



La végétation des roches ultramafiques ou terrains miniers

Tanguy Jaffré, L. L'Huillier

► To cite this version:

Tanguy Jaffré, L. L'Huillier. La végétation des roches ultramafiques ou terrains miniers. Laurent L'Huillier; Tanguy Jaffré; Adrien Wulff. Mines et environnement en Nouvelle Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration, IAC, p. 45-103, 2010, Etudes Synthèses, 978-2-9523950-8-3. ird-03039745

HAL Id: ird-03039745

<https://ird.hal.science/ird-03039745>

Submitted on 4 Dec 2020

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

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



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

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

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

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

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



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

Tabi
ÉDITIONS

ISBN : 978-2-9523950-8-3



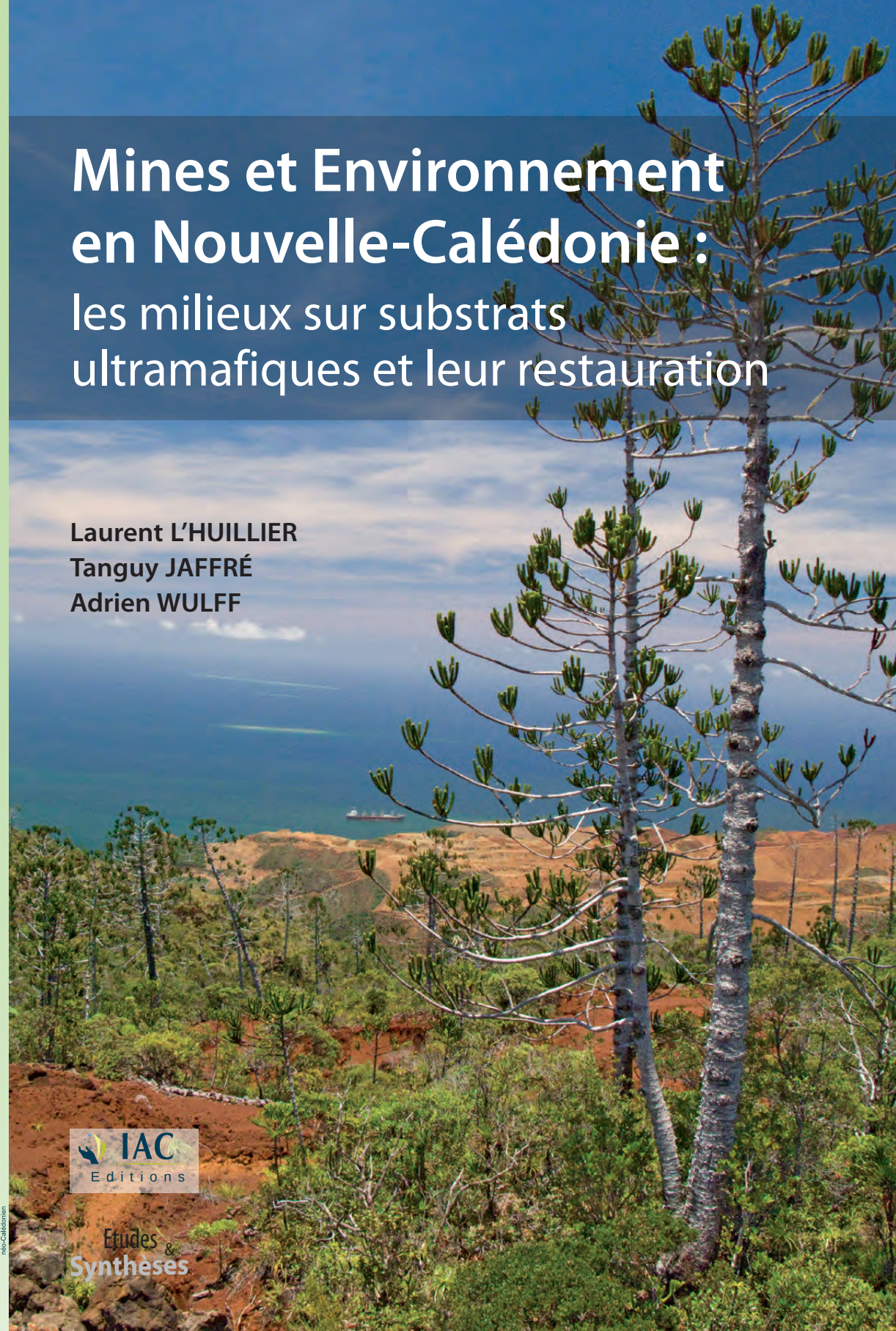
Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration

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 :  **EDITIONS** / tabueditions@tabu.nc / Tél. : 24 91 11

Correction : Claudine Bousquet

Photographie de couverture : Laurent L'Huillier

Achevé 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 MINERAIS 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 MINERAI 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 MINERAIS 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 MINIER (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 MINIER	115
2.1. Isolement et radiation endémique des reptiles	115
2.2. Les ressources exploitées par les reptiles des terrains miniers . .	116
2.3. Préservation des milieux et conservation des reptiles.	117

SOMMAIRE

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

CHAPITRE 5

LES BACTÉRIES ET LES CHAMPIGNONS DU SOL SUR ROCHES ULTRAMAFIQUES

(Amir H. et Ducouso M.).	129
----------------------------------	-----

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

CHAPITRE 6

LA RESTAURATION DES SITES 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., Vea 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 VÉGÉTATION DES ROCHES ULTRAMAFIQUES OU TERRAINS MINIERS

Tanguy JAFFRÉ et Laurent L'HUILLIER

1. LA FLORE

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

2. LES FORMATIONS VÉGÉTALES

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

3. ADAPTATION DES PLANTES AUX CONDITIONS DE NUTRITION MINÉRALE

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

4. ADAPTATION DES PLANTES DU MAQUIS À LA SÈCHERESSE

5. RÔLE DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE

6. DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION

7. CONCLUSION

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



© SLN / B. Pelletier

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

1. LA FLORE

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

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

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

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

Au sein des grands groupes botaniques

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

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

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

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

Figure 3.2 : *Agathis ovata* (Araucariaceae).

