

Éditorial

Mine et environnement

par Michel Laurent
directeur général de l'IRD

La Nouvelle-Calédonie vit depuis plus d'un siècle au rythme de l'économie du nickel. Après l'accord de Nouméa de 1998, l'État, le gouvernement local et les provinces ont élaboré avec des partenaires industriels privés un plan concerté de développement minier et de protection de l'environnement. Présent depuis 60 ans en Nouvelle-Calédonie, dépositaire d'un important corpus de connaissances multidisciplinaires et riche d'un large spectre de compétences, l'IRD est particulièrement bien placé pour contribuer à la réalisation de l'état des lieux avant exploitation et aux propositions garantissant une gestion durable de l'ensemble des ressources des écosystèmes miniers. Cette thématique, fortement inscrite dans le contrat d'objectifs IRD-État, est au cœur de la politique de site du centre IRD de Nouméa. Les études en cours en Nouvelle-Calédonie s'appuient sur les recommandations faites lors du colloque « préservation et restauration écologique des environnements miniers tropicaux » de 2003 à Nouméa. Cette manifestation scientifique, organisée avec l'Institut agronomique néo-calédonien et l'université de Nouvelle-Calédonie, avait regroupé plus de 400 chercheurs nationaux et issus de la communauté internationale et créé les conditions d'un dialogue entre les pouvoirs publics, la communauté des chercheurs et les acteurs privés. Ce dialogue se structure par la création, en octobre 2007, du CNRR « Nickel et son environnement ». L'ensemble des acteurs se trouve ainsi représenté au sein de cette structure de type GIP (groupement d'intérêt public). La position de l'IRD en Nouvelle-Calédonie lui confère des responsabilités particulières dans un contexte où la société civile est sensibilisée et plus exigeante (cf. le Grenelle de l'Environnement) en matière de développement durable. La société néo-calédonienne, avec son contexte de fortes pressions économiques et sociales, devient un formidable terrain expérimental de nouvelles pratiques de la recherche où l'éthique doit être omniprésente. Le CNRR devra élargir son action en s'adossant à l'AIIRD (Agence Inter-établissements de Recherche pour le Développement), ce qui lui donnera les leviers d'un meilleur partenariat tant au Nord qu'au Sud, dans sa dimension internationale notamment. L'IRD devra également renforcer, sur ces questions, le partenariat avec l'université de Nouvelle-Calédonie et développer l'articulation formation-recherche, véritable clé pour le futur de cette région et la durabilité sociale et environnementale des projets de développement de celle-ci. À ces conditions, les connaissances acquises et les méthodes développées pour les acquérir peuvent inspirer les nombreux pays de la ceinture tropicale, désireux d'exploiter durablement les ressources naturelles tout en préservant leur environnement et sa biodiversité.



© IRD/O. Dargouge

Nouvelle-Calédonie

Concilier enjeux économiques et écologiques

Comment accompagner une activité minière essentielle au développement en maîtrisant les impacts sur l'environnement, afin de préserver et restaurer les écosystèmes ? C'est l'un des défis auxquels la Nouvelle-Calédonie fait face. La recherche finalisée trouve tout son rôle en identifiant des stratégies environnementales compatibles avec un développement durable. En 2003, un colloque réunissait, autour de cette problématique, 400 scientifiques venus de plus de 20 pays et les professionnels de la mine. À l'issue de ce colloque, des recommandations avaient été élaborées collégialement. Quel est le chemin parcouru quatre ans après ?

La Nouvelle-Calédonie est le quatrième pays producteur de nickel. L'activité minière s'intensifie, notamment avec l'arrivée de nouveaux opérateurs miniers. Bientôt, la production annuelle, 7 % du PIB du territoire, sera doublée pour atteindre 200 000 tonnes de nickel métal. Parallèlement, la Nouvelle-Calédonie figure parmi les points chauds de la planète en matière de biodiversité terrestre et marine. Sur terre, plus de sept végétaux supérieurs sur dix n'existent nulle part ailleurs (70 % d'endémisme). Bien que les gisements exploités ne recouvrent que 1,2 % de la surface de la Grande Terre, l'impact de l'activité minière de surface sur les écosystèmes terrestres doit être connu qualitativement et quantitativement et géré en conséquence afin de préserver la biodiversité pour le futur. Côté océan, le territoire possède l'un des lagons les plus riches du monde et plusieurs sites récifaux ont été présentés en 2007 à l'Unesco pour une inscription au Patrimoine mondial. Les phénomènes d'érosion naturelle des sols, qui pourraient être accélérés par l'exploitation minière, doivent être maîtrisés car ils pourraient induire une hypersédimentation néfaste à la santé des récifs coralliens. Par ailleurs, les caractéristiques des effluents d'usine de traitement doivent être maîtrisés afin d'obtenir un risque zéro pour les lagons. Enfin, les eaux doivent être parfaitement gérées non seulement au plan minier mais plus largement à l'échelle régionale.

L'accord de Nouméa, qui légifère le transfert des compétences de l'État (français) à la Nouvelle-Calédonie, prévoit que le territoire arrête un schéma de mise en valeur des richesses minières comportant, outre l'inventaire minier, les règles d'exploitation des gisements, mais aussi les principes directeurs en matière de protection de l'environnement. Dans ce contexte, sous l'égide de l'État, du gouvernement et des trois

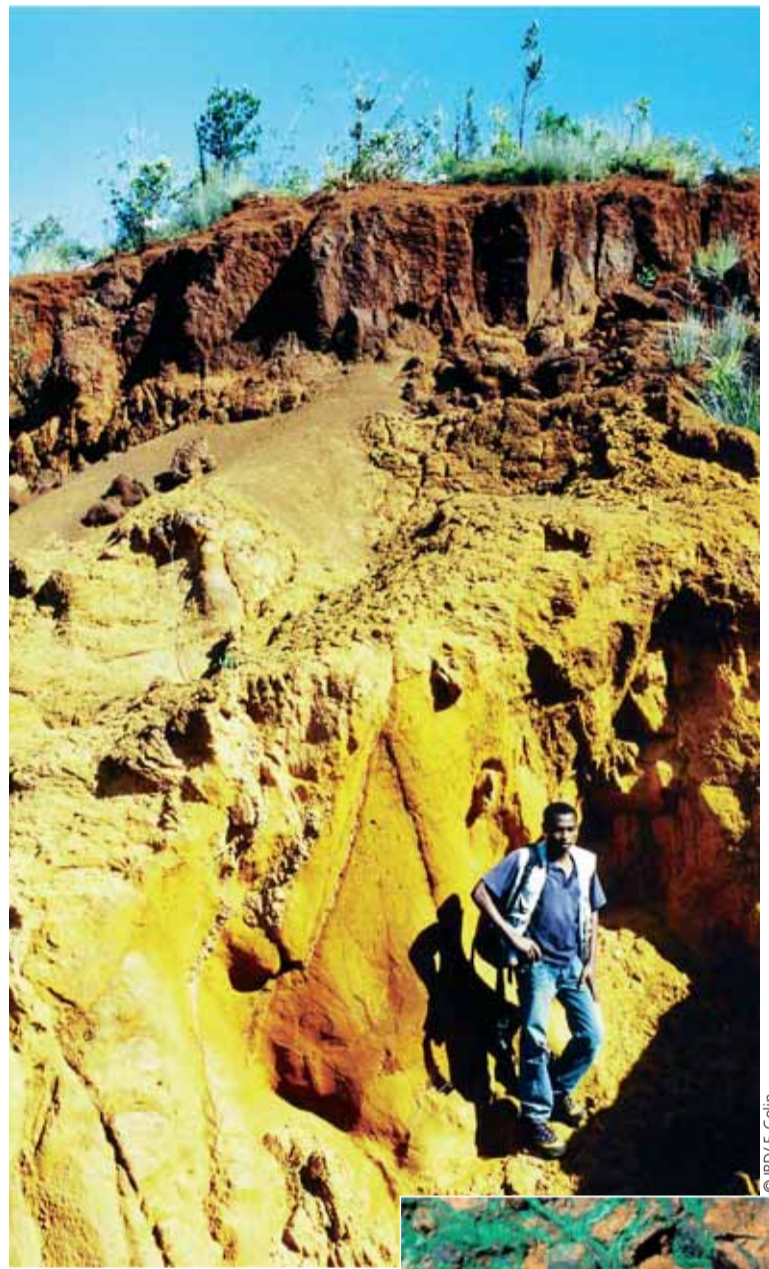
provinces du territoire, un colloque international sur la restauration et la préservation des écosystèmes miniers était organisé en 2003 par l'Institut de recherche pour le développement (IRD), l'Institut agronomique néo-calédonien (IAC) et l'université de la Nouvelle-Calédonie (UNC). Il s'agissait, pour la première fois en Nouvelle-Calédonie, de réunir scientifiques et professionnels de la mine pour faire le point sur les connaissances dans le domaine de la restauration écologique des sites miniers. Parmi les thèmes traités : la biodiversité des écosystèmes riches en métaux, la géochimie des sols latéritiques, l'eau en environnement minier et les techniques de restauration minière. Près de 400 participants venus de 22 pays ont assisté à ce colloque. Les conclusions pratiques ont été de deux ordres : des recommandations scientifiques et des recommandations structurelles.

