

La réhabilitation des mines et carrières à ciel ouvert

Ce travail est le condensé d'une étude bibliographique sur la réhabilitation et la revégétalisation des sites miniers. Les aspects législatifs sont abordés ainsi que le contexte environnemental et économique. Il est proposé des solutions techniques aux difficultés rencontrées couramment lors de la réhabilitation des mines et carrières à ciel ouvert.



Christine LE ROUX
Cirad
LSTM (Laboratoire des symbioses
tropicales méditerranéennes)
Campus de Baillarguet
TA 10/J
34398 Montpellier Cedex 5
France

L'installation de brise-vent et de plantes de couverture contre les vents de sable permet la germination plus lente d'*Acacia karroo*.
Windbreaks and cover plants help protect slow-germinating Acacia karroo against sandstorms.

Photo A. Bannister, avec l'aimable autorisation de RBM.

RÉSUMÉ

LA RÉHABILITATION DES MINES
ET CARRIÈRES À CIEL OUVERT

Pour attirer l'investissement, nombre de pays développent activement leur secteur minier. Les dommages environnementaux qui en résultent peuvent être importants. Ils le sont d'autant plus que la réglementation du pays est insuffisante. Par ailleurs, les compagnies minières sont en compétition pour l'accès aux différents sites d'exploration et d'exploitation. Or l'affichage d'une attitude responsable vis-à-vis de l'environnement est un moyen pour les compagnies d'être crédibles et compétitives. La prise de conscience de la nécessité de la réhabilitation minière est toutefois récente. Beaucoup de sites sont encore abandonnés après l'exploitation. Pourtant, certaines compagnies, d'envergure internationale le plus souvent, adoptent de hauts standards environnementaux, financent des études d'impact, des recherches sur la réhabilitation et la restauration écologique. En effet, un site minier subit des stress importants sur le plan physique, chimique et biologique. Une bonne gestion de la réhabilitation peut atténuer et même résoudre ces problèmes. Il faut pour cela aménager le terrain de façon à limiter l'érosion et la compaction du sol, tirer rapidement profit des potentialités biologiques du sol de couverture, pallier les carences nutritives (par l'amendement, la fertilisation, la fixation biologique de l'azote et la mycorrhization), réduire les toxicités métalliques, créer un microclimat favorable à la germination des plantes, choisir des espèces adaptées. Ce choix prendra en compte les espèces pionnières et les espèces natives. Il portera aussi sur les associations d'espèces et leur succession à plus long terme. Il apparaît que, quel que soit le site, l'utilisation d'espèces fixatrices d'azote est bénéfique, voire indispensable au succès de la réhabilitation.

Mots-clés : réhabilitation minière, revégétalisation, restauration écologique.

ABSTRACT

REHABILITATING OPEN-CAST
MINES AND QUARRIES

Many countries are actively developing their mining sectors to attract investment. This can result in considerable environmental damage, all the more so in countries with inadequate regulations in this area. Adding to the problem is the fact that mining companies are competing for access to prospecting and mining sites. For companies, displaying an environmentally responsible attitude is a way of enhancing their credibility and competitiveness. However, awareness of the need to rehabilitate mining sites is a recent phenomenon, and many are still being abandoned once they cease to operate. Nevertheless, some companies, mainly those of international stature, are now adopting strict environmental standards and financing impact studies and research on ecological rehabilitation and restoration. Mining sites are subject to high levels of physical, chemical and biological stress. Sound rehabilitation management can help to reduce and sometimes solve the ensuing problems. Achieving these objectives requires managing the terrain to limit erosion and soil compaction, rapidly making use of the biological potential of available topsoil, remedying nutrient deficiencies (by adding soil improvement material and fertiliser and planting nitrogen-fixing and mycorrhiza-bearing species), reducing toxic metal concentrations, creating a microclimate that promotes germination and selecting appropriate species. The selection should be made among pioneer and native species, and should also consider species associations and successions over the longer term. Whatever the site under consideration, the use of nitrogen-fixing species is always beneficial and even essential to successful rehabilitation.

Keywords: mining site rehabilitation, revegetation, ecological restoration.

RESUMEN

LA REHABILITACIÓN DE MINAS
Y CANTERAS A CIELO ABIERTO

Para atraer las inversiones, muchos países desarrollan activamente su sector minero, lo que puede acarrear daños considerables al medio ambiente; fenómeno amplificado por la insuficiencia de la reglamentación de los países. Por otro lado, las compañías mineras compiten para acceder a los distintos sitios de exploración y explotación. Ahora bien, el mostrar una actitud responsable hacia el medio ambiente es un medio para las compañías de ser creíbles y competitivas. No obstante, la concienciación sobre la necesidad de la rehabilitación minera es reciente. Aún se abandonan muchos sitios tras su explotación. Sin embargo, algunas compañías, generalmente de dimensión internacional, adoptan normas medioambientales exigentes, financian estudios de impacto, investigaciones sobre rehabilitación y restauración ecológica. En efecto, una explotación minera sufre importantes estreses físicos, químicos y biológicos. Una adecuada gestión de la rehabilitación puede disminuir e incluso resolver tales problemas. Para ello, hay que acondicionar el terreno de manera que se limite la erosión y la compactación del suelo, aprovechar rápidamente las potencialidades biológicas del suelo de cobertura, paliar las carencias nutritivas (mediante enmiendas, fertilización, fijación química del nitrógeno y micorrización), reducir las toxicidades metálicas, crear un microclima favorable para la germinación de plantas y elegir especies adaptadas. Esta elección tendrá en cuenta las especies pioneras y las especies nativas, sin olvidar las asociaciones de especies y su sucesión en un plazo más largo. Se observa que, sea cual sea el sitio, el empleo de especies fijadoras de nitrógeno es beneficioso e incluso indispensable para el éxito de la rehabilitación.

Palabras clave: rehabilitación minera, revegetación, restauración ecológica.

Introduction

Les activités extractives ont des répercussions notables sur l'environnement, surtout depuis la mécanisation de l'exploitation. En dehors de l'impact esthétique négatif, les sites laissés à l'abandon n'ont plus ni sol ni végétation, sont même généralement abiotiques, fortement soumis à l'érosion et susceptibles de polluer une large zone alentour. On peut distinguer plusieurs niveaux d'intervention sur ces sites dégradés, la réhabilitation étant le processus de réparation des effets de l'exploitation sur l'environnement. Elle peut ne consister qu'en une stabilisation et une mise en sûreté de la zone, ou bien en un simple reverdissement, mais elle peut aller jusqu'à la restauration écologique. C'est le niveau d'intervention le plus abouti, l'intégralité de l'écosystème original devant être restaurée. Dans ce cas, le rôle de la revégétalisation sera d'accélérer la succession naturelle des espèces.

Les aspects législatifs de la réhabilitation

Face à l'impact des mines et des carrières, la plupart des pays ont mis en place une législation, celle-ci étant plus ou moins précise et exigeante. En France, il y a obligation de garanties financières afin d'assurer la remise en état du site après l'exploitation d'une carrière. Dans l'exploitation minière, par contre, il n'y a pas cette obligation de garanties, mais le mode de remise en état est précisé dans le dossier de demande d'autorisation d'ouverture. Que ce soit pour les carrières ou les mines, la revégétalisation est demandée, mais elle n'est pas explicitement exigée par la loi. En ce qui concerne les départements d'outre-mer, l'extension du code minier métropolitain y est très récente puisqu'elle ne date que d'avril 1998. Dans les territoires d'outre-mer français, on peut noter par exemple qu'en Nouvelle-Calédonie il n'existe actuellement pas d'obligation réglementaire de réhabilitation des mines, mais cela va changer puisque le Territoire est en train d'élaborer une police des mines.

