption de l'eau et des éléments minéraux, voire plus sensibles à l'arrachement en cas de coups de vent et de fortes pluies.



Figure 6.34 : Jeune plant raciné et fleuri de *Cloezia buxifolia*.

© IAC / G. Gâteblé



Figure 6.35 : Bouture enracinée de *Dracophyllum cosmelioides*, espèce difficile à multiplier par bouturage (enracinement de 4 % en 171 jours).

© IAC / V. Lemay

4.3.2. Revue des travaux réalisés en Nouvelle-Calédonie

Les premiers essais significatifs de multiplication végétative en vue de la réhabilitation d'anciennes mines en Nouvelle-Calédonie ont été entrepris par Jaffré et Rigault (1989) et poursuivis dans les années suivantes (Jaffré & Pelletier 1992, Jaffré *et al.* 1993) pour le compte de la Société Le Nickel. Dans ces premiers temps (Jaffré & Rigault 1989), diverses techniques de multiplication végétative ont été testées et des succès ont été enregistrés pour *Agatea longipedicellata*, *Bocquillonina sessiliflora*, *Oxera neriifolia*, *Pteripterygia marginata*, *Phyllanthus aeneus* et *Scaevola montana* par bouturage, pour *Storckiella pancheri* par marcottage ainsi que pour *Machaerina (ex-Baumea) deplanchei* et *Lepidosperma perteres* par division de touffe. D'autres espèces ont été bouturées avec plus ou moins de succès par la suite, notamment *Cunonia atrorubens*, *Dracophyllum ramosum*, *Myrtastrum rufo-punctatum*, *Styphelia cymbulae* et *Tristaniopsis calobuxus* (Petinot 1991), *Phyllanthus buxoides*, *P. montrouzieri*, *Normandia neocaledonica* et *Tristaniopsis glauca* (Jaffré *et al.* 1993), *Cloezia aquarum*, *C. artensis*, *Hibbertia lucens*, *H. tontoutensis*, *Hybanthus caledonicus* et *Longetia buxoides* (Jaffré & Pelletier 1992), *Garcinia neglecta*, *Hibbertia pancheri*, *Melaleuca gnidioides*, *Metrosideros operculata* et *Neocallitropsis pancheri* (Cornu *et al.* 2001), *Cunonia macrophylla* et *Geissois pruinosa* (Fogliani 2002).

Plus récemment, les travaux de recherche visant à identifier les plantes endémiques et indigènes potentiellement ornementales ont conduit l'Institut agronomique néo-calédonien à développer les techniques de multiplication végétative, notamment le bouturage (Gâteblé & Pastor 2006, Gâteblé 2009^a, Gâteblé 2009^b). Depuis 2006, la Station de recherche agronomique de Saint-Louis (Institut agronomique néo-calédonien) réalise également des essais de bouturage d'espèces à germination problématique et d'espèces rares et menacées, sous convention, pour Vale Inco Nouvelle-Calédonie (figure 6.36 ; Lemay & Gâteblé 2007, Lemay *et al.* 2009) et Koniambo Nickel SAS (Wamytan & Gâteblé 2007, Udo & Gâteblé 2009). L'ensemble de ces travaux a permis de contribuer à l'amélioration des connaissances pour 112 taxa répertoriés en maquis minier par Jaffré *et al.* (2001), 110 étant endémiques à la Nouvelle-Calédonie.

Ces taxa sont répartis en 110 espèces appartenant à 61 genres différents, dont 15 genres endémiques, et à 27 familles botaniques. En outre, 21 de ces espèces sont classées sur la liste rouge de l'UICN. Un succès du bouturage a été enregistré pour 101 taxa, ce qui représente plus de 90 % de réussite spécifique. Ce succès global masque cependant d'énormes disparités quant à l'aptitude réelle des taxa testés à la multiplication par bouturage. En effet, pour certaines espèces, même si le taux d'enracinement est bas (5 %) ou même si le temps d'apparition de racines est très long (jusqu'à un an), nous avons considéré qu'il était possible de les multiplier de cette manière. C'est le cas, notamment, pour les espèces appartenant aux Sapotaceae (*Planchonella*), aux Rubiaceae (*Bikkia*) et à certaines Myrtaceae (*Tristaniopsis*). D'un point de vue pratique, le bouturage de ces espèces récalcitrantes ne pourra s'envisager que dans certaines situations, en particulier pour la sauvegarde de plantes menacées en conservation *ex situ*, surtout en cas de destruction imminente.

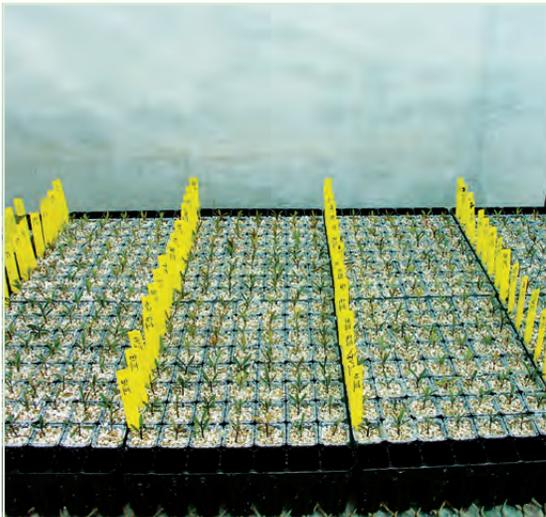


Figure 6.36 : Aperçu d'un essai de bouturage sur *Cloezia aquarum*.



Figure 6.37 : Bouture enracinée de *Corchorus neocaledonicus*, espèce facile à multiplier par bouturage (enracinement > 90 % en 21 jours).

Pour être économiquement viables en revégétalisation des sites miniers, les espèces à envisager doivent en effet s'enraciner rapidement et facilement, selon les critères utilisés pour la sélection des plantes ornementales endémiques potentielles (figure 6.37). Nos résultats montrent notamment que les taxa appartenant aux Elaeocarpaceae (*Dubouzetia*), aux Euphorbiaceae (*Phyllanthus*), aux Lamiaceae (*Oxera*) et aux Proteaceae (*Grevillea*) peuvent être facilement bouturés. Il n'est toutefois pas possible de généraliser et de prédire l'aptitude au bouturage des taxa car d'autres exemples montrent des différences importantes d'aptitude au bouturage en fonction des espèces au sein d'un même genre, voire en fonction des clones au sein d'une même espèce. De bonnes illustrations de cette problématique se rencontrent dans la famille des Myrtaceae, au sein des genres *Cloezia* (Lemay *et al.* 2009), *Metrosideros* et *Xanthostemon*, ainsi que dans d'autres genres de différentes familles, tels que *Cunonia*, *Hibbertia* et *Pittosporum*.

En outre, les espèces envisageables en restauration doivent également avoir une croissance suffisante une fois le stade du bouturage passé. Le tableau 6.4, s'appuyant sur ces différents critères, présente les taxa, parmi ceux que nous avons testés, ayant *a priori* les meilleures potentialités pour la revégétalisation sur terrains miniers.

Tableau 6.4 : Espèces présentes en maquis minier pouvant se multiplier aisément par bouturage et ayant un potentiel en revégétalisation. (Gâteblé, com. pers)

Famille	Taxon	Statut I / E	Unité de végétation	Répartition géographique (Grande Terre)
Apocynaceae	<i>Melodinus phylliraeoides</i>	E	LM	Large
Cunoniaceae	<i>Cunonia deplanchei</i>	E	MR*	Sud
Cunoniaceae	<i>Geissois magnifica</i>	E	M	Est
Cunoniaceae	<i>Geissois pruinosa</i> var. <i>pruinosa</i>	E	M	Sud
Dilleniaceae	<i>Hibbertia deplancheana</i>	E	M	Nord-Ouest
Dilleniaceae	<i>Hibbertia tontoutensis</i>	E	M	Tontouta
Elaeocarpaceae	<i>Dubouzetia campanulata</i>	E	M	Est et Sud
Elaeocarpaceae	<i>Dubouzetia confusa</i>	E	M	Sud
Elaeocarpaceae	<i>Dubouzetia elegans</i> var. <i>elegans</i>	I	FM	Large
Goodeniaceae	<i>Scaevola coccinea</i>	E	M	Tontouta
Lamiaceae	<i>Oxera baladica</i> subsp. <i>baladica</i>	E	FM	Large
Lamiaceae	<i>Oxera brevicalyx</i>	E	LM	Nord-Ouest
Lamiaceae	<i>Oxera gmelinoides</i>	E	FM	Sud
Lamiaceae	<i>Oxera neriifolia</i> subsp. <i>neriifolia</i>	E	FM	Large
Malvaceae	<i>Corchorus neocaledonicus</i>	E	M	Nord-Ouest
Myrtaceae	<i>Carpolepis laurifolia</i> var. <i>laurifolia</i>	EE	FM	Large
Myrtaceae	<i>Cloezia aquarum</i>	EE	MR*	Sud
Myrtaceae	<i>Cloezia artensis</i> var. <i>artensis</i>	EE	LM	Large
Myrtaceae	<i>Cloezia buxifolia</i>	EE	MR*	Sud
Myrtaceae	<i>Melaleuca gnidioides</i>	E	MR*	Sud
Myrtaceae	<i>Metrosideros nitida</i>	E	FM	Large (sauf N.-O.)
Myrtaceae	<i>Metrosideros operculata</i>	E	FMR*	Large
Myrtaceae	<i>Myrtastrum rufo-punctatum</i>	EE	M	Large
Myrtaceae	<i>Uromyrtus artensis</i>	E	M	Large
Myrtaceae	<i>Xanthostemon aurantiacus</i>	E	MR	Sud
Myrtaceae	<i>Xanthostemon longipes</i>	E	M	Tontouta
Myrtaceae	<i>Xanthostemon myrtifolius</i>	E	MR*	Sud
Oleaceae	<i>Osmanthus austrocaledonicus</i>	E	MR	Large
Phyllanthaceae	<i>Phyllanthus buxoides</i>	E	M	Nord-Ouest
Phyllanthaceae	<i>Phyllanthus koniamboensis</i> var. <i>koniamboensis</i>	E	M	Koniambo
Picrodendraceae	<i>Longetia buxoides</i>	EE	M	Large
Proteaceae	<i>Beauprea spathulaefolia</i>	EE	M	Large
Proteaceae	<i>Grevillea exul</i>	E	M	Large
Proteaceae	<i>Grevillea gillivrayi</i>	E	M	Sud et Centre
Proteaceae	<i>Grevillea meisneri</i> var. <i>meisneri</i>	E	M	Nord-Ouest
Salicaceae	<i>Casearia kaalensis</i>	E	M	Nord-Ouest

E : taxa endémique ; EE : genre endémique ; I : taxon indigène ; * taxon rivulaire ou de zones humides ; F : forêt humide ; L : forêt sèche ; M : maquis minier ; R : zones humides.

En dehors de ces travaux d'organismes de recherche, de l'IRD, de l'IAC et de l'UNC en multiplication végétative, d'autres espèces sont reproduites par bouturage pour la revégétalisation des sites miniers, notamment *Hibbertia pulchella*, *Longetia buxoides*, *Melaleuca gnidioides*, *Metrosideros nitida*, *Myrtastrum rufo-punctatum*, *Normandia neocaledonica*, *Oxera neriifolia* var. *neriifolia*, *Podocarpus novaecaledoniae*, *Sannantha leratii* et *Uromyrtus emarginata* (S. McCoy & T. Leborgne, com. pers.), *Bocquillonina* spp., *Cloezia artensis*, *C. aquarum*, *Cupaniopsis* spp., *Geissois pruinosa*, *Guioa* spp., *Hibbertia bouletii*, *H. lucens*, *H. vieillardii*, *Jasminum* spp., *Longetia buxoides*, *Macaranga* spp., *Metrosideros* spp., *Myrtastrum rufo-punctatum*, *Normandia neocaledonica*, *Oxera* spp., *Pancheria rivularis*, *Peripterygia marginata*, *Phyllanthus* spp., *Scaevola beckii*, *S. cylindrica*, *S. montana* et *Xanthostemon aurantiacus* (J.-L. Ruiz, com. pers.).

4.3.3. Adaptation de la méthode aux espèces endémiques du maquis minier

Cette paragraphe, basée sur nos expérimentations, a pour objectif la présentation des principaux modes opératoires, de la récolte du matériel végétal *in situ* à sa production en conteneurs. Les principes généraux de la multiplication végétative sont notamment bien détaillés dans des ouvrages spécialisés (Boutherin & Bron 2002, Margara 1989).

Récolte des boutures

Tout comme pour la collecte de graines, la récolte de boutures doit se préparer en amont. En tout premier lieu, le collecteur doit obtenir auprès des services provinciaux compétents et, le cas échéant, du propriétaire foncier (privé, coutumier...) une autorisation écrite de collecte de matériel végétal. Il faudra également cibler les espèces à récolter en fonction de la saison, de l'éloignement du site, des besoins et des capacités d'accueil en pépinière. Les conditions climatiques peuvent aussi influencer les jours, voire les heures, de récolte. Il est en effet préférable de récolter les boutures en début de matinée (pendant l'état de turgescence maximale des tissus végétaux) et durant les périodes brumeuses et pluvieuses afin d'éviter la collecte de rameaux en état de stress hydrique lors d'épisodes ensoleillés et ventés (figure 6.38).



Figure 6.38 : Récolte de boutures, par un sous-traitant spécialisé, sur *Kermadecia pronyensis*.

© IAC / G. Gâteblé



Matériel nécessaire lors de la collecte :

- Sécateur
- Glacière (sans glace)
- Papier journal
- Eau fraîche
- GPS
- Presse pour herbier
- Étiquettes

Sur le terrain, il est utile de faire un diagnostic rapide de la population de l'espèce ciblée afin de repérer la quantité approximative de matériel végétal pouvant être prélevé. Il faudra notamment s'attacher à regarder les maladies et ravageurs, voire les plantes parasites (*Cassytha filiformis*), présents, à diagnostiquer des carences minérales et chloroses (jaunissements et autres colorations inter-nervaires douteuses), à observer le stade de développement (végétatif ou reproductif) des plantes et à repérer la présence de réitérations ou de jeunes pousses vigoureuses. Les rameaux récoltés à l'aide du sécateur doivent être enroulés dans des feuilles de papier journal bien humidifiées au fur et à mesure afin d'éviter leur déshydratation, puis placés dans une glacière (à l'ombre et sans glace). Le repérage de la population ciblée à l'aide d'un GPS et le prélèvement d'un échantillon botanique pour herbier pourront être utiles pour des vérifications ultérieures (identification, retour sur le lieu de collecte si la population est de bonne qualité...). La mise en milieu d'enracinement peut se faire dans l'après-midi de la récolte mais peut également attendre le lendemain.

La constitution d'un parc de pieds mères à proximité de la pépinière peut être une solution pour s'affranchir des récoltes aléatoires *in situ*, à condition de bien identifier les différentes plantes en culture (massif de provenance) et de réserver cette méthode aux espèces dont on ne maîtrise pas la multiplication à partir de graines (fructifications faibles et aléatoires, ou germinations non encore maîtrisées). La récolte des boutures peut également se faire sur les jeunes plants en cours de production et pouvant supporter une taille.

Ces deux techniques présentent plusieurs avantages.

Elles permettent :

- d'éviter des déplacements sur le terrain ;
- de pouvoir mettre en enracinement les rameaux dès leur collecte ;
- de réaliser le bouturage à la bonne époque en fonction de l'état de lignification des rameaux ou de leur fructification ;
- d'avoir des plantes saines (indemnes de maladies et de parasites, correctement fertilisées...).

Facteurs influençant la rhizogenèse

De nombreux facteurs peuvent influencer l'enracinement des rameaux de végétaux :

Facteurs physiologiques

L'âge de la plante peut fortement influencer l'aptitude de ses rameaux à se bouturer. En pratique, il est généralement plus aisé de bouturer une plante jeune qu'une plante âgée, car les tissus d'une plante âgée ont souvent plus de mal à se différencier, ou bien parce que d'autres éléments physiologiques comme le stade ontogénique entrent en compte (Gâteblé & Pastor 2006).

L'exposition lumineuse de la plante mère peut également entrer en considération. La bibliographie relate des exemples où les boutures issues de pieds mères soumis à une forte intensité lumineuse s'enracinent moins bien que celles prélevées sur des pieds mères cultivés à de plus faibles intensités lumineuses. Un essai réalisé sur *Leptostylis goroensis* croissant dans trois conditions différentes a cependant montré une tendance inverse, mais non significative d'un point de vue statistique (Lemay & Gâteblé 2007).

Facteurs génétiques

Avec les récents progrès de la génétique, des chercheurs ont déjà montré que les individus d'une même espèce végétale n'étaient pas forcément égaux quant à leurs capacités à se multiplier végétativement (Marques *et al.* 1999). En Nouvelle-Calédonie, différents clones d'une même espèce de *Cloezia* peuvent présenter des capacités très hétérogènes quant à leur enracinement (de 0 à 90 %). Même si les facteurs épigénétiques n'ont pu être mis en évidence dans ce cas précis, ils sont fortement soupçonnés (Lemay *et al.* 2009).

Autres facteurs

La période de l'année peut avoir son importance en fonction des espèces végétales. Bien que le bouturage soit possible toute l'année en Nouvelle-Calédonie, la période la plus favorable semble être le début de la saison chaude (octobre à décembre), mais il n'est pas possible de généraliser. Il faudra plutôt tenir compte de l'état de croissance, tel qu'observé, par exemple, sur *Planchonella latihila* (Lemay & Gâteblé 2007). Les rameaux de type semi-ligneux à croissance rapide et à entre-nœuds longs sont en général préférables.

Le bouturage des plantes à latex (certaines Apocynaceae, Euphorbiaceae, Sapotaceae...) peut poser des problèmes à cause de la formation d'un bouchon de latex (figure 6.39) qui empêcherait la néoformation de racines (voir Yates *et al.* 2006, par exemple). L'essai réalisé sur *Planchonella latihila* (Lemay & Gâteblé 2007) n'a pas été concluant, mais d'autres essais sont en cours, notamment sur *Cerberiopsis obtusifolia*, *Cocconerion minus* et *Ochrosia mulsantii* (Udo & Gâteblé 2009).



Figure 6.39 : Accumulation de latex à la base d'une bouture de *Cerberiopsis obtusifolia* n'ayant reçu aucun prétraitement.

© IAC/H. Udo

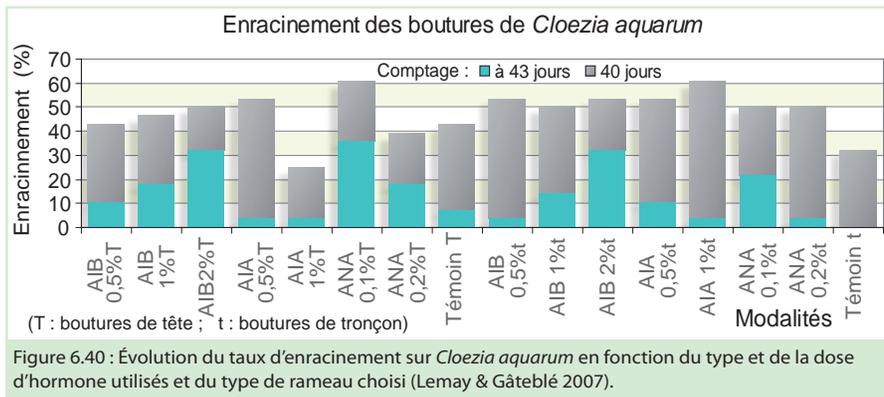
La réalisation pratique des boutures

Différents types de boutures sont possibles, mais les plus utilisés sont ceux de rameaux feuillés. L'état de lignification du rameau prélevé joue un rôle important dans la réussite de la multiplication. Les boutures dites semi-ligneuses (semi-herbacées) sont les plus couramment employées car elles offrent un bon compromis de réussite par rapport aux boutures herbacées et ligneuses. En fonction des espèces, le niveau de prélèvement des rameaux (tête ou tronçon) pourra avoir son importance pour la réussite de l'enracinement (figure 6.40).

Pour les espèces à tendance monocaule et en cas de nécessité de bouturage (exemple de plants qui seront détruits au cours du décapage), il sera cependant conseillé de prélever des boutures sur des axes orthotropes plutôt que sur des ramifications plagiotropes, afin d'avoir un développement normal de l'architecture de la plante multipliée.

En pratique, les boutures de rameaux feuillés font entre 3 et 10 centimètres de hauteur avec en général 2 à 4 entre-nœuds. Les boutures sont « habillées » pour ne laisser que quelques feuilles (2 à 5) dans la partie supérieure. Si les feuilles de l'espèce à multiplier sont de grande taille, elles sont également réduites d'un tiers à deux tiers de leur surface pour limiter l'évapotranspiration. Une coupe nette sous un nœud est généralement pratiquée et les stipules et pétioles de la base sont enlevés.

L'application d'hormones végétales de type auxines améliore généralement en qualité (vitesse d'enracinement, nombre et longueur des racines) et en quantité (pourcentage d'enracinement) la reprise des boutures. En fonction des espèces, voire des types de rameaux, il peut s'avérer utile de tester différentes hormones de bouturage (AIA, AIB, ANA) ainsi que plusieurs dosages, voire modes d'application, afin d'optimiser l'enracinement (figure 6.40).



Pendant toute la durée de la préparation des boutures, il faudra veiller à ce qu'elles ne se dessèchent pas sous l'influence de courants d'air ou d'une exposition au soleil, par exemple.

Le choix d'un substrat sain et possédant d'excellentes propriétés physiques (bonnes capacités de rétention en air et en eau) est impératif. À la Station de recherche agronomique de Saint-Louis (Institut agronomique néo-calédonien), toutes les espèces sont bouturées dans un mélange de perlite (50 %) et de vermiculite (50 %). D'autres substrats comme la tourbe, la fibre de coco et certains sables de rivière sont également utilisables. Tous les essais sont réalisés avec des plaques de bouturage dans lesquelles sont placés des alvéoles transparentes pour suivre l'enracinement.

Le suivi pendant la phase d'enracinement

La maîtrise des facteurs du milieu est prépondérante dans la réussite de la multiplication végétative. Le choix des investissements (serre, irrigation, chauffage, ventilation...) doit se réaliser en fonction des objectifs fixés (Gâteblé & Poitchili 2007).

L'hygrométrie relative doit être maintenue à un maximum (le plus proche possible de 100 %) pour éviter la déshydratation des rameaux feuillés, d'autant plus s'ils sont de type herbacé (figure 6.42). Le maintien d'une forte hygrométrie relative s'effectue idéalement par des systèmes dits de « fog » (brouillard très fin), voire de « mist » (taille des gouttelettes d'eau plus importante). L'arrosage peut être lié au facteur précédent en fonction du type de système choisi. Idéalement, le maintien de l'hygrométrie relative et les fréquences d'arrosage sont effectués à l'aide de systèmes automatiques prenant en compte la température, le rayonnement global et l'hygrométrie relative.



© IAC / H. Udo

Figure 6.41 : Enracinement d'*Ochrosia mulsantii*, en cellules PVC transparentes, avec perlite et vermiculite.



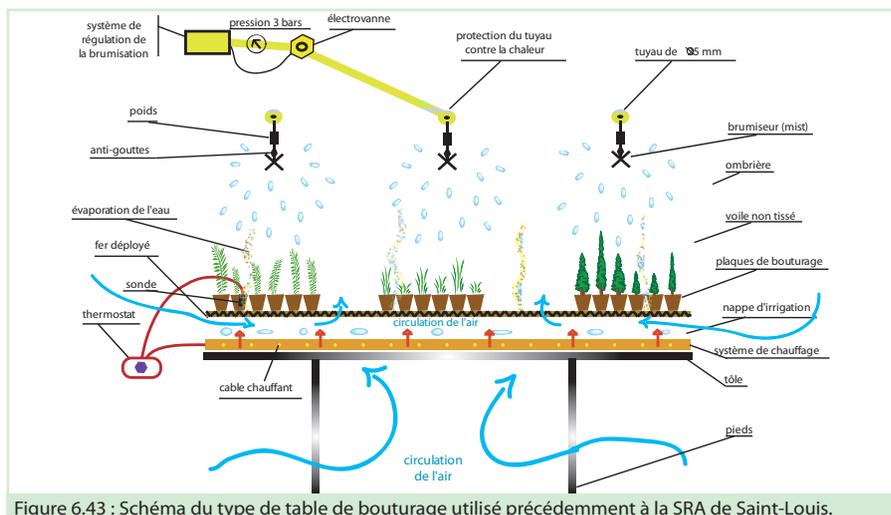
© IAC / H. Udo

Figure 6.42 : Aperçu de l'intérieur de la serre de multiplication utilisée à la SRA de Saint-Louis.

Une protection contre le soleil est importante pour les explants sensibles aux brûlures, notamment en saison chaude. Il faudra alors adapter un système avec une toile à ombrer. En saison fraîche, il est recommandé d'utiliser un système de chauffage de couche, particulièrement la nuit, afin de maintenir une température de l'ordre de 20-22 °C dans le substrat. La température de l'air doit également être contrôlée pour se rapprocher au maximum de celle du substrat. Des systèmes de ventilation automatisés couplés au système de brumisation sont efficaces pour maintenir des températures de moins de 30 °C en saison chaude. Pour une maîtrise de tous ces facteurs, une serre de type tunnel paraît nécessaire (figure 6.43).

Un suivi de l'état sanitaire doit être assuré hebdomadairement pour retirer les feuilles tombées et enlever les alvéoles dont les rameaux se sont nécrosés. Des traitements phytosanitaires à l'aide de fongicides adaptés sont parfois nécessaires pour limiter l'extension de maladies cryptogamiques.

L'évolution de l'enracinement doit être suivie afin de déterminer le bon stade de rempotage des jeunes plants (figure 6.41). En pratique, il faut généralement repoter les boutures enracinées quand les racines sortent sous la plaque.



© IAC / A. Tardivel

Figure 6.43 : Schéma du type de table de bouturage utilisé précédemment à la SRA de Saint-Louis.

La production des plants

À l'instar de l'acclimatation d'un jeune plant issu de culture *in vitro*, les jeunes boutures doivent être acclimatées progressivement après leur premier repotage. Les jeunes plants sortent en effet de conditions très confinées en serre de multiplication et des étapes de transition (baisse progressive de l'hygrométrie relative, du pourcentage d'ombrage de la toile à ombrer, de l'irrigation) doivent être ménagées avant leur sortie sur une aire de culture située en plein soleil.

Les jeunes plants issus de boutures ne développent généralement pas un système racinaire pivotant car leurs racines sont adventives. Pour cette raison, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à des conteneurs très profonds comme pour les plants issus de semis. Les substrats à utiliser sont à adapter en fonction des sites à restaurer et des espèces cultivées. Un essai réalisé sur 15 substrats différents pour l'horticulture ornementale a montré que des différences significatives pouvaient être observées sur la croissance de *Metrosideros operculata* var. *operculata* en fonction des matériaux utilisés (Gâteblé & Wamytan 2008).

4.3.4. Perspectives

Malgré ces précédentes considérations, les techniques de multiplication végétative sont sous-utilisées pour la restauration des sites miniers en Nouvelle-Calédonie comparativement aux techniques de multiplication sexuée, en pépinière et par ensemencement hydraulique, et comparativement aux travaux de réhabilitation de sites dégradés (notamment berges, dunes...) menés ailleurs dans le monde. Plusieurs raisons pourraient expliquer cette relative désaffection du bouturage pour la restauration de sites miniers en Nouvelle-Calédonie :

- le manque de références locales anciennes ;
- la nécessité, pour obtenir de bons résultats, d'infrastructures (serre, irrigation...) plus lourdes et plus coûteuses que celles utilisées pour la multiplication sexuée ;
- et la volonté de maintenir une importante diversité génétique intraspécifique dans les plans de revégétalisation.

À mesure que les connaissances sur les potentialités de bouturage des plantes endémiques de Nouvelle-Calédonie s'améliorent, les industriels s'intéressent à la mise en œuvre de ces « nouvelles » pratiques, notamment Vale Inco et KNS qui orientent désormais leurs études non plus uniquement vers les espèces rares ou menacées, mais aussi vers les espèces dominantes des maquis ligno-herbacés et des formations para-forêts dont la germination n'est pas maîtrisée (S. McCoy, com. pers.). Des études ultérieures plus exhaustives devraient également permettre de sélectionner plus finement les espèces candidates à la restauration des sites via des méthodes de bouturage.

Le manque, voire l'absence, de recul sur le comportement de végétaux bouturés et réimplantés *in situ* à grande échelle étant flagrant en Nouvelle-Calédonie, il n'est pas possible, à l'heure actuelle, de discerner concrètement les avantages (gain de productivité, stabilisation du sol par le système racinaire adventif, auto-ensemencement naturel par fructification plus rapide...) des inconvénients (plus grande sensibilité aux maladies, aux ravageurs et aux perturbations climatiques, perte de diversité ou sélection de matériel génétique...) émanant de l'utilisation de la multiplication végétative. L'observation de la recolonisation par la strate arbustive d'un site restauré sur les moyen et long termes en comparant les deux types de techniques (sexuée *versus* asexuée, sexuée et asexuée en association) pourrait donner des éléments de réponse à ce type de question.

4.4. Préparation des substrats à revégétaliser

Le processus naturel de la succession végétale peut conduire, à long terme, à la restauration progressive d'un milieu dégradé sur roches ultramafiques. C'est le cas notamment après incendie (cf. section 3 dans ce chapitre). Pourtant, dans bien des cas, ce processus naturel n'a pas lieu, en particulier si l'horizon humifère a été totalement ou partiellement enlevé. Ainsi, sur matériaux saprolitiques, la couverture végétale pionnière demeure absente ou clairsemée avec un taux de recouvrement qui n'excède généralement pas 20 % plus d'un siècle après l'arrêt de l'exploitation du site (Jaffré 1974). Dans ces situations, seule une assistance appropriée est susceptible d'initier ou de dynamiser le processus de la reconquête végétale.

Conditions écologiques des substrats à revégétaliser

La revégétalisation concerne différentes catégories de sites, pouvant présenter chacune des substrats et des conditions de milieux très variés : on distingue les verses de stériles, les carrières d'exploitation, les pistes d'accès, les merlons de pistes, les talus de routes et de carrières, les zones de stockage et d'activités annexes, ainsi que les résidus de traitements industriels stockés sur sites miniers et recouverts d'une couche épaisse de latérite. Il s'agit, d'une manière générale, de biotopes ouverts et dénudés, très exposés à l'insolation et au vent, soumis à des conditions d'aridité particulièrement sévères durant les périodes sèches. Ces conditions rendent très difficiles l'installation et le maintien de germinations, en raison de très fortes élévations de la température et d'un déficit hydrique accentué par une évapotranspiration intense en cours de journée.

Amélioration des conditions physiques des substrats

Les caractéristiques physiques du substrat des sites à revégétaliser sont souvent peu propices à un bon développement des végétaux. Les différentes catégories de substrats sont très hétérogènes, montrant des variations importantes de granulométrie et de réserve en eau utile (tableau 6.6). Plusieurs d'entre eux ont une texture grossière, facilitant une dessiccation rapide. Ainsi, les matériaux rocheux des anciennes carrières (ou terrasses d'excavation), parfois recouverts d'une faible épaisseur de substrat meuble, sont peu favorables à la pénétration des racines et constituent des milieux dépourvus de réserves en eau utile, devenant rapidement arides à la moindre période sèche (figure 6.44). D'autres substrats ont une texture fine et sont facilement compactés par le passage de véhicules, le phénomène étant accentué du fait de faibles teneurs en matière organique. Ainsi, les verses à stériles et les anciennes pistes sont fréquemment constituées de matériaux compactés, qui s'opposent à la pénétration des racines en profondeur et ne retiennent pas l'eau de pluie qui ruisselle en surface.



Figure 6.44 : Carrière d'exploitation (Kouaoua).

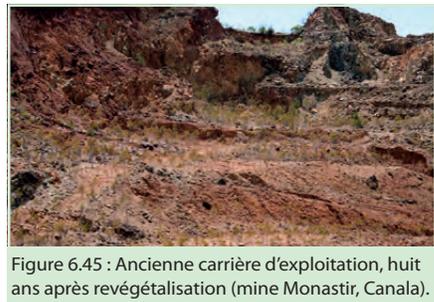


Figure 6.45 : Ancienne carrière d'exploitation, huit ans après revégétalisation (mine Monastir, Canala).

Dans ces différents cas, il est nécessaire de décompacter mécaniquement la partie supérieure du substrat, sur une profondeur suffisante (au moins 50 cm), avant toute tentative de végétalisation. En présence d'une proportion trop importante de matériaux rocheux, en plus d'un décompactage, il est préférable de recourir à leur recouvrement par des matériaux assez fins (latérite, idéalement du topsoil, cf. ci-après), sous peine de voir les plantations ou les semis végéter, voire dépérir (figure 6.45). Après décompactage, il est nécessaire de planter rapidement, de façon à éviter un tassement naturel, qui se produit surtout lorsque les matériaux sont argileux et pauvres en matière organique.

Le reprofilage des sites et la réduction de la déclivité du terrain sont souvent indispensables pour canaliser l'écoulement des eaux superficielles et réduire les risques d'érosion, notamment au pied des talus de carrières et des verses, ainsi que sur les anciennes routes. Les règles de l'art édictées en matière de déclivité maximale et de longueur de pente doivent ainsi être respectées (un talus de 30° de pente et de moins de 10 m de long semble en général convenir) (figures 1.5, 6.47 à 6.49), en accompagnement des autres procédés géotechniques pour la lutte contre l'érosion (SLN 2005). La meilleure période d'intervention pour le profilage se situe en dehors de la saison pluvieuse, en principe au cours du second semestre, idéalement entre les mois de septembre et de novembre. Si la période ne peut pas être respectée ou si les pluies sont trop importantes, une solution consiste à recouvrir rapidement le substrat par de la paille hachée (« mulch »), ou à installer un géotextile biodégradable (tel que de la toile de jute), ou à épandre un topsoil grossier, contenant en mélange de la matière végétale (branchages et racines) et des blocs rocheux : cette méthode s'est révélée très efficace sur des talus de verses préalablement enrochés, avec des pentes de 30° et mesurant environ 7 m de long, recouverts de topsoil, montrant très peu d'érosion en trois ans d'observations (figure 6.49 ; L'Huillier, obs. pers.). Il est aussi possible de semer des graines d'espèces « nourrices » à croissance rapide et à faible durée de vie lorsque les risques d'érosion sont particulièrement élevés (cf. section 4.5 suivante).

De plus, il est souvent constaté que les anfractuosités rocheuses constituent des microsites favorables à l'installation de nombreuses espèces telles que *Normandia neocaledonica*, *Schoenus juvenis* ou encore *Tristaniopsis guillainii* (figure 6.46). Ces microsites présentent de meilleures conditions d'alimentation hydrique (ralentissement et retenue d'eaux de ruissellement, dépôt de particules fines capables de stocker de petites quantités d'eau) et offrent aux germinations l'ombrage nécessaire et l'abri du vent pour amoindrir l'assèchement. Il est donc utile, chaque fois que cela est possible, d'épandre des matériaux grossiers contenant des blocs rocheux (en proportion faible à modérée, un excès risquant de rendre le substrat trop filtrant), ainsi que de la matière organique brute, que ce soit en zone non pentue ou en zone de pente relativement forte (jusqu'à 30° environ). Cette pratique est systématiquement mise en œuvre sur de nombreux sites miniers de par le monde. Ainsi, elle participe notamment à la réussite des opérations de restauration conduites par la société Alcoa, dans le Sud-Ouest australien.



Figure 6.46 : Nombreuses germinations de *Tristaniopsis guillainii*, en majorité au niveau d'anfractuosités rocheuses (ancienne piste minière, Koniambo).

© IAC / L'Huillier

Réponses apportées aux contraintes chimiques

Elles sont de deux natures, chimique, par apports de fertilisants, et biologique, par le choix judicieux du matériel végétal utilisé.

Les caractéristiques chimiques des substrats à revégétaliser sont également très variables. Elles tiennent à la nature du sol (horizon pédologique) mis à nu ou à la composition des matériaux déplacés (tableau 6.5). Les saprolites ainsi que les latérites jaunes, situées immédiatement au-dessus des saprolites dans le profil pédologique, sont anormalement riches en magnésium, en silice et en nickel. Les latérites rouges, qui les recouvrent, sont moins riches en ces éléments, tandis qu'elles ont des teneurs plus élevées en fer et un pH nettement acide. Ces derniers caractères sont encore plus accentués dans les cuirasses ferrallitiques, stade ultime de l'altération de la roche (péridotite) et de l'évolution pédologique.

Tableau 6.5 : Composition chimique d'une péridotite et des différents faciès d'altération (d'après Pelletier 1990^b, Jaffré & Rigault 1991^a, Jaffré *et al.* 1994^c, L'Huillier, *com. pers.*).

	SiO ₂ (%)	Mg (%)	FeO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ni (%)	pH
Péridotites (harzburgites)	41	43	7		0,3	-
Saprolites	15-45	5-35		10-30	1-5	6,5-7,8
Latérites	1-10	1-5		60-72	0,8-1,5	5,3-6,5
Cuirasses	0,1-2	0,3-1,5		75-78	0,3-0,8	4,2-5,5

Les différentes catégories de matériaux rencontrés sur sites miniers (tableau 6.6) ont en commun des teneurs très faibles en phosphore, en potassium et en calcium ; inversement, leurs teneurs en magnésium, en silice, en nickel et autres métaux sont élevées pour la plupart d'entre eux. Cela témoigne du caractère peu évolué des matériaux constituant la majorité des déblais (dominance de saprolites et de latérites jaunes). Les conditions de nutrition calcique sont de surcroît d'autant plus défavorables que les teneurs en magnésium sont excessives. Ainsi, les contraintes chimiques apparaissent d'une manière globale plus sévères sur terrasses d'excavation que sur verses à stériles et sur merlons.

En outre, ces sols décapés, tout comme les verses constitués d'un mélange d'horizons pédologiques, sont globalement appauvris en matière organique et consécutivement en azote (Jaffré *et al.* 1994^c) et en micro-organismes (Herrera *et al.* 2007), contrairement aux horizons supérieurs des sols en place (tableau 6.7), qui ne représentent qu'une faible proportion du profil pédologique.

Pour faire face à ces différentes contraintes, il est nécessaire d'utiliser des espèces végétales indigènes adaptées aux terrains miniers. Il est également important, principalement au cours des premiers stades de la revégétalisation, de corriger les carences en certains éléments nutritifs des substrats, afin d'accélérer l'installation des espèces plantées ou ensemencées, et d'améliorer leur croissance et le taux de recouvrement (Jaffré *et al.* 1994^c, Sarrailh 2001, Lagrange 2009). Ces améliorations chimiques du substrat peuvent être obtenues par des apports de sol de meilleure qualité (voir partie suivante) ou par des apports d'éléments nutritifs, la combinaison des deux méthodes étant préférable. Des apports de nutriments peuvent être réalisés à l'aide de fertilisants, mais il est important que les types et les quantités apportés soient les plus appropriés (cf. ci-après).

Tableau 6.6 : Composition physico-chimique de différents substrats d'anciennes mines (d'après Jaffré & Rigault 1991^a). (n = nombre d'échantillons analysés)

	Verses à stériles miniers			Merlons (matériaux rapportés)	Terrasses d'excavation (n = 24)	Talus de routes et de carrières (n = 8)
	Matériaux désaturés (n = 6)	Matériaux faiblement désaturés (n = 20)	Matériaux peu évolués (n = 11)			
Argiles + limons fins (%)	3-43	1-13	1-15	2-48	3-30	-
Limons grossiers (%)	2-30	2-11	2-17	4-31	2-18	-
Sables (%)	40-94	82-95	68-97	35-95	64-94	-
Eau utile (%)	3-32,6	3-28,4	5,1-16,6	3,4-19,5	3,5-19,4	-
pH	5,6	6,5	7,2	7,4	7,1	7,0
Carbone (mg/g)	3,5	8,0	1,9	-	8,6	-
Azote total (mg/g)	0,08	0,34	0,13	0,33	0,33	0,32
Mat. organique (%)	0,6	1,4	0,3	-	1,5	-
C.E.C. (meq/100 g)	-	4,88	5,86	-	8,81	-
Ca ²⁺ (meq/100 g)	-	0,10	0,57	-	1,20	-
Mg ²⁺ (meq/100 g)	-	4,81	8,35	-	8,22	-
K ⁺ (meq/100 g)	-	0,07	0,01	-	0,06	-
Na ⁺ (meq/100 g)	-	0,12	0,08	-	0,12	-
Phosphore total (ppm)	46	37	24	107	19	40
Éléments totaux :						
SiO ₂ (%)	4,5	11,2	24,8	29,3	33,3	31,6
Fe (%)	48,5	39,0	23,6	24,3	17,7	26,7
Mn (%)	0,78	0,66	0,41	0,32	0,44	0,35
Ca (%)	< 0,01	0,02	< 0,01	0,03	0,02	0,02
Mg (%)	1,29	4,41	10,49	8,87	9,42	4,93
K (%)	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-
Na (%)	0,07	0,03	< 0,01	0,01	< 0,01	-
Ni (%)	1,30	1,92	2,11	1,14	2,70	1,77
Cr (%)	3,30	2,59	1,25	1,82	1,22	2,91

La plupart des éléments nutritifs étant déficients dans ces substrats, les fertilisants devront contenir : surtout de l'azote, du phosphore et du potassium, ainsi que, en petite quantité, des éléments secondaires (calcium, soufre) et des oligoéléments (cuivre, zinc, molybdène et bore, les autres étant présents en quantité naturellement suffisante). En général, un seul apport initial suffit, l'implantation de la végétation assure ensuite le recyclage d'une partie des éléments nutritifs.

Hormis le phosphore qui est fixé sur les oxydes de fer et qui n'est donc pas lixivié, la majorité des autres éléments (notamment l'azote et le potassium) sont très peu retenus dans ces substrats (par déficience du complexe argilo-humique) et sont donc rapidement lixiviés lors des épisodes pluvieux : les engrais minéraux du commerce de type NPK (par exemple 17-17-17) sont donc peu adaptés. Il est possible d'utiliser des engrais à libération lente qui permettent à la plante de bénéficier d'une dissolution de l'engrais étalée sur plusieurs mois (mais de coût élevé), ou des matières fertilisantes d'origine organique qui, au fur et à mesure de leur dégradation, vont libérer de nombreux minéraux (par exemple les boues de station d'épuration, contenant environ 5 % d'azote, 1 % de phosphore et 0,5 % de potassium, ou des composts, dont certains, comme le Biofert, sont en vente à la Chambre d'agriculture). De plus, ces apports de matière organique permettent de renforcer le complexe argilo-humique et de mieux retenir les éléments échangeables, comme le potassium. Ces matières fertilisantes sont en général peu dosées en phosphore et il est utile d'en rajouter : là encore, il est préférable d'éviter les formes chimiques les plus solubles (comme le « superphosphate triple » ou le 0-32-16) et de privilégier les phosphates naturels (phosphates de calcium) qui se dissolvent lentement et apportent en plus un peu de calcium (tels que le « Rock phosphate » ou le « Physalg », vendus également à la Chambre d'agriculture).

La quantité de matières fertilisantes à apporter doit être soigneusement considérée : en général, des apports faibles sur ces substrats permettent d'observer de nettes améliorations de la croissance des espèces inféodées aux terrains miniers. Des apports relativement élevés sont également possibles pour accélérer davantage le développement de ces espèces (bien que certaines ne supportent pas les excès, comme les Proteaceae à l'égard du phosphore).

Cependant, l'apport massif de fertilisants n'est pas la panacée en termes de restauration de biotopes diversifiés. Plusieurs problèmes risquent d'apparaître rapidement : en effet, l'augmentation de la fertilité accroît le risque d'implantation d'espèces exotiques indésirables, capables de s'installer de manière plus ou moins durable et d'entraver l'implantation recherchée d'espèces locales (des graminées importées s'observent encore plus de dix ans après sur certains sites fertilisés, voire trente ans dans certains cas, comme dans le Sud où l'espèce invasive *Imperata cylindrica* tend même à proliférer). La plupart de ces espèces se disséminent facilement, plusieurs ont un caractère envahissant avéré, d'autres pourraient le devenir par variation et sélection génétiques au sein de leurs descendances : ainsi, en voulant améliorer fortement la fertilité de ces substrats, on fait peser, de manière inattendue, une réelle menace sur la biodiversité exceptionnelle des milieux ultramafiques. En outre, l'installation d'espèces exotiques sur des substrats ultramafiques améliorés est généralement suivie d'autres perturbations, telles que l'augmentation de la fréquentation des terrains miniers par les cerfs, attirés par l'appétence des espèces exotiques (de nombreuses graminées utilisées sont des espèces fourragères), et qui causent des dégâts également à la végétation native environnante, par abrutissement de plantules et de jeunes pousses (Dionisio 2008).

Afin de concilier l'intérêt d'une fertilisation pour la croissance des espèces indigènes avec les risques sur l'environnement, il semble qu'un apport d'azote et de phosphore d'environ 100 kg/ha (de N et de P₂O₅) – accompagnés si possible des autres éléments nutritifs en quantité plus faible – soit un niveau moyen permettant d'obtenir de bons résultats,

un dosage de l'ordre de 500 kg/ha étant probablement une limite à ne pas dépasser (Lagrange 2009, L'Huillier, obs. pers ; figures 6.15 et 6.56). Il est toutefois possible de limiter les risques d'installation d'espèces exotiques en plaçant les fertilisants au fond des trous de plantation, ou en recouvrant le substrat fertilisé par des latérites non amendées, sur une épaisseur suffisante (environ 10 à 20 cm de latérite ou de topsoil frais).

Afin de limiter les apports d'azote, il est possible et recommandé de privilégier l'implantation de plantes capables de fixer l'azote atmosphérique (en particulier *Gymnostoma* spp., *Serianthes* spp.). Plantées en association avec des espèces non fixatrices d'azote, leur effet sur la croissance de ces dernières peut être très important (Bradshaw 1997^b).

Pour améliorer le rapport calcium/magnésium des substrats riches en magnésium, dont le pH est proche de la neutralité, l'apport de croûte calcaire, qui aurait pour conséquence d'élever encore le pH, ne peut pas être envisagé ; il est préférable de recourir à un apport de substrat différent (comme du topsoil, cf. partie suivante) et surtout d'utiliser des plantes adaptées (cf. chapitre 7 et tableaux de synthèse en annexe 8).

Les teneurs en métaux (le nickel en particulier) dans certains substrats peuvent être plus élevées que dans un sol en place (par exemple sur terrasse d'excavation). Elles sont susceptibles d'induire des phénomènes de toxicité. Comme de nombreuses espèces natives sont résistantes à ces métaux (cf. chapitre 3), elles peuvent être largement utilisées, en veillant toutefois à ce qu'elles soient aussi adaptées aux autres caractéristiques du milieu.

Tableau 6.7 : Composition physico-chimique de différents « topsoils » (horizon 0-5 cm) de maquis sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. (Source : IAC, L. L'Huillier)

	Plum	Tontouta	Thio	Tiébaghi	Goro
Granulométrie : Argile (%)	12,6	16,3	15,0	11,1	12,2
Limons fins (%)	23,6	33,8	31,1	24,2	29,4
Limons grossiers (%)	5,5	0,3	7,1	4,8	0,1
Sables fins (%)	16,6	10,6	13,5	10,0	11,3
Sables grossiers (%)	39,5	33,7	25,5	42,9	46,9
Réserve utile en eau (mm/cm)	0,77	0,78	0,72	0,70	0,79
pH eau	5,9	5,6	5,5	5,6	5,4
Carbone (mg/g)	42,8	37,7	32,9	44,7	28,8
Azote total (mg/g)	2,52	1,60	1,72	1,65	1,21
Mat. organique (%)	7,4	6,5	5,7	7,7	5,0
C.E.C. (meq/100 g)	16,8	10,6	11,1	12	8,4
Ca ²⁺ (meq/100 g)	2,88	0,97	0,34	3,32	1,54
Mg ²⁺ (meq/100 g)	1,63	1,04	1,60	7,92	1,34
K ⁺ (meq/100 g)	0,12	0,01	0,19	0,76	0,11
Na ⁺ (meq/100 g)	0,08	0,01	0,07	0,27	0,16
Taux de saturation (%)	28,1	19,1	19,8	100	37,5
Phosphore total (ppm)	109	172	118	185	215
Phosphore assimilable (ppm)	9	8	4	6	1
Éléments totaux : Fe (%)	34,5	46,2	42,8	37,3	40,7
Ni (%)	0,47	0,94	0,95	0,30	0,72

Apport de terre humifère

L'épandage sur les zones dénudées d'une couche de sol fertile ne provenant pas du site, comme des alluvions, ensemencées par des espèces exotiques, donne rapidement des résultats visibles. Cette solution est cependant coûteuse et ne permet d'améliorer que des surfaces limitées, en zones peu inclinées. En outre, elle n'entraîne aucune progression de la végétation au-delà de la surface traitée, ni une véritable fixation du sol car les racines ne s'étendent pas au substrat minier sous la couche de terre rapportée. Généralement, elle ne permet pas non plus l'implantation ultérieure d'espèces de la flore endémique. Seules quelques espèces locales à caractère ubiquiste, véhiculées par les alluvions, parviennent à s'implanter (*Dodonaea viscosa*, *Acacia spirorbis*...), ainsi que de nombreuses espèces banales à caractère rudéral et en grande partie exotiques (observées sur la mine SMMO 43 à Tontouta, sur Boualoudjélina à Kaala-Gomen...) : *Wedelia trilobata* (gazon tahitien), différentes graminées (*Setaria sphacelata*, *Chloris virgata*, *Stenotaphrum dimidiatum*), *Mimosa invisa* (sensitive géante), *Stachytarpheta urticaefolia* (herbe bleue), *Trema cannabina*... (Jaffré & Rigault 1991^a, Jaffré *et al.* 1994^c, Jaffré *et al.* 1997^a). Cette méthode ne répond donc pas aux exigences d'une véritable restauration des sites dégradés. De plus, l'apport de semences d'espèces exotiques, dont certaines pourraient se révéler envahissantes, fait courir aux espèces endémiques peu compétitives un risque de disparition.

Le recours à un apport de terre peut se révéler plus efficace lorsque celle-ci provient d'un décapage minier de surface (topsoil), en ayant pris soin de préserver le potentiel séminal du sol et sa matière organique. Pour cela, le prélèvement du topsoil doit être le plus superficiel possible, les premiers centimètres étant les plus riches, et faire l'objet d'un transfert direct ou après un stockage, sur une faible épaisseur (moins de 2 m), n'excédant pas quelques jours, un stockage plus long étant toujours néfaste (Pelletier & Esterle 1995, Ruiz 2006, L'Huillier 2007). S'agissant des substrats dénudés les moins fertiles (notamment sur saprolites ou sur résidus de traitements industriels), il est aussi recommandé, quand cela est possible (comme sur pente faible), de les recouvrir d'une couche épaisse de latérite, puis de topsoil. L'apport de cet horizon de surface permet d'éviter ou de limiter les risques de toxicité, et d'apporter des nutriments (notamment de l'azote ; cf. tableau 6.7), des graines et des symbiotes indigènes (mycorhizes et actinomycètes ; cf. chapitre 5). Même si son utilisation reste souvent

limitée en termes de surface pouvant être traitée, et n'est en général possible que si les décapages ont lieu à proximité du site à revégétaliser, cette technique mérite d'être mise en œuvre chaque fois que cela est réalisable. En effet, elle favorise l'implantation naturelle des espèces natives, augmentant ainsi la richesse spécifique du site (par germinations et par rejets), et elle améliore la croissance des espèces semées ou plantées, permettant d'obtenir les meilleurs résultats (cf. section 4.5). Elle est de plus en plus pratiquée depuis quelques années (figures 6.47 à 6.49), son coût étant par ailleurs modeste. Le déplacement de ce substrat est de toute façon obligatoire pour le mineur.



© NIS

Figure 6.47 : Verse avec épandage de topsoil sur les banquettes (verse Paris Bas, Kouaoua).

Il est important de se rappeler que le développement d'un sol nécessite une durée de plusieurs milliers d'années pour atteindre un stade évolué, avec une organisation en horizons différenciés. Aussi, chaque fois que c'est possible, il faut récupérer ces horizons supérieurs et les remettre en place de manière ordonnée sur le site à revégétaliser afin d'obtenir les meilleurs résultats. Une bonne gestion des topsoils répond à cette exigence.



Figure 6.48 : Verse avec topsoil étalé sur les banquettes (verse Newco, Kouaoua).

© SLN



Figure 6.49 : Verse avec topsoil frais épandu sur le talus enroché (mine Vulcain, Tontouta).

© JAC / L. L'Huilier

4.5. Mise en œuvre et choix des techniques de revégétalisation

Un site dégradé peut être revégétalisé selon différentes techniques, en fonction des objectifs fixés, des caractéristiques du site et des espèces retenues. En Nouvelle-Calédonie, les opérations de revégétalisation sont réalisées principalement par plantations et par ensemencements. Mais elles peuvent également se faire par régénérations naturelles à partir d'un apport de topsoil de bonne qualité, contenant un nombre suffisant de semences d'espèces natives diverses, épandu selon des méthodes adéquates (cf. section 4.4).

4.5.1. La plantation

La plantation est effectuée à l'aide de jeunes plants élevés en pépinière, produits le plus souvent à partir de graines ou de boutures, ou encore à partir de divisions de touffes (cas de certaines Cyperaceae). Les plants peuvent être implantés manuellement ou mécaniquement.

Cette méthode a été la première utilisée à partir des années 1970, et la seule employée pendant plus de vingt ans. Entre 1971 et 2008, environ 333 ha de terrains miniers ont fait l'objet de travaux de revégétalisation par plantation de plus de un million de plants (cf. annexe 4).

Bien que la plantation soit en général plus coûteuse que d'autres méthodes, en raison de la nécessité d'une main-d'œuvre importante, elle reste largement utilisée. Les résultats des plantations ainsi réalisées sont immédiatement visibles et fiables (sous réserve que le substrat soit assez meuble et que les espèces soient adaptées), l'emplacement des plants peut être maîtrisé et les plants morts peuvent être rapidement remplacés. Elle reste néanmoins, en général, réservée aux zones peu pentues et assez faciles d'accès.

Méthodes de plantation

Il est souvent considéré que les plants et les trous de plantation doivent être les plus grands possible, mais à partir du moment où le système racinaire est contenu dans une motte compacte et bien formée, avec un réseau dense de racines saines, il a été montré que les plants de taille relativement petite sont généralement plus résistants au stress lié à la plantation et se développent plus rapidement que des plants plus grands. Des mottes d'un volume de l'ordre de 250 ml (environ 5 cm par 5 cm de côté et 10-12 cm de profondeur) conviennent à la plupart des espèces du maquis minier.

Les plantations peuvent être faites de manière conventionnelle, en creusant un trou un peu plus large et un peu plus profond que la motte du plant, puis en plaçant celle-ci dans le trou de telle sorte que le collet – ou le sommet de la motte – soit positionné juste sous le niveau de la surface du sol (figure 6.50). Il convient de s'assurer que la motte ait un bon contact avec le sol lors du remplissage, en rappuyant assez fermement le sol pour qu'il n'y ait plus de poches d'air, celles-ci pouvant provoquer un dessèchement accéléré des racines. Il est important de créer une petite dépression circulaire à environ 10-20 cm du plant, de façon à capter davantage d'eau de pluie pour le maintien prolongé d'une bonne humidité. Enfin, il est préférable de recouvrir la surface autour du plant avec du mulch (paille broyée, sans graines indésirables), sur plusieurs centimètres d'épaisseur, afin de réduire l'évaporation et d'augmenter la perméabilité de la surface du sol à l'eau de pluie. En procédant de la sorte, une personne peut planter de 100 à 200 plants par jour, en fonction de l'état du sol, des accès et de la pente.



Figure 6.50 : Méthode de plantation : a) trouaison ; b) hydrorétenteur pré-humidifié, mélangé au sol ; c) pose du plant sans briser la motte ; d) mélange d'engrais au sol, remplissage du trou, puis formation d'une dépression circulaire ; e) paillage.

© IAC / L'Huilier

Il est possible d'utiliser des outils adaptés pour faciliter et accélérer l'opération de plantation. Il existe ainsi des pelles spécialement conçues pour réaliser une trouaison correspondant à la forme exacte de la motte, équipées d'un système permettant de les enfoncer facilement à l'aide des pieds à la profondeur voulue (par exemple le « Hamilton Tree Planter », proposé en Australie). Dotée d'un tel outil, une personne entraînée et en terrain favorable peut implanter jusqu'à 500 plants par jour. Un autre outil, le « Potti-Putki », permet de soulager le dos du planteur. Il est constitué d'un tube, équipé d'un bec à une extrémité pour former le trou, l'autre extrémité permettant d'insérer le plant qui est alors parfaitement placé dans son trou. La profondeur peut être contrôlée et différents diamètres de tube sont disponibles. Avec un tel outil, si le planteur est alimenté en continu en jeunes plants par un équipier, il est possible de dépasser 1 000 à 2 000 plants par jour dans de bonnes conditions (sol ameubli et faible pente).

La transplantation est une autre méthode, à réserver toutefois pour de faibles surfaces. Elle consiste à prélever dans le milieu des jeunes plants avec une motte, puis à les planter directement sur le site à revégétaliser, selon les mêmes méthodes que celles décrites ci-dessus. Si les plants sont très petits au départ, il est préférable de les repiquer sur des plaques de culture (en gardant leur motte et leur substrat d'origine, complété éventuellement de terreau), puis de les élever en serre quelques mois avant de les réimplanter sur le terrain. Cette méthode a été testée localement par l'IAC et peut donner de bons résultats pourvu qu'on respecte certaines conditions. S'agissant de plants de *Machaerina deplanchei* et de *Costularia comosa*, la meilleure manière de les prélever consiste à récupérer de jeunes plants (taille du feuillage inférieure à 20 cm environ), avec une petite motte de terre bien formée de façon à maintenir protégées une partie des racines (l'utilisation d'un plantoir à bulbe en sol meuble s'est montrée très satisfaisante). Des taux de réussite de l'ordre de 80 % ont été obtenus par cette méthode (figure 6.51 ; L'Huillier, obs. pers.). Pour ces espèces, des essais de prélèvement de plants plus grands, ou de jeunes plants à racines nues, avec ou sans taille des racines et des feuilles, ont donné des résultats beaucoup moins bons. Pour *Lepidosperma perteres*, cette méthode peut également s'appliquer, en procédant par division de touffes (des reprises de l'ordre de 50 % ont été obtenues). S'agissant d'espèces ligneuses, les prélèvements doivent se faire sur de très jeunes plants (moins d'un an), ayant des tailles de tige de moins de 10 cm, voire moins de 5 cm (les racines pivots pouvant mesurer plus de trois fois la hauteur de la tige), avec une motte assez grosse et profonde pour récupérer une grande partie des racines, laquelle devra être manipulée avec beaucoup de précautions pour ne pas la briser. Les taux de réussite pour ces espèces sont beaucoup plus aléatoires (environ 30 à 60 % pour *Alphitonia neocaledonica* et *Longetia buxoides*). Il est essentiel de respecter plusieurs principes lors de la mise en œuvre de cette méthode : prélever uniquement des espèces communes, prélever dans des populations où elles sont en grand nombre, et ne prélever qu'une partie des plants de façon à perturber le moins possible le site de prélèvement. En revanche, sur les sites devant être décapés avant exploitation, les espèces communes pourront être prélevées sans précautions particulières (les espèces moins communes devront être traitées par des méthodes éprouvées).



Figure 6.51 : Transplantation directe de *Costularia comosa* et de *Machaerina deplanchei* (plants de 2 ans et demi).

© IAC / L. L'Huillier

Produire des plants de qualité

L'obtention de plants sains et sans défauts est un point crucial pour la réussite des plantations. Les jeunes plants doivent avoir un système racinaire en très bon état, de façon à permettre une reprise rapide *in situ*. Les parties aériennes, siège de l'activité photosynthétique, doivent également présenter des feuilles saines afin de pouvoir fournir les métabolites nécessaires au développement et au bon fonctionnement des systèmes racinaires. Ces critères de qualité sont de plus en plus souvent spécifiés dans des contrats de production de plants en pépinière ; il est donc important d'en tenir compte (un contrat avec ces critères de qualité est présenté en annexe 5).

Une évolution importante dans la culture en pépinière a consisté à élever les plants dans des plaques de culture, désormais largement utilisées. Ces plaques sont conçues pour améliorer la qualité du système racinaire (les racines sont guidées vers le bas, plutôt que de manière circulaire le long des parois du pot). Cette technique, permettant de contenir plusieurs plants sur une plaque, facilite le transport et la manipulation des plants sur le terrain.

Il est également important de procéder à un durcissement des plants à la fin de leur culture en pépinière, pour les préparer aux conditions du terrain sur lequel ils seront implantés. Cela permet aux plants de mieux supporter le stress de la plantation et diminue le taux de mortalité. Aussi, avant la plantation, l'arrosage dans la pépinière devra-t-il être réduit graduellement pendant quelques semaines, afin de se rapprocher de la pluviométrie du site. Les plants devront également être exposés aux conditions extérieures, d'éclairage et de température, plusieurs jours avant leur plantation.

Les plantes pionnières locales

Parmi les espèces indigènes pionnières, environ 70 peuvent être produites en pépinière, soit par germination (69 espèces), soit par bouturage (20 espèces), ou des deux façons pour quelques espèces (cf. chapitre 7 et tableaux de synthèse en annexe 8). D'excellents résultats peuvent être obtenus à l'aide de ces espèces (figure 6.52).

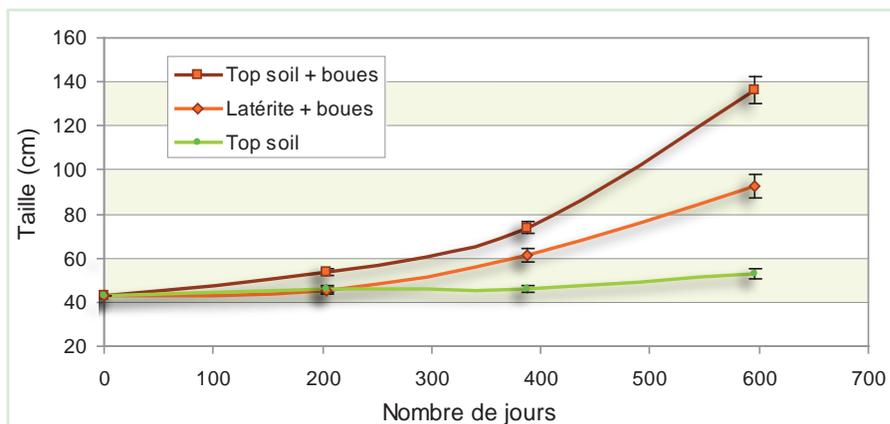


Figure 6.52 : Croissance d'*Alphitonia neocaledonica* implanté sur différents substrats (dose de boue de STEP : 1 % pf/pf de sol) (essai sur Tontouta, mine Vulcain) (L'Huillier, 2009, com. pers.).

Transport et manipulation des plants sur le terrain

Il est essentiel de transporter les plants sur le site dans des conditions optimales : ils doivent être en permanence protégés du vent et du soleil afin de limiter le dessèchement. Les chocs devront être réduits au minimum lors des déplacements afin de ne pas déstructurer les mottes. Si les plants doivent rester sur le site avant d'être plantés, ils devront être placés sous une ombrière temporaire, ou au moins à l'ombre de bâtiments ou de la végétation. S'ils doivent être stockés plusieurs jours avant d'être plantés, un arrosage régulier (tous les jours ou tous les deux jours suivant la température et l'humidité) doit être prévu. Une fois que les plants sont enlevés de leur plaque de culture, ils deviennent très vulnérables à la dessiccation et doivent être plantés aussi rapidement que possible. Un arrosage généreux au pied doit être réalisé rapidement (environ 2 L), de préférence dans les minutes qui suivent, surtout en période chaude lorsque le sol est sec.

Espacements et associations

Les densités de plantation dépendent des espèces retenues, de leur vitesse de croissance et des caractéristiques du site, notamment des risques d'érosion. Pour les espèces de la famille des Cyperaceae, la densité devrait être de l'ordre de 1 à 4 plants/m², tandis que pour les espèces ligneuses elle devrait être environ de 0,5 à 1 plant/m². Une densité globale de l'ordre de 1 plant/m² (soit 10 000/ha) est une moyenne souvent fixée dans les objectifs de plantation, ce qui convient dans la plupart des cas. Sur les zones peu pentues, et lorsque les budgets alloués à l'opération sont trop faibles, il est possible de diminuer la densité entre 2 500 et 5 000 plants/ha (soit des espacements de 1,4 à 2 m entre les plants). En revanche, pour une bonne protection des sols en pente, une densité de 4 à 10 plants par mètre carré est nécessaire (espacement de 0,3 à 0,5 m entre les plants), ce qui correspond aux densités observées en général en maquis minier. Avec des densités de 10 000 plants/ha, le coût des plantations est en moyenne de cinq à sept millions de francs CFP par hectare (comprenant la fourniture des plants et leur implantation). Ce coût pouvant être ramené à environ deux millions de francs CFP pour de faibles densités.

Il est d'autre part important d'associer des espèces différentes, telles que des Cyperaceae et des espèces ligneuses, de façon à ce que les caractéristiques de chacune se complètent (systèmes racinaires de structures différentes, systèmes de reproduction et de dissémination des semences différents... ; cf. section 4.1 de ce chapitre).

Commande de plants à une pépinière

Pour de grandes quantités de plants (plusieurs centaines à plusieurs milliers), les pépinières ont besoin de connaître la commande de plants suffisamment à l'avance. La collecte des semences, la multiplication et l'élevage des plants prennent en effet beaucoup de temps. Il faut en général passer la commande au moins douze mois avant la date prévue de plantation. Quelques espèces peuvent être produites à la bonne taille en moins de neuf mois, mais d'autres exigent une durée de l'ordre de dix-huit mois de culture (cf. chapitre 7). Certaines présentent également des difficultés de germination, ce qui prolonge encore la durée de leur production. Une commande passée suffisamment à l'avance permettra au pépiniériste d'organiser la production des différentes espèces afin qu'elles soient toutes au bon stade de développement au moment prévu de leur plantation sur site.

Remarques pour améliorer la plantation

- Il est préférable de planter pendant une période pluvieuse ou nuageuse, idéalement juste après une journée de pluie. Les sols disposeront d'une réserve en eau élevée qui permettra aux plants de s'enraciner rapidement. La saison fraîche ne convient pas, même si des pluies peuvent être abondantes, car les plants n'auront pas le temps de se développer suffisamment pour pouvoir résister à la saison sèche qui suit. La meilleure période se situe entre les mois de décembre et de mai, idéalement entre janvier et avril, mois les plus humides avec le nombre de jours de pluie le plus élevé (cf. figure 2.13).
- Quand le temps est chaud, planter de préférence tôt le matin ou tard dans l'après-midi.
- Afin de limiter l'évapotranspiration, notamment si les journées chaudes et sèches n'ont pu être évitées, il est possible d'utiliser un anti-transpirant au moment de la plantation ou juste après. En arrosage au sol ou en pulvérisation sur le feuillage, il aura un effet pendant quelques jours (jusqu'à environ deux semaines). Ce produit peut aussi être appliqué avant le transport des plants, pour limiter la dessiccation pendant le déplacement.

- Dans la majorité des cas, il est fortement recommandé de mettre au fond du trou des grains d'hydro-rétenteur, préalablement saturés en eau. Cela améliore la capacité de rétention en eau du sol et réduit le risque de mortalité des plants. Mettre environ une poignée d'hydro-rétenteur hydraté par trou. Cette méthode devrait toutefois être évitée sur les sites à forte pluviométrie et à substrat peu filtrant.
- Il est également recommandé de placer un engrais, de préférence organique (cf. section précédente 4.4), à la fois au fond du trou et sur les côtés de la motte lors du remplissage. L'engrais devra auparavant avoir été mélangé au substrat pour ne pas être en contact direct avec les racines.
- Dans les zones où des cerfs sont présents, la meilleure protection consiste à installer une clôture électrifiée autour de la plantation. Il sera nécessaire de la laisser en place et de veiller régulièrement à son bon fonctionnement pendant au moins quelques années, le temps que les plants aient atteint une taille suffisante pour pouvoir résister à l'abrutissement. Il est recommandé également dans ce cas d'implanter des espèces peu abruties (cf. annexe 7).



© IAC / L'Hubilier

Figure 6.53 : Installation de fascines, entre bandes de plantation (mine Moulinet, Thio).

- Sur fortes pentes, la mise en place de fascines est un procédé recommandé : il s'agit de longues branches assemblées en fagots serrés dont la longueur est supérieure à 1 m et le diamètre plus grand que 10 cm, maintenues sur la pente par au moins deux pieux en bois (figure 6.53). Les fascines permettent de ralentir les écoulements d'eau, de diminuer l'érosion et de retenir les éléments fins, améliorant ainsi la croissance des espèces plantées en amont.

4.5.2. L'ensemencement

Cette méthode consiste à déposer les graines directement sur le terrain à végétaliser. Elle peut être mise en œuvre manuellement ou mécaniquement.

L'ensemencement, et notamment l'ensemencement hydraulique (*hydroseeding*), s'est développé progressivement à partir du milieu des années 1990 et représente dorénavant la méthode la plus utilisée en termes de surfaces revégétalisées (cf. annexe 4). Celle-ci permet en effet, contrairement aux plantations, de traiter rapidement des surfaces importantes y compris les fortes pentes. Ses principaux inconvénients, par rapport à la méthode par plantation, sont : l'utilisation d'une très grande quantité de graines, l'obtention de résultats plus aléatoires et la nécessité d'un temps d'implantation plus long. Le coût de l'ensemencement hydraulique est de l'ordre de quatre millions de francs CFP par hectare, en fonction des espèces retenues (l'utilisation de semences d'espèces natives augmente le coût et représente en moyenne 40 % du coût total).

Les premiers essais utilisant cette méthode se sont révélés pour la plupart décevants, principalement en raison d'un choix d'espèces inappropriées. Les études ont montré que la période d'ensemencement était déterminante, de même que la qualité et le prétraitement des semences (Rigault *et al.* 1996, Arcas 2008). Si des progrès ont été rapidement réalisés, les résultats demeurent encore assez fluctuants. Les recherches portent dorénavant sur la qualité, le prétraitement et la diversification des graines d'espèces indigènes, parfois utilisées en association avec des graines d'espèces exotiques (travaux notamment conduits par la Siras en collaboration avec l'UNC, ainsi que par l'IAC).

Méthodes

Le principe général consiste à répandre les graines sur le sol, de préférence quand celui-ci est chaud et humide afin d'initier rapidement la germination, et à les protéger contre les risques de prédation. Une protection contre des espèces végétales envahissantes (risques de compétition) est inutile, celles-ci étant absentes des terrains miniers en conditions habituelles, ce qui constitue un avantage considérable comparé à d'autres milieux. Pour un résultat durable, il est essentiel que les graines soient de bonne qualité, avec un bon pouvoir germinatif, qu'elles soient bien adaptées aux conditions du site et dotées d'une bonne diversité génétique.

La méthode la plus simple est l'ensemencement manuel, qui consiste en général à semer les graines à la volée. L'avantage est la facilité de sa mise en œuvre ; en revanche, elle ne permet pas de traiter de grandes surfaces, ni de fortes pentes difficilement accessibles. Elle peut également être utile en complément sur des sites qui ont été préalablement revégétalisés par plantation, afin de renforcer et de diversifier le couvert végétal. Pour faciliter leur répartition et mieux contrôler leur densité, les graines peuvent être mélangées à un substrat fin (sable, sciure de bois, terre...). Il est recommandé d'ajouter aussi un engrais en granulés (de préférence organique, ou minéral à libération lente). Pour un épandage plus homogène, le mélange obtenu peut être mis dans un récipient portant des trous ajustés à la taille des graines, des granulés d'engrais et des substrats utilisés. Il est aussi possible de mélanger les graines à du papier déchiqueté ou à du terreau, humecté, afin de constituer un mulch conservant l'humidité. Sur de petites étendues, après le semis, il est recommandé de griffer le sol avec un outil (râteau) afin d'enfouir légèrement les graines.

Une autre méthode manuelle, très peu pratiquée en Nouvelle-Calédonie, consiste à effectuer un paillage de branches fructifères (*branch mulching*). Dans ce cas, des branches d'arbres, d'arbustes, ou des hampes d'espèces herbacées, portant des fruits mûrs, sont coupées et immédiatement déposées sur le site à ensemercer. Des fruits détachés des branches peuvent également être récupérés et déposés au sol. La préparation du substrat est identique à celle préconisée pour les autres méthodes d'ensemencement (surface décompactée, de préférence irrégulière). Le *branch mulching* est utilisé, notamment en Australie, surtout sur les terrains pentus sujets à érosion. Les branches ont l'avantage de protéger les graines libérées, de retenir le sol et la matière organique, ainsi que des graines venant de zones adjacentes. Cette méthode n'est toutefois utilisable que sur de très petites surfaces. Il est recommandé de ne pas couper plus de 20 % de la biomasse de chaque plant récolté. Cette méthode, qui nécessite l'amputation des porte-graines, n'est pas à recommander en Nouvelle-Calédonie, où l'approvisionnement en semences d'espèces natives demeure une difficulté à surmonter.

L'ensemencement mécanisé repose sur deux méthodes, la première étant largement utilisée : l'ensemencement hydraulique (ou semis hydraulique, *hydroseeding*) et l'ensemencement à sec (*dryseeding*).

Le semis hydraulique consiste en une application mécanique d'un mélange contenant des graines, ce qui permet de traiter des pentes, des talus ou de vastes surfaces (figure 6.54). Cette technique utilise l'eau comme agent de transport d'un mélange qui sera projeté sur les surfaces à végétaliser. En général, le mélange utilisé, variable selon le site et le résultat attendu, est composé des produits suivants : des graines (d'espèces natives et éventuellement d'espèces nourrices, cf. ci-après), de la matière organique (mulch, copeaux, sciure, paille, compost...), des engrais (organiques ou minéraux), de la colle organique et éventuellement des colorants. La matière organique permet de protéger les graines sur le sol et participe au maintien de l'humidité.

La colle organique retient le mélange sur le substrat et conserve l'humidité, facilitant ainsi la germination des graines. Le colorant, qui disparaît après quelques jours, permet de repérer les zones d'application afin d'avoir une projection homogène du mélange. Le semis est réalisé à l'aide d'un *hydroseeder* monté souvent sur camion, équipé d'une pompe puissante et d'un canon pouvant projeter le mélange jusqu'à 50 m, voire 100 m. Avec des rallonges, le rayon d'action du canon à graines peut atteindre 500 m. Cette méthode est ainsi communément utilisée pour revégétaliser les zones les plus pentues. Si on peut disposer de semences d'espèces adaptées en quantité suffisante, cette technique est la plus rapide : une équipe de deux personnes peut traiter quotidiennement 1 à 5 ha. Des recherches sont réalisées par la Siras, en collaboration avec l'UNC, afin de permettre une mycorhization des plantules une fois le mélange projeté.



© SIRAS

L'ensemencement à sec, encore très peu utilisé en Nouvelle-Calédonie, n'est en fait qu'une mécanisation de la méthode d'ensemencement manuel, permettant de traiter rapidement des surfaces plus grandes de l'ordre de quelques ares. Le mélange peut être identique (graines, matière organique finement broyée afin d'éviter de bloquer la pompe, engrais, éventuellement colle en poudre...), en veillant toutefois à privilégier des produits légers, l'équipement étant souvent portable. Le mélange peut être projeté sur plusieurs mètres, permettant d'atteindre facilement des zones pentues et peu accessibles.

Choix des espèces et densités

Pour un résultat durable et efficace, les graines doivent provenir d'espèces indigènes adaptées aux substrats ultramafiques. Bien qu'assez peu d'essais aient été réalisés, les meilleurs résultats en termes de germination *in situ* et de maintien constatés après deux années ont été obtenus avec les Cyperaceae (*Costularia comosa*, *Schoenus juvenis*, *Machaerina deplanchei*) et quelques espèces ligneuses : *Dodonaea viscosa*, *Alphitonia neocaledonica*, *Grevillea exul* (ssp. *exul* et ssp. *rubiginosa*), *Xanthostemon laurinus* (Rigault *et al.* 1996, Arcas 2008). Des résultats encourageants sont également obtenus avec *Carpolepis laurifolia*, *Cloezia artensis*, *Joinvillea plicata*, *Gymnostoma* spp., *Longetia buxoides*. Toutefois, ces résultats manquent encore de recul. Ainsi, les observations faites quinze ans après la mise en place d'un essai de l'Orstom (IRD) à Kouaoua (Rigault *et al.* 1996) montrent que les espèces qui se sont finalement le mieux développées appartiennent au genre *Gymnostoma*, alors que d'autres espèces semblaient donner de meilleurs résultats les premières années (L'Huillier, obs. pers.).

Ces essais ont aussi montré l'intérêt de la mise en place d'un paillage (mulch) pour maintenir une humidité suffisante à la surface du sol. Pour plusieurs espèces, un prétraitement est nécessaire avant l'ensemencement : *Machaerina deplanchei*, *Dodonaea viscosa*, *Alphitonia neocaledonica* (cf. chapitre 7 et annexe 8). Les ensemencements réalisés ont également montré que les Cyperaceae fructifient au bout de deux à trois ans, donnant des semences qui germent en partie sur place, ce qui améliore la densité du recouvrement végétal.

D'autre part, la végétation pionnière mise en place contribue, après quelques années, à l'implantation d'autres espèces indigènes, initiant ainsi les processus de succession secondaire.

Les densités de graines actuellement retenues pour l'application de l'*hydroseeding* sont en général très élevées. En effet, une contrainte forte réside dans les trop faibles taux de germination sur le terrain des graines de nombreuses espèces indigènes. Il a ainsi été montré que les taux de germination des graines de 15 espèces pionnières semées sur un terrain minier dégradé, selon la méthode de l'ensemencement hydraulique, étaient beaucoup plus faibles que ceux obtenus en enceinte de germination, les différences entre ces taux pouvant atteindre un facteur 1 000 (Arcas 2008). Cela justifie qu'actuellement les graines d'espèces indigènes soient semées à la densité avoisinant 5 000 graines par mètre carré. Un calcul d'estimation du nombre de graines d'espèces indigènes à semer peut être fait à l'aide de la formule suivante (Arcas 2008) :

Nombre de graines à semer par mètre carré = $D / \{(T \cdot K) \cdot (1 - M)\}$

Avec D = densité désirée de plantes au final

T = taux de germination au laboratoire (varie de 0 exclu à 1)

K = coefficient de correction du taux T pour le terrain (varie de 0 exclu à 1)

M = taux de mortalité (varie de 0 à 1 exclu)

Ces densités très élevées imposent donc de pouvoir récolter des quantités très importantes de semences. Bien que la collecte de semences soit en nette progression ces dernières années, les quantités de graines natives disponibles sont encore bien inférieures aux besoins de la végétalisation et les prix de revient demeurent très élevés (leur part représente environ 40 % du coût du semis hydraulique). Des champs semenciers ont été mis en place pour tenter de répondre à cette demande croissante (cf. encadré en section 4.2.2.3). Toutefois, il est probable que ces productions ne suffisent pas à compléter la fourniture de graines et à satisfaire la demande.