© IRD / T. Jaffré

Figure 3.4 : *Neocallitropsis pancheri* (Cupressaceae).

© IAC / L. L'Huillier

Figure 3.3 : *Araucaria rulei* (Araucariaceae).

© IAC / L. L'Huillier

Figure 3.5 : *Podocarpus novaecaledoniae* (Podocarpaceae).

© IRD / T. Jaffré

Figure 3.6 : *Callitris neocaledonica* (Cupressaceae).

© IRD / T. Jaffré

Figure 3.7 : *Podocarpus gnidioides* (Podocarpaceae).

© IRD / F. Rigault

À l'échelon des familles et des genres

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



© IRD / J. Munzinger

Figure 3.8 : *Oncotheca balansae* (Oncothecaceae).



© IRD / J. Munzinger

Figure 3.9 : *Phelline comosa* (Phellinaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.10 : *Zygogynum pancheri* (Winteraceae).

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

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

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

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

Figure 3.11 : *Montrouzieria gabriellae* (Clusiaceae).

© IRD / T. Jaffré

Figure 3.12 : *Greslania circinata* (Poaceae).

© IRD / F. Rigault

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

© IAC / L. L'Huilier

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

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

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

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

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



Figure 3.14 : *Phyllanthus virgultiramus* (Phyllanthaceae).

© Cirad-IAC / M. Ducousso



Figure 3.15 : *Pancheria confusa* (Cunoniaceae).

© Cirad-IAC / M. Ducousso



Figure 3.16 : *Hibbertia altigena* (Dilleniaceae).

© IRD / C. Grignon



Figure 3.17 : *Cunonia atrorubens* (Cunoniaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.18 : *Planchonella crassinervia* (Sapotaceae).

© IRD / J. Munzinger



Figure 3.19 : *Xanthostemon ruber* (Myrtaceae).

© IAC / L. L'Huillier



© Cirad-IAC / M. Ducouso

Figure 3.20 : *Psychotria calorhamnus* (Rubiaceae).



© Cirad-IAC / M. Ducouso

Figure 3.21 : *Pittosporum kaalense* (Pittosporaceae).



© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.22 : *Oxera gmelinoides* (Lamiaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.23 : *Syzygium acre* (Myrtaceae).



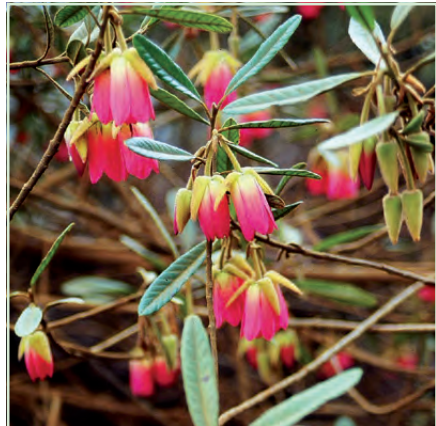
© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.24 : *Elaeocarpus alaternoides* (Elaeocarpaceae).



© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.25 : *Baloghia deplanchei* (Euphorbiaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.27 : *Dubouzetia campanulata* (Elaeocarpaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.26 : *Polyscias pancheri* (Araliaceae).



Figure 3.28 : *Atractocarpus heterophyllus* (Rubiaceae).

© Cirad-IAC / M. Ducousso



Figure 3.29 : *Bikkia campanulata* (Rubiaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.30 : *Codia montana* (Cunoniaceae).

© Cirad-IAC / M. Ducousso



Figure 3.31 : *Metrosideros nitida* (Myrtaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.32 : *Tristaniopsis guillainii* (Myrtaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.33 : *Grevillea gillivrayi* (Proteaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.34 : *Styphelia pancheri* (Ericaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.35 : *Dracophyllum verticillatum* (Ericaceae).

© Cirad-IAC / M. Ducousso

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

1.2. Origine de la flore

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

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

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

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

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

2. LES FORMATIONS VÉGÉTALES

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



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

© IRD / C. Grignon

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

2.1. Les forêts denses humides

2.1.1. Généralités

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

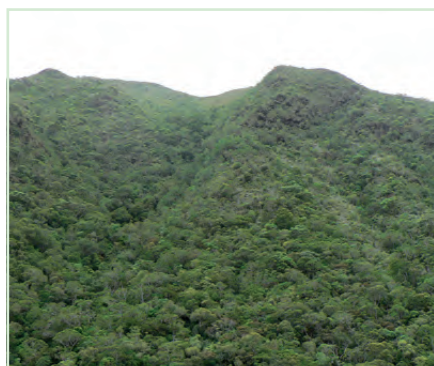


Figure 3.37 : Forêt de Saille (Thio).

© IRD / C. Grignon

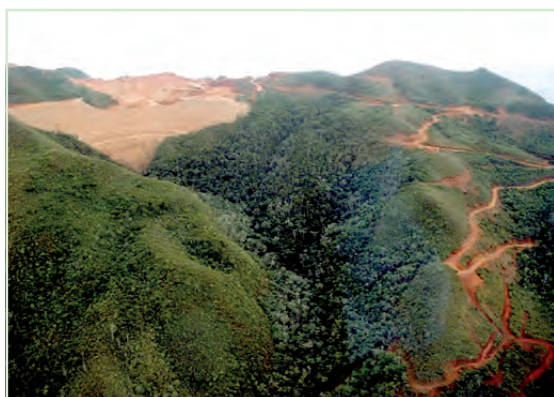


Figure 3.38 : Forêt du Ningua (Thio).

© IAC / L. L'Huilier

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

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



© IRD / T. Jaffré

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

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



Figure 3.40 : Relique de forêt de talweg.

