



HAL
open science

Dispersion et exposition humaine aux métaux en Nouvelle-Calédonie : synthèse des résultats

Magalie Baudrimont, Yannick Dominique, Agnès Feurtet-Mazel, Patrice Gonzalez, Pierre-Yves Gourvès, Peggy Gunkel-Grillon, Christine Laporte-Magoni, Estelle Lefrançois, Yves Letourneur, Julien Marquié, et al.

► To cite this version:

Magalie Baudrimont, Yannick Dominique, Agnès Feurtet-Mazel, Patrice Gonzalez, Pierre-Yves Gourvès, et al.. Dispersion et exposition humaine aux métaux en Nouvelle-Calédonie : synthèse des résultats. [Rapport de recherche] Programmes DMML, Dynamine et Métexpo [Métaux, vol. 4]. [Tome Nickel et Santé], CNRT Nickel et son environnement. 2019, 53 p. hal-03409815

HAL Id: hal-03409815

<https://hal.science/hal-03409815v1>

Submitted on 10 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



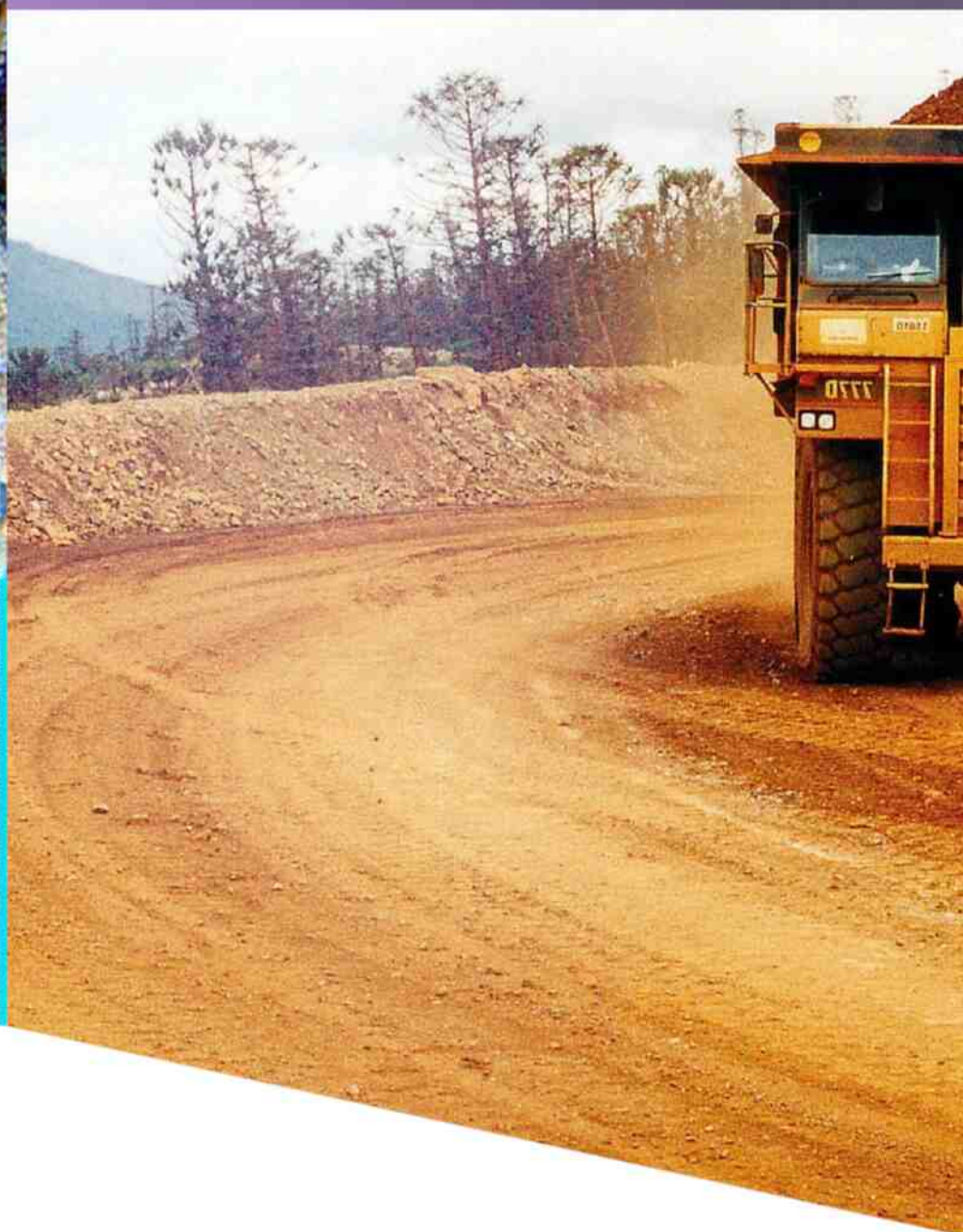
Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

SYNTHESE

Des rapports scientifiques

EDITION
Risque & Santé
2019

Dispersion et exposition
humaine aux métaux
en Nouvelle-Calédonie
[Volume 4]



SYNTHESE

Un tiers de la superficie de la Grande Terre est recouverte de substrats naturellement riches en métaux. L'exploitation minière, comme d'autres sources de dégradation, accentue la dispersion des métaux (Ni, Co, Cr, Mn) dans le milieu naturel par l'air, les rivières jusqu'au lagon, les sols, la végétation, les organismes vivants.

Le thème de la dispersion et de la toxicité potentielle des métaux dans l'environnement jusqu'à la biosphère et *in fine* la population est abordée par le CNRT au travers d'un programme intégré «Dispersion et exposition humaine aux métaux en Nouvelle-Calédonie» composé de 3 projets complémentaires [DMML, DYNAMINE et METEXPO] qui se sont déroulés de 2015 à 2019.

DMML

Dispersion des métaux de la mine au lagon [Atmosphère et réseaux trophiques]

DYNAMINE

Dynamique des métaux dans l'hydrosphère de la mine au lagon [Hydrosphère et écosystèmes coralliens]

METEXPO

Niveaux d'imprégnation et déterminants de l'exposition humaine aux métaux en Nouvelle-Calédonie

Ces trois projets ouvrent la voie à d'autres sujets de recherche qui sont encore à mener pour compléter les connaissances sur les causes, les mécanismes, les conséquences et les risques associés à la présence de ces métaux dans l'environnement.

Les synthèses de chacun des 3 projets sont présentées ci-après ainsi qu'une conclusion commune ouvrant sur les perspectives en termes de recherche.



Dispersion des métaux et risques potentiels pour la santé humaine en Nouvelle-Calédonie

UN PROGRAMME DE RECHERCHE INTÉGRÉ (2015-2019)



COMPARTIMENT ABIOTIQUE Dispersion des métaux



- ✓ Modèle de dispersion des poussières de la mine et des sites industriels (contexte ultramafique)
- ✓ Cartographie des retombées à l'aide d'un bio-indicateur 'Lichen'
- ✓ Réactivité des poussières (en fonction de la taille et des conditions environnementales)



- ✓ Flux de métaux en eaux douces et les sédiments :
 - . hydrologie
 - . chimie des eaux et des particules en suspension
 - . spéciation des métaux dans les sédiments et les particules en suspension
 - . Suivi des apports en sédiments jusqu'au lagon (par images satellite)



- ✓ Potentiel de remobilisation du Ni, Co et Cr des sols latéritiques, des rivières et des sédiments du lagon

COMPARTIMENT BIOTIQUE Ecotoxicologie



- ✓ Potentiel d'accumulation dans les niveaux trophiques (Bassin versant - lagon)
- ✓ Expérience de transfert trophique du Ni (biofilm à poisson brouteur)
- ✓ Développement de bio-indicateurs d'exposition métallique (analyse transcriptomique des biofilms - diatomées)



- ✓ *Etude in situ* de l'influence des métaux sur la croissance des coraux
- ✓ Suivi de la production primaire – chlorophylle a – par images satellites



- ✓ Utilisation expérimentale de bivalves comme indicateurs de contamination métallique en milieu marin
- ✓ Tests de toxicité utilisant des embryons d'invertébrés marins

EXPOSITION HUMAINE Etude de risque



- ✓ Cartographier l'imprégnation des populations en métaux
- ✓ Influence de la géologie et des activités minières
- ✓ Identification des principales sources de contamination (poussières, aliments, eau...)



PROJET DMML

Dispersion des métaux de la mine au lagon

Rôle du compartiment atmosphérique et dispersion au sein du compartiment biotique dulçaquicole et esturien



SYNTHESE

Synthèse des résultats
du programme **DMML**
Dispersion des Métaux de la Mine au Lagon



*Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par
le CNRT « Nickel & son environnement »*



Pour le consortium **DMML** Dispersion des Métaux de la Mine au Lagon

AUTEURS :

Magalie Baudrimont (EPOC, Université de Bordeaux)

Yannick Dominique (Biéko consultants)

Agnès Feurtet-Mazel (EPOC, Université de Bordeaux)

Patrice Gonzalez (CNRS-EPOC)

Pierre-Yves Gourvès (EPOC, Université de Bordeaux)

Peggy Gunkel-Grillon (ISEA, Université de la Nouvelle-Calédonie)

Christine Laporte-Magoni (ISEA, Université de la Nouvelle-Calédonie)

Estelle Lefrançois (Asconit Consultants/Eco in'Eau)

Yves Letourneur (ISEA, Université de la Nouvelle-Calédonie)

Julien Marquié (Asconit/ Consultant indépendant)

Régine Maury-Brachet (EPOC, Université de Bordeaux)

Fabrice Monna (ArteHis, Université de Bourgogne)

Camille Pasquet (ISEA, Université de la Nouvelle-Calédonie)

Emmanuel Rivière (GSMA, Université de Reims)

Estelle Roth (GSMA, Université de Reims)

Synthèse issue du rapport scientifique final, coordonné par Dr Agnès FEURTET-MAZEL (EPOC, Université de Bordeaux, France)

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET DMML

En Nouvelle-Calédonie, les deux tiers de la Grande Terre sont composés de roches ultrabasiques altérées, principalement des péridotites, formant des horizons latéritiques et saprolitiques. Ces horizons sont enrichis en métaux de transition, tels que le nickel (Ni), le chrome (Cr), le cobalt (Co), le fer (Fe) et le manganèse (Mn). Le nickel est exploité par excavation et toutes les activités minières (excavation, stockage, transport, séchage, traitement du minerai) sont susceptibles d'être source de fines particules facilement mobilisables par le vent ou l'eau. La dispersion de ces particules riches en nickel, chrome, cobalt, fer et manganèse peut présenter un risque pour l'environnement et pour la population.

Ce projet « DMML : Dispersion des métaux de la Mine au Lagon » est lié à deux autres projets traitant de la dispersion des métaux et du risque d'exposition de la population néo-calédonienne. Ces deux projets complémentaires sont le projet « DYNAMINE : Dynamique des Métaux de la Mine au Lagon » et le projet « METEXPO : Niveaux d'imprégnation et déterminants de l'exposition humaine aux métaux en Nouvelle-Calédonie ».

Les objectifs du programme « Dispersion des Métaux de la Mine au lagon » sont d'apporter des connaissances sur la dispersion des métaux en contexte minier en étudiant le rôle du compartiment atmosphérique dans la dispersion du nickel, chrome, cobalt, fer et manganèse (le rôle de l'hydrosphère dans la dispersion de ces éléments est traité dans le programme DYNAMINE). La dispersion de ces éléments métalliques au sein des compartiments biologiques dulçaquicoles et estuariens est également étudiée, et une première évaluation des effets toxiques de ces éléments est documentée.

Le site d'étude choisi est principalement le massif du Mont-Koniambo, même si des sites complémentaires (par exemple Poro, Nouméa, le Parc de la rivière Bleue...) ont été échantillonnés pour des besoins spécifiques aux différentes tâches du projet.

Ce projet traite spécifiquement les points suivants:

Dispersion et réactivité des poussières

- Potentiel de libération de métaux par les poussières
- Développement d'un bioindicateur lichen pour la dispersion des poussières émises par les activités minières
- Modélisation du transport atmosphérique des particules susceptibles d'être émises par les activités minières et lien avec la bio-indication lichénique

Dispersion des éléments métalliques au sein des compartiments biologiques dulçaquicoles et estuariens et évaluation de leurs effets toxiques

- Approche exploratoire de la contamination métallique de différents maillons trophiques le long du continuum bassin versant – lagon
- Etudes expérimentales du transfert trophique du nickel entre du biofilm périphytique et un poisson modèle brouteur
- Développement d'un outil diatomées en tant que bioindicateur d'exposition et d'effets des éléments métalliques au sein des hydrosystèmes ultramafiques

2. RÉACTIVITÉ ET DISPERSION DES POUSSIÈRES ÉMISES PAR LES ACTIVITÉS MINIÈRES

Toutes les opérations liées à l'exploitation du minerai de nickel sont susceptibles de libérer dans l'atmosphère des poussières riches en Fe, Mn, Ni, Co et Cr. Les émissions de poussières peuvent être mesurées en termes de concentrations massiques à l'aide d'analyseurs de particules fixes mais cette méthode de référence reste coûteuse. La caractérisation des particules échantillonnées par ces dispositifs est elle-même longue et coûteuse. La biosurveillance végétale de la qualité de l'air avec un bioindicateur lichénique a fait ses preuves dans d'autres contextes et pourrait être une alternative intéressante au moins pour une étude préliminaire avant de positionner des analyseurs de particules aux endroits les plus pertinents. Les lichens épiphytes sont des organismes symbiotiques composés de champignons et d'algues. Dépourvus de cuticule et de système racinaire leurs apports de nutriments reposent exclusivement sur les dépôts humides et secs des composants de l'air. Ils sont donc particulièrement sensibles à leur environnement atmosphérique et accumulateurs potentiels des polluants y compris métalliques contenus dans les particules atmosphériques. Cependant, les concentrations en éléments traces métalliques mesurées d'un lichen à l'autre peuvent varier en fonction de facteurs individuels comme la taille, l'âge, la morphologie, etc...y compris pour des lichens prélevés dans la même zone géographique L'objectif est donc ici d'évaluer la biodisponibilité des éléments traces métalliques des poussières d'origine minière, de développer une méthode d'utilisation des lichens comme biomoniteurs de la qualité de l'air avec un traitement des données permettant de s'affranchir des variabilités individuelles, de relier les contenus normalisés des métaux en éléments traces métalliques à l'histoire des masses d'air et à leur survol des zones d'exploitation minière dénudées.

2.1. POTENTIEL DE LIBERATION DE MÉTAUX PAR LES POUSSIÈRES

Pour caractériser les poussières émises par l'exploitation minière, des échantillons de sols miniers ont été prélevés et deux fractions granulométriques ont été étudiées, les PM100 (taille de particules inférieures à 100 μm qui représente la fraction inhalable) et les PM10 (taille de particules inférieures à 10 μm qui représente la fraction thoracique).

Pour mimer divers scénarii et principalement le scénario de l'ingestion ou de l'inhalation, ces particules ont été extraites à l'eau avec un pH imposé allant des pH acides ($\text{pH}_{\text{gastrique}} \approx 2.5$) aux pH proches de la neutralité ($\text{pH}_{\text{pulmonaire}} \approx 7.4$).

Pour Fe, Mn, Ni et Co, les résultats de lixiviation à l'eau montrent que les quantités solubilisées sont très élevées pour le $\text{pH}_{\text{gastrique}}$ avec Fe : 10-2790 mg/kg, Mn : 54-182 mg/kg, Ni : 127-520 mg/kg et Co : 10-15 mg/kg tandis que pour le $\text{pH}_{\text{pulmonaire}}$ ces quantités sont toutes inférieures à 0,1 mg/kg. Pour Cr au $\text{pH}_{\text{gastrique}}$, les 2 échantillons présentent des résultats différents avec 400mg/kg pour l'un et 0.7 mg/kg pour l'autre. Et contrairement aux autres métaux étudiés, les quantités solubilisées au $\text{pH}_{\text{pulmonaire}}$ sont bien supérieures à 0.1mg/kg et comprises entre 7 et 18 mg/kg, donc non négligeables. Ces résultats démontrent que pour Fe, Mn, Ni et Co, le principal risque d'imprégnation en métaux via la dispersion de ces fines particules est la voie digestive tandis que pour Cr, les voies digestives et pulmonaires peuvent représenter des risques comparables. Une précédente étude menée sur des sols de Poro avait montré des quantités de Cr lessivés à l'eau du même ordre de grandeur pour un pH proche du pH pulmonaire mais surtout, le Cr solubilisé était sous sa forme hexavalente hautement toxique. Le risque sanitaire liée à l'inhalation de poussières d'origine ultrabasiques riches en Cr est donc réel.

Des extractions cinétiques à l'Éthylènediaminetétraacétique (EDTA) ont été utilisées pour cerner les quantités de métaux solubilisables à plus ou moins long terme. Ces extractions peuvent être modélisées par la somme de deux réactions du premier ordre pour évaluer le pool de métaux « rapidement » (Q_1) et « lentement » extractibles (Q_2). Les extractions cinétiques permettent alors de discriminer des pools de métaux par leur vitesse d'extraction (c'est-à-dire leur vitesse de mobilisation de la phase solide vers la phase liquide). Un troisième pool de métaux est défini comme étant le pool non solubilisé (Q_3) par déduction des pools extraits avec les concentrations totales. Cette approche ne permet pas de déterminer les classes porteuses des métaux même si les cinétiques en dépendent étroitement.

En termes de pourcentage par rapport à la totalité du réservoir, la fraction non extraite donc non biodisponible (Q_3) reste toujours majoritaire, plus de 95% dans le cas de Ni et entre 65% et 97% pour Co et Mn. Cela s'explique par le fait que les métaux étudiés sont des métaux endogènes (ces sols n'ont pas été enrichis par des activités anthropiques) et que les sols à l'origine de ces poussières sont issus de formations géologiques fortement altérées, c'est-à-dire que les éléments les plus solubles ont été dissous, et que les métaux encore présents sont sans doute encore principalement inclus dans les structures minérales

Mais le réservoir étant particulièrement élevé, les quantités extraites à l'EDTA sont cependant relativement élevées avec des sommes Q_1+Q_2 pouvant représenter plusieurs centaines de mg/kg (Figure 1). Cela signifie que les quantités susceptibles de passer à plus ou moins long terme en solution, donc d'être solubilisés dans les eaux naturelles ou dans les liquides biologiques sont très élevées pour ces métaux endogènes contenus dans les poussières produites par les sols ultrabasiques miniers ou forestiers. Les résultats montrent également que les quantités Q_2 sont toujours supérieures aux quantités Q_1 . La plus grande quantité de métaux est donc « lentement » extraite, le pool le plus important mettrait du temps à se solubiliser, ce qui requiert un temps de séjour plutôt long des poussières dans un environnement donné.

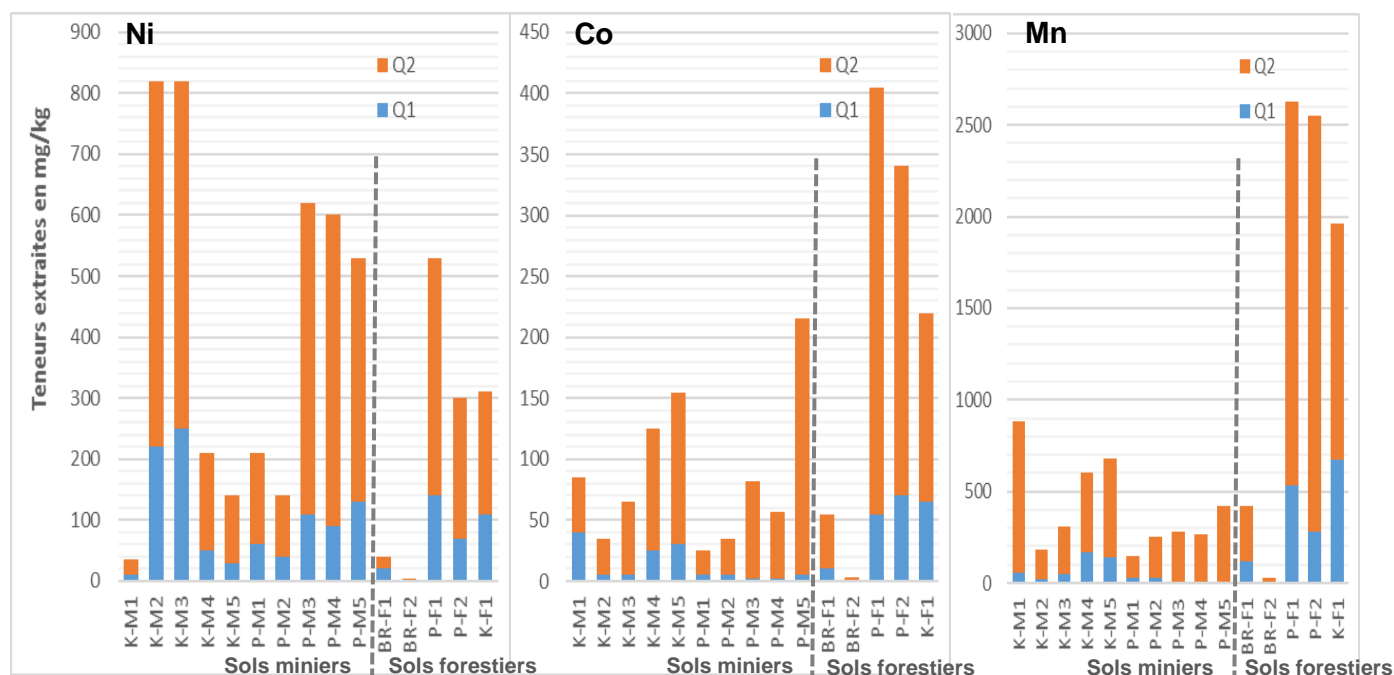


Figure 1 : quantités en mg/kg de Ni, Co et Mn extraites à l'EDTA « rapidement » (Q_1) ou « lentement » (Q_2) de la fraction inhalable ($<100\mu\text{m}$) de sols ultrabasiques.

2.2. DEVELOPPEMENT D'UN BIOINDICATEUR LICHEN

Les lichens n'ont jamais utilisé comme bioindicateur des poussières émises par des sols aussi riches en Ni, Co et Cr et cette étude propose un traitement original des données de concentrations en Co, Cr, Ni, Fe, Cu, Zn et Ti analysées dans 34 lichens épiphytes collectés en contexte ultrabasique et urbain. Le traitement a pour but de s'affranchir des variabilités liées à l'espèce ou à l'âge du lichen. Pour développer cette méthodologie, 3 sites ont été échantillonnés (à proximité de la mine de Poro, sur le transept Bourail-Poro (comprenant des zones éloignées de toute activité minière) et à Nouméa où se trouve une usine pyrométallurgique de traitement du minerai de nickel. Le Ti est un élément d'origine crustale et est utilisé comme référence. Ni, Co, Cr et Fe sont liés aux émissions minières (exploitations et usines) tandis que Cu et le Zn ont des origines autres que liées à l'exploitation du minerai de nickel, potentiellement industrielles et ou domestiques.

Des analyses de données compositionnelles ont été utilisées pour calculer un indice synthétique d'exposition aux poussières. En statistique, un jeu de données est dit compositionnel lorsqu'il représente une proportion d'un tout, tels que des pourcentages, des concentrations, etc, définissant la totalité d'un système. Les données compositionnelles sont définies comme des vecteurs de D composantes positives et dont la somme des composants est soumise à une contrainte κ constante, avec $\kappa = 1$ (proportion) ou 100 % (pourcentage), 10^6 (partie par million ou $\mu\text{g/g}$) :

$$\text{Soit pour } \kappa = 1; x = [x_1, \dots, x_D] = \kappa$$

Les données compositionnelles sont multivariées et fournissent une information relative puisque les données ne peuvent être interprétées indépendamment les unes des autres. Toute augmentation d'une composante est accompagnée d'une réduction d'au moins une autre composante, afin de garantir la contrainte de somme constante. On ne peut donc plus exploiter les valeurs absolues des données compositionnelles, mais bien leurs valeurs relatives. Les données compositionnelles appartiennent à un espace géométrique représentant une portion de l'espace réel, nommé simplexe. Le passage du simplexe à l'espace euclidien \mathbb{R} , peut être réalisé par des transformations logarithmiques des rapports entre composantes. Cette transformation permet ainsi de sortir de l'espace géométrique fermé et de représenter les données dans l'espace euclidien \mathbb{R} , permettant de réaliser des statistiques multivariées. Une transformation logarithmique centrée, *clr*, a donc été appliquée à ces concentrations brutes pour contourner les problèmes liés au caractère fermé de ces données:

$$\text{clr}(x) = \left[\ln \frac{x_1}{g_m(x)}, \quad \ln \frac{x_2}{g_m(x)}, \dots, \quad \ln \frac{x_D}{g_m(x)} \right]$$

où $g_m(x)$ correspond à la moyenne géométrique des parties du vecteur de composition, $g_m(x) = (x_1 x_2 \dots x_D)^{1/D}$.

