



HAL
open science

Rapport bibliographique sur les topsoils

Léa Hatteschweiler, Hamid Amir, Laurent L'Huillier, Bruno Fogliani

► **To cite this version:**

Léa Hatteschweiler, Hamid Amir, Laurent L'Huillier, Bruno Fogliani. Rapport bibliographique sur les topsoils. [Rapport de recherche] Programme Ecomine biotop. Tome Nickel et Environnement, CNRT Nickel et son environnement. 2011, 28 p. hal-02152038v2

HAL Id: hal-02152038

<https://hal.science/hal-02152038v2>

Submitted on 6 Oct 2021

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.



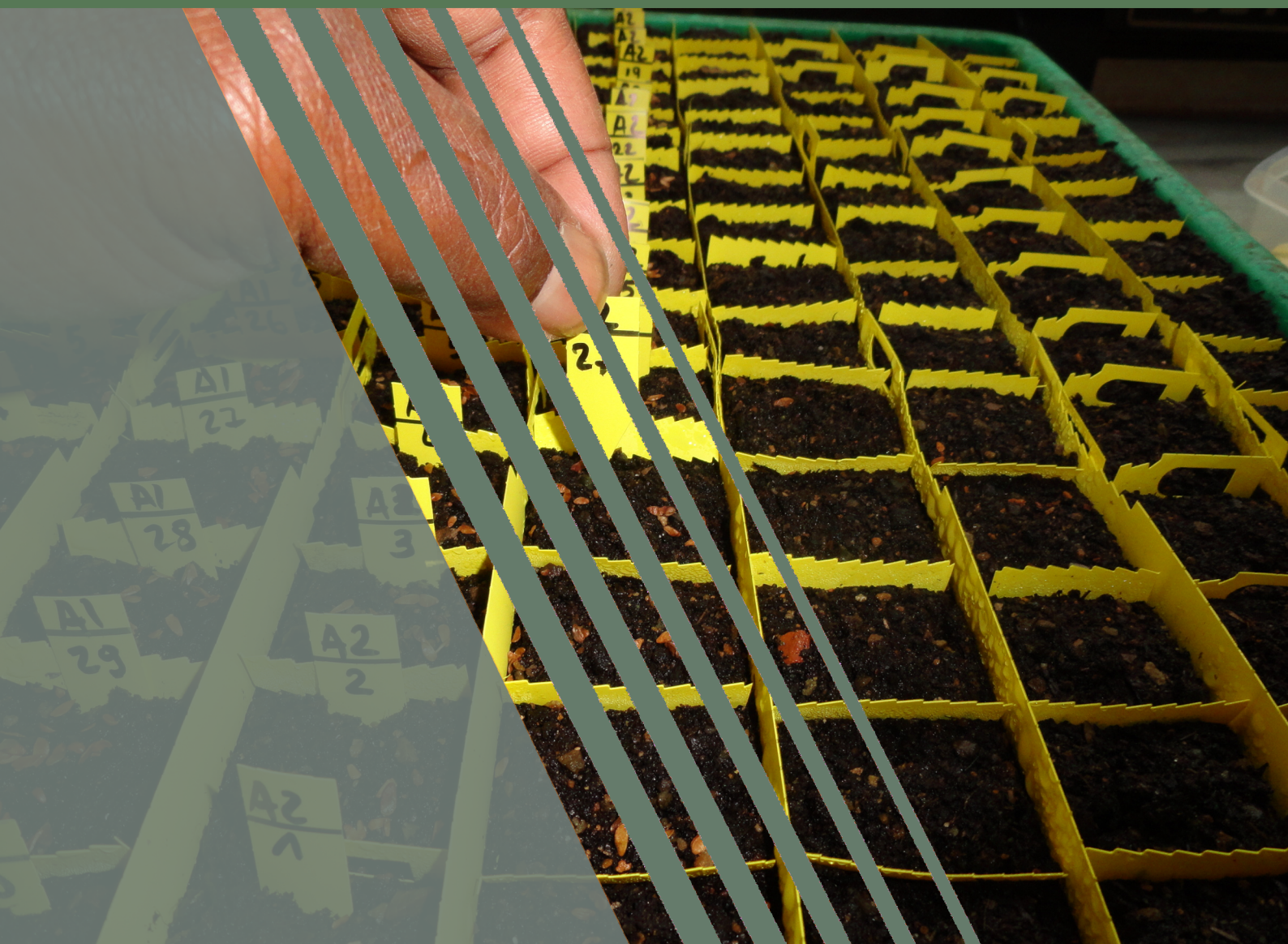
Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Synthèse bibliographique

Edition 2011

LES TOPSOILS

Ecomine "Caractérisation et fonctionnement du système sol/plante/microorganisme dans les maquis miniers et perspective d'application à la restauration écologique"



Bibliographie sur les topsoils en Nouvelle-Calédonie

Etude financée par le CNRT « Nickel et son environnement

Ce programme a bénéficié d'un cofinancement

Programme de recherche appliquée lancé en 2009

Travaux réalisés par l'IAC, l'IRD, le SIRAS, le CNRS et
l'UNC

Projet d'une durée de 48 mois

Rendu Final de 28 pages

2011

Rapport bibliographique

Bibliographie sur les topsoils

De : Léa Hatteschweiler
Hamid Amir, Laurent L'Huillier
et Bruno Fogliani

JUIN 2011



Projet Ecomine « Caractérisation et fonctionnement du système sol/plante/microorganisme dans les maquis miniers et perspective d'application à la restauration écologique »

Hamid Amir (UNC)



CNRT Nickel et son environnement

Projet Ecomines-BioTop (2010-2013)

**« Caractérisation et fonctionnement
du système sol/plante/microorganismes dans les maquis miniers.
Perspectives d'application à la restauration écologique »**

Nom d'Axe : Nickel et environnement (NE)

Nom de projet : ECOMINE bioTop (n° 15)

Rapport bibliographique sur les topsoils (2011)

**Rédigé par Léa Hatteschweiler pour le collectif du projet Ecomine-BioTop,
Sous la direction de Hamid Amir , Laurent L'Huillier et Bruno Fogliani**



Sommaire

1. Introduction

1.1 Définition d'un topsoil

1.2 Principe global de la restauration écologique

1.3 Potentialités et intérêts du topsoil en restauration écologique

2. Historique de l'utilisation du topsoil par différentes sociétés minières à travers le monde

3. Le cas des mines de bauxite en Australie : une référence en matière de restauration écologique et d'utilisation de topsoil

3.1 Le recrutement de la banque de graines et les symbiotes mycorhiziens

3.2 La régénération naturelle à partir du topsoil

3.3 Techniques employées pour augmenter la quantité et la germination des graines

3.4 Les bonnes pratiques concernant les manipulations du topsoil

4. Etudes et pratiques liées au topsoil en Nouvelle-Calédonie

4.1 Bref historique sur les travaux de revégétalisation réalisés en Nouvelle-Calédonie

4.2 Particularités des topsoils néo-calédoniens

4.3 L'utilisation du topsoil pour la réhabilitation des sites miniers en Nouvelle-Calédonie

4.3.1 Banque de graines et germination

4.3.2 Le rôle des microorganismes issus du topsoil dans le processus de réhabilitation écologique

4.3.3 L'utilisation du topsoil dans les opérations de revégétalisation

5. Les indicateurs du succès de la réhabilitation écologique

6. Conclusion et perspectives

Bibliographie

1. Introduction

Ce bilan bibliographique a pour but de faire un état des connaissances sur les potentialités des topsoils et leur gestion dans la restauration écologique de terrains miniers dégradés. Ces données s'appuieront sur les travaux menés en Nouvelle-Calédonie, mais aussi en Australie et dans d'autres pays du monde. La synthèse sera par la suite complétée d'un questionnaire rassemblant les connaissances et expérimentations de différents groupes miniers, sur la gestion des topsoils en Nouvelle-Calédonie, afin de pouvoir dresser une liste de recommandations pratiques.

Jusqu'à présent, très peu de données ont été répertoriées concernant les modalités optimales de conservation, de gestion et d'utilisation des topsoils en Nouvelle-Calédonie. Le topsoil constitue pourtant une ressource naturelle essentielle, qui semble incontournable pour garantir le succès de la réhabilitation écologique des sites miniers.

Cette synthèse permettra de rassembler les informations dispersées ou indisponibles concernant ce sujet et d'en faire le point pour en tirer l'essentiel. Elle servira de base à l'exploitation des résultats de recherche du projet « Ecomine BioTop », car il est toujours essentiel d'avoir une bonne maîtrise de la littérature dans le domaine d'étude pour exploiter au mieux les protocoles disponibles et les résultats obtenus.

1.1 Définition d'un topsoil

La définition d'un topsoil est un sujet de discussion faisant l'objet de plusieurs réponses possibles selon les caractéristiques prises en compte.

Le topsoil, terme anglo-saxon signifiant « sol de surface » est souvent assimilé à l'horizon superficiel du profil pédologique (A) (Tacey & Glossop, 1980), où la matière organique et la fraction minérale sont étroitement liées, mais dont l'épaisseur est variable. De manière plus imprécise, d'autres utilisent ce terme en référence à un substrat contenant les éléments qui soutiennent la croissance des plantes (Hargis & Redente, 1984). On peut le définir également comme « l'horizon fertile » contenant les agrégats, l'essentiel de la matière organique, les microorganismes, la faune du sol, la litière et les graines tombées au sol.

Le terme « terre végétale » est parfois employé, notamment localement, pour désigner des substrats décapés superficiellement, d'aspect sombre et riche en matière organique, et utilisés afin d'enrichir des terrains de faible fertilité, en particulier dans les lotissements. Toutefois un topsoil ne peut pas être limité à cette terminologie et cet usage.

Selon la nature du substrat géologique (latérites, serpentines,...) et sa position dans le relief, selon l'étendue des racines et la microflore active associée, le topsoil aura des propriétés physico-chimiques et des épaisseurs différentes, généralement comprises entre 10 et 30 cm. Cette épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres dans le cas d'enracinements profonds.

Les topsoils peuvent être définis et regroupés suivant leur texture et leurs caractères dominants : matériel organique, caractères physico-chimiques, biologiques, drainage, usage sur terrain, érosion ou dégradation, conditions externes physiques et pente (FAO, 1998).

L'horizon sous-jacent (« subsoil » en anglais) est souvent étudié en même temps que le topsoil et il fait l'objet de recommandations portant sur la gestion de ces deux substrats. Le subsoil possède en effet des caractéristiques qui sont en général favorables à l'enracinement, et la remise en place de ces deux horizons semble être une méthode à privilégier lorsque c'est

possible.