Aux États-Unis, la loi SMCR (Surface Mining Control and Reclamation Act) demande le rétablissement d'un paysage stabilisé où le ruissellement et l'érosion sont contrôlés, mais aussi le rétablissement d'une couverture végétale permanente et diversifiée qui inclut pratiquement toutes les espèces d'origine (BARNHISEL, HOWER, 1997). Cette loi a malheureusement freiné les plantations de ligneux car une couverture végétale herbacée suffit à la restitution des dépôts de garantie aux compagnies. Par ailleurs, dans beaucoup de pays (Bolivie, Colombie, Brésil, Jamaïque, Malaisie...), des programmes de reforestation sont en cours.

En Australie, les recherches en matière de réhabilitation ont démarré plus tard qu'aux États-Unis, et la législation s'est fondée sur les exigences de l'environnement local. Les propositions détaillées de réhabilitation ne sont pas exigées au moment où la licence est accordée, mais il en faut l'approbation avant que l'exploitation commence. Un rapport annuel est fourni par la compagnie, avec un suivi, entre autres, de la revégétalisation.

Carte 1.

Sites et pays référencés dans le texte.
Sites and countries referred to in the text.





Revégétalisation d'un site d'orpaillage en Guyane par l'ONF. Les plants d'*Acacia mangium* (âgés ici de quatre mois) sont installés sur les matériaux de comblement des bassins de sédimentation.

Revegetation of a gold panning site in French Guyana by the ONF (Office national des forêts, the French forestry office). Seedlings of Acacia mangium (aged four months in this example) have been established on infill material in sedimentation basins.

Photo C. Le Roux.

Plus près de nous, en Allemagne, la densité de population a forcé les opérateurs de mines à ciel ouvert à remettre en culture les anciens sites miniers, et ce depuis le début du siècle à l'Ouest, mais beaucoup plus récemment à l'Est (WUERZ, 1986).

La réhabilitation est parfois obligatoire, comme au Royaume-Uni, avec le redépôt du sol décapé, ou au Brésil, par le dépôt de 20 cm de sol de couverture. Plus généralement, la réhabilitation est souvent requise, mais sans être obligatoirement assor-

tie de la nécessité de rétablir la couverture végétale (comme au Zimbabwe). Lorsque la réhabilitation implique la revégétalisation, cette injonction n'est pas obligatoirement suivie, comme en Chine. Globalement, dans beaucoup de pays du Sud, il n'y a pas ou peu de réhabilitation, soit parce que les opérations sont de petite taille (artisanales), soit parce que la loi est inexistante ou pas appliquée. Cette insuffisance de moyens d'action est observée au Brésil, sur la mine de nickel de Macedo, dans l'État de Goiás (BROOKS *et al.*, 1998). Les exploitations à grande échelle sont, en revanche, conduites par des organisations internationales qui imposent des standards environnementaux internationaux à l'opérateur minier.

Par ailleurs, le désir d'attirer les investissements étrangers, ou le besoin d'accroître les exportations, font que beaucoup de gouvernements ont ouvert grand leurs portes aux compagnies minières, ce qui conduit actuellement à un regain des prospections et des exploitations (5)¹. Or un pays est d'autant plus attractif pour les investisseurs qu'il a une attitude laxiste en matière de protection de l'environnement, ou que le développement de ce secteur d'activité est encore trop récent pour être accompagné d'une législation. C'est le cas de l'Argentine, où ce sont les carrières qui constituent la principale activité extractive (avec 65 % du PNB minier). Le gouvernement a toutefois mis en place un plan volontariste de développement du secteur minier, et les compagnies internationales arrivent en force, car le nouveau cadre juridique minier, très libéral, est calqué sur celui du Chili (où cela a déjà entraîné des problèmes environnementaux). Le nombre d'entreprises minières internationales implantées en Argentine est passé de 4 en 1989 à 60 en 1996. Le Botswana, Cuba, le Venezuela, le Ghana, le Burundi, le Honduras, le Guatemala sont également devenus des pôles de développement des activités minières.

L'image des compagnies d'exploitation minière et l'impact minier

L'image que renvoient les compagnies est contrastée. Parfois, leurs objectifs sont uniquement financiers, au mépris des populations et de l'environnement. Certaines compagnies ont même été impliquées dans de graves conflits, favorisés souvent par la complexité des régimes fonciers.

D'autres compagnies ont une attitude qui se veut, au contraire, responsable vis-à-vis de l'environnement. Elles adoptent les standards les plus performants possible malgré les différences législatives suivant les pays. Beaucoup de compagnies essaient de réduire au minimum l'impact sur l'environnement, de réparer tout effet négatif, de reconstruire un écosystème original ou de s'approcher le plus possible de l'état initial du site. Elles conduisent des recherches sur la faune et la flore, maximisent la conservation de la biodiversité et préconisent le choix des espèces indigènes pour la revégétalisation.

C'est le cas de la multinationale Rio Tinto. Ce géant est né, en 1995, de la fusion de deux conglomérats, l'un du Royaume-Uni et l'autre australien. Implanté dans quarante pays, il emploie 51 000 personnes. Les sites miniers sont soumis à des études d'impact, un suivi et des audits environnementaux. À Madagascar, dans le projet d'exploitation de dépôts d'ilménite (dioxyde de titane), près de Tolagnaro, au sud-est de l'île, QIT (Quebec Iron & Titanium, filiale canadienne de Rio Tinto) évalue depuis 1986 les possibilités d'exploitation de ce site. Avant qu'une décision d'exploitation soit prise, QIT fait réaliser des études sociales, environnementales et techniques, avec une large consultation de la population, des discussions avec le gouvernement malgache, la Banque mondiale, WWF,

¹ Les chiffres entre parenthèses renvoient aux références Internet figurant en fin d'article.

et d'autres groupes d'intérêt local. L'idée de base de ce projet est qu'en l'absence de tout développement économique la pression des populations sur la forêt côtière va se poursuivre, à tel point que cette forêt sera totalement détruite dans vingt ou quarante ans. Le projet propose la création de zones de conservation de la faune et de la flore, incluant une partie de la forêt littorale, tandis que, dans les zones défrichées du fait de l'exploitation de l'ilménite, des essences commerciales seront plantées, ce qui permettra d'alléger la pression existante sur la forêt.

Sous un autre climat, à Sudbury au Canada, la compagnie Inco (International Nickel Company) mène ses programmes de revégétalisation. Ses efforts ont été reconnus en 1992, au sommet de Rio, pour l'excellence de son travail environnemental dans la transformation de deux mille hectares désertiques en un tapis herbacé et arboré, à partir de pins provenant de ses pépinières. La production est de 100 000 plants par an. Inco possède également un site unique de production, à 1 400 m de profondeur, avec éclairage adapté et arrosage automatisé. La température constante de 24 °C permet une production de pins tout au long de l'année (1).

Un autre exemple positif dans l'industrie minière est la création, en 1993, du centre australien de recherche en réhabilitation minière (ACMRR), rebaptisé récemment ACMER (Australian Center for Mining Environmental Research), dont le rôle est de répondre aux besoins de l'industrie sur le plan environnemental, de regrouper les recherches et d'analyser les résultats des expérimentations sur le long terme. Ce centre travaille en partenariat, entre autres, avec le Csiro (organisme australien de recherche scientifique et industrielle) et des universités. Comme les compagnies d'exploitation sont jugées principalement sur leur comportement environnemental, l'industrie minière australienne vise l'excellence dans ce domaine. C'est ainsi qu'est né le code de l'industrie

minière australienne pour la gestion de l'environnement, incluant, entre autres, le principe de développement durable (2). Les compagnies se sont longtemps focalisées sur les bénéfices économiques. En s'orientant vers le développement durable, elles prennent toujours en compte les aspects économiques, mais ceux-ci ne sont plus prioritaires par rapport aux considérations de santé, de sécurité et d'environnement (3).