Une telle transformation est connue pour supprimer la contrainte de fermeture, ce qui la rend utilisable dans l'analyse en composantes principales (ACP). L'interprétation graphique du biplot de l'ACP, représentant sur le même graphique les individus et les variables, est différente dans le cadre de données compositionnelles. L'angle formé entre les pointes de deux flèches (variables) indique la corrélation du rapport entre les deux variables (plus l'angle formé entre les pointes est proche de 0° ou 180° , plus les variables sont respectivement corrélées ou anti-corrélées. La distance entre les pointes de deux flèches indique la variabilité entre les deux variables (plus les pointes sont proches, plus la variabilité entre les rapports est faible). Grâce à ces règles, l'interprétation du graphique permet de déterminer des groupes de variables fortement corrélés et de former des groupes d'individus suivant leur proximité sur le graphique.

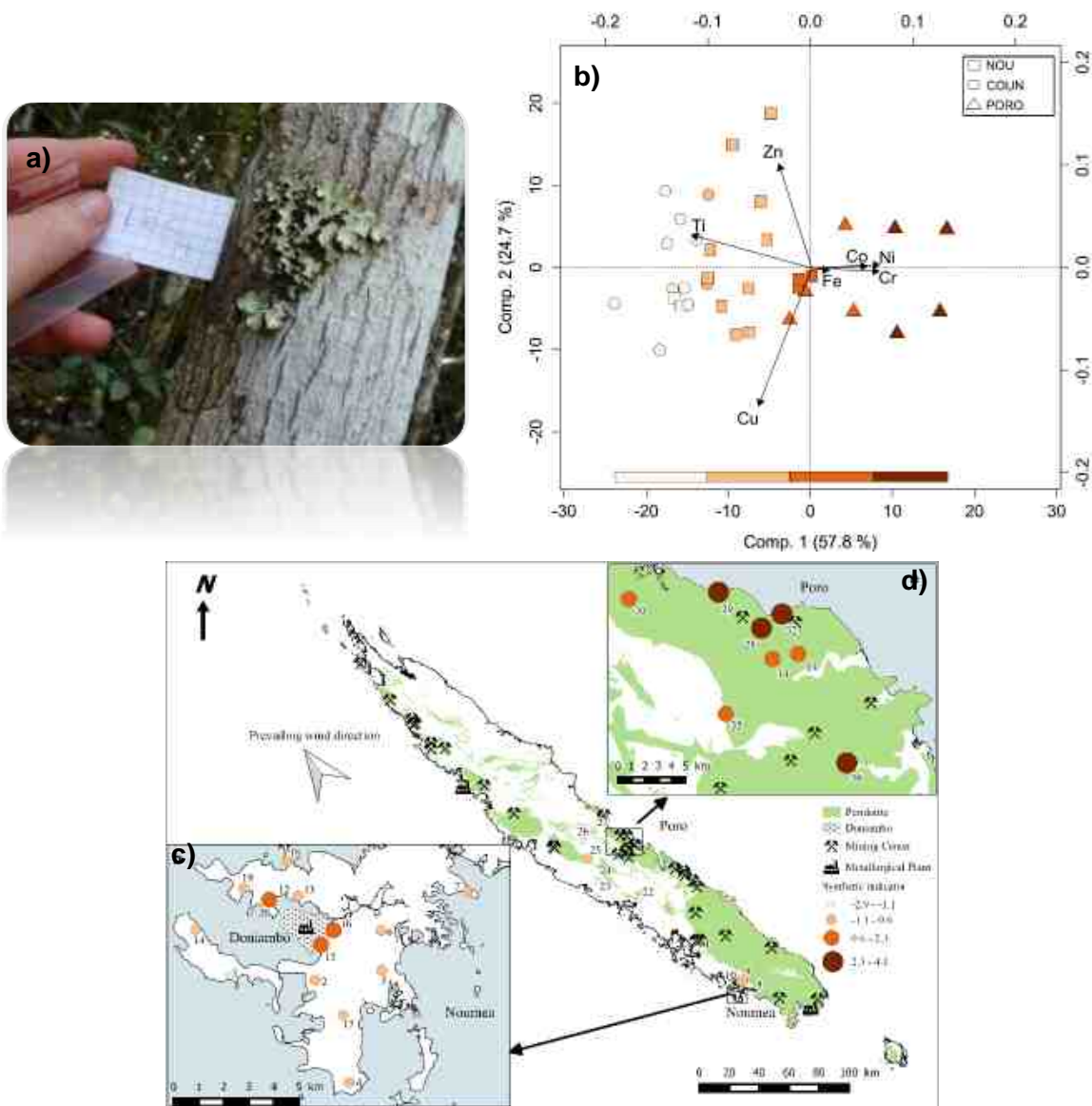


Figure 2 : a) collecte de lichen sur les troncs d'arbre ; b) biplot projeté sur les deux premières composantes principales des données compositionnelles pour les lichens prélevés à Nouméa (NOU), à Poro (PORO) et sur le transect Bourail-Poro ($n=34$ thalles) et indicateur synthétique d'exposition des lichens c) à Nouméa et d) à Poro.

L'analyse en composante principale (ACP) des données compositionnelles permet de distinguer trois groupes d'individus bien distincts de lichens (Figure 2). Ces trois groupes correspondent aux trois sites d'étude. La distinction est réalisée suivant les valeurs de la première composante (PC1), gouvernées par les rapports des principaux éléments métalliques présents dans les poussières d'origine ultrabasique (Ni, Co, Cr, Fe) sur Ti. Les valeurs de PC1 sont élevées pour les échantillons de Poro, faibles pour le transect Bourail-Poro éloigné des activités minières et intermédiaires pour les échantillons collectés à Nouméa. Les valeurs de PC1 peuvent être utilisées comme un indice synthétique d'exposition au Ni, Co, Cr la contamination par les éléments Ni, Co et Cr contenus dans les poussières liées aux activités minières. Plus l'indice est élevé, plus le lichen a été exposé, plus il est faible, moins le lichen a été exposé.

Ces travaux montrent que les lichens survivent dans un contexte de poussières émises par des sols où les concentrations en Ni, Co et Cr sont extrêmement élevées (respectivement 2000-25000 mg/kg, 100-4100 mg/kg et 2000-40 000 mg/kg) et qu'il est possible de les utiliser comme bio-moniteur de la qualité de l'air. Cette nouvelle approche de traitement des données

permet en effet de s'affranchir des variations internes comme la morphologie, l'âge ou encore l'espèce de lichen. Cette méthode présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et l'obtention d'indices d'exposition permet de réaliser des cartographies d'exposition. Les indices d'exposition permettent de dire qu'une zone est plus exposée qu'une autre mais le désavantage de la méthode est que l'exposition n'est pas quantifiable avec cette méthode. De même cette approche ne permet pas de réaliser un suivi temporelle (ou alors à une échelle de temps très large).

2.3. MODELISATION DU TRANSPORT ATMOSPHERIQUE DES PARTICULES SUSCEPTIBLES D'ETRE EMISES PAR LES ACTIVITES MINIERES

Dans cette partie du projet, la bio-indication lichénique est combinée à la modélisation atmosphérique pour évaluer l'exposition de la population aux poussières émises par les activités du site industriel et minier de KNS-SAS.

Nous avons développé un outil de calcul et de visualisation de la densité de trajectoire à partir des trajectoires de masses d'air modélisées par FLEXTRA alimenté des données météorologiques du Centre Européen pour la Prédiction du Temps à Moyen-Terme (acronyme anglais ECMWF). Dans le contexte de la dispersion atmosphérique de particules liées à l'exploitation de mines à ciel ouvert, cet outil a été utilisé pour identifier les sources minières potentielles et étudier leur contribution à la pollution de l'air autour du massif du Mont Koniambo. Des lichens ont été prélevés à plus ou moins longue distance du massif et les trajectoires arrière des masses d'air à partir des positions de prélèvement de lichen ont permis d'étudier l'origine des masse d'air et leur histoire avant de parvenir au lichen. Les densités de trajectoires des masses d'air ayant survolé des mines avant de parvenir au lichen ont été déterminées (Figure 3 (a) et 3 (b)).

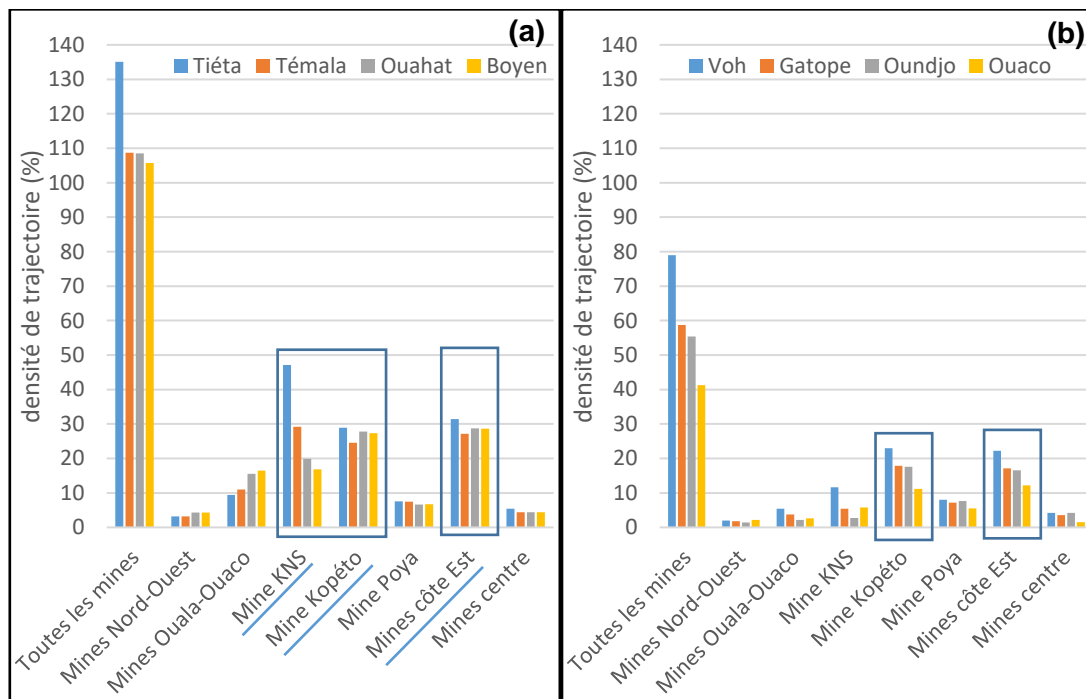


Figure 3 : Densités de trajectoires (%) ayant survolé des mines et parvenant aux localités (a) de Tiéta, Télama, Ouahat et Boyen et (b) de Voh, Gatope, Oundjo et Ouaco

Les résultats montrent que les mines les plus impactantes sur une localité donnée aux alentours du Mont-Koniambo sont souvent les plus proches, à condition d'être sous les vents. Mais ils montrent également qu'il ne faut pas négliger les mines localisées sur la côte est. Trois directions préférentielles des vents ont été mises en évidence entre 2014 et 2016 :

- les alizés souvent dominants suivant la côte ouest direction sud-est vers nord-ouest dans la longueur de la Nouvelle Calédonie (la direction et le sens sont indiqués par la flèche 1 sur la Figure 4 (a)) exposent les localités de Tiéta, Témala, Ouahat et Boyen situées au nord-ouest des mines car il y a de fortes densités les densités de trajectoire survolant les mines de KNS-SAS et Kopéto-Népoui (Figure 3 (a)). De ce point de vue, ces mines sont alors particulièrement impactantes pour ces localités.
- Les vents transversaux ouest-est (océaniques dont la direction et le sens sont indiqués par la flèche 2 sur la Figure 4 (a)) limitent les impacts de KNS-SAS sur les localités côtières ouest comme Gatope, Ouaco et Oundjo (Figure 3 (b)) car les densités de trajectoire sont faibles sur ces localités.
- Les vents du sud-est vers l'ouest correspondant à des alizés infléchis par l'île (dont la direction est indiquée par la flèche 3 dans la Figure 4 (a)) entraînent une contribution non négligeable des mines de la côte Est car on observe une assez forte densité de trajectoire sur l'ensemble des localités situées autour de KNS-SAS (Figure 3 a et b).

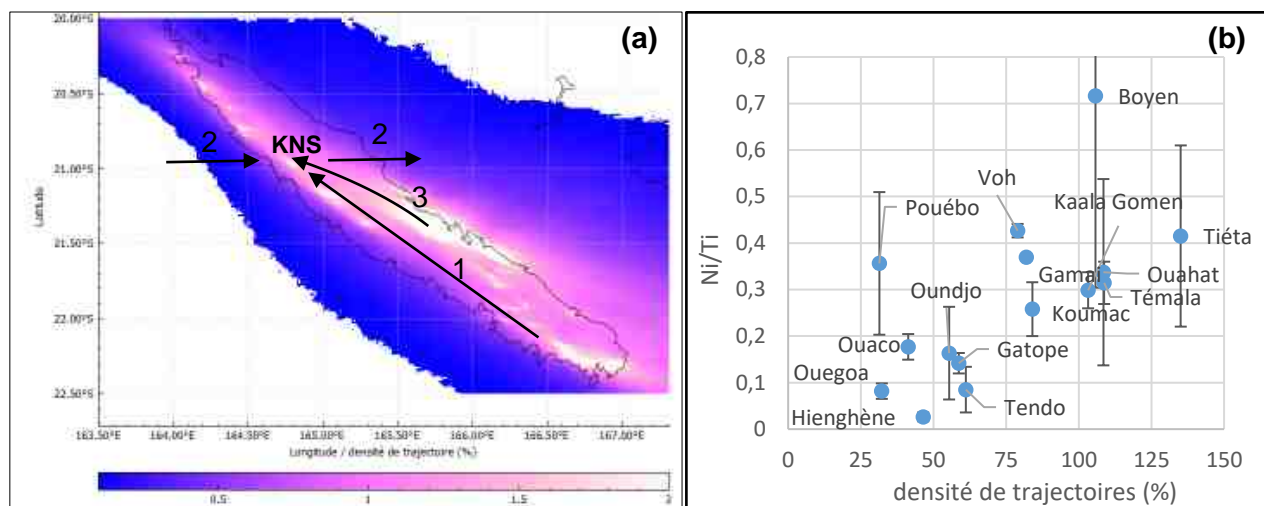


Figure 4 : (a) Densité de trajectoires partant des mines entre le 01/01/2014 et le 31/06/2016 – (b) Rapport Ni/Ti dans les lichens prélevés au lieu indiqué en fonction de la densité des trajectoires ayant survolé une mine entre le 1^{er} janvier 2014 et le 31 juillet 2016

Les lichens prélevés autour de KNS-SAS et dans le nord de la Nouvelle Calédonie ont été analysés en Ni, Co, Cr, Cu, Zn et Ti. Ni, Co, Cr sont des marqueurs des sols ultramafiques tandis que Cu et Zn sont des marqueurs d'activité anthropique autre comme par exemple la combustion de ressources fossiles ou de biomasse (bois). Le couplage bio-indication et modélisation atmosphérique montre que les concentrations en métaux (Ni, Cr ou Co) dans les lichens, concentrations normalisées par le titane augmentent avec la densité de trajectoire ayant survolé des mines (résultats présentés pour le nickel (Figure 4 (b))). Mais les rapports Cu/Ti ou Zn/Ti ne montrent aucune corrélation avec les densités de trajectoire ayant survolé des mines. Le rôle des mines dans la pollution atmosphérique au Nickel est donc mis en évidence ici.

De cette étude croisée bio-indication – densité de trajectoire menée aux environs du Mont-Komianbo, on en déduit également qu'il serait utile de faire des mesures et des caractérisations de PM₁₀ dans les localités de Témala, Tiéta, Boyen et Ouahat, très exposées, pour mesurer l'exposition de la population aux poussières de nickel.

A plus large échelle, la carte des densités de trajectoires issues des mines sur toute la Nouvelle Calédonie (Figure 4 (a)) permet de localiser les zones pour lesquelles un suivi de la qualité de l'air serait judicieux pour évaluer l'exposition de la population aux poussières de Nickel. Les densités de trajectoires des masses d'air ayant survolé une mine à ciel ouvert sont importantes aux alentours de Poro, Kouaoua et Thio (zone blanche sur la carte). Ces villes de la côte Est sont potentiellement particulièrement exposées et un suivi de la qualité de l'air mériterait d'être réalisé dans ces localités entre autres.

3. ETUDE ÉCOTOXICOLOGIQUE DE LA CONTAMINATION MÉTALLIQUE DE LA COMPOSANTE BIOTIQUE DES HYDROSYSTÈMES TALÉA-COCO ET TIVOLI

En Nouvelle-Calédonie les mécanismes de dispersion des Éléments Traces Métalliques (ETM) naturellement présents dans les sols ultramafiques au sein des différents compartiments biologiques n'ont fait l'objet que de très peu d'études. Pour les milieux aquatiques dulçaquicoles, les données sur la bioaccumulation et la dispersion des ETM au sein des maillons biologiques sont encore plus rares. Il apparaissait donc que le cycle des ETM au sein des compartiments biologiques présents le long du continuum bassin-versant/lagon des massifs ultramafiques calédoniens, était peu connu.

Aucune étude publique n'a été effectuée sur le territoire sur les possibles effets toxiques de ces ETM sur les communautés aquatiques présentes dans ces milieux. Grâce au programme DMML, l'étude d'un large éventail de plusieurs espèces et/ou communautés représentatives de cours d'eau néo-calédoniens a pu être menée depuis le compartiment primaire avec les biofilms de rivières (périphytiques) et autres sources potentielles de matière organique jusqu'au dernier maillon des réseaux trophiques dulçaquicoles avec des poissons carnivores. Les résultats obtenus sont nouveaux et enrichissent les connaissances sur ces milieux aquatiques tropicaux d'eau douce.

3.1. UNE CONTAMINATION MÉTALLIQUE DES ORGANISMES DEPUIS LA ZONE D'EXPLOITATION MINIÈRE JUSQU'À L'AVAL

L'exploration s'est déroulée lors de deux missions (pour les biofilms uniquement: mai et novembre 2016 ; mai : pour les crustacés et poissons) caractérisant les deux saisons contrastées sur deux bassins versants situés sur la côte Ouest de la Grande Terre au niveau du Mont Koniombo : un bassin versant ultramafique de référence sans activité minière (bassin versant de la Rivière Tivoli avec un site amont et un site aval échantillonnés) et un bassin versant ultramafique exploité dans sa partie amont par une mine (bassin versant de la Rivière Taléa-Coco). Sur la Rivière Taléa-Coco, quatre sites ont été échantillonnés répartis entre les deux « Bras » gauche et droit et la zone plus aval.

Les résultats obtenus montrent qu'en tant que producteur primaire jouant un rôle déterminant dans les cours d'eau dulçaquicoles, **les biofilms périphytiques** se sont avérés être un compartiment biologique extrêmement bioaccumulateur des cinq métaux étudiés, Co, Cr, Fe, Mn et Ni) sur tous les sites étudiés des deux hydrosystèmes. Le Bras Gauche de la Taléa-Coco, à l'aval de l'exploitation minière, apparaît le plus contaminé (concentrations jusqu'à 16000 mg Ni/kg ps, Figure 5) quelle que soit la saison par rapport aux autres sites et à l'hydrosystème Tivoli pris en référence ultramafique en zone non exploitée (~3000 mg Ni/kg ps). Les valeurs obtenues prouvent l'influence directe de la zone amont d'exploitation minière sur la contamination des biofilms surtout en fin de saison humide (mai) comparativement au site « Bras Droit » et aux sites plus en aval.

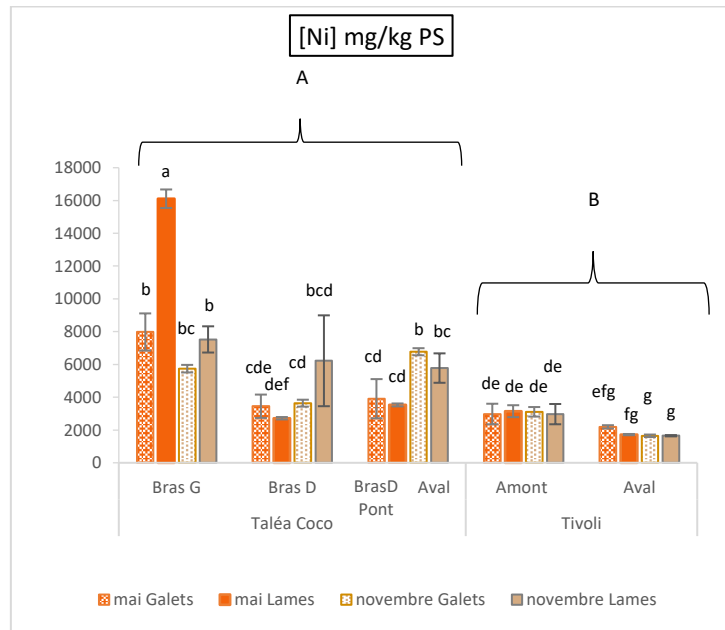


Figure 5 : Concentrations en nickel en mg/kg de poids sec (PS) des biofilms collectés aux deux saisons (mai et novembre) sur substrats artificiels (lames de verre) et sur galets naturels dans les 5 sites échantillonnés (moyenne \pm SEM, $n = 3$). Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les sites ($\alpha = 0,05$).

Les biofilms étudiés sur les deux hydrosystèmes ont montré qu'ils étaient constitués d'une part majoritaire de matière inorganique par rapport à la part organique (respectivement 67% et 33% en moyenne). La part organique des biofilms correspond aux microorganismes animaux et microalgues du biofilm qui sont des sources potentielles de nourriture des animaux aquatiques du réseau trophique rivière. La part inorganique correspond aux matières particulaires drainées par la rivière en provenance du bassin versant et qui s'agglomèrent aux biofilms. Selon la saison et les épisodes de précipitations, leur épaisseur peut varier en fonction des apports de l'amont (effets des pluies) et de la croissance microalgale favorisée en fin de saison sèche (novembre) par des conditions écologiques optimales (lumière...).

Les diverses analyses de biofilms périphytiques *in situ* ont porté sur des prélèvements effectués sur substrat naturel (galets) et artificiel (lames de verre préalablement immergées pendant 3 semaines) sur chaque station d'étude. Pour la composante microalgale, l'analyse conjointe des mesures de chlorophylle *a* et des densités cellulaires suggère une capacité de colonisation précoce des substrats par les diatomées et souligne leur importance dans les conditions environnementales extrêmes rencontrées ici (oligotrophie, substrats ultramafiques) par rapport aux autres organismes photosynthétiques.

Les résultats des inventaires des flores diatomiques montrent des communautés distinctes selon la station échantillonnée, ce qui illustre bien les capacités bioindicatrices des diatomées. Toutefois, les résultats de l'IDNC (l'Indice Diatomique Nouvelle-Calédonie) ne mettent pas en évidence une pollution liée à l'activité minière alors que les résultats de transcriptomiques montrent une activité métabolique altérée des populations soumises à de plus fortes concentrations en ETM. En effet, les résultats de transcriptomique indiquent que les biofilms diatomiques présents sur la Taléa-Coco présentent des niveaux d'expression souvent plus bas que ceux observés sur le site de référence de la Tivoli, suggérant un impact important des ETM présents sur l'activité métabolique de ces organismes. Nous avons constaté que les effets sont plus forts en novembre, à la fin de la saison sèche et période la plus propice au développement des biofilms du fait des conditions de luminosité accrue et d'une concentration en nutriments plus importante. Les biofilms situés sur le bras gauche subissent le plus les impacts des ETM et donc du Ni avec des effets observés sur le métabolisme mitochondrial, la photosynthèse et la réponse au stress oxydant à corrélés avec les modifications de communautés présentes sur ce site.