Recommandations scientifiques

Des conseils pratiques ont été émis, concernant par exemple l'utilisation judicieuse des sols de surface, l'utilisation d'espèces végétales adaptées aux substrats, ou la conservation d'îlots de végétation naturelle, réservoirs de semences d'espèces endémiques qui ne peuvent être cultivées ou qui ne s'implantent que tardivement en milieu végétalisé. Mais les travaux présentés en 2003 montraient qu'il restait encore beaucoup à découvrir



Distribution des roches ultrabasiqes (vert pré) en Nouvelle-Calédonie.



© IRD/F. Colin

Manteaux d'altération des roches ultrabasiqes, de la roche saine jusqu'au sol. Les minerais garniériques verdâtres, riches en silice, (1 à 3 % Ni) se forment à la base, tandis que la partie supérieure contient le minéral rougeâtre dit latéritique, riche en fer (0.7 à 1,2 % Ni)



sur la plante (fructification, dissémination des pollens et des semences, germination, mécanismes de résistance aux métaux, dynamique des peuplements, en particulier à partir des aires naturelles protégées, dynamiques d'évolution de la recolonisation), le sol (processus d'altération et d'érosion à l'échelle de l'écosystème et du bassin versant, spéciation des métaux aux interfaces sol/plante/eau, rôle de la matière organique et des micro-organismes, potentiel biologique des sols) et l'eau (suivi de la qualité des eaux en environnement tropical minier, aménagements hydrauliques minimisant les effets de l'exploitation minière). Les conclusions scientifiques recommandaient encore le développement des sciences de l'homme et de la Santé : études écotoxicologiques sur les chaînes trophiques, suivis des impacts socio-économique et culturel des projets miniers en cours (par exemple sur l'expansion locale), et développement de bases de données servant de référence pour l'élaboration de normes réglementaires.

Recommandations structurelles

Les recommandations stratégiques prônaient une coordination et la structuration de la

recherche en Nouvelle-Calédonie, la création de conservatoires botaniques, une formation professionnelle renforcée et l'organisation d'un second colloque en 2008.

(suite page 6)

Dans ce numéro

L'IRD à Montpellier

En 2007, l'Institut fête les 20 ans de son implantation à Montpellier, retour sur l'histoire de cette décentralisation et sur les raisons du succès régional d'un centre de recherche dédié au développement des pays du Sud. p.12

Petites Antilles
Une exploration sismique approfondie p. 3

Tribune
Faim et malnutrition au Sahel, remobilisation nécessaire p. 16

Environnement urbain
Brasília, de l'utopie au développement durable p. 4

Adaptation et ultramafisme

Une équipe du Laboratoire des symbioses tropicales et méditerranéennes¹ s'est installée depuis 2006, au centre IRD de Nouméa. Ce renforcement des équipes déjà en place de l'université de Nouvelle-Calédonie, de l'Institut agronomique néo-calédonien et de l'IRD contribue nettement aux recherches sur l'adaptation des plantes et de leurs micro-organismes associés en réponse aux contraintes du sol.

Une première étude de cas sur le rôle des plantes et des champignons associés sur la mobilité des éléments métalliques a été effectuée sur un transect représentatif du massif du Koniombo. Ce travail a été mené dans le cadre du doctorat de Nicolas Perrier (UR161, UMR Cerege) soutenu en juin 2005 à l'IRD (contrat Falconbridge/SMSP) en partenariat avec l'université de Nouvelle-Calédonie (UNC) et l'Institut agronomique néo-calédonien (IAC), et en étroite collaboration avec les universités de Perth et de Melbourne (Australie).

Quatre formations végétales distinctes ont été identifiées d'amont en aval d'un versant (bioséquence) : un maquis dominé par *Araucaria montana* sur le plateau, un maquis ligno-herbacé à *Costularia spp.* et *Codia montana*, un maquis à *Tristaniopsis spp.* et un thalweg colonisé par *Nothofagus balansaie*. Sur ce transect, différents horizons de sol sont caractérisés par des quantités de nickel élevées mais de faibles quantités de nickel disponible pour les plantes. Ce nickel est en effet séquestré au sein des oxydes et hydroxydes de fer. La mobilité du nickel et des métaux associés, comme le manganèse, le cobalt et le chrome, est contrôlée par la présence de niveaux riches en minéraux primaires des roches mères ultrabasiques (très pauvres en silice) qui renferment des fractions de métaux facilement mobilisables à proximité de la surface du sol. Ces métaux sont ensuite recyclés par les plantes endémiques qui développent des stratégies d'adaptation originales allant jusqu'à l'hyperaccumulation des métaux dans les vacuoles de leurs cellules foliaires. La définition du rôle des associations plantes-champignons a été une découverte majeure pour la restauration écologique des sites miniers, une inoculation étant impérative pour garantir une meilleure revégétalisation post-exploitation minière. ●

1. UR040, unité mixte IRD, Cirad, Inra, Sup Agro, université de Montpellier 2.

Contact

Michel Lebrun
michel.lebrun@noumea.ird.nc



Paysage et écosystèmes miniers de Nouvelle-Calédonie : du sommet des massifs au lagon.

(suite de la page 1)

N o u v e l l e - C a l é d o n i e

Concilier enjeux économiques

Des plantes endémiques pour la revégétalisation

Une convention, ayant pour objet de promouvoir les plantes endémiques et leurs micro-organismes associés dans les procédés de revégétalisation, a été signée entre une entreprise spécialisée dans la revégétalisation des sites miniers, la Société internationale de réhabilitation et d'aménagement des sites du Pacifique (Siras) et des chercheurs (écologues, géochimistes, agronomes et microbiologistes) de l'IRD, de l'université de Nouvelle-Calédonie (UNC) et de l'Institut agronomique néo-calédonien (IAC).

Les recherches en écologie ont permis de caractériser des espèces pionnières ou cicatricielles des sites miniers dégradés. Parmi celles-ci, des Cypéracées (la famille du Carex) ont été identifiées pour leurs capacités à recoloniser les terrains dénudés. Mais l'utilisation de ces espèces endémiques, adaptées aux sols riches en métaux et extrêmement pauvres en éléments minéraux comme l'azote et le phosphore, pose des problèmes.

Le premier obstacle consiste à disposer de grandes quantités de graines. Les récoltes dans la nature sont difficiles, coûteuses et fournissent des lots de graines au pouvoir germinatif trop variable (de 0 % à 80 %) pour

être intégrées à la technique la plus utilisée pour la revégétalisation des sites miniers : le « semis hydraulique ». Cette technique consiste à propulser sous pression, à l'aide d'une lance, un mélange d'eau, de graines, d'engrais et de colle sur les surfaces à revégétaliser.

Pour remédier au problème de la qualité des graines, un champ semencier expérimental de 1,5 hectare a été mis en place. Mais cet outil reste encore limité par le manque de connaissances sur la germination, la survie des jeunes plantes sur site et les micro-organismes fongiques et bactériens impliqués dans l'assimilation de l'azote et du phosphore par ces plantes.

Concernant ce dernier point, l'IRD (UR161, UMR Cerege), en collaboration



Champ semencier pour la production de graines de Cyperaceae.

avec l'UNC et l'IAC, a mis en évidence, pour la première fois chez des espèces de cette famille, le rôle des champignons mycorrhiziens arbusculaires dans la croissance et la survie des jeunes plantes. Parallèlement, une collection d'isolats bactériens provenant de la rhizosphère de plantes croissant

naux, endémiques de la Nouvelle-Calédonie. Deux nouvelles espèces, *Cantharellus garnierii* et *Russula auranthiophylla*, ont ainsi été décrites en 2004 et de nombreuses autres espèces seront décrites dans les années qui viennent. Par ailleurs, l'abondance et la diversité du genre *Cortinarius* associé aux *Tristaniopsis* et aux *Nothofagus* sont exceptionnelles. En effet, le genre *Cortinarius*, très important en zones tempérées de l'hémisphère Nord et de l'hémisphère Sud, est quasiment absent en zone tropicale, ou restreint à des zones d'altitude, comme la Papouasie-Nouvelle-Guinée. L'analyse génétique de la diversité des cortinaires néo-calédoniens, comparée à celle des cortinaires australiens, néo-zélandais, chiliens, argentins, européens et nord-américains, est en cours.

Une fonge exceptionnelle

La diversité des champignons ectomycorhiziens associés aux plantes endémiques des maquis miniers constitue certainement le plus grand ensemble d'espèces nouvelles de champignons restant à décrire.

l'IRD et ses partenaires ont découvert des ectomycorhizes dans deux écosystèmes distincts du massif du Koniombo, dans la province Nord : le maquis à *Tristaniopsis* (myrtacées, famille de la myrte et des eucalyptus) et les forêts-galeries à *Nothofagus* (fagacées, famille des chênes, des châtaigniers et des hêtres).

Non seulement ces associations sont décrites pour la première fois, mais la diversité des champignons associés à quatre espèces, *Tristaniopsis*

callobuxus, *T. guillainii*, *Nothofagus balansaie* et *N. codonandra*, est particulièrement importante. Des prospections mycologiques régulières ont été menées dans ces milieux, mettant en évidence des champignons appartenant à des groupes ectomycorhiziens déjà connus de l'hémisphère Nord comme les russules, les lactaires, les amanites, les cortinaires, les tricholomes, les chanterelles mais aussi de l'hémisphère Sud comme les *Austroboletus* et les *Austropaxillus*. La plupart de ces champignons sont des taxons origi-

Un modèle d'étude

Afin de comprendre les mécanismes impliqués dans la tolérance aux métaux lourds des plantes et de leurs micro-organismes associés, la symbiose ectomycorhizienne qui associe *Tristaniopsis guillainii* à *Pisolithus albus* dans les sols ultramafiques (riches en minéraux ferromagnésiens) de Nouvelle-Calédonie a été choisie comme modèle d'étude.