Ainsi, un des enjeux pour la recherche est d'améliorer les taux de germination et de maintien sur le terrain, afin de diminuer la densité de graines à semer, ce qui permettrait de traiter davantage de surface tout en diminuant les coûts. Une méthode pourrait être l'implantation en phase initiale, sur sol amendé en NPK, d'une espèce herbacée à croissance rapide et à courte durée de vie, jouant le rôle d'espèce nourrice. Le recouvrement végétal provisoire et la matière organique engendrée par son dépérissement pourraient favoriser l'implantation et le développement des espèces endémiques pérennes dont la croissance est plus lente. Compte tenu de la quasi-absence d'espèces annuelles à développement rapide, facilement utilisables, dans la flore des terrains miniers, cette espèce nourrice ne peut qu'être exotique. Des espèces comme *Chloris gayana*, *Setaria sphacelata*, *Brachiaria decumbens*, *Panicum maximum*, *Stylosanthes scabra*, voire *Trifolium subterraneum*, sont utilisées localement par les entreprises pour remplir ce rôle. Aucune étude n'a malheureusement encore bien mis en évidence un effet significatif de ces espèces sur la germination et l'implantation des espèces indigènes. Par ailleurs, bien que les espèces citées n'aient pas de caractère envahissant avéré en Nouvelle-Calédonie (*Chloris gayana* est néanmoins évaluée avec un risque moyen sur le site PIER, interdisant son importation en Australie), il convient de se montrer prudent.

En effet, les graminées mentionnées sont des espèces pérennes qui, si la fertilisation initiale est élevée, peuvent s'installer durablement et occasionner des désordres localisés ainsi que des risques pour l'environnement : à court terme, des risques d'abrutissement par les cerfs ou de multiplication d'insectes ravageurs introduits, qui causeront des dégâts à la végétation voisine ; à long terme, un risque d'adaptation des espèces exotiques au milieu, suivi d'un risque d'envahissement. Le choix de ces espèces et leur utilisation doivent donc être parfaitement raisonnés (cf. section 4.1 pour des informations complémentaires).

Idéalement, ces espèces nourrices devraient donc disparaître après un an ou quelques années : des espèces annuelles devraient ainsi être privilégiées (telles que l'avoine, le blé... ; ce dernier, testé sur mine sur topsoil, latérites et saprolites, a montré d'excellents taux de germination sur les trois substrats, un développement complet puis un dessèchement total, avec toutefois le maintien des tiges sèches avec leur enracinement en place pendant plus d'un an ; Arcas 2008). Ces espèces peuvent être utilisées de deux manières : soit en une seule application d'un mélange comportant les espèces exotiques et les espèces indigènes, soit en deux applications, la première avec les espèces exotiques seules, la seconde comportant uniquement les espèces indigènes après que les espèces exotiques ont dépéri. La combinaison des deux méthodes est possible également : une première application du mélange, puis une seconde avec uniquement les espèces indigènes. Dans le premier cas, les deux catégories d'espèces devant coexister pendant quelque temps, la densité des espèces nourrices ne doit pas être trop importante pour limiter les effets de compétition : il est difficile d'avancer des chiffres, chaque espèce présentant une forme et un recouvrement au sol qui lui sont propres. Le principe est d'ajuster la densité de telle manière qu'il reste des espaces non recouverts pour permettre aux espèces natives de s'y développer (figure 6.55). Une densité d'espèces exotiques de l'ordre de 100 plants par mètre carré semble convenir. Cette densité doit cependant être abaissée dans le cas des espèces qui ont un recouvrement individuel assez important. Pour les espèces natives, il convient d'obtenir une densité de plusieurs individus durablement implantés par mètre carré. La quantité de graines à utiliser dans ce cas sera largement fonction de leurs propriétés germinatives.

Il est important également que la quantité de fertilisant ne soit pas trop importante (cf. section 4.4), de façon à faciliter l'épuisement puis le dépérissement des espèces exotiques. Une méthode à préconiser pourrait consister en un premier ensemencement d'espèces nourrices, sans aucun apport d'engrais, suivi, une fois ces espèces dépériées ou en cours de dépérissement, d'un ensemencement d'espèces indigènes, associé à un apport d'engrais.

Enfin, cette méthode utilisant les espèces exotiques ne devrait être mise en œuvre qu'en des endroits limités, présentant de forts risques d'érosion. De plus, à moins d'une confirmation par des résultats expérimentaux significatifs que ces espèces ont un rôle positif sur le développement des espèces natives et qu'elles disparaissent totalement par la suite, cette méthode ne devrait être qu'une solution provisoire, le temps d'améliorer les techniques de germination *in situ* des espèces natives, et de disposer de plus grandes quantités de semences sur le marché.



© IAC / L. L'Huillier

Figure 6.55 : Résultat d'un ensemencement hydraulique après environ deux mois : jeune plant d'*Alphitonia neocaledonica*, accompagné de graminées (mine Moulinet, Thio).

Remarques pour améliorer l'ensemencement

- L'humidité est un facteur clé ; des différences très importantes dans les taux de germination des graines d'espèces natives ont en effet été relevées entre des substrats non arrosés *in situ* et des substrats arrosés (Arcas 2008, Brinon 2010). La meilleure période pour un ensemencement se situe donc pendant les mois les plus humides de l'année, surtout dans le cas des sites les plus secs de la côte Ouest, dont la pluviométrie est concentrée principalement entre les mois de décembre et de mars. La période d'ensemencement dépend également des espèces, certaines pouvant germer sur une période très étalée (pendant plusieurs mois, voire pendant plus d'un an), d'autres pouvant rester plusieurs mois sans germer (cas des graines orthodoxes) en attendant la période la plus adaptée à leur physiologie pour initier leur germination (voir le rapport Rigault *et al.* 1996).
- Sur les fortes pentes (en particulier de plus de 30°), il est recommandé de recouvrir la surface d'un géotextile biodégradable de manière à limiter l'érosion superficielle. Il est possible d'utiliser de la toile de fibres de coco, ou de la toile de jute, celle-ci offrant l'avantage d'être plus souple et de mieux épouser les irrégularités de la surface du terrain. Lors d'ensemencements, leur structure maillée ouverte permet de retenir les graines et de les laisser germer et se développer librement. Elles sont, en revanche, d'un coût élevé.
- Comme pour toute action de revégétalisation, la maintenance est une phase importante pour le succès de l'opération. Ainsi, l'installation d'une clôture électrique contre les cerfs est nécessaire, surtout sur les massifs où leur présence est avérée (Kopéto, Kouaoua, Tomo..., cf. Dionisio 2008), et d'autant plus lorsque des graminées ont été ensemencées.

4.5.3. La régénération naturelle à partir du topsoil

La régénération naturelle correspond à l'implantation et au développement de plantes à partir de graines, de propagules, de rejets de souche ou de boutures, naturellement présents sur le site. Elle dépend essentiellement des sources de graines existantes, telles que le topsoil, les graines des plantes présentes sur le site à revégétaliser, ainsi que celles amenées par dissémination par le vent, l'eau ou les animaux. La récupération adéquate du topsoil, sur les zones en phase d'exploitation minière, et son épandage sur les sites à restaurer représentent ainsi une méthode incontournable, largement mise en œuvre par les grandes sociétés minières à travers le monde. L'utilisation du topsoil en Nouvelle-Calédonie remonte seulement aux années 2000.

Cette méthode présente les avantages de permettre l'implantation naturelle d'espèces indigènes parfaitement adaptées au site (figures 6.56 et 6.57, tableau 6.8), notamment des espèces difficiles à planter par d'autres méthodes, d'enrichir la diversité spécifique, de permettre le développement de symbioses mycorhiziennes grâce aux symbiotes véhiculés par le topsoil. Lorsque l'épandage de topsoil est couplé avec des plantations ou des ensemencements, il permet d'obtenir de très bons résultats, reconstituant en quelques années un couvert végétal sur une zone dénudée (figures 6.52, 6.58 et 6.59).



Figure 6.56 : Talus de piste recouverte de topsoil par transfert direct (Goro). Après trois ans, on constate l'implantation spontanée de nombreuses Cyperaceae et de quelques espèces ligneuses.

© IAC / L. L'Huilier

De plus, la mise en œuvre de cette méthode est relativement peu coûteuse, le substrat étant de toute façon obligatoirement déplacé pour atteindre les couches de minerais exploitables. Les inconvénients résident dans le manque fréquent de topsoil de qualité, dans la difficulté de sa manipulation pour qu'il conserve ses qualités, et dans la durée, parfois assez longue, pour que les espèces se développent. En outre, les caractéristiques du topsoil, tout comme les résultats obtenus, sont souvent hétérogènes.

Malgré tout, l'utilisation du topsoil devrait être prise en compte en premier lieu chaque fois que cela est possible (cf. section 4.4).



Figure 6.57 : Talus en gradins, recouverts de topsoil (Tiébaghi). Après cinq ans, implantation spontanée de nombreuses espèces (notamment *Acacia spirorbis* et *Solanum styraciflorum*).



Figure 6.58 : Verse avec topsoil épandu sur les banquettes et plantations (Kouaoua, mine Méa).

Tableau 6.8 : Relevés des espèces natives naturellement implantées (germinations et rejets) à partir de topsoils de maquis sur roches ultramaïques, deux ans après leur mise en place (essai de l'IAC à Tontouta sur le mont Vulcain : topsoil frais, mis en recouvrement sur les enrochements des talus de verses ; cf. figure 6.49). (Soucrant 2008, L'Huillier, com. pers.)

Nombre total d'espèces (sur 16 parcelles de 30 m ²)	43
Richesse spécifique par parcelle (nombre d'esp./30 m ²)	5 à 20
Statut des espèces (endémique, autochtone, introduite)	E (91 %), A (9 %), I (0)
Densité (nombre de plants/m ²)	0,4 à 6,3
Taux de recouvrement des parcelles (%)	0,1 à 10
Cinq espèces principales (ordre décroissant)	<i>Lepidosperma perteres</i> , <i>Smilax</i> sp., <i>Cloezia artensis</i> , <i>Machaerina deplanchei</i> , <i>Alphitonia neocaledonica</i>

Méthodes

La première difficulté pour le mineur est en général de synchroniser le prélèvement du topsoil, sur un site d'exploitation, avec son épandage sur le site à restaurer. L'idéal est en effet un transfert direct, sans stockage, celui-ci entraînant une diminution rapide de sa qualité, par la mortalité des graines et des micro-organismes (Rokich *et al.* 2000). Ce point est très important et doit être mis en œuvre autant que possible. Si le stockage du topsoil ne peut être évité, il ne devrait pas dépasser quelques semaines afin de préserver au maximum ses qualités.

L'épaisseur du prélèvement est un autre paramètre important. Les graines ainsi que les symbiotes et la matière organique sont concentrés dans la partie superficielle du sol (d'où l'appellation « topsoil »), les premiers centimètres étant les plus riches. Ainsi, il est important que le prélèvement de ce substrat soit le plus superficiel possible. Les outils utilisés localement sont en général peu adaptés, puisque les épaisseurs les plus faibles sont de l'ordre de 30 cm, voire 50 cm. Prélever sur une épaisseur plus grande causera une dilution des graines et des micro-organismes. Dans tous les cas, il ne faudrait pas prélever plus de 50 cm, les horizons inférieurs ne contenant quasiment plus de matière organique.

La meilleure période de prélèvement, pour conserver au mieux la qualité du topsoil et les graines contenues dans le sol, n'est pas encore bien connue. En revanche, il est très difficile et même non recommandé de prélever lors des mois les plus pluvieux de l'année, surtout si le topsoil est de texture fine. En effet, outre les difficultés accrues rencontrées par les engins pour se déplacer dans ces conditions, les principaux problèmes seront les risques importants de compaction et de déstructuration du sol lors de sa manipulation, ce qui aurait des conséquences néfastes sur la survie des symbiotes et de nombreuses graines.

S'agissant de la période d'épandage, elle peut varier en fonction des objectifs et des caractéristiques du site. Il semble qu'un épandage entre les mois de décembre et de janvier, juste avant la saison pluvieuse, soit la période la plus favorable car elle permettra aux graines non dormantes ou à faible dormance d'initier rapidement leur germination. Elle permettra également aux racines et aux souches de rejeter, évitant ainsi qu'elles ne se dessèchent irrémédiablement, tel que cela serait observé dans le cas d'un épandage en saison sèche.

Afin de faciliter l'enracinement et le développement des espèces naturellement implantées, il est préférable que le topsoil soit déposé sur un substrat meuble, ou préalablement décompacté. Les meilleurs résultats seront obtenus avec du topsoil épandu sur de la latérite rouge, idéalement sur celle qui était présente sous le topsoil, les deux horizons étant replacés dans l'ordre sur le site à revégétaliser.

La germination des graines et la croissance des jeunes plants seront améliorées si le dessèchement du sol est le plus faible possible. Ainsi, il est préférable d'épandre le topsoil en laissant des irrégularités en surface (petits sillons, blocs rocheux, matière organique grossière), qui constitueront autant de microsites abrités du vent et du soleil. En outre, ces irrégularités en surface concentreront davantage les écoulements des eaux, permettant ainsi aux graines et aux plants à proximité de mieux se développer.

Le topsoil peut être épandu sur des surfaces planes comme sur des pentes légères à moyennes. Une pente de 30° et de faible longueur (moins de 10 m) semble être une limite (cf. 4.4).

Comme pour les autres méthodes, les jeunes plants sont sensibles à l'abrouissement par les cerfs, en particulier les Cypéracées (notamment *Machaerina deplanchei* et *Costularia comosa*). Ainsi, sur les massifs où des cerfs sont présents en nombre important, il sera préférable de protéger le site à l'aide de clôtures électriques, au moins le temps que les plants soient plus résistants à l'abrouissement (deux à trois ans au minimum).



Figure 6.59 : Essai de plantations d'*Alphitonia neocaledonica*, d'*Austrobuxus carunculatus* et de *Schoenus juvenis* sur topsoil fertilisé (mine Vulcaïn, Tontouta).

Remarques pour améliorer la régénération naturelle

- La plantation sur du topsoil de bonne qualité et fertilisé permet d'obtenir de très bons résultats : l'essai mis en place par l'IAC à Tontouta en 2006 (figure 6.52) a montré pour la première fois le développement très rapide d'espèces endémiques (*Alphitonia neocaledonica*, *Austrobuxus carunculatus* et *Schoenus juvenis*) (figure 6.59).
- Des essais menés sur Goro (McCoy 2005) ont montré qu'un ensemencement manuel d'espèces endémiques donne de bien meilleurs résultats sur topsoil que sur d'autres substrats, avec pourtant moins de graines semées.
- La régénération naturelle s'opère également à partir de graines disséminées par le vent, l'eau ou les animaux, raison pour laquelle il est indispensable de conserver à proximité immédiate des sites exploités des îlots de végétation, dont la composition floristique doit être la plus diversifiée possible. Ce sont en effet les propagules provenant de ces îlots de végétation qui participeront en tout premier lieu à la restauration écologique des milieux dégradés.

4.5.4. Choix des techniques

La régénération naturelle, l'ensemencement et la plantation représentent donc les trois principales techniques de revégétalisation permettant d'initier les processus de restauration d'un site dégradé. Chacune possède des adaptations pour une meilleure efficacité, des avantages et des inconvénients, selon les caractéristiques du site à revégétaliser. Les différentes techniques et leurs conditions de mise en œuvre sont présentées dans le tableau ci-contre.

La combinaison de ces techniques est possible et même recommandée pour améliorer le succès de la revégétalisation. Par exemple, des plantations effectuées sur topsoil, préalablement fertilisé, permettent d'obtenir d'excellents taux de croissance et de faibles mortalités (figure 6.52). Il est également recommandé de compléter l'ensemencement par des plantations, en particulier pour :

- les espèces qui ont des difficultés à se développer ou qui sont connues pour ne pas se développer à partir d'ensemencements ;
- les espèces dont les graines sont chères ;
- la mise en place d'espèces par plantation afin de créer plus rapidement des conditions d'ombrage et d'humidité favorables au semis.

Comme préconisé par des auteurs australiens (Grant & Koch 2007, figure 6.60), la combinaison de l'ensemble de ces techniques, mises en œuvre de manière parfaitement raisonnée, représente la meilleure stratégie pour parvenir à reconstituer le plus rapidement possible un couvert végétal diversifié, d'un point de vue tant biologique que fonctionnel. En effet, cette stratégie repose sur les caractéristiques propres aux différentes techniques, chacune permettant de compléter la technique précédente, en assurant à chaque fois l'implantation de nouvelles espèces. Ainsi, le topsoil frais doit être utilisé en premier lieu, puisqu'il peut permettre l'implantation naturelle de 40 à 70 % des espèces présentes initialement, et ce à moindre coût (Ward *et al.* 1996). L'étape suivante repose sur l'apport de graines d'autres espèces natives (dans l'ordre : par dissémination, par ensemencement, par plantation de graines germées élevées en pépinière), pouvant elles-mêmes représenter plus de la moitié des espèces initiales. Les méthodes par multiplication végétative (bouturage, puis éventuellement culture *in vitro* – cette méthode étant la plus coûteuse – pour les espèces les plus récalcitrantes) ne sont à utiliser qu'en dernier ressort. Toutefois, il est nécessaire de recourir à ces méthodes pour certaines espèces utiles, qui ne peuvent être reproduites par graines (cf. figure 6.60).

Tableau 6.9 : Guide pour le choix des techniques de revégétalisation.

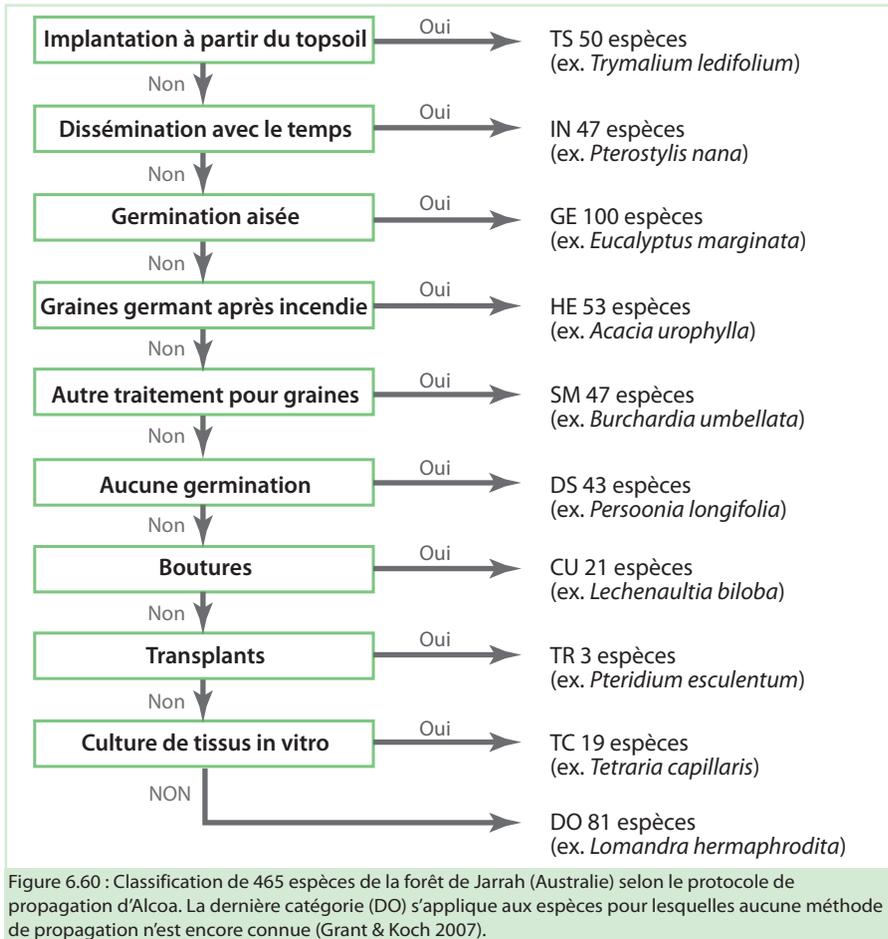
Paramètres	Régénération naturelle		Ensemencement		Plantation	
	Sources en place ¹	Topsoil déplacé ²	Manuel	Mécanisé	Manuelle	Outils ad hoc ³
Pluviométrie :	forte	●	●	●	●	●
	faible	●	●	(●)	(●)	●
Terrain :	plat	●	●	●	●	●
	pente modérée	●	●	●	●	●
	pente forte	●	●	(●)	●	(●)
	rocailloux	●	●	●	●	●
	accès difficile	●	●	(●)	●	(●)
Surface :	grande	●	(●)	●	(●)	●
	moyenne	●	●	(●)	●	●
	faible	●	●	●	●	●
Gain de temps	●	●	(●)	●		
Faible coût	●	●	(●)		(variable)	(variable)
Besoin de main-d'œuvre			(●)		●	●
Plantes :	communes	●	●	●	●	●
	secondaires	●	●			
Difficiles à produire, rares		●	●			●
	espèces nourrices			(-)	(-)	
Utilisation d'un géotextile			• (pour pentes fortes, améliore les résultats, mais coût élevé)			
Avantages	Plantes adaptées au site, coût faible à modéré		Accès fortes pentes, rapidité, grandes surfaces possibles, colonisation végétale de haute densité		Fiable, densité contrôlable, résultats rapidement visibles, peu de graines utilisées	
Inconvénients	Durée d'implantation, résultats variables, topsoil pas toujours disponible		Espèces pas toujours adaptées (esp. nourrices ?), coût parfois élevé, utilise beaucoup de graines, résultats variables		Coûts variables, pouvant être élevés (selon la densité surtout), besoin de sol meuble	
Possibilités d'améliorer l'efficacité	Déterminer en amont la qualité du topsoil, utiliser du topsoil frais, prélever sur une faible épaisseur, épandre à la bonne saison		Sélection des espèces, collecte de bonnes graines, prétraiter les graines, période de semis, préparation du sol		Sélectionner les espèces adaptées au site, produire des plants de qualité, préparer un bon sol	
Possibilités de diminution des coûts	Transfert direct (sans stockage), garder des îlots de végétation à proximité (disséminations)		Améliorer les collectes (quantités et qualités), produire les graines en champ semencier, abaisser la densité de graines (meilleure germination), sélection d'espèces adaptées		Surfaces importantes (économie d'échelle), améliorer la technicité des pépiniéristes et des planteurs (meilleures réponses appels d'offres), espèces adaptées	

1 : Régénération naturelle à partir de sources en place : germinations de graines provenant de plants voisins, de graines disséminées ou de graines contenues dans le sol en place.

2 : Le topsoil déplacé est prélevé sur un site (en exploitation) pour être épandu sur le site à revégétaliser.

3 : Par rapport à la plantation manuelle (peu d'outils, simple pelle), des outils aident la plantation (cf. cette partie).

● : Technique appropriée. (●) : Technique peu appropriée, ou sous certaines conditions.



4.6. Suivi, évaluation et indicateurs

Comment déterminer le degré de succès d'une opération de revégétalisation, comment évaluer la dynamique progressive de l'écosystème, comment et quand effectuer les mesures ? Ces questions sont encore assez peu ou incomplètement abordées en Nouvelle-Calédonie. Elles sont pourtant essentielles, leurs réponses permettant non seulement d'évaluer l'opération suivie, mais étant aussi susceptibles de fournir des informations concrètes de terrain, fort utiles pour imaginer et apporter des améliorations aux opérations ultérieures.

Ainsi, compte tenu des lacunes dans la connaissance du comportement des espèces sur différents substrats à plus ou moins long terme, et suivant les aléas climatiques, il serait important que chaque nouveau chantier de revégétalisation fasse l'objet d'une description précise des conditions environnementales, des moyens mis en œuvre, des caractéristiques du matériel végétal utilisé, puis d'un suivi régulier sur la base de critères précis. Le suivi assuré devrait permettre d'affiner au fil des années les connaissances sur l'efficacité de telle ou telle technique ou de tel ou tel matériel végétal utilisés dans des conditions parfaitement définies.

La méthode de suivi devrait être détaillée et établie au début du projet, comprenant les critères et les protocoles d'observations et de mesures selon un calendrier établi, permettant ainsi de bien suivre les évolutions des différents paramètres au cours du temps.

Les opérations de revégétalisation nécessitent un suivi et des évaluations à des intervalles de temps variables selon les cas, selon le degré de réussite obtenu.

En s'inspirant de travaux antérieurs sur l'évaluation de l'état des écosystèmes, plusieurs auteurs ont proposé l'utilisation d'un certain nombre d'indicateurs mesurables rendant compte de l'état de la structure et du fonctionnement d'un écosystème (Asher & Bell 1999). Ces indicateurs, qualifiés d'« Attributs Vitaux de l'Écosystème », ont été repris par Le Floc'h et Aronson (1995) pour comparer les résultats d'expérimentations de restauration ou de réhabilitation. Parmi ces indicateurs, les plus pertinents pour l'évaluation de travaux de revégétalisation des anciens sites miniers en Nouvelle-Calédonie sont :

Structure :

- **Le taux de mortalité.** Cet indicateur est à mesurer assez rapidement, environ un an après la plantation, de façon à s'assurer que les plants ont résisté à la saison sèche (un critère de moins de 30 % est souvent fixé, au-delà, les plants morts sont à remplacer). S'agissant des ensemencements, des contrôles sur des durées plus longues peuvent être nécessaires, le premier au bout d'environ trois mois, les suivants après un an à trois ans, car les conditions climatiques ne sont pas toujours favorables la première année et des graines dormantes peuvent nécessiter un temps relativement long avant de pouvoir germer.
- **La richesse floristique** en espèces autochtones et endémiques. Parfois le pourcentage d'espèces préexistantes à retrouver sur sites revégétalisés est fixé dans les critères (par exemple 50 %, ou 75 %, voire 100 %, comme retenu par Alcoa en Australie). Cet indicateur pouvant nécessiter de longues années d'observations avant de pouvoir statuer, il faudrait au moins pouvoir observer une augmentation régulière de la richesse pour conclure positivement.
- **Le nombre de plants d'espèces herbacées** ou, pour les stades plus évolués, le recouvrement de la végétation herbacée. Cet indicateur devrait être mesuré annuellement, pendant au moins trois ans, de préférence cinq ans.
- **Le recouvrement total** de la végétation. À mesurer également pendant au moins trois à cinq ans.

Fonctionnement :

- **La capacité de reproduction** des espèces végétales (floraison, fructification). Cet indicateur peut être mesuré assez rapidement pour les Cyperaceae (deux à trois ans), alors qu'il faut attendre en général au moins trois ans avant de pouvoir réaliser les premières observations sur des espèces ligneuses.
- **Le nombre de recrûs** issus des espèces implantées, du potentiel séminal du sol, dans le cas d'apport de topsoil, ainsi que le nombre de recrûs provenant d'apports naturels depuis des groupements végétaux voisins. Un suivi annuel pendant plusieurs années est en général nécessaire pour pouvoir déterminer le maintien des germinations et l'identification des plantules. Afin de faciliter ce travail, il est préférable de délimiter au départ des parcelles de relevés.

- **La productivité de la biomasse** (croissance des espèces). À mesurer au moins une fois la première année, puis espacer de plus en plus (par exemple après encore un an, puis deux, trois, cinq ans).
- **La matière organique** du sol et son augmentation. Celle-ci peut être suivie selon le rythme adopté pour la mesure de la croissance des espèces.
- **La capacité d'échange cationique.** À suivre comme la matière organique.
- **Le coefficient d'infiltration des pluies.** À suivre comme la productivité de la biomasse.
- **La diversité des animaux** (oiseaux, reptiles, insectes). Mesure de la présence et de l'abondance de certaines espèces marqueurs du fonctionnement (par exemple, certains oiseaux communs en maquis, pollinisateurs et disséminateurs ; cf. chapitre 4).
- **L'importance relative de la mésofaune détritivore.**
- **L'inféctivité potentielle** par les rhizobiums, les *Frankia* et les mycorhizes.
- **Un suivi photographique** est conseillé, car il peut apporter facilement des informations intéressantes sur l'évolution de la végétation, sous réserve toutefois de respecter à chaque fois les mêmes points de prises de vue et de prendre des photos régulièrement. Cela peut concerner autant des germinations que des plants plus grands ou des parcelles.

SUIVI ET AMÉNAGEMENT ADAPTATIF EN RESTAURATION ÉCOLOGIQUE

(d'après Cooke & Johnson 2002)

« Dans la planification de la restauration, il est impératif que les buts, les objectifs et les critères de succès soient clairement établis dès le début du projet pour s'assurer que la restauration soit entreprise de façon systématique, tout en réalisant que ces paramètres peuvent nécessiter quelques modifications plus tard, à la lumière de la direction dans laquelle la succession de la restauration suit son cours. Bien que la théorie écologique manque de lois générales avec des applications universelles au niveau d'organisation de l'écosystème, la connaissance écologique a un grand potentiel heuristique (favorisant les découvertes de modes opératoires et de concepts nouveaux ou améliorés), ainsi qu'une forte applicabilité pour des objectifs de restauration écologique sur des sites spécifiques. Cependant, le suivi et l'aménagement sont essentiels, puisque les incertitudes dans la planification de la restauration ne peuvent jamais être totalement surmontées. Le concept d'aménagement adaptatif avec la notion qu'un site restauré doit être considéré comme une expérimentation à long terme est une perspective raisonnable. Malheureusement, en pratique, le manque de suivi et de recherche post-restauration offre peu d'occasions d'améliorer la théorie et la pratique de la restauration des terrains miniers. »

ESPÈCES INDIGÈNES UTILISABLES EN REVÉGÉTALISATION

*Adrien WULFF, Laurent L'HUILLIER,
Casimir VÉA et Tanguy JAFFRÉ*

1. INTRODUCTION

2. FICHES PAR ESPÈCE, CLASSÉES PAR FAMILLE

ARAUCARIACEAE
CASUARINACEAE
CELASTRACEAE
CUNONIACEAE
CYPERACEAE
DILLENACEAE
FABACEAE (OU LEGUMINOSAE)
GOODENIACEAE
JOINVILLEACEAE
MALPIGHIACEAE
MYODOCARPACEAE
MYRTACEAE
PICRODENDRACEAE
PROTEACEAE
RHAMNACEAE
SAPINDACEAE

3. QUELQUES AUTRES FAMILLES, GENRES ET ESPÈCES POTENTIELLEMENT UTILES POUR LA REVÉGÉTALISATION

1. INTRODUCTION

Les résultats des travaux de recherches et des essais sur sites se rapportent essentiellement à des espèces à caractère pionnier de la flore des terrains miniers. Il s'agit d'espèces capables de s'implanter en pleine lumière sur des substrats dénudés. Ces espèces destinées à former une première couverture végétale doivent aussi favoriser l'implantation naturelle d'espèces variées plus couvrantes mais également plus exigeantes en nutriments et en eau. Elles devront ainsi enclencher le processus de la succession végétale (cf. chapitre 6), permettant à terme la restauration d'un couvert de plantes herbacées et ligneuses, de plus en plus complexe et diversifié, à même de répondre aux trois objectifs principaux de la restauration écologique : régulation des débits hydriques, lutte contre l'érosion, reconstitution progressive de la biodiversité.

Toutes les espèces pionnières recommandées se développent naturellement dans différentes catégories de maquis miniers, certaines se rencontrant de manière très dispersée sur les anciens sites d'exploitation minière. Outre leur très bonne adaptation à une ou plusieurs catégories de milieux sur substrats ultramafiqes, garantie d'un maintien durable, les espèces retenues sont relativement communes, fructifient assez abondamment, sont faciles à collecter et possèdent des graines ne nécessitant pas la mise en œuvre de techniques sophistiquées pour la levée de dormance, leur conservation et leur germination. Elles sont en outre pour la plupart relativement faciles à élever en serre et à planter sur site, et présentent l'avantage de fructifier abondamment après replantation, ce qui leur permet de se régénérer et de se disséminer.

Les données rassemblées dans les fiches qui suivent permettent d'obtenir en pépinière, par germination de graines ou par bouturage, des plants d'environ 70 espèces adaptées à différents types de substrats ultramafiqes. Ce nombre peut être porté à près de 100 si les espèces moins communes, ou dont les graines sont plus difficiles à faire germer, sont aussi prises en compte (cf. section 3 de ce chapitre et tableau de synthèse en annexe 8).

Certaines espèces n'ont pas été retenues, telles que *Acacia spirorbis* (gaïac) et *Casuarina collina* (bois de fer), pour les raisons développées à la section 4.1 du chapitre 6, mais également parce qu'elles sont déjà bien documentées et connues des pépiniéristes. La fougère aigle (*Pteridium esculentum*), espèce autochtone pantropicale, dont l'utilisation a été parfois suggérée, devrait logiquement être évitée : elle est en effet caractéristique des stades ultimes de dégradation du maquis minier par le feu, qu'elle favorise largement par la production de frondes sèches très inflammables (Jaffré *et al.* 1998^b), empêchant le processus de succession et laissant la place à un stade figé, floristiquement appauvri (décrit et illustré au chapitre 3, section 6).

D'autres espèces n'ont pas été reprises ici, bien qu'elles aient été préconisées par le passé (Jaffré & Pelletier 1992). La plupart conservent un réel intérêt (reprises dans les tableaux de synthèse, annexe 8), même si elles présentent quelques inconvénients : production de graines faible et difficulté de récolte (*Normandia neocaledonica*, *Phyllanthus* spp., etc.), biologie insuffisamment connue (*Archidendropsis* spp., *Baloghia* spp., *Hybanthus caledonicus*, etc.), ou encore graines difficiles à faire germer (*Dracophyllum* spp., *Styphelia* spp., etc.). Enfin, quelques espèces potentiellement intéressantes, mais insuffisamment étudiées, ne sont présentées que succinctement à la fin de ce chapitre, en troisième partie (après les fiches).

2. FICHES PAR ESPÈCE, CLASSÉES PAR FAMILLE

Cette partie regroupe donc les espèces indigènes pionnières des terrains miniers pour lesquelles les connaissances sont suffisantes pour une présentation sous forme de fiches détaillées (cf. pages suivantes). Celles-ci sont classées par ordre alphabétique des familles, genres et espèces et contiennent les informations suivantes :

- **PRÉSENTATION DE LA FAMILLE :** au sein de chaque famille considérée, sont donnés les genres présents en Nouvelle-Calédonie, dans les différentes catégories de milieux. Au sein des genres, les espèces sont dénombrées. Une description botanique succincte des principaux traits taxonomiques de la famille et des genres retenus permet d'orienter l'identification d'échantillons par un utilisateur. Les données les plus récentes ont été prises en compte au moment de la rédaction, à partir des références suivantes : Aubreville *et al.* 1967-2006, Raynal 1974, Jaffré *et al.* 2001^c, Kranitz 2005, Morat *et al.* 2010. Des références complémentaires ont été consultées (cf. liste plus bas) : Guillaumin 1943, 1948, Webb *et al.* 1988, Bayer *et al.* 1998, Spichiger *et al.* 2004, Craven *et al.* 2006, Elmore 2008, APG III (2009), Watson & Dallwitz 2010.

Les fiches présentant les espèces retenues pour la revégétalisation contiennent les informations suivantes :

- **NOM DE GENRE ET NOM D'ESPÈCE :** nom latin de genre suivi du nom de l'espèce (selon les règles classiques de la taxonomie). La synonymie a été renseignée lorsque l'espèce a été révisée récemment (d'après Jaffré *et al.* 2001^c, Morat *et al.* 2010).
- **STATUT :** endémique ou non (d'après Jaffré *et al.* 2001^c et Morat *et al.* 2010).
- **DESCRIPTION :** une description assez complète de l'espèce est donnée, avec ses principaux critères de reconnaissance (d'après *Flore de la Nouvelle-Calédonie et dépendances* : Aubreville *et al.* 1967-2006).
- **HABITAT :** répartition, type de sol, type de milieu, pluviométrie, altitude où se rencontre l'espèce (d'après *Flore de la Nouvelle-Calédonie et dépendances* : Aubreville *et al.* 1967-2006, l'herbier du centre IRD (NOU), Jaffré 1980, Jaffré & Pelletier 1992, IAC et IRD, com. pers.).
- **PHÉNOLOGIE :** cycles de floraison et de fructification. La synchronicité est donnée quand elle est connue (une synchronicité élevée indique que beaucoup d'individus, au sein de l'espèce, sont en fleur ou en fruit en même temps) (données compilées d'après l'herbier du centre IRD (NOU), *Flore de la Nouvelle-Calédonie et dépendances* : Aubreville *et al.* 1967-2006, Bailly 1986, Jaffré & Rigault 1991, Jaffré & Pelletier 1992, Derroire *et al.* 2008, IAC et IRD, obs. pers.).
- **DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :** cartes de répartition, sur la Grande Terre, l'île des Pins et les îles Bélep (d'après *Flore de la Nouvelle-Calédonie et dépendances* : Aubreville *et al.* 1967-2006, l'herbier du centre IRD (NOU), IAC et IRD, obs. pers.).
- **STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :** en fonction du type de fruit, le stade et la technique de collecte les plus adéquats sont décrits (d'après IAC, com. pers., Bailly 1986).
- **EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :** description des techniques pour extraire les graines des fruits, puis pour les traiter (nettoyage, tri des graines fertiles...), avant leur mise en germination ou leur stockage (d'après IAC, com. pers., Bailly 1986).
- **DONNÉES QUANTITATIVES :** après nettoyage et séchage à l'air libre, le poids de 1000 graines est déterminé, selon les protocoles de l'ISTA (déterminations IAC).

- **TEST DE VIABILITÉ** : tests mis en œuvre (coupe de graine, coloration au tétrazolium, test de germination) selon les protocoles de l'ISTA (Karnadi 2008, déterminations IAC, com. pers.).
- **GERMINATION / PRÉTRAITEMENT** : les résultats présentés correspondent à un seul lot récolté ; chaque point est la moyenne de 100 graines (4 boîtes de Petri x 25 graines : pour faciliter la lecture, les écarts-types ne sont pas présentés) ; les conditions expérimentales sont indiquées sur la figure. Il convient de signaler que les résultats peuvent être variables selon les lots collectés. Protocoles de levée de dormance : d'après Bailly 1986, Jaffré & Rigault 1991, Jaffré & Pelletier 1992, Baskin & Baskin 1998, Fogliani 2002, Orvain 2007, Wulff *et al.* 2008, IAC, com. pers. Résultats présentés d'après IAC, com. pers.
- **STOCKAGE** : comportement des graines évalué après séchage à l'air libre, puis stockage à 4 °C en récipient hermétique (d'après Wulff *et al.* 2008, IAC et UNC, com. pers.).
- **CULTURE EN PÉPINIÈRE** : plants élevés en plaques de culture (volume des alvéoles environ 250 ml), dans un substrat à base de terreau, latérite, vermiculite et perlite, sans fertilisants supplémentaires, à température extérieure et arrosage quotidien (en serre, à Port Laguerre) (d'après IAC, com. pers.).
- **COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE** : échantillons prélevés sur des plantes présentes sur le type de sol où elles sont les plus fréquentes (d'après T. Jaffré, IRD).

Sauf mention contraire, les photographies présentées dans ce chapitre qui n'indiquent pas de copyright ont été réalisées par l'IAC, qui en reste propriétaire.

Liste bibliographique complémentaire consultée pour la confection des fiches :

- APG III. 2009. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161 (2): 105-202.
- Bayer C., Appel. O. 1998. Joinvilleaceae. Pp. 249-251, *in* Kubitzki, K. (ed.), *The Families and Genera of Vascular Plants. IV. Flowering Plants. Monocotyledons. Alismatanae and Commelinanae (except Gramineae)*. Springer, Berlin.
- Craven L.A., Biffin E., Ashton P.S. 2006. *Acmena, Acmenosperma, Cleistocalyx, Piliocalyx* and *Waterhousea* formally transferred to *Syzygium* (Myrtaceae). *Blumea*, 131-142.
- Elmore M. 2008. *Pollination biology of Hawaiian Scaevola* (Goodeniaceae). M.S. thesis, Univ. Hawaii, Manoa.
- Guillaumin A. 1943. *Introduction à la flore de la Nouvelle-Calédonie*. Annales du musée colonial de Marseille, sér. 6, vol. 1.
- Guillaumin A. 1948. *Flore analytique et synoptique de la Nouvelle-Calédonie*. Phanérogames. Office de la recherche scientifique coloniale. Paris.
- Spichiger R.-E., Savolainen V.V., Figeat M., Jeanmonod D., Perret M. 2004. *Botanique systématique des plantes à fleurs : une approche phylogénétique nouvelle des angiospermes des régions tempérées et tropicales*. 3^e éd., Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 413 p.
- Watson L., Dallwitz M. J. *The Families of Flowering Plants*. [En ligne] <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/delta/angio/> (consulté le 01/01/2010).
- Webb C. J., Sykes W. R., Garnock-Jones P.J. 1988. *Flora of New Zealand, Vol. IV: Naturalised pteridophytes, gymnosperms, dicotyledons*. Botany Division, DSIR, Christchurch. 1365 p. [En ligne] www.endemia.nc

La famille des Araucariaceae possède trois genres : *Agathis*, *Araucaria* - représentés en Nouvelle-Calédonie - et *Wollemia*, monospécifique, d'Australie. Presque la moitié (45 %) des espèces de cette famille, rassemblant 4 espèces du genre *Agathis* (« kaori ») et 13 espèces du genre *Araucaria*, se trouvent uniquement en Nouvelle-Calédonie. Trois espèces du premier genre et 12 espèces du second se rencontrent sur substrat ultramafique. De plus, 2 espèces du genre *Agathis* et 10 espèces du genre *Araucaria* sont strictement localisées sur ce substrat. L'emblématique « pin colonnaire » (*Araucaria columnaris*) n'est représenté sur terrains miniers que très localement dans l'extrême Sud de la Grande Terre.

Bien que toutes les espèces des genres *Araucaria* et *Agathis* soient initialement des espèces forestières, qui ne se régénèrent qu'au bénéfice de chablis et qui à l'état adulte dominant la voûte des feuillus, plusieurs espèces (*Araucaria humboldtensis*, *A. laubenfelsii*, *A. luxurians*, *A. montana*, *A. muelleri*, *A. nemorosa*, *A. rulei*, *A. scopulorum* et *Agathis ovata*) se développent aussi dans les maquis miniers. En effet, très héliophiles et adaptées aux sols pauvres, elles se multiplient abondamment dans le maquis, jouant alors le rôle d'espèces pionnières (Enright *et al.* 2001, Manauté *et al.* 2004, Rigg *et al.* 1998). En l'absence d'incendies, les Araucariaceae qui subsistent dans le maquis facilitent la succession du maquis vers la forêt en créant de meilleures conditions d'alimentation hydrique et minérale sous leur couvert. En revanche, les incendies rapprochés, tels qu'ils ont sévi dans la plupart des massifs au cours des dernières décennies, anéantissent les populations d'*Araucaria* dont les jeunes pieds sont totalement détruits ainsi que des pieds adultes par blessures successives.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres sempervivents, résineux, la plupart du temps monoïques, quelquefois dioïques. Feuilles généralement larges et aplaties, parfois aiguës ou subulées, disposées en spirale. Cônes mâles, accompagnés au-dessous de plusieurs écailles grandes et minces, en position axillaire ou terminale, de forme cylindrique, comportant de nombreuses microsporophylles (4 à 20) disposées en spirale, supportant de nombreux sacs polliniques. Cônes femelles en position terminale de forme globuleuse à ovoïde. Pas de bractées, chaque carpelle imbriqué, disposé en spirale, ne comporte qu'un seul ovule sur la surface supérieure. Cône mature lignifié se débitant en graines ailées. Plantules comptant 2 ou 4 cotylédons.

CLÉ DE DÉTERMINATION DES GENRES :

Araucaria : Feuilles largement sessiles et disposées en hélice.

Agathis : Feuilles plus ou moins pétiolées et opposées-décussées.

Remarque : Des nodules mycorhiziens (myconodules) ont été observés sur les racines des espèces du genre *Araucaria* (Yves Prin, com. pers.).



Araucaria scopulorum (cap Bocage).

Araucaria montana, *Araucaria rulei*



Araucaria rulei (Poro).

STATUT DES ESPÈCES : Endémiques.

DESCRIPTION :

Caractères communs au genre : Grands arbres (20-30 m), aux feuilles persistantes, très rigides, sessiles, épaissies à la base, insérées en hélice. Cônes femelles (dont chaque carpelle ne supporte qu'un seul ovule, qu'une seule graine) se désarticulant à maturité. Écorce du tronc s'exfoliant en bandes horizontales et devenant écailleuse sur les vieux individus.

Distinction des deux espèces :

Caractère discriminant	<i>A. montana</i>	<i>A. rulei</i>
Cime	arrondie, à tabulaire pour les adultes	arrondie
Écorce	brun foncé à gris	blanchâtre
Diamètre des ramilles, feuilles comprises	1,5 à 2,2 cm	3,5 à 4 cm
Orientation de la feuille	en écaille (adulte), courbée vers l'intérieur	pointant vers l'extérieur
Taille des feuilles adultes	11-14 mm de long, 7-8 mm de large	25 mm de long, 11-14 mm de large
Taille des cônes à graines	8-9 cm de long et 6-8 cm de diamètre	12 cm de long et 8 cm de diamètre
Longueur de la pointe de la graine	5-10 mm	15 mm

HABITAT :

• *A. montana* est signalé sur les plateaux et crêtes des principaux massifs de la Grande Terre, de la région de Thio aux mont Kaala et mont Panié. Cette espèce est plus abondante dans les massifs de roches ultramafiques que sur roches acides. Elle se rencontre au-dessus de 800 m d'altitude à l'ouest, tandis qu'à l'est, où la pluviométrie est plus importante, elle descend jusqu'à 300 m. Les peuplements d'*Araucaria montana* dominent généralement des maquis arbustifs buissonnants ainsi que des forêts basses.

• *A. rulei* se trouve sur la Grande Terre, entre la plaine des Lacs et Tiébaghi. Cette espèce se développe sur roches ultramafiques, dans des maquis sur sols gravillonnaires ou cuirassés. Elle est présente en forêt dense humide et en maquis, des basses altitudes jusqu'à plus de 1 000 m. N. B. : Statut IUCN : EN (en danger), en raison de la forte réduction de ses effectifs (plus de 50 %) au cours des dernières décennies et de la fragmentation de ses populations souvent résiduelles (Jaffré *et al.* 2010).

PHÉNOLOGIE :

Les cônes commencent à se développer entre juillet et novembre. La maturation d'un cône femelle nécessite 16 à 18 mois. La récolte des cônes matures s'effectue entre janvier et mars.



Arbre adulte d'*A. montana*.

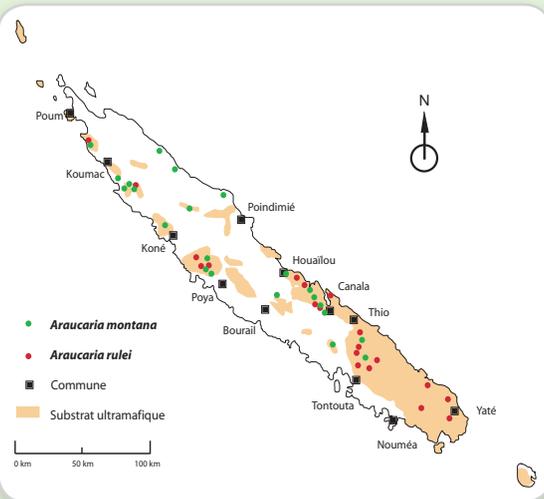


Ramille adulte d'*A. montana*.



Ramille adulte d'*A. rulei*.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :



D'après *La flore de Nouvelle-Calédonie* (MNHN) et Kranitz (2005).

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

La maturité est indiquée par les premières semences repérées au sol ou par un léger brunissement du cône femelle. Cela nécessite un contrôle régulier (une fois par semaine à partir de janvier). La fructification est aléatoire selon les années. L'idéal est de collecter les cônes encore fermés : soit par ascension de l'arbre, soit à l'aide d'un écheloir.

À défaut, la collecte au sol de petites quantités de graines fraîchement tombées est possible.

Dans ce cas, collecter les graines de préférence avant la pluie et ne pas les stocker. La prise en compte de l'origine des semences en fonction du site à restaurer est essentielle (cf. remarque).

N. B. : La technique d'ascension est dangereuse et ne doit être réalisée que par des équipes possédant l'expérience et l'équipement *ad hoc* indispensables.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les graines sont séparées manuellement du cône (si nécessaire, les laisser mûrir en salle pour faciliter leur délitage), puis désailées afin de leur faire subir le test de flottaison. Les graines qui flottent horizontalement ne sont pas viables. Si le résultat du test de viabilité (ci-dessous) est très bon, il n'est pas nécessaire de procéder au test de flottaison.



Cônes femelles d'*A. montana*.

© IRD / T. Jaffré



Graines d'*A. rulei*.



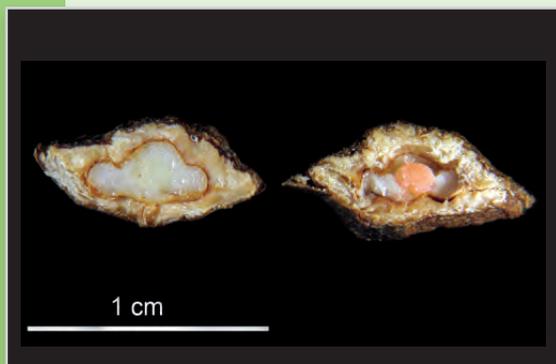
Graine désailée d'*A. montana*.

DONNÉES QUANTITATIVES :

Environ 400 g pour 1 000 graines désailées. Environ 200 à 300 graines par cône.

TEST DE VIABILITÉ :

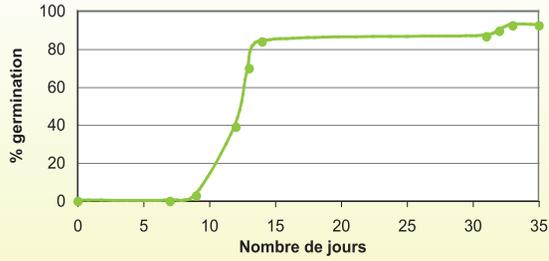
Il se fait directement par une coupe dans la largeur de la graine, qui doit révéler la présence d'un embryon de couleur rose. Faire un test sur un petit échantillon afin d'évaluer la viabilité de l'ensemble du lot.



Test de viabilité (coupe de graines) :
À gauche, une graine d'*Araucaria* contenant uniquement l'endosperme (non viable).
À droite, une graine contenant l'endosperme et l'embryon (viable).

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, aucun prétraitement nécessaire (cf. courbe). Les meilleurs résultats de germination sont obtenus aux températures supérieures à 25 °C. Germination très ralentie à moins de 15 °C.



Courbe de germination d'*Araucaria montana*. Culture : sans traitement, arrosage régulier, enceinte (29 °C + éclairage 12 h / 22 °C sans éclairage 12 h).

STOCKAGE :

Graines récalcitrantes ou intermédiaires (environ 30 % d'eau chez *A. rulei*), ne peuvent donc pas se conserver sur le long terme. La meilleure méthode connue actuellement est la suivante : prendre des graines dans des cônes encore fermés (germination non initiée), laisser sécher la surface légèrement (une heure ou deux à l'ombre, pour éviter les moisissures), les mettre dans des flacons hermétiques (éviter leur déshydratation) et les stocker à 3 °C. Cela permet de maintenir la viabilité des graines pendant 6 mois environ, au-delà, le taux de germination diminuera rapidement.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir des graines. Utiliser de préférence des contenants profonds. Durée de culture : environ 15 à 20 mois (selon le substrat et la température), en alvéoles d'environ 700 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.



Jeunes plants d'*Araucaria montana* (à 2 mois).



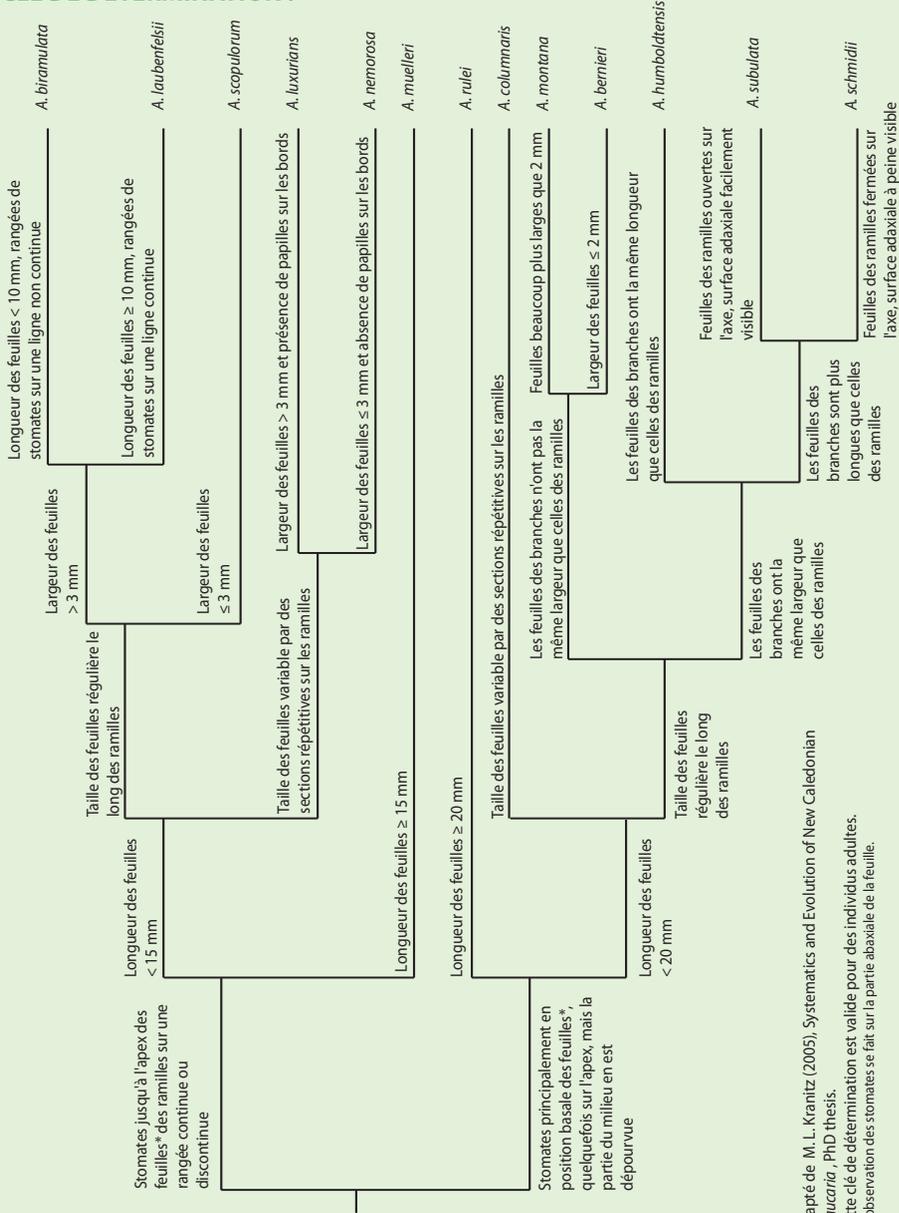
Plant d'*A. montana* (à 16 mois).

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>A. montana</i> (n = 2)	0,66	0,03	0,27	2,03	0,23	0,44	315	52	0,27
<i>A. rulei</i> (n = 4)	0,57	0,03	0,41	1,44	0,25	0,27	393	21	0,83

Araucaria montana, Araucaria rulei

CLÉ DE DÉTERMINATION :



Adapté de M. L. Kranitz (2005), Systematics and Evolution of New Caledonian *Araucaria*, PhD thesis.

Cette clé de détermination est valide pour des individus adultes.

* L'observation des stomates se fait sur la partie abaxiale de la feuille.

REMARQUE :

D'autres espèces d'*Araucaria* se rencontrent sur sites miniers (*A. bernieri* sur les massifs du Sud, de Tiébaghi, de Poum..., *A. biramulata* sur le Kopéto, le mont Do..., *A. scopulorum* sur cap Bocage, Tiébaghi, Poum...).

La clé de détermination ci-jointe permet d'identifier les différentes espèces.

Toutefois, les identifications sont parfois difficiles, certains individus présentant des caractères intermédiaires entre deux espèces. Il a été montré, en effet, qu'au sein d'une même espèce d'*Araucaria* il existe des particularités génétiques entre différentes populations (Kranitz 2005).

Il apparaît ainsi indispensable, dans un souci de conservation de la diversité génétique des espèces, de récolter les graines d'*Araucaria* dans un environnement proche du site à revégétaliser. Aussi est-il important de bien préciser la provenance des graines dans le cas de production de plants.

La famille des Casuarinaceae est largement représentée en Nouvelle-Calédonie, tant par le nombre d'espèces que par l'abondance de plusieurs d'entre elles, qui ont le plus souvent un comportement grégaire dans des groupements végétaux secondaires. Elle possède 3 espèces du genre *Casuarina*, dont 2 endémiques se développant sur terrains miniers (*C. collina* et *C. teres*, cette dernière étant connue sur quelques sites dans la région de Voh-Koné), et 8 espèces endémiques du genre *Gymnostoma*, sur les 18 que compte le genre réparti sur l'Australie, la Malaisie et la Mélanésie. Six espèces sont strictement associées aux roches ultramafiques (*G. chamaecyparis*, *G. deplancheanum*, *G. glaucescens*, *G. leucodon*, *G. poissonianum* et *G. intermedium*). Cette dernière espèce est aussi cantonnée à ces substrats, à une exception (sur la Roche Ouaième). Deux espèces, *G. webbianum* et *G. nodiflorum*, sont davantage inféodées aux roches acides du Nord. *G. webbianum* est nettement ubiquiste, tandis que *G. nodiflorum* ne se rencontre sur alluvions péridotitiques (ou mixtes) que dans les régions de Kouaoua et de Canala.

Gymnostoma chamaecyparis et *G. deplancheanum* appartiennent aux maquis et aux maquis paraforestiers. *G. chamaecyparis* est associé à des sols magnésiens issus de serpentinites, le plus souvent en dessous de 500 m d'altitude. *G. deplancheanum* se développe principalement sur sols ferrallitiques gravillonnaires ou cuirassés, généralement en dessous de 700 m, uniquement dans le grand massif du Sud.

Casuarina collina, *Gymnostoma leucodon*, *G. nodiflorum* et *G. webbianum* ont leur optimum écologique et leur plus grande fréquence dans des formations ripicoles. *Casuarina collina* (bois de fer) est aussi très commun sur des sols très variés. Cette espèce ayant tendance à former des peuplements stables monospécifiques, il semble prudent de ne l'utiliser que de manière limitée et uniquement dans des milieux où son extension peut être contrôlée. *Gymnostoma leucodon* se rencontre sur les berges de quelques rivières (rivière des Pirogues, Tontouta, creek Pernod...) dans les massifs du Sud. Il a donné d'excellents résultats dans deux essais (mont Dore et Crépuscule à Thio) sur saprolites et sur latérites. *G. nodiflorum* s'est, comme l'espèce précédente, révélé capable de se développer sur saprolites dans un essai sur le mont Dore, à partir de graines récoltées à la cascade de Ciu, sur roches acides.

Gymnostoma glaucescens, *G. intermedium* et *G. poissonianum* ont un comportement nettement plus forestier, atteignant couramment des tailles supérieures à 15 m. *G. glaucescens* se rencontre en populations grégaires ou sous forme d'arbres isolés le plus souvent sur des sols ferrallitiques remaniés dans le massif du Sud ainsi que dans des massifs isolés (Mé Maoya, Boulinda...). *G. intermedium* se développe sur des sols ferrallitiques variés le plus souvent au-dessus de 700 m d'altitude. *G. poissonianum* se développe à basse et à moyenne altitude préférentiellement sur des sols ferrallitiques remaniés, mais aussi sur alluvions et plus rarement sur sols bruns (Jaffré *et al.* 1994^a).

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres ou arbustes à feuilles réduites à des dents écailleuses verticillées, portées à l'état jeune par des rameaux chlorophylliens. Fleurs monoïques ou dioïques, les mâles en épis, les femelles en cônes. Fruits en capsules, groupés en cône. Graines ailées comprimées.

CLÉ DE DÉTERMINATION DES GENRES :

Casuarina : rameaux chlorophylliens en section presque ronde.

Gymnostoma : rameaux chlorophylliens en section anguleuse.

Remarques : Toutes les espèces développent une symbiose racinaire avec un actinomycète fixateur d'azote du genre *Frankia* (Gauthier *et al.* 2000, Navarro *et al.* 1999).

Gymnostoma chamaecyparis, *G. deplancheanum*, *G. poissonianum*



Gymnostoma deplancheanum (Sud).

STATUT DES ESPÈCES : Endémiques.

DESCRIPTION :

Caractères communs aux espèces concernées : Arbustes de 3 à 15 m de haut. Feuilles réduites à de petites écailles triangulaires (correspondant à l'extrémité des feuilles), insérées sur des pseudo-cladodes (composés de la fusion de la tige et des tissus foliaires chlorophylliens), disposées en verticilles de quatre écailles (ce nombre étant supérieur pour les espèces du genre *Casuarina*). Espèces dioïques. Inflorescence

féminelle globulaire portée par un pédoncule. Inflorescence mâle terminale et sessile. Fruits, résultant du développement des cônes femelles lignifiés, constitués de loges, chacune contenant une graine ailée.

Distinction des trois espèces : La distinction entre les différents *Gymnostoma* se fait en observant la forme des nœuds (zone d'insertion des écailles) et des pseudo-cladodes.

- *G. chamaecyparis* a un feuillage tendant vers le vert-jaune avec des ramilles assez fines.
- *G. deplancheanum* se distingue par des rameaux dressés, en général disposés en verticilles plus réguliers que chez *G. poissonianum*, ainsi que par un liseré de tissus nécrosés au niveau des écailles.
- *G. poissonianum* a un feuillage souple au toucher par rapport à *G. deplancheanum* avec lequel on peut le confondre.

HABITAT :

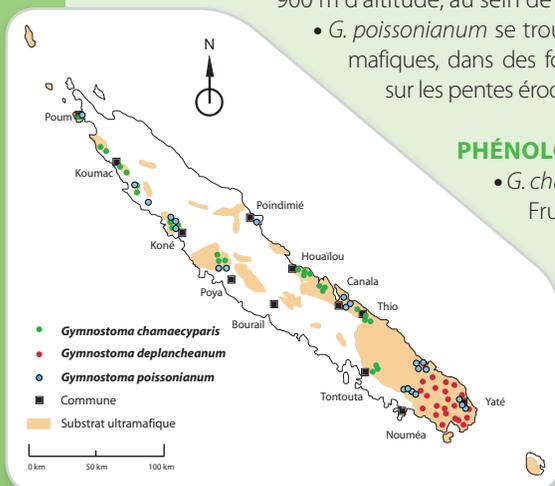
- *G. chamaecyparis* se développe sur des sols bruns hypermagnésiens et sur alluvions. Il est abondant sur les serpentinites au pied des massifs miniers, dépassant rarement 600 m d'altitude, au sein de maquis arbustifs et localement en maquis paraforestier et parfois en forêt rivulaire basse.
- *G. deplancheanum* se développe sur des sols ferrallitiques gravillonnaires ou cuirassés. D'importantes populations de cette espèce se trouvent dans le massif du Sud, jusqu'à 900 m d'altitude, au sein de maquis arbustifs ou préforestiers.
- *G. poissonianum* se trouve uniquement sur les massifs de roches ultramafiques, dans des formations végétales forestières et paraforestières, sur les pentes érodées à des altitudes comprises entre 200 et 700 m.

PHÉNOLOGIE :

- *G. chamaecyparis* : Floraison principale de mai à août. Fructification principale de décembre à février.
- *G. deplancheanum* : Floraison principale de juin à septembre. Fructification principale de décembre à mars (fleurs et fruits mûrs vus également à d'autres périodes, ex. en juillet).
- *G. poissonianum* : Floraison de janvier à août. Fructification de septembre à avril.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après l'herbier du centre IRD (NOU).





G. chamaecyparis, plant adulte.



G. chamaecyparis, *G. deplancheanum*,
G. poissonianum (de gauche à droite).



Détail des pseudo-cladodes (de haut en bas) :
G. chamaecyparis, *G. deplancheanum*, *G. poissonianum*.



Fleurs mâles de *G. deplancheanum* (à gauche).
Fleurs femelles de *G. deplancheanum* (à droite).

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les fruits se récoltent lorsqu'ils commencent à brunir et que les loges commencent à peine à s'ouvrir. Fruits souvent nombreux par pied, mais pas tous au même stade (collecte étalée).

N. B. : Les espèces étant dioïques, veiller à avoir des pieds mâles à proximité pour augmenter les chances de collecter des graines fertiles.



Fruits mûrs de *G. deplancheanum*.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les fruits sont séchés sur un tamis à température ambiante, dans un endroit sec et aéré. Ils s'ouvrent en quelques jours, puis sont tapotés sur un tamis (n° 6), sous lequel sont récupérées les graines. Un passage au « vacuum cleaner » permet d'éliminer les déchets fins. Des graines non viables sont souvent présentes, qu'on ne peut toutefois différencier visuellement des graines viables.



Graines de *G. deplancheanum*.

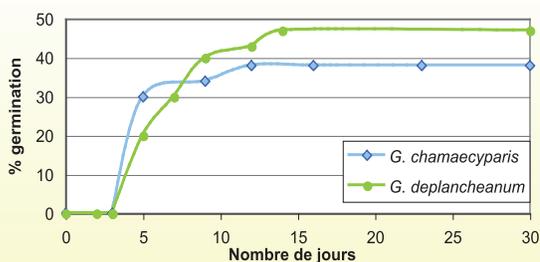
DONNÉES QUANTITATIVES :

De 2,7 à 5,7 g pour 1 000 graines.
Jusqu'à 16 graines par fruit.

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, toutes les graines viables germent en moins de 15 jours, à des températures comprises entre 22 et 29 °C.

Gymnostoma chamaecyparis, *G. deplancheanum*, *G. poissonianum*



Courbes de germination de *G. chamaecyparis* et de *G. deplancheanum*. Culture : sans traitement, arrosage régulier, enceinte (29 °C + éclairage 12 h / 22 °C sans éclairage 12 h).

STOCKAGE :

Espèces orthodoxes ou intermédiaires (reste à préciser) : avec une teneur en eau de 9 % et un stockage à 3 °C, le taux de germination ne varie pas au cours des 15 premiers mois de conservation, puis il diminue. À conserver après léger séchage en boîtes hermétiques à 3 °C.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Assez facile à cultiver à partir de graines. Repiquage à l'apparition des premières vraies feuilles. Mortalité des plantules assez fréquente après repiquage, non expliquée. Durée de culture : environ 12 à 18 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ou 500 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, aucun traitement nécessaire (cf. courbes).

Taux de germination variable selon les lots.



Plantules de *G. deplancheanum* à un mois.



Jeunes plants de *G. deplancheanum* (à 5 mois).

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>G. chamaecyparis</i> (n = 18)	0,91	0,02	0,38	0,77	0,21	0,38	508	23	0,12
<i>G. deplancheanum</i> (n = 28)	0,76	0,02	0,45	1,06	0,25	0,44	306	30	0,21
<i>G. poissonianum</i> (n = 12)	0,90	0,02	0,53	0,82	0,23	0,28	128	20	

Toutes les Casuarinaceae du territoire sont associées à des bactéries fixatrices d'azote du genre *Frankia*, contribuant ainsi à enrichir le sol environnant en cet élément indispensable.

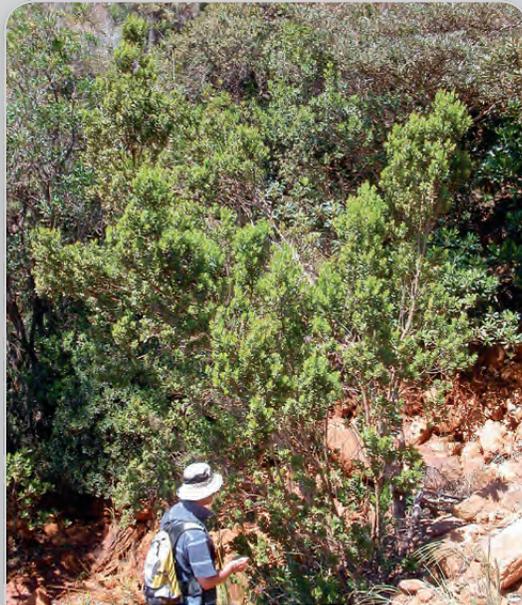
REMARQUE :

L'utilisation d'autres espèces de *Gymnostoma* est possible : de bons résultats ont été obtenus sur des essais à Thio et sur le mont Dore avec *G. leucodon* et *G. nodiflorum*, bien que tous deux soient surtout rivulaires (altitude 150-200 m). *G. glaucescens*, *G. intermedium* (au-dessus de 700 m) et *G. webbianaum* sont aussi présents sur terrains miniers. La phénologie, les techniques de collecte et de germination sont identiques à celles des autres espèces.

La famille des **Celastraceae** comprend,, en Nouvelle-Calédonie, 24 espèces dont 21 endémiques. Dix-neuf espèces se rencontrent sur terrains miniers et 7 leur sont strictement liées. Elles se répartissent en huit genres. Cinq espèces sur six du genre *Elaeodendron* se rencontrent sur roches ultramafiques et trois d'entre elles sont strictement associées aux maquis. Les genres endémiques principalement forestiers, *Menepetalum*, *Dicarpellum* (quatre espèces) et *Salaciopsis* (six espèces), possèdent respectivement trois, quatre et quatre espèces sur terrains miniers, la plupart d'entre elles étant ubiquistes. Le genre *Maytenus* possède une espèce ubiquiste, très fréquente dans les maquis miniers (*M. fournieri*). Les genres non endémiques *Celastrus* et *Pleurostyliya* (une espèce chacun) sont également ubiquistes mais peu fréquents sur terrains miniers. Le genre endémique monospécifique *Peripterygia* est, quant à lui, très commun et strictement cantonné aux maquis sur roches ultramafiques. *Peripterygia marginata* se trouve dans différentes catégories de maquis, sur alluvions, sur sol brun et sur sol ferrallitique remanié. Il ne se développe pas sur cuirasse ni sur sol gravillonnaire.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbrisseaux, arbres ou lianes. Feuilles opposées ou sub-verticillées ou alternes, simples, entières, parfois groupées au sommet des rameaux, à marges souvent crénelées, plus rarement entières ; stipules petites, simples ou laciniées, caduques ou absentes. Inflorescence en cyme, racème ou panicule, parfois fleurs solitaires ou groupées en fascicules, axillaires et/ou terminales, parfois portées par des rameaux défeuillés, le plus souvent bractéolées. Fleurs généralement petites, actinomorphes, bi- ou unisexuées (en ce cas, plantes principalement dioïques ; 4 ou 5 sépales, imbriqués, rarement valvaires, généralement persistants ; 4 ou 5 pétales, libres ou rarement soudés à la base, imbriqués, contortés, rarement valvaires, caducs, parfois persistants ; 4 ou 5 étamines, parfois plus, alternipétales. Fruits en drupes, baies, capsules déhiscentes ou fruits secs indéhiscentes. Graines parfois ailées ; arille présent ou absent, enveloppant partiellement ou totalement la graine.



Peripterygia marginata (Tontouta).

Peripterygia marginata



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbrisseau pouvant atteindre 4 m de haut, à écorce grise à noirâtre. Feuilles coriaces, à marge crénelée et nervure principale saillante. Inflorescences en grappes, fleurs de 6,5-7 mm de diamètre, 5 pétales blancs à roses. Fruits déhiscents, dressés en capsules lignifiées, brunes, à 3 loges concaves, s'ouvrant en valves minces vers le haut et contenant 1 à 2 graines par loge. Graines aplaties, jaunâtres à brunes, de 5 mm de diamètre, entourées d'une aile souple de 1,5-2 mm de largeur.

Critères de reconnaissance : Le port dressé des feuilles et des rameaux est caractéristique. Les feuilles, légèrement révolutes, ont un bord crénelé. Les fruits, très reconnaissables, restent longtemps sur la plante après ouverture.

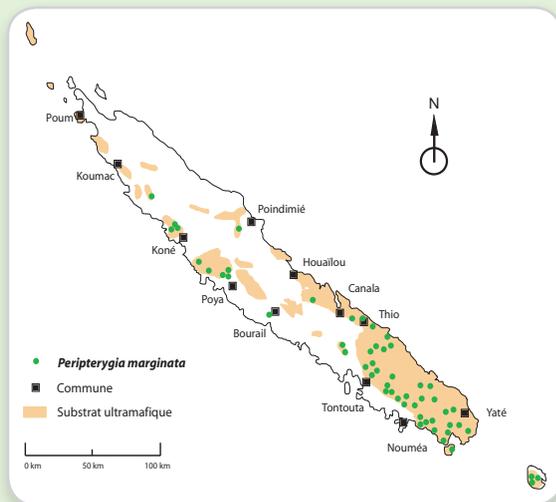
HABITAT :

Peripterygia marginata se développe entre 0 et 1 050 m. L'espèce pousse sur sols ferrallitiques remaniés, sur sols bruns hypermagnésiens et sur alluvions. Elle est cantonnée aux maquis sur roches ultramafiques. Elle résiste bien à la sécheresse.

PHÉNOLOGIE :

Floraison principalement d'octobre à février. Fructification quasiment toute l'année, maximale entre mars et juin. Faible synchronisme de floraison et de fructification (peu d'individus en fleur en même temps, ou en fruit en même temps).

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :



D'après *La flore de Nouvelle-Calédonie* (MNHN).

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

La récolte des fruits déhiscents s'effectue manuellement sur l'arbre lorsqu'ils commencent à s'ouvrir ou sont de couleur marron clair (des fruits marron foncé peuvent encore contenir quelques graines adhérentes). Les capsules récoltées au stade encore fermé et de couleur jaunâtre sont immatures et ne s'ouvrent pas en salle. Les bonnes graines sont reconnaissables à leur aspect bombé. Les graines stériles sont fréquentes (souvent 80 à 90 %) : elles sont soit malformées (aspect aplati), soit piquées.



Détail des feuilles.



Fleurs en grappes.



Fruit mûr.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les capsules sont ouvertes manuellement ou battues dans un sac puis tamisées. Le tri des bonnes graines se fait manuellement. N. B. : Les graines sont souvent parasitées.

DONNÉES QUANTITATIVES :

Entre 2 et 4 g pour 1 000 graines triées. Chaque capsule contient en moyenne 4 graines.

Graines de *Peripterygia marginata*.**TEST DE VIABILITÉ :**

Le test de germination semble être le moyen le plus fiable pour quantifier la viabilité des graines. Toutes les graines viables germent en moins de 30 jours.

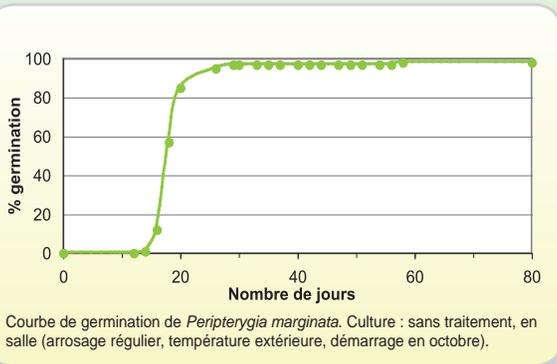
Peripterygia marginata

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, aucun traitement nécessaire (cf. courbe).

STOCKAGE :

Espèce probablement orthodoxe. Les données sont encore insuffisantes pour statuer sur la capacité de conservation de cette espèce.



REMARQUE :

Cette espèce présente des teneurs en calcium assez élevées dans ses tissus foliaires (cf. tableau 3.3 chapitre 3).

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquage sans délai (inutile d'attendre) au stade feuilles cotylédonaire à peine déployées. Durée de culture avant plantation : environ 12 à 14 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés. Bouturage possible à partir de jeunes rameaux (difficulté moyenne, repotage après 60 jours, 65 % de réussite).



Plantules en pépinière (à environ 9 mois).



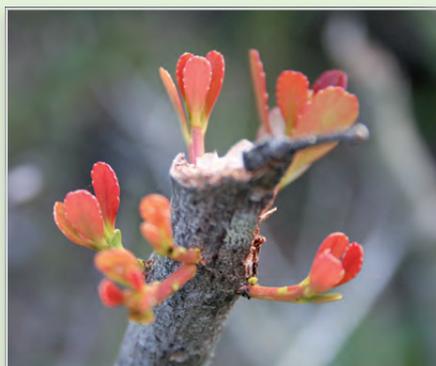
Jeunes plants en pépinière (à environ 2 ans).



Peripterygia marginata peut émettre de nombreux rejets après passage d'un feu.



Peripterygia marginata dans le maquis.



Rejets sur une branche cassée.

La famille des Cunoniaceae totalise, en Nouvelle-Calédonie, 92 espèces (toutes endémiques) réparties sur 7 genres, dont 3 endémiques (*Codia*, *Pancheria*, *Hooglandia*) et un genre (*Cunonia*) possédant une seule espèce en dehors de la Nouvelle-Calédonie (en Afrique du Sud). La famille des Cunoniaceae comprend des arbres, des arbustes et des arbrisseaux, en forêt et en maquis. Plus de 80 % des espèces se rencontrent sur roches ultramafiques et plus de 60 % se trouvent exclusivement sur ce substrat.

Le genre *Codia* possède 15 espèces, dont 12 sur roches ultramafiques incluant 10 espèces dans le maquis.

Le genre *Cunonia* a un total de 25 espèces, dont 23 sur roches ultramafiques incluant 15 espèces dans le maquis ou dans des formations humides basses.

Le genre *Geissois* rassemble 13 espèces, dont 8 sur terrains miniers et 6 qui ne s'en écartent pas.

Le genre *Pancheria*, sur un total de 26 espèces, en possède 18 sur roches ultramafiques, dont 15 dans le maquis. Elles se développent en forêt ou en maquis paraforestiers pour la plupart d'entre elles.

Six espèces du genre *Spiraeanthemum*, sur un total de sept, se rencontrent sur terrains miniers, toutes en forêt et également en maquis pour cinq d'entre elles. Toutefois, seulement deux espèces sont strictement liées aux terrains miniers.

Le genre *Weinmannia* (cinq espèces), essentiellement forestier, ne possède que deux espèces ubiquistes sur roches ultramafiques, et le genre endémique monospécifique *Hooglandia* se trouve uniquement sur roches acides.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres ou arbustes, feuilles opposées ou verticillées, composées ou simples, avec stipules. Fleurs hermaphrodites ou unisexuées, sépales et pétales 3-5 ou 0 (*Geissois*, *Spiraeanthemum* et certains *Codia*). Fruits en capsules s'ouvrant par deux valves (*Cunonia*, *Geissois*), en follicules (*Pancheria*, *Spiraeanthemum*) ou indéhiscents (*Codia*).

CLÉ DE DÉTERMINATION DES GENRES CONCERNÉS :

Cunonia : Feuilles simples, composées trifoliolées ou pennées. Bourgeons stipulaires en forme de spatule. Inflorescences terminales en grappes ou grappes modifiées, capsules déhiscentes, graines anguleuses ou courtement ailées, non velues.

Geissois : Feuilles opposées et composées palmées. Inflorescences en grappes ramiflores (sur les rameaux).

Pancheria : Feuilles simples ou composées, très souvent verticillées par 3 ou plus. Inflorescences en têtes sphériques. Infrutescences glabres, en follicules.

Codia : Feuilles simples, opposées (verticillées par 3 chez *Codia triverticillata* et *Codia albifrons*). Inflorescences en têtes sphériques. Infrutescences laineuses.

Remarque : Outre les espèces présentées ci-après, le genre *Codia*, très présent en maquis, comporte des espèces intéressantes pour la revégétalisation (*C. discolor*, *C. montana*). La germination de leurs graines est rapide sans aucun traitement (environ 15 jours), toutefois la récolte semble aléatoire. En effet, la floraison est souvent faible, tandis que certaines années la fructification est abondante (par exemple en avril-mai 2009, probablement en lien avec le régime pluviométrique). Toutefois les fruits sont le plus souvent sans graines (L'Huillier, obs. pers.).