WMC (Western Mining Corporation), une compagnie australienne qui est le troisième producteur mondial de nickel, s'inscrit tout à fait dans cette vision de la « *sustainability* », qui est de concilier les besoins actuels de développement social, économique et environnemental, sans compromettre la satisfaction des besoins des générations futures (4), de garder comme objectif l'accroissement des profits et de la valeur des actions, mais à travers un comportement social et environnemental responsable. Selon WMC, « la compétition pour l'accès à l'exploration et à l'exploitation minières est intense. De faibles performances environnementales freinent la capacité d'une compagnie à attirer les meilleurs éléments, le capital et l'appui de la collectivité. Pour simplifier, une bonne gestion de l'environnement, c'est du bon business » (4).

On est passé ainsi d'une période de forte opposition entre les ONG et les compagnies minières à une coopération plus constructive, avec la parution de guides de bonne conduite des opérations dans l'industrie minière. Pour les ONG, l'activité des compagnies minières peut avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur l'environnement et les collectivités locales. Elles constituent parfois les seules sources de capital pour le développement et les infrastructures. Le partenariat ONG-compagnies minières peut éviter ou limiter les impacts délétères. Le but est ainsi d'infléchir la philosophie industrielle en faveur de l'environnement, cela pouvant se faire par l'attribution d'une certification indépendante aux résultats de gestion environnementale d'une compagnie minière. Ce partenariat, on l'a vu, peut être bénéfique pour la compagnie minière, dans le sens d'une confiance accrue de la collectivité et d'un avantage compétitif, car elle prouve ainsi son engagement en faveur du développement durable (3).

Mine à ciel ouvert de Berkely Pit à Butte (Montana, États-Unis). Vue d'un bassin de 240 m de profondeur pollué par du cuivre. *The Berkely Pit open-cast mine in Butte (Montana, USA). This 240 m deep basin has been polluted by copper.*
Photo C. Le Roux.



Les clés de la réhabilitation et l'intérêt des symbioses

La réhabilitation intégrée

Dans le cas d'une dégradation avancée, la persistance de stress physiques, chimiques et biologiques empêche la succession des processus forestiers naturels de s'opérer à un rythme compatible avec les besoins humains. Il faut donc penser, avant de commencer l'exploitation, au cycle entier de vie de la mine pour y incorporer la remise en valeur progressive et préserver le sol de surface. Lone Star (Washington) est une carrière de sable et de gravier où les zones exploitées sont réhabilitées au fur et à mesure de l'exploitation : préparation, extraction et remise en état sont intégrées à l'exploitation. Cette pratique réduit la quantité de matériaux déplacés et manipulés. De ce fait, la biomasse et l'activité microbiennes sont moins longues à se rétablir qu'en cas de stockage du sol (The Department for the Environment, 1996).

L'utilisation du sol de couverture

Dans la plupart des cas, la remise en place du sol de surface est le meilleur moyen de restaurer la productivité (BARNISH, HOWER, 1997). Pourtant, le coût d'apport de sol de couverture venant d'un autre endroit peut être prohibitif. Cette technique est néanmoins couramment utilisée pour végétaliser des substrats très toxiques, fortement acides ou basiques, s'opposant à toute vie végétale. C'est ce qu'ont fait en Nouvelle-Calédonie deux compagnies, la Cider Nord et la SLN, en recouvrant sur plusieurs sites les substrats dénudés avec de la terre fertile (du sol d'alluvions). Cette technique ne permet pas toujours la fixation du sol car les racines ont tendance à n'explorer que la couche superficielle.



Parcelle d'*Acacia mangium* (âgés de trois ans et demi) sur la mine d'or Boulanger en Guyane. La hauteur moyenne des arbres est de 8 m.

A plot of three and a half year-old Acacia mangium planted on the Boulanger gold mine site in Guyana. The trees have reached an average height of 8 m.

Photo C. Le Roux.

Dans certains cas, comme celui des terrils de schiste houiller à Saint-Étienne (France), pour éviter le développement des adventices et pour réduire le coût de la végétalisation, celle-ci a lieu sans apport de terre végétale. Les déblais peuvent même être préférables au sol de couverture, quand celui-ci a été stocké trop longtemps. Le sol a alors perdu sa microflore et sa microfaune, les nutriments ont été lessivés et il est devenu une source de mauvaises herbes.

Une alternative au sol de couverture

Elle consiste en l'utilisation d'espèces fixatrices d'azote, qui peuvent être mises en place directement sur le substrat brut (MOIROUD *et al.*, 1991). Des expérimentations de revégétalisation ont été menées sur la mine de Porto Trombetas (Brésil). Les légumineuses nodulées (*Acacia mangium*, *Acacia holosericea*, *Acacia angustissima*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Clitoria fairchildiana* et des albizzias) ont montré une croissance plus rapide que les légumineuses ne nodulant pas. La revégétalisation est dans ce cas recommandée avec des espèces arborées nodulées mais aussi mycorhizées (FRANCO *et al.*, 1994) ; en effet, les plantes mycorhizées, du fait de leur croissance améliorée et de leur capacité à exploiter les minéraux du sol, offrent une meilleure protection contre l'érosion. Le taux de survie des plantes sera augmenté (LUGO, 1997)

et la succession écologique facilitée (6). En Inde, au Rajasthan, les champignons mycorhiziens sont considérés comme indispensables dans la restauration des sites dégradés (RAO, TARAFDAR, 1998). En Floride, une préinoculation endomycorhizienne s'est avérée essentielle pour l'établissement d'un écosystème forestier sur mines de phosphate. C'est encore le cas de la mine d'uranium Ranger (Australie), où les difficultés d'établissement de certains eucalyptus ont été en partie résolues par leur mycorhization et par l'utilisation d'une litière d'eucalyptus (7). En Nouvelle-Calédonie également, la mycorhization du pin des Caraïbes (*Pinus caribaea*) a permis sa bonne croissance sur substrat ferrallitique (PELLETIER, ESTERLE, 1995).

La décompaction du substrat

Le substrat compacté de la mine manque d'un réseau macroporeux facilitant les mouvements de l'eau, l'aération et l'extension du système racinaire. Il vaut mieux alors replacer les déblais en évitant la compaction, plutôt que d'essayer de la réduire *a posteriori* (The Department for the Environment, 1996). Néanmoins, quand la compaction n'a pu être évitée, il faut l'alléger : un labourage profond, sur plus de 45 cm, permettra la pénétration racinaire, l'infiltration de l'eau (BARNISH, HOWER, 1997) et la lutte contre l'érosion.

L'amendement et la fertilisation

En l'absence de sol de couverture, on peut amender le substrat par l'épandage de boues de stations d'épuration. Cet épandage peut faciliter l'établissement de la végétation (SOPPER, SEAKER, 1986), car il permet de remonter le pH du sol : c'est une source de carbone et une source alternative d'azote (BARNHISEL, HOWER, 1997). Les déblais miniers sont, en effet, très fréquemment déficients en azote et en micro-organismes capables de convertir l'azote de l'air sous une forme assimilable pour les plantes. En dehors de l'épandage des boues, on utilise principalement des fertilisants et des agents neutralisants (BARNHISEL, HOWER, 1997). Par exemple, sur le site de Sudbury (Ontario), le reverdissement s'est fait à l'aide d'un mélange d'herbacées et de légumineuses indigènes, d'application de chaux (50 t/ha) et d'engrais (1 t/ha). De la même façon, en Australie, sur la mine de Eneabba, l'établissement de la plante de couverture et du mélange de graines d'espèces indigènes a été stimulé par l'ajout d'engrais (200 kg/ha de superphosphate avec oligoéléments) (7).

