



HAL
open science

La restauration des sites miniers

L. L'Huillier, A. Wulff, G. Gâteblé, B. Fogliani, C. Zongo, Tanguy Jaffré

► **To cite this version:**

L. L'Huillier, A. Wulff, G. Gâteblé, B. Fogliani, C. Zongo, et al.. La restauration des sites miniers. Laurent L'Huillier; Tanguy Jaffré; Adrien Wulff. Mines et environnement en Nouvelle Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration, IAC, p. 147-230, 2010, Etudes Synthèses, 978-2-9523950-8-3. ird-03045412

HAL Id: ird-03045412

<https://ird.hal.science/ird-03045412>

Submitted on 8 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



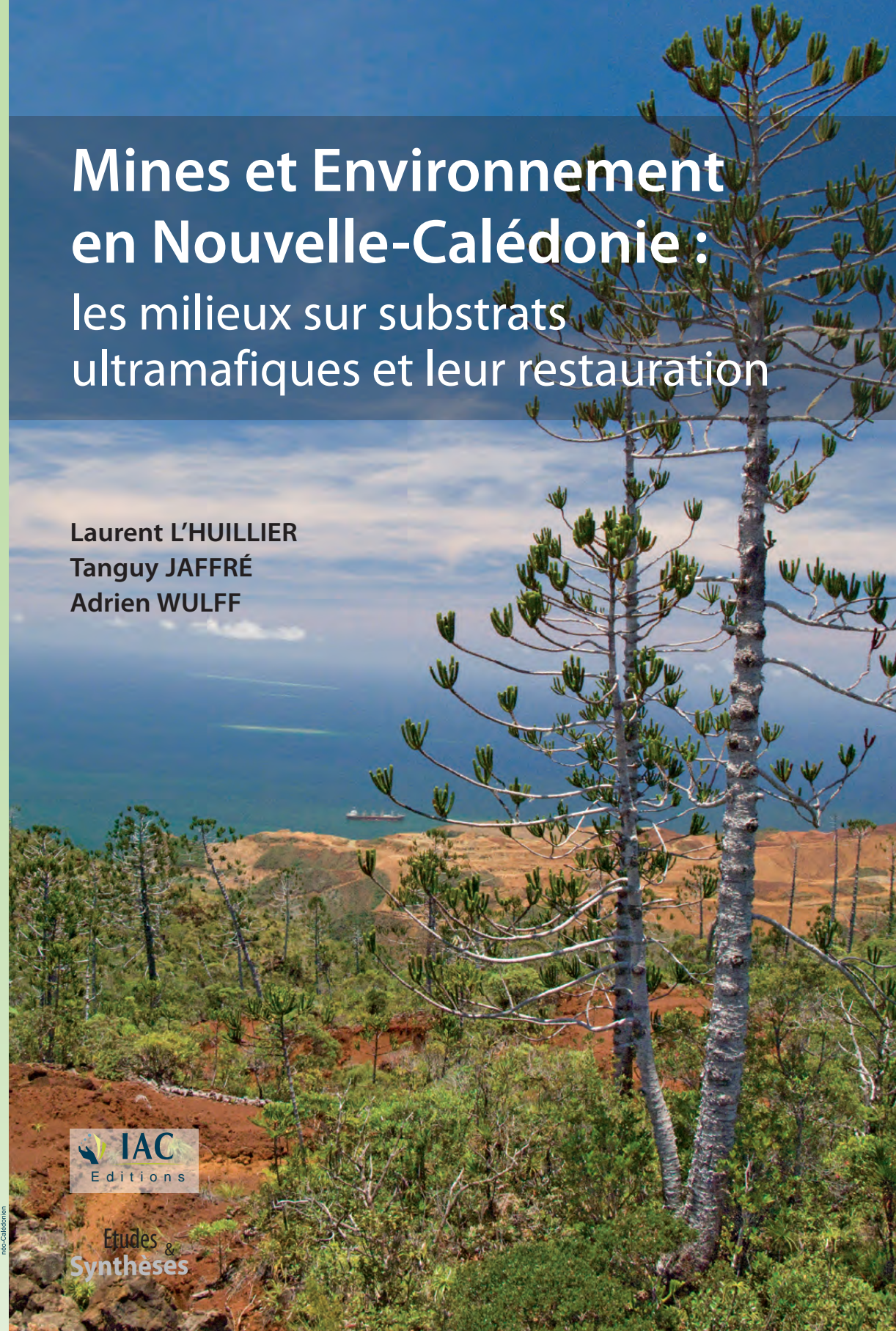
Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration

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

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 : **Tabu** EDITIONS / 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 :



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 MINIERS118
3.1. L'intérêt faunistique des milieux sur terrains miniers	118
3.2. La guilda 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 MINIERS128

CHAPITRE 5

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

1. INTRODUCTION130
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 ECTOMYCORHIZES135
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 MINIERS138
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 PLANTES142
7. INOCULATION CONTRÔLÉE AVEC DES BACTÉRIES SYMBIOTIQUES OU RHIZOSPHERIQUES, APPLIQUÉE À LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DES TERRAINS MINIERS142
8. PERSPECTIVES144

CHAPITRE 6

LA RESTAURATION DES SITES MINIERS

(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

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).

