



Rivière des Pirogues.

Nouvelle-Calédonie

# Mine et environnement

À l'occasion du colloque international « Préservation et restauration écologique en environnement minier tropical » organisé à Nouméa par l'Université de Nouvelle-Calédonie (UNC), l'Institut agronomique néo-calédonien (IAC-CIRAD) et l'IRD, *Sciences au Sud* présente un état des lieux des recherches sur l'environnement minier de la Nouvelle-Calédonie, quatrième producteur mondial de nickel.

## Genèse de l'or vert

**G**éologiquement, la Nouvelle-Calédonie est constituée pour 40 % environ de roches mères ultrabasiques riches en olivine, pyroxène et serpentine. Exposées pendant plusieurs millions d'années à la chaleur et aux pluies du climat tropical, ces roches ont subi une intense altération géochimique, qui a généré un manteau latéritique épais de plusieurs dizaines de mètres. Lors de la dissolution de la roche saine, le nickel, présent en faible teneur (inférieure à 0,5 %) a été libéré, puis s'est concentré pour former les minerais nickélifères riches en silice (les garniérites) et/ou en fer. Les paysages latéritiques actuels résultent donc de la fonte géochimique des roches ultrabasiques, mais aussi de la dissection des manteaux d'altération par une érosion mécanique contrôlée en partie par une activité tectonique récente, qui aurait favorisé l'instabilité de ces couvertures meubles et fragiles.

Très pauvres en éléments nutritifs, ces sols latéritiques sont riches en métaux, tels que le nickel, le chrome, le cobalt, le manganèse, traces des roches ultrabasiques, préservées en surface. « *Alors que le contexte socio-économique est aujourd'hui favorable au développement de l'exploitation du nickel en Nouvelle-Calédonie, la genèse et l'évolution des différents types de minerais nickélifères ou d'autres métaux parfois associés, comme les platinoïdes, restent encore peu étudiées*, souligne Fabrice Colin, directeur de l'unité de recherche de l'IRD « Biogéodynamique supergène et géomorphologie tropicale ». *Il faut comprendre cette genèse, quantifier l'évolution des manteaux d'altération par érosion mécanique ou chimique, et établir les cycles biogéochimiques des éléments, en particulier des métaux, de la roche saine au sol, des sols vers les plantes et, réciproquement, des plantes vers le sol ou les rivières, des sols et rivières vers le lagon. Il est également particulièrement important de mesurer l'effet réel des activités de l'homme sur la structure des sols et, pour cela, de distinguer les aléas naturels des risques induits par l'action de l'homme, en comparant l'érosion de bassins versants naturels et celle de bassins à l'aval des carrières, par exemple* ».

Pour conduire ces recherches, les scientifiques utilisent les méthodes classiques d'analyse des sols (texture, structure, propriétés physiques

et chimiques) et des éléments dissous ou en suspension dans les rivières au sein des bassins versants. Ces études sont complétées par l'utilisation de différents traceurs – magnétiques, minéralogiques, isotopiques, biogéochimiques – qui donnent des informations sur l'histoire à court et à long terme des manteaux d'altération. Les chercheurs ont également recours à la tomographie de résistivité électrique qui permet d'estimer la structure des sols et d'identifier les nappes d'eau et les fronts d'altération qui délimitent les zones d'enrichissement du nickel. Très récemment utilisée en Nouvelle-Calédonie, cette technique d'investigation efficace présente l'avantage de limiter les forages de prospection fort coûteux.

Ces recherches écosystémiques abordent les formations superficielles comme une interface dynamique entre lithosphère, hydrosphère et biosphère. Elles associent imagerie spatiale, géomorphologie, géochimie, géophysique, minéralogie, biochimie, hydrogéochimie, disciplines déclinées à différentes échelles, du paysage à celle du minéral et parfois de l'atome. Les résultats permettront de répondre aux interrogations de la communauté scientifique, notamment sur les grands cycles des éléments à la surface de la planète, en réponse ou non à des changements climatiques ou causés plus récemment par l'homme. « *Les informations qu'offriront ces études conduites en partenariat*

*local, régional et international visent également à satisfaire aux besoins croissants d'exploration et d'exploitation des gisements de nickel ou d'autres métaux ainsi que des activités d'accompagnement de la gestion minière (revégétalisation notamment) ; et ce en tenant compte de la fragilité de l'environnement insulaire ainsi que de la nécessité de préserver la grande qualité du milieu naturel, et, en particulier, la biodiversité d'une exceptionnelle richesse sur la Grande Terre.*

*Cette nécessité dont chacun aujourd'hui a parfaitement conscience s'inscrit dans un esprit de développement économique solidaire »,* conclut le chercheur.