L'utilisation de légumineuses, seules ou en mélange, permet de réduire les applications de fertilisants (The Department for the Environment, 1996), car les bactéries fixatrices d'azote apportées par l'inoculation confèrent aux espèces végétales associées un avantage indéniable pour se développer sur des sols dépourvus de matière organique. La revégétalisation effective des mines de gypse du Rajasthan passe par le rétablissement des cycles nutritifs. Neuf arbres ont été sélectionnés pour leur importance économique et pour leur capacité à réhabiliter les mines de gypse sans aucun amendement. Il s'agit d'*Acacia senegal*, *A. tortilis*, *Azadirachta indica*, de *Colophospermum mopane*, *Dichrostachys nutans*, *Pithecellobium dulce*, *Prosopis juliflora*, *Salvadora oleoides* et *Zizyphus*

nummularia (RAO, TARAFDAR, 1998). En France, sur les sites de Millery (Rhône) et Voglans (Savoie), l'inoculation de plantes actinorhiziennes et de légumineuses a permis d'améliorer fortement leur taux de survie (MOIROUD *et al.*, 1991).

L'adaptation à la toxicité

En Nouvelle-Calédonie, face au problème très sérieux de la phytotoxicité des sites miniers, l'utilisation de plantes pionnières fixatrices symbiotiques d'azote, comme *Acacia spirorbis* et *Casuarina collina* qui sont des plantes indigènes présentant une haute résistance aux conditions édaphiques défavorables, fait partie de la stratégie de revégétalisation (BROOKS *et al.*, 1998).

Mine de cuivre de Bingham (Utah, Montana) exploitée depuis 1906 par Kennecott. L'excavation mesure près de 1 km de profondeur sur 4 km de large. Chaque jour, 450 000 t de matériaux sont déplacées.
The Bingham copper mine (Utah, Montana), worked by Kennecott since 1906. The excavation is nearly 1 km deep and 4 km wide. 450 000 t of earth are moved each day.
Photo C. Le Roux.





Restauration de la forêt riveraine à Montejo la Vega (Ségovie, Espagne).
Restoration of riparian forest at Montejo la Vega (Segovia, Spain).
Photo WWF, avec l'aimable autorisation de Lafarge/WWF.

Le choix des espèces

Puisque les sols à restaurer ont souvent des propriétés physiques et chimiques anormales, seules les plantes adaptées à ces contraintes peuvent les coloniser. Ces espèces seront essentiellement des plantes mycorhizées et/ou fixatrices d'azote, comme nous l'avons déjà vu. C'est la stratégie employée en Malaisie, dans les mines d'étain (ANG LAI, 1986). Le choix des espèces peut aussi se porter sur les espèces pionnières à croissance rapide, particulièrement celles qui sont connues pour leur capacité à s'établir et croître sur les sites dégradés, comme *Acacia mangium* dans les zones colonisées par *Imperata* sp. (PARROTTA *et al.*, 1997).

Au Brésil, des technologies ont été développées par l'Embrapa (organisme brésilien de recherche agronomique), fondées sur l'installation de légumineuses nodulées et mycorhizées, utilisables sans sol de couverture ni compost. La priorité est donnée aux espèces indigènes, comme *Mimosa caesalpinifolia*, *M. scabrella*, *M. acutistipula*, *Pseudosamanea saman* et *Entolobium contorsiliquum*.

En Nouvelle-Calédonie, les travaux sur les espèces indigènes ont permis d'obtenir en pépinière, par germination de graines ou par bouturage, des plants d'une quarantaine d'espèces, la plupart endémiques du territoire, pouvant convenir à différents types de substrat minier (JAFFRE, PELLETIER, 1992). On trouve les espèces potentiellement utilisables pour la revégétalisation parmi les cypéracées, les myrtacées, les protéacées et les casuarinacées (JAFFRE, RIGAUT, 1991).

Pour la revégétalisation des sites miniers de Nauru, dans le Pacifique, un projet pilote expérimental a été proposé en 1992 par le Cirad

et le BRGM (Bureau des recherches géologiques et minières), afin de mettre au point des techniques de réhabilitation. Les propositions en matière de plantation étaient fondées sur les espèces locales pour reconstituer la forêt originelle de l'île, telles que *Calophyllum inophyllum*, *Cordia subcordata*, *Terminalia catappa* et *Adenantha pavonina* (une légumineuse) (FRIOU *et al.*, 1992). Des espèces exotiques à croissance rapide avaient aussi été sélectionnées, en plus des espèces locales, pour leur capacité à couvrir rapidement le sol, à fixer l'azote et à reconstituer une formation forestière favorable à la croissance des espèces locales de seconde génération. Il s'agissait de légumineuses (acacias et gliricidias) et de casuarinacées (*Casuarina* sp., *Gymnostoma* sp.) préalablement inoculées (FRIOU *et al.*, 1992).

Les espèces exotiques sont, on le voit, souvent utilisées de façon complémentaire aux espèces indigènes ; au Brésil, des espèces introduites ont aussi été utilisées. À ce propos, sur plusieurs sites, les acacias ont montré le meilleur comportement. Les espèces exotiques sont parfois aussi utilisées en cas d'échec des espèces locales. En Sierra Leone, la compagnie Sieromco voulait réhabiliter les sites exploités et les aires de dépôt des rejets de lavage de la bauxite. Dans un premier temps, on a favorisé la recolonisation par la flore indigène et des tentatives ont été faites pour y ajouter des plantations de citrus. Globalement, comme les résultats n'ont pas été à la hauteur de ceux attendus, un nouveau programme de revégétalisation des déblais a été entrepris. De nombreuses espèces d'herbacées et de ligneux ont été testées. Parmi les variétés introduites, on trouve *Paspalum plicatulum*, une herbacée d'Amérique centrale, utile quand le sol de couverture est minimal et que la zone est sensible à l'érosion, et *Acacia leptocarpa*. Elles se sont bien adaptées, sont tolérantes au feu et ne sont pas envahissantes (KARGBO *et al.*, 1994).

Toujours en Nouvelle-Calédonie, il existe des plantes hyperaccumulatrices de nickel comme *Geissois pruinosa*, *Argophyllum laxum*, *Baloghia alternifolia*, *Phyllanthus aeneus*, *Agathea deplanchi* et *Hybanthus caledonicus*, dont la teneur en nickel de la masse sèche varie de 0,1 à 0,9 % (BROOKS *et al.*, 1998). Elles pourraient être utilisées pour décontaminer le sol par phyto-extraction.

Quand la croissance des plantes est inhibée par les résidus miniers, il est possible d'apporter du compost pour réduire la toxicité. Une expérimentation sur une ancienne mine de plomb et de zinc, en Chine, à Shaoguan, a montré que les apports de compost comme matériel de couverture, et d'effluents comme amendement, ont des effets positifs sur la croissance de la légumineuse *Stylosanthes guianensis* (LAN *et al.*, 1998).