Concernant les autres maillons trophiques (**crustacés et poissons**) prélevés *in situ* en mai 2016, nous pouvons constater, comme observé à la base du réseau trophique, des accumulations de Ni, Cr, Co et Fe quasi systématiquement plus élevées dans les organismes prélevés sur le site de Taléa gauche sous influence minière, avec des concentrations dégressives sur les sites de Taléa droite, Taléa aval et enfin Tivoli (Figure 6, exemple pour *Anguilla marmorata*). Ces résultats montrent un transfert des ETM issus des activités minières en eau douce vers les organismes aquatiques, selon un gradient amont-aval le long de la Taléa. Au niveau des organes d'accumulation, que ce soit pour les crustacés ou pour les poissons, nous observons quasi systématiquement des accumulations plus élevées dans les branchies, comparativement aux organes plus internes tels que le foie ou les reins dont l'accumulation résulte des apports de métaux cumulés par les voies directe et trophique. Ces résultats soulignent un rôle très important de la voie de contamination des organismes par la phase dissoute des métaux présents dans l'eau, qui apparaît prépondérante par rapport à la voie trophique. Quant aux organes les moins accumulateurs, ce sont les muscles, ce qui implique un risque *a priori* faible pour la consommation humaine de poissons ou crevettes provenant des eaux douces (Figure 6).

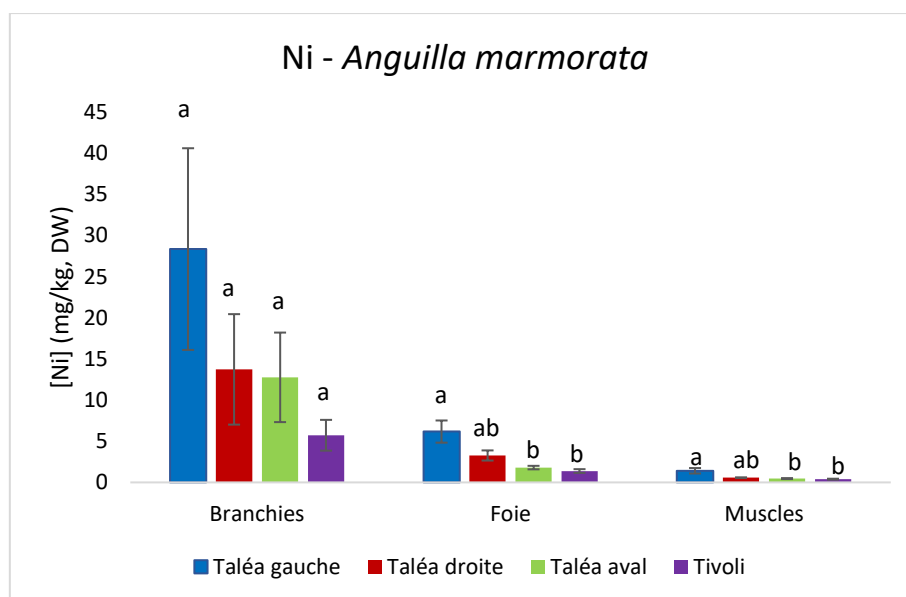


Figure 6 : Bioaccumulation du Ni dans les organes de l'anguille marbrée (*Anguilla marmorata*). (Moyennes \pm SEM, $n = 5$). Les lettres différentes indiquent des différences significatives en fonction des sites ($\alpha < 0.05$).

Une comparaison des concentrations en ETM accumulés dans les différents maillons trophiques indique une diminution des concentrations depuis les biofilms vers les maillons supérieurs avec en dernier lieu l'anguille. Nous constatons donc une absence de phénomène de bioamplification du Ni et des autres métaux le long des réseaux trophiques aquatiques d'eau douce de Nouvelle Calédonie.

L'ensemble des sources potentielles de matière organique utilisée par les invertébrés et/ou poissons des hydrosystèmes du Koniambo a été étudié. Cela concerne aussi bien les végétaux terrestres, source allochtone de carbone dans les écosystèmes aquatiques, que les détritiques, la matière organique sédimentaire ou encore les biofilms. Seules les espèces présentes dans l'estuaire, *i.e.* le crabe de palétuvier (*Scylla serrata*) et le cro-cro (*Leiognathus equulus*) qui ont des signatures isotopiques clairement distinctes, s'alimentent vraisemblablement sur des proies qui dépendent d'autres sources de matière organique.

L'examen du positionnement des espèces dans le plan $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ suggère que toutes les espèces pourraient être plus ou moins omnivores à des degrés divers, sans doute par « opportuniste » (présence, voire abondance, de telle ou telle catégorie de proies). Ceci impliquerait que les invertébrés et poissons présents dans les hydrosystèmes étudiés fourragent tous sur le même type de ressources composées pour l'essentiel, de biofilms et des invertébrés vivant dans ces biofilms, même si les proportions relatives des sources et leurs caractéristiques isotopiques peuvent changer selon les sites et/ou les saisons. Cette hypothèse permet de comprendre pourquoi les lochons présentent des signatures différentes entre Taléa aval et Tivoli aval.

Enfin, le rôle supposé de prédateur opportuniste de l'anguille, *Anguilla marmorata*, apparaît plausible, vis-à-vis de différentes catégories d'invertébrés, mais il reste délicat de trancher quant à son possible rôle d'ichtyophage occasionnel ; l'espèce ne montrant pas de signature en $\delta^{15}\text{N}$ particulièrement plus élevée que les autres poissons.

3.2. UN TRANSFERT TROPHIQUE ET DES IMPACTS DU NICKEL EN LABORATOIRE EN LIEN AVEC UNE CONTAMINATION PROVENANT DE L'ACTIVITÉ MINIÈRE

Lors des deux études expérimentales de transfert de Ni entre du biofilm périphytique et un poisson brouteur omnivore, le lochon blanc (*Awaous guamensis*), nous avons confirmé une faible capacité du Ni à transférer par la voie trophique, alors que le métal présent en phase dissoute conduisait à une accumulation significative de ce métal dans les branchies des poissons. Les résultats de terrain ont ainsi pu être vérifiés par le volet expérimental mené en conditions contrôlées de laboratoire.

Lors de l'analyse des biofilms provenant du terrain et contaminés en laboratoire, nous avons constaté la présence d'une part inorganique majoritaire (de 63 à 73%) riche en métaux provenant des Matières En Suspension charriées par les cours d'eau. Nos résultats ont de plus révélé une corrélation importante entre Fe et Ni au sein du biofilm. Cela suggère que le Ni est complexé aux éléments ferritiques qui composent la part inorganique de ce maillon, ce qui le rend très peu ou pas mobilisable (pas de différence avec ou sans traitement à l'EDTA). Malgré la faible capacité des biofilms à relarguer du Ni suite au traitement EDTA, il est apparu que ces derniers ont participé à l'augmentation des concentrations en Ni dans la colonne d'eau des unités expérimentales. Cette fraction a ainsi pu participer à l'exposition des poissons par la voie directe (échanges ioniques au niveau des branchies), comme le démontrent les résultats sur la répartition du Ni dans les différents organes et tissus des poissons.

Ces résultats mettent en évidence que le Ni contenu dans la fraction inorganique des biofilms est capable de passer dans la colonne d'eau et de soutenir, du moins pendant 21 jours, des concentrations en Ni comprises entre 15 et 20 µg/l, concentrations légèrement supérieures à celles définies pour le fond géochimique des cours d'eaux ultramaïques calédoniens voisine de 10 µg/l.

Les ordres de grandeurs similaires entre les niveaux d'accumulation dans le foie et les branchies des poissons soutiennent une entrée du métal essentiellement par la voie directe et peu par la voie trophique. Ce résultat est similaire à celui observé dans les poissons collectés sur les cours d'eau du massif exploité du Mont Koniambo lors des échantillonnages de terrain de mai 2016. Néanmoins, l'étude de la composante micro-algale des biofilms en mésocosme a montré que la croissance du biofilm ainsi que sa consommation et sa digestion par *Awaous guamensis* n'étaient pas affectées par la contamination métallique. Ce constat indique d'une part l'adaptation de ces organismes à des concentrations en Ni importantes et d'autre part, le rôle potentiel du biofilm dans le transfert trophique de Ni entre le producteur primaire et ces poissons phytophages, puisque ce maillon et sa consommation sont maintenus même en condition contaminée. La concentration en Ni dans le foie des organismes augmente dans un premier temps puis diminue pour retourner à des taux d'accumulation comparables à T0 à la fin de l'expérimentation. Cette évolution de la concentration en nickel dans le foie au cours du temps suggère que les poissons sont en mesure de réguler les concentrations en Ni. Il serait intéressant à l'avenir d'étudier ces différents mécanismes de défense ou d'impacts du Ni chez les poissons en Nouvelle-Calédonie, étant donné le bruit de fond géochimique élevé de cette zone.

Concernant les effets de la contamination observés en transcriptomique sur les diatomées périphytiques, notre analyse montre que pour la plus faible concentration (50 µg/l) des effets modérés sont observables à 48h d'exposition avec des atteintes du métabolisme mitochondrial compensées par une surexpression de l'expression de gènes impliqués dans la photosynthèse. Ces compensations dénotent la capacité de la diatomée à maintenir un niveau d'ATP suffisant dans la cellule afin de garantir sa viabilité. Après 30 jours d'exposition, l'ensemble des gènes analysés reviennent à un niveau d'expression comparable à ceux des témoins. Ce résultat démontre que pour ce niveau de concentration en Ni et nos conditions expérimentales, les biofilms ont été capables de mettre en place des mécanismes de défense efficaces. Au contraire à la concentration de 250 µg/l, de fortes répressions de l'ensemble des gènes sont observées dès 48 h, mais surtout à 30 jours. Ces résultats montrent des effets qui s'apparentent à une toxicité aiguë du Ni dans ces conditions.

Enfin, que ce soit en conditions de laboratoire ou *in situ*, les effets observés sur les diatomées périphytiques sont assez comparables. En effet, comparés au site de référence de la Tivoli, les niveaux d'expression sur les sites de la Taléa-Coco, et notamment sur le bras gauche, sont beaucoup plus faibles, dénotant l'effet des ETM, dont celui du Ni, présents sur ces sites. La même tendance a été observée en laboratoire et montre que des concentrations importantes en Ni conduisent à une inhibition du niveau d'expression de la quasi-totalité des gènes étudiés. Cependant, une nouvelle fois, il faut noter une différence importante en termes de structuration d'espèce des communautés. Ainsi, les espèces diatomiques présentes sur le bras gauche se différencient nettement de celles de la Tivoli, mais également de celles des autres sites de la Taléa-Coco. Ceci pourrait rendre compte d'une sélection d'espèces plus « résistantes » sur ce site, impacté par les activités minières.

4. CONCLUSION

Les fines particules (<100µm) émises par les activités minières sont particulièrement chargées en ETM dont Fe, Mn, Ni, Co et Cr. Une forte quantité de ces métaux est mobilisable avec un potentiel de libération de métaux de l'ordre de plusieurs centaines de mg/kg. Des extractions à l'eau avec des pH proches des conditions gastriques et pulmonaires ont démontré que Fe, Mn, Ni et Co risquent principalement de contaminer par voie digestive et Cr autant par voie digestive que pulmonaire. Le risque sanitaire liée à l'ingestion ou à l'inhalation de poussières d'origine ultrabasique existe. Pour le chrome, le risque par inhalation est à souligner d'autant que de précédentes études ont montré que le chrome est principalement présent dans les particules latéritiques sous sa forme hexavalente très toxique.

Ces fines particules sont émises par toutes les activités d'excavation et de transport du minerai et sont mobilisées des surfaces dénudées des exploitations minières soit par érosion éolienne soit par ruissellement lors des pluies. Les éléments métalliques qu'elles contiennent se retrouvent dans les particules respirées par la population calédonienne et peuvent sédimenter par voie sèche ou humide risquant ainsi de contaminer les chaînes alimentaires. Le projet DMML « Dispersion des métaux de la mine au lagon » couplé aux projets DYNAMINE (Dynamique des Métaux de la Mine au lagon) et Metexpo (exposition humaine aux métaux) a fédéré des expertises dans un large spectre disciplinaire pour étudier la dispersion des ETM dans toutes les sphères de l'environnement de Nouvelle Calédonie. Pour le projet DMML, le radical commun est de décrire la contamination de l'environnement en ETM et de développer des outils de bioindication atmosphérique (lichen) et aquatique (diatomée).

L'atmosphère est un vecteur de poussières et les lichens sont très sensibles à leur environnement atmosphérique. Des lichens ont été prélevés sur des sites miniers (Poru, KNS, Nouméa) et dans des villages essentiellement autour du Mont Koniambo et dans la Province Nord. Les teneurs en ETM ont été normalisées par leur teneurs en Titane et deux démarches complémentaires d'analyse des résultats ont été développées. La première a consisté à traiter les données compositionnelles des concentrations en ETM avec une ACP. Cette première permet de distinguer trois groupes de lichens en fonction de la valeur de la composante 1. La composante 1 est très élevée pour les ETM miniers (Ni, Co, Cr, Fe) dans les lichens collectés sur sites miniers, intermédiaire pour les lichens collectés à Nouméa à proximité du site industriel de traitement du minerai de nickel (site de Doniambo) et faible pour les lichens prélevés loin d'influence minière ou industrielle. La valeur de la composante 1 peut alors être utilisée comme un indice synthétique de l'exposition au Ni, Co et Cr émis par les activités minières. La deuxième démarche a consisté à coupler la modélisation de déplacement des masses d'air et la bioindication lichénique. Elle a montré que les rapports normalisés des concentrations en Ni, Co et Cr, par les concentrations en Titane augmentent avec la densité de trajectoire ayant survolé des mines. La modélisation atmosphérique a permis de déterminer les sites impactés par les exploitations minières. Aux alentours du Mont-Koniambo, Témala, Tiéta, Boyen et Ouahat sont des villages particulièrement exposés aux mines du Mont-Koniambo et de Kopéto. Dans la même zone géographique, les villages côtiers de Gatope et Oundjo sont partiellement protégés par les vents océaniques. Sur la côte est, les villages de Kouaoua et de Poro, localisés à proximité de sites miniers sont fortement exposés et un suivi régulier de la qualité de l'air en termes de PM₁₀ inhalées par les habitants serait nécessaire.

L'étude écotoxicologique menée sur les hydrosystèmes Taléa-Coco (sous influence minière) et Tivoli (pas d'influence minière) dans la région du Mont-Koniambo a permis de dresser un premier constat de la contamination métallique de leur composante biotique. Les biofilms périphytiques se sont avérés être un compartiment extrêmement bioaccumulateur des cinq métaux Co, Cr, Fe, Mn, Ni. La fraction inorganique des biofilms périphytiques est majoritaire et est associée à une composante microalgale qui s'est développée sur tous les sites avec des communautés de diatomées bien distinctes ce qui permet d'identifier des conditions environnementales différentes. Les diatomées se sont révélées être des bioindicateurs d'exposition aux plus fortes concentrations en ETM avec des réponses transcriptomiques mettant en évidence des activités métaboliques altérées et donc un impact fort des ETM.

Pour les niveaux trophiques supérieurs, crustacés et poissons, des accumulations de Ni, Cr, Co et Fe ont quasi systématiquement été plus élevées dans les organismes sous influence minière, suivant un gradient longitudinal décroissant vers l'aval. Les plus fortes bioaccumulations ont été analysées dans les branchies par rapport au foie ou aux reins. Ceci est révélateur d'une contamination prépondérante par les métaux dissous dans l'eau par rapport à la voie trophique. Cependant une diminution des concentrations dans les organismes depuis les biofilms vers les maillons supérieurs a été observée ce qui conduit au constat d'une absence de phénomène de bioamplification du Ni et des autres métaux le long des réseaux trophiques aquatiques d'eau douce de Nouvelle Calédonie, même si le caractère ichtyophage occasionnel de l'anguille n'a pas pu être confirmé au regard de ses signatures isotopiques.

La structuration des réseaux trophiques des hydrosystèmes révèle le statut omnivore (à des degrés divers) à tendance opportuniste des différentes espèces animales collectées avec des caractéristiques différant selon les sites, mais qui exploitent le même type de ressources (biofilms, matière organique sédimentaire, invertébrés ...).

Les études menées *in situ* ont été complétées par des expérimentations de contamination trophique de poissons omnivores, le lochon blanc, par des biofilms exposés à du nickel en conditions de laboratoire. Bien que les diatomées des biofilms aient montré une inhibition du niveau d'expression de la quasi-totalité des gènes étudiés, et que la structuration des communautés de diatomées exposées ait évolué vers le développement d'espèces plus résistantes, les résultats chez les poissons ont montré une faible capacité du Ni à transférer par la voie trophique. Cela confirme les analyses du terrain avec des bioaccumulations chez les poissons ne résultant pas majoritairement de la consommation des biofilms contaminés mais de la voie directe *via* les métaux dissous dans l'eau.

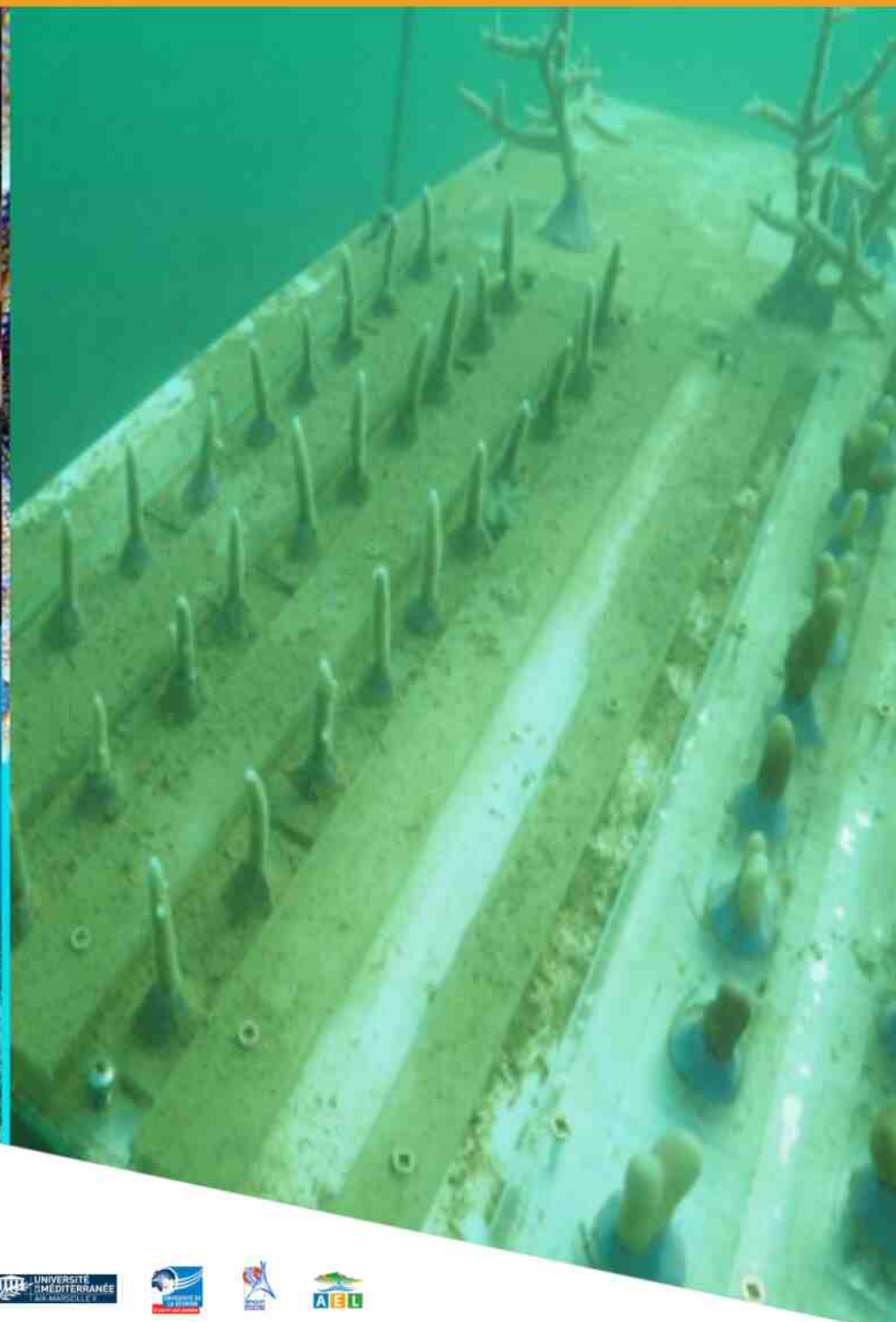
Grâce au programme DMML, l'étude d'un large éventail de plusieurs espèces et/ou communautés représentatives de cours d'eau néo-calédoniens a pu être menée dans le cadre du projet DMML et ce depuis le compartiment primaire avec les biofilms périphytiques de rivières et autres sources potentielles de matière organique jusqu'au dernier maillon des réseaux trophiques dulçaquicoles avec des poissons. Les résultats obtenus sur la bioaccumulation en métaux des organismes aquatiques, leurs impacts toxiques dans un réseau trophique dont la structure a pu être précisée sont nouveaux et enrichissent les connaissances sur ces milieux aquatiques tropicaux d'eau douce.



PROJET DYNAMINE

Dynamique des métaux de la mine au lagon en Nouvelle-Calédonie

Hydrosphère et écosystèmes coralliens



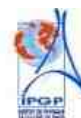
SYNTHESE

Synthèse des résultats
du programme **DYNAMINE**
Dynamique des Métaux de la Mine
au Lagon en Nouvelle-Calédonie



*Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par
le CNRT « Nickel & son environnement »*

CNRT
NICKEL
& son environnement



Pour le consortium **DYNAMINE** Dynamique des métaux de la mine au lagon en Nouvelle-Calédonie

AUTEURS :

AEL

Jean-Michel Fernandez, Responsable AEL et Benjamin Moreton – Ingénieur AEL

CEREGE (Université Aix-Marseille - UMR CNRS 7330 – UMR IRD 161)

Jean-Paul Ambrosi - CR CNRS
Ferdaous Hamidi – Stagiaire M1 Université Aix-Marseille
Olivier Radakovitch – MCF Université Aix-Marseille

ENTROPIE (Université de La Réunion - UMR IRD 250 – UMR CNRS 9220)

Tom Biscere - Doctorant Sorbonne Université (CIFRE IRD/KNS/Ginger Soproner)
Fanny Houlbrèque – CR IRD

IMPMC (Sorbonne Université - UMR CNRS 7590 – UMR IRD 206)

Pierre-Jean Apiazari – Stagiaire 2eme année DUT Université Lyon 2
Robin Cirou – Stagiaire 3eme année ENSEEIHT
Léonore Flipo – Stagiaire M1 Sorbonne Université
Maya Ikogou – Doctorante Sorbonne Université
Farid Juillot – CR IRD
Jordan Mercier – Stagiaire CUIR Université de la Nouvelle-Calédonie
Pauline Merrot – Doctorante Sorbonne Université
Guillaume Morin – DR CNRS
Georges Ona-Nguéma - MCF Sorbonne Université
Daphné Peyresaubes – Stagiaire L3 Sorbonne Université
Sarah Steinmetz – Stagiaire M1 Sorbonne Université

IPGP (Université Paris Diderot - UMR CNRS 7154)

Eric Viollier - MCF Université Paris Diderot

MIO (Université Aix-Marseille - UMR CNRS 7294 – UMR IRD 235)

Cécile Dupouy - CR IRD et Guillaume Wattelez – Ingénieur CDD

ISEA (Université de la Nouvelle-Calédonie)

Lisa Berto – Stagiaire M2 Université de la Nouvelle-Calédonie
Aurélié Boula - Doctorante Université de la Nouvelle-Calédonie
Peggy Gunkel-Grillon – MCF Université de la Nouvelle-Calédonie
Wilson Heron Tagar – Stagiaire M2 Université de la Nouvelle-Calédonie
Christine Laporte-Magoni - MCF Université de la Nouvelle-Calédonie
Cyrille Métayer - MCF Université de la Nouvelle-Calédonie
Michaël Meyer - MCF Université de la Nouvelle-Calédonie
Kevin Schneider – Stagiaire M1 Université de Nice Sophia Antipolis
Nazha Selmaoui-Folcher - MCF Université de la Nouvelle-Calédonie

Synthèse issue du rapport scientifique final, coordonné par Dr Farid JUILLOT (IRD, France)

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET *DYNAMINE*

En Nouvelle-Calédonie, l'érosion des massifs latéritiques développés sur roches ultrabasiques depuis plusieurs centaines de milliers d'années a entraîné le transfert vers les écosystèmes littoraux (mangrove et lagon) d'un volume considérable de matériaux plus ou moins riches en métaux (plus communément regroupés sous le terme d'*éléments traces métalliques* ou *ETM*, qui sera utilisé dans cette synthèse), tels que le nickel (Ni), le chrome (Cr), le cobalt (Co), le manganèse (Mn) ou le fer (Fe). Par ailleurs, depuis la fin du 19^{ème} siècle, le développement de l'activité minière est soupçonné d'avoir augmenté ce transfert en exacerbant ces processus naturels d'érosion, ce qui soulève la question de la résilience des écosystèmes littoraux à ces changements environnementaux. Des études portant sur un suivi intégré de la dynamique des ETM le long du continuum massif minier – rivière – écosystèmes littoraux s'avèrent donc nécessaires pour évaluer l'impact potentiel de l'activité minière sur le fonctionnement et la biodiversité des écosystèmes littoraux.