## Contact

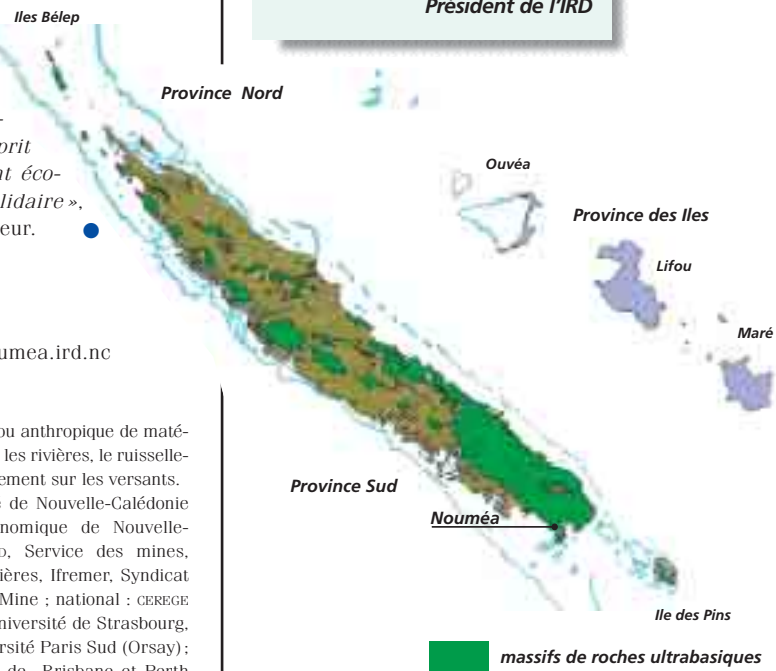
Fabrice Colin  
fabrice.colin@noumea.ird.nc

1. Erosion naturelle ou anthropique de matériaux transportés par les rivières, le ruissellement et le colluvionnement sur les versants.
2. Local : université de Nouvelle-Calédonie (UNC), Institut agronomique de Nouvelle-Calédonie (IAC-CIRAD), Service des mines, BRGM, sociétés minières, Ifremer, Syndicat des industries de la Mine ; national : CEREGE (Aix en Provence), université de Strasbourg, CREGU (Nancy), université Paris Sud (Orsay) ; régional : université de Brisbane et Perth (Australie), université de Nouvelle-Zélande.

## Editorial

L'objectif d'un développement économique durable, soucieux de l'environnement, est le thème majeur du colloque international. Préservation et restauration écologique en environnement tropical minier qui se tiendra en juillet prochain à Nouméa. Placée sous l'égide du Haut Commissariat de la République, du Président du Gouvernement et des Présidents des Assemblées des trois Provinces de la Nouvelle-Calédonie, cette initiative associant l'université de Nouvelle-Calédonie, l'Institut agronomique néo-calédonien et l'IRD mérite attention à plusieurs titres. Elle témoigne combien pour la Nouvelle-Calédonie l'activité minière, pierre angulaire du développement économique du territoire, ne peut s'exercer sans un souci constant et partagé par tous de préserver un patrimoine naturel et une biodiversité uniques au monde. Cette préoccupation qui, de longue date, se nourrit des avancées de la recherche suscite en Nouvelle-Calédonie un partenariat exemplaire entre les compagnies minières, les collectivités territoriales et les organismes scientifiques. Ce colloque offre l'occasion de réaliser un état des lieux de la recherche conduite en Nouvelle-Calédonie sur les sols, l'eau et la biodiversité et il ouvre la perspective de fructueux échanges avec d'autres équipes scientifiques ainsi qu'avec le milieu professionnel de la mine, dans le Pacifique et ailleurs.

Jean-François Girard  
Président de l'IRD



## Sommaire

### Genèse de l'or vert p.7

Les processus de formation des sols riches en nickel ouvrent de multiples perspectives de recherches menées à différentes échelles, du paysage à celle du minéral et parfois de l'atome.

### Une flore exceptionnelle p.8

Les terrains miniers de Nouvelle-Calédonie abritent l'une des flores et microflores les plus originales de la planète, qui nécessitent des stratégies de conservation spécifique.

### Un lagon sous surveillance p.9

La recherche est appelée à contribuer à un développement minier soucieux de l'environnement. L'identification de bio-indicateurs permettra notamment un meilleur suivi du milieu marin.

### Restauration écologique p.10

Mises en œuvre par des équipes scientifiques et les compagnies minières, différentes stratégies de revégétalisation sont actuellement à l'essai en Nouvelle-Calédonie.

Dossier réalisé par M.-L. Sabrié sous la direction scientifique de Fabrice Colin et de Tanguy Jaffré

## Garniérite et latérite

« Le nickel est si abondant dans les roches serpentineuses de la Nouvelle-Calédonie qu'on doit espérer en trouver un jour un gisement exploitable », écrivait de façon prémonitoire en 1869 Jules Garnier. Cinq ans plus tôt, cet ingénieur, chef du service des mines de la Nouvelle-Calédonie, découvrait la première trace de ce minéral d'une belle couleur verte sur la Grande Terre. La découverte est officialisée en 1876 lorsque l'Académie des sciences baptise cette variété de minéral aux fortes teneurs en nickel "garniérite". Alors que de nouveaux filons ne cessent d'être mis à jour et des mines créées, la fin du XIX<sup>e</sup> siècle marque l'ouverture à Nouméa de la première usine de fusion à la pointe Chaleix remplacée en 1910 par celle de Doniambo, site toujours en fonctionnement. Aujourd'hui, deux types de minerais, selon l'appellation des mineurs, sont exploités en Nouvelle-Calédonie : la garniérite à teneur élevée en nickel (2,5 à 3 %) dont les réserves sont estimées à une cinquantaine d'années, et la latérite, moins riche (1 à 2%) mais qui représente un potentiel d'exploitation considérable de plusieurs centaines d'années pour le nickel mais aussi le cobalt.



La première usine pyrométallurgique.