Malheureusement, dans d'autres régions, des espèces exotiques se sont montrées envahissantes, comme certains acacias et *Leuceana leucocephala* (PARROTTA *et al.*, 1997), mais des espèces indigènes peuvent aussi l'être. C'est pourquoi, sur la mine d'uranium Ranger (Australie), le sol de couverture n'est pas utilisé pour végétaliser, car cela poserait des problèmes d'infestation par des mauvaises herbes et de colonisation agressive par des espèces indigènes comme *Acacia holosericea* et des mauvaises herbes. Or la dominance d'une espèce est à éviter parce qu'elle rend l'habitat trop homogène et que cela peut interrompre ou perturber la succession des espèces (TUCKER, MURPHY, 1997). C'est pourquoi une revégétalisation multi-espèce est souhaitable, avec une couverture végétale complétée par des espèces pionnières ligneuses ou arbustives (8). Ainsi, sur la mine de Eneabba, à l'ouest de l'Australie, la végétalisation a lieu grâce au réétalement du sol de couverture, au moyen du paillis, et par l'ensemencement d'une centaine d'espèces locales. Une culture de couverture, de l'avoine, est semée avec les espèces indigènes pour protéger la germination des jeunes plants. Sur ce site minier, l'envahissement par les mauvaises herbes est contrôlé naturellement, l'avoine étant remplacée par les légumineuses indigènes (7).

La levée de dormance et la germination des graines

Le feu peut aussi être utilisé pour supprimer les adventices (7*). Dans le parc national Rudall River (Australie), il est géré par les aborigènes pour favoriser la levée de dormance des graines de spinifex. Cette méthode accélère effectivement la réhabilitation de petites zones et évite la dominance des espèces annuelles. Les graines enfouies dans le sable sont chauffées et deviennent réceptives à la prochaine pluie (9). Un certain nombre de légumineuses indigènes du sud-ouest de l'Australie nécessitent une forte chaleur pour lever la dormance de leurs graines. Traditionnellement, on pense que ces espèces répondent à un signal de chaleur émanant d'un front de feu. Dans un environnement soumis au feu, il y a un avantage pour les graines qui germent à la saison humide, juste après le passage du feu, et ce indépendamment des autres spécificités adaptatives des plantes (ROCHE *et al.*, 1997).

Sur la mine d'Alcoa en Australie, on utilise chaque année 400 000 graines de différentes espèces pour réhabiliter les mines de bauxite. L'amélioration du taux de germination de ces graines reste une préoccupation constante. En effet, si ce taux

était amélioré, la densité et la diversité pourraient aussi être augmentées (ROCHE *et al.*, 1997). Une autre façon d'optimiser la réhabilitation est de prélever le sol de couverture au moment de l'année où ce sol est le plus riche en graines, pour qu'il atteigne sa capacité optimale à végétaliser le terrain exploité. L'épandage du sol de couverture doit avoir lieu sans délai car le stockage a un effet négatif sur la survie des graines : dans le cas de la réhabilitation des mines de bauxite, seulement 15 % des graines résisteraient au stockage du sol.

Semis direct ou plantation

L'opérateur a le choix entre semis direct et plantation. Le semis direct a deux avantages : un mélange de graines peut être utilisé et de grandes surfaces peuvent être ensemencées rapidement. Le succès des techniques de semis direct nécessite l'utilisation de plusieurs tonnes de graines et la présence d'un verger à graines (SEABROOK, 1995). Au Canada, sur le site de Sudbury, la revégétalisation des 2 000 ha de

Reboisement à Mertola (Portugal).
Reforestation at Mertola (Portugal).
Photo WWF, avec l'aimable autorisation
de Lafarge/WWF.



déblais s'est faite, entre autres, par des techniques aériennes avec épannage de chaux et de fertilisants (1). Les plantations sont le plus souvent complémentaires de l'hydro-ensemencement. Une expérimentation sur trois années, dans des carrières d'argile en Italie, a montré que l'ensemencement hydraulique était une méthode peu onéreuse mais également peu efficace. Un moyen d'améliorer l'efficacité de cette méthode est de l'associer au paillis. Celui-ci, constitué d'une couche de débris organiques végétaux, permet de réduire l'évaporation et les variations de température, protège la microflore et la microfaune, et apporte une réserve de matières organiques (BROOKS *et al.*, 1998).

La biodiversité

Au cours de la réhabilitation, la question de la reconstitution de la diversité écologique d'origine se pose, même s'il existe la possibilité du retour naturel, au moins partiel, de cette diversité. La réhabilitation écologique produit une succession de végétation précoce, et elle est un moyen de reconstruire une certaine biodiversité. Cette succession peut être accélérée par le choix d'espèces appétentes pour les frugivores qui vont disperser les graines (TUCKER, MURPHY, 1997). Quand la végétalisation est assurée, les plantations peuvent catalyser la succession forestière, par des changements dans les conditions microclimatiques du sous-

bois, par l'augmentation de la complexité structurale de la végétation et par la formation de litière et d'humus. Il peut ainsi se créer des conditions favorables à la germination de graines provenant des forêts avoisnantes, sans compétition avec des herbacées.

Dans la réhabilitation des dunes de Richards Bay, en Afrique du Sud, le singe vervet se déplace entre zones non perturbées et zones réhabilitées et influence la succession des espèces dans la forêt réhabilitée, par son régime alimentaire (13). Les chauves-souris et les oiseaux jouent également un rôle fondamental (en dehors du vent) dans la dispersion des graines (PARROTTA *et al.*, 1997). Les fourmis et les vers de terre améliorent la structure du sol, accélèrent la décomposition de la litière et les cycles nutritifs, modifient la composition des espèces végétales, influencent la dispersion des mycorhizes, facilitent la dispersion des graines et la pollinisation, et encouragent la présence de la faune sauvage (MAJER, 1989). Des groupes d'indicateurs du succès de la réhabilitation, comme les reptiles, les petits mammifères et les invertébrés, devraient être utilisés plus largement pour évaluer la dynamique de la communauté (TUCKER, MURPHY, 1997). En effet, les invertébrés donnent parfois des informations plus sensibles que les plantes sur l'état de l'écosystème où ils se trouvent. Les fourmis sont déjà considérées en Australie comme des bio-indicateurs de la restauration de l'écosystème après exploitation minière. La biomasse microbienne répond aussi plus rapidement aux changements que les paramètres chimiques du sol. Le succès du rétablissement précoce de la biomasse microbienne pourrait être assuré en favorisant la production de plantes associées comme les acacias. Les indices microbiens sont des indicateurs du redémarrage des cycles nutritifs et de l'établissement réussi de l'écosystème forestier sur les sites réhabilités (SAWADA, 1996).

L'étalement d'une quinzaine de centimètres de sol de couverture sur les dunes exploitées par Richards Bay Minerals, en Afrique du Sud, est la première étape de la réhabilitation de la forêt côtière.

Spreading a 15-cm layer of topsoil over the dunes mined by Richards Bay Minerals, in South Africa, is the first stage in rehabilitating the coastal forest.

Photo A. Bannister, avec l'aimable autorisation de RBM.



Un exemple de réhabilitation en Nouvelle-Calédonie

La restauration de la végétation a été envisagée en Nouvelle-Calédonie dès le début des années 1970 (JAFFRE, PELLETIER, 1992) car, sur les mines fermées depuis 50 ans, on a constaté que la colonisation par des plantes endémiques était soit très modeste, soit inexistante. La revégétalisation est actuellement prise en charge essentiellement par les services forestiers des provinces et par la Société Le Nickel (SLN) (SARRAILH, 1997). Les stratégies de végétalisation comprennent :

- l'amélioration du substrat par la mise en place d'une couche écran carbonatée, ou l'apport d'alluvions ; la SLN réhabilite avec une plantation ultérieure de gaïac (*Acacia spirorbis*) et de bois de fer (*Casuarina collina*), et par le reverdissement rapide des sites par des plantes herbacées ;
- l'installation de plantes pionnières sur substrat non modifié ; parmi les espèces locales adaptées, on retient, en dehors des cypéracées, des arbusives héliophiles, dont de nombreuses casuarinacées, et des légumineuses ;

- la récupération sélective des horizons supérieurs du sol (JAFFRE, PELLETIER, 1992).