1.2 Principe global de la restauration écologique

La restauration écologique, qui concerne la reconstruction de biotopes ou d'écosystèmes dégradés variés, est définie par la Society for Ecological Restoration (SER) comme étant le « processus qui assiste l'autoréparation d'un écosystème dégradé, endommagé ou détruit. Le but de cette opération est de revenir à la structure, à la diversité et à la dynamique de cet écosystème. »

Les opérations de revégétalisation des zones dénudées ou endommagées par l'activité minière doivent avoir clairement pour objectif l'installation à terme d'une couverture végétale, qui puisse protéger les pentes contre l'érosion, réguler les débits hydriques, assurer la reconstitution stable des écosystèmes dans leurs propriétés et fonctions, ainsi que dans leur qualités et diversités biologiques, afin de garantir la réintégration des sites impactés dans le paysage (L'Huillier *et al.*, 2010b).

Le principe préconisé en Nouvelle-Calédonie, consiste à amorcer le processus de la succession primaire ou à accélérer et parfois redynamiser le processus de la succession végétale secondaire, par l'implantation d'espèces pionnières dans le premier cas et d'espèces secondaires, dans le second. Le processus de la succession doit permettre à la couverture végétale d'évoluer vers des groupements végétaux de plus en plus complexes et biologiquement diversifiés, grâce à l'implantation naturelle ou assistée, d'espèces secondaires, puis forestières.

1.3 Potentialités et intérêts du topsoil en restauration écologique

La régénération naturelle, l'ensemencement et la plantation représentent les trois principales techniques de revégétalisation permettant d'initier les processus de restauration d'un site dégradé. Grant & Koch (2007) recommandent la combinaison de ces techniques, de manière raisonnée, afin de reconstituer le plus rapidement possible un couvert végétal diversifié, d'un point de vue biologique et fonctionnel.

Le topsoil frais contient tous les éléments nécessaires pour réamorcer progressivement une végétation biologiquement équilibrée : une réserve importante de matière organique, de microorganismes utiles, de graines, de racines et de propagules d'espèces locales adaptées aux sols ultrabasiques, convenant parfaitement pour la reconstitution de l'écosystème originel spécifique. Il doit donc être utilisé en premier lieu, puisqu'il peut permettre l'implantation naturelle de 40 à 70% des espèces initialement présentes, et ce à moindre coût (Ward *et al.*, 1996).

Les topsoils ne présentent toutefois pas tous les mêmes caractéristiques qualitatives et quantitatives. Les potentialités d'un topsoil pour la restauration écologique des sites miniers dépendent de la formation végétale en place, qui conditionne la richesse en matière organique et la richesse en graines viables, ou banque de graines, dont la quantité et la composition spécifique

détermineront la possibilité de réimplantation. Ces potentialités dépendent aussi du contenu en champignons mycorhiziens jouant un rôle important dans l'adaptation des végétaux aux fortes contraintes des terrains miniers, et plus généralement de diverses caractéristiques physico-chimiques du sol.

2. Historique de l'utilisation du topsoil par différentes sociétés minières à travers le monde

Diverses publications montrent que l'utilisation du topsoil est étudiée et maîtrisée depuis plusieurs années dans certains pays, comme le Brésil, les Etats-Unis et surtout l'Australie.

Les pratiques d'utilisation du topsoil ont beaucoup évolué depuis quelques décennies. Au départ, le topsoil était enlevé assez grossièrement par les engins miniers puis stocké pour une durée indéterminée, avant son épandage sur les terrains à réhabiliter. Les terrains revégétalisés pouvaient être reboisés avec des essences à croissance rapide et destinées à la production de bois. A ces plantations s'ajoutait un apport de semences et de fertilisants, pour palier à la dilution du topsoil survenue lors de sa manipulation et de son stockage (Ruiz, 2006).

Cependant, les acteurs de la réhabilitation se sont peu à peu rendu compte du potentiel germinatif du topsoil, par l'apparition de plantules issues de la germination spontanée de graines contenues dans le « seed bank » (banque ou réserve de graines), c'est-à-dire des graines provenant des espèces végétales installées sur ce sol avant son décapage. Afin de préserver ce potentiel germinatif, les stratégies ont évolué : avec un prélèvement plus fin du topsoil (la réserve de graines se trouve dans les premiers centimètres), un temps de stockage plus court, pour éviter la compaction et d'autres phénomènes qui entraînent la perte des graines contenues dans le sol (Tacey, 1979 ; Tacey & Glossop, 1980; Hargis & Redente, 1984). De plus, pour augmenter le nombre de germinations naturelles, les sociétés minières ont mis en place le « double stripping », c'est-à-dire un deuxième apport de topsoil frais n'ayant pas ou très peu subis de stockage, afin de compenser la perte de qualité du topsoil stocké (Tacey & Glossop, 1980). Mais comme les résultats restaient moyennement satisfaisants, il est apparu nécessaire de mener des études sur la banque de graines des topsoils.

Dans un premier temps, il s'agissait de comparer le potentiel naturel du topsoil et les résultats obtenus lors de la restauration de milieux dégradés (Bellairs & Bell, 1993). Au Brésil, un programme de restauration a été développé au début des années 1980 dans les mines de Bauxite. Les résultats démontrent l'importance de la régénération naturelle par apport de topsoil qui favorise la productivité et la biodiversité des forêts restaurées. L'intégration supplémentaire d'une grande variété d'espèces secondaires dans la succession, permet une restauration à long terme, en compensant les limitations de la dispersion des semences, et donc de la recolonisation (Parotta & Knowles, 1999). Dans les mines du Sud de l'Afrique, le topsoil contient une importante réserve de graines persistantes permettant à la végétation native, dénommée fynbos, de reprendre ses droits face à l'invasion de ces milieux par un *Acacia* introduit (Holmes, 2001). En outre, le topsoil a généralement une meilleure capacité de rétention de l'eau que le subsoil, il contient des nutriments nécessaires à la croissance des plantes, en plus de la micro-flore et

micro-faune essentielles pour les processus de recyclage des nutriments et le ré-établissement du couvert végétal. Même épandu en fine couche, il améliore les conditions du sol.

Dans un second temps, plusieurs auteurs ont étudié l'impact de la gestion du topsoil sur le rendement de la banque de graines (Bellairs & Bell, 1993 ; Koch *et al.*, 1996), en recherchant notamment quelles étapes du processus de restauration causaient le plus de pertes en graines.

D'autres travaux ont été consacrés à la recherche de conditions optimales de germination, comme la profondeur idéale d'enfouissement des graines, comprise entre 2 et 10 cm (Grant *et al.*, 1996 ; Ward *et al.*, 1997 ; Rokich *et al.*, 2000), permettant d'obtenir un meilleur rendement du taux de germination. Concernant la germination et la longévité des graines, Baskin & Baskin, aux Etats-Unis, ont beaucoup étudié les dormances ainsi que le rôle primordial de la lumière, de la température et de la saison, dans la germination des semences (Baskin & Baskin, 1983 ; Baskin *et al.*, 1989, 1993, 1995). Aux Pays-Bas, Bakker *et al.* (1995) se sont intéressés à la persistance (longévité) naturelle des graines contenues dans le topsoil, dépendant de leur taille, de leur structure, et de leur profondeur d'enfouissement. Ils mettent en évidence l'importance du facteur « dispersion temporelle » dans la seconde phase de la restauration, après activation de la banque de graines présente. Le succès de la réhabilitation dépend d'une part du transport longue-distance des graines (par les animaux, hommes, machines, ou par le vent ou l'eau), mais aussi de bonnes conditions de germination dans l'endroit (micro-habitat) où les graines sont dispersées (Bakker *et al.*, 1995).

Dans l'Ouest du Kentucky, des auteurs ont suivi pendant 2 ans et demi les communautés fongiques mycorhiziennes dans les sols de cinq sites miniers de charbon à ciel ouvert abandonnés, en tenant compte du temps écoulé depuis la revégétalisation (Gould & Hendrix, 1997). Selon le stade plus ou moins avancé de la revégétalisation, des populations assez diverses de spores de champignons mycorhiziens du genre *Glomus*, colonisent le milieu assez rapidement puis se succèdent avec des dominances de populations, une richesse en espèces de plus en plus importante en l'espace de cinq ans. Après les deux premières années de revégétalisation, la dominance des espèces, leur diversité et leur régularité tend à se stabiliser. Donc, même lorsque ces populations de champignons sont décimées en surface par l'activité minière, la réserve de propagules en profondeur sert d'inoculum pour recoloniser la surface lorsque les racines hôtes des plantes poussent à nouveau dans le sol. Cette observation n'est probablement pas applicable aux cas des terrains miniers exploités en Nouvelle-Calédonie, car le décapage est profond et ne laisse généralement pas de propagules mycorhiziennes vivantes (Amir *et al.* 1997).

L'utilisation des boues de stations d'épuration (boues de STEP) pour la restauration des sites dégradés fait l'objet d'un intérêt particulier depuis environ deux décennies. Elles sont d'abord préconisées pour fertiliser des zones décapées, dépourvues de couche organique, où il s'agit de reconstituer, en apportant de la matière organique et une flore bactérienne, une couche arable artificielle (ATS) qui peut aider au recouvrement de la couverture végétale et donc de l'écosystème (Zier *et al.*, 1999). Elles sont plus récemment utilisées, pour l'amélioration de la fertilité du topsoil.

Dans ce sens, des études ont été menées concernant l'application de gypse et de boues de STEP sur résidus fins de mines de bauxite (Wong & Ho, 1991). Un apport de 77 t/ha de gypse et 144 t/ha de boues, modifie les propriétés physiques des résidus par une amélioration de la structure, de la porosité et de l'infiltration de l'eau ; ce qui favorise la revégétalisation. Un essai semblable a été réalisé sur des mines de bauxite en Irlande, montrant que la pauvreté en nutriments dans les résidus de bauxite est un des principaux facteurs limitant l'établissement à long-terme des plantes. L'ajout de gypse et de boues dans ce cas n'a pas permis de compenser ces multiples déficiences (Courtney & Timpson, 2004).

Suite à toutes ces expérimentations, une combinaison de différentes stratégies a été préconisée, garantissant de meilleurs résultats : le topsoil doit être utilisé directement (sans stockage préalable), épandu en une couche de 10 cm à 30 cm, suivi d'un « ripping » ou fendage. De la matière organique pourra être incorporée au topsoil, ainsi qu'un fertilisant.

3. Le cas des mines de bauxite en Australie : une référence en matière de restauration écologique et d'utilisation de topsoil

Il importe d'abord de souligner que la performance australienne en termes de restauration écologique (l'une des meilleures au monde) est liée en particulier à une grande rigueur de la réglementation de l'exploitation minière et de la restauration des sites miniers en fin d'exploitation. La restauration écologique de tous les terrains dégradés par cette activité est obligatoire. Elle doit être planifiée bien à l'avance et réalisée selon des normes et des méthodes bien définies, particulièrement exigeantes.

Même dans les étapes préliminaires de prospection, certaines juridictions légales ne délivrent un permis d'exploitation qu'après la réalisation d'analyses environnementales, permettant de prendre conscience de la biodiversité initialement établie. Suite à quoi, des objectifs doivent être fixés et des engagements, pris et respectés, avec notamment la production d'un plan de réhabilitation (ICMM, 2006).