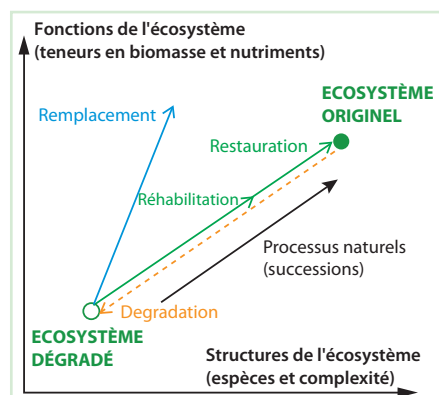


Figure 6.2 : Différentes approches de la mise en place d'une végétation sur terrain dégradé (Bradshaw 1997[®]).

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.

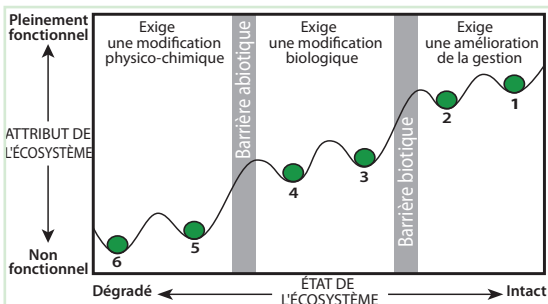


Figure 6.3 : Modèle conceptuel de la dégradation et de la restauration d'un écosystème (adapté de Hobbs & Harris 2001).



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.

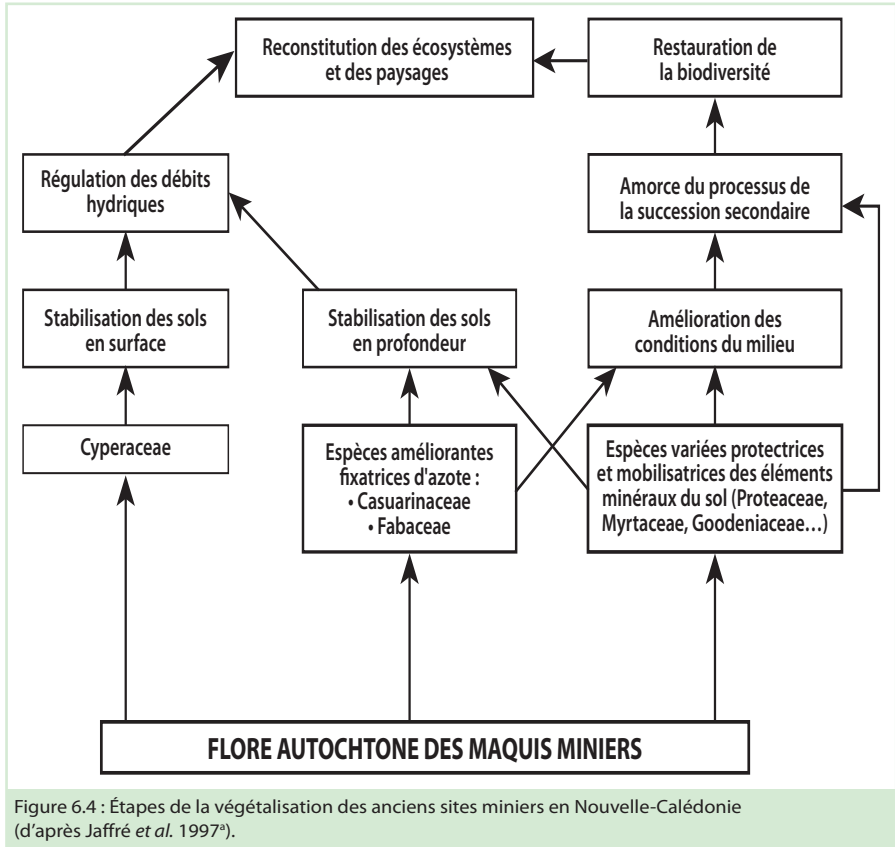
Une modélisation a permis d'estimer l'impact de la fréquence des feux sur la structure de la végétation : une probabilité de feu $< 0,1$ par décennie se traduirait par le maintien d'une couverture majoritairement forestière dense humide, tandis qu'une probabilité d'incendie entre 0,1 et 0,4 modifierait 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'IAAC, 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 planter 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 abouties (*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.