C'est dans ce contexte que le projet *DYNAMINE* proposait de (1) quantifier les flux d'ETM potentiellement toxiques tels que le fer (Fe), le nickel (Ni), le chrome (Cr), le cobalt (Co) et le manganèse (Mn) le long du continuum massif-lagon, dans le but de mieux évaluer la contribution relative des phénomènes naturels et anthropiques (activité minière) aux cycles biogéochimiques de ces éléments à l'aval des massifs miniers de Nouvelle-Calédonie et (2) de proposer une première évaluation de la toxicité de ces ETM vis-à-vis de la biodiversité lagonaire, représentée par les écosystèmes coralliens.

Pour atteindre ces objectifs, le projet *DYNAMINE* était structuré en en trois volets principaux consacrés respectivement à l'étude (1) de la dynamique des métaux à l'échelle du continuum massif minier – rivière – lagon, (2) des propriétés des métaux associés le long de ce continuum et (3) des impacts potentiels des métaux sur la biodiversité du lagon. Chacun de ces volets comportait plusieurs actions étant elles-mêmes organisées en 2 ou 3 Tâches (à l'exception de la première action).

Le premier volet était constitué de trois actions complémentaires. La première était destinée à (1) caractériser le bruit de fonds géochimique des rivières sur massif minier, (2) identifier les marqueurs géochimiques de l'activité minière au sein de ces rivières et (3) quantifier les flux de métaux transportés par les hydro-systèmes. La deuxième avait pour objectif de comparer les flux historiques et actuels de métaux transportés vers les sédiments du lagon dans le but de mettre en évidence une éventuelle variation de ces flux qui pourrait être imputée à l'activité minière. Enfin, la troisième action avait pour ambition de retracer les sources de métaux vers les sédiments du lagon dans le but de mieux évaluer l'importance des massifs latéritiques dans ces flux.

Le deuxième volet du projet *DYNAMINE* était également constitué de trois actions complémentaires. La première avait pour objectif d'estimer la biodisponibilité des métaux le long du continuum massif minier – rivière – lagon. La deuxième action était focalisée sur le comportement des métaux à l'interface rivière / lagon qui est marquée par un gradient marqué de salinité. Enfin, la troisième action avait pour objectif de préciser la cristallogénèse des sédiments du lagon et de mieux décrire la spéciation des métaux dans ces sédiments.

Le troisième et dernier volet du projet *DYNAMINE* était constitué de deux actions destinées à établir une première évaluation des impacts des métaux sur la biodiversité lagonaire. Cette évaluation a été abordée sous deux angles complémentaires, le premier reposant sur une étude directe de la toxicité de certains métaux sur la physiologie des écosystèmes coralliens et le second s'appuyant sur une comparaison entre les concentrations mesurées dans les eaux porales des sédiments du lagon et les valeurs connues de toxicité des métaux dans des contextes environnementaux similaires.

Les résultats obtenus dans le cadre de ces différents volets sont présentés synthétiquement dans le présent document.

2. BASSINS VERSANTS SUIVIS DANS LE CADRE DU PROJET DYNAMINE

Le site d'étude du projet *DYNAMINE* constitue un continuum entre milieu terrestre et milieu lagonaire.

Pour le milieu terrestre, les différents bassins versants suivis sont localisés sur le massif du Koniambo (côte Ouest, Province Nord) (Figure 1). Ces bassins versants sont équipés d'un réseau météorologique (pluviographes) et hydrologique (stations limnimétriques) opéré par la société Koniambo Nickel SAS (KNS) depuis une vingtaine d'années dans le cadre du suivi environnemental en lien avec la mise en exploitation du massif.

Dans le cadre du projet, les données hydrologiques et géochimiques de 7 bassins versants (Foachiamboué, Taléa droite, Taléa gauche, Pandanus, Confiance, Népia et Tivoli) ont plus particulièrement été utilisées. Parmi ces bassins versants, celui de la rivière Foachiamboué garde les stigmates d'une activité minière passée datant du 19^{ème} siècle qui se traduit par la présence de plusieurs carrières abandonnées et de nombreuses ravines, visibles directement à l'aval de mines orphelines. La conséquence est un charriage sédimentaire récurrent et important (coloration rouge/ocre du cours d'eau). Le bassin versant de la rivière Foachiamboué, jamais réhabilité, est donc considéré comme influencé par une activité minière passée pour laquelle aucune gestion des eaux de surface n'a été mise en place. Les bassins versants des rivières Taléa droite, Taléa gauche, Pandanus, Confiance et Népia sont quant à eux considérés comme pas ou peu influencés par l'activité minière antérieure à la mise en exploitation du massif du Koniambo par la société KNS. Enfin, le bassin versant de la rivière Tivoli a également été sélectionné comme référence, car il n'est pas directement connecté à la zone minière du massif du Koniambo.

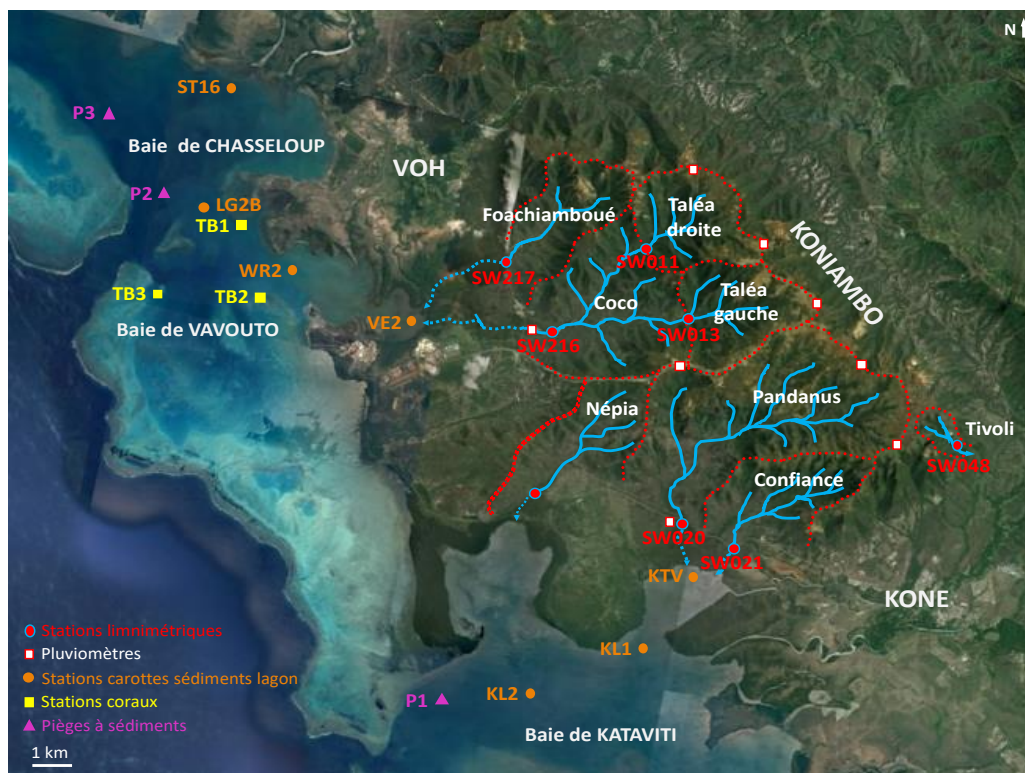


Figure 1. Présentation du site d'étude (Koniambo) avec la délimitation des bassins versants suivis et les emplacements des différents points de mesure et d'échantillonnage sur les rivières et dans le lagon.

La partie du lagon qui a fait l'objet de cette étude se situe au Nord-Ouest de la Nouvelle-Calédonie, au nord de la ville de Koné et au sud de la ville de Voh, à 270 km au nord de Nouméa. Elle correspond à la zone dite Voh-Koné-Pouembout ou VKP.

Pour ce milieu lagunaire, 7 stations de collecte de carottes de sédiments et 3 stations de suivi des coraux ont été mises en place dans le cadre du projet (Figure 1). Les 3 stations de suivi des coraux sont localisées dans la baie de Vavouto. Les 7 stations de collecte de carottes de sédiments se répartissent entre la baie de Vavouto (stations VE2, WR2, LG2B), la baie de Kataviti (stations KTV, KL1, KL2) et la baie de Chasseloup (station ST16). Les stations dans les baies de Vavouto et Chasseloup ont été sélectionnées pour représenter un gradient décroissant d'apports continentaux. La station dans la baie de Chasseloup a été sélectionnée pour représenter un site de référence d'apports continentaux en dehors de l'influence directe des rivières du massif du Koniambo.

3. BRUIT DE FOND GÉOCHIMIQUE DES RIVIÈRES DU MASSIF DU KONIAMBO ET INDICATEURS GÉOCHIMIQUES D'ANTHROPISATION

Les concentrations totales et dissoutes ($< 0,45 \mu\text{m}$) en éléments traces métalliques de la base de données KNS correspondant à la période avant la mise en exploitation du massif du Koniambo (1994-2009) ont été analysées par une approche combinant statistiques descriptives et classification supervisée (notamment l'approche nommée "arbre de décision") pour (1) définir le bruit de fond géochimique des rivières sur substrat ultrabasique (composition chimique des eaux de rivières non impactées par l'activité minière), (2) identifier les marqueurs géochimiques de l'activité minière et (3) vérifier le poids de chaque marqueur géochimique dans la discrimination entre bassin versant impacté et bassin versant non impacté.

Bruit de fond géochimique : Les bassins versants ultrabasiques non impactés montrent les concentrations totales en éléments majeurs les plus élevées pour Fe (fer), Ca (calcium), Na (sodium), Si (silicium) et Mg (magnésium) (valeurs maximales du 3^{ème} quartile, $Q3_{max}$, de 8941 $\mu\text{g/L}$ à 118000 $\mu\text{g/L}$). Les concentrations en éléments dissous, les plus fortes sont obtenues pour Al (aluminium), Fe et Mg ($Q3_{max}$ de 113 $\mu\text{g/L}$ à 7050 $\mu\text{g/L}$). En ce qui concerne les éléments traces, les concentrations les plus élevées sont obtenues pour Co (cobalt), Cr (chrome), Mn (manganèse) et Ni (nickel) ($Q3_{max}$ de 40 à 285 $\mu\text{g/L}$), à partir des concentrations totales, et pour Mn, Cr et Ni ($Q3_{max}$ de 30 à 61 $\mu\text{g/L}$) à partir des concentrations dans la fraction dissoute. Les éléments les plus concentrés dans les eaux de surface sont donc les mêmes que ceux qui dominent dans la composition des roches ultrabasiques et des produits de leur altération. Ces roches constituent le substrat des bassins versants et, leur érosion, alimente les eaux de surface en matières en suspension (MES). L'origine géogénique des signatures géochimiques des eaux de surface est donc confirmée.

À noter que la valeur de $Q3_{max}$ de l'As (arsenic) dans la fraction dissoute dans les eaux de la Népia est de 14 $\mu\text{g/L}$. Cette valeur est supérieure à celle de 10 $\mu\text{g/L}$ recommandée par l'OMS pour l'eau de boisson. Les autres rivières présentent des valeurs de $Q3$ pour As près de trois fois inférieures (de 4 à 5 $\mu\text{g/L}$). De même, la concentration maximale en Cr dissous dans les eaux de la Pandanus (114 $\mu\text{g/L}$) dépasse la valeur limite de 50 $\mu\text{g/L}$ recommandée par l'OMS pour l'eau de boisson. Les eaux des bassins versants ultrabasiques non impactés peuvent donc être, au moins ponctuellement, impropres à la consommation.

Afin de minimiser la variabilité interquartile, et obtenir une référence à la fois plus lisible et plus représentative, le bruit de fond géochimique a été défini à partir des valeurs médianes. La Figure 2 montre la faible variabilité de ces valeurs médianes par élément chimique pour les 4 rivières pas ou peu influencées par l'activité minière (Coco, Pandanus, Confiance, Népia). Le bruit de fond géochimique des bassins versants ultrabasiques, non impactés du Koniambo peut être représenté par l'intervalle entre les limites hautes et basses des valeurs médianes (zone grisée, Figure 2).

Marqueurs géochimiques de l'activité minière : Les eaux de la Foachiamboué présentent des concentrations de MES supérieures à celles des rivières non impactées. La valeur $Q3_{MES}$ Foachiamboué est de 1185 mg/L ($[MES]_{Foachiamboué}$ maximale = 5740 mg/L), contre 210 mg/L pour la valeur maximale de $Q3_{MES}$ des rivières non anthropisées ($[MES]_{rivières\ non\ anthropisées}$ maximale = 2867 mg/L). L'exploitation minière à ciel ouvert implique, en l'absence d'ouvrages de gestion des eaux de surface (cas de la Foachiamboué), la mobilisation importante de roches considérées comme des stériles. L'absence de couvert végétal, les pentes importantes des reliefs, et les précipitations intenses, tropicales, sont autant de facteurs qui favorisent une érosion importante. L'augmentation des concentrations en MES est alors une source d'ETM plus ou moins solubles.

En conséquence, les valeurs médianes des concentrations totales dans les eaux de la Foachiamboué sont supérieures aux valeurs maximales du bruit de fond géochimique pour Ni, Fe, Cr, Mn, Al, Co (avec un rapport respectif des valeurs médianes de la Foachiamboué sur la valeur médiane maximale du bruit de fond de 59,2 - 30,8 - 27,5 - 25,2 - 25,0 - 13,8) et dans une moindre mesure pour As et Zn (zinc) (rapport d'environ 2,6) (Figure 2). Dans la fraction dissoute, seules les concentrations en Cr, Ni, Al et Fe présentent des valeurs médianes supérieures aux valeurs maximales du bruit de fond géochimique avec des rapports compris entre 6,8 et 2,1 (Figure 2). Les résultats des analyses statistiques descriptives identifient donc comme marqueurs de l'activité minière sur la signature géochimique des eaux des rivières (1) Ni, Fe, Cr, Mn, Al, Co et As pour les concentrations totales, et (2) Cr, Ni et Al pour les concentrations dissoutes.

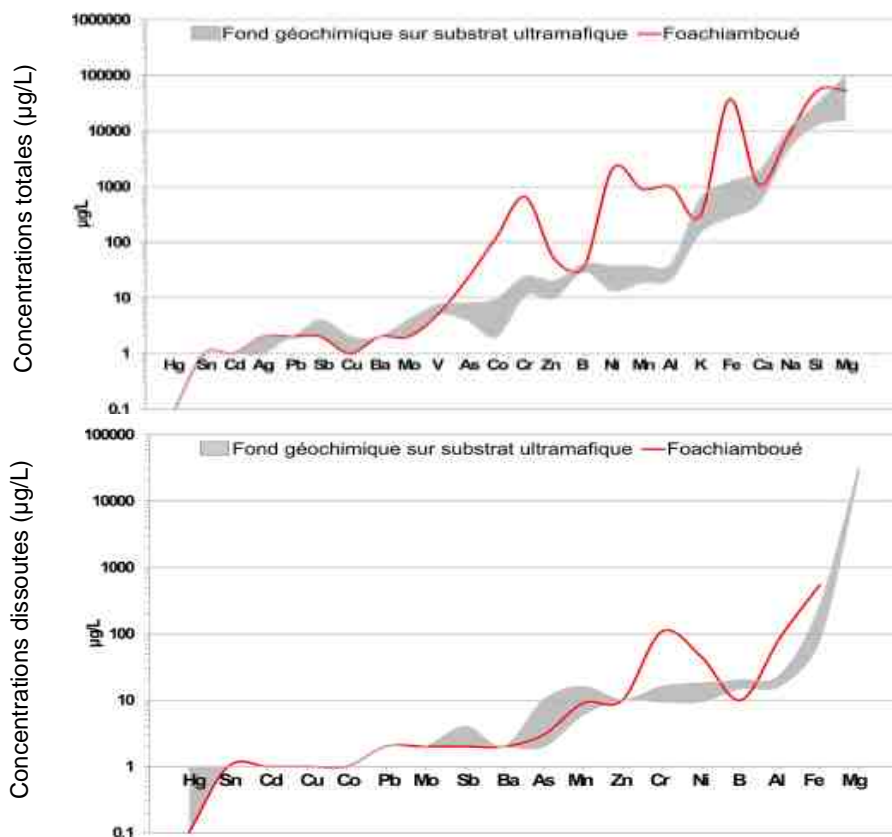


Figure 2. Valeurs médianes des concentrations totales (haut) et dissoutes (bas) dans les eaux de la Foachiamboué (en rouge) et bruit de fond géochimique (en gris) défini par les valeurs médianes dans les eaux de la Pandanus, de la Népia, de la Coco et de la Confiance.

Les tests d'analyse de variances (ANOVA) confirment les éléments Al, As, Co, Cr, Fe, Mn et Ni comme marqueurs géochimiques de l'activité minière pour les concentrations totales, avec des *p-value* inférieures à 0,05 (valeurs de *p-value* de $1,18 \cdot 10^{-8}$ à 0,002). En revanche, l'enrichissement de Zn par rapport au bruit de fond géochimique n'est pas significatif (*p-value* de 0,48). Pour la fraction dissoute, Cr est confirmé comme un marqueur de l'activité minière avec une *p-value* de $6,6 \cdot 10^{-12}$ (valeur la plus faible de toutes celles obtenues à l'issue de ces tests d'analyse de variances). Les *p-value* de 0,03 obtenues pour Ni et Al dans la fraction dissoute sont trop proches de la valeur seuil de 0,05 pour conclure de façon définitive à leur classement comme marqueurs géochimiques de l'activité minière.

Même s'il est classé comme un oligo-élément essentiel pour l'homme sous sa forme trivalente, Cr peut s'avérer toxique à concentration élevée. De plus, sa forme hexavalente est reconnue comme toxique et cancérigène. Or, la valeur médiane des concentrations en Cr dissous dans les eaux de la Foachiamboué est de 108 µg/L, avec une valeur de Q3 de 153 µg/L, ce qui dépasse très largement la valeur limite de 50 µg/L recommandée par l'OMS pour les eaux de boisson. L'augmentation des concentrations en Cr dans les eaux des rivières sous influence minière ne faisant pas, ou n'ayant pas fait l'objet d'une gestion adaptée, représente donc un risque sanitaire et est susceptible de poser un problème de santé publique.

Poids de chaque indicateur géochimique dans la discrimination bassins non-impactés/bassin impacté : les arbres de décisions correspondant à la séparation en deux groupes « impactés » et « non impactés » obtenus à partir des concentrations totales et dissoutes sont présentés Figure 3.

Pour les concentrations totales, l'arbre de décision montre que Cr, Mn et As sont les 3 marqueurs géochimiques qui permettent de discriminer quasiment la totalité des échantillons. Les concentrations limites qui permettraient de séparer les deux groupes sont 367 µg/L pour Cr, 192 µg/L pour Mn et 100 µg/L pour As. Le taux de précision du classement est de 89.5%. L'arbre indique également que le groupe « non impactés » possède des concentrations en As supérieures à celles du groupe « impactés ». Ce résultat, peut sembler contradictoire mais il est la conséquence des concentrations élevées en As dissous des eaux de la Népia, un bassin versant pourtant non anthropisé (alimentation par les eaux souterraines). Il s'agit ici de premiers résultats qui devront être confirmés par l'exploitation de bases de données plus conséquentes et représentatives des autres bassins versants ultrabasiques calédoniens.

Pour les concentrations dissoutes, l'arbre de décision montre que Cr est l'élément décisif. Le taux de précision du classement atteint 92.94%. La concentration limite de discrimination est 58 µg/L, qui est proche mais toutefois supérieur à la valeur limite de 50 µg/L recommandée par l'OMS pour les eaux de boisson. Ce résultat confirme qu'en contexte minier et en absence de gestion adaptée des eaux de surface, il peut exister un risque sanitaire lors de l'utilisation domestique des eaux des rivières sous influence minière.

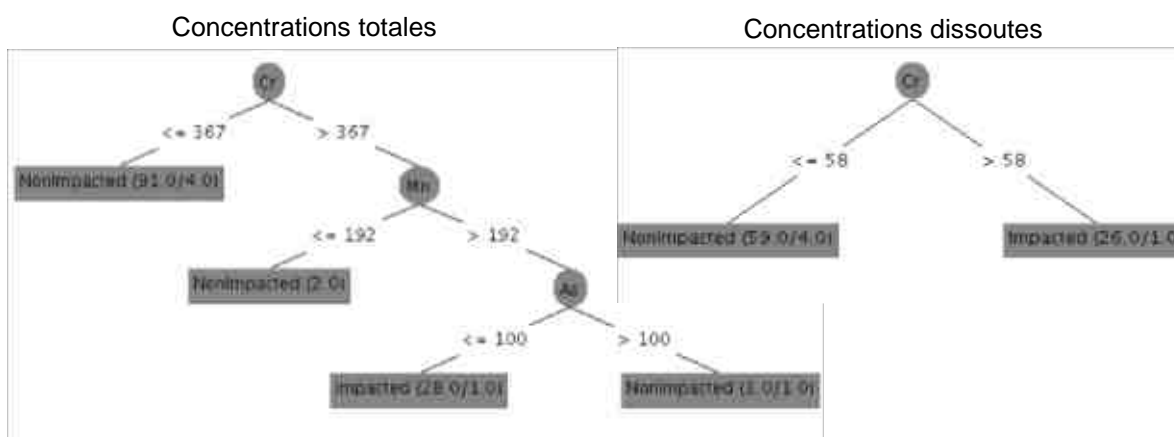


Figure 3. Arbres de décision obtenus pour les concentrations totales (gauche) et dissoutes (droite).

Ce dernier point sur l'importance des ouvrages de gestion des eaux de surface sur la qualité des eaux des rivières des massifs miniers est soutenu par les résultats d'une analyse comparative des concentrations totales et dissoutes de Fe, Cr, Ni, Mn et Co mesurées dans les eaux des rivières considérées comme non impactées sur l'ensemble de la période couverte par la base de données KNS (1997-2016, au moment de la transmission des informations).

En effet, ces résultats semblent indiquer une tendance à la diminution des concentrations en ETM dans les eaux des rivières des bassins versants suivis depuis la mise en exploitation du massif du Koniambo (Figure 4). Cette tendance semble se manifester aussi bien dans les fractions dissoutes que totale des eaux des rivières du massif. Elle pourrait s'expliquer par la mise en place d'ouvrages de gestion des eaux de surface sur les massifs miniers à partir des années 2009-2010, en lien avec l'apparition du Code Minier de Nouvelle-Calédonie. Si tel était le cas, la diminution des concentrations en ETM dans les fractions totales et dissoutes des rivières du massif du Koniambo soulignerait l'efficacité de ces ouvrages et leur utilité pour la gestion de la qualité des eaux des rivières sur les massifs miniers.