## Métallurgies

La Nouvelle-Calédonie possède une usine métallurgique - usine de Doniambo de la Société Le Nickel (SLN) - où l'on traite la garniérite par pyrométallurgie. Le minéral est tout d'abord calciné, ce qui permet une première réduction des oxydes métalliques à l'état solide. Une seconde phase consiste à réduire à l'état liquide les oxydes dans des fours électriques, de façon à séparer le métal (ferro-nickel de première fusion) des scories. Après affinage, du ferro-nickel (25 % de nickel) et des mattes (75 %) sont obtenus. Un autre procédé industriel, l'hydrométallurgie, récemment affiné, repose sur l'utilisation d'acide sulfurique à chaud et sous pression (lixiviation) qui attaque les oxydes de fer et libère le nickel. Actuellement testé dans l'usine pilote de Goro-Nickel, au sud de la Nouvelle-Calédonie, ce procédé, moins cher que la



Usine pilote hydrométallurgique de Goro nickel.

pyrométallurgie, présente l'avantage de traiter le minéral latéritique et de récupérer le cobalt en sous-produit. La grande quantité de minerais riches en fer et le coût plus élevé de la pyrométallurgie induisent une évolution à terme vers l'hydrométallurgie, qui demande d'être bien maîtrisée du fait de ses impacts potentiels sur l'environnement, en particulier sur la qualité des eaux.

## ► Impératif catégorique

Quatrième pays producteur de nickel<sup>1</sup>, la Nouvelle-Calédonie possède environ un quart des ressources mondiales de ce métal, qui se répartissent dans le sous-sol de l'île pour 30 % en minerais saprolitiques et 70 % en minerais dits latéritiques. «L'industrie minière de la Nouvelle-Calédonie est aujourd'hui en pleine mutation», souligne Janine Décamp, présidente du Syndicat des industries de la mine. Jusqu'à présent relativement peu exploitée<sup>2</sup>, la latérite devrait à terme, en particulier avec les nouveaux procédés de traitement de ce minerai (hydrométallurgie), prendre une part croissante dans la production néo-calédonienne. De ce fait, les compagnies minières ont un très fort besoin de connaissances des réserves en minerai latéritique dans l'île. La latérite étant encore souvent prospectée «à l'aveugle», une collaboration avec les instituts de recherche est nécessaire dans ce domaine mais aussi dans beaucoup d'autres. Lors d'une réunion organisée par le Syndicat des industries de la mine en août 2001, plusieurs axes de recherche ont été proposés : mise en œuvre de méthodes d'investigation géophysiques (tomographie électrique, sismique réfraction, géoradar); recherches sur la géochimie des latérites en vue notamment d'une meilleure compréhension de la distribution de certains éléments valorisables (cobalt, platinoïdes, scandium, etc.) ou au contraire indésirables (silice, cuivre, phosphore); inventaire des minerais saprolitiques pauvres en nickel, ressources encore non évaluées; études des relations entre tectonique et minéralisations nickelifères de façon à améliorer les méthodes de prospection, etc. «Dans le domaine de l'environnement, la demande des sociétés minières est également très diversifiée», ajoute Janine Décamp. Les petites compagnies en particulier n'ont pas les moyens de recherche leur permettant de mener des investigations qui impliquent des compétences en pédologie, en géotechnique, en agronomie, en botanique ou encore en écologie. Or toutes ces études sont nécessaires pour prendre les dispositions destinées à réduire l'impact de l'activité minière sur le milieu naturel. Les sociétés minières soulignent également l'utilité de la création d'une banque de données scientifiques et techniques sur le minerai de nickel qui ne se limiterait pas à la Nouvelle-Calédonie, mais pourrait s'élargir à l'ensemble des pays producteurs. Dans le domaine économique, une meilleure connaissance du marché mondial du nickel, du cobalt et autres métaux apparaît également essentielle. «Des champs importants de l'écosystème minier, y compris dans ses aspects socio-économiques, restent encore méconnus», souligne le Professeur Paul de Deckker, président de l'université de la Nouvelle-Calédonie. Il y a en particulier un fort manque en sciences sociales, alors que l'histoire du peuple calédonien est intimement liée à la mine. Fédérer des recherches pluridisciplinaires autour du nickel est un «impératif catégorique» qui conditionne un développement minier durable en Nouvelle-Calédonie. ●

1. Le nickel est essentiellement utilisé pour la fabrication d'aciers inoxydables (75 % de la consommation mondiale de ce métal).  
2. Les 7 200 millions de tonnes humides de minerai de nickel produites en 2001 sont composées de 4 500 tonnes de garniérites (en baisse de 17 % par rapport à 2000) contre 2 700 tonnes de latérites (en croissance de 38 %).

# Une flore exceptionnelle

Peu propices à la végétation, les terrains miniers de Nouvelle-Calédonie abritent pourtant l'une des flores les plus originales de la planète. La pauvreté de ces sols et leurs fortes teneurs en métaux lourds expliquent en partie le haut degré d'endémisme de cette flore.



À la fin de l'éocène, la flore et la végétation de la Nouvelle-Calédonie subirent des modifications considérables à la suite d'un élément géologique majeur : la mise en place progressive d'un feuillet de roches ultrabasiques qui recouvrit une grande partie de l'île. Réduites par l'altération et l'érosion, ces roches subsistent en massifs discontinus qui constituent les terrains miniers de la Nouvelle-Calédonie. Ils occupent aujourd'hui 5 500 km<sup>2</sup>, s'élevant du niveau de la mer jusqu'à 1 618 m d'altitude. Les sols issus des roches ultrabasiques sont très riches en métaux (nickel, cobalt, manganèse et chrome) et excessivement pauvres en éléments nutritifs - calcium, potassium, phosphore, azote - ainsi qu'en matière organique. La nature particulière de ces sols, fort peu favorable à la végétation, a tout d'abord provoqué la disparition d'une partie notable des espèces originaires - en majorité forestières - incapables de survivre à ce milieu. Elle a en revanche favorisé une spéciation active, par radiation adaptative<sup>1</sup>, de plusieurs groupes dont certains étaient déjà adaptés à ces sols pauvres et parfois toxiques. Ces caractéristiques ont également

dance des familles résistantes à la pauvreté et au déséquilibre minéral du sol ainsi qu'à sa toxicité (Myrtacées, Cunoniacées, Epacridacées, Protéacées, conifères...). Certaines espèces, moins nombreuses, accumulent même impunément dans leurs tissus des concentrations anormales de métaux lourds.