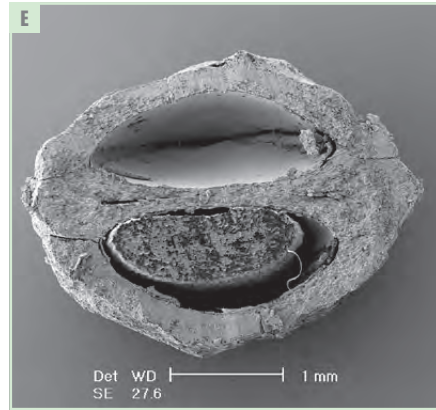
© IRD / J. Munzinger



© 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 déhiscent en gousses de *Storckia pancheri* (Fabaceae). **B** : Fruits secs déhiscent en capsules de *Xanthostemon gugerlii* (Myrtaceae). **C** : Fruits secs indéhiscent, akènes de *Machaerina deplanchei* (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).

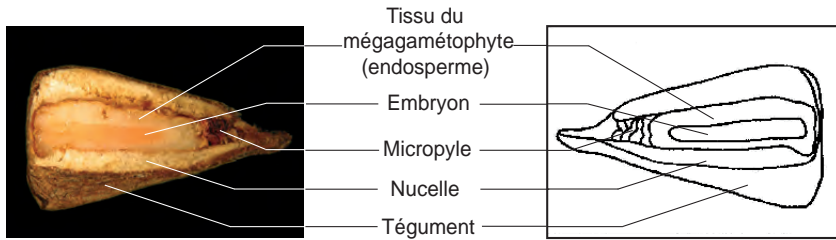
4.2.2.2. Période de collecte

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.

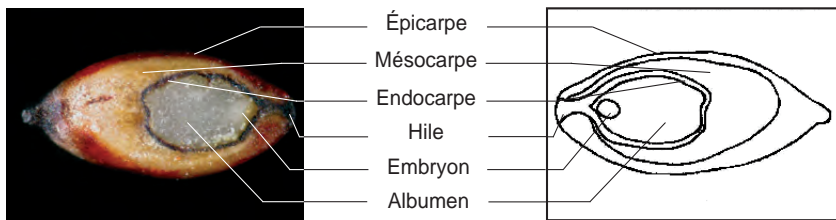
La prise de notes sur le terrain est indispensable car elle permettra de programmer les collectes ultérieures.

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



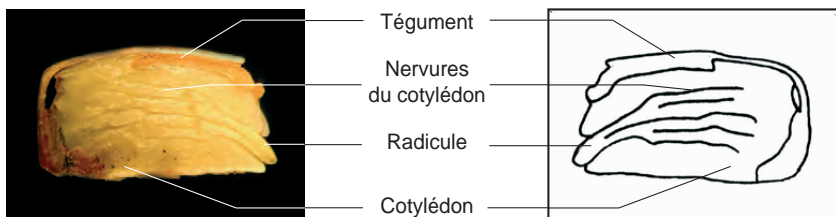
Cas d'une graine de gymnosperme où l'endosperme constitue le tissu de réserve (haploïde) de l'embryon. Ces structures sont enveloppées dans le nucelle (tissu de réserve diploïde), délimité extérieurement par le tégument. Il existe une ouverture apicale appelée micropyle.

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 racicule (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).

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).

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).

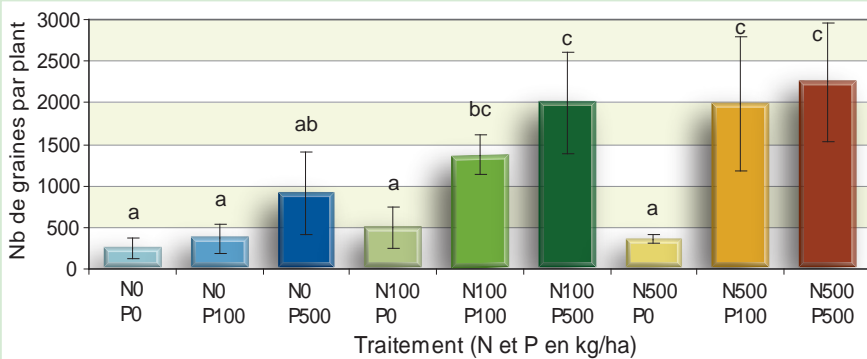


Figure 6.15 : Nombre de graines produites par plant de *Costularia comosa* selon le traitement (azote x phosphore). Moyenne de 5 répétitions, comportant chacune 18 plants. Des lettres différentes indiquent des différences significatives ($P < 0,05$) (Lagrange 2009).

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).

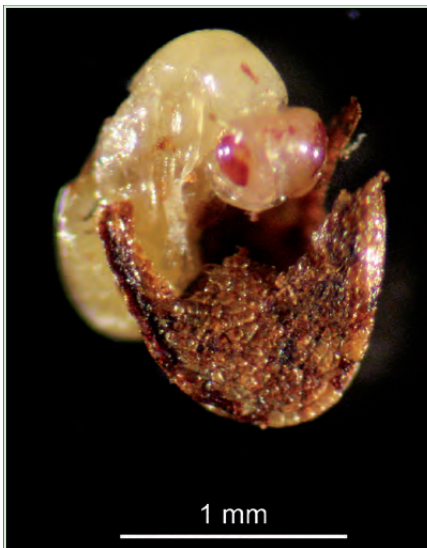


Figure 6.16 : Graine de *Tristaniopsis calobuxus* parasitée par une larve d'insecte.