© IRD / T. Jaffré



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

© IAC / L. L'Huillier

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

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

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

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



Figure 3.42 : *Parasitaxus usta* (Podocarpaceae).

© CIRAD-IAC / M. Ducousso



Figure 3.43 : *Daenikera corallina* (Santalaceae).

© IRD / J.M. Veillon

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



Figure 3.44 : *Cerberiopsis candelabra* (Apocynaceae).

© IRD / T. Jaffré



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

© IRD / F. Rigault

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

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

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

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



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

© IRD / C. Grignon



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

© IRD / T. Jaffré



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

© IRD / C. Grignon



Figure 3.49 : *Pandanus balansae* (Pandanaceae).

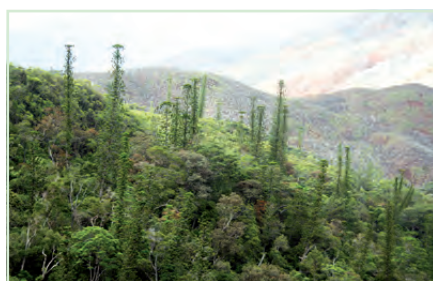
© IRD / C. Grignon

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



© IRD / T. Jaffré

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



© IAC / L. L'Huilier

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



© CIRAD-IAC / M. Ducousso

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



© IAC / L. L'Huilier

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



© IRD / F. Rigault

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



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.55 : Forêt littorale (Grand Sud).

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

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

2.1.3. Les forêts denses humides d'altitude



© IRD / C. Grignon

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

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



© IRD / C. Grignon

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

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



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.58 : *Platyspermation crassifolium* (Alseuosmiaceae).



© IRD / C. Grignon

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



© IRD / J. Munzinger

Figure 3.60 : *Paracryphia alticola* (Paracryphiaceae).



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

Figure 3.61 : *Strasburgeria robusta* (Strasburgeriaceae).

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



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



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



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

2.2. Les maquis miniers

2.2.1. Généralités

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



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



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

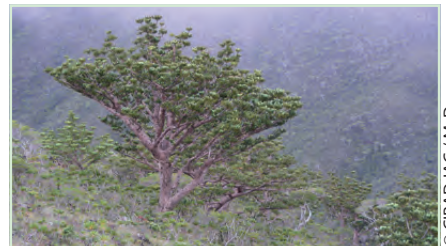


Figure 3.67 : Maquis ligno-herbacé dominé par *Agathis ovata* (Dzumac).



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

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



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

© IRD / T. Jaffré



© IRD / T. Jaffré

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

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

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

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

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

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

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

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



© IRD / T. Jaffré.

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

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

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

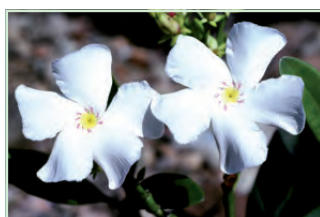


Figure 3.72 : *Cerberiopsis obtusifolia* (Apocynaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.73 : *Deplanchea sessilifolia* (Bignoniaceae).

© CIRAD-IAC / M. Ducousso



Figure 3.74 : *Archidendropsis lentiscifolia* (Fabaceae).

© IRD / T. Jaffré



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

© IRD / T. Jaffré



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

© CIRAD-IAC / M. Ducousso



Figure 3.77 : *Grevillea meisneri* (Proteaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.78 : *Cyclophyllum deplanchei* (Rubiaceae).

© CIRAD-IAC / M. Ducousso



Figure 3.79 : *Oxanthera neocaledonica* (Rutaceae).

© IRD / T. Jaffré

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

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



© IAC / L. L'Huillier

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

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

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

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



© IRD / T. Jaffré

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



© IAC / L. L'Huillier

Figure 3.82 : Maquis ligno-herbacé (Kopéto).

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



© CIRAD-IAC / M. Ducousso

Figure 3.83 : *Montrouzieria spharoidea* (Clusiaceae).

© IRD / Y. Pillon

Figure 3.84 : *Pancheria alaternoides* (Cunoniaceae).

© IRD / C. Grignon

Figure 3.85 : *Dracophyllum ramosum* (Ericaceae).

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

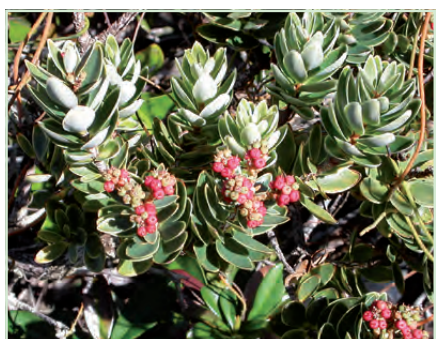


Figure 3.86 : *Cyathopsis albicans* (Ericaceae).

© IAC / L. L'Huilier



Figure 3.87 : *Melaleuca dawsonii* (Myrtaceae).

© IAC / L. L'Huilier



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

© IAC / L. L'Huilier



Figure 3.89 : *Normandia neocaledonica* (Rubiaceae).

© IAC / L. L'Huilier

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

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



Figure 3.90 : Maquis d'altitude (Humboldt).

© IRD / C. Grignon.



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

© IRD / F. Rigault

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



Figure 3.92 : *Codia albifrons* (Cunoniaceae).

© IRD / Y. Pillon



Figure 3.93 : *Cunonia rotundifolia* (Cunoniaceae).

© IRD / C. Grignon



Figure 3.94 : *Libocedrus chevalieri* (Cupressaceae).

© IRD / F. Rigault



Figure 3.95 : *Metrosideros humboldtiana* (Myrtaceae).