La revégétalisation elle-même se fait par ensemencement (manuel ou hydraulique associé à du mulch) ou par plantation : des essais ont été réalisés, en général après décompactation du sol, dès 1971 par le Cirad (SARRAILH, 1997) et l'IRD avec l'aide financière des sociétés minières SLN, Inco et Amax (PELLETIER, ESTERLE, 1995). Des résultats positifs ont été obtenus avec des espèces endémiques produites en pépinières et transplantées, alors que les espèces ligneuses introduites dépérissent en général. *Acacia spirorbis* et *Casuarina collina* se développent naturellement dans des zones perturbées à basse et moyenne altitude, s'accommodent parfaitement des sols riches en nickel et donnent rapidement de bons résultats paysagers. Ils ont cependant tendance à former des peuplements denses, floristiquement appauvris, et on n'assiste pas, après dix ans, à l'implantation spontanée d'espèces témoignant de l'amorce d'une succession secondaire (JAFFRE, RIGAUULT, 1991), ce qui est probablement dû à un problème d'acidité de litière (PELLETIER, ESTERLE, 1995).

La revégétalisation des mines Alcoa en Australie

L'exploitation de la bauxite par Alcoa (Aluminium Company of America) dans les forêts d'*Eucalyptus marginata* au sud-ouest de l'Australie a commencé en 1963, et la remise en valeur dès 1966 (GRANT *et al.*, 1996) ; 450 ha sont exploités et réhabilités chaque année. L'objectif étant de rétablir un écosystème forestier diversifié, plusieurs opérations successives sont nécessaires.

La première est le redépôt du sol forestier de couverture dans les zones réhabilitées. La pratique classique de revégétalisation commence par un double décapage et la mise en réserve du sol avant le début de l'exploitation. Le premier décapage est constitué des cinq premiers centimètres de sol et, avec eux, la plupart des ressources en graines (7). Il y a ensuite un labourage profond (GRANT *et al.*, 1996). Une fertilisation au phosphate de diammonium et au potassium est effectuée par avion. L'ensemencement est manuel et a lieu tout de suite après, à la fin de l'été ou à l'automne, pour que les graines germent au moment des pluies d'automne ou d'hiver. Les graines sont celles d'espèces indigènes, avec un mélange de graines d'eucalyptus, de légumineuses et de différentes espèces d'arbustes et d'herbacées (GRANT *et al.*, 1996).

Le contrôle de la réhabilitation a montré, neuf mois plus tard, une densité de 1 500 eucalyptus à l'hectare et de une à deux légumineuses par mètre carré (7).



Après 12 mois, la réhabilitation des dunes par Richards Bay Minerals atteint le stade d'une prairie buissonnante d'où émerge *Acacia karroo* principalement.

After 12 months, dunes under rehabilitation by Richards Bay Minerals have reached the stage of a shrubby grassland with Acacia karroo, mainly, beginning to emerge.

Photo A. Bannister, avec l'aimable autorisation de RBM.

La revégétalisation de Upper Hunter en Australie

A Upper Hunter (NSW), l'objectif de réhabilitation des mines de charbon est essentiellement le retour au pâturage. Pour y parvenir, un certain nombre de règles sont observées.

On utilise des herbacées exotiques, plus vigoureuses que les espèces indigènes, ainsi que des légumineuses. Des espèces indigènes ligneuses (acacias et eucalyptus) sont plantées en bosquets (comme brise-vent et comme abri pour la faune) et plus densément sur les pentes (GORDON, HANNAN, 1986).

On sème au début de l'automne pour profiter des pluies, en utilisant un mélange d'espèces. Les herbacées de saison froide et les légumineuses germent rapidement et permettent une protection précoce contre l'érosion. Les graines de saison chaude restent en dormance jusqu'au printemps suivant, puis les jeunes plants s'établissent au travers du paillis (mulch) fourni par les herbacées précédentes, et forment un pâturage

permanent et productif. L'ensemencement au printemps est utilisé comme traitement complémentaire, si nécessaire.

Pour la préparation du terrain, on fait en sorte de ralentir les écoulements de surface et de faciliter l'infiltration de l'eau. Une partie des fertilisants est mélangée aux graines, tandis que le reste est pulvérisé.

Parfois aussi, les fertilisants sont appliqués avant le dépôt du sol de couverture pour s'assurer qu'ils seront incorporés au niveau de la rhizosphère de la plante. Les légumineuses sont inoculées juste avant le semis.

Les sites destinés à la plantation de ligneux ne reçoivent pas de sol de couverture. Des sillons profonds sont creusés 4 à 6 semaines avant la plantation. On emploie des plants de six à neuf mois venant de pépinières commerciales. Les différentes espèces d'eucalyptus et d'acacias sont disposées aléatoirement sur le terrain pour simuler autant que possible les zones forestières naturelles (GORDON, HANNAN, 1986).

Un exemple de revégétalisation au Kenya : la carrière Bamburi

La Bamburi Portland Cement Factory, à une dizaine de kilomètres au nord de Mombasa, exploite depuis 1954 du calcaire corallien fossile pour en faire du ciment. Les carrières s'étendent sur 1 200 ha. Tout le sol de surface ayant été perdu, on s'est orienté vers la pisciculture et le reboisement, en tenant compte du sol calcaire et sablonneux, et de la nappe phréatique à la fois proche et légèrement salée (BAUMER *et al.*, 1990). Le reboisement de 70 ha de la « South Quarry » a commencé en 1971 par la plantation de *Casuarina equisetifolia* qui a la particularité de s'installer dans des sols particulièrement pauvres et de bien supporter les embruns et la salinité du sol. Son bois dense est facilement commercialisé.

L'accélération de la décomposition des feuilles s'est faite par l'introduction de mille-pattes.

Après l'obtention de 10 cm d'humus, d'autres espèces sont apparues spontanément, ou ont été plantées. Au bout de vingt ans, la flore comprend une multitude d'espèces. La monoculture de casuarinas du départ s'est diversifiée grâce à *Prosopis pallida*, *Conocarpus lancifolius* et *Azadirachta indica* (BAUMER *et al.*, 1990). Après vingt-cinq ans, les casuarinas ont rempli leur tâche de transformer les carrières hostiles en forêt luxuriante, alors qu'il n'y avait pas de sol au départ. Plus de 200 espèces de seconde génération originaires de la forêt côtière ont été sélectionnées et plantées (10).

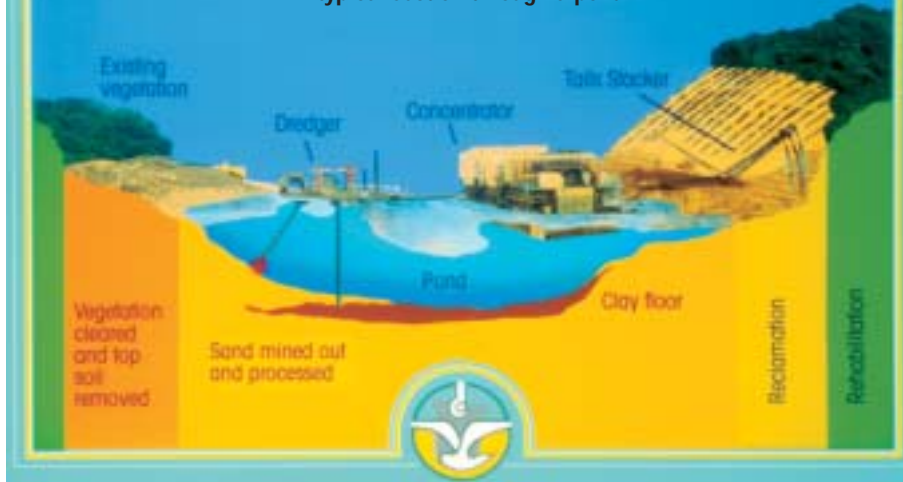


Diverses étapes de la réhabilitation des dunes par Richards Bay Minerals. D'autres espèces arborées indigènes pourront succéder naturellement à *Acacia karroo*.