Flore indigène du maquis minier; de gauche à droite *Storckia pancheri*, *Grevillea meisneiri*, *Deplanchea speciosa*.



Vue sur le maquis minier depuis les pentes du Mont Koghi (1 061 m d'altitude).

## Des champignons pour alliés

La microflore des sols miniers, très diversifiée, semble jouer un rôle clé dans la croissance et la protection de certaines plantes.



La pauvreté en éléments nutritifs des terrains miniers de Nouvelle-Calédonie et leurs fortes teneurs en certains métaux limitent l'activité microbienne, gage de la fertilité des sols. Ainsi la densité microbienne y est 50 à 1 000 fois plus faible que dans un sol agricole de fertilité moyenne. Cependant, il semblerait qu'une microflore se soit adaptée à ces conditions difficiles et favorise la croissance des plantes.

La microflore des sols ultrabasiques restant largement méconnue, des recherches ont été récemment entreprises par l'UNC, l'IAC-CIRAD et l'IRD<sup>1</sup> sur plusieurs sites miniers et en particulier sur le massif de Koniambo, en partenariat avec la société Falconbridge. Les chercheurs étudient plus particulièrement le rôle des mycorhizes, champignons vivant en symbiose avec les plantes dont ils infectent les racines. Cette association joue un rôle clé dans la croissance et la protection de certaines plantes, d'une part, parce que les mycorhizes leur apportent des éléments minéraux ainsi que l'azote nécessaire à leur croissance, d'autre part parce qu'ils peuvent réduire l'absorption de métaux par celles-ci. Ces études ont mis en évidence une très grande diversité mycologique, notamment sous certains arbres (*Acacia spirobis*, *Nothofagus* spp., *Gymnostoma* spp.). Une quarantaine d'espèces de champignons ont été récoltées et décrites, pour la plupart au niveau moléculaire; et certaines recueillies sur le massif du Koniambo seraient des espèces nouvelles pour la science. Les symbioses mycorhi-

ziennes font également l'objet d'études, en particulier chez les Casuarinacées. Sur les racines de toutes les espèces endémiques analysées, les chercheurs ont observé des structures particulières, appelées «myconodules», infectées par un champignon mycorhizien de l'ordre des Glomales. «Outre une meilleure connaissance de la microflore des sites miniers et de leur rôle vis-à-vis de la végétation endémique, ces recherches devraient nous permettre d'identifier les espèces végétales locales qui, du fait de leur activités symbiotiques fixatrices d'azote ou d'éléments nutritifs, seront les plus adaptées pour la restauration de sites miniers après leur exploitation», souligne Nicolas Perrier, qui étudie le massif du Koniambo dans le cadre de sa thèse sur les cycles bio-géochimiques dans les écosystèmes miniers de la Nouvelle-Calédonie. ●

### Contact

Nicolas Perrier  
nicolas.perrier@noumea.ird.nc

1. Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes (UMR 1063 AGROM/CIRAD/INRA/IRD/UM2) et unité de recherche 037 «Biogéodynamique supergène et géomorphologie tropicale».



Le latex de cet arbre (*Niemeyera acuminata*), baptisé «sève bleue ou arbre à nickel», présente la particularité d'avoir des concentrations de nickel supérieures à 20 %.

constitué une barrière écologique qui a limité l'installation d'espèces allochtones pantropicales, ailleurs très compétitives et envahissantes. «L'aboutissement de ce lent processus a conduit à une végétation d'une remarquable originalité», souligne Tanguy Jaffré, directeur de recherche à l'IRD et l'un des grands spécialistes de la flore néo-calédonienne. Sur les terrains miniers, l'endémisme est plus élevé qu'ailleurs sur la Grande Terre. On y recense 2 200 espèces différentes dont 80 % sont endémiques de la Nouvelle-Calédonie et 35 % sont uniques à ces sols ultramafiques. Quelques-unes même n'existent que sur tel ou tel massif particulier (micro-endémisme). La flore des terrains miniers comprend en abon-

### Contact

Tanguy Jaffré  
tanguy.jaffre@noumea.ird.nc

1. Extension d'espèces issues d'un même ancêtre commun, mais qui sont adaptées à des niches écologiques différentes.
2. On recense 3 260 espèces de végétaux supérieurs natifs de la Nouvelle-Calédonie dont 74 % sont endémiques.
3. Une espèce est qualifiée d'hyperaccumulatrice de nickel lorsqu'elle tolère dans ses tissus sans être intoxiquée des teneurs supérieures à 0,1 %.
4. Voir p.10.



Ci-dessus : coupe transversale de racine mycorhizée de *Tristaniopsis* sp. récoltée dans un maquis minier; à droite : une espèce vraisemblablement nouvelle de champignon prélevée dans une forêt dense humide.

# Un lagon sous surveillance

Quel est l'impact du développement de l'exploitation et de l'industrie minière sur les lagons et les récifs coralliens, milieux d'une grande richesse biologique mais très fragiles ? Les recherches en cours sur le lagon sud-ouest visent à recueillir les informations nécessaires à un meilleur suivi de l'environnement.

