

CONDITIONS DE MILIEU DES TERRAINS MINIERS

Tanguy JAFFRÉ et Laurent L'HUILLIER

1. NATURE ET ORIGINE DU SUBSTRAT GÉOLOGIQUE

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

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

3. CONDITIONS DE NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES

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

4. CONDITIONS D'ALIMENTATION HYDRIQUE DES PLANTES

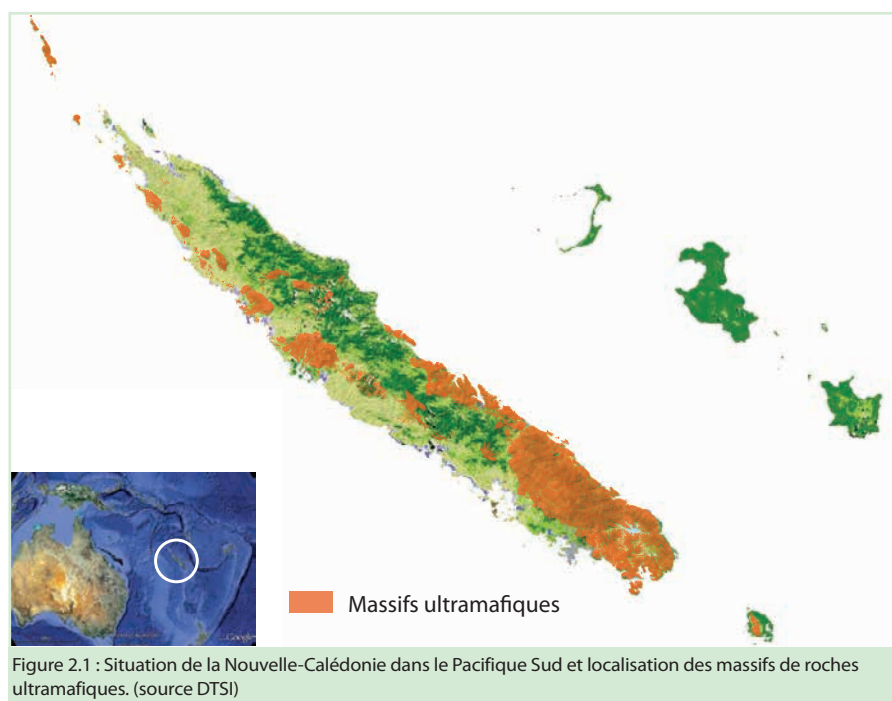
- 4.1 Conditions hydriques liées au climat
- 4.2 Conditions hydriques liées à la nature du sol

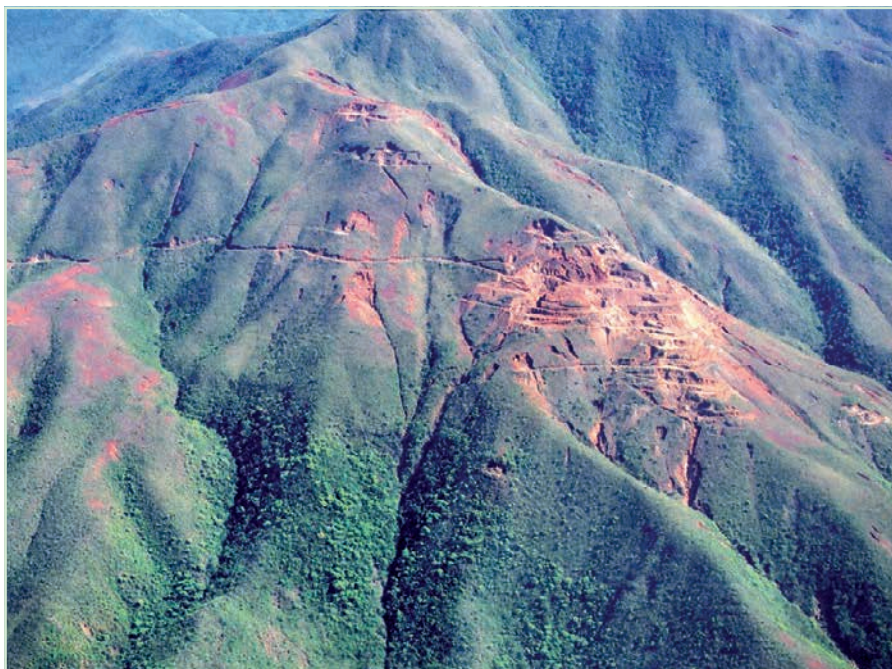
L'archipel néo-calédonien est situé dans le sud-ouest de l'océan Pacifique. D'une superficie émergée de 19 100 km², il s'étend sur environ 500 km de long et 50 km de large, entre le 18° et le 23° degré de latitude sud et entre le 163° et le 168° degré de longitude est (figure 2.1a). Il est constitué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