Stages in dune rehabilitation at the Richards Bay Minerals site. Other indigenous tree species successions should develop naturally from the initial Acacia karroo planting.

Photo A. Bannister, avec l'aimable autorisation de RBM.

Sketch of RBM dune mining operations A typical section through a pond



La méthode d'exploitation par Richards Bay Minerals de métaux lourds en Afrique du Sud avec la réhabilitation en continu en aval du bassin.
Operating methods used at the Richards Bay Minerals heavy metals mine in South Africa, with continuous rehabilitation below the basin.
Avec l'aimable autorisation de RBM.

Des indicateurs du succès de la réhabilitation

Un indicateur d'une réhabilitation réussie peut être l'aspect du site qui doit sembler ne jamais avoir été perturbé. L'opération de Richards Bay Minerals (dont le propriétaire est Rio Tinto) dans le Natal en est un bon exemple. Après dragage des sables côtiers pour en récupérer 2 à 3 %, les 97 % restants ont été replacés. La revégétalisation a reposé sur une plante pionnière, *Acacia karroo*. La forêt a maintenant une quinzaine d'années et il n'y a plus trace de l'exploitation.

On peut aussi se fonder sur la productivité du site, en tant qu'indicateur du succès de la réhabilitation : pour le projet de reforestation Powell River (au sud-ouest de la Virginie), qui a débuté en 1980, on a montré que la forêt, après exploitation minière, pouvait avoir une productivité identique ou supérieure à celle de la forêt d'origine (11).

Un autre critère pourrait être la durabilité, mais il n'est pas facile de juger de l'achèvement de la réhabilitation. Dans les exploitations australiennes, il y a restitution de la plus grande partie des dépôts de garantie au moment de l'établissement de la végétation ; or il n'y a pas, à l'heure actuelle, de critères pour juger de la qualité de cette réhabilitation. L'industrie australienne travaille précisément au développement de critères pratiques pour l'estimer (GORDON, HANNAN, 1986).

Conclusion

On compte de plus en plus de codes de conduite, d'accords volontaires, générés par les secteurs industriels entre autres. L'environnement joue, en effet, un rôle plus important dans les relations internationales et les transactions. Globalement pourtant, il a continué à se détériorer. La réhabilitation peut contribuer à renverser cette tendance.

Dans le cas des mines et carrières à ciel ouvert, nous avons vu que la question de la réhabilitation doit être abordée préalablement à l'exploitation. Cela nécessite la connaissance, la collecte et la conservation des graines et des plantes locales, adaptées aux conditions climatiques et pédologiques. Cela suppose, par ailleurs, le décapage sélectif de la terre arable et son épandage après le réaménagement du site.

L'étape de la restauration du couvert végétal est un des aspects clés de la réhabilitation. L'ensemencement de la terre doit permettre une couverture du sol rapide et effective, ce couvert végétal permettant de limiter l'érosion, de prévenir la pollution, de rétablir les cycles des nutriments et d'améliorer les propriétés physiques du sol. L'installation de plantes fixatrices d'azote peut améliorer la structure du sol et sa capacité de rétention. En effet, ces plantes ont un rôle bénéfique dans l'enrichissement en matière organique du sol.

Elles peuvent être utilisées au moment de l'établissement de la couverture végétale ou parmi les espèces arbustives ou arborées qui lui succéderont. La connaissance du fonctionnement de l'écosystème, les moyens et la volonté de gérer la succession écologique sont nécessaires. Les plantations ont un effet « starter » sur cette succession en étant attractives pour la faune, en apportant de l'ombre, en modifiant le microclimat et en permettant l'établissement d'espèces indigènes sous leur couvert. Mais les plantations, surtout en monoculture, ne développent pas toujours un sous-bois riche d'espèces variées. Il est donc très important d'accroître le nombre d'espèces dans les zones réhabilitées, de gérer et de rétablir la biodiversité dans une option de restauration écologique. L'intervention humaine sera d'autant plus lourde que la dégradation du site est importante et que l'activité biologique y est faible.

Références bibliographiques

ANG LAI H., 1986. Some potential tree species for reclamation of tin tailings. National PTS Seminar I, Forest Research Institute, Selangor, Malaisie, 14 p.

BARNHISEL R. I., HOWER J. M., 1997. Coal surface mine reclamation in the eastern United States : the revegetation of disturbed lands to hayland/pasture or cropland. *Advances in Agronomy*, 61 : 233-275.

BAUMER M., DARNHOFER I., GUNDALINO S., 1990. Baobab farm LTD ou que faire d'une carrière après exploitation ? Bois et Forêts des Tropiques, 226 : 48-60.

BROOKS R. R., CHIARUCCI A., JAFFRÉ T., 1998. Revegetation and stabilisation of mine dumps and other degraded terrain. *In* : Plants that hyperaccumulate heavy metals. Brooks R. R. (éd.). Cab International, 227-247.

FRANCO A. A., CAMPELLO E. F., DIAS L. E., DE FARIA S. M., 1994. Revegetation of acidic residues from bauxite mining in Porto Trombetas-PA using nodulated and mycorrhizal legume trees. To be presented at 1st Latin American symposium on soil reclamation, Foz de Iguaçu, Brasil, 8 p.

FRIOU M., LEGUERE J., VERNIER P., 1992. Propositions techniques et financières pour un projet pilote de réhabilitation des sites miniers de la République de Nauru, rapport de mission. Agence pour l'eau et l'environnement du Pacifique/Cirad, 31p.

GORDON R. M., HANNAN J. C., 1986. Reclamation of surface coal mines in the Hunter Valley, New South Wales, Australia. *In* : Innovative approaches to mined land reclamation. Carlson C. L., Swisher J. H. (éd.). Carbondale, États-Unis, Southern Illinois University Press, 524-560.

GRANT C. D., BELL D. T., KOCH J. M., LONERAGAN W. A., 1996. Implications of seedling emergence to site restoration following bauxite mining in western Australia. *Restoration Ecology*, 4 (2) : 146-154.

JAFFRÉ T., RIGAULT F., 1991. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur sites miniers. *In* : Conventions Sciences de la vie-botanique, 5. Nouméa, Nouvelle-Calédonie, Orstom, 78 p.

JAFFRÉ T., PELLETIER B., 1992. Plantes de Nouvelle-Calédonie permettant de revégétaliser des sites miniers. Nouméa, Nouvelle-Calédonie, Orstom/SLN, 115 p.

KARGBO K. M., MILNE R., WESTWOOD J. V. B., 1994. Rehabilitation aspects at Sieromco. Mining Environmental Management.

LAN C. Y., SHU W. S., HONG M. H., 1998. Reclamation of Pb/Zn mine tailings at Shaogun, Guangdong Province, People's Republic of China : The role of river sediment and domestic refuse. *Bioresource Technology*, 65 : 117-124.

LUGO A. E., 1997. The apparent paradox if reestablishing species richness on degraded lands with tree monocultures. *Forestry Ecology and Management*, 99 : 9-19.

MAJER J. D., 1989. Fauna studies and land reclamation technolog. A review of the history and need for such studies. *In* : Animals in primary succession. The role of animals in reclaimed lands. Majer J. D. (éd.). Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 5-33.

