



**HAL**  
open science

## **Guide sur l'utilisation des topsoils en restauration écologique des terrains miniers**

Laurent Bordez, Bruno Fogliani, Laurent L'Huillier, Hamid Amir

### ► **To cite this version:**

Laurent Bordez, Bruno Fogliani, Laurent L'Huillier, Hamid Amir. Guide sur l'utilisation des topsoils en restauration écologique des terrains miniers. CNRT Nickel et son environnement. , 91 p., 2018, Programmes Ecomine biotop et Recosynth. [Tome Nickel et Environnement], <10.34928/ny41-c429>. <hal-03411145>

**HAL Id: hal-03411145**

**<https://hal.science/hal-03411145v1>**


Submitted on 2 Nov 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 CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License



# GUIDE

SUR L'UTILISATION  
DES TOPSOILS  
EN RESTAURATION  
ÉCOLOGIQUE  
DES TERRAINS MINIERES





## AUTEURS

Dr Laurent BORDEZ (1)

Dr Bruno FOGLIANI (1)

Dr Laurent L'HUILLIER (1)

Prof. Hamid AMIR (2)

## RELECTURE/EXPERTISE SCIENTIFIQUE

Dr France BAILLY (3)

Prof. Guillaume ECHEVARRIA (4)

Dr Philippe JOURAND (5)

Dr Marc DUCOUSSO (6)

## CONCEPTION DE LA MAQUETTE

Laurence BARILLER (3)

(1) Institut Agronomique néo-Calédonien (IAC), BP 73, 98890 Païta,  
Nouvelle-Calédonie

(2) Université de la Nouvelle-Calédonie (UNC), ISEA, BP R4, 98800 Nouméa,  
Nouvelle-Calédonie

(3) CNRT « Nickel et son environnement », BP 18235 98857 Nouméa,  
Nouvelle-Calédonie

(4) Laboratoire Sols et Environnement UMR 1120 Université de Lorraine /  
INRA Groupement d'intérêt scientifique pour les friches industrielles (GISFI),  
ENSAIA, BP 20163, 54505 Vandoeuvre-les-Nancy Cedex, FRANCE

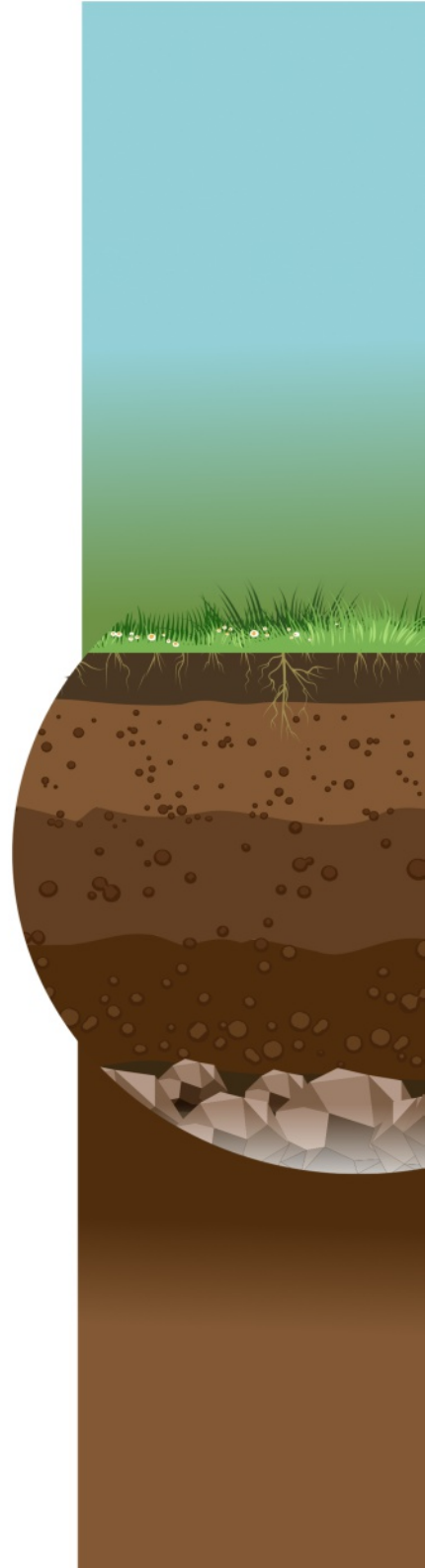
(5) IRD, LSTM UMR040, CIRAD, Campus International de Baillarguet, TA-  
A82 / J, 34398 Montpellier cedex 05, FRANCE

(6) CIRAD, UMR082 LSTM (CIRAD - INRA - IRD - SupAgro Montpellier -  
UM2), F-34398 Cedex 5, Montpellier, FRANCE



# GUIDE

SUR L'UTILISATION  
DES TOPSOILS  
EN RESTAURATION  
ÉCOLOGIQUE DES  
TERRAINS MINIERS







# SOMMAIRE

<b>PREFACE</b> .....	<b>9</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>10</b>
<b>1. ETAT DE L'ART DES CONNAISSANCE</b> .....	<b>13</b>
<b>LE TOPSOIL : UNE COMPOSANTE ESSENTIELLE DU FONCTIONNEMENT DES ÉCOSYSTÈMES MINIER</b> .....	<b>15</b>
Qu'est-ce que le topsoil ? .....	15
Un carrefour multifonctionnel essentiel de l'écosystème .....	16
Le sol : Un patrimoine naturel à préserver .....	18
<b>LE TOPSOIL : UN ATOUT POUR RÉUSSIR LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DES TERRAINS MINIERES DEGRADÉS</b> .....	<b>21</b>
Conditions des terrains miniers dégradées et problématiques de restauration écologique .....	21
Le topsoil, ses avantages pour la restauration écologique .....	24
Le topsoil : un moyen de restauration efficace et peu couteux .....	33
<b>2. ASPECTS PRATIQUES DE LA GESTION DU TOPSOIL</b> .....	<b>37</b>
<b>RECONNAISSANCE, DÉFRICHEMENT, ET RECUPERATION DU TOPSOIL ET DES LATÉRITES</b> .....	<b>39</b>
Première étape : la reconnaissance de la zone à décaper .....	39
Seconde étape : le défrichage et la récupération du topsoil.....	53
<b>LE STOCKAGE DU TOPSOIL</b> .....	<b>63</b>
Effet du stockage sur le potentiel de restauration des topsoils .....	65
Règles à suivre pour limiter les effets négatifs du stockage .....	69
<b>L'ÉPANDAGE DU TOPSOIL</b> .....	<b>72</b>
Identifier et préparer la zone à restaurer .....	72
Epanchage de topsoil .....	73
<b>3. LES TECHNIQUES COMPLÉMENTAIRES DE RESTAURATION</b> .....	<b>82</b>
<b>4. LA TRAÇABILITÉ ET RETOURS D'EXPERIENCE</b> .....	<b>88</b>
<b>5. L'ESSENTIEL A RETENIR</b> .....	<b>91</b>



1/12/20

1/12/20

1/12/20

## PREFACE

**L**e Guide sur l'utilisation des topsoils en restauration écologique des terrains miniers de Nouvelle-Calédonie a été produit dans le cadre du programme «ECOMINE BIOTOP»<sup>1</sup> financé par le CNRT «Nickel et son environnement» (2010-2014).

Ce programme de recherche pluridisciplinaire a permis des avancées importantes, non seulement en termes de connaissances, mais aussi en termes d'applications concrètes en vue d'une restauration écologique des milieux ultramafiques dégradés.

Ce guide à visée pédagogique complète le rapport scientifique du premier programme de l'axe 'Nickel et environnement' qui soit dédié à la restauration des sites miniers.

Il s'inscrit également dans la continuité de l'ouvrage majeur «Mine et environnement en Nouvelle-Calédonie»<sup>2</sup> produit en 2010.

Rédigé à l'usage des opérateurs miniers et des professionnels de la restauration, ce guide fournit au lecteur les informations les plus à jour pour optimiser l'utilisation de la ressource en topsoils des sites miniers en Nouvelle-Calédonie.

<sup>1</sup> Amir H, et coll. (2015) - *Caractérisation et fonctionnement du système sol/plante/microorganismes dans les maquis miniers. Perspectives d'application à la restauration écologique. Rapport final. Projet ECOMINE BIOTOP – CNRT «Nickel et son environnement», 315 p.*

<sup>2</sup> L'Huillier L., T. Jaffré T., A. Wulff A. (2010) - *Mine et environnement en Nouvelle-Calédonie : Les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration. Editions IAC, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 412 p.*


## INTRODUCTION

**A** l'échelle mondiale, le topsoil est utilisé dans les travaux de restauration des terrains dégradés depuis près de 60 ans.

Au fil des années, l'utilisation du topsoil s'est imposée comme une technique efficace, au regard des contraintes économiques liées aux coûts des travaux de restauration, mais aussi des enjeux patrimoniaux de préservation de la biodiversité.

En Nouvelle-Calédonie, l'utilisation du topsoil dans les travaux de restauration a débuté dans les années 1990. Entre 1980 et 2000, après quelques essais avec des espèces végétales compétitives et à croissance relativement rapide, mais peu adaptées aux substrats ultramafiques, les efforts scientifiques ont porté principalement sur la sélection et l'utilisation d'espèces natives pionnières. C'est à partir de 2003, que l'intérêt s'est porté sur le substrat et sa microflore, notamment à l'issue du colloque international «Préservation et restauration écologique en milieu tropical minier» (Nouméa). Bien que l'utilisation systématique du topsoil soit préconisée, les résultats et les connaissances relatives à son utilisation dans les travaux de restauration en Nouvelle-Calédonie sont encore fragmentaires.

Scientifiques et compagnies minières se sont alors associés pour mutualiser les moyens et organiser des recherches afin de trouver des solutions locales optimisant son utilisation en Nouvelle-Calédonie. Cette volonté affichée s'est concrétisée par plusieurs projets de recherche centrés sur la compréhension du fonctionnement des topsoils et leur gestion lors de l'exploitation minière.



Les orientations communes de ces études ont notamment porté sur la caractérisation et le fonctionnement du système sol/plante/microorganismes à l'intérieur des trois principales étapes de l'utilisation des topsoils :

- Le défrichement (ou la récupération) du topsoil
- Le régalage (ou l'épandage) du topsoil
- L'éventuel stockage du topsoil (déconseillé)

Ce livret technique, rédigé à destination des équipes travaillant à la restauration des sites, propose une synthèse des connaissances acquises ces 15 dernières années sur les topsoils des terrains miniers de Nouvelle-Calédonie et intègre également les retours d'expériences de mise en œuvre sur le terrain par les opérateurs miniers eux-mêmes depuis une trentaine d'années.

L'ambition de cet ouvrage est de guider les opérateurs dans la planification et la réalisation des travaux. L'objectif est d'intégrer de manière efficace l'utilisation du topsoil dans les programmes de restauration et de rationaliser les moyens à mettre en œuvre pour réduire les coûts, tout en augmentant le succès des opérations menées.

Quelques éléments financiers sont proposés afin d'illustrer l'intérêt économique de son utilisation à l'échelle du projet minier.

Ce livret est basé sur les connaissances actuelles. Il propose un cadre d'intervention général qui doit être adapté à chaque situation sur le terrain.





**1**

**ETAT DE L'ART  
DES  
CONNAISSANCES**







## LE TOPSOIL, UNE COMPOSANTE ESSENTIELLE du fonctionnement des écosystèmes miniers

### QU'EST-CE QUE LE TOPSOIL ?

**T**opsoil est un terme anglo-saxon signifiant littéralement «sol de surface». Il définit la partie sommitale du profil, qui peut également être défini comme «l'horizon fertile» car il contient l'essentiel de la matière organique du profil, ainsi que les microorganismes, en particulier symbiotiques, et la faune du sol.

Il est recouvert par la litière et la majorité des graines tombées au sol s'y concentrent dans les tous premiers centimètres. Sa structure est riche en agrégats et son organisation est sous la dépendance essentielle de l'activité biologique.

En Nouvelle-Calédonie, les topsoils peuvent être, selon les situations, situés au niveau des horizons de cuirasse ou de grenaille ou inclure une partie des latérites rouges des substrats ultramafiques.

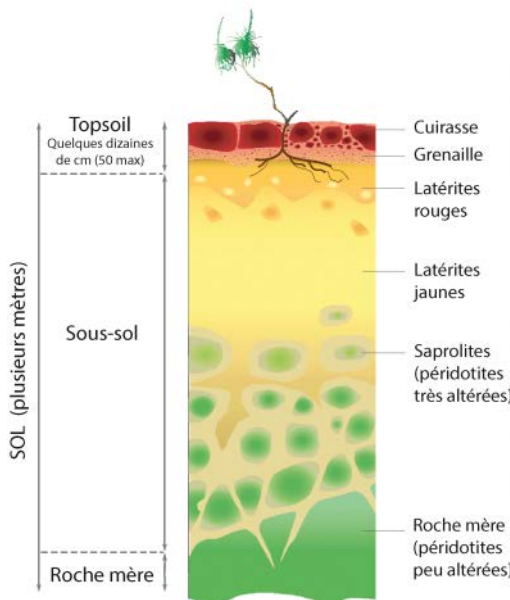


Figure 1 :  
Profil pédologique  
général d'un sol  
ultramafique et  
localisation du  
topsoil (©iac)

## UN CARREFOUR MULTIFONCTIONNEL ESSENTIEL DES ÉCOSYSTÈMES

Qu'il soit d'ici ou d'ailleurs, le sol, situé à l'interface entre les principaux compartiments de l'environnement (l'hydrosphère, la lithosphère, l'atmosphère et la biosphère) est une composante essentielle des écosystèmes.

Support physique, habitat des organismes, réservoir de nutriments issus du recyclage par la végétation, régulateur des matières en circulation, c'est dans le sol, et plus particulièrement dans sa partie sommitale, que s'exercent les activités biologiques.

L'apport et l'utilisation énergétique y sont maximales et permettent la synthèse de biomolécules, la croissance des organismes, le fonctionnement des chaînes et des réseaux trophiques et de leurs multiples compartiments. La litière s'y transforme (humus et ions nutritifs), la faune et la microflore du sol y sont les plus actives (dont un rôle majeur est celui de la décomposition de la litière et la libération d'éléments minéraux absorbables par les végétaux), et généralement les racines des plantes s'y développent préférentiellement. La partie sommitale du sol, le topsoil, est le compartiment physiquement le plus structuré, chimiquement le plus fertile et biologiquement le plus actif.

Les sols jouent ainsi un rôle majeur dans la préservation de la qualité des autres composantes de l'environnement. Ils influencent directement la qualité de l'air en tant que puits et sources de carbone et lieux de nitrification/dénitrification, ils influencent le devenir des substances polluantes et donc la santé humaine par leur impact direct sur le transfert d'éléments (dont les polluants) dans la chaîne alimentaire (eaux superficielles et souterraines, production végétale agricole et sylvicole, etc.). Enfin, le topsoil fait partie intégrante du développement des civilisations en tant que support de l'activité humaine (habitat, production végétale, et support des infrastructures urbaines et industrielles, ...).



*Figure 2 : Illustration de la richesse physico-chimique et biologique d'un topsoil (©iac)*



Présente en grand nombre, la biomasse de la flore microbienne d'un sol dépasse souvent l'imagination. La biomasse bactérienne peut ainsi atteindre les 1 500 kg à l'hectare (avec près de 10 milliards de bactéries par gramme de sol sec), tandis que la biomasse de champignons peut atteindre 3 500 kg à l'hectare. Un mètre carré de topsoil pouvant contenir jusqu'à 10 000 km de réseau mycélien...

## LE SOL : UN PATRIMOINE NATUREL À PRÉSERVER

**L**es sols, et plus encore leurs horizons supérieurs fertiles (topsoils), sont des milieux fragiles. Ils se forment à partir de substrats de diverses origines (roches, limons et sables d'origine éolienne, alluvions de rivière), soumis à des processus influencés à la fois par le climat, le relief, les organismes vivants et, aujourd'hui, par l'activité humaine (cf.figure 3).

Leur formation est un phénomène continu mais lent, qui peut prendre plusieurs milliers à plusieurs millions d'années pour les sols les plus développés, en fonction notamment de la nature de la roche mère, du climat (la formation d'un sol est plus longue en conditions sèches et plus rapide en conditions chaudes et humides), de la végétation, de la topographie.

Les sols sont donc peu renouvelables à l'échelle humaine et doivent à ce titre être considérés comme une ressource limitée qu'il convient de préserver.





## La formation des sols est un processus lent, qui peut prendre des centaines à des milliers d'années en conditions tropicales

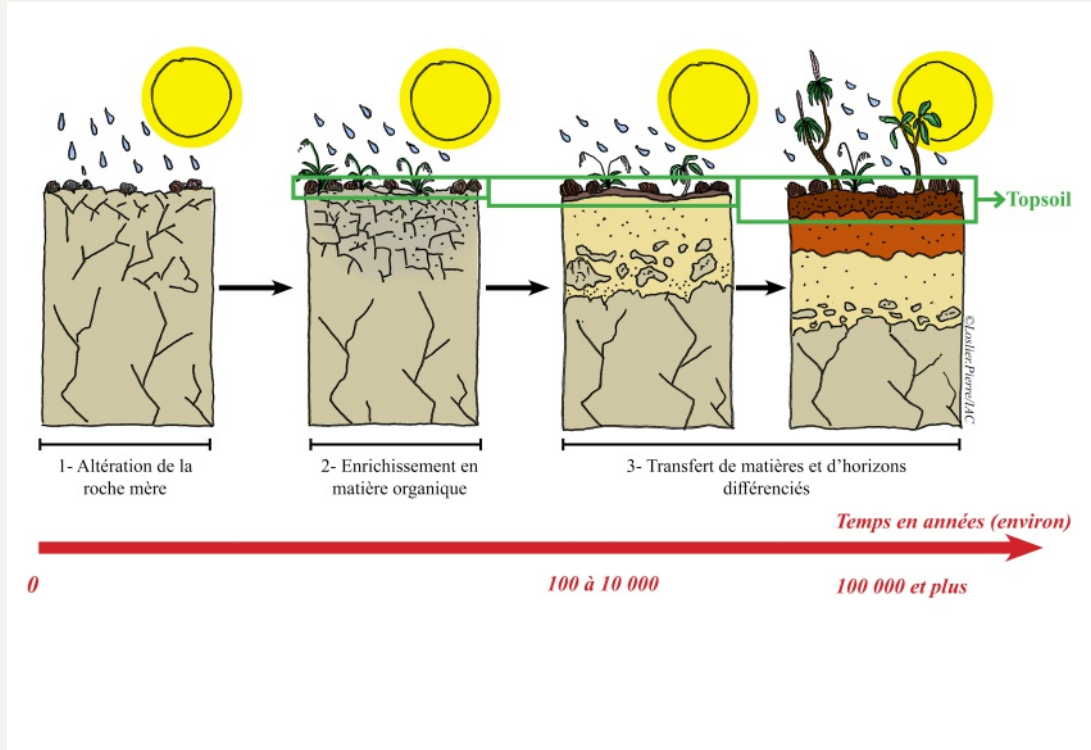


Figure 3 : Principe schématique de la formation d'un sol et d'un topsoil, de la roche mère brute à un système équilibré (Illustration Pierre Loslier, adaptée de Soltner<sup>3</sup>, 2005).