© IRD / T. Jaffré

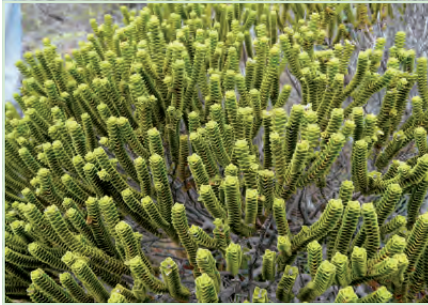


Figure 3.96 : *Metrosideros tetrastricha* (Myrtaceae).

© IRD / F. Rigault



Figure 3.97 : *Beauprea montisfontium* (Proteaceae).

© IRD / F. Rigault



Figure 3.98 : *Bikkia pachyphylla* (Rubiaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.99 : *Xeronema moorei* (Xeronemataceae).

© IRD / T. Jaffré

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



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

© IRD / T. Jaffré

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



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

© IRD / T. Jaffré



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

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.103 : *Lomandra insularis* (Asparagaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.104 : *Boronella pancheri* (Rutaceae).

© CIRAD-IAC / M. Ducousso

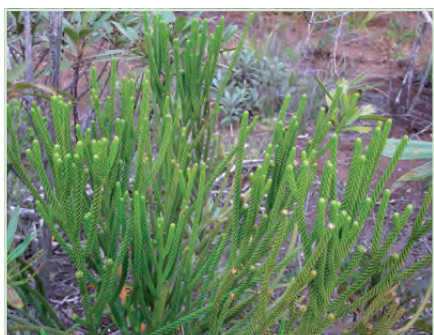


Figure 3.105 : *Dacrydium araucarioides* (Podocarpaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.106 : *Garnieria spathulata* (Proteaceae).

© CIRAD-IAC / M. Ducousso



Figure 3.107 : *Gardenia aubryi* (Rubiaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.108 : *Tarenna hexamera* (Rubiaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.109 : *Beccariella sebertii* (Sapotaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.110 : *Solmsia calophylla* (Thymelaeaceae).

© IAC / L. L'Huillier

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

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

2.2.5. Les maquis paraforestiers et préforestiers



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

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



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

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.113 : *Codia discolor* (Cunoniaceae).

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



Figure 3.114 : *Geissois pruinosa* (Cunoniaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.115 : *Myodocarpus involucratus* (Myodocarpaceae).

© IAC / L. L'Huillier



Figure 3.116 : *Dysoxylum canalense* (Meliaceae).

© IRD / T. Jaffré

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

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

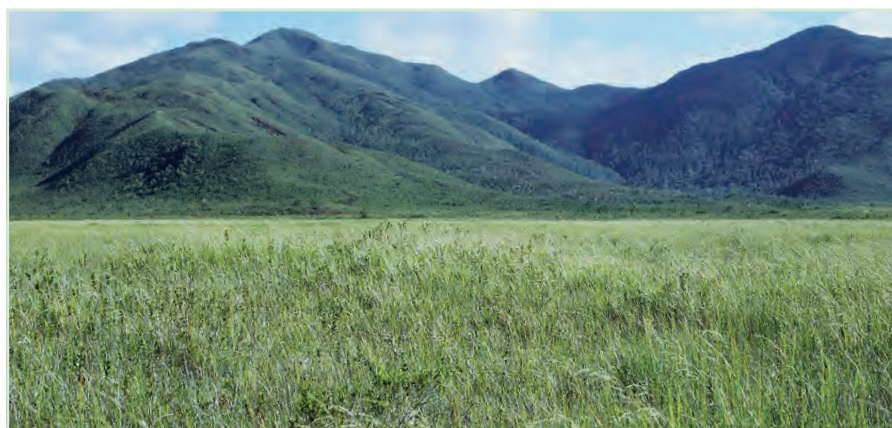


Figure 3.117 : Zone humide (Sud).

© IRD / T. Jaffré



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

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.119 : Maquis rivulaire (Sud).

© IAC / L. L'Huillier

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



© IRD / Y. Pillon

Figure 3.120 : *Pancheria communis* (Cunoniaceae).



© IRD / Y. Pillon

Figure 3.121 : *Cunonia deplanchei* (Cunoniaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.122 : *Dracophyllum balansae* (Ericaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.123 : *Melaleuca brongniartii* (Myrtaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.124 : *Codia nitida* (Cunoniaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.125 : *Xanthostemon aurantiacus* (Myrtaceae).



© IAC / L. L'Huillier

Figure 3.126 : *Stenocarpus umbelliferus* (Proteaceae).

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



© IAC / L'Huillier

Figure 3.127 : *Retrophyllum minus* (Podocarpaceae).



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.128 : *Dacrydium guillauminii* (Podocarpaceae).

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

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

3. ADAPTATION DES PLANTES AUX CONDITIONS DE NUTRITION MINÉRALE

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

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

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

Tableau 3.3 (suite).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.129 : Système racinaire de *Tristaniopsis guillainii* sur sol ferrallitique gravillonneux (Boulinda).



© Vale / S. McCoy

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

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

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

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

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

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

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



Figure 3.131 : *Psychotria douarrei* (Rubiaceae).

© IRD / T. Jaffré

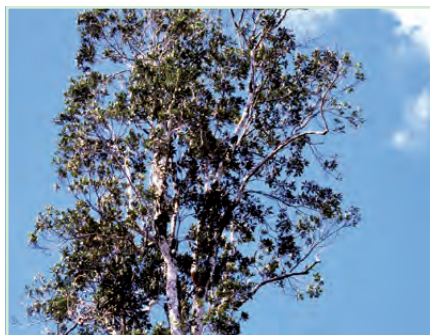


Figure 3.132 : *Pycnandra acuminata* (ex-*Sebertia*) (Sapotaceae), frondaison.