MOIROUD A., CAPELLANO A., DANIÈRE C., 1991. Un procédé exemplaire de réaménagement et de reverdissement des carrières : l'emploi des espèces fixatrices d'azote atmosphérique. Rapport final. Taxe parafiscale sur les granulats : opération n° 60 EG 161/Laboratoire d'écologie microbienne de l'université Claude-Bernard, 34 p.

PARROTTA J. A., TURNBULL J. W., JONES N., 1997. Catalyzing native forest regeneration on degraded tropical lands. *Forestry Ecology and Management*, 99 : 1-7.

PELLETIER B., ESTERLE M., 1995. Revégétalisation des anciens sites d'exploitation de minerais de nickel en Nouvelle-Calédonie. *In* : Colloque « Quelle recherche française en environnement dans le Pacifique Sud ? Bilan et perspectives », Paris, France, 28-31 mars 1995.

RAO A. V., TARAFDAR J. C., 1998. Selection of plant species for rehabilitation of gypsum mine spoil in arid zone. *Journal of Arid Environment*, 39 : 559-557.

ROCHE S., KOCH J. M., DIXON K. W., 1997. Smoke enhanced seed germination for mine rehabilitation in the southwest of Western Australia. *Restoration Ecology*, 5 (3) : 191-203.

SARRAILH J.-M., 1997. Sylviculture des terrains miniers dégradés. *In* : Doc. Sci. Tech. III 2, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, Orstom, 289-296.

SAWADA Y., 1996. Indices of microbial biomass and activity to assess minesite rehabilitation. *In* : Third International Annual Minerals Council of Australia, Environmental Workshop, 223-236.

SEABROOK J., 1995. Another Network : revegetation is not just trees. *In* : Nature Conservation 4 : The Role of Network. Saunders D. A., Craig J. L., Mattiske E. M. (éd.). Australia, Surrey Beatty & Sons, 495-499.

SOPPER W. E., SEAKER E. M., 1986. Development of microbial communities on sludge-amended mine land. *In* : Innovative approaches to mined land reclamation. Carlson C. L., Swisher J. H. (éd.). Carbondale, États-Unis, Southern Illinois University Press, 659-680.

THE DEPARTMENT FOR THE ENVIRONMENT, 1996. Mineral Planning Guidance : The Reclamation of Mineral Workings. Londres, Royaume-Uni, Crown Copyright, The Stationery Office, 53 p.

TUCKER N. I. J., MURPHY T. M., 1997. The effects of ecological rehabilitation on vegetation recruitment : some observations from the Wet Tropics of North Queensland. *Forestry Ecology and Management*, 99 : 133-152.

WUERZ W., 1986. Methods and successes in agricultural and forest reclamation in german lignite. *In* : Innovative approaches to mined land reclamation. Carlson C. L., Swisher J. H. (éd.). Carbondale, États-Unis, Southern Illinois University Press, 173-186.

Références sur Internet

- (1) <http://www.incoltd.com>
- (2) <http://www.minerals.org.au>
- (3) <http://www.ameef.com.au>
- (4) <http://www.wmc.com.au>
- (5) <http://mbendi.co.za>
- (6) <http://www.fipr.state.fl.us>
- (7) <http://www.erin.gov.au>
- (8) <http://www.djc.com/special/enviro96>
- (9) <http://www.riotinto.com>
- (10) www.worldbank.org/
- (11) www.ext.vt.edu/pubs/mines/460-129/460-129.html
- (12) <http://grid2.cr.usgs.gov/geo1/exsum/>
- (13) <http://www.richardsbayminerals.co.za>

Synopsis

REHABILITATING OPEN-CAST MINES AND QUARRIES

Christine LE ROUX

Mining legislation is caught between economic interest and environmental protection

Rehabilitating a former mining site requires human intervention at several levels, from stabilising the site through to the restoration of indigenous vegetation. In France, rehabilitation is mandatory, but the term “revegetation” is not explicitly included in statutory documents. Internationally, while the United States and Australia have specific legislation, laws in many other countries are most often inadequate, inappropriate or unenforced. Nevertheless, mining legislation has been changing rapidly in many respects, with recent moves to integrate environmental matters at policy level. However, legislation can also be influenced by the many countries seeking to attract investment, in which case populations are likely to suffer the consequences of mining impacts, as in Papua-New-Guinea where mining has caused severe pollution and serious conflicts with local populations. The overriding objective for mining companies is to increase their financial value. A policy for sound environmental management can help to achieve this, by giving companies a competitive edge in their bids to prospect and mine a site. This is why many companies carry out impact studies, try to minimise mining impacts and rehabilitate sites using indigenous species as far as possible. As part of its mining project for the ilmenite (titanium dioxide) deposits in Madagascar, Rio Tinto, the world’s largest mining company, has been carrying out social and environmental studies for over ten years through its Canadian subsidiary QIT (Quebec Iron & Titanium).

The decision to begin mining will not be made until studies are completed. If mining is to go ahead, QIT has proposed creating fauna and flora conservation areas, and planting commercial tree species in areas where mining has ceased in order to reduce logging pressures on the highly degraded coastal forest area.

In seeking to enhance their credibility, companies are looking to partnerships with NGOs to implement processes certifying their environmentally sound management practices, and all of them claim to be working towards sustainability.

Keys to rehabilitation

Mining impacts over the long term, mainly on soils, are such that rehabilitation is essential and should, as far as possible, be part of the plan of operations. When rehabilitation is carried out in stages, less earth-moving is required on the site and there are fewer losses of biological soil material (seeds, rhizobacteria, etc.), which makes revegetation easier. Decompacting and ploughing up the mining substrate is often essential, as well as bringing in new soil if the mining substrate is highly toxic, although both tend to encourage adventitious vegetation. An alternative to re-spreading topsoil is to improve spoil by adding lime, fertiliser, mulch, sewage sludge or undemanding nitrogen-fixing species. Erosion can be reduced by early revegetation. Soil cover is more rapidly established with mycorrhiza-bearing plants, since their nutrient requirements are partly met by the association of mycorrhizal fungi and plant roots. Nitrogen-fixing species that are selected to suit specific site conditions will also grow more quickly if inoculated.

Nowadays, priority is given to indigenous species, as in Brazil, Australia and New Caledonia, although exotic species can also be useful as they are often selected among nitrogen-fixing and / or mycorrhiza-bearing species that can encourage the development of local species. Each type of plant has a specific function in rehabilitation and in ecological succession, hence the importance of seed availability and high rates of germination for plant biodiversity on the site : numerous studies are being carried in Australia on recalcitrant species. In Rudall River Park, in the south west of Australia, aboriginal fire management techniques are being used to bring certain seeds out of dormancy. It is advisable to remove topsoil before mining begins, at a time of year when the soil contains the maximum quantity of seeds, and to keep it in reserve for the shortest possible time before re-spreading (when operations cease). Whenever this is not possible, direct planting or sowing is required (by hand, by hydraulic means or from the air). Sowing is usually cheaper but not as effective as planting, and can be improved by using mulch. Successful rehabilitation also depends on re-establishing microbial biomass and fauna species, some of which are already used as indicators of ecosystem health. In Kenya, diversified tree cover was successfully established at the Bamburi quarry, (on the Indian Ocean coast near Mombasa) thanks to the introduction of myriapods, bacteria and earthworms, which speeded up the formation of humus beneath *Casuarina equisetifolia* plantations. This is an example of how secondary forest can stimulate regrowth of original coastal forests. Usually, however, the idea is to start with a plantation that is already diversified to encourage succession, rather than with a single-species plantations.