<sup>3</sup> A Soltner D. (2005) Les bases de la production végétale. Tome I : Le sol. Coll. Sciences et Techniques agricoles, Ste-Gemmes-sur-Loire, France.

(1) Dans un premier temps, sous l'action de l'eau, des variations de température et du vent, le matériau parental se fractionne de façon mécanique. Cette **désagrégation physique** conduit à la formation d'éléments de plus en plus petits qui s'altèrent plus ou moins en fonction des conditions climatiques. Puis les minéraux initiaux se transforment par différentes réactions chimiques (faisant intervenir l'eau, la présence d'oxygène, de dioxyde de carbone) en composés solubles (sels...) et en minéraux secondaires (argiles et oxydes de fer, ...). Contrairement au processus de désagrégation, **l'altération** modifie la composition minéralogique du matériau parental. Désagrégation et altération produisent un matériel (mélange de constituants de tailles et de qualités minéralogiques variées) apte à intégrer dans une deuxième phase, les êtres vivants et les matières organiques formant alors une nouvelle entité, **le sol**.

(2) Dans la deuxième phase de l'évolution des sols, la matière organique est transformée puis intégrée au sol par les organismes du sol. La matière organique subit trois types de **transformations** :

- Une minéralisation, processus physique, chimique et surtout biologique de transformation des constituants organiques en constituant minéraux ;
- Une humification, processus biochimique de synthèse de nouvelles substances organiques par augmentation de la taille de certaines molécules ;
- Une assimilation par les microorganismes, à la fois consommateurs ultimes à l'extrémité des chaînes de détritus et producteurs secondaires au départ d'une chaîne alimentaire.

Ces transformations se poursuivent durant toute l'évolution des sols, tant que de nouveaux apports existent, contribuant largement aux phénomènes de formations et de structuration des sols.

(3) Au cours d'une troisième étape, dite de **transfert** de matières, la circulation de l'eau à travers le sol entraîne des éléments solubles (sels, calcium...) et des particules (argiles, matières organiques...) plus ou moins profondément, ce qui conduit à une organisation du sol en couches distinctes possédant des caractéristiques de couleurs et de structures homogènes appelés horizons pédologiques. A mesure que le sol se développe, différents horizons s'individualisent. En surface, les horizons organiques (O, H) puis les horizons organo-minéraux (A), et enfin les horizons minéraux sous jacents, jusqu'à la roche mère.



## LE TOPSOIL, Un atout pour réussir la Restauration Écologique des terrains miniers dégradés

### CONDITIONS DES TERRAINS MINIERES DÉGRADÉS ET PROBLÉMATIQUES DE RESTAURATION ÉCOLOGIQUE

**A**ujourd'hui, toutes les mines de nickel en Nouvelle-Calédonie sont exploitées à ciel ouvert. Ce type d'exploitation nécessite la destruction complète du couvert végétal et l'enlèvement des horizons superficiels (appelés « stériles miniers») pour accéder aux couches sous-jacentes plus riches en minerai exploitable et ce parfois jusqu'à la roche-mère.

Ainsi, après exploitation, la plupart des sites miniers à restaurer présente une rupture des fonctions écologiques, à travers le franchissement de seuils (i) physiques, (ii) chimiques et (iii) biologiques...



Figure 4 : Exploitation minière à ciel ouvert : exemple en Nouvelle-calédonie (@SLN.nc).

Il en résulte pour ces terrains dégradés, une incapacité à soutenir l'installation et le développement d'un couvert végétal, une modification profonde qualitative et quantitative du réseau hydrographique superficiel et de ce fait un affaiblissement, voire une disparition des capacités de résilience<sup>4</sup> des écosystèmes.

<sup>4</sup> La résilience écologique est la capacité d'un écosystème, d'un habitat, d'une population ou d'une espèce à subir une perturbation puis à conserver ou retrouver les caractéristiques initiales de structure et de fonctions.

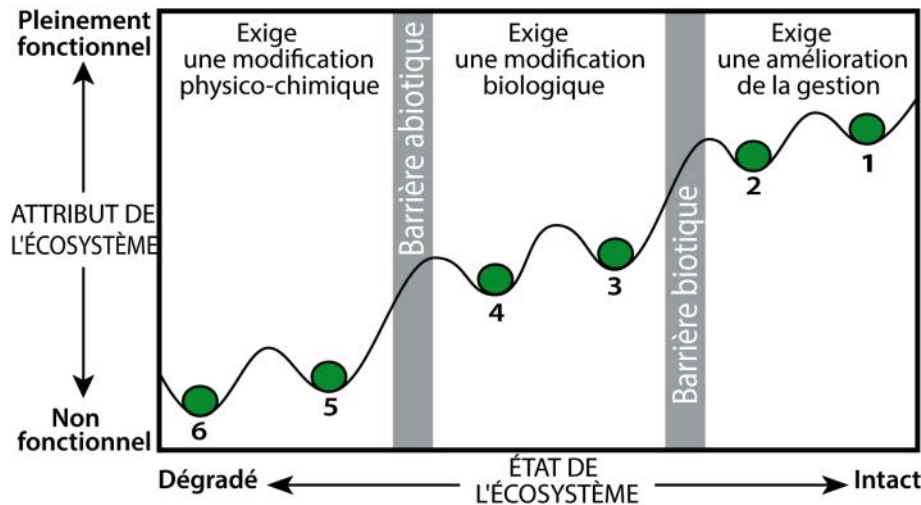


Figure 5 : Modèle conceptuel de la dégradation et de la restauration d'un écosystème (d'après L'huillier et al., 2010)

### Franchissement de seuils physiques :

De nombreux substrats mis à nus par l'exploitation minière présentent une texture grossière (constitués majoritairement d'éléments supérieurs à 5 cm), peu favorables à la pénétration racinaire, avec une faible réserve utile en eau pour les plantes. C'est notamment le cas des anciennes carrières d'exploitation. D'autres substrats ont une texture fine (constitués d'éléments inférieurs à 2 mm) et sont facilement compactés, réduisant la capacité d'infiltration des eaux, la croissance racinaire et créant des conditions d'anoxie défavorables à la microflore. C'est le cas des décharges de stériles, d'anciennes pistes ou plateformes.

### Franchissement de seuils chimiques :

Par rapport aux horizons supérieurs des sols, et aux topsoils en particulier, les substrats décapés ont en commun de faibles teneurs en macronutriments, azote (N), phosphore (P) et potassium (K). En revanche, la biodisponibilité de certains éléments peut être excessive, comme celle du magnésium, du nickel, du cobalt, du chrome, pouvant alors perturber la croissance des végétaux. Par rapport aux sols initiaux, les substrats décapés présentent généralement des pH défavorables aux végétaux.

### Franchissement de seuils biologiques :

Contrairement aux sols de surface, les substrats à restaurer sont appauvris ou dépourvus de micro-organismes. Pourtant, les populations microbiennes jouent un rôle essentiel dans le maintien des conditions de fertilité des sols. Leur absence peut compromettre la croissance des plantes, leur régénération, et, plus tard, la résilience du couvert végétal. Enfin, la majorité des substrats décapés est dépourvue de matériel végétal (banque de graines, rejets, boutures...) capable d'initier la reconquête végétale et la régénération naturelle des milieux dégradés.

Ainsi, quel que soit le niveau de dégradation de la zone à restaurer, le défi auquel doivent faire face les acteurs de la restauration consiste à recréer des conditions favorables à la reconquête végétale en améliorant d'abord les conditions abiotiques (physiques et chimiques) puis les conditions biotiques. Pour y parvenir, l'apport de topsoil sur une surface dégradée constitue la méthode la plus adaptée, la plus simple et la moins coûteuse.



## LE TOPSOIL, SES AVANTAGES POUR LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE

**L'**utilisation du topsoil pour la restauration écologique présente l'avantage d'éliminer (ou de fortement diminuer) les contraintes physico-chimiques et de réduire significativement le coût de préparation des terrains dégradés rendus stériles par l'activité minière, pour les rendre propices au développement de la végétation (amendement, fertilisation). La méthode consiste à récupérer la fraction superficielle des sols, la plus fertile, lors d'une opération qui précède l'excavation des stériles miniers, puis à l'épandre sur les sites dégradés à restaurer.



Par une même opération, l'épandage de topsoil répond à la majorité des contraintes de restauration liées aux conditions des terrains dégradés. De par sa nature, il apporte l'essentiel des éléments nécessaires pour reconstituer un sol et permettre le retour de la végétation et de la faune naturelle nécessaire à la restauration des écosystèmes. Le topsoil présente généralement une granulométrie relativement fine et une meilleure capacité de rétention en eau, favorable au développement racinaire. Une fois régalé sur les zones à restaurer, les potentialités biologiques des topsoils favorisent la régénération spontanée des milieux : la matière organique (MO), la banque de graines et les propagules, ainsi que la faune et la microflore du sol, notamment les microorganismes symbiotiques, bactéries et champignons.

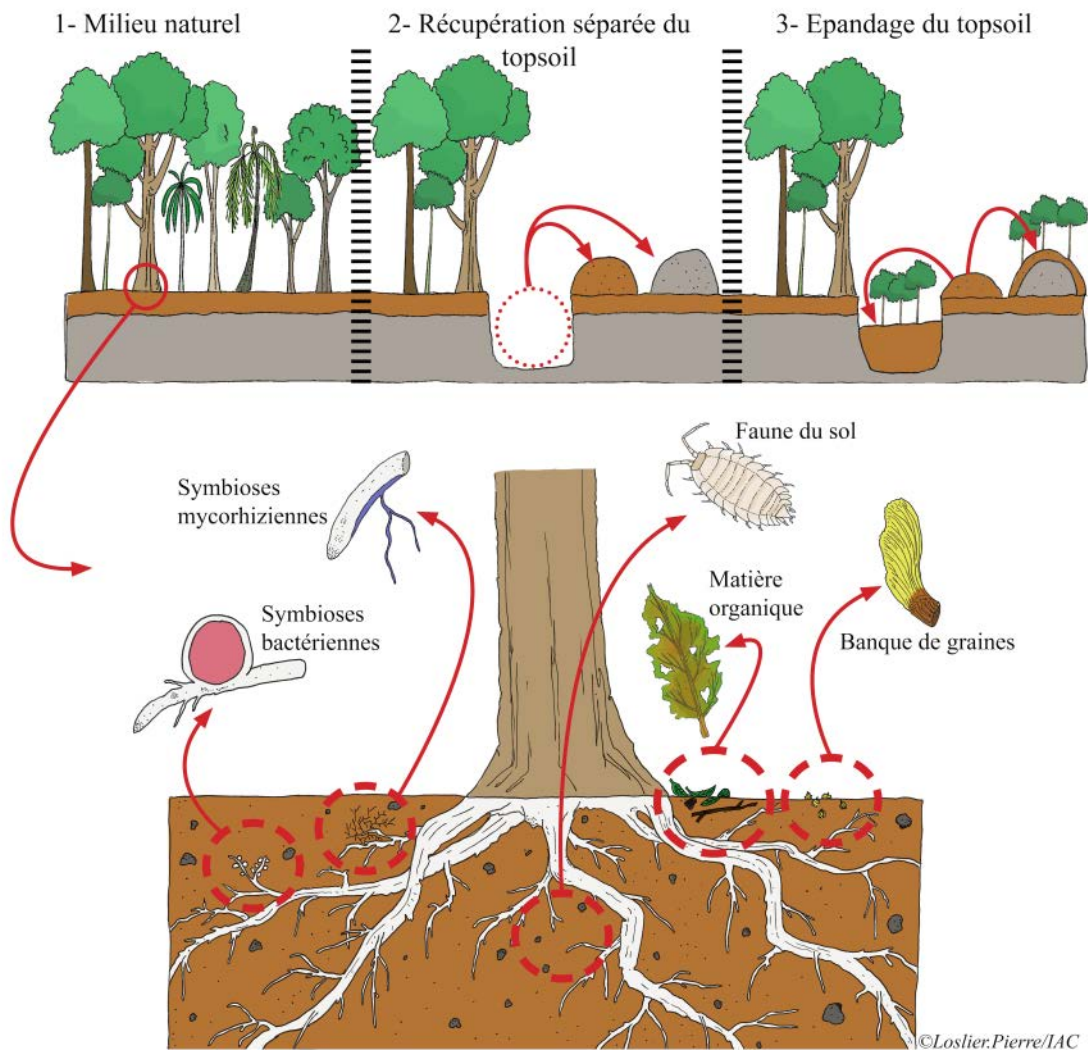


Figure 6 : Principe d'utilisation du topsoil en restauration écologique :  
 (1) Ecosystème non perturbé ;  
 (2) Décapage, récupération du topsoil (stockage si nécessaire) ;  
 (3) Epandage sur terrains dégradés à restaurer.  
 Et présentation de son potentiel biologique de restauration.



### **La matière organique**

Le topsoil contient naturellement de la matière organique et des nutriments. Il constitue le seul horizon réservoir de nutriments minéraux du profil latéritique.

Liée à la matière minérale au sein des complexes argilo-humiques, la matière organique joue le rôle de réservoir énergétique essentiel aux processus biologiques du sol. Elle apporte des éléments nutritifs permettant ainsi de réduire les besoins en fertilisation. Elle fournit un substrat à la faune et la microflore du sol, qui, par les réseaux trophiques, sont indispensables à la durabilité des écosystèmes.

On obtient de meilleurs taux de survie et de croissance des végétaux sur topsoil que sur d'autres substrats, tels que des stériles miniers fertilisés et/ou amendés.

### **La banque de graines**

La banque de graines joue un rôle majeur dans la régénération du couvert végétal.

En effet, support de la végétation, les topsoils en place recueillent naturellement les semences qui tombent au sol, constituant ainsi une «banque de graines». Ce terme fait référence aux graines reposant en surface, contenues dans la litière ou enterrées dans les premiers centimètres.

Les entrées de semences dans la banque de graines sont en majeure partie déterminées par le couvert végétal présent à proximité. La banque de graines d'un topsoil reflète donc la diversité des espèces végétales qu'il supporte.

L'épandage du topsoil avec sa banque de graines favorise l'implantation d'espèces natives diversifiées, parfaitement adaptées aux substrats et aux conditions locales. Il constitue parfois le seul moyen de réintroduire certaines espèces difficiles à reproduire du fait d'un manque de graines collectées, de difficultés de germination, d'échec à la plantation ou au semis.



Le cortège floristique de la banque de graine comporte des **espèces pionnières** en mesure de constituer rapidement un premier couvert et initier ainsi le processus naturel de succession végétale.

Les zones végétalisées à partir de topsoils pourront constituer des zones source de diversité végétale pour les zones alentours à restaurer. Elles seront elles-mêmes enrichies au cours du temps par colonisation spontanée à partir des secteurs préservés encore présents à proximité.

Les retours d'expérience montrent que l'utilisation du topsoil et de sa banque de graines réduit le risque de développement d'espèces invasives.

Enfin, et alors que la demande en semences augmente avec l'augmentation des surfaces affectées par l'activité minière, la banque de graines des topsoils constitue pour les acteurs de la restauration une source d'approvisionnement en graines, maximisant la diversité spécifique des zones à restaurer et à moindre coût.

Ainsi, la seule présence de la banque de graines des topsoils suffit à justifier l'intérêt de leur récupération et de leur application pour la restauration des terrains miniers dégradés.



Sur le territoire, l'utilisation des topsoils et de leur banque de graines a permis, dans les meilleurs cas, le rétablissement de près de **50 %** (environ 40 espèces) de la diversité floristique initiale (avec des densités de germination potentiellement supérieures à 20 plants par mètre carré), et en moyenne entre 10 et 30 % (environ 8 à 25 espèces avec une densité de 2 à 6 plants par mètre carré) lors d'utilisation non optimum du topsoil.

## La faune et la microflore

La faune et la microflore participent activement à l'écologie du sol. Ils interviennent dans sa fertilité à travers la stabilisation des agrégats et des micro-agrégats, essentiels au maintien des conditions structurales et de porosité appropriés à la croissance des végétaux, participent aux cycles des éléments nutritifs par la dégradation de la matière organique et la libération consécutive d'éléments nutritifs disponibles pour les plantes.

La faune et la microflore du sol assurent des fonctions essentielles à la durabilité des écosystèmes. De nombreuses études soulignent l'importance de leur rôle dans la réussite des opérations de restauration des écosystèmes terrestres.

En particulier le rôle des micro-organismes symbiotiques, bactéries et champignons est maintenant établi, y compris sous climat tropical.



Il est par exemple bien documenté que les associations symbiotiques (bactériennes et fongiques) sont essentielles pour la survie et la croissance de la plupart des plantes sur les terrains dégradés dont la fertilité est très faible (cf. encadré).