Une stratégie rigoureuse doit être mise en place pour évaluer des impacts potentiels de chaque opération et aménagement réalisés, et formuler des objectifs spécifiques et quantifiables, afin de garantir une conservation durable de la biodiversité.

Pour le planning de fermeture des activités de la mine, il faut procéder à une estimation de la valeur, des gains et pertes, concernant les ressources environnementales avant et après implantation de la mine (biodiversité de la faune et flore terrestre et aquatique, hydrologie, sol, paysage...), en complément de la norme ISO 14001 qui donne l'accréditation du management environnemental (ICMM, 2008).

Le South Australian Consolidated Acts a établi une réglementation complète et précise basée sur l'activité minière. Le règlement 14 issu de « Mines and works inspection regulations 1998 » concerne les manipulations du topsoil ; celui-ci doit être collecté séparément des stériles miniers, et tout stockage du topsoil (s'il a lieu) doit être réalisé de manière à optimiser son utilisation pour le plan de réhabilitation. De même, il faut s'assurer que le topsoil est protégé de l'érosion par la pluie et le vent.

Le règlement 18 stipule qu'après 2 années de cessation des activités, l'entreprise exploitante doit s'assurer que la réhabilitation du site a été totalement et correctement accomplie, et qu'aucune autre aire ne soit affectée.

(http://www.austlii.edu.au/au/legis/sa/consol_reg/mawir1998396/index.html)

Même si on peut considérer que nous n'en sommes pas encore à ce stade en Nouvelle-Calédonie, il conviendrait d'aller assez rapidement dans ce sens et d'augmenter progressivement les contraintes réglementaires afin de pousser tous les acteurs à réaliser les efforts nécessaires pour réussir ce défi important de conserver pour les générations futures un environnement le moins dégradé possible, gardant des capacités élevées de restauration.

De nombreux résultats prometteurs ont pu être observés en Australie, avec l'exemple marquant du rétablissement de la forêt de Jarrah après exploitation minière. L'objectif était de rétablir un écosystème fonctionnel et durable, incluant conservation, production de bois, capture d'eau et biodiversité (Koch, 2007a). La richesse spécifique devait être semblable à celle de la forêt primitive (Alcoa, 2003b). Challenge lancé depuis quelques années : augmenter la restauration de la richesse botanique de 65% à 100% en l'espace de 10 ans, tout en contrôlant le coût des opérations.

3.1 Le recrutement de la banque de graines et les symbiotes mycorhiziens

La réserve de graines se concentre dans la partie superficielle du topsoil ; 92% des graines contenues dans 10 cm de topsoil, se trouvent dans les 5 premiers cm. La plupart des espèces ne germent pas à des profondeurs au-delà de 2 cm (Koch *et al.*, 1996 ; Rokich *et al.*, 2000).

Après défrichage et brûlage des terrains à exploiter, la réserve de graines diminue de 74% par rapport à la densité initiale dans la forêt originelle (Koch *et al.*, 1996).

Lorsque la couche de topsoil récupérée est épaisse (30 cm par exemple), on constate une diminution d'un facteur 3 du recrutement de semences dans la banque de graines, au moment de la réinstallation du topsoil pour la restauration du site (Rokich *et al.*, 2000) excepté pour certaines espèces qui nécessitent chaleur ou scarification pour germer, auquel cas les travaux de décapage peuvent avoir un effet stimulant sur la levée de dormance (Koch *et al.*, 1996 ; Grant & Koch, 2007). Certaines espèces sont donc plus affectées que d'autres au retournement et à l'enfouissement.

Le stockage *in situ* du topsoil pendant 1 an ou 3 ans a montré une baisse du recrutement de graines, puisqu'on retrouve après ces périodes seulement 54% et 34% respectivement de la quantité totale présente dans le topsoil frais (Rokich *et al.*, 2000). Des conditions d'humidité trop élevées lors du stockage entraînent la décomposition des semences ou une germination prématurée (Rokich *et al.*, 2000), ainsi qu'une diminution de la viabilité des propagules (Grant & Koch, 2007).

Un topsoil stocké a montré une diminution d'environ 70% de sa réserve de graines

viables après 10 mois de stockage. Après étalage, il reste 16% en contenu de graines de la forêt originelle. Le transfert direct entraîne une perte de moins de 50% alors que le stockage suivi d'un transfert cause une perte de 80-90% (Koch *et al.*, 1996).

Les feux à répétition peuvent perturber le rétablissement des jeunes aires réhabilitées en engendrant une grande proportion d'herbes introduites indésirables (Smith *et al.*, 2000).

Au niveau de la microflore, les perturbations du sol liées à l'activité minière réduisent la propagation du mycélium externe des champignons mycorhiziens à arbuscule (MA), en saison sèche ou pendant la période active de la croissance des plants. La perturbation des sols a deux effets : séparer les hyphes externes de la racine hôte et rompre le réseau d'hyphes du sol, ce qui endommage également la structure des spores et racines mycorhiziennes (Jasper *et al.*, 1989a). L'infectivité des champignons MA est meilleure dans un sol revégétalisé, mais nettement moins que les valeurs observées dans une forêt non perturbée (Jasper *et al.*, 1989b).

3.2 La régénération naturelle à partir du topsoil

La régénération naturelle se base sur l'implantation et le développement de plants issus de graines, de propagules ou de rejets de souches, présents naturellement dans le topsoil amené pour restaurer le site, lorsque ce topsoil a gardé ses potentialités biologiques. Cela dépend des sources de graines préexistantes dans le topsoil, ou encore amenées par dissémination avec le vent, les animaux ou les oiseaux (L'Huillier *et al.*, 2010).

La récupération du topsoil et son épandage dans des conditions adéquates est une pratique effective et bon marché, largement mise en œuvre par les sociétés minières à travers le monde. Même si elle doit être complétée par d'autres techniques (semis, plantations), elle permet souvent l'établissement d'une diversité d'espèces allant au-delà de celle assurée par plantation ou semence ; c'est une part importante de la succession et de l'écologie de la végétation. Cette pratique a l'avantage, de rétablir des espèces indigènes localement adaptées et de produire des plants au système racinaire souvent plus robuste et plus résistant à la sécheresse et au vent que ceux issus de semences apportées (Alcoa, 2003a). Elle nécessite toutefois une humidité du sol peu fluctuante, pour favoriser la germination ; ce qui n'est pas souvent le cas en Nouvelle-Calédonie et nécessite donc une gestion rigoureuse des périodes de restauration.

Certaines expériences australiennes ont montré que 72% des plantes qui ont recolonisé le milieu provenait de la régénération naturelle du topsoil (Koch *et al.*, 1996). Le topsoil épandu est alors la source la plus importante d'espèces natives dans les aires restaurées, suivi par les graines semées et les plantes ré-introduites (Ward *et al.*, 1997). Il y a eu peu de changement dans la composition floristique en l'espace de quelques années ; ce qui prouve qu'il y a peu d'apports externes, d'où l'importance de la composition floristique initiale pour déterminer la succession (Norman *et al.*, 2006).

La plupart des espèces peuvent se ré-établir après 5 à 10 ans (Grant & Koch, 2007). L'objectif de 5 ans pour restaurer 80% de la richesse spécifique peut donc être atteint, bien que l'abondance soit plus faible (Koch & Hobbs, 2007).

Avec le temps, une amélioration de la qualité des semences a pu être obtenue, ainsi que des collectes plus importantes et une optimisation des prétraitements de graines. On a aussi

préconisé la restriction du manèment du topsoil à la période sèche été-automne, et son transfert direct dès le décapage. En l'espace de 10-15 ans, après restauration, la végétation a gagné en vigueur et densité, la structure de la forêt s'est élaborée ; puis l'accumulation de litière a permis le développement d'un habitat favorable pour la recolonisation par la faune (Grant & Koch, 2007).

Cependant certains paramètres de l'écosystème ne sont pas correctement restaurés à moyen terme, notamment une partie de la faune et des champignons nécessitant du bois dégradé pour se développer (Koch & Hobbs, 2007).

3.3 Techniques employées pour augmenter la quantité et la germination des graines

Un apport supplémentaire de semences sur les sites en restauration est souvent recommandé afin d'augmenter l'abondance et la richesse des graines déjà présentes (Rokich *et al.*, 2002). Dans cette optique, de nombreuses études ont été réalisées en Australie pour connaître les caractéristiques et la biologie des graines de toutes les espèces végétales utilisées. Il faut savoir que la qualité d'une graine est importante pour toutes les étapes de la réhabilitation : récolte, stockage et plantation. Ces étapes peuvent être cruciales et affecter les aspects physiques et physiologiques de la qualité des graines, influençant leur germination, leur survie et leur croissance. Le conditionnement est donc très important : les graines doivent être mures, récoltées, triées, séchées avec soin, des tests de germination doivent être faits régulièrement en cas de stockage longue durée. Les conditions de stockage varient selon les espèces.

De nombreuses espèces de la forêt de Jarrah sont dormantes et requièrent différentes conditions ou traitements pour germer (température, lumière, humidité, temps de stockage) (Norman *et al.*, 2006)

Pour certaines espèces, l'enterrement dans le sol apporte un avantage ; le cycle naturel du sol avec l'alternance chaleur/fraicheur et humidité/sècheresse, augmente le taux de germination (Alcoa, 2003b).

L'application d'une simple couche de mulch après diffusion des graines, permet également d'optimiser le recrutement (Rokich *et al.*, 2002).

Le traitement des graines à la fumée est maintenant fréquemment utilisé avant leur diffusion sur la zone de restauration (Roche *et al.*, 1997). La combinaison fumée et chaleur permet une recrudescence de la germination dans les forêts et dans certains sols miniers, notamment en Australie, aussi bien d'espèces introduites que natives, et accélère le taux d'émergence des plants de la banque de graines (Roche *et al.*, 1997 ; Read *et al.*, 1999).

Certaines espèces récalcitrantes se sont adaptées aux contraintes et perturbations naturelles telles que le feu, la sécheresse et le pâturage, facteurs dont dépend généralement la levée de dormance de leurs graines ; leur germination ne se fait donc pas naturellement dans les conditions habituelles de revégétalisation des sites miniers. On peut alors pratiquer la scarification, le bouturage ou la culture *in vitro* (micropropagation) (Alcoa, 2003b ; Grant & Koch, 2007). Ces cas sont probablement assez rares en Nouvelle-Calédonie, mais nécessitent des études supplémentaires.

3.4 Les bonnes pratiques concernant la manipulation du topsoil

L'idéal est de récupérer le topsoil juste après décapage de la végétation et de le remettre immédiatement en place, d'enlever les déblais et préparer le semis de graines pour le début des pluies d'automne en Australie (Ward *et al.*, 1997 ; Koch, 2007b). Il est préférable d'éviter le stockage causant des problèmes de compaction et de perte des potentialités biologiques, et d'accomplir le transfert direct avec un minimum de délai entre chaque opération (Koch, 2007a, 2007b). C'est pour ces raisons que le transfert direct du topsoil devient la technique privilégiée dès les années 1980 (Grant & Koch, 2007). C'est le meilleur moyen de restaurer les semences naturelles, les microorganismes importants et la fertilité du sol (Alcoa, 2003b). En Australie, il doit être fait à la saison sèche entre l'été et l'automne, sachant que la densité naturelle des graines est deux fois plus importante en été qu'en hiver.