Depuis maintenant 40 ans, la symbiose de *Pisolithus* avec *Eucalyptus* est utilisée comme modèle d'étude des relations plantes - micro-organismes au sein de la symbiose ectomycorhizienne. Malheureusement, le genre *Eucalyptus* est notoirement absent de la flore néo-calédonienne et il n'existe pas en Australie (zone d'origine des eucalyptus) d'espèces capables de tolérer de fortes concentrations de métaux lourds. Les chercheurs ont donc dû développer un modèle d'étude propre à la Nouvelle-Calédonie : la symbiose ectomycorhi-

zienne *Tristaniopsis guillainii* - *Pisolithus albus*.

Pour développer ce modèle, l'IRD, en collaboration avec l'IAC, a créé une collection de souches de *Pisolithus albus* provenant de différents massifs miniers, au nord comme au sud, et de zones témoins où les toxicités métalliques ne constituent pas une contrainte majeure. Des essais *in vitro* ont permis de montrer que certaines souches issues des maquis miniers sont capables de tolérer des doses de nickel de 100 à 200 fois supérieures aux souches témoins sensibles. Les recherches actuelles tendent à identi-

fier les déterminants moléculaires de cette tolérance chez *Pisolithus albus* associé aux *Tristaniopsis spp.* Pour cette étude, en collaboration avec les services Environnement de la société Xtrata (projet KNS avec la société SMSF),



© Cirad-IAC/Marc Ducouso

dans leur milieu naturel a été constituée. La caractérisation de ces bactéries a permis de sélectionner des isolats pour leurs capacités à solubiliser le phosphore et à tolérer le nickel. Leur utilisation en complément des graines lors du semis hydraulique est en cours d'étude. L'approfondissement

Ces champignons jouent un rôle de première importance dans la cohésion des sols constitués quasi exclusivement de billes d'oxyhydroxyde de fer (goëthite), où croissent les maquis à *Tristaniopsis spp.* La compréhension des rôles fonctionnels (notamment dans la spéciation des métaux) et de la dynamique des champignons ectomycorhiziens nécessite de poursuivre les recherches. Les résultats seront très utiles à la préparation de la couche superficielle du sol préalable à une restauration durable des écosystèmes après exploitation minière. ●

Contact

Marc Ducouso
ducouso@iac.nc

deux souches de *Pisolithus albus*, isolées du massif du Koniombo et capables de croître *in vitro* à des concentrations fortes de nickel, font l'objet d'une préservation *in situ*. La collection de souches est également testée pour la tolérance à trois

À gauche, fructification *in situ* de la souche MD06-337 de *Pisolithus albus*.

Ci-dessous, mycorrhization en conditions semi-contrôlée, entre *Pisolithus tolérant* ou sensible au nickel, avec une Myrtacée modèle (*Eucalyptus globulus*) ou une Myrtacée locale, *Tristaniopsis guillainii*.



© IRD/P. Jourand

© Cirad-IAC/Marc Ducouso

Essais *in vitro* de champignons avec nickel (100, tolérant au nickel) (*Eucalyptus globulus*) non ultramafique.

miniques et écologiques



Une flore riche à préserver

La flore de la Nouvelle-Calédonie, mondialement reconnue, n'en demeure pas moins relativement mal connue, tant du point de vue de l'inventaire de la flore, que de son origine, sa diversification et son fonctionnement.



Le **Laboratoire de Botanique et d'Écologie appliquées** de l'unité de service Biodival (US084)

remplit sa mission d'expertise auprès des diverses sociétés minières (Goro-Nickel, Koniambo Nickel SAS, SMS, Queensland Nickel, Société Le Nickel), des bureaux d'étude du territoire et des collectivités, par la caractérisation de la végétation de sites. Toutefois, les travaux réalisés ne se résument pas à de simples inventaires, ils s'inscrivent dans le cadre plus large des études systématiques et écologiques du laboratoire. Les zones concernées par le développement minier étaient souvent biologiquement mal connues. Les travaux d'inventaire commandés par les compagnies minières se traduisent, au-delà d'une meilleure connaissance de la flore, par l'acquisition de données inédites sur la biologie et l'écologie des espèces et sur le fonctionnement des écosystèmes sur terrain minier. Ainsi il a été démontré que les formations monodominantes à *Nothofagus*

n'étaient pas liées au type de sol, mais à des événements locaux anciens (probablement chablis cycloniques ou glissements de terrain). L'écologie du *Cerberiopsis candelabra* (*Apocynaceae*) a également été étudiée. Cet arbre monocarpique (qui meurt après la production de ses fruits) endémique, germant en condition héliophile (exposée au soleil), renfermant le milieu permettant l'installation d'espèces plus sciaphiles (vivant à l'ombre), puis disparaissant après sa floraison, pourrait avoir un rôle clé dans la restauration forestière des terrains miniers. L'étude systématique et génétique de nombreux échantillons récoltés au cours de prospection, de l'ordre des *Ericales*, dans les familles des *Sapotaceae* et des *Ebenaceae*, a permis de mettre en évidence de multiples événements de dispersions à partir de l'Australie. De nombreuses spéciations, probablement récentes, ont ensuite eu lieu en Nouvelle-Calédonie. L'existence des terrains



Psychotria douareii, hyperaccumulatrice de nickel (▲ fleur et fruit ▼).



ultramafiques, si contraignants pour les plantes, pourrait être un élément moteur de ces phénomènes de radiation observés. Des recommandations sont ainsi clairement formulées pour préserver et/ou restaurer les écosystèmes avant, pendant et après l'activité minière.

Contact

Jérôme Munzinger
Jerome.munzinger@noumea.ird.nc

Des plantes hyperaccumulatrices de nickel

Au-delà de la « tolérance » au nickel, il existe en Nouvelle-Calédonie des plantes hyperaccumulatrices de nickel. Qu'en est-il pour ces plantes des micro-organismes symbiotes ? Comment ont-ils évolué avec le nickel ?



Il est bien connu que les champignons mycorhiziens à arbuscules augmentent par leur mycélium le volume de sol prospecté par les racines, induisant une meilleure absorption des éléments comme le phosphore (très rare dans ce milieu) et une meilleure absorption de l'eau, leur rôle dans la résistance des plantes aux métaux toxiques comme le nickel n'est connu que depuis quelques années. La capacité de ces champignons à réduire l'absorption du nickel par la plante a été montrée chez plusieurs espèces végétales endémiques de Nouvelle-Calédonie. Une des questions qui se pose alors est de savoir s'il y a un lien entre l'hyperaccumulation de nickel chez certaines plantes, comme *Psychotria douareii*, et la colonisation des racines par les champignons mycorhiziens. Une étude récente sur les plantes accumulatrices montre que la surface racinaire colonisée par les champignons est d'autant plus faible que la concentration en nickel dans les feuilles est élevée. Chez *Psychotria douareii*, la fréquence de ces symbiotes reste toutefois suffisante pour jouer un rôle dans la nutrition. Ce n'est pas le cas chez *Sebertia acuminata*, plante considérée comme la plus forte hyperaccumulatrice de nickel dans le monde, et dont les racines n'hébergent généralement que des quantités très faibles de champignons mycorhiziens. Cette inhibition de la symbiose

mycorhizienne est liée partiellement à l'intoxication du sol par le nickel provenant de la litière de la plante. En effet, le taux de nickel extractible sous la plante peut dépasser 1 000 µg/g, alors qu'il est généralement inférieur à 100 µg/g à l'extérieur de la zone d'influence de cette plante. Le taux de germination des spores dans le sol, préalable à toute pénétration du champignon dans la plante, est ainsi fortement réduit. En effet, au cours de millions d'années d'évolution, les champignons mycorhiziens ont réussi à s'adapter en devenant de plus en plus tolérants au nickel. Une comparaison de souches fongiques isolées sous *Psychotria douareii* ou à partir d'autres sols, ultramafiques ou non, montre que les souches liées à la plante hyperaccumulatrice ne sont pas inhibées par des doses de nickel qui réduisent fortement le développement des autres souches. Un des projets en cours dans ce domaine vise à utiliser quelques espèces végétales, notamment des *Psychotria*, pour étudier la diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules. Il s'agit de comparer des



© IRD/J. Munzinger

souches de sols ultramafiques avec celles qui proviennent de sols plus classiques, en termes de distance phylogénétique (après séquençage de l'ADN), de tolérance au nickel et de capacité à améliorer la tolérance des plantes à ce métal. Ces travaux visent notamment à analyser la co-évolution plante/champignon dans ces milieux extrêmes que sont les sols ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. Ils pourront contribuer à apprécier le rôle de l'ultramafisme dans l'évolution des écosystèmes en Nouvelle-Calédonie.

En plus des connaissances fondamentales qu'elles renforcent, les études visant à comprendre les modalités d'adaptation des plantes aux milieux ultramafiques peuvent être exploitées pour la gestion de la biodiversité de ces milieux et la restauration des sites dégradés par l'activité minière.