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. *ruginosa* (Proteaceae) présentent des compositions en acides gras particulières qui en font des sources potentielles d'oméga 5 (Zongo *et al.* 2008^b).

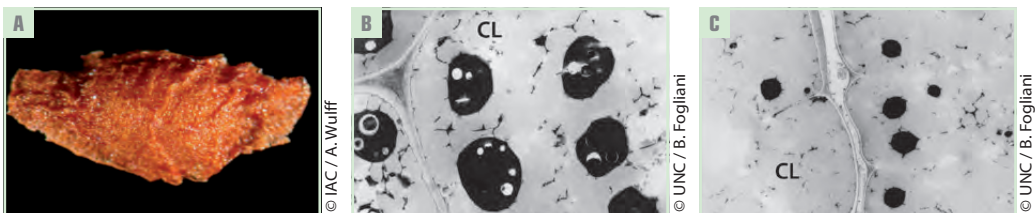


Figure 6.18 : Graines de *Cunonia macrophylla* (Cunoniaceae) : observation, à la loupe binoculaire, d'une graine entière (A) et, en microscopie électronique, de cellules de l'albumen (B) et de l'embryon (C). CL : corps lipidiques.

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.

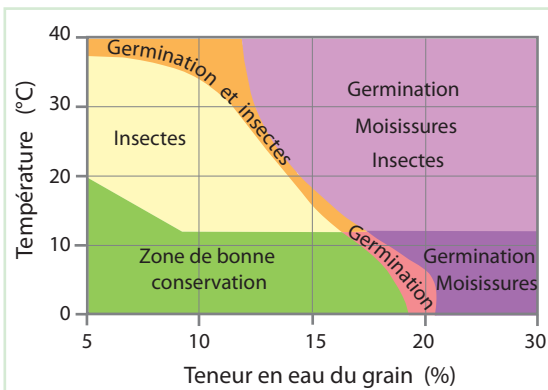


Figure 6.19 : Diagramme de conservation des graines (cas pour les céréales) (Mémento de l'agronome, 2002).

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.

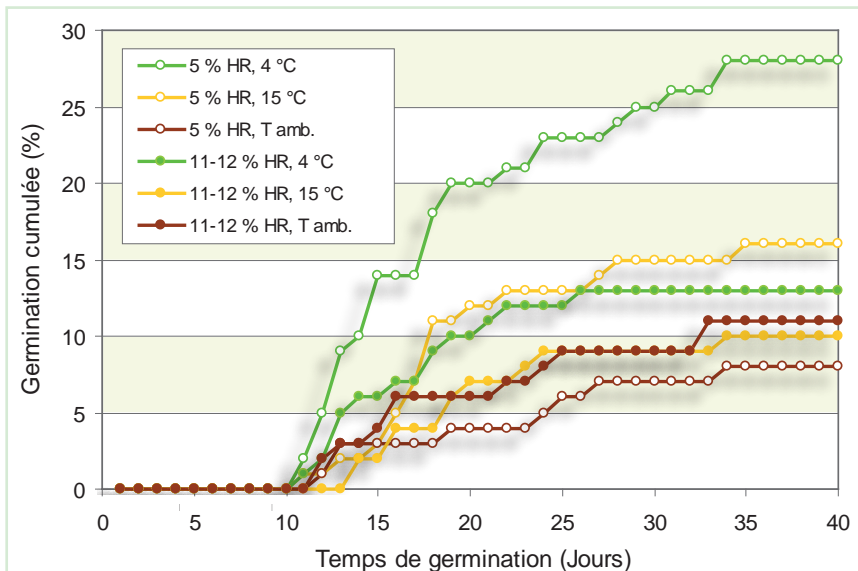


Figure 6.21 : Courbes de germination de *Gahnia aspera* : graines stockées selon différentes conditions (cf. légende).

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.