Il est souvent possible de dégager deux couches de sol séparément et de respecter les horizons lors du transfert ; la couche supérieure riche en graines doit rester en surface (Alcoa, 2003b ; Koch, 2007b). Le topsoil doit être remplacé frais et sec (Rokich *et al.*, 2000) avec un étalage assez fin, favorable à la germination (Koch *et al.*, 1996).

Une équipe de recherche a développé une méthode pour concentrer les graines dans le topsoil frais, récupéré en été, au moment où la réserve est la plus importante. Ce topsoil concentré, provenant d'un hectare de forêt, a eu pour effet d'augmenter le nombre de plantes et d'espèces sur une surface de réhabilitation supérieure à 7 hectares. Le topsoil est tamisé pour enlever les particules de sol supérieures à 5 mm de diamètre, puis déposé en fine couche au dessus d'un vieux topsoil ; ce qui a pour effet d'augmenter sa richesse spécifique de 2 à 4 fois (technique du « double-stripping »). Le transport coûte moins cher car les graines ont été concentrées dans un petit volume de sol. Cette technique a été utilisée pour la 1^{ère} fois dans le monde (Alcoa, 2003b ; ICMM, 2006).

Concernant l'apport supplémentaire de graines, il est important d'utiliser des semences « locales » (récoltées dans un rayon de 20 kms par exemple dans le SW Australien, toutefois cette distance peut varier selon les situations) pour s'assurer que la diversité génétique est maintenue et reliée à la végétation native environnante (Koch, 2007b). Dans ces études le plus haut taux de germination est obtenu à des températures entre 10-15°C (période de pluie hivernale), l'application des graines peut avoir lieu en été-automne, pendant la période de dormance, et la germination peut alors survenir fin automne-hiver. Le délai entre le décompactage du sol et l'ensemencement doit être le plus court possible.

Sur les mines de bauxite du SW australien, l'application de fertilisants phosphatés a été diminuée dans les sols réhabilités en 2009, pour réduire l'avantage compétitif des espèces à forte croissance et encourager la biodiversité des Protéacées natives qui grandissent moins vite et qui sont peu exigeantes en phosphate (site www.alcoa.com).

La maîtrise de l'utilisation du topsoil, combinée aux autres techniques de revégétalisation a permis d'obtenir de très bons résultats dans les mines de bauxite de l'ouest australien. Ces résultats positifs ne peuvent qu'encourager les acteurs néo-calédoniens à entamer des recherches

sur le topsoil local, mais ne peuvent pas être directement extrapolables à la Nouvelle-Calédonie car les sols miniers ultrabasiques et la flore associée possèdent des caractéristiques très différentes et les conditions climatiques diffèrent également.

4. Etudes et pratiques liées au topsoil en Nouvelle-Calédonie

L'utilisation du topsoil pour la restauration de sites miniers dégradés est encore récente et peu répandue en Nouvelle-Calédonie. En effet, même si les sociétés minières ont commencé à l'utiliser, sans aucune connaissances, depuis environ une dizaine d'années, elles ne disposent d'un cadre réglementaire que depuis 2009 et ce code minier ne détaille pas les méthodes de réhabilitation à utiliser. Ainsi, les potentialités apportées par l'utilisation du topsoil pour la restauration écologique des sites miniers sont encore mal connues en Nouvelle-Calédonie (Goxe, 2010). De même, les caractéristiques biologiques et physico-chimiques des topsoils sur substrat ultramafiques en Nouvelle-Calédonie sont insuffisamment étudiées.

De récents travaux de recherche ont toutefois mis en évidence des réponses différentes des topsoils selon la formation végétale en place, le milieu et la saison (Ruiz, 2006 ; L'Huillier, 2007 ; McCoy, 2007; Goxe, 2010). Il est donc nécessaire d'améliorer les connaissances concernant la diversité des comportements des topsoils en relation avec les différents types de maquis susceptibles d'être décapés par l'activité minière.

La fragilité et la rareté des topsoils de qualité pour la restauration nécessitent une grande attention quant à leur maniement. Il faut se donner les moyens d'une bonne gestion, pour optimiser une reprise efficace et rapide de la végétation.

4.1 Bref historique sur les travaux de revégétalisation réalisés en Nouvelle-Calédonie

Les premiers essais de revégétalisation ont été réalisés en 1971 pour le compte de la société Penamax, par le CTFT, avec la collaboration de l'ORSTOM. Ils portaient sur la revégétalisation de deux horizons de latérites (latérites rouge cuirassée et latérite jaune) (L'Huillier *et al.*, 2010). Ces essais, comme les suivants, réalisés par l'ORSTOM pour le compte de la SLN en 1974-1976, puis par le CTFT de 1975 à 1981, ont privilégié l'utilisation de nombreuses espèces exotiques ligneuses ou herbacées (Poaceae diverses, Pin des Caraïbes, *Acacia* australiens, plantes fourragères), ainsi que celle de quelques espèces locales, assez peu exigeantes et à forte croissance, comme le gaïac (*Acacia spirorbis*) et le bois de fer (*Casuarina collina*), lesquelles ont montré de bonnes croissances (; Amir *et al.*, 2003 ; L'Huillier *et al.*, 2010).

L'objectif de départ était l'introduction d'espèces exotiques à croissance rapide permettant la création d'un milieu humifère et de conditions mésophiles, propices au développement d'espèces forestières de terrains miniers. Il en ressort globalement sur l'ensemble des substrats testés que l'utilisation d'espèces locales de terrains miniers est à privilégier car ces espèces sont mieux adaptées aux conditions de sols peu fertiles et arides. Pour améliorer la reprise et la croissance des jeunes plants, le sol doit être ameubli, paillé et additionné d'engrais complet (Jaffré *et al.*, 1994b).

En parallèle, des essais d'ensemencement sont mis en place avec épandage d'un mélange eau, colle organique, engrais et semences. Les meilleurs résultats de ces études sont obtenus avec des Cypéracées qui conservent leur pouvoir germinatif tout au long de la période sèche (Jaffré *et al.*, 1994b).

De 1988 à 1991, les recherches menées par l'ORSTOM pour le compte de la SLN ont eu pour but d'inventorier et de tester en laboratoire les espèces, majoritairement endémiques, potentiellement utilisables pour la revégétalisation par plantation ou par semis. Ces premiers résultats ont fait l'objet d'un manuel publié par la SLN, donnant les caractéristiques de 67 espèces (Jaffré & Pelletier, 1992) qui ont par la suite été testées lors de divers essais en champs effectués par l'ORSTOM, le Cirad et Siras Pacifique, pour le compte de différentes sociétés minières. Un apport de matière organique sous forme de topsoil, de paille ou de pâte à papier, complémente ces essais afin d'améliorer la fertilité des substrats. Les meilleures performances sont obtenues avec l'utilisation de la couche superficielle humifère du sol, mais c'est une opération difficile car la couche est mince et très riche en cuirasse de fer (Sarrahil, 2002).

L'utilisation de ces espèces endémiques adaptées et diverses, a permis de limiter les apports d'engrais ainsi que les possibilités d'invasion d'espèces allochtones, mais aussi de réduire l'utilisation des espèces locales à caractère grégaire et invasif (Amir *et al.*, 2003 ; L'Huillier *et al.*, 2010).

Les acteurs miniers ont alors recours à des plantes pionnières pour amorcer une bonne succession écologique et à des plantes introduites pour l'apport de matière organique, le maintien et la fertilisation du sol, nécessaire à l'installation des plantes endémiques. Il a fallu trois décennies avant que les principes de la restauration écologiques soient bien perçus et partagés (Amir *et al.*, 2003 ; L'Huillier *et al.*, 2010).

4.2 Particularités des topsoils néo-calédoniens

Jusqu'à présent, les topsoils néo-calédoniens ont fait l'objet de peu d'attention et ne sont pas souvent réutilisés pour la restauration écologique des terrains miniers après exploitation, comme cela se fait dans d'autres pays tel que l'Australie. Pourtant, ces topsoils contiennent non seulement les éléments minéraux nécessaires aux plantes, mais aussi un stock de graines d'espèces locales, les microorganismes symbiotes de plantes, bactéries et champignons, ainsi que la matière organique dont les microorganismes ont besoin.

Leur fonctionnement sur les plans physico-chimique, biologique et microbiologique, a été jusque là très peu étudié ; ces données sont pourtant essentielles pour permettre une bonne réhabilitation des écosystèmes dégradés.

En termes de diversité, on distingue schématiquement en Nouvelle-Calédonie deux principales grandes classes de sols développés à partir des roches ultramafiques, qui sont les sols ferrallitiques ferritiques (parmi lesquels on distingue : les sols remaniés par érosion sur pentes, les sols colluvionnés de piedmont, les sols alluvionnés de plaine, et les sols non remaniés souvent cuirassés de plateaux) et les sols bruns hypermagnésiens situés généralement en bas de massif et développés principalement à partir de serpentinites. Les communautés végétales installées sur ces substrats se distinguent par des variations physiologiques influencées surtout

par les paramètres édaphiques, d'altitude et stationnels, qui permettent de distinguer de manière simplifiée quatre grands groupements principaux de maquis, particulièrement impactés par l'activité minière : 1) les maquis arbustifs, à strate herbacée réduite, sur sols bruns hypermagnésiens, 2) les maquis ligno-herbacés sur sols ferrallitiques remaniés par érosion ou colluvionnement, 3) les maquis arbustifs buissonnants sur sols ferrallitiques gravillonnaires ou cuirassés, 4) les maquis paraforestiers et préforestiers (Jaffré, 1980 ; Morat *et al.*, 1986 ; McCoy, 2007 ; L'Huillier *et al.*, 2010).

De ce fait, les sols de ces différents maquis ne présentent pas les mêmes caractéristiques qualitatives et quantitatives. Par exemple, la quantité et la composition spécifique de graines contenues dans le topsoil varient fortement selon son origine.

Les premières études sur les potentialités des topsoils à permettre une régénération d'espèces végétales, sur terrains miniers, ont montré une grande variabilité dans les réponses (Ruiz 2006, L'Huillier 2007). Une étude comparative de ces différents topsoils a été menée dans le cadre d'un stage de master 2 encadré par l'IAC et l'UNC. Les résultats ont mis en évidence une probable relation entre la composition floristique des formations végétales en place et les banques de graines des topsoils (Goxe, 2010). La richesse spécifique en Cyperaceae des maquis en place semble influencer les densités de germinations et la composition spécifique en Cyperaceae des banques de graines. La composition spécifique de la banque de graines viables du topsoil est un indicateur de la capacité de régénération d'une communauté végétale, et peut fournir une information sur la composition floristique initiale et future ainsi que sur les schémas de succession.