Contact

Hamid Amir
amir@univ-nc.nc



© IRD/J. Munzinger

▲ *Sebertia acuminata*, Sapotaceae très accumulatrice de nickel comme en témoigne la couleur de la sève.

des connaissances sur cette biodiversité bactérienne se poursuit, notamment avec la recherche d'isolats capables de fixer l'azote de l'air.

Contact

Alexandre Lagrange
lagrange@noumea.ird.nc



▲ *Hygrocybe miniata*.

La symbiose mycorrhizienne sur milieu (AM) entre un *Pisolithus* du Koniambo et une *Myrtaceae* modèle (poulus) comparée à un *Pisolithus* de sol sensible au nickel.



© IRD/P. Jourand

autres métaux lourds : le chrome, le cobalt et le manganèse. Des souches hypertolérantes au chrome ont déjà été identifiées. Des essais *in vitro* sont également en cours avec un isolat tolérant de *Pisolithus albus* afin d'étudier la symbiose ectomycorhizienne et son comportement en fonction de concentrations croissantes de nickel biodisponible. Ces essais sont menés d'une part avec la *Myrtaceae* modèle, *Eucalyptus globulus* et, d'autre part, avec la *Myrtaceae* dominante du maquis minier, *Tristanopsis guillainii*. À terme, des essais d'inoculation contrôlée seront mis en place pour tester l'installation d'une symbiose ectomycorhizienne fonctionnelle pour la tolérance aux métaux lourds.

Contact

Philippe Jourand
jourandp@noumea.ird.nc

En savoir plus

Dossier **Mines et environnement, sciences** au sud n° 20, mai-juin 2003

Résumé et recommandations du colloque de 2003 : **Préservation et restauration écologique en environnement tropical minier**

WEB http://www.ird.nc/actualites/resume_travaux_final.pdf

Institut agronomique néo-calédonien (IAC)

WEB <http://www.iac.nc>

Université de Nouvelle-Calédonie

WEB <http://www.univ-nc.nc>

UR040, **Laboratoire des symbioses tropicales et méditerranéennes (LSTM)**, unité mixte Cirad, Agro M, Inra, université de Montpellier 2.

Direction : Bernard Dreyfus

WEB <http://www.mpl.ird.fr/lstm>

UR161, **Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement (Cerege)**, unité mixte CNRS, IRD, université Paul Cézanne, université de Provence, Collège de France.

Direction : Jean-Yves Bottero

WEB <http://www.cerege.fr/>

UR103, **Caractérisation et modélisation des échanges dans des lagons soumis aux influences terrigènes et anthropiques (Camelia)**.

Direction : Renaud Fichez

WEB <http://www.ird.nc/CAMELIA/>

L'île Nickel, Nouvelle-Calédonie

52 minutes, 2007

Réalisation : Patrice Desenne
Conseil scientifique : Fabrice Colin
Coproduction : IRD, Europimages et France 5
Entre protection d'un lieu unique et manne économique, les populations, les collectivités, les industriels se tournent vers les scientifiques pour mesurer, évaluer, créer des modèles d'évolution, conseiller... Le film tente de montrer le rôle de la science face au questionnement citoyen et au développement durable.

Représentation de l'IRD en Nouvelle-Calédonie

Délégué IRD pour le Pacifique Sud : Fabrice Colin
BP A5, 98848 Nouméa cedex
Tél. : (687) 26 10 00 - Fax : (687) 26 43 26
Courriel : nouvelle-caledonie@ird.fr

WEB <http://www.ird.nc>

Nickel et son Environnement

La mise en place d'un Centre national recherche et technologie « Nickel et son Environnement » a suscité un intérêt général. Un Groupement d'intérêt public (GIP) a été constitué. Il s'appuie, d'une part, sur les moyens humains et les équipements analytiques dont disposent les établissements scientifiques présents en Nouvelle-Calédonie (l'IAC/Cirad, l'UNC, l'IRD, l'IPNC, l'Ifremer, le BRGM) et d'autre part, sur des collaborations étroites avec le syndicat des industries de la mine, fort de ses compagnies minières, les bureaux d'études. Il bénéficie également des compétences de laboratoires d'excellence en France métropolitaine, en Australie et en Nouvelle-Zélande, dans le cadre de collaborations régionales. De plus, les institutions publiques de la Nouvelle-Calédonie (gouvernement, Congrès, provinces) ont apporté un fort soutien au projet qu'elles contribueront à animer et à financer. Le CNRT sera doté d'un budget de 5 millions d'euros pour 5 ans. Il fonctionnera sur appels d'offres et permettra d'adresser internationalement des sujets de recherche proposés par les collectivités publiques et le monde de la mine.



© IRD/M. Vihayleck

Inauguration, le 12 octobre 2007, du Centre national recherche et technologie « Nickel et son Environnement », les membres fondateurs autour du secrétaire d'État chargé de l'Outre-Mer, Christian Estrosi.

(suite page 8)

Un traceur de l'altération et de l'érosion

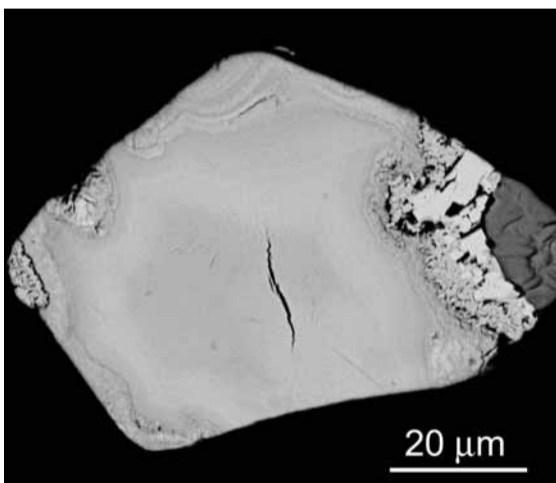
L'altération des roches ultrabasiqes (pauvres en silice) a été abordée par l'étude de l'indice platinifère de la rivière des Pirogues. Les minéraux du groupe du platine forment des inclusions dans des chromites. Avec l'altération progressive de ces dernières, ils sont libérés et se dispersent dans les profils d'altération. Les minéraux du groupe du platine se différencient par leur morphologie au microscope électronique à balayage et par leur composition chimique. Les minéraux contenant du fer (Fe), du cuivre (Cu), du soufre (S) et du palladium (Pd) subissent une dissolution sélective avec un appauvrissement dégressif de S à Cu puis Pd, Fe et platine (Pt). Cela conduit finalement à un enrichissement relatif en platine, sous forme d'isoferroplatine (Pt₃Fe), minéral plus résistant à l'altération qui tend à s'accumuler à la base des profils d'altération et à l'aval des versants. Les processus de dissolution sélective et d'enrichissement relatif réitérés au cours de l'altération sont finalement responsables des anomalies en platine détectées au sein des latérites de Nouvelle-Calédonie et sur leurs pentes en aval.

Les résultats permettent de mieux comprendre comment les éléments chimiques du groupe du platine sont mobilisés, évacués et concentrés au cours de l'altération des roches ultrabasiqes. L'étude spécifique du comportement de ces éléments au cours de l'altération des roches renseigne sur l'évolution des sols, mais aussi des reliefs et des versants, et par conséquent sur les mécanismes d'érosion et de transfert des éléments vers les réseaux fluviaux.

Ce travail a fait l'objet du doctorat de Daouda Traoré (soutenu le 11 mars 2005 à l'UNC) au sein de l'UMR Cerege au centre IRD de Nouméa, en partenariat scientifique avec le BRGM, le G2R (université de Nancy) et l'EOST/CGS (université de Strasbourg).

Contacts

Anicet Beauvais
beauvais@cerege.fr
Daouda Traoré
dtraore@ingemine.nc



Association minérale entre un alliage Pt-Fe-Cu (gris clair) et l'isoferroplatine (blanc).

Tomographie des massifs miniers

Des chercheurs de l'IRD ont utilisé la méthode géophysique de tomographie de résistivité électrique pour étudier la structure des manteaux d'altération latéritique nickelifère des massifs miniers de Nouvelle-Calédonie.

Les études ont été menées pour répondre à une demande d'expertise croissante de la part des compagnies minières présentes sur le territoire néo-calédonien (SLN, SMS, Falconbridge et Goro Nickel). Elles ont permis également de former à la recherche de nombreux étudiants en DEA, DESS et 3^e année d'école d'ingénieurs; certains ont pu trouver un emploi dans un bureau d'études local à la suite de leur stage de formation.

En Nouvelle-Calédonie, le sol de surface repose souvent sur d'épais manteaux de roches altérées (latérites) qui recouvrent eux-mêmes un socle de roches saines, ultrabasiqes, susceptibles de renfermer du nickel. L'étude du contexte géologique et hydrologique et du potentiel minier des massifs de roches ultrabasiqes de Nouvelle-Calédonie implique une connaissance approfondie des manteaux latéritiques situés entre la surface des sols et celle, enfouie, des roches mères.

La tomographie de résistivité électrique produit des images précises et continues, d'une centaine de mètres de profondeur, de l'organisation des différentes couches du manteau d'altération, sous forme de coupes en deux dimensions.