Panorama général du lagon au sud de la Nouvelle-Calédonie et vue sur Nouméa et le site de Doniambo.

## Le rôle clé de la recherche

Signés le 5 mai 1998, les accords de Nouméa prévoient le transfert à la Nouvelle-Calédonie des compétences en matière de réglementation de l'exploration, de l'exploitation et de la gestion du nickel. En outre, il est prévu que, d'ici à 2004, la Nouvelle-Calédonie arrête, par délibération du Congrès, un schéma de mise en valeur des richesses minières ainsi que les principes directeurs en matière de protection de l'environnement lors de l'exploitation des gisements<sup>1</sup>. Dans ce cadre, la recherche scientifique sera amenée à jouer un rôle essentiel, ainsi que le soulignent plusieurs instances politiques néo-calédoniennes. Pour le Sénat coutumier, en effet, « cette nécessaire réglementation doit s'appuyer sur des données scientifiques solides, qui permettent un véritable état des lieux de l'impact environnemental de l'activité minière. Nous comptons sur la recherche pour prendre en compte notre aspiration à préserver les richesses naturelles de l'île dont dépend l'avenir de nos enfants. » Deux projets d'envergure d'usines de traitement du minerai ont été récemment lancés - l'un au Sud par Goro Nickel (hydrométallurgie), l'autre au Nord par Falconbridge et la SMS<sup>2</sup> (pyrométallurgie) - et devraient contribuer à terme à augmenter la capacité de production du nickel de l'île. « La Nouvelle-Calédonie s'engage désormais sur la voie d'une économie industrielle, souligne Daniel Constantin, Haut Commissaire de la République. De ce fait, la recherche devra contribuer à la définition de normes de très haut niveau qui garantissent une exploitation propre et qui constituent une condition nécessaire au développement d'une industrie lourde sur la Grande Terre. Les instituts de recherche devront plus particulièrement conjuguer et renforcer leurs efforts dans la lutte contre l'érosion, source de pollution dans les rivières et le lagon, ainsi que dans l'élaboration de méthodes permettant une restauration de la végétation dans diversité initiale. »

« Tout doit en effet être mis en œuvre pour que les projets miniers aient le plus faible impact possible sur le patrimoine terrestre et marin de l'île, déclare pour sa part, Yves Magnier, membre du Congrès de Nouvelle-Calédonie. Globalement, pour limiter les risques encourus, les apports de la recherche seront très diversifiés qu'il s'agisse de la domestication de la végétation endémique, de la microbiologie des sols ou de l'identification de bio-indicateurs du milieu marin. » Pour Jean-François Marini, délégué régional à la Recherche et à la Technologie, parer à ces risques environnementaux nécessite que les compétences et les moyens entrent en synergie tant sur le plan local que régional « Les institutions publiques et les groupes industriels impliqués dans l'exploitation minière expriment, en Nouvelle-Calédonie, une préoccupation commune, celle de résoudre les problèmes de gestion de l'environnement que suscite l'exploitation minière ; la fédération de leurs compétences et de leurs moyens doit permettre de faire progresser la recherche, ses applications et les modalités d'intervention sur le terrain, notamment en matière de préservation de la biodiversité et de revégétalisation des sols. Il s'agit là d'une préoccupation qui peut être partagée avec de nombreux pays du Sud Pacifique. Au-delà de ce colloque, un centre national de recherche technologique "nickel et environnement" est en cours de structuration. Il rassemblerait les institutions publiques et le secteur privé et permettrait d'atteindre des objectifs contractualisés dans les domaines de la recherche, de la formation, de l'expertise, du transfert de connaissances vers les acteurs concernés, dans un contexte local, régional et international. »

1. Les compétences sur l'environnement relèvent des Provinces.  
2. Société minière du Pacifique Sud.



©IRD/Pierre Laboute

duelle) porteuses des métaux piégés dans les sédiments offrent des informations sur leur origine et sur l'importance de leur dispersion. Les concentrations en nickel dans la phase résiduelle permettent par exemple de distinguer les apports érosifs rejetés par les rivières des apports issus d'un centre métallurgique où est traité le minerai. Ces recherches visent par ailleurs à déterminer l'impact éventuel des apports en métaux sur les organismes

vivant dans le lagon. Dans ce cadre, des espèces, qui présentent la particularité d'accumuler certains métaux en fonction des taux de concentration dans le milieu ambiant, font l'objet d'études expérimentales pour arriver à une sélection finale de bio-indicateurs fiables. Ces organismes benthiques représentatifs de grands groupes biologiques présents dans le lagon - mollusques bivalves, macroalgues, holothuries, coraux mous - serviront à terme d'outils de surveillance de l'environnement.

### Contact

Renaud Fichez, [fichez@noumea.ird.nc](mailto:fichez@noumea.ird.nc)

1. Dans le cadre du programme Ecotrope jusqu'en 2000, puis de l'unité de recherche 103 Camélia, en collaboration avec les universités de La Rochelle et de Nantes ainsi que l'International Atomic Energy Association (IAEA)



©IRD/Pierre Laboute

Mise en place d'un marégraphe dans le lagon sud-ouest. Les données obtenues permettent de modéliser les courants et donc la dispersion des métaux dans les eaux lagonaires.

s'accompagne de processus secondaires (stockage de déchets...) et de l'activité de l'industrie métallurgique. Là les conséquences et les effets sont mieux connus et, on peut l'espérer, mieux maîtrisés.