Une corrélation positive entre la teneur en carbone organique des topsoils et la quantité de spores MA a permis de souligner l'influence de la densité du couvert végétal des maquis sur potentiel mycorhizogène d'un topsoil (Goxe, 2010). Certaines caractéristiques physico-chimiques des topsoils dépendent de la formation végétale en place et des conditions écologiques stationnelles associées : la densité du couvert végétal, la position topographique, la pluviométrie, la capacité de rétention du sol pour l'eau et le stade d'évolution du processus pédogénétique lié à la localité (Goxe, 2010).

Les sols ultramafiques et plus particulièrement les topsoils présentent une diversité originale de microorganismes, avec un important potentiel en termes d'application. Cette microflore joue un rôle majeur dans le recyclage de la matière organique, ainsi que dans l'adaptation et le développement des plantes dans les écosystèmes dégradés (Amir & Pineau, 2003 ; Perrier *et al.*, 2006 ; Amir & Ducouso, 2010).

On distingue différents groupes, notamment les bactéries symbiotiques fixatrices d'azote (*Rhizobium* et *Frankia*), les champignons symbiotiques mycorhiziens associés aux racines et les bactéries et rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes. Leur rôle sera détaillé dans le chapitre 4.3.2.

4.3 L'utilisation du topsoil pour la réhabilitation des sites miniers en Nouvelle-Calédonie

L'utilisation du topsoil pour la restauration de sites miniers dégradés remonte seulement aux années 2000. Bien qu'assez peu répandue en Nouvelle-Calédonie, cette méthode est de plus en plus pratiquée depuis quelques années. Beaucoup de travaux réalisés ne sont disponibles que sous forme de rapport interne.

4.3.1 Banque de graines et germination

Jusqu'à présent et dans le cadre de l'optimisation de la restauration écologique des terrains miniers dégradés, les recherches se sont attachées dans des conditions de laboratoire à rechercher le moyen de faire germer les graines par des actions diverses comme la scarification et la stratification (Fogliani *et al.*, 2004, L'Huillier *et al.*, 2010) pour une utilisation en plantation ou en hydroseeding. Cependant, la mise en relation de ces résultats avec les conditions naturelles reste encore aujourd'hui trop rare. Il apparaît essentiel à ce stade de la recherche sur les graines, que ces relations soient établies, avec comme objectif de valoriser au mieux le topsoil.

Quelques études ont démarré sur ce sujet récemment ; L'Huillier (2007) a montré l'extrême variabilité dans la réponse des topsoils en termes de germinations, selon leur milieu et les formations végétales en place, l'importance des cypéracées dans la composition spécifique de la banque de graines, ou encore l'émergence d'espèces présentant pourtant des dormances profondes très difficiles à lever en conditions de laboratoire, notamment de la famille des Ericaceae (*Dracophyllum*, *Styphelia*). Après étalage sur terrine de différents types de topsoils, les relevés de germination ont montré que la plupart des graines ayant germé avaient été inventoriées sur la formation en place ; les autres germinations provenant de la dissémination des espèces alentours. La banque de graines est donc un réservoir important de graines. Inversement, de nombreuses espèces inventoriées au départ ne sont pas retrouvées dans les germinations sur terrine, indiquant que toute la diversité spécifique initiale ne se retrouve pas dans les topsoils prélevés à une période déterminée. Un effet saison est probablement un des facteurs essentiels à prendre en compte.

Zongo (2010) a par ailleurs pu mettre en évidence deux stratégies différentielles sur maquis miniers entre des graines légères non dormantes à embryon volumineux peu maintenues dans le topsoil et celles de poids plus important avec une dissémination de type barochore ou zoochore dont les graines à téguments épais et présentant des dormances qui semblent se maintenir dans la banque de graines.

Les processus germinatifs des graines ou le moyen optimal de les conserver sont généralement appréhendés au travers d'expériences menées dans des conditions contrôlées ou semi-contrôlées en laboratoire. S'il est évident que ces données ont permis de mieux appréhender ces processus, il est apparu tout aussi évident que la mise en corrélation avec les conditions naturelles devenait essentielle. C'est pourquoi depuis plusieurs années, les chercheurs qui se consacrent à l'étude des semences tentent de se rapprocher au plus près des conditions naturelles, dans les expérimentations, depuis la collecte jusqu'à la germination en passant par le mode de stockage des graines. Plus encore, l'étude *in situ* est de plus en plus répandue (Baskin *et al.*, 1989).

La viabilité et la longévité d'une graine sont liées à différents éléments tels que la taille, la forme et la structure de son tégument, à la composition de ses réserves séminales, à sa physiologie et à sa profondeur d'enfouissement. Dans les conditions naturelles, il est rare que les conditions d'humidité, d'oxygénation, de température soient stables. Cela induit donc un vieillissement plus rapide des graines réduisant d'autant leur longévité, se traduisant par exemple par la dégradation des réserves séminales essentielles à la germination. Or, les graines des espèces de maquis miniers de Nouvelle-Calédonie ont généralement un pourcentage élevé de lipides au sein des réserves (Zongo *et al.*, 2008). La composition même de ces lipides en acides gras, pour certains rares, révèlent une prédominance d'acides gras insaturés sensibles à l'oxydation. Cette particularité semble jouer un rôle essentiel dans leur conservation et leur longévité.

4.3.2 *Le rôle des microorganismes issus du topsoil dans le processus de réhabilitation écologique*

Les travaux de recherche en écologie microbienne des sols miniers de Nouvelle-Calédonie ont pris un essor important depuis une dizaine d'année. Ils ont pour but de mieux comprendre le fonctionnement microbiologique des sols miniers et notamment les interfaces sol-microorganismes-plantes afin d'optimiser leur utilisation dans les processus de restauration écologique, mais également, de façon plus générale, de tirer profit des microorganismes naturellement en interaction avec les plantes pour améliorer l'adaptation de celles-ci à leur environnement (Amir *et al.*, 2007 ; Amir & Ducouso, 2010).

Herrera *et al.* (2007), ont étudié l'impact de l'activité minière sur la diversité microbienne. Il en ressort qu'entre un sol intact et un sol exploité, les communautés bactériennes sont similaires en termes de richesse spécifique, mais les populations dominantes sont différentes. Globalement, sur les sites dévastés, il y a une faible quantité de protéobactéries à relier à l'absence de végétation (pas d'activité enzymatique telle que dénitrification ou fixation d'azote). La diversité phylogénétique est donc reliée à la fonction de l'écosystème. En phase de revégétalisation, l'introduction de plantes pionnières augmente la quantité de protéobactéries, dû à l'apport de carbone et azote, ce qui tend à créer un environnement similaire à celui d'origine. La disponibilité des ressources limitant la croissance (matière organique des feuilles ou racines en décomposition) influence la composition des communautés biotiques. Des effets distincts sont observés en fonction des espèces de plantes et de la communauté considérée (Héry *et al.*, 2005 ; Herrera *et al.*, 2007).

Les microorganismes symbiotes jouent un rôle fondamental dans le développement et l'adaptation au milieu de la plupart des espèces végétales.

Parmi eux les champignons mycorhiziens sont présents dans le topsoil sous forme essentiellement de spores de conservation pour les mycorhizes à arbuscules (MA) et de diverses propagules plus ou moins actives pour les champignons ectomycorhiziens (ECM). Les sols miniers actifs sont relativement riches en champignons mycorhiziens (Perrier *et al.*, 2006, Amir & Ducouso, 2010 ; Jourand *et al.*, 2010) ; tandis que les terrains miniers décapés, même anciens, ne comportent plus de spores MA ni de propagules ectomycorhiziennes et l'activité microbienne globale y est très réduite. L'abondance de spores viables donne une indication sur la

capacité d'un sol à produire des MA (potentiel mycorhizogène).

La grande majorité des espèces végétales de milieux ultramafiques forment des mycorhizes à arbuscules, mais le degré de mycorhization est variable selon les espèces, les sols et les conditions environnementales. Le genre *Glomus* est dominant parmi les champignons MA. Les souches fongiques à utiliser pour l'inoculation de plantes de maquis minier doivent être particulièrement adaptées et tolérantes au nickel, ce qui exclut des souches commerciales d'origine non minière qui ne pourront se maintenir dans ces sols (Amir *et al.*, 2008). Ces symbiotes interviennent de diverses façons dans le développement et l'adaptation des plantes (Amir & Ducouso, 2010) : ils récupèrent le phosphore, souvent peu disponible car lié aux particules argilo-humiques du sol, et le transfèrent vers les racines, ils interviennent également au niveau de l'assimilation des autres éléments minéraux (azote, potassium, calcium, oligo-éléments), ils peuvent en outre jouer un rôle dans la résistance au stress hydrique, dans la résistance des plantes aux pathogènes et enfin dans la tolérance aux métaux lourds (Amir & Lagrange, 2008).

Contrairement aux endomycorhizes, les plantes qui forment des ectomycorhizes sont taxonomiquement peu nombreuses ; environ 3% des taxa, en général des arbres. A la différence des champignons MA strictement symbiotiques et très peu spécifiques, la dépendance des champignons ectomycorhiziens vis-à-vis d'une plante hôte évolue de façon continue en fonction de la compatibilité génétique entre les partenaires, mais également en fonction de paramètres environnementaux et physiologiques ; cette association peut être réversible. Les ectomycorhizes fonctionnent de façon très similaire aux mycorhizes à arbuscule, avec en plus deux caractéristiques propres : le fonctionnement en peuplement et les successions, faisant qu'au cours de sa vie, un arbre aura des partenaires fongiques ectomycorhiziens différents.

Un autre type de symbiose d'une grande importance écologique, notamment dans les maquis miniers néo-calédoniens, est la symbiose fixatrice d'azote, qui associe des bactéries capables de réduire l'azote de l'air en azote assimilable par la plante. En Nouvelle-Calédonie, seule la famille des Casuarinaceae a été identifiée comme étant capable de former des symbioses fixatrices d'azote avec le genre d'actinobactérie *Frankia* (Jaffré *et al.*, 1994a), avec notamment les genres *Gymnostoma* et *Casuarina*. La fixation d'azote avec les *Rhizobium* concerne principalement les Fabaceae, et jouent un moindre rôle en raison de la faible fréquence relative des Fabaceae dans les maquis miniers ; il s'agit essentiellement des genres *Archidendropsis* et *Serianthes* (Amir & Ducouso, 2010).

Parmi les microorganismes non symbiotiques, les bactéries à effet promoteur de croissance ou PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), se situent dans le voisinage immédiat des racines et ont un impact important sur le fonctionnement biologique de la rhizosphère. Elles colonisent la surface des racines en utilisant les exsudats racinaires, et induisent en retour une stimulation de la croissance des plantes grâce à des mécanismes variés (libération des éléments essentiels, sécrétion d'hormone, fixation de l'azote atmosphérique, etc.)