Cunonia macrophylla



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbre ou arbuste, le plus souvent monocaule, pouvant atteindre 3 à 4 m de haut. Feuilles opposées, composées pennées à 2-3 paires de folioles latérales et une foliole terminale, parfois trifoliolées, à pétiole net long de 3-5 cm. Folioles légèrement dentelées, de 5-15 x 2-6 cm, pétio-lulées. Stipule cordiforme de 1-3 cm, glabre sur la face inférieure. Inflorescences en pseudo-grappes, en paires opposées sur des branches

portant aussi des feuilles en paires opposées. Rachis de la partie florifère plus long que le pédon-cule. Fleurs de couleur verte à jaune, grandes pour le genre (5 sépales, 5 pétales, 10 étamines, ovaire supère, style à deux branches). Capsules de couleur verte à l'état jeune, virant au brun, s'ouvrant en deux valves glabres. Graines assez plates et courtement ailées.

Critères de reconnaissance : *C. macrophylla* se reconnaît bien à ses tiges rouges, à ses stipules proéminentes ainsi qu'à ses panicules de couleur jaune-vert, dont les pistils sont orientés vers le bas.

HABITAT :

Cette espèce est bien répandue dans tout le sud de la Grande Terre, de basse altitude à environ 1 200 m, sur sols ferrallitiques remaniés.

PHÉNOLOGIE :

Floraison principalement d'octobre à avril. Fructification possible toute l'année, fruits mûrs généralement de janvier à juin.



Détail des feuilles et des tiges.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE : D'après l'herbier du centre IRD (NOU).

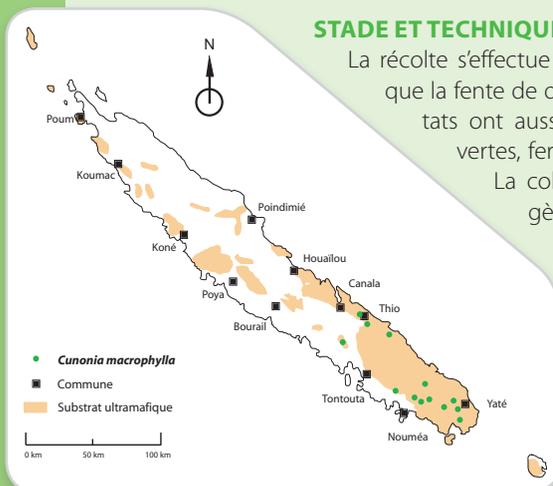
STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

La récolte s'effectue lorsque les capsules commencent à rougir et que la fente de déhiscence commence à s'ouvrir (de bons résultats ont aussi été obtenus avec une collecte de capsules vertes, fermées mais bien pleines, puis séchées en salle).

La collecte est délicate : la fructification est homogène sur un individu, si bien que toutes les graines tombent en même temps. Les infrutescences peuvent être récoltées au sécateur ou avec un échenilloir.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Après séchage des infrutescences en salle, celles-ci sont tapotées manuellement sur un tamis fin (n° 14).



DONNÉES QUANTITATIVES :

0,5 à 0,7 g pour 1 000 graines triées. Présence de nombreuses graines par capsule (jusqu'à 40, mais 60 à 80 % sont des graines vides le plus souvent). Environ 30 à 50 capsules par infrutescence. Production de fruits par pied assez faible.

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, sachant qu'environ 80 % des graines viables germent en moins d'une trentaine de jours.



Détail d'une infrutescence, capsules en phase de maturation.



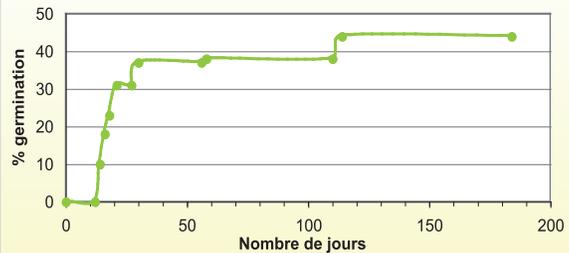
Graines de *Cunonia macrophylla*.



Jeune plant de 10 mois.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, traitement non indispensable (cf. courbe). Une scarification mécanique améliore un peu la vitesse et le taux de germination, ainsi qu'un trempage à l'eau chaude à 40 °C (effet négatif au-dessus). (Seules sont testées les semences d'aspect fertile, caractérisées par la présence d'un embryon bombé.) Température optimale de germination : entre 20 et 25 °C. Aucune germination en dessous de 15 °C ni à plus de 30 °C.



Courbe de germination de *Cunonia macrophylla*. Culture : sans traitement, enceinte (29 °C + éclairage 12 h / 22 °C sans éclairage 12 h).

STOCKAGE :

Espèce probablement orthodoxe : le taux de germination ne varie pas après deux ans de conservation à 3 °C, avec un taux d'humidité des graines de 8,7 % (pas encore de résultats au-delà). À conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Assez facile à cultiver à partir de graines. Ne pas repiquer trop tôt, attendre au moins le stade 2 feuilles cotylédonaires, voire 2 vraies feuilles. Mortalité des plantules assez fréquente. Durée de culture en pépinière avant plantation : environ 12 à 15 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Bouturage difficile.



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbre pouvant atteindre 3 à 6 m de haut. Feuilles opposées, composées palmées, à 5 folioles, glabres, pétiole de 4-5 cm. Folioles pétiolulées de 6-7 x 3-5 cm, à marge entière, à pétiolule de 4 cm. Stipule velue de 0,5 cm. Inflorescence cauliflore en grappe de couleur rouge de 10-15 cm. Fleurs pédicellées (0,5-1 cm), à 4 sépales, pas de pétales, 10 étamines, à ovaire garni de poils épars, à style à deux branches. Capsules vertes à l'état juvénile, puis rouges et enfin brunes à maturité. Graines assez plates et ailées.

Critères de reconnaissance : *G. pruinosa* se reconnaît bien à son feuillage glauque, à feuilles composées palmées, ainsi qu'à son importante floraison en panicules rouges.

HABITAT :

Cette espèce se développe dans les massifs du Sud, uniquement sur roches ultramafiques, entre 30 et 700 m d'altitude, sur des sols variés, à l'exception des sols ferrallitiques gravillonnaires ou cuirassés. Elle est le plus souvent dans des groupements paraforestiers ou préforestiers. Elle s'accommode assez bien de divers degrés d'humidité du sol.

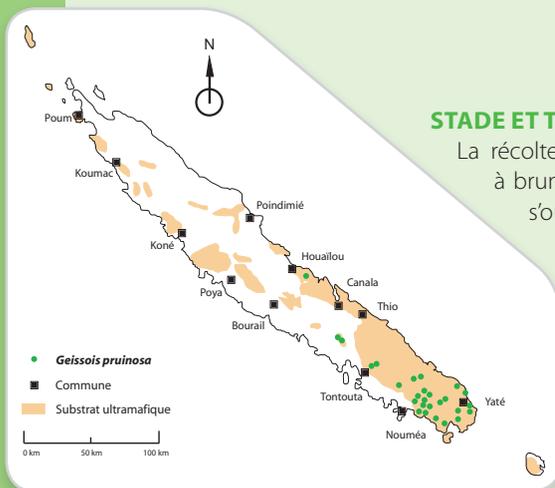
PHÉNOLOGIE :

La floraison et la fructification semblent s'étaler sur toute l'année en fonction de la localité et de l'altitude. Un même pied porte le plus souvent des fleurs et des fruits en même temps. Floraison principale d'octobre à février. Fructification principale de janvier à avril.



Détail des feuilles et des tiges.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE : D'après l'herbier du centre IRD (NOU).



STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

La récolte s'effectue lorsque les capsules commencent à brunir et que la fente de déhiscence commence à s'ouvrir. Les capsules cueillies avant maturité (vertes ou même roses) ne s'ouvrent pas. Un individu porte souvent des infrutescences à des stades différents, ce qui permet de collecter des grappes de fruits mûrs à plusieurs reprises. Les infrutescences peuvent être récoltées au sécateur ou avec un échenilloir. N. B. : Les graines tombent facilement lorsque les capsules sont ouvertes, il convient de positionner un sac en dessous.

Graines de *Geissois pruinosa*.

Détail d'une infrutescence, bon stade de collecte.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Après séchage en salle, les infrutescences ouvertes sont tapotées manuellement sur un tamis fin (n° 14), permettant de récupérer les graines dessous. Un tamis plus fin (n° 16) peut servir ensuite pour éliminer les débris fins.

DONNÉES QUANTITATIVES :

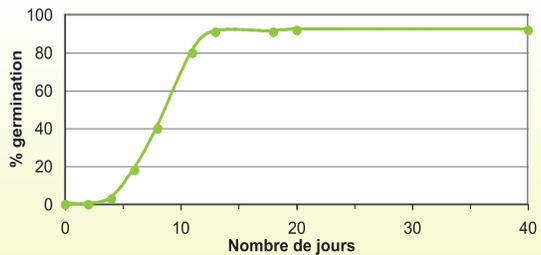
De 1,2 à 1,9 g pour 1 000 graines. Nombreuses graines par capsule (jusqu'à 20-30, mais souvent plus de 60 % sont des graines vides). Environ 10 à 40 capsules par infrutescence.

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, sachant que toutes les graines viables germent en moins de 20 jours.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, aucun traitement nécessaire (cf. courbe). (Seules sont testées les semences d'aspect fertile, caractérisées par la présence d'un embryon bombé.) Température optimale de germination : entre 25 et 30 °C. Aucune germination en dessous de 10 °C ni à plus de 40 °C.



Courbe de germination de *Geissois pruinosa*. Culture : sans traitement, en salle (arrosage régulier, température extérieure, démarrage en avril).

STOCKAGE :

Espèce orthodoxe : le taux de germination ne varie pas après 3,5 ans de conservation à 3 °C, avec un taux d'humidité des graines de 13 % (un séchage plus poussé peut être réalisé). À conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Ne pas repiquer trop tôt, attendre au moins le stade 2 feuilles cotylédonaires, voire 2 vraies feuilles. Durée de culture : environ 12 à 14 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés. Bouturage possible.

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>Geissois pruinosa</i> (n = 46)	0,89	0,03	1,11	1,04	0,59	0,12	230	6 117	3,07

Cette espèce accumule le nickel à des concentrations souvent supérieures à 10 000 ppm (Jaffré *et al.* 1979).



Pancheria billardierei.

REMARQUE :

Les genres *Pancheria* et *Codia* peuvent se confondre, ils se distinguent notamment par leurs fruits (aspect piquant chez *Pancheria*, laineux chez *Codia*).

STATUT DES ESPÈCES : Endémiques.

DESCRIPTION :

Caractères communs aux deux espèces :

Arbustes pouvant atteindre 3 m de hauteur. Feuilles simples elliptique, verticillées par 3 ou 4. Jeunes rameaux et pétioles finement pubescents. Pétiole court (4-5 mm). Stipule de 0,5 à 1 cm de long, pubescente sur la face inférieure. Infrutescence en tête sphérique, portée à l'aisselle des feuilles par un pédoncule finement pubescent. Fruits secs déhiscent (en follicules) à valve finement pubescente.

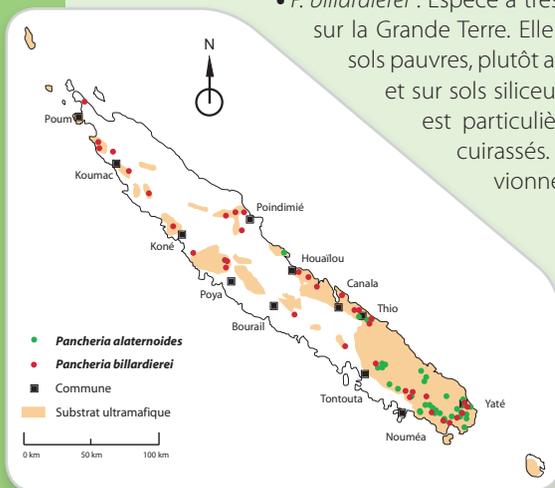
Distinction des deux espèces :

Caractère discriminant	<i>P. alaternoides</i>	<i>P. billardierei</i>
Dimension des feuilles	2,5-3,5 x 0,5-0,7 cm	3-7 x 1,5-3 cm
Verticille	par (3 ou) 4	par 3
Forme de la stipule	linéaire 0,5-1 cm	elliptique 0,5-0,9 cm
Feuilles	finement pubescentes	glabres
Marges des feuilles	dentées	à dents larges et révolutes
Diamètre de l'infrutescence	0,5-1 cm	1-1,5 cm
Longueur du pédoncule	1,5-2 cm	3-5 cm

HABITAT :

• *P. alaternoides* : Se trouve entre 50 et 1 000 m d'altitude, sur sols ferrallitiques remaniés par érosion ou colluvionnement, sur les sols à hydromorphie temporaire de piedmont et localement sur sols bruns hypermagnésiens.

• *P. billardierei* : Espèce à très large répartition géographique et écologique sur la Grande Terre. Elle se trouve entre 0 et 800 m d'altitude, sur des sols pauvres, plutôt acides (pH inférieur à 6), sur roches ultramafiques et sur sols siliceux (ex. : col d'Amos, Boat Pass). Dans le Sud, elle est particulièrement commune sur sols gravillonnaires ou cuirassés. Elle est fréquente également sur des sols colluvionnés à hydromorphie temporaire.



DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après l'herbier du centre IRD (NOU).

PHÉNOLOGIE :

- *P. alaternoides* : La floraison et la fructification s'étalent sur toute l'année, et l'espèce est peu synchrone (nombreux individus à des stades différents). Floraison principale vers novembre. Fructification principale en février-mars.
- *P. billardieri* : La floraison et la fructification s'étalent sur toute l'année. Fructification principale entre mai et juillet.

Feuilles et stipules de *P. alaternoides*.Feuilles et stipules de *P. billardieri*.Inflorescences sphériques de *P. billardieri*.**STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :**

Les fruits se récoltent manuellement lorsqu'ils commencent à sécher, encore fermés ou avec déhiscence de quelques follicules seulement (de bons résultats ont aussi été obtenus avec une collecte de fruits jaune-vert mais bien gonflés). Il est possible d'étaler une bâche sous l'arbre et de secouer les branches pour faire tomber les graines.

N. B. : Collecte délicate : sur un individu, la fructification est groupée et la fin de la maturation rapide (chute rapide et groupée des graines). En revanche, la présence de pieds à des stades différents (peu synchrones) permet des collectes à peu près toute l'année.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les fruits, mis sur tamis (n° 14 ou 16), sont séchés en salle jusqu'à déhiscence, puis tapotés sur le tamis ; les graines sont récupérées dessous.

Infrutescences matures chez *P. alaternoides*.Infrutescences presque matures chez *P. billardieri*.

Pancheria alaternoides, *Pancheria billardierei*



Graines de *P. alaternoides*.



Graines de *P. billardierei*.

DONNÉES QUANTITATIVES :

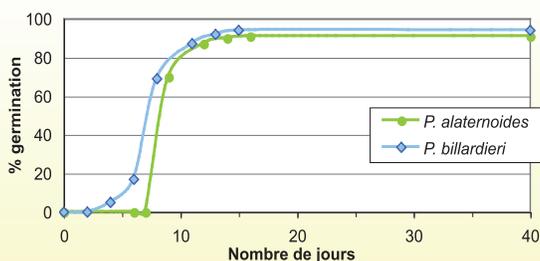
De 0,2 à 0,5 g pour 1 000 graines triées. Environ 25 à 40 graines par infrutescence. Toutefois, présence de nombreuses graines vides.

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le test le plus fiable, car toutes les graines viables germent en moins de 20 jours.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, aucun traitement nécessaire (cf. courbes). (Seules sont testées les semences d'aspect fertile.)



Courbes de germination de *Pancheria alaternoides* et de *P. billardierei*. Culture : sans traitement, en salle (arrosage régulier, température extérieure, démarrage en octobre pour *P. alaternoides*, en septembre pour *P. billardierei*).

STOCKAGE :

Espèces probablement orthodoxes.

À conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Pour *P. alaternoides*, le taux de germination ne varie pas après 2,5 ans de stockage à 3 °C. Pour *P. billardierei*, le taux de germination a tendance à diminuer au-delà de 1,5 an de conservation à 3 °C.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Assez facile à cultiver à partir de graines. Repiquage délicat : plantule à croissance lente, ne pas repiquer trop tôt (stade 4 à 6 feuilles). À ce stade, éviter les arrosages à grosses gouttes (cause de mortalité fréquente). Durée de culture : environ 16 à 18 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml.



P. billardierei en pépinière (à 6 mois).



P. alaternoides en pépinière (à 14 mois).

REMARQUE :

Pancheria rivularis, une espèce voisine avec laquelle on peut confondre *P. alaternoides*, possède des feuilles un peu plus étroites.

La famille des Cyperaceae comprend une majorité d'espèces herbacées de pleine lumière, dans différentes catégories de maquis et dans les zones humides, ainsi qu'en lisières forestières ou sous un couvert peu dense. En Nouvelle-Calédonie, elle rassemble 25 genres et environ 90 espèces dont seulement 34 % sont endémiques. Une cinquantaine d'espèces ont été recensées sur terrains miniers. Elles appartiennent principalement aux genres *Costularia* (12 espèces), *Lepidosperma* (4 espèces), *Chorizandra* (2 espèces), *Machaerina* (4 espèces sur 6), *Fimbristylis* (7 espèces sur 8), *Scleria* (5 espèces sur 8), *Gahnia* (4 espèces sur 5), *Schoenus* (4 espèces sur 7), ainsi qu'à plusieurs genres ayant des espèces ubiquistes en zones humides (*Carex*, *Eleocharis*, *Lepironia*, *Pycreus*, *Rhynchospora*...). Un total de 21 espèces incluant 11 *Costularia*, 3 *Gahnia*, 2 *Lepidosperma*, 3 *Schoenus*, un *Scleria* et un *Tricostularia* est strictement lié aux terrains miniers.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Herbes à tige pleine et non noueuse, à insertion majoritairement tristique, ou distique, le plus souvent sans ligule. Fleurs régulières, hermaphrodites, à l'aisselle de glumes, pas de périanthe, ovaire libre à un style généralement à trois branches, 3 étamines libres. Fruit (akène) à l'aisselle d'une écaille, non enfermé dans un utricule (Scirpoideae, sous-famille la plus nombreuse en Nouvelle-Calédonie), ou enfermé soit dans un utricule soit entre deux écailles soudées (Caricoideae) chez les genres *Carex* et *Uncinia*.

CLÉ DE DÉTERMINATION DES PRINCIPAUX GENRES CONCERNÉS :

Costularia : L'insertion des feuilles est tristique. Les akènes bruns portent des soies (6 soies hypogynes), la plupart du temps plumeuses.

Lepidosperma : Les feuilles sont réduites en position basale, à section ronde. Les inflorescences, en position terminale, sont portées par des tiges cylindriques striées et dressées (que l'on peut confondre avec les feuilles). Akènes non lisses bruns.

Machaerina : Les feuilles, parfois glauques, sont en insertion distique. Les akènes lisses, de couleur noire, pendent sur les infrutescences à maturité (akènes orangés et limbes à section ronde chez *B. juncea*).

Schoenus : Ce genre est facilement reconnaissable à ses feuilles réduites, cylindriques ou aplaties, et à ses akènes blancs ou à parties blanchâtres, avec soies hypogynes.

Autres genres :

Gahnia : Limbes canaliculés, scabres, sans nervure médiane distincte. *G. aspera* est reconnaissable à ses akènes rouges et lisses à maturité.

Remarque : Les Cyperaceae ont des systèmes racinaires fasciculés particulièrement efficaces contre l'érosion superficielle des sols.



Production de *Costularia comosa* en pépinière.



Costularia comosa.

STATUT DES ESPÈCES : Endémiques.

DESCRIPTION :

- *C. arundinacea* : Limbe caréné en V avec une nervure centrale médiane distincte. Marges des limbes, ainsi que la nervure médiane sur la face inférieure, très scabres, faces inférieure et supérieure glabres. Hampes florales non fastigiées, brunes et touffues. Akènes ovales, bruns et mesurant environ 1 mm.

- *C. comosa* : Feuilles canaliculées, nervure médiane bien distincte. Feuilles planes larges d'environ 1 cm à la base et s'éffilant vers l'extrémité. Marges des limbes, ainsi que la nervure médiane sur la face supé-

rieure, recouvertes de cils fins. Limbe sillonné sur la face inférieure, le long de la nervure médiane. Hampes florales hautes (> 1 m) et portant un grand nombre d'akènes, allongés, mesurant environ 2 mm.

- *C. nervosa* : Feuilles canaliculées, striées en long, rigides, scabres et longuement atténuées en pointe fine, sans nervure médiane distincte, de 30 à 60 cm de long et de 4 à 10 mm de large. Hampes florales hautes de 40 à 60 cm. Akènes larges de 1,5 à 2 mm et longs de 2 à 2,8 mm.

- *C. pubescens* : Feuilles légèrement carénées en V, nervure médiane distincte. Bords et face inférieure du limbe (parfois face supérieure) largement recouverts de cils (Raynal 1974).

Critères de reconnaissance :

- *C. arundinacea* : Large limbe coriace, scabre, caréné en V. Akènes plus larges que ceux de *C. comosa* et de *C. pubescens*, soies peu ciliées.

- *C. comosa* : Limbe mince, canaliculé et souple, vert-jaune. Akènes allongés, avec 6 soies hypogynes ciliées dépassant largement la longueur de l'akène.

- *C. nervosa* : Limbe mince, canaliculé, rigide et scabre. Akènes à forme arrondie, assez volumineux, avec de courtes soies regroupées en touffes.

- *C. pubescens* : Limbe pubescent, vert sombre. Akènes à soies hypogynes ciliées bien visibles.



Limbe de *C. arundinacea*.



Limbe de *C. comosa*.



Limbe de *C. nervosa*.



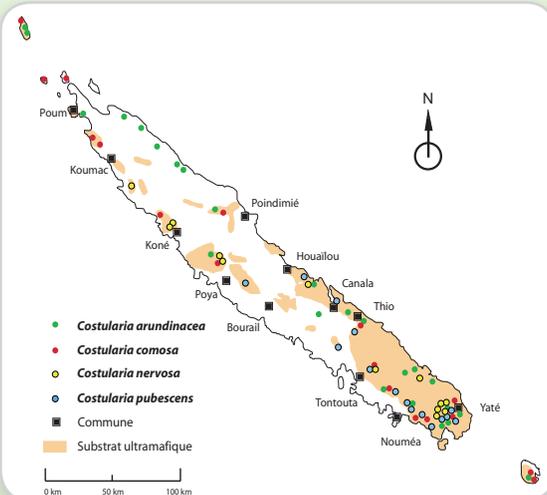
Limbe de *C. pubescens*.

HABITAT :

- *C. arundinacea* : Espèce à large répartition géographique et écologique, entre 50 et 1 500 m d'altitude, dans des milieux ensoleillés ou en sous-bois clairs, sur des sols variés, plutôt acides, sur roches ultramafiques et sur roches acides.
- *C. comosa* : Dans le maquis, cette espèce se rencontre préférentiellement en zone ouverte, sur sols bruns hypermagnésiens comme sur sols latéritiques, entre 50 et 1 000 m d'altitude. Elle est répartie sur toute la Grande Terre ainsi qu'à l'île des Pins et aux Bélep. Dans le Sud, elle se trouve souvent dans des milieux à hydromorphie temporaire.
- *C. nervosa* : L'espèce se rencontre sur substrats ultramafiques, entre 400 et 1 200 m d'altitude. Son aire principale de distribution se trouve dans le Sud, de la plaine des Lacs à Kouaoua. Une aire secondaire existe le long de la côte nord-ouest (Koniambo-Kaala).
- *C. pubescens* : Cette espèce est commune, entre 200 et 1 000 m d'altitude, dans les maquis miniers sur sols rocheux, au sud d'une ligne Boulinda-Houailou.

PHÉNOLOGIE :

Floraison étalée, principalement de juin à décembre. Fructification de décembre à avril (principalement de janvier à mars).

Fructification de *C. comosa*.Floraison de *C. comosa*.**DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :****REMARQUE :**

Des essais de transplantation ont donné d'assez bons résultats (taux de reprise entre 50 et 70 %) (voir le chapitre 6, section 4.5.1).

D'autres espèces de *Costularia*, moins communes, sont également intéressantes pour la restauration : *C. breviseta*, *C. setacea*, *C. stagnalis* (Orvain 2007).

D'après l'herbier du centre IRD (NOU).

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Cueillette des épis lorsque les soies apparaissent et que l'akène est marron ou brun (ouvrir des épillets pour vérifier le stade). Divers stades de maturité sont observés sur le même épi, et entre les épis. Un aspect flétri indique une graine avortée.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Toutes les graines de *Costularia* sont traitées de la même manière sauf pour *C. nervosa*.

Un fois séchées, les hampes sont frottées manuellement au-dessus d'un tamis afin de ne retenir que les petits éléments (akènes, glumelles et petits déchets). Pour séparer les akènes, il faut réaliser des tamisages successifs (14-16-18), qui permettent d'arriver à une pureté de 50 % au mieux.

N. B. : Travailler de préférence dans un endroit sans courant d'air, porter un masque anti-poussière et des manches longues (allergies cutanées fréquentes).

Pour *C. nervosa*, les akènes sont détachés manuellement des hampes. Ensuite, on leur fait subir un nivelage sur plateau : faire rouler les akènes en tapotant légèrement un plateau tenu en pente, et retenir en haut du plateau les déchets avec la main. Un passage au « vacuum cleaner » permet d'éliminer les débris fins.

DONNÉES QUANTITATIVES :

	<i>C. arundinacea</i>	<i>C. comosa</i>	<i>C. nervosa</i>	<i>C. pubescens</i>
Pour 1 000 graines triées	0,37 g	0,20-0,28 g	1,90-3,54 g	0,25-0,35 g

Environ 200 à 400 graines par hampe fructifère, 5 à 20 hampes par plant.



Akènes de *C. arundinacea*.



Akènes de *C. comosa*.



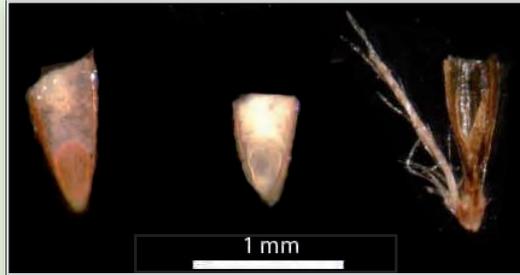
Akènes de *C. nervosa*.



Akènes de *C. pubescens*.

TEST DE VIABILITÉ :

Pour *C. arundinacea*, *C. comosa* et *C. pubescens*, le test de germination permet de connaître la viabilité d'un lot. Les graines viables germent en moins de 30 jours. Pour *C. nervosa*, qui nécessite plus de 60 jours pour complètement germer, un test à la coupe transversale peut être appliqué.

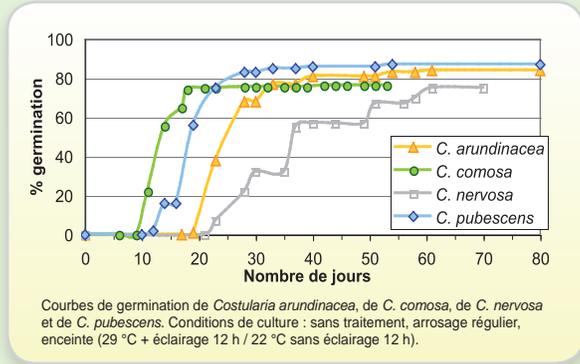


Coloration au tétrazolium : à gauche, un akène viable contenant l'albumen et l'embryon ; au milieu, une graine non viable ; à droite, un akène vide.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance (excepté pour *C. nervosa*), aucun prétraitement nécessaire.

C. nervosa présente vraisemblablement une dormance morphologique (petit embryon, germination étalée). Sa germination est difficile, voire bloquée, aux basses températures hivernales : température optimale entre 20 et 35 °C.



Courbes de germination de *Costularia arundinacea*, de *C. comosa*, de *C. nervosa* et de *C. pubescens*. Conditions de culture : sans traitement, arrosage régulier, enceinte (29 °C + éclairage 12 h / 22 °C sans éclairage 12 h).



Plant de *C. pubescens* en pépinière (à 11 mois).

STOCKAGE :

Graines orthodoxes : bonne conservation après séchage (teneurs en eau entre 7 et 10 % selon les lots) en boîtes plastique hermétiques à 3 °C. Dans ces conditions, on constate un maintien des taux de germination après 1,5 an pour *C. arundinacea*, 3,5 ans pour *C. comosa*, 3,5 ans pour *C. nervosa*, 1,5 an pour *C. pubescens*.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Repiquage au stade 2 ou 3 feuilles. Durée de culture : environ 10 à 14 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>C. arundinacea</i> (n = 32)	0,51	0,02	0,40	0,12	0,12	0,15	262	24	6,65
<i>C. comosa</i> (n = 17)	0,74	0,02	0,51	0,11	0,14	0,08	71	48	3,79
<i>C. nervosa</i> (n = 21)	0,44	0,02	0,34	0,10	0,07	0,11	565	43	9,14

Lepidosperma perteres



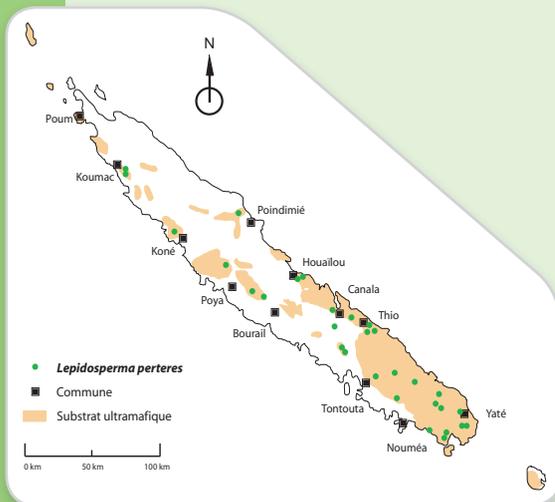
HABITAT :

Cette espèce se trouve dans des maquis ligno-herbacés sur sols ferrallitiques remaniés par érosion ou colluvionnement, entre 100 et 1 400 m d'altitude. Elle résiste au passage du feu grâce à son système racinaire rhizomateux, et domine la strate herbacée dans les zones affectées par des incendies.

PHÉNOLOGIE :

La floraison dure toute l'année, la fructification a tendance à se concentrer entre juillet et novembre.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE : D'après l'herbier du centre IRD (NOU).



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Plantes herbacées jonciformes. Feuilles réduites en position basale, tiges cylindriques fines, striées et dressées (largeur comprise entre 1 et 4 mm, longueur pouvant atteindre 180 cm), comportant des inflorescences (ou panicules) en position terminale. Fleurs blanches, épillets sombres, voire noirs. Akènes bruns, extrémité plus claire, 4-5 mm de long, forme caractéristique du genre *Lepidosperma*.

Cyperaceae rhizomateuse, à la différence des autres Cyperaceae cespiteuses (*Costularia*, *Machaerina*, *Schoenus*).



Détails d'inflorescences.

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

La récolte de cette espèce peut se révéler délicate (difficile de connaître le stade de maturité de l'akène, et peu d'akènes sur les infrutescences). Les akènes doivent être bien formés et bien gonflés. Un simple sécateur suffit pour récolter les épis.

En revanche, il est plus aisé de récupérer des touffes adultes afin de multiplier les plants (cf. ci-après).

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Extraction et conditionnement des graines : les akènes sont détachés des hampes manuellement. Ensuite, on leur fait subir un nivelage sur plateau, consistant à faire rouler les akènes en tapotant légèrement un plateau tenu en pente et à retenir, en haut du plateau, les déchets avec la main. Un passage au « vacuum cleaner » permet d'éliminer les débris fins.

DONNÉES QUANTITATIVES :

Poids de 1 000 akènes : 2,5-3,7 g.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

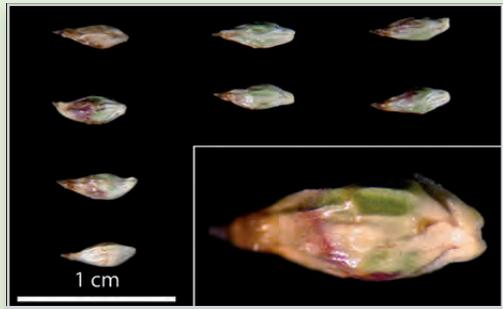
Actuellement, aucune germination de *L. perteres* n'a pu être obtenue en conditions contrôlées, malgré de nombreux tests effectués (ébullition, trempage KNO_3 , GA_3 , H_2SO_4 , scarification). Les graines présentent probablement de profondes dormances. Il est possible que l'impact d'un feu sur la banque de graines permette d'obtenir une bonne germination, au vu de son comportement sur terrain brûlé (rejets et germinations souvent observés).

STOCKAGE :

Espèce vraisemblablement orthodoxe. À conserver au froid après séchage.



Détail de feuilles et d'inflorescences.



Akènes de *Lepidosperma perteres*.



Germination relevée en serre sur un top-soil.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

On ne contrôle pas la germination pour le moment. En revanche, il est aisé de récupérer des touffes adultes et de les séparer afin de multiplier les plants. Il est nécessaire de les replacer rapidement dans un environnement relativement humide pour permettre la reprise du système racinaire. Des essais à partir de cette méthode ont permis d'obtenir environ 50 % de réussite. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.

REMARQUE :

La mise en terrine et en serre de top-soil frais a montré plusieurs germinations (photo ci-contre), en nombre relativement faible, mais dénotant bien l'existence de processus permettant de lever la dormance de ces graines. La mise en place de topsoil frais sur le terrain a permis également d'observer des germinations, avec des développements rapides (individus ayant jusqu'à 80 cm de diamètre au bout de 2 ans).



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Plante herbacée, en touffes, pouvant atteindre 1 m de diamètre et 0,8 m de hauteur. Feuilles insérées en éventail et de couleur vert glauque. Akènes mûrs restant plusieurs mois sur la hampe florale (à la différence d'autres Cyperaceae), de couleur brun foncé, à partie supérieure jaune paille, ronds à ovales et de petite taille.

Critères de reconnaissance : feuilles plates et lisses, vert glauque, parfois brillantes et vert-jaune, disposées en éventail.

HABITAT :

Se rencontre à des altitudes variées, depuis la base jusqu'au sommet des massifs miniers. Se développe bien autant sur sols meubles et humides qu'en zones peu pluvieuses (1 600 mm), en milieu ouvert. Fait partie des espèces qui se réinstallent naturellement, et les premières, sur les anciennes mines.

PHÉNOLOGIE :

Floraison étalée, principalement d'avril à août. Fructification répartie entre septembre et juillet (essentiellement de janvier à mars), les graines restant longtemps attachées. Bonne synchronicité de fructification (peu de différences entre les plants).

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

Cette espèce se trouve sur tous les massifs de roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie et sur les sols alluvionnaires provenant de ces massifs.

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Cueillette des épis lorsque la graine est noire ou brune, pendante, et bien lisse. Coupe des hampes au sécateur pour collecter toutes les graines.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les hampes sont tapotées et frottées manuellement (prévoir des gants) sur un tamis de maille fine (n° 16 ou 18). Afin de séparer les graines des déchets, faire rouler les graines en tapotant légèrement le plateau tenu en pente, et retenir en haut du plateau les déchets avec la main. Un passage au « vacuum cleaner » permet de se débarrasser des débris fins.



Détail des feuilles. Le type de gauche est le plus courant.



Stade approprié de collecte.

Akènes de *Machaerina deplanchei*.

Coloration au tétrazolium : à gauche, graine non viable, à droite, graine viable (embryon coloré en rouge).

DONNÉES QUANTITATIVES :

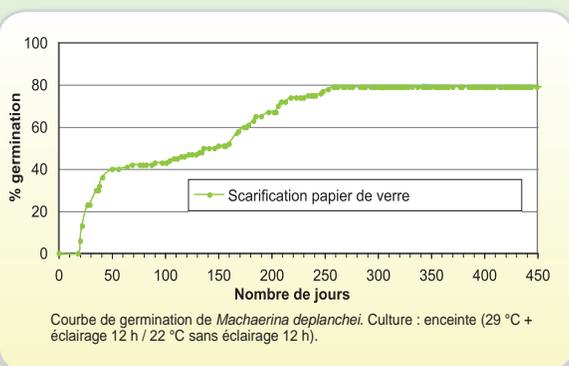
3 à 7 g pour 1 000 graines triées. Un plant peut produire jusqu'à 7 000 graines.

TEST DE VIABILITÉ :

Pour cette espèce, le test tétrazolium est le plus fiable. Il faut en effet attendre plus de 250 jours pour qu'au sein d'un même lot toutes les graines viables et scarifiées aient germé.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Forte dormance physique, associée vraisemblablement à une dormance morphologique (germination étalée). Il faut scarifier les graines (à l'aide d'un scarificateur ou manuellement entre deux feuilles de papier de verre), jusqu'à apparition de la couche blanche (endocarpe) qui se trouve sous le tégument. Taux de germination très variable selon les lots collectés.

**STOCKAGE :**

Espèce orthodoxe : pas de perte de germination constatée après 4 ans de stockage en boîtes hermétiques à 3 °C, et avec une teneur en eau des graines de 7 %. Cette espèce peut donc probablement être stockée sur du long à très long terme, après séchage (5 à 8 % d'eau) et à environ 3-5 °C.



Plants au bon stade pour être plantés (10 mois).

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Repiquage au stade 2 ou 3 feuilles. Croissance rapide, durée de culture : environ 7 à 10 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Espèce supportant mal d'être à l'étroit dans son pot : planter rapidement quand les racines apparaissent à la base, sinon repoter. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>Machaerina deplanchei</i> (n = 14)	0,67	0,02	0,58	0,20	0,21	0,09	118	29	10,62

Schoenus juvenis, *Schoenus neocaledonicus*



Schoenus juvenis.

STATUT DES ESPÈCES : Endémiques.

DESCRIPTION :

• *S. juvenis* : Plantes herbacées, d'une hauteur de 60 cm environ, poussant en touffes compactes. Feuilles très fines et étroites (1 mm), longues et dressées. Inflorescences en épis de fleurs blanches. Infrutescences sombres, akènes de couleur blanche, d'environ 3 mm de long, présentant des soies hypogynes ciliées à la base.

• *S. neocaledonicus* : Limbes plats, relativement courts (15 à 30 cm de haut), dressés, larges de 2 à 4 mm, avec une extrémité pointue et noire. Infrutescences à bandes de couleurs alternées vertes et brunes. Akènes blancs, plus arrondis que chez *S. juvenis*, à soies légèrement ciliées à la base.

Critères de reconnaissance : *S. juvenis* a des limbes à section demi-ronde, très fins (1 mm) et dressés, alors que ceux de *S. neocaledonicus* sont plats et courts.

HABITAT :

• *S. juvenis* est présent sur la Grande Terre, sur sols ferrallitiques d'érosion sur périodites ainsi que sur surfaces terreuses avec un léger encroûtement superficiel. Cette espèce se développe à des altitudes comprises entre 300 et 1 200 m, et résiste bien à la sécheresse.

• *S. neocaledonicus* se développe sur des sols variés, magnésiens ou ferrallitiques, pas trop arides, à des altitudes comprises entre 50 et 1 200 m.



Schoenus neocaledonicus.

PHÉNOLOGIE :

- *S. juvenis* fleurit de juillet à février et fructifie de janvier à mai.
- *S. neocaledonicus* fleurit d'août à février et fructifie de novembre à avril.

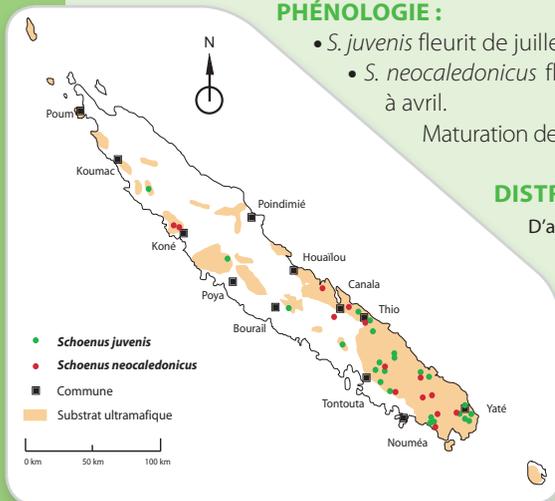
Maturation des semences principalement entre janvier et mars.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après l'herbier du centre IRD (NOU).

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Surveiller lorsque les akènes commencent à sortir des épillets. Les akènes de *Schoenus* se récoltent lorsqu'ils sont bien blancs et durs. Les hampes fructifères sont récoltées au sécateur.



EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Une fois séchées, les hampes fructifères sont frottées et décortiquées manuellement, au-dessus d'un tamis à maille moyenne (6 ou 8) afin de ne faire passer que les petits éléments (akènes, glumelles...). Un dernier passage avec un tamis fin (maille 1 mm environ) permettra de récupérer des akènes exempts de petites matières inertes.

Feuilles de *S. juvenis*.Feuilles de *S. neocaledonicus*.**DONNÉES QUANTITATIVES :**

- *S. juvenis* : Environ 0,4 à 0,6 g pour 1 000 akènes triées.
- *S. neocaledonicus* : Entre 0,5 et 0,9 g pour 1 000 akènes triées.

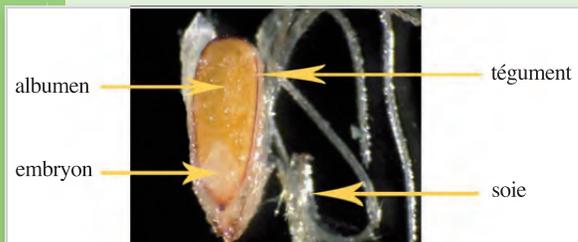
Nombre de graines par plant : environ 200 à 500 chez *S. neocaledonicus*, 500 à 2 000 chez *S. juvenis*.

Akènes de *S. juvenis*.Akènes de *S. neocaledonicus*.**TEST DE VIABILITÉ :**

Le test de germination nécessitant plus de 60 jours pour s'assurer que toutes les graines ont germé, il est possible de réaliser un test à la coupe afin d'obtenir rapidement un résultat fiable du taux de viabilité d'un lot.

Akènes de *S. juvenis*.

Schoenus juvenis, *Schoenus neocaledonicus*



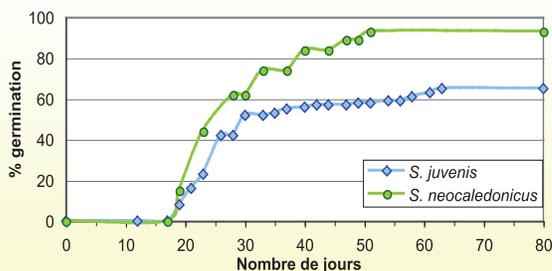
Test à la coupe et structure interne de *S. neocaledonicus*.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, aucun prétraitement nécessaire.



S. juvenis avec infrutescences.



Courbes de germination de *Schoenus juvenis* et de *S. neocaledonicus*. Conditions de culture : sans traitement, arrosage, enceinte (29 °C + éclairage 12 h / 22 °C sans éclairage 12 h).

STOCKAGE :

Graines orthodoxes : après séchage (avec des teneurs en eau entre 5,5 et 7 % selon les lots), on observe une bonne conservation en boîtes hermétiques à 3 °C. Dans ces conditions, les taux de germination ne diminuent pas après 3,5 ans pour *Schoenus juvenis* et 2,5 ans pour *S. neocaledonicus*. Pas encore de résultats au-delà.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Repiquage délicat au stade 1 à 2 feuilles. Durée de culture : 14 à 16 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.



Plantules de *S. neocaledonicus* (à 2 mois).



Plant de *S. neocaledonicus* (à 15 mois).

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>S. neocaledonicus</i> (n = 22)	0,49	0,02	0,57	0,16	0,21	0,25	103	73	12,84

La famille des Dilleniaceae totalise sur le territoire 25 espèces majoritairement arbustives ou buissonnantes, dont 24 endémiques. Elles appartiennent au genre *Tetracera* (1 espèce lianescente ubiquiste) et au genre *Hibbertia* avec 23 espèces sur 24 présentes sur terrains miniers, dont 20 exclusives à ce substrat. Dans ce genre, 22 espèces se développent dans le maquis et 16 espèces, dont deux rivulaires, y sont strictement liées.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbustes (ou arbres) dressés (*Hibbertia*) ou grimpants (*Tetracera*). Feuilles sans stipules, simples, alternes, à marge souvent révoluée, sessiles ou nettement pétiolées, entières ou dentées ; nervure médiane souvent en creux dessus, nervures secondaires parallèles, anastomosées sur les bords.

Inflorescences terminales ou axillaires, pauci- ou pluriflores, en cymes scorpioïdes simples ou composées, ou parfois réduites à des fleurs solitaires ; bractées et souvent bractéole (parfois 2) présentes, quelquefois peu distinctes des sépales.

Fleurs sessiles ou brièvement pédicellées. Cinq sépales hétéromorphes, persistants ; 3-5 pétales hétéromorphes, rapidement caducs, de couleur jaune vif chez la plupart des espèces du genre *Hibbertia*, à préfloraison quinconciale. Nombreuses étamines, régulièrement réparties autour de l'ovaire ou, parfois, concentrées d'un côté, introrses, parfois présence de staminodes à la périphérie. Ovaire formé de 1-15 carpelles libres.

Fruits en follicules ovoïdes, ne contenant généralement chacun qu'une seule graine entourée d'un arille charnu rouge-orangé.

Remarque :

Hibbertia lucens est une espèce arbustive (les individus âgés inclus dans la forêt sont souvent de petits arbres), principalement préforestière héliophile, qui est également signalée à Fidji. En Nouvelle-Calédonie, elle se trouve aussi bien sur roches ultramafiques que sur roches acides.



Hibbertia lucens (Dumbéa).

Hibbertia lucens, *Hibbertia pancheri*



Hibbertia lucens.

STATUT DES ESPÈCES : *H. lucens* est indigène (présent également aux îles Fidji), *H. pancheri* est endémique.

DESCRIPTION :

Caractères communs aux *Hibbertia* de Nouvelle-Calédonie :

Arbrisseaux ou arbres atteignant plus de 10 m de haut. Feuilles lancéolées, simples et alternes, sans stipules, à marge souvent révolutée. Nervure médiane souvent en creux dessus, nervures secondaires parallèles, anastomosées sur les bords. Inflorescences terminales ou axillaires, composées de cymes scorpioïdes. En Nouvelle-Calédonie, le genre est divisé en deux groupes : celui comprenant des cymes scorpioïdes simples (16 espèces) et celui comprenant des cymes scorpioïdes composées (8 espèces). Sépales au nombre de 5 ; pétales de couleur jaune, au nombre de 5 et rapidement caducs. Graines toujours entourées d'un arille rouge-orangé.

Distinction des deux espèces :

Caractère discriminant	<i>H. lucens</i>	<i>H. pancheri</i>
Taille du pétiole	presque inexistant	8-55 mm, en forme de gouttière
Inflorescence	cyme scorpioïde simple	cyme scorpioïde composée
Limbe	3-12 x 0,6-2 cm	2,5-16 x 1,2-5,5 cm, revers brun
Diamètre de la fleur	2 cm	1,5-2 cm
Taille du pétale	7-12 x 5-7,5 mm	5-10 x 4-7 mm

HABITAT :

• *H. lucens* : Espèce d'*Hibbertia* la plus répandue de Nouvelle-Calédonie. Elle se développe de 0 à 1 000 m d'altitude, avec une préférence pour les altitudes basses et moyennes, surtout sur sols ultramafiques. Elle se trouve également sur schistes métamorphiques, dans le Nord-Est, dans des zones où la pluviométrie est de 1 500 à 3 500 mm. Elle se comporte fréquemment en espèce pionnière dans les formations ouvertes dégradées, ou en espèce cicatricielle en forêt où elle peut atteindre plus de 10 m de haut.



Feuilles d'*Hibbertia lucens* (la feuille terminale est dressée et repliée).



Hibbertia pancheri.

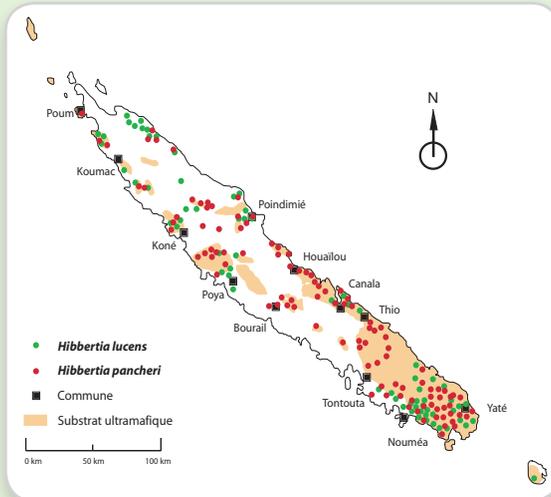
• *H. pancheri* : Cette espèce est largement représentée sur la Grande Terre avec une prédilection pour les substrats ultramafiques, dans les maquis, les formations paraforestières et la forêt dense. Elle se comporte comme une espèce cicatricielle des zones perturbées. Sur terrains schisteux, surtout dans le Centre et le Nord-Est, elle fait partie des composantes forestières de la strate moyenne. Elle se trouve depuis le niveau de la mer jusqu'à 1 100 m d'altitude, sa distribution restant tributaire d'une pluviométrie annuelle comprise entre 1 200 et 4 000 mm.

PHÉNOLOGIE :

Les floraisons de ces deux espèces se répartissent entre les mois d'octobre et de décembre (voire mars pour *H. pancheri*) et sont en général assez synchrones. La fructification est étalée entre janvier et mars, avec une assez bonne synchronicité.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après *La Flore de la Nouvelle-Calédonie* (MNHN)



Fleur d'*H. lucens*.



Infrutescence d'*H. lucens*.

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les infrutescences doivent être récoltées à maturité (graines apparentes, dures et lisses). Les graines d'un même individu ne mûrissent pas toutes en même temps. Cependant, une collecte lorsque les deux tiers des graines sont mûres est possible.



Graines d'*H. pancheri*.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Après séchage complémentaire en salle, séparer les graines manuellement par battage et tamisage. L'arille autour de la graine est retiré par un léger frottement sur un tamis fin (10-14). Un passage au « vacuum cleaner » permet d'éliminer les matières inertes fines.

DONNÉES QUANTITATIVES :

14 à 18 g pour 1 000 graines triées.

Hibbertia lucens, Hibbertia pancheri

TEST DE VIABILITÉ :

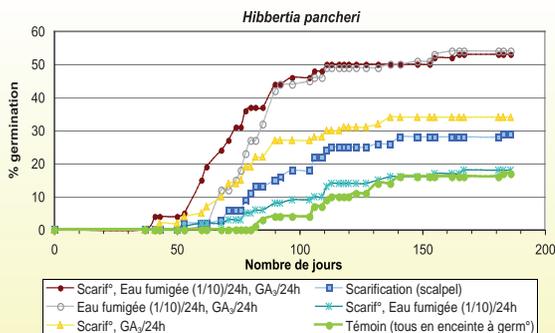
Il n'y a pas de moyen rapide de quantifier la viabilité d'un lot de graines d'*Hibbertia*. Il est en effet très difficile de localiser l'embryon, petit par rapport à la taille de l'albumen, et la germination est longue.



Coupe longitudinale d'une graine d'*H. pancheri* : embryon de petite taille en bas à droite.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Cette espèce présente une forte dormance morphologique (petit embryon) et physiologique. La germination est fortement étalée dans le temps. Le meilleur résultat a été obtenu par un trempage dans de l'eau fumigée (10 %, 24 h), suivi par un trempage dans une solution de GA₃ (0,3 g/l, 24 h) (cf. courbes).



STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : le taux de germination ne varie pas après 2,5 ans de conservation en boîtes hermétiques à 3 °C (avec une teneur en eau de 11,5 %). Pas encore de résultats au-delà.



Jeunes plants d'*H. lucens*.



Jeunes plants d'*H. pancheri*.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Assez facile à cultiver à partir de graines. Repiquer au stade 2 feuilles cotylédonaires. Durée de culture : environ 12 mois, en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies constatées, consommation fréquente par des chenilles au stade jeune plantule. Bouturage possible.

REMARQUE :

D'autres espèces d'*Hibbertia* des maquis peuvent être intéressantes : *H. altigena*, *H. deplancheana*, *H. tontoutensis*...

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>H. pancheri</i> (n = 32)	0,87	0,03	0,34	1,40	0,27	0,27	63	56	5,73

La famille des Fabaceae (Leguminosae), dont seule la sous-famille des Mimosoideae a été revue dans *La flore de la Nouvelle-Calédonie*, rassemble en Nouvelle-Calédonie environ 95 espèces avec un taux d'endémisme de l'ordre de 65 %. Environ 50 % se rencontrent sur roches ultramafiques, contre environ 70 % sur les autres substrats.

Dans la sous-famille des **Caesalpinioideae**, qui compte 17 espèces, arborescentes, arbustives ou lianescentes, dont 9 endémiques, les genres *Mezoneuron* (3 espèces ubiquistes) et *Storckiella* (2 espèces) sont les plus communs sur roches ultramafiques. Une des deux espèces du genre *Cassia* (*Cassia artensis*) se trouve uniquement dans le maquis minier. Le genre *Caesalpinia* possède sept espèces, mais seulement deux d'entre elles se rencontrent sur roches ultramafiques. Les genres *Cynometra* et *Intsia* n'y sont pas représentés.

La sous-famille des **Mimosoideae** rassemble 20 espèces, arbustives et arborescentes, dont 10 endémiques. Treize espèces se rencontrent sur terrains miniers et sept y sont strictement liées. L'espèce la plus commune, le « gaïac » (*Acacia spirorbis*), forme des peuplements arbustifs buissonnants à caractère monospécifique, en dessous de 500 m d'altitude, sur des substrats variés. Elle forme souvent des peuplements stables au cortège floristique appauvri. Le genre *Archidendropsis* regroupe huit espèces principalement forestières, dont six se développent sur roches ultramafiques et trois se retrouvent aussi dans le maquis. Le genre *Serianthes* est représenté par six espèces se développant surtout sur des zones rivulaires basses sur alluvions magnésiennes.

La sous-famille des **Papilionoideae** possède une soixantaine d'espèces regroupant tous les types biologiques, dont plus de 60 % sont endémiques, réparties en une vingtaine de genres. Les deux genres endémiques majoritairement arbustifs *Arthroclianthus* (19 espèces décrites) et *Nephrodesmus* (5 espèces) ont des répartitions incertaines en raison de la difficulté de séparer les espèces. *Arthroclianthus* aurait le plus grand nombre d'espèces sur roches acides ou calcaires tandis que *Nephrodesmus* se trouverait surtout en maquis minier. Cinq espèces sur huit du genre *Desmodium*, en Nouvelle-Calédonie, sont signalées sur roches ultramafiques, et quatre d'entre elles (très rares) se trouveraient uniquement dans le maquis. La majorité des autres espèces de la sous-famille se trouvent dans les groupements littoraux.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres, arbustes ou lianes, feuilles composées alternes, parfois stipulées et stipellées, à pétiole épaissi à la base, hétérochlamydes, dialypétales, souvent zygomorphes et papillonacées, toujours monocarpellées.

Remarques : Beaucoup d'espèces possèdent des nodules racinaires qui abritent des bactéries fixant l'azote atmosphérique. C'est le plus grand ensemble angiospermien, cosmopolite, prédominant en individus et en espèces dans de nombreux biomes, et surtout en régions tropicales.

CLÉ DE DÉTERMINATION DES SOUS-FAMILLES :

Caesalpinioideae : Préfloraison vexillaire (en forme d'étendard). Fleurs zygomorphes.
Mimosoideae : Feuilles presque toujours bipennées, folioles le plus souvent opposées. Présence de glandes sur le pétiole pour certains genres. Fleurs actinomorphes, souvent regroupées en têtes sphériques.

Papilionoideae (ou Faboideae) : Feuilles souvent imparipennées (ou trifoliées), parfois unifoliées. Souvent il y a présence de stipelles à la base des folioles. Préfloraison carénale (les deux pétales inférieurs sont soudés, formant un genre de labelle). Fleurs zygomorphes.

Serianthes calycina, *Serianthes satchetae*



Serianthes calycina.

SOUS-FAMILLE : Mimosoideae.

STATUT DES ESPÈCES : Endémiques.

DESCRIPTION :

Caractères communs aux deux espèces :

Arbres ou arbustes à feuilles pennées. Pennes légèrement alternes. Folioles oblongues, alternes. Inflorescences en panicules, fleurs groupées par 2 ou 3 à l'extrémité du pédoncule. Gousses ligneuses couvertes d'un tomentum dense, de teinte brune.

Distinction des deux espèces :

Caractère discriminant	<i>S. calycina</i>	<i>S. satchetae</i>
Taille maximale	10 m	20 m
Couleur de l'écorce	gris pâle ou brune, légèrement rugueuse, sillonnée	de teinte brune, occasionnellement tachetée de gris, légèrement rugueuse
Taille des gousses	13-19 x (2,8-)3-5,2 cm	16-25 x (4-)5,4-7,2 cm
Folioles, face inférieure	pubescentes, poils dressés	papilleuses, poils couchés

Ces deux espèces sont toutefois très proches et présentent de plus des variations selon les échantillons.

Critère de reconnaissance : Il est possible de confondre, à l'état végétatif, les *Serianthes* avec d'autres légumineuses : leurs folioles sont alternes alors que chez *Archidendropsis* et *Albizzia*, elles sont opposées (sauf chez *Archidendropsis granulosa* qui, par contre, possède des pennes opposées, tandis que chez les *Serianthes*, elles sont alternes).

HABITAT :

- *S. calycina* : Cette espèce se trouve en maquis ou en forêt, sur sols rocailloux, sur substrat ultramafique, jusqu'à 200 m d'altitude. Elle semble confinée aux secteurs côtiers du nord-ouest de la Grande Terre. Elle se développe préférentiellement en forêt basse de talweg. Elle peut se rencontrer en maquis paraforestier dans les mêmes zones.
- *S. satchetae* : Cette espèce est largement répartie sur la Grande Terre, ainsi qu'à l'île des Pins et à Maré. On la trouve jusqu'à 400 m d'altitude, par pieds isolés, en forêts hygrophiles ou mésophiles, en particulier en forêts galeries et en forêts littorales.



Feuilles, fleurs et fruits de *S. calycina*.



Détail de feuille et de fleur de *S. satchetae*.

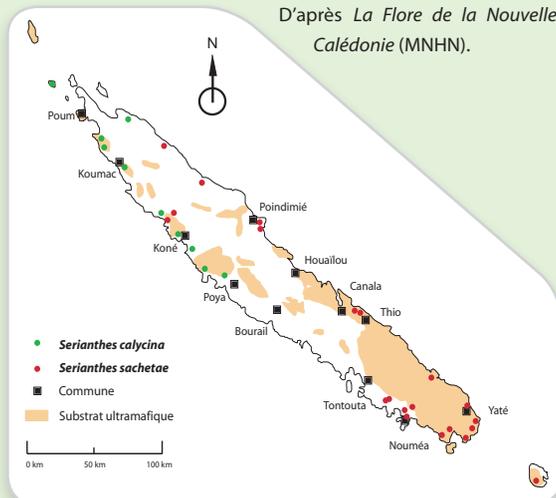
PHÉNOLOGIE :

Floraison étalée d'octobre à juillet, et surtout de février à mai.

Fructification étalée de novembre à avril, maturité des gousses principalement de décembre à mars.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après *La Flore de la Nouvelle-Calédonie* (MNHN).



Fleur de *S. sachetae*.

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les gousses contenant les fruits sont récoltées lorsqu'elles sont dures, bien gonflées et noirâtres, à l'aide d'un sécateur ou d'un échenilloir.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les gousses sont ouvertes à l'aide d'un sécateur longitudinalement ou transversalement. Les graines sont souvent attaquées par des insectes.

DONNÉES QUANTITATIVES :

240-330 g environ pour 1 000 graines triées.

TEST DE VIABILITÉ :

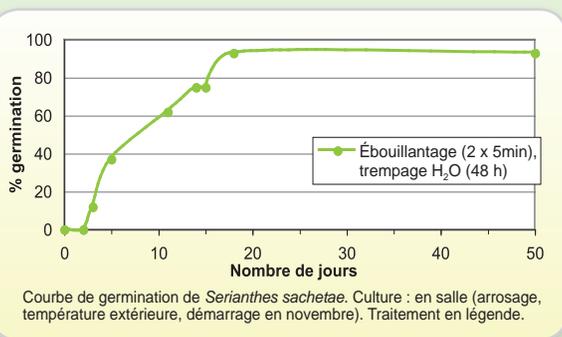
Le test de germination est le plus fiable, toutes les graines viables germent en moins de 20 jours (après ébouillantage, cf. ci-après).

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Les graines présentent une dormance physique, variable selon les lots : le meilleur résultat (93 % de germination) a été obtenu par double ébouillantage (verser de l'eau bouillante sur les graines dans un récipient, laisser 5 min et recommencer l'opération, puis laisser tremper pendant 48 h). Il est possible également de réaliser une légère scarification à l'aide d'un scalpel à l'opposé du hile.



Graines de *S. sachetae*.



Courbe de germination de *Serianthes sachetae*. Culture : en salle (arrosage, température extérieure, démarrage en novembre). Traitement en légende.

Serianthes calycina, *Serianthes sachetae*

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : le taux de germination ne varie pas après 26 mois de conservation en boîtes hermétiques à 3 °C. Pas encore de résultats au-delà.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquer au stade « allumette » (ne pas attendre le déploiement des cotylédons). Croissance rapide, durée de culture : environ 8 à 10 mois, en alvéoles assez profondes (au moins 500 ml, 750 ml de préférence). Les jeunes plants supportent mal le manque d'arrosage. Attendre que le système racinaire soit bien développé avant de planter. Présence fréquente en serre de cochenilles farineuses (traitement chimique possible).



Jeunes plants de *S. sachetae* en pépinière (à 6 mois).



Germination de *S. sachetae*.

REMARQUE :

Parmi les *Serianthes*, *S. petitiiana* est assez commun dans les maquis rivulaires et parfois de piedmont de l'extrémité sud du massif du Sud, et se distingue par ses nombreuses folioles très petites. Fructifications jamais observées.

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>S. calycina</i> (n = 2)	2,93	0,07	0,60	2,30	0,30	0,04	227	76	3,64
<i>S. petitiiana</i> (n = 1)	2,57	0,04	0,79	0,93	0,27	0,04	300	49	
<i>S. sachetae</i> (n = 1)	4,07	0,16	1,25	0,52	0,37	0,06	46	30	0,46

Espèces particulièrement intéressantes en raison des teneurs élevées en azote dans leurs feuilles (en relation avec l'existence d'une symbiose racinaire avec des rhizobiums).

La composition minérale foliaire de *S. calycina* (comparée avec celle d'autres espèces implantées sur le mont Dore) se différencie de la composition minérale des rameaux chlorophylliens des trois espèces du genre *Gymnostoma* par des teneurs supérieures en azote, phosphore et potassium et par des teneurs très inférieures en sodium. Par rapport à *Geissois pruinosa* qui est une espèce hyperaccumulatrice de nickel (Jaffré *et al.* 1979), *S. calycina* se comporte en « exclure » (Baker 1981), de même qu'à l'égard du manganèse, dont les teneurs les plus élevées se trouvent chez *Grevillea exul*.



S. calycina de 15 ans sur saprolites au mont Dore (essai IRD). Noter la présence, à proximité, de nombreux recrûs issus de graines (*Scaevola* sp., *Costularia comosa*, *Machaerina deplanchei*, *Dodonaea viscosa*, *Alphitonia neocaledonica*, *Hibbertia* sp., *Schoenus juvenis*, *Acacia spirorbis*...).

COMPOSITION CHIMIQUE DU SOL MINIER DU MONT DORE : (Source : T. Jaffré, IRD)

	pH	N (%)	P (mg/kg)	CEC (meq/100g)	Cations échangeables (meq/100g)				Éléments totaux (%)				Extraits DTPA (ppm)	
					Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	k ⁺	Na ⁺	Ni	Mn	Cr	Co	Ni	Mn
<i>Sol nu</i> (n = 4)	7,28 ±0,2	0,001 ±0	6,5 ±2,5	8,7 ±1,1	0,38 ±0,21	5,59 ±0,63	0,02 ±0,01	0,003 ±0,001	1,93 ±0,1	0,17 ±0,02	0,13 ±0,03	0,04 ±0,01	314 ±28	15 ±2
<i>Sol sous S. calycina</i> (n = 5)	6,69 ±0,05	0,12 ±0,05	53,2 ±32,4	12,9 ±1,4	3,51 ±1,51	7,02 ±0,77	0,09 ±0,1	0,17 ±0,09	1,94 ±0,05	0,16 ±0,01	0,11 ±0,02	0,04 ±0	435 ±132	151 ±34

REMARQUES SUR *SERIANTHES CALYCINA* :

De forme élancée à l'abri du vent, cette espèce prend en zone exposée une forme plus ramassée, avec un tronc plus court (1,5-3 m) portant des branches latérales également plus courtes et ramifiées. Comme elle possède en outre un puissant système racinaire, elle est bien adaptée pour résister aux vents cycloniques (constaté lors du puissant cyclone Erica en 2003, avec des vents de plus de 150 km/h).

Bien que d'affinité plutôt forestière, cette espèce a donné des résultats étonnamment positifs pour la revégétalisation d'un site dénudé excessivement riche en nickel. En outre, bien plus que toutes les autres espèces testées sur site, elle a favorisé l'implantation naturelle de plusieurs espèces voisines à partir de semences, et a permis d'améliorer la fertilité du sol (cf. photo ci-dessus et tableau).

S. calycina comprendrait deux variétés : *calycina* var. *calycina* et *calycina* var. *kaalaensis*, qui seraient distinguées par leur taille (10 m de haut contre moins de 3 m). Toutefois, il est probable que cette forme résulte simplement de l'effet des conditions stationnelles.

Storckiella pancheri



SOUS-FAMILLE : Caesalpinioideae.

SOUS-ESPÈCES :

Storckiella pancheri subsp. *acuta*,
Storckiella pancheri subsp. *pancheri*.

STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Caractères communs au genre : Arbustes ou arbres à floraison jaune spectaculaire (blanche dans le cas de l'espèce rare *S. neocaledonica*). Stipules petites et caduques. Limbes imparipennés, folioles opposées ou alternes, pétiolées. Inflorescences en pan-

cules denses. Fleurs bisexuées, actinomorphes, bractées caduques. Sépales imbriqués et pétales au nombre de 3 à 5.

Caractères communs aux deux sous-espèces : Face supérieure des folioles totalement glabre, face inférieure marron-vert glabre ou légèrement pubescente. Pennes comportant environ 9 paires de nervures. Panicules, de couleur jaune, en position terminale de 12 x 9 cm avec une importante pubescence. Hypanthium pubescent long de 1 mm. Fleurs comportant 4 sépales et 4 pétales pubescents le long de la veine principale. Sépales de (6-)10-14 x 1,2-3,2 mm. Pétales de (8-)10-13 x 1,2-2,5 mm. Gousses, en forme de rein, environ 5-9 x 3,5-4,5 cm, comportant 1 à 2 graines de 8-10,5 x 7-8,5 x 4 mm.

Distinction des deux sous-espèces :

Caractère discriminant	<i>S. pancheri</i> subsp. <i>acuta</i>	<i>S. pancheri</i> subsp. <i>pancheri</i>
Hauteur maximale	30 m	8 m
Diamètre maximal du tronc	80 cm	30 cm
Taille des folioles	2,7-6,2 x 0,9-2,62 cm	3-5 x 1,4-2,7(3,5) cm
Apex des folioles	aigu-acuminé (voire largement aigu)	rétus ou obtus

HABITAT :

• *S. pancheri* subsp. *acuta* : Cette sous-espèce, plus commune sur substrat ultramafique que sur roches acides, se trouve en forêt ou en maquis sur sols bruns hypermagnésiens et sur sols ferrallitiques, à des altitudes comprises entre 20 et 300 m (exceptionnellement à 500 m). Elle se développe surtout dans la partie centrale et dans le sud de la Nouvelle-Calédonie.

• *S. pancheri* subsp. *pancheri* : Cette espèce se trouve en maquis sur serpentinites (sols bruns hypermagnésiens), sur sols latéritiques rocaillieux et sur sols alluvionnaires. Elle est plutôt cantonnée au nord de la Nouvelle-Calédonie, entre 0 et 600 m d'altitude.



Détail des feuilles de *S. pancheri* subsp. *acuta*.

PHÉNOLOGIE :

- *S. pancheri* subsp. *acuta* : Floraison et fructification possibles toute l'année. Maturité des fruits surtout entre janvier et avril.
- *S. pancheri* subsp. *pancheri* : Floraison entre juin et janvier. Fructification entre novembre et juin.



Détail d'une inflorescence de *S. pancheri* subsp. *acuta*.

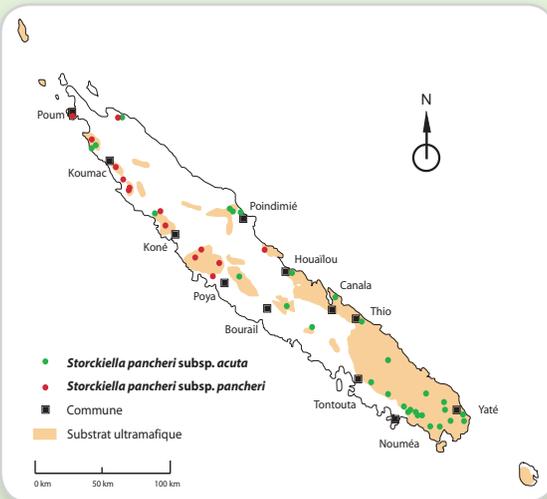


Branches et inflorescences de *S. pancheri* subsp. *acuta*.



Extrémité d'une tige de *S. pancheri* subsp. *acuta* (avec apex aigu).

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :



D'après Nielsen *et al.* 2005.

Storckiella pancheri

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les gousses se récoltent à l'aide d'un sécateur, d'un échenilloir ou à la main, lorsqu'elles commencent à sécher.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les gousses sont ouvertes manuellement ou à l'aide d'un sécateur longitudinalement ou transversalement. Les graines sont souvent attaquées par des insectes.



Gousses de *S. pancheri* subsp. *acuta*.

© IRD / J. Munzinger



Graines de *S. pancheri* subsp. *acuta*.

DONNÉES QUANTITATIVES :

153,4 g pour 1 000 graines triées.

Espèces ayant une faible production de graines.

TEST DE VIABILITÉ :

Un test à la coupe permet d'appréhender rapidement la viabilité d'un lot de graines. La graine est albuminée, même si les structures de l'embryon sont déjà bien développées : il convient de bien noter la présence de l'embryon, de couleur verte, et de l'albumen, de couleur blanche.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Légère dormance physique : la germination est favorisée par un ramollissement des téguments dans de l'eau chaude (mettre dans de l'eau à environ 60 °C et laisser refroidir).

Les premières germinations apparaissent au bout d'une à deux semaines, le taux final pouvant atteindre 80 %.

STOCKAGE : Pas de données

REMARQUE :

Le nom *Storckiella comptonii* a été invalidé et remplacé par *S. pancheri* subsp. *pancheri*.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Repiquer au stade 2 feuilles cotylédonaires. Croissance assez rapide, durée de culture : environ 10 à 12 mois, en alvéoles assez profondes (au moins 500 ml, voire 750 ml). Bouturage possible.

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>Storckiella pancheri</i> (n = 3)	2,29	0,08	0,83	0,28	0,19	0,05	54	48	13,63

Cette espèce possède des teneurs en azote relativement importantes dans ses feuilles (bien que l'association avec des rhizobiums n'ait pas encore été mise en évidence).

La famille des **Goodeniaceae** comporte dans le monde 12 genres et environ 440 espèces, la plus grande partie se trouvant en Australie, et le plus souvent en régions sèches.

La famille n'est représentée en Nouvelle-Calédonie que par un seul genre, *Scaevola*, comprenant neuf espèces dont six endémiques. Huit d'entre elles, dont deux ubiquistes, se rencontrent sur terrains miniers. Toutes sont des arbustes ou des arbrisseaux, qui se développent dans le maquis minier ou en lisière de forêt.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbustes ou arbrisseaux, dressés, ou très rarement rampants.

Feuilles alternes, simples, groupées au sommet des rameaux, à marges entières à dentées.

Inflorescences à l'aisselle de bractées foliacées, en cymes ou en racèmes, ou encore en fleurs solitaires. Fleurs hermaphrodites, sessiles ou pédonculées, accompagnées de 2 bractéoles étroites, pileuses à la base. Cinq sépales, plus ou moins triangulaires, courts, parfois très petits, intérieurement pourvus à la base d'une petite barbe. Corolle dorsalement incisée jusqu'à la base, à 5 lobes subégaux, ailés ou non, le plus souvent étalés comme les doigts d'une main, intérieurement couverts de poils très longs le plus souvent. Cinq étamines, libres, à filets filiformes.

Fruits indéhiscents en drupes ; endocarpe le plus souvent ligneux, à deux loges (une graine par loge) ; mésocarpe plus ou moins charnu ou rarement membraneux, de couleur noire, rarement verte. Graines à albumen mince.

Remarque : La manière dont se fait la fécondation chez les Goodeniaceae a attiré l'attention de nombreux botanistes. Les anthères, en cercle très proche du style, libèrent leur pollen alors que la fleur est encore en bouton. Le stigmate sera fonctionnel plus tard. En grandissant, le stigmate pousse le pollen au bord de la fleur où il est enlevé par les visiteurs (abeilles, papillons, oiseaux). Il semble ainsi que l'allogamie soit la règle, bien que l'autofécondation ne puisse être exclue.



Scaevola montana (Tontouta).

Scaevola cylindrica, *Scaevola montana*



Scaevola cylindrica.

STATUT DES ESPÈCES : Indigènes.

DESCRIPTION :

Caractères communs aux deux espèces présentées :

Arbustes ou arbrisseaux, feuilles pétiolées (pétiole de 1-2 cm), à marge révolutée, entière à dentée sur la moitié ou les trois quarts supérieurs. Fleurs présentant la particularité d'être asymétriques et de ressembler à une main ouverte par leurs pétales pubescents (longueur : 12-18 mm) au nombre de 5. Fruits de couleur noire, à mésocarpe charnu, endocarpe ligneux.

Distinction des deux espèces :

Caractère discriminant	<i>S. cylindrica</i>	<i>S. montana</i>
Taille maximale	8 m	2 m
Rameaux	glabres, à côtés longitudinaux	glabres ou à pubescence
Taille du limbe	6-18 x 1-4 cm	(1,5-)6(-10) x 1,5-2 cm
Nervure médiane des feuilles	proéminente sur les deux faces	saillante
Nervures secondaires	fines et visibles	invisibles
Inflorescence	terminale en cymes lâche, souvent multiflore (60 fleurs)	terminale en grappe de cymes ou en grappe simple
Taille du fruit	4-5 x 3-4 mm	2,5-5 x 2-3 mm
Taille de la graine	2 x 0,5 mm	2 x 1,2 mm

HABITAT :

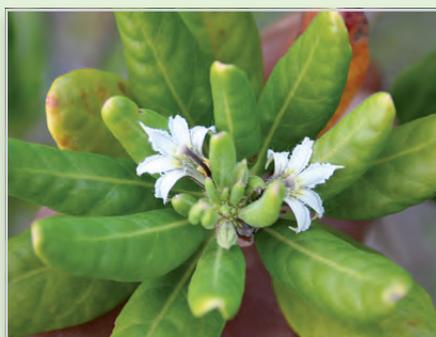
Ces deux espèces sont bien distribuées sur l'ensemble du territoire, des Bélep à l'île des Pins. *S. cylindrica* croît en maquis, en forêt humide et sur brûlis, de 200 à 1 100 m d'altitude. *S. montana* se trouve plutôt en maquis jusqu'à 800 m d'altitude. Les deux espèces se développent sur sols issus de péridotites ou de serpentinites, et *S. montana* croît également sur des sols issus de roches calcaires ou de roches acides.

PHÉNOLOGIE :

- *S. cylindrica* : Floraison et fructification semblent être étalées sur toute l'année.
- *S. montana* : Floraison principalement de mai à novembre, fructification de octobre à février.

REMARQUE :

La distinction entre *S. montana* et *S. cylindrica* peut poser parfois quelques difficultés. En effet, il semble exister des individus intermédiaires présentant une grande amplitude de variations morphologiques, qui concernent la surface du noyau, la forme du limbe, la longueur du tube floral, la pubescence.



Fleurs de *S. montana*.



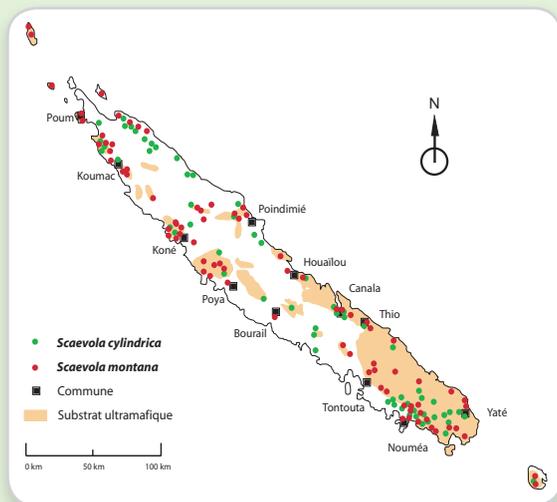
Feuilles de *S. cylindrica*.



Feuilles de *S. montana*.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après *La Flore de Nouvelle-Calédonie* (MNHN).



Fruits mûrs (de *S. cylindrica*).

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Cueillette manuelle des fruits à maturité (de coloration noirâtre). On peut utiliser une fourchette dont les dents auront été pliées pour récolter plus de fruits à la fois. Le ramassage des fruits d'un plant peut se faire quand environ 3 fruits sur 4 sont noirs. N. B. : Les fruits tachent les vêtements et les doigts durablement.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les fruits de *Scaevola* doivent être déulpés rapidement après la récolte (manuellement ou mécaniquement avec une déulpieuse). Si les fruits sont secs, les faire tremper quelques jours. Il suffit de les frotter contre un tamis fin (n° 12 ou 14), sous un filet d'eau, pour retirer la pulpe. Les noyaux sont séchés, puis éventuellement passés au « vacuum cleaner » pour éliminer les matières inertes fines.

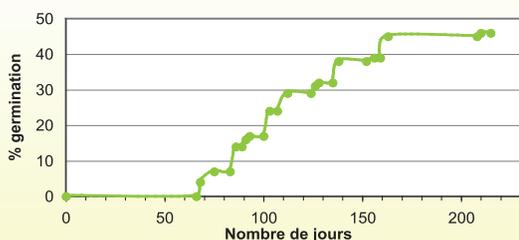
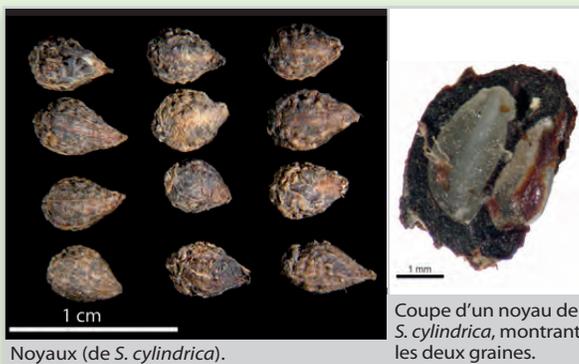
Scaevola cylindrica, *Scaevola montana*

DONNÉES QUANTITATIVES :

Entre 10 et 30 g pour 1 000 noyaux. Chaque noyau contient normalement 2 graines.

TEST DE VIABILITÉ :

La germination des graines est très étalée dans le temps, ne permettant pas de quantifier rapidement la viabilité d'un lot. Le plus simple semble être le test de la coupe : chaque fruit contient deux loges où se trouvent les graines, qui sont de couleur blanches ou claires lorsqu'elles sont viables.



Courbe de germination de *Scaevola cylindrica*. Conditions de culture : arrosage régulier, enceinte (29 °C+éclairage 12 h / 22 °C sans éclairage 12 h). Traitement : H₂O / 2 mois, changé régulièrement.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Cette espèce présente de fortes dormances, vraisemblablement physique et physiologique. Des études sont en cours afin de les préciser.

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : le taux de germination ne varie pas après 2,5 ans de conservation en boîtes hermétiques à 3 °C (avec une teneur en eau de 11,8 %).

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Assez facile à cultiver à partir de graines. Repiquer au moins au stade 2 feuilles cotylédonaire. Durée de culture : environ 10 à 12 mois, en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.

Le bouturage donne de bons résultats.



COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses). (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>S. cylindrica</i> (n = 3)	1,00	0,05	1,86	0,90	0,64	0,83	95	142	0,06
<i>S. montana</i> (n = 33)	1,32	0,05	1,21	1,30	0,64	0,73	201	37	0,07

Espèces intéressantes en raison de teneurs élevées en potassium dans leurs feuilles.

La famille des **Joinvilleaceae** est représentée en Nouvelle-Calédonie par deux espèces, dont une seule, également présente à Vanuatu, à Fidji et aux îles Salomon, *Joinvillea plicata* var. *plicata*, se rencontre sur terrains miniers. C'est une espèce herbacée robuste, fréquente en lisière de forêts denses humides le long d'anciennes pistes forestières.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Herbes (monocotylédones) pérennes, se développant à partir d'un rhizome sympodial, tiges aériennes érigées, sans ramification, creuses à l'exception des nœuds.

Feuilles en insertion distique, plus ou moins ligulées, limbe linéaire à lancéolé à base pubescente, à veines anamosées.

Inflorescence terminale, paniculée, présence de bractées. Fleurs sessiles à sub-sessiles, hermaphrodites, actinomorphes, trimères. Tépales libres, persistants.

Fruits en baies, noires à maturité, comportant 0 à 3 graines.



Joinvillea plicata (Tontouta).

Joinvillea plicata ssp. plicata



STATUT DE L'ESPÈCE :

Indigène (également représentée dans d'autres îles du Pacifique).

DESCRIPTION :

Espèce herbacée pouvant atteindre entre 1 et 5 m de hauteur et présentant plusieurs tiges partant de la base du plant. Feuilles engainantes autour de la tige principale et présentant des plissures à l'image d'un soufflet d'accordéon. Inflorescence mesurant entre 10 et 40 cm, en large panicule, érigée, comportant 3 à 5 embranchements. Fruits (baies) noirs à maturité, de 4-6 mm, comprenant 0 à 3 graines rondes (d'environ 2 mm) de couleur blanche.

Critères de reconnaissance : Cette espèce est facilement reconnaissable. Il faut toutefois éviter de la confondre avec les *Flagellaria* qui ont la particularité d'avoir une vrille à l'extrémité des feuilles, et dont le limbe est lisse.

HABITAT :

Cette espèce se rencontre souvent au bord des pistes minières, sur substrat latéritique, entre 200 et 1 300 m d'altitude.

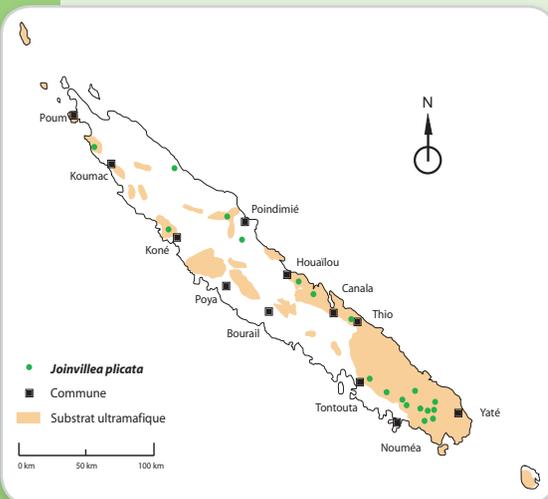
PHÉNOLOGIE :

La floraison s'étale d'avril à septembre. La fructification a lieu entre les mois d'août et mars.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :



Touffes de *J. plicata* en bord de piste.



D'après l'herbier du centre IRD (NOU).

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les infrutescences doivent être récoltées lorsque les fruits sont bien mûres (fruits noirs et charnus), à l'aide d'un sécateur ou d'un échenilloir.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

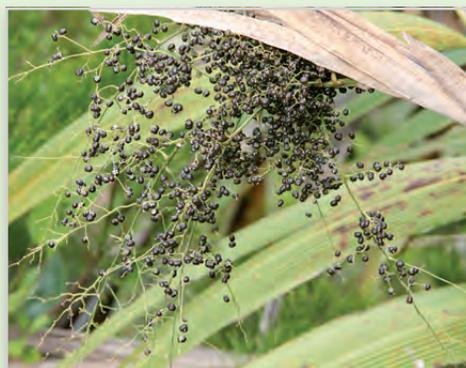
Les fruits de *Joinvillea* doivent être dépulpés rapidement après la récolte. Si les fruits sont secs, il est nécessaire de les faire tremper quelques jours. Il convient ensuite de les frotter contre un tamis fin (16), sous un filet d'eau, pour retirer la pulpe. Les graines sont séchées, puis éventuellement passées au « vacuum cleaner » pour enlever les matières fines inertes restantes.



Détail d'inflorescence de *J. plicata*.



Détail des feuilles et inflorescence de *J. plicata*.



Infrutescence de *J. plicata*.



Tige, détail des limbes et inflorescence de *J. plicata*.

Joinvillea plicata ssp. *plicata*

DONNÉES QUANTITATIVES :

2 à 4 g pour 1 000 graines triées.

TEST DE VIABILITÉ :

Il est difficile de conseiller un test de viabilité rapide pour cette espèce, sachant que l'embryon est très difficile à repérer dans la graine. Il est juste possible de quantifier le nombre de graines par fruit (entre 0 et 3).

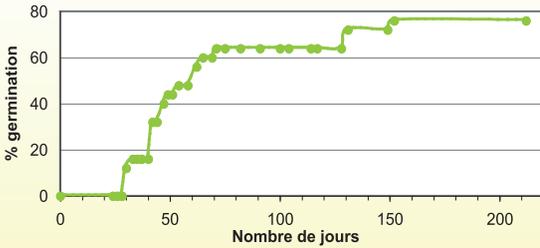


Graines et fruits (séchés) de *J. plicata*.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Les graines semblent présenter une dormance physiologique et morphologique (à confirmer toutefois).

Une application de GA₃ (0,3 g/l) permet d'obtenir une germination un peu plus rapide, mais sans améliorer le taux final.



Courbe de germination de *Joinvillea plicata*. Culture : sans traitement, en salle (arrosage régulier, température extérieure, démarrage en octobre).

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : le taux de germination ne varie pas après 24 mois de conservation en boîtes hermétiques à 3 °C (avec une teneur en eau de 12,5 %).

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Repiquage au stade environ 2 feuilles. Durée de culture : environ 12 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.



Germination des 3 graines contenues dans le fruit de *J. plicata*.



Jeunes plants de *J. plicata* (à environ 8 mois).

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses). (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>J. plicata</i> (n = 2)	1,55	0,07	1,29	0,20	0,19	0,24	197	8	2,06

Les teneurs en azote et en potassium sont assez intéressantes.

La famille des **Malpighiaceae** comprend sur le territoire sept espèces, dont quatre sont endémiques (trois espèces du genre *Rhyssopteris*, et *Acridocarpus austrocaledonica*, toutes les quatre présentes en maquis miniers). Cette dernière est une espèce à large répartition géographique, qui se développe préférentiellement à basse altitude (< 600 m), le plus souvent sur des sols magnésiens.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Lianes, arbustes ou petits arbres.

Feuilles opposées ou alternes, avec ou sans stipules.

Fleurs hermaphrodites, calice à 5 lobes, 5 pétales, 10 étamines, à anthères à 2 loges s'ouvrant par des fentes longitudinales, ovaire libre, à 3 loges.



Acridocarpus austrocaledonica (Tontouta).

Acridocarpus austrocaledonica



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbre ou arbrisseau. Feuilles simples, elliptiques, alternes, sans stipules, revers du limbe à tomentum roux puis brun. Inflorescence en panicule de fleurs jaune pâle. Fleurs à 5 pétales et à 5 sépales. Infrutescence formée par 1-3 disamares à ailes longitudinales, comportant une graine par samare.

Critères de reconnaissance : Graines ailées, feuillage rouge en dessous.

HABITAT :

Cette espèce à large répartition géographique se trouve en maquis arbustifs, préférentiellement sur sols bruns hypermagnésiens, de 30 à 650 m d'altitude.

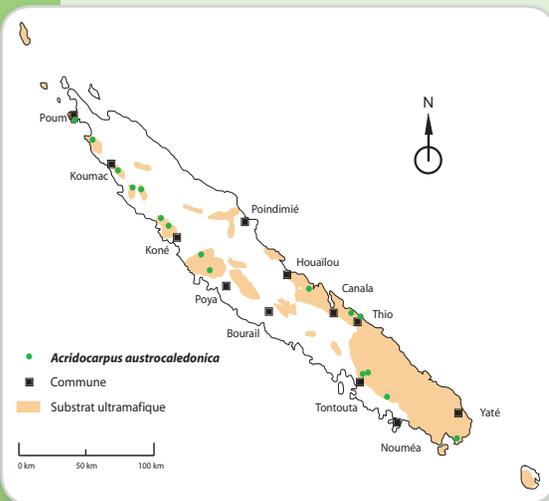


Feuilles d'*Acridocarpus austrocaledonica*.

PHÉNOLOGIE :

La floraison s'étale de novembre à mai et la fructification de janvier à juin.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :



D'après l'herbier du centre IRD (NOU).

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les graines ailées sont collectées lorsqu'elles ont pris une couleur jaunâtre à brun clair. La récolte peut se faire à la main ou à l'aide d'un échenilloir.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les disamares (graines ailées) sont triées manuellement puis séchées en salle sur un tamis. Les ailes peuvent être enlevées pour prendre moins de place lors du stockage.



Rameaux d'*A. austrocaledonica*.



Revers des feuilles d'*A. austrocaledonica*.



Infrutescence et disamares matures d'*A. austrocaledonica*.



Inflorescence d'*A. austrocaledonica*.

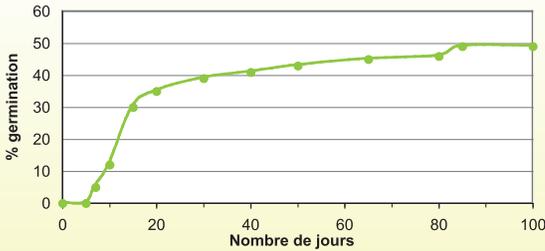
Acridocarpus austrocaledonica

DONNÉES QUANTITATIVES :

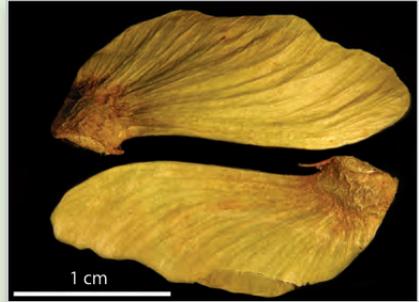
21,2 à 24,3 g pour 1 000 graines ailées.

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le moyen le plus simple. Une durée de 80 jours est nécessaire pour s'assurer que toutes les graines viables ont germé. Toutefois, on peut estimer qu'environ 80 % des graines viables ont germé au bout de 20 jours.



Courbe de germination d'*Acridocarpus austrocaledonica*. Culture : sans traitement, arrosage, enceinte (29 °C +éclairage 12 h / 22 °C sans éclairage 12 h).



Disamare d'*A. austrocaledonica*, séparée.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Graines exalbuminées, sans dormance observée. Aucun prétraitement n'est nécessaire. La germination est rapide, la majorité des graines émergent en 3 semaines.

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes (teneur en eau après séchage à l'air libre : 9,2 %). À conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Pas de données sur la conservation à long terme.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquer de préférence au stade 2 feuilles cotylédonaire, possible au stade « allumette ». Durée de culture : environ 12 à 14 mois, en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.



Jeune plant d'*A. austrocaledonica* (à 3 mois).



Plant d'*A. austrocaledonica* (à 10 mois).

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses). (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>A. austrocaledonica</i> (n = 12)	1,48	0,05	0,87	1,69	0,42	0,05	151	39	0,40

Cette espèce a des teneurs relativement élevées en azote et en calcium dans ses feuilles.

La famille des Myodocarpaceae était précédemment incluse au sein de la famille des Araliaceae *sensu lato*, qui a été également amputée, pour la Nouvelle-Calédonie, des genres *Apiopetalum*, *Apium* et *Centella* (Apiaceae). Elle comprend le genre endémique *Myodocarpus* (10 espèces) et le genre *Delarbrea* (6 espèces endémiques).

Huit espèces du genre *Myodocarpus* ne se rencontrent que sur terrains miniers, cinq d'entre elles, dont *M. fraxinifolius*, se trouvent en forêt et en maquis, deux exclusivement en forêt et une se développe uniquement en maquis humides.

Le genre *Delarbrea* est principalement forestier et préforestier et ne possède que deux espèces strictement associées aux roches ultramafiques. Trois espèces sont ubiquistes et deux absentes des terrains miniers.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres ou arbustes, le plus souvent monocaules ou très peu ramifiés.

Apex des tiges, pétioles et base des inflorescences souvent glauques.

Feuilles simples, découpées, ou imparipennées, alternes, regroupées au bout des rameaux. Folioles opposées à sub-opposées (quelquefois alternes), entièrement ou partiellement dentées. Pétiole avec une base embrassante, lisse ou à marge membraneuse ou scarieuse (organe mince, membraneux, sec, parfois translucide).

Inflorescences en panicules d'ombelles, terminales. Fleurs hermaphrodites et protandres.

Sépales soudés à la base en un court tube, 5 pétales. Ovaire infère à 2 carpelles.

Fruits charnus ou ailés. Présence de vésicules huileuses dans l'endocarpe.



Myodocarpus fraxinifolius et *M. involucratus* (Sud).

Myodocarpus fraxinifolius



ANCIENNE FAMILLE : Araliaceae.

STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbuste ou petit arbre (en forêt secondaire) à feuilles alternes, condensées en bouquet à l'extrémité des rameaux et longuement pétiolées. Limbe imparipenné, de 4 à 14 paires de pennes opposées ; folioles dentées en général, avec une dernière foliole seule en position terminale. Inflorescence en panicule. Fruits secs en 2 akènes ailés (ou disamares).

Critères de reconnaissance : Les Myodocarpaceae sont facilement reconnaissables sur le terrain grâce à leur port et à l'insertion des feuilles sur le tronc (cf. photos). Les *Myodocarpus* se distinguent par des fruits secs ailés (tandis que les *Polyscias* ont des fruits charnus).

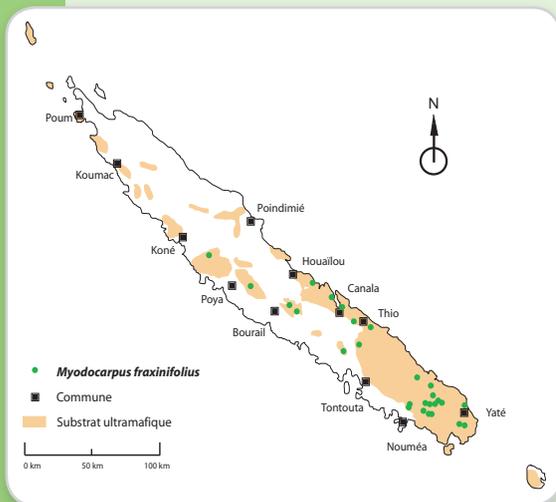
HABITAT :

Les Myodocarpaceae sont une composante importante de la flore du maquis arbustif et paraforestier. *M. fraxinifolius* se retrouve le plus souvent sur sols latéritiques de piedmont et sur gabbros, entre 150 et 1 100 m d'altitude.

PHÉNOLOGIE :

La floraison s'étale principalement de novembre à janvier. La fructification a lieu entre février et juin (surtout entre février et mars).

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :



Détail des feuilles de *M. fraxinifolius*.

D'après l'herbier du centre IRD (NOU).

Inflorescences de *M. fraxinifolius*.Fruits mûrs de *M. fraxinifolius*.

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les disamares se récoltent lorsqu'elles sont bien sèches et qu'elles se détachent facilement de l'infrutescence. Collecter l'infrutescence entière ou l'envelopper dans un sac afin de faire tomber les graines si celles-ci se détachent trop facilement.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les graines encore attachées sont séparées des infrutescences par battage manuel. Afin de faciliter le stockage, il est possible de retirer les ailes puis de tamiser pour éliminer les matières inertes.

DONNÉES QUANTITATIVES :

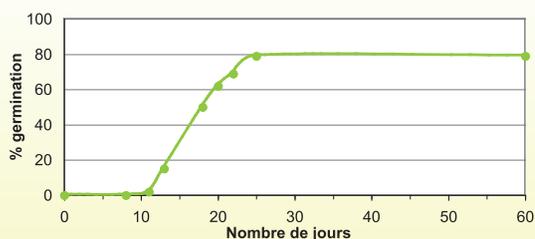
8 g pour 1 000 graines triées.

TEST DE VIABILITÉ :

Un test à la coupe semble suffire pour quantifier la viabilité d'un lot, éventuellement avec coloration au tétrazolium (cf. photo). Sinon, le test de germination donne également un résultat rapidement, la totalité des graines germant en moins de 25 jours.

Graines de *M. fraxinifolius*.Test de viabilité sur *M. fraxinifolius*, par coloration au tétrazolium : seules les graines à gauche sont viables.

Myodocarpus fraxinifolius



Courbe de germination de *Myodocarpus fraxinifolius*. Culture : sans traitement, en salle (arrosage régulier, température extérieure, démarrage en avril).

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Graines albuminées, sans dormance observée. Aucun prétraitement n'est nécessaire. La germination est rapide, la majorité des graines émergent en 3 semaines.



Myodocarpus involucreatus (Grand Sud).



Jeune plant de *M. fraxinifolius* (à environ 16 mois).

STOCKAGE :

Graines probablement intermédiaires : avec une teneur en eau à 12 % après séchage à l'air libre, et un stockage en boîtes hermétiques à 3 °C, le taux de germination ne change pas pendant environ 18 mois. Au-delà, il a tendance à baisser.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Assez facile à cultiver à partir de graines. Repiquer de préférence au stade 2 feuilles cotylédonaire. Mortalité assez fréquente des jeunes plants. Durée de culture : environ 12-14 mois, en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés. Cochenilles à bouclier parfois sur *M. involucreatus* (traitement possible).

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>M. fraxinifolius</i> (n = 12)	0,98	0,03	1,00	1,05	0,22	0,53	239	30	-

REMARQUE :

Le genre *Myodocarpus* comporte 6 espèces en maquis. En fonction de celles présentes sur les sites à revégétaliser, les autres espèces de *Myodocarpus* peuvent être récoltées et utilisées en restauration (notamment *M. crassifolius*, *M. involucreatus* (cf. photo) et *M. nervatus*), leurs caractéristiques germinatives étant similaires à celles de *M. fraxinifolius*. Ce genre se retrouve souvent dans les maquis peu évolués et sur les anciennes pistes minières où il se comporte en pionnier. La bonne productivité en graines et sa croissance rapide en font un candidat intéressant en revégétalisation. Il faut toutefois noter que ce genre contient dans ses tissus des huiles inflammables, à l'odeur de térébenthine, qui constitueraient une défense contre les phytophages tout en le rendant plus sensible aux incendies.

La famille des Myrtaceae est la plus riche en espèces de toute la flore de la Nouvelle-Calédonie, avec environ 250 espèces autochtones (toutes endémiques, sauf trois espèces, dont le « niaouli »), ainsi que de la flore des substrats ultramafiques avec plus de 180 espèces. Elle est largement représentée dans les forêts et dans les maquis, par exemple par les « goyas » (regroupant diverses Myrtaceae), le « chêne gomme » (*Arillastrum gummiferum*), le « faux teck » (*Carpolepis laurifolia*), exploités pour leur bois. Les Myrtaceae de Nouvelle-Calédonie appartiennent à deux groupes (ou tribus) : les Leptospermoideae à fruits secs et les Myrtoideae à fruits charnus.

Le groupe des **Leptospermoideae** a fait l'objet d'une révision. Il possède 75 espèces réparties sur 10 genres dont 4 endémiques (*Arillastrum*, *Carpolepis*, *Cloezia* et *Purpleostemon*) ; 69 espèces se développent sur roches ultramafiques et 49 ne s'en écartent pas. Le genre *Xanthostemon* comprend 19 espèces dont 17 sur roches ultramafiques (14 dans le maquis minier et 3 en forêt) ; les autres espèces se développent uniquement en forêt. Le genre *Metrosideros* rassemble 18 espèces dont 13 se rencontrent sur roches ultramafiques : 10 espèces se trouvent dans le maquis dont 5 également en forêt. Le genre *Tristaniopsis* possède 12 espèces (sur un total de 13) sur roches ultramafiques, 12 se trouvent en maquis et 5 en forêt. Le genre *Melaleuca* possède neuf espèces, toutes représentées dans le maquis minier, deux se développent également en forêt et une (*Melaleuca quinquenervia*) préférentiellement en savane sur roches acides. Le genre *Sannantha* (ex-*Babingtonia* et ex-*Baeckea*) possède quatre espèces, dont trois ubiquistes, dans le maquis minier. Le genre *Cloezia* compte six espèces dans le maquis, incluant deux espèces ubiquistes et deux rivulaires. Le genre *Carpolepis* comprend trois espèces dont deux exclusivement sur roches ultramafiques dans le maquis et en forêt. Les genres *Arillastrum* (une espèce d'origine forestière) et *Pleurocalyptus* (deux espèces forestières dont une également dans le maquis minier) ne se trouvent que secondairement dans le maquis. L'importance des espèces sur roches ultramafiques placerait ce groupe en tête des familles sur-représentées sur ce substrat, s'il était élevé au rang de famille.

Le groupe des **Myrtoideae** comprend environ 175 espèces, réparties sur une douzaine de genres. Le genre *Syzygium* (le seul ayant fait l'objet d'une révision dans *La flore de la Nouvelle-Calédonie*) possède 68 espèces, dont 46 sur terrains miniers et 21 ne s'en écartent pas ; 24 espèces sont représentées dans le maquis minier et 14 y sont strictement inféodées. Le genre *Eugenia* (en cours de révision, J. W. Dawson, com. pers.) possède 52 espèces, dont 33 sur roches ultramafiques et 18 strictement liées à ce substrat ; 23 espèces ont été recensées dans le maquis minier et seulement 7 espèces ne s'en écartent pas. Le genre *Ptilocalyx*, qui doit être mis en synonymie avec le genre *Syzygium* (Craven *et al.* 2006), aurait une dizaine d'espèces, majoritairement forestières et d'égale importance sur roches ultramafiques et sur roches acides. Les genres *Gossia*, *Archirhodomyrtus*, *Rhodomyrtus* et *Uromyrtus* (un total d'une trentaine d'espèces actuellement à l'étude) seraient majoritairement représentés sur roches ultramafiques et compteraient de 15 à 20 espèces dans le maquis. Le genre endémique *Myrtastrum* (une espèce) est strictement lié aux maquis tandis que le genre *Kanakomyrtus* (endémique) n'a qu'une espèce sur cinq sur terrains miniers..

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres, arbustes. Feuilles aromatiques à glandes pellucides, opposées sauf chez *Tristaniopsis* (feuilles alternes) et *Xanthostemon* (alternes souvent sub-verticillées), présence d'une nervure marginale chez de nombreuses espèces. Fleurs hermaphrodites ou unisexuées, sépales et pétales généralement par 4-5, parfois soudés ou adhérents, disque tapissant le tube du calice ou le haut de l'ovaire, étamines nombreuses.



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbuste ou arbre de 1,5-18 m de haut. Jeunes rameaux à 6 angles ailés. Feuilles entières à pétiole court, à limbe ovale, opposées ou verticillées par 3. Inflorescences groupées par 3 à 5 au sommet des rameaux, chacune composée de 2 ou 3 fleurs. Fleurs jaunes, à 5 sépales et à 5 pétales, étamines nombreuses, plus longues que les pétales ; corolle de 1-1,5 cm. Fruits secs en capsules de 5-8 mm de hauteur sur 8-12 mm de diamètre, s'ouvrant à maturité. Graines ailées de 2,5-3 x 0,7-1 mm.

Critères de reconnaissance : Jeunes rameaux anguleux, jeunes feuilles souvent rouges, feuillage groupé aux extrémités des branches supérieures et fleurs jaunes.

HABITAT :

Espèce largement répandue sur la Grande Terre. On la trouve en forêt et en maquis (sa taille est alors réduite) sur substrat ultramafique, entre 5 et 1 600 m d'altitude, parfois en peuplements denses. Il existe deux variétés :

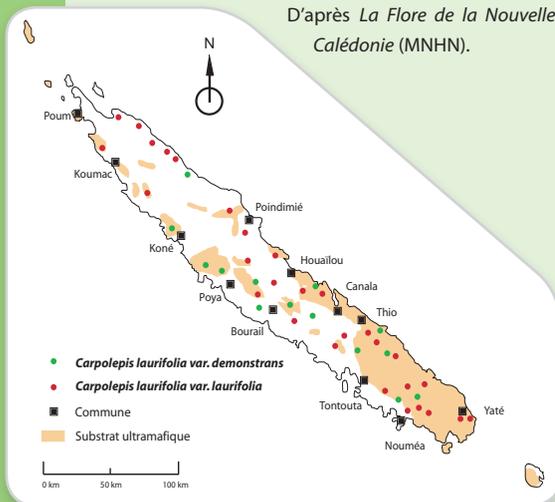
- la variété *laurifolia*, qui se trouve surtout à basse altitude, en forêt humide ;
- la variété *demonstrans*, qui croît principalement en altitude dans les forêts basses et en maquis, surtout sur substrat péridotitique, mais aussi sur schistes.

PHÉNOLOGIE :

Floraison de décembre à mars, avec un pic en janvier. Fructification d'avril à septembre (fruits mûrs surtout entre avril et juillet). Les arbres ne fleurissent pas tous les ans.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après *La Flore de la Nouvelle-Calédonie* (MNHN).



Fleurs de *C. laurifolia*.



Fruits de *C. laurifolia*.

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Récolte des fruits sur l'arbre avant déhiscence, quand leur couleur passe au marron clair. Si les fruits sont trop mûrs, les graines restantes tombent très facilement, on peut alors utiliser un sac ou une bâche et secouer les branches.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les capsules sont séchées sur tamis fin (n° 14 ou 16). À la déhiscence totale des fruits, le tamis est secoué manuellement afin de libérer les graines. Les graines fertiles sont ailées et présentent un embryon bombé (cf. photo).

DONNÉES QUANTITATIVES :

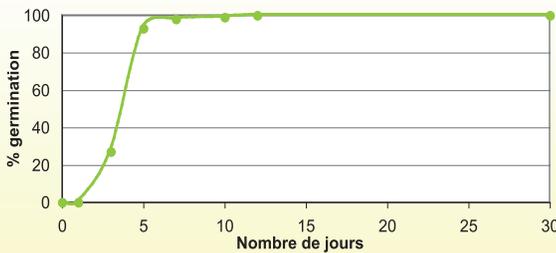
De 0,1 à 0,5 g pour 1 000 graines triées. Nombreuses graines par fruit. Beaucoup sont vides, en forme d'écaille aplatie (90 à 95 %).

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, la totalité des graines viables germent en moins de 10 jours.



Graines de *C. laurifolia* (la plupart vides).



Courbe de germination de *Carpolepis laurifolia*. Culture : sans traitement, en salle (arrosage régulier, température extérieure, démarrage en juin).

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, germination rapide sans aucun traitement (cf. courbe ; seules sont testées les semences d'aspect fertile). Prendre en compte la forte proportion de graines vides dans un lot. Les graines germent entre 7 et 35 °C, avec un optimum entre 25 et 35 °C.

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : à conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Avec cette méthode, le taux de germination ne varie pas après 3,5 ans (avec une teneur en eau de 14 %, après séchage en salle) ; il a tendance à diminuer après. À l'air libre en laboratoire, on constate une baisse de viabilité après 2 mois et une perte totale en 12 mois.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Assez facile à cultiver à partir de graines. Repiquage délicat : plantules de petite taille, à ne pas repiquer trop tôt (stade 2 ou 4 vraies feuilles). À ce stade, éviter les arrosages à grosses gouttes. Durée de culture : environ 12 à 14 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés. Peut se multiplier par bouturage.



Plant en pépinière de *C. laurifolia*.

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>C. laurifolia</i> (n = 15)	0,62	0,04	0,28	1,46	0,26	0,29	906	38	0,03



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbrisseau ou arbuste de 0,5-4 m de haut. Feuilles opposées à pétiole de 3-11 mm de long ; limbe souvent vert glauque, pouvant être vert pâle ou vert foncé, souvent terne ou parfois luisant ; glabre ou à pubescence dense au stade jeune. Inflorescence axillaire en cyme, comportant 3-21 fleurs généralement jaunes, parfois blanches. Fruits en capsules, contenant des graines linéaires de 3-4,5 mm de long et 0,7-1 mm de large.

Critères de reconnaissance : Aspect vert clair de la face inférieure des feuilles. Feuillage polymorphe.

Il existe trois variétés : var. *artensis*, répandue sur tout le territoire sur terrains miniers, var. *basilaris*, qui se retrouve dans le massif ultramafique du Sud, et var. *riparia*, inféodée aux seules berges de la haute Tontouta. Pour la revégétalisation, il est préférable de se concentrer sur la variété *artensis* ou sur celle présente sur le site.

HABITAT :

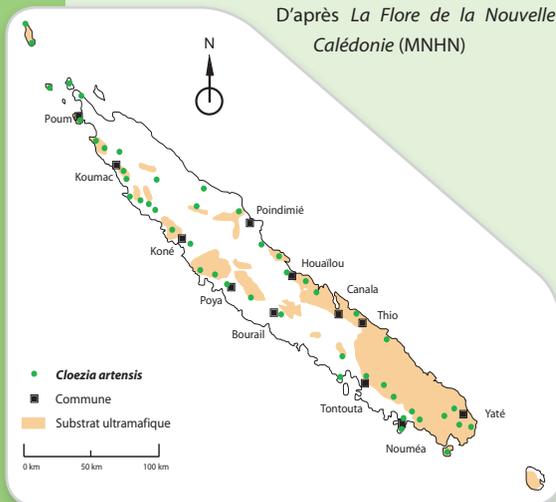
Espèce commune, largement répandue sur substrat ultramafique, et localement sur schistes et sur roches calcaires. Elle croît dans le maquis et les forêts basses, sur les versants rocheux et les alluvions, de 10 à 1 000 m d'altitude, aussi bien dans des endroits secs que dans des lieux humides.

PHÉNOLOGIE :

Floraison de novembre à mai. Fructification abondante de mai à novembre.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après *La Flore de la Nouvelle-Calédonie* (MNHN)



Rameau de *Cloezia artensis*.

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Récolte de préférence quand les fruits commencent à s'ouvrir. Récolte possible des fruits fermés, de couleur virant au brun, mais bien formés. Si les fruits sont très ouverts, on peut secouer les rameaux pour faire tomber les graines dans un sac. Un individu porte souvent des fruits à des stades différents, ce qui permet de collecter sur une assez large période.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Après séchage en salle, à leur déhiscence, les capsules sont tapotées sur tamis afin de libérer les semences. Les graines sont ensuite tamisées plusieurs fois à travers des tamis de mailles différentes. Il n'est pas possible d'utiliser un « vacuum cleaner » pour séparer les graines des matières inertes restantes.



Fleurs et fruits de *C. artensis*.



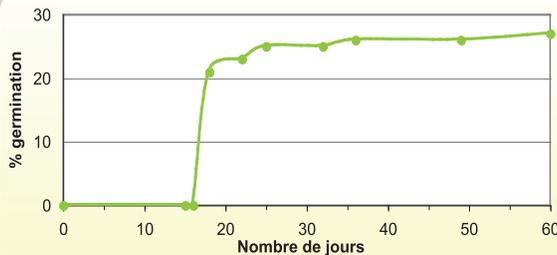
Graines de *Cloezia artensis* (les viables et les stériles sont peu différenciables).

DONNÉES QUANTITATIVES :

De 0,3 à 0,5 g pour 1 000 graines triées. Les fruits libèrent un grand nombre de graines, la plupart vides (plus de 85 %).

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, la majorité des graines viables germent en 20 jours.



Courbe de germination de *Cloezia artensis*. Culture : sans traitement, en salle (arrosage régulier, température extérieure, démarrage en septembre).

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, aucun traitement nécessaire (cf. courbe ; seules sont testées les semences d'aspect fertile). Qualité des lots collectés variable (graines souvent vides).

N.B. : Les graines vides et les viables sont difficiles à séparer, même sur table lumineuse.

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : à conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Avec cette méthode, le taux de germination ne varie pas après 3,5 ans (avec une teneur en eau de 11,2 %, après séchage en salle). Pas encore de résultats au-delà.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquage délicat, au stade 2 vraies feuilles. À ce stade, éviter d'arroser à grosses gouttes. Durée de culture : 10 à 12 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.

Peut se multiplier par bouturage.

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>C. artensis</i> (n = 50)	0,82	0,02	0,73	1,01	0,53	0,03	148	250	0,20

Myrtastrum rufo-punctatum



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbrisseau ayant généralement un port en boule. Feuilles opposées-décussées de petite taille (10 x 5 mm), possédant des glandes bien visibles sur la face inférieure. Marge des feuilles légèrement révolutée. Fleurs de couleur blanche comportant de nombreuses étamines. Baies de couleur noire, de diamètre compris entre 5 et 10 mm et contenant plusieurs graines d'environ 1 mm de diamètre.

HABITAT :

Cette espèce se trouve sur substrat ultramafique, préférentiellement sur sols bruns hypermagnésiens et sur sols peu évolués d'érosion, entre 100 et 1 300 m d'altitude. Elle présente une bonne résistance à l'aridité.

PHÉNOLOGIE :

Floraison entre novembre et avril. Fructification étalée entre avril et décembre (collecte surtout entre août et novembre).



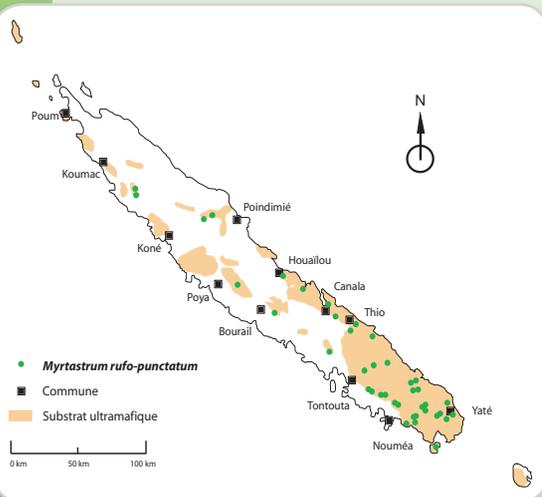
Fleurs de *Myrtastrum rufo-punctatum*.



Feuilles de *M. rufo-punctatum* (revers du limbe en haut à gauche).

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après l'herbier du centre IRD (NOU).



STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les baies sont récoltées manuellement lorsqu'elles sont bien noires. Fructification souvent abondante.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les baies sont déulpées manuellement, juste après la récolte, sur un tamis fin (n° 16), sous un filet d'eau. Les graines sont séchées à l'air, puis éventuellement passées au « vacuum cleaner » afin d'éliminer les fines matières inertes restantes.

Graines de *M. rufo-punctatum*.**DONNÉES QUANTITATIVES :**

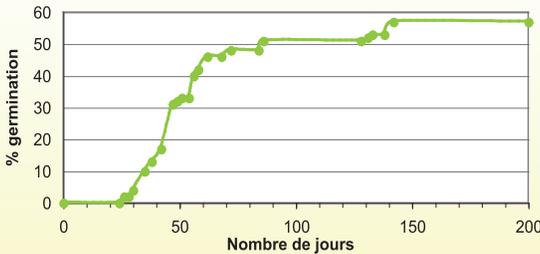
0,45 g pour 1 000 graines triées. Nombreuses graines par fruit (plus de 10 à 20).

TEST DE VIABILITÉ :

Vu la taille des graines, les tests à la coupe ou au tétrazolium sont difficiles à réaliser. Le test de germination est le plus fiable, mais il faut attendre environ 50 à 60 jours pour voir 80 % des graines viables germer.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Dormance : soit absente, soit légère (en cours d'étude). De bons résultats sont obtenus sans traitement (cf. courbe). Le nitrate de potassium (3 g/l) pendant 48 heures améliore la vitesse et le nombre de germinations.



Courbe de germination de *Myrtastrum rufo-punctatum*. Culture : sans traitement, arrosage, enceinte (29 °C + éclairage 12 h / 22 °C sans éclairage 12 h).

Baies de *M. rufo-punctatum*.**STOCKAGE :**

Graines probablement orthodoxes : à conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Avec cette méthode, le taux de germination ne varie pas après deux ans (avec une teneur en eau de 11,3 %, après séchage en salle). Pas encore de résultats au-delà.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquage délicat, au stade 2 vraies feuilles. À ce stade, éviter d'arroser à grosses gouttes. Croissance assez lente, durée de culture : environ 12 à 14 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.

Peut se multiplier par bouturage.

Jeune plant de *M. rufo-punctatum*.**COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE :** (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>M. rufo-punctatum</i> (n = 6)	0,53	0,02	0,48	0,55	0,54	0,06	-	50	0,08



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbrisseau pouvant atteindre 2 m de haut. Rameaux dressés. Feuilles opposées-décussées, coriaces et presque cylindriques, de 5 à 12 x 0,6 à 1 mm, avec un sillon au milieu du limbe. Inflorescence de 1 à 3 fleurs. Fleurs blanches abondantes, d'environ 5 mm de diamètre. Capsules de 1,5 mm de haut et 2 mm de diamètre.

Critères de reconnaissance : Cette espèce est caractérisée par ses feuilles disposées sur 4 rangs, relativement petites, presque cylindriques, à sommet arrondi, éricoïdes (rappelant la bruyère *Erica* sp.), par ses pédoncules et pédicelles courts, par ses petites fleurs blanches ayant un petit nombre d'étamines.

HABITAT :

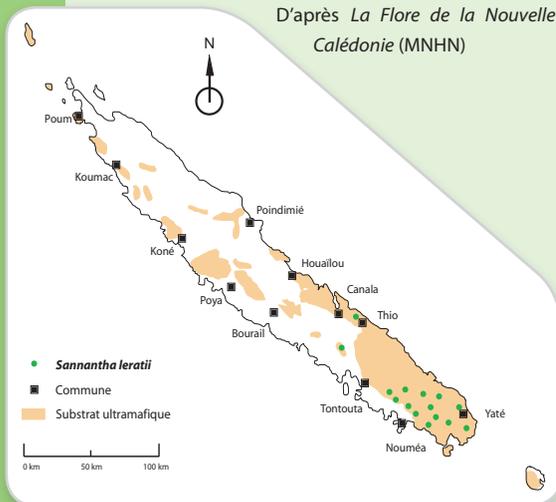
Cette espèce est commune sur substrat ultramafique dans le Sud. Il existe également deux populations plus au nord (mont Do et col de Petchikara). Elle est présente à la fois en maquis, en zone humide et en savane, entre 0 et 1 000 m d'altitude.

PHÉNOLOGIE :

Floraison étalée entre octobre et mars. Fructification entre janvier et juin (collecte surtout de janvier à mars).

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après *La Flore de la Nouvelle-Calédonie* (MNHN)



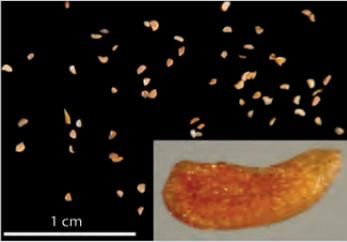
Feuilles de *Sannantha leratii*.



Fleurs de *S. leratii*.

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les fruits se récoltent juste avant ou au début de leur déhiscence, quand ils ont une couleur brune. Sélectionner les capsules, un même pied présentant des fruits à des stades différents.

Fruits matures de *S. leratii*.Graines de *S. leratii* (la plupart vides).

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, aucun traitement nécessaire (cf. courbe ; seules sont testées les semences d'aspect fertile, en forme de virgule avec un embryon bombé, et d'aspect translucide sur table lumineuse).

Jeune plant de *S. leratii* (de 12 mois).

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

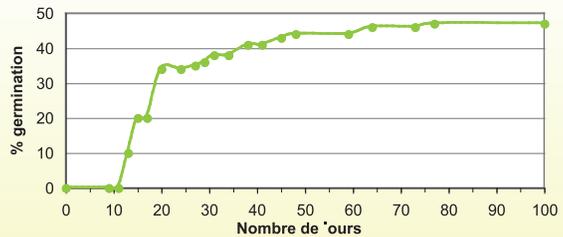
Après séchage en salle, à leur déhiscence, les capsules sont tapotées sur tamis afin de libérer les semences. Les graines sont ensuite tamisées plusieurs fois à travers des tamis de mailles différentes. Il est impossible d'utiliser un « vacuum cleaner » pour cette espèce, les graines étant trop légères.

DONNÉES QUANTITATIVES :

0,013 g pour 1 000 graines. Nombreuses graines par fruit.

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, la majorité des graines viables germent en 25 jours.



Courbe de germination de *Sannantha leratii*. Culture : sans traitement, en salle (arrosage régulier, température extérieure, démarrage en février).

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : à conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Avec cette méthode, le taux de germination ne varie pas après 32 mois (avec une humidité des graines de 9,3 %, après séchage en salle). Pas de résultats au-delà.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Assez facile à cultiver à partir de graines. Repiquage délicat : plantules de petite taille, à ne pas repiquer trop tôt (stade 2 ou 4 vraies feuilles). À ce stade, éviter les arrosages à grosses gouttes. Croissance assez rapide, durée de culture : environ 10 à 12 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés. Peut se multiplier par bouturage.

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>S. leratii</i> (n = 10)	0,87	0,03	0,43	0,45	0,20	0,33	540	38	0,40

Tristaniopsis calobuxus, *T. glauca*, *T. guillainii*



Tristaniopsis glauca.

STATUT DES ESPÈCES : Endémiques.

DESCRIPTION :

Caractères communs aux trois espèces présentées :

Arbustes ou arbres à feuilles alternes. Densité pubescence blanchâtre sur les jeunes rameaux et les feuilles juvéniles, qui deviennent progressivement glabres. Nervure médiane saillante en dessous, réseau de nervilles indistinct. Inflorescence située à l'aisselle des feuilles de l'extrémité des rameaux ordinaires. Les différents éléments floraux sont couverts d'une densité pubescence. Les étamines sont rassemblées en faisceaux.

Distinction des trois espèces :

Caractère discriminant	<i>T. calobuxus</i>	<i>T. glauca</i>	<i>T. guillainii</i>
Taille maximale	4 m	6 m	15 m
Pubescence des rameaux	longs poils blanchâtres, étalés, devenant progressivement glabres et brun-noir	dense pubescence blanchâtre, devenant rapidement glabre et brun foncé	poils courts, denses, tordus, cramoisis ou rouille sur les jeunes rameaux, devenant glabres et noirs à brun moyen
Dimensions du pétiole	1-5 x 1-2 mm	6-12 x 1-2,5 mm	5-20 x 1,5-2,5(5) mm
Dimensions du limbe	1-4 x 1-2 cm	7-12 x 2-3,5 cm	4-12 x 1-5 cm
Nombre de fleurs par inflorescence	1-3, parfois 4	jusqu'à 31	2-10
Dimensions du pédoncule	2-5 x 1-2 mm	aplatis, de 10-30 x 1-2,5 mm	10-30 x 1-3 mm, s'élargissant vers le haut
Dimensions de la capsule	5-7 x 4-5 mm	3,5-5 x 3-4 mm	7,5-12 x 7-11 mm
Dimensions de la graine	4 x 1,3 mm	2,3 x 1 mm	4 x 2 mm

REMARQUE :

Deux variétés de *T. guillainii* ont été décrites : *T. guillainii* var. *guillainii* et *T. guillainii* var. *balansana*. Elles se distinguent par le nombre d'étamines par faisceau : 15-30 pour la première (cantonée au nord de la ligne Thio-La Foa), 50-70 pour la seconde (dans le Sud).



Détail des feuilles de *T. calobuxus*.



Feuilles de *T. guillainii*.

HABITAT :

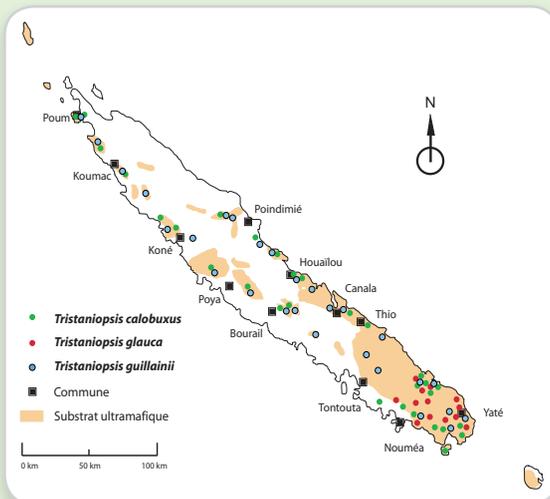
- *T. calobuxus* est une composante commune des maquis buissonnants sur sols latéritiques, de 10 à 1 100 m d'altitude, ainsi que sur sols bruns hypermagnésiens. Cette espèce existe aussi dans les maquis sur roches acides du nord de la Grande Terre.
- *T. glauca* : Cette espèce est très commune dans la moitié sud du grand massif ultramafique, en maquis sur divers sols latéritiques et sur gabbros. Elle se développe entre 50 et 1 000 m d'altitude, mais plus fréquemment dans les zones basses.
- *T. guillainii* : Cette espèce se retrouve sur tous les massifs de roches ultramafiques de la Grande Terre, entre 140 et 1 200 m d'altitude, souvent en peuplements denses. Elle affectionne surtout les sols ferrallitiques caillouteux ou gravillonnaires plus ou moins acides. Elle résiste bien à l'aridité.

PHÉNOLOGIE :

- *T. calobuxus* : Floraison étalée de mai à décembre, voire février (surtout de juillet à octobre). Fructification étalée de juillet à mai (surtout de septembre à mars). Cycles phénologiques variables selon les lieux, les années et les individus.
- *T. glauca* : Floraison de janvier à avril (surtout en février-mars). Fructification de mars à octobre (surtout de mai à août). Cycles assez réguliers entre les années, selon les lieux et les individus.
- *T. guillainii* : Floraison étalée d'avril à décembre (surtout de mai à octobre). Fructification de juin à janvier (surtout de juillet à novembre). Cycles phénologiques très variables selon les lieux, les années et les individus, et à des stades différents au même moment. Il semble qu'en zone plus sèche les individus fleurissent et fructifient plus précocement.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après *La Flore de Nouvelle-Calédonie* (MNHN).



Feuilles et fleurs de *T. calobuxus*.



Feuilles et fleurs de *T. glauca* (caractérisé par de grandes feuilles d'un vert glauque dont la face inférieure est terne).



Feuilles et fleurs de *T. guillainii*.

Tristaniopsis calobuxus, *T. glauca*, *T. guillainii*



Fruits de *T. calobuxus* (mûrs et passés).



Fruits de *T. glauca* (mûrs et passés).



Fruits de *T. guillainii* (immatures).

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les capsules se récoltent manuellement ou au sévateur lorsqu'elles commencent à brunir et que les fentes de déhiscence commencent à se voir.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Mis à sécher en salle, les fruits s'ouvrent complètement. Ils sont tapotés manuellement sur tamis afin de libérer les semences. Il convient ensuite de tamiser plusieurs fois les graines à travers des tamis de maillages différents. Il n'est pas possible d'utiliser le « vacuum cleaner » pour cette espèce, les graines sont trop légères. Les graines fertiles sont ailées et présentent un embryon bombé (cf. photos).



Graines de *T. calobuxus* (encadré : graine fertile).



Graines de *T. glauca* (encadré : graine fertile).

DONNÉES QUANTITATIVES :

	<i>T. calobuxus</i>	<i>T. glauca</i>	<i>T. guillainii</i>
Pour 1 000 graines triées	1,3 g	0,3 à 0,6 g	0,6 g

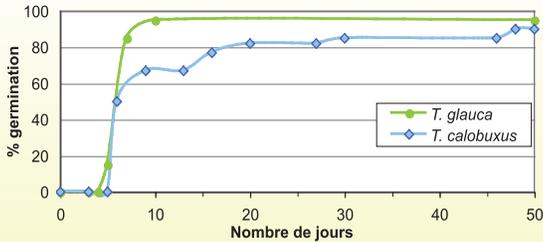
Un fruit peut contenir 15 à 30 graines, mais la plupart sont vides (80 à 95 % en général) et souvent parasitées.

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, 90 % des graines viables germent en 10 à 20 jours.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, germination rapide sans aucun traitement (cf. courbes ; seules sont testées les semences d'aspect fertile). Peu de différences de réponse entre les températures estivales et hivernales (en salle, soit entre 20 et 30 °C environ).



Courbes de germination de *Tristaniopsis glauca* et de *T. calobuxus*. Culture : sans traitement, arrosage, enceinte (29 °C + éclairage 12 h / 22 °C sans éclairage 12 h).

REMARQUE :

En fonction des sites à revégétaliser, d'autres espèces du genre *Tristaniopsis* (*T. capitulata*, *T. macphersonii*, *T. yateensis*) devraient pouvoir être aussi utilisées en restauration, les techniques de collecte et les caractéristiques germinatives étant vraisemblablement similaires à celles détaillées ci-dessus.

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : à conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Avec cette méthode, le taux de germination ne varie pas après 12 mois de stockage (avec une humidité des graines de 8,7 %, après séchage en salle). Pas encore de résultats au-delà.

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquage délicat, au stade 2 (voire 4) vraies feuilles. Croissance assez lente, durée de culture : environ 12 à 14 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés. Bouturage possible sur *T. calobuxus* et *T. glauca* (résultats toutefois moyens).



Jeune plant de *T. glauca* (à 12 mois).



Jeune plant de *T. calobuxus*.

Xanthostemon aurantiacus, *X. multiflorus*, *X. ruber*



Xanthostemon ruber.

STATUT DES ESPÈCES : Endémiques.

DESCRIPTION:

Critères de reconnaissance :

- *X. aurantiacus* : Espèce facilement reconnaissable à ses feuilles relativement étroites, de plus de 6 cm, à revers blanchâtre et à nombreuses nervilles, ainsi qu'à ses fleurs à hypanthium profond et à pétales orange ou rouges.
- *X. multiflorus* : Espèce caractérisée par ses fleurs jaunes. Feuillage et taille variables, 5 pétales, 5 sépales ; feuilles vernissées. Peut être confondu avec *X. laurinus*, qui diffère par des feuilles très

épaisses, à pétiole court, ainsi que par des fleurs et des fruits aussi plus grands.

- *X. ruber* : Cette espèce est une des plus faciles à reconnaître avec son hypanthium plat et ses fleurs rouge vif très voyantes.

Distinction des trois espèces :

(Pour les caractères communs, voir la page sur la famille.)

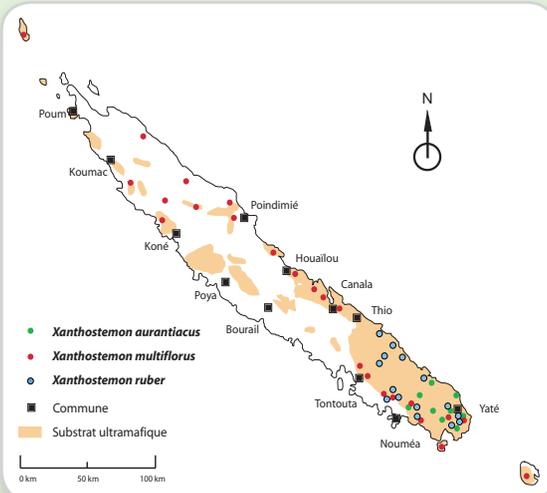
Caractère discriminant	<i>X. aurantiacus</i>	<i>X. multiflorus</i>	<i>X. ruber</i>
Taille maximale	3 m	30 m	20 m
Pubescence	glabre et pourvue de poils épars, argentés sur les parties jeunes	appareil végétatif et fleurs glabres, ou d'abord garnis d'une pubescence grise et devenant glabres	poils épars sur les parties jeunes, devenant rapidement glabres.
Dimensions du pétiole	6-12 x 2-3 mm	4-20 x 1-3 mm	4-6 x 1,5-2 mm
Dimensions du limbe	épais, plat de 7-9 x 1,5-3,5 cm	4-15 x 2-8 cm	4-7 x 2-3,5 cm
Nervures	nervure médiane saillante en dessous, 20-30 paires de nervures secondaires peu marquées, réseau de nervilles bien visibles en dessous	nervure médiane saillante en dessous et vers la base au-dessus, 15-25 paires de nervures secondaires peu marquées	nervure médiane saillante en dessous, souvent foncée, 25-40 paires de nervures secondaires peu marquées
Nombre de fleurs par inflorescence	jusqu'à 12	jusqu'à 18	jusqu'à 5
Couleur des pétales	rouge à orange (rarement jaune ou blanche)	jaune ou blanc crème	rouge
Dimensions de l'hypanthium	10-15 x 7-9 mm	4-7 x 5-11 mm	plat ou légèrement concave, de 9-18 mm de diamètre
Dimensions des sépales	4-6,5 x 5-7 mm	2-16 x 3-6 mm	4-6,5 x 2,5-3 mm
Dimensions des pétales	12-18 x 10-13 mm	5-10 x 5-10 mm	15-25 x 10-15 mm
Dimensions de la capsule	12-15 x 11-13 mm	8-12 x 9-15 mm	8-10 x 10-12 mm

HABITAT :

- *X. aurantiacus* : Cette espèce est localement abondante dans la moitié méridionale du massif ultramafique du Sud. Elle se trouve en maquis, entre 30 et 700 m d'altitude, le plus souvent sur sols rocheux et sur colluvions à basse altitude.
- *X. multiflorus* : C'est l'espèce du genre *Xanthostemon* la plus répandue, du niveau de la mer à 600 m d'altitude, sur l'ensemble des massifs de roches ultramafiques. Elle se rencontre en maquis minier sur sols rocheux, et sur schistes le long de la côte nord-ouest. Elle atteint la taille d'un arbre dans les lambeaux forestiers, près des cours d'eau.
- *X. ruber* : Cette espèce se rencontre dans plusieurs localités du massif ultramafique du Sud, en forêt basse et en maquis, sur sol magnésien ou sur serpentinite, entre 30 et 850 m d'altitude.

PHÉNOLOGIE :

- *X. aurantiacus* : Floraison étalée du mois d'octobre au mois de mai. Fructification étalée sur l'année, collecte principalement entre juin et novembre.
- *X. multiflorus* : Floraison étalée entre octobre et juillet (principalement vers avril). Fructification étalée sur l'année, collecte principale entre août et octobre.
- *X. ruber* : Floraison entre les mois de mai et août (surtout juin-juillet), assez synchrone. Maturation des fruits principalement entre novembre et février.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE : D'après *La Flore de Nouvelle-Calédonie* (MNHN).

Détail des feuilles de *X. aurantiacus* (revers blanchâtre).



Détail des feuilles de *X. multiflorus*.



Détail des feuilles de *X. ruber*.

**STADE ET TECHNIQUE
DE COLLECTE :**

Les capsules se récoltent manuellement ou au sécateur lorsque les fentes de déhiscence commencent à se voir, ou avant déhiscence lorsque les capsules commencent à brunir. Si les capsules sont déjà ouvertes, mettre un récipient ou un drap en dessous et secouer la branche. Les graines sont ensuite récupérées.



Fleurs de *X. aurantiacus*.



Détail des fleurs de *X. multiflorus*.



Fleurs de *X. ruber*.

**EXTRACTION ET TRAITEMENT
DES GRAINES :**

Les capsules ouvertes après séchage en salle sont tapotées manuellement sur tamis afin de libérer les semences. Elles sont ensuite tamisées plusieurs fois à travers des tamis de mailles différentes. Un passage au « vacuum cleaner » permet d'enlever les matières inertes.



Fruits de *X. multiflorus*.

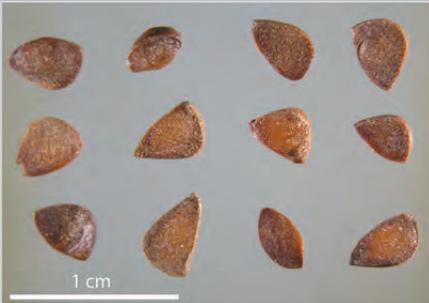
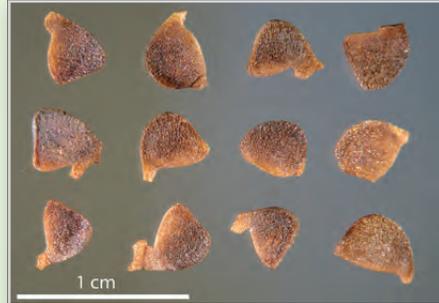
DONNÉES QUANTITATIVES :

	<i>X. aurantiacus</i>	<i>X. multiflorus</i>	<i>X. ruber</i>
Pour 1 000 graines triées	1,7 à 2,1 g	2,2 à 2,5 g	3,6 g

Un fruit contient souvent plus de 50 graines, mais la plupart sont vides (> 90 % en général).

TEST DE VIABILITÉ :

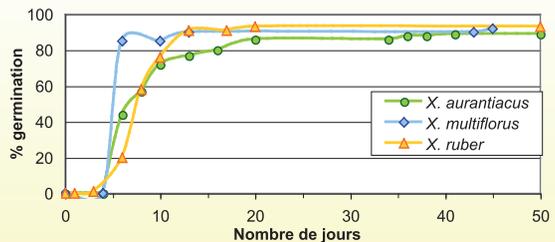
Le test de germination est le plus fiable car 90 % des graines viables germent en 15 jours environ.

Détail des graines de *X. aurantiacus*.Détail des graines de *X. multiflorus*.Fruits de *X. ruber* séchés en salle.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, germination rapide sans aucun traitement (cf. courbes ; seules sont testées les semences d'aspect fertile, lesquelles, mises sur table lumineuse, apparaissent plus claires sur une grande partie de la graine).

Peu de différences de réponse entre les températures estivales et hivernales (en salle, soit entre 20 et 30 °C environ).



Courbes de germination de *Xanthostemon aurantiacus*, de *X. multiflorus* et de *X. ruber*. Culture : sans traitement, enceinte (29 °C + éclairage 12 h / 22 °C sans écl. 12 h).

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : à conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Avec cette méthode, le taux de germination ne varie pas après 3 ans de stockage (avec une humidité des graines de 11 à 14 %, après séchage en salle).

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquage au stade 2 (voire 4) vraies feuilles.

Durée de culture : environ 10 à 12 mois pour *X. aurantiacus*, 12 à 14 mois pour les autres (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml.

Cochenilles farineuses parfois sur *X. multiflorus* (traitement chimique possible).

X. aurantiacus peut se multiplier par bouturage.

Plantules de *X. ruber* (à 4 mois).

Xanthostemon aurantiacus, *X. multiflorus*, *X. ruber*

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>X. aurantiacus</i> (n = 13)	0,64	0,02	0,71	1,43	0,17	0,05	129	29	0,31
<i>X. multiflorus</i> (n = 8)	0,67	0,03	0,37	1,32	0,32	0,10	27	27	3,28
<i>X. ruber</i> (n = 4)	0,68	0,02	0,44	0,89	0,32	0,13	20	14	2,36



Jeune plant en pépinière de *X. aurantiacus* (à 14 mois).



Plant de *X. multiflorus*.

REMARQUE :

Le genre *Xanthostemon* est très diversifié en Nouvelle-Calédonie et possède de nombreuses espèces à caractère pionnier. Plusieurs sont cantonnées à des zones géographiques restreintes : *X. carlii* dans les secteurs du Boulinda et du Koniambo, *X. ferrugineus* dans les secteurs du Boulinda et du Kopéto, *X. francii* dans la vallée de la Tontouta, *X. gugerlii* dans la région de Poro-Kouaoua, *X. laurinus* sur serpentinites au nord de Poya, *X. pubescens* sur les massifs de la côte ouest...

Il est donc important de n'utiliser que les espèces de *Xanthostemon* naturellement présentes sur le secteur où s'effectue la revégétalisation. Les techniques de collecte, les caractéristiques germinatives et de conservation de ces espèces sont similaires à celles décrites ici.



X. gugerlii (Kouaoua, route de Poro) (cf. remarque).



X. francii (vallée de la Tontouta, mont Vulcain) (cf. remarque).

La famille des **Picrodendraceae** était précédemment incluse au sein de la famille des Euphorbiaceae *sensu lato*, laquelle a été également amputée de la famille des Phyllanthaceae (genres *Phyllanthus*, *Antidesma*, *Bischofia*, *Breynia*, *Cleistanthus* et *Glochidion* pour la Nouvelle-Calédonie). La famille des Picrodendraceae comprend les genres *Austrobuxus* (15 espèces dont 14 endémiques), *Longetia* (1 espèce) et *Scagea* (2 espèces), ces deux derniers genres étant endémiques..

Neuf espèces du genre *Austrobuxus* sont strictement associées aux roches ultramafiques et *A. carunculatus* y est plus fréquente et plus abondante que sur tous autres substrats. Six espèces se trouvent aussi bien dans le maquis que dans la forêt, trois sont uniquement forestières et une seule n'a été recensée que dans le maquis.

Longetia buxoides ainsi que les deux espèces du genre *Scagea* se trouvent essentiellement sur terrains miniers. *Longetia buxoides* est principalement dans le maquis, l'une des espèces du genre *Scagea* en zone rivulaire et la seconde dans le maquis et en forêt.

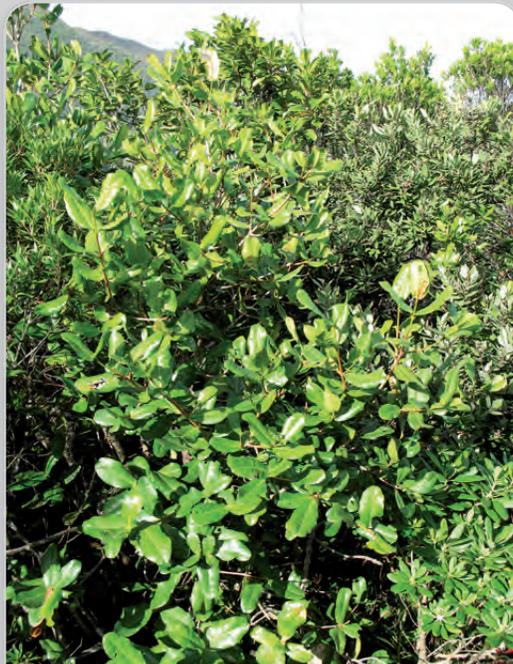
DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbustes ou arbres monoïques ou dioïques.

Feuilles entières décidues, alternes, long pétiole, petites stipules caduques ou persistantes.

Fleurs solitaires à 4-6 sépales, sans pétales, sur des inflorescences en cymes unisexuées ou bisexuées, en grappes, supra-axillaires, axillaires ou terminales. Fleurs mâles avec 8-27 étamines, fleurs femelles avec un ovaire à 2 loges, 2 ovules par loge.

Fruits soit en capsules contenant des graines arillées (parfois à caroncules), soit drupacés avec des graines sans caroncules.



Austrobuxus carunculatus (mont Dore).



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbuste ou arbre pouvant atteindre 15 m de hauteur. Rameaux couverts d'une pubescence rouille, devenant glabres. Feuilles de forme ovale, opposées ; limbe de 3-15 cm de long sur 2-7 cm de large dont la base est en forme de cœur ; pétiole de 3-13 mm de long, creusé d'un sillon peu profond. Espèce dioïque. Inflorescences mâles axillaires de 1-4 cm de long, fleurs mâles de 2-3 mm de diamètre à 4 sépales, 8-12 étamines ; inflorescences femelles axillaires comportant 1-7 fleurs, fleurs femelles d'environ 5-6 mm de diamètre, à 5 sépales pubescents ; fleurs de couleur crème à vert clair. Infrutescences de 1-4 fruits, en capsules de 11-17 x 11-15 mm à 3-4 loges. Graines ovoïdes de 7-9 x 5 mm et 3 mm d'épaisseur ; caroncule importante de couleur jaune-orangé.

Critères de reconnaissance : *A. carunculatus* est une espèce polymorphe. Elle se reconnaît à la disposition de ses feuilles opposées en bout de rameaux, aux pétioles courts de 1-2 mm d'épaisseur (cf. photos) et aux pédicelles des fruits de 3-7 mm.

HABITAT :

A. carunculatus est largement répandu dans les différents maquis miniers et en forêts sur roches ultramafiques, ainsi que sur roches métamorphiques, entre 0 et 1 100 m. Cette espèce est présente également dans des formations sclérophylles proches du littoral sur sols bruns hypermagnésiens.

PHÉNOLOGIE :

Floraison de septembre à mai (surtout de décembre à février). Fructification étalée, collecte principalement entre août et décembre.



Rameaux et feuilles d'*A. carunculatus*.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

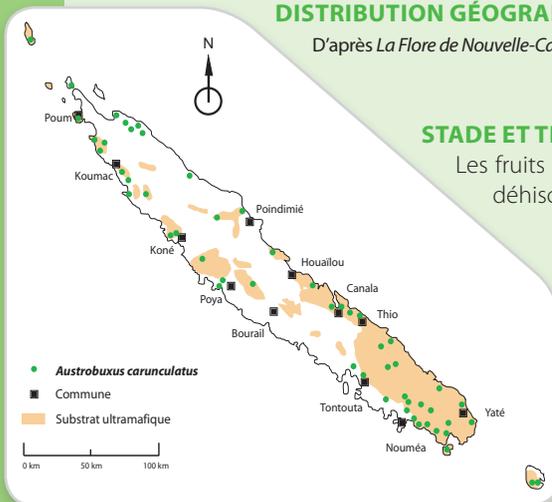
D'après *La Flore de Nouvelle-Calédonie* (MNHN).

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les fruits sont collectés à la main dès que des fentes de déhiscence apparaissent sur l'enveloppe extérieure.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les capsules sont séchées sur tamis fin en attendant leur déhiscence. Lorsque les fruits se sont ouverts, utiliser un tamis de maille un peu plus grande que les graines. Les graines fertiles sont noires, gonflées et brillantes. Les graines ridées ou creuses ne sont pas viables.





Inflorescence mâle d'*A. carunculatus*.



Fruits d'*A. carunculatus*.

DONNÉES QUANTITATIVES :

50 à 72 g pour 1 000 graines. Nombre de graines par fruit : 4 en moyenne.



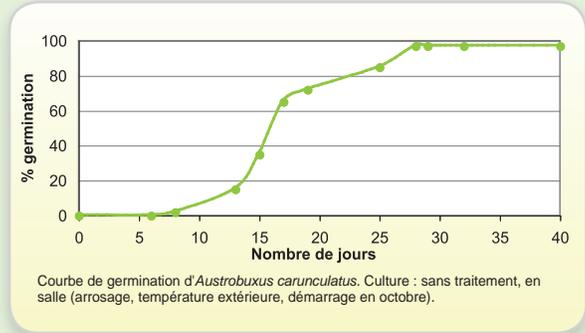
Graines d'*A. carunculatus*.

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, aucun traitement nécessaire (cf. courbe). Peu de différences de réponse entre les températures estivales et hivernales (en salle, soit entre 20 et 30 °C environ).

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, sachant que toutes les graines viables germent en moins de 30 jours. Le test de coloration au tétrazolium donne d'assez bons résultats.



Jeune plant d'*A. carunculatus*.

STOCKAGE :

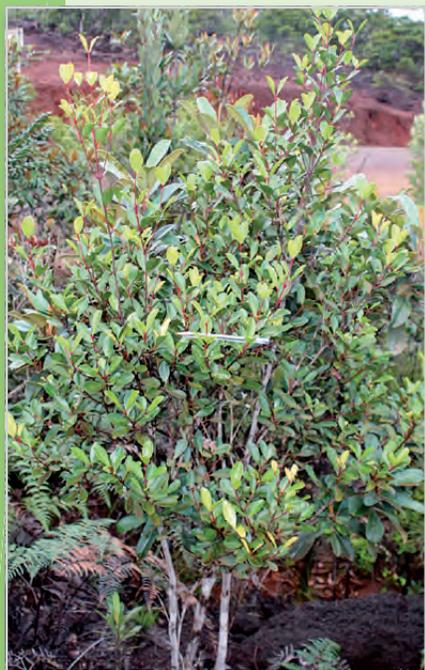
Graines probablement intermédiaires : après séchage à l'air (teneur en eau des graines : 6,3 %) et conservation en boîtes hermétiques à 3 °C, le taux de germination a tendance à diminuer après 16 mois de stockage, voire 6 mois selon les lots (perte de viabilité totale après 28 mois, confirmée par le test au tétrazolium).

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquer au stade 2 feuilles cotylédonaires. Durée de culture : environ 10 à 14 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Feuilles parfois attaquées par des chenilles. Pas de maladies constatées.

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>A. carunculatus</i> (n = 8)	0,94	0,04	0,52	1,26	0,49	0,10	88	21	2,34



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbousseau ou arbuste pouvant atteindre 4 m de haut. Feuilles opposées, simples, à marges entières, à pétiole de 1-5 mm, à nervation pennée. Plante monoïque. Inflorescences à l'aisselle des feuilles ou terminales, organisées en cymes, de 3-4 cm. Fleur mâle formée de 6 sépales imbriqués ; pas de pétales ; 9-17 étamines ; présentant un pistillode. Fleur femelle souvent terminale, formée de 6 sépales ; pas de pétales ; ovaire à 3 loges, contenant chacune 2 ovules ; 3 styles courts, 3 stigmates triangulaires charnus. Capsules tricoques de 7-9 x 8 mm. Graines ovoïdes de 4-5 x 3 mm et de 2 mm d'épaisseur, de couleur variable (marron, gris, orangé), lisses et luisantes, à caroncule non découpée.

Critères de reconnaissance : Cette espèce se reconnaît à ses feuilles opposées ainsi qu'aux entre-nœuds rouges des rameaux juvéniles. Les fruits tricoques sont bien caractéristiques de cette espèce et de toutes les Picrodendraceae.

HABITAT :

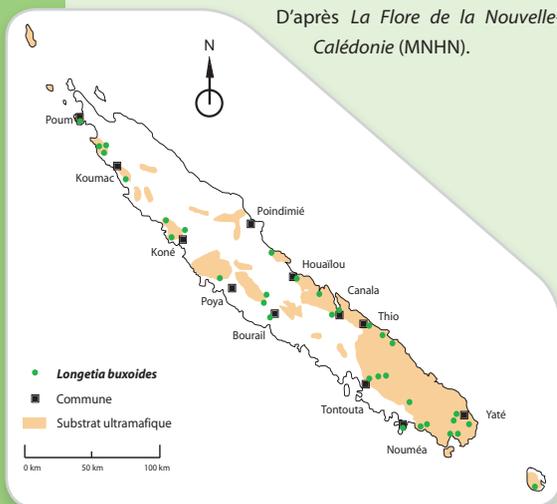
Cette espèce se rencontre sur l'ensemble des massifs ultramafiques de la Grande Terre, aussi bien sur sols bruns hypermagnésiens que sur sols ferrallitiques, entre 20 et 900 m d'altitude. Elle s'accommode assez bien des variations d'humidité du sol.

PHÉNOLOGIE :

Floraison de mars à août. Maturation des fruits d'octobre à mars (principalement de novembre à février).

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

D'après *La Flore de la Nouvelle-Calédonie* (MNHN).



Rameaux juvéniles de *Longetia buxoides*.



Détail des feuilles et des entre-nœuds de *L. buxoides*.



Fleurs mâles et fleurs femelles de *L. buxoides*.



Inflorescences de *L. buxoides*.

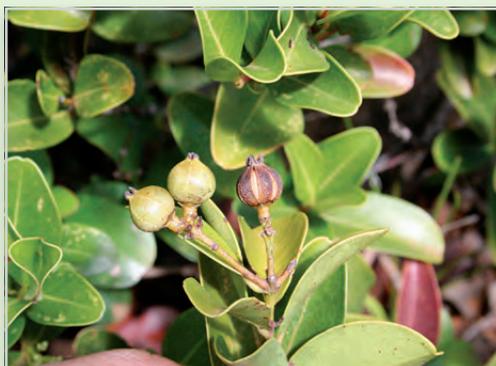
STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les fruits déhiscents se récoltent manuellement, de préférence lorsqu'ils changent de couleur (jaunâtre puis brune), avec des fentes de déhiscence qui se distinguent nettement. Il est possible de les collecter quand ils sont encore vert clair mais bien formés. Les fruits peuvent se récolter dans des draps disposés au pied de l'arbuste. Fructification assez abondante et relativement synchrone sur un même individu, ce qui permet de collecter des quantités assez importantes, à condition d'être présent au bon moment.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les capsules sont enlevées manuellement de leur grappe, puis mises à sécher à l'air libre sur tamis fin (n° 14 ou 16) jusqu'à leur déhiscence. Il est important de recouvrir le tamis pour éviter la perte de graines qui sont expulsées lors de l'ouverture des capsules (surtout si elles sont mises au soleil).

Les fruits ouverts sont passés au tamis de maille à peine supérieure à la taille des graines. Un passage au « vacuum cleaner » permet d'éliminer les fines matières inertes.



Fruits mûrs de *L. buxoides*.

Longetia buxoides

DONNÉES QUANTITATIVES :

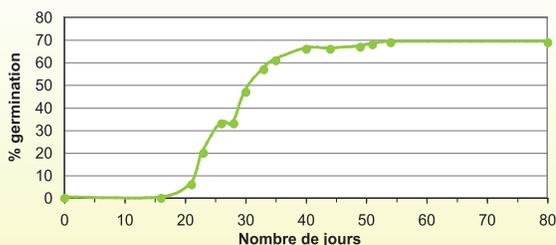
24 à 26 g pour 1 000 graines triées. Nombre de graines par fruit : 3 en moyenne.

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, sachant que la quasi-totalité des graines germent sur une période d'environ 35 jours.



Graines de *L. buxoides*.



Courbe de germination de *Longetia buxoides*. Culture : sans traitement, en salle (arrosage régulier, température extérieure, démarrage en avril).

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, aucun traitement nécessaire (cf. courbe). Développements fongiques fréquents sur les graines en cours de germination (en boîtes de Petri en enceinte de culture). Température optimale de germination entre 25 et 30 °C.

STOCKAGE :

Graines probablement intermédiaires : après séchage à l'air (teneur en eau des graines : 10,4 %) et conservation en boîtes hermétiques à 3 °C, le taux de germination ne varie pas après 12 mois de stockage, puis il a tendance à diminuer à partir de 18 mois de stockage (-50 %).

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquer de préférence au stade 2 feuilles cotylédonaire. Croissance assez lente, durée de culture : environ 12 à 14 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés. Peut se multiplier par bouturage.



Plants de *L. buxoides* en pépinière.



Jeune plant de *L. buxoides* sur le terrain (issu de germination naturelle).

En Nouvelle-Calédonie, **la famille des Proteaceae** rassemble 43 espèces, toutes endémiques, réparties sur 9 genres dont 6 endémiques. Elle comprend des arbres et des arbustes et a un nombre sensiblement égal d'espèces en maquis et en forêt. Plus de 80 % d'entre elles se rencontrent sur terrains miniers et 41 % ne s'en écartent pas.

Parmi les genres les plus fréquents du maquis, *Grevillea* (trois espèces) et les genres endémiques monospécifiques *Garnieria* et *Beaupreopsis* se trouvent essentiellement sur roches ultramafiques.

Le genre endémique *Beauprea* a 11 de ses 12 espèces sur roches ultramafiques : 7 espèces sont représentées dans le maquis, mais seulement 2 ne se retrouvent pas aussi en forêt.

Les 12 espèces du genre *Stenocarpus* se rencontrent sur terrains miniers et 8 ne s'en écartent pas ; 11 espèces se développent dans le maquis, dont 2 également en forêt.

Le genre *Eucarpha* (ex-*Knightia*) possède une espèce exclusive des maquis miniers et une espèce forestière sur roches acides.

Les genres endémiques essentiellement forestiers : *Sleumerodendron* (une espèce ubiquiste), *Kermadecia* et *Viotia*, avec respectivement trois espèces sur quatre et le même nombre d'espèces sur roches acides et sur roches ultramafiques, sont moins liés aux terrains miniers que les Proteaceae des maquis.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres ou arbustes, généralement à feuilles alternes, pouvant être composées pennées ou pennatiséquées (cas de plusieurs espèces du genre *Beauprea*).

Inflorescences en grappes, en épis, quelquefois en ombelles (*Stenocarpus* sp.).

Fleurs généralement hermaphrodites. Pas de corolle, 4 étamines, opposées aux lobes du calice. Anthères généralement sessiles. Ovaire supère, sessile ou stipulé, à un locule. Glandes hypogynes souvent présentes. Un ovule par fleur, style simple, souvent rigide et persistant, stigmate généralement proéminent, quelquefois oblique. Chaque fleur (monochlamidée) sans corolle possède un calice pétaloïde à 4 segments, aux pièces le plus souvent récurvées ou enroulées.

Fruit généralement déhiscent et folliculaire (*Stenocarpus*, *Eucarpha* (ex-*Knightia*), *Grevillea*), ou drupacé indéhiscent (*Beauprea*, *Beaupreopsis*, *Garnieria*, *Kermadecia*...).

Graines aplaties ou plus ou moins charnues, peu nombreuses, souvent partiellement ailées.



Grevillea exul ssp. *exul* (Canala).



Grevillea exul ssp. *rubiginosa*.

STATUT DES ESPÈCES : Endémiques.

DESCRIPTION :

Espèces arbustives. Rameaux couverts d'un tomentum rubigineux à gris sur les formes juvéniles, glabres ensuite. Bourgeons revêtus d'une pubescence argentée à rubiginieuse. Feuilles alternes, simples, entières, coriaces et pétiolées. Forme du limbe très polymorphe : de lancéolé, oblong spatulé à linéaire spatulé. Inflorescences en grappes, terminales ou parfois axillaires. Fleurs hermaphrodites, apétales. Style nettement plus long que les tépales et demeurant coudé jusqu'à l'ouverture complète de la fleur. Étamines courtes, fixées à la base des tépales. Fruits en follicules déhiscents suivant une fente longitudinale, de couleur verte à brune selon la maturation, se maintenant longtemps sur l'arbre (jusqu'à 1 ou 2 ans). Une ou deux graines par fruit, arrondies ou ovales, plates, légèrement ailées.

Distinction des trois espèces :

Caractère discriminant	<i>G. exul</i>	<i>G. gillivrayi</i>	<i>G. meisneri</i>
Taille maximale	10 m (5 m en général)	10 m (moyenne 2-5 m)	7 m
Longueur du pétiole	5-15 mm	3-20 mm	5-20 mm
Dimensions du limbe	45-120 x 1,5-50 mm (limbe étroit : ssp. <i>exul</i>)	35-150 x 3-70 mm (variations fortes)	35-140 x 6-70 mm
Revers de la feuille	vert (ssp. <i>exul</i>) ou roux (ssp. <i>rubiginosa</i>)	vert	argenté
Forme des inflorescences	unilatérales (« brosses »), jamais pendantes	cylindriques ou coniques, non pendantes	courtement cylindriques, grappes pendantes
Couleur des fleurs	blanche à blanc jaunâtre, parfois blanc rosé	rouge à rose	rouge
Stigmate	terminal	terminal	latéral
Dimensions et forme du fruit	12-20 x 9-15 mm très bombé	20 x 8-10 mm aplati	15 x 8 mm assez aplati
Répartition géographique	Grande Terre (ssp. <i>exul</i>), Sud (ssp. <i>rubiginosa</i>)	sud du territoire	Nord-Ouest

Grevillea exul réunit deux sous-espèces :

- *G. exul* ssp. *exul* : axe de l'inflorescence soit revêtu d'une pubescence blanche à gris argenté, soit en partie glabre. Feuilles étroites. Large répartition.
- *G. exul* ssp. *rubiginosa* : axe de l'inflorescence toujours revêtu d'une pubescence brun-rouge. Feuilles larges, rousses en dessous. Répartition uniquement dans le Grand Sud.



Inflorescences et feuilles de *G. exul* ssp. *rubiginosa*.

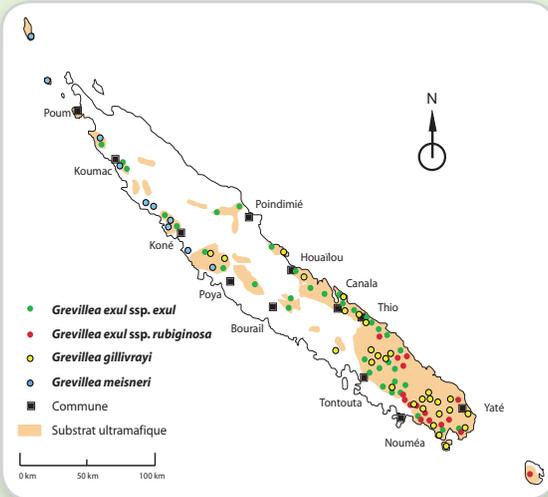
HABITAT :

- *G. exul* ssp. *exul* se rencontre fréquemment à travers le grand ensemble péridotitique du Sud. Peut se retrouver dans les massifs ultramafiques du Nord-Ouest. Cette espèce se développe aussi bien sur les sols bruns hypermagnésiens, de pH neutres ou basiques, que sur les sols latéritiques. Elle est répartie du niveau de la mer jusqu'à 1 000 m d'altitude.
- *G. exul* ssp. *rubiginosa* se développe dans le massif péridotitique du Sud jusqu'à Thio, en milieu ouvert et ensoleillé en maquis, principalement sur des sols ferrallitiques. Cette espèce est distribuée du niveau de la mer jusqu'à 1 400 m d'altitude (au mont Humboldt). *G. exul* possède un réseau racinaire important et résiste bien à l'aridité.
- *G. gillivrayi* se développe dans le grand massif péridotitique du Sud et son prolongement le long de la côte est jusqu'à Houailou. Peut se retrouver dans des massifs ultramafiques de la côte ouest jusqu'à Poya (Kopéto-Boulinda). Présent jusqu'à 1 000 m d'altitude, sur sols ferrallitiques gravillonnaires ou cuirassés ainsi que sur sols bruns hypermagnésiens.
- *G. meisneri* se trouve sur les massifs péridotitiques de la côte ouest du nord de la Grande Terre (au nord de Poya), ainsi qu'aux îles Art, Tanlé et Yandé, préférentiellement sur sols bruns hypermagnésiens. Cette espèce n'a pas été signalée au-dessus de 650 m d'altitude.

PHÉNOLOGIE :

La floraison est étalée toute l'année, principalement entre octobre et juin. La maturation des fruits s'effectue entre décembre et mai, collecte principale entre janvier et mars.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE : D'après *La Flore de la Nouvelle-Calédonie* (MNHN).



Inflorescence et feuilles de *G. meisneri*.



Inflorescence et feuilles de *G. exul* ssp. *exul*.
Noter les feuilles plus étroites que celles de la ssp. *rubiginosa*.



Inflorescence et feuilles de *G. gillivrayi*.

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Collecte des infrutescences quand les fruits sont marron et à peine ouverts ; ou alors encore fermés, verts virant au brun (pourront s'ouvrir en salle). Ils ne doivent pas être percés (graines souvent attaquées par des insectes). Les fruits bien ouverts peuvent être tapotés pour vérifier s'ils contiennent encore leurs graines. Forte variabilité entre peuplements, comme au sein d'une même population, d'où la nécessité d'un minutieux suivi de terrain.

N. B. : Les fruits noirs correspondent la plupart du temps à des fruits vides issus de la fructification précédente.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les infrutescences sont séchées sur un tamis, dans un endroit sec et aéré. À la déhiscence, les capsules sont tapotées sur un tamis (n° 4), sous lequel sont récupérées les graines. Un passage au « vacuum cleaner » permet d'éliminer les fines matières inertes.



Infrutescence de *G. exul* ssp. *exul*, portant des fruits mûrs et des fruits presque mûrs.



Fruits collectés de *G. exul* ssp. *rubiginosa*, la plupart au bon stade (bruns, encore fermés ou à peine ouverts).



Graines de *G. exul* ssp. *rubiginosa*.

DONNÉES QUANTITATIVES :

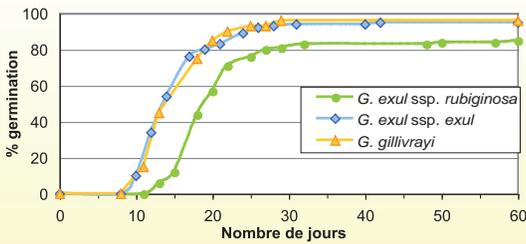
De 10 à 17 g pour 1 000 graines.

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, la majorité des graines viables germent entre 25 et 30 jours (à 25-30 °C). Toutefois, le test à la coupe permet d'évaluer assez précisément et rapidement la viabilité d'un lot (présence d'un embryon entier, bien formé et blanchâtre), ainsi que le test au tétrazolium (lecture après 48 h).



Graines de *G. gillivrayi*.



Germination de *Grevillea exul* ssp. *rubiginosa*, de *G. exul* ssp. *exul* et de *G. gillivrayi*. Culture : sans traitement, en salle (arrosage régulier, température extérieure, démarrage en février pour *G. exul*, en avril pour *G. gillivrayi*).

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, germination rapide sans aucun traitement (cf. courbes).

Température optimale : environ 25-35 °C. Germination ralentie à 15-20 °C : 60 à 90 jours sont nécessaires pour obtenir toutes les germinations, sans toutefois changer le taux final.

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : à conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Avec cette méthode, le taux de germination ne varie pas après 4 ans de stockage (avec une humidité des graines de 9 à 9,7 %, après séchage en salle).

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquage au stade « allumette », ou à 2 feuilles cotylédonaires. Croissance assez rapide, durée de culture : environ 10 à 12 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Parfois attaques modérées de chenilles au stade jeune plantule. Feuilles et jeunes pousses de *G. exul* ssp. *exul* parfois brunes, dû à une attaque fongique en cas d'arrosage excessif.

Ces espèces peuvent se multiplier par bouturage.



Jeune plant de *G. exul* ssp. *rubiginosa* (à 12 mois).

COMPOSITION MINÉRALE FOLIARE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>G. exul</i> ssp. <i>rubiginosa</i> ou ssp. <i>exul</i> (n = 39)	0,86	0,03	0,50	0,62	0,21	0,10	2 833	130	0,08
<i>G. meisneri</i> (n = 13)	0,75	0,04	0,29	0,42	0,33	0,18	2 590	19	0,21

La composition foliaire de ces espèces est caractérisée par des teneurs basses pour la plupart des éléments et par des teneurs élevées en manganèse (plus de 1 000 ppm) (Jaffré 1979).

REMARQUE :

En fonction de la pubescence extérieure des fleurs et de la forme des feuilles, *La Flore de la Nouvelle-Calédonie* distingue plusieurs variétés et formes au sein de ces espèces, qui se répartissent différemment selon le milieu et le sol. Il est ainsi recommandé de n'utiliser que les espèces de *Grevillea* naturellement présentes sur le secteur à revégétaliser.

Les plantes de la famille des Proteaceae sont caractérisées par la présence de racines protéoïdes spécialisées, qui seraient à l'origine de l'absence ou de la faible symbiose avec des mycorhizes à arbuscules. Elles sont adaptées aux sols pauvres en phosphore : les apports en P doivent être faibles, car des effets toxiques ont été souvent rapportés.

Stenocarpus milnei, *Stenocarpus umbelliferus*



Stenocarpus umbelliferus.

STATUT DES ESPÈCES : Endémiques.

DESCRIPTION :

Caractères communs aux deux espèces : Arbustes ou arbres. Feuilles alternes, pétiolées, entièrement glabres en dessous à l'état adulte. Inflorescences terminales (exceptionnellement axillaires) en ombelles. Fleurs hermaphrodites, de couleur blanchâtre, jaunâtre ou jaune verdâtre, parfois rougeâtre. Fruits en follicules, allongés en forme de gousse, glabres, brunâtres et s'ouvrant par une seule fente longitudinale à maturité. Graines aplaties, ailées, jaune-brun, de 0,7-1 cm de long pour 0,3-0,4 cm de large.

Distinction des deux espèces :

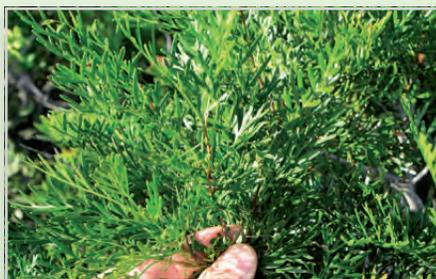
Caractère discriminant	<i>S. milnei</i>	<i>S. umbelliferus</i>
Taille maximale	10 m	5 m
Rameaux jeunes	tomentum rubigineux	pruine bleuâtre
Bourgeons	tomentum rubigineux	glabres ou légèrement velus
Feuilles	en général découpées étroitement, parfois simples, entières et fines (en coexistence sur le même individu)	simples, entières, assez épaisses, pruine bleuâtre sur les jeunes
Dimensions du limbe	feuilles divisées : 25-170 x 15-180 mm feuilles entières : 25-120 x 2-6 mm	15-110 x 2-40 mm
Taille du pétiole	5-50 mm sur les feuilles divisées, 5-10 mm sur les feuilles entières	3-12 mm
Longueur du pédoncule	8-60 mm	10-90 mm
Nombre de fleurs par ombelle	2-10	3-8
Dimensions du fruit	25-120 x 2-5 mm	25-80 x 3-5 mm

HABITAT :

- *S. milnei* : Cette espèce est relativement commune au sein des massifs péridotitiques, sur sols bruns hypermagnésiens ou ferrallitiques. Elle a tendance à se développer dans les maquis et les forêts claires, montrant toutefois une prédilection pour les franges arbustives bordant les rivières et les ruisseaux. Elle est plus fréquente à basses altitudes, mais se rencontre aussi, souvent avec un feuillage plus dense, entre 600 et 1 000 m.
- *S. umbelliferus* : Cette espèce est dotée d'une forte amplitude écologique. Commune sur substrat ultramafique, sur sols bruns hypermagnésiens ou ferrallitiques, notamment à l'intérieur du grand massif péridotitique méridional, elle se rencontre aussi sur des substrats métamorphiques. Bien qu'elle ait une préférence pour les basses altitudes, il est possible de la trouver jusqu'à 1 300 m d'altitude.



Détail des feuilles de *S. umbelliferus*.

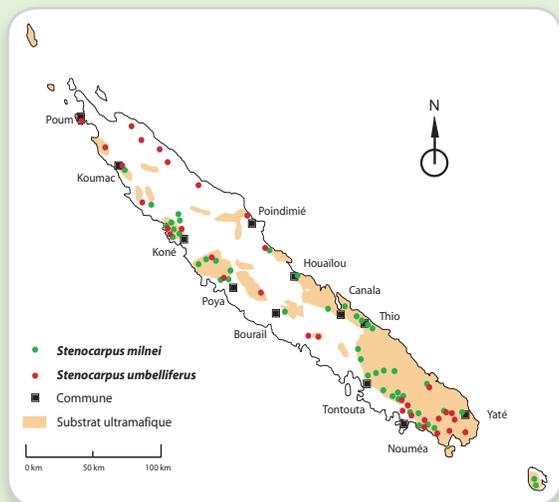


Détail des feuilles de *S. milnei*.

PHÉNOLOGIE :

- *S. milnei* : Floraison étalée entre janvier et septembre. Maturation des fruits entre juin et février (principalement octobre-novembre).
- *S. umbelliferus* : Floraison étalée, principalement entre septembre et avril. Maturation des fruits entre janvier et septembre (surtout février-mars).

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE : D'après *La Flore de la Nouvelle-Calédonie* (MNHN).



Inflorescence en ombelle de *S. umbelliferus* (fréquente présence d'abeilles).



Fruits (follicules) mûrs de *S. umbelliferus*.

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

La récolte s'effectue manuellement, de préférence lorsque les fruits ont une couleur marron, qu'ils soient fermés ou ouverts. Il est possible de les collecter quand ils sont encore verts, mais bien formés. Des fruits verts, des fruits mûrs et des fruits passés peuvent être présents sur le même pied en même temps.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Un séchage dans un endroit sec et aéré permet la déhiscence complète des fruits. Les graines peuvent se détacher manuellement. Un passage au « vacuum cleaner » permet d'éliminer les matières inertes.

Stenocarpus milnei, *Stenocarpus umbelliferus*

DONNÉES QUANTITATIVES :

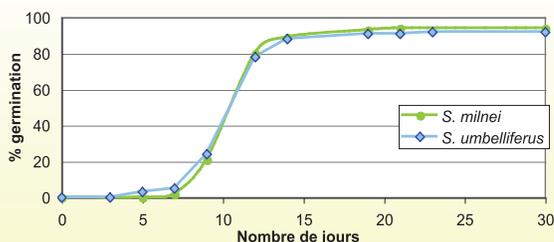
Poids pour 1 000 graines : *S. milnei* : 10 g ; *S. umbelliferus* : 12 g.
5 à 10 graines par fruit en moyenne.

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, sachant que toutes les graines viables germent en moins de 20 jours (à 25-35 °C). Toutefois, le test à la coupe permet d'évaluer très rapidement et assez précisément la viabilité d'un lot (présence d'un embryon entier, bien formé et blanchâtre), ainsi que le test au tétrazolium.



Graines de *S. umbelliferus*.



Courbes de germination de *Stenocarpus milnei* et de *S. umbelliferus*. Culture : sans traitement, en salle (arrosage, température extérieure, démarrage en avril).

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Pas de dormance, germination rapide sans traitement (cf. courbes). Peu de différences de réponse entre les températures estivales et hivernales en salle (entre 20 et 30 °C environ).

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : à conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Avec cette méthode, le taux de germination ne varie pas après 3,5 ans de stockage (avec une humidité des graines de 9,6 à 10,9 %, après séchage en salle).

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquage au stade 2 feuilles cotylédonaire. Croissance moyenne, durée de culture : environ 12 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.

Remarque : Au stade jeune plant, les feuilles ont des formes très variables et les deux espèces peuvent être confondues.



Jeune plant de *S. milnei*.



Jeune plant de *S. umbelliferus*.

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE : (n = nb d'analyses) (Source : T. Jaffré, IRD)

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	SiO ₂ (%)
<i>S. milnei</i> (n = 16)	0,80	0,03	0,52	0,32	0,16	0,09	1 489	19	0,87

La composition foliaire est caractérisée par des teneurs assez basses pour la plupart des éléments sauf pour le manganèse (plus de 1 000 ppm).

La famille des Rhamnaceae rassemble en Nouvelle-Calédonie 10 espèces dont 7 endémiques ; 7 espèces croissent sur roches ultramafiques. Elles sont réparties en six genres dont trois se trouvent sur terrains miniers.

Le genre *Alphitonia* possède trois espèces dont deux strictement liées aux terrains miniers (*A. erubescens* en maquis et *A. xerocarpa* en forêt et parfois en maquis) et une espèce ubiquiste édaphique, en maquis et en forêt (*A. neocaledonica*). Cette dernière est une espèce arbustive dans le maquis et arborescente en forêt. Elle est ubiquiste, mais moins commune sur roches acides que sur roches ultramafiques où elle est fréquente sur différentes catégories de sols, depuis des sols basiques hypermagnésiens à des sols acides ferrallitiques gravillonnaires ou cuirassés. Elle se comporte en espèce pionnière (ex. : sur l'ancienne mine de fer de Prony, sur les anciennes pistes de prospection d'Inco dans le massif du Sud en association avec *Gymnostoma deplancheanum*, sur d'anciens chemins de tirage du bois en forêt...).

Le genre *Ventilago* possède trois espèces lianescentes sur roches ultramafiques, dont deux dans le maquis, et le genre *Gouania* comporte une espèce, également lianescente, dans le maquis minier ainsi que dans des formations secondarisées sur substrats divers.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres ou arbustes souvent grimpants.

Feuilles alternes, stipulées.

Fleurs hermaphrodites, calice à 4-5 lobes, 4-5 pétales, souvent en capuchon, 5 étamines, opposées aux pétales, anthères à 2 loges s'ouvrant par des fentes longitudinales.

Fruit en capsule, s'ouvrant en deux valves, en samare ou en drupe.



Alphitonia neocaledonica (Dumbéa).

Alphitonia neocaledonica



STATUT DE L'ESPÈCE : Endémique.

DESCRIPTION :

Arbre ou arbuste à écorce blanche marbrée. Rameaux veloutés gris, pousses de jeunesse fauves. Feuilles simples entières alternes, pétiole de 1-3 cm ; limbe ovale 3 x 8 cm environ, pubescent, fauve puis blanc en dessous ; nervures canaliculées en dessus, pennées et saillantes en dessous. Fleurs en petites panicules veloutées fauves, insérées à l'aisselle des feuilles terminales, 4 mm de diamètre ; 5 sépales en étoile charnus, triangulaires, veloutés à l'extérieur, lisses, blanc verdâtre à l'intérieur ; 5 étamines. Infrutescences composées de nombreux fruits (drupes), ronds (1-1,5 cm de diamètre), verts puis noirs à maturité, contenant 2 graines noires, lisses, de 5 x 3 mm.

Critères de reconnaissance :

Écorce à odeur camphrée. Revers des feuilles roussâtre ou blanc. Fruits noirs à maturité, avec un mésocarpe orangé farineux, contenant deux graines hémisphériques.

HABITAT :

Le plus fréquemment en maquis sur sols ferrallitiques, se rencontre aussi sur sols bruns hypermagnésiens dans l'ensemble des massifs miniers, et plus rarement sur schistes ou terrains volcano-sédimentaires, entre 0 et 1 000 m d'altitude. Peut se retrouver dans la strate arborée en forêt dense humide.

PHÉNOLOGIE :

Floraison étalée de décembre à mai. Maturation des fruits entre septembre et mars, et collecte principale entre décembre et février. Fructifications souvent abondantes.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

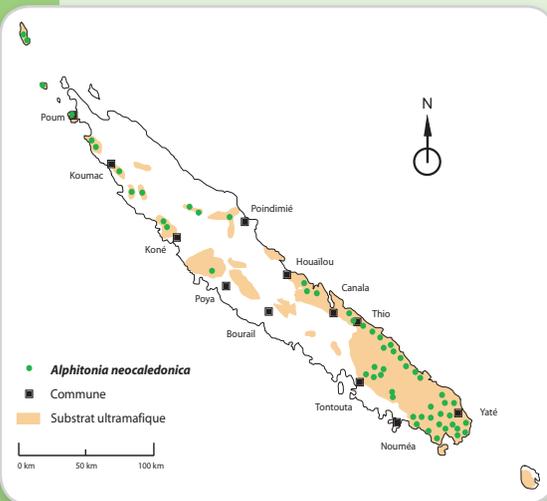
D'après l'herbier du centre IRD (NOU).



Détail d'un rameau et du feuillage d'*A. neocaledonica*.



Inflorescence d'*A. neocaledonica*.



Fruits mûrs d'*A. neocaledonica*.Détail de fruits mûrs, du mésocarpe et des noyaux d'*A. neocaledonica*.

STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Les fruits se récoltent lorsqu'ils sont devenus noirs et que la pulpe est devenue sèche, par grappes, au sécateur ou à la main. Les fruits peuvent rester longtemps attachés à l'arbre.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les fruits sont dépulpés manuellement ou mécaniquement (à l'aide d'un dépulpeur) jusqu'à l'apparition des noyaux durs (2 noyaux par fruit, contenant chacun une graine). L'extraction est ensuite assez difficile : il convient de leur faire subir une alternance de phases d'humidification (avec un pulvérisateur par exemple) et de séchage au soleil, pour qu'ils s'ouvrent et afin d'en extraire les graines entourées d'un arille rouge. Il est possible de retirer cet arille (en frottant les graines sur un tamis fin) avant la mise en germination ou la conservation.

DONNÉES QUANTITATIVES :

22 à 23 g pour 1 000 graines triées. Un individu porte souvent de nombreux fruits.



Test de viabilité par coupe de graine.

Graines d'*A. neocaledonica*.

TEST DE VIABILITÉ :

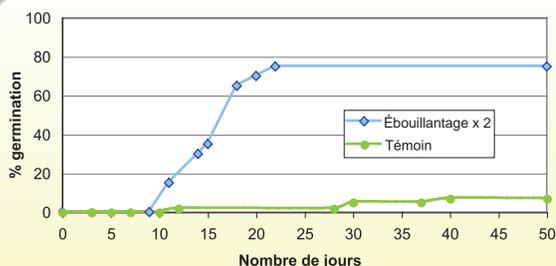
Le test de germination est le plus fiable. Toutes les graines viables germent en moins de 15 à 20 jours. Il est toutefois nécessaire de traiter les graines pour arriver à ce résultat, par une scarification ou un ébouillantage (cf. point suivant). La viabilité peut aussi être évaluée rapidement, avec une précision moyenne, par un test à la coupe (présence d'un embryon entier, bien formé et blanchâtre ; cf. photo), ou par un test au tétrazolium (avec trempage préalable $H_2O/24$ h).

Alphitonia neocaledonica

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Ces graines présentent une forte dormance physique. Il faut scarifier les graines à l'aide d'un scarificateur mécanique ou manuellement entre deux feuilles de papier de verre, jusqu'à ce que des tissus plus clairs commencent à apparaître. Un double ébouillantage permet également de lever cette dormance assez bien (verser de l'eau bouillante sur les graines dans un récipient, laisser 5 min et recommencer l'opération).

La germination est possible entre 10 et 40 °C, et optimale entre 25 et 35 °C. Les graines scarifiées germent en une 10-15 jours entre 20 et 40 °C, en 1 ou 2 mois entre 10 et 20 °C.



Courbe de germination d'*Alphitonia neocaledonica*. Culture : enceinte (29 °C + éclairage 12 h / 22 °C sans éclairage 12 h). Traitements : voir légende.

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : à conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Avec cette méthode, le taux de germination ne varie pas après 4 ans de stockage (avec une humidité des graines de 8 %, après séchage en salle).

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquage au stade 2 feuilles cotylédonaire. Croissance moyenne, durée de culture : environ 12 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.

REMARQUE :

Cette espèce est souvent observée en tant que pionnière abondante, associée à *Gymnostoma deplancheanum*, comme sur les sols décapés de l'ancienne mine de fer de Prony et sur d'anciens chantiers miniers dans le massif du Sud.

Bien que la famille des Rhamnaceae soit une des 8 familles possédant des plantes actinorhiziennes, il n'a pas été observé de nodules actinorhiziens fixateurs d'azote sur les racines d'*Alphitonia neocaledonica*. Il a été cependant constaté une prolifération importante de *Frankia* dans sa rhizosphère (Gauthier *et al.* 2000). Cette espèce pourrait ainsi constituer un réservoir à *Frankia* et faciliter l'installation ultérieure d'espèces de *Gymnostoma*.



Jeune plant d'*A. neocaledonica* (à 11 mois).



Plants d'*A. neocaledonica* sur un essai à Tontouta (2,5 ans après plantation, sur top-soil fertilisé).

La famille des Sapindaceae rassemble sur le territoire 66 espèces, dont 61 endémiques, réparties sur 13 genres dont 4 endémiques (*Gongrodiscus*, *Loxodiscus*, *Podonephelium* et *Storthocalyx*). Parmi ces espèces, 47 sont représentées sur substrat ultramafique, mais seulement 17 y sont strictement cantonnées.

Les genres *Cupaniopsis* (28 espèces) et *Guioa* (9 espèces) sont représentés respectivement par 20 et 9 espèces sur substrat ultramafique. Toutefois, seulement sept espèces du genre *Cupaniopsis* et une espèce du genre *Guioa* leur sont strictement liées. Dix espèces du genre *Cupaniopsis* et six espèces du genre *Guioa* se rencontrent dans le maquis minier.

Les quatre espèces forestières du genre *Storthocalyx* se trouvent sur roches ultramafiques, de même que les trois espèces du genre *Gongrodiscus* et deux espèces, sur un total de trois, du genre *Elattostachys*.

Les genres *Dodonea*, *Cossinia* et *Loxodiscus*, représentés par une seule espèce chacun, se rencontrent dans le maquis minier.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

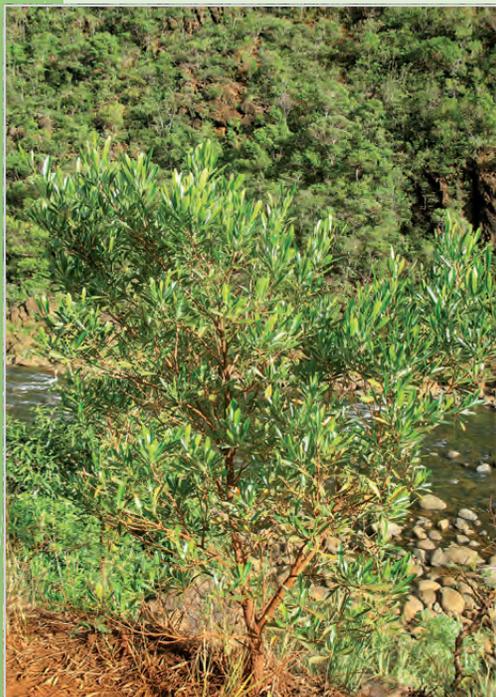
Arbustes ou arbres.

Feuilles alternes souvent composées pennées (simples chez *Dodonea*), sans stipules. Fleurs généralement dioïques, 4-5 sépales et 4-5 (ou 0) pétales. Disque complet ou unilatéral, étamines 8-10, insérées à l'intérieur du disque, ovaire libre à 2-3 loges avec 1-2 ovules par loge.

Fruit en capsule s'ouvrant par des valves, en samare ou drupacé. Graine souvent pourvue d'un arille.



Dodonea viscosa, pied femelle (Tontouta).



STATUT DE L'ESPÈCE : Indigène.

DESCRIPTION :

Arbuste ou petit arbre pouvant atteindre 5 m de hauteur. Feuilles simples, alternes, entières, oblongues à lancéolées, de 2 cm x 10-15 cm, à court pétiole. La nervation très dense est pennée. Espèce généralement dioïque, parfois monoïque. Inflorescences en panicules, le plus souvent terminales. Fleurs petites, apétales, de couleur blanc crème à jaune-orange. Fruits en capsules à 3 ailes (parfois 2 ou 4), verts puis changeant de teinte (jaune, rose, pourpre, rouge-brun), marron à maturité, contenant en général 3 graines. Graines dures, noires et luisantes, mesurant environ 3 mm de diamètre.

Critères de reconnaissance : Les feuilles rougissent en conditions sèches. Grappe de fruits souvent rose pâle à rose soutenu, puis marron, généralement en bout de rameau. Au toucher, les fruits secs ont un aspect de papier. L'écorce grise se détache en lambeaux.

HABITAT :

Cette plante à caractère pionnier est largement répandue sur l'ensemble du territoire. Elle se développe sur sols bruns hypermagnésiens, sur latérites ou sur terrains volcanosédimentaires, surtout en basse altitude (à moins de 500 m, parfois jusqu'à 800 m).

PHÉNOLOGIE :

Floraison de mai à septembre. Fructification de juin à décembre, collecte entre août et novembre, selon les sites et les années.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE :

Cette espèce est distribuée sur l'ensemble du territoire, sur tous les types de sols.



Feuilles de *Dodonaea viscosa*.



Écorce de *D. viscosa*.

Fleurs mâles de *D. viscosa*.Fruits immatures de *D. viscosa*.

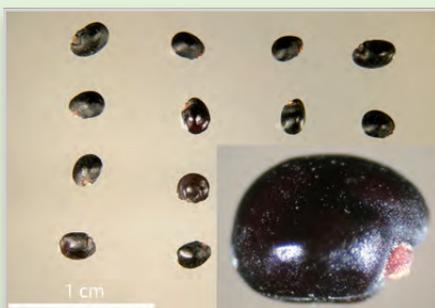
STADE ET TECHNIQUE DE COLLECTE :

Collecte des fruits à maturité, quand ils se dessèchent et présentent une coloration brune. Les fruits peuvent être récoltés avant la dessiccation complète de la capsule. Évaluation de la maturité par observation des graines : elles doivent être bien formées, noires, brillantes, dures et sans défaut (pas d'attaques d'insectes...). Les fruits sont assez souvent parasités.

Fruits mûrs de *D. viscosa*.

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES GRAINES :

Les capsules sont d'abord séchées sur tamis (jusqu'à coloration marron à marron clair), puis frottées entre les mains ou sur une grille de tamis (maille 5 mm) laissant passer les petits éléments tels que les semences et quelques matières inertes. Un passage au « vacuum cleaner » permet d'éliminer les matières inertes.

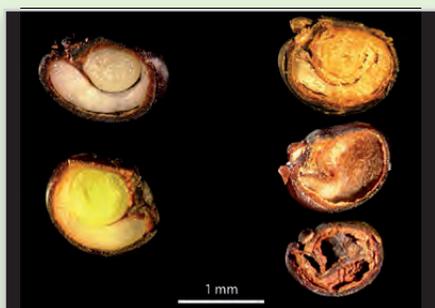
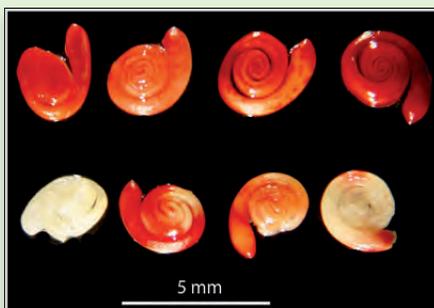
Graines de *D. viscosa*.

DONNÉES QUANTITATIVES :

4 à 7 g pour 1 000 graines. Fructification souvent abondante sur un individu.

TEST DE VIABILITÉ :

Le test de germination est le plus fiable, la majorité des graines viables germent en moins de 30 jours dans la plupart des cas. Il est toutefois nécessaire de traiter les graines (par ébouillantage) pour arriver à ce résultat (cf. point suivant).

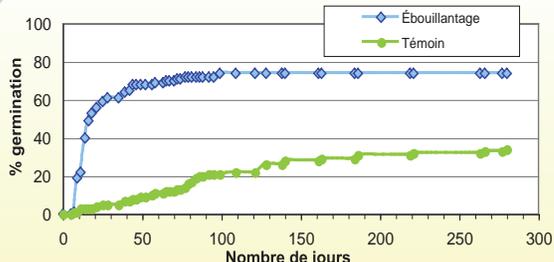
Test de viabilité : coupe de graines de *D. viscosa* (graines viables à gauche).Test de viabilité par coloration au tétrazolium de graines de *D. viscosa* (graines viables en haut).

GERMINATION / PRÉTRAITEMENT :

Ces graines présentent une forte dormance physique : pour une germination rapide, il faut les ébouillanter un court instant (entre 1 et 60 s) ou les scarifier. Un apport de GA₃ semble accélérer légèrement la germination, mais n'est pas indispensable.

Cette levée de dormance par ébouillantage a été également mise en évidence sur des graines de *Dodonaea viscosa* d'Hawaii (Baskin *et al.* 2004). La dormance peut être absente ou plus faible sur des graines fraîches immatures.

La germination est un peu plus lente en saison hivernale en salle (environ 15-22 °C), par rapport à l'été (environ 25-33 °C).



Courbe de germination de *Dodonaea viscosa*. Conditions de culture : arrosage, enceinte (29 °C + éclairage 12 h / 22 °C sans éclairage 12 h).

STOCKAGE :

Graines probablement orthodoxes : à conserver après séchage en boîtes hermétiques à 3 °C. Avec cette méthode, le taux de germination ne varie pas après 2,5 ans de stockage (avec une humidité des graines de 10,6 %, après séchage en salle).

CULTURE EN PÉPINIÈRE :

Facile à cultiver à partir de graines. Repiquage au stade 2 feuilles cotylédonaires, ou « allumette ». Croissance rapide, durée de culture : environ 7 à 9 mois (selon la température et le substrat), en alvéoles de 250 ml. Pas de maladies ni de ravageurs constatés.



Jeune plante de *D. viscosa* en pépinière (à 3 mois).



Les plants de *D. viscosa* plantés sont assez souvent parasités par de nombreuses cochenilles *in situ*.

COMPOSITION MINÉRALE FOLIAIRE MOYENNE :

Dodonaea viscosa a des teneurs élevées en azote dans ses tissus foliaires, elle est donc, à ce titre, une espèce améliorante (cf. tableau 3.3, chapitre 3).

REMARQUE :

Il semble que des plants de *D. viscosa* puissent porter à la fois des fleurs femelles et des fleurs mâles, dans ce cas un plant seul pourra produire des fruits. La plupart des autres plants porteront soit des fleurs femelles, soit des fleurs mâles, dans ce cas au moins un plant mâle sera nécessaire pour que les plants femelles puissent produire des fruits.

3. QUELQUES AUTRES FAMILLES, GENRES ET ESPÈCES POTENTIELLEMENT UTILES POUR LA REVÉGÉTALISATION

Certaines familles ne figurent pas dans les fiches techniques, bien qu'elles soient représentées dans la flore des maquis. Cela étant dû au manque de connaissances sur la multiplication et la culture de leurs espèces. Ces familles sont néanmoins brièvement présentées ci-dessous, afin que la flore des maquis miniers de Nouvelle-Calédonie puisse être appréhendée de manière plus complète. Les études actuellement poursuivies dans le but d'élargir le choix des espèces à proposer pour la restauration des habitats remarquables des terrains miniers aboutiront probablement à l'utilisation de plusieurs espèces de ces familles.

Apocynaceae

Il s'agit ici de la famille des Apocynaceae *sensu stricto*. Cette famille *sensu lato* inclut aussi désormais la famille des Asclepiadaceae. Elle compte en Nouvelle-Calédonie 102 espèces, réparties en 13 genres présentant un endémisme de plus de 90 %. Les espèces les plus communes dans le maquis appartiennent aux genres *Alstonia* (14 espèces dont 7 dans le maquis), *Alyxia* (21 espèces dont 15 dans le maquis), *Melodinus* (6 espèces dont 3 dans le maquis), *Parsonsia* (16 espèces dont 8 dans le maquis) et *Rauvolfia* (4 espèces dont 2 dans le maquis). *Neisosperma* compte 5 espèces forestières, dont une très rare, *N. sevenetii*, qui se développe aussi en milieu ouvert.

Les espèces du genre *Alyxia*, qui se développent dans des conditions de milieux très variées, aussi bien du point de vue édaphique que climatique, mériteraient d'être largement testées. La multiplication d'espèces rares, réalisée avec succès (*Rauvolfia sevenetii* par Vale Inco (McCoy, com. pers.) et *Neisosperma sevenetii* par la Siras Pacifique pour le compte de la SLN sur Tiébaghi), permet de penser que d'autres espèces de ces genres, et tout particulièrement *Rauvolfia semperflorens*, espèce commune très fructifère qui se développe sur des sols variés, devraient être étudiées en priorité. Les espèces du genre *Alstonia*, plutôt représentées dans des groupements arbustifs, possèdent des graines qui se récoltent et qui germent facilement. Elles n'ont pas encore fait l'objet d'essais en revégétalisation, mais elles mériteraient que l'on s'attarde sur leurs aptitudes. *Cerberiopsis candelabra*, espèce pionnière arborescente à croissance rapide et à longue durée de vie (Read *et al.* 2008), pourrait être utilisée, une fois le sol reconstitué et enrichi en azote et en éléments minéraux, pour accélérer le retour vers des groupements forestiers. Toutefois, cette espèce présente l'inconvénient d'être monocarpique (l'arbre ne fleurit qu'une seule fois puis meurt).



Alyxia leucogyne.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres et arbustes, parfois grimpants, latex blanc toujours présent. Feuilles simples, entières, opposées ou verticillées, rarement alternes, sans ou avec stipules fréquemment intra-pétiolaires, libres ou soudées à la face interne du pétiole. Inflorescences généralement en cymes. Fleurs régulières actinomorphes, hermaphrodites ; calice à préfloraison quinconciale, à segments soudés à la base sur une hauteur variable ; 5 lobes, corolle à 5 lobes, tordue, 5 étamines, insérées sur le tube de la corolle, anthères à 2 loges s'ouvrant par deux fentes longitudinales ; ovaire à 2 loges, 1 style, parfois fendu en deux à la base, ovules 2-∞ par loge. Fruits en follicules plus ou moins allongés ou en baies, charnus et indéhiscents, généralement doubles.

Araliaceae

La famille des Araliaceae, amputée des genres *Apiopetalum* (2 espèces), *Apium* et *Centella* (1 espèce chacun), inclus désormais dans la famille des Apiaceae, et des genres *Myodocarpus* (10 espèces) et *Delarbrea* (6 espèces), formant la famille des Myodocarpaceae, rassemble en Nouvelle-Calédonie environ 70 espèces, toutes endémiques, réparties sur 4 genres. Elle comprend une majorité de grands arbres de forêt (« les ralias ») et une vingtaine d'arbustes et petits arbres qui peuvent se développer dans le maquis et en lisière de forêt où ils se comportent en espèces pionnières cicatricielles. Le genre *Polyscias* (ex-*Tieghemopanax*) rassemble 23 espèces dont 12 sur roches ultramafiques et 8 exclusivement dans le maquis. Les genres *Schefflera* (*sensu lato*), devant être scindés entre les genres *Schefflera* et *Plerandra* (Pete Lowry, com. pers.), *Meryta* et *Arthrophyllum* (totalisant une quarantaine d'espèces) sont prédominants sur roches ultramafiques mais essentiellement en forêt ou en lisière de forêt.

Les espèces du genre *Polyscias*, abondantes dans différents maquis, et dont les fruits sont prisés des oiseaux, devraient pouvoir être utilisées en revégétalisation. Toutefois, des dormances endogènes de type physiologique de leurs graines semblent constituer pour l'instant une difficulté à surmonter.



Polyscias pancheri. L'étude de la germination des graines de cette espèce est en cours (IAC).

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres ou arbustes. Feuilles alternes, stipules formant une aile à la base du pétiole ou soudées en lame intra-pétiolaire. Inflorescences en ombelles ou en capitules. Fleurs hermaphrodites, calice à lobes peu ou pas distincts, généralement 5 pétales alternant avec les sépales, 5 étamines, parfois plus. Fruits en drupes charnues, parfois soudés en fruits composés.

Ericaceae

Cette famille est représentée sur le territoire par 23 espèces dont 22 sont endémiques. Parmi elles, 20 se rencontrent sur terrains miniers et 18 ne s'en écartent pas. Seules les deux espèces du genre *Paphia* et une espèce du genre *Dracophyllum* se trouvent uniquement sur roches acides. Une seule espèce des terrains miniers (*Styphelia balansae*) ne se rencontre pas dans le maquis. Les trois espèces du genre endémique *Cyathopsis* sont cantonnées aux maquis. C'est aussi le cas de six espèces sur neuf du genre *Dracophyllum* et de quatre espèces sur neuf du genre *Styphelia*.

Les espèces du genre *Cyathopsis* (tout particulièrement *Cyathopsis albicans* et *C. floribunda*) seraient sans doute les plus intéressantes pour la revégétalisation. Elles sont en effet très fructifères, fixent bien le sol en profondeur, comme le font généralement les espèces arbustives, et ont, de plus, un port en boule à même le sol, permettant de freiner l'écoulement des eaux de pluie et ainsi de réduire l'érosion superficielle. Les fruits de ces espèces peuvent être disséminés par des animaux, ce qui permet de réenclencher des interactions faune-flore, assurant ainsi un meilleur brassage génétique des populations d'espèces déjà présentes sur le site. Toutefois, les graines des Ericaceae sont dotées de fortes dormances, qu'il conviendrait de pouvoir lever au moment voulu pour qu'elles soient vraiment utilisables en revégétalisation.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbustes. Feuilles alternes, spiralées, soit plus ou moins éparées, imbriquées le long des rameaux, soit fortement condensées à l'extrémité des tiges, quelquefois rapprochées en faux verticilles séparés par des entre-nœuds plus ou moins longs, pétiolées, sessiles ou engainantes à la base, raides, coriaces, de structure xéromorphe, pas de stipules. Feuilles à nervures parallèles, sauf chez *Paphia* sp. Inflorescences terminales ou axillaires en épis, en grappes simples ou composées (parfois fleurs solitaires). Fleurs hermaphrodites, régulières, calice à 4-5(-6) sépales libres, imbriqués et persistants. Corolle gamopétale, régulière (actinomorphe). Étamines en nombre égal à celui des lobes de la corolle et alternes avec ceux-ci. Fruits en drupes à mésocarpe charnu ou en capsules déhiscentes.



Cyathopsis albicans. Des germinations sont obtenues entre 1,5 mois et 8 mois (20 % après traitement par GA₃) (IAC, com. pers.).

© IRD / T. Jaffré



Styphelia pancheri. Des germinations nombreuses de *Styphelia cymbulae* peuvent être obtenues entre 3 et 8 mois (IAC, com. pers.).

Lamiaceae

La famille des Lamiaceae compte 31 espèces arbustives ou lianescentes, dont 25 endémiques. Parmi elles, 21 se rencontrent sur terrains miniers. Elles appartiennent aux genres *Gmelina* (3 espèces sur un total de 5), *Oxera* (16 espèces sur un total de 19), *Premna* et *Vitex* (1 espèce pour chaque genre). Au total, 15 espèces (10 *Oxera*, 3 *Gmelina*, 1 *Vitex* et l'unique espèce du genre *Premna*) se rencontrent dans le maquis.

Oxera neriifolia, espèce lianescente commune, testée dans les essais réalisés par l'Orstom (IRD) sur saprolites sur le mont Dore, a donné de bons résultats. De plus, les travaux de G. Gateblé (2009^a, 2009^b) ont montré que les espèces du genre *Oxera* se multipliaient assez facilement. Plusieurs espèces de ce genre devraient donc pouvoir être utilisées à l'avenir.



Oxera neriifolia. Les graines ne présentent pas de dormance et germent rapidement. Le bouturage de cette espèce est également aisé.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres, arbustes, arbrisseaux, lianes et herbes. Feuilles sans stipule, opposées-décussées, verticillées ou alternes, composées ou simples, souvent aromatiques. Fleurs bisexuées ou fonctionnellement unisexuées, généralement bractéolées et en inflorescences terminales ou axillaires, parfois en fleurs solitaires. Calice généralement persistant, parfois accrescent et charnu, à (4)5(-9) dents ou lobes, ou bilabié. Corolle à (4)5(-16) lobes, (1)2-labiée ou parfois 4-lobée. Étamines 4 ou 2 avec 2 staminodes, ou toutes staminodales, insérées sur le tube de la corolle, anthères à déhiscence longitudinale, insérée sur le tube de la corolle. Fruits en drupes ou fruits secs, agrégats de méricarpes, capsules, 1-4 graines, à péricarpe dur.

Rubiaceae

La famille des Rubiaceae serait, avec environ 230 espèces et une vingtaine de genres, après les Myrtaceae, la famille la plus riche en espèces de la flore de la Nouvelle-Calédonie. Elle comprend des arbustes, des arbrisseaux et des lianes. Comme elle est en cours de révision, les données concernant la distribution des espèces demeurent très imprécises. Environ 125 espèces (60 % du total) se rencontrent sur roches ultramafiques, mais moins de 100 espèces (40 %) y seraient cantonnées.

La distribution des espèces des genres *Psychotria* (85 espèces dont 26 dans le maquis), *Cyclophyllum* (16 espèces dont 6 dans le maquis) et *Randia* (9 espèces dont 2 dans le maquis) est relativement équilibrée entre les substrats sur roches ultramafiques et les autres substrats. Ces trois genres demeurent toutefois prédominants en milieu forestier.

Les genres *Guettarda* (une dizaine d'espèces dont la moitié se trouvent dans le maquis), *Morinda* (14 espèces dont 9 dans le maquis), *Tarenna* (8 espèces dont 6 dans le maquis) et *Coelospermum* (3 espèces dont 2 dans le maquis) sont davantage liés aux roches ultramafiques. À l'opposé, les espèces des genres *Atractocarpus* (12 espèces dont 3 dans le maquis), *Ixora* (16 espèces dont 4 dans le maquis) et *Gardenia* (10 espèces dont 2 dans le maquis) se développent majoritairement en forêt et le plus souvent sur roches volcanosédimentaires. Les genres endémiques *Morierina* (2 espèces forestières), *Bikkia* (12 espèces, 11 dans le maquis) et *Normandia* (1 espèce du maquis) sont principalement associés aux roches ultramafiques.

Les espèces les plus prometteuses pour la revégétalisation comprennent *Normandia neocaledonica* et certaines espèces du genre *Psychotria*. *Normandia neocaledonica* affectionne les sols érodés et les talus escarpés, et tolère des teneurs élevées en nickel et en magnésium. Il se reproduit très facilement par bouturage et par graines, et a montré, dans un essai Orstom (IRD)-IAC à Thio, qu'il réagissait très bien aux apports d'engrais, étant capable de doubler facilement de taille et de vitesse de croissance. Il produit des graines qui germent rapidement, mais qui sont difficiles à collecter en raison de leur petite taille. Le genre *Psychotria* est très diversifié et les espèces du maquis se rencontrent sur toutes les catégories de sols. Une assez bonne germination des graines de l'espèce forestière accumulatrice de nickel *Psychotria douarei* (Jaffré, com. pers.) laisse penser que plusieurs espèces de ce genre pourraient être utilisées pour la revégétalisation.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Presque toujours arbres ou arbustes parfois grimpants. Feuilles simples, entières, opposées, stipulées, stipules souvent inter-pétiolaires. Fleurs hermaphrodites ou unisexuées, calice à 4-6 lobes, corolle en tube en 3-6 lobes, 3-6 étamines, insérées sur le tube de la corolle, anthères à 2 loges s'ouvrant par des fentes longitudinales, ovaire infère, à 1-10 loges, 1 style. Fruits en baies libres, ou soudées en fruits composés (*Morinda* sp.), en drupes ou en capsules s'ouvrant par des valves.



Normandia neocaledonica. Les graines germent rapidement (pas de dormance) (IAC, com. pers.).

Rutaceae

La famille des Rutaceae compte dans la flore de la Nouvelle-Calédonie 94 espèces, dont plus de 90 % sont endémiques, réparties sur 21 genres. Les espèces les plus communes dans le maquis appartiennent aux genres *Boronella* (4 espèces, toutes dans le maquis), *Comptonella* (8 espèces sur 10 dans le maquis) et *Myrtopsis* (8 espèces, essentiellement dans le maquis).

Comptonella drupacea, espèce arbustive buissonnante, produisant beaucoup de fruits, pourrait être utilisée en revégétalisation. Toutefois, la germination de ses graines nécessite une longue période d'attente, en raison d'une dormance physiologique, qui existe chez de nombreuses Rutaceae.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres ou arbustes à poches sécrétrices pellucides dans l'écorce, les feuilles, les fleurs et les fruits. Feuilles généralement opposées, pas de stipules. Fleurs hermaphrodites ou plus ou moins unisexuées, 4-5 sépales, 4-5 pétales, parfois 0, étamines 4-5-∞, libres ou soudées en faisceaux, carpelles 4-5, libres ou soudés en ovaire à 4-5-∞ loges, styles 4-5, soudés par le stigmate, ou 1. Fruits en capsules s'ouvrant par des fentes longitudinales, en drupes ou en baies.



Comptonella drupacea.



Jeune plant de *Comptonella drupacea*.
La germination est très étalée (entre un mois et deux ans ; étude en cours par l'IAC).

Sapotaceae

Cette famille est en cours de révision. En l'état actuel des connaissances, elle est divisée en deux groupes selon que les espèces possèdent ou non des staminodes (J. Munzinger, com. pers.). Les genres avec staminodes sont : *Planchonella* (36 espèces dont 24 sur substrats ultramafiques), *Beccariella* (environ 14 espèces dont 9 sur roches ultramafiques), *Pichonia* (7 espèces dont 4 sur substrats ultramafiques). Les genres sans staminodes sont : *Leptostylis* (10 espèces dont 8 sur terrains miniers), *Pycnandra* (une vingtaine d'espèces, principalement forestières, dont plus du tiers sur roches ultramafiques), *Trouettia* (2 espèces, uniquement sur substrats ultramafiques), *Ochrothallus* (9 espèces dont 7 sur terrains miniers), *Corbassona* (3 espèces, uniquement sur substrats ultramafiques), *Sebertia* (2 espèces, uniquement sur substrats ultramafiques) et *Niemeyera* (1 espèce ubiquiste). Tous ces genres seront prochainement regroupés sous le genre *Pycnandra*.

Les espèces à caractère préforestier, au sein de différents genres (*Leptostylis*, *Ochrothallus*, *Planchonella*...), dont les graines sont souvent transportées par les oiseaux, pourraient être implantées – tout comme les espèces des genres *Myodocarpus* et *Delarbreia* (Myodocarpaceae), *Geissois* et *Codia* (Cunoniaceae), *Garcinia* (Cluseaceae)... – après la phase pionnière de la succession végétale, pour accélérer le retour vers des stades plus forestiers.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres ou arbustes. Présence de latex blanc, parfois bleu-vert (*Pycnandra acuminata*), exsudation plus ou moins importante, exceptionnellement très peu apparent chez quelques espèces (*Leptostylis* sp.) ainsi que pour les espèces de forêt sèche. Feuilles alternes, entières, parfois opposées, ou sub-opposées chez *Leptostylis* et *Pichonia*. Feuilles souvent groupées en touffes terminales et dressées parfois au sommet des rameaux, présentant souvent un tomentum ferrugineux ou grisâtre à l'état juvénile, qui persiste plus ou moins longtemps en dessous du limbe. Pas de stipules. Fleurs généralement hermaphrodites, solitaires ou fasciculées à l'aisselle des feuilles terminales, ou à l'aisselle des cicatrices sur les rameaux âgés défeuillés, ou parfois même sur le vieux bois. Corolle gamopétale, à plusieurs lobes et à tube plus ou moins long. Étamines insérées au bord ou à l'intérieur du tube. Fruits charnus contenant des graines à tégument épais, brillants, lisses, de couleur marron, grise ou noire, avec une cicatrice (hile) latérale mate et rugueuse.



Beccariella sebertii.

Simaroubaceae

Cette famille comprend en Nouvelle-Calédonie 11 espèces endémiques appartenant au genre *Soulamea*. Elles se développent toutes sur roches ultramafiques, une seule espèce se développe également sur roches sédimentaires, deux espèces sont essentiellement forestières et quatre strictement inféodées aux maquis miniers.

Soulamea pancheri, l'espèce la plus commune, produit des graines qui germent assez facilement, et devrait faire l'objet d'essais de multiplication et d'implantation sur sites.



Soulamea pancheri.

DESCRIPTION BOTANIQUE DE LA FAMILLE :

Arbres ou arbustes. Feuilles alternes, généralement composées-pennées, pas de stipules. Fleurs unisexuées ou hermaphrodites, calice à 3-5 lobes, 3-5 pétales, 6-10 étamines, anthères à 2 loges s'ouvrant par des fentes longitudinales, 5 carpelles, libres ou soudés en ovaire à 2 loges, 2 ou 5 styles. Fruits secs, indéhiscents, souvent en samares.



Soulamea pancheri (plantules de 10 mois) : germination sans traitement au bout de 3 à 4 semaines (IAC, com. pers.).

Annexe 1 – RÉGLEMENTATION

Annexe 2 – CHARTE DES BONNES PRATIQUES MINIÈRES

**Annexe 3 – LISTE DES ESSAIS DE REVÉGÉTALISATION
SUR SITES MINIERS (par les organismes de recherche)
(de 1971 à 2010)**

**Annexe 4 – BILAN DES TRAVAUX DE REVÉGÉTALISATION
PAR LES COLLECTIVITÉS ET LES MINEURS**

Annexe 5 – CAHIER DES CHARGES DE PRODUCTION DE PLANTS

**Annexe 6 – CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES
(CCTP)**

Annexe 7 – IMPACTS DU CERF SUR LE MAQUIS

**Annexe 8 – LISTE DES ESPÈCES UTILISABLES
EN REVÉGÉTALISATION DES SITES MINIERS
(NON EXHAUSTIVE) ET DONNÉES SYNTHÉTIQUES**

**Annexe 9 – SCHÉMA RÉCAPITULATIF DES OPÉRATIONS
À ENTREPRENDRE POUR UN LOT DE GRAINES
D'UNE NOUVELLE ESPÈCE**

Annexe 1 – RÉGLEMENTATION

Cette annexe présente les réglementations relatives à la mine et à l'environnement, en vigueur en 2010, prises par la Nouvelle-Calédonie et les provinces Nord et Sud.

Les textes réglementaires sont décrits succinctement, et certains articles parmi les plus importants sont repris *in extenso*. Les textes peuvent être téléchargés sur le site internet www.juridoc.nc.

1. Schéma de mise en valeur des richesses minières, code minier

Textes de référence :

- Délibération n° 466 du 18 mars 2009 arrêtant les dispositions du schéma de mise en valeur des richesses minières.
- Loi du pays n° 2009-6 du 16 avril 2009 relative au code minier de la Nouvelle-Calédonie (partie législative).
- Arrêté n° 2009-2205/GNC du 28 avril 2009 instituant la partie réglementaire du code minier de la Nouvelle-Calédonie.

Les transferts de compétences en matière minière se sont faits progressivement. La loi organique du 19 mars 1999 confie à la Nouvelle-Calédonie la compétence pour la réglementation relative au nickel, au chrome et au cobalt et elle confie aux provinces la compétence pour appliquer cette réglementation. En outre, elle prévoit que la Nouvelle-Calédonie arrête un schéma de mise en valeur des richesses minières, qui comporte notamment : l'inventaire minier, les perspectives de mise en exploitation des gisements, ou encore les principes directeurs en matière de protection de l'environnement pour l'exploitation des gisements.

Après un travail de plusieurs années, le schéma a été adopté le 18 mars 2009 par la Nouvelle-Calédonie, et a permis d'élaborer le code minier. Adopté en avril 2009 sous la forme d'une loi du pays, suivi d'un arrêté du gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, le code minier est la traduction juridique du schéma de mise en valeur des richesses minières.

Le code minier est un document unique regroupant l'ensemble des règles concernant le nickel, le chrome et le cobalt, applicable depuis le 1^{er} mai 2009. Son objectif est de clarifier et de simplifier la réglementation minière applicable à ces minerais, de donner les règles sur lesquelles doivent reposer l'essor et la consolidation du secteur de la mine et de la métallurgie. Il abroge et remplace de nombreuses réglementations précédentes, souvent anciennes (décret n° 54-1110 du 13 novembre 1954...).

Les parties du code minier en rapport avec les questions de préservation de l'environnement et de restauration des sites miniers sont rapportées ci-après, ainsi que les articles les plus importants.

Police des mines

Article Lp. 142-1 (partie législative)

« La police des mines a pour objet de prévenir, de faire cesser ou de faire réparer les dommages ou nuisances imputables aux activités de prospection, de recherches et d'exploitation minières, notamment de faire respecter les contraintes et les obligations énoncées à l'article Lp. 142-5. [...] »

Article Lp. 142-3 (partie législative)

« Le président de l'assemblée de la province compétente exerce la police des mines. »

Autorisations de travaux et déclarations

Article Lp. 142-10 (partie législative)

« L'ouverture de travaux de recherches et d'exploitation est subordonnée à une autorisation du président de l'assemblée de la province compétente fixant les prescriptions destinées à prévenir les dommages ou nuisances que l'activité minière est susceptible de provoquer.

L'autorisation de travaux de recherches est précédée d'une notice d'impact. [...]

L'autorisation de travaux d'exploitation est précédée d'une étude d'impact.

L'autorisation de travaux de recherches est accordée après avis de la commission minière communale.

L'autorisation de travaux d'exploitation est accordée après enquête publique et avis de la commission minière communale. Ces autorisations peuvent être complétées ou modifiées ultérieurement. »

Article R. 142-10-4 (partie réglementaire)

« Outre les éléments mentionnés à l'article R. 142-10-1 (NDLR : demande d'exploitation), la demande initiale prévue au point 1 de ce même article comprend également les documents suivants, exposant le déroulement de l'activité au cours de la période de travaux considérée :

- 1) un rapport sur les ressources et réserves minières du gisement concerné ;
- 2) un document d'orientation générale de l'exploitation minière sur la période considérée ;
- 3) une étude d'impact de l'ensemble du projet de développement minier sur le milieu environnant dont le contenu doit être en relation avec l'importance des travaux et aménagements envisagés ainsi qu'avec leurs incidences prévisibles sur l'environnement ;
- 4) un exposé relatif à la gestion et à la protection des eaux superficielles et souterraines ;
- 5) le schéma de réhabilitation des zones dégradées par l'activité minière du projet, complété par le plan de restauration et de fermeture et les dépenses associées ; [...]

Article R. 142-10-6 (partie réglementaire)

« Le document d'orientation générale prévu au point 2) de l'article R. 142-10-4 [...]. Il précise, par période quinquennale, les objectifs et principes généraux du projet de développement minier, notamment en matière d'exploitation et de valorisation de la ressource minière, de préservation de l'environnement et de conservation de la biodiversité, ainsi que les moyens mobilisés pour y satisfaire. [...] »

Article R. 142-10-7 (partie réglementaire)

« L'étude d'impact prévu au point 3) de l'article R. 142-10-4 décrit l'état initial du site concerné par le projet d'exploitation et présente une évaluation des effets de ce projet sur l'environnement.

L'étude d'impact porte sur l'ensemble des installations et chantiers inclus dans le périmètre de l'emprise de l'exploitation, et sur les zones adjacentes à ce périmètre où l'influence de l'exploitation se fait ressentir.

L'étude d'impact présente successivement :

- a - une analyse de l'état initial du périmètre de l'emprise du projet portant notamment sur la faune, la flore, les eaux de toute nature, [...]. Un reportage photographique par vue aérienne, à l'échelle appropriée, met en évidence les caractéristiques de l'état initial et l'implantation du projet. Un levé topographique du massif, de la crête ou de la vallée concerné par le projet est également fourni sous format numérique ;

- b - une analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents du projet sur l'environnement, et en particulier sur la faune et la flore, les sites et paysages, les eaux de toute nature, l'air, les milieux naturels et les équilibres biologiques, [...] ;
- c - les raisons pour lesquelles le projet présenté a été retenu parmi les solutions alternatives envisagées, notamment du point de vue des préoccupations environnementales ;
- d - les mesures que l'explorateur ou l'exploitant s'engage à mettre en œuvre pour prévenir, supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement, ainsi que, le cas échéant, l'évaluation des dépenses correspondantes. La présence d'espèces endémiques rares ou menacées ou d'écosystèmes protégés fait l'objet d'études particulières et de propositions relatives à leur sauvegarde ;
- e - l'analyse des méthodes utilisées pour suivre et évaluer les effets du projet sur l'environnement, indiquant les difficultés éventuelles de nature technique ou scientifique rencontrées pour établir cette évaluation, ainsi que leur périodicité ;
- f - un résumé d'information simplifié est fourni, facilitant la prise de connaissance des informations contenues dans l'étude par toute personne intéressée par le projet ;
- g - un plan illustrant l'état prévisionnel des lieux à l'issue des travaux d'exploitation pour lesquels l'autorisation est sollicitée et après remise en état des zones exploitées. »

Article R. 142-10-9 (partie réglementaire)

« Le schéma de réhabilitation prévu au point 5) de l'article R. 142-10-4 indique les mesures prévues pour la remise en état et la réhabilitation des espaces affectés par les travaux miniers, au fur et à mesure de l'exploitation et en fin d'exploitation.

La surface visée par ce schéma de réhabilitation comprend :

- les zones d'extraction et de stockage des minerais et stériles ;
- le site de production ; [...].

Ce schéma est complété par un plan de restauration et de fermeture qui décrit les techniques de réaménagement et de revégétalisation retenues notamment en ce qui concerne l'utilisation des terres de découverte. Les éventuelles zones laissées sans couverture végétale à la fin de l'exploitation sont justifiées.

L'évaluation des dépenses relatives aux travaux de remise en état et de réhabilitation des espaces affectés par les travaux miniers est fournie, poste par poste.

[...]

En annexe au schéma de réhabilitation est fourni un document précisant la nature, les délais de constitution et le montant des garanties financières prévues à l'article Lp. 142-24, [...]. »

Article R. 142-10-16 (partie réglementaire)

« L'autorisation de travaux d'exploitation prévue à l'article Lp. 142-10 prescrit les dispositions et obligations que l'exploitant doit respecter au cours de l'exploitation et à la fermeture du site et fixe le montant et les modalités de constitution et de révision des garanties financières prévues à l'article Lp. 142-24.

[...]

Les prescriptions techniques sont complétées, le cas échéant, par les règles de conduite des activités minières en Nouvelle-Calédonie, regroupées dans une charte des bonnes pratiques minières. [...] »

Responsabilité

Article Lp. 142-23 (partie législative)

« L'explorateur ou l'exploitant, ou à défaut le titulaire du titre minier, est responsable des dommages causés par son activité.

Il peut toutefois s'exonérer de sa responsabilité en apportant la preuve d'une cause étrangère.

Cette responsabilité n'est limitée ni au périmètre, ni à la durée de validité du titre minier.

En cas de disparition ou de défaillance du responsable, la province est garante de la réparation des dommages mentionnés au premier alinéa ; elle est subrogée dans les droits de la victime à l'encontre du responsable. »

Garanties financières

Article Lp. 142- 24 (partie législative)

« L'exploitation d'une mine, tant après l'autorisation initiale qu'après une autorisation de changement d'exploitant, est subordonnée à la constitution préalable de garanties financières destinées à assurer, soit par l'exploitant lui-même, soit par la puissance publique en cas de défaillance du premier, la remise en état et la réhabilitation des zones dégradées par l'exploitation. [...] »

Article R. 142-24 (partie réglementaire)

« La délivrance de l'autorisation de travaux d'exploitation prévue à l'article Lp. 142-10 est subordonnée à la validation par le président de l'assemblée de la province compétente du document prévu au dernier alinéa de l'article R. 142-10-9 (NDLR : document sur les garanties financières).

L'autorisation de travaux d'exploitation fixe le montant des garanties financières exigées, les modalités de constitution ainsi que les modalités d'actualisation de ce montant.

[...]

À défaut de justification ou en cas de sous-estimation manifeste du montant des coûts de remise en état et de réhabilitation retenus dans les conditions prévues à l'article R. 142-10-9, un coût forfaitaire de 6 000 000 F CFP par hectare est appliqué. »

Arrêt des travaux

Article R. 143-9 (partie réglementaire)

« L'exploitant dépose [...] un mémoire descriptif des mesures effectivement prises et, s'il y a lieu, de celles prescrites ainsi que les plans de récolement des travaux et une couverture photographique de l'ensemble des travaux arrêtés.

[...]

Le président de l'assemblée de la province compétente donne acte de l'exécution de ces mesures et fixe la fréquence du suivi et le montant des retenues des garanties financières exigées, prévues à l'article Lp. 142-24, jusqu'à la réussite de la revégétalisation. Ces retenues sont déterminées comme suit :

- 20 % de la somme initiale des travaux de revégétalisation jusqu'à l'obtention d'un taux de réussite de 80 % minimal, constaté par le service en charge des mines, douze mois après la réception des travaux ;
- 10 % de la somme initiale des travaux de revégétalisation jusqu'à l'obtention d'un taux de réussite de 100 %, constaté par le service en charge des mines, dans un délai maximal de deux ans. [...] »

Commentaires :

Le code minier rend dorénavant obligatoires la préservation de l'environnement et la réhabilitation des sites dégradés. Dès la genèse du projet, les mineurs devront garantir qu'au cours de l'exploitation d'une concession et à la fermeture des travaux, des programmes de revégétalisation et de gestion des eaux seront mis en place.

Le code minier ne détaille pas au sein du texte les méthodes appropriées qu'il convient de mettre en œuvre en matière de revégétalisation. Les articles R. 142-10-16 et R. 142-10-27 font référence à une charte des bonnes pratiques minières, non encore adoptée à ce jour. La charte prévoit de rassembler toutes les règles de bonne conduite des opérateurs miniers en matière de bonne utilisation des gisements, de protection de l'environnement et de techniques de réhabilitation des sites miniers dégradés. Il est prévu que les éléments de cette charte soient utilisés pour la rédaction des prescriptions des arrêtés d'autorisation qui seront délivrés pour toute ouverture de centre de recherches ou d'exploitation.

Un projet de charte, pour la partie concernant la restauration des sites dégradés, est présenté en annexe 2.

2. Code de l'environnement de la province Nord

Texte de référence : Délibération n° 2008-306/APN du 24 octobre 2008 relative au code de l'environnement de la province Nord.

Ce code rassemble dans un seul texte toutes les dispositions réglementaires relevant de la compétence de la province Nord en matière d'environnement.

Les rubriques du code ainsi que les articles les plus importants ayant une relation avec les questions de préservation et de restauration des sites miniers sont rapportés ci-après.

Protection des espaces : aires protégées

Article 211-2

« Les différentes catégories d'aires naturelles protégées reconnues en province Nord au titre du présent titre sont au nombre de six, en fonction de l'objectif de gestion principal, tel qu'exposé dans les articles suivants :

- Réserves naturelles intégrales, correspondant à la catégorie de gestion Ia de l'Union internationale pour la conservation de la nature ;
- Réserves de nature sauvage, correspondant à la catégorie de gestion Ib de l'Union internationale pour la conservation de la nature ;
- Parcs provinciaux, correspondant à la catégorie de gestion II de l'Union internationale pour la conservation de la nature ;
- Réserves naturelles, correspondant à la catégorie de gestion IV de l'Union internationale pour la conservation de la nature ;
- Aires de protection et de valorisation du patrimoine naturel et culturel, correspondant à la catégorie de gestion V de l'Union internationale pour la conservation de la nature ;
- Aires de gestion durable des ressources, correspondant à la catégorie de gestion VI de l'Union internationale pour la conservation de la nature. [...] »

Protection des espèces

Article 251-1

« Une liste comprenant des espèces indigènes sauvages au sens de l'article 120-1 (NDLR : non domestiquées, ou non cultivées) et des espèces occasionnellement présentes du fait de déplacements naturels (migration ou autre), figurant en annexe du présent article, dite « liste des espèces protégées en province Nord », détermine les espèces protégées au sens du présent code. [...] »

Article 251-2

« Sont interdits pour tout spécimen ou partie de spécimen des espèces inscrites sur la « liste des espèces protégées en province Nord », sur toute l'étendue de la province Nord :

1°) la destruction, la coupe, la mutilation, l'arrachage, la cueillette ou l'enlèvement, le ramassage de leur fructification ou de toute autre forme prise lors du cycle biologique, le prélèvement de cellules ou de matériel génétique, ainsi que le transport, le colportage, l'utilisation, la mise en vente, la vente ou l'achat, la détention de spécimens ou parties de spécimens des espèces végétales ; [...] »

Article 251-3

« Sont interdits sur toute l'étendue de la province Nord la capture ou le prélèvement, à des fins scientifiques ou commerciales (à l'exception des activités de pêche et des activités de chasse au sens du présent code), de tout ou partie d'espèces sauvages. »

Article 251-4

« Il peut être dérogé aux articles 251-2 et 251-3 par autorisation écrite du président de l'assemblée de province Nord [...] »

Espèces envahissantes

Article 261-1

« Une liste, figurant en annexe du présent article, ci-après « liste des espèces envahissantes en province Nord », détermine les espèces animales et végétales considérées comme envahissantes, au sens du présent code. [...] »

Article 261-2

« Sont interdits pour tout spécimen des espèces inscrites sur la « liste des espèces envahissantes en province Nord », y compris toutes les parties, gamètes, graines, œufs ou propagules, qui pourraient survivre et se reproduire :

1°) la culture, l'élevage ou la multiplication par quelque moyen que ce soit, le transport, le colportage, l'utilisation, la mise en vente, la vente ou l'achat ;
2°) l'introduction intentionnelle ou non intentionnelle par négligence ou par imprudence dans le milieu naturel de tout spécimen de l'une des espèces animales ou végétales inscrites sur la liste dite « liste des espèces envahissantes en province Nord ». [...] »

Article 261-4

« Afin de ne porter préjudice ni aux milieux naturels, ni à la faune et à la flore sauvages, est interdite l'introduction intentionnelle ou non intentionnelle par négligence ou par imprudence dans le milieu naturel de tout spécimen d'une espèce non indigène au site d'introduction, et non domestique ou non cultivée. »

Article 261-5

« Il peut être dérogé aux articles 261-2 et 261-4 par arrêté du président de l'assemblée de province Nord à des fins agricoles, piscicoles ou forestières ou pour des motifs d'intérêt général et après évaluation des conséquences de cette introduction. [...]

Il appartient au bénéficiaire de présenter un mémoire circonstancié, exposant notamment : l'évaluation documentée et objective du risque environnemental, le descriptif des modalités d'utilisation de l'espèce, les moyens de contention envisagés et les garanties techniques et financières présentées. [...] »

Commentaires :

Certaines rubriques, comme l'accès à la nature, la protection des écosystèmes, les ressources ligneuses (coupe du bois), ou encore les ressources biologiques, génétiques et biochimiques, n'étaient pas encore renseignées lors de l'adoption du code de l'environnement de la province Nord.

Les principales aires naturelles terrestres protégées comprennent la réserve de nature sauvage du mont Panié et la réserve de nature sauvage du massif de l'Aoupinié. Aucun site sur terrains miniers n'est à ce jour (04/2010) classé en aire protégée en province Nord.

Selon les articles 251-1 à 251-4, la collecte des espèces protégées est interdite, ainsi que la collecte de toutes les espèces sauvages (espèces non cultivées) à des fins commerciales ou scientifiques, sauf en cas d'autorisation préalable. Ainsi, pour toutes les espèces utiles pour la revégétalisation des sites miniers, même les plus communes, les collecteurs doivent d'abord se mettre en règle en demandant à la province Nord une autorisation de collecte.

Bien que la réglementation n'aille pas aussi loin que celle du code de l'environnement de la province Sud dans ce domaine, il est quand même demandé des autorisations pour tout prélèvement. Une nouvelle délibération sur la protection des ressources biologiques et génétiques est actuellement à l'étude.

Par ailleurs, l'utilisation de toute espèce exotique, par exemple pour *hydroseeding*, doit faire l'objet d'une demande préalable avec une évaluation des risques pour l'environnement (articles 261-4 et 261-5).

3. Code de l'environnement de la province Sud

Texte de référence : Délibération n° 25-2009/APS du 20 mars 2009 relative au code de l'environnement de la province Sud.

Ce code rassemble dans un seul texte toutes les dispositions réglementaires en matière d'environnement relevant de la compétence de la province Sud. Il s'agit essentiellement de textes préexistants, y compris les plus récents, qui ont été réorganisés sans en modifier le fond (droit constant).

Les parties du code ayant une relation avec les questions de préservation et de restauration des sites miniers sont rapportées ci-après, ainsi que les articles les plus importants dans ces domaines.

Aires protégées

Article 211-2

« I. - Au sens du présent code, on entend par « aire protégée » une parcelle de terre ou de milieu aquatique, dulçaquicole ou marin intact ou peu modifié, qui fait l'objet d'une protection particulière en vue d'y maintenir la diversité biologique, les processus écologiques, les ressources naturelles et les valeurs culturelles associées.

II. - Les catégories d'aire protégée sont :

- 1° La réserve naturelle intégrale ;
- 2° La réserve naturelle ;
- 3° L'aire de gestion durable des ressources ;
- 4° Le parc provincial, qui peut contenir une ou plusieurs catégories d'aire mentionnées aux 1°, 2° et 3° ci-dessus. »

Protection des écosystèmes d'intérêt patrimonial

Article 231-1

« I. - Le présent titre a pour objet de contribuer à la préservation et à l'amélioration de l'état de conservation de la biodiversité par des mesures visant à assurer le maintien ou la restauration d'écosystèmes qui sont d'intérêt patrimonial, [...].

Dès lors qu'il est susceptible d'avoir un effet significatif sur un écosystème d'intérêt patrimonial, tout programme ou projet de travaux, d'installations, d'ouvrages ou d'aménagements est soumis à autorisation dans les conditions fixées par le présent titre. [...] »

Article 232-1

« Les écosystèmes d'intérêt patrimonial soumis aux dispositions du présent titre sont :

- 1° Les forêts denses humides sempervirentes ;
- 2° Les forêts sclérophylles ou forêts sèches ;
- 3° Les mangroves ;
- 4° Les herbiers dont la surface est supérieure à cent mètres carrés ;
- 5° Les récifs coralliens dont la surface est supérieure à cent mètres carrés.

La liste des écosystèmes d'intérêt patrimonial soumis aux dispositions du présent titre et leur caractérisation peuvent être complétées par délibération du bureau de l'assemblée de province après avis du comité pour la protection de l'environnement et de la commission intérieure en charge de l'environnement.

Les écosystèmes d'intérêt patrimonial soumis aux dispositions du présent titre sont considérés indépendamment de leur situation géographique. [...] »

Protection des espèces endémiques, rares ou menacées

Article 240-1

« Le présent titre a pour objet de préserver la biodiversité néo-calédonienne en déterminant les espèces animales ou végétales endémiques, rares ou menacées qui doivent être protégées et en réglementant les conditions dans lesquelles il peut être dérogé aux interdictions fixées dans le cadre de cette protection.

Les listes des espèces animales et végétales protégées sont indiquées dans les tableaux ci-dessous.

Ces listes peuvent être modifiées par délibération du bureau de l'assemblée de province après avis du comité pour la protection de l'environnement et de la commission intérieure en charge de l'environnement. [...] »

Article 240-2

« Sont interdits :

- 1° La destruction, la coupe, la mutilation, l'arrachage, la cueillette ou l'enlèvement des spécimens des espèces végétales mentionnées à l'article 240-1, de leurs fructifications ou de toute autre forme prise au cours de leur cycle biologique, leur transport, leur colportage, leur utilisation, leur mise en vente, leur vente ou leur achat ;
- 2° Le transport, le colportage, l'utilisation, la mise en vente, la vente ou l'achat de tous produits ou toutes parties issus d'un spécimen de ces espèces ;
- 3° La destruction, l'altération ou la dégradation du milieu particulier à ces espèces végétales. »

Lutte contre les espèces exotiques envahissantes**Article 250-2**

« I. - Afin de ne porter préjudice ni au patrimoine biologique, ni aux milieux naturels, ni aux usages qui leur sont associés, ni à la faune et à la flore sauvages, sont interdits :

- 1° L'introduction dans le milieu naturel, volontaire, par négligence ou par imprudence, la production, la détention, le transport, l'utilisation, la cession à titre gratuit ou onéreux, la mise en vente, la vente ou l'achat de tout ou partie d'un spécimen vivant d'une espèce animale exotique envahissante listée dans le tableau prévu au IV, ainsi que de ses produits ;
- 2° L'introduction dans le milieu naturel, volontaire, par négligence ou par imprudence, la production, le transport, l'utilisation, le colportage, la cession à titre gratuit ou onéreux, la mise en vente, la vente ou l'achat de tout ou partie d'un spécimen vivant d'une espèce végétale exotique envahissante listée dans le tableau prévu au V ainsi que de ses semences.

Ces listes peuvent être modifiées par délibération du bureau de l'assemblée de province après avis du comité pour la protection de l'environnement. [...] »

Récoltes et exploitation des ressources biologiques, génétiques et biochimiques**Article 311-1**

« Le présent titre régit l'accès et l'utilisation des ressources naturelles sauvages, terrestres et marines, situées dans les limites géographiques de la province, ainsi que leurs dérivés, génétiques et biochimiques, sans préjudice des réglementations spécifiques plus contraignantes. [...] »

Article 311-2

« Sont concernées par le présent titre les activités de récolte effectuées par toute personne physique ou morale, de droit privé comme de droit public, à des fins commerciales ou non, industrielles ou non, biotechnologiques, de bioprospection, scientifiques, d'enseignement ou de conservation, ci-après dénommée récolteur. [...] »

Article 311-4

« Le présent titre s'applique aux ressources mentionnées à l'article 311-1, quelle que soit la nature de la propriété sur laquelle elles se trouvent : privée, publique ou coutumière. »

Article 312-1

« Le récolteur doit préalablement à tout prélèvement obtenir une autorisation d'accès à des ressources biologiques auprès du président de l'assemblée de province. »
[...]

Altérations des milieux

Article 431-1

« Pour l'application du présent chapitre, on entend par défrichement :

- 1° Toute opération volontaire ayant pour effet de détruire le couvert végétal naturel d'un terrain ;
- 2° Toute opération volontaire entraînant indirectement et à terme les mêmes conséquences, [...] »

Article 431-2

« I. - Est soumis à autorisation préalable le défrichement des terrains situés :

- 1° Au-dessus de 600 mètres d'altitude ;
- 2° Sur les pentes supérieures ou égales à 30° ;
- 3° Sur les crêtes et les sommets, dans la limite d'une largeur de 50 mètres de chaque côté de la ligne de partage des eaux ;
- 4° Sur une largeur de 10 mètres le long de chaque rive des rivières, des ravins et des ruisseaux.

II. - Est également soumis à autorisation préalable le défrichement ou le programme de défrichement portant sur une surface supérieure ou égale à 30 hectares.

III. - Est soumis à déclaration préalable le défrichement ou le programme de défrichement portant sur une surface supérieure ou égale à 10 hectares. »

Commentaires :

Plusieurs aires protégées font l'objet d'une description détaillée dans le code de l'environnement de la province Sud, et leurs cartes de répartition sont données en annexe. La plupart des aires protégées se trouvent sur terrains miniers (réserve naturelle intégrale de la Montagne des Sources ; réserves naturelles : du cap N'Dua, de la forêt Nord, des chutes de la Madeleine, du barrage de Yaté, du mont Mou, du massif du Kouakoué, du mont Humboldt, du pic Ningua, de la forêt de Saille, du mont Do... ; aire de gestion durable des ressources de Netcha ; parc provincial de la rivière Bleue...).

S'agissant des écosystèmes reconnus d'intérêt patrimonial, il est sans doute regrettable que certains groupements des maquis n'aient pas été pris en compte, notamment les maquis humides et rivulaires du sud de la Grande Terre, certaines catégories de maquis rares ou très originaux, liés à des conditions de milieu particulières, de superficie souvent limitée.

La liste des espèces protégées est appelée à évoluer rapidement en fonction de nouvelles connaissances (inscription de nouvelles espèces, précision des espèces protégées au sein d'un genre actuellement entièrement, et donc trop largement, protégé...), et les interdictions liées à leur protection peuvent également faire l'objet de dérogations dans certains cas (articles 240-5, 240-6).

La récolte des ressources biologiques (plantes, fruits, graines...) fait l'objet d'un texte très complet (articles 311 à 315). Tout collecteur en province Sud est ainsi concerné et doit faire une demande d'autorisation préalable, valable pour une durée maximum d'un an.

Les coupes de bois sont également réglementées (articles 321 à 325).

4. Délibération n° 104

Texte de référence : Délibération n° 104 du 20 avril 1989 portant modification des modalités de versement de l'impôt sur les bénéfices industriels et commerciaux des entreprises assujetties à la fiscalité minière et des entreprises dont les activités relèvent de la métallurgie des minerais.

Dans le cadre de cette délibération n° 104, les entreprises minières soumises à l'impôt sur les bénéfices peuvent se libérer d'une fraction de cet impôt par des versements effectués notamment à des fonds communaux pour l'environnement.

Ces fonds communaux, créés par les communes d'implantation d'un site minier, ont pour objet la réhabilitation d'anciens sites miniers (antérieurs à 1975, la plupart n'étant plus couverts par une concession, mines dites « orphelines »).

Les versements peuvent également être effectués à des sociétés d'économie mixte ayant pour objet la réalisation d'activités économiques sur les communes où sont implantés des sites miniers.

Le montant total des versements d'une année pour une entreprise est limité à 15 % du total de l'impôt liquidé la même année et au maximum à 250 millions de francs CFP. En outre, il est institué une réduction d'impôt égale à 10 % des versements effectués.

Commentaires :

À relativement court terme, il est prévu que cette délibération soit abrogée, pour être remplacée par le Fonds Nickel (voir le point suivant).

Cette mesure incitative a permis d'engager des travaux de réhabilitation d'anciennes mines sur plusieurs communes. Un bilan d'utilisation de ces fonds communaux pour l'environnement est présenté en pages suivantes (annexe 4).

5. Fonds Nickel

Texte de référence : Délibération n° 467 du 18 mars 2009 créant un établissement public administratif dénommé « Fonds Nickel ».

Ce fonds, créé en 2009, est destiné, d'une part, à secourir les entreprises minières en cas de crise, d'autre part, à réhabiliter les zones d'anciens sites miniers. Géré par un établissement public, il est alimenté par un impôt spécifique, dans la limite de 1,5 milliard francs CFP par an.

Ci-après, sont repris quelques-uns des articles fondateurs.

Article 3 : « Dans le cadre de son objet, l'établissement public est chargé des missions suivantes :

- soutenir les communes et les entreprises du secteur minier et métallurgique en favorisant le maintien ou la reconversion des emplois en cas de crise ou lors de la fermeture d'un centre minier ;
- financer des programmes de réhabilitation des zones dégradées par l'activité minière ;
- subventionner les communes pour la réparation de dommages causés par l'ancienne exploitation minière sur leur territoire ;
- subventionner, dans la limite des financements disponibles, les organismes poursuivant un but d'intérêt général et participant au financement d'actions ou de placements constitués au profit des générations futures de la Nouvelle-Calédonie.

Pour l'exercice de ces missions, l'établissement public dispose des recettes prévues à l'article 13. »

Article 13 : « Pour exercer ses missions, l'établissement public dispose notamment des ressources suivantes :

- A - toutes dotations en provenance de la Nouvelle-Calédonie, des provinces, des communes, des sociétés d'économie mixte, de l'État ou de l'Union européenne et de tout autre organisme public ;
- B - les recettes fiscales qui lui sont affectées ;
- C - le produit de la redevance superficielle acquittée par les titulaires de concessions minières conformément aux dispositions du code minier de la Nouvelle-Calédonie ;
- D - toutes subventions, dons et legs ;
- E - les emprunts. »

Commentaires :

Le Fonds Nickel est administré par un conseil d'administration, composé notamment de représentants de la Nouvelle-Calédonie, des provinces, des associations des maires, du Sénat coutumier, des professionnels de l'industrie minière et métallurgique, des associations environnementales.

Les recettes du Fonds Nickel proviennent en grande partie de la redevance superficielle (environ 250 millions de francs CFP par an). À ces recettes, il a été rajouté 1,7 milliard francs CFP en 2009, provenant de l'abrogation du fonds de concours pour le soutien conjoncturel du secteur minier, lequel a été remplacé par le Fonds Nickel.

De même, il était prévu en 2009 que la délibération n° 104 (cf. ci-dessus) soit abrogée à court ou à moyen terme pour être remplacée par ce nouveau fonds, les missions relatives à la réhabilitation des sites miniers étant les mêmes. Les actions en cours, engagées sous délibération n° 104, seront poursuivies jusqu'à la fin des travaux, puis les communes passeront progressivement sous financement du Fonds Nickel.

Annexe 2 – CHARTE DES BONNES PRATIQUES MINIÈRES

Dans le cadre de la préparation du code minier, la Dimenc a sollicité l'IAC en 2005 pour la rédaction d'un projet de charte portant sur la partie relative à la fermeture de chantiers et à la réhabilitation de sites. Le texte global, comprenant toutes les parties, s'intitulait alors « Méthodes d'exploitation et protection environnementale ».

Le texte qui suit, portant sur la partie VI du projet de charte, a fait l'objet d'un travail collectif par des chercheurs et des gestionnaires de l'environnement, réalisé fin 2005.

Ont contribué à la rédaction de cette partie : l'IAC (Laurent L'Huillier, Jacques Tassin, Nicolas Barré, Thierry Mennesson), l'IRD (Tanguy Jaffré), la Direction de l'Environnement de la province Sud (Anne-Claire Goarant, Vincent Mary, Dominique Garnier, Louis-Charles Corfdir, Philippe Bonnefois).

VI – FERMETURE DE CHANTIERS – RÉHABILITATION

Préambule :

La prise en compte de la richesse, de l'originalité et du fort taux d'endémisme de la flore des terrains miniers a entraîné au cours des trente dernières années une évolution des pratiques de réhabilitation des sites miniers dégradés. Celles-ci sont passées d'une simple revégétalisation (« mise en verdure ») à une restauration de groupements végétaux fonctionnels, capables d'évoluer vers des groupements de plus en plus complexes et diversifiés. Les objectifs clairement affichés sont désormais la lutte contre l'érosion des sols, la régulation des débits hydriques et la reconstitution à terme des paysages et de la biodiversité. Aussi les premières opérations qualifiées de « reverdissement » ont-elles fait progressivement place à des opérations visant à la « restauration écologique » des sites dégradés.

Cette partie de la charte est largement inspirée des conclusions du colloque international qui s'est tenu à Nouméa en juillet 2003 (Amir *et al.* 2003) : « Préservation et restauration écologique en milieu minier tropical ».

Article 28 : Réhabilitation du site – Dispositions générales

L'exploitant est tenu de réhabiliter de manière durable le site affecté par son activité, compte tenu des caractéristiques essentielles du milieu environnant. La réhabilitation du site doit être achevée au plus tard à l'échéance de l'autorisation. On entendra par réhabilitation le retour à un écosystème fonctionnel et évolutif, pour le moins proche, dans sa structure, sa composition et ses fonctions, de celui qui a été affecté.

Six mois au moins avant l'arrêt de l'exploitation, l'opérateur minier fera parvenir au service chargé du contrôle des mines, pour agrément par celui-ci, une proposition de réhabilitation du site exploité.

La réhabilitation du site comporte les opérations suivantes :

- la mise en sécurité des fronts de taille ;
- la mise en sécurité, notamment par des merlons ou des rectifications de pente, des points hauts du site d'extraction ;

- le remblayage des décanteurs devenus inutiles et autres dispositifs pouvant présenter un risque de chute et notamment les puits de prospection s'il en subsiste ;
- le remodelage, lorsque cela est possible, du site d'exploitation et des terrains affectés par l'activité ;
- la mise en place d'un dispositif de gestion des eaux, notamment des eaux de ruissellement, garantissant une distribution des débits très proche du schéma originel, voire identique à celui-ci ;
- le nettoyage de l'ensemble des terrains et, d'une manière générale, l'enlèvement de tout déchet ou produit étranger au site naturel si cela n'a pas été fait au fur et à mesure de l'exploitation et la suppression de toutes les structures n'ayant pas d'utilité après la réhabilitation du site ;
- la mise en place, sur l'ensemble des terrains aptes à cette opération, d'une couverture végétale pionnière capable d'enclencher un processus de succession vers des groupements végétaux plus complexes, répondant ainsi aux principes de la restauration écologique. La revégétalisation commencera si possible en cours d'exploitation d'un secteur minier, dès la fin d'un chantier. Au cas où des pentes rocheuses en place ou reconstituées (bords de verses) ne seraient pas aptes à une telle réhabilitation, des rideaux de végétation indigène propre au site seront constitués sur les banquettes intermédiaires du front de taille ou de la verse pour les masquer progressivement ;
- le maintien de zones de végétation naturelle qui serviront de réservoirs de propagules (semences, spores, insectes...), permettant le déroulement de la succession végétale et la diversification biologique des sites restaurés.

L'exploitant est tenu d'apporter une attention toute particulière à l'insertion satisfaisante de l'espace affecté par l'exploitation au sein du paysage, dans ses dimensions esthétiques et fonctionnelles, compte tenu de la vocation du site.

Un suivi ultérieur (monitoring) du site et de la réussite de la réhabilitation sera assuré pendant un minimum de cinq ans (de préférence dix ans) conformément aux dispositions d'application de la caution prévue à l'article 29 de la loi du pays minière, et selon un cahier des charges préalablement défini avant l'ouverture du chantier d'exploitation.

Article 29 : Accès au site

Pour les besoins de la surveillance du site en cours de réhabilitation, la route d'accès principale sera conservée en état, notamment sur le plan de la gestion des eaux.

Le merlon, côté ravin, sera revégétalisé, si cela n'a pas été fait en cours d'exploitation.

À la fin de la période de surveillance de remise en état du site, la route d'accès principale fera l'objet d'une réhabilitation qui s'inspirera aussi des principes de la restauration écologique, notamment dans le choix des espèces et en respectant le système d'écoulement des eaux réalisé précédemment, sous réserve de demandes éventuelles de collectivités intéressées par ces accès ou du propriétaire foncier.

Article 30 : Point de chargement – Bord de mer

Le minerai ou les produits miniers qui subsisteraient sur les plateformes de stockage du bord de mer seront enlevés et le terrain sera revégétalisé. Il peut s'agir d'un simple engazonnement ou bien de plantation d'arbres de bord de mer, en fonction de la végétation qui préexistait.

Sauf plan de reprise d'une exploitation à court terme dûment démontré, le wharf et la digue d'accès seront détruits, sauf demande particulière d'une collectivité. En cas de destruction du wharf, les pieux seront coupés de manière à ne pas constituer un danger pour la navigation côtière ou pour la plaisance. Si nécessaire, un enrochement confortera le talus maritime.

Sauf demande particulière et constatée, d'une collectivité ou du propriétaire du terrain, tous matériels et toutes installations seront enlevés.

Article 31 : Dispositions particulières de revégétalisation

Ces dispositions sont applicables quel que soit l'opérateur chargé de la réhabilitation du site, et quel que soit le moment de l'opération de revégétalisation, que ce soit en cours d'exploitation ou lors de la fermeture du site.

L'utilisation des Cyperaceae pionnières endémiques des terrains miniers sera privilégiée pour assurer la première couverture herbacée. Toutefois, si l'utilisation transitoire de graminées ou de légumineuses herbacées, ne figurant pas dans la flore naturelle des terrains miniers, s'avère nécessaire dans un premier temps pour fournir un environnement favorable à la colonisation ultérieure par des espèces indigènes préservées sur le site, cette couverture de « plantes nourrices » ne devra pas être pérenne, devra être parfaitement contrôlée et ne devra pas comporter d'espèces réputées indésirables ou potentiellement envahissantes. L'éradication de toute espèce qui se révélerait invasive ou à l'origine d'une invasion induite sera à la charge de l'exploitant minier.

Hormis pour cette phase de démarrage, le fonds floristique de réhabilitation devra être constitué d'espèces pionnières et/ou héliophiles des terrains miniers (Cyperaceae, espèces héliophiles arbustives, buissonnantes ou arborescentes), dont la plus grande part possible devra être originaire du massif.

Ces espèces devront être plantées ou semées en mélange.

Il faudra impérativement éviter la saturation de l'espace par des ligneux pionniers grégaires et résistants (ex. : *Casuarina collina*, *Acacia spirorbis*, *Dodonea viscosa*, *Croton insulare*...).

Sont portés à la connaissance du service de contrôle des mines :

- la liste argumentée des espèces devant être semées et/ou plantées (origine, pureté des semences, répartition géographique et écologique, absence des listes d'espèces invasives, etc.) ;
- les quantités et les périmètres concernés ;
- la préparation des terrains ;
- la densité des plantations ;
- la méthode de mise en terre des plants ;
- les intrants accompagnant la revégétalisation ;
- le plan de suivi des plantations ;
- s'il s'agit de semis hydraulique, la composition du produit projeté (graines, produits d'accompagnement, etc.).

Article 32 : Recommandations complémentaires pour la revégétalisation

Le choix des espèces utilisées pour la réhabilitation écologique prend en compte les connaissances préalables sur :

- l'écosystème initial (type de groupement végétal, sol, faune, flore...) avant sa destruction ;
- les facteurs pédologiques, biologiques et climatiques du biotope dégradé à revégétaliser.

L'exploitant devra conserver dans la mesure du possible des îlots de végétation naturelle permettant la dissémination de semences d'espèces secondaires puis forestières. Les zones faiblement minéralisées devront être épargnées au maximum, et impérativement s'il s'agit de milieux forestiers ou préforestiers.

La destruction de tels biotopes devra entraîner la mise en place par l'exploitant minier de mesures compensatoires, telles que la multiplication des espèces concernées, ou d'espèces préforestières ou forestières pour une implantation dans des sites appropriés, dans l'objectif d'une meilleure sauvegarde de la diversité biologique du massif minier.

Chaque fois que cela sera possible, le topsoil sera préservé pour être restitué le plus rapidement possible soit sur la zone d'origine, soit sur une autre zone décapée. De même, la végétation qui serait défrichée devra être conservée, de préférence broyée, pour être réutilisée notamment en paillage lors de la revégétalisation.

De même, il est recommandé d'enrichir le sol en matière organique pour favoriser la croissance des plantes. Un paillage, ou mulch, est également utile afin de réduire l'évaporation et l'érosion. Il faudra néanmoins veiller à ce que les apports de matière organique ne s'accompagnent pas d'apports de semences d'espèces indésirables à caractère invasif.

Avant plantation ou semis, le sol devra être décompacté quand c'est possible et sans que cela augmente le risque d'érosion, afin de le rendre meuble et bien aéré.

D'une manière générale, les exploitants miniers s'attacheront à mettre en œuvre les connaissances les plus récentes, éprouvées et adaptées aux conditions locales en matière de réhabilitation.

L'objectif de résultat minimum à atteindre cinq ans après le début des travaux de réhabilitation sera de 50 % de recouvrement (et de 75 % après dix ans) par des espèces des terrains miniers au niveau des surfaces réhabilitées.

Les sociétés minières s'emploieront à participer le plus possible aux travaux de recherche portant sur ces thématiques de la réhabilitation écologique des sites miniers, notamment par l'accueil de chercheurs, et la facilitation technique et financière de ces travaux de recherche.

Annexe 3 – LISTE DES ESSAIS DE REVÉGÉTALISATION SUR SITES MINIERES (par les organismes de recherche) (de 1971 à 2010)

1. Mise en place : 1971. **Lieu :** Plaine des Lacs (près campement INCO). **Opérateur :** CTFT / Amax. **Substrat :** latérite rouge. **Alt. :** 270 m. **Pluvio. :** 2 500 mm/an. **Type d'essai :** fertilisation (témoin/engrais) en champs, plantation de ligneux (une espèce exotique et quatre espèces endémiques). **Surface :** 1 600 m². **Références :** Bavard D. 1987, bilan de dix années de recherches par le CTFT sur les possibilités de revégétalisation des terrains miniers après exploitation en Nouvelle-Calédonie, rapport CTFT, 78 p. / Rapport CTFT 1992 (fiche analytique d'essai n° 60) / Sarrailh 2001.

2. Mise en place : 1973-1974. **Lieu :** Plaine des Lacs (Prony, la Capture). **Opérateur :** CTFT / Amax. **Substrat :** latérite rouge. **Alt. :** 270 m. **Pluvio. :** 2 500 mm/an. **Type d'essai :** suivi de l'érosion, plantation de ligneux (1 espèce exotique, 1 espèce endémique). **Surface :** 500 m². **Références :** Jacques A. 1976. Bilan de 2 années et demie d'observation sur les parcelles d'érosion de Prony, rapport stage CTFT, 37 p. / Bavard D. 1987 / Rapport CTFT 1992 (fiche analytique d'essai n° 85) / Sarrailh 2001.

3. Mise en place : 1973 (mars). **Lieu :** Houailou (décharge de Néaki à Poro). **Opérateur :** Orstom. **Substrat :** latérite rouge et latérite jaune. **Alt. :** 170 m. **Pluvio. :** 1 800 mm/an. **Type d'essai :** plantations, semis et transplantations de jeunes plants prélevés sur le terrain, d'espèces ligneuses (4 espèces exotiques, 20 natives) et d'herbacées (8 espèces exotiques, 4 natives) ; test de fumure et d'arrosage. **Surface :** 800 m². **Références :** Jaffré & Latham 1976.

4. Mise en place : 1975-1977. **Lieu :** Prony (mine Amax). **Opérateur :** CTFT / Amax. **Substrat :** latérite rouge. **Alt. :** 180 m. **Pluvio. :** 2 500 mm/an. **Type d'essai :** ensemencement et plantation de ligneux (9 espèces exotiques, 2 indigènes et 3 endémiques) et d'herbacées (3 espèces exotiques). **Surface :** 3 200 m². **Références :** Bavard D. 1987 / Rapport CTFT 1992 (fiche analytique d'essai n° 127) / Sarrailh 2001.

5. Mise en place : 1975-1984. **Lieu :** Plum (col de Plum). **Opérateur :** CTFT / SLN et ASNNC. **Substrat :** divers. **Type d'essai :** étude comportement, plantations d'espèces diverses. **Références :** Bavard D. 1985. Étude de la revégétalisation des terrains miniers à Plum - Note de synthèse, dossier 169, 10 p. / Bavard 1987.

6. Mise en place : 1978. **Lieu :** Poro (Néaki). **Opérateur :** CTFT / SLN. **Substrat :** latérite jaune. **Alt. :** 180 m. **Pluvio. :** 2 000 mm/an. **Type d'essai :** étude comportement, plantation de ligneux (10 espèces exotiques). **Surface :** 16 000 m². **Références :** Bavard D. 1985. Résultats du premier essai de revégétalisation de terrain minier à Poro, essai 218, rapport CTFT, 48 p. / Bavard D. 1987 / Rapport CTFT 1992 (fiche analytique d'essai n° 218) / Sarrailh 2001.

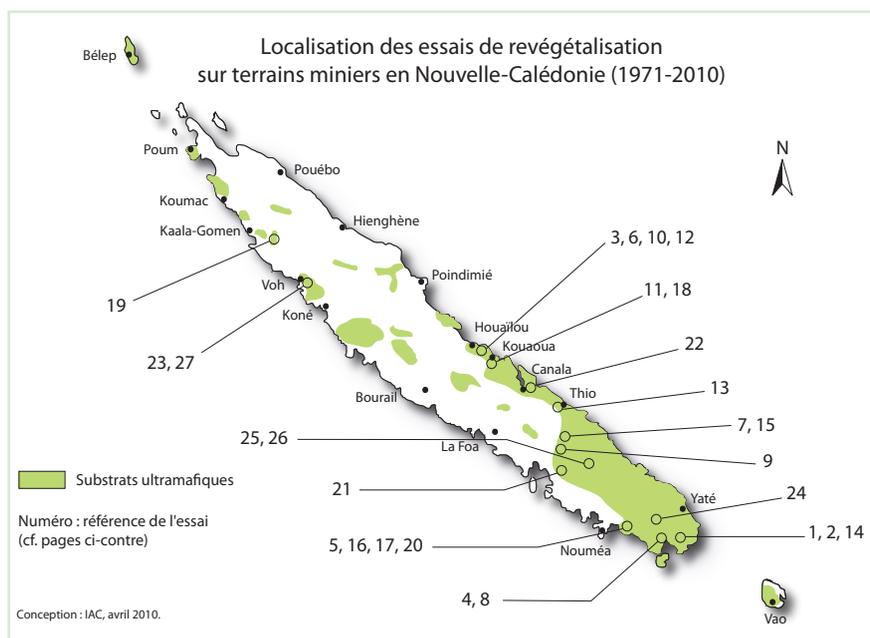
7. Mise en place : 1978. **Lieu :** Thio (Camp des Sapins). **Opérateur :** CTFT / SLN. **Substrat :** décharge stériles divers. **Alt. :** 760 m. **Pluvio. :** 2 500 mm/an. **Type d'essai :** étude comportement, plantation de ligneux (34 espèces exotiques et natives) et d'herbacées (2 espèces exotiques). **Surface :** 8 000 m². **Références :** Lespes P. 1979. Plantation comparatives de diverses espèces sur terrains miniers en altitude (760 m), rapport CTFT, 18 p. / Bavard D. 1987 / Rapport CTFT 1992 (fiche analytique d'essai n° 228) / Sarrailh 2001.

8. Mise en place : 1978. **Lieu :** Prony. **Opérateur :** CTFT / Amax. **Substrat :** latérite rouge. **Alt. :** 180 m. **Pluvio. :** 2 500 mm/an. **Type d'essai :** étude comportement, ensemencement et plantation de ligneux (23 espèces exotiques, 9 natives) et d'herbacées (2 exotiques). **Surface :** 4 530 m². **Références :** Chondroyannis P. 1978. Fixation et reforestation des terrains miniers, essai 235, rapport CTFT, 10 p. / Bavard D. 1987 / Rapport CTFT 1992 (fiche analytique d'essai n° 235) / Sarrailh 2001.

9. Mise en place : 1979. **Lieu :** Thio (Kongouhaou). **Opérateur :** CTFT / SLN. **Substrat :** latérite jaune. **Alt. :** 670 m. **Pluvio. :** 2 500 mm/an. **Type d'essai :** plantation de ligneux (6 espèces exotiques et 2 indigènes) et d'herbacées (2 espèces exotiques). **Surface :** 7 700 m². **Références :** Rapport CTFT. 1986. Réaménagement du milieu naturel après exploitation minière (essai n° 277), 58 p. / Bavard D. 1987 / Rapport CTFT 1992 (fiche analytique d'essai n° 277) / Sarrailh 2001.

10. Mise en place : 1979. **Lieu :** Poro (Néaki-Julia-Pétroglyphes). **Opérateur :** CTFT / SLN. **Substrat :** latérite jaune. **Alt. :** 190 m. **Pluvio. :** 2 000 mm/an. **Type d'essai :** plantation de ligneux (10 espèces exotiques) et d'herbacées (2 espèces exotiques). **Surface :** 14 000 m². **Références :** Bavard D. 1985. Résultats du deuxième essai de revégétalisation de terrain minier à Poro, essai 278, rapport CTFT, 27 p. / Bavard D. 1987 / Rapport CTFT 1992 (fiche analytique d'essai n° 278) / Sarrailh 2001.

11. Mise en place : 1979. **Lieu :** Kouaoua (mines Pentecost). **Opérateur :** CTFT / NMC. **Substrat :** décharge stériles divers. **Alt. :** 200 m. **Pluvio. :** 2 000 mm/an. **Type d'essai :** plantation de ligneux (9 exotiques, 2 indigènes et 1 endémique) et d'herbacées (2 espèces exotiques). **Surface :** 4 000 m². **Références :** Rapport CTFT. 1979. Plantation expérimentale sur décharge minière de Kouaoua, dossier 279, 15 p. / Bavard D. 1987 / Rapport CTFT 1992 (fiche analytique d'essai n° 279) / Sarrailh 2001.



12. Mise en place : 1981. **Lieu :** Poro. **Opérateur :** CTFT / SLN. **Substrat :** -. **Alt. :** 540 m et 350 m. **Pluvio. :** 2 000 mm/an. **Type d'essai :** associations d'espèces diverses exotiques et natives. **Surface :** 3 500 plants. **Références :** Messant, Bavard D. 1981. Plantation expérimentale sur les décharges minières de Borangui et de Mecorouma (Poro), essai 291, compte rendu de mise en place, rapport CTFT, 15 p. / Bavard D. 1987.

13. Mise en place : 1981. **Lieu :** Thio (Plateau, décharges Santa Maria et Debris B). **Opérateur :** CTFT / SLN. **Substrat :** décharge stériles divers. **Alt. :** 590 m et 440 m. **Pluvio. :** 1 500 mm/an. **Type d'essai :** associations d'espèces diverses exotiques et natives (15 espèces ligneuses exotiques et natives). Détruit 88 % en 1981 cyclone Cliff. **Surface :** 5 100 m², 2 000 plants. **Références :** Rapport CTFT. 1986. Réaménagement du milieu naturel après exploitation minière (essai n° 294), 58 p. / Bavard D. 1987 / Rapport CTFT 1992 (fiche analytique d'essai n° 294) / Sarrailh 2001.

14. Mise en place : 1991. **Lieu :** Goro (mine BRGM). **Opérateur :** CTFT. **Substrat :** latérite rouge. **Alt. :** 200 m. **Pluvio. :** 2 750 mm/an. **Type d'essai :** plantation de ligneux (2 espèces indigènes). **Surface :** 7 000 m². **Références :** Rapport CTFT 1993 (fiche analytique d'essai n° 482) / Sarrailh 2001.

15. Mise en place : 1992 (mai-juillet). **Lieu :** Thio (Nigua et Crépuscule). **Opérateur :** Orstom et CTFT. **Substrat :** Saprolytes (Nigua) et mélange de latérites (Crépuscule). **Alt. :** 730 m et 760 m. **Pluvio. :** 2 500 mm/an. **Type d'essai :** plantation et semis de 38 espèces indigènes (ligneux + herbacées), comparaison d'apport de mulch. **Surface :** 750 + 1 000 m². **Références :** Jaffré *et al.* 1993. / Sarrailh 2001 (essai 508).

16. Mise en place : 1993. **Lieu :** Mont-Dore (mine de Rouvray). **Opérateur :** CTFT. **Substrat :** latérite rouge. **Alt. :** 100 m. **Pluvio. :** 1 500 mm/an. **Type d'essai :** plantation de ligneux (2 espèces indigènes). **Surface :** 1 800 m². **Références :** Sarrailh 2001 (essai n° 530).

17. Mise en place : 1993. **Lieu :** Mont-Dore. **Opérateur :** Orstom. **Substrat :** saprolite. **Alt. :** 400 m. **Type d'essai :** étude du comportement de plusieurs espèces ligneuses endémiques, dont *Serianthes calycina*. **Références :** Rigault *et al.* 2003.

18. Mise en place : 1993-1994. **Lieu :** Kouaoua (Méa). **Opérateur :** Orstom. **Substrat :** latérites. **Alt. :** 200 m (Kou 1) et 800 m (Kou 2). **Pluvio. :** 1 300 et 1 900 mm/an. **Type d'essai :** ensemencement de 18 espèces indigènes, répété tous les mois pendant un an. Comparaison de deux apports de paille broyée. **Surface :** 400 m² + 400 m². **Références :** Rigault *et al.* 1996.

19. Mise en place : 1997. **Lieu :** Kaala-Gomen (Ouaco). **Opérateur :** Cirad Forêt / SMSP. **Substrat :** décharge stériles divers. **Alt. :** 780 m. **Pluvio. :** 1 200 mm/an. **Type d'essai :** fertilisation sur décharge, plantation de ligneux (4 espèces natives) et 1 herbacée exotique (vétiver). **Surface :** 2 700 m². **Références :** Cornu A. 1997. Comparaison du comportement d'espèces ligneuses de terrains miniers selon les modalités de plantation. Rapport convention Cirad-SMSP, 17 p. / Sarrailh 2001 (essai n° 542).

20. Mise en place : 1999. **Lieu :** Mont-Dore (mine de Rouvray). **Opérateur :** CTFT. **Substrat :** latérite rouge. **Alt. :** 250-400 m. **Pluvio. :** 1 500 mm/an. **Type d'essai :**

plantation de ligneux (2 espèces indigènes et 4 espèces endémiques). **Surface** : 4 300 m². **Références** : Sarrailh 2001 (essai n° 567).

21. Mise en place : 1999. **Lieu** : Tomo. **Opérateur** : CTFT / SMGM. **Substrat** : latérite rouge. **Alt.** : 600 m. **Pluvio.** : 1 200 mm/an. **Type d'essai** : plantation de ligneux (une espèce indigène et une endémique). **Surface** : 675 m². **Références** : Sarrailh 2001 (essai n° 568).

22. Mise en place : 1999-2000. **Lieu** : Canala (Monastir). **Opérateur** : CTFT / MKM. **Substrat** : décharge sur stériles divers. **Alt.** : 200 m. **Pluvio.** : 1 750 mm/an. **Type d'essai** : plantation de ligneux (2 espèces indigènes et 2 endémiques). **Surface** : 1 800 m². **Références** : Sarrailh 2001 (essai n° 569).

23. Mise en place : 2002-2003. **Lieu** : Koné (Koniambo). **Opérateur** : IAC / Falconbridge. **Substrat** : latérite rouge. **Alt.** : 700-800 m. **Type d'essai** : plantation de ligneux (12 espèces natives), à deux saisons différentes (octobre et juillet). **Surface** : 7 250 plants sur 5 sites. **Références** : Lagrange A. 2004. Projet d'optimisation des coûts pour la réhabilitation minière : synthèse des travaux effectués dans le cadre de l'essai 584, Rapport IAC, 56 p.

24. Mise en place : 2005. **Lieu** : Yaté (Ferme du Sud). **Opérateur** : IAC / UNC, Ferme du Sud, CdE. **Substrat** : sol ferrallitique ferritique. **Alt.** : 30 m. **Type d'essai** : fertilisation de topsoils par boues de STEP, suivi régénération naturelle. **Surface** : 625 m². **Références** : Wadawa Louis. 2006. Étude des effets de boues d'épuration sur un topsoil de terrain minier. Rapport stage, Deust RGEM - UNC, 29 p.

25. Mise en place : 2006. **Lieu** : Tontouta (mine Vulcain). **Opérateur** : IAC / SMGM. **Substrat** : latérite rouge et topsoil. **Alt.** : 638 m. **Pluvio.** : 1 600 mm/an. **Type d'essai** : fertilisation par boues de STEP, comportement topsoil frais, plantation de ligneux (3 espèces endémiques) et d'herbacées (3 espèces endémiques). **Surface** : 1 200 m². **Références** : Tiavouane J. 2007. Évaluation de l'intérêt des boues de station d'épuration en restauration des sites miniers dégradés en Nouvelle-Calédonie. Rapport stage, Licence Pro., Univ. Perpignan, 62 p. / Soucrant O. 2008. Intérêt du topsoil en restauration des sites miniers dégradés en Nouvelle-Calédonie. Résultats sur l'essai de la Tontouta. Rapport stage, Deust RGEM - UNC, 55 p.

26. Mise en place : 2008. **Lieu** : Tontouta (mine Vulcain). **Opérateur** : IAC / SMGM. **Substrat** : latérite rouge, topsoil et saprolite. **Alt.** : 638 m. **Pluvio.** : 1 600 mm/an. **Type d'essai** : *hydroseeding* d'espèces ligneuses (1 espèce indigène et 12 endémiques) et d'herbacées (6 espèces exotiques et 3 endémiques). **Surface** : 200 m². **Références** : Arcas X. 2008. Caractérisation des dynamiques germinatives d'espèces indigènes de maquis miniers de Nouvelle-Calédonie : étude comparative en conditions contrôlées et *in situ* sur différents déblais miniers. Rapport de Master pro, Univ. Toulouse, 71 p.

27. Mise en place : 2010. **Lieu** : Koné (Koniambo, base massif). **Opérateur** : UNC. **Substrat** : topsoil (sur serpentine). **Alt.** : 0-50 m. **Pluvio.** : 1 800 mm/an. **Type d'essai** : *hydroseeding* d'espèces ligneuses (5 espèces endémiques) et herbacées (2 Cyperaceae endémiques). **Surface** : 2 000 m². **Références** : en cours.

Annexe 4 – BILAN DES TRAVAUX DE REVÉGÉTALISATION PAR LES COLLECTIVITÉS ET LES MINEURS

Cette annexe présente le bilan, à fin 2008, des travaux de revégétalisation réalisés par les collectivités (communes et province Sud) et les sociétés minières.

Les données, exprimées en termes de surfaces revégétalisées (par plantation ou par ensemencement) ou en termes de nombre de plants, ont été obtenues auprès de la Dimenc, à partir de déclarations transmises par les sociétés minières et les collectivités.

Bien que les méthodes utilisées soient en progrès constant, comme cela peut être constaté lors de visites sur sites miniers, notamment en ce qui concerne la diversification des espèces natives utilisées, il n'a pas été possible de chiffrer ces évolutions, les données étant trop incomplètes, souvent imprécises et hétérogènes.

Les travaux de revégétalisation portent à la fois sur des sites miniers en activité, ils sont alors réalisés aux frais des sociétés minières, et sur d'anciennes mines (orphelines), qui peuvent être prises en charge par les communes ou une collectivité provinciale. D'autres actions plus ponctuelles ont été également mises en œuvre (via la Nouvelle-Calédonie ou l'Europe).

À l'avenir, la Nouvelle-Calédonie prendra une part croissante dans ces travaux de revégétalisation des anciens sites miniers, à travers le Fonds Nickel (voir l'annexe 1 sur les réglementations).

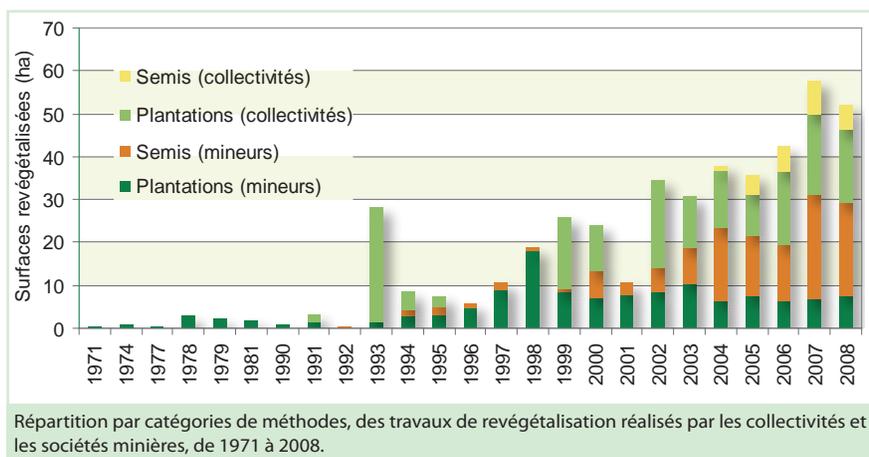
1. Les surfaces revégétalisées

Depuis 1971, date du premier essai connu de revégétalisation sur mine, et jusqu'à 2008, environ 296 ha de terrains miniers ont fait l'objet de travaux de revégétalisation avec la plantation de plus de 1,083 million de plants :

- Les sociétés minières ont financé la plantation de près de 714 000 plants sur une surface estimée à 125 ha. La technique du semis hydraulique a permis de traiter également 120 ha supplémentaires.
- Les collectivités (communes + province Sud) ont financé la plantation de près de 369 000 plants sur une surface de 171 ha. Le semis hydraulique a été pratiqué sur 25 ha additionnels.

Ces chiffres permettent de constater que les sociétés minières procèdent à des plantations de densité bien supérieure à celle des plantations réalisées par les collectivités, la moyenne étant de 5 400 contre 2 000 plants par hectare. Par ailleurs, l'ensemencement hydraulique est utilisé principalement par les sociétés minières.

Avant les années 1990, les surfaces revégétalisées étaient extrêmement réduites (figure ci-après). À partir de cette période, les surfaces faisant l'objet de plantations ont connu une nette progression, la moyenne s'établissant depuis quelques années à environ 20 ha par an (8-10 ha par les sociétés minières, 10-12 ha par les collectivités). L'ensemencement, méthode appliquée à partir de 1994, s'est peu développé jusqu'en 1999. Mais les surfaces traitées sont en très forte augmentation depuis 2000, la moyenne s'établissant actuellement à environ 20 à 30 ha par an, plaçant ainsi l'ensemencement en tête des méthodes en termes de surfaces revégétalisées.



2. Revégétalisation par les sociétés minières

Les sociétés minières financent chaque année des travaux de revégétalisation sur les mines en activité, par plantation ou par ensemencement, ce dernier étant devenu la principale méthode sur de nombreuses mines (notamment de la SLN) (cf. tableau suivant).

Avec les nouveaux projets miniers, les demandes des sociétés minières vont augmenter de manière significative. La société Vale Inco, selon ses prévisions de restauration, estime que pour les dix à quinze prochaines années la production devra atteindre 2,5 millions de plants, pour revégétaliser une surface totale de 324 ha dans le Sud (terrains dégradés par la société et mines orphelines environnantes).

La société KNS estimait ses besoins en 2008 à environ 30 000 plants par an, et prévoyait une augmentation pour les années suivantes.

Les pépiniéristes et autres sociétés impliquées dans la revégétalisation ont intérêt à se renseigner directement auprès des sociétés minières, notamment auprès des centres miniers implantés sur leur commune, pour connaître plus précisément leurs demandes à court terme (dans l'année ou dans l'année suivante).

État des travaux de revégétalisation réalisés par les sociétés minières en 2008.

(Source : Dimenc ; données déclarées)

Sociétés minières	Sites miniers	Nombre de plants	Surface plantée (ha)	Surface semée (ha)
SLN	Thio, Kouaoua, Poro, Poya, Népoui, Tiébaghi	10 703	2,04	16,82
NMC (groupe SMSP)	Ouaco, Poya	6 865	1,54	0
SMGM	Tomo, Vulcain	4 880	1,32	0,34
Vale Inco	Goro	7 465	0,83	4,70
KNS	Koniambo	7 519	1,60	-
Totaux des sociétés minières		37 432	7,3	21,9
Total 1971-2008		718 000	133,0	120,0

3. Les comités communaux de réhabilitation des sites miniers

Instaurés dans le cadre de la délibération n° 104 du 20 avril 1989 (cf. annexe 1), ces comités ont pour mission de définir le choix des opérations de réhabilitation des anciens sites miniers de leur commune.

Entre 1990 et 2007, quatorze communes ont mis en place leur Comité de Réhabilitation des Sites Miniers (dans l'ordre chronologique : Thio, Pouembout, Yaté, Poya, Bourail, Boulouparis, Houailou, Koné, Kouaoua, Canala, Païta, Koumac, Kaala-Gomen et Poum). Le Service des mines et carrières (Dimenc) assure le secrétariat des différents comités.

Au total, près de 2,888 milliards francs CFP ont été versés entre 1990 et 2008, dont 82 % durant la période 2000-2008. Les faibles versements entre 1990 et 1999 sont liés à une période de moindre activité pour l'industrie minière néo-calédonienne. La reprise des versements a eu lieu en 2000 (15 millions francs CFP), s'est poursuivie en 2001 (196,9 millions de francs CFP), puis entre 2003 et 2008, cette dernière année constituant une année record avec un total de 650,4 millions de francs CFP versés par neuf sociétés minières.

Depuis 1990, une vingtaine de sites miniers ont fait l'objet de travaux de réhabilitation.

Il convient de préciser toutefois que la majorité des fonds est consommée pour des travaux géotechniques de terrassement et de gestion des eaux, seule une partie de ces travaux concerne des opérations de revégétalisation (estimée entre 10 et 20 %). Le tableau suivant présente les travaux réalisés en 2008.

Ces fonds communaux sous délibération n° 104 étaient encore en activité en 2009, toutefois ils sont appelés à être progressivement remplacés par le Fonds Nickel, notamment sur la partie mode de financement (les objectifs restant les mêmes ; cf. annexe 1).

Les pépiniéristes et autres sociétés impliquées dans la revégétalisation peuvent se renseigner auprès des mairies de leurs communes (services techniques), lesquelles pourront les informer des opérations en cours ou à venir. Les marchés font généralement l'objet d'un appel d'offres unique (fourniture des plants + travail de plantation) par voie de presse.

État des travaux de revégétalisation réalisés par les collectivités en 2008.

(Source : Dimenc ; données déclarées)

Collectivités	Sites	Nombre de plants	Surface plantée (ha)	Surface semée (ha)
Comités communaux de réhabilitation des sites miniers				
Thio	Mine Élise	1 823	0,18	-
	Mine André	5 129	1,36	-
	Mine La Moulinet	6 000	1,20	2,70
Païta	Mine Cosinus 16	5 008	0,44	0,37
	Mine Cosinus 18	-	-	0,91
	Cosinus 19	-	-	1,00
Houailou	Pounéhoua	5 698	-	-
Province Sud				
Mont-Dore	Mine Claudette	13 000	8	0,75
Thio	Mine Yolande	7 000	3	-
Dumbéa	Mine SMMO 84	5 000	3	-
Totaux des collectivités		48 658	17,18	5,73
Total 1971-2008		412 000	203,00	53,00

4. Revégétalisation par la province Sud

Depuis le début de la provincialisation en 1989, la province Sud s'est organisée pour financer des opérations de revégétalisation de mines orphelines, financées sur fonds propres. Entre 2005 et 2009, son leur programme annuel prévoyait de financer jusqu'à 20 ha par an (environ 40 000 plants) (cf. tableau précédent pour 2008 et tableau ci-dessous pour la période 1990-2007).

Dorénavant, ces opérations sont transférées au Fonds Nickel (cf. annexe 1), le financement provincial devant aussi être transféré pour être géré par ce fonds.

Jusqu'alors, la province (à travers la DDR) procédait à des appels d'offres, publiés par voie de presse de manière séparée : d'abord pour la fourniture des plants, puis pour la plantation.

État des travaux de revégétalisation réalisés par la province Sud entre 1990 et 2007. (données sur les plantations) (Source : Dimenc ; données déclarées)

Commune de la province	Mine	Date	Nombre de plants	Surface plantée (ha)
Thio	Verse « Galliot »	1990-91	5 500	2
Mont-Dore	« De Rouvray »	1993-94	20 000	8
Mont-Dore	« Mille et Berton »	1995-96	5 000	2
Mont-Dore	« De Rouvray »	1999	22 800	13
Mont-Dore	Odette	2000-01	22 000	10,5
Mont-Dore	« De Rouvray »	2002	5 200	3,5
Yaté	« Saint Gabriel »	2002	15 365	10
Dumbéa	« Dzumac » : Juliette, Sophie	2002	9 400	6
Dumbéa	« Dzumac » : Juliette, Sophie	2003	9 800	6
Mont-Dore	« De Rouvray »	2003	8 522	5,3
Boulouparis	EBV4	2004	7 700	4,4
Mont-Dore	La Coulée	2004	4 400	2,75
Mont-Dore	La Coulée	2005	16 100	6,5
Païta	Alexandrie	2005	5 820	3
Mont-Dore	La Coulée	2006	9 622	7
Païta	Souza	2006	11 304	10
Mont-Dore	Claudette	2007	24 200	10
TOTAL		1990-2007	202 733	110

5. Autres collectivités

Sysmin

Dans le cadre du 7^e FED (Fonds européen de développement), l'Union européenne a apporté une aide financière de 195 millions de francs CFP aux chantiers de réhabilitation de deux anciennes mines, « Pervenche », située à Saint-Louis sur la commune du Mont-Dore, et « La Moulinet », sise à Thio.

Sur l'ancienne exploitation de Saint-Louis (arrêtée en 1972), des terrassements, pour le remodelage du site et une bonne gestion des eaux, ont été les principaux travaux réalisés. Bien que la phase de végétalisation n'ait pu être menée à son terme comme initialement prévu, la réception définitive du chantier été effectuée en 2007. La Dimenc assurait la maîtrise d'œuvre du projet. Véritable site pilote, ce projet a permis la mise en application de techniques innovantes (notamment le remodelage des terrains par bouteur). Ces travaux devront être complétés par d'importants travaux de revégétalisation afin de garantir l'insertion progressive du site dans son environnement naturel.

Le site de l'ancienne mine « La Moulinet », sur le plateau de Thio, est le second chantier de réhabilitation ayant bénéficié d'une aide financière de l'Union européenne pour un montant de 54 millions de francs CFP. Les travaux de terrassement et de gestion des eaux ont été réalisés en 2007. La phase de revégétalisation financée par la commune de Thio, via la délibération n° 104, a débuté en 2008-2009 (45 000 plants prévus).

Fonds de Concours pour le Soutien Conjoncturel du secteur Minier

La Nouvelle-Calédonie a pu également intervenir grâce au Fonds de Concours pour le Soutien Conjoncturel du secteur Minier (FCSCM). Ce fonds avait pour objectif de soutenir des sociétés minières éligibles en période de crise minière déclarée, il a notamment servi à financer en 1999 la revégétalisation de la mine Monastir (Canala), dont l'exploitation est arrêtée depuis près de vingt-cinq ans.

Le FCSCM a été abrogé en 2009 pour être remplacé par le Fonds Nickel (cf. annexe 1).

Annexe 5 – CAHIER DES CHARGES DE PRODUCTION DE PLANTS

Ce document est inspiré du cahier des charges de production de plants du programme forêt sèche, qui est annexé aux conventions passées avec les pépiniéristes.

I. Normes techniques générales

I. 1. Installations de la pépinière

Les pépinières doivent être reliées à un réseau téléphonique fixe ou mobile et accessibles à tous véhicules même par temps pluvieux. Elles doivent également maintenir en état de bon fonctionnement les installations minimales suivantes :

- **Équipement d'irrigation** : la pépinière dispose d'une ressource en eau permanente et possède un réseau d'irrigation adapté à ses installations.
- **Systèmes d'ombrage** : des ombrières fixes ou démontables, en nombre suffisant pour la capacité d'accueil de la pépinière, sont disponibles pour permettre un dosage de l'ombrage en fonction des besoins des espèces.
- **Locaux à usage d'abris** : les équipements de semis sont installés dans un local approprié, bien ventilé et suffisamment éclairé. Ils doivent être protégés contre les rongeurs et les insectes. Les substrats (terre et autres) sont également stockés à l'abri des intempéries et des animaux.
- **Stockage des conteneurs** : la surface au sol contenant les plants est profilée de sorte que le drainage des eaux soit immédiat. Des dispositifs de type cadres rigides fixes au sol (planches, fils de fer tendus...) ou hors sol (bâtis, casiers suspendus...) sont installés pour accueillir les conteneurs.
- **Systèmes de protection** : si la pépinière est sujette à l'intrusion d'animaux pouvant perturber le bon déroulement des étapes d'élevage des plants, il est recommandé de la clôturer. Dans les endroits ventés, il est fortement conseillé d'installer des dispositifs brise-vent, naturels ou artificiels.

I. 2. Matériel végétal

• Production à partir de semences :

Si les graines sont fournies, les quantités de plants à produire et à livrer intègrent le taux de germination indiqué pour chaque espèce, une perte moyenne de 15 % en culture et un prélèvement de 5 % pour contrôle.

Le pépiniériste pourra récolter lui-même les graines des espèces nécessaires à l'exécution de la commande. Dans ce cas, la récolte et le conditionnement de ces semences feront l'objet d'un avenant à la convention de production. La provenance et la date de récolte de ces graines doivent être indiquées sur le devis. Les graines sont préparées à partir de fruits sains et mûrs.

• Production par multiplication végétative :

Pour les espèces difficiles à produire à partir de graines (faible potentiel germinatif, graines attaquées ou rares...), le pépiniériste peut récolter et produire des boutures.

I. 3. Semis

Toutes les précautions sont prises pour protéger les graines en cours de germination, et les plantules en cours de croissance, de tous les prédateurs éventuels (volatiles, rongeurs...). L'utilisation de mollusquicide, une dératisation générale de la pépinière ainsi qu'un désherbage complet des abords sont recommandés à titre préventif, environ trois semaines avant le démarrage des travaux.

Les semis sont effectués selon les prescriptions contenues dans les fiches techniques remises au pépiniériste. Une attention particulière doit être portée à la préparation des graines, à l'ombrage des germoirs, au drainage, à la qualité et à la désinfection du substrat.

I. 4. Conditionnement

Les plants sont produits pour être mis en terre avec leur motte de culture. La qualité de ces mottes est prépondérante pour une bonne installation des plants ; elle est conditionnée par le type de conteneurs et la nature du substrat.

• Type de conteneurs :

Les plants sont élevés en plaques alvéolées (40 alvéoles par plaque généralement) et ou en pots individuels (en fonction des espèces, des vitesses de croissance, des durées de culture ou des dates de plantation).

Les plaques alvéolées sont rangées par bandes de deux et surélevées afin de ménager un espace de lumière d'au moins 10 cm et provoquer ainsi l'autocernage des racines.

• Substrat :

Sauf indications contraires contenues dans les fiches techniques, les conteneurs sont remplis d'un mélange composé à parts égales de terre franche (latérite de bonne qualité) tamisée à la maille de 10 à 12 mm, de terreau du commerce additionné d'engrais à libération lente de type osmocote et de fibre de coco (et/ou de pumice et de vermiculite). Pour que le mélange soit homogène, il est recommandé d'utiliser une bétonnière comme mélangeur.

Une analyse physico-chimique peut être exigée pour corriger les éventuelles carences et rééquilibrer la terre franche utilisée en mélange. Elle est à la charge du pépiniériste. À l'initiative du pépiniériste, le substrat peut éventuellement être traité :

- à la vapeur ;
- chimiquement (nématocide – fongicide). Avant le repotage, vérifier la disparition totale du produit actif par le semis de radis ; s'ils lèvent, le substrat est prêt, sinon, poursuivre l'aération.

• Repiquage :

Il est adapté en fonction des essences et constitue une opération essentielle pour la qualité du futur plant. Les principales précautions à prendre sont :

- rejeter les plantules mal conformées ;
- repiquer en prenant grand soin de ne pas croquer ou dévier le pivot ;
- tasser sans compacter la terre autour de la plantule tout en maintenant celle-ci pour éliminer les poches d'air ;
- respecter le niveau du collet et ne pas le blesser ;
- bassiner abondamment pour assurer un meilleur contact substrat/racines.

• **Identification des lots :**

Chaque lot doit être distinctement individualisé par une étiquette qui indique lisiblement l'espèce, la date de semis (ou de bouturage), la date de repiquage et le nombre de plants, révisé après chaque opération de tri.

Toutes les indications de semis, de repiquage, de taille, de tri et de traitement sont reportées dans le cahier de pépinière.

I. 5. Élevage

Il est conseillé de maintenir l'ombrage des plants pendant les premiers mois suivant le repiquage. L'éclaircissement est progressivement augmenté en ouvrant les systèmes d'ombrage pour « endurcir » les plants et les préparer à la transplantation en plein champ.

L'élevage des plants comporte toutes les opérations nécessaires à leur livraison dans un bon état sanitaire et physiologique : arrosages, fumures d'entretien, traitements phytosanitaires et désherbages.

En cours d'élevage, les plants sont triés autant que nécessaire de façon à homogénéiser les lots et à éliminer les plants non conformes.

Le tri est effectué d'après l'enracinement des plants et l'aspect visuel des parties aériennes, selon les critères utilisés pour la réception des plants et détaillés au paragraphe II. 2. Les plants mal conformés sont remplacés par des plants de qualité marchande de façon à avoir systématiquement des plaques alvéolées ou des lignes en planches qui soient complètes.

Pour faciliter les travaux de pépinière et les contrôles, les plants seront regroupés dans la pépinière afin de ne pas les mélanger avec ceux destinés à d'autres usages (arboriculture, horticulture, sylviculture...).

I. 6. Durées d'élevage

Les durées d'élevage sont à prendre en compte à partir de la date de repiquage. Elles diffèrent beaucoup selon les espèces, dans un intervalle qui va de sept mois à seize mois généralement. Sauf spécification contraire, les plants livrables doivent avoir une hauteur de leur partie aérienne d'au moins quinze centimètres (15 cm), vingt centimètres de préférence.

La durée de production à prendre en considération est estimée à partir de la commande effective au pépiniériste.

Les plants doivent être livrés et plantés à la saison des pluies, qui s'étend habituellement de février à mai. Tout retard de production, non justifié, pourra donner lieu à pénalités.

I. 7. Dispositions diverses

La livraison se fait par plaques complètes ou par cageots complets afin de faciliter les comptages et les transports. Le chargement se fait en collaboration avec le transporteur et en présence du pépiniériste.

Le pépiniériste n'a pas en charge le transport de ses plants jusqu'au chantier de plantation.

II. Les contrôles

Ils sont effectués par un agent mandaté et à son initiative. Le contrôle de la qualité extérieure des plants nécessite notamment l'examen du système racinaire d'un échantillon représentatif de chaque lot. Ce contrôle est destructif. Il revient au pépiniériste d'en supporter la charge en prévoyant le nombre de plants supplémentaires nécessaires.

Chaque contrôle fait l'objet d'une fiche de visite contresignée par le pépiniériste et d'un rapport remis au plus tard dans la semaine qui suit la visite. Y sont notamment détaillées les causes de rejet des plants jugés non conformes.

II. 1. Contrôle en cours d'élevage

Un contrôle destructif est opéré systématiquement en cours d'élevage, un mois après la date de repiquage, sur chaque lot individualisé d'au moins 50 plants d'une même espèce.

Ce contrôle, qui porte principalement sur la vérification du système racinaire des jeunes plants repiqués, est effectué sur les lots triés présentés par le pépiniériste, en prélevant au hasard un échantillon de :

- 5 % pour les lots de 50 à 1 000 plants (50 plants au maximum) ;
- 3 % pour les lots de 1 001 à 3 000 plants (de 30 à 90 plants au maximum) ;
- 2 % pour les lots de 3 001 à 8 000 plants (de 60 à 160 plants au maximum) ;
- 1 % pour les lots supérieurs à 8 000 plants (80 plants au maximum).

Si le contrôle de l'échantillon donne un résultat supérieur à 10 % de plants dont le système racinaire présente une déformation non acceptable (racine principale formant avec la tige un angle de moins de 110°), la totalité du lot est refusée.

Lors de ce contrôle sont également vérifiés les éléments d'identification des lots, précisés au paragraphe I. 4.

II. 2. Réception des plants bons à livrer

La réception des plants est prononcée sur chaque lot spécifique jugé livrable par le pépiniériste.

Un contrôle sur un échantillon représentatif, déterminé comme précédemment, est effectué sur chaque lot à réceptionner présenté après tri par le pépiniériste. Il consiste à évaluer la qualité extérieure des plants à l'aide de critères quantitatifs (âges et dimensions) et qualitatifs (conformation et état sanitaire) portant à la fois sur le système racinaire, l'appareil aérien et l'équilibre général du plant.

Pour être accepté, le lot doit être composé d'au moins 90 % de plants de qualité loyale et marchande, c'est-à-dire qui satisfont aux critères quantitatifs figurant dans la commande et qui ne présentent aucun des défauts rédhibitoires figurant dans le tableau n° 1 ci-après.

L'acceptation du lot fait l'objet d'un certificat de réception rédigé par l'agent chargé du contrôle et dont une copie est remise au pépiniériste.

Si l'échantillon contrôlé présente un pourcentage de plants non conformes supérieur à 10 %, le lot n'est pas réceptionné ; il est rendu au pépiniériste pour être trié et représenté pour un nouveau contrôle. Si le résultat du second contrôle est encore supérieur à 10 % de plants non conformes, le lot est définitivement refusé et déclaré inapte à la plantation. Il est alors demandé au pépiniériste de le retirer de la vente ou de ne destiner ces plants refusés qu'à une valorisation autre que celle d'un projet de plantation éducative ou de restauration écologique.

Tableau 1 : Contrôle de la qualité extérieure des plants forestiers : défauts rédhibitoires, conformation et état sanitaire.

N°	Description
1	Plants portant des blessures non cicatrisées
2	Plants partiellement ou totalement desséchés
3	Tige présentant une forte courbure
4	Absence de dominance apicale, tige multiple
5	Ramification absente ou nettement insuffisante (plant chétif)
6	Jaunissement prononcé du feuillage
7	Collet endommagé (nécroses, blessures)
8	Racines principales gravement enroulées ou déformées (formant un angle $<$ ou $=$ à 110° avec la tige)
9	Radicelles absentes ou gravement endommagées (chevelu racinaire insuffisant)
10	Plants présentant des indices d'échauffement, de fermentation ou de moisissures

Annexe 6 - CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES (CCTP)

1. Travaux de revégétalisation

Cette annexe présente un exemple de CCTP pour des travaux de revégétalisation sur site minier. Il est inspiré de celui qui a servi aux travaux conduits sur la mine La Moulinet (Thio) en 2009. Afin de ne pas surcharger inutilement ce document, toutes les parties ne sont pas ici reproduites, notamment la première énonçant les prescriptions générales.

Les préconisations formulées dans ce document sont bien entendu appelées à s'améliorer en fonction de l'évolution des connaissances, des techniques et des méthodes de revégétalisation applicables sur sites.

Il est donc important que ce document puisse évoluer en tenant compte de ces améliorations.

2. Description des travaux

2.1. Les travaux préparatoires

Le décompactage

Cette opération est effectuée mécaniquement par des engins miniers (type bulldozers) sur les surfaces indurées plates ou à faible pente et qui n'ont pas été reprises lors des travaux de terrassements généraux. Elle pourra être sous-traitée à l'entreprise retenue pour les travaux de terrassements généraux. Cette préparation de terrain sera couplée avec un épandage de matière organique. Le produit sera appliqué à raison d'une quantité minimale de 3 t/ha de matière sèche, composé soit de paille broyée, soit de résidus de végétaux broyés provenant du site, ou de toutes autres matières végétales proposées par l'entrepreneur lors de la remise des offres. Le produit devra être indemne de graines et d'organismes indésirables, ainsi que de tous produits toxiques.

Les fascines

Les fascines en fagots de branchages sont installées sur des micro-banquettes réalisées manuellement sur latérites. Cette technique est utilisée sur les talus de forte pente et/ou meubles, en complément à la plantation. L'espacement entre deux fascines varie de 2 à 30 m maximum en fonction de la pente. Cette technique est couplée avec une plantation en plein ou en cordon (cf. § suivant).

2.2. Les plantations

Les végétaux

Dans les plantations, au moins 90 % des espèces utilisées doivent appartenir à la flore endémique des maquis miniers et se trouver naturellement sur le massif faisant l'objet de la végétalisation (elles sont appelées « espèces du maquis » dans le reste du document technique).

Seulement 10 % des plants utilisés peuvent appartenir au gâïac (*Acacia spirorbis*) et au bois de fer (*Casuarina collina*), deux espèces à croissance rapide, indigènes de la Nouvelle-Calédonie, capables de tolérer les contraintes liées à la nature particulière des sols des sites miniers (elles sont appelées « espèces d'accompagnement » dans la suite du document technique). Ces deux espèces ne peuvent être utilisées que si elles

sont présentes naturellement à proximité du site, et ne peuvent être implantées qu'à des altitudes inférieures à 500 m, à des densités assez faibles (de 3 à 5 m d'espacement entre les pieds).

Un minimum de 20 espèces différentes du maquis seront plantées sur l'ensemble du site, en respectant une diversité minimale de 10 espèces par surface unitaire de 100 m².

Les espèces du maquis devront être choisies et plantées en respectant leurs conditions naturelles d'habitat, notamment en ce qui concerne l'altitude et les caractéristiques physiques et chimiques du sol.

Les modalités de plantation

La plantation en plein sur faible pente

Elle s'effectue sur les surfaces plates ou à faible pente (inférieure à 10°) et soumises à une érosion modérée. Seules des espèces du maquis sont plantées. La densité globale de plantation est de 0,5 à 1 u/m². Les espèces ligneuses pourront être mélangées à des Cyperaceae.

La plantation en plein sur pente modérée à forte

Elle s'effectue sur des pentes modérées à fortes (environ 10 à 30°). La disposition des plantations est identique à celle sur pentes faibles, seule la densité globale des plants, au minimum 1,5 à 2 u/m², est différente. Des espèces ligneuses seront plantées en ligne à la densité minimale de 1 u/m² (soit 1 m entre lignes x 1 m sur ligne, lignes en quinconce), des cyperaceae devront être installées entre les ligneux à la densité minimale de 0,5 u/m².

La plantation sur merlons

Elle est réalisée dans le but de stabiliser rapidement les matériaux meubles déposés en bordure de pistes pour former des merlons de protection. La plantation s'effectue en bandes de végétation sur quelques lignes espacées de 1 m. Elle est réalisée en quinconce avec une distance entre les plants de 1 à 2 m sur la ligne, soit une densité globale de 0,5 à 1 u/m². Les plants pourront appartenir à des espèces d'accompagnement associées à des espèces du maquis (un espace d'au moins 2 m doit être laissé entre les espèces d'accompagnement et celles du maquis ; les espèces du maquis pourront être plantées de manière plus serrée).

La plantation en cordons avec fascines

Elle est réalisée sur des surfaces à pente modérée mais sur lesquelles les transports de sédiments peuvent être importants (zone décompactée). Les cordons constituent autant de petits barrages successifs favorisant la dispersion de la lame d'eau et l'atterrissement des sédiments charriés. La densité de plantation est forte, 1 à 2 u/m² sur le cordon et 1 m entre les cordons. Les plants pourront appartenir à des espèces d'accompagnement, associées à des espèces du maquis qui devront rester majoritaires. Cette technique accompagne la réalisation de fascines, la plantation est alors réalisée en amont de chaque fascine.

Les brise-vent

Pour les zones particulièrement ventées (bords de plates-formes et talus exposés aux alizés notamment), des brise-vent individuels sont fixés autour des plants.

2.3. Les semis hydrauliques

Il s'agit de semis réalisés par semoir hydraulique (*hydroseeder* ou *dryseeder*) permettant d'épandre simultanément sur le sol les semences, les fertilisants et tous autres adjuvants nécessaires au bon développement de la couverture végétale.

Les mélanges de graines sont à base d'espèces du maquis et d'espèces à développement rapide (graminées ou légumineuses exotiques). Plus de 90 % des semences appartiennent à des espèces herbacées (du maquis et exotiques), le reste étant composé de semences d'espèces ligneuses du maquis (cf. point 3.6).

Tous les semis seront réalisés avec paillage préalable du sol ou apport de mulch fin pouvant être projeté par l'*hydroseeder*.

Pour certains sites à fort impact paysager, le semis est associé à une plantation préalable d'espèces du maquis. Cette technique est appelée « végétation mixte » dans la suite du document technique. Les espèces semées sont alors uniquement des espèces herbacées (cf. point 3.6).

3. Nature, qualité et provenance des matériaux

Tous les matériaux entrant dans les opérations de revégétalisation par plantation et semis hydraulique sont fournis par l'entreprise. L'entrepreneur est responsable, jusqu'à leur emploi, de la conservation des produits et plants réceptionnés.

Les matériaux utilisés et qui ne sont pas visés dans le présent CCTP sont décrits, quant à leur nature, leur provenance, leur qualité et leur préparation, dans une note complémentaire à l'appui de la soumission.

3.1. Dépôt et rangement des fournitures

Les matériaux livrés et enregistrés seront déposés aux emplacements désignés en accord avec le maître d'œuvre. Les plants seront stockés dans un site à l'abri du vent. L'entrepreneur ne pourra occuper les emplacements au-delà du périmètre qui lui aura été assigné.

Les aires de dépôt seront nettoyées et dressées par les soins de l'entrepreneur et à ses frais. Pour l'entretien des plants stockés, un ombrage sera mis en place ainsi qu'un système d'irrigation permettant un arrosage quotidien.

Les plants seront approvisionnés depuis la pépinière jusqu'au site de stockage par camions bâchés. Les transports seront effectués de manière à ne pas dégrader les routes ou aménagements déjà réalisés. Si des dégradations sont commises, elles devront être réparées sans retard par l'entrepreneur ou à ses frais par une autre entreprise. Lorsqu'elles ne seront pas effectuées dans le délai prescrit par le maître d'œuvre, les réparations seront réalisées d'office aux frais de l'entrepreneur.

3.2. Examen et réception des matériaux

[...]

3.3. Fournitures pour les fascines

Les fagots

Ils sont réalisés en branchages de gaiac préalablement débarrassés de leur feuillage. Les branchages sont les plus rectilignes possible et étroitement liés aux deux extrémités. Les fagots mesurent environ 1,5 m de long et 0,3 m de diamètre.

Les pieux en bois

Ils servent à fixer les fascines, à raison de quatre pieux par mètre. Ils font entre 3 et 4 cm de diamètre, 0,8 m minimum de long (la longueur est ajustée en fonction de l'épaisseur de matériau meuble dans le cas des remblais) et sont époinçés vers le bas.

Ils sont coupés dans du bois dur tel que bois de fer ou gaiac, ou de toute autre espèce commune dans les maquis environnants.

3.4. Fournitures pour les brise-vent

Chaque brise-vent est constitué d'une bâche en plastique perforée transparente, de 0,4 x 0,4 m, maintenue tendue autour du plant par trois piquets.

Les piquets sont en bois dur, de 0,7 m environ de longueur et de 2 à 3 cm de diamètre. Ils seront coupés sur les mêmes espèces que les pieux pour fascines et approvisionnés sur le site.

3.5. Fourniture des plants

Les végétaux sont fournis par l'entrepreneur. Au moins 90 % d'entre eux appartiennent à la flore des maquis miniers. Ils devront être fournis conformément à la liste qui définit les espèces et les quantités à respecter (NDLR : liste fournie avec le CCTP complet). Ils seront plantés en mélange d'au moins une vingtaine d'espèces. Le mélange sera équilibré pour chaque surface élémentaire (talus, plate-forme, merlon...) : aucune espèce n'excédera 20 % du nombre total de plants utilisés, et au moins 10 espèces seront plantées pour 100 m².

Le choix des espèces sera soumis obligatoirement au maître d'œuvre lors de la remise de l'offre, leur disponibilité et leur mode de mise en culture seront indiqués et validés par la pépinière ainsi que la date de livraison.

Seuls 10 % du total des plants pourront appartenir au gaiac (*Acacia spirorbis*) et au bois de fer (*Casuarina collina*), pour éviter les effets de leur caractère grégaire et invasif, pouvant nuire à l'installation d'une couverture végétale floristiquement diversifiée.

Les plants doivent être de la meilleure qualité possible. Les végétaux doivent être sains et de qualité loyale et marchande, c'est-à-dire ne pas être atteints de maladies, ne pas présenter de parasites, de signes de dessèchement, de lésions de la partie aérienne ou du système racinaire.

Les plants doivent être produits selon les caractéristiques techniques définies dans le cahier des charges de production de plants.

3.6. Fourniture des semences

L'utilisation d'espèces natives pour la revégétalisation entraîne un besoin important de semences, notamment pour les semis hydrauliques. L'obtention de ces semences, non disponibles dans le commerce, reste encore une opération artisanale.

Les graines des espèces sélectionnées sont collectées manuellement dans le milieu naturel, puis triées et stockées en chambre froide (froid sec, température 5 °C, sous emballages fermés).

Pour les semis hydrauliques

Plusieurs types de mélanges seront appliqués sur l'ensemble des surfaces à revégétaliser.

Qualité

Les semences des espèces herbacées du commerce doivent impérativement répondre aux normes en vigueur. L'entreprise doit indiquer dans son offre les espèces et variétés choisies et les proportions.

Pour les semences d'espèces natives qui sont incluses dans le mélange, l'entreprise doit fournir dans son offre :

- le nom du fournisseur et le nom de l'organisme collecteur ;
- l'origine géographique des semences ;
- la date de récolte des semences ;
- la pureté et le taux de germination (test datant de moins de six mois, taux de germination de 20 % minimum).

Lors de la réception des semences sur le chantier, elle doit aussi fournir :

- la fiche de fabrication ;
- les fiches de lots.

Les semences d'espèces natives doivent être produites ou collectées sur les terrains miniers.

Le fournisseur devra confirmer par écrit que les quantités pour la campagne sont réservées ou commandées et ce, jusqu'à confirmation de l'attribution du marché.

Composition des mélanges

Dans les zones de semis seul, le mélange de graines comprend au minimum 60 % de semences du maquis qui devront être naturellement présentes sur le site – à raison de 90 % d'herbacées et 10 % d'espèces ligneuses – et au maximum 40 % de semences exotiques (graminées et/ou légumineuses). Les pourcentages sont donnés en nombre de graines.

Pour les semis réalisés dans le cadre de la végétalisation mixte, les espèces seront uniquement des herbacées, en respectant les proportions suivantes : 60 % de semences d'espèces du maquis et 40 % de semences d'espèces exotiques du commerce.

Le mélange de 60 % de semences du maquis devra comporter un minimum de cinq espèces parmi celles de la liste des espèces à utiliser pour le semis (NDLR : liste jointe dans un CCTP complet).

Les espèces seront choisies en fonction de la nature des substrats à revégétaliser parmi la liste des espèces données dans le carnet de détails.

Il sera important de vérifier au préalable les informations données par la littérature sur les risques d'invasion des espèces exotiques retenues. Il est évident que ces espèces devront présenter les plus faibles risques possible. Les graminées annuelles devront être privilégiées par rapport aux graminées pérennes.

L'entreprise devra détailler la composition du mélange de semences par type de substrat en précisant les espèces et leur proportion dans le mélange donné (en poids et en nombre de graines).

Dosage des semis

Les semis sont réalisés en deux passages espacés d'une saison de végétation aux doses suivantes :

Premier passage :	semences du maquis	70 kg/ha
	semences du commerce	20 kg/ha
Deuxième passage :	semences du maquis	30 kg/ha

Le deuxième passage sera demandé au bout de la première année en fonction des résultats, avec apport de semences du maquis uniquement.

Conditionnement

Les semences seront conditionnées en sacs scellés et munis d'une étiquette comportant le poids et la date de fermeture du sac, ainsi que la liste détaillée des espèces et des variétés composant le mélange.

Stockage

Le stockage des semences sera assuré par l'entreprise dans des conditions adéquates à leur parfaite conservation pour la durée des travaux de revégétalisation de la campagne considérée.

3.7. Fourniture des fertilisants

La fertilisation couplée avec les semis et la fertilisation d'entretien seront réalisées à partir d'engrais minéraux et organiques. Toute modification de la nature des engrais fera l'objet d'un accord préalable du maître d'œuvre.

Engrais organiques

Ils sont de préférence d'origine végétale et répondent aux caractéristiques suivantes :

- teneur en matière organique supérieure à 50 %, mesurée sur produit sec ;
- teneur en eau inférieure à 30 % ;
- valeur du rapport carbone actif sur azote actif (C/N) inférieure à 15.

Ces engrais seront acheminés sur le chantier en sacs fermés portant mention de leur nature, de leurs composants et de leur concentration.

Si la teneur en eau est supérieure à 30 %, l'entreprise complètera les quantités afin d'assurer à l'équivalent de matière organique demandée son produit sec. La teneur en eau ne dépassera pas toutefois 50 %. Si la teneur en matière organique est inférieure à 50 %, l'entreprise complètera également les quantités à l'équivalent de matière organique demandée sur produit sec.

Ils sont utilisés en semis hydraulique et à la plantation (cf. point 4 Modalités d'exécution des travaux).

Engrais minéraux

En semis hydraulique ; il s'agit d'un mélange d'engrais de type 17.17.17 et 0.32.16 ou équivalent.

Pour les plantations, sera utilisé soit le 17.17.17, soit le 13.13.21, soit le 10.12.24, soit un engrais retard NPK équilibré (par exemple 13.13.13). Un engrais retard contenant des oligoéléments est la meilleure formule.

Si des fertilisations sont nécessaires en accompagnement des semis complémentaires ou des plantations au titre de la garantie ou de l'entretien, elles seront à la charge de l'entreprise. Leur formulation et leur dosage seront normalement identiques aux spécifications du présent CCTP (cf. Modalités d'exécution des travaux).

3.8. Le paillage

Pour les plantations, il est réalisé avec de la paille broyée.

Pour les semis hydrauliques, il est réalisé :

- soit avec de la paille broyée ;
- soit par projection d'un mulch de type cellulose, pâte à papier, fibre de bois ou de coco, qui sera proposé par l'entrepreneur lors de la remise des offres. Les quantités prévues sont calculées en poids sec. L'entrepreneur devra établir son offre en indiquant les quantités brutes (compte tenu des teneurs en eau du produit proposé) et les qualités du produit.

3.9. Les colloïdes

Pour les plantations, l'entreprise utilisera un hydrorétenteur.

Pour les semis hydrauliques, l'entreprise emploiera, en complément du mulch, un produit colloïdal naturel : alginate, farine d'algues, latex..., ayant les propriétés suivantes : stabilisant, gélifiant, rétenteur d'eau et d'éléments nutritifs.

Les quantités prévues sont calculées en poids sec. L'entrepreneur devra établir son offre en indiquant les quantités brutes (compte tenu des teneurs en eau du produit proposé) et le type de produit utilisé.

3.10. L'eau du mélange hydraulique

L'entreprise devra préciser sa source d'approvisionnement en eau pour assurer les semis hydrauliques. Cette eau, répondant aux qualités requises, sans polluant, sera utilisée sous la responsabilité de l'entreprise.

4. Modalités d'exécution des travaux

4.1. Principes généraux

[...]

4.2. Période d'intervention

Les travaux de revégétalisation et notamment les semis sont réalisés en dehors de la période sèche (septembre à novembre) et de préférence de mi-décembre à mi-juin. L'entreprise engage intégralement sa responsabilité dans un échec éventuel de la reprise végétale, au cas où elle interviendrait en périodes d'intempéries ou de sécheresse. [...]

4.7. Décompactage

Le décompactage est effectué par ripage croisé des surfaces à traiter. Le sens du dernier passage étant réalisé en courbe de niveau. La profondeur du décompactage est de 0,3 m environ, voire 0,5 m en zone plane. Cette opération doit être exécutée peu de temps avant le début de la revégétalisation de la surface concernée, notamment pour les surfaces en pente.

4.8. Réalisation des fascines

L'installation de la fascine se fait sur une micro-banquette préalablement creusée parallèlement aux courbes de niveau.

Les pieux en bois, support de fascines, sont enfoncés verticalement de part et d'autre des fagots sur environ 0,5 m de profondeur, à raison de quatre piquets par mètre de fascine. Les fascines, une fois en place, peuvent être consolidées avec des pierres de faible diamètre placées à l'amont de la fascine.

La distance entre deux rangées de fascines est fonction de la pente du talus. Elle varie entre 2 et 3 m maximum. Selon le diamètre des fagots, la fascine est constituée de un ou deux étages. La hauteur finale de la fascine est de 30 cm environ. Les fagots sont posés en alignement, sans espace entre deux fagots. Le tout doit être parfaitement ancré et doit pouvoir résister à une pression modérée.

4.9. Réalisation des plantations

Les trous de plantations sont creusés manuellement ou à l'aide d'une tarière, selon les dimensions suivantes : 30 cm x 30 cm x 30 cm.

Avant de refermer la fosse, les produits suivants sont mélangés, à sec, à la terre réservée à côté du trou :

- hydrorétenteur : 5 g par plant ;
- engrais organo-minéral : 30 g par plant.

Le plant est mis en terre en prenant soin de ne pas abîmer les racines en enlevant le conteneur. La cuvette (impluvium) est formée (à environ 20 cm du plant). Le paillage est installé en surface et fixé par des pierres ou une poignée de terre. Au final, un plombage (tassement hydraulique) est effectué obligatoirement même si l'état hygrométrique du sol peut faire croire à son inutilité. Après le plombage, le collet de la plante doit se trouver au niveau du fond de la cuvette. [...]

4.11. Réalisation des semis hydrauliques

Paille broyée

Ce type de paillage est réalisé préalablement au semis hydraulique, à l'aide d'une broyeuse-projeteuse alimentée avec des bottes de graminées séchées. Immédiatement après sa mise en place, la paille broyée est fixée par projection hydraulique d'une colle organique (colloïde organique ou colle organique à base d'algues).

Projection de mulch

Ce type de paillage est réalisé par le semeur hydraulique en mélange avec de la colle organique (colloïde organique ou colle organique à base d'algues). Cette opération peut être réalisée simultanément avec le semis hydraulique.

Semis

Cette opération est réalisée à l'aide d'un semoir hydraulique (*hydroseeder*) qui permet d'apporter simultanément au sol les semences, les fertilisants et les différents adjuvants nécessaires au bon développement de la couverture végétale.

Les dosages de base des produits sont les suivants :

Produit	1 ^{er} passage	2 ^e passage
Mélange de semences	90 kg/ha	30 kg/ha
Engrais minéral 17.17.17	250 kg/ha	200 kg/ha
Engrais minéral 0.32.16	300 à 500 kg/ha	
Engrais organique	1 000 à 2 000 kg/ha	1 000 kg/ha
Cellulose	300 kg/ha	
Mulch	1 000 à 1 500 kg/ha	500 kg/ha
Colloïde	60 à 100 kg/ha	60 kg/ha

[...]

5. Entretien, Réception, Garantie

5.1. Entretien : modalités et durée

Plantations

L'entretien des plantations est inclus au présent marché pour une durée d'un an. Il prend effet au constat de fin de travaux de plantation et prend fin au constat d'achèvement des travaux de plantation.

Il comprend :

- un à deux arrosages supplémentaires au cours des trois premiers mois ;
- le désherbage éventuel au pied des végétaux ;
- la fertilisation d'entretien (nouvel apport de matière organique et d'engrais minéral), qui sera apportée manuellement sur l'ensemble des surfaces traitées.

Semis hydrauliques

Une visite technique pour apprécier le recouvrement des surfaces semées devra être réalisée au plus tard onze mois après le premier semis, en présence du maître d'œuvre. D'après les résultats constatés, les mélanges pourront être réajustés et le second semis pourra être réalisé.

5.2. Réception, Garantie

La retenue de garantie s'élève à 5 % du montant des travaux.

Plantations

La garantie de reprise des végétaux s'applique pendant un délai d'un an à compter du constat d'achèvement des travaux.

Le constat d'achèvement des travaux de plantation sera réalisé un an après le constat de fin de travaux de plantation et le procès verbal de réception définitive pourra alors être prononcé.

L'entrepreneur garantit la reprise d'au moins 70 % des plants jusqu'à la réception définitive.

L'exécution des travaux de plantation, sans réserves écrites de la part de l'entrepreneur, équivaut à l'acceptation de la garantie de reprise. Celui-ci ne pourra donc arguer ultérieurement d'aucune condition défavorable.

Semis hydrauliques

Le constat d'achèvement des travaux sera réalisé une année après le second passage, soit deux ans après le début des travaux.

Lors du constat d'achèvement des travaux de revégétalisation, le résultat peut être jugé insatisfaisant par le conducteur d'opération (mauvaise levée des espèces, recouvrement hétérogène...). Dans ce cas et seulement si ce mauvais résultat provient effectivement d'un défaut d'application ou de qualité des fournitures, et non pas de conditions extérieures exceptionnelles de type climatique par exemple, l'entrepreneur s'engage à reprendre les zones jugées non satisfaisantes. Le procès verbal de réception définitive des travaux de revégétalisation ne sera alors prononcé qu'à l'issue de la réception des travaux de reprise.

L'exécution des travaux de semis, sans réserves écrites de la part de l'entrepreneur, équivaut à l'acceptation de la garantie de reprise. Celui-ci ne pourra donc arguer ultérieurement d'aucune condition défavorable.

Annexe 7 – IMPACTS DU CERF SUR LE MAQUIS

Sur les sites miniers où la présence et les impacts du cerf sur la végétation sont avérés (par exemple, Kopéto, Tiébaghi, Méa (Kouaoua), Tomo...), il est recommandé d'utiliser préférentiellement des espèces peu appréciées et naturellement présentes sur le site. Le tableau qui suit permet d'orienter le choix des espèces en fonction des sites et de la pression des cerfs sur le milieu.

Appétence des cerfs pour des espèces des maquis miniers. (D'après Dionisio, 2008)

Espèce	Dans le maquis	Sur zones de plantations
<i>Acacia spirorbis</i>	-	1
<i>Acridocarpus austrocaledonica</i>	-	1
<i>Alphitonia neocaledonica</i>	3	3
<i>Araucaria montana</i>	0	0
<i>Austroboxus carunculatus</i>	-	1
<i>Carpolepis laurifolia</i>	-	1
<i>Casuarina collina</i>	-	2
<i>Cloezia artensis</i>	-	2
<i>Cordia discolor</i>	0	0
<i>Cordyline neocaledonica</i>	3	3
<i>Costularia arundinacea</i>	0	1
<i>Costularia chamaedendron</i>	0	-
<i>Costularia comosa</i>	1	1
<i>Costularia nervosa</i>	1	1
<i>Dodonaea viscosa</i>	-	3
<i>Dracophyllum</i> spp.	0	0
<i>Eriaxis rigida</i>	1	1
<i>Eucarpha deplanchei</i>	0	-
<i>Gahnia sinuosa</i>	2	-
<i>Grevillea exul</i> spp. <i>exul</i>	-	2
<i>Grevillea exul</i> spp. <i>rubiginosa</i>	-	2
<i>Guioa glauca</i> var. <i>vulgaris</i>	0	-
<i>Gymnostoma chamaecyparis</i>	-	0
<i>Gymnostoma deplancheanum</i>	-	2
<i>Gymnostoma poissonianum</i>	-	2
<i>Hibbertia pancheri</i>	1	-
<i>Joinvillea plicata</i>	1	-
<i>Lepidosperma perteres</i>	0	0
<i>Lomandra insularis</i>	2	-
<i>Longetia buxoides</i>	0	2
<i>Machaerina deplanchei</i>	2	2
<i>Metrosideros punctata</i>	0	-
<i>Myodocarpus nervatus</i>	-	3
<i>Nepenthes vieillardii</i>	0	0
<i>Normandia neocaledonica</i>	1	-
<i>Pancheria ferrunginea</i>	1	-
<i>Pittosporum</i> sp.	1	-
<i>Pteridium esculentum</i>	0	-
<i>Sannantha leratii</i>	-	1
<i>Scaevola cylindrica</i>	1	-
<i>Scaevola montana</i>	1	2
<i>Schoenus juvenis</i>	0	0
<i>Schoenus neocaledonicus</i>	3	2
<i>Smilax</i> sp.	0	-
<i>Stenocarpus milnei</i>	0	0
<i>Stenocarpus umbelliferus</i>	-	1
<i>Styphelia</i> sp.	0	0
<i>Tristaniopsis</i> sp.	2	-
<i>Xanthostemon aurantiacus</i>	-	0

0 : pas d'appétence ; 1 : appétence faible ; 2 : appétence moyenne ; 3 : appétence forte ; - : pas d'observation.

Annexe 8 – LISTE DES ESPÈCES UTILISABLES EN REVÉGÉTALISATION DES SITES MINIERES (NON EXHAUSTIVE) ET DONNÉES SYNTHÉTIQUES

Espèce	Sol	Altitude (m)	Distribution	Période de maturation des graines (mois)	Dormance	Traitement	% moyen de germination	1 ^{re} levée - Dernière levée (j)	% graines fertiles	Poids 1000 graines (g)	Type de graine	Conservation (mois)	Durée de culture (mois)	Multiplication	Production de graines	Utilisation	Page
				J F M A M J J A S O N D													
<i>Acridocarpus austroaedeonica</i>	B(E,C)	30-650	L	J F M A M J	ND	aucun	50-90	7-80	100	21-24	Op	-	12-14	g	m	p, sm	290
<i>Agathis ovata</i>	F	150-1100	S,(E)	fmAM j j a s . . .	ND	aucun	80-100	3-7	10-50	100-140	Rp	~4-8	10-15	g	m/f	p	-
<i>Alphitonia neocaledonia</i>	FB	0-1000	L	J F m a . . . o n d	PY	EBx2, sca	90	5-20	50-90	22-23	0	48*	12	g	a	p,sh,sm	330
<i>Alstonia balansae</i>	F,A,G	0-350	L	F.M. . . .	ND	aucun	85	8-27	100	2,9	Op	15*	-	g	m	p,sm	-
<i>Araucaria montana</i>	F	>800(300)	CN	J F M	ND	aucun	90	8-35	10-30	400	R/I	~4-8	15-20	g	m/a	p	236
<i>Araucaria rulei</i>	G	100-1100	aL	J F M	ND	aucun	80	7-32	10-30	400	R/I	~4-8	15-20	g	m/a	p	236
<i>Archidendrops lenisifolia</i>	A, B	0-500(700)	NO	-	ND?	(mérite d'être étudiée)								g	f	p	-
<i>Archidendrops macradenia</i>	E, C, B	0-800	S	j . . . j a s o n d	ND?	(mérite d'être étudiée)								g	f	p	-
<i>Archidendrops paivana</i>	B	0-500	NO	j f m . . .	ND	aucun	-	3-8	(mérite d'être étudiée)				~6-8	g	f	p	-
<i>Austrobuscus caranaculatus</i>	FB	0-1100	L	A S O N D	ND	aucun	80-100	8-30	100	50-72	Op/I	8-16	10-14	g	m	p, sm	316
<i>Baloghia drimiflora</i>	B	0-500	NO	J F M a o N D	PD?	GA3	80	30-57	-	-	-	-	-	g	m?	p	-
<i>Carpolepis laurifolia</i> var. <i>demonstrans</i>	F	350-1500	L	A M J J a s	ND	aucun	100	2-8	5-10	0,1-0,5	0	42	12-14	g, b	m/a	p, sm, sh	298
<i>Cerberopsis candelabra*</i>	C	0-500	S	J F	D	ND	aucun	55-75	5-21	-	Op	~12	-	g	f	p	-
<i>Cerberopsis obtusifolia</i>	B	< 500	NO	J F m	D	ND?	(mérite d'être étudiée)							g	-	p	-
<i>Cloezia arvensis</i> var. <i>arvensis</i>	F,H	10-1000	L	M J J A S O N	ND	aucun	10-30	10-30	<15	0,3-0,5	0	42*	10-12	g, b	m	p, sm	300
<i>Cloezia buxifolia</i>	H	200-800	S	toute l'année	ND?	(mérite d'être étudiée)					Op			g, b	-	-	-
<i>Cloezia floribunda</i>	F,B,H	< 900	S, E	. . m a m . . .	ND	aucun	50-60	3-7	5-10	-	0	30	-	g	m	p	-
<i>Codia discolor</i>	C	200-1000	S, O, E	j f m . . . n d	ND	aucun	<10	15-25	<10	3,0	-	-	12-15	g	m	p	-
<i>Codia montana</i>	F, B	0-800	N, C, O	j f m . . . s o n d	ND?	-	-	-	<10	5,8	-	-	-	g	m	p	-
<i>Codia spatulata</i>	F, B	100-1500	S, O, N, C	j f m a m j j . . . n d	ND?	(mérite d'être étudiée)								g	m	p	-
<i>Comptonella drupacea</i>	F	100-1500	L	toute l'année	PY+PMD?	sca	59	25-700	100	15,7	-	-	12-15	g	m	p	-
<i>Costularia arundinacea</i>	F	50-1500	L	J F M a	d	ND	aucun	80-90	~100	0,37	0	18*	12-14	g	a	p,sh,sm	258
<i>Costularia comosa</i>	F,B,H	50-1000	L	J F M a	d	ND	aucun	80-90	~100	0,2-0,3	0	42*	12-14	g	a	p,sh,sm	258
<i>Costularia nervosa</i>	F	400-1200	S, NO	J F M a	d	MD?	aucun	20-60	~100	1,9-3,5	0	42*	12-14	g	a	p,sh,sm	258
<i>Costularia pubescens</i>	F	200-1000	S	J F M a	d	ND	aucun	80-90	~100	0,2-0,3	0	18*	12-14	g	a	p,sh,sm	258
<i>Cunonia macrophylla</i>	C, G	200-1150	S	J F M A M J	ND	aucun	40-60	12-35	20-40	0,5-0,7	0	12*	12-15	g, (b)	m	p	250
<i>Gyathopsis albicans</i>	B, E	50-1000	L	J J A S O N D	PD/MPD?	GA3	19	46-225	100	3,8	Op	-	-	g	m	p	-
<i>Gyathopsis floribunda</i>	E?	50-1000	C, N	j f m a m . . .	PD/MPD?	(mérite d'être étudiée)								-	m/a	p	-
<i>Dodonaea viscosa</i>	B, F	< 500	L	A S O N	PY	EB	70-80	5-150	50	4-7	0	30*	7-10	g	m	p,sh,sm	334
<i>Eucarpia deplanchei</i>	E, C	100-1200	aL	j f m . . .	ND	(mérite d'être étudiée)					0?			g, b	f	p	-

Suite du tableau page suivante...

Gahnia	B,A	50-1000	L	toute l'année	PV	sca	10-30	12-35	100	9,5	0	g	m	p,sm,sh	
<i>aspera</i>	B,A	50-1000	L	toute l'année	PV	sca	10-30	12-35	100	9,5	0	g	m	p,sm,sh	
<i>Geissois</i>	F,B	30-700	S	J F M A m j	ND	aucun	90	4-15	<40	1,2-1,9	0	42*	12-14	g, b m p, sm	
<i>Grevillea exul</i>	B,F	0-1000	L	J F M a m j	D	aucun	80-100	10-30	80-90	10-13	0	48*	10-14	g, b m p, sm	
<i>Grevillea exul</i> ssp. <i>exul</i>	F	0-1400	S	J F M a m j	D	aucun	80-100	10-30	80-90	14	0	48*	10-12	g, b m p, sm	
<i>Grevillea gillivrayi</i>	B,G	0-1000	C,S	J F M a m j	D	aucun	80-100	10-30	80-90	17	0	48*	10-12	g, b m p, sm	
<i>Grevillea meisneri</i>	B	0-650	NO	J F M a m j	D	aucun	80-100	10-30	80-90	10-17	Op	-	10-12	g, b m p, sm	
<i>Gulua glauca</i> var. <i>vulgaris</i>	F	0-1200	L	j f s o n d	PY?	aucun	20	30-44	100	62	-	-	g	m p, sm	
<i>Gymnostoma chamaecyparis</i>	B,A	0-600	C,NO	J F	D	aucun	40-50	4-10	100	3,4	0/1?	15	12-18	g a p,sh,sm	
<i>Gymnostoma G,(C)</i>	G,(C)	100-900	S	J F M a m j	D	aucun	40-50	3-14	100	2,7-5,7	0/1?	15	12-18	g a p,sh,sm	
<i>Gymnostoma glaucescens</i>	F,B	100-1000	S,O,E	j f m	D	ND?	aucun?	-	100?	-	0/1?	-	g	m p,sm	
<i>Gymnostoma intermedium</i>	F	>500	S,O,E	j f m	D	ND?	aucun?	-	100?	-	0/1?	-	g	m/a p,sm	
<i>Gymnostoma leucadon</i>	A	<500	S	j f m	D	ND?	aucun?	-	100?	-	0/1?	-	g	m p,sm	
<i>Gymnostoma nodiflorum</i>	A	<500	L(-S)	j f m	D	ND?	aucun?	-	100?	-	0/1?	-	g	m p,sm	
<i>Gymnostoma palissotianum</i>	E	200-700	L	J F M a	s o n d	ND	aucun	20	4-10	100	3,2	0/1?	15	12-18	g m/a p,sh,sm
<i>Gymnostoma alligena</i>	E	600-1200	aL	J F m	d MD/MPD?	(mérite d'être étudiée)	-	-	-	-	-	-	g, b m p	-	
<i>Hibbertia depiancheana</i>	B,E?	<700	NO	J F m	d MD/MPD?	(mérite d'être étudiée)	-	-	-	-	-	-	g, b m p	-	
<i>Hibbertia luens</i>	F	0-1000	L	J F m	d MD/MPD?	EF	51*	83-251*	100	12-16	Op	30*	12-14	g, b m p, sm	
<i>Hibbertia pancheri</i>	F	0-1100	L	J F m	d MD/MPD?	EF+GA3	54	50-150	100	14-18	Op	30*	12-14	g, b m/a p, sm	
<i>Hibbertia tontoutensis</i>	E,C	20-750	S	j f m a m	d MD/MPD?	(mérite d'être étudiée)	-	-	-	-	-	-	g, b m p	-	
<i>Joinvillea plicata</i>	C	200-1300	L	J F M	s o n d	MPD?	aucun	50-70	30-150	100	2-4	Op	24*	12-14	g m p,sm
<i>Lepidosperma perteres</i>	E,C	100-1400	L	j a s o n	-	-	-	-	-	2,5-3,7	Op	-	~6-9	d m p	
<i>Lomanidia insularis</i>	G,(C)	100-1000	S,O,N	. . . a m j j a s o . . .	PY/MPD?	aucun	50-80	50-200	100	24,6	Op	-	~18	g f p	
<i>Longetia buxoides</i>	F,B	20-900	L	J F m	o n d	ND	aucun	60-80	10-35	100	24-26	Op/l	12	12-14	g, b m p, sm
<i>Machaerina depianchei</i>	F,A,B	0-1500	L	J F M a m j	n d	PV(+MPD?)	Sca	20-80	20-500	100	3-7	0	48*	7-10	g a p,sh,sm
<i>Melaieuca pancheri</i>	C	<400	S	j f m a m	n d	ND	aucun	10	10-15	10	0,05	0	30*	-	g m/a p, sm
<i>Metrosideros nitida</i>	C	<900?	S,C,E	f m a s . . .	ND?	(mérite d'être étudiée)	-	-	-	-	-	Op	g, b	-	
<i>Metrosideros punctata</i>	E	500-1200	aL	étalé ?	ND?	(mérite d'être étudiée)	-	-	-	-	-	Op	g, b	-	
<i>Myoacarpus crassifolius</i>	F(-H)	100-1150	S,O	. . . . . m	ND?	-	-	-	-	-	lp/0?	-	g	m/a?
<i>Myoacarpus fraxinifolius</i>	C	150-1100	S,C	F M a m j	j	ND	aucun	80	12-30	100	8	lp/0?	18	12-14	g a p,sm
<i>Myoacarpus involucreus</i>	C,A,B	200-1200	S	j f m	ND?	-	-	-	-	-	-	lp/0?	-	g a p,sm	
<i>Myoacarpus nervatus</i>	F	450-1500	E,O	j f m	ND	aucun	50-60	15-30	90-100	5,5	lp/0?	18	12-14	g m/a p,sm	
<i>Myrtastrum rufo-punctatum</i>	B,E,C	100-1300	S,aL	a m j j a s o n d	ND?	aucun	40-80	20-80	100	0,45	Op	16*	12-14	g,(b) m/a p, sm	
<i>Normandia neocaledonia</i>	E,B	100-1300	L	j s o n d	ND	aucun	<20	20-45	-	-	-	-	g, b f	p	
<i>Oxera nerifolia</i>	F(-G?)	100-850	L	j a s o n d	ND	aucun	10	15-30	-	-	-	-	g, b f	p	
<i>Pancheria alaternoides</i>	E,C,B,H	100-1000	S	j F M a m j n d	ND	aucun	70-90	7-20	15	0,2-0,5	0	30*	16-18	g a p, sm	
<i>Pancheria billardieri</i>	F	100-950	L	j f m a m j j n d	ND	aucun	70-90	5-20	70	0,6	0	18	16-18	g m p, sm	

Suite du tableau page suivante...

Espèce	Sol	Altitude (m)	Distribution	Période de maturation des graines (mois)	Dormance	Traitement	% moyen de germination	Première levée - Dernière levée (j)	% graines fertiles	Poids 1000 graines (g)	Type de graine	Conservation (mois)	Durée de culture (mois)	Multiplication	Production de graines	Utilisation	Page	
																		J F M A M J J A S O N D
<i>Panicum ferrugineum</i>	E, B	100-900	S	...	ND?	-	-	15-40	10-20	2-4	Op	-	-	g	f/m	p	-	
<i>Peripeterygia marginata</i>	F, G, B	0-1050	L	j f M A M J j	ND	aucun	90-100	15-40	10-20	2-4	Op	-	12-14	g, b	f/m	p	246	
<i>Phyllanthus aeneus</i>	A, C, E, H	100-1000	L	j . . . . .	...	(mérite d'être étudiée)	-	-	-	-	Op	-	-	g, (b)	f ?	p	-
<i>Phyllanthus montouzieri</i>	A, B	100-800	NO	j f m . . . . .	...	(mérite d'être étudiée)	-	-	-	-	Op	-	-	g, (b)	f	p	-
<i>Polyscias pancheri</i>	G, (C)	150-1000	S	j f m a	nd	PD?	-	-	-	12	0?	-	-	g	f/m	p	-	
<i>Psychothria calorhammus</i>	B	< 300	N, O	. . . . .	...	...	-	-	-	-	0?	-	-	g	f/m	p	-
<i>Rauwolfia semperlorens</i>	B, F	0-950	L(S,C)	j f m . . . . .	...	(mérite d'être étudiée)	50-60	8-30	70	0,013	0	32*	10-12	g, b	a	p, sm, sh	304
<i>Scannantha leratii</i>	F	0-1000	S	J F M a m j	ND	aucun	45	70-160	100	10-30	Op	30*	10-12	g, b	m/a	p, sm, sh	282	
<i>Scaevola cylindrica</i>	F, B	200-1100	L	. f m a m j	PD?	TEZm	15*	20*	100	10-30	Op	-	10-12	g, b	m	p, sm	282	
<i>Scaevola montana</i>	F, B	50-800	L	J F	ND	PD?	80*, EF, GA	15-50	100	0,4-0,6	0	42*	14-16	g	m/a	p, sm, sh	266	
<i>Schoenus juvenis</i>	E, C	300-1200	S, C, (NO)	J F M a m	nd	ND	aucun	60-80	100	0,5-0,9	0	30*	14-16	g	m	p, sm, sh	266	
<i>Schoenus neocaledonicus</i>	F, B	50-1200	S, C, (NO)	J F M a	nd	ND	aucun	80-90	100	200-300	Op	-	-	g	f/m	p	274	
<i>Serianthes calycina</i>	E, C, B?	0-200	NO	J F M a	nd	PY?	EBx2?	-	-	240-330	Op	26*	8-10	g	m	p, sm	274	
<i>Serianthes sachetae</i>	F (C?)	0-400	L	J F M a	nd	PY	EBx2	95	4-18	-	-	-	-	g	f	p	-	
<i>Soulamea muelleri</i>	B, A	< 400	NO	j f m	nd	PY?	Sca	95	6-15	-	-	-	-	g	f	p	-	
<i>Soulamea pancheri</i>	B, E	100-1100	S, O, E	J F M a m	ND	PY?	Sca	100	5-19	-	-	-	14-18	g	f	p	-	
<i>Stenocarpus milnei</i>	F, B	0-1000	L	j f j j a s O N d	ND	aucun	80-100	7-20	100	10	0	42*	12	g	m/a	p, sm, sh	326	
<i>Stenocarpus umbelliferus</i>	F, B	0-1300	L	J F M a m j J a s	ND	aucun	80-100	5-18	100	12	0	42*	12	g	m/a	p, sm, sh	326	
<i>Storckia pancheri ssp. aouta</i>	F, B	< 500	S, C, N	J F M A M	PY	EC60	5-80	4-25	-	150	-	-	9-12	g, b, m	m/a	p, sm	278	
<i>Storckia pancheri ssp. pancheri</i>	B, A	< 600	N, O	j f m a m j	nd	PY	EC60	5-80	4-25	150	-	-	9-12	g, b, m	m/a	p, sm	278	
<i>Styphelia cymbulata</i>	F, B?	0-1000	L	J F M A M j	MD	aucun	62*	83-250*	95	2,8	-	-	-	g, (b)	m/a	p, sm	-	
<i>Styphelia veillonii</i>	F	< 500	S, O, C	j f m a m j j a s	MD?	-	-	-	100	3,4	-	-	-	g	m/a	p, sm	-	
<i>Tristaniaopsis calobulus</i>	E, C, G, B?	10-1100	L	J F M a	a S O N D	ND	aucun	50-80	5-15	5-20	1,3	0	12*	12-14	g, (b)	m	p, sm	306
<i>Tristaniaopsis glauca</i>	E, C, G	50-(1000)	S	m a m j J a s o	ND	aucun	70-95	5-10	5-20	0,3-0,6	0	13*	12-14	g, (b)	m/a	p, sm, sh	306	
<i>Tristaniaopsis guilainii</i>	E, C, G	140-1200	L	j j j a s O N d	ND	aucun	30-40	4-15	5-20	0,6	Op	-	12-14	g	m/a	p, sm, sh	306	
<i>Uromyrtus emarginata</i>	E, C, G	100-1100	S, O	. . . M A M	ND?	aucun	72	40-200	-	-	0?	-	-	g	m	p, sm	-	
<i>Xanthostemon aurantiacus</i>	E, C, G	30-700	S	. . . . .	J J A S O N D	ND	aucun	60-90	5-40	1,7-2,1	0	36*	10-12	g, b	m	p, sm	310
<i>Xanthostemon francii</i>	C, G	5-1400	Tontouta	. F M	ND	aucun	50-90	6-20	5-30	2,3-3,0	0	24*	12-14	g	f/m	p, sm	310	
<i>Xanthostemon gugelii</i>	E, C, A	20-800	Poro-Car	j f	o N D	ND	aucun	50-95	6-15	3,6	0	14*	12-14	g	m	p, sm	310	
<i>Xanthostemon multiflorus</i>	E, B?	0-600	L	. . . . .	J A S O N .	ND	aucun	80-90	5-15	2,2-2,5	Op	-	12-14	g	m	p, sm	310
<i>Xanthostemon ruber</i>	E, B?	30-850	S	J F m	o N D	ND	aucun	90	3-20	3,6	Op	12*	12-14	g	m	p, sm	310	

Légende du tableau

Sol (sur lequel l'espèce se retrouve naturellement le plus souvent) :

A : sol ferrallitique sur alluvions ; B : sol brun hypermagnésien ;
C : sol ferrallitique colluvial (bas de pente) ; E : sol ferrallitique érodé sur pente ;
G : sol ferrallitique gravillonnaire ou cuirassé ; H : sol ferrallitique hydromorphe ;
F : ferrallitique (général).

Distribution : L : large (ensemble des massifs miniers) ; aL : assez large ;
C : centre ; E : massifs de la côte Est ;
O : massifs de la côte Ouest ; N : massifs du Nord ;
S : massifs du Sud.

Période de maturation des graines : en majuscules mois principal, en minuscules mois possible, «...» : autres mois possibles. Données moyennes, pouvant varier selon la localité, l'altitude et l'année.

Dormances : MD : morphologique ; MPD : morphophysiological ;
ND : Non dormante ; PD : physiologique ;
PY : physique ; ? : probable.

Traitements : traitement appliqué correspondant aux résultats de germination obtenus.
EB : eau bouillante ; EC60 : eau chaude (60 °C) ;
EF : eau fumigée (24 h) ; GA3 : acide gibbérilique (0,3 g/L 24 h) ;
Sca : scarification ; TE2m : trempage à l'eau (2 mois).

Germination : test réalisé avec des graines triées (visuellement), d'aspect fertile (embryon bien formé...)
* : Étude en cours, non terminée.

Première levée / dernière levée : durées (en jours) pour observer la première et la dernière germination (conditions : chambre de culture, 12 h à 29 °C + éclairage / 12 h à 22 °C sans éclairage).
* Étude en cours, non terminée.

Poids de 1 000 graines : après tri des graines fertiles.

% graines fertiles : sur un lot non trié, % de graines d'aspect fertile, comparé aux graines d'aspect non fertile (graines vides, piquées, mal formées et matières inertes).

Type graine : O : orthodoxe ; Op : orthodoxe probable ;
I : intermédiaire ; Ip : probablement intermédiaire, orthodoxie possible ;
R : récalcitrante ; Rp : récalcitrante possible.

Conservation : durée de conservation sans perte de viabilité observée (à 4 °C en récipient hermétique).
(* : durée pouvant être plus longue, pas de données au-delà).

Durée culture : en pépinière, en alvéoles d'environ 250 ml, avec un substrat mélangé (tourbe du commerce, engrais NPK, sol ferrallitique environ 30 %, pumice).

Multiplication : voies de multiplication possibles : g : graine ; (b) : bouturage assez difficile ;
b : bouturage ; d : division de touffes ; m : marcottage.

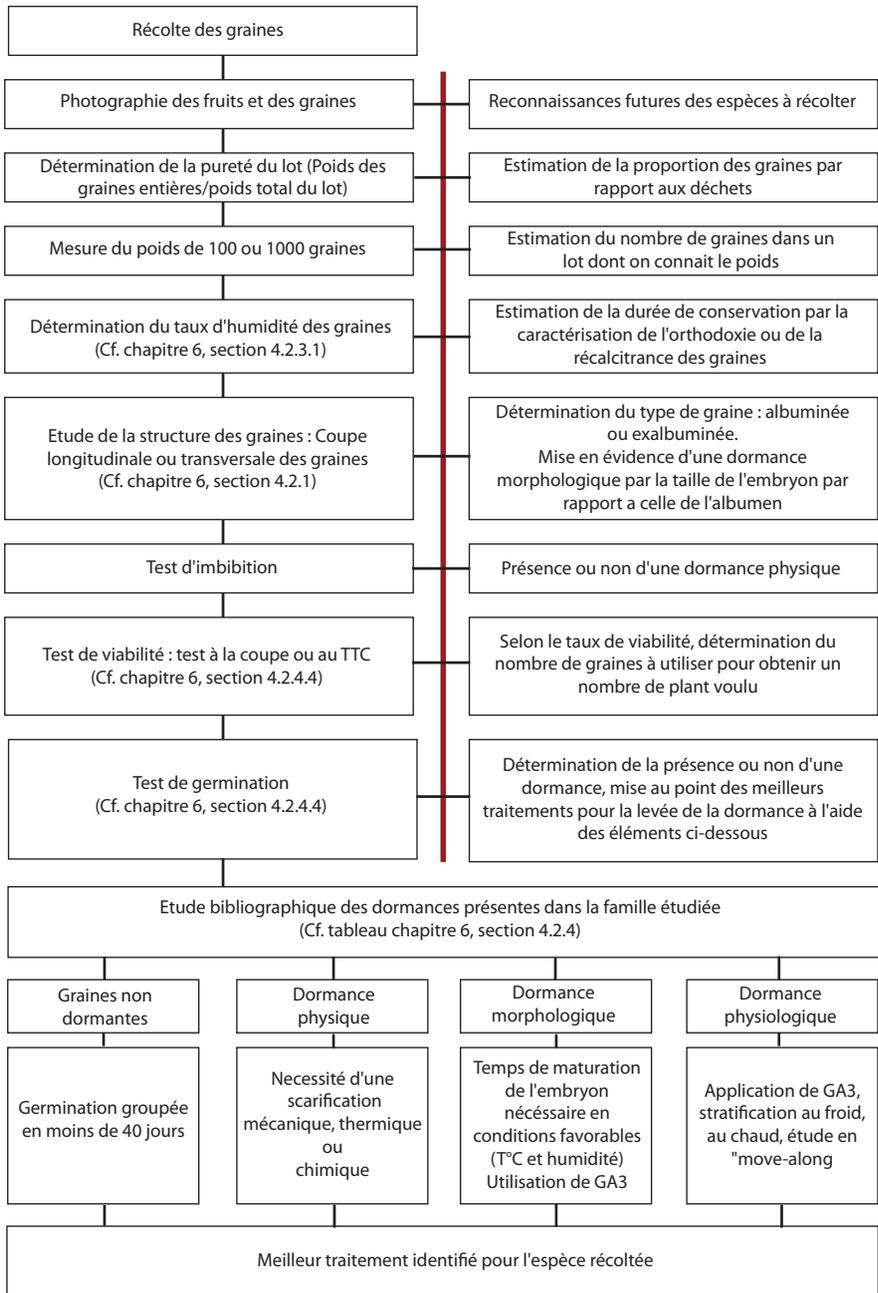
Production de graines (fertiles) : a : abondante ; m : moyenne ; f : faible.
(Cas observés les plus fréquents.)

Utilisation possible : p : plantation ;
sh : semis hydraulique ; sm : semis manuel.

* *Cerberiopsis candelabra* est une espèce monocarpique (l'arbre ne fleurit qu'une seule fois, puis meurt ; ce qui peut survenir après plusieurs années de croissance).

- : Données insuffisantes, non disponibles ou en cours d'étude.

Annexe 9 – SCHEMA RÉCAPITULATIF DES OPÉRATIONS À ENTREPRENDRE POUR UN LOT DE GRAINES D'UNE NOUVELLE ESPÈCE



BIBLIOGRAPHIE

- Aerts R., Chatain P.S. 2000. The mineral nutrient of wild plants revisited : a re-evaluation of processes and patterns. *Adv. Ecol. Res.* 30 : 1-67.
- Agosti D., Alonso L.E. 2000. The ALL protocol. A standard protocol for the collection of ground-dwelling ants : 204-206. In : Agosti et al. (eds.) : *Ants. Standard methods for measuring and monitoring biodiversity.* Smithsonian Institution Press, Washington.
- Agren J., Elmqvist T., Tunlid A. 1986. Pollination by deceit, floral sex ratios and seed set in dioecious *Rubus chamaemorus* L. *Oecologia* 70 : 332-338.
- Allee W. C. 1931. *Animal aggregations, a study in general sociology.* Univ. Chicago Press, Chicago.
- Allee W. C. 1941. Integration of problems concerning protozoan populations with those of general biology. *Am. Nat.* 75 : 473-487.
- Amir H., Lagrange A., 2008. Arbuscular mycorrhizal fungi from New Caledonian ultramafic soil improve the tolerance to nickel of endemic plant species. Sixth International Conference on Serpentine Ecology, 16-23 juin, Bar Harbor, USA.
- Amir H., Pineau R. 2003a. Relationship between extractable Ni, Co and others metals and microbiological characteristics of different ultramafic soils from New Caledonia. *Aust. J. Soil Res.* 41 : 1-14.
- Amir H., Pineau R. 2003b. Release of Ni and Co by microbial activity in New Caledonian ultramafic soils. *Can. J. Microbiol.* 49 : 288-293.
- Amir H., Pineau R., Violette Z. 1997. Premiers résultats sur les endomycorhizes des plantes de maquis miniers de Nouvelle-Calédonie. In : *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (Eds Jaffré T., Reeves R. D., Becquer T), pp.75-85. Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa.
- Amir H., Barré N., Boulègue H., Colin F., Dreyfus B., Marini J-F., Mennesson T., Pelletier B., Quantin C., Pineau R., Tassin J. 2003. Résumé des travaux du colloque et recommandations. Colloque Préservation et restauration écologique en milieu tropical minier, juillet 2003, Nouméa.
- Amir H., Perrier N., Rigault F., Jaffré T. 2007. Relationships between Ni-hyperaccumulation and mycorrhizal status of different endemic plant species from New Caledonian ultramafic soils. *Plant Soil* 293 : 23-35.
- Amir H., Jasper D.A., Abbott L.K. 2008. Tolerance and induction of tolerance to Ni of arbuscular mycorrhizal fungi from New Caledonian ultramafic soils. *Mycorrhiza* 19 : 1-6
- Andrianoelina O., Favreau B., Ramamonjisoa L., Bouvet J-M. 2009. Small effect of fragmentation detected by chloroplast and nuclear microsatellites on the genetic diversity of *Dalbergia monticola* Bosser & R.Rabev., an endangered tree species of the eastern forest of Madagascar. *Ann. Bot.* 104 (6) : 1231-1242.
- Arcas X. 2008. Caractérisation des dynamiques germinatives d'espèces indigènes de maquis minier de Nouvelle-Calédonie : étude comparative en conditions contrôlées et sur site minier avec différents déblais. Stage IAC, Mémoire Master Gestion de la biodiversité, Univ. Paul Sabatier, Toulouse, août 2008, 73 p.
- Armstrong J.A. 1979. Biotic pollinisation mechanisms in the Australian flora-a review. *New Zeal. J. Bot.* 467-508.
- Asher C.J., Bell L.C. (Eds.). 1999. *Proceedings of the Workshop on Indicators of Ecosystem Rehabilitation Success.* Melbourne, 23-24 October 1998. (Australian Centre for Mining Environmental Research : Brisbane).
- Aubreville A., Le Roy J.F., Mac Kee H., Morat P. 1967-2006. *Flore de la Nouvelle-Calédonie et dépendances.* Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris. 25 tomes.
- Bà A.M. 1990. Contribution à l'étude de la symbiose ectomycorhizienne chez deux essences forestières d'Afrique intertropicale : *Azelia africana* Sm. et *Uapaca guineensis* Müll.Arg. Thèse, USTL, Montpellier, France, 193 p.
- Bailly Y. 1986. Étude de la germination et de la conservation des semences d'essences forestières d'intérêt économique. Rapport de convention ORSTOM/CTFT. 429 p.
- Bailly C., Benamar A., Corbineaue F., Côme D. 1997. Changes in superoxide dismutase, catalase and glutathione reductase activities in sunflower seeds during accelerated ageing and subsequent priming. In : *Basic and Applied Aspects of Seed Biology*, (Eds : Ellis R. H., Black M., Murdoch A. J., Hong T. D.) Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp 665-672.
- Baker A.J.M. 1981. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *J. Plant Nut.* 3 : 643-654
- Baker A.J.M., Proctor J., Reeves R.D. 1992. *The Vegetation of Ultramafic (Serpentine) Soils* Intercept Ltd. Andover, U.K.
- Balkwill K. 2001. Serpentine ecology. *Proceedings of the third International Conference on Serpentine Ecology.* South Afr. J. Sci. 97 (part 2 special issue).
- Baroni Urbani C., Wilson E.O., 1987. The fossil members of the ant tribe Leptomyrmecini (Hymenoptera, Formicidae). *Psyche* 94 : 1-8.
- Barrabé L. 2005. Application d'une méthode d'échantillonnage floristique aux forêts denses humides de la Nouvelle-Calédonie. Mémoire ingénieur, IRD/INA Paris-Grignon.
- Barrett S. C. H. 1998. The evolution of mating strategies in flowering plants. *Trends Plant Sci.* 3 : 335-341.
- Barrière R., Dagostini G., Rigault F., Munzinger J. 2007. Caractérisation et cartographie de la végétation des milieux miniers de la côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie. Rapport de Convention IRD/ DDEE Province Nord. 55 p+ cartes en annexe.
- Barrière R., Nigote W., Rigault F., Dagostini G., Munzinger J. 2008. Caractérisation et cartographie de la végétation des milieux miniers de la côte Nord Est de la Nouvelle-Calédonie. Rapport de Convention IRD/ DDEE Province Nord. 38 p + cartes en annexe.
- Bartish I.V., Swenson U.V., Munzinger J., Anderberg A.A. 2005. Phylogenetic relationships among New Caledonian Sapotaceae (Ericales) : molecular evidence for genetic polyphyly and repeated dispersal. *Am. J. Bot.* 92 : 667-673.
- Baskin C., Baskin J. 1998. *Seeds, Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination.* Academic Press.
- Baskin J., Baskin C. 2004. A classification system for seed dormancy. *Seed Sci. Res.* 14 : 1-6.

- Baskin J., Davis B. H., Baskin C., Gleason S. M., Cordell S. 2004. Physical dormancy in seeds of *Dodonaea viscosa* (Sapindales, Sapindaceae) from Hawaii. *Seed Sci. Res.* 14 : 81-90.
- Bauer A.M., De Vaney K.D. 1987. Aspects of diet and habitat use in some New Caledonian lizards. *Amphibia-Reptilia* 8 : 349-364.
- Bauer A.M., Sadler R.A. 2000. The Herpetofauna of New Caledonia. Society for the Study of Amphibians and Reptiles. Ithaca, New York, USA, 310 p.
- Becher M., Talke I.N., Krall L., Krämer U. 2004. Cross-species microarray transcript profiling reveals high constitutive expression of metal homeostasis genes in shoot of the zinc hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Plant J.* 37 : 251-268.
- Becquer T., Bourdon E., Pétard J. 1995a. Disponibilité du nickel le long d'une toposéquence de sol développé sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. *C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa*, 321 : 585-592.
- Becquer T., Bourdon E., L'Huillier L. 1995b. Disponibilité du nickel dans les sols développés sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. 3^e Conférence Internationale sur la Biogéochimie des Éléments Traces, Ministère de l'Environnement, 15-19 mai 1995, Paris.
- Becquer T., Bourdon E., L'Huillier L. 1997. Mobilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie. In : *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (éds Jaffré T., Reeves R. D., Becquer Th.), pp.57-63. Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa.
- Becquer T., Bourdon E., L'Huillier L., Quantin P., Herbillon A. 1998. Sources du nickel biodisponible dans les sols ferrallitiques ferritiques du sud de la Nouvelle-Calédonie. 16^e Congrès Mondial de la Science du Sol, 20-26 août 1998, Montpellier.
- Becquer T., Quantin C., Sicot M., Boudot J.P. 2003. Chromium availability in ultramafic soils from New-Caledonia. *Sci. Total Environ.* 301 : 251-261.
- Bellefontaine R., Sabir M., Kokou K., Guinko S., Saadou M., Ichaou A., Chaar H., Battono B.A., Saley K., Jhonn L. 2003. Revégétalisation, une quatrième voie : la propagation végétative naturelle. In : *Actes du XII^e Congrès forestier mondial. La forêt, source de vie*, Québec, Canada.
- Bewley J. D. 1997. Seed germination and dormancy. *Plant Cell* 9 : 1055-1066.
- Bird E.C., Dubois J.P., Iltis J.A. 1984. The impact of opencast mining on the rivers and coast of New Caledonia. The United Nations University. 53 p. Tokyo.
- Black M., Bewley D., Halmer P. 2006. *The Encyclopedia of Seeds : Science, Technology and Uses*. Ed. CAB.
- Boissenin M., Gomez S., Barré N., Chambrey C., Tassin J. 2006. Interactions entre l'aviafaune frugivore et la flore ligneuse en forêt sèche de Nouvelle-Calédonie. *Rapport Programme Forêt Sèche n°3/2006*.
- Bolton B. 1995. A new general catalogue of the ants of the World (Hymenoptera : Formicidae). Harvard University Press, Cambridge.
- Bonello P., Bruns T.D., Gardes M. 1998. Genetic structure of a natural population of the ectomycorrhizal fungus *Suillus pungens*. *New Phytol.* 138 : 533-542.
- Bonzon B., L'Huillier L., Edighoffer S., Bourdon E., Becquer T., Laubreaux P. 1995. Facteurs de la fertilité et de mise en valeur des sols ferrallitiques du Sud de la Grande Terre. Historique et résultats des recherches. Questions pour l'avenir. Nouméa, ORSTOM. *Conv. Sci. Vie; Agropédo.* 31 : 32 p.
- Bonzon B., Edighoffer S., L'Huillier L., Bourdon E., Becquer T. 1997. Facteurs de fertilité et conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Grande Terre : problématique de leur étude. In : *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (éds Jaffré T., Reeves R. D., Becquer T.), pp.39-47. Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa.
- Bonzon B., Dupont S., L'Huillier L. 2001. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Fertilisations phosphatées et toxicités métalliques. Synthèse des résultats. Nouméa : ORSTOM. *Conv. ; Sci. Vie ; Agropédo.*, 36 : 61 p.
- Bottin L. 2006. Déterminants de la variation moléculaire et phénotypique d'une espèce forestière en milieu insulaire : cas de *Santalum austrocaledonicum* en Nouvelle-Calédonie. Thèse, Univ. Montpellier II, 132 p + annexes.
- Bottin L., Verhaegen D., Tassin J., Olivier I., Vaillant A., Bouvet J.M. 2005. Genetic diversity and population structure of an insular tree, *Santalum austrocaledonicum* in New Caledonian archipelago. *Mol. Ecol.* 14 : 1979-1989.
- Bourdon E., Becquer T., Edighoffer S., Bonzon B. 1997. Caractérisation du comportement physique de deux types de faciès de sol ferrallitiques issus de roches ultramafiques. In : *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (éds Jaffré T., Reeves R. D., Becquer T.), pp.49-55. Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa.
- Boutherin D., Bron G. 2002. Multiplication des plantes horticoles. Ed. Tec & Doc. 2^e édition. 248 p.
- Boyd R.S. 2002. Does elevated body Ni concentration protect insects against pathogens ? A test using *Melanotrichus boydi* (Heteroptera : Miridae). *Am. Midl. Nat.* 147 (2) : 225-236.
- Boyd R.S. 2009. High nickel insects and nickel hyperaccumulator plants : a review. *Insect Sci.* 16 : 19-31
- Boyd R.S., Jaffré T. 2009. Elemental concentration of eleven New Caledonian plant species from serpentine soils : Elemental correlations and leaf age effects. *Northeast. Nat.* 16 (5) : 93-110.
- Boyd R.S., Martens S.N. 1992. The raison d'être for metal hyperaccumulation by plants. pp 279-289. In : *The vegetation of ultramafic (serpentine) soils* (Baker A.J.M., Proctor J., Reeves R.D., eds). Intercept, Andover, UK.
- Boyd R.S., Baker A.J.M., Proctor J. 2004. Ultramafic rocks : their soils, vegetation and fauna. *Proceedings of the 4th International Conference on Serpentine Ecology. Science reviews 2000 Ltd.* St Albans, Herts, UK.
- Boyd R.S., Wall M., Jaffré T. 2006. Nickel levels in arthropods associated with Ni hyperaccumulator plants from an ultramafic site in New Caledonia. *Insect Sci.* 13 : 271-277.
- Bradshaw A. D. 1997a. Restoration after mining for metals - an ecological view. In : *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (éds T. Jaffré, R. D. Reeves, Th Becquer), pp.239-248. Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa.

- Bradshaw A. D. 1997b. Restoration of mined lands – using natural processes. *Ecol. Eng.* 8 : 255-269.
- Brady K.U., Kruckeberg A.R. and Bradshaw Jr. H.D. 2005. Evolutionary ecology of plant adaptation to serpentine soils. *Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 36 : 243-266.
- Brinon L.C. 2009. Répartition, écologie et multiplication de deux espèces de *Xanthostemon*, pour la conservation des espèces et la restauration des sites miniers. Rapport stage IAC, 2^e année Deust RGE, Univ. Nouvelle-Calédonie, 41 p.
- Brooks R.R. 1987. Serpentine and its vegetation : a multi-disciplinary approach. Dioscorides Press, Portland Oregon.
- Brooks R.R., Lee J., Reeves R.D., Jaffré T. 1977. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *J. Geochem. Explor.* 7 : 49-57.
- Brundrett M. Mycorrhizal associations : the web resource, [En ligne]. <http://mycorrhizas.info/info.html> (Page consultée le 1^{er} décembre 2009).
- Brundrett M.C. 2009. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants : understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis. *Plant and Soil*, 320 : 37-77.
- Brys R., Jacquemyn H., Hermy M. 2008. Pollination efficiency and reproductive patterns in relation to local plant density, population size, and floral display in the rewarding *Listera ovata* (Orchidaceae). *Bot. J. Linn. Soc.* 157 : 713-721.
- Buyck B., Hofstetter V., Eberhardt U., Verbeke A., Kauff F. 2008. Walking the thin line between *Russula* and *Lactarius* : the dilemma of *Russula* subsect. *Ochriconcompactae*. *Fungal Divers.* 28 : 15-26.
- Chaintreuil C., Rigault F., Moulin J., Jaffré T., Fardoux J., Giraud E., Dreyfus B., Bailly X. 2008. Nickel resistance determinants in *Bradyrhizobium* strains from nodules of the endemic New Caledonian legume *Serianthes calycina*. *Appl. Environ. Microb.* 73 : 8018-8022.
- Chaney R.L., Angle J.S., Broadhurst C.L., Peters C.A., Tappero R.V., Sparks D.L. 2007. Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies. *J. Environ. Qual.* 36 : 1429-1443.
- Chapman H.P. 1966. Diagnostic criteria for plants and soils. Riverside Univ. of California, Div. Agr. Sciences.
- Chazeau J. 1993. Research on New Caledonian terrestrial fauna : achievements and prospects. *Biodiv. Letters* 1 : 123-129.
- Chazeau J. 1997. Caractères de la faune de quelques milieux naturels sur sols ultramafiques en Nouvelle-Calédonie. In : *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (éds Jaffré T., Reeves R. D., Becquer T.), pp. 95-105. Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa.
- Chazeau J., Jourdan H., Sadlier R., Bonnet de Larbogne L., Konghouleux J., Potiroa T. 2003. Identification, typologie et cartographie des groupements végétaux de basse altitude du Grand Sud calédonien et de la vallée de la Tontouta. Caractérisation écologique, botanique et zoologique des écosystèmes représentatifs de ces secteurs (Convention Province Sud/IRD). Rapport final 2^e partie, étude zoologique. Rap. No. 15. Conventions Sciences de la Vie Zoologie. IRD, Nouméa.
- Chazeau J., Jourdan H., Bonnet de Larbogne L., Konghouleux J., Potiroa T. 2004. Recherche des caractéristiques faunistiques des habitats se trouvant sur les sites retenus pour l'installation des infrastructures minières et industrielles du complexe de Goro Nickel. Contrat de Consultance Institutionnelle Goro Nickel/IRD. Rapport final. IRD, Nouméa.
- Cherrier J.F. 1974. Inventaire des ressources forestières de la Nouvelle-Calédonie, inventaire des peuplements de niaouli. CTFT, 41 p+ annexes.
- Cherrier J.F. 1983. Les essences forestières exploitables de Nouvelle-Calédonie. CTFT, Nouméa.
- Cherrier J.F. 1990. Reverdissement des terrains miniers en Nouvelle-Calédonie. *Bois et Forêts des Tropiques* 226 (3) : 5-23.
- Chiarucci A., Baker A.J.M. 2007. Proceedings of the fifth International Conference on Serpentine Ecology. *Plant Soil* 293 (special issue).
- Cohic F. 1959a. Contribution à l'étude des cochenilles de Nouvelle-Calédonie (Hom.) *Neoclaviccoccus ferrisi* n.g. n. sp. et *Neoclaviccoccus bugnicourti* n. sp. *Bulletin de la Société entomologique de France* 64 : 88-91.
- Cohic F. 1959b. Notes sur les espèces néocalédoniennes du genre *Orchamoplatus* Russell (Homoptera Aleyrodidae). *Journal d'Agriculture tropicale et de Botanique appliquée* 6 : 494-497.
- Colin F., Parron C., Bocquier G., Nahon D. 1980. Nickel and chromium concentration by chemical weathering of pyroxenes and olivine. UNESCO Intern. Symp. Athènes, 2 : 56-66.
- Côme D. 1982. Germination. pp. 129-225. In : Mazliak P, eds. *Physiologie végétale, II. Croissance et développement*. Hermann, Paris,
- Côme D., Corbinau F. 2000. Storage of seeds. pp. 755-770. In : *Improving Postharvest Technologies of Fruits, Vegetables and Ornamentals*, Artes F., Gill M.J., Conesa M.A. (eds).
- Côme D., Corbinau F. 2006. Dictionnaire de la biologie des semences et des plantules. Ed. Tec & Doc.
- Cooke J. A., Johnson M.S. 2002. Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals : a review of theory and practice. *Environ. Rev.* 10 : 41-71.
- Cornu A., Sarraill J-M., Marion F. 2001. Espèces endémiques et restauration écologique en Nouvelle-Calédonie. *Bois et Forêts des Tropiques* 268 : 57-67.
- Dagostini G., Veillon J.M., Jaffré T. 1997. Inventaire et caractérisation de la flore et des groupements végétaux du massif de la Tiébaghi. Convention ORSTOM/SLN. Nouméa 14 p + annexes.
- Davis H. G., Taylor C. M., Lambrinos J. G., Strong D. R. 2004. Pollen limitation causes an Allee effect in a wind-pollinated invasive grass (*Spartina alternifolia*). *Proc. Natl. Acad. Sci.* 101 : 13804-13807.
- Derroire G., Lagrange A., Tassin J. 2008. Flowering and fruiting phenology in maquis of New Caledonia. *Acta Bot. Gallica* 155 : 263-275.
- Desmoulin F., Barré N. 2004. Inventaire et écologie de l'avifaune du plateau de Goro. Rapport IAC/Programme Elevage et Faune Sauvage n° 9/2004, 47 p.

- Dionisio C. 2008. Étude de l'impact du cerf rusa *Cervus timorensis* russa sur la restauration des sites miniers de Nouvelle-Calédonie. Stage IAC, Mémoire 2^e année Master Conservation et Restauration des Écosystèmes, Univ. Paul Verlaine – Metz, juillet 2008, 129 p.
- Dobzhansky T. 1937. Genetics and the Origin of Species, Columbia University Press.
- Ducoussou M., Contesto C., Jaffré T., Rigault F., Reddell P., Dreyfus B., Prin Y. 2001. Molecular and cytological characterization of a *Glomus* sp. induce myconodules in Casuarinaceae. In : 12th International Meeting on Frankia and Actinorhizal Plants, 17-21 June 2001, Carry-le-Rouet.
- Ducoussou M., Contesto C., Cossegal M., Prin Y., Rigault F., Eyssartier G., 2004. *Cantharellus garnierii* sp. nov., une nouvelle chanterelle des maquis miniers nickélifères de Nouvelle-Calédonie. Cryptogamie Mycol. 25 : 115-125.
- Duhoux E., Rinaudo G., Diem H.G., Augy F., Fernandez D., Boguusz D., Franche C., Dommergue Y., Huguenin B. 2001. Angiosperm *Gymnostoma* trees produce root nodules colonized by arbuscular mycorrhizal fungi related to *Glomus*. New Phytol. 149 : 115-125.
- Dumbleton L.J. 1961. The Aleyrodidae (Hemiptera-Homoptera) of New Caledonia. Pacific Science 15 : 114-136.
- Dupon J.F. 1986. Les effets de l'exploitation minière sur les îles hautes : le cas de l'extraction du minerai de nickel en Nouvelle-Calédonie. Environnement étude de cas, Pacifique Sud N°1, PROE, PNUE, CPS Nouméa.
- Dupoussis R., Garbaye J., Bouchard D., Churin J.L. 1993. The fungus-specificity of mycorrhization helper bacteria (MHBs) used as an alternative to soil fumigation for ectomycorrhizal inoculation of bare-root Douglas-fir planting stocks with *Laccaria laccata*. Plant Soil 157 : 257-262.
- Dupoussis R., Ouahmane L., Galiana A., Hafidi M., Prin Y., Dreyfus B. 2007. Valoriser et conserver les ressources forestières méditerranéennes : rôle potentiel des champignons mycorrhiziens associés à la strate arbustive pionnière. Bois et Forêts des Tropiques 294 : 29-37.
- Elam D. R., Ridley C. E., Goodell K., Ellstrand N. C. 2007. Population size and relatedness affect fitness of a self-incompatible invasive plant. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 104 :549-552.
- Emerson B. C. 2002. Evolution on oceanic islands : molecular phylogenetic approach to understanding pattern and processes. Mol. Ecol. 11 : 951-966.
- Enright N.J., Rigg L., Jaffré T. 2001. Environmental controls on species composition along a (maquis) shrubland to forest gradient on ultramafics at Mt Do, New Caledonia. South African J. Sci. 97 : 573-580.
- Eyssartier G. 2009. Mission d'introduction à un inventaire mycologique de la Nouvelle-Calédonie. Rapport de mission, CIRAD, 10 p.
- Eyssartier G., Buyck B., Ducoussou M. 2009. *Cortinarius meleagris*, *Paxillus chalybaeus* et *Pluteus bressollensis* sp. nov., trois Agaricales remarquables de Nouvelle-Calédonie. Bulletin de la société mycologique de France, sous presse.
- Falk D.A., Knapp E.E., Guerrant E.O. 2001. An introduction to restoration genetics. Society for Ecological Restoration, for : Plant Conservation Alliance, Bureau of Land Management, US Department of Interior, 33 p.
- Fatercal V. 2009. Base de données sur la faune terrestre de Nouvelle-Calédonie. IRD/UMR 022 CBGP, Nouméa.
- Fernando D.R., Woodrow E., Jaffré T., Dumontet, V., Marshall A.T., Baker A.J.M. 2008. Foliar manganese accumulation by *Maytenus furnieri* (Celastraceae) in its native New Caledonia habitats : Populational variations and localisation by x ray microanalysis. New Phytol. 177 : 178-185.
- Field T., Brodribb T.J. 2005. A unique mode of parasitism in the conifer coral tree *Parasitaxus ustus* (Podocarpaceae). Plant Cell Environ. 28 : 1316-1325.
- Finch-Savage W. E., Leubner-Metzger G. 2006. Seed dormancy and the control of germination. New Phytol. 171 : 501-523.
- Florabank. 2007. Professional development training course for Seed Collectors.
- Fogliani B. 2002. De la connaissance physiologique des Cunoniaceae endémiques de la Nouvelle-Calédonie, à la recherche des caractéristiques physico-chimiques et biologiques de leurs substances bioactives d'intérêt. Thèse, Univ. Nouvelle-Calédonie, Nouméa.
- Fogliani B. 2008. Les végétaux terrestres de Nouvelle-Calédonie : mécanismes adaptatifs, conservation et valorisation. Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Univ. Provence, 84 p.
- Ford, H. A., Paton, D.C. 1986. The dynamic partnership. Birds and Plants in Southern Australia. D. J. Woolman, Adelaide, Australia.
- Frankham R. 1997. Do island populations have less genetic variation than mainland populations? Heredity 78 : 311-327.
- Frankham R. 1998. Inbreeding and extinction : island populations. Conserv. Biol. 78 : 665-675
- Gâteblé G. 2009a. New Caledonia and its potential for new floriculture crops. Acta Horticulturae 813 : 29-36.
- Gâteblé G. 2009b. Potentialités de valorisation de la flore néo-calédonienne en horticulture ornementale. PHM Revue horticole, 524 : 39-44.
- Gâteblé G., Pastor M. 2006. Ontogenic stage, auxin type and concentration influence rooting of *Oxera sulfurea* stem cuttings. Acta Horticulturae 723 : 269-272.
- Gateblé G., Poitichili E. 2007. Installation d'une unité de multiplication végétative. La Calédonie Agricole. 112 : 20-24.
- Gâteblé G., Wamytan D. 2008. Substrats en horticulture ornementale. La Calédonie Agricole. 116 : 40-45.
- Gauthier D., Navarro E., Rinaudo G., Jaffré T., Jourand P., Prin Y. 1999a. Isolation, caractérisation (PCR-RFLP) and specificity of *Frankia* from 8 *Gymnostoma* species endemic to New Caledonia. Eur. J. Soil Biol. 35 : 199-205.
- Gauthier D., Jaffré T., Prin Y. 1999b. Occurrence of both *Casuarina*-infective and *Elaeagnus*-infective *Frankia* strains within actinorhizae of *Casuarina collina*, endemic to New Caledonia. Eur. J. Soil Biol. 35 : 9-15.
- Gauthier D., Jaffré T., Prin Y. 2000. Abundance of *Frankia* from *Gymnostoma* spp. in the rhizosphere of *Alphitonia neocaledonica*, a non-nodulated Rhamnaceae endemic to New Caledonia. Eur. J. Soil Biol. 36 : 169-175.
- Gendre D., Czernic P., Conéjéro G., Pianelli K., Briat J-F., Lebrun M. and Mari S. 2007. TcYSL3, a member of the YSL gene family from the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*, encodes a nicotianamine-Ni/Fe transporter. Plant J. 49 : 1-15.

BIBLIOGRAPHIE

- Godley, E. J. 1979. Flower biology in New Zealand. *New Zeal. J. Bot.* 467-508.
- Grandcolas P, Murienne J, Robillard T, Desutter-Grandcolas L, Jourdan H, Guilbert E, Deharveng L. 2008. New Caledonia very old Darwinian island? *Phil. Trans. R. Soc. B.* 363 : 3309-3317.
- Grant K, Koch J. 2007. Decommissioning Western Australia's First Bauxite Mine : Co-evolving vegetation restoration techniques and targets. *Ecol. Manag. & Rest.* 8 (2) : 92-105.
- Grignon C. 2006. Accumulation et synthèse de données floristiques relatives à la réserve de la Forêt Nord de Nouvelle-Calédonie. IRD/ Univ. P. et M Curie. 61 p.
- Grignon C., Dagostini G., Rigault F., Munzinger J. 2009. Caractérisation et cartographie des formations végétales de huit aires protégées de la Province Sud. (Rapport d'étape n°2). Convention IRD/DENV Province Sud. 69 p.
- Grosman R. 1968. Le chrome dans le sol et la plante. Mise au point bibliographique. *Bull. Assoc. Et. Sol.* 3 : 115-124.
- Guilbert E. 1994. Biodiversité des arthropodes de la canopée dans deux forêts primaires en Nouvelle-Calédonie. Thèse de Doctorat, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 189 p., annexes.
- Guilbert E., Chazeau J., Bonnet de Larbogne L. 1994. Canopy arthropod diversity of New Caledonian forests sampled by fogging : preliminary results. *Memoires of the Queensland Museum* 36 : 77-85.
- Guilbert E., Baylac M., Najt J. 1995. Canopy arthropod diversity in a New Caledonian primary forest sampled by fogging. *Pan-Pacific Entomol.* 71 : 3-12.
- Guillon J.H. 1975. Les massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie. *Mém. ORSTOM*, 76, 120 p.
- Hackney E. E. McGraw J. B. 2001. Experimental demonstration of an Allee effect in American ginseng. *Conserv. Biol.* 15 : 129-136.
- HacsKaylo E., Vozzo J.A. 1967. Inoculation of *Pinus caribaea* with pure cultures of mycorrhizal fungi in Puerto Rico. XVI IUFRO-Congress Munich, Vol. V, 139-148.
- Hanikken M., Talke I.N., Haydon M.J., Lanz C., Nolte A., Motte P., Kroymann J., Weigel K., Krämer U. 2008. Evolution of metal hyperaccumulation required cis-regulatory changes and triplication of HMA4. *Nature* 453 : 391-395.
- Haydon M.J., Cobbett C.S. 2007. Transporters of ligands for essential metal ions in plants. *New Phytol.* 174 : 499-506.
- Hegarty T.W. 1978. The physiology of seed hydration and dehydration, and the relation between water stress and the control of germination : a review. *Plant Cell Environ.* 1 : 101-119.
- Heller R. 1969. *Biologie végétale*. II. Masson et Cie, 578 p.
- Herbert J., Hollingsworth P.M., Gardner M.F., Mill R.R., Thomas P.L., Jaffré T. 2002. Conservation genetics and phylogenetics of New Caledonian *Retrophillum* (Podocarpaceae) species. *New Zeal. J. Bot.* 40 (2) : 175-188.
- Herrera A., Hery M., Stach J.E.M., Jaffré T., Normand P., Navarro E. 2007. Species richness and phylogenetic diversity comparisons of soil microbial communities affected by nickel-mining and revegetation efforts in New Caledonia. *Eur. J. Soil Biol.* 43 : 130-139.
- Hery M., Nazaret S., Jaffré T., Normand Ph., Navarro E. 2003. Adaptation to nickel spiking of bacterial communities in Neo-caledonian soils. *Environ. Microbiol.* 5 (1) : 3-12.
- Hery M., Philippot L., Meriaux E., Poly F., Le Roux X., Navarro E. 2005. Nickel mine spoils revegetation attempts : effect of pioneer plant on two functional bacterial communities involved in the N-cycle. *Environ. Microbiol.* 7 : 486-498.
- Hibbett D.S., Donoghue M.J. 2000. Evolutionary instability of ectomycorrhizal symbioses in basidiomycetes. *Nature* 407 : 506-508.
- Higgins P.J. 1999. *Handbook of Australian, New Zealand and Antarctic birds*. Vol 4. Parrots to Dollarbirds. P.J. Higgins Editeur. Oxford University Press.
- Higgins P.J., Peter J.M., Steele W.K. (eds) 2001. *Handbook of Australian, New Zealand and Antarctic birds*. Vol 5. Tyrant-flycatchers to Chats. Oxford University Press.
- Hobbs R.J., Harris J.A. 2001. *Restoration Ecology : repairing the Earth's ecosystems in the New Millennium*. *Restor. Ecol.* 9 : 239-246.
- Holloway J. 1979. A survey of the Lepidoptera, biogeography and ecology of New Caledonia. W. Junk, The Hague, Series Entomologica 15, 588 p.
- Honnay O., Jacquemyn H. 2006. Susceptibility of common and rare plant species to the genetic consequences of habitat fragmentation. *Conserv. Biol.* 21 : 823-831.
- Hope G., Pask J. 1998. Tropical vegetational change in the late Pleistocene of New Caledonia. *Palaeogeography, Palaeoclimatologie, Palaeoecology* 142 : 1-21.
- ISTA. 2003. *ISTA Working Sheets on Tetrazolium testing*, Vol 1 : Agricultural, Vegetable and Horticultural Species, Ed. ISTA.
- Jaffré T. 1974. La végétation et la flore d'un massif de roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie : le Koniambo *Candollea* 29 : 493-499.
- Jaffré T. 1976. Composition chimique et condition de l'alimentation minérale des plantes sur roches ultrabasiques (Nouvelle-Calédonie). *Cahiers ORSTOM sér. Biol.*XI (1) : 53-63.
- Jaffré T. 1978. Accumulation du manganèse par des espèces associées aux terrains ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. *C.R. Acad. Sci. Paris (D)* 289 : 425-428.
- Jaffré T. 1979. Accumulation du manganèse par les Protéacées de Nouvelle-Calédonie. *C.R. Acad. Sciences. Paris (D)* 284 (16) : 1573- 1575.
- Jaffré T. 1980. Étude écologique du peuplement végétal des sols dérivés de roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. Thèse, Univ. Paris-Sud (XI)-ORSTOM, Paris.
- Jaffré T. 1992. Floristic and Ecological diversity of the vegetation on ultramafic rocks in New Caledonia. 101-107. In : *The Vegetation of Ultramafic (Serpentine) Soils*, (eds Baker A.J.M., Proctor J., Reeves R.D.). Intercept Ltd. Andover, U.K.
- Jaffré T. 1993. The relationship between ecological diversity and floristic diversity in New Caledonia. *Biodiversity letter* 1 : 82-87.
- Jaffré T. 1995. Distribution and ecology of the conifers of New Caledonia.. In : *Conifers of the Southern Hemisphere*, (eds N.J. Enright, R.S. Hill). Melbourne University Press, Australia. pp. 177-196

- Jaffré T. 1996. Étude comparative des formations végétales et des flores des roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie et d'autres régions du monde. In : Phytogéographie tropicale, réalités et perspectives. (eds Guillaumet J.L., Belin M.), pp. 137-149. Colloques et Séminaire ORSTOM, Paris.
- Jaffré T. 2003. Reconnaissance et caractérisation de la végétation et de la flore de la presqu'île de Vavouta. Rapport de consultance IRD/Falconbridge 20 p.
- Jaffré T., Latham M. 1974. Contribution à l'étude des relations sol-végétation sur un massif de roches ultrabasiqes de la côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie : le Boulinda. *Adansonia* 14 (3) : 311-336.
- Jaffré T., Latham M. 1976. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur déblais miniers. Rapport de convention ORSTOM/SLN. 16 p.
- Jaffré T., Pelletier B. 1992. Plantes de Nouvelle-Calédonie permettant de revégétaliser des sites miniers. S.L.N., Nouméa. 114 p.
- Jaffré T., Rigault F. 1989. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur sites miniers. Nouméa : ORSTOM, 20 p.
- Jaffré T., Rigault F. 1991a. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur déblais miniers. ORSTOM/SLN, Nouméa. *Sci. Vie, Bota., Convention*, n°5. 77 p.
- Jaffré T., Rigault F. 1991b. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur déblais miniers ORSTOM/SLN, Nouméa. *Sci. Vie, Bota., Convention*, n°4. 43 p.
- Jaffré T., Rigault F. 1998. Gestion de la diversité floristique en zone minière. Actes du colloque sur l'environnement Koné 29-31 juillet 1998 (ed. B.Cressens, Province Nord) pp 166-170. Pouembout Nouvelle-Calédonie.
- Jaffré T., Schmid M. 1974. Accumulation du nickel par une Rubiacée de Nouvelle-Calédonie, *Psychotria douarrei* (Beauvisage G.) Däniker. *C.R. Acad. Sci. Paris, (D)* 278 : 1727-1730.
- Jaffré T., Veillon J.M. 1990. Étude floristique et structurale de deux forêts denses humides sur roches ultrabasiqes en Nouvelle-Calédonie. *Bull. Mus. Natl. Hist. Nat., Paris, sér. 12, section B, Adansonia* 1990 (3-4) : 243-273.
- Jaffré T., Latham M., Quantin P. 1971. Les sols des massifs miniers de Nouvelle-Calédonie et leur relation avec la Végétation. Rapport ORSTOM. 26 p + annexes.
- Jaffré T., Brooks R.R., Lee J., Reeves R.D. 1976. *Sebertia acuminata* : a hyperaccumulator of nickel from New-Caledonia. *Science* 193 : 579-580.
- Jaffré T., Latham M., Schmid M. 1977. Aspects de l'influence de l'extraction du minerai de nickel sur la végétation et les sols en Nouvelle-Calédonie. *Cah. ORSTOM (Biol.)*, 12 (4) : 307-321.
- Jaffré T., Brooks R.R., Trow J.M. 1979a. Hyperaccumulation of nickel by *Geissois* species. *Plant Soil* 51 (1) : 157-162.
- Jaffré T., Kersten W., Brooks R.R., Reeves R.D. 1979b. Nickel uptake by Flacourciaceae of New-Caledonia. *Proc. R. Soc. Lond. (B)* 205 : 385-394.
- Jaffré T., Morat P., Veillon J.M., MacKee H.S. 1987. Changements dans la végétation de la Nouvelle-Calédonie au cours du Tertiaire : la végétation des roches ultrabasiqes. *Bull. Mus. natl. Hist. nat., B, Adansonia*, 4è. Sér. 9 (3) : 273-288.
- Jaffré T., Rigault F., Sarraillh J.M. 1993. Essais de revégétalisation par des espèces locales d'anciens sites miniers de la région de Thio. ORSTOM – CIRAD – Province Sud – SLN, Nouméa. *Sci. Vie, Bota., Convention*, n°7. 31 p.
- Jaffré T., Gauthier D., Rigault F., McCoy S. 1994a. Les Casuarinaceae endémiques, caractéristiques écologiques et nutritionnelles. *Bois et Forêts des Tropiques* 242 : 31-43.
- Jaffré T., Morat P., Veillon J.M. 1994b. La flore, caractéristiques et composition floristique des principales formations végétales. Dossier Nouvelle-Calédonie. *Bois et Forêts des Tropiques* 242 : 7-30.
- Jaffré T., Rigault F., Sarraillh J.M. 1994c. Végétalisation des anciens sites miniers. Dossier Nouvelle-Calédonie, Bois et Forêts des Tropiques 242 : 45-57.
- Jaffré T., McCoy S., Rigault F., Dagostini G. 1997a. Quelle méthode de végétalisation pour la réhabilitation des anciens sites miniers de Nouvelle-Calédonie. In : Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères (éds Jaffré T., Reeves R. D., Becquer T.), pp. 285-288. *Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa.*
- Jaffré T., Reeves R.D., Becquer T. 1997b. Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères (Ecology of ultramafic and metalliferous areas). *Proceedings of the 2nd International Conference on Serpentine Ecology. Doc. Sci. Tech. III2, (special issue) ORSTOM, Nouméa.*
- Jaffré T., Veillon J.M., Pintaud J.C. 1997c. Comparaison de la diversité floristique des forêts denses humides sur roches ultramafiques et sur substrats différents en Nouvelle-Calédonie. In : Écologie des milieux sur roches ultramafiques et des sols métallifères (éds Jaffré T., Reeves R.D., Becquer T.), pp.163-170. *Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa.*
- Jaffré T., Bouchet P., Veillon J.M. 1998a. Plant extinction in New Caledonia : is the system of protection adequate? *Biodivers. Conserv.* 7 : 109-135.
- Jaffré T., Rigault F., Dagostini G. 1998b. Impact des feux de brousse sur les maquis ligno-herbacés des roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. *Adansonia*, sér. 3. 20 (1) : 173-189.
- Jaffré T., Dagostini G., Rigault F. 2001a. Végétation et flore du site d'implantation de la future usine de INCO Goro Nickel SA. Consultance pour INCO Goro Nickel, Nouméa IRD. 28 p.
- Jaffré T., McCoy S., Rigault F., Navarro E. 2001b. Comparative study of flora and symbiotic micro-flora diversity in two *Gymnostoma* formations on ultramafic rocks in New Caledonia. *South African Journal of Science* 97 : 599-603.
- Jaffré T., Morat P., Veillon J.M., Rigault F., Dagostini G. 2001c. Composition et caractérisation de la flore indigène de Nouvelle-Calédonie. Nouméa : IRD. *Doc. Sci. Tech. II 4*, 121 pp. (seconde édition + addenda 2004).
- Jaffré T., Dagostini G., Rigault F. 2003. Identification typologie et cartographie des groupements végétaux de basse altitude du Grand Sud Calédonien et de la vallée de la Tontouta. *Convention IRD/ Province Sud. IRD Nouméa. (Sci., Vie, Bota., n°12)*. 84 p. + annexes.
- Jaffré T., Dagostini G., Rigault F., Coïc N. 2004. Inventaires floristiques des unités de végétation de la zone d'implantation des infrastructures minières et industrielles de Goro Nickel. Rapport de synthèse. Consultance IRD/ Goro Nickel SA. 42 p. + annexes.

- Jaffré T., Rigault F., Munzinger J. 2008. Identification and characterisation of floristic groups in dry forest relicts of a West Coast region of New Caledonia. *Pacific Conservation Biology* 14 (2) : 128-145.
- Jaffré T., Rigault F., Dagostini G., Tinel J., Munzinger J. 2009a. Fichier floristique et écologique des plantes vasculaires autochtones de la Nouvelle-Calédonie. IRD, UMR AMAP. Laboratoire de Botanique et d'Écologie Appliquée, Herbarium (NOU), Nouméa. (Inédit).
- Jaffré T., Rigault F., Dagostini G., Tinel-Fambart J., Wulff A., Munzinger J. 2009b. Input of the different vegetation units to the richness and endemism of the New Caledonian flora. Proceedings of the 11th Pacific Sciences Inter Congress, 2-6 march 2009, Tahiti, French Polynesia.
- Jaffré T., Munzinger J., Lowry II P.P. 2010. Threats to the conifer species found on New-Caledonia's ultramafic massifs and proposals for urgently needed measure to improve their protection. *Biodivers. Conserv.* 19 : 1485-1502.
- Jourdan H. 1997. Are serpentine biota free from successful biological invasions? Southern New Caledonian ant community example : 107-108. In : *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères*. (eds Jaffré T., Reeves R.D., Becker T.). ORSTOM, Nouméa.
- Jourdan H. 1999. Dynamique de la biodiversité de quelques écosystèmes terrestres néo-calédoniens sous l'effet de l'invasion de la fourmi peste *Wasmannia auropunctata* (Roger), 1863 (Hymenoptera : Formicidae). Thèse, Univ. Paul Sabatier, Toulouse.
- Jourdan H. 2002. New Caledonian ant fauna : a hot spot for ant diversity in the Pacific. In : XIV International Congress of IUSSI. The golden Jubilee Proceedings, 27th July - 3rd August 2002. Hokkaido Univ., Sapporo. p. 167.
- Jourdan H., Sadlier R., Bauer A. 2001. Little fire ant invasion (*Wasmannia auropunctata*) as a threat to New Caledonian lizards : evidence from a sclerophyll forest (Hymenoptera : Formicidae). *Sociobiology* 38 : 283-301.
- Karnadi G. 2008. Identification de méthodes permettant de caractériser la viabilité de graines d'espèces de terrains miniers de Nouvelle-Calédonie. Rapport stage IAC, Deust RGEM, Univ. Nouvelle-Calédonie, décembre 2008, 63 p.
- Kato M., Kawakita A. 2004. Plant-pollinator interactions in New Caledonia influenced by introduced honey bees. *Am. J. Bot.* 91 : 1814-1827.
- Kazakou E., Dimitrakopoulos P.G., Baker A.J.M., Reeves R.D., Troumbis A.Y. 2008. Hypotheses, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils : from species to ecosystem levels. *Biol. Rev.*, 83 : 495-508.
- Kersten W.J., Brooks R.R., Reeves R.D. Jaffré T. 1979. Nickel uptake by New Caledonian species of *Phyllanthus*. *Taxon* 28 (5-6) : 529-534.
- Kersten W.J., Brooks R.R., Reeves R.D., Jaffré T. 1980. Nature of nickel complexes in *Psychotria douarrei* and other nickel accumulating plants. *Phytochem.* 19 : 1963-1965.
- Kettle C. J., Hollingsworth P. M., Jaffré T., Moran B., Ennos R. A. 2007. Identifying the early genetic consequences of habitat degradation in a highly threatened tropical conifer, *Araucaria nemorosa* Laubenfels, *Mol. Ecol.* 16 : 3581-3591.
- Kettle C.J., Ennos R.A., Jaffré T., Gardner M., Hollingsworth P. 2008. Cryptic genetic bottlenecks during restoration of an endangered tropical conifer. *Biol. Conserv.* 141 : 1955-1961.
- Khade S.W., Adholey A. 2007. Feasible bioremediation through arbuscular mycorrhizal fungi imparting heavy metal tolerance : a retrospective. *Bioremediation Journal*, 11 : 33-43.
- Kier G., Kreft H., Lee T.M., Jetz W., Ibsch P.L., Nowicki C., Mutke J., Barthlott W. 2009. A global assessment of endemism and species richness across island and mainland regions. *PNAS* 106 (23): 9322-9327.
- Kotiluoto R., Ruokolainen K., Kettunen M. 2009. Invasive *Acacia auriculiformis* Benth. in different habitats in Unguja, Zanzibar. *Afr. J. Ecol.* 47(1) : 77-86.
- Krämer U., Talke I., Hanikenne M. 2007. Transition metal transport. *FEBS Lett.* 581 : 2263-2272.
- Kranitz M.L. 2005. Systematics and evolution of New Caledonian *Araucaria*. Thèse, Univ. Edinburgh, UK. 218 p.
- Krückeberg A.R. 1954. The ecology of serpentine soils. III. Plant species in relation to serpentine soils. *Ecology* 35 : 267-274.
- Kull C. A., Tassin J., Rambeloarisoa G., Sarrailh J.M. 2008. Invasive Australian acacias on western Indian Ocean islands : a historical and ecological perspective. *Afr. J. Ecol.* 46(4) : 684-689.
- L'Huillier L. 1994. Biodisponibilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie. Effets toxiques de Ni sur le développement et la physiologie du maïs. Thèse, Univ. Montpellier II, France.
- L'Huillier L., 1997a. Mécanismes d'action toxique du nickel chez le maïs. In : *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et des sols métallifères* (éds Jaffré T., Reeves R.D., Becquer T.), pp.215-222. Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa.
- L'Huillier L. 1997b. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Evaluation de la sensibilité au nickel des plantes cultivées. 1. Premiers résultats sur des espèces maraichères. Nouméa : ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie; Agropédo.* 35 : 22 p.
- L'Huillier L. 1998. Mise en valeur des sols dérivés des massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Détermination de la sensibilité des plantes cultivées aux métaux (Ni, Mn). Résultats sur des espèces maraichères, fruitières et fourragères. Nouméa : ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie; Agropédo.*, 44 : 40 p.
- L'Huillier L. 2007. Assessment of soil seed banks for rehabilitation of nickel mines in New Caledonia. In "Proceedings of the Seed Ecology II 2007 Conference, 9-13 September, Perth, Australia" (Eds. S Turner S., Merritt D., Clarke S., Commander L., Dixon K.). p. 51. Kings Park and Botanic Garden, Perth, Australia.
- L'Huillier L., Edighoffer S. 1991. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Étude de la toxicité du nickel sur les plantes cultivées : synthèse des connaissances actuelles. Nouméa : ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie; Agropédo.*, 11 : 16 p.
- L'Huillier L., Edighoffer S. 1996. Extractability of nickel and its concentration in cultivated plants in Ni rich ultramafic soils of New Caledonia. *Plant soil* 186 : 255-264.
- L'Huillier L., d'Auzac J., Durand M., Michaud-Ferrière N. 1996. Nickel effects on two maize (*Zea mays*) cultivars : growth, structure, Ni concentration and localization. *Can. J. Bot.* 74 : 1547-1554.

- L'Huillier L., Dupont S., Dubus I., Becquer T., Bourdon E., Laubreaux P., Bonzon B. 1998. Carence et fixation du phosphore dans les sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie. 16^e Congrès Mondial de la Science du Sol, 20-26 août 1998, Montpellier.
- Lagrange A. 2009. Études écologique et microbiologique des espèces du genre *Costularia* (Cyperaceae), pionnières des sols ultramafiques en Nouvelle-Calédonie : perspectives d'application à la restauration écologique. Thèse, Univ. Nouvelle-Calédonie, 234 p.
- Lagrange A., Derroire G., Tassin J. 2004. Projet d'optimisation des coûts pour la réhabilitation minière : synthèse des travaux effectués dans le cadre de l'essai 584. Rapport de convention IAC-Falconbridge, Ed. IAC, 2004, 56 p.
- Lagrange A., Ducouso M., Jourand P., Majorel C., Amir H. 2009. New insights into the mycorrhizal behaviour of Cyperaceae. Role of arbuscular mycorrhizas in growth and adaptation of *Costularia comosa* in New Caledonian ultramafic soils. Can. J. Microbiol. soumis.
- Lagrange A., Rigault F., L'Huillier L., Derroire G., Jaffré T., Ambrosi J. P. 2010. Phytosociology and soil chemistry relationships on an ultramafic weathering sequence of New Caledonia. (soumis à *Oecologia*).
- Lambers H., Raven J.A., Shaver G.R., Smith S.E. 2007. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. *Trends Ecol. Evol.* 23 (2) : 95-106.
- Latham M. 1975a. Les sols d'un massif de roches ultrabasiqes de la côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie : Le Boulinda. Les sols à accumulation humifère. Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie Vol XIII : 27-35.
- Latham M. 1975b. Les sols d'un massif de roches ultrabasiqes de la côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie : Le Boulinda. Les sols à accumulation ferrugineuse relative. Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie Vol. XIII : 159-172.
- Latham M. 1986. Altération et pédogenèse sur roches ultramafiques en Nouvelle-Calédonie. Genèse et évolution des accumulations de fer et de silice en relation avec les formations du modelé. Étude et thèses. ORSTOM Paris.
- Latham M., Quantin P., Aubert G. 1978. Étude des sols de Nouvelle-Calédonie. Notice explicative n° 78. ORSTOM Paris.
- Le Breton J., Chazeau J., Jourdan H. 2003. Immediate impacts of invasion by *Wasmannia auropunctata* (Hymenoptera : Formicidae) on native litter ant fauna in a New Caledonian rain forest. *Austral Ecol.* 28 : 204-209.
- Le Floch E., Aronson J. 1995. L'Écologie de la restauration. Définition de quelques concepts de base. *Natures, Sciences, Sociétés* 3, Hors série, 29-35.
- Le Mire-Pécheux L. 1996. Impact écologique de l'introduction d'une espèce végétale sur la diversité floristique endémique des maquis miniers de la Nouvelle-Calédonie : le cas des plantations de *Pinus caribaea* var *hondurensis* (Wild) dans la Province Sud (Plaine des Lacs). Mémoire DEA, Univ. Orléans, France, 80 p. + annexes.
- Lee J., Reeves R.D., Brooks R.R., Jaffré T. 1977. Isolation and identification of a citrate-complex of nickel from nickel-accumulating plants. *Phytochem.* 16 : 1503-1505.
- Lemay V., Gâteblé G. 2007. Essais de macro-bouturage d'espèces endémiques rares pour la société Goro Nickel. Rapport final de convention IAC/Goro Nickel. 58 p.
- Lemay V., Gâteblé G., McCoy S. 2009. Vegetative propagation of two endemic species of *Cloezia* Brongn. & Gris for conservation and mining revegetation activities in New Caledonia. *New Forest* 37 : 1-8.
- Léon V. 2005. Contribution à la caractérisation des stratégies mises en jeu par les plantes endémiques à la Nouvelle-Calédonie pour leur développement sur les sols nickelifères. Thèse, Univ. Nouvelle-Calédonie. 382 p.
- Lhuillier E., Broucke A., Vaillant A., Maggia L. 2009a. The population genetics approach : a sustainable management tool of the natural resources and environment for New Caledonia. In : Proceedings 11th Pacific Science Intercongress 2009, Tahiti – Polynésie française.
- Lhuillier E., Broucke A., Maggia L. 2009b. Mécanismes biologiques de la colonisation des paysages de Nouvelle-Calédonie par le niaouli (*Melaleuca quinquenervia*). Rapport final projet MOM 2005, 38 p + annexes.
- Lister R., Gregory B.D., Ecker J.R. 2009. Next is now : new technologies for sequencing of genomes, transcriptomes, and beyond. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12 : 107-118
- Lloyd M.V., Barnett G., Doherty M.D., Jeffree R.A., John J., Majer J.D., Osborne J.M., Nichols O.G. 2002. Managing the impacts of the Australian minerals industry on biodiversity. Final Report. ACMER (Australian Center for Mining Environmental Research), Curtin.
- Lowry P.II. 1996. Diversity, endemism, and extinction in the flora of New Caledonia. In : C.I Peng and P.P II Lowry eds, Rare, Threatened, and Endangered Floras of Asia of the Pacific Rim. Institute of botany, Academia Sinica, Monogr. Ser. N° 16, Taipei. pp 181-206.
- Lowry P.P. II., Munzinger J., Bouchet P., Géaux H., Bauer A., Langrand O. and Mittermeier R.A. 2004b New Caledonia. In : Mittermeier R.A., et al. (eds), Hotspots Revisited : Earth's Biologically Richest and Most Threatened Terrestrial Ecoregions, CEMEX, Mexico. pp. 193-197.
- Luçon S., Marion F., Niel J.F., Pelletier B. 1997. Réhabilitation des sites miniers sur roches ultramafiques en Nouvelle-Calédonie. Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères (éds Jaffré T., Reeves R. D., Becquer T.), Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa. pp. 297-303
- Manauté J., Jaffré T., Veillon J.M., Kranitz M.L. 2004. Review of the Araucariaceae in New Caledonia. In : Proc. of the Symp. of Dendrology, Aukland. pp 403-417 (version Française IRD/Province Sud, Nouméa).
- Margara J. 1989. Bases de la multiplication végétative. Ed. INRA. 262 p.
- Mari S., Gendre D., Pianelli K., Ouerdane L., Lobinski R., Briat J-F., Lebrun M. and Czernic P. (2006) Root-to-shoot long-distance circulation of nicotianamine and nicotianamine-nickel chelates in the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *J. Exp. Bot.*, 57 :4111-4122.
- Marques C. M., Vasquez-Kool J., Carocha V. J., Ferreira J. G., O'Malley D. M., Liu B.-H. et Sederoff R. 1999. Genetic dissection of vegetative propagation traits in *Eucalyptus tereticornis* and *E. globulus*. *Theor. Appl. Genet.* 99 : 936-946.
- Marushia R. G., Holt J. S. 2008. Reproductive strategy of an invasive thistle : Effects of adults on seedling survival. *Biol. Invasions* 10 : 913-924.

- Matile-Ferrero D. 1988. Homoptères Coccoidea de Nouvelle-Calédonie. Un nouveau genre cryptique d'Eriococcidae. Mémoires du Muséum national d'Histoire naturelle, Zoologie, 142 : 67-74.
- Matthiessen, J.N., Springett B.P. 1973. The food of the silvereye, *Zosterops gouldi* (Aves : Zosteropidae), in relation to its role as a vector of a granulosis virus of the potato moth, *Phthorimaema operculella* (Lepidoptera : Gelechiidae). Aust. J. Zool. 21 : 533-540.
- Mayr E. 1942. Systematics and the Origin of Species. Columbia University Press, Harvard University Press.
- McCoy S. 2005. Broadcast seeding trials of native species on ultramafic laterites in southern New Caledonia. In : Proceedings of the Fifth Australian Workshop on Native Seed Biology. (Eds Adkins S.W., Ainsley P.J., Bellairs S.M., Coates D.J., Bell L.C.). 21-23 June 2004. Brisbane, Queensland. pp. 267-274 (Australian Centre for Minerals Extension and Research : Brisbane).
- McCoy S.G., Ash J., Jaffré T. 1997. The effect of *Gymnostoma deplancheanum* (Casuarinaceae) litter on seedling establishment of New Caledonian ultramafic maquis species. In : Proceeding of the second Australian biology for revegetation workshop (Eds Bellairs S.M., J.M. Osborne). pp 127-135.
- McCoy S., Jaffré T., Rigault F., Ash J.E. 1999. Fire and succession in the ultramafic maquis of New Caledonia. J. Biogeogr. 26 (3) : 579-594.
- McCoy S., Kurpitz D., Newenou S. 2002. Species selection for revegetation of the Goro-Nickel Project area in New Caledonia. In : Proceedings of the 26th Annual British Symposium Dawson Creek British Columbia. pp. 213-225.
- Mercky S. 1999. Rhizobactéries natives de Nouvelle-Calédonie promotrices de la croissance des plantes. Bois et Forêts des Tropiques 262 : 80-83
- Meyer J.Y., Loope L.L., Sheppard A., Munzinger J., Jaffré T. 2006. Les plantes envahissantes et potentiellement envahissantes dans l'archipel néo-calédonien : première évaluation et recommandations de gestion. In : Beauvais M. L., Coléno A., Jourdan H. (Eds). Les espèces envahissantes dans l'archipel néo-calédonien = Invasive species in the New Caledonian archipelago. Paris : IRD, pp 50-115.
- Morat P. 1993. Our knowledge of the flora of New Caledonia : endemism and diversity in relation to vegetation types and substrates. Biodiversity letters 1 : 72-81.
- Morat P., Jaffré T., Veillon J.M., Mac Kee H.S. 1981. Végétation. Atlas de la Nouvelle-Calédonie et Dépendances. planche 15, carte et notice. ORSTOM, Paris.
- Morat P., Jaffré T., Veillon J.M. 1986. Affinités floristiques et considérations sur l'origine des maquis miniers de la Nouvelle-Calédonie, Bull. Mus. natl. Hist. nat., Paris, sér. 9, section B, Adansonia (2) : 133-182.
- Morat P., Jaffré T., Veillon M. 1994. Richesse et affinités floristiques de la Nouvelle-Calédonie : conséquences directes de son histoire géologique. Mém. Soc. Biogéogr. (3^e série) IV : 111-123.
- Morat P., Jaffré T., Veillon J.M. 1995. Data sheet of Grande Terre, New Caledonia. Centres of Plant Diversity : a guide and strategy for their conservation (eds David S.D., Heywood V.H., Hamilton A.C.). IUCN-WWF. Oxford University Press, pp 529-637
- Morat P., Jaffré T., Veillon J.M. 1999. Menaces sur les taxons rares et endémiques de la Nouvelle-Calédonie. Bull. Soc. Bota. du Centre Ouest 19 : 129-144.
- Morat P., Jaffré T., Tronchet F., Munzinger J., Pillon Y., Veillon J.M., Chalopin M. 2010. Référentiel taxonomique de la flore vasculaire indigène de la Nouvelle-Calédonie. (En préparation).
- Munzinger J., Dagostini G., Rigault F., Kurpitz D. 2007. Inventaire de la réserve de Forêt Nord. Rapport de Consultance IRD/Goro Nickel S.A.
- Munzinger J., Kurpitz D., Rigault F., Dagostini G. 2008a. Caractérisation taxonomique et patrimoniale des lambeaux forestiers dans le Grand Sud Calédonien, implication pour la gestion et la préservation de ces formations. Rapport de Convention IRD/DRN Province Sud. 65 p.
- Munzinger J., McPherson G., Lowry P.P. II. 2008b. A second species in the endemic New Caledonian genus *Gastrolepis* (Stemonuraceae), and its implication for the conservation status of high altitude maquis vegetation : Coherent application of the IUCN red list criteria is urgently needed in New Caledonia. Bot. J. Linn. Soc. 157 : 775-788.
- Murienne J., Grandcolas P., Piulachs M.D., Belles X, D'Haese, Legendre F., Pellens R., Guilbert E. 2005. Evolution on a shaky piece of Gondwana : is local endemism recent in New Caledonia? Cladistics 21 : 2-7.
- Myers N. 1998. Threatened biotas "Hot Spots" in tropical forest. The Environmentalist 8 : 107-208.
- Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., da Fonseca G.A.B., Kent J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature 403 : 853-858.
- Nasi R., Jaffré T., Sarraillh J.M. 2002. Les forêts de montagne de Nouvelle-Calédonie. Bois et Forêts des Tropiques 274 : 5-17.
- Navarro E., Nalin R., Gauthier D., Normand P. 1997. The nodular microsymbionts of *Gymnostoma* spp. are *Elaeagnus*-infective *Frankia* strains. Appl. Environ. Microb. 63 : 1610-1616.
- Navarro E., Rouvier C., Normand P., Domenach A.M., Simonet P., Prin Y. 1998. Evolution of *Frankia*-Casuarinaceae interactions. Genetics selection evolution, 30 suppl. 1 : S357-S372. Colloque national BRG/USTL. 2, 1997-10-08/1997-10-10, Lille, France.
- Navarro E., Jaffré T., Gauthier D., Gourbière F., Rinaudo G., Simonet P., Normand P. 1999. Distribution of *Gymnostoma* spp. microsymbiotic *Frankia* strains in New Caledonia is related to soil type and to host-plant species. Mol. Ecol. 8 : 1781-1788.
- Nielsen I., Labat J.N., Munzinger J. 2005. Synopsis of *Storckiaella* Seem. (Leguminosae-Caesalpinioideae) with description of a new species and a new subspecies from New Caledonia. Adansonia, sér. 3, 27 : 217-230.
- Nikolaeva M.G. 1969. Physiology of deep dormancy in seeds. Izdatel'stvo "Nauka", Leningrad [Translated from Russian by Z. Shapiro, National Science Foundation, Washington, DC].
- Nikolaeva M.G. 1977. Factors controlling the seed dormancy pattern. In : the Physiology and Biochemistry of Seed Dormancy and Germination" (A. A. Khan, ed.), North-Holland, Amsterdam/New York. pp.51-74.

- Oddi A. 2004. Caractérisation floristique et structurale de deux forêts denses humides du Sud de la Nouvelle-Calédonie. IRD/Univ. Rouen. 22 p.
- O'Dowd D.J., Green P.T., Lake P.S. 2003. Invasional 'meltdown' on an oceanic island. *Ecol. Lett.* 6 (9) : 812-817.
- Oostermeijer J.G.B., Luijten S.H., den Nijs J.C.M. 2003. Integrating demographic and genetic approaches in plant conservation. *Biol. Conserv.* 113 : 389-398.
- Orvain M. 2007. Identification et caractérisation des Cypéracées candidates à la restauration des sites miniers de Nouvelle-Calédonie. Rapport de stage IAC, IUT de Caen, 43 p.+annexes.
- Ozbingol N., Corbineau F., Come D. 1998. Responses of tomato seeds to osmoconditionning as related to temperature and oxygen. *Seed Sci. Res.* 8 : 377-384.
- Papineau C. 1989. Le Chêne Gomme (*Arilalstrum gummiferum*) en Nouvelle-Calédonie. Mémoire 3^e année.
- Paris J.P. 1981. Géologie de la Nouvelle-Calédonie. Un essai de synthèse Mém. N°113, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans 278 p.
- Paton D.C. 1982. The diet of the New-Holland Honeyeater *Phylidonyris novaehollandiae*. *Aust. J. Ecol.* 7 : 279-298.
- Pauly A., Munzinger J. 2003. Contribution à la connaissance des Hyménoptères Apoidea de Nouvelle-Calédonie et de leurs relations avec la flore butinée. *Ann. Soc. Entomol. Fr.* 39 : 153-166.
- Pauwels M., Roosens N., Frérot H. and Saumitou-Laprade P. 2008. When population genetics serve genomics : putting adaptation back in a spatial and historical context. *Curr. Opin. Plant Biol.* 11 : 129-134.
- Pelletier B. 1990a. De la prospection à la mine. Edition SLN, Nouméa 45 p.
- Pelletier B. 1990b. Techniques minières permettant de préserver l'environnement autour des gisements de nickel néocalédoniens. International Society for reef Studies. UFP, Nouméa pp. 27-34.
- Pelletier B. 2003. Les méthodes d'exploitation et de revégétalisation mises en place depuis les années 70 sur les mines de nickel de Nouvelle-Calédonie. Bulletin de l'Union Française des Géologues.
- Pelletier B. 2006. Geology of the New Caledonia region and its implications for the study of the New Caledonian biodiversity. Forum Biodiversité des écosystèmes corallines (éds Pairy C., Richer de Forges B.). Doc. Sci. Tech. IRD II 7 Nouméa. pp17-30.
- Pelletier B., Esterle M. 1995. Revegetation of nickel mines in New Caledonia. In : Quelle recherche française en environnement dans le Pacifique Sud, Bilan et perspectives. 28-31 March, Paris.
- Perrier N. 2006. Biogéo-diversité fonctionnelle des sols latéritiques de Nouvelle-Calédonie : application à la restauration écologique. Thèse, Univ. Nouvelle-Calédonie, 213 p.
- Perrier N., Colin F., Jaffré T., Ambroisi J.P., Ballero J.P. 2004. Nickel speciation in *Sebertia acuminata*, a plant growing on a laterite soil in New Caledonia. *C.R. Géoscience* 333 : 567-577.
- Perrier N., Ambroisi J.P., Colin F., Gilkes R.J. 2006a. Biogeochemistry of a regolith : The New Caledonian Koniambo ultramafic massif. *J. Geochem. Expl.* 88 : 54-58.
- Perrier N., Amir H., Colin F. 2006b. Occurrence of mycorrhizal symbioses in the metal-rich lateritic soils of the Koniambo Massif, New Caledonia. *Mycorrhiza* 16 : 449-458.
- Petinet M. 1991. Valorisation de la flore de Nouvelle-Calédonie : Étude du potentiel horticole de quelques espèces des terrains miniers. ORSTOM/ENSH, Nouméa.
- Pillon Y. 2008. Biodiversité, origine et évolution des Cunoniaceae : implication pour la conservation de la flore de Nouvelle-Calédonie. Thèse, IRD, Univ. Nouvelle-Calédonie.
- Pillon Y., Munzinger J., Amir H., Hopkins H., Chase M.W. 2009. Reticulate evolution on a mosaic of soils; diversification of the New Caledonian endemic genus *Codia* (Cunoniaceae). *Mol. Ecol.* 18 : 2263-2275.
- Pintaud J.C. 2006. The impact of forest disturbance on the palms of New Caledonia. *Palms* 50 (3) : 123-135.
- Pintaud J.C., Jaffré T. 2001. Pattern of diversification of palms on ultramafic rocks in New Caledonia. *South Afr. J. Sci.* 97 (11-12 part 2) : 548-550.
- Pintaud J.C., Jaffré T., Puig H. 2001. Chorology of New Caledonian palms and possible evidence of Pleistocene rain refugia. *C. R. Acad. Sci.* 324 : 1-11.
- Platnick N. 1993. The araneomorph spider fauna of New Caledonia. *Biodiv. Lett.* 1 : 102-106.
- Proctor J. 1970. Magnesium as a toxic element. *Nature* 227 : 742-743.
- Proctor J. 2003. Vegetation and soil and plant chemistry on ultramafic rocks in the tropical Far East. *Perspec. Plant Ecol.* 61, 2 : 105-124.
- Proctor J., McGowan I. 1976. Influence of magnesium on nickel toxicity. *Nature* 176 : 234.
- Proctor J., Nagy 1992. Ultramafic rocks and their vegetation. The Vegetation of Ultramafic (Serpentine) Soils, (eds Baker A.J.M., Proctor J., Reeves R.D.), pp.101-107. Intercept Ltd. Andover, U.K.
- Proctor J., Woodell S.R.J. 1975. The ecology of serpentine soils; *Adv. Ecol. Res.* 9 : 255-365.
- Pupier C. 2006. Influence de la mycorrhization sur la croissance de quelques espèces végétales en présence de concentrations phytotoxiques de nickel. Mémoire Ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy. 39 p.
- Qiu Y-L., Lee J., Bernasconi-Quadroni F., Soltis D.E., Soltis P.S., Zanis M., Zimmer E.R., Savolainen V., Chase M.W. 1999. The earliest angiosperms : evidence from mitochondrial, plasmid and nuclear genomes. *Nature* 402 : 404-407.
- Quantin P., Bourdon E., Becquer T. 1997. Minéralogie et contraintes édaphiques des sols «ferritiques» dérivés de roches ultramafiques en Nouvelle-Calédonie : relation entre constituants minéraux et disponibilité en certains éléments (Al, Fe, Si, Mg, Mn, Ni, Co, Cr, Cu,Zn, et Mo) facilement solubles. Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères (éds Jaffré T., Reeves R. D., Becquer T.). Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa. pp.13-25.

BIBLIOGRAPHIE

- Quantin C., Becquer T., Berthelin J. 2002. Mn-Oxide : a major source of easily mobilisable Co and Ni under reducing conditions in New Caledonia ferralsols. *CR. Geosci.* 334 : 273-278.
- Rajakaruna N., Boyd R.S. (Eds). 2009. Soil and biota of serpentine : a world view. Proceedings of the sixth International Conference on Serpentine Ecology. Northeast. Nat. 16 (special issue 5).
- Rao N. K., Hanson J., Dulloo M. E., Ghosh K., Nowell D., Larinde M. 2006. Manuel de la manipulation des semences dans les banques de gènes. Manuels pour les banques de gènes N°8. Biodiversity International, Rome, Italie.
- Raven P.H., Axelrod D.I. 1972. Plate tectonics and Australasian biogeography. *Science* 176 : 1379-1386.
- Raven R.J. 1991. A revision of the Mygalomorph spider family Dipluridae in New Caledonia (Araneae). Mémoires du Muséum national d'Histoire naturelle, Zoologie 149 : 87-117.
- Raven R.J. 1994. Mygalomorph spiders of the Barychelidae in Australia and the western Pacific. *Memoirs of the Queensland Museum* 35 : 291-706.
- Raynal J. 1974. Notes cypérolologiques 22. Les *Costularia* de Nouvelle-Calédonie. *Adansonia*, ser.2, 14 : 337-377.
- Read J., Hallam P., Cherrier J.F. 1995. The anomaly of monodominant tropical rainforests : some preliminary observations in the *Nothofagus*-dominated rainforest in New Caledonia. *J. Trop. Ecol.* 11, 3 : 359-389.
- Read J., Jaffré T., Godrie E., Hope G., Veillon J.M. 2000. Structural and floristic characteristics of some monodominant and adjacent mixed rainforests in New Caledonia. *J. Biogeogr.* 27 : 233-250.
- Read J., Sanson G.D., de Garine-wichatitsky M., Jaffré T. 2006a. Sclerophylly in two contrasting tropical environments; low nutrient vs. low rainfall. *Am. J. Bot.* 93 (11) : 1601-1614.
- Read J., Sanson G.D., Jaffré T., Burd M. 2006b. Does tree size influence timing of flowering in *Cerberiopsis candelabra* (Apocynaceae), a long-lived semelparouster? *J. Tro. Ecol.* 22 : 621-629.
- Read J., Sanson G., Burd M., Jaffré T. 2008. Mass flowering and parental death in the regeneration of *Cerberiopsis candelabra* (Apocynaceae), a long live monocarpic tree in New Caledonia. *Am. J. Bot.* 96 (5) : 558-567.
- Reeves R.D. 2003. Tropical hyperaccumulators of metals and their potential for phytoextraction. *Plant Soil* 249 : 57-65.
- Reeves R.D., Baker A.J.M. 2000. Metal-accumulating plants. In : *Phytoremediation of toxic metals*. Raskin I., Ensley B.D. eds, John Wiley, New York : pp 193-229.
- Reeves R.D., Baker A.J.M., Borhidi A., Berazain R. 1999. Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba. *Ann. Bot.* 83 : 29-38.
- Reusch T. B. H. 2003. Floral neighbourhoods in the sea : how floral density, opportunity for outcrossing and population fragmentation affect seed set in *Zostera marina*. *J. Ecol.* 91(4) : 610-615.
- Rey F., Ballais J.L., Marrec A., Rovérad G. 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *C.R. Geosci.* 336 : 991-998.
- Richau K.H., Kozhevnikova A.D., Seregin I.V., Vooijs R., Koevoets P.L.M., Smith A.C., Ivanov V.B., Schat H. 2009. Chelation by histidine inhibits the vacuolar sequestration of nickel in roots of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *New Phytol.* 183 : 106-116.
- Rigault F., Dagostini G., Jaffré T. 1996. Contribution à la mise au point de techniques d'ensemencement hydrauliques sur sites miniers : implantation d'espèces locales et relation avec les conditions climatiques. ORSTOM-SLN, Nouméa. *Sci., Vie, Bota., Convention*, n°8. 60 p.
- Rigault F., Dagostini G., Jaffré T. 2003. Légumineuses d'intérêt majeur pour la réhabilitation des anciens sites miniers : *Serianthes calycina* Bentham. Poster, Fête de la Science, IRD Nouméa.
- Rigg L.S., Enright N., Jaffré T. 1998. Stand structure of the emergent conifer *Araucaria laubenfelsii*, in maquis and rainforest, Mt Do, New Caledonia. *Aus. J. Ecol.* 23 : 528-538.
- Rigg L.S., Enright N. J., Jaffré T., Perry G.L.W. 2010. Contrasting population dynamics of the endemic New Caledonian conifer, *Araucaria laubenfelsii*, in maquis and rainforest. *Biotropica* (sous presse).
- Rokich D. P., Dixon K. W., Sivasithamparam K., Meney K. A. 2000. Topsoil handling and storage effects on woodland restoration in Western Australia. *Restor. Ecol.*, 8 (2) : 196-208.
- Roosens N.H., Willems G., Saumitou-Laprade P. 2008. Using *Arabidopsis* to explore zinc tolerance and hyperaccumulation. *Trends Plant Sci.*, 13 : 208-215.
- Ross S.M. 1994. Retention, transformation and mobility of toxic metal in soils. Toxic metals in soil-plant systems. (ed. S.M. Ross) John Wiley & Sons Ltd. pp. 63-152.
- Ruiz O. 2006. Étude de top-soils des terrains miniers en Nouvelle-Calédonie. Premiers résultats sur leur potentiel germinatif. Mémoire, Master Biologie Géosciences Agroressources Environnement 2^e année, Univ. Montpellier II, septembre 2006, 53 p.+annexes.
- Sadler R.A., Smith S.A., Whitaker A., Bauer A.M. 2008. A New Live-Bearing Species of Scincid Lizard (Reptilia : Scincidae) from New Caledonia, Southwest Pacific. *Pac. Sci.* 63 (1) : 123-136.
- Saley K., Batonio Babou A., Bellefontaine R., Ichaou A. 2003. Reboiser au moindre coût les zones semi-arides par marcottage naturel : A less costly reforestation of semi-arid areas by natural layering. In : *Actes du XII^e Congrès forestier mondial. La forêt, source de vie*, Québec, Canada.
- Sarlin P. 1954. Bois et forêts de la Nouvelle-Calédonie. Centre Techn. Forest. Trop. 330 p.
- Sarraillh J.M. 2001. Bilan des recherches menées par L'IAIC sur la revégétalisation des sites miniers. IAC Programme Forêt Nouméa.
- Schmid M. 1981. Fleurs et plantes de Nouvelle-Calédonie. Les Editions du Pacifique 164 p.
- Schmid M. 1982. Endémisme et spéciation en Nouvelle-Calédonie. *C. R. Soc. Biogéogr.* 58 (2) : 52-60.
- Schüßler A., Schwarzott D., Walker C., 2001. A new fungal phylum, the Glomeromycota : phylogeny and evolution. *Mycol. Res.* 105 : 1413-1421.

- Selosse M.A., Baudoin E., Vandenkoornhuyse P. 2004. Symbiotic microorganisms, a key for ecological success and protection of plants. *CR. Biol.* 327 : 639-648.
- SER 2004. The SER International Primer on ecological restoration, Version 2. Society for Ecological Restoration Sciences and Policy Working Group, [En ligne]. http://www.ser.org/content/ecological_restoration_primer.asp (Page consultée le 1^{er} décembre 2009).
- Serret J. 2007. Étude de la diversité génétique de *Captaincookia margaretae*, espèce endémique des forêts sèches de Nouvelle-Calédonie. Mémoire de stage « Génie des biotechnologies végétale », Ecole Nationale de Formation Agronomique, CIRAD, Univ. Paul Sabatier – Toulouse III, France. 28 p + annexes.
- Setoguchi H., Ohsawa P., Pintaud J.C., Jaffré T., Veillon J.M. 1998. Phylogenetic relationship of Araucariaceae inferred from rbcL gene sequence. *Am. J. Bot.* 85 (11) : 1507-1516.
- Shea G., Jourdan H., Sadlier R., Bauer A. 2009. Natural history of the New Caledonian whiptailed skink *Tropidoscincus variabilis* (Bavay, 1869) (Squamata : Scincidae). *Amphibia-Reptilia* 30 : 207-220.
- SLN. 2005. Lutte contre l'érosion et le transport solide dans les exploitations de minerais de nickel en Nouvelle-Calédonie. Guide pratique, techniques et ouvrages hydrauliques. Edition SLN, août 2005, 24 p.
- Smith S.E., Read D.J. 2008. Mycorrhizal symbiosis. 3rd edition, Academic Press, London.
- Solomon M. E. 1958. Meaning of density-dependence and related terms in population dynamics. *Nature* 181 : 4626, 1778-1780.
- Soucrant O. 2008. Intérêt du Top soil en restauration des sites miniers dégradés en Nouvelle-Calédonie. Résultats sur l'essai de la Tontouta. Rapport stage IAC, Deust RGEM, Univ. Nouvelle-Calédonie, 55 p.
- Stephens P.A., Sutherland W.J. and Freckleton R.P. 1999. What is the Allee effect? *Nordic Society Oikos* 87 : 185-190.
- Strullu J.A. 1991. Les mycorhizes des arbres et plantes cultivées. Lavoisier, Paris.
- Sweedman L., Merritt D. 2006. Australian Seeds, a guide to their Collection, Identification and Biology, CSIRO Publishing.
- Swenson U., Baklund A., McLoughlin S., Hill R.S. 2001. *Nothofagus* biogeography revisited with special emphasis on the enigmatic distribution of subgenus *Brassospora* in New Caledonia. *Cladistics* 17 : 28-47.
- Talke I., Hanikenne M., Krämer U. 2006. Zinc dependent global transcriptional control, transcriptional de-regulation and higher gene copy number for genes in metal homeostasis of the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Plant Physiol.* 142 : 148-167.
- Tassin J., Boissenin M., Barré N. 2009. Can *Ptilinopus greyi* (Columbidae) disperse dry-forest fleshy fruits in New Caledonia. (Accepted Pacific Science).
- Tewksbury J. J., Levey D. J., Haddad N. M., Sargent S., Orrock J. L., Weldon A., Danielson B. J., Brinkerhoff J., Damschen E. I., Townsend P. 2002. Corridors affect plants, animals, and their interactions in fragmented landscapes. *Ecology* 99 (20) : 1223-1226
- Trescases J.J. 1975. L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Mémoire ORSTOM, n°78, Paris.
- Udo H., Gâteblé G. 2009. Études complémentaires sur le macro-bouturage d'espèces végétales endémiques. Rapport de convention intermédiaire n°1 IAC/KNS. 21 p.
- Valéry L., Fritz H., Lefeuvre J.C., Simberloff D. 2009. Ecosystem-level consequences of invasions by native species as a way to investigate relationships between evenness and ecosystem function. *Biol. Invasions* 11 : 609-617.
- Veillon J.M. 1971. Une Apocynacée monocarpique de Nouvelle-Calédonie *Cerberiopsis candelabrum* Vieill. *Adansonia ser.*, 11 : 625-639.
- Verbruggen N., Hermans C., Schat H. 2009. Molecular mechanisms of metal accumulation in plants. *New Phytol.* 181 : 759-776.
- Viette P. 1961. Découverte de la famille des Hepialidae en Nouvelle-Calédonie. *Bull. Soc. Entomol. Fr.* 66 : 106-108.
- Virost R. 1956. La végétation canaque. Mémoire. Mus. Nat. Hist Nat, Paris, sér. Bot., 8 Paris.
- Wagenius S., Lonsdorf E., Neuhauser C. 2007. Patch aging and the S-alley effect : Breeding system effects on the demographic response of plants to habitat fragmentation. *The Am. Nat.* 169 : 383-397.
- Wahlund S. 1928. Zusammensetzung von populationen und korrelationserscheinungen von standpunkt der vererbungslehre aus betrachtet. *Hereditas* 11 : 65-106.
- Walker R.B., Walker H.M. 1955. Calcium-magnesium nutrition with special reference to serpentine soils. *Plant Physiol.* 30 : 214-221.
- Wamytan D., Gâteblé G. 2007. Essais de macro-bouturage d'espèces endémiques pour Koniambo Nickel SAS. Rapport de convention intermédiaire IAC/KNS. 30 p.
- Wanat M. 2008. The Apionidae (Coleoptera : Curculionidae) of New Caledonia. Genus *Megatracheloides*. In : *Zoologia Neocaledonia* 6. Systématique et endémisme en Nouvelle-Calédonie (Ed. Grandcolas P), Mémoires du Mus. Nat. Hist Nat., 197, Paris : pp 297-322.
- Wanégui J. 2007. Influence de différents substrats dans le développement sous serre de plantes pionnières des terrains miniers de Nouvelle-Calédonie. Rapport de stage, IAC, Master Science de l'Environnement, Univ. Rouen, août 2007, 50 p.
- Ward S. C., Koch J.M., Ainsworth G.L. 1996. The effect of timing of rehabilitation procedures on the establishment of a jarrah forest after bauxite mining. *Restor. Ecol.* 4, 19-24.
- Weber M., Harada E., Vess C., von Roepenack-Lahaye E., Clemens S. 2004. Comparative microarray analysis of *Arabidopsis thaliana* and *Arabidopsis halleri* roots identifies nicotianamine synthase, a ZIP transporter and other genes as potential metal hyperaccumulation factors. *Plant J.* 37 : 269-281.
- Whiting S.N., Reeves R.D., Richards D., Johnson M. S., Cooke J.A., Malaisse F., Paton A., Smith J.A.C. Angle J.S., Chaney R.L., Ginocchio R., Jaffré T., Johns R., McIntyre T., Purvis O.W., Salt D.E., Schat H., Zhao F. J., Baker A.J.M. 2004. Research priorities for conservation of metallophyte biodiversity and its sustainable uses in ecological restoration and site. *Restor. Ecol.* 12 (1) : 106-116.

BIBLIOGRAPHIE

- Wilson E.O., Hölldobler B. 2005. The rise of the ants : A phylogenetic and ecological explanation. Proc. Natl Acad. Sci. 102 (21) : 7411-7414.
- Wulff A., L'Huillier L., Veà C., Tassin J. 2008. Caractéristiques germinatives de graines d'espèces indigènes candidates à la restauration des sites ultramafiques dégradés de Nouvelle-Calédonie. Ed. IAC, Rapport de convention SYSMIN 8^e FED, 92 p.
- Wulff A., L'Huillier L., Fogliani B., Veà C. 2009. Understanding germination characteristics of common species in order to conserve micro-endemic species in New Caledonia : the *Hibbertia* (Dilleniaceae) model. 19th Conference of the Society for Ecological Restoration International, 23-27 August, Perth, Western Australia, Australia.
- Wyndham E., Cannon C.E. 1985. Parrots of eastern Australian forests and woodlands : the genera *Platycerus* and *Trichoglossus*. In : Birds of *Eucalyptus* forests and woodlands : Ecology, Conservation and Management. (Eds. Keast A., Recher H.F., Ford H., Saunders O. Surry Beaty & Sons and RAOU, NSW.
- Yates D. I., Earp B.L., Lew F., Walker E.S. 2006. Propagation of *Sciadopitys verticillata* (Thunb.) Sieb. & Zucc. by stem cuttings and properties of its latex-like sap. HortScience 41 : 1662-1666.
- Yoshinaga A. Y., Walters C. 2004. Conservation of Tropical Island Seeds : an example from Hawai'i. In : Seed Conservation : Turning Science Into Practice (Eds : Smith, R, Dickie, J., Linington, S., Pritchard, H., Probert, R.). Kew Publishing, pp. 957-963.
- Young GR, Bellis GA, Brown GR, Smith ESC. 2001. The crazy ant *Anoplolepis gracilipes* (Smith) (Hymenoptera : Formicidae) in East Arnhem land, Australia. Aus. Entomol. 28 : 97-104.
- Young T.P., Petersen D.A., Clary J.J. 2005. The ecology of restoration : historical links, emerging issues and unexplored realms. Ecol. Lett. 8 : 662-673.
- Zongo C., Saintpierre-Bonaccio D., McGill C.R., Bouraïma-Madjèbi S., Hnawia E., Fogliani B. 2007. Lipid contents and fatty acids composition of seed storage reserves of eight species used for re-vegetation in New Caledonia and their implication for long term conservation. In : Conference Proceedings "Seed ecology II, the 2nd International Society for Seed Science Meeting on Seeds and the Environment". (Eds : Turner, S., Merritt, S., Clarke, L., Commander, L., Dixon, K.), 9-13 september, Perth, Western Australia.
- Zongo C., Fogliani B., McGill C.R., Saintpierre-Bonaccio D., Bouraïma-Madjèbi S. 2008a Morphological adaptations and chemical composition of seeds of New Caledonian native plants used for mining revegetation. 9th ISSS Conference on Seed Biology, 6-11 juillet, Olsztyn, Poland.
- Zongo C., Fogliani B., Bombarda I., McGill C.R., Doumenq P. 2008b. Chemical composition of seeds from two New Caledonian plants used for revegetation : Identification of unusual isomers of C14 :1, C16 :1 and C18 :1 in their oil. Symposium : Seeds for Futures Massey University, 26-27 Novembre, Palmerston North, New Zealand.
- Zongo C., Fogliani B., Desvals L., Henriot L., Bouraïma-Madjèbi S. 2009. Études approfondies de semences de Cypéracées, herbacées pionnières utilisées pour la revégétalisation des terrains miniers néo-calédoniens : le cas de *Gahnia aspera*. 11^e Inter-congrès des Sciences du Pacifique et 2^{èmes} Assises de la Recherche française dans le Pacifique, 2-6 mars 2009, Tahiti – Polynésie française.
- Zongo C., McGill C. R., Rabier J., Saintpierre-Bonaccio D., L'Huillier L., Fogliani B. 2010. Structure and biology of kuà seeds (*Alphitonia neocaledonica*) used for revegetation in New Caledonia. (soumis à Forest Ecology and Management).

GLOSSAIRE

Acide aminé : Molécule organique possédant un squelette carboné. Elles sont les unités structurales de base des protéines.

Acide nucléique : Macromolécule (grosse molécule relativement complexe) comme l'ADN et l'ARN.

Actinomorphe : Désigne une fleur à symétrie radiale (possédant plusieurs plans de symétrie).

Actinomycète : Type de bactéries filamenteuses symbiotiques de divers genres végétaux (ex. : *Frankia* chez les *Casuarinaceae*).

Akène : Fruit sec à maturité, indéhiscent, descendant d'un unique carpelle, ne contenant généralement qu'une seule graine.

Albuminé : Désigne une graine d'angiosperme contenant de l'albumen (tissu de réserve triploïde), qui sera tôt ou tard consommé par l'embryon.

Anastomose : Mise en communication de deux éléments constitutifs d'un végétal. L'anastomose des nervures d'une feuille ou d'une bractée : conduisant à l'élaboration d'un réseau irriguant le limbe de l'organe.

Anémochore : Se dit d'une plante dont les semences sont dispersées par le vent.

Angiosperme : Important groupe de plantes supérieures caractérisées par la possession (au niveau de leurs fleurs) d'un ovaire enclosant un ou des ovules, lesquels organes (à la suite d'une fécondation) deviendront un fruit renfermant une ou plusieurs graines.

Anthère : Partie terminale de l'étamine qui produit le pollen.

Anthropisation : Transformation d'espaces, de paysages ou de milieux naturels sous l'action de l'homme.

Apex (adj. : apical) : Qualifie la partie sommitale d'un organe.

Arille : Excroissance, le plus souvent charnue, provenant du développement du funicule ou du hile et souvent appliquée sur une partie de la graine.

Arthropode : Organisme dont le corps est composé de segments articulés, recouvert d'une cuticule rigide, constituant leur squelette externe, constitué la plupart du temps de chitine.

Autochtone : Qualifie ce qui habite en son lieu d'origine, son caractère « local ».

Axillaire : Placé à l'aisselle d'une feuille ou d'un pétiole.

Baie : Fruit charnu, sans noyau central, indéhiscent à plusieurs graines (pépins).

Barochore : Se dit d'une plante dont les semences sont dispersées par la seule gravité.

Biodisponibilité : En pédologie, aptitude d'un élément à passer d'un compartiment quelconque du sol dans un être vivant (bactérie, végétal, animal).

Biodiversité : « Variété et variabilité de tous les organismes vivants. Elle inclut la variabilité génétique à l'intérieur des espèces et de leurs populations, la variabilité des espèces et de leurs formes de vie, la diversité des complexes d'espèces associées et de leurs interactions, et celle des processus écologiques qu'ils influencent ou dont ils sont les acteurs ». (XVII^e Assemblée Générale de l'IUCN, Costa Rica, 1998)

Bractée : Feuille modifiée dans ses forme, dimension, coloration et consistance, qui accompagne d'ordinaire les fleurs et qui forment souvent les enveloppes du bouton floral.

Bractéole : Petite bractée.

Ca (symb. chim.) : Calcium.

Caduc : Désigne un organe à durée de vie limitée (généralement inférieure à une année), se détachant spontanément à maturité.

Canaliculé : Désigne un organe creusé d'un petit sillon mimant un canal.

Capacité au champ : Capacité de rétention maximale en eau du sol. État hydrique du sol *in situ* après ressuyage par gravité d'une pluie ayant saturé entièrement le sol. Correspond à un pF = 2,5, voire 3,0 selon les sols (le pF est égal au logarithme décimal du potentiel matriciel ; celui-ci correspond à la tension de succion du sol, qui augmente quand la teneur en eau diminue).

Capacité d'échange cationique (CEC) : Quantité de cations que le sol peut retenir sur son complexe adsorbant (ou complexe argilo-humique, constitué par les argiles et l'humus du sol ; voir définition) à un pH donné. S'exprime en méq/100 g de sol.

Capsule : Fruit sec déhiscent s'ouvrant par plusieurs fentes longitudinales.

Caréné : Désigne un organe portant une arête saillante, formée par la proéminence de la nervure médiane ou par un pli à angle aigu et longitudinal sur la face inférieure d'un organe, ressemblant à la carène d'un bateau.

Caroncule : Petite excroissance arrondie située sur la graine.

Carpelle : Élément de l'organe femelle de la fleur, contenant les ovules.

Cations échangeables (ou bases échangeables) : Cations retenus par le complexe adsorbant dont ils compensent la charge négative et pouvant être échangés, c'est-à-dire remplacés charge pour charge par d'autres cations provenant de la solution du sol. Peuvent être préférentiellement absorbés par les racines. Les cations concernés sont : Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ et Na⁺, et s'expriment habituellement en méq/100 g de sol.

Cernage : Action de trancher les racines.

Cespiteuse : Formant une touffe dense.

Cladode : Rameau aplati, simulant des feuilles.

Colluvial (sol) : Les sols colluviaux d'origine ultramafique sont constitués de matériaux ferrallitiques sableux ou gravillonnaires accumulés en bas des pentes.

Complexe adsorbant (ou complexe argilo-humique, ou complexe d'échange) : Dans le sol, ensemble des forces capables de retenir certains éléments. Il est représenté par la surface des constituants organiques et minéraux (essentiellement humus et argiles) qui jouent un rôle dans l'échange des cations. Représente le réservoir de fertilité chimique du sol.

Conifère : Arbre produisant des fruits en forme de cône, une sève collante, la résine, et dont le feuillage, en forme d'aiguilles ou d'écailles, est très persistant (pin, araucaria...).

Cotylédon : La première ou les deux premières feuilles d'une plante, déjà présente(s) dans la graine.

Crénéle : Désigne un organe bordé de dents obtuses ou arrondies.

Cuirasse : Désigne ici la partie supérieure, indurée, du profil d'altération des roches ultrabasiques. Produit représentant

le terme ultime de l'altération des péridotites, en climat tropical, et correspondant à l'accumulation résiduelle de fer.

Cyme : Inflorescence dont l'axe, à croissance définie, se termine par une fleur, et dont les axes latéraux, apparaissant ultérieurement, sont également terminés par une fleur.

Décussé : Qualifie un organe (et plus spécialement les feuilles) dont les paires successives insérées le long d'un axe forment entre elles un angle droit.

Déhiscent : Se dit d'un organe initialement clos qui s'ouvre spontanément à maturité.

Dicotylédone : Plante dont l'embryon a deux lobes ou cotylédons. Les dicotylédones sont les végétaux les plus complets, ceux dont l'organisation est la plus compliquée.

Dioïque : Désigne des espèces de plantes qui possèdent des individus portant uniquement des fleurs mâles ou uniquement des fleurs femelles (cas des Casuarinaceae).

Diploïde : L'état diploïde d'une espèce végétale est celui qui correspond à la présence d'un lot double de chromosomes dans chaque noyau cellulaire de l'individu.

Distique : Se dit d'organes alternes disposés sur deux rangs opposés, et donc situés dans un même plan.

Dormance : Inaptitude d'une graine à germer lorsque les conditions environnementales devraient apparemment permettre la germination.

Drupe : Fruit charnu indéhiscent, contenant une ou plusieurs graines enfermées dans un noyau dur. Le péricarpe y est représenté par l'épicarpe (la peau du fruit), le mésocarpe en est la chair et l'endocarpe, sclérifié, constitue le noyau.

Eau fumigée : Eau commercialisée renfermant des substances volatiles présentes dans la fumée, et pouvant faciliter la germination chez certaines plantes.

Écosystème : Unité écologique fonctionnelle constituée par un ensemble d'organismes vivants (biocénose) exploitant un milieu naturel déterminé (biotop). Cette notion intègre également les interactions des espèces entre elles et avec leur milieu de vie.

Écotype : Population locale d'une espèce, qui se caractérise par l'acquisition génétique de modifications sélectionnées par des conditions écologiques particulières.

Édaphique : Caractérise un facteur écologique lié aux caractéristiques du sol.

Embryon : Formation usuellement diploïde, dérivée de l'évolution de l'œuf né de la fécondation. Il vit aux dépens de la plante mère avec laquelle il reste en communication jusqu'au terme de la genèse.

Endémique : Qui est particulier à une localité donnée. Ici, espèce dont l'aire de répartition naturelle ne s'étend pas au-delà de la Nouvelle-Calédonie.

Endo et ecto (associés à mycorhizes) : Endo (dedans), pénétrant à l'intérieur des racines, et ecto (dehors), restant à l'extérieur des racines.

Endocarpe : Partie interne de l'enveloppe du fruit, la plus proche de la graine.

Environnement : Ensemble des agents physiques, chimiques, biologiques et des facteurs sociaux susceptibles d'avoir un effet sur les êtres vivants et les activités humaines.

Épicarpe : Partie la plus externe de la paroi du fruit. L'épicarpe est très souvent extrêmement mince et constitue alors « la peau » du fruit.

Épicotyle : Chez les Angiospermes, on qualifie de la sorte la partie de l'axe d'une plantule qui se situe au-dessus du

niveau d'insertion des cotylédons. Lorsque la semence sera confinée au sol et germera, cet axe épicotylé prendra son essor et engendrera, grâce à l'activité de son méristème apical, la tige principale de la plante.

Épillet : Inflorescence élémentaire caractéristique de la famille des Poaceae et de la famille voisine des Cyperaceae.

Épiphyte : Plantes qui poussent en se servant d'autres plantes comme supports.

Érodé (sol) : Les sols érodés, dont il est question ici, sont faiblement acides à légèrement basiques. Ils sont constitués de latérites en place, peu évoluées, renfermant encore un peu de magnésium et de silice.

Espèce introduite : Espèce introduite volontairement ou involontairement par l'homme.

Espèce invasive : C'est une espèce introduite, intentionnellement ou non, hors de son aire de répartition naturelle, qui se multiplie sur son nouveau territoire, sans intervention de l'homme, et y forme une population pérenne, constituant un agent de perturbation des activités humaines ou nuisant à la diversité biologique. L'UICN élargit la définition d'espèce invasive à toute espèce (introduite ou autochtone) qui, s'étant établie dans un nouveau domaine géographique pour elle, y est un agent de perturbation et nuit à la diversité biologique.

Espèce native (ou autochtone ou indigène) : Espèce dont l'aire de distribution naturelle (ne résultant pas du transport par l'homme) s'étend également en dehors des limites de la Nouvelle-Calédonie.

Évapotranspiration : Paramètre équivalant à la somme de la quantité d'eau transpirée par les végétaux et à celle évaporée.

Exalbuminé : Se dit d'une graine où l'embryon a entièrement consommé l'albumen.

Ferrallitique (sol) : Sol des zones tropicales humides, de couleur rouge, acide, riche en oxydes et en hydroxydes de fer, pauvre en silice et en magnésium. L'adjectif latéritique est le plus souvent utilisé dans cette acception.

Ferritique : Qualifie un sol ferrallitique lorsque le fer prédomine par rapport à l'aluminium.

Foliole : Chacune des divisions d'une feuille composée, laquelle peut être, par exemple, trifoliée, multifoliée.

Follicule : Fruit sec, déhiscent par une seule fente et constitué par chacun des carpelles. En général, chaque follicule renferme plusieurs graines.

Formation végétale : Groupement végétal d'aspect défini, sans prise en compte des espèces qui le constituent.

Génotype : Caractéristiques du patrimoine génétique propre à un individu donné.

Gibbérelline : Régulateur de croissance qui peut stimuler la germination dans le cas de dormances d'origine embryonnaire.

Glabre : Se dit d'un organe dépourvu de poils.

Glume : Équivalent des bractées, généralement au nombre de deux, parfois plus. Située à la base de l'épillet des Poaceae ou des Cyperaceae.

Goethite : Minéral oxyhydroxyde de fer trivalent. Se présente en cristaux en forme d'aiguille.

Gousse : Fruit sec déhiscent, plus ou moins allongé, formé d'un seul carpelle s'ouvrant par deux fentes longitudinales. Elle dérive d'un ovaire uniloculaire renfermant deux rangées alternantes de graines.

Grappe : Inflorescence formée d'un axe primaire allongé, portant des axes secondaires ou rameaux terminés chacun par une fleur.

Grégaire : Se dit d'une espèce dont les individus sont distribués en groupes.

Guilde : Groupe de populations appartenant à des espèces taxonomiquement apparentées et qui exploitent, au sein d'un écosystème, le même type de ressource.

Gymnosperme : Important groupe de plantes supérieures caractérisées par leurs graines élaborées à nu (pas de fruit) à partir des ovules supportés par des feuilles carpellaires regroupées en cônes.

Hampe : Se dit d'une tige florale ne possédant pas de feuilles (*stricto sensu*). Toutefois, certaines hampes peuvent comporter des feuilles réduites.

Haploïde : L'état haploïde d'une espèce végétale est celui qui correspond à la présence d'un lot simple de chromosomes, dans chaque noyau cellulaire de l'individu.

Héliophile : Espèce végétale dont l'activité photosynthétique est maximale en pleine lumière.

Hématite : Minéral composé d'oxyde de fer Fe_2O_3 .

Hermaphrodite : Désigne une fleur ou une plante entière présentant conjointement les deux sexes.

Hile : Cicatrice laissée sur la graine au point d'attache de l'ovule qui lui a donné naissance.

Horizons : En pédologie, les diverses strates de couleur, de texture et de structure différentes, qui apparaissent sur un profil de sol.

Hydromorphe : Qualifie un sol régulièrement saturé en eau.

Hypermagnésien : Sol riche en magnésium dont le rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} est supérieur à 5.

Hypocotyle : Partie de l'axe d'une plantule qui se situe au-dessous du niveau d'insertion des cotylédons.

Hypogyne : Se dit d'une pièce florale qui paraît s'insérer au-dessous de l'ovaire. Par extension, lorsque toutes les pièces florales sont disposées de la sorte, on dit que la fleur elle-même est hypogyne. Dans le cas des Cyperaceae, on appelle soies hypogynes les structures restantes des pièces florales qui servent de mécanisme de dispersion, par le vent notamment.

Impact : Incidence de perturbations plus ou moins graves sur un environnement ou sur une ou plusieurs de ses composantes et susceptibles d'en modifier le fonctionnement.

Imparipenné : Désigne une feuille pennée, dont le rachis se termine par une foliole isolée qui ne fait pas partie d'une paire.

Indéhiscant : Qualifie une étamine ou un fruit qui ne s'ouvre pas spontanément à maturité.

Indigène : Espèce se trouvant naturellement dans une ou plusieurs régions géographiques données.

Inoculum : Substance introduite par inoculation.

Invertébré : Organisme du règne animal dépourvu de colonne vertébrale. Il peut être unicellulaire.

K (symb. chim.) : Potassium.

Latérite : Ensemble des matériaux meubles ou indurés riches en oxydes et en hydroxydes de fer (cas des latérites des terrains miniers) et en aluminium (lorsque la roche mère en contient), constituant les sols provenant de l'altération poussée des roches sous climat tropical.

Lenticelle : Discontinuité du liège au niveau d'un rameau, d'une tige ou d'une racine, permettant, à son niveau, les échanges gazeux avec l'extérieur.

Lessivage, lixiviation : Entraînement mécanique (lessivage) ou par dissolution (lixiviation) d'éléments (argiles, ions, minéraux hydrolysés) d'un substrat, sous l'effet de l'écoulement des eaux.

Ligule : Languette membraneuse, ou parfois rangée de poils, située à la jonction de la gaine foliaire et du limbe des feuilles, que l'on retrouve chez les Poaceae, les Cyperaceae et la Selaginellaceae.

Maquis minier : Regroupe en Nouvelle-Calédonie toutes les formations végétales, d'origine principalement secondaire, sur substrats ultramafiques (péridotites et serpentinites) n'appartenant pas à la forêt dense humide ni aux forêts rivulaires. Il s'agit de formations sclérophylles sempervirentes héliophiles, arbustives plus ou moins buissonnantes ou ligno-herbacées à strate cypéracéenne dense. Elles peuvent être dominées localement par une strate lâche d'*Araucaria* spp. ou d'*Agathis ovata* (kaori de montagne).

Merlon : Levée de matériaux, rapportés, rocheux ou terreux, constitués le long, du côté ravin, des pistes de roulage.

Mésocarpe : Couche intermédiaire du péricarpe, constituant dans les drupes la partie charnue (pulpe), entre l'épiderme et les noyaux.

Métamorphique : Se dit d'une roche dont la structure a été modifiée sous l'action de facteurs physiques (pression, température) ou chimiques.

Mg (symb. chim.) : Magnésium.

Micropyle : Petite discontinuité du tégument qui entoure l'ovule, permettant le passage du tube pollinique en direction du sac embryonnaire, en vue d'assurer la fécondation. Comme son nom l'indique, le micropyle joue bien son rôle de « petite porte ».

Mn (symb. chim.) : Manganèse.

Monocaulé : Qualifie un végétal dépourvu de branches latérales, dont seul le sommet du tronc est feuillu.

Monocotylédone : Qui n'a qu'un cotylédon (palmiers, graminées...).

Monoïque : Qualifie des plantes présentant simultanément des fleurs mâles et femelles.

Mycorhize : Résultat de l'association symbiotique entre certains champignons du sol et les racines des plantes. On distingue deux types principaux de mycorhizes : les ectomycorhizes et les endomycorhizes.

Myrmécophage : Désigne le groupement de différentes fourmis présentes en un site donné.

N (symb. chim.) : Azote.

Ni (symb. chim.) : Nickel.

Nodule : Ici, élément fixateur de l'azote atmosphérique se trouvant sur les racines de certaines Fabaceae.

Nucelle : Massif cellulaire diploïde remplissant chaque jeune ovule. L'une de ces cellules est à l'origine du gamétophyte femelle à la faveur d'une méiose. Au cours de l'évolution de l'ovule en graine, le nucelle sera, plus ou moins précocement, lysé.

Oblong : Plus long que large et à bords quasiment parallèles.

Obtus : Se dit d'une pièce (sépal, pétale, feuille...) dont le sommet est arrondi.

Ombelle : Inflorescence dont les rameaux partant du même point s'élevaient à la même hauteur, en divergeant comme les rayons d'un parasol.

Opposé : Désigne des organes qui s'insèrent par deux à un même niveau en se faisant face. Lorsque, d'une paire à la suivante, l'angle de divergence est de 90°, on dit, en outre, que les pièces sont décussées.

Orthodoxe : Désigne une graine tolérant la dessiccation. Les graines orthodoxes sont fortement déshydratées à maturité (5 à 15 % d'eau), ce qui leur permet de se conserver sur une longue période.

P (symb. chim.) : Phosphore.

Panicule : Inflorescence indéfinie (et donc terminée par un bourgeon), dans laquelle les axes secondaires, plus ou moins ramifiés, vont en décroissant de la base au sommet.

Paripenné : Se dit d'une feuille composée, formée d'un nombre pair de folioles.

Pathogène : Désigne un organisme responsable d'une maladie.

Pauciflore : Désigne une plante qui porte peu de fleurs.

Pédogenèse : Ensemble des processus conduisant à la formation et à l'évolution des sols.

Pédoncule : Pièce florale qui porte les fleurs puis les fruits après fécondation.

Penné : Désigne une feuille composée, divisée en folioles disposées des deux côtés du rachis.

Péricarpe : Paroi du fruit mûr ; constitué de trois couches : l'épicarpe, externe, le mésocarpe, médian, et l'endocarpe, interne.

Péridot : Silicate ferromagnésien, comprenant une série allant de $Mg_3(SiO_4)$ à $Fe_2(SiO_4)$, dans laquelle $(Fe,Mg)(SiO_4)$ représentent le groupe important des olivines.

Péridotite : Roche magmatique, comprenant deux catégories de roches, les harzburgites (les plus communes en Nouvelle-Calédonie), formées de pyroxène (sous forme de cristaux de couleur sombre) et d'olivine (de couleur verte), et les dunites, constituées à plus de 90 % d'olivine. Pyroxène et olivine sont des minéraux composés principalement de silicates de fer et de magnésium. Roche fréquemment altérée par serpentinisation.

Pétiole : Partie étroite de la feuille unissant le limbe à la tige. À sa base se trouvent les stipules. Les feuilles dépourvues de pétiole sont dites sessiles.

Phénologie : Étude des phases de développements saisonniers chez les végétaux : feuillaison, floraison, fructification. Ces développements sont liés à certains paramètres climatiques.

Phylogénie : Étude de la formation et de l'évolution des espèces animales et végétales, en vue d'établir leur parenté.

Phylum : Désigne le niveau taxonomique, à savoir l'embranchement.

Phyto-disponibilité : Désigne la biodisponibilité spécifiquement liée aux végétaux.

Phytopathogène : Micro-organisme susceptible d'infecter les végétaux et de déclencher des maladies.

Phytophage : Organisme se nourrissant de végétaux.

Pionnière (espèce) : Espèce qui apparaît aux premiers stades évolutifs d'un écosystème, capable de s'installer sur des sols dénudés.

Point de flétrissement : Niveau d'humidité du sol auquel la plante ne peut plus prélever d'eau et commence à se flétrir. Correspond à $pF = 4,2$ (soit une force de succion d'environ 16 bars ; cf. capacité au champ).

Polymorphe : Désigne un élément pouvant présenter des formes variables.

Protandre : Désigne une fleur dont les anthères sont mûres avant les stigmates, permettant d'éviter l'autogamie.

Pseudocladode : Structure analogue à un cladode (rameau aplati et vert, ressemblant à une feuille).

Ptéridophytes : Les ptéridophytes comprennent les fougères, les prêles, les lycopodes et les sélaginelles. Ce sont des plantes sans fleurs, mais elles possèdent des racines, une tige (quelquefois souterraine), des feuilles et des éléments conducteurs de la sève. Ces éléments conducteurs restent malgré tout archaïques.

Radiation adaptative : Diversification d'une espèce qui s'adapte à différentes niches écologiques et finalement aboutit à différentes espèces. La sélection naturelle étant le mécanisme principal qui dirige les phénomènes de radiation adaptative.

Ramille : Les plus fines ramifications des rameaux. Mot utilisé pour désigner les ramilles vertes des Araucariaceae comportant plusieurs feuilles écaillées.

Récalcitrant : Désigne des graines riches en eau à maturité, qui ne résistent pas à la dessiccation et à la conservation sur de longues périodes.

Relation trophique : Lien qui unit un prédateur et sa proie dans un écosystème.

Réserve utile : Différence entre les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement. On exprime généralement la réserve utile en millimètres, elle est alors directement comparable avec les hauteurs de pluie.

Restauration écologique : Processus qui assiste l'autoréparation d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit.

Rétus : Tronqué et légèrement déprimé dans la partie centrale.

Révoluté : Désigne des feuilles à bords repliés vers la face inférieure.

Rhizome : Tige souterraine, généralement horizontale, qui diffère de la racine par sa structure interne et la présence de feuilles réduites, de bourgeons et de nœuds.

Rhizosphère : Zone du sol dans laquelle s'exerce l'influence des racines des plantes, notamment sur la microflore par l'intermédiaire de substances chimiques secrétées par les racines.

Rivulaire (végétation) : Désigne des espèces ou une formation se développant dans des zones moyennes aux cours d'eau.

Roches ultramafiques (ou ultrabasiqes) : Ce sont des roches magmatiques constituées de silicates ferromagnésiens dépourvus de feldspath et de quartz. Elles renferment des teneurs en $SiO_2 < 45\%$ (caractère basique), des teneurs élevées en fer, en magnésium et en certains métaux (nickel, cobalt, chrome, manganèse), mais très pauvres en aluminium, en potassium, en calcium et en phosphore. Elles sont représentées en Nouvelle-Calédonie par des péridotites et des serpentinites.

Samare : Akène pourvu d'une aile membraneuse.

Saprolite : Roche (ou couche géologique) produite par altération chimique d'une roche mère, due à l'action du climat, sans avoir été transportée. Elle est souvent friable et contient des structures de la roche d'origine et de nouvelles structures qui n'ont pas été transportées. Elle peut être enrichie en nickel dans le cas de l'altération des péridotites, ce sont alors des minerais de nickel.

Scabre : Désigne un organe dont la surface est très rugueuse au toucher.

Scarification : Action de fragiliser l'enveloppe externe d'une semence (graine ou fruit) pour la rendre perméable à l'eau.

Sclérophylle : Qualifie un végétal à feuillage sempervirent avec des feuilles souvent petites, coriaces et assez épaisses, caractérisant une adaptation à la sécheresse.

Scorpioïde : Désigne une inflorescence (cyme) où les fleurs sont disposées sur un seul côté de l'axe principal, ce dernier étant enroulé sur lui-même comme une queue de scorpion.

Sempervirent : Formation végétale composée d'espèces à feuillages persistants.

Serpentine : Silicate en feuillets, en lamelles ou en fibres. De couleur vert opaque et à l'aspect de peau de serpent, d'où son nom. Produit d'altération de divers minéraux riches en fer et en magnésium, notamment les péridots (olivine) et les pyroxènes.

Serpentinite : Roche monominérale, provenant de la transformation des péridotites par métamorphisme sous forte pression. Le minéral qui la compose est la serpentine.

Sessile : Désigne une fleur sans pédoncule ou une feuille sans pétiole.

Smectites : Famille d'argiles gonflantes (expansibles en fonction de leur teneur en eau) du type 2-1.

Sol métallifère : Type de sol ayant de fortes concentrations en métaux.

Spéciation : En biologie, désigne le processus évolutif par lequel de nouvelles espèces vivantes apparaissent.

Spéciation allopatrique : Spéciation due à une séparation géographique d'une espèce en deux ensembles. Les populations isolées divergent génétiquement jusqu'à constituer des espèces différentes.

Staminode : Étamine stérile ne comportant pas de sacs polliniques.

Stipule : Petit appendice foliacé ou épineux, placé généralement de chaque côté de la base du pétiole sur les tiges de certaines plantes.

Stomate : Structure se situant surtout sur la face inférieure des feuilles, jouant un rôle essentiel dans les échanges gazeux.

Succession primaire : Établissement et développement d'un écosystème, sur une surface nue où aucune végétation ne l'a précédé (formation d'une île volcanique par exemple).

Succession secondaire : Processus de colonisation d'un biotope par les êtres vivants et les changements dans le

temps de la composition floristique et faunistique d'une station après qu'une perturbation a détruit partiellement ou totalement l'écosystème préexistant.

Symbiose : Association entre deux organismes (mode de vie commun de deux ou de plusieurs catégories d'organismes, bénéfique pour chacun d'eux).

Talweg (ou thalweg) : Correspond à la ligne qui rejoint les points les plus bas d'une vallée. Les talwegs sont modelés par l'érosion et fréquemment occupés par le réseau hydrographique.

Taxonomie : Science qui traite de la classification des organismes vivants d'après leurs rapports naturels, en prenant pour critère principal la morphologie.

Tégument : Bien que ce terme puisse servir pour désigner tout revêtement, on l'utilise beaucoup plus régulièrement pour désigner l'enveloppe protectrice de l'ovule ou de la graine.

Tépale : Pièces florales externes et internes du périanthe, dont on ne peut dire s'il s'agit de pétales ou de sépales.

Terrains miniers : Désigne en Nouvelle-Calédonie l'ensemble des substrats issus des roches ultramafiques. Au sens large, englobe tous les écosystèmes sur ces substrats.

Tomenteux : Désigne un organe aérien (feuille, tige, fruit) dont la surface est couverte de poils cotonneux (tomentum), plus ou moins longs, enchevêtrés et denses.

Topsoil : Terme anglophone désignant la partie superficielle du sol dans laquelle l'activité biologique est la plus active, renfermant notamment semences et spores.

Tricoque : Désigne un type particulier de capsule. Fruit à trois coques.

Trimère : Désigne une fleur ou une partie de la fleur dont les organes homologues sont au nombre de trois ou d'un multiple de trois.

Tristique : Disposition particulière des feuilles sur certaines tiges. L'angle de divergence est là de 120°, c'est-à-dire que les feuilles sont disposées suivant trois génératrices.

Ubiquiste : Espèce capable de se développer dans des habitats variés.

Ultrabasilique / ultramafique : Voir « roche ».

Vacuum cleaner : Dispositif utilisant le principe de dépression atmosphérique pour trier les graines.

Valve : Un des segments de l'enveloppe d'un fruit déhiscent après son ouverture pour laisser échapper les graines à maturité.

Verse : Ouvrage où sont stockés les stériles miniers.

Vertébré : Organisme du règne animal possédant un squelette osseux ou cartilagineux interne.

Verticille : Désigne un ensemble d'organes insérés au même niveau autour de l'axe sur lequel ils ont pris naissance.

Vicariante altitudinale : Espèce qui se substitue à une autre à une altitude différente.

Xérophile : Organisme capable de se développer, grâce à des adaptations, dans des milieux très secs.

SIGLES et ACRONYMES

- ABA** : Acide abscissique.
- AIA** : Acide indole acétique (hormones de bouturage).
- AIB** : Acide indole butyrique (hormones de bouturage).
- Amap** : botAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes.
- ANA** : Acide naphthalène acétique (hormones de bouturage).
- APG III** : Angiosperm Phylogeny Group (3^e classification publiée).
- BP** : Before Present (traduit par avant le présent, terme de référence chronologique).
- CEC** : Capacité d'échange cationique.
- Cirad** : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.
- CNRT** : Centre national de recherche technologique.
- CTFT** : Centre technique forestier tropical (dorénavant intégré dans le Cirad).
- DDEE** : Direction du développement économique et de l'environnement (province Nord).
- DDR** : Direction du développement rural (province Sud).
- Dimenc** : Direction de l'industrie, des mines et de l'énergie de Nouvelle-Calédonie.
- DTPA** : Diéthylène triamine penta acide (chélateur, notamment pour métaux de transition).
- GA3** : Acide gibbérellique de la famille des Gibbérellines (phytohormones).
- Gemini** : Société gestion-exploitation des mines de nickel.
- GPS** : Global Positioning System.
- IAC** : Institut agronomique néo-calédonien.
- IRD** : Institut de recherche pour le développement.
- Isee** : Institut de la statistique et des études économiques.
- ISTA** : International Seed Testing Association.
- IUCN** : Union internationale pour la conservation de la nature.
- KNS** : Koniambo Nickel SAS.
- Live** : Laboratoire insulaire du vivant et de l'environnement.
- méq** : milliéquivalent (1 mmole de K⁺ = 1 méq ; 1 mmole de Ca⁺² = 2 méq).
- MNHN** : Muséum national d'histoire naturelle.
- MTH** : Millions de tonnes humides.
- NMC** : Nickel Mining Company.
- ONG** : Organisation non gouvernementale.
- Orstom** : Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération.
- PIB** : Produit intérieur brut.
- ppm** : partie par million (par ex. mg/kg).
- SLN** : Société Le Nickel.
- SMCB** : Société des mines du cap Bocage.
- SMGM** : Société minière Georges Montagnat.
- SMN** : Société des mines de Nakéty.
- SMP** : Société des mines de Poro.
- SMSP** : Société minière du Sud Pacifique.
- SMT** : Société des mines de Tontouta.
- Step (boues de)** : Station d'épuration.
- Sysmin** : Système pour les minerais (fonds de stabilisation pour les produits miniers des pays liés à l'Union européenne).
- TTC** : Triphényl 2,3,5 tétrazolium chlorure.
- UE** : Union européenne.
- UNC** : Université de la Nouvelle-Calédonie.

INDEX

ESPÈCES VÉGÉTALES PRÉSENTES EN MAQUIS MINIERS

A

Acacia spirorbis 69, 132, 141, 143, 145, 148, 149, 155, 160, 161, 212, 224, 232, 273, 277, 360, 376, 379, 385.
Acridocarpus austrocaledonica 175, 289, 290, 292, 385, 386.
Agathis ovata 48, 65, 145, 175, 235, 386.
Alphitonia neocaledonica 59, 77, 83, 91, 96, 126, 140, 143, 145, 159, 174, 176, 185, 187, 215, 216, 220, 222, 224, 225, 226, 277, 329, 330, 332, 385, 386.
Alstonia balansae 96, 161, 175, 386.
Alstonia deplanchei 68, 81.
Alyxia poyaensis 81.
Amborella trichopoda 49.
Apiopetalum velutinum 63, 71.
Araucaria montana 65, 81, 145, 175, 190, 236, 238, 239, 240, 385, 386.
Araucaria muelleri 81.
Araucaria rulei 48, 65, 175, 236, 238, 240, 386.
Archidendrops granulosa 59, 274.
Archidendrops lentiscifolia 68, 141, 386.
Archidendrops macradenia 141, 386.
Archidendrops paivana 141, 386.
Arilistrum gummiiferum 57, 59, 61, 92, 145, 175, 297.
Artia balansae 175.
Austrobuxus carunculatus 66, 68, 82, 159, 176, 177, 225, 226, 315, 316, 385, 386.

B

Baloghia drimiflora 68, 386.
Beauprea montisfontium 72, 73.
Beauprea spathulaefolia 199.
Beaupreopsis paniculata 72, 87.
Beccariella bauveri 74.
Beccariella sebertii 75, 92, 343.
Bikkia artensis 68.
Bikkia pachyphylla 72, 73.
Bocquillonina sessiliflora 197.
Boronella koniamboensis 145.
Boronella pancheri 74, 75.
Brachiaria decumbens 221.

C

Carpolepis laurifolia 59, 91, 111, 145, 159, 175, 177, 199, 220, 297, 298, 385, 386.
Casearia kaalensis 199.
Cassia artensis 68, 273.
Cassytha filiformis 201.
Casuarina collina 69, 140, 145, 148, 149, 155, 160, 161, 232, 241, 360, 376, 379, 385.
Cerberiopsis candelabra 58, 59, 61, 96, 337, 386, 389.
Cerberiopsis obtusifolia 68, 202, 386.
Chloris gayana 221.
Chloris virgata 212.
Chorizandra cymbaria 78.
Cleistanthus stipitatus 68.
Cloezia aquarum 197, 198, 199, 203.
Cloezia artensis 70, 80, 83, 145, 176, 199, 200, 220, 224, 300, 301, 385, 386.
Cloezia buxifolia 78, 197, 199, 386.
Cloezia floribunda 176, 386.
Codia albifrons 71, 73, 249.
Codia discolor 77, 82, 91, 145, 385, 386.
Codia montana 53, 74, 82, 145, 386.
Codia nitida 70, 79, 80, 82.
Codia spatulata 70, 74, 386.
Comptonella drupacea 176, 342, 386.
Corchorus neocaledonicus 198, 199.
Costularia arundinacea 80, 142, 145, 175, 258, 260, 385, 386.
Costularia comosa 82, 143, 145, 155, 156, 159, 161, 168, 169, 175, 215, 220, 225, 257, 258, 277, 385, 386.
Costularia nervosa 82, 145, 175, 385, 386.
Costularia pubescens 71, 145, 175, 386.
Costularia stagnalis 80.
Costularia xyrioides 78.
Crossostylis grandiflora 176.
Croton insularis 69.
Cunonia alticola 71.
Cunonia deplanchei 78, 79, 109, 111, 175, 199.
Cunonia macrophylla 70, 82, 145, 174, 175, 177, 191, 197, 250, 251, 386.
Cunonia purpurea 78.
Cunonia rotundifolia 71, 73.
Cyathopsis albicans 71, 82, 145, 166, 175, 339, 386.

Cyathopsis floribunda 70, 386.
Cyclophyllum deplanchei 68.

D

Dacrydium araucarioides 74, 75, 145.
Dacrydium guillauminii 80.
Deplanchea sessilifolia 68.
Diospyros umbrosa 175.
Dodonaea viscosa 83, 85, 143, 145, 176, 187, 189, 212, 220, 277, 333, 334, 336, 385, 386.
Dracophyllum alticola 72.
Dracophyllum balansae 78, 79.
Dracophyllum cosmelioides 197.
Dracophyllum involucreatum 74, 82.
Dracophyllum mackeanum 72.
Dracophyllum ramosum 70, 80, 82, 166, 197.
Dracophyllum verticillatum 53, 111, 120.
Dubouzetia campanulata 52, 199.
Dubouzetia confusa 199.
Dubouzetia elegans 199.

E

Earina deplanchei 72.
Elaphanthera baumannii 74.
Eucarpa deplanchei 72, 176, 385, 386.
Eugenia rubiginosa 74.
Eugenia stricta 77, 83.
Exocarpos phyllanthoides 74.
Exocarpos spathulatus 74.

F

Fimbristylis ovata 68.

G

Gahnia aspera 68, 82, 175, 177, 179, 387.
Gahnia novocaledonensis 78.
Garcinia amplexicaulis 70, 81, 87, 94, 145.
Garcinia hennecartii 77.
Garcinia neglecta 197.
Gardenia aubryi 74, 75.
Garnieria spathulaefolia 74, 75.
Geissois hirsuta 111, 145, 175.
Geissois magnifica 111, 199.
Geissois pruinoso 77, 82, 87, 111, 135, 145, 175, 190, 197, 199, 200, 252, 253, 276, 387.
Geniostoma celastrinum 83.
Gossia alaternoides 74.
Greslania circinata 50, 72.
Greslania montana 72.
Grevillea exul ssp. exul 83, 111, 159, 176, 321, 322, 324, 385, 387.
Grevillea exul ssp. rubiginosa 85, 109, 176, 322, 385, 387.
Grevillea gillivrayi 53, 74, 80, 83, 111, 145, 176, 199, 387.
Grevillea meisneri 68, 83, 199, 387.
Guioa glauca 166, 176, 385, 387.
Gymnostoma chamaecyparis 69, 81, 141, 145, 175, 177, 241, 242, 244, 385, 387.
Gymnostoma deplancheanum 74, 76, 81, 140, 141, 149, 153, 175, 191, 241, 242, 244, 329, 332, 385, 387.
Gymnostoma glaucescens 241, 244, 387.
Gymnostoma intermedium 241, 244, 387.
Gymnostoma leucodon 80, 241, 387.
Gymnostoma nodiflorum 241, 244, 387.
Gymnostoma poissonianum 81, 145, 175, 241, 242, 244, 385, 387.

H

Hibbertia altigna 51, 71, 272, 387.
Hibbertia deplancheana 68, 199, 272, 387.
Hibbertia lucens 77, 91, 166, 175, 197, 200, 269, 270, 272, 387.
Hibbertia nana 72.
Hibbertia pancheri 74, 91, 175, 181, 197, 270, 272, 385, 387.
Hibbertia pulchella 70, 82, 200.
Hibbertia tontoutensis 197, 199, 272, 387.
Hibbertia trachyphylla 70, 82, 175.
Homalium kanaliense 80, 145.
Hybanthus caledonicus 197, 232.

J

Joinvillea plicata 82, 159, 175, 220, 285, 286, 288, 385, 387.

L

Lepidosperma perteres 70, 80, 82, 93, 145, 175, 197, 215, 224, 262, 263, 385, 387.
Libocedrus chevalieri 71, 73.
Litsea triflora 77.
Logania imbricata 72, 91.
Lomandra insularis 74, 75, 175, 385, 387.
Longetia buxoides 68, 83, 145, 176, 197, 199, 200, 215, 220, 315, 318, 320, 385, 387.

M

Machaerina deplanchei 82, 143, 145, 155, 159, 161, 163, 168, 175, 177, 192, 194, 215, 220, 224, 225, 264, 265, 277, 385, 387.
Machaerina juncea 78.
Maxwellia lepidota 175.
Maytenus fourneri 81, 87.
Melaleuca brongniartii 79.
Melaleuca dawsonii 71, 111.
Melaleuca gnidioides 78, 197, 199, 200.
Melaleuca pancheri 111, 145, 176, 387.
Melaleuca quinqueneria 101, 145, 297.
Melicope lasioneura 176.
Melodinus phylliraoides 199.
Metrosideros humboldtiana 72, 73.
Metrosideros nitida 53, 61, 77, 199, 200, 387.
Metrosideros operculata 197, 199, 205.
Metrosideros punctata 385, 387.
Metrosideros tetrasticha 73.
Mimosa invisa 212.
Montrouzieria sphaeroidea 81, 111.
Montrouzieria verticillata 71.
Morinda deplanchei 68.
Morschella esculenta 135.
Myodocarpus crassifolius 71, 387.
Myodocarpus fraxinifolius 81, 175, 293, 294, 296, 387.
Myodocarpus involucratum 77, 189, 296, 387.
Myodocarpus nervatus 175, 385, 387.
Myrtastrum rufo-punctatum 71, 83, 85, 91, 163, 166, 176, 197, 199, 200, 302, 387.
Myrtopsis novaecaledoniae 166.
Myrtopsis selingii 74.

N

Neisosperma sevenetii 337.
Neocallitropsis pancheri 48, 197.
Normandia novaecaledonica 71, 197, 200, 207, 232, 341, 385, 387.
Nothofagus balansae 145.
Nothofagus codonandra 61, 145.

O

Ochrosia mulsantii 68, 202, 204.
Osmanthus austrocaledonicus 176, 199.
Oxera baladica 111, 199.
Oxera brevicalyx 111, 199.
Oxera gmelinoides 52, 199.
Oxera neriiifolia 83, 111, 114, 197, 199, 200, 340, 387.

P

Pancheria alaternoides 70, 82, 111, 145, 175, 254, 256, 387.
Pancheria billardierei 82, 175, 254, 256, 387.
Pancheria communis 78, 79, 82.
Pancheria confusa 51, 74.
Pancheria ferruginea 92, 385, 388.
Pancheria hirsuta 82.
Pancheria humboldtiana 71.
Panicum maximum 221.
Peripterygia marginata 81, 175, 197, 200, 245, 246, 247, 248, 388.
Phyllanthus aeneus 83, 197, 388.
Phyllanthus buxoides 197, 199.
Phyllanthus favieri 87, 135, 145.
Phyllanthus koniamboensis 199.
Phyllanthus montrouzierii 68, 83, 388.
Phyllanthus peltatus 68, 83.
Phyllanthus poumensis 68.
Pinus caribaea 94, 157, 158.
Pittosporum collinum 68.
Pittosporum croceum 68.
Pittosporum gracile 176.
Pittosporum pronyense 176.
Polyscias pancheri 52, 74, 81, 175, 338, 388.
Pittosporum poumense 68.
Psychotria calorhammus 52, 68, 388.

Psychotria douarrei 86, 90, 145, 176, 341.
Pteridium esculentum 70, 93, 94, 145, 232, 385.
Pycnanandra acuminata 59, 86, 88, 343.

R

Rauvolfia semperflorens 81, 337, 388.
Retrophyllum minus 80.

S

Sannantha leratii 91, 120, 166, 176, 200, 304, 385, 388.
Scaevola beckii 82, 200.
Scaevola coccinea 111, 145, 163, 199.
Scaevola cylindrica 111, 159, 161, 175, 177, 282, 284, 385, 388.
Scaevola montana 83, 111, 145, 175, 197, 281, 282, 284, 385, 388.
Schoenus brevifolius 78.
Schoenus juvenis 71, 82, 143, 156, 159, 168, 175, 207, 220, 225, 226, 266, 268, 277, 385, 388.
Schoenus novaecaledonicus 82, 145, 156, 168, 169, 175, 266, 268, 385, 388.
Sebertia acuminata 135, 145.
Serianthes calycina 82, 111, 141, 142, 143, 274, 276, 277, 364, 388.
Serianthes germanii 141.
Serianthes margaretae 141.
Serianthes petitiana 80, 141, 276.
Serianthes sachetae 142, 175, 274, 276, 388.
Setaria sphacelata 212, 221.
Solmsia calophylla 74, 75, 176.
Soulamea muelleri 68, 388.
Soulamea pancheri 83, 344, 388.
Soulamea pelletieri 72, 92.
Stachytarpheta urticaefolia 212.
Stenocarpus comptonii 74.
Stenocarpus milnei 68, 83, 176, 326, 328, 385, 388.
Stenocarpus umbelliferus 79, 80, 83, 94, 176, 326, 328, 385, 388.
Stenotaphrum dimidiatum 212.
Storckia pancheri 59, 68, 82, 111, 163, 197, 278, 280, 388.
Stylosanthes scabra 221.
Styphelia cymbulae 70, 188, 197, 339, 388.
Styphelia longistylis 78.
Styphelia veillonii 113, 388.
Syzygium n'goyense 74.

T

Tarenna hexamera 74, 75.
Tarenna microcarpa 68.
Trema cannabina 212.
Tricostularia guillauminii 78.
Trifolium subterraneum 221.
Tristaniopsis calobuxus 83, 145, 172, 176, 197, 306, 308, 388.
Tristaniopsis capitulata 74.
Tristaniopsis glauca 70, 83, 94, 114, 145, 176, 197, 306, 388.
Tristaniopsis guillainii 53, 66, 83, 85, 91, 111, 145, 176, 177, 207, 388.
Tristaniopsis macphersonii 145.
Tristaniopsis ninndoensis 145.
Tristaniopsis vieillardii 145.

U

Uromyrtus artensis 199.
Uromyrtus emarginata 113, 114, 176, 200, 388.

W

Wikstroemia indica 176.

X

Xanthomyrtus hienghenensis 176.
Xanthostemon aurantiacus 79, 80, 83, 111, 176, 199, 200, 310-314, 385, 388.
Xanthostemon carlii 68, 314.
Xanthostemon francii 176, 314, 388.
Xanthostemon gugerlii 163, 167, 176, 314, 388.
Xanthostemon multiflorus 68, 83, 145, 176, 195, 310-314, 388.
Xanthostemon pubescens 68, 314.
Xanthostemon ruber 51, 83, 109, 111, 176, 310-314, 388.
Xeronema moorei 72, 73.
Xyris novaecaledonica 78.
Xyris pancheri 72, 78.

Z

Zygogynum pancheri 49, 176.

Achévé d'imprimer sur les presses de G.CANALE&C., Italie. 2^{ème} trimestre 2010.