© IRD / T. Jaffré

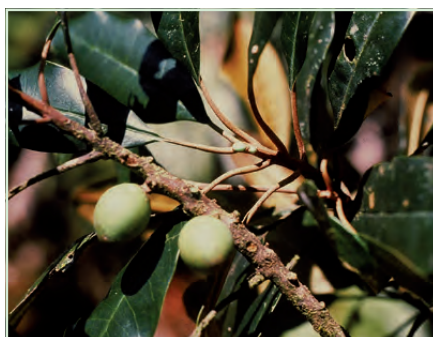


Figure 3.133 : *Pycnandra acuminata* (ex-*Sebertia*) (Sapotaceae), fruits.

© IRD / T. Jaffré



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

© IRD / T. Jaffré

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



© IRD / T. Jaffré

Figure 3.135 : *Beaupreopsis paniculata* (Proteaceae).



© IAC / L. L'Huillier

Figure 3.136 : *Garcinia amplexicaulis* (Clusiaceae).

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

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

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

MÉCANISMES DE L'HYPERACCUMULATION DES MÉTAUX CHEZ LES PLANTES

Par Michel Lebrun

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

• • •

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

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

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

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

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

4. ADAPTATION DES PLANTES DU MAQUIS À LA SÉCHERESSE

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

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



Figure 3.137 : *Logania imbricata* (Loganiaceae).

© IRD / F. Rigault



Figure 3.138 : *Alyxia sarasinii* (Apocynaceae).

© IRD / J. Munzinger

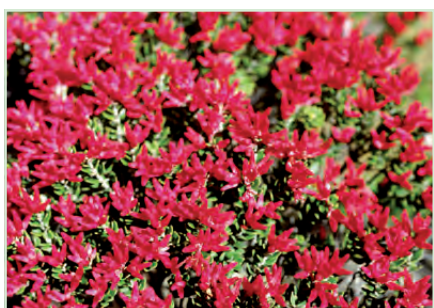


Figure 3.139 : *Cyathopsis floribonda* (Ericaceae).

© IRD / T. Jaffré



Figure 3.140 : *Sannantha leratii* (Myrtaceae).

© IAC / L. L'Huillier

Figure 3.141 : *Pancheria ferruginea* (Cunoniaceae).

© IRD / Y. Pillon

Figure 3.142 : *Beccariella sebertii* (Sapotaceae).

© IAC / L. L'Huilier

Figure 3.143 : *Soulamea pelletieri* (Simaroubaceae).

© IRD / T. Jaffré

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

5. RÔLE DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE

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

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



Figure 3.144 : Phénomène d'érosion (Sud).

© IAC / L. L'Huilier



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

© IRD / T. Jaffré

6. DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION

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

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

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



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

© IRD / T. Jaffré



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

© IRD / T. Jaffré



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

© IRD / T. Jaffré



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

© IRD / T. Jaffré

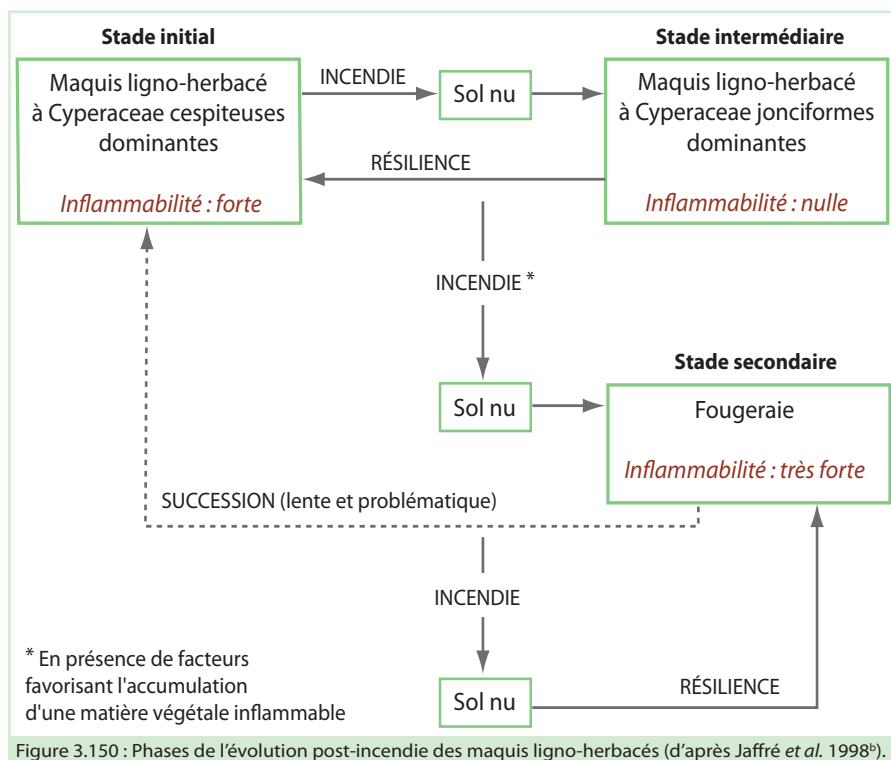


Figure 3.151 : Zone de maquis récemment incendié (Prony).