Enfin, et c'est essentiel pour les sols miniers, les travaux scientifiques des deux dernières décennies montrent le rôle de la microflore dans la tolérance des plantes aux métaux, en diminuant la disponibilité de ces éléments et leur absorption par les racines, réduisant les problèmes de phyto-toxicité des terrains à restaurer.

**Aussi, la récupération du topsoil et son épandage rapide sur les sites à restaurer présentent l'avantage de la préservation et la conservation d'une grande partie de sa faune, de sa microflore et de leurs fonctions.**

## BACTERIES ET CHAMPIGNONS EN MILIEUX ULTRAMAFIQUES

Le déficit en phosphore et azote disponibles pour les végétaux dans les sols dégradés par l'activité minière et dans les matériaux terreux déplacés lors de l'exploitation du minerai de nickel constitue un facteur limitant majeur pour l'installation d'une couverture végétale (azote et phosphore étant des composants essentiels des acides aminés, des acides nucléiques, de la chlorophylle, des coenzymes...).

Dans ces conditions les apports d'engrais chimiques sont coûteux et doivent être renouvelés car l'azote assimilable, apporté le plus souvent sous forme de nitrate, est lessivé ou dénitrifié et le phosphore, très fortement retenu par les oxydes de fer et de chrome, devient indisponible pour les plantes. Ainsi, bien que l'azote constitue près de 80% de l'air, les sols en sont fréquemment carencés et doivent être constamment réapprovisionnés en cet élément.

Le réapprovisionnement en azote est en grande partie réalisé naturellement par des bactéries capables de réduire l'azote de l'air ( $N_2$ ) en azote ammoniacal ( $NH_3$ ) grâce à une réaction enzymatique réalisée par la nitrogénase ; l'ammonium est alors intégré sous forme d'acides aminés primaires dans le métabolisme de la plante. Ce processus est appelé fixation biologique de l'azote et peut être réalisé soit par des bactéries libres du sol, soit par des bactéries en symbiose avec certains groupes de plantes au sein d'un organe spécialisé, le nodule fixateur d'azote. Ce processus peut induire une véritable augmentation de la teneur en azote d'un sol tout comme la photosynthèse enrichit celui-ci en matière organique.

En Nouvelle-Calédonie les symbioses fixatrices d'azote associant des bactéries et les racines de plantes concernent un nombre limité de taxa : c'est le cas de la symbiose fixatrice d'azote à *Frankia* qui concerne les genres *Casuarina* et *Gymnostoma* et, dans une moindre mesure, de la symbiose fixatrice d'azote à *Rhizobium* avec les genres tels que *Serianthes* et *Archidendropsis*.

Pour ce qui concerne le phosphore, les quantités totales de cet élément dans un sol sont rarement limitantes ; c'est sa disponibilité pour la plante qui est le principal facteur limitant. Un des rôles les mieux documentés des champignons mycorhiziens (résultat d'une association symbiotique d'une plante avec certains champignons) est de rendre une partie du phosphore du sol disponible pour la plante. Dans ce processus, il s'agit uniquement d'un changement de forme ionique du phosphore et en aucun cas d'une augmentation de la quantité totale de phosphore dans le sol.

Outre le rôle que jouent les mycorhizes vis-à-vis de la disponibilité du phosphore dans les sols, elles jouent également un rôle essentiel dans le fonctionnement et la structuration des communautés végétales en permettant leur complexification sur des substrats peu fertiles. Elles jouent aussi un rôle dans la gestion de l'eau par la plante, et dans la résistance au stress hydrique en fournissant de l'eau lorsqu'elle se raréfie pour les végétaux.

D'autres travaux ont rapporté un rôle de résistance aux pathogènes. Enfin, différents travaux ont également démontré leur intervention dans la tolérance de leur hôte aux métaux lourds parce qu'ils peuvent fixer ces éléments dans leur mycélium empêchant la transplantation des éléments toxiques vers les racines.

Les travaux à l'échelle mondiale rapportent que près de 80% des familles de plantes seraient concernées par des associations mycorhiziennes à arbuscules appartenant aux glomérromycètes, et près de 3% par des associations ectomycorhiziennes. Dans ce dernier cas, cette relative rareté traduit mal l'importance écologique de cette symbiose puisque ce type de mycorhizes concernent généralement des arbres grégaires dominant la canopée, abondants en Nouvelle-Calédonie. A ce jour, les travaux menés localement ont permis de mettre en évidence des associations mycorhiziennes à arbuscules sur une soixantaine d'espèces végétales appartenant aux familles des Cunionacées, Myrtacées, Euphorbiacées (familles importantes en Nouvelle-Calédonie), mais aussi au genre *Costularia* chez les Cyperaceae (espèces pionnières). Et des associations ectomycorhiziennes ont été identifiées chez les Fabacées, Myrtacées, et Nothofagacées.



### **UN POINT SUR L'INOCULATION BACTÉRIENNE ET MYCORHIZIENNE**

Si à ce jour des essais d'inoculations contrôlées de bactéries ou de champignons en pépinière ont pu révéler des avantages pour la croissance des hôtes ou leur tolérance aux métaux, il n'y a pas encore de techniques « d'inoculation » avec des souches sélectionnées adaptées au milieu ultramafique.

Néanmoins, il est tout à fait possible de procéder à une inoculation des plants lors de l'élevage en pépinière en mélangeant au substrat de culture un peu de topsoil, riche en racines fines, prélevé sous un individu d'une espèce végétale réputée pour être symbiotique, mycorhizienne ou bactérienne. Toutefois, pour assurer les résultats il peut être utile de contrôler le succès des inoculations avant utilisation des plants dans les travaux de restauration.

Certains champignons mycorhiziens sont inféodés à une espèce végétale particulière, tandis que d'autres présentent une variété d'hôtes.

De même, certaines plantes peuvent être spécifiques d'un champignon, ou bien présenter tout un cortège de symbiotes, ou encore présenter un cortège mycorhizien variant selon le stade de développement de la plante et les conditions environnementales.

Les souches indigènes de champignons et bactéries ont développé des mécanismes d'adaptation aux teneurs en métaux des substrats ultramafiques.

La composition physico-chimique originale des terrains «miniers» est donc une contrainte forte à l'utilisation de souches commerciales inadaptées.

L'inoculation des plantules, avec des souches microbiennes sélectionnées, pourra se révéler à terme plus favorable que l'inoculation non sélective. Mais cette méthode n'est pas encore opérationnelle et doit être développée à l'échelle locale. Des études sont en cours afin d'optimiser cette méthode en tenant compte du fait que les souches indigènes ont développé des adaptations spécifiques aux teneurs en métaux des substrats ultramafiques du territoire.

De même, le développement de techniques d'enrobage de semences avec des inoculas avant semis hydraulique dans le contexte des substrats «miniers» est en cours.

D'une manière générale, les terrains miniers décapés, mêmes anciens, ne comportent pas ou quasiment pas d'organismes bactériens ou fongiques. Ainsi, l'apport de topsoil constitue actuellement le moyen le plus efficace pour initier un fonctionnement biologique du substrat, pour tendre, à terme, vers un écosystème équilibré ayant des fonctions, notamment, de cohésion du sol, se rapprochant de la situation d'origine.

## LE TOPSOIL, UN MOYEN DE RESTAURATION EFFICACE ET PEU COÛTEUX

**A** Ce jour, l'utilisation du topsoil comme point de départ des travaux de restauration écologique des terrains miniers dégradés est considérée comme la technique la plus efficace, répondant en une application à la majorité des contraintes des terrains miniers à restaurer.

Il présente l'avantage d'apporter un substrat et des éléments nutritifs favorables à la croissance végétale, de favoriser l'implantation naturelle d'espèces natives parfaitement adaptées au site, notamment pour des espèces difficiles à planter par d'autres méthodes, d'accroître la diversité spécifique et de permettre le développement de symbioses indigènes.

Par ailleurs, lorsque l'épandage de topsoil est complété par des plantations ou des semis, cela permet d'obtenir en quelques années la reconstitution d'un couvert végétal sur une zone dénudée.

Le topsoil apparaît ainsi comme le deuxième matériau le plus précieux à gérer sur mine après le minerai.

La mise en œuvre de cette méthode est relativement peu coûteuse (cf. encadré aspect financier), le topsoil étant nécessairement déplacé pour atteindre les couches de minerai exploitable. Le topsoil constitue un outil de restauration écologique directement disponible sur mine, pouvant être manipulé par les engins miniers.

Sa valorisation dans les opérations de végétalisation entraîne la réduction des volumes de stériles.



**Utilisation du topsoil**

Le coût d'utilisation du topsoil varie selon les distances de roulage, dépendantes de la distance entre le point de récupération et le point d'utilisation du topsoil, mais également selon les conditions d'épandage (surface plane, pente...).

Le coût varie de 1 à 8 millions de francs CFP par hectare (informations collectées auprès de plusieurs sociétés minières), avec un coût moyen voisin de 3,5 millions de francs CFP par hectare (29 350 €/ha) pour une distance moyenne de 5km entre le point de récupération et d'utilisation du topsoil et épandage sur pente.

**Plantations**

Le coût de plantation varie notamment en fonction des distances entre la pépinière et le lieu de plantation, mais aussi en fonction du nombre de plants nécessaires, donc des surfaces traitées.

Le prix unitaire du plant forestier fourni et planté varie de 600 à 800 francs CFP (5 à 7 €/U) avec une moyenne voisine de 725 francs CFP par plant (soit 7,250 millions de francs CFP – 60 000 € - par hectare pour une plantation de 10 000 plants, selon une densité de 1 plant par mètre carré comme imposé par la réglementation).

Actuellement, pour être conforme à la réglementation, les surfaces à revégétaliser doivent garantir une densité de 1 plant par mètre carré avec une diversité spécifique d'au moins 20 espèces.

**Semis hydraulique (ou « hydroseeding »)**

Le prix moyen d'une opération de semis hydraulique est voisin de 9 millions de francs CFP par hectare (75 400 €/ha).

### En conclusion

Le coût d'utilisation du topsoil est inférieur dans la plupart des cas à celui d'une plantation ou d'un semis hydraulique. Manipulé dans les règles de l'art, le topsoil donne des résultats potentiellement très satisfaisants en terme de densité de germination et de diversité spécifique avec moins de mortalités et de meilleurs taux de croissance.

Il permettra également de diminuer les coûts de plantation ou de semis (en diminuant la densité et en se concentrant uniquement sur les espèces qui n'émergent pas du topsoil), cette diminution des coûts est estimée de 30% à 80% dans les meilleures situations...

Les économies ainsi réalisées pourraient être utilisées pour développer la maîtrise de nouvelles espèces et ainsi augmenter la diversité spécifique.

Enfin, l'utilisation du topsoil dans de bonnes conditions permet de répondre aux obligations réglementaires dans le cadre du Code Minier.

L'intérêt est donc énorme !





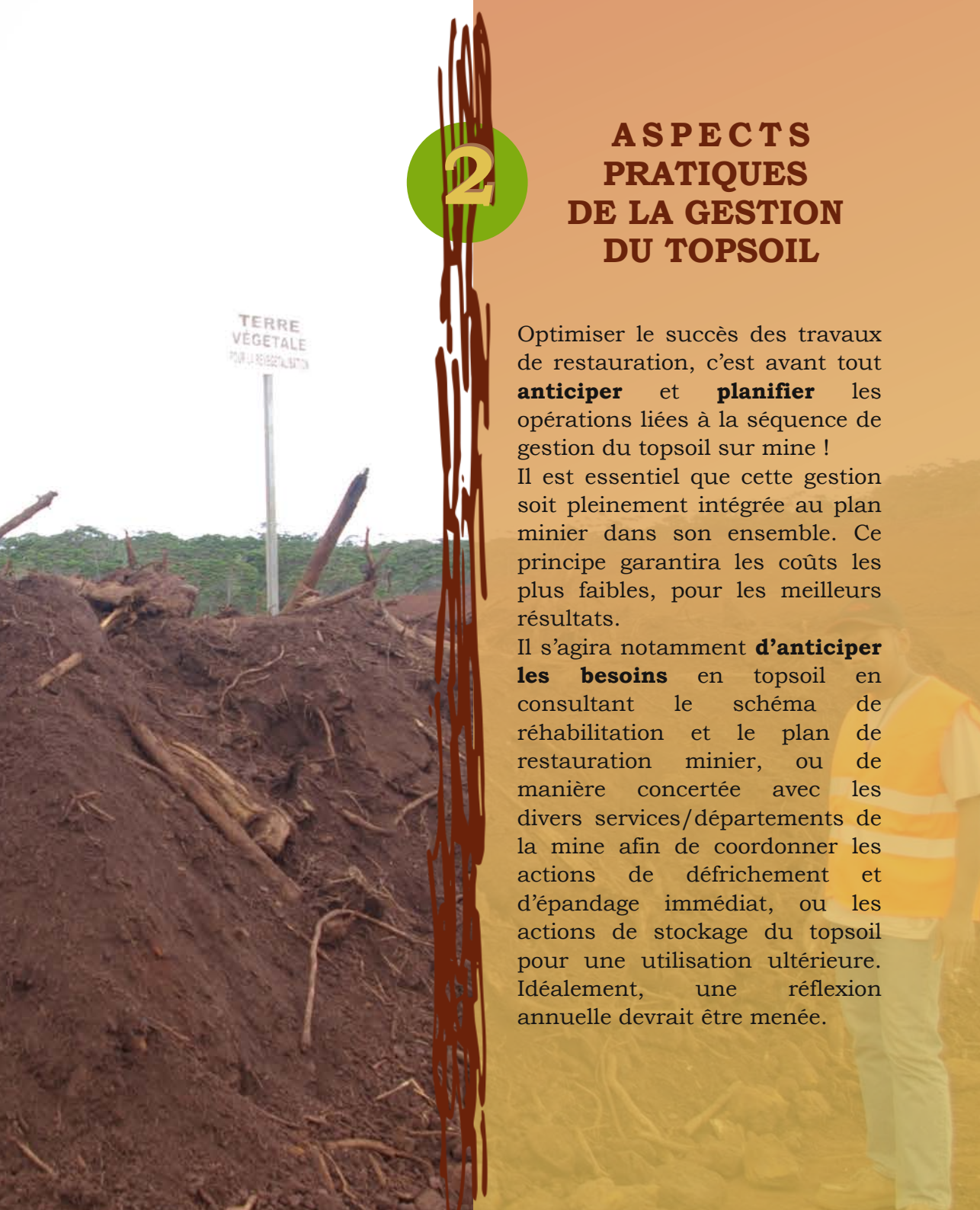
# 2

## ASPECTS PRATIQUES DE LA GESTION DU TOPSOIL

Optimiser le succès des travaux de restauration, c'est avant tout **anticiper** et **planifier** les opérations liées à la séquence de gestion du topsoil sur mine !

Il est essentiel que cette gestion soit pleinement intégrée au plan minier dans son ensemble. Ce principe garantira les coûts les plus faibles, pour les meilleurs résultats.

Il s'agira notamment **d'anticiper les besoins** en topsoil en consultant le schéma de réhabilitation et le plan de restauration minier, ou de manière concertée avec les divers services/départements de la mine afin de coordonner les actions de défrichage et d'épandage immédiat, ou les actions de stockage du topsoil pour une utilisation ultérieure. Idéalement, une réflexion annuelle devrait être menée.





## Séquence de gestion du topsoil sur mine (détaillée ci-après)

<b>- Reconnaissance, défrichage, et récupération du topsoil et des latérites</b> .....	<b>39</b>
<b>Première étape : la reconnaissance de la zone à décaper</b> .....	<b>39</b>
1. Balisage de la zone .....	41
2. Inventaire floristique, identification des espèces protégées, récoltes .....	42
(ou collecte ?), et multiplication ou transplantation	
3. Caractérisation du topsoil selon son potentiel de restauration .....	43
4. Estimation des volumes de topsoils et de latérites rouges .....	48
5. Vérification de l'absence d'espèces envahissantes (fourmis...) .....	50
6. Planification de l'utilisation ultérieure du topsoil et des latérites rouges .....	53
<b>Seconde étape : le défrichage et la récupération du topsoil et des latérites rouges</b> .....	<b>53</b>
1. Coupe et évacuation des gros sujets végétaux .....	53
2. Récupération du topsoil (en 3 étapes ou en 2 étapes).....	55
3. Récupération des latérites rouges .....	62
<b>- Le stockage (option à éviter autant que possible)</b> .....	<b>63</b>
1. Effet du stockage sur le potentiel de restauration des topsoils .....	65
2. Règles à suivre en cas de stockage .....	69
<b>- L'épandage du topsoil</b> .....	<b>72</b>
<b>Identifier et préparer de la zone à restaurer</b> .....	<b>72</b>
1. Identification de la zone d'épandage et prise en compte de l'origine du topsoil	72
2. Préparation de la zone à restaurer .....	73
<b>Epandage du topsoil</b> .....	<b>78</b>
<b>- Les techniques complémentaires de restauration</b> .....	<b>82</b>
<b>- La traçabilité et retours d'expérience</b> .....	<b>88</b>
<b>- L'essentiel à retenir</b> .....	<b>91</b>

## RECONNAISSANCE, DEFRICHEMENT & RÉCUPÉRATION DU TOPSOIL ET DES LATÉRITES

**P**our la récupération du topsoil en milieu naturel, le défrichage correspond à la première opération de gestion du topsoil sur site. Le défrichage est défini par le Code de l'environnement de la Province Sud comme « toute opération qui a pour effet de supprimer la végétation d'un sol et d'en rendre impossible la régénération naturelle, notamment par l'enlèvement des couches organiques superficielles des sols » (article 431-1 Code de l'environnement de la Province Sud).

### PREMIÈRE ÉTAPE : LA RECONNAISSANCE DE LA ZONE À DÉCAPER



Avant toute opération de défrichage le coordinateur procédera à une reconnaissance de la zone à décaper, éventuellement accompagné par les conducteurs d'engins chargés de l'exécution des opérations.