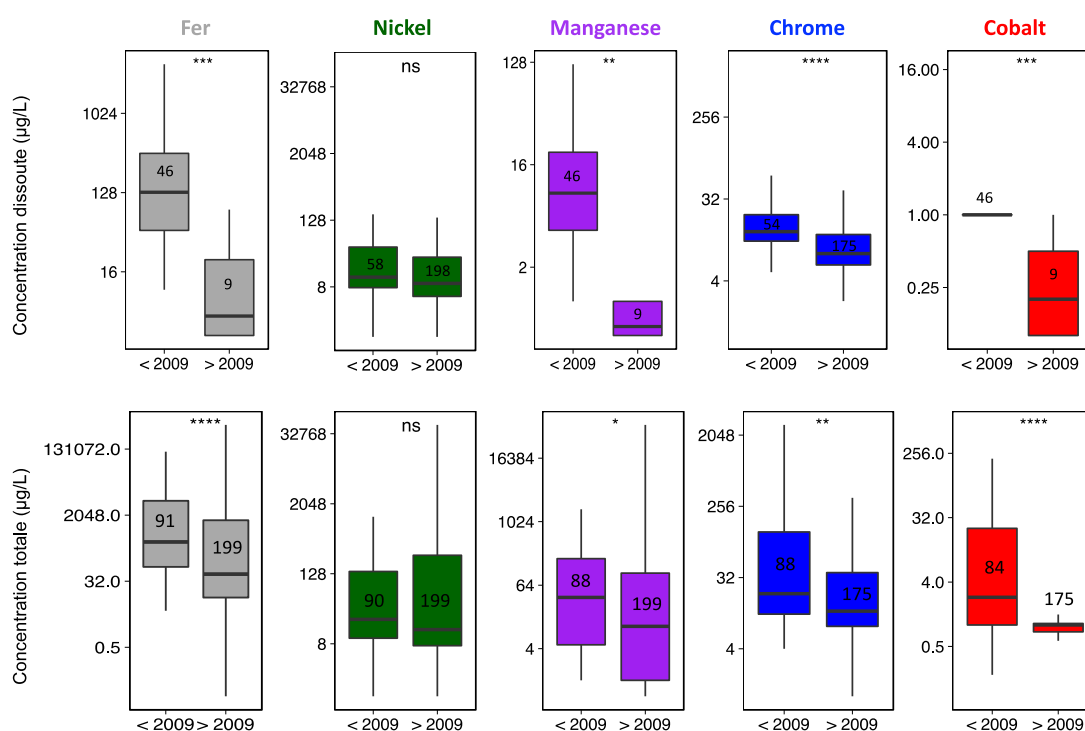


Figure 4. Comparaison des concentrations ($\mu\text{g/L}$) en fer (Fe), nickel (Ni), manganèse (Mn), chrome (Cr) et cobalt (Co) dans les fraction dissoute ($< 0,45 \mu\text{m}$) et totale des eaux de rivières des bassins versants du massif du Koniambo suivis dans le cadre du projet DYNAMINE avant (période 1997-2009) et après (période 2010-2016) la mise en exploitation du massif. Pour chaque élément, les boîtes délimitent les valeurs comprises entre le premier quartile (25% des valeurs inférieures) et le troisième quartile (75% des valeurs inférieures), la barre horizontale indique la valeur médiane (50% des valeurs inférieures) et les traits pointillés verticaux indiquent la gamme complète de valeurs mesurées. Données présentées en échelle logarithmique.

La tendance observée devra néanmoins être analysée de manière plus détaillée avant de pouvoir conclure définitivement sur cette efficacité des ouvrages de gestion des eaux de surface, car une variation plus ou moins marquée de pluviométrie entre les deux périodes comparées pourrait également expliquer les différences observées. En effet, les concentrations en ETM mesurées dans les fractions dissoute et totale avant 2009 présentent une plus grande variabilité que celles mesurées après 2009, ce qui pourrait indiquer une plus forte densité d'épisodes météorologiques forts durant la période 1997-2009.

4. FLUX D'ETM LE LONG DU CONTINUUM MINE - LAGON

I. FLUX ANNUELS D'ETM DANS LES RIVIÈRES DU MASSIF DU KONIAMBO

En plus de données chimiques, la base de données KNS contient également des données de suivis hydrologiques qui ont fait l'objet de plusieurs phases de traitement. Dans un premier temps, les courbes de tarage des stations limnimétriques établies à l'aide des données KNS (fiables pour les débits $< 1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ont été utilisées pour calculer les débits moyens quotidiens des rivières suivies. Cette partie du travail a été limitée aux données disponibles sur la période 2010-2016, car les données antérieures se sont avérées peu fiables sans une analyse plus détaillée qui aurait nécessité un investissement en temps incompatible avec la durée du projet. Dans un second temps, le débit moyen quotidien de chacune des rivières suivies a été utilisé pour calculer le module du débit (moyenne des débits mensuels sur plusieurs années), ce paramètre servant à définir les périodes de basses eaux (débit inférieur au module) et de hautes eaux (débit supérieur au module). Les débits moyens pour chaque période de basses eaux et de hautes eaux, ainsi que la fréquence annuelle de ces périodes, ont ensuite été calculés et ces données ont été utilisées pour calculer le débit moyen annuel des différentes rivières suivies. Les débits moyens annuels ainsi calculés sont de $0,0837 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la rivière Taléa droite, $0,1072 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la rivière Taléa gauche, $0,4308 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la rivière Coco, $0,4207 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la rivière Pandanus, $0,1084 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la rivière Confiance.

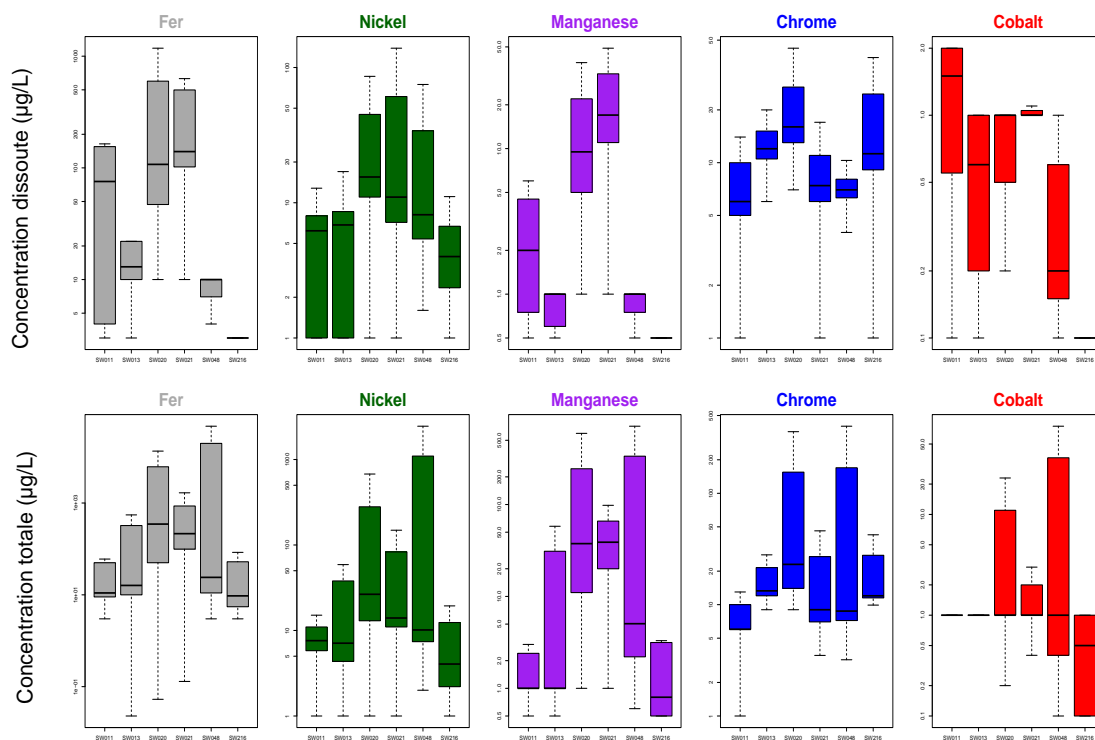


Figure 5. Comparaison des concentrations ($\mu\text{g/L}$) en fer (Fe), nickel (Ni), manganèse (Mn), chrome (Cr) et cobalt (Co) mesurées dans les fractions dissoute ($< 0,45 \mu\text{m}$) et totale des eaux de rivières des différents bassins versants du massif du Koniambo suivis dans le cadre du projet DYNAMINE sur l'ensemble de la période 1997-2016. Pour chaque élément, les boîtes délimitent les valeurs comprises entre le premier quartile (25% des valeurs inférieures) et le troisième quartile (75% des valeurs inférieures), la barre horizontale indique la valeur médiane (50% des valeurs inférieures) et les traits pointillés verticaux indiquent la gamme complète de valeurs mesurées. Données présentées en échelle logarithmique.

Ces débits moyens annuels ont été combinés aux concentrations médianes en ETM dans les fractions dissoute et totale des eaux des rivières (Figure 5) pour calculer les flux annuels (kg/an) d'ETM actuellement transportés par les rivières du massif du Koniambo.

Les résultats obtenus indiquent que les flux actuels d'ETM dans la fraction dissoute des rivières suivies varient d'environ 1,4 kg/an pour Co en sortie du bassin versant Coco à plus de 1400 kg/an pour Fe en sortie du bassin versant Pandanus (Tableau 1). Les flux dans la fraction totale varient quant à eux d'environ 2,6 kg/an pour Mn en sortie du bassin versant Taléa droite à plus de 4600 kg/an pour Fe en sortie du bassin versant Pandanus (Tableau 1). Cette grande variabilité des flux d'ETM est liée d'une part à la variabilité des signatures géochimiques des rivières (Figure 5), et d'autre part à la grande variabilité de leur fonctionnement hydrologique (en lien avec la taille des bassins versants, mais également avec la répartition annuelle des périodes de basses eaux et de hautes eaux).

Que ce soit dans la fraction dissoute ou dans la fraction totale, les résultats obtenus avec cette approche indiquent que les flux annuels d'ETM actuellement transportés dans les bassins versants Taléa Droite et Taléa Gauche sont les plus faibles. Les flux estimés pour le bassin versant Coco correspondent sensiblement à la somme de ceux estimés pour ces deux bassin versants. Les flux estimés pour le bassin versant Confiance sont plus de deux fois supérieurs et ceux estimés pour le bassin versant Pandanus sont de loin les plus élevés (Tableau 1

Tableau 1. Flux (kg/an) en fer (Fe), chrome (Cr), nickel (Ni), manganèse (Mn) et cobalt (Co) dans les fractions dissoute (< 0,45 µm) et totale des rivières des différents bassins versants du massif du Koniambo suivis dans le cadre du projet DYNAMINE (à l'exception du bassin versant Tivoli). Les valeurs présentées ont été estimées à partir des concentrations médianes en ETM mesurées dans les rivières sur la période 1997-2016 et des débits moyens estimés sur la période 2010-2016.

Flux ETM (kg/an)										
Bassin versant	Fe		Cr		Ni		Mn		Co	
	Dissous	Total	Dissous	Total	Dissous	Total	Dissous	Total	Dissous	Total
Taléa droite	199,2	29,0	15,8	15,8	16,4	20,1	5,3	2,6	4,0	2,7
Taléa gauche	44,0	54,1	40,6	45,0	23,2	24,0	3,4	3,4	2,0	3,4
Coco	40,8	129,1	152,8	163,0	54,3	55,0	6,8	10,9	1,4	8,2
Pandanus	1426,1	4603,4	212,3	305,1	205,6	351,6	126,0	497,5	13,3	22,6
Confiance	478,4	734,7	25,3	30,8	37,6	47,8	58,1	132,9	3,4	3,4

II. FLUX ANNUELS D'ETM VERS LES SEDIMENTS DU LAGON A L'AVAL DU MASSIF DU KONIAMBO

Les flux actuels d'ETM vers les sédiments du lagon ont été évalués à l'aide de 3 pièges à sédiments déployés dans les baies de Kataviti, de Vavouto et de Chasseloup (Figure 1). Ces pièges ont été installés à 3 mètres du fond dans des zones qui présentent une hauteur d'eau supérieure à une douzaine de mètres. Trois campagnes de collecte ont été réalisées (campagne 1 du 26 novembre 2016 au 25 janvier 2017, campagne 2 du 28 juin 2017 au 15 août 2017 et campagne 3 du 03 août 2018 au 19 septembre 2018) pendant la durée du projet.

Les flux quotidiens de sédiments enregistrés sur les trois périodes sont de 0,113 kg/m²/jour (Kataviti), 0,044 kg/m²/jour (Vavouto) et 0,052 kg/m²/jour (Chasseloup) pour la première campagne (2016), 0,025 kg/m²/jour (Kataviti), 0,014 kg/m²/jour (Vavouto) et 0,019 kg/m²/jour (Chasseloup) pour la deuxième campagne (2017) et 0,032 kg/m²/jour (Kataviti), 0,021 kg/m²/jour (Vavouto) et 0,022 kg/m²/jour (Chasseloup) pour la troisième campagne (2018).

La principale information qui ressort de ces résultats est que la première campagne (2016) montre des flux quotidiens actuels de sédiments nettement plus élevés que les deux autres campagnes. Cette différence marquée peut être liée à une différence d'apports continentaux en lien avec la pluie ou à une remise en suspension des sédiments en lien avec le vent (direction et/ou intensité) lors de la première campagne. Les premières analyses des paramètres météorologiques durant les campagnes suggèrent une influence prépondérante de la remise en suspension des sédiments. Cependant, ces informations devront être confirmées par une analyse plus détaillée des conditions météorologiques lors des 3 campagnes.

La comparaison des enregistrements sédimentaires entre les 3 baies suggère également un flux quotidiens actuels de sédiments plus élevé dans la baie de Kataviti. Cependant, cette différence est surtout marquée pour la première campagne qui a manifestement été perturbée par les conditions météorologiques, comme évoqué précédemment. Le volume de données ainsi collecté semble donc pour l'instant trop limité pour pouvoir conclure définitivement à une éventuelle différence des flux quotidiens actuels de sédiments entre les 3 baies.

Les flux quotidiens actuels de sédiments ont ensuite été utilisés pour estimer les flux moyens quotidiens d'ETM sédimentant actuellement dans les baies de Kataviti, Vavouto et Chasseloup. Pour ces calculs, les concentrations en Fe, Ni, Mn, Cr et Co dans les sédiments collectés dans les pièges ont été moyennées sur chaque période (Figure 6).

Les flux actuels d'ETM ainsi calculés à l'aide des pièges à sédiments sont reportés dans le Tableau 2 où ils sont comparés aux flux anciens de sédiments estimés par datation de carottes sédimentaires.

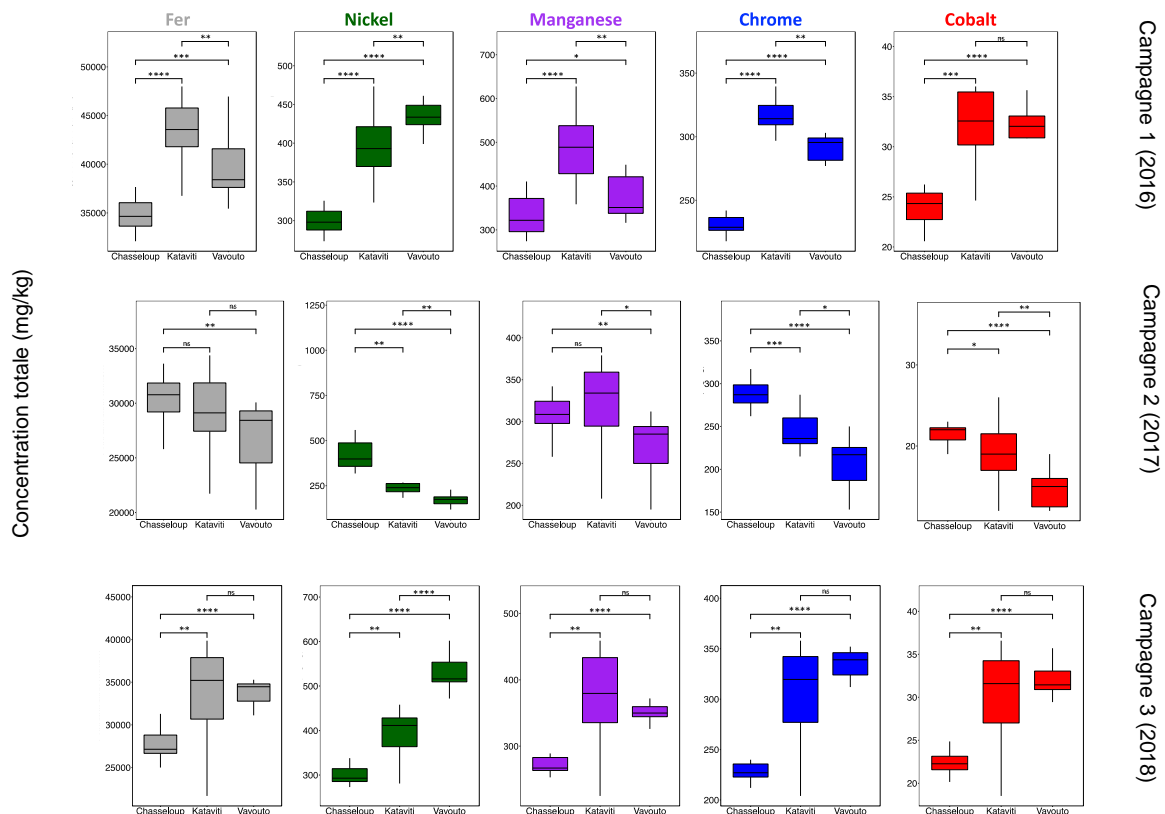


Figure 6. Comparaison des concentrations (mg/kg) en fer (Fe), nickel (Ni), manganèse (Mn), chrome (Cr) et cobalt (Co) mesurées dans les MES collectées dans les pièges à sédiments déployés dans les baies de Vavouto, Kataviti et Chasseloup durant les 3 campagnes (2016, 2017 et 2018). ns : différence des moyennes non significative.

Les flux anciens d'ETM vers les sédiments du lagon ont été quantifiés par datation de carottes sédimentaires à l'aide de la méthode du ^{210}Pb (Plomb-210). Cette datation a été réalisée sur une centaine d'échantillons de sédiments issus des 7 carottes prélevées dans le lagon à l'aval du massif du Koniambo (Figure 1). Sur ces 7 carottes, seules les carottes KL1, KL2 et LG2B ont pu être utilisées pour les datations. Les autres carottes présentaient en effet des évidences de mélange qui ont empêché l'utilisation de cette approche méthodologique. Le mélange des sédiments pour les carottes VE2, KTV et WR2 n'est pas vraiment surprenant du fait de la faible hauteur d'eau (0,8 m, 1,3 m et 4 m, respectivement). Celui observé le long de la carotte ST16 en dépit d'une hauteur d'eau significative (8,0 m) peut s'expliquer par la proximité de cette station avec l'embouchure de la rivière Témala (Figure 1).

Les taux de sédimentation calculés pour les carottes KL1, KL2 et LG2B sont respectivement de $0,33 \text{ cm.an}^{-1}$, $0,28 \text{ cm.an}^{-1}$ et $0,45 \text{ cm.an}^{-1}$. Ces résultats suggèrent une sédimentation significativement plus élevée dans la baie de Vavouto (carotte LG2B) par rapport à la baie de Kataviti (carottes KL1 et KL2). Cependant, ces résultats doivent être considérés avec précaution du fait du profil légèrement perturbé de la carotte LG2B et donc d'une faible statistique sur les calculs de taux de sédimentation. Compte tenu des taux de sédimentation estimés et des profondeurs sur lesquelles ces estimations ont été réalisées, la période couverte par la partie exploitable des carottes KL1 ($0,33 \text{ cm/an} - 19 \text{ cm}$), KL2 ($0,28 \text{ cm/an} - 16 \text{ cm}$) et LG2B ($0,45 \text{ cm/an} - 14 \text{ cm}$) est respectivement estimée à 57 ans, 57 ans et 31 ans.

Les taux de sédimentation calculés (cm/an) ont été transformés en flux de sédiments ($\text{kg/m}^2/\text{j}$) qui ont eux-mêmes été couplés aux concentrations moyennes en ETM mesurées le long des carottes de sédiments (Figure 7) pour estimer les flux quotidiens anciens d'ETM ($\text{mg/m}^2/\text{j}$).

Les flux quotidiens anciens d'ETM ainsi estimés sont reportés dans le Tableau 2 où ils sont comparés aux flux quotidiens actuels d'ETM estimés à l'aide des pièges à sédiments.

Les taux de sédimentation calculés (cm/an) ont été transformés en flux de sédiments (kg/m²/j) qui ont eux-mêmes été couplés aux concentrations moyennes en ETM mesurées le long des carottes de sédiments (Figure 7) pour estimer les flux quotidiens anciens d'ETM (mg/m²/j).

Les flux quotidiens anciens d'ETM ainsi estimés sont reportés dans le Tableau 2 où ils sont comparés aux flux quotidiens actuels d'ETM estimés à l'aide des pièges à sédiments.

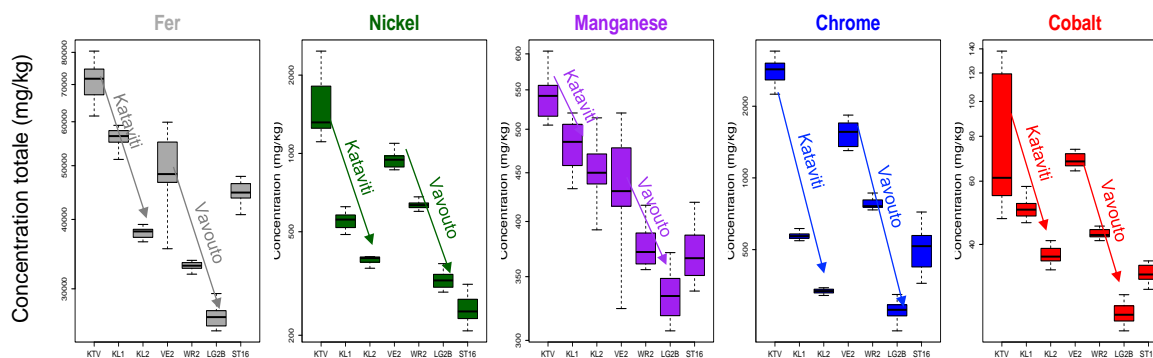


Figure 7 : Comparaison des concentrations (mg/kg) en fer (Fe), nickel (Ni), manganèse (Mn), chrome (Cr) et cobalt (Co) mesurées dans les carottes de sédiments collectées le long d'un gradient côte-récif dans les baies de Kataviti (KTV, KL1, KL2), Vavouto (VE2, WR2, LG2B) et Chasseloup (ST16) dans le cadre du projet DYNAMINE. Pour chaque élément, les boîtes délimitent les valeurs comprises entre le premier quartile (25% des valeurs inférieures) et le troisième quartile (75% des valeurs inférieures), la barre horizontale indique la valeur médiane (50% des valeurs inférieures) et les traits pointillés verticaux indiquent la gamme complète de valeurs mesurées. Données présentées en échelle logarithmique.

La comparaison des flux anciens (carottes de sédiments) et actuels (pièges à sédiments) d'ETM vers les sédiments du lagon a permis une première évaluation de la variation historique de ce paramètre dans les baies à l'aval du massif du Koniambo. Pour cette estimation, la carottes KL2 a été considérée comme un analogue ancien du piège à sédiments déployé dans la baie de Kataviti et la carotte LG2B comme un analogue ancien du piège à sédiments déployé dans la baie de Vavouto (Figure 1).

Si l'on considère les trois campagnes réalisées à l'aide des pièges à sédiments (Hypothèse 1 dans le Tableau 2), la comparaison des flux anciens d'ETM estimés à partir du taux de sédimentation de la carotte KL2 et des flux actuels estimés à l'aide du piège à sédiments déployé dans la baie de Kataviti suggère une variation des flux d'ETM de +68% pour Fe, +63% pour Ni, +67% pour Mn, +63% pour Cr et +61% pour Co (Tableau 2). La même approche appliquée à la carotte LG2B et au piège à sédiments déployé dans la baie de Vavouto suggère une variation des flux d'ETM de +16% pour Fe, +9% pour Ni, -3% pour Mn, -7% pour Cr et 0% pour Co (Tableau 2).

Ces résultats suggèrent ainsi une différence significative entre les flux d'ETM dans les baies de Kataviti et de Vavouto, avec des flux nettement plus importants dans la baie de Kataviti. Pour cette baie, les résultats suggèrent que les flux d'ETM vers les sédiments du lagon à l'aval du massif du Koniambo ont augmenté de manière très significative depuis une cinquantaine d'années. En revanche, les résultats obtenus pour la baie de Kataviti suggère une évolution peu marquée de ces flux d'ETM vers les sédiments du lagon depuis une cinquantaine d'années.

Tableau 2. Comparaison entre les flux (mg/m²/j) d'ETM vers les sédiments du lagon estimés à partir des taux de sédimentation pour les carottes KL2 et LG2B (flux anciens) et ceux estimés à l'aide des pièges à sédiments déployés dans les baies de Kataviti et Vavouto (flux actuels). Cette comparaison est matérialisée par les chiffres en gras qui représentent la variation des flux (%).