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

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



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

© IRD / T. Jaffré

7. CONCLUSION

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

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

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

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

LES ESPÈCES, LEURS POPULATIONS, LEURS ENVIRONNEMENTS ET LEURS DEVENIRS

– Dynamiques spatiales d'espèces végétales et revégétalisation –

Par Laurent Maggia

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

L'espèce

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

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

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

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

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

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

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

Barrières biologiques et facteurs évolutifs

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

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

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

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

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

Évaluation de la diversité génétique

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

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

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

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

Ces conditions environnementales soutiennent l'existence :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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
- Andrianovelina 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., Côte 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 Vane K.D. 1987. Aspects of diet and habitat use in some New Caledonian lizards. *Amphibia-Reptilia* 8 : 349-364.
- Bauer A.M., Sadler R.A. 2000. The Herpetofauna of New Caledonia. Society for the Study of Amphibians and Reptiles. Ithaca, New York, USA, 310 p.
- Becher M., Talke I.N., Krall L., Krämer U. 2004. Cross-species microarray transcript profiling reveals high constitutive expression of metal homeostasis genes in shoot of the zinc hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Plant J.* 37 : 251-268.
- Becquer T., Bourdon E., Pétard J. 1995a. Disponibilité du nickel le long d'une toposéquence de sol développé sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. *C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa*, 321 : 585-592.
- Becquer T., Bourdon E., L'Huillier L. 1995b. Disponibilité du nickel dans les sols développés sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. 3^e Conférence Internationale sur la Biogéochimie des Éléments Traces, Ministère de l'Environnement, 15-19 mai 1995, Paris.
- Becquer T., Bourdon E., L'Huillier L. 1997. Mobilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie. In : *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (éds Jaffré T., Reeves R. D., Becquer Th.), pp.57-63. Doc. Sci. Tech. III2, ORSTOM, Nouméa.
- Becquer T., Bourdon E., L'Huillier L., Quantin P., Herbillon A. 1998. Sources du nickel biodisponible dans les sols ferrallitiques ferritiques du sud de la Nouvelle-Calédonie. 16^e Congrès Mondial de la Science du Sol, 20-26 août 1998, Montpellier.
- Becquer T., Quantin C., Sicot M., Boudot J.P. 2003. Chromium availability in ultramafic soils from New-Caledonia. *Sci. Total Environ.* 301 : 251-261.
- Bellefontaine R., Sabir M., Kokou K., Guinko S., Saadou M., Ichaou A., Chaar H., Battono B.A., Saley K., Jhonn L. 2003. Revégétalisation, une quatrième voie : la propagation végétative naturelle. In : *Actes du XII^e Congrès forestier mondial*. La forêt, source de vie, Québec, Canada.
- Bewley J. D. 1997. Seed germination and dormancy. *Plant Cell* 9 : 1055-1066.
- Bird E.C., Dubois J.P., Iltis J.A. 1984. The impact of opencast mining on the rivers and coast of New Caledonia. The United Nations University. 53 p. Tokyo.
- Black M., Bewley D., Halmer P. 2006. The Encyclopedia of Seeds : Science, Technology and Uses. Ed. CAB.
- Boissenin M., Gomez S., Barré N., Chambrey C., Tassin J. 2006. Interactions entre l'avifaune 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.

BIBLIOGRAPHIE

- 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 RGEM, Univ. Nouvelle-Calédonie, 41 p.
- Brooks R.R. 1987. *Serpentines and its vegetation : a multi-disciplinary approach*. Dioscorides Press, Portland Oregon.
- Brooks R.R., Lee J., Reeves R.D., Jaffré T. 1977. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *J. Geochem. Explor.* 7 : 49-57.
- Brundrett M. Mycorrhizal associations : the web resource, [En ligne]. <http://mycorrhizas.info/info.html> (Page consultée le 1^{er} décembre 2009).
- Brundrett M.C. 2009. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants : understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis. *Plant and Soil*, 320 : 37-77.
- Brys R., Jacquemyn H., Hermy M. 2008. Pollination efficiency and reproductive patterns in relation to local plant density, population size, and floral display in the rewarding *Listera ovata* (Orchidaceae). *Bot. J. Linn. Soc.* 157 : 713-721.
- Buyck B., Hofstetter V., Eberhardt U., Verbeke A., Kauff F. 2008. Walking the thin line between *Russula* and *Lactarius* : the dilemma of *Russula* subsect. *Ochriconcompactae*. *Fungal Divers.* 28 : 15-26.
- Chaintreuil C., Rigault F., Moulin L., 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., Potihoa 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., Potihoa 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.) *Neoclavicoccus ferrisi* n.g. n. sp. et *Neoclavicoccus bugnicourti* n. sp. *Bulletin de la Société entomologique de France* 64 : 88-91.
- Cohic F. 1959b. Notes sur les espèces néocalédoniennes du genre *Orchamoplatus* Russell (Homoptera Aleyrodidae). *Journal d'Agriculture tropicale et de Botanique appliquée* 6 : 494-497.
- Colin F., Parron C., Bocquier G., Nahon D. 1980. Nickel and chromium concentration by chemical weathering of pyroxenes and olivine. UNESCO Intern. Symp. Athènes, 2 : 56-66.
- Côme D. 1982. Germination. pp. 129-225. In : Mazliak P., eds. *Physiologie végétale, II. Croissance et développement*. Hermann, Paris.
- Côme D., Corbineau 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., Corbineau 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., Sarraillh 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* rusa 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 horticulture 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., Poitcilli 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., Muriénne 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.
- Hackskaylo 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.
- Hanikenne M., Talke I.N., Haydon M.J., Lanz C., Nolte A., Motte P., Kroymann J., Weigel D., 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, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 142 : 1-21.
- ISTA. 2003. ISTA Working Sheets on Tetrzolium testing, Vol 1 : Agricultural, Vegetable and Horticultural Species, Ed. ISTA.
- Jaffré T. 1974. La végétation et la flore d'un massif de roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie : le Koniambo Candollea 29 : 493-499.
- Jaffré T. 1976. Composition chimique et condition de l'alimentation minérale des plantes sur roches ultrabasiqes (Nouvelle-Calédonie). *Cahiers ORSTOM sér. Biol.* XI (1) : 53-63.
- Jaffré T. 1978. Accumulation du manganèse par des espèces associées aux terrains ultrabasiqes 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 ultrabasiqes en Nouvelle-Calédonie. Thèse, Univ. Paris-Sud (XI)-ORSTOM, Paris.
- Jaffré T. 1992. Floristic and Ecological diversity of the vegetation on ultramafic rocks in New Caledonia. 101-107. In : *The Vegetation of Ultramafic (Serpentine) Soils*, (eds Baker A.J.M., Proctor J., Reeves R.D.). Intercept Ltd. Andover, U.K.
- Jaffré T. 1993. The relationship between ecological diversity and floristic diversity in New Caledonia. *Biodiversity letter* 1 : 82-87.
- Jaffré T. 1995. Distribution and ecology of the conifers of New Caledonia.. In : *Conifers of the Southern Hemisphere*, (eds N.J. Enright, R.S. Hill). Melbourne University Press, Australia. pp. 177-196