#### **Cette étape doit permettre :**

1. Le balisage de la zone
2. Un inventaire floristique, l'identification des espèces protégées et la mise en place de mesures de transplantation ou de multiplication (collecte de graines voire de boutures)
3. L'identification du type de topsoil et de son potentiel de restauration
4. L'évaluation des volumes de topsoils et de latérites rouges pouvant être récupérés
5. La vérification de l'absence d'espèces envahissantes (fourmis, ...)
6. La planification de l'utilisation ultérieure du topsoil et des latérites rouges.



Figure 7 : Balisage de zone, repérage d'espèce, collecte de graines (©IAC) et transplantation de *Kentiopsis pyli-formis* classée EN par IUICN en forêt Nord. (©Vale-NC)



**1. Le balisage de la zone à défricher de façon à éviter l'atteinte à la végétation des zones alentours.**

**2. La réglementation** (code minier et codes de l'environnement) exige de caractériser l'état initial du milieu naturel pour les études d'impacts, et de réaliser un **inventaire floristique** pour les demandes de défrichement. Il convient donc de répertorier les espèces présentes y compris les espèces rares ou menacées, d'organiser la collecte de graines ou de plantules et la transplantation d'individus en ciblant prioritairement les espèces dont la multiplication n'est pas maîtrisée.

**3. L'identification du type de topsoil et de son potentiel de restauration.**

En effet, les travaux scientifiques de ces dernières années ont montré qu'il existait une **structuration spatiale et saisonnière** du potentiel biologique de restauration du topsoil principalement conditionnée par le couvert végétal (cf. encadré « Pas un mais des topsoils ! »).

Tenir compte du potentiel de restauration du topsoil lors de sa récupération et de son affectation ultérieure permet une utilisation raisonnée des volumes disponibles et l'optimisation des moyens complémentaires à mettre en œuvre pour la reconstitution de la mosaïque végétale et son intégration à l'échelle du paysage minier.



Bien que des dérogations puissent être accordées dans certains cas, le défrichement de zone de forêt dense humide doit être évité, s'agissant des formations végétales les plus complexes et les plus diversifiées sur substrats ultramafiques, pour les espèces végétales comme pour la faune.



## PAS UN MAIS DES TOPSOILS

**L**es études menées ces dernières années ont cherché à établir des relations entre le potentiel de restauration des topsoils, le type de couvert végétal (espèces et communautés végétales), les caractéristiques du milieu (climat, type de substrat) et l'ensemble des organismes vivants qu'ils hébergent.

Les résultats ont mis en évidence une structuration à la fois spatiale et saisonnière du potentiel biologique des topsoils, définissant ainsi différents potentiels biologiques de restauration, autrement dit : différents types de topsoils !

### TOPSOIL & COUVERT VEGETAL Une structuration spatiale du potentiel biologique de restauration des topsoils

Le couvert végétal initial (avant défrichage) détermine différents potentiels biologiques de restauration des topsoils, liés notamment à leur banque de graines.

#### **Cinq grands types de topsoil peuvent ainsi être identifiés :**

- topsoil sous maquis ligno-herbacé
- topsoil sous maquis arbustif ouvert à strate herbacée réduite
- topsoil sous maquis arbustif buissonnant dense
- topsoil sous maquis para/préforestier
- topsoil sous formations forestières (défrichage autorisé uniquement sur dérogation)

Les différences de potentiel biologique de restauration s'expriment à la fois en termes de densité, de diversité et de composition spécifique (espèces présentes).

Ainsi, il apparaît que la banque de graines des topsoils sous maquis para- ou pré-forestier et forestier est jusqu'à 5 fois supérieure en termes de densité de germinations et près de 2 fois supérieure en termes de nombre d'espèces par rapport aux topsoils des autres formations.

Bien que chaque topsoil soit caractérisé par une composition spécifique de sa banque de graines qui lui soit propre, elle est généralement dominée à près de 80% par des espèces herbacées «pionnières» de la famille des Cypéracées. Les différences spécifiques apparaissant au niveau des 20% restants, alors constitués d'espèces ligneuses (arborescentes ou arbustives).

Il en est de même pour les communautés de microorganismes (bactéries et champignons) avec des communautés microbiennes propres à chaque topsoil sous jacent d'une formation végétale particulière, mais également toujours deux fois supérieures en moyenne (en termes d'espèces) dans les topsoils associés aux formations para- ou pré-forestières et forestières.

Par conséquent, il est recommandé de prendre en compte, lors de la planification des opérations de récupération et de gestion des topsoils sur mine, les caractéristiques du potentiel biologique de restauration de ceux-ci selon le couvert végétal qui leur est associé avant décapage.

Il est de fait recommandé d'éviter les mélanges de topsoils provenant de couverts végétaux différents, qui pourraient avoir comme conséquence de dégrader l'expression du potentiel biologique des topsoils lors de leur réapplication sur les zones à restaurer. La gestion ainsi séparée des topsoils devrait permettre *in fine* de mieux raisonner et d'optimiser les moyens complémentaires à mettre en œuvre pour la reconstitution de la mosaïque végétale et son intégration à l'échelle du paysage minier.

C'est le cas notamment pour le choix des espèces à produire en pépinière et à planter dans un second temps pour compléter la diversité des espèces végétales restaurées.

## TOPSOIL & SAISONS

### Une structuration temporelle du potentiel biologique de restauration des topsoils

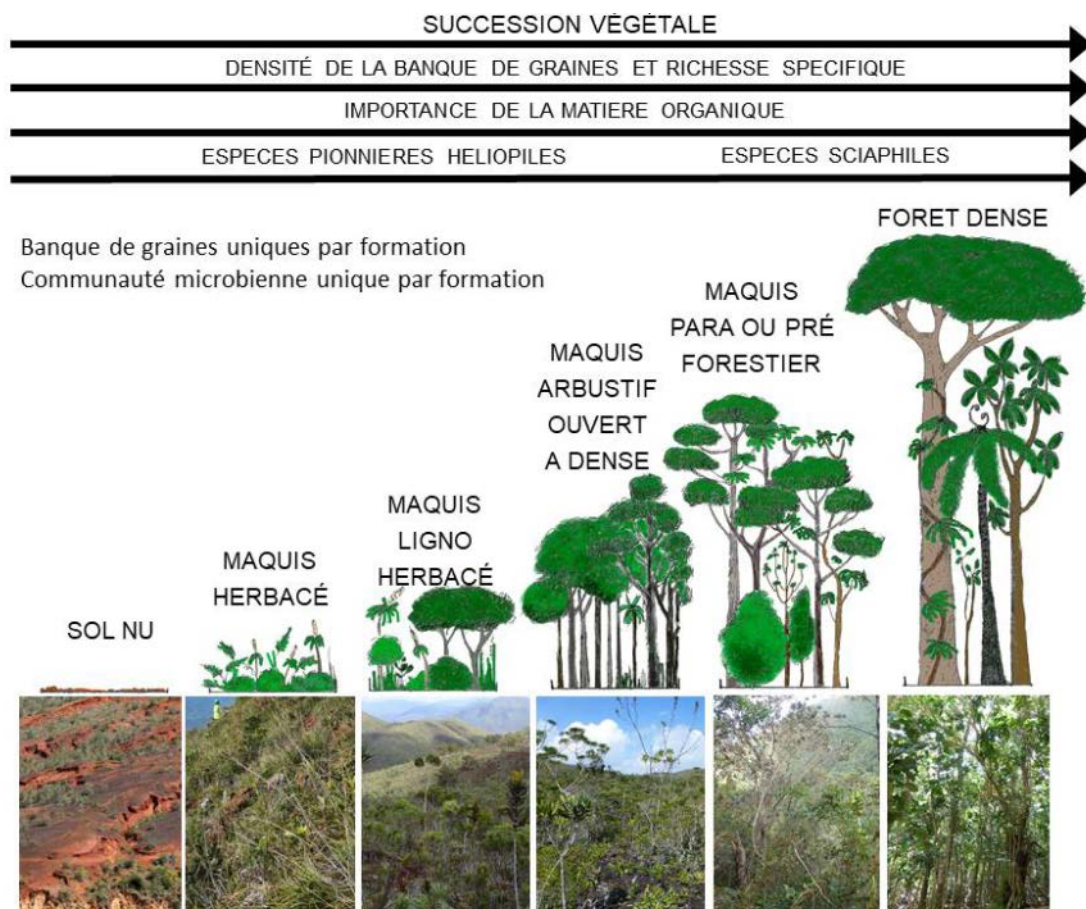
Les travaux scientifiques menés ont montré qu'il existe au sein de chaque type de topsoil, une variation du potentiel biologique en fonction des grandes saisons qui caractérisent le climat de Nouvelle-Calédonie : la saison chaude et humide (de mi-novembre à mi-avril), la période plus fraîche et sèche (de mi-mai à mi-septembre) et les deux périodes dites de transitions (de mi-avril à mi-mai et de mi-septembre à mi-novembre).

Les différences climatiques dues aux saisons ont une influence à la fois sur la productivité des espèces végétales, en termes de fructification, et sur l'activité biologique des sols. Un nombre important d'espèces végétales sur substrats ultramafiques présente un pic de fructification durant la saison chaude et humide.

La structure de la banque de graines (composition spécifique et densité) présente des variations significatives entre les différentes saisons. Ainsi, en saison chaude et humide, les densités de germination à partir du topsoil sont en moyenne deux fois supérieures à celles observées en saison fraîche.

La diversité spécifique des plantules qui émergent du topsoil est également plus importante en saison chaude, alors qu'en saison fraîche les germinations sont dominées par quelques espèces de cypéracées. Concernant les communautés microbiennes : Durant la saison chaude et humide, dans les sols dont la teneur en eau est élevée, on observe une activité biologique plus importante des micro-organismes de la rhizosphère (développement de germes, bactéries, champignons). A l'inverse, en saison sèche et fraîche, on observe une réduction de l'activité biologique des micro-organismes de la rhizosphère.

**En conséquence, il est conseillé, de prendre en compte les variations saisonnières du potentiel biologique des topsoils dans le plan de gestion. Le défrichage en saison chaude et humide peut améliorer la quantité de semences et la diversité spécifique au sein de la banque de graines, ainsi que l'activité microbienne, favorisant les meilleurs succès des travaux de restauration.**



*Figure 8 : Schéma de la succession végétale sur substrats ultramafiques de Nouvelle-Calédonie et présentation de la typologie du potentiel de restauration de leur topsoil (Illustrations Pierre LOSLIER, Crédit Photos @IAC).*



#### **4. Estimation des volumes de topsoil et de latérite rouge disponibles** **Cette étape permet d'évaluer les surfaces qui pourront être régalées et les temps d'engins nécessaires pour la récupération et le déplacement du topsoil.**

L'épaisseur de topsoil sur les sols miniers semble varier de 10 cm à 50 cm (notamment pour les topsoils sous maquis dense, ou sous couvert forestier, les topsoils de fond de thalweg).

En règle générale, le topsoil présente une couleur plus sombre que les latérites rouges sous jacentes, mais qui n'est pas toujours perceptible. Le meilleur indicateur est la densité de racines. La partie la plus riche en racines fines ( $< 2$  mm) correspond à la partie la plus fertile du topsoil, elle fait environ 10 cm d'épaisseur, elle correspond au topsoil dit « superficiel ». A noter que la litière (feuilles mortes, résidus végétaux) présente à la surface de sols, doit être récupérée avec ce topsoil « superficiel ».

La limite inférieure de récupération du topsoil correspond au niveau des dernières grosses racines ( $> 2$  mm), cette limite se situe entre 30 et 50 cm environ.

Enfin, et selon la présence et l'épaisseur de l'horizon, il est également conseillé de récupérer la latérite rouge sous-jacente qui pourra être utilisée soit comme substrat d'accueil à l'épandage du topsoil, soit pour les plantations ou le semis lorsque les volumes de topsoil sont insuffisants.

Dans tous les cas, la mise en place de chacun des matériaux doit se réaliser selon l'ordre initial : Latérite sous jacente et topsoil en surface.

Les volumes de topsoil et de latérites rouges peuvent être appréciés sur le terrain en réalisant des sondages en différents points de la zone à décaper par exemple à l'aide d'une tarière, d'une pioche ou d'une barre à mine ou d'un engin léger.

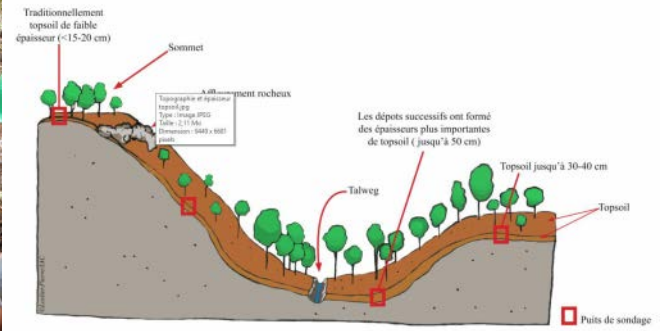


Figure 9 : Exemple de plan de prospection adapté à la topographie d'une zone à décaper pour l'évaluation des épaisseurs de topsoil et latérite rouge à récupérer (Illustration Pierre Loslier), et photo d'un profil montrant les limites entre les horizons de topsoil et latérite rouge (©iac).



## RÉCUPÉRER LES LATÉRITES ROUGES : UN COUP GAGNANT

Malgré tous les efforts réalisés pour leur récupération, il est certain que certaines zones à restaurer manqueront tout de même de topsoil soit en raison des faibles épaisseurs disponibles ou de la compaction lors de leur manipulation, soit dans le cas d'anciennes zones dénudées ou mines orphelines.

Les études ont montré que les latérites rouges constituent un substrat d'accueil assez favorable à l'installation et au développement d'un couvert végétal, par plantation, semis et même par recolonisation spontanée depuis les zones naturelles alentours, car leurs caractéristiques physico-chimiques sont assez proches de celles des topsoils.

Leur emploi peut constituer une solution alternative ou complémentaire à l'usage du topsoil. Il est donc fortement recommandé de les récupérer pour les valoriser dans les opérations de restauration, plutôt que de les mettre en versés à stériles..

## 5. La vérification de l'absence d'espèces envahissantes

Actuellement, les fourmis envahissantes sont, reconnues comme une menace pour la biodiversité néo-calédonienne (cf. encadré « Les fourmis envahissantes »). La vérification de l'absence de ces fourmis doit être réalisée par des techniciens formés. Si des individus d'une ou plusieurs espèces envahissantes sont identifiés dans le topsoil, alors celui-ci ne doit être déplacé que vers des zones déjà contaminées.

De la même façon, un topsoil indemne de fourmis envahissantes ne devra être déplacé que vers des zones indemnes. D'autres espèces peuvent s'avérer dangereuses et devront être soumises à la même vérification.

Concernant les espèces végétales, peu sont déclarées envahissantes sur sols ultramafiques. La principale espèce pouvant se révéler envahissante dans certaines zones est le *Pinus caribaea*, libérant de très nombreuses graines qui se retrouvent alors dans le topsoil. De la même manière que pour les fourmis envahissantes, il convient de ne pas déplacer du topsoil provenant de zones où ce Pinus est présent vers des zones indemnes.



**LES FOURMIS ENVAHISSANTES, UNE MENACE POUR LES ÉCOSYSTÈMES NÉO-CALÉDONIENS ET EN PARTICULIER LES HABITATS SUR SOLS MINIERS** (CONTRIBUTION H. JOURDAN, IRD)

### ZOOM SUR LA FOURMI ÉLECTRIQUE

Originaire d'Amérique tropicale, la fourmi électrique (*Wasmannia auropunctata*) est une fourmi exotique envahissante, dotée d'une grande plasticité écologique, lui permettant de coloniser une large gamme d'habitats. Elle représente une menace majeure pour la biodiversité des milieux qu'elle colonise, par prédation et compétition avec les espèces autochtones déjà présentes et dont elle provoque des effondrements de populations, voire leur disparition (fourmis, reptiles<sup>5</sup> ...).

<sup>5</sup>Jourdan H., Brescia F. et Vidal E. (2014) - Programme RMines. Impacts des espèces invasives sur les communautés de reptiles des massifs miniers. Programme CNRT, Rapport final, 91 p. + annexes.

Présente depuis les années 60 en Nouvelle-Calédonie, cette fourmi est considérée aujourd'hui comme l'une, voire la plus dangereuse des «espèces exotiques» introduites dans l'archipel néo-calédonien. Elle a été recensée dans tous les types de milieux naturels : forêt sclérophylle, forêt tropicale humide, maquis minier du territoire. Il ne s'agit pourtant pas de la seule espèce de fourmis introduites recensée sur le territoire, puisque plus d'une trentaine de taxons sont considérés comme exotiques, dont 16 «espèces vagabondes».

Parmi elles, au moins 3 autres espèces (*Pheidole megacphala*, *Anoplolepis gracilipes* et *Solenopsis geminata*) sont considérées comme des menaces pour la biodiversité néo-calédonienne, en particulier dans les milieux miniers.

Les réglementations environnementales adoptées par les provinces visent à limiter la dissémination de ces espèces dans les milieux naturels indemnes de leur présence.



Figure 10 : *Wasmania auropunctata* (A)

Aussi, il est essentiel avant la récupération du topsoil de mettre en œuvre des mesures minimales de biosécurité, en vérifiant la présence ou l'absence de l'une de ces 4 fourmis envahissantes et principalement la fourmi électrique, tant au niveau des zones de prélèvement de topsoil que des zones en périphérie des zones d'épandage envisagées.

Cette mesure permet ensuite d'orienter le choix des sites pour l'épandage du topsoil en évitant d'introduire et de propager ces

espèces dans des milieux où elles sont absentes. A noter que la reconnaissance des fourmis envahissantes peut être réalisée durant toute l'année, dès que la zone concernée par le défrichage est connue.