Pendant trois ans, plusieurs campagnes successives de prospection géophysique ont précédé la phase de reconnaissance par sondages mécaniques sur le massif péridotitique de Tiébaghi dans le nord de la Nouvelle-Calédonie. Plus de 40 kilomètres de profils ont ainsi été réalisés sur une surface d'environ 3 km². Leur interprétation permet de préciser la géométrie des couches d'altération sur toute la zone. Ces mesures sont comparées aux données issues d'un réseau de sondages carottés à la maille 56 m. Les informations géologiques très détaillées découlant des images géophysiques et des sondages permettent d'optimiser la quantification de la richesse du gisement de nickel.

L'analyse des données de résistivité électrique obtenues a permis d'identifier trois couches majeures dans le manteau d'altération : une première couche, résistante, qui correspond aux horizons ferrugineux (cuirasses), un matériau généralement présent au sommet des profils d'altération développés sur roches ultrabasiqes ; une seconde couche sous-jacente, conductrice, susceptible de piéger les réserves d'eau et qui correspond aux horizons altérés (saprolites fine et grossière).

Soulèvement, altération et érosion

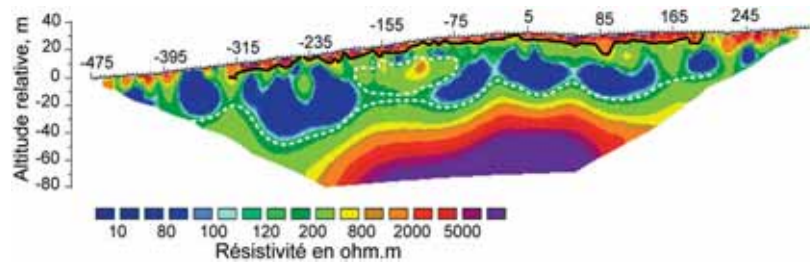
En réponse à l'une des recommandations scientifiques du colloque de Nouméa, la cartographie systématique des paléosurfaces morphologiques porteuses d'altérations latéritiques, depuis le sommet des massifs miniers jusqu'au lagon, a été entreprise. Elle apporte des connaissances de base sur les phénomènes géologiques et géomorphologiques responsables de la structure des massifs miniers.

Les résultats de la cartographie ont permis la caractérisation de sept niveaux d'érosion, étagés sur les mille six cents mètres du relief de la Grande Terre, correspondant aux surfaces qui étaient drainées par les réseaux fluviaux et aujourd'hui abandonnées en altitude. Cette étude cartographique, menée en parallèle d'une étude des sédiments fluviaux, préservés à terre et dans les bassins sédimentaires jouxtant la Grande Terre, a permis de définir les principales phases de dénudation et de dissection du relief de la Calédonie en relation avec le soulèvement de l'île, la formation des grands deltas sur ses marges et la déformation tectonique du soubassement de l'île depuis son émergence il y a 35 millions d'années. Ces travaux conduisent *in fine* à proposer un modèle d'évolution géomorphologique et tectonique pour la Nouvelle-Calédonie, en relation avec le développement et la préservation des latérites riches en nickel.

Ce travail a été réalisé au sein du Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement¹ (UR161, Cerege) au centre IRD de Nouméa en partenariat avec le BRGM et les opérateurs miniers. Il a abouti à la soutenance, le 14 mars 2005, à l'université de la Nouvelle-Calédonie du doctorat de Violaine Chevillotte (allocataire BRGM qui travaille aujourd'hui dans un bureau d'études de géologie et géophysique en Nouvelle-Calédonie).

Les résultats obtenus dans le cadre de ce doctorat viennent d'être complétés par une campagne d'imagerie sismique au moyen de l'Alis, navire océanographique de l'IRD. Cette campagne (appelée Néomarges) associant diverses unités de l'IRD (UR161 Cerege, UR55 Paléotropiques, UR082 Géoscience-Azur) et l'Institut de géophysique de l'université du Texas à Austin avait pour but d'obtenir une image fine de la marge nord-est de la Grande Terre pour comprendre les liens

Structure géoélectrique du manteau d'altération d'un massif minier (interface cuirasse ferrugineuse-saprolite fine en noir, interface saprolite grossière-roche saine en tirets blancs).



C'est aussi dans ces couches moins résistantes que les mineurs exploitent les minerais de nickel dont la présence est généralement confirmée par l'analyse chimique des sondages carottés ; la troisième couche, plus profonde et résistante, correspond au socle de roches ultrabasiqes non altérées. L'analyse détaillée de l'interface entre la couche de saprolite conductrice et cette couche résistante met en évidence une structure en bosses et creux marquée par l'alternance de seuils rocheux et de sillons de saprolites. Par sa morphologie, cette structure profonde contrôle la dynamique d'infiltration de l'eau et d'altération des roches ultrabasiqes, la vitesse du processus d'altération pouvant s'accroître à la base des seuils rocheux, souvent marquée par des fractures ouvertes, entre les sillons de saprolites.

Outre des informations sur l'organisation verticale et latérale des manteaux d'altération, les études fournissent aussi des données importantes sur la structure hydrogéologique de ces manteaux, en particulier sur les variations de niveau des eaux de nappe, dont la conductivité a permis d'interpréter les variations spatiales et temporelles de la résistivité mesurée en termes de variations de concentration minérale de ces eaux.

La méthode de résistivité appliquée sur les massifs miniers de Nouvelle-Calédonie a aussi contribué à caractériser la géométrie des zones les plus à

même de concentrer le minerai de nickel, ce qui a permis d'en optimiser l'exploitation. Loin de se limiter à la prospection minière, cette méthode a été également utilisée pour des problématiques environnementales liées aux activités minières dans le cadre d'études et d'expertises géotechniques et hydrologiques ou pour suivre l'évolution et la vulnérabilité des réserves d'eau douce souterraines.

La technologie géophysique a été transférée par l'IRD à un opérateur minier via un bureau d'études local, ce qui a permis la création d'une petite entreprise par une postdoctorante de l'UMR Cerege qui s'est adjoint récemment les services d'une doctorante de cette même unité. C'est dans ce cadre que sont faites aujourd'hui des expertises sur différents massifs miniers pour continuer à répondre à la demande des opérateurs industriels. Ces expertises visent en particulier à acquérir une meilleure connaissance des structures hydrogéologiques des massifs miniers, par exemple sur le site de Goro Nickel, dans la perspective d'identification de zones de stockage de déchets issus du traitement des minerais latéritiques.

Contacts

Anicet.Beauvais@ird.fr
Jean-Claude.Parisot@ird.fr
Bernard.Robineau@gouv.nc
join@univ.reunion.fr

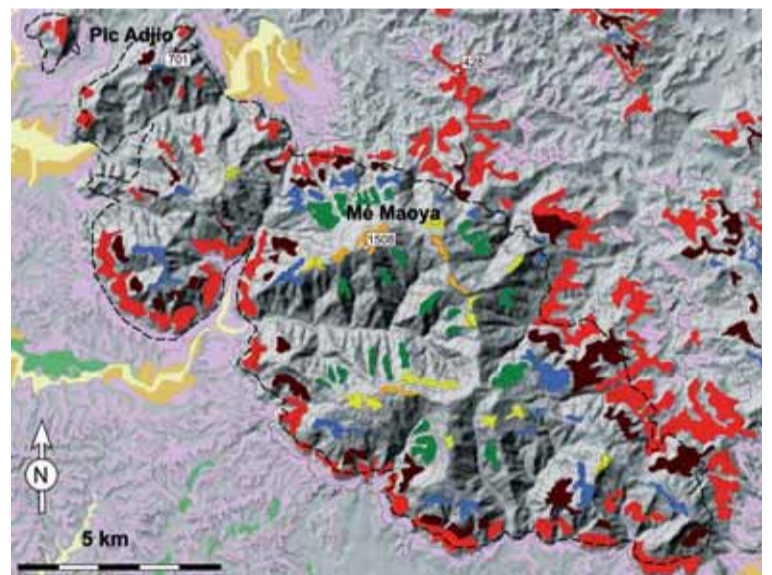
terre-mer et érosion-sédimentation au cours de l'évolution des massifs miniers. Les données géophysiques recueillies permettent de définir la réponse des marges de la Calédonie aux variations du niveau marin, aux mouvements verticaux de la Grande Terre et aux variations climatiques au cours des 10 derniers millions d'années. Après une phase majeure de soulèvement consécutive à l'effondrement des marges et des deltas qu'elles portaient, la Grande Terre s'est peu à peu enfoncée au cours des 5 derniers millions d'années alors que la sédi-

mentation carbonatée s'installait sur ses marges. L'expression finale de cette sédimentation est le récif-barrière calédonien qui a permis la naissance du plus beau et du plus grand lagon du monde.

1. Unité mixte CNRS, IRD, université Paul Cézanne, université de Provence, Collège de France.

Contacts

chardon@lmtg.obs-mip.fr
Anicet.Beauvais@ird.fr
Cecile.Savin@lagoon.nc



Distribution des reliques des surfaces latéritiques du massif de roches ultrabasiqes du Mé Maoya (Nouvelle-Calédonie).