- Jaffré T. 1996. Étude comparative des formations végétales et des flores des roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie et d'autres régions du monde. In : Phytogéographie tropicale, réalités et perspectives. (eds Guillaumet J.L., Belin M.), pp. 137-149. Colloques et Séminaire ORSTOM, Paris.
- Jaffré T. 2003. Reconnaissance et caractérisation de la végétation et de la flore de la presqu'île de Vavouta. Rapport de consultance IRD/Falconbridge 20 p.
- Jaffré T., Latham M. 1974. Contribution à l'étude des relations sol-végétation sur un massif de roches ultrabasiqes de la côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie : le Boulinda. *Adansonia* 14 (3) : 311-336.
- Jaffré T., Latham M. 1976. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur déblais miniers. Rapport de convention ORSTOM/SLN. 16 p.
- Jaffré T., Pelletier B. 1992. Plantes de Nouvelle-Calédonie permettant de revégétaliser des sites miniers. S.L.N., Nouméa. 114 p.
- Jaffré T., Rigault F. 1989. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur sites miniers. Nouméa : ORSTOM, 20 p.
- Jaffré T., Rigault F. 1991a. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur déblais miniers. ORSTOM/SLN, Nouméa. *Sci. Vie, Bota., Convention*, n°5. 77 p.
- Jaffré T., Rigault F. 1991b. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur déblais miniers ORSTOM/SLN, Nouméa. *Sci. Vie, Bota., Convention*, n°4. 43 p.
- Jaffré T., Rigault F. 1998. Gestion de la diversité floristique en zone minière. Actes du colloque sur l'environnement Koné 29-31 juillet 1998 (ed. B.Cressens, Province Nord) pp 166-170. Pouembout Nouvelle-Calédonie.
- Jaffré T., Schmid M. 1974. Accumulation du nickel par une Rubiacée de Nouvelle-Calédonie, *Psychotria douarrei* (Beauvisage G.) Däniker. *C.R. Acad. Sci. Paris, (D)* 278 : 1727-1730.
- Jaffré T., Veillon J.M. 1990. Étude floristique et structurale de deux forêts denses humides sur roches ultrabasiqes en Nouvelle-Calédonie. *Bull. Mus. Natl. Hist. Nat., Paris, sér. 12, section B, Adansonia* 1990 (3-4) : 243-273.
- Jaffré T., Latham M., Quantin P. 1971. Les sols des massifs miniers de Nouvelle-Calédonie et leur relation avec la Végétation. Rapport ORSTOM. 26 p + annexes.
- Jaffré T., Brooks R.R., Lee J., Reeves R.D. 1976. *Sebertia acuminata* : a hyperaccumulator of nickel from New-Caledonia. *Science* 193 : 579-580.
- Jaffré T., Latham M., Schmid M. 1977. Aspects de l'influence de l'extraction du minerai de nickel sur la végétation et les sols en Nouvelle-Calédonie. *Cah. ORSTOM (Biol.)*, 12 (4) : 307-321.
- Jaffré T., Brooks R.R., Trow J.M. 1979a. Hyperaccumulation of nickel by *Geissois* species. *Plant Soil* 51 (1) : 157-162.
- Jaffré T., Kersten W., Brooks R.R., Reeves R.D. 1979b. Nickel uptake by Flacouriaceae 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., Sarrailh 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., Sarrailh 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., Coic 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., Adholeya 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., Sarraillh 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 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 ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Détermination de la sensibilité des plantes cultivées aux métaux (Ni, Mn). Résultats sur des espèces maraichères, fruitières et fourragères. Nouméa : ORSTOM. *Conv. ; Sci. Vie; Agropédo.* 44 : 40 p.
- L'Huillier L. 2007. Assessment of soil seed banks for rehabilitation of nickel mines in New Caledonia. In "Proceedings of the Seed Ecology II 2007 Conference, 9-13 September, Perth, Australia" (Eds. S Turner S., Merritt D., Clarke S., Commander L., Dixon K.). p 51. Kings Park and Botanic Garden, Perth, Australia.
- L'Huillier L., Edighoffer S. 1991. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Étude de la toxicité du nickel sur les plantes cultivées : synthèse des connaissances actuelles. Nouméa : ORSTOM. *Conv. ; Sci. Vie; Agropédo.* 11 : 16 p.
- L'Huillier L., Edighoffer S. 1996. Extractability of nickel and its concentration in cultivated plants in Ni rich ultramafic soils of New Caledonia. *Plant soil* 186 : 255-264.
- L'Huillier L., d'Auzac J., Durand M., Michaud-Ferrière N. 1996. Nickel effects on two maize (*Zea mays*) cultivars : growth, structure, Ni concentration and localization. *Can. J. Bot.* 74 : 1547-1554.

- L'Huillier L., Dupont S., Dubus I., Becquer T., Bourdon E., Laubreaux P., Bonzon B. 1998. Carence et fixation du phosphore dans les sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie. 16^e Congrès Mondial de la Science du Sol, 20-26 août 1998, Montpellier.
- Lagrange A. 2009. Études écologique et microbiologique des espèces du genre *Costularia* (Cyperaceae), pionnières des sols ultramafiques en Nouvelle-Calédonie : perspectives d'application à la restauration écologique. Thèse, Univ. Nouvelle-Calédonie, 234 p.
- Lagrange A., Derroire G., Tassin J. 2004. Projet d'optimisation des coûts pour la réhabilitation minière : synthèse des travaux effectués dans le cadre de l'essai 584. Rapport de convention IAC-Falconbridge, Ed. IAC, 2004, 56 p.
- Lagrange A., Ducousso 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 *Cloezi* 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.II. 1996. Diversity, endemism, and extinction in the flora of New Caledonia. In : C.I Peng and P.P II Lowry eds, Rare, Threatened, and endangered floras of Asia of the Pacific Rim. Institute of botany, Academia Sinica, Monogr. Ser. N° 16, Taipei. pp 181-206.
- Lowry P.P. II., Munzinger J., Bouchet P., Géraux 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, *Phthorimaea 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 Colombia. 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 *Storckia* 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 (*Arillastrum 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 Minière, 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 Apoïdes 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 Païry 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.
- Petiot 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.