### Comment les instituts de recherche peuvent-ils aborder les problèmes posés par le développement de l'activité minière avec l'exploitation de la latérite ?

Il s'agira tout d'abord de comprendre. Les flux de matières transportées, soit par voie atmosphérique, soit dans les eaux, vont être notablement augmentés. L'accessibilité biologique aux métaux le sera. Les échanges métaux-organismes sont contrôlés par la spéciation ionique et moléculaire des métaux. L'exploitation minière est source de problèmes qu'il faudra savoir poser, étudier et résoudre à des échelles très variables. Il faudra savoir passer de l'échelle pluri-kilométrique de l'exploitation à l'échelle nanométrique des effets induits au niveau de la cellule. C'est un défi que l'IRD et ses partenaires doivent relever. Les premières études en ce sens sont déjà lancées.

### Créer des compétences professionnelles

L'Université de Nouvelle-Calédonie (UNC) qui compte près de deux mille étudiants est le principal établissement sur la Grande Terre à dispenser des formations professionnelles dans le secteur minier. Depuis plus de dix ans, un DEUST en géosciences appliquées « Eau, mines et environnement » accueille pour deux années universitaires une vingtaine d'étudiants. Plus récemment un DEUST en métallurgie et en génie des procédés a été créé et forme quinze à vingt futurs techniciens. « Nous avons également en projet un enseignement destiné à des professions dans la restauration des terrains miniers avec un DEUST « Revégétalisation et environnement minier », précise René Pineau, vice-Président du Conseil scientifique de l'UNC. Ces formations nous conduisent à travailler de pair avec les sociétés minières qui nous apportent un soutien financier et accueillent en stage de fin d'études nos étudiants. Nous fonctionnons à numerus clausus de façon à rester en flux tendus par rapport à la demande. Avec ces enseignements professionnels, l'UNC s'affirme comme un instrument au service du développement économique de la Nouvelle-Calédonie. »

Malgré plus d'un siècle d'exploitation minière en Nouvelle-Calédonie, les rejets, la dispersion et le dépôt de métaux

dans le lagon demeurent mal connus, qu'ils proviennent d'effluents industriels ou, via les rivières notamment, de l'érosion des massifs exploités. Pour combler ce manque, l'IRD conduit depuis 1997 des programmes de recherche sur le devenir des métaux dans le lagon sud-ouest et, plus récemment, des études à la demande de compagnies minières, dans le cadre de contrats de consultation qui incluent le financement de bourse de thèse (contrats CIFRE). Ces travaux associent plusieurs volets : études hydrodynamiques, les courants étant responsables de la dispersion dans le lagon des apports en provenance de la terre ferme, analyse physico-chimique des eaux et des sédiments marins, recherches sur l'impact éventuel des métaux sur les organismes vivant dans le lagon.

Les études en cours ont d'ores et déjà permis quelques avancées. L'analyse du nickel dissous dans les eaux lagonaires montre qu'exception faite des périodes de cyclone, les apports par les rivières s'éloignent peu de la côte ; les concentrations en nickel diminuent ainsi rapidement au-delà de la frange littorale pour atteindre au milieu du lagon des valeurs comparables (0,1 µg/litre) à celles enregistrées dans l'océan. Les sédiments qui s'accumulent au fil du temps au fond du lagon se révèlent également riches d'enseignement. D'une part, ils constituent des archives historiques à partir desquels les chercheurs reconstituent l'évolution passée des apports en métaux ; il est ainsi apparu que l'hypersédimentation qui, dans le lagon sud-ouest, se limite aux zones littorales, correspond à l'essor de l'exploitation minière au lendemain de la Seconde Guerre mondiale. D'autre part, l'analyse des différentes phases géochimiques (organique, carbonatée, oxydes-hydroxydes, rési-

## Questions à Jacques Boulègue

Directeur du département Milieux et Environnement de l'IRD et professeur à Paris VI.

### Quelles peuvent être les conséquences toxicologiques, directes ou indirectes, de l'exploitation minière sur l'environnement ?

Les gisements de nickel en Nouvelle-Calédonie correspondent à des horizons d'altération de plusieurs mètres d'épaisseur et résultent donc d'un processus géologique qui s'est opéré sans doute en quelques millions d'années. L'exploitation minière dans les horizons d'altération superficielle peut donc être assimilée à un événement du type exceptionnel à l'échelle de l'histoire géologique de la surface terrestre. Les sols exploités sont riches en certains éléments qui peuvent avoir des conséquences fâcheuses lorsqu'ils deviennent accessibles en trop grande quantité aux organismes vivants. L'exploitation minière permet cette plus grande accessibilité sous plusieurs formes.

Tout d'abord, la création de poussières qui favorise le transport de particules fines, leur dissémination et, éventuellement, leur ingestion par voie respiratoire. L'apport prévisible de nickel et de chrome par ces voies peut entraîner des allergies, voire des évolutions plus graves. Il convient donc de prendre des mesures pour éviter la dissémination de poussières. De telles



Site minier de Tiébaghi.