## 6. La planification de l'utilisation ultérieure du topsoil et des latérites rouges

Une fois ces étapes préliminaires réalisées, il conviendra alors de planifier au mieux l'usage du topsoil et des latérites rouges qui sera fait après récupération. Autrement dit de définir les zones sur lesquelles ils seront étalés (cf. l'épandage du topsoil), la préparation de ces zones et les moyens à mettre en œuvre. Cette étape réalisée le plus tôt possible permettra de rationaliser l'utilisation du topsoil et favorisera le succès des opérations de restauration.



### SECONDE ÉTAPE : LE DÉFRICHEMENT ET LA RÉCUPÉRATION DU TOPSOIL

**Cette étape se réalise en trois temps :**

1. L'évacuation des gros sujets végétaux présents dans la végétation de diamètre supérieur à 20 cm
2. La récupération du topsoil
3. La récupération des latérites rouges

**1. L'évacuation des gros sujets végétaux** présents dans la végétation, de diamètre supérieur à 20cm. Avant de procéder à la récupération du topsoil à proprement parler, il est indispensable, d'abattre à la tronçonneuse les sujets de diamètre supérieur à 20 cm, puis de les évacuer de la zone. Ces derniers ne peuvent être défrichés par les engins chargés de la récupération du topsoil (pelle ou bulldozer) qu'ils risqueraient d'endommager. Les gros sujets sont notamment présents au sein des formations de type para- ou pré-forestières et forestières (défrichement autorisé uniquement sur dérogation ; cf. encadré suivant). Lorsque d'intérêt économique, les bois ainsi évacués peuvent être valorisés, ou bien cédés aux tribus voisines pour un usage privé, ou si les moyens techniques le permettent, être valorisé par compostage.

Une fois l'évacuation des plus gros arbres réalisée, la récupération du topsoil à proprement parler peut commencer. Le reste de la végétation (arbustive) peut être incorporé au topsoil lors de sa récupération ou si possible broyé sur place à l'aide d'un broyeur forestier (cf. encadré et point suivant pour la méthode).



Bien que des dérogations puissent être accordées dans certains cas, le défrichement de zones de forêt dense humide doit être évité. Il s'agit des formations végétales les plus complexes et les plus diversifiées sur substrats ultramafiques, en terme de végétaux mais aussi pour la faune.



### **INTEGRER LA VEGETATION AU TOPSOIL LORS DU DEFRIQUEMENT**

L'incorporation des végétaux au topsoil lors du défrichement permet d'améliorer significativement le potentiel de restauration du topsoil. Les bénéfices sont nombreux :

Les végétaux vont se décomposer au cours du temps, ce qui représente un apport complémentaire de matière organique et stimule l'activité microbienne.

La présence de végétaux crée des micro-habitats particulièrement favorables à la germination des semences, au développement des plantules et au retour de la faune.

Cela favorise également une aération de la structure du topsoil, améliorant ainsi sa capacité de rétention en eau et favorisant les réactions aérobies des microorganismes.

Enfin une partie de ces végétaux a la capacité de se régénérer par rejet de souche ou multiplication végétative à partir de toute autre partie, ce qui participe à la revégétalisation spontanée, améliorant encore le potentiel de régénération du topsoil.

Enfin, cette opération simplifie les opérations de défrichement et permet de réduire les coûts de manipulation du topsoil.

## 2. La récupération du topsoil



*Figure 11 : Illustrations des étapes de défrichage, mise en andain et chargement des substrats récupérés lors du décapage (topsoil).*



## METHODE IDEALE

L'analyse de la distribution verticale des graines au sein du topsoil, de la surface vers la profondeur a montré qu'environ 97 % des graines sont concentrées en surface dans les 5 premiers centimètres du sol.

La banque de graines perd quasiment tout potentiel germinatif au delà de 5 cm de profondeur (cette information est primordiale lors de la ré-application du topsoil sur zone à restaurer et doit être prise en compte dès sa récupération).

En conséquence, il est fortement recommandé de procéder à la **récupération fractionnée du topsoil** en trois temps :

- **Le premier temps** consiste à récupérer la partie superficielle la plus fertile et où est concentré l'essentiel de la banque de graines du topsoil. Cette opération peut être réalisée au bulldozer. Celui-ci progresse selon des layons successifs dans le couvert végétal, broie (fragmente) la végétation et l'intègre simultanément au topsoil qu'il racle sur les 5-10 premiers centimètres (litière incluse), générant une première fraction de topsoil, dite topsoil « superficiel » (si l'engin utilisé ne permet pas de récupérer une couche de 5-10 cm, le travail devra néanmoins viser à récupérer une couche aussi fine que possible).

Le broyage de la végétation ainsi réalisé et son intégration au topsoil améliore significativement le potentiel de restauration de ce dernier (cf. encadré précédent).

Le mélange topsoil « superficiel » et végétaux broyés est disposé en bordure de zone, sous forme d'andains en attendant d'être chargé et évacué vers les zones d'utilisation ou de stockage.

## METHODE IDEALE (suite)

- **Dans un second temps**, la récupération du topsoil sous-jacent est également réalisée par bulldozer sur la tranche de 10 à 40cm (en suivant la topographie de la zone et selon la limite inférieure évaluée – cf. paragraphe « Estimation des volumes de topsoil »). Cet horizon est encore pourvu en matières organiques et dispose d'un potentiel microbien. Comme précédemment, cette fraction est disposée en bordure de zone sous forme d'andain en attendant d'être chargée et évacuée vers les zones d'utilisation ou de stockage.

- **Le troisième temps** fait intervenir une pelle hydraulique qui vient récupérer les poches de topsoil restant après le passage du bulldozer selon le profil du terrain. **Cette technique permet d'augmenter de 50% le volume de topsoil récupéré.**

**A noter** que les tas disposés par le second et le troisième temps de récupération du topsoil peuvent être mélangés, formant ainsi une deuxième fraction de topsoil dit « profond ».

Bien que les moyens matériels (engins) utilisés actuellement rendent difficiles une récupération fine de ces deux fractions de topsoil («superficiel» et «profond»), c'est néanmoins cette technique qui doit être privilégiée.

Il est primordial de repositionner ces fractions selon leur agencement initial, c'est à dire la fraction plus profonde en premier jusqu'à la fraction superficielle en surface.

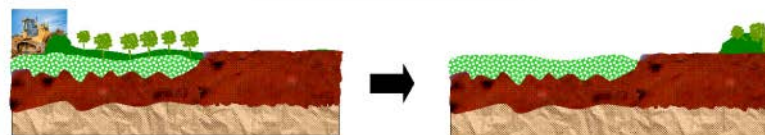
**Ces précautions permettent d'éviter la dilution des graines dans la masse du topsoil et donc la réduction du potentiel de germination, puisque les graines enfouies trop profondément ne pourront germer.**



Défrichage – évacuation des sujets de diamètre supérieur à 20 cm

**Étape 1**

**METHODE IDEALE**



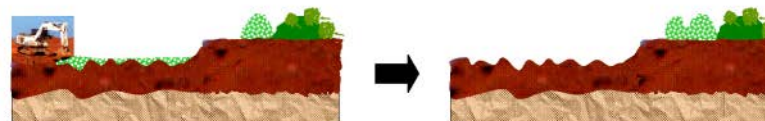
Récupération fine du topsoil sur les 5-10 premiers centimètres

**Étape 2**



Récupération du topsoil sur les 10 - 40 centimètres suivants

**Étape 3**



Récupération des poches de topsoil restantes selon le profil du terrain

**Étape 4**



Récupération des latérites rouges



## METHODE ALTERNATIVE

Si la récupération des deux fractions du topsoil s'avérait difficilement réalisable faute de temps ou de moyens matériels adéquats, les deux fractions pourraient alors être récupérées en une seule opération.

Deux temps de récupération sont néanmoins à prévoir :

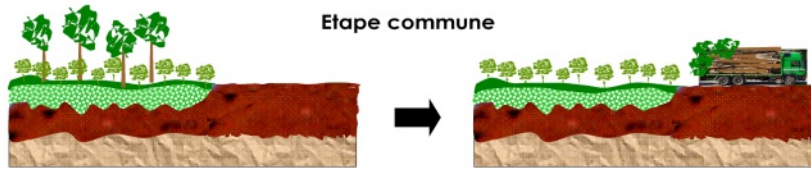
- **Un premier temps** de récupération réalisé au bulldozer. Comme précédemment, celui-ci, en traçant des layons dans le couvert végétal, broie (fragmente) la végétation et l'intègre au topsoil qu'il racle sur les 30 à 50 premiers centimètres (selon la limite inférieure évaluée – cf. paragraphe « Identification des volumes de topsoil »), toujours en suivant la topographie de la zone. Il ne s'agit plus alors de distinguer topsoil « superficiel » et topsoil « profond ». L'ensemble du mélange est disposé en bordure de la zone, sous forme d'andains en attendant d'être chargé et évacué vers les zones d'utilisation ou de stockage.

- Enfin, comme précédemment, **un second temps** de récupération fait intervenir une pelle hydraulique qui récupère les poches de topsoil restant après le passage du bulldozer, selon le profil du terrain..

Ici aussi les matériaux peuvent être mélangés, formant ainsi une seule et unique fraction de topsoil.

Selon les cas, topsoil superficiel et topsoil profond sont alors gérés séparément et sont ensuite récupérés par une chargeuse et acheminés par camion vers la zone de stockage ou d'épandage.

A noter que la durée de stockage des topsoils en andains en bordure de zone défrichée **ne devrait pas excéder une semaine**, afin d'éviter une dégradation rapide de leur potentiel de restauration (cf. chapitre : Le stockage du topsoil : un option à éviter autant que possible).



Défrichement – évacuation des sujets de diamètre supérieur à 20 cm

**METHODE ALTERNATIVE**

**Étape 1**



Récupération du topsoil sur les 40 premiers centimètres en une seule opération

**Étape 2**



Récupération des poches de topsoil restantes selon le profil du terrain

**Étape 3**



Récupération des latérites rouges





## RÉCUPÉRATION DU TOPSOIL EN ZONE DE PENTE

Il est bien entendu que la méthode de récupération du topsoil décrite précédemment n'est applicable qu'aux zones planes ou peu pentues. Dans le cas de topsoils à récupérer sur des terrains fortement irréguliers ou sur pentes, une pelle hydraulique de 20 à 30t peut alors être utilisée. De la même façon que précédemment, il s'agira de récupérer simultanément le couvert végétal et le topsoil, qui peut éventuellement être directement évacué par camion ou provisoirement mis en andain.

Astuce : La longueur des dents de la pelle peut être utilisée comme indicateur de la profondeur maximale à récupérer, tout comme la présence de racines ou l'indicateur visuel de couleur décrit plus haut (cf. paragraphe "Estimation des volumes de topsoil" peut aussi être utilisé avec cette méthode".



Figure 12 : Récupération de topsoil sur les zones pentues par le bas et par le haut.

### 3. La récupération de latérites rouges

Sur les sites où le topsoil est peu présent, voir quasi absent, les zones à restaurer en manqueront immanquablement.

Il est donc recommandé de récupérer et utiliser les latérites rouges, de façon alternative ou complémentaire car leurs caractéristiques physico-chimiques sont assez proches de celles des topsoils. Les latérites rouges pourront être utilisées comme substrat sous jacent au topsoil ou directement comme substrat d'accueil de plantations et de semis (cf. encadré : Récupérer les latérites rouges, un coup gagnant).

Leur récupération, après celle du topsoil, est donc fortement recommandée. Celle-ci peut être réalisée au bulldozer, sur des épaisseurs d'environ 50 à 100 cm. Les latérites rouges sont disposées en tas en bordure de zone avant d'être évacuées vers leur zone d'utilisation.

Leur récupération permet la valorisation d'un stérile, évitant ainsi une mise en verse.

Le stockage des latérites rouges peut être réalisé sans contraintes ni limitation de durée puisque ces matériaux sont quasiment dépourvus de matériel biologique.



## **LE STOCKAGE DU TOPSOIL (option à éviter autant que possible)**

**L**'utilisation immédiate du topsoil pour les travaux de restauration ne peut avoir lieu qu'à la condition de disposer de surfaces disponibles à la restauration, c'est-à-dire de zones sur lesquelles il est acquis que plus aucune activité ne sera réalisée et sur lesquels les travaux de préparation ont été réalisés (cf. chapitre : L'épandage de topsoil). C'est pourquoi il est fortement conseillé d'élaborer un plan de réhabilitation intégrant la gestion du topsoil en fonction de l'avancée de l'exploitation.

De même, la coordination des actions de récupération et d'épandage du topsoil n'est pas toujours aisée. Ainsi, il s'avère parfois inévitable de «stocker» le topsoil en vue d'utilisation ultérieure.

On parle de «stockage» de topsoil au delà de 7 jours après le décapage des matériaux sans réutilisation définitive. Néanmoins, il faut retenir que le stockage du topsoil altère son potentiel de restauration. Un stockage le plus court possible est donc recommandé car les travaux menés sur l'ensemble des massifs miniers de Nouvelle-Calédonie ont montré que la dégradation des composantes biologiques (banque de graines, faune, microflore) est avérée pendant le stockage malgré des qualités physico-chimiques toujours favorables.

Cette dégradation est en grande partie due aux conditions d'anoxie (mauvaise oxygénation) qui se créent au sein des andains, liées à la fois aux phénomènes de compactations et à la teneur en eau (susceptible de devenir trop élevée). On observe ainsi une stratification des stocks de topsoils, avec la mise en place de zone aérobie à température ambiante en surface, de zone anaérobie à température plus élevée en profondeur, séparées par une zone intermédiaire de transition. Les conditions anaérobies et chaudes sont défavorables au maintien des populations microbiennes et de la banque de graines. En revanche le potentiel de fertilité chimique et la teneur en matière organique semblent se maintenir pendant plusieurs mois.

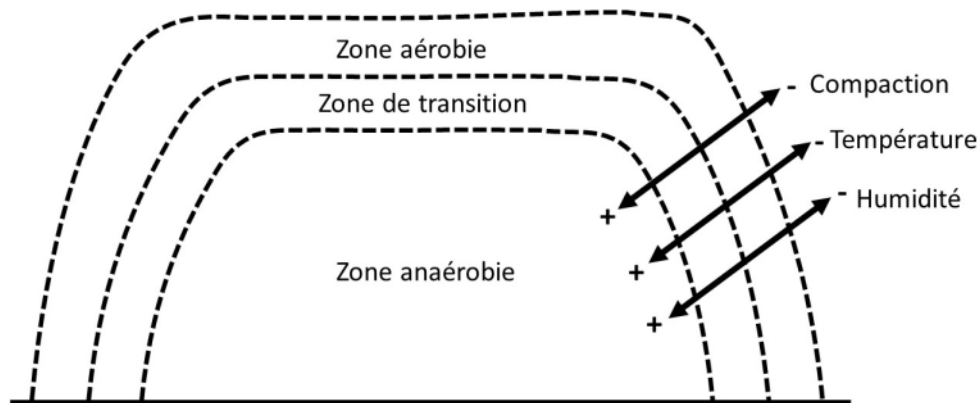


Figure 13 : Schéma de la stratification créée par le stockage au sein d'un andain de topsoil. Les limites entre les zones dépendent de la texture du topsoil et des moyens mécaniques mis en œuvre lors du montage des stocks de topsoils (d'après Ghose 2001)<sup>6</sup>.

<sup>6</sup>Ghose M. (2001) - Management of topsoil for geo-environmental reclamation of coal mining areas. *Environmental Geology*, 40(11-12), 1405-1410.

## EFFETS DU STOCKAGE sur le potentiel de restauration des topsoils

**E**ffet du stockage sur la persistance de la banque de graines.  
En profondeur, des conditions défavorables à la conservation des semences :

Les expérimentations menées en Nouvelle-Calédonie, essentiellement entre 2010 et 2015, ont montré que la persistance de la banque de graines pendant le stockage des topsoils est favorisée en surface des tas où les conditions sont les plus fraîches et les plus sèches.

Les graines se conservent moins bien en profondeur où augmentent la température, l'humidité et les phénomènes d'anaérobiose, qui induisent la perte de dormance et/ou la germination des semences, surtout à des profondeurs non favorables au développement de plantules.

## Prendre en compte la « dormance » des graines :

La persistance de la banque de graines pendant le stockage des topsoils a pu être corrélée à l'absence ou à la présence de dormance chez les semences.

Les résultats indiquent en effet que les graines d'espèces non dormantes ne sont pas conservées au delà de quelques mois si les conditions sont favorables à leur germination et que certaines espèces disparaissent au delà de 3 mois (exemple : *Sannantha leratii*, *Gymnostoma spp.*).

La perte de telles espèces peut s'avérer problématique car il peut s'agir d'espèces difficiles à reproduire et/ou à réimplanter. Lorsque les conditions sont plus sèches, les graines de certaines espèces non dormantes, notamment les graines de types orthodoxes (résistantes à la dessiccation), semblent pouvoir se maintenir dans les topsoils stockés sur des durées plus longues (cas de *Costularia comosa*, capable d'émerger après 24 mois de stockage). Ce résultat est à relier aux autres travaux menés jusqu'à présent sur les maquis miniers et qui indiquent que la majorité des graines sont non dormantes, donc se conservent mal en conditions chaudes et humides, ce qui doit inciter à ne pas stocker les topsoils ou à ne le faire que sur des durées courtes. Seules les graines d'espèces dormantes se sont révélées capables de maintenir leur pouvoir germinatif sur près de 24 mois au sein des stocks de topsoils (*Gahnia novocaledonensis*, *Machaerina deplanchei*, *Alphitonia neocaledonica*, *Polyscias sp.*, *Styphelia sp.*,...).

Il faut souligner que si le maintien d'un petit nombre d'espèces dormantes paraît modeste, il n'en est pas moins essentiel pour les travaux de restauration car certaines d'entre elles, pionnières, faciliteront l'implantation d'autres espèces (succession secondaire).