	Hypothèse 1 (2016 / 2017 / 2018)						Hypothèse 2 (2017 / 2018)					
	Ancien KL2		Actuel Kataviti				Ancien LG2B		Actuel Vavouto			
Fe	730,5	2296,1	+68	1174,1	986,9	+16	861,0	899,1	+19	1174,1	562,3	-46
Ni	7,5	20,5	+63	8,6	11,1	+9	7,5	7,6	+1	8,6	6,5	-45
Mn	8,8	26,2	+67	10,1	10,0	-3	8,8	10,1	+14	10,1	5,7	-80
Cr	10,3	17,4	+63	10,3	8,0	-7	10,3	7,8	+18	10,3	5,2	-65
Co	0,7	1,8	+61	0,8	0,8	0	0,7	0,7	0	0,8	0,4	-100

Ces résultats doivent cependant être considérés avec précaution car les flux actuels d'ETM estimés à l'aide des pièges à sédiments intègrent une contribution de la remise en suspension des sédiments dans la colonne d'eau en lien avec les conditions météorologiques (principalement intensité et direction des vents). Comme évoqué précédemment, cette contribution de la remise en suspension des sédiments est particulièrement marquée pour la première campagne (2016). Ainsi, si l'on écarte cette première campagne, les nouveaux flux actuels d'ETM calculés s'avèrent inférieurs aux flux anciens estimés à partir des taux de sédimentation (Hypothèse 2 dans le Tableaux 2). En effet, la comparaison des flux anciens d'ETM estimés à partir du taux de sédimentation des carottes KL2 et LG2B et des flux actuels estimés à l'aide des pièges à sédiments déployés dans les baies de Kataviti et Vavouto en excluant les données de la première campagne suggère une variation des flux d'ETM de +19% pour Fe, +1% pour Ni, +14% pour Mn, +18% pour Cr et 0% pour Co pour la baie de Kataviti et -46% pour Fe, -45% pour Ni, -80% pour Mn, -65% pour Cr et -100% pour Co pour la baie de Vavouto (Tableau 2).

Ces seconds résultats suggèrent ainsi que les flux d'ETM dans le lagon à l'aval du massif du Koniombo auraient plutôt diminué ces dernières années par rapport aux flux historiques sur une cinquantaine d'années. Il est intéressant de noter que ces seconds résultats rejoignent ceux obtenus sur l'évolution des concentrations en ETM dans les fractions dissoute et totale des eaux des rivières des bassins versants du massif du Koniombo et qui suggéraient une possible diminution de ces concentrations depuis la mise en exploitation du massif.

La sensibilité des résultats obtenus sur la comparaison des flux actuels et anciens d'ETM vers les sédiments du lagon souligne néanmoins la nécessité de bien déconvoluer le signal correspondant à une sédimentation réelle de celui correspondant à de la remise en suspension, avant de pouvoir conclure définitivement à une variation éventuelle des flux d'ETM dans le lagon en lien avec la mise en exploitation du massif du Koniombo. Un tel travail nécessite une analyse approfondie de l'influence des différents paramètres météorologiques (intensité et durée de la pluie, intensité, direction et durée du vent) qui sera conduite au-delà du cadre du projet *DYNAMINE*.

5. BIODISPONIBILITE DES ETM LE LONG DU CONTINUUM MASSIF - LAGON

Les données extraites de la base de données KNS montrent que les concentrations totales en Ni, Fe, Cr, Mn, Al, Co et As dans les eaux des rivières du massif du Koniombo sont supérieures aux concentrations dissoutes. Ceci indique que les particules d'origine minière transportées dans les cours d'eau constituent des réservoirs en ETM. Cependant, seul Cr présente une concentration significativement supérieure au bruit de fond géochimique, dans la fraction dissoute du bassin versant historiquement impacté.

De plus, l'évolution des concentrations en ETM dans les différentes fractions solides collectées le long du continuum massif – lagon souligne l'existence d'un gradient bien marqué (Figure 8).

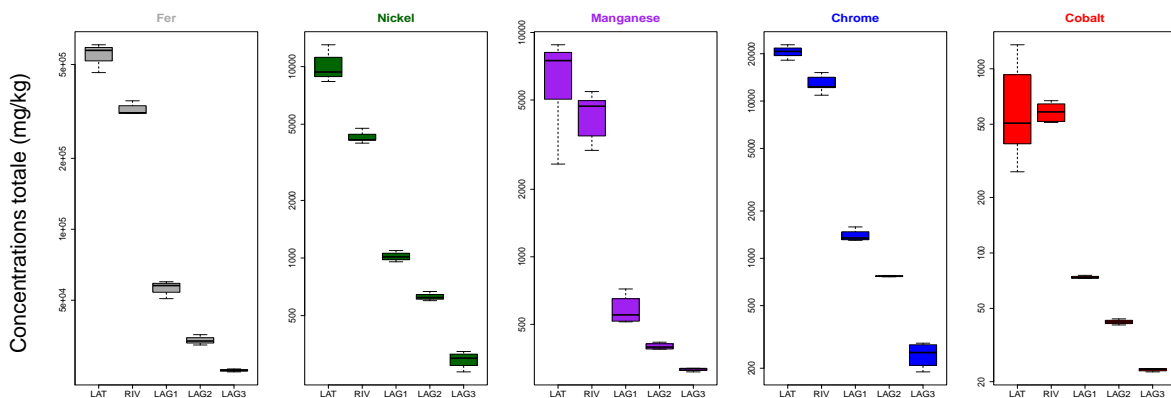


Figure 8. Comparaison des concentrations (mg/kg) en fer (Fe), nickel (Ni), manganèse (Mn), chrome (Cr) et cobalt (Co) mesurées dans les différentes fraction solides (LAT : latérites, RIV : sédiments/MES de rivière, LAG1 : sédiments lagunaires de fond, LAG2 : sédiments lagunaires en position intermédiaire, LAG3 : sédiments lagunaires proches des récifs coralliens) collectées le long du continuum massif – lagon à l'aval du massif du Koniombo. Les sédiments de rivière sont ceux collectés dans la rivière du bassin versant Coco. Les sédiments lagunaires sont ceux collectés dans la baie de Vavouto. Pour chaque élément, les boîtes délimitent les valeurs comprises entre le premier quartile (25% des valeurs inférieures) et le troisième quartile (75% des valeurs inférieures), la barre horizontale indique la valeur médiane (50% des valeurs inférieures) et les traits pointillés verticaux indiquent la gamme complète de valeurs mesurées.

Afin de comprendre la dynamique de solubilisation des ETM au cours du transport des sédiments/MES depuis le massif jusqu'au lagon, le comportement à la lixiviation de Ni, Fe, Mn et Co a donc été étudié dans les différentes fractions solides rencontrées le long de ce continuum.

L'approche utilisée s'appuyait sur des expériences réalisées avec (1) un extractant doux (CaCl_2) permettant d'estimer la fraction la plus réactive des ETM (généralement, celle qui est adsorbée à la surface des minéraux) et un complexant fort (Éthylène Diamine Tétra-Acétique ou EDTA) permettant d'estimer une fraction moins réactive des ETM (généralement celle qui est associée à la fraction organique ou à certains minéraux sensibles à la complexation tels que certains oxydes de Mn et/ ou de Fe). Les expériences avec l'EDTA ont été réalisées en conditions cinétiques de manière à accéder à la dynamique de libération des ETM en lien avec ce complexant et de pouvoir ainsi prédire leur solubilisation éventuelle dans le milieu en considérant un scénario très défavorable. Ces extractions cinétiques à l'EDTA ont ainsi permis de quantifier trois fractions : la fraction rapidement solubilisée (F_1), la fraction plus lentement solubilisée (F_2) et la fraction non solubilisée (F_3) (non biodisponible). La fraction totale mobilisable ou biodisponible correspond à la somme (F_1+F_2).

I. BIODISPONIBILITE DES ETM DANS LES SEDIMENTS/MES DES RIVIERES DU MASSIF DU KONIAMBO

Pour ce premier volet, les échantillons analysés correspondent à des sols latéritiques prélevés sur le site minier du massif du Koniombo (KNS 1, 3, 4, 6, 10) et des sédiments d'origine latéritique, transportés dans la rivière Taléa-Coco après le débordement d'un décanteur et dont le temps de séjour dans la rivière est d'environ 8 mois.

Les lixiviations au CaCl_2 ont montré que moins de 0,14% du réservoir en Ni, Co et Mn est solubilisé avec des teneurs en ETM facilement mobilisables variant de 0,009 à 4,9 mg/kg. Les échantillons Taléa et Coco ayant séjourné dans le milieu naturel pendant 8 mois présentent des concentrations en Mn échangeable plus élevées, suggérant une réduction partielle des oxydes de manganèse en condition d'immersion. Fe et Al ne sont pas été détectés dans les solutions d'extraction CaCl_2 . Les très faibles concentrations en ETM facilement mobilisables expliqueraient qu'ils n'apparaissent pas comme marqueurs de l'activité minière dans la fraction dissoute.

Les résultats des extractions cinétiques à l'EDTA obtenus pour Ni, Co, Mn et Fe montrent que la fraction non biodisponible (F_3) est toujours supérieure à 65% ce qui signifie que ces ETM sont majoritairement non biodisponibles à plus ou moins long terme (Figure 9). De plus, la fraction lentement biodisponible (F_2) apparaît plus importante que la fraction rapidement biodisponible (F_1). Ce résultat indique que la faible fraction de Mn, Co, Ni et Fe biodisponible ne l'est que sur le long terme (cinétique lente de solubilisation). Il est donc probable que la faible fraction de ces ETM rapidement solubilisables ne compense pas l'effet de dilution lors des crues, ce qui confirmerait le fait qu'ils n'apparaissent pas comme des marqueurs de l'activité minière dans la fraction dissoute.

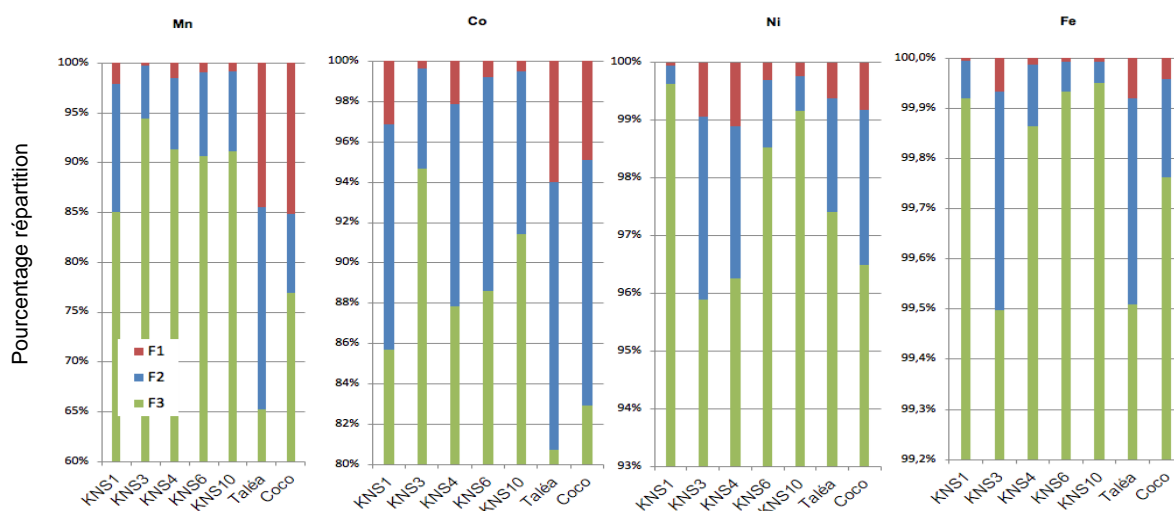


Figure 9. Distribution du Mn, Co, Ni et Fe dans les fractions F_1 (rapidement biodisponible, en rouge), F_2 (lentement biodisponible, en bleu) et F_3 (inerte donc non biodisponible, en vert) des sols latéritiques du massif du Koniombo (terme source) et des sédiments/MES des rivières Taléa et Coco.

Pour Mn (et dans une moindre mesure Co), la fraction biodisponible (F_1+F_2) apparaît plus importante dans les échantillons de MES/sédiments des rivières Taléa et Coco (Figure 9). Ces résultats suggèrent que le séjour dans le décanteur et dans le milieu naturel, qui engendre des périodes d'anoxie donc réductrices plus ou moins importantes, aurait altéré de manière significative ces échantillons par réduction partielle des oxydes de manganèse. Le comportement à la lixiviation de Mn et Co aurait donc été significativement modifié après stagnation dans le décanteur et libération dans le milieu naturel.

Du fait des concentrations élevées en Mn, Co, Ni et Fe dans les sols latéritiques, les concentrations biodisponibles ($F_1 + F_2$) peuvent être élevées (de 36 à 833 mg/kg pour Ni, de 31 à 137 mg/kg pour Co, de 135 à 1287 mg/kg pour Mn et de 183 à 658 mg/kg pour Fe). Ainsi, en dépit de faibles fractions biodisponibles, les sédiments/MES des massifs latéritiques représentent un réservoir important d'ETM potentiellement mobilisables à long terme, ce qui indique un risque environnemental réel.

II. BIODISPONIBILITE DES ETM DANS LES SEDIMENTS DU LAGON A L'AVAL DU MASSIF DU KONIAMBO

Pour ce second volet, les échantillons analysés correspondent aux sédiments prélevés le long d'un gradient côte-récif dans la baie de Vavouto (VE2, WR2, LG2B) à l'aval du massif du Koniambo (Figure 1).

Comme pour les échantillons de latérite et de sédiments de rivières, les lixiviations au CaCl_2 indiquent que la fraction d'ETM facilement mobilisable est négligeable ($< 0,05\%$) dans les sédiments du lagon.

Les résultats des extractions cinétiques à l'EDTA montrent que la fraction non biodisponible (F_3) pour Ni, Co, Mn et Fe est toujours supérieure à 70% (Figure 10), ce qui signifie que ces métaux sont majoritairement non biodisponibles à plus ou moins long terme dans ces sédiments du lagon. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus sur les échantillons de latérites et de sédiments de rivières (Figure 9).

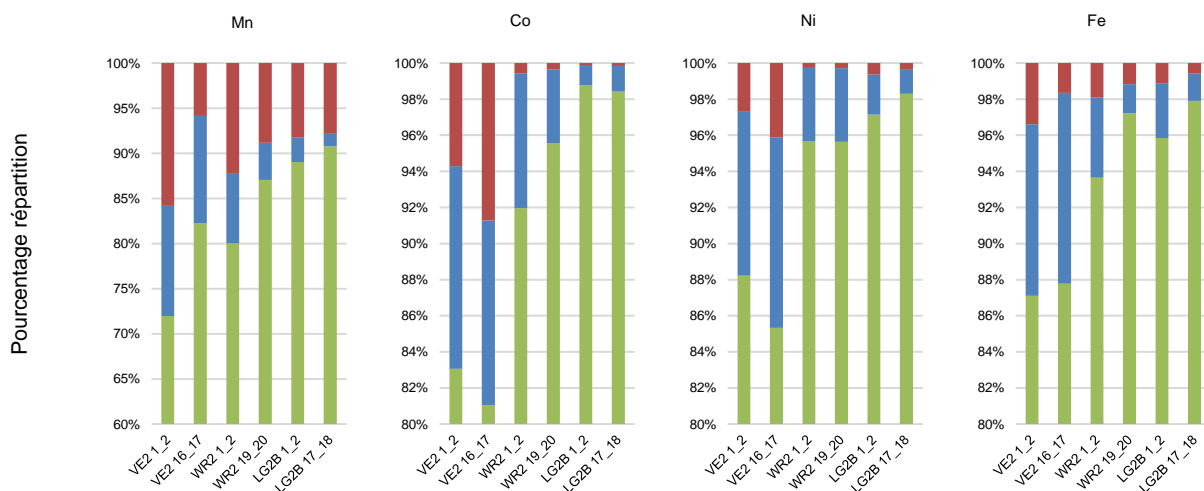


Figure 10. Distribution du Mn, Co, Ni et Fe dans les fractions F_1 (rapidement biodisponible, en rouge), F_2 (lentement biodisponible, en bleu) et F_3 (inerte donc non biodisponible, en vert) dans les sédiments de la baie de Vavouto.

De plus, les résultats des extractions cinétiques à l'EDTA sur les sédiments du lagon indiquent une différence de biodisponibilité entre les métaux (Figure 10): Mn est l'élément le plus biodisponible (jusqu'à 30% de la fraction totale), suivi de Fe (jusqu'à 13,5% de la fraction totale), puis de Co (jusqu'à 10% de la fraction totale), de Ni (jusqu'à 5% de la fraction totale) et de Cr (pas plus de 1% de la fraction totale). Ces résultats suggèrent que le transfert potentiel des métaux depuis la fraction solide vers l'eau porale des sédiments du lagon peut être considéré comme faible pour Ni et Cr, limité pour Co et Fe et significatif pour Mn. Comme pour les sédiments de rivière ayant séjourné dans le décanteur, ces résultats s'expliquent par les conditions anoxiques qui se développent au cours de la diagenèse dans les sédiments du lagon et qui favorisent la dissolution reductive des oxydes de fer et manganèse.

Du fait de concentrations encore relativement élevées (Figure 8), les concentrations extraites des sédiments du lagon peuvent être significatives (la fraction F₃ varie de 5 à 130 mg/kg pour Ni, de 30 à 140 mg/kg pour Mn et de 500 à 6500 mg/kg pour Fe). Pour Co, cette fraction est plus faible (inférieure à 10 mg/kg). Ceci soulève la question d'un risque éventuel pour la biodiversité lagonaire.

Cependant, cette question concerne principalement les sédiments proches de la côte, car les résultats des extractions cinétiques à l'EDTA indiquent l'existence d'un gradient décroissant de biodisponibilité des métaux depuis la côte jusqu'au récif-barrière (Figure 10). L'interface rivière/lagon semble donc constituer un écosystème clef dans la compréhension des cycles biogéochimiques des ETM et dans l'évaluation de leurs impacts potentiels sur la biodiversité à l'aval des massifs miniers en Nouvelle-Calédonie.

5. DYNAMIQUE DES SEDIMENTS/MES A L'INTERFACE RIVIERE/LAGON A L'AVAL DU MASSIF DU KONIAMBO

A l'exception de Mn pour lequel les incertitudes ne permettent pas de conclure, les concentrations des ETM dans les eaux des rivières Confiance, Pandanus et Coco filtrées à 0,45 µm sont systématiquement plus élevées que celles mesurées dans les mêmes eaux filtrées à 0,20 µm. Ces résultats indiquent que les fractions des eaux de rivières classiquement considérées comme dissoute car filtrées à 0,45 µm sont en fait susceptibles de contenir une fraction plus ou moins importante d'ETM sous forme colloïdale.

Cette présence d'ETM sous forme colloïdale suggère que leur dynamique au travers du gradient de salinité caractéristique de l'interface rivière – lagon est susceptible d'être fortement contrôlée par des phénomènes d'aggrégation-floculation.

Le suivi en laboratoire du comportement rhéologique de suspensions de sédiments/MES des rivières Coco et Tivoli indique une diminution de la résistance à la contrainte avec l'augmentation de la salinité pour les sédiments des rivières Coco et Tivoli. Ceci correspond à un comportement classique d'agrégation de particules (floculation). En revanche, le résultat inverse est obtenu pour les sédiments de la rivière Pandanus. Cette différence pourrait s'expliquer par la nature des sédiments des rivières Coco et Pandanus. En effet, les analyses et observations minéralogiques réalisées sur ces échantillons suggèrent une fraction plus importante d'oxydes de fer de type goethite (FeOOH) ou hématite (Fe₂O₃) dans les sédiments de la rivière Coco et une proportion plus importante de phyllosilicates de type talc (Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂) ou serpentine ((Mg₃Si₂O₅(OH)₄) dans ceux de la rivière Pandanus.

Ces résultats soulignent l'importance de la nature minéralogique des sédiments/MES sur leur comportement à l'interface rivières (eau douce) / lagon (eau salée) à l'aval du massif du Koniambo. Ils indiquent également que ce paramètre peut varier d'un bassin versant à l'autre.

Le comportement hydrodynamique des sédiments/MES lors de leur arrivée dans le lagon à l'aval du massif du Koniambo pourrait donc être spécifique de chaque bassin versant considéré.

Une des possibilités explorées par le projet *DYNAMINE* pour tenter de visualiser ce type de contraste de comportement des sédiments/MES à l'interface rivière / lagon entre différents bassins versants était l'utilisation d'images satellites. Il s'agissait notamment de savoir si ces images enregistrées à haute fréquence (journalière, voire pluri journalière) par des satellites à larges champs (SeaWiFS, MERIS, MODIS...) représentent des outils adaptés pour estimer la distribution spatio-temporelle de la turbidité à l'échelle du lagon de la Nouvelle-Calédonie. Cette approche a donc été testée sur la zone Voh-Koné-Pouembout (VKP) à l'aval du massif du Koniambo à l'aide d'images satellites MODIS et en s'appuyant sur la base de données de valeurs *in situ* de turbidité (mesures CTD) établie durant plusieurs années par le laboratoire Analytical Environmental Laboratory (AEL) dans le cadre de différents suivis environnementaux réalisés pour la société KNS.

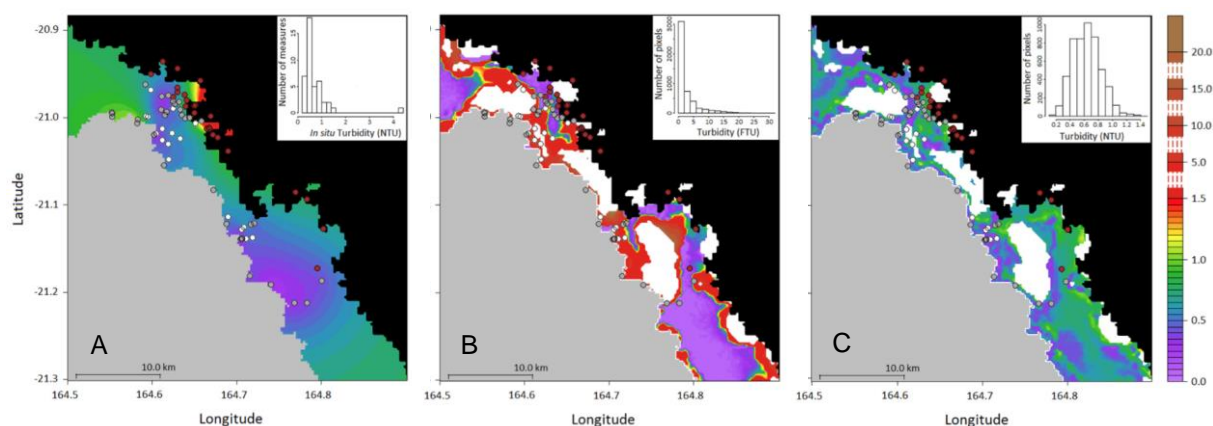


Figure 11. Turbidité dans le lagon de Koné le 24 juin 2014. A. Turbidité mesurée *in situ*. B. Turbidité estimée à l'aide de l'ancien modèle. C. Turbidité estimée à l'aide du modèle développé dans le cadre du projet *DYNAMINE*.

Le travail réalisé a permis de converger vers une modélisation optimale qui intègre à la fois des paramètres optiques (couleur de l'eau, rétrodiffusion) et des paramètres géomorphologiques (bathymétrie, couleur des fonds), et des essais de cartographie de la turbidité estimée à l'échelle du lagon de Koné ont pu être réalisés. Un exemple de cette modélisation à partir des données satellites collectées le 24 juin 2014 est présenté en Figure 11. Sur cette figure, il est intéressant de noter que l'approche par modélisation SVR développée dans le cadre du projet *DYNAMINE* améliore significativement la qualité des turbidités estimées par rapport aux modèles précédents pour les zones peu profondes. Cette différence est essentiellement dû au fait que la modélisation SVR intègre la bathymétrie et la couleur des fonds, ce que ne faisait pas les modèles précédents.

Compte tenu de cette amélioration apportée par l'intégration de la couleur des fonds dans la modélisation SVR, mais de l'absence de cartographie des fonds lagunaires en Nouvelle-Calédonie, un travail supplémentaire a été réalisé sur une image satellite Sentinel-2 correspondant à une situation sans turbidité dans le but de générer une cartographie des fonds dans la zone VKP du lagon. Ce travail a permis d'établir une cartographie des fonds lagunaires sur la zone VKP qui distingue 5 groupes de fonds et présente une très grande similitude avec l'image satellite. Cette cartographie des fonds sur la zone VKP du lagon sera utilisée prochainement pour le modèle SVR qui indiquait que l'ajout de la couleur des fonds était censé améliorer la modélisation. Elle sera également utilisée pour modéliser la distribution de la chlorophylle-*a*.

Les images satellite devraient ainsi pouvoir être utilisées pour estimer la variabilité spatio-temporelle de la turbidité et de la chlorophylle-*a* à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie dans le but d'améliorer notre compréhension des liens possibles entre ces deux paramètres.

6. IMPACTS DES ETM SUR LES ECOSYSTEMES CORALLIENS

La spéciation de Fe, Ni, Mn et Cr dans les sédiments du lagon de la zone d'étude a été analysée par spectroscopie d'absorption de rayons X sur rayonnement synchrotron.