©IRD/Anne-Soline Lepetit

mesures existent déjà dans certaines exploitations minières, par exemple celle de Salsigne, dans le sud de la France, productrice de poussières riches en arsenic. Un deuxième type d'apport prévisible est dû au redémarrage du processus d'altération après extraction du minerai. L'eau, principal agent chimique de l'altération, va pouvoir agir de façon renouvelée et les effets de dissolution vont être accentués. On peut donc s'attendre à une augmentation des teneurs en métaux dans les eaux de ruissellement et, donc, dans les apports aux aquifères et aux milieux côtiers. Il y a donc un problème global de dégradation de la qualité des eaux. Le problème sera difficile à gérer dans des conditions climatiques difficilement contrôlables tels les cyclones, car intéressant l'ensemble des surfaces exploitées, il risque alors d'être d'une ampleur bien supérieure à celle des effets atmosphériques. L'exploitation minière

## Essais

« La fin des années 1970 a marqué une prise de conscience à la SLN : la biodiversité néo-calédonienne, unique en son genre, était menacée par le développement de l'activité minière et nous devons donc mettre en œuvre des moyens pour réduire son impact », souligne Bernard Pelletier, chef du département Géologie Sondage à la SLN. Dès lors, en nous appuyant sur des recherches menées par l'IRD et l'IAC-CIRAD, nous avons expérimenté plusieurs stratégies de revégétalisation. » Lors des premiers essais, deux espèces ligneuses indigènes sont apparues intéressantes – le gaïac (*Acacia spirobis*) et le bois de fer (*Casuarina collina*) – dont la capacité à fixer l'azote en symbiose avec des bactéries leur confère l'avantage indéniable de se développer sur des sols dépourvus de matière organique. Si les essais ont montré que le gaïac et le bois de fer permettaient de masquer à court et moyen terme les effets les plus visibles de l'exploitation minière, la méthode n'est plus préconisée : d'une part, le système racinaire de ces deux espèces n'assure pas une protection suffisante des sols contre l'érosion et, d'autre part, très compétitives, elles produisent une litière dont les propriétés physico-chimiques interdisent l'implantation de quasiment toutes les autres espèces, empêchant ainsi la restauration de la biodiversité.

Aujourd'hui, les stratégies mises en œuvre par les sociétés minières en Nouvelle-Calédonie s'orientent vers une diversification des espèces locales utilisées et notamment de plantes endémiques pionnières (voir ci-contre).

De façon à réduire les coûts très élevés de cette méthode, des études ont été entreprises pour tenter de remplacer les plantations manuelles par l'ensemencement. De nombreuses difficultés sont apparues pour la récolte des graines et la germination après le semis, mais des résultats probants ont été obtenus avec des Cypéracées et une Protéacée (*Grevillea exul*). Les essais ont également montré l'importance de la mise en place d'un paillage (*mulch*) pour maintenir une humidité suffisante à la surface du sol. Au cours de ces dernières années, la SLN et SIRAS PACIFIQUE, un bureau d'étude néo-calédonien, s'appuyant sur des travaux de l'IRD, ont adapté aux terrains ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie une technique d'ensemencement, le semis hydraulique<sup>2</sup>, qui a fait ses preuves ailleurs pour le traitement de vastes surfaces d'accès difficile et à forte pente.

Des essais menés depuis 1974 ont permis de déterminer, en fonction du type de terrain, la densité des semences appropriée, parmi lesquelles des graines d'espèces végétales exotiques à croissance rapide mais à courte durée de vie. La matière organique engendrée par le dépérissement de ces espèces dites « nurses » semble favoriser l'implantation et le développement de plantes endémiques pérennes. De récents essais donnent des résultats assez concluants : les espèces locales utilisées, en particulier, les Cypéracées, fructifient au bout de deux ou trois ans, donnant des semences qui germent en partie sur place, améliorant ainsi la densité du recouvrement végétal. ●

1. Le coût de ces plantations est de 45 à 55 000 euros par hectare, selon les espèces retenues, avec une densité de 10 000 plants par hectare.

2. Graines, engrais, colles organiques et *mulch* en suspension dans de l'eau sont projetés au moyen d'une lance.



# Restauration écologique

Comment restaurer les sites miniers après leur exploitation ? Avec les sociétés minières, les chercheurs élaborent et expérimentent des stratégies destinées à reconstituer l'écosystème dans sa diversité d'origine. Les difficultés ne manquent pas.



Depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les « mines » de nickel à ciel ouvert se sont multipliées sur les massifs de la Nouvelle-Calédonie. D'abord limité, l'impact sur l'environnement a pris une nette ampleur au lendemain de la seconde guerre mondiale avec la mécanisation. Si les sociétés minières utilisent aujourd'hui des techniques de prospection et d'exploitation de plus en plus respectueuses de l'environnement<sup>1</sup>, l'ouverture de pistes d'accès et l'exploitation minière elle-même nécessitent néanmoins le décapage des sols et le stockage sur site des matériaux non utilisés (les « stériles miniers »). Ceci a deux corollaires majeurs : d'une part, la dégradation de la végétation et le risque à terme de disparition de certains écosystèmes d'une diversité et d'une richesse exceptionnelles (cf. p.8) ; d'autre part, l'accroissement de surfaces dénudées, sensibles à l'érosion et sources, lors de fortes pluies, de rejets sédimentaires dans les rivières ou le lagon.

Depuis la fin des années 1970, des recherches sont entreprises par l'IRD et l'IAC-CIRAD à la demande des sociétés minières afin d'identifier les moyens de rétablir un couvert végétal sur les sites après leur



Végétation du maquis minier, ici *Gymnostoma nodiflorum*.

exploitation. « La revégétalisation, explique Tanguy Jaffré, botaniste à l'IRD, poursuit plusieurs objectifs : protéger les pentes de l'érosion, réguler le cycle de l'eau et reconstituer le biotope d'origine. Sur les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie, nous sommes cependant confrontés à des contraintes majeures. Du fait de la pauvreté et de la phyto-toxicité des sols, seules des plantes adaptées peuvent être utilisées. Elles doivent en outre être indigènes, car les espèces exotiques pourraient se révéler envahissantes et constituer une menace pour la flore endémique. Il s'agit moins de reverdir rapidement, que de restaurer à terme dans leur intégrité les

fonctions antiérosives et régulatrices ainsi que la biodiversité des écosystèmes qui préexistaient ».