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

1. NATURE ET ORIGINE DU SUBSTRAT GÉOLOGIQUE

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





© IRD / T. Jaffré

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

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



© IAC / L. L'Huilier

Figure 2.3 : Bloc de péridotite (harzburgite).

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

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

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

2.1. Les « terres rouges » ou « latérites »

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

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



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

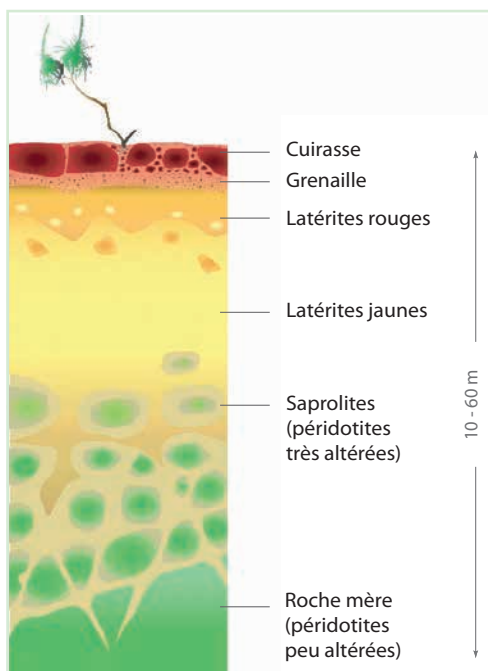


Figure 2.5 : Coupe schématique d'un profil type de sol issu de roches ultramafiques.

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



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



Figure 2.7 : Sol ferrallitique ferritique colluvionné de piedmont.