Les résultats obtenus pour Fe et Ni indiquent une spéciation similaire dans les différents sédiments étudiés, avec une contribution sensiblement équivalente des (oxyhydr)oxydes de fer de type goethite et des minéraux argileux. Ces résultats soulignent également la faible contribution de la pyrite (FeS_2) à la spéciation de ces ETM. Cette faible contribution s'expliquerait par la présence significative de Fe sous forme d'oxyhydroxydes de fer qui favoriseraient la ré-oxydation des formes réduites du soufre (H_2S et HS^-) produites par l'activité bactérienne, au travers de réactions dites de sulfuration des oxyhydroxydes de fer. Les conditions météorologiques favorisant la remise en suspension épisodique des horizons de surface des sédiments contribueraient également à la ré-oxydation plus ou moins forte des sulfures de fer formés précédemment. L'ensemble de ces résultats suggère que les sédiments du lagon de Nouvelle-Calédonie à l'aval des massifs ultrabasiques constitueraient un environnement plutôt favorable au piégeage de Fe et Ni par les minéraux argileux, plutôt que par les sulfures de fer.

Ce dernier point semble pouvoir être étendu à Cr et Mn qui présentent une spéciation qui dépend de l'éloignement à la côte. Le chrome est majoritairement présent sous forme de chromite (FeCr_2O_4) dans les sédiments localisés près de la côte, puis de goethite dans les sédiments localisés près du récif-barrière. Une partie non négligeable de Cr est également incorporée dans des argiles, avec une contribution sensiblement constante de la côte vers le récif-barrière. Le manganèse est quant à lui majoritairement incorporé dans des argiles dans les sédiments localisés près de la côte, mais cette contribution diminue le long du gradient de contamination au profit des carbonates qui représentent environ 50% de la spéciation de Mn près du récif-barrière. Cette évolution le long du gradient de contamination souligne un changement progressif de sources pour Mn, depuis une source continentale près de la côte vers une source marine près du récif-barrière.

L'absence de Mn sous forme d'oxydes de manganèse dans les sédiments de la zone d'étude est considérée comme la principale explication de la présence de Cr uniquement sous sa forme réduite (Cr(III)) dans ces sédiments. En dépit de concentrations totales en Cr significatives, les sédiments du lagon de Nouvelle-Calédonie à l'aval des massifs ultrabasiques ne représenteraient donc pas un risque significatif pour la biodiversité lagunaire. Cependant, la possible dissolution partielle de la chromite lors du transport des sédiments/MES le long du gradient côte-récif soulève la question d'une éventuelle remise en solution d'une partie de Cr au cours d'un tel mécanisme. Ce dernier point souligne la nécessité de mieux évaluer la stabilité de la chromite dans le contexte lagunaire de Nouvelle-Calédonie et de quantifier les flux qui pourraient être associés à une possible dissolution partielle de ce minéral au cours de son transport depuis la côte jusqu'au récif.

Pour finir, la comparaison des résultats de spéciation des ETM et des fractions labiles et moins labiles quantifiées à l'aide des extractions cinétiques à l'EDTA permet de mettre en évidence certaines relations. Dans le cas de Fe, Ni et Cr, cette comparaison indique en effet une anti-corrélation entre les fractions plus ou moins labiles et les fractions présentes sous forme d'oxyhydroxydes de fer. Dans le cas de Mn, une anti-corrélation est observée entre la fraction moins labile et celle sous forme de carbonates.

Ces derniers résultats suggèrent que le piégeage de Fe, Ni et Cr sous forme d'oxyhydroxydes de fer, et de Mn sous forme de carbonates, diminue la biodisponibilité de ces ETM. Ces différentes spéciation constitueraient ainsi les formes les plus stables de ces ETM dans les sédiments du lagon de Nouvelle-Calédonie à l'aval des massifs ultrabasiques.

7. IMPACTS DES ETM SUR LES ECOSYSTEMES CORALLIENS

L'objectif de ce volet du projet *DYNAMINE* était d'évaluer les impacts potentiels des apports détritiques en lien avec l'activité minière sur la dynamique des écosystèmes coralliens dans le but de guider les actions de gestion et de conservation à mettre en œuvre pour maintenir l'intégrité de ces écosystèmes coralliens, et les services écosystémiques associés, lorsqu'ils sont localisés à l'aval des massifs miniers en Nouvelle-Calédonie.

Cet objectif a été visé au travers d'une approche déclinée en deux étapes. La première étape consistait en un suivi *on site* de l'impact des ETM caractéristiques des baies à l'aval du massif du Koniambo sur la physiologie des colonies coralliennes par une étude sur le long terme sur 3 sites considérés comme représentatifs des différents contextes sédimentaires. La seconde étape consistait en une étude en laboratoire des effets combinés de la température et de certains ETM (Ni, Co et Mn) sur la physiologie des coraux.

I. SUIVI DE LA PHYSIOLOGIE DES CORAUX APRES TRANSPLANTATION DE COLONIES CORALLIENNES

L'expérience de transplantation des colonies coralliennes s'est déroulée en 2016 sur 3 stations censées représenter un gradient d'exposition aux apports détritiques du massif du Koniambo (St1, St2 et St3 ; Figure 1). Initialement, le suivi devait concerner 3 espèces de coraux scléactiniaires constructeurs de récifs (*Acropora muricata*, *Montipora stellata* et *Stylophora pistillata*), mais les contraintes et difficultés inhérentes à ce type d'opération ont réduit le suivi à la seule espèce *Montipora stellata*.

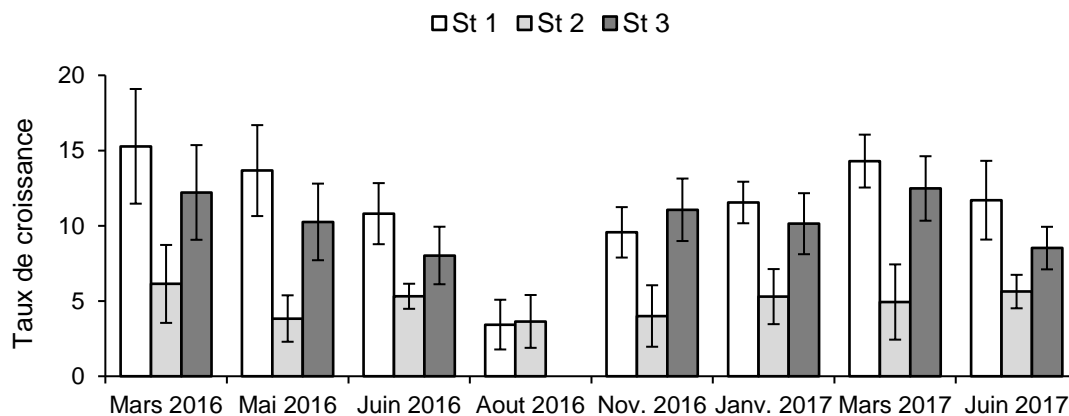


Figure 12. Taux de croissance ($\text{mg g}^{-1} \text{j}^{-1}$) de *Montipora stellata* à chacune des stations sur les 18 mois de transplantation.

Le suivi de l'activité physiologique des coraux a été réalisé au travers de la mesure de leur vitesse de croissance ($\text{mg g}^{-1} \text{j}^{-1}$). Les résultats obtenus indiquent que les colonies de la station 1 possèdent de meilleurs taux de croissance (Figure 12) et une efficacité photosynthétique accrue en comparaison des coraux des deux autres stations, et ceci quelle que soit la saison. Alors que l'on pourrait potentiellement attribuer ces résultats à une concentration accrue en ETM, les colonies de la station 2 présentent les métabolismes les moins performants malgré des concentrations en ETM plus élevées qu'à la station 3. Les observations réalisées lors des différentes missions laissent penser que cette station 2 serait plus chargée en matières en suspension que les autres, ce qui limiterait l'accès des coraux à la lumière et engendrerait des coûts métaboliques supplémentaires.

Une analyse détaillée des données physico-chimiques disponibles sur les eaux du lagon à l'aval du massif du Koniambo permettra de confirmer cette hypothèse ou de mettre en évidence l'influence éventuelle d'un facteur tiers.

L'hiver austral 2016 semble également avoir été marqué par un évènement particulier qui a durement impacté les stations 1 et 2. En effet, l'efficacité photosynthétique des colonies des deux stations, ainsi que les taux de croissance des coraux de la station 1 ont fortement diminués. Encore une fois, l'analyse détaillée des données physico-chimiques disponibles devrait permettre d'identifier la cause de ce stress intense. Les pistes envisagées sont une chute brutale de la salinité ou une augmentation brutale de la turbidité, ces deux évènements étant en lien avec une pluviométrie excessive.

II. EXPERIENCES EN LABORATOIRE SUR L'EFFET COMBINE DES ETM ET DE LA TEMPERATURE SUR LA PHYSIOLOGIE DES CORAUX

En parallèle du suivi des transplantations coralliennes, plusieurs expériences en aquarium ont été réalisées afin d'étudier les effets croisés du réchauffement des océans et de l'augmentation des teneurs en ETM (Ni, Fe et Mn) sur plusieurs espèces de coraux parmi les plus représentatives du lagon calédonien (*Stylophora pistillata*, *Acropora muricata*, *Pocillopora muricata*). Pour ces expériences en laboratoire, les boutures ont été soumises à différentes concentrations en ETM pour deux régimes de températures (température ambiante et réchauffement progressif jusqu'à 31-32°C).

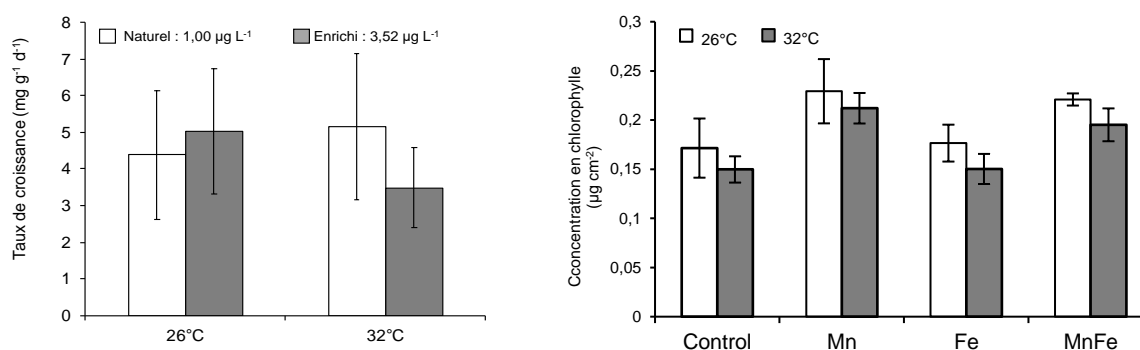


Figure 13. (Gauche) Taux de croissance de boutures d'*Acropora muricata* exposées pendant 6 semaines à 26 ou 32°C à des concentrations normales (1,00 µg L⁻¹) ou enrichies en Ni (3,52 µg L⁻¹). (Droite) Concentration en chlorophylle totale de boutures de *Stylophora pistillata* (moy ± SD, n = 3) exposées pendant 6 semaines à 26 ou 32°C à des concentrations normales en Mn et Fe (0,06 et 0,22 µg L⁻¹) (Control) ou à des concentrations plus élevées (4,1 µg L⁻¹ pour Mn et 3,0 µg L⁻¹ Fe).

Plusieurs résultats intéressants ont été obtenus dans le cadre de ces expériences. Il a tout d'abord été mis en évidence qu'à température ambiante, un apport en Ni stimule de 27 à 47% les taux de calcification des coraux. En revanche, lors d'un stress de température, cet apport en Ni amplifie les effets négatifs du réchauffement des eaux en diminuant jusqu'à 37% la croissance de ces mêmes coraux (Figure 13). Suite à ces résultats, une deuxième expérience a permis de montrer qu'un apport en Ni stimule plus spécifiquement l'activité de l'enzyme uréase, dont les produits formés (l'ammonium et le carbone inorganique), favorisent le processus de calcification des coraux.

Enfin, les résultats des expériences en laboratoire ont révélé qu'un apport modéré en Mn (concentrations équivalentes à celles mesurées le long des côtes de Nouvelle-Calédonie) joue un rôle clef dans le métabolisme des coraux. Cet ETM leur donne en effet une meilleure résistance au blanchissement en leur permettant de conserver leurs algues symbiotiques et leurs teneurs en chlorophylles (Figure 13).

Les différents résultats ainsi obtenus suggèrent donc une influence des ETM sur la physiologie des écosystèmes coralliens plus complexe qu'initialement envisagée, avec des effets positifs de certains ETM sous certaines conditions environnementales et une inversion de ces effets lorsque les conditions environnementales changent. À ce titre, la température apparaît comme un paramètre très important qui semble ne pas seulement jouer un rôle direct sur la physiologie des coraux (phénomène de blanchissement lorsque la température de l'eau augmente), mais également exercer un rôle indirect en exacerbant ou en inversant les effets des ETM.

7. CONCLUSIONS

Les résultats obtenus dans le cadre du projet *DYNAMINE* permettent de proposer des bilans quantitatifs des flux d'ETM, de décrire et caractériser certains des processus hydro-biogéochimiques qui contrôlent ces flux le long du continuum massif-lagon, mais également au cours de la diagenèse précoce des sédiments du lagon, et d'établir une première évaluation des impacts potentiels des ETM sur les écosystèmes coralliens.

Ils contribuent ainsi à améliorer notre compréhension des effets du forçage anthropique lié à l'activité minière sur les flux et cycles biogéochimiques des ETM le long de ce continuum, ainsi que sur leurs impacts éventuels sur la biodiversité au sein du littoral calédonien.

Ces résultats se veulent complémentaires de ceux obtenus dans le cadre du projet *METEXPO* (*Niveaux d'imprégnation et déterminants de l'exposition humaine aux métaux*) qui ambitionnait d'évaluer l'imprégnation de la population par les ETM classiquement rencontrés en Nouvelle-Calédonie et potentiellement toxiques (Cr, Ni, Co, Mn), et du projet *DMML* (*Dispersion des métaux de la mine au lagon*) qui proposait de tracer la dispersion par voie atmosphérique de ces mêmes ETM autour du massif minier ultrabasique du Koniambo, tout en intégrant un volet relatif à l'évaluation de leur écotoxicité vis-à-vis de la biodiversité aquatique dans les rivières des massifs ultrabasiques.



PROJET METEXPO

Niveau d'imprégnation et déterminants de l'exposition humaine aux métaux



SYNTHESE

Synthèse des résultats
du programme **METEXPO**
Niveaux d'imprégnation et déterminants
de l'exposition humaine aux métaux en
Nouvelle-Calédonie



Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par
le CNRT « Nickel & son environnement »

CNRT
NICKEL
& son environnement

Instituts
thématiques

Inserm

Institut national
de la santé et de la recherche médicale



CENTRE HOSPITALIER TERRITORIAL
GASTON-BOURRET
NOUVELLE-CALÉDONIE

CHU
de Québec
Université Laval

bioeko
CONSULTANTS

Pour le consortium **METEXPO** Niveaux d'imprégnation et déterminants de l'exposition humaine aux métaux en Nouvelle-Calédonie

AUTEURS :

Sylvaine CORDIER (INSERM, Rennes, France)

Yann BARGUIL (CHT, Nouméa, Nouvelle-Calédonie)

Yannick DOMINIQUE (Société Bioeko, Nouméa, Nouvelle-Calédonie)

Audray ST-JEAN (Centre de recherche du CHU de Québec-Université Laval, Québec, Canada)

Stéphane MENGANT (CHT, Nouméa, Nouvelle-Calédonie)

Barbara LE BOT (INSERM 1085, Rennes, France)

Pierre AYOTTE (Centre de recherche du CHU de Québec-Université Laval, Québec, Canada)

Synthèse issue du rapport scientifique final, coordonné par Dr Sylvaine CORDIER (INSERM 1085, Rennes, France)

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET *METEXPO*

Contexte

Environ un tiers de la superficie de la Nouvelle-Calédonie est recouverte de formations géologiques riches en métaux d'intérêt tels que le nickel (Ni) et le cobalt (Co), mais également le chrome (Cr) et le manganèse (Mn).

La présence de ces formations constitue une source potentielle d'exposition des populations calédoniennes à ces éléments traces métalliques (ETM), notamment à proximité des zones où le couvert végétal est dégradé voire absent.

Au droit de ces zones, les processus d'érosion chimique et mécanique sont particulièrement actifs et conduisent à la libération des ETM qui sont ensuite dispersés dans l'environnement par voie aérienne (vent) ou par les écoulements d'eau de surface.

Ces ETM sont donc susceptibles de se retrouver dans :

- l'eau des creeks et rivières, contaminant les captages d'eau destinée à la consommation humaine, mais également certains produits de la pêche (crevettes de creek et poissons),
- l'eau du lagon contaminant les produits de la pêche lagonaire (coquillages, poissons et crustacés),
- les sols alluvionnaires cultivés contaminant les cultures qui y sont produites,
- les poussières qui se déposent dans les habitations ou à proximité susceptibles d'être inhalées ou avalées.

Toutes ces voies sont susceptibles de contribuer à l'exposition à ces ETM des populations calédoniennes. Et ce d'autant plus que l'intégrité du couvert végétal des massifs ultramafiques calédoniens subit depuis plusieurs décennies différents types de pressions qui contribuent à sa dégradation. Les trois principales pressions à l'origine de ces dégradations sont les feux de brousse, les ongulés envahissants (cerfs et cochons sauvages), ainsi que l'activité minière. Cette dernière pression, outre le fait qu'elle participe à l'accentuation des processus d'érosion, est également susceptible d'amplifier les émissions aériennes de poussières chargées en ETM via les travaux d'excavation, le roulage des engins miniers, les activités de concassage et criblage effectuées sur site ou au travers les émissions atmosphériques des usines métallurgiques.

A ce jour aucune étude n'avait été menée pour évaluer le risque potentiel d'exposition des populations calédoniennes aux ETM. Il n'existe a priori aucune donnée quant aux niveaux d'imprégnation de la population générale néo-calédonienne à ces quatre métaux.

OBJECTIF

Le programme METEXPO avait comme objectif d'évaluer l'exposition aux quatre métaux d'intérêt (nickel, chrome, cobalt et manganèse) à travers le pays, de décrire les principaux déterminants et sources de cette exposition.

Une étude a donc été réalisée avec les objectifs généraux suivants :

- 1) Évaluer l'exposition de la population néo-calédonienne aux quatre métaux cibles (nickel, chrome, cobalt et manganèse).
- 2) Évaluer l'existence d'une surexposition à ces ETM des populations vivant au sein des régions ultramaïques du territoire.
- 3) Évaluer l'influence des exploitations minières sur ces niveaux d'exposition.

À travers les réponses apportées à ces 3 objectifs généraux cette étude s'est également attachée à répondre aux questions suivantes :

- Comment ces concentrations se comparent-elles à celles mesurées en métropole et ailleurs dans le monde et ce selon les groupes d'âge et les localités ?
- Quelles sont les sources et voies d'exposition les plus importantes ?

Cette étude dite biosurveillance a été organisée en deux étapes : d'abord une étude d'exposition à l'échelle du territoire, puis une étude des déterminants environnementaux des concentrations urinaires dans des zones ateliers en milieu ultramaïque.

La première phase consistait à obtenir une « photographie » du niveau d'exposition de la population générale de la Nouvelle-Calédonie au nickel, chrome, cobalt et manganèse.

La deuxième phase visait à identifier les principales sources de contamination de la population générale vivant dans des zones sur sites ultramaïques avec ou sans activité minière à proximité.

2. LES DIFFERENTES PHASES

PHASE 1 : NIVEAU D'EXPOSITION DE LA POPULATION GÉNÉRALE DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE

Les participants ont été recrutés parmi les consultants (âgés de 3 ans ou plus) de 20 centres de santé en région et, à Nouméa, dans les hôpitaux de Nouméa, Gaston Bourret (urgences) et Magenta (consultation pédiatrie), selon des quotas par âge et par région (Nord-Ouest, Nord-Est, Sud-Est, Sud-Ouest, Nouméa et Îles Loyauté). Au total 732 personnes ont été incluses : 458 adultes, 121 adolescents (10-17 ans) et 153 enfants (3-9 ans).

Centres de recrutement selon la zone géographique (Phase 1)

Zone géographique	Centre de recrutement
Nord-Ouest	Hôpital de Koumac (Poum/Koumac) Dispensaire de Voh Dispensaire de Koné Dispensaire de Poya et Népoui Dispensaire de Belep
Nord-Est	Dispensaire de Touho Dispensaire de Hienghène Dispensaire de Poindimié Dispensaire de Ponérihouen Dispensaire de Houaïlou Dispensaire de Kouaoua Dispensaire de Canala Dispensaire de Ouégoa
Sud-Est	Dispensaire de Yaté Dispensaire de l'Île des Pins Dispensaire de Thio
Sud-Ouest	Dispensaire de Bourail Dispensaire de La Foa CHT de Nouméa (Gaston Bourret et Magenta)
Îles Loyauté	Dispensaire de Wé et Chépénéhé

Les données ont été recueillies lors d'un entretien à l'aide d'un questionnaire informatisé : âge, sexe, communauté d'appartenance, niveau d'études, profession, poids, taille, habitudes de vie (consommation de tabac, origine de l'eau pour la cuisine et la boisson...) et lieu de résidence.

Un questionnaire alimentaire a permis de recueillir la fréquence de consommation habituelle de différents groupes d'aliments. Des urines ont été prélevées, congelées et expédiées pour analyse. Les concentrations urinaires de nickel, chrome, cobalt et manganèse permettant d'estimer l'exposition à ces métaux ont été mesurées par ICP-MS au laboratoire de l'Institut National de Santé Publique (INSPQ) de Québec.

Les concentrations urinaires moyennes (pondérées pour être représentatives de l'ensemble du territoire néo-calédonien) sont exprimées soit en concentrations volumiques ($\mu\text{g/L}$), soit rapportées à la créatinine urinaire ($\mu\text{g/g}$ créatinine) ce qui permet de tenir compte de la diurèse qui influe sur la quantité de métaux excrétée dans l'urine.

Les concentrations moyennes sont respectivement de 1,85 $\mu\text{g/g}$ de créatinine (2,68 $\mu\text{g/L}$) pour le nickel, 0,63 $\mu\text{g/g}$ de créatinine (0,91 $\mu\text{g/L}$) pour le chrome, 0,31 $\mu\text{g/g}$ de créatinine (0,46 $\mu\text{g/L}$) pour le cobalt et 0,10 $\mu\text{g/g}$ de créatinine (0,15 $\mu\text{g/L}$) pour le manganèse.

Principaux résultats obtenus dans la phase 1

On observe des variations des concentrations urinaires en métaux selon l'âge (souvent plus élevées chez les jeunes), le sexe (souvent plus élevées chez les femmes) ainsi que de fortes différences selon la zone géographique (figures 1 à 4).

Les concentrations urinaires de nickel et de cobalt sont plus élevées dans les centres situés sur sols ultramafiques. Les variations géographiques des concentrations urinaires de chrome et de manganèse ne semblent pas pouvoir être expliquées par les caractéristiques géologiques locales.

Les figures 1 à 4 illustrent les résultats obtenus pour ces quatre métaux dans l'ensemble des dispensaires autour de la Grande Terre et aux Iles Loyauté ayant participé au programme.

Comparaison aux valeurs internationales

La comparaison des niveaux observés en Nouvelle-Calédonie avec des valeurs de référence internationales (qui par définition ne sont *a priori* dépassées que par 5% des habitants de ces pays) établies dans des populations non soumises à des sources spécifiques d'exposition aux ETM, montre des dépassements en Nouvelle-Calédonie : pour le chrome surtout (47% des adultes et 90% des enfants dépassent ces valeurs de référence) et dans une moindre mesure pour le nickel (9% des adultes et 13% des enfants), le cobalt (4% des adultes et 15% des enfants) et le manganèse (3% des adultes et 9% des enfants).

D'importantes variations géographiques dans ces dépassements sont à noter :

Ce sont dans les centres du Nord-Est (Kouaoua, Houaïlou, Hienghène, Touho) que les pourcentages de dépassement en chrome sont les plus élevés.

L'île des Pins et Bélep sont les centres de recrutement où la proportion la plus élevée de dépassement en nickel est observée, à Bélep pour le cobalt et à Ouégoa pour le manganèse.

Ces dépassements mettent en évidence une exposition aux métaux plus élevée en Nouvelle-Calédonie que dans d'autres régions du monde, mais ne signifient pas nécessairement l'existence d'un risque sanitaire associé.



