

Rapport Scientifique

2025

PROGRAMME 2020- METALICA-ALIMENT

« **METAux-ALiments en Nouvelle-CALédonie – Evaluation des concentrations en éléments métalliques dans les ressources ALIMENTaires de Nouvelle-Calédonie.** »



*Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par
le CNRTEC, Centre du Nickel*



2025

/



« METALICA-Aliment »

Rapport scientifique final (version définitive)

Septembre 2025

Ouvrage collectif coordonné par Audrey LEOPOLD (Institut Agronomique néo-Calédonien, IAC – Equipe Sol & Végétation, SolVeg)

Pour le consortium IAC, GNS, UNC, SGNC, CHT, Inserm

AUTEURS :

Audrey LEOPOLD (IAC),

Virginie LADROUE (IAC),

Karyne ROGERS (GNS),

Anthony PAIN (IAC),

Hélène KAPLAN (IAC),

Thomas HUE (IAC),

Yves LETOURNEUR (UNC),

Angelline GOUE (SGNC),

Peggy GUKEL-GRILLON (UNC),

Olivier MONGE (SGNC).

Révision du document

Version	Date	Rédacteur(s)	Qualité du rédacteur(s)	Révision pour CNRTEC
V1 / VF	31/10/2024			M. Suon
VF	10/09/2025			M. Suon

Réf. *CSF N° 2PS2020-CNRT.IAC/METALICA-Aliments du 20/09/21*

Citation du document

Mots clés : aliments, métaux, agriculture, élevage, chasse, pêche, Nouvelle-Calédonie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Léopold, A. et coll. (2025) – « METaux-ALiments en Nouvelle-CALédonie – Evaluation des concentrations en éléments métalliques dans les ressources ALIMENTaires de Nouvelle-Calédonie. » CNRTEC, Centre du Nickel. 148 pages.

Executive summary

La Nouvelle-Calédonie est mondialement connue pour la richesse en minerais de ses couvertures d'altération. Le nickel, le chrome, le cobalt, ou encore le manganèse peuvent présenter des concentrations particulièrement importantes dans les sols. Le projet CNRTEC METEXPO (2015-2017) a ainsi mis en évidence une imprégnation conséquente de la population néo-Calédonienne aux métaux. Respectivement 13% et 90% des enfants présentaient des urines dont les concentrations en nickel et en chrome dépassaient les concentrations de référence (*St-Jean et al., 2018*). Faisant suite à METEXPO, différents travaux cherchent aujourd'hui à comprendre le rôle des forçages naturels et humains dans l'imprégnation des populations néo-Calédoniennes, et à évaluer le rôle des différentes composantes des agroécosystèmes dans cette imprégnation, ainsi que leurs conséquences environnementales et sanitaires. Différents compartiments potentiellement impliqués sont étudiés : eaux de boisson, eaux superficielles, et souterraines, dépôts atmosphériques (poussières), ou encore forçages anthropiques : feu, assolement, ou pratiques agricoles. Bien que suggéré, le rôle de l'alimentation dans cette imprégnation, reste largement méconnu, notamment en raison de la quasi-absence de données concernant les concentrations en éléments métalliques dans les denrées alimentaires produites ou prélevées localement.

Le projet METALICA-Aliment, a quantifié les concentrations en éléments métalliques totaux, particulièrement As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, et Zn, des denrées alimentaires du territoire, notamment les ressources agricoles végétales et animales, les ressources aquatiques (dulçaquicoles et estuariennes), ou encore les ressources terrestres issues de prélèvements cynégétiques. La sélection des données échantillonnées a été réalisée sur les fréquences de consommation, et les volumes de production locale. Lorsque cela était possible et/ou pertinent, les liens potentiels avec la qualité de l'agro-environnement, notamment la qualité des sols (pédologie), des eaux environnantes, de la géologie, ou encore de l'impact minier ont été étudiés.

Bien que non systématiques, nos résultats décrivent pour la première fois sur le territoire de la Nouvelle-Calédonie, les concentrations en éléments métalliques dans différentes catégories de denrées alimentaires, agricoles particulièrement. Concernant les denrées végétales, les dépassements à la réglementation, sur une base de matière fraîche, étaient inexistantes pour As, Cd, Hg et Pb dans l'ensemble des échantillons étudiés, rares pour Cr et plus fréquents pour Ni, particulièrement considérant la réglementation applicable en Europe à compter de juillet 2025. Ils concernaient plus particulièrement les légumes feuilles. Cependant, nos résultats démontrent (i) des concentrations en métaux plus élevées dans les épidermes consommables que dans la chair des denrées, (ii) un effet significatif du nettoyage des denrées végétales sur les concentrations en métaux. Ainsi, en termes de recommandations en vue de limiter l'exposition, le projet METALICA-Aliment suggère aux consommateurs de nettoyer à l'eau les denrées végétales pour retirer les dépôts des sols/poussières pourvoyeurs de métaux ; et peler les denrées avant consommation, même lorsque l'épiderme est consommable. Les facteurs de transferts sols-plantes sont similaires à ce qui peut être rencontré dans la littérature, avec une capacité des légumes feuilles plus importantes vis-à-vis de l'absorption métallique, en lien avec les taux de croissance et de transpiration importants de cette catégorie de denrées. Enfin, concernant la disponibilité environnementale des métaux dans les sols, évaluée par extraction à l'EDTA ; seules des relations entre les concentrations en Ni-EDTA et celles mesurées dans les denrées végétales ont été mises en évidence. De tels constats, régulièrement observés dans la littérature scientifique, mettent en exergue, la pluralité des facteurs de contrôle impliqués dans les transferts sols-plantes, de la qualité biogéochimique des sols, aux mécanismes physiologiques intrinsèque aux espèces végétales étudiées.

La relation Ni-EDTA et Ni-plantes suggère que plus la disponibilité du nickel dans les sols est élevée plus cet élément sera susceptible d'être absorbé par la plante. Cependant, et contrairement à ce qui aurait pu être attendu, il n'existe pas de liens simples entre les concentrations en Ni-EDTA dans les sols, et l'unité pédologique sur laquelle elles sont mesurées, même si les sols développés sur substrats ultrabasiques présentent généralement des concentrations plus élevées en Cr et Ni que les sols développés sur substrats volcano-sédimentaires. Ainsi, les différences dans les valeurs moyennes en éléments métalliques mesurées par denrées et régions géographiques, sont moins marquées qu'attendues initialement, notamment pour le Ni. Les sols agricoles échantillonnés étant majoritairement des sols alluvionnaires, il est possible que la nature pédo-géologique du bassin versant, et la présence d'activités minières en amont, impactent la qualité physico-chimique des sols développés en bas de toposéquence. À titre d'exemple, les concentrations en Ni- et Cr- mesurées dans les sols alluvionnaires

du bassin de la Ouenghi pouvaient présenter des