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

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



© IRD

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



© IRD / T. Jaffré

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



© IAC / L. L'Huillier

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

2.2. Les sols bruns hypermagnésiens

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

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

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

2.3. Les minerais de nickel

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



© JAC / L. L'Huillier



© SLN / R. Pacta

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

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

3. CONDITIONS DE NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES

3.1. Les carences en éléments nutritifs

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

3.2. Teneurs excessives en magnésium

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

3.3. Risques de toxicité en certains métaux

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

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

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

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

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

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

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

4. CONDITIONS D'ALIMENTATION HYDRIQUE DES PLANTES

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

4.1. Conditions hydriques liées au climat

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

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

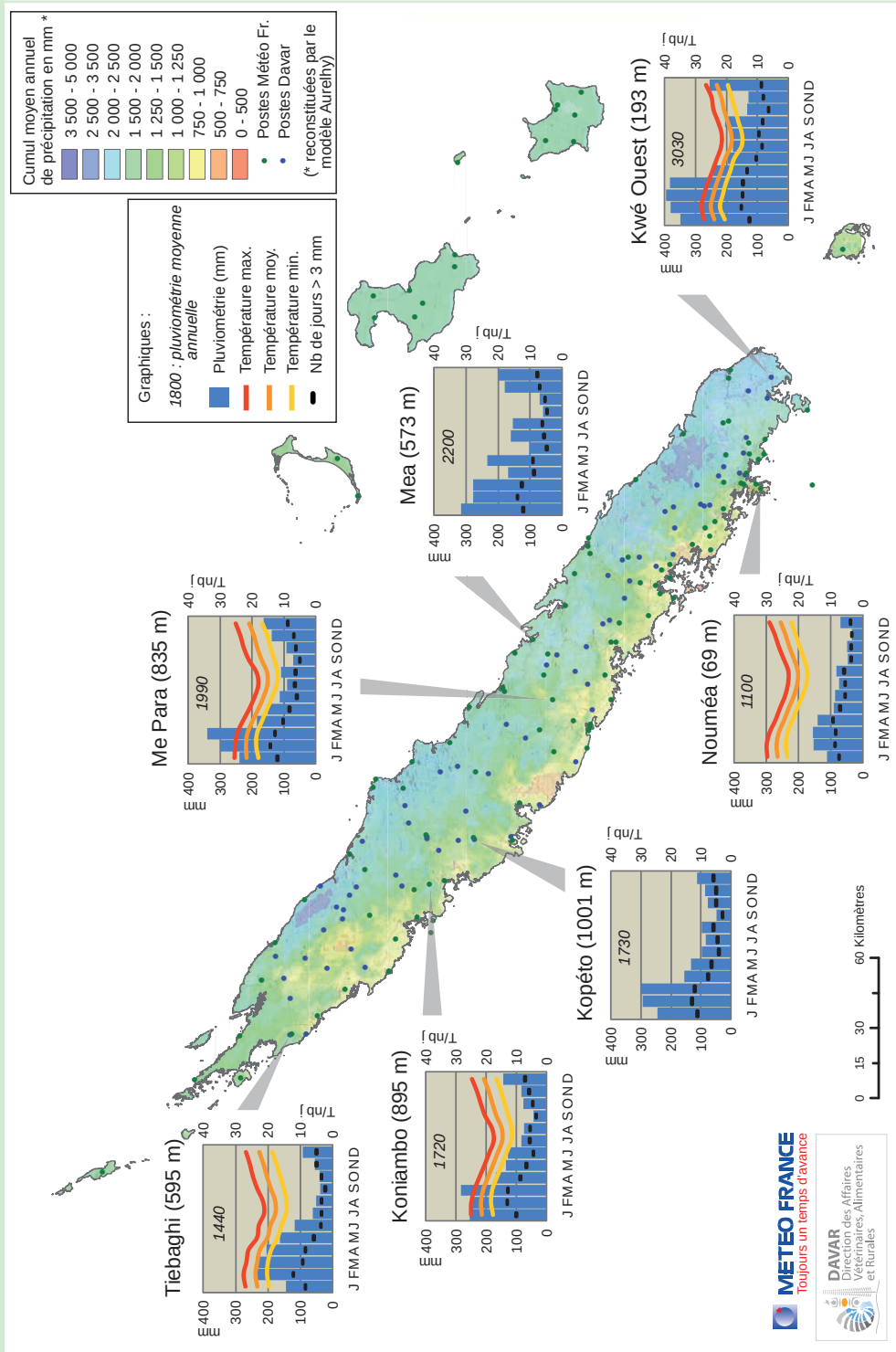
Les conditions climatiques et pluviométriques stationnelles sont largement fonction de l'altitude et de l'exposition. Les précipitations annuelles moyennes varient de l'ordre de 800 mm au niveau de la mer sur la côte ouest à plus de 4 000 mm sur les sommets de plus de 1 500 m d'altitude et dans le massif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