La remise en fonction des activités microbiennes vers un écosystème équilibré peut être obtenue par la plantation d'espèces structurantes de maquis, inoculées avec des champignons mycorhiziens, ou par apport de topsoil naturellement riche en symbiotes (Amir & Ducouso, 2010). Il importe donc dans un premier temps, de connaître l'état du topsoil en termes de richesse en propagules MA viables, au cas où un apport exogène d'inoculum en conditions contrôlées se révèle nécessaire pour stimuler la mycorhization. L'analyse du potentiel

mycorhizogène revêt une importance particulière dans le cas de l'utilisation d'un topsoil stocké sur mine. En effet, des travaux ont montré que le stockage des topsoils avait un effet dépressif sur la survie de ces symbiotes (Jasper *et al.*, 1989a), effet d'autant plus important que le stockage est long. En Nouvelle-Calédonie, aucune étude n'a été réalisée dans ce sens (en dehors de celle en cours), pour déterminer à partir de quel temps de stockage, le topsoil perdait l'essentiel de son potentiel mycorhizogène. Une technique prometteuse nécessitant encore des mises au point (en cours), est l'enrobage de graines avec un inoculum mycorhizien (pur ou avec un mélange d'espèces), à utiliser dans le cas de l'ensemencement hydraulique (hydroseeding).

L'activité microbienne globale est directement corrélée à la fertilité du sol et est souvent utilisée comme indicateur de la réussite d'une action de restauration. Les *Rhizobium* et les *Frankia* sont généralement présents dans tous les sols (Amir & Ducouso, 2010). Il y a donc de fortes chances d'en trouver dans un topsoil non-stocké ou stocké sur une courte période. En revanche si le topsoil a été stocké longtemps, il faut alors intervenir activement pour restimuler l'activité microbienne, grâce notamment à des amendements organiques (compost végétal, réincorporation de végétaux grossièrement broyés).

Certaines bactéries des sols miniers peuvent cependant, de par leur activité avoir des effets nocifs et interviennent dans la libération de métaux qui peuvent se révéler toxiques (Amir & Pineau, 2003). On ne sait pas encore si le stockage du topsoil favorise la libération de certains métaux toxiques, notamment lorsqu'il est stocké dans des conditions de faible aération, propices à ce type de bactéries. Une telle étude (en cours) peut également apporter des indications sur les risques de transfert de métaux toxiques dans d'autres écosystèmes par les ruissellements.

4.3.3 L'utilisation du topsoil dans les opérations de revégétalisation

En Nouvelle-Calédonie, depuis quelques années, les différentes sociétés minières ont entrepris de réutiliser le topsoil à des fins de restauration écologique, selon des méthodes plus ou moins empiriques (Ruiz, 2006).

Jusque là, les opérations de revégétalisation étaient principalement réalisées par plantations et par ensemencements. Pour de meilleurs résultats, ces techniques doivent être couplées à la régénération naturelle à partir d'un topsoil de bonne qualité, contenant un nombre suffisant de semences d'espèces natives diverses, épandu selon des méthodes adéquates. Cette méthode peu coûteuse est de plus en plus pratiquée ces dernières années, et devrait être utilisée en premier recours autant que possible (L'Huillier *et al.*, 2010). Elle permet l'implantation d'espèces natives parfaitement adaptées, un enrichissement de la diversité spécifique et le développement de symbioses mycorhiziennes, mais elle doit généralement être complétée par la plantation, l'ensemencement ou les deux à la fois.

La société SIRAS Pacifique travaillant pour le compte de la SLN, a fait le point en 2004 sur les différents essais de revégétalisation utilisant le topsoil, réalisés sur mines. Dans les tout premiers essais, certaines parcelles ont servi pour tester les effets de l'apport de « terre végétale » sur l'implantation des végétaux. Pour les mines de Méa (commune de Kouaoua) par exemple ; que ce soit sur les pieds ou les banquettes de verse, ou sur des plate-formes, les dépôts de topsoil amorcent l'implantation spontanée de diverses espèces du maquis, à commencer par les Cypéracées avec la dominance de *Machaerina deplanchei* (anciennement *Baumea deplanchei*)

qui forment un paillage dense permettant l'émergence de jeunes plants d'espèces ligneuses. Ces végétaux proviennent d'une part de la germination des graines déjà présentes dans le topsoil ou issues de la végétation environnante, mais aussi de rejets de souches, racines ou bouturage à partir de végétaux arrachés lors du décapage (Siras Pacifique, 2004).

La régénération spontanée de la végétation sur les surfaces enrichies en topsoil est assez variable selon les sites observés, tant par le cortège floristique que par le mécanisme de régénération. La composition floristique va dépendre de la provenance du topsoil et de la végétation qui s'y était développée, mais aussi de l'environnement immédiat des zones où le topsoil est réutilisé (dissémination par le vent, l'eau, les animaux). D'où l'importance de conserver à proximité des surfaces exploitées, des îlots de végétation à la composition floristique aussi diversifiée que possible, pour leur rôle primordial dans les phénomènes de recolonisation en tant que réserves de graines (Siras Pacifique, 2004 ; L'Huillier *et al.*, 2010).

Sur la mine de Goro Nickel, une expérimentation de la technique du transfert direct de topsoil sur un talus de piste a donné des résultats assez encourageants, puisqu'après 3 ans, le taux de recouvrement par des espèces locales approchait les 50% (Ruiz, 2006).

Les essais réalisés par Mc Coy (2005) ont montré qu'un ensemencement manuel d'espèces endémiques donnait de meilleurs résultats sur topsoil que sur d'autres substrats.

Bien que présentant des résultats positifs, l'utilisation du topsoil en Nouvelle-Calédonie reste encore limitée, tout comme son impact sur la restauration des milieux miniers dégradés ; il apparaît donc nécessaire de mener d'autres travaux de recherches allant dans ce sens, en particulier l'évaluation de la banque de graines viables des topsoils et l'évaluation de l'impact du stockage sur ce potentiel (Ruiz, 2006).

Méthodes de maniement du topsoil :

Dans leur ouvrage récent sur l'environnement minier et sa restauration, L'Huillier *et al.* (2010) ont avancé quelques recommandations sur la gestion du topsoil :

- Le prélèvement du topsoil doit être relativement superficiel, les premiers cm étant les plus riches en graines, symbiotes et matière organique. Les outils utilisés localement sont en général peu adaptés pour des épaisseurs de l'ordre de 30cm, mais il faut autant que possible éviter de dépasser cette épaisseur, afin de limiter la dilution des graines et des microorganismes.
- La période idéale de prélèvement n'est pas encore bien connue. Mais il est déconseillé de prélever lors des mois les plus pluvieux, surtout si le topsoil est de texture fine, à cause des risques importants de compaction et de déstructuration du sol, qui auraient des conséquences néfastes sur la survie des symbiotes et de nombreuses graines.
- L'épandage doit être fait de préférence par transfert direct ou après un stockage sur une faible épaisseur (moins de 2 m) et n'excédant pas quelques semaines, un stockage plus long étant toujours néfaste d'un point de vue perte de qualité, mortalité des graines et des symbiotes (Pelletier & Esterle, 1995 ; Ruiz, 2006 ; L'Huillier, 2007 ; Lagrange, 2009 ;

L'Huillier *et al.*, 2010). Eventuellement, il est possible de le conserver sous forme étalée et le retourner de temps en temps afin d'éviter l'anaérobiose qui modifie la majorité des composantes vivantes du sol et induit la solubilisation des métaux (Amir *et al.*, 2003).

- La période d'épandage peut varier selon les objectifs et les caractéristiques du site. La période la plus favorable semble être entre décembre et janvier, juste avant la saison pluvieuse, pour initier rapidement la germination des graines non dormantes ou à faible dormance. En outre, les racines et les souches pourront rejeter, au lieu de se dessécher, dans le cas d'un épandage en saison sèche.
- Le topsoil doit être déposé sur un substrat meuble ou décompacté, comme la latérite rouge, pour faciliter l'enracinement et le développement des espèces. Les irrégularités en surface (petits sillons, blocs rocheux ou reste de bois, matière organique grossière) constituent des microsites abrités du vent et du soleil, et drainants, ce qui favorise le développement des graines et plants à proximité. Le topsoil peut être épandu sur des surfaces planes, comme sur des pentes légères à moyennes, avec une limite de 30° sur 10m de longueur.
- Les limites de son utilisation résident dans le manque fréquent de topsoil de qualité, dans la difficulté de sa manipulation pour qu'il conserve toutes ses qualités, et dans la durée nécessaire au développement des plantes.

D'autres expérimentations sont à réaliser pour optimiser la gestion du topsoil : traitement physique, conditions et durée maximale de stockage avant dégradation, périodes optimales de décapage et d'épandage, recherche d'indicateurs chimiques ou biologiques pour mesurer son évolution, etc...

Apport d'amendement :

Les caractéristiques physico-chimiques du substrat à revégétaliser sont souvent peu propices à un bon développement des végétaux. Il est donc important, au cours des 1^{er} stades de la revégétalisation, de corriger les carences en éléments nutritifs et le caractère peu structuré de ces substrats, afin d'accélérer l'installation des espèces plantées ou semencées et d'améliorer leur croissance et leur taux de recouvrement. Des améliorations peuvent être obtenues grâce à un apport en éléments nutritifs sous forme minérale et des amendements organiques ayant à la fois un rôle nutritif et un rôle important dans l'amélioration de la structure et l'aération du sol.

Le type et la quantité des fertilisants ajoutés doivent être appropriés aux déficiences. Ils devront contenir : azote, phosphore, potassium, plus si nécessaire des éléments secondaires en petite quantité (calcium, soufre), voire des oligoéléments (cuivre, zinc, molybdène et bore). En général un seul apport suffit, l'implantation de la végétation assure ensuite le recyclage d'une partie des éléments nutritifs. Un apport d'azote de potassium et de phosphore d'env. 100 kg/ha, plus d'autres éléments nutritifs en quantité plus faible, est un niveau moyen donnant de bons résultats, 500 kg/ha étant la limite à ne pas dépasser (Lagrange, 2009).

Le mieux est d'utiliser des engrais à libération lente pour éviter la lixiviation des

éléments solubles, ou des matières fertilisantes d'origine organique libérant de nombreux minéraux au cours de leur dégradation très progressive (comme les boues de station d'épuration qui contiennent environ 5% d'azote, 1% de phosphore et 0.5% de potassium, ou les composts).

Ces apports de matière organique renforcent le complexe argilo-humique, améliorant la structure du sol et retiennent les éléments échangeables comme le potassium, tout en libérant de l'azote, du phosphore et du calcium. Cependant, il importe de faire attention au fait que l'apport massif d'amendements organiques accroît le risque d'implantation d'espèces exotiques indésirables, à caractère parfois invasif, entravant la recolonisation des espèces locales et attirant les cerfs (L'Huillier *et al.*, 2010).