Il est à noter que la germination des graines en surface des andains au cours du stockage, loin d'être favorable, est à considérer comme une perte pour la future zone à restaurer car les fructifications, si jamais celles-ci pouvaient se produire, ne compenseraient jamais la dégradation de la banque de graines globale qui se produit au sein des tas de topsoil stocké.

## DORMIR POUR AMÉLIORER SES CHANCES DE SURVIE



Les espèces végétales productrices de graines ont développé des stratégies de dormance afin de permettre à leurs semences de germer seulement quand les conditions optimales pour leur développement sont réunies. Attention, toutes les graines ne présentent pas de dormance ! Ainsi, une étude menée sur une centaine d'espèces du maquis miniers, dont un grand nombre est utilisé en revégétalisation, montre que près de 70% d'entre-elles sont non dormantes.

L'entrée en dormance d'une graine intervient lors d'une étape de maturation qui succède à la fécondation. D'une manière générale, un individu peut augmenter sa chance de survie et de reproduction dite « fitness » grâce à une physiologie ou à un comportement particulier. Cette stratégie permet d'échapper à de mauvaises conditions dans le temps ou dans l'espace, minimisant ainsi les risques de mortalité (la dormance est un mécanisme adaptatif qui contribue à l'optimisation des traits d'histoire de vie en termes de valeur sélective). Ainsi les variations environnementales (périodiques et/ou non prévisibles), ayant une influence sur le succès reproducteur des individus, sélectionnent des stratégies adaptatives comme la dormance.

Par exemple, certaines espèces végétales des milieux tempérés produisent des graines dont la dormance ne sera levée qu'après avoir passé la période hivernale. En effet, une graine, «mature» en été, peut trouver en fin de période chaude et humide des conditions favorables à sa germination. Néanmoins, la saison froide risque de surprendre la jeune plantule, n'ayant pas nécessairement l'aptitude à résister aux températures basses. Après avoir passé la saison froide sous un état dormant? la graine augmente alors ses chances de survie. Il est donc tout à fait possible de percevoir la dormance chez les plantes comme un véritable mode de contrôle du "calendrier de germination" des graines.

On parle de dormance lorsqu'il faut attendre plus de quatre semaines avant la première percée racinaire et/ou que la germination est étalée dans le temps (plus de deux mois pour un lot de graines). C'est la présence de dormance, leur identification et leur levée chez les graines qui posent notamment problème lors des essais de germination.

Au niveau inter et subtropical, des dormances ont pu être mises en évidence pour de nombreuses familles végétales présentes sur terrains miniers : Euphorbiacées, Rubiacées, Sapotacées, Apocynacées, Rutacées, Cyperacées, Araliacées...Ainsi, dans le cadre du programme CNRT ECOMINE-Biotop, le rôle essentiel de ces dormances pour 3 des 4 espèces étudiées a été mis en évidence. Les graines de ces dernières présentaient encore la capacité de germer après 24 à 30 mois de stockage dans un topsoil étalé in-situ.

## **E**ffet du stockage sur la persistance des microorganismes

De la même façon que pour la banque de graines, les travaux scientifiques menés ont montré que le potentiel microbien diminue avec la profondeur où augmente les conditions anaérobies et le taux d'humidité. Après 3 mois de stockage du topsoil, une baisse moyenne de 60 à 80% du potentiel microbien a été relevée.

De façon générale, la perte du potentiel microbien pendant le stockage des topsoils peut s'avérer problématique pour les travaux de restauration. La perte de micro-organismes symbiotiques (bactéries et champignons) peut empêcher ou retarder le retour d'espèces végétales symbio-dépendantes dont la présence est bénéfique pour la succession végétale. Plus probablement, cela peut conduire à une perturbation du cycle des éléments nutritifs et une diminution de leur disponibilité pour les plantes.

## **E**ffet du stockage sur la matière organique et le potentiel de fertilité

A l'inverse des composantes biotiques, le potentiel de fertilité chimique et la teneur en matière organique du topsoil ne semblent pas être significativement impactés par un stockage sur 36 mois. Le stockage des topsoils ne semble pas affecter significativement les teneurs en éléments nutritifs qui sont conservés tels que le calcium ou le potassium (mais qui montrent néanmoins une tendance à la baisse au cours du temps). Enfin, les concentrations en éléments traces métalliques, potentiellement toxiques pour les végétaux (nickel, chrome, cobalt, manganèse, fer), de même que leur biodisponibilité ne semblent pas évoluer significativement pendant la durée du stockage. Ainsi, le stockage des topsoils ne devrait pas engendrer de problème de toxicité par les métaux lors de la réutilisation dans les travaux de restauration, même au delà de 36 mois.

En conséquence, il est recommandé d'éviter le stockage du topsoil (c'est à dire au delà de 7 jours après récupération et avant son épandage sur terrain à restaurer). **Toutefois, en cas d'impossibilité d'utilisation immédiate du topsoil après sa récupération (c'est-à-dire sous moins de 7 jours), le stockage ne devra pas excéder 24 mois** en respectant les règles qui suivent, car il reste un matériau fertile contenant de la matière organique et des éléments nutritifs pour des plantes.

## REGLES A SUIVRE pour limiter les effets négatifs du stockage du topsoil

### 1. Identifier et préparer la zone de stockage

D'une manière générale, le stockage devra être réalisé sur une zone, déjà défrichée (pour minimiser l'emprise au sol des activités minières) et impérativement mise hors d'eau pour éviter la rétention excessive d'eau dans les andains. On veillera particulièrement à ne pas favoriser la contamination par des espèces envahissantes (espèces animales ou végétales envahissantes, végétaux présentant une rouille des myrtacées etc...) du topsoil stocké s'il en est indemne à l'arrivée. De la même façon une zone de stockage indemne ne devra pas être contaminée par un topsoil lui même contaminé.

### 2. Modalités de stockage

**Stocker de préférence étalé (en couche de 50 cm de haut) ou bien en andain de 2 m de haut au maximum sur les durées les plus courtes**

Lorsque le stockage de topsoil est inévitable, il est recommandé de stocker celui-ci en couche de 50 cm d'épaisseur, ou à défaut en andain de 2 m de hauteur au maximum pour minimiser la compaction du matériau, principale cause de l'altération des potentialités biologiques de restauration des topsoils.



Figure 14 : Topsoil en andain (2 m de haut environ) ou étalé, stocké sur la mine de VALE à Goro (mise en place août 2011) ©iac.

### 3. Durée du stockage

Jusqu'à 3 mois de stockage, le topsoil conserve toutes ses propriétés. Entre 3 mois et 24 mois de stockage, un grand nombre d'espèces végétales à graines non dormantes vont disparaître et le potentiel microbien va décliner, de même que la teneur initiale en matière organique.

La durée maximale de conservation des espèces dites à graines dormantes (minoritaires dans les banques de graines) est de 24 mois. Ainsi, au delà de cette durée de stockage, la quasi totalité de la banque de graines initiale du topsoil, de même que 80 % du potentiel microbien, auront disparu, La teneur initiale en matière organique est également réduite.

Le topsoil ne conserve alors plus que son potentiel de fertilité chimique...

Ce « vieux » topsoil reste néanmoins toujours favorable comme substrat d'accueil pour l'épandage de topsoil frais au-dessus ou moyennant amendement pour la plantation ou l'ensemencement !!!

### 4. Saison du stockage

Le décapage suivi du stockage du topsoil en saison chaude et humide tend à être défavorable à la conservation de la banque de graines pour de nombreuses espèces végétales. En effet, les conditions de chaleur et d'humidité qui sont présentes à cette saison induisent le développement de moisissures et de phénomènes de décomposition qui peuvent porter atteinte à l'intégrité du pouvoir germinatif.

Le stockage pendant cette saison peut induire des processus de germination à des profondeurs où les graines n'ont aucune chance de survivre une fois la germination enclenchée.

La manipulation du topsoil par temps humide favorise la compaction du matériau, créant des conditions asphyxiantes, ce qui est défavorable aux besoins des végétaux.

**Pendant la saison chaude et humide, il est donc préférable de réutiliser le topsoil immédiatement et de réserver le stockage à la saison fraîche et sèche, pour une utilisation lors de la saison chaude et humide suivante.**



## Utilisez tous les topsoils !

Le stockage du topsoil doit être évité ou limité dans la durée afin d'optimiser l'expression de son potentiel de restauration.

Toutefois même s'il est impossible de l'épandre immédiatement sur des terrains à restaurer, sa récupération reste néanmoins très utile.

Il conviendra alors de le conserver dans les meilleures conditions possibles.

En effet, un topsoil dont le potentiel biologique aurait été complètement dégradé pendant la période de stockage pourra toujours répondre aux premières problématiques de restauration des terrains miniers en apportant un substrat dont les caractéristiques physico-chimiques sont favorables à l'installation et à la croissance d'un couvert végétal, moyennant des apports complémentaires tels que : apport de topsoil frais en surface, plantation, ensemencement.

A noter que des travaux récents sur l'utilisation de plantes nurses (cas des légumineuses par exemple) offre de nouvelles pistes de revitalisation des topsoils. En fonction de leurs avancées, de nouvelles alternatives pourraient être proposées.

Par ailleurs, l'utilisation de ce topsoil stocké réduit les coûts de préparation des terrains à restaurer (cf. section : conditions des terrains miniers dégradés et problématiques de restauration).

**Pour rappel, le topsoil constitue un milieu vivant dont la formation est très lente au regard des générations et des phénomènes de dégradations auxquels il est exposé. Aussi, le stockage même long, contribuera à la préservation de cette ressources limitée.**

## L'EPANDAGE DU TOPSOIL

L'épandage du topsoil sur la zone à restaurer, pour permettre l'expression de son potentiel biologique de restauration naturel, constitue la première étape des travaux de restauration, qui pourra être complétée par des plantations ou des semis.

### IDENTIFIER ET PREPARER LA ZONES A RESTAURER

Une attention particulière doit être apportée au choix de la zone d'épandage et à sa préparation.

#### **1. Identification de la zone d'épandage et prise en compte de l'origine du topsoil**

Comme décrit précédemment dans la partie «défrichage et récupération du topsoil», différents types de topsoils correspondent à différents potentiels de restauration, selon la formation végétale qui leur était associée avant décapage (cf. encadré : «Pas un, mais DES topsoils»).

L'installation d'un couvert végétal à partir du topsoil varie également selon la topographie et les conditions climatiques de la zone à restaurer, et l'adaptabilité des espèces végétales composant la banque de graines du topsoil aux nouvelles conditions de la zone traitée.

Ainsi, des essais sur un même topsoil mis en place dans des conditions climatiques (humidité, température, ensoleillement...) et topographiques différentes (zone plane ou talus) ont montré que les espèces végétales qui s'installent varient de façon significative. En zone ensoleillée ou plane, les espèces pionnières héliophiles s'installent plus facilement que certaines espèces ligneuses, même à partir d'un topsoil d'origine para/préforestier ou forestier. En conséquence, il est conseillé lors de l'épandage de topsoil de : i) tenir compte des caractéristiques du potentiel de restauration du matériau selon son origine, et ii) de maximiser autant que possible son

**épandage dans des conditions environnementales (climat, environnement proche...) voisines de celles de son environnement d'origine.**

L'installation du couvert végétal en sera ainsi facilitée et la composition spécifique de celui-ci plus proche du couvert végétal originel, favorisera la reconstitution progressive du paysage. Ce type de gestion permettra également de guider les opérations complémentaires de restauration par ensemencement ou plantation en ciblant les espèces à utiliser (collectes des semences et production des plants).

## **2. Préparation de la zone à restaurer**

La préparation des zones à restaurer est un préalable essentiel lors de la restauration de terrains miniers dégradés. En effet, la pérennité des surfaces restaurées peut être fortement compromise par l'érosion, i) du fait de l'ajout d'un matériel hétérogène sur la surface traitée - celui-ci n'étant par définition pas solidaire du support - , et ii) par le ruissellement des eaux de pluies. Il est par conséquent essentiel de prendre en compte ces deux aspects lors de la préparation des zones d'accueil pour l'épandage du topsoil.

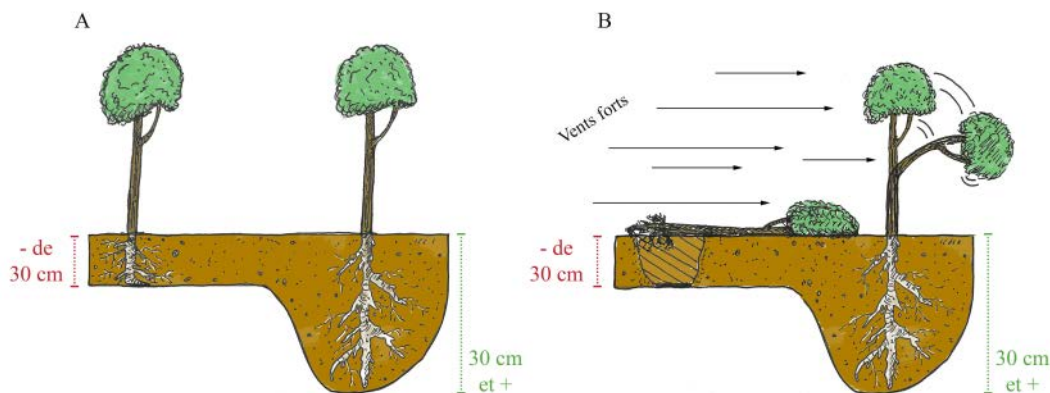
### **i) Epaisseur du substrat exploitable par la végétation**

Des travaux menés sur l'influence de l'épaisseur de topsoil ont montré qu'environ 30 cm de topsoil permet l'installation satisfaisante d'un couvert végétal, en termes de densité et de diversité spécifique, mais également en termes de pérennité. Une épaisseur de topsoil finale inférieure à 30 cm ne permet pas un développement racinaire et un drainage des sols satisfaisants.

Les végétaux qui s'y développent ne peuvent développer de racines profondes à même d'assurer leur stabilité. Dans ces conditions, ces végétaux bien que capables de se développer pendant plusieurs années sans présenter de difficultés majeures, se sont révélés fortement sensibles aux coups de vent (période cyclonique notamment) provoquant des déracinements, ainsi qu'aux périodes de sécheresse qui les affectent plus particulièrement. **En conséquence, il est recommandé d'apporter une épaisseur de topsoil d'au moins 30 cm.**

**Attention, il est important de rappeler (cf. paragraphe la récupération du topsoil) que de manière idéale, il faut récupérer les 10 premiers centimètres puis les 20-30cm suivants de topsoil avant de les ré-étaler en ordre inverse.**

Si la quantité de topsoil est faible, il faut alors envisager que le substrat d'accueil du topsoil soit lui même apte à permettre l'installation des végétaux. Les meilleurs substrats aujourd'hui identifiés restent la latérite rouge ou encore exceptionnellement un « vieux » topsoil. Dans le cas de la latérite rouge, il conviendra alors de prévoir, avant d'étaler le topsoil frais, un travail du sol (cf paragraphe Travail du sol ci-après).



*Figure 15 : Influence de l'épaisseur du substrat apportée sur zone à restaurer pour la pérennité des ouvrages (Illustrations P. Loslier).*

## ii) Influence de la pente

Une épaisseur de substrat de 30 cm peut être apportée sur une pente maximale de 20° sans problème d'érosion ou de reptation.

Pour une pente de 20° à 30°, il est préférable de mettre en place des dispositifs de stabilisation du matériau de type fascines ou géofiletés par exemple.

Au delà de 30°, les surfaces à restaurer ne permettent plus de retenir les épaisseurs de 30 cm de substrat, compromettant le développement d'un couvert végétal et la pérennité de la zone restaurée. La mise en place de topsoil n'est donc plus envisageable et il est conseillé d'envisager d'autres techniques de revégétalisation tel que le semis hydraulique, plus adapté à de telles conditions.

**En conséquence, et afin de pouvoir respecter l'épaisseur minimum de 30 cm de substrat indispensable au succès de l'installation d'un couvert végétal, il est conseillé d'épandre le topsoil sur des zones présentant une pente maximum de 30°.**



Figure 16 : Techniques de stabilisation des sols par utilisation de fascines (©SIRAS) ou géofilet (©UNC-IAC).

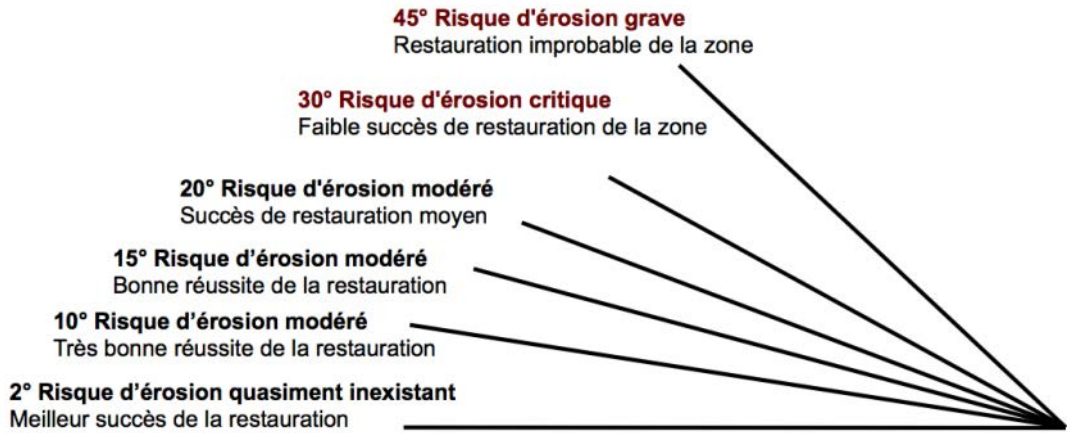


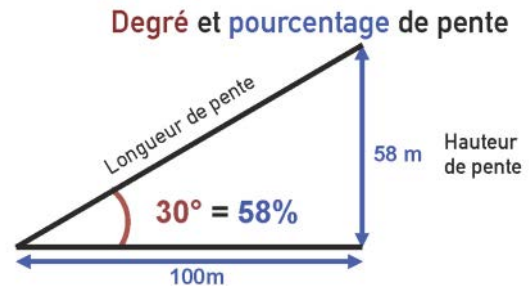
Figure 17 : Influence de la pente sur l'érosion et le succès de la revégétalisation. Epandage d'un substrat minimum de 30cm ne nécessitant pas de moyens de stabilisation possible jusqu'à 20°. Au delà et jusqu'à 30°, il devient nécessaire de mettre en place des dispositifs de stabilisation des ouvrages restaurés, de plus en plus importants. Au delà de 30°, les surfaces à restaurer ne permettent plus de retenir les épaisseurs de 30 cm de substrat, compromettant le développement d'un couvert végétal et la pérennité de la zone restaurée.