Hydrogéologie des massifs miniers

Sur les massifs ultrabasiqes, les eaux souterraines, partout présentes, constituent une ressource mais aussi une contrainte pour l'exploitation minière. Des études ont été menées afin d'acquérir une meilleure connaissance hydrologique et hydrogéologique des massifs miniers. Le contexte hydrogéologique de ces massifs était souvent assimilé à une superposition de nappes localisées dans les différents horizons du manteau d'altération. Avec l'exemple du système aquifère du plateau de Tiébaghi (nord de la Grande

Terre), la continuité hydraulique des horizons d'altération jusqu'au socle a été démontrée. Dans ce modèle, un horizon nodulaire sous la cuirasse ferrugineuse forme une surface de suintement au toit de la nappe. En deçà, le système hydrogéologique peut être illustré selon un modèle plan vertical à trois couches : (i) les latérites rouges et jaunes, (ii) le socle fracturé altéré et (iii) le socle fracturé sain.

Cet exemple a permis de proposer un modèle général du système hydrogéologique des massifs miniers de

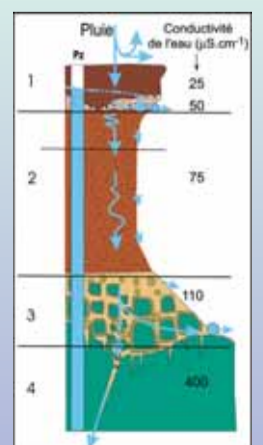
Nouvelle-Calédonie. Le fonctionnement de ce système est caractérisé par une forte dépendance hydraulique entre les horizons d'altération et le socle. La structure et la texture des latérites participent à la régulation de la ressource développée essentiellement au toit du socle rocheux. Ce modèle conceptuel fournit un cadre pour l'interprétation des conditions de gisement des eaux souterraines qui évoluent largement dans les différents massifs miniers de l'île selon les conditions d'alimentation et de drainage.

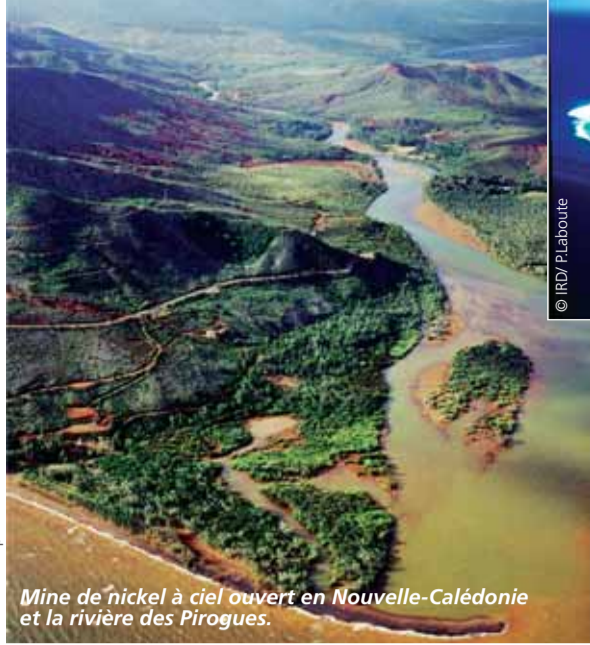
Contacts

Jean-Lambert Join
join@univ.reunion.fr
Jean-Paul Ambrosi
Jean-Paul.Ambrosi@ird.fr

Circulation des eaux souterraines dans un profil caractéristique et valeur des conductivités mesurées dans chaque couche.

1 : Cuirasse ferrugineuse et horizon nodulaire
2 : Latérites rouges et jaunes
3 : Socle fracturé altéré
4 : Socle fracturé sain
Pz : Sondage avec le niveau de la nappe

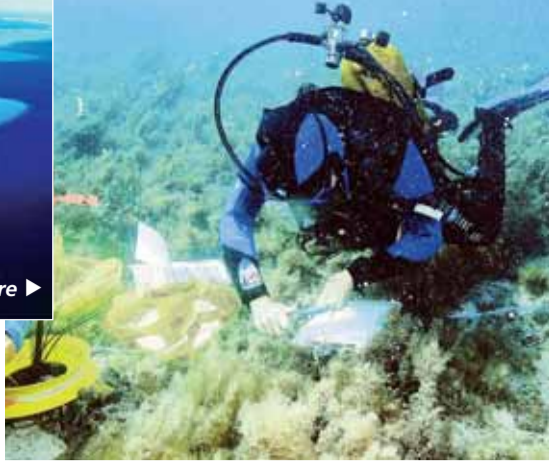




Mine de nickel à ciel ouvert en Nouvelle-Calédonie et la rivière des Pirogues.



▲ Récif-barrière ▶



© IRD/PLaboute

De la terre au lagon

L'altération et l'érosion transfèrent les métaux des bassins versants vers l'océan. Ces transferts s'exercent depuis des millions d'années et sont toujours actifs aujourd'hui. Le nickel peut ainsi servir de traceur dans des processus impliqués dans le fonctionnement des écosystèmes incluant des organismes vivants.

Dosage du nickel en milieu marin

La pierre angulaire de toute étude scientifique réside dans la contribution analytique, autrement dit sans mesure précise, pas d'interprétations et encore moins de conclusions sérieuses. Pour cette raison, un effort tout particulier a, très tôt, été consenti pour développer des outils spécifiques de dosage du nickel dans les trois compartiments marins que sont les sédiments, les tissus biologiques et la colonne d'eau.

Dans les sédiments et les matières en suspension, l'analyse du nickel a fait, et continue de faire, l'objet de mises au point méthodologiques pour quantifier les différentes formes physico-chimiques du métal et ainsi estimer sa disponibilité potentielle pour le milieu vivant.

Outre les techniques chimiques classiques, de nouvelles voies d'analyse physique (Fluorescence X, MET...) sont

actuellement appliquées grâce à une collaboration avec le Cerege.

Le dosage en eau de mer des fractions dissoutes du nickel à l'état de traces constitue depuis longtemps le maillon le plus délicat de la chaîne analytique. Cette préoccupation a conduit à la mise au point d'un banc autonome de traitement des échantillons sur lit de résine piloté par ordinateur, réalisation qui signe la dernière avancée de l'unité de recherche en matière d'automatisation analytique. Le développement d'un tel dispositif a été

rendu indispensable compte tenu du nombre élevé des études conduites autour des problématiques minières (PNEC, contrat de consultance Goro-Ni...). Le dosage du nickel en eau de mer fait actuellement l'objet de nouvelles recherches (Gels intégrateurs) pour parvenir à des techniques fiables et robustes dont les domaines d'application devraient essentiellement concerner le suivi environnemental à travers la constitution des futurs réseaux de surveillance du milieu marin de Nouvelle-Calédonie.

Le nickel, traceur des apports terrigènes

Cette capacité à mesurer les quantités de nickel a conduit à utiliser ce métal comme traceur des sources terrigènes de particules dans le lagon. En effet, déterminé initialement de manière globale dans le sédiment, l'étude de sa distribution a permis, dans un premier temps, de délimiter les aires lagunaires influencées par les apports terrigènes. Le dosage plus ciblé des fractions physico-chimiques de nickel, constitutives de particules strictement terrigènes, a ensuite facilité l'interprétation de la dynamique sédimentaire. Ainsi, ont pu être tracées les zones de dépôts au droit des embouchures et plus amplement le transport du matériel terrigène fin à travers le lagon.

Dans les lagons sud et sud-ouest, plusieurs unités sédimentaires (baies Ste-Marie, St-Vincent, Dumbéa, Boulari, Prony, Kwé) ont été ainsi décryptées pour mettre en évidence les gradients d'influences anthropiques et terrigènes.

Dans certains cas, les phénomènes de transport à grande distance de particules terrigènes ont pu être démontrés, comme en baie Sainte-Marie où la sédimentation est empreinte du matériel particulaire arraché au bassin versant de la Coulée et transporté par l'hydrodynamisme local.

À cette dimension spatiale du « traceur-nickel », peut être juxtaposée une dimension temporelle en vertu notamment de sa faible mobilité dans les sédiments terrigènes. Ainsi, l'étude des variations des teneurs en métaux dans les sédiments accumulés, ou « archives sédimentaires », a permis de reconstituer la chronologie des événements liés à l'histoire de l'exploitation minière depuis une centaine d'années. Les profils de concentration du nickel le long des carottes sédimentaires ont tracé avec une précision remarquable les modifications dans les régimes sédimentaires et, conjointement avec d'autres paramètres,

permis de les dater. De telles études ont été conduites dans le canyon de la Dumbéa ainsi que sur les baies Dumbéa, Prony, Kwé et Ste-Marie. Dans cette dernière, l'ouverture à l'exploitation minière du bassin versant de la Coulée et son intensification dans les années 1970 ont été clairement identifiées grâce au nickel.

Dans le cadre du Programme national environnement côtier (PNEC), le volet *Risques miniers : Spéciation et flux des contaminants métalliques dans un système estuarien lagunaire* est développé autour de deux systèmes estuariens caractérisés par des apports terrigènes de teneurs différentes en nickel : un bassin versant présentant une exploitation minière en activité (bassin de la Tontouta) ; un bassin versant dévégétalisé avec des gisements désaffectés depuis 20 ans mais ayant fait l'objet d'une intense extraction (bassin de la Coulée). Un troisième système estuarien, exempt de toute activité minière présente ou passée, a servi de référence à

l'étude (Dumbéa). Les recherches, effectuées en collaboration avec le Cerege, sont orientées de manière à former un continuum dans l'étude de la géochimie des métaux et du nickel en particulier, entre les milieux terrestres et lagunaires. Le programme intègre la variabilité temporelle liée aux conditions météorologiques qui régissent l'intensité du lessivage des sols grâce aux informations détaillées par de longues séries temporelles de mesure sur les 3 estuaires (baies St-Vincent, Dumbéa, Boulari).