Figure

1 : Distribution des concentrations urinaires de nickel dans la population néo-calédonienne, 2016

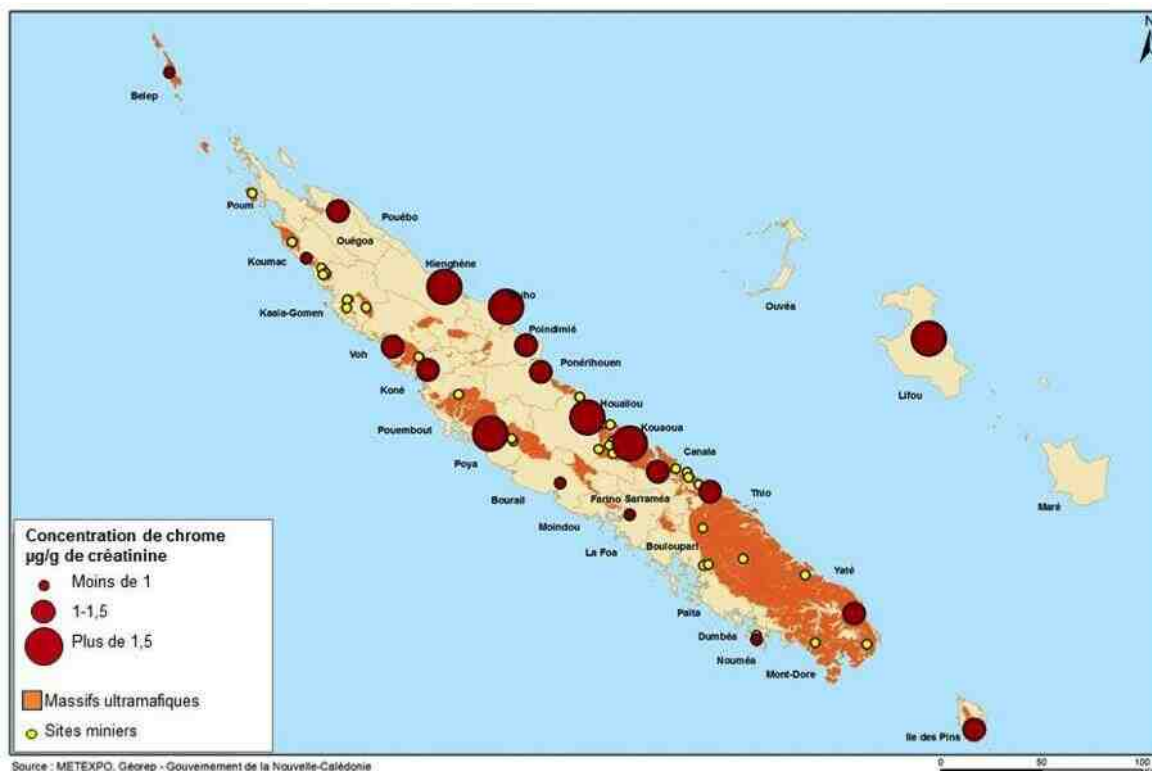


Figure 2 : Distribution des concentrations urinaires de **chrome** dans la population néo-calédonienne, 2016



Figure 3 : Distribution des concentrations urinaires de **cobalt** dans la population néo-calédonienne, 2016

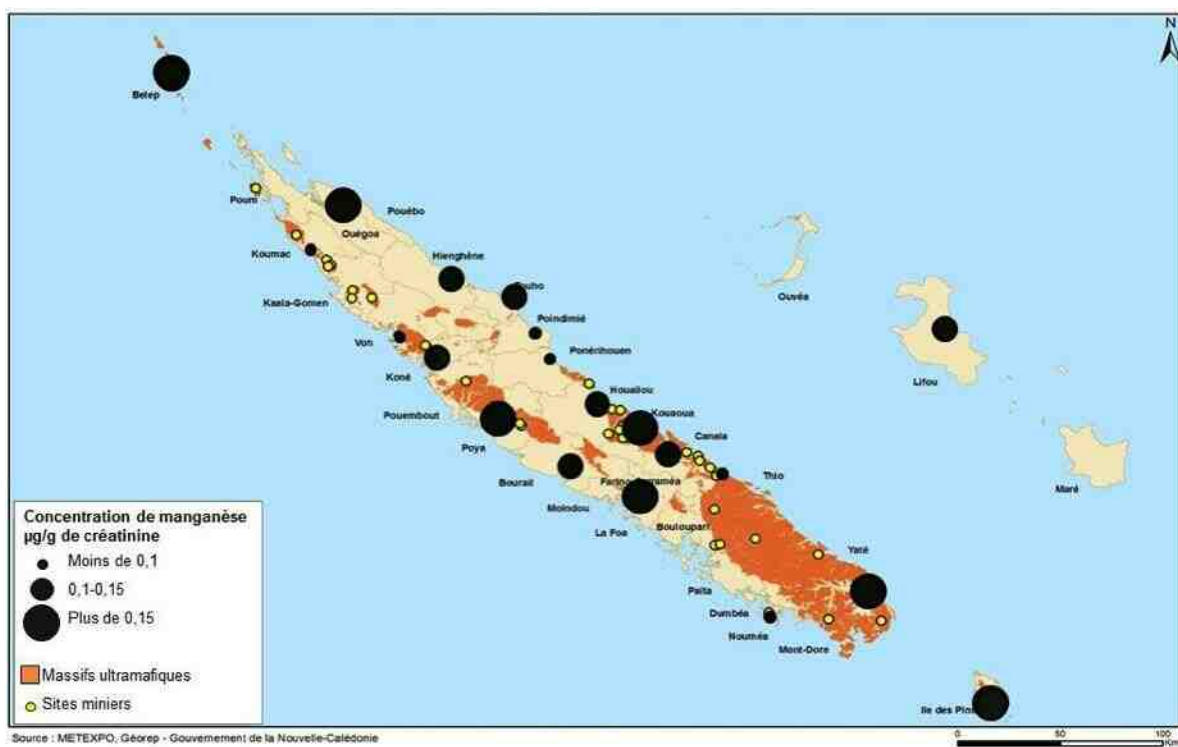


Figure 4 : Distribution des concentrations urinaires de **manganèse** dans la population néo-calédonienne, 2016

PHASE 2 : PRINCIPALES SOURCES DE CONTAMINATION DE LA POPULATION

La phase 2 avait pour but de rechercher les principales sources d'exposition aux ETM dans deux sites ateliers sur sol ultramafique avec ou sans activité minière :

- 1) **Voh (Voh/Oundjo/Tieta)** : site exposé, localisé au sein de la zone d'influence du site minier ;
- 2) **Île des Pins** : site témoin, site sur massif ultramafique localisé hors influence d'un site minier ancien ou en activité.

Trente familles à Voh (10 à Voh Village, 10 à Oundjo et 10 à Tieta) et 16 à l'Île des Pins ont été choisies.

Dans chaque maison, les informations suivantes ont été recueillies auprès d'un adulte y habitant : les caractéristiques du logement et l'existence d'un jardin, l'origine de l'eau, le nombre d'adultes et d'enfants y vivant, les consommations alimentaires de la semaine précédente.

Des prélèvements d'urines des personnes présentes ainsi que des prélèvements dans l'environnement (sol, poussières, et mesure d'empoussièrement) ont été effectués. Des aliments ont été recueillis à Voh et à l'Île des Pins (marché, jardins) pour analyse. Les résultats des mesures de surveillance des réseaux de distribution d'eau effectuées au cours de cette période par la DASS-NC ont été collectés.

Principaux résultats obtenus dans la phase 2

On constate que les médianes des concentrations urinaires mesurées dans la phase 2 en novembre-décembre 2016 sont environ deux fois plus élevées que ce qu'elles étaient au début de l'année 2016 (lors de la phase 1) : à Voh : 1,2 µg/g en mars vs 3,1 en novembre ; à l'Île des Pins : 3,7 µg/g en février vs 6,1 en novembre, ce qui suggère **une variation saisonnière de l'exposition**.

On remarque également que malgré la proximité d'un site minier en activité, les familles incluses à Voh/O/T ont des concentrations urinaires de nickel beaucoup plus faibles que celles des familles de l'Île des Pins. Tous les milieux échantillonnés (sols, poussières, aliments) ainsi que les ressources en eau présentent des teneurs en nickel très supérieures à l'Île des Pins comparativement à Voh.

Il est donc probable que l'exposition à l'Île des Pins soit déterminée par les teneurs de nickel dans les sols, contribuant à la contamination des poussières, des ressources en eau et des aliments, principaux vecteurs de l'exposition au nickel dans cette population.

Rôle de l'exploitation minière dans l'exposition :

Le rôle de la proximité d'une exploitation minière sur l'exposition, qui était l'objectif initial de cette deuxième phase, n'a donc pas pu être évalué devant l'ampleur de l'exposition d'origine géologique dans certaines régions de Nouvelle-Calédonie, exposition à laquelle était soumis le site qui avait été choisi comme site témoin.

Globalement, sur l'ensemble de l'échantillon d'étude (phase 1), nous n'observons pas de lien entre la proximité (< 5 km) du lieu de résidence à un site minier et des concentrations urinaires élevées d'ETM, et ce dans aucune des classes d'âge étudiées.

Dans l'analyse par zone géographique, les effectifs sont faibles et malgré l'absence d'association statistiquement significative, nous pouvons observer certaines tendances à une augmentation des concentrations urinaires de certains ETM à proximité de sites miniers dans certaines classes d'âge, sur la côte Est (Nord et Sud).

Malgré ces résultats peu probants, il ne peut être exclu que l'exploitation minière à proximité du lieu de résidence contribue à accroître la concentration d'ETM dans les poussières ambiantes et la contamination de certains milieux (cf. autres programmes CNRT du pool « Métaux » ; étude Scal'Air 2015)), et donc l'exposition humaine, et que cette activité puisse jouer un rôle sur l'exposition.

Cette première approche doit donc être affinée en utilisant une modélisation et/ou des mesures plus précises et plus nombreuses des contaminations environnementales, en particulier alimentaires, en lien avec l'exposition humaine de façon à mieux caractériser ses sources principales et les moyens de la réduire.

INTERPRÉTATION SANITAIRE

L'interprétation sanitaire se réalise selon un scénario « typique » d'ingestion quotidienne par un enfant d'une portion de légumes feuilles (ex. : chou kanak) et une portion de poisson (parmi d'autres aliments non contaminés), de 0.75 L d'eau du robinet et de 200 mg de poussières.

Les concentrations retenues sont les médianes des concentrations en nickel mesurées à l'Île des Pins en novembre 2016 dans certains aliments (17 µg/g légumes feuilles ; 0,25 µg/g poisson), dans les poussières (450 µg/g) et l'eau de boisson (70 µg/L).

Selon ce scénario la dose totale externe ingérée serait de 571 µg/j (soit 42 µg/j en dose absorbée).

On constate que la source principale de contamination semble être l'alimentation (produits locaux) suivie de l'ingestion d'eau du robinet.

Pour un enfant de 5 ans (pesant en moyenne 18 kg) on aboutit à une dose quotidienne ingérée de 31,7 µg Ni/kg poids corporel/jour supérieure à la valeur toxicologique de référence (VTR) récemment proposée par Haber et al. (2017) et spécifique aux enfants (VTR = 20 µg/kg pc/j), en lien avec de possibles retards de croissance (diminution de gain de poids corporel) (voir section 6.4 du rapport pour plus de détails).

3. CONCLUSIONS

Le programme METEXPO a permis d'apporter des informations nouvelles sur les niveaux et les déterminants de l'exposition humaine aux métaux Ni, Cr, Co et Mn en Nouvelle-Calédonie.

Cette exposition apparaît très variable selon les régions et plus importante chez les plus jeunes.

Les concentrations urinaires dépassent en général les niveaux rapportés dans d'autres pays n'ayant pas de source particulière d'exposition à ces métaux, surtout dans certains centres : centres du Nord-Est pour le chrome, Île des Pins et Bélep pour le nickel, Bélep et Yaté pour le cobalt, Ouégoa pour le manganèse.

La recherche des sources d'exposition a montré la part déterminante de la géologie locale qui entraîne une contamination de tous les milieux et contribue à accroître la charge corporelle en nickel par voie inhalatoire (poussières) et par voie orale (eau, alimentation, poussières).

L'estimation des apports en nickel par voie orale indique un dépassement de la valeur toxicologique de référence récemment proposée chez les enfants dans certaines zones. En conséquence de cette variabilité géographique liée au fond géologique, le rôle spécifique de l'activité minière dans cette exposition n'a pu être évalué mais ne peut pas être exclu.

Ces premiers résultats demandent à être complétés par une meilleure connaissance des niveaux de contamination des sources locales d'exposition (alimentation, eau) et par une évaluation des conséquences sanitaires possibles de cette exposition, en particulier chez les plus jeunes.



SYNTHESE

2019

CONCLUSION COMMUNE

Dispersion et exposition
humaine aux métaux
en Nouvelle-Calédonie

CONCLUSION COMMUNE aux PROJETS METEXPO- DMML – DYNAMINE

Les projets de recherche METEXPO « Niveaux d'imprégnation et déterminants de l'exposition humaine aux métaux », DMML « Dispersion des métaux de la mine ont lagon » et DYNAMINE « Dynamique des Métaux de la mine au lagon » ont été financés par le CNRT dans le but d'acquérir des connaissances pour une meilleure compréhension et gestion des risques environnementaux et pour la santé humaine liés à la dispersion des métaux provenant des massifs de péridotites en Nouvelle-Calédonie.

Les objectifs du projet METEXPO (2015-2017) étaient, au travers d'une étude de bio-surveillance, (1) d'évaluer l'exposition de la population Néo-Calédonienne aux quatre métaux caractéristiques des massifs miniers latéritiques (Ni, Cr, Co et Mn), (2) d'identifier l'éventualité d'une surexposition à ces métaux des populations vivants au voisinage des massifs ultrabasiques miniers et (3) de préciser le rôle éventuel des exploitations minières sur ces niveaux d'imprégnation.

Les objectifs du projet DMML (2015-2019) étaient (1) de caractériser les particules fines émises par les sols latéritiques miniers du point de vue de leur potentiel de libération des métaux cibles (Ni, Cr, Co, Mn) et pouvant être mobilisées par le vent ou les eaux de ruissellement, (2) de développer le bio-indicateur lichen pour l'évaluation de la dispersion des métaux cibles, (3) de réaliser des calculs de trajectoires des masses d'air contenant les poussières produites par les activités minières du massif du Koniambo et de cerner le rôle du transport éolien dans la dispersion des métaux, (4) de réaliser des mesures d'accumulation sur des organismes des différents maillons trophiques des rivières du massif du Koniambo et (5) d'évaluer au laboratoire les mécanismes du transfert trophique de Ni entre des biofilms et un modèle de poisson brouteur.

Les objectifs du projet DYNAMINE (2015-2019) étaient (1) de déterminer le bruit de fond géochimique des rivières du massif du Koniambo, (2) d'identifier des marqueurs géochimiques de l'anthropisation de ces rivières en lien avec l'activité minière, (3) d'établir les flux de métaux le long du continuum mine-lagon, (4) d'évaluer la réactivité des sédiments et des matières en suspension, du point de vue de leur potentiel de libération des métaux, le long de ce continuum et (5) d'établir une première évaluation des impacts potentiels des métaux sur la biodiversité lagonaire (appréhendée au travers de l'étude des écosystèmes coralliens).

Le projet METEXPO a permis d'apporter des informations nouvelles sur les niveaux d'imprégnation et les déterminants de l'exposition humaine au Ni, Cr, Co et Mn. Cette exposition est très variable selon les régions et plus importante chez les plus jeunes. Les concentrations urinaires mesurées dans la population calédonienne dépassent les niveaux rapportés pour d'autres pays, surtout pour les sites d'étude du Nord-Est pour Cr, de l'île des Pins et Belep pour Ni, de Yaté pour Co et de Ouégoa pour Mn. La recherche des sources de ces métaux a permis de souligner la part déterminante de la géologie locale qui entraîne une contamination de tous les milieux et contribue à accroître la charge corporelle en Ni par voie inhalatoire (poussières) et par voie orale (eau, alimentation, poussières). Ces résultats sont en accord avec ceux du projet DMML qui a montré que les fines particules (< 100µm) provenant des sols latéritiques miniers sont particulièrement chargées en métaux (notamment Fe, Mn, Ni, Co et Cr), mais surtout qu'une quantité significative de ces métaux est mobilisable avec un potentiel de libération de l'ordre de plusieurs centaines de mg/kg. Des extractions à l'eau avec des pH proches des conditions gastriques et pulmonaires ont démontré que Fe, Mn, Ni et Co présentent un risque de contamination par voie digestive (très solubles à pH acide), alors que Cr présente un risque de contamination autant par voie digestive que pulmonaire (solubilité équivalente aux deux pH). Ces résultats suggèrent un risque sanitaire liée à l'ingestion ou à l'inhalation de poussières latéritiques issues des massifs miniers. Pour Cr, le risque par inhalation est d'autant plus à souligner que de précédentes études ont montré que cet élément est principalement présent dans les particules latéritiques sous sa forme hexavalente (la plus toxique).

L'atmosphère étant un vecteur important de dispersion des poussières, l'utilisation des lichens comme bio-indicateur dans le cadre du projet DMML indique un indice d'exposition élevé sur site minier et une diminution de cet indice lorsqu'on s'éloigne du site minier. Ces résultats sont confirmés par ceux de la modélisation atmosphérique qui permettent d'identifier les principaux sites impactés par les exploitations minières au voisinage du massif du Koniambo. Ces sites correspondent aux villages de Témala, Tiéta, Boyen et Ouahat qui sont particulièrement exposés aux mines des massifs du Koniambo et du Kopéto. Dans la même zone géographique, les villages côtiers de Gatope et Oundjo sont partiellement protégés par les vents océaniques. Les trajectoires des masses d'air reconstituées par la modélisation suggèrent que les villages de Kouaoua et de Poro sur la côte Est sont également susceptibles d'être impactés par des sites miniers. Ainsi, les résultats du projet DMML, pour ce qui concerne la partie relative à la dispersion des poussières et des métaux, soutiennent l'hypothèse émise dans le cadre du projet METEXPO quant à la part déterminante de la géologie à la charge corporelle de la population locale en Ni. Ces résultats indiquent également que les villages identifiés comme potentiellement impactés par des sites miniers devraient faire l'objet d'un suivi régulier de la qualité de l'air en termes de PM₁₀ inhalées par les habitants.

Le projet METEXPO suggère que l'inhalation de poussières atmosphériques d'origine minières pourrait ne pas être la seule voie d'imprégnation de la population aux métaux.

Parmi les autres voies d'imprégnation possibles, l'ingestion par voie aqueuse est fortement soupçonnée. Le projet DYNAMINE a permis de déterminer le bruit de fond géochimique en métaux des rivières du massif du Koniambo et d'identifier Al, As, Co, Cr, Fe, Mn et Ni comme marqueurs de l'activité minière dans la fraction totale des rivières sur massifs latéritiques. Ces métaux sont donc principalement transportés sous forme particulaire lors d'événements pluvieux sur les massifs miniers qui ne font pas l'objet d'une gestion adaptée des eaux de ruissellement (eaux rouges). Pour la fraction dissoute, Cr est le marqueur qui ressort avec le plus de poids, mais Ni et Al semblent également augmenter dans la fraction dissoute lorsque le transport solide est important. Ces métaux sont donc susceptibles de présenter des concentrations significatives dans les rivières des massifs miniers qui ne font pas l'objet d'une gestion adaptée des eaux de ruissellement et leur consommation pourrait représenter une voie d'imprégnation de la population.

Par ailleurs, les résultats obtenus sur la réactivité des sédiments et/ou des matières en suspension dans le cadre du projet DYNAMINE indiquent que ces fractions solides représentent des compartiments de métaux potentiellement mobilisables non négligeables. Ces résultats soulignent également l'existence d'un gradient depuis les termes sources (sols latéritiques miniers) jusqu'aux sédiments et/ou matières en suspension dans le lagon, tant du point de vue des concentrations totales en métaux, que de celui de la biodisponibilité de ces métaux. Ainsi, les organismes évoluant dans les rivières des massifs miniers latéritiques seraient potentiellement les plus exposés, par rapport aux organismes vivants dans le lagon.

Dans cette perspective, l'étude écotoxicologique menée sur les rivières du massif du Koniambo dans le cadre du projet DMML a permis de dresser un premier constat de la contamination métallique de leur composante biotique par comparaison avec une référence. Les biofilms périphytiques se sont avérés être un compartiment extrêmement accumulateur de Co, Cr, Fe, Mn, Ni avec une fraction inorganique majoritaire. Les diatomées se sont révélées être des bio-indicateurs d'exposition aux plus fortes concentrations en métaux cibles avec des réponses transcriptomiques mettant en évidence des activités métaboliques altérées et donc un impact fort de ces métaux. Pour les niveaux trophiques supérieurs, crustacés et poissons, des accumulations plus élevées de Ni, Cr, Co et Fe ont quasi systématiquement été observées dans les organismes évoluant sous influence minière, avec un gradient décroissant vers l'aval. Les plus fortes bioaccumulations ont été observées dans les branchies, ce qui est révélateur d'une contamination prépondérante par la fraction dissoute des métaux (par opposition à la voie trophique qui est plutôt indicatrice d'une contamination par la fraction particulaire des métaux). Cependant, une diminution des concentrations en métaux dans les organismes, depuis les biofilms vers les maillons supérieurs a été observée. Ce dernier résultat suggère qu'il n'y a pas de bioamplification des métaux le long des réseaux trophiques aquatiques d'eau douce dans les hydrosystèmes sur massif minier en Nouvelle-Calédonie. Au laboratoire, la faible capacité de transfert de Ni par la voie trophique a été confirmée, ce qui confirme que les bioaccumulations observées chez les poissons dans le milieu naturel résultent majoritairement de la voie directe *via* les formes dissoutes des métaux.

Pour ce qui concerne les organismes lagonaires, les résultats de l'étude réalisée dans le cadre du projet DYNAMINE suggèrent une influence des métaux sur la physiologie des écosystèmes coralliens plus complexe qu'initialement envisagée, avec des effets positifs de certains métaux sous certaines conditions environnementales et une inversion de ces effets lorsque les conditions environnementales changent. A ce titre, la température apparaît comme un paramètre très important qui semble ne pas seulement jouer un rôle direct sur la physiologie des coraux (phénomène de blanchissement lorsque la température de l'eau augmente), mais également exercer un rôle indirect en exacerbant ou en inversant les effets des métaux. Ce dernier point suggère qu'en se combinant à ceux à plus large échelle du réchauffement climatique, les effets de l'activité minière pourraient représenter une menace pour la survie à long terme des écosystèmes coralliens de Nouvelle-Calédonie.

L'ensemble des travaux menés dans le cadre de ces trois projets souligne que les latérites développées sur roches ultrabasiques sont des sources de métaux mobilisables par le vent et l'eau et que ces derniers sont assimilables. Ils contribuent à accroître la charge corporelle en métaux des hommes et la voie atmosphérique par inhalation n'est pas à écarter. La contamination alimentaire n'a pas été étudiée et la source d'exposition humaine prépondérante reste à étudier. Les écosystèmes aquatiques dulçaquicoles sont également imprégnés en aval des exploitations minières, mais sans phénomènes de bioamplification, ce qui semble protéger le consommateur. L'augmentation des concentrations en métaux totaux et dissous des cours d'eau fortement impactés par l'érosion soulève la question du risque d'exposition par l'eau de boisson. Dans ce contexte, un suivi de la qualité de l'eau au sein des massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie apparaît indispensable, notamment parce que 61% de la ressource en eau potable est produite par les captages d'eau superficielle et que ces ressources sont potentiellement sous influence anthropique (principalement activité minière et feux). Ces travaux permettraient de définir des seuils de qualité environnementale adaptés à la spécificité de ces milieux dulçaquicoles calédoniens naturellement concentrés en métaux). Les mécanismes de mobilisation de Ni et Cr, présents dans les sols latéritiques et retrouvés comme marqueurs d'anthropisation dans la fraction dissoute des eaux douces superficielles, méritent également d'être investigués plus en détail. Enfin et dans le but de pouvoir distinguer un état écologique "naturel" d'un état écologique impacté par les activités anthropiques, des seuils de qualité environnemental spécifiques (QS) devraient être déterminés dans chacun des compartiments environnementaux : abiotiques (eaux, sédiments), et biotiques (organismes aquatiques, benthiques,...). Au final, une Norme de Qualité Environnementale (NQE), égale à la plus faible des normes de qualité spécifiques, devrait être définie pour les eaux douces sur substrat ultrabasique. L'ensemble des travaux montre également que l'imprégnation de la population par voie atmosphérique est probablement non négligeable et même importante dans certaines zones habitées sous influence des masses d'air ayant survolé des sites miniers. La dispersion des métaux par voie atmosphérique devrait être également étudiée plus en détail et faire l'objet de travaux à l'échelle du territoire.