### Pourcentage de pente et degré de pente ?

Le degré de pente est celui de l'angle formé par la pente du toit et l'horizontale. Le pourcentage de la pente est le rapport entre la valeur en hauteur pour une valeur horizontale de 100.

Une pente à 30° et l'équivalent d'un dénivelé de 58%, c'est à dire que pour une distance parcourue, équivalente à 100m horizontale, la hauteur gagnée sera de 58m.



### **iii) Les moyens de stabilisation et de gestion des eaux**

L'évaluation des risques d'érosion hydrique doit être réalisée en concertation avec les responsables de la gestion des eaux sur mine et le coordinateur de la revégétalisation/restauration. La zone à traiter doit être mise hors d'eau par tous les moyens à disposition par modelage du profil du sol de manière à ralentir les eaux.

Dans le cas d'un talus (ou d'une zone pentue), il est conseillé la réalisation d'une tranchée en arrière de la crête qui pourra également être utilisée pour l'ancrage du géotextile le cas échéant. Des tranchées de drainage engravées peuvent également être mises en place si nécessaire dans les zones de pentes. L'utilisation d'ouvrage type murs bois est à envisager pour retenir des talus de forte pente notamment aux abords de routes ou autres constructions.

### **Travail du sol de la surface à traiter – une étape primordiale**

Il est fortement recommandé de prévoir une étape de travail du sol de la surface à restaurer par ripage ou décompactage, avant épandage du topsoil. Ceci permettra une meilleure continuité entre les deux substrats (même densité entre la surface d'accueil et le topsoil régale), améliorera le drainage de l'ensemble et la stabilité en créant des conditions plus favorables à l'installation ou à la reprise des jeunes plants et à leur enracinement profond.

L'épandage du topsoil sur une surface plus dense et compacte va créer un obstacle à l'enracinement et donc favoriser des systèmes racinaires superficiels (mauvaise résistance au vent, etc.) et limiter la plante dans son accès à l'eau, en particulier.

### **Protéger les zones restaurées**

Sur les massifs où les cerfs sont présents en nombre important, il est préférable de protéger le site restauré à l'aide d'une clôture, le temps que les plants soient plus résistants à l'abrutissement. (2 à 3 ans au minimum).

## EPANDAGE DU TOPSOIL

Pour optimiser le succès des travaux de restauration, l'épaisseur de substrat doit être d'au moins 30 cm. Les graines enfouies à des profondeurs supérieures à 5 cm (cf. « Récupération du topsoil ») seront perdues..

Il est donc conseillé de procéder à un épandage du topsoil en deux temps selon la configuration de la zone de récupération et les moyens à disposition :

1. Un apport préalable sur une épaisseur de 20 à 30 cm d'un substrat meuble servant de substrat d'accueil. Il peut s'agir
  - de topsoil dit « profond », lorsque celui-ci a pu être récupéré
  - de latérites rouges
  - de « vieux » topsoil stocké sur une longue durée supérieure à 24 mois.
2. Un apport de topsoil superficiel (prélevé sur les 10 premiers centimètres) par « saupoudrage » sur une épaisseur de 5 à 10 cm

**A noter que, dans le cas où la fraction de topsoil «superficiel» n'aurait pu être récupérée, il s'agirait alors au mieux d'épandre le topsoil non distingué issue de la méthode de récupération dite "alternative" sur un substrat d'accueil de latérites rouges ou de topsoil stocké, en couche fine de 5 à 10 cm maximum.**

**Si toutefois aucun substrat d'accueil n'était disponible, le topsoil devrait alors être étalé en couche de 30cm d'épaisseur minimum. Mais cela réduirait considérablement le potentiel de germination de celui-ci par un effet dilution et la surface potentiellement traitée sera réduite d'autant.**

Sur les talus, l'approvisionnement en substrat d'accueil, comme celui en topsoil, peut se faire soit depuis la crête, soit à partir du pied de talus. Sur talus comme sur les surfaces planes, les modalités d'approvisionnement en matériaux et de régilage doivent être pensées de façon à éviter aux engins de rouler sur les secteurs déjà régilés.

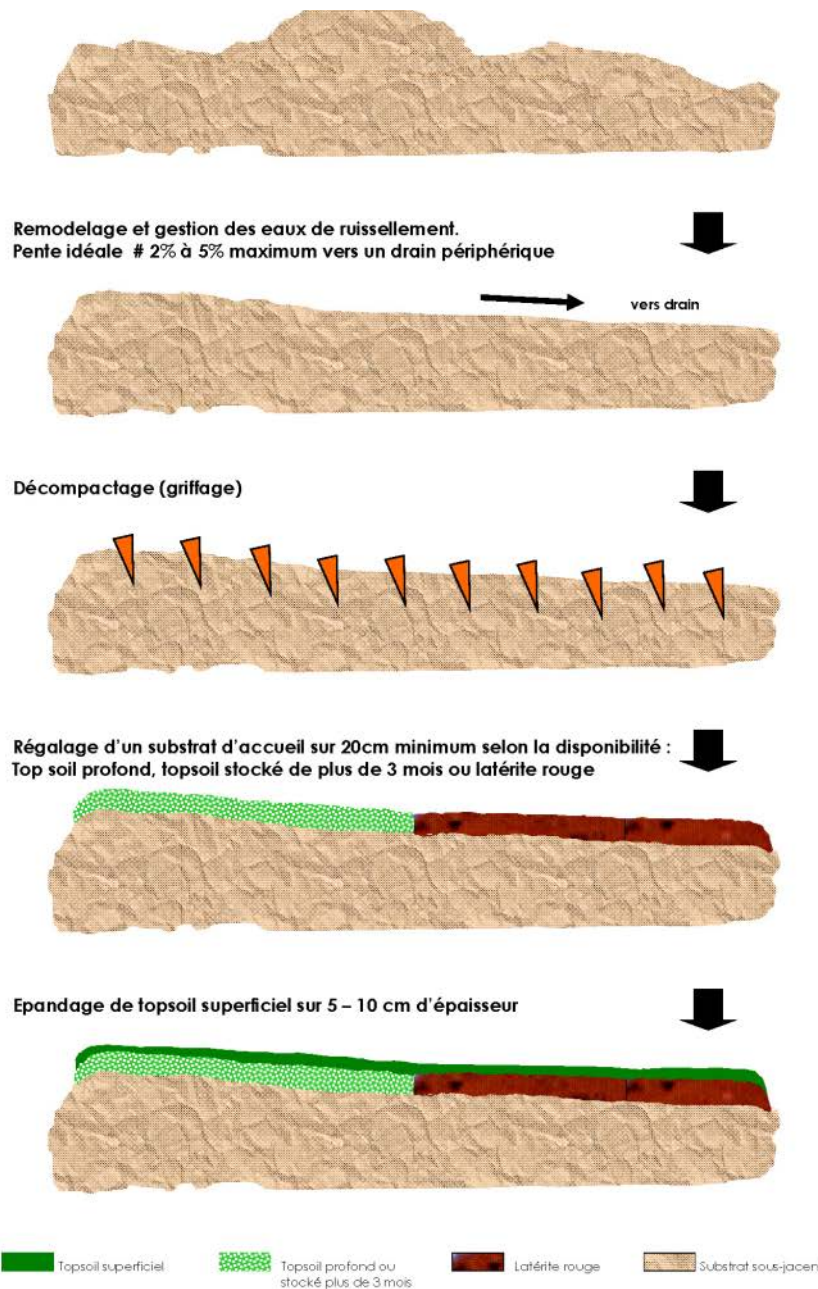


Figure 18 : Etapes de préparation des zones à restaurer et d'épandage de topsoil.



Figure 19 : Approvisionnement en topsoil et épandage sur zone.

## RECOMMANDATION : UN CALENDRIER DE GESTION DU TOPSOIL

**La saison chaude et humide est à la fois favorable au décapage et à l'épandage du topsoil**, alors que la saison fraîche et sèche paraît moins propice. En effet, les meilleurs taux de germination sont observés en saison chaude et humide. Ainsi, pour réussir l'implantation du couvert végétal, il est recommandé de procéder à l'épandage de topsoil durant cette période. Il est toutefois conseillé d'éviter de réaliser l'épandage de topsoil en fin de saison chaude et humide afin de permettre aux plantes de se développer suffisamment pour affronter la saison sèche qui suivra.

A l'inverse, **la préparation des surfaces à revégétaliser par topsoil peut-être réalisée durant la saison fraîche**. Il apparaît donc possible de coordonner les étapes de préparation des terrains à revégétaliser pendant la saison sèche, en planifiant la récupération et l'épandage immédiat de topsoil lors de saison chaude et humide suivante. Ceci maximisera les chances de succès des travaux de restauration mettant en œuvre l'«outil topsoil». A noter que la préparation des terrains en saison fraîche peut permettre, une fois la gestion de la pente et celle des eaux réalisées, l'épandage du substrat qui servira de surface d'accueil au topsoil en saison chaude (topsoils récupérés aux profondeurs supérieures à 10cm, latérites rouges, topsoils stockés éventuellement).

**IMPORTANT** : Bien entendu, le topsoil devra de préférence faire l'objet d'un épandage immédiat après sa récupération sous peine de voir la qualité du potentiel de restauration diminuer pendant stockage. Aussi, lorsque le défrichage se déroule en saison fraîche et sèche celui-ci devrait au maximum faire l'objet d'un transfert direct, sans stockage, ni attente de la saison chaude et humide suivante.

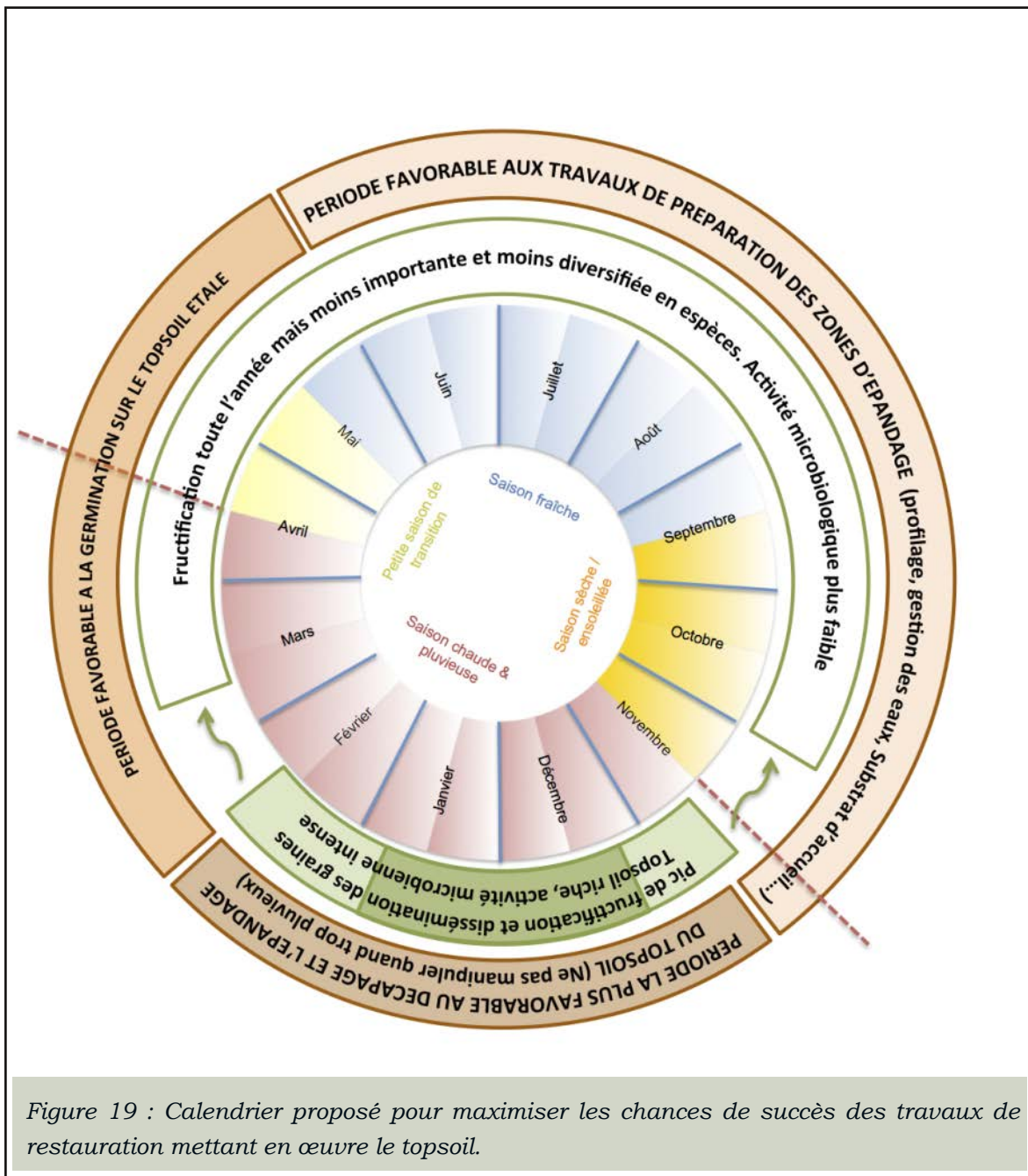


Figure 19 : Calendrier proposé pour maximiser les chances de succès des travaux de restauration mettant en œuvre le topsoil.

# 3

## LES TECHNIQUES COMPLEMENTAIRES DE RESTAURATION

**L**a régénération naturelle (via l'utilisation du topsoil), l'ensemencement et la plantation représentent les 3 principales techniques de revégétalisation à disposition pour initier le processus de restauration écologique d'un site dégradé.

La combinaison raisonnée de ces techniques représente la meilleure stratégie pour reconstituer le plus rapidement possible un couvert végétal diversifié.

Il est aujourd'hui démontré que l'utilisation du topsoil dans les travaux de restauration permet de gagner en efficacité et améliore les résultats des opérations de revégétalisation.

Il permet de compenser certaines contraintes inhérentes aux substrats dégradés et apporte en une seule opération l'essentiel des éléments nécessaires à la reconstitution d'un sol favorable au retour de la végétation et de la faune naturelle d'un site, accélérant la restauration des écosystèmes. Néanmoins, si l'utilisation de topsoil permet d'initier favorablement le retour d'un couvert végétal, elle n'en permet toutefois pas la restauration complète.

En effet, utilisé de façon optimale, le topsoil restitue en moyenne 30% de la diversité végétale d'origine (10% dans les cas observés les moins bons, 50% dans les meilleurs cas). Cette diversité d'origine étant variable d'un topsoil à l'autre.

En complément, semis ou plantations d'espèces natives permettront d'apporter de nouvelles espèces qui n'auront pas émergé de la banque de graines du topsoil, permettant ainsi de reconstituer plus rapidement un couvert végétal se rapprochant du couvert originel cible, tant d'un point de vue de la diversité spécifique, que des fonctions de l'écosystème.

Enfin, une partie de biodiversité sera assurée naturellement par recolonisation spontanée à partir des zones environnantes.

A noter que les espèces natives produites pour les plantations doivent provenir prioritairement de semences dont la diversité génétique est importante. Cependant certaines espèces posent des difficultés de germination et d’approvisionnement en graines, il convient alors de les produire par bouturage ou micro-bouturage (culture in vitro) tout en conservant au maximum la diversité génétique par prélèvement de boutures sur différents individus et populations, proches de la zone à restaurer.



### **Le topsoil s'exprime dans le temps !**

Avant d’envisager la mise en oeuvre de moyens complémentaires de végétalisation, il convient de laisser au topsoil le temps d’exprimer son potentiel de restauration. La banque de graines des topsoils peut en effet, selon les conditions météorologiques ou environnementales, mettre un certain temps à germer.

**Ainsi, il est conseillé d’attendre au moins une année pour déterminer, à partir de l’observation des espèces qui ont émergées de la banque de graines et de leur densité, les compléments à apporter. Cela permettra d’optimiser les efforts complémentaires par un choix raisonné de la densité et des espèces à réintroduire.**

Dans le cadre du projet CNRT BIOTOP, une évaluation a été faite sur les capacités théoriques, au regard des connaissances acquises, que nous avons de recréer un écosystème proche de celui d'un maquis paraforestier sur la zone du plateau de Goro. Cette analyse montre que sur les 55 espèces constitutives, 9 (16%) peuvent émerger du topsoil, 5 (9%) peuvent recoloniser à partir des milieux environnants, et que 34 espèces (62%) sont maîtrisées en germination ou par bouturage et peuvent donc être apportées par plantation ou semis.

S'il convient de dire que cette étude de cas est spécifique d'une expérimentation menée à un instant t, il n'en reste pas moins que cela montre clairement que nous avons les capacités de restaurer les milieux néo-calédoniens si tous les moyens optimaux sont mis en œuvre.