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

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

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

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

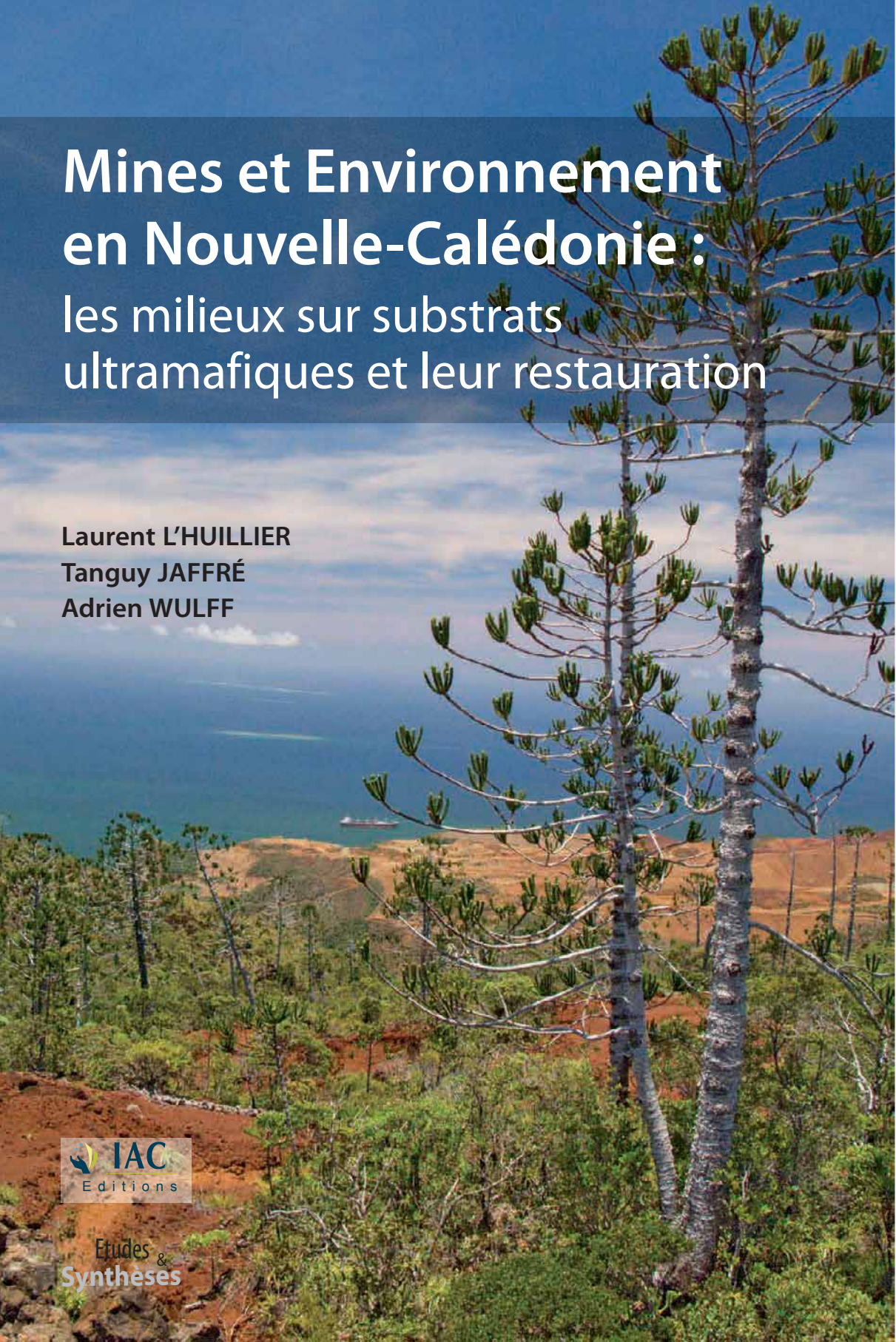


4.2. Conditions hydriques liées à la nature du sol

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

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

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



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

Laurent L'HUILLIER
Tanguy JAFFRÉ
Adrien WULFF



Etudes &
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

ANNEXES345

ANNEXE 1 - RÉGLEMENTATION 346

ANNEXE 2 - CHARTE DES BONNES PRATIQUES MINIÈRES 358

**ANNEXE 3 - LISTE DES ESSAIS DE REVÉGÉTALISATION
SUR SITES MINIER (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 MINIER 386**

**ANNEXE 9 - SCHÉMA RÉCAPITULATIF DES OPÉRATIONS
À ENTREPRENDRE POUR UN LOT DE GRAINES
D’UNE NOUVELLE ESPÈCE 390**

BIBLIOGRAPHIE.391

GLOSSAIRE404

LISTE DES SIGLES.409

INDEX410

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.



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.



Institut Agronomique
néo-Calédonien



Institut de recherche
pour le développement



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

Tabi
ÉDITIONS

ISBN : 978-2-9523950-8-3



9 782952 395083