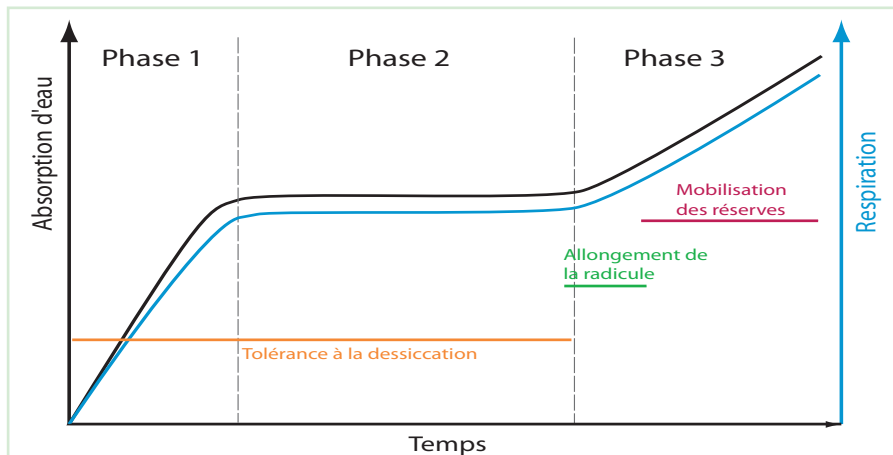


Figure 6.22 : Les différents processus dans la germination des graines (Côme 1982, Bewley 1997).

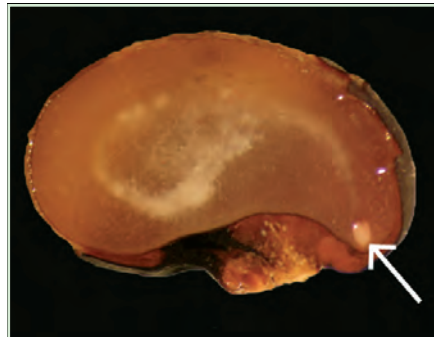
4.2.4.2. Dormances

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 racicule. 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	Erythroxylaceae	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)

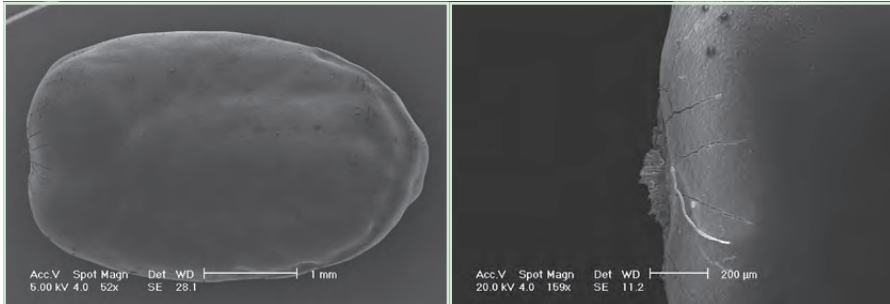
Les méthodes suivantes sont envisageables :

- 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 radicule (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 radicule. 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.

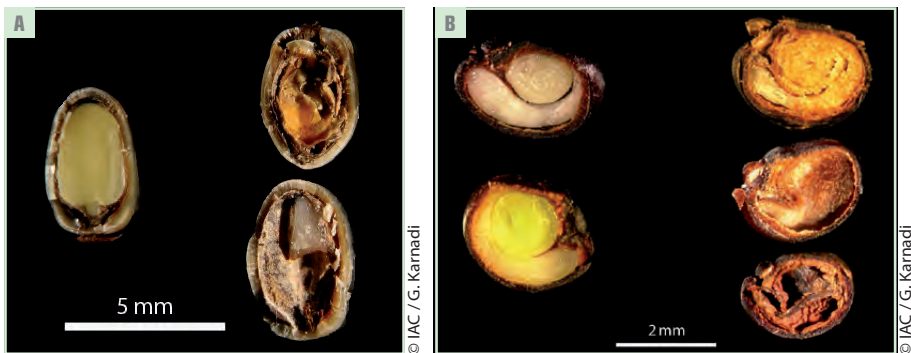
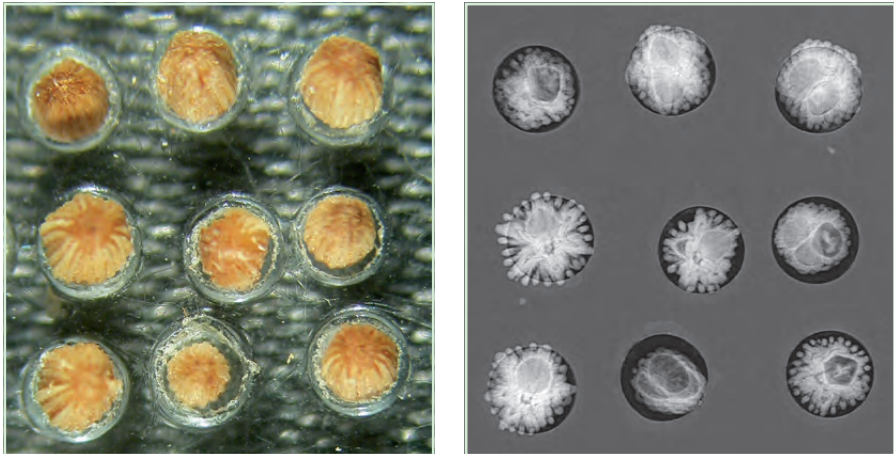


Figure 6.26 : Exemples de test à la coupe. Photo A : graines d'*Alphitonia neocaledonica* (une graine viable à gauche). Photo B : graines de *Dodonaea viscosa* (deux graines viables à gauche).