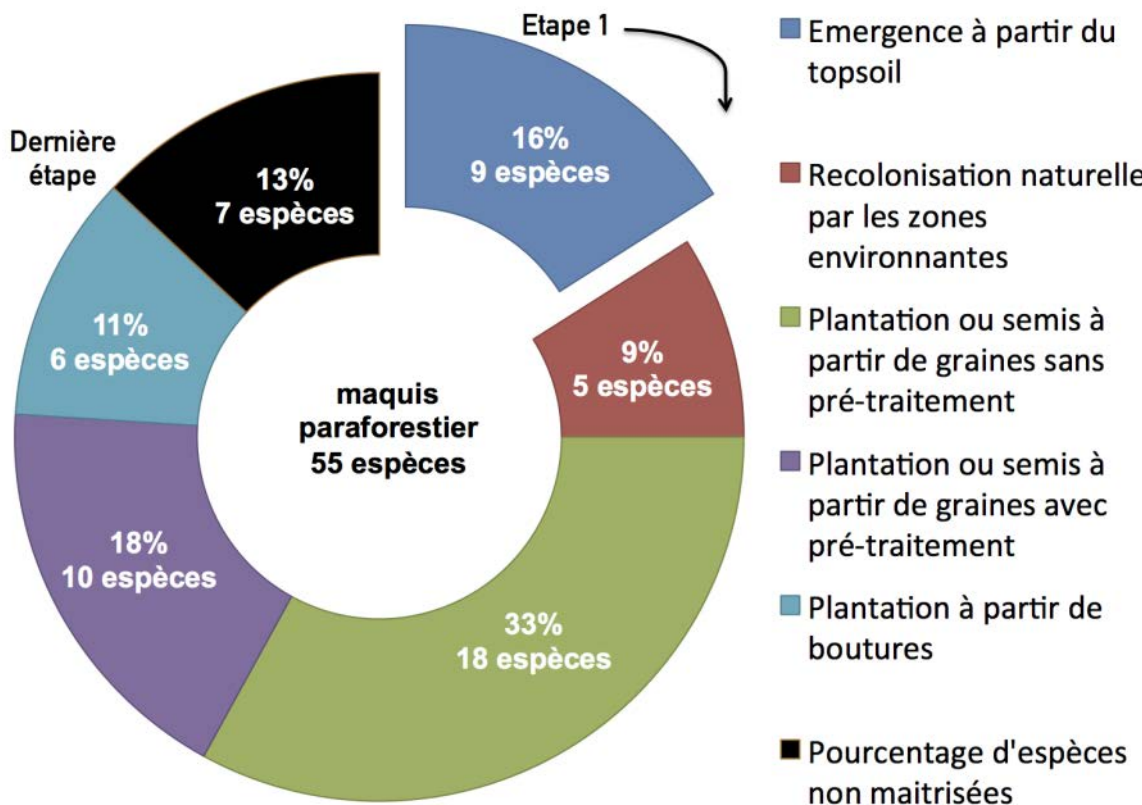


Figure 20 : Exemple de restauration d'un maquis paraforestier par utilisation combinées des techniques de restauration actuellement à disposition. Les travaux de restauration commencent par l'utilisation du topsoil. Un total de 85% d'espèces présentes dans le couvert végétal d'origine peut ainsi être restauré pour un coût réduit (d'après L'Huillier & Fogliani).

## **Topsoil et vision paysagère, le principe de continuité écologique**

Il apparaît important d'envisager l'utilisation du topsoil dans une vision «paysagère» de la restauration écologique, intégrant le concept de continuité écologique.

Le plan de restauration écologique doit être pensé en considérant les zones naturelles alentours, particulièrement les zones para- ou pré-forestières et forestières, véritables réservoirs de semences qui par dispersion pourront enrichir spontanément les zones revegetalisées/restaurées.

Différentes modalités peuvent être envisagées pour la restauration : en plein ou par la création d'îlots de végétation jouant le rôle de zones sources pour la reconquête végétale.



Cette structure paysagère en « pas japonais » accompagnée de l'implantation d'un topsoil bien géré, qui pourra être complété si besoin par plantation d'espèces clés de type zoochore (dont les graines sont dispersées par les animaux), favorise une recolonisation dans le temps par extension des îlots qui finiront pas se rejoindre. Des travaux scientifiques en cours cherchent à déterminer la distance optimale entre les îlots.

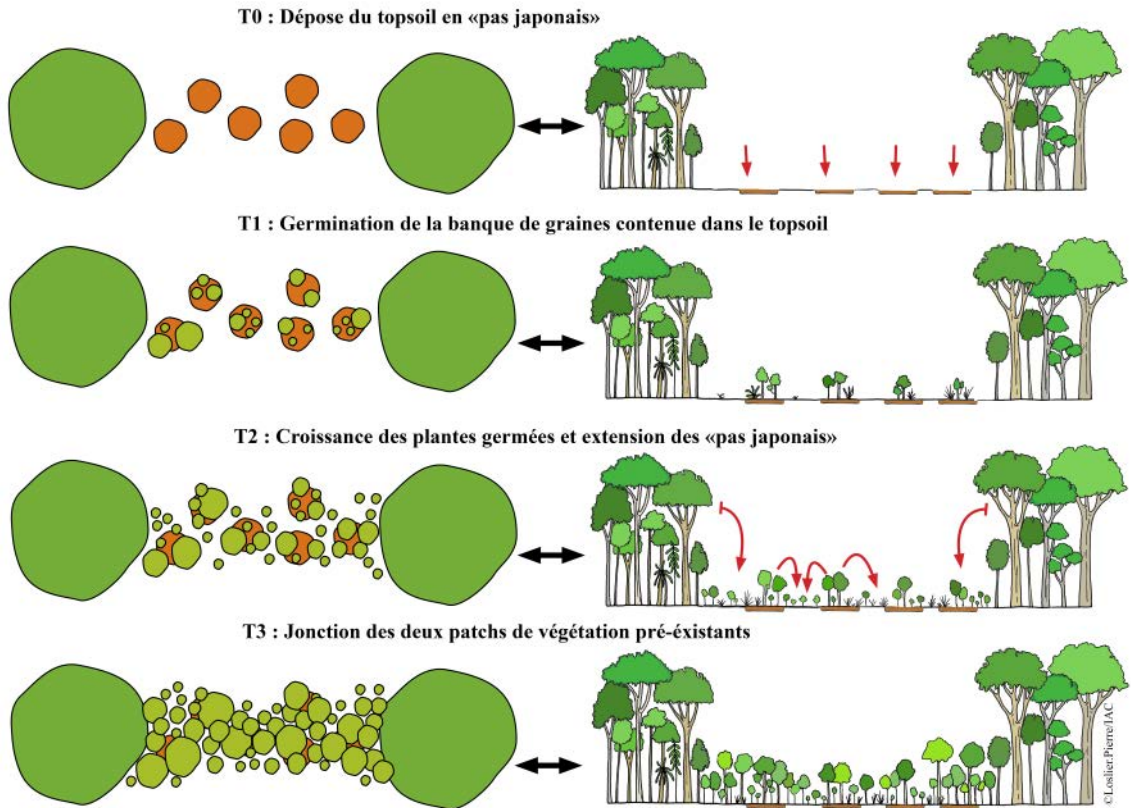


Figure 21 : Illustration de restauration en « pas japonais » par utilisation de topsoil (qui peut être complémenté par plantation ou semis) et évolution dans le temps pour aboutir à la restauration des connectivités (d'après Fogliani & Ititiaty ; illustrations P. Loslier : A gauche vue de dessus, à droite vue de profil).



# 4

## LA TRACABILITE ET RETOURS D'EXPERIENCES

**L**es recommandations contenues dans ce guide méthodologique, à destination des opérateurs miniers et des professionnels de la restauration écologique, sont issues des résultats d'études scientifiques et d'observations menées à l'échelle du territoire.

Ce sont des recommandations de bon usage qui permettront globalement d'optimiser l'utilisation du topsoil disponible sur chaque centre minier. Mais les résultats seront variables selon les conditions environnementales et les moyens humains et matériels à disposition.

Il appartient à chacun d'adapter les modalités à son contexte et de tirer des enseignements des expériences réalisées. Pour ce faire, la mise en place d'une procédure permettant d'établir une traçabilité des topsoils sera très utile.

La traçabilité est un outil d'amélioration continue qui permettra d'améliorer les résultats liés à l'utilisation des topsoils.

Cette procédure peut être adoptée au niveau de chaque centre minier et mise en œuvre par les membres des équipes responsables des travaux de restauration en consignnant les informations utiles avant récupération, au cours des différentes manipulations des matériaux jusqu'au régilage et y compris pendant la phase de suivi des résultats.

*Une fiche de traçabilité type est proposée ci-après.*

### I. RECONNAISSANCE DE LA ZONE

Date de la reconnaissance

Personne en charge de la reconnaissance

Localisation et coordonnées de la zone

Topographie de la zone  Exposition de la zone

Altitude de la zone

Présence de fourmis envahissantes Oui  Non  Si oui, lesquelles

Présence d'autres espèces envahissantes Oui  Non

Personne(s) ayant réalisé l'inventaire floristique

Formation végétale de la zone

Nombre d'espèces identifiées

Liste espèces récoltées

Liste espèces transplantées

Volume estimé de topsoil pouvant être récupéré

Volume estimé de latérites pouvant être récupéré

Nécessité de prévoir l'évacuation de gros individus de la végétation avant décapage

### II. DÉFRICHEMENT ET RÉCUPÉRATION DU TOPSOIL ET LATÉRITES

Date du défrichage

Méthode de récupération 3 étapes  2 étapes   
(fraction supérieure et inférieure et curage) (1 fraction et curage)

Engin(s) utilisé(s)

Temps entre récupération et évacuation

Récupération de latérites rouges Oui  Non

### PRÉPARATION DE LA ZONE A RESTAURER CORRESPONDANTE

Localisation et coordonnées de la zone

Altitude de la zone  Exposition de la zone

Reprise de pente Oui  Non  Pente avant (en degré)  Pente après (en degré)

Gestion des eaux Oui  Non  Travail du sol Oui  Non  Date des travaux

### III. EPANDAGE

Date épandage substrat d'accueil  Nature substrat d'accueil

Épaisseur du substrat d'accueil  Engin(s) utilisé(s)

Date épandage du topsoil et épaisseur  Engin(s) utilisé(s)

Mise en place de moyen de stabilisation Oui  Non  Si oui, lesquels

Figure 22 : Exemple de fiche pour la traçabilité des topsoils et la mise en place de moyens complémentaires suite à leur réponse.

#### IV. SUIVI APRES UN AN

Nombre d'espèces germées

Densité réelle ou estimée

Mise en place de moyens complémentaires Oui  Non  Si oui, lesquels  
(plantation, semis ...)

Date de la mise en place

Liste espèces utilisées

Utilisation de fertilisants, d'amendements Oui  Non  Si oui, lesquels

*décrire avec un maximum de précision*

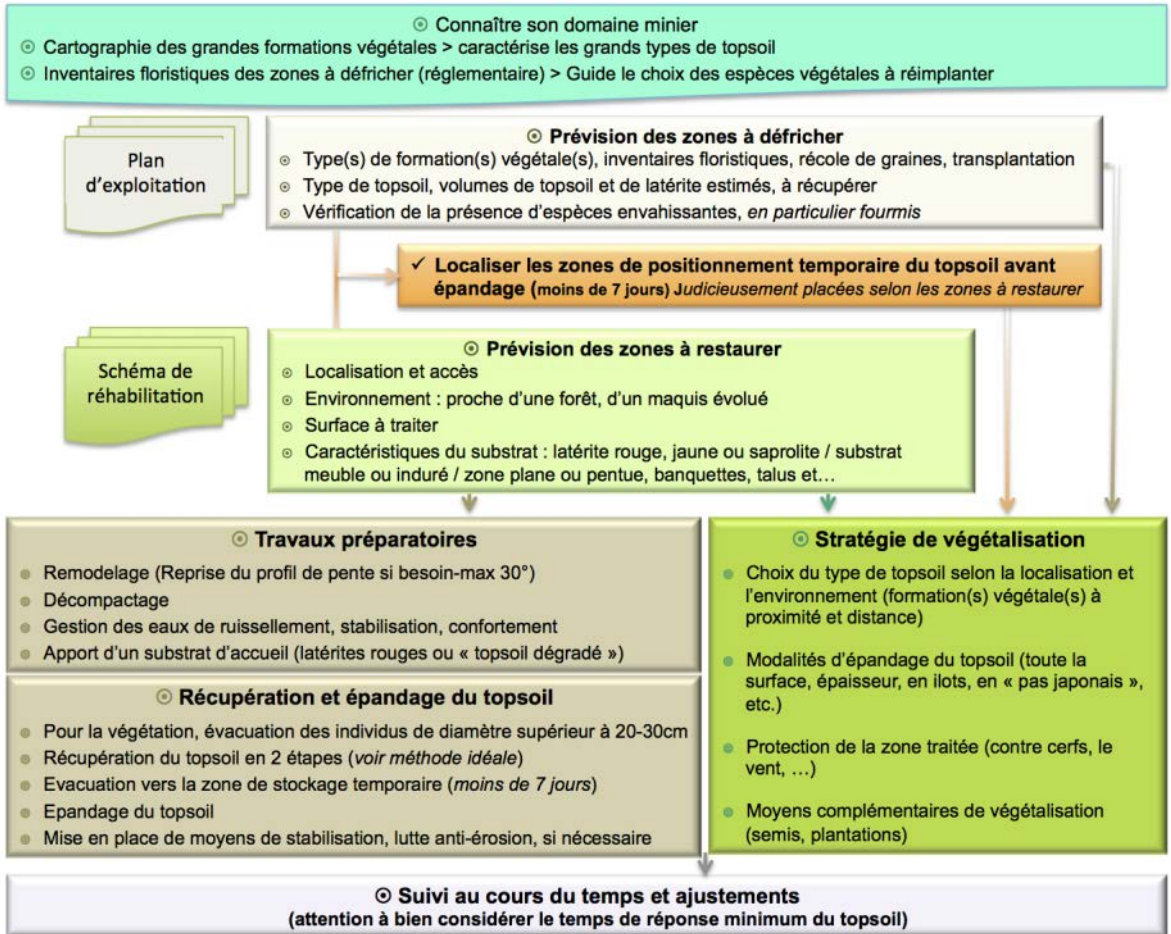
#### V. SUIVI APRES DEUX ANS

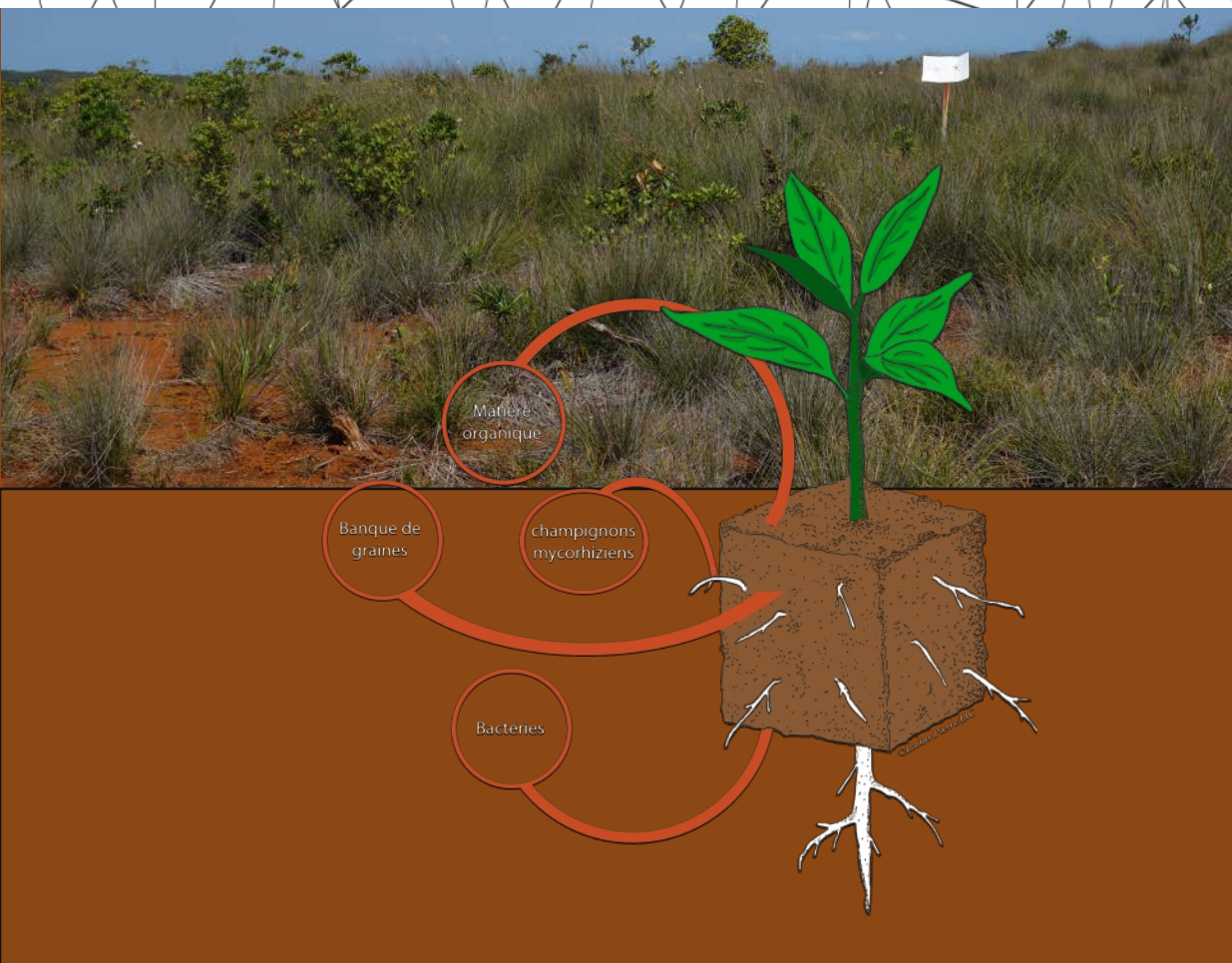
#### VI. SUIVI APRES CINQ ANS

# 5

## L'ESSENTIEL A RETENIR

### Résumé des différentes étapes pour une utilisation optimale des topsoils





## CREDITS PHOTOGRAPHIQUES

UNC (Université de la Nouvelle-Calédonie)  
IAC (Institut Agronomique Néo-Calédonien)