Scléractiniaire : Faviidae (naissant). Lagon, passe de Boulari, Nouvelle-Calédonie. 15 m de profondeur.

Des bio-indicateurs de contamination



L'impact sur le compartiment biologique du lagon et la constitution des réseaux de surveillance qui en découle, représentent un autre axe des recherches développées autour du nickel dans l'UR Camelia¹.

Ce champ d'investigation a tout d'abord fait l'objet de travaux sur les phénomènes de bioaccumulation du métal par un nombre important d'espèces marines caractéristiques du sédi-

Gafrarium tumidum.

ment et de la colonne d'eau. Des groupes d'espèces ont pu ainsi être sélectionnés selon leur aptitude à concentrer le nickel pour servir de bio-indicateurs de contamination et un premier bilan des niveaux de concentration atteints a été dressé chez les espèces retenues. Cependant, deux espèces semblent particulièrement prometteuses, l'algue *Lobophora variegata* et le bivalve *Isognomom isognomom*, dont l'utilisation conjointe permet de fournir une représentation précise des niveaux de contamination. Parmi les espèces pressenties, au moins deux bivalves, *Isognomom isognomom*

et *Gafrarium tumidum* ont fait l'objet de travaux sur les phénomènes d'incorporation du nickel dans les tissus biologiques. Ces études ont permis de hiérarchiser les voies de transfert du nickel vers les tissus de ces organismes et de déterminer les principaux paramètres cinétiques qui permettent de valider le choix des espèces retenues en tant que bio-indicateur de contamination par le nickel.

1. UR103 *Caractérisation et modélisation de l'échange dans les lagons soumis aux influences terrigènes et anthropiques*, Camelia.

Estimer l'écotoxicité du nickel

Sur la base des recommandations formulées par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques pour évaluer la toxicité chronique de l'effluent attendu de l'usine de Goro-Ni, un axe de recherche en matière d'écotoxicité a été développé dans l'UR Camelia. Dans ce contexte, il s'agit d'accroître la connaissance sur la mesure des effets chroniques chez les organismes marins du milieu récifal néo-calédonien, de manière à disposer, d'ici la mise en service de l'usine, d'outils écotoxicologiques d'une variété suffisante pour appliquer préférentiellement les critères énoncés dans la méthodologie européenne. Le nickel fait partie des métaux surveillés

dans le cadre d'un projet d'observatoire de l'environnement mené sur des bio-indicateurs sélectionnés.

L'objectif des recherches consiste donc à : caractériser la toxicité de l'effluent du complexe minier ; réaliser une évaluation de risque initial (point zéro écotoxicologique) ; proposer une procédure pour réaliser un suivi régulier de l'impact potentiel des effluents issus des usines. Cette approche fondée sur la détermination d'indices précoces de toxicité vient logiquement compléter les travaux conduits par ailleurs sur les indicateurs physico-chimiques (eaux et sédiments) et biologiques (organismes bioaccumulateurs).

Écosystème et nickel

Le rôle des bactéries sur le devenir du nickel dans le milieu marin a été abordé afin d'identifier les processus primordiaux de transfert et de transformation des complexes biogéochimiques dans les sédiments en fonction des conditions d'oxygénation (oxie/anoxie) ; différents microcosmes ont ainsi été testés.

Il apparaît que la distribution du nickel entre les différentes phases géochimiques constitutives des sédiments est éminemment variable. En particulier, les gradients de concentration du nickel dissous dans la colonne d'eau ont des conséquences liées à l'origine des sédiments expérimentés. Dans certaines conditions physico-chimiques, ils peuvent donner lieu à des relargages

de métaux, comme le manganèse. Cependant, il semble que les bactéries n'influencent pas la spéciation des métaux présents dans les différentes phases géochimiques, alors qu'elles peuvent stimuler l'adsorption dans les sédiments, avec notamment la production de sulfure ; cette stimulation n'entraîne pas de différence significative dans les processus de spéciation. ●

Contacts

Jean-Michel Fernandez
jean-michel.fernandez@ird.fr
Olivier Pringault
olivier.pringault@ird.fr
Pascal Douillet
pascal.douillet@ird.fr

Les chemins de l'eau

En environnement minier, le maintien de la qualité des eaux constitue l'un des problèmes majeurs. Les horizons exploités et les sols sont riches en éléments qui peuvent avoir des conséquences néfastes lorsqu'ils deviennent accessibles aux organismes vivants, en particulier lorsqu'ils sont au contact des eaux de ruissellement, puis dans les sols, dans les cours d'eau et les lagons.

L'exploitation minière peut occasionner une accélération des processus d'altération par les eaux des roches encore peu altérées se trouvant sous le minerai et dans les sols de surface, en raison de la fragmentation liée à l'extraction et au traitement du minerai, et des effets transitoires de la revégétalisation. À plus long terme, l'installation de la végétation est bénéfique en raison de la limitation du ruissellement. Mais l'action des eaux de percolation permet une dissolution accélérée des minéraux et donc une augmentation des teneurs en métaux, sous formes dissoute et colloïdale. Ces effets se propagent dans les aquifères et dans les milieux côtiers. Les péridotites et les sols latéritiques représentent une source importante en métaux. L'introduction de formes moléculaires nouvelles consécutive à l'exploitation augmente aussi l'impact des métaux sur les organismes vivants. L'intensification de l'exploitation minière en Nouvelle-Calédonie, et en particulier celle des minerais latéritiques, constitue ainsi une source potentielle de contamination des eaux.

Le problème peut, par des actions ciblées, trouver des solutions dans des territoires où les chemins de l'eau sont connus. Les premières études hydrologiques et hydrogéologiques, entreprises en coopération entre les opérateurs miniers et les scientifiques présents sur le territoire, ont montré que les milieux géologiques riches en garnièrite sont très fracturés. L'exploitation minière, dans une telle situation, permet la circulation accrue des eaux dans les fractures sous-jacentes au minerai, induisant des effets de dissolution localisés. Il en résulte une extension du réseau de circulation de type karstique au sein des péridotites. C'est la configuration hydrogéologique la plus susceptible de propager des contaminations acquises en surface par les eaux de ruissellement.

Pour ce qui est des zones latéritiques et des sols de surface, la connaissance de leur hydrologie reste encore insuffisante. L'eau de percolation, y circulant lentement, s'enrichit en éléments dissous au-delà de ce qui est actuellement observé en milieu naturel. Cela pourrait accentuer les sources de déséquilibres chimiques et biochimiques pour l'environnement. Les effets seront étalés sur des échelles de temps importantes et qui restent encore à préciser par une meilleure connaissance des chemins de l'eau dans les latérites et les sols de surface.

Le problème des conséquences de l'exploitation minière sur l'environnement, et en particulier sur les eaux, n'est pas nouveau, mais leur perception reste encore trop partielle en ce qui concerne les milieux tropicaux. Son impact sur l'environnement ne sera limité que par une politique de contrôle des chemins des eaux, de leur composition et de la restitution de leur qualité, telle que celle conduite dans le cadre d'observatoires. ●

Organiser les connaissances environnementales

Dans le domaine de l'environnement, les systèmes d'information revêtent une importance stratégique. Au-delà du contenu, que représentent les connaissances acquises par les différentes disciplines scientifiques sur le milieu, l'organisation de ce contenu détermine sa propension à être utilisable par l'ensemble des acteurs.

Dans le contexte dynamique de la métallurgie et de l'exploitation du nickel en Nouvelle-Calédonie, les responsables ont besoin, pour gérer les problèmes de développement, d'appréhender des questions compliquées avec des contraintes de temps dictées par la réalité du terrain. Ainsi, la collecte de nouvelles données doit-elle être optimisée et l'acquisition de nouvelles connaissances environnementales s'accompagner de méthodes favorisant leur appropriation rapide.

Pour cela, un certain nombre d'étapes relatives à l'organisation des contenus et à leur accessibilité sont à mettre en œuvre très en amont, dont une partie relève encore de la recherche en systèmes d'information environnementale. La liste qui suit n'est pas exhaustive :

- En amont, la télédétection spatiale permet, d'une part, de récolter des mesures fiables et exhaustives et, d'autre part, de fédérer l'interprétation pluridisciplinaire que l'on peut en faire.
- Les bases de métadonnées fournissent des catalogues de l'information existante et des moyens de recherche multicritère.
- Les bases de données, sous réserve qu'elles soient standardisées et communicantes, structurent une information pérenne, partageable et réutilisable.
- Le domaine de l'interopérabilité répond aux besoins de communication à distance de systèmes hétérogènes, comme les systèmes d'information géographique. Chacun dispose ainsi de moyens très supérieurs à ses propres ressources.
- Une fois l'information collectée, organisée et accessible, le domaine de la modélisation des systèmes complexes permet alors de raisonner, de simuler et de prédire. En un mot, de comprendre les phénomènes et d'anticiper les tendances pour mieux les gérer.

Communautés humaines face au développement minier

Les études ont mis en évidence le lien spécifique des Kanaks avec la nature. En revanche, peu de documents réactualisés décrivent comment a évolué la perception des communautés peuplant la Nouvelle-Calédonie au regard des changements écologiques et économiques produits par le développement des activités minières. Des travaux sont en cours sur ces thématiques.