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 *Staphelia cymbulae* (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.

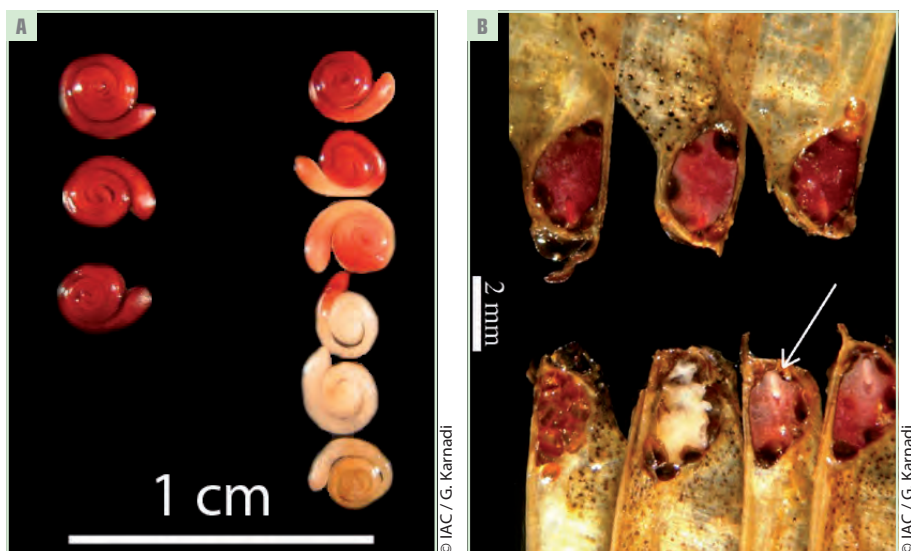


Figure 6.28 : Exemples de test au TTC. Photo A : à gauche, des embryons viables de *Dodonaea viscosa*, à droite, des embryons non viables. Photo B : en haut, des graines viables de *Myodocarpus involuocratus*, en bas, des graines non viables (pas de coloration de l'embryon qui reste clair (cf. flèche), 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 hygroscopique 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.

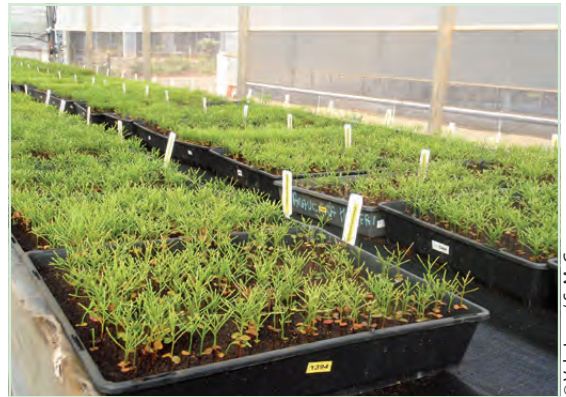


Figure 6.30 : Semis de *Gymnostoma deplancheanum* (serres de Vale Inco).

© 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).

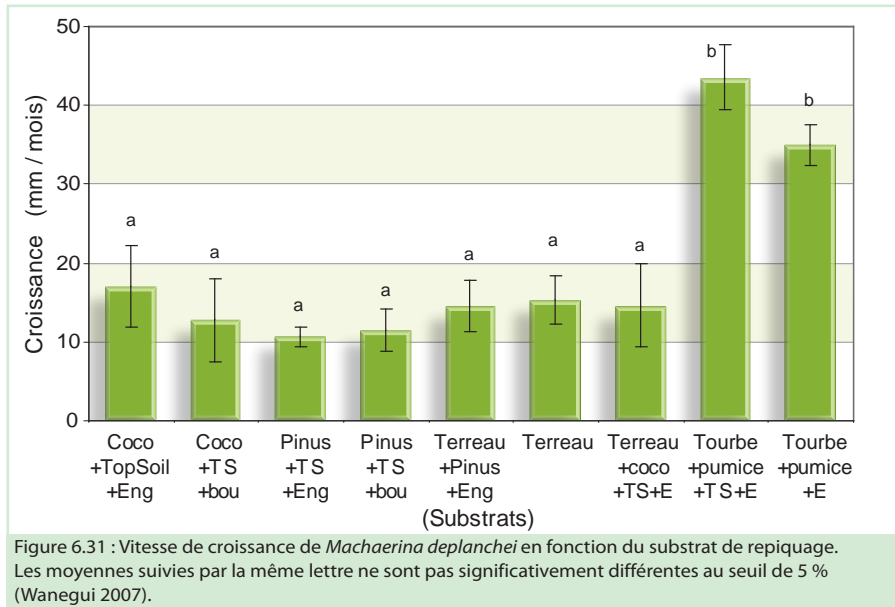


Figure 6.32 : Plaque de culture (35 alvéoles de 250 ml).