Au terme de trois décennies de multiples essais, le recours aux espèces pionnières natives des sols ultrabasiques apparaît pour l'heure comme la meilleure alternative. Un programme de recherche, mené par l'IRD avec le soutien de la SLN, a permis d'identifier 67 espèces, dont quatre herbacées de la famille des Cypéracées, s'étant spontanément réimplantées sur d'anciens sites miniers ; parmi celles-ci 40 ont pu, dans un premier temps, être produites en pépinières, à partir de graines ou de boutures. Depuis quelques années, la reproduction de quelques autres espèces a pu être maîtrisée. Cette stratégie présente l'intérêt de créer une végétation qui, ensuite, pourra favoriser l'implantation et le développement d'autres

associations végétales, évoluant à terme en un massif forestier diversifié, proche de celui d'origine. « Les plantes pionnières contribuent en effet à stabiliser par leurs racines les terrains en surface et en profondeur ou encore à améliorer la fertilité du sol, soit parce que ce sont des espèces fixatrices d'azote, soit parce qu'elles mobilisent des éléments minéraux et les restituent au sol par la litière », précise Jacques Tassin de l'IAC-CIRAD. La réussite de cette méthode nécessite un choix judicieux des espèces au cas par cas, en fonction de caractéristiques des sites à revégétaliser et de façon à assurer par la suite une évolution vers des groupements végétaux plus complexes. L'application de cette méthode, encore au stade expérimental, demeure très coûteuse. Sa mise en œuvre à grande échelle passe par une baisse des coûts, qui pourra en partie résulter d'une meilleure connaissance et d'une domestication plus complète des espèces préconisées. ●

## Contact

Tanguy Jaffré,  
tanguy.jaffre@noumea.ird.nc  
Jacques Tassin, tassini@iac.nc

1. Mise en verse des stériles miniers, exploitation avec conservation d'un merlon de terrain naturel, évacuation des déblais lors de l'ouverture des pistes, gestion des eaux de ruissellement par des caniveaux et décanteurs, sondages hélicoptères pour la reconnaissance des sites.

**Casuarina collina ou bois de fer. L'utilisation de cette espèce pour revégétaliser n'est plus préconisée aujourd'hui notamment à cause de l'importante litière produite qui empêche d'autres espèces de s'installer.**

©IRD/Tanguy Jaffré

## Fertiliser les sols

Des essais ont montré que, même sans apport de semences, le potentiel séminal du sol de surface des sites miniers suffit pour qu'une flore pionnière de maquis réapparaisse. Son développement est cependant très lent. De plus, les quantités d'humus disponibles limitent l'application à grande échelle de ce type d'opération. L'une des stratégies d'amélioration mises en œuvre par Goro Nickel consiste donc à conserver la couche superficielle du sol et à la replacer sur les sites miniers exploités pour favoriser la revégétalisation. « Depuis 1996, nos recherches sur la revégétalisation menées en pépinière et sur le site portent sur différentes méthodes visant à protéger les espèces rares, à améliorer la germination des espèces endémiques et à accroître la fertilité des sols », souligne Stéphane McCoy, responsable du programme Revégétalisation de Goro Nickel. Parmi celles-ci, nous étudions les effets des copeaux de végétaux broyés provenant du défrichage des routes d'exploration minière. Répandue sur les sols, cette matière végétale réduit l'impact des eaux de ruissellement et maintient l'humidité autour des plantes. Elle fournit également des éléments nutritifs et crée un milieu propice au développement des mycorhizes, essentiels à la croissance des espèces du maquis minier. L'ensemble des résultats enregistrés sur le terrain contribue à approfondir et à concrétiser les recherches initiées, dans les années 1990, par l'IRD, un échange scientifique essentiel à la préservation de l'écosystème minier en Nouvelle-Calédonie. ●

## Au fur et à mesure...

Sur le massif de Koniambo, au nord de la Grande Terre, la société minière canadienne Falconbridge s'attache à une restauration progressive du site minier. « Nous avons, entre autres, opté pour une stratégie de revégétalisation au fur et à mesure de l'exploitation », explique Martin Boucher, directeur du service Environnement pour le Projet Koniambo. Nous protégeons également des parcelles où le patrimoine végétal a été laissé intact. Elles constitueront par la suite des îlots qui seront des points de départ de recolonisation de la végétation vers les parcelles revégétalisées où les conditions seront favorables. Avec l'IAC et l'IRD, nous nous attachons également à des études sur la physiologie des espèces endémiques, encore mal connues. Quelles sont les périodes de germination et de floraison de ces plantes ? Quand faut-il initier la germination des semences en dormance ? autant de questions auxquelles il nous faut répondre pour réussir les programmes de revégétalisation. La collaboration avec les instituts de recherche permet d'élaborer des méthodes de restauration reproductibles par d'autres. Soutenir la recherche fondamentale comme nous le faisons contribue à mieux faire de la recherche appliquée ». ●

**Espèces endémiques du maquis minier en pépinière, station agronomique de Port-Laguerre (IAC-CIRAD).**



**Grevillea exul, espèce pionnière utilisée pour restaurer les sites miniers.**

©IRD/Tanguy Jaffré