Les conséquences écologiques liées à l'activité minière depuis le siècle dernier (contamination des eaux de surface et des terres agricoles, engorgement des lits des rivières, disparitions de zones de végétation naturelle...) ont été jusqu'à présent tolérées en contrepartie des emplois créés. Mais il n'en est plus de même aujourd'hui et les collectivités, en charge de l'environnement et de l'approvisionnement en besoins premiers des populations (alimentation en eau potable, santé), travaillent à l'élaboration de projets miniers équilibrés économiquement, écologiquement et socialement. Ainsi, l'élaboration d'un corpus régle-

mentaire adapté et fondé sur une bonne connaissance de la société et de la vision de son organisation doit être finalisée. Par exemple, un nombre croissant d'emplois seront créés dans le domaine de la revégétalisation, avec des répercussions sur le développement local à travers des initiatives de projets nouveaux (récoltes, pépinières, réinstallation d'un environnement favorable à la plante...). L'impact de ces développements sur l'activité de production agricole traditionnelle, commercialisée ou autoconsommée est à mesurer si l'on veut permettre aux décideurs de disposer d'outils fins de pilotage de l'aménagement du territoire et du rééquilibrage.



Sensibilisation des enfants au milieu récifal dans la tribu de Temala (zone VKP, Province Nord).

Deux questions principales

À la suite des recommandations du colloque de 2003, deux thèses de doctorat sur le projet Koniambo en province Nord ont été conduites au sein de l'UR128 *Communautés récifales et Usages*, financées par des



Pêche au filet dans la zone de Voh-Koné-Pouembout.

bourses Cifre (Denis Poignonec, thèse soutenue en 2006, Nicolas Guillemot, thèse en cours). Objectif : faire un état initial de la zone récifo-lagonaire de la région de Voh-Koné-Pouembout avant l'installation du complexe minier :

- au plan écologique – quel est l'état actuel des communautés récifales associées à la zone récifo-lagonaire, et plus particulièrement les peuplements de poissons, ressource essentielle des populations locales ?
- au plan socio-économique – quels sont les éléments à prendre en compte pour répondre aux attentes et aux besoins des populations locales vis-à-vis de leurs ressources puisées dans le lagon ?

En ce qui concerne les communautés de poissons, les résultats obtenus montrent une hétérogénéité spatiale qui reflète les différents habitats rencontrés dans la zone d'étude. Une analyse temporelle montre que les peuplements ichtyologiques sont variables au cours du temps, variabilité qui pourrait être due à l'impact du cyclone Erica en 2003. Ce résultat souligne l'intérêt d'un suivi sur le long terme et la mise en place d'une méthodologie adaptée pour pouvoir différencier les perturbations anthropiques (dragages, augmentation de l'effort de pêche...) de celles qui sont dues à des phénomènes naturels (cyclones...).

Dans l'approche socio-économique, le savoir des acteurs locaux constitue une source de connaissances essentielle qu'il importe de prendre en compte. La méthodologie utilisée pour recueillir ce savoir traditionnel s'appuie sur la représentation de la perception des acteurs locaux du fonctionnement du système récifo-lagonaire par le tracé de cartes cognitives individuelles. Les principaux résultats mettent en évidence une dichotomie marquée entre les acteurs des villages et ceux des tribus, tant au niveau de la structure du fonctionnement du système récifo-lagonaire qu'à celui de l'importance relative accordée aux différents éléments constitutifs de ce système. Ce programme pose les bases pour la mise en place de protocoles de communication entre les acteurs locaux de la zone de Voh-Koné-Pouembout. De plus, il ouvre des pistes de réflexions pour modéliser et simuler l'évolution du système récifo-lagonaire, ce qui fournira un éclairage plus dynamique de son fonctionnement en vue d'une approche intégrée de la gestion de l'environnement et des ressources récifo-lagonaires.

Contact

Pascal Chabanet, UR128
pascal.chabanet@noumea.ird.nc

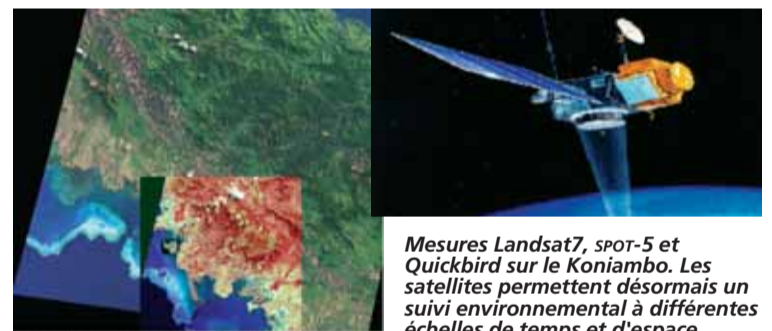
Suivi environnemental Modélisation et applications

Dans un monde où l'information est bien organisée, il est possible de connaître l'existant et d'y accéder afin de ne pas recommencer les mêmes collectes de données, de mutualiser les ressources (données, calculs, expertises) et d'avoir une vision collective d'une situation donnée à un instant donné.

Un gain économique et stratégique qui a été identifié au niveau de l'Europe par la directive Inspire : « Inspire, Infrastructure pour l'information spatiale en Europe, renforcera la base de connaissances exploitables à des fins de politique environnementale et elle permettra aux citoyens et aux décideurs d'y accéder plus facilement. »

En Nouvelle-Calédonie, des études sont menées pour répondre à ces enjeux. L'IRD et l'université de Nouvelle-Calédonie mènent conjointement des projets pilotes d'organisation des connaissances environnementales afin de permettre aux responsables d'agir et

de réagir aux contraintes souvent antagoniques du développement. Des partenaires comme le Land Care Research ou la société KNS sont également partie prenante de ces travaux pluridisciplinaires. Certains ont déjà abouti à des résultats intéressants : communication de systèmes d'information géographique sur Internet ou modélisation de propagation de poussières. D'autres sont très prometteurs comme l'exploitation spatio-temporelle des données du satellite Formosat-2 sur le Koniambo pour la gestion intégrée des bassins versants au lagon. C'est en effet la première programmation en Nouvelle-Calédonie qui permet de disposer de



Mesures Landsat7, spot-5 et Quickbird sur le Koniambo. Les satellites permettent désormais un suivi environnemental à différentes échelles de temps et d'espace.

données satellitaires exploitables au niveau spatial mais également au niveau temporel. Les spécialistes peuvent alors raisonner sur des évolutions et non plus uniquement sur des « point zéro ». Cette acquisition a été financée par KNS, pilotée et analysée par l'IRD. Les premiers résultats préfigurent déjà le potentiel d'analyse et la société SMS est intéressée à poursuivre l'action dans le cadre de ses objectifs propres de préservation de l'environnement. En effet, compte tenu de la progression concomitante des capacités des satellites d'observation et des méthodes d'analyse, il est désormais parfaitement envisageable de suivre l'évolution des man-

groves, des récifs ou de la végétation à des échelles spatiale et temporelle compatibles avec les besoins de gestion. Des sujets de thèses, en cours d'élaboration dans le cadre de bourses Cifre, vont permettre de poursuivre les études dans un contexte de collaboration entre la recherche et l'industrie.

Contacts

Didier Lille, US140, Espace, IRD
Didier.Lille@ird.fr
Morgan Mangeas et Touraivane, LGPMC, Erim, Espace, Université de la Nouvelle-Calédonie
Morgan.Mangeas@univ-nc.nc
Touraivane@univ-nc.nc

Réalité économique, formation, innovations et transfert de compétences

Depuis 4 ans, cette thématique a permis de former à la recherche par la recherche : 15 DEA, DESS, dont tous ont trouvé un emploi en Nouvelle-Calédonie dans les compagnies minières et bureaux d'études ; 10 doctorants (en collaboration avec l'UNC, l'IAC, l'IP, les compagnies minières et bureaux d'études, les Provinces, dont 6 soutenues qui ont trouvé un emploi en Nouvelle-Calédonie dans les bureaux d'études et organismes de recherche ; 1 postdoctorant avec création d'une entreprise innovante « Géophys' Cal » appliquant les techniques de géophysique à la connaissance en deux et trois dimensions des manteaux d'aléation miniers et aux modélisations de la circulation des eaux.

Enfin, pour compléter les équipes de recherche et mettre à disposition le plus rapidement possible les résultats, un projet de société innovante baptisé Bluecham a été proposé au 9^e concours national sur l'innovation, organisé en 2007 par le ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur. Le projet a été lauréat du concours, ce qui va donner les moyens de déployer en Nouvelle-Calédonie un dispositif opérationnel Recherche/Innovation/Formation/Production dans le domaine des systèmes d'aide à la décision en environnement. Cette initiative aidera également des diplômés calédoniens dans le domaine de l'informatique scientifique, de la télédétection ou des mathématiques appliquées à trouver plus facilement des emplois locaux dans leurs domaines de compétences respectifs. Ce savoir-faire scientifique et technologique en rapport avec le développement économique de la Nouvelle-Calédonie permettra d'accompagner les objectifs du Centre national de recherche technologique (CNRT) « Nickel et son Environnement » et d'apporter des solutions innovantes en matière de structuration, de mutualisation et d'utilisation des connaissances pluridisciplinaires et pluriorganismes.



Identification automatisée de la forêt sclérophylle de Vavouto (image Quickbird).