Un essai de plantations sur différents substrats (topsoil + boues de station d'épuration (STEP) / latérites + boues / topsoil seul) a été mis en place par l'IAC à Tontouta en 2006 et a montré pour la 1^{ère} fois la capacité d'un développement rapide d'espèces endémiques sur le topsoil ainsi amendé (L'Huillier *et al.*, 2010). Il a montré également que de nombreuses espèces indigènes apparaissent spontanément à partir du topsoil, dont la densité moyenne, après seulement deux ans de mise en place, se situe entre 1 et 3 plants/m² et la diversité atteint 43 espèces au total (Soucrant 2008, L'Huillier & Fogliani 2010).

Depuis 2008, des travaux ont été engagés à l'Université de la Nouvelle-Calédonie, en collaboration avec l'IAC, pour la restauration des sites miniers en utilisant des déchets organiques solides. Ces amendements organiques sous forme de boues de stations d'épuration ou de fientes de poules ont permis d'obtenir des résultats de croissance significatifs pour toutes les espèces végétales utilisées, quelque soit le site expérimental. Des travaux récents ont montré que les boues de station d'épuration ont au moins un effet équivalent aux fientes de poules sur la croissance végétale. D'autre part, dans une ancienne pinède (*Pinus caribaea*), les résultats ont permis d'établir des modèles allométriques de croissance et de biomasse qui seront utiles à la gestion forestière (Velayoudon *et al.*, 2010).

Il est également recommandé de privilégier l'implantation de plantes fixatrices d'azote, telles que *Gymnostoma* et *Serianthes*, qui favorisent la croissance des autres espèces non fixatrices d'azote (Amir & Ducouso, 2010).

5. Les indicateurs du succès de la réhabilitation écologique

Dans leur ouvrage, L'Huillier *et al.* (2010) ont émis des recommandations en matière de suivi, d'évaluation et d'indicateurs sur la gestion du topsoil, reprises en partie ici :

Comment déterminer le degré de succès d'une opération de revégétalisation ? Comment évaluer la dynamique progressive de l'écosystème ? Comment et quand effectuer ces mesures ? Ce sont des questions essentielles, encore peu abordées en Nouvelle-Calédonie. Les opérations de revégétalisation nécessitent cependant un suivi régulier afin de rendre compte de l'évolution des différents paramètres au cours du temps.

En s'inspirant de travaux antérieurs sur l'évaluation de l'état des écosystèmes, un certain

nombre d'indicateurs mesurables rendant compte de l'état de la structure et du fonctionnement d'un écosystème, ont été repris par Le Floch & Aronson (1995). Nous citerons ici les plus pertinents pour l'évaluation de travaux de revégétalisation des anciens sites miniers de Nouvelle-Calédonie :

- Suivre l'évolution de l'état de la structure de l'écosystème restauré par une mesure périodique des paramètres suivants : taux de mortalité des plants, de richesse floristique en espèces autochtones et endémiques, nombre de plants de la strate herbacée (ou recouvrement), recouvrement total de la végétation.
- Suivre l'évolution de l'état fonctionnel de l'écosystème restauré par une mesure périodique de quelques uns des paramètres suivants : capacité de reproduction des espèces (floraison, fructification), nombre de recrûs issus des espèces implantées, issus du potentiel séminal du topsoil épandu ou provenant de groupements végétaux voisins, productivité de la biomasse végétale, taux de matière organique du sol issu de la décomposition de la litière, capacité d'échange cationique, coefficient d'infiltration des pluies, diversité des animaux, l'importance relative de la mésofaune détritivore, infectivité potentielle par les rhizobiums, *Frankia* et mycorhizes, un suivi photographique.

6. Conclusion et perspectives

Cette synthèse bibliographique sur les topsoils et leur utilisation pour la restauration des terrains miniers montre qu'une évolution sensible s'est produite en Nouvelle-Calédonie depuis une dizaine d'années. Des acquis plus ou moins applicables en Nouvelle-Calédonie ont été assimilés par différents acteurs concernés par le sujet, mais des insuffisances importantes persistent. Il faut souligner en particulier les points suivants :

- 1- Le modèle australien proche peut et doit être source d'inspiration, notamment pour le sérieux des pratiques de restauration écologique, pour les principes généraux de cette restauration et pour les moyens et les méthodes générales mises en œuvres dans ce but. Mais ces pratiques ne peuvent pas être transposées telles quelles dans le détail, en raison de différences importantes au niveau des climats, de la végétation et de la nature des sols, les sols miniers de Nouvelle-Calédonie étant à la fois moins fertiles, plus minces et généralement plus difficile à travailler. Ainsi, la rigueur australienne, à la fois en termes de réglementation (obligation de restauration, avec des exigences bien précisées) et en termes d'organisation et de pratiques élaborées sur des bases scientifiques solides, et donc d'investissement dans la restauration écologique, est un modèle auquel il est essentiel de se référer pour faire évoluer les pratiques de restauration des sites miniers en Nouvelle-Calédonie.
- 2- Il ne faut pas perdre de vue que l'Australie et d'autres pays ont une longue avance dans la recherche appliquée dans ce domaine (recherches commencées il y a de nombreuses décennies, avec des moyens importants), alors que la Nouvelle-Calédonie n'a commencé à s'intéresser à ces aspects que depuis tout au plus une quinzaine d'années. Rien n'est gratuit et de nombreux travaux de recherche appliquée restent à faire, aussi bien dans le domaine de la connaissance des exigences des différentes espèces végétales utilisées et de

leurs semences, que des moyens d'optimiser l'utilisation des topsoils.

- 3- Bien que des recherches sur les effets du stockage du topsoil soient nécessaires, il est évident que la meilleure façon d'utiliser le topsoil reste de le transférer dès son décapage vers une zone à revégétaliser et de l'épandre directement, car tout indique que plus le topsoil est stocké, plus il perd ces potentialités biologiques (banque de graines, symbiotes, activités microbiennes). Cependant, les entreprises minières en Nouvelle-Calédonie ont actuellement un mode d'organisation qui ne leur permet pas de réutiliser facilement le topsoil dès son décapage. Il est toutefois nécessaire que ces entreprises se réorganisent en vue de gérer les terrains à décapage et ceux à restaurer, de façon à avoir constamment des zones peu éloignées où le topsoil peut être directement épandu pour la revégétalisation. Dans cette optique, la stratégie qui consiste à n'exploiter certains terrains que partiellement et à les garder non restaurés en vue de les ré-exploiter plusieurs années après, n'est pas adaptée et doit être abandonnée, pour aller vers des stratégies permettant une restauration écologique progressive et continue des sites dégradés, dès la fin de l'exploitation ; et cela d'autant plus que la réglementation deviendra certainement de plus en plus contraignante.
- 4- Une bonne gestion du topsoil ne règle cependant pas tous les problèmes ; semer ou planter un certain nombre d'espèces sur le topsoil est nécessaire. Dans ce sens, une des insuffisances les plus patentées en Nouvelle-Calédonie concerne la problématique posée par l'obtention, le stockage et l'utilisation des semences. En Australie, de grandes entreprises se sont spécialisées uniquement dans ce domaine. Il faut donc que soit encouragée la création d'entreprises de récolte, de stockage et de commercialisation des graines pour la revégétalisation. Un savoir faire complexe est nécessaire dans ce domaine (identification des bonnes espèces, connaissance de la phénologie des plantes, de la nature des graines et de leur dormance, des conditions de conservation, etc.), ce qui justifie une telle spécialisation.

Les diverses recherches en cours, dans le cadre de ce projet, mais aussi à d'autres niveaux, devraient permettre une meilleure maîtrise des pratiques de décapage, de traitement, de stockage, d'épandage et de fertilisation des topsoils.

Bibliographie

- Alcoa (2003a) Revegetation techniques. A guide for establishing native vegetation in Victoria. Greening Australia Victoria
- Alcoa (2003b) Restoring the botanical richness of the Jarrah forest after bauxite mining in South-Western Australia. Alcoa World Alumina Australia
- Amir H., Pineau R., Violette Z. (1997) Premiers résultats sur les endomycorhizes des plantes de maquis miniers. Actes de la 2^{ème} Conférence Internationale sur l'écologie des milieux serpentiniques. Nouméa, 31 Juillet-5 Août 1995. Ed. ORSTOM, Nouméa.
- Amir H. et Pineau R. (2003) Ecologie microbienne des sols métallifères : la boîte grise. Préservation et restauration écologique en environnement tropical minier, 15-20 Juillet 2003, Nouméa, Nouvelle-Calédonie
- Amir H., Barre N., Boulegue J., Colin F., Dreyfus B., Marini J.F., Mennesson T., Pelletier B., Quantin C., Pineau R. et Tassin J. (2003) Préservation et restauration écologique en milieu tropical minier. Résumé des travaux du colloque et recommandations. Colloque international, Nouméa 2003
- Amir H., Perrier N., Rigault F. and Jaffré T. (2007) Relationships between Ni-hyperaccumulation and mycorrhizal status of different endemic plant species from New Caledonian ultramafic soils. *Plant and Soil*. 293, 23-35
- Amir H., Jasper D. and Abbott L. (2008) Tolerance and induction of tolerance to Ni of arbuscular mycorrhizal fungi from New Caledonian ultramafic soils. *Mycorrhiza*. 19, 1-6
- Amir H. and Lagrange A. (2008) Arbuscular mycorrhizal fungi from New Caledonian ultramafic soil improve the tolerance to nickel of endemic plant species. Sixth International Conference of Serpentine Ecology, 16-23 juin, Bar Harbor, USA.
- Amir H. et Ducouso M. (2010) Les bactéries et les champignons du sol sur roches ultramafiques. In: L'Huillier L., Jaffré T. et Wulff A. Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration. pp 129-145. Éditions IAC, Nouméa, Nouvelle-Calédonie
- Bakker J., Poschlod P., Strykstra R., Bekker R. and Thompson K. (1995) Seed banks and seed dispersal : important topics in restoration ecology. *Acta Bot. Neerl.* 45, 461-490
- Baskin J. and Baskin C. (1983) Role of temperature in regulating timing of germination in soil seed reserves of *Lamium purpureum* L. *Weed Research*, Vol. 24, 341-349
- Baskin C., Baskin J. and Spooner D. (1989) Role of temperature, light and date: seeds were exhumed from soil on germination of four wetlands perennials. *Aquatic Botany*. 35, 387-394
- Baskin C., Baskin J., and Chester E. (1993) Seed germination ecophysiology of four summer annual mudflat species of Cyperaceae. *Aquatic Botany*. 45, 41-52
- Baskin C., Baskin J., and Chester E. (1995) Role of temperature in the germination ecology of the summer annual *Bidens polylepsis* Blake (Asteraceae). *Bulletin of the Torrey Botanic Club*. 122, 275-281