- Quantin C., Becquer T., Berthelin J., 2002. Mn-Oxide : a major source of easily mobilisable Co and Ni under reducing conditions in New Caledonia ferralsols. *CR. Geosci.* 334 : 273-278.
- Rajakaruna N., Boyd R.S. (Eds). 2009. Soil and biota of serpentine : a world view. Proceedings of the sixth International Conference on Serpentine Ecology. Northeast. Nat. 16 (special issue 5).
- Rao N. K., Hanson J., Dulloo M. E., Ghosh K., Nowell D., Larinde M. 2006. Manuel de la manipulation des semences dans les banques de gènes. Manuels pour les banques de gènes N°8. Biodiversity International, Rome, Italie.
- Raven P.H., Axelrod D.I. 1972. Plate tectonics and Australasian biogeography. *Science* 176 : 1379-1386.
- Raven R.J. 1991. A revision of the Mygalomorph spider family Dipluridae in New Caledonia (Araneae). Mémoires du Muséum national d'Histoire naturelle, Zoologie 149 : 87-117.
- Raven R.J. 1994. Mygalomorph spiders of the Barychelidae in Australia and the western Pacific. *Memoirs of the Queensland Museum* 35 : 291-706.
- Raynal J. 1974. Notes cypérolologiques 22. Les *Costularia* de Nouvelle-Calédonie. *Adansonia*, ser.2, 14 : 337-377.
- Read J., Hallam P., Cherrier J.F. 1995. The anomaly of monodominant tropical rainforests : some preliminary observations in the *Nothofagus*-dominated rainforest in New Caledonia. *J. Trop. Ecol.* 11, 3 : 359-389.
- Read J., Jaffré T., Godrie E., Hope G., Veillon J.M. 2000. Structural and floristic characteristics of some monodominant and adjacent mixed rainforests in New Caledonia. *J. Biogeogr.* 27 : 233-250.
- Read J., Sanson G.D., de Garine-wichatitsky M., Jaffré T. 2006a. Sclerophylly in two contrasting tropical environments; low nutrient vs. low rainfall. *Am. J. Bot.* 93 (11) : 1601-1614.
- Read J., Sanson G.D., Jaffré T., Burd M. 2006b. Does tree size influence timing of flowering in *Cerberiopsis candelabra* (Apocynaceae), a long-lived semelparous tree? *J. Tro. Ecol.* 22 : 621-629.
- Read J., Sanson G., Burd M., Jaffré T. 2008. Mass flowering and parental death in the regeneration of *Cerberiopsis candelabra* (Apocynaceae), a long live monocarpic tree in New Caledonia. *Am. J. Bot.* 96 (5) : 558-567.
- Reeves R.D. 2003. Tropical hyperaccumulators of metals and their potential for phytoextraction. *Plant Soil* 249 : 57-65.
- Reeves R.D., Baker A.J.M. 2000. Metal-accumulating plants. In : *Phytoremediation of toxic metals*. Raskin I., Ensley B.D. eds, John Wiley, New York : pp 193-229.
- Reeves R.D., Baker A.J.M., Borhidi A., Berazain R. 1999. Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba. *Ann. Bot.* 83 : 29-38.
- Reusch T. B. H. 2003. Floral neighbourhoods in the sea : how floral density, opportunity for outcrossing and population fragmentation affect seed set in *Zostera marina*. *J. Ecol.* 91(4) : 610-615.
- Rey F., Ballais J.L., Marrec A., Rovérad G. 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *C.R. Geosci.* 336 : 991-998.
- Richau K.H., Kozhevnikova A.D., Seregin I.V., Vooijs R., Koevoets P.L.M., Smith A.C., Ivanov V.B., Schat H. 2009. Chelation by histidine inhibits the vacuolar sequestration of nickel in roots of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *New Phytol.* 183 : 106-116.
- Rigault F., Dagostini G., Jaffré T. 1996. Contribution à la mise au point de techniques d'ensemencement hydrauliques sur sites miniers : implantation d'espèces locales et relation avec les conditions climatiques. ORSTOM-SLN, Nouméa. Sci., Vie, Bota., Convention, n°8. 60 p.
- Rigault F., Dagostini G., Jaffré T. 2003. Légumineuses d'intérêt majeur pour la réhabilitation des anciens sites miniers : *Serianthes calycina* Benth. 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., Sivasithamparan 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., Batoua Babou A., Bellefontaine R., Ichaou A. 2003. Reboiser au moindre coût les zones semi-arides par marcottage naturel : A less costly reforestation of semi-arid areas by natural layering. In : *Actes du XII^e Congrès forestier mondial. La forêt, source de vie*, Québec, Canada.
- Sarlin P. 1954. Bois et forêts de la Nouvelle-Calédonie. Centre Techn. Forest. Trop. 330 p.
- Sarraillh J.M. 2001. Bilan des recherches menées par l'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 ultrabasiqes 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.2, 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.
- Viroi 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 Neocaledonica 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 naphtalène 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 ($1 \text{ mmole de K}^+ = 1 \text{ méq}$; $1 \text{ mmole de Ca}^{+2} = 2 \text{ méq}$).
- 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.