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.

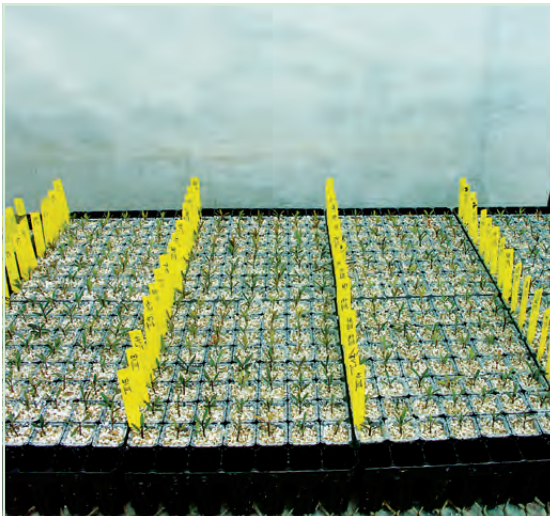


Figure 6.36 : Aperçu d'un essai de bouturage sur *Cloezia aquarum*.



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.), *Bocquillon* 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).



© IAC / H. Udo

Figure 6.39 : Accumulation de latex à la base d'une bouture de *Cerberiopsis obtusifolia* n'ayant reçu aucun prétraitement.

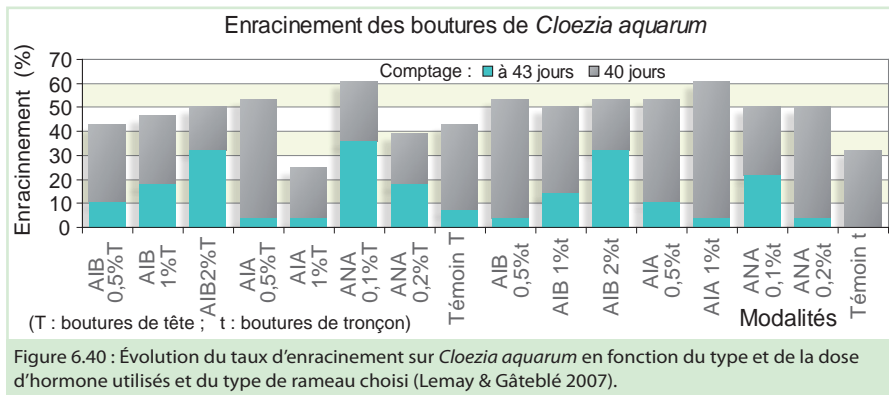
La réalisation pratique des boutures

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.



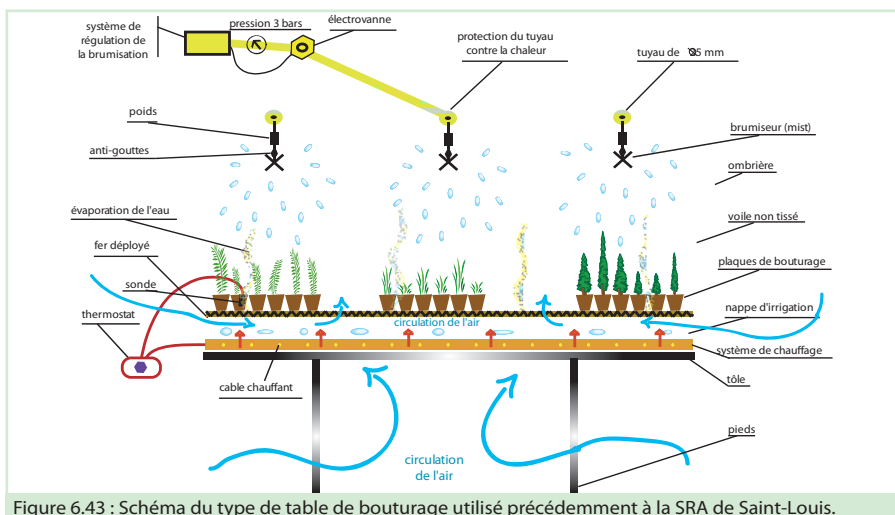
© IAC / H. Udo

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-forestières 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.



© IAC / L'Huillier

Figure 6.46 : Nombreuses germinations de *Tristaniopsis guillainii*, en majorité au niveau d'anfractuosités rocheuses (ancienne piste minière, Koniambo).

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 d'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).