- Bellairs S. and Bell D. (1993) Seed stores for restoration of species-rich shrubland vegetation following mining in Western Australia. *Restoration Ecology* Vol. 1 No. 4, 231-240
- Courtney R.. and Timpson J. (2004) Nutrients status of vegetation grown in alkaline bauxite processing residue amended with gypsum and thermally dried sewage sludge – A two year field study. *Plant and Soil*. 266, 187-194
- Food and Agriculture Organization (FAO) (1998) Topsoil characterization for sustainable land management. (Land and Water Development Division, Soil Resources, Management and Conservation Service: Rome) Source: www.fao.org/AG/aGL/agll/wrb/topsoil.stm
- Fogliani B., Bouraïma-Madjèbi S., Medevielle V. and Pineau R. (2004) Methods to promote germination of two Cunoniaceae species, *Cunonia macrophylla* and *Geissois pruinosa* from New Caledonia. *Seed Sci. Tech.* 32, 703-715
- Gould A. and Hendrix J. (1997) Relationship of mycorrhizal activity to time following reclamation of surface mine land in western Kentucky. II. Mycorrhizal fungal communities. *Can. J. Bot.* 76, 204-212
- Goxe J. (2010) Comparaison de topsoils provenant de différentes formations de maquis pour la restauration écologique des sites miniers de Nouvelle-Calédonie. Mémoire de stage de M2. Institut Agronomique néo-calédonien
- Grant C., Bell D., Koch J., and Loneragan W. (1996) Implications of seedling emergence to site restoration following bauxite mining in Western Australia. *Restoration Ecology*, Vol. 4, No. 2, 146-154
- Grant C. and Koch J. (2007) Decommissioning Western Australia's first bauxite mine: co-evolving vegetation restoration techniques and targets. *Ecological management & restoration* Vol. 8 No. 2 and Prozac
- Hargis N. and Redente E. (1984) Soil handling for surface mine reclamation. *Journal of Soil and Water Conservation*. 39, 300-305
- Herrera A., Héry M., Stach J., Jaffré T., Normand P. and Navarro E. (2007) Species richness and phylogenetic diversity comparisons of soil microbial communities affected by nickel-mining and revegetation efforts in New Caledonia. *European Journal of Soil Biology*. 43, 130-139
- Héry M., Phillippot L., Mériaux E., Poly F., Le Roux X. and Navarro E. (2005) Nickel mine spoils revegetation attempts: effect of pioneer plants on two functional bacterial communities involved in the N-cycle. *Environmental Microbiology* 7(4), 486-498
- Holmes P. (2001) Shrubland restoration following woody alien invasion and mining: effects of topsoil depth, seed source, and fertilizer addition. *Restoration Ecology* Vol. 9 No. 1, 71-84.
- ICMM (International Council on Mining and Metals) (2006) Good Practice Guidance for Mining and Biodiversity
- ICMM (International Council on Mining and Metals) (2008) Planning for Integrated Mine Closure: Toolkit

Jaffré T., (1980) Etude écologique du peuplement végétal des sols dérivés de roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. Thèse doctorat, Université de Paris-Sud (XI), ORSTOM, Paris.

Jaffré T. et Pelletier B. (1992) Plantes de Nouvelle-Calédonie permettant de revégétaliser des sites miniers. S.L.N., Nouméa. 114p

Jaffré T., Gauthier D., Rigault F., McCoy S. (1994a) Les Casuarinaceae endémiques, caractéristiques écologiques et nutritionnelles. Bois et forêts des Tropiques. 242, 31-41

Jaffré T., Rigault F., Sarrailh J-M. (1994b) La végétalisation des anciens sites miniers. Bois et forêts des Tropiques. 242, 45-55.

Jasper D., Abbott L., Robson A. (1989a) Soil disturbance reduces the infectivity of external hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. New Phytol. 112, 93-99

Jasper D., Abbott L., Robson A. (1989b) The loss of VA mycorrhizal infectivity during bauxite mining may limit the growth of *Acacia pulchella* R. Br. Austr. J. Bot, 37, 33-42

Jourand P., Ducouso M., Loulergue C., Hannibal L., Santoni S., Prin Y. and Lebrun M. (2010) Ultramafic soils from New Caledonia structure *Pisolithus albus* in ecotype. FEMS Microbiology Ecology, 1-12

Koch J., Ward S., Grant C., and Ainsworth G. (1996) Effects of bauxite mines restoration operations on topsoil seed reserves in the Jarrah forest of Western Australia. Restoration ecology Vol. 4, No. 4, 368-376

Koch J. (2007a) Alcoa's mining and restoration process in south Western Australia. Restoration Ecology Vol. 15, No. 4 (Supplement), 11-16

Koch J. (2007b) Restoring a Jarrah Forest understorey vegetation after bauxite mining in Western Australia. Restoration Ecology Vol. 15, No. 4 (Supplement), 26-39

Koch J. And Hobbs J. (2007) Synthesis : Is Alcoa successfully restoring a Jarrah Forest ecosystem after bauxite mining in Western Australia ? Restoration Ecology Vol. 15, No. 4 (Supplement), 137-144

Lagrange A. (2009) Etudes écologiques et microbiologiques des espèces du genre *Costularia* (Cyperacea), pionnières des sols ultramafiques en Nouvelle-Calédonie : perspectives d'application à la restauration écologique. Thèse doctorat, Université de la Nouvelle-Calédonie, Nouméa.

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, D Merritt, S Clarke, L Commander and K Dixon. Pp 51. Kings Park and Botanic Garden, Perth, Australia

L'Huillier L. And Fogliani B. (2010) Using seeds on mining sites in New Caledonia : from revegetation to restoration. (Oral) Workshop Seed Ecology 2010, Noumea, New Caledonia. 12-15

- L'Huillier L., Wulff A., Gâteblé G., Fogliani B., Zongo C. et Jaffré T. (2010) La restauration des sites miniers. In : L'Huillier L., Jaffré T. et Wulff A. Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration. pp 147-230. Éditions IAC, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.
- 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., Ainsley P., Bellairs S., Coates D., Bell L.) 21-23 June 2004. Brisbane, Queensland. Pp. 267-274 (Australian Centre for Minerals Extension and Research : Brisbane)
- McCoy S. (2007) Plan de réutilisation de la terre végétale dans l'emprise du projet Goro Nickel. Projet Goro Nickel : Demande d'autorisation d'exploiter des installations classées, Annexe III-C-5-3
- Morat P., Jaffré T. et Veillon J.M., (1986) Affinités floristiques et considérations sur l'origine des maquis miniers de la Nouvelle-Calédonie. Paris, série 9, Section B, *Adansonia*, (2), 133-182.
- Norman M., Koch J., Grant C., Morald T. And Ward S. (2006) Vegetation succession after bauxite mining in Western Australia. *Restoration Ecology* Vol. 14, No. 2, 278-288
- Parotta J. And Knowles O. (1999) Restoration of tropical moist forests on bauxite-mined lands in the Brazilian Amazon. *Restoration Ecology* Vol. 7, No. 2, 103-116
- Pelletier B. And 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
- Perrier N., Amir H. And Colin F. (2006) – Occurrence of mycorrhizal symbioses in the metal rich ultramafic soils of the Koniambo Massif, New Caledonia. *Mycorrhiza*. 16, 449-458
- Read T., Bellairs S., Mulligan D. And Lamb D. (1999) Smoke and heat effects on soil seed bank germination for the re-establishment of a native forest community in New South Wales. *Austral Ecology*. 25, 48-57
- Roche S., Koch J. And Dixon K. (1997) Smoke enhanced seed germination for mine rehabilitation in the southwest of Western Australia. *Restoration Ecology* Vol. 5 No. 3, 191-203
- Rokich D., Dixon K., Sivasithamparam K. And Meney K. (2000) Topsoil handling and storage effects on woodland restoration in Western Australia. *Restoration ecology* Vol. 8 No. 2, 196-208
- Rokich D., Dixon K., Sivasithamparam K. And Meney K. (2002) Smoke, mulch, and seed broadcasting effects on woodland restoration in Western Australia. *Restoration Ecology* Vol. 10 No. 2, 185-194
- Ruiz O. (2006) Etude de topsoils des terrains miniers en Nouvelle-Calédonie. Premiers résultats sur leur potentiel germinatif. Rapport de stage M2. Université de Montpellier, Institut Agronomique Néo-Calédonien
- Sarrailh J.M (2002) La revégétalisation des exploitations minières : l'exemple de la Nouvelle-Calédonie. *Bois et Forêts des Tropiques*. 272, 22-31
- Siras Pacifique (2004) Etude pour une utilisation raisonnée du topsoil sur les mines de Nouvelle-Calédonie. Rapport interne

Smith M., Loneregan W., Grant C. And Koch J. (2000) Effect of fire on the topsoil seed banks of rehabilitated bauxite mine sites in the Jarrah Forest of Western Australia. Ecological management and restoration Vol. 1, No. 1, 50-60

Soucrant O. 2008. Intérêt du Topsoil en restauration des sites miniers dégradés en Nouvelle-Calédonie. Résultats sur l'essai de la Tontouta. Rapport de stage IAC, 1^{ère} année Deust
Revégétalisation et Gestion de l'Environnement Minier, Université de Nouvelle-Calédonie, décembre 2008, 55 p.

Tacey W. (1979) Landscaping and Revegetation Practices used in Rehabilitation after Bauxite Mining in Western Australia. Reclamation Review. 2, 123-132

Tacey W. And Glossop B. (1980) Assessment of Topsoil Handling Techniques for Rehabilitation of Sites Mined for Bauxite within the jarrah Forest of Western Australia. Journal of Applied Ecology. 17, 195-201

Velayoudon P., Pagand P., L'Huillier L., Waneissi E., Chantre P. And Guiresse M. (2010) Biosolids application for revegetalization of an abandoned nickel mine from New Caledonia. IWA World Congres, Montréal, Canada, 19-24 septembre.

Ward S., Koch J. And Ainsworth G. (1996) The effect of timing of rehabilitation procedures on the establishment of a jarrah forest after bauxite mining. Restoration Ecology. 4, 19-24

Ward S., Koch J. And Grant C. (1997) Ecological aspects of soil seed-banks in relation to bauxite mining. I. Unmined jarrah forest. Australian Journal of Ecology 22, 169-176

Wong J. And Ho G. (1991) Effects of gypsum and sewage sludge amendement on physical properties of fine bauxite refining residue. Sol Science. 152, issue 5

Zier N., Schiene R., Koch H. And Fischer K. (1999) Agricultural reclamation of disturbed soils in a lignite mining area using municipal and coal wastes: the humus situation at the beginning of reclamation. Plant and Soil. 213, 241-250

Zongo C., Fogliani B., McGill C., Saintpierre-Bonaccio D. And Bouraïma-Madjèbi S. (2008) Morphological adaptations and chemical composition of seeds of New Caledonian native plants used for mining revegetation. 9th ISSS Conference on Seed Biology, Olsztyn, Poland, 6-11 juillet

Zongo C. (2010) Données biologiques et physiologiques sur les semences de quelques espèces de milieux ultramafiques néo-calédoniens. Thèse doctorat, Université de la Nouvelle-Calédonie., Nouméa.

Sources internet :

- www.alcoa.com
- http://www.austlii.edu.au/au/legis/sa/consol_reg/mawir1998396/index.html

CNRT "Nickel et son environnement"

Tome Nickel et Environnement