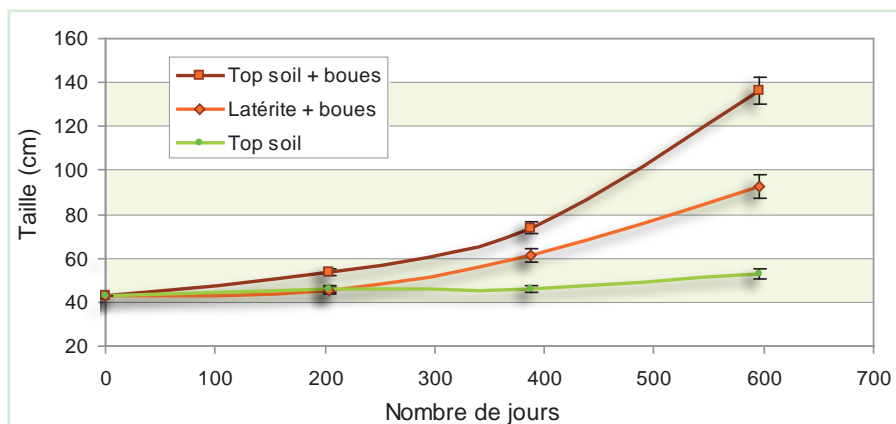


Figure 6.52 : Croissance d'*Alphitonia neocaledonica* implanté sur différents substrats (dose de boue de STEP : 1 % pf/pf de sol) (essai sur Tontouta, mine Vulcain) (L'Huillier, 2009, com. pers.).

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).

- 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.



© IAC / L'Huillier

Figure 6.53 : Installation de fascines, entre bandes de plantation (mine Moulinet, Thio).

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 ensemer. 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

Figure 6.54 : Ensemencement hydraulique d'un talus.

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'Huillier

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 ultramafiques, 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'abrutissement 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'abrutissement (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 Vulcain, 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.

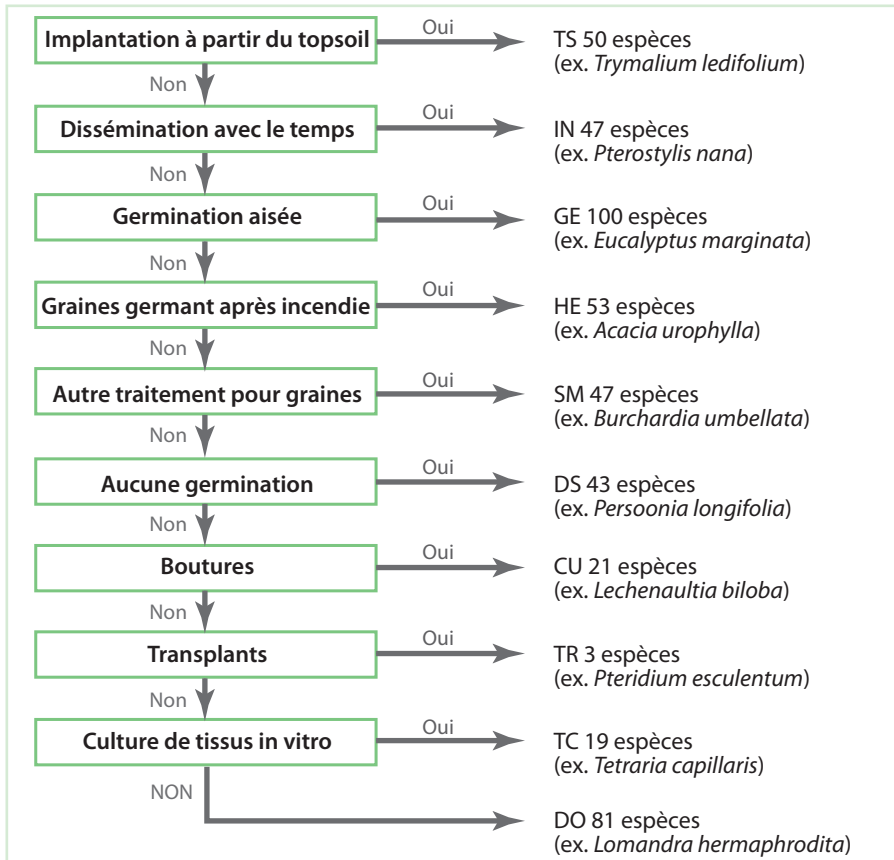


Figure 6.60 : Classification de 465 espèces de la forêt de Jarrah (Australie) selon le protocole de propagation d'Alcoa. La dernière catégorie (DO) s'applique aux espèces pour lesquelles aucune méthode de propagation n'est encore connue (Grant & Koch 2007).

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. »

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 milieux 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. Ila*, 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.
- Bouterin 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. *Ochricompaetae*. *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.) *Neoclaviccus ferrisi* n.g. n. sp. et *Neoclaviccus 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. Végétation. 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.
- Duponnois 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.
- Duponnois 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 fournieri* (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 ultrabasiques 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 Vavoutu. 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., Sarraill 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., Sarraill 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* (eds 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 ultrabasiqes 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 ultrabasiques 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 ultrabasiques 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 *Cloeziopsis* 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.P. 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, Auckland. 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 Paury 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 ferral soils. *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 semelparous tree? *J. Trop. 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., Berzain 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 reafforestation 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'IAC 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. (Accepté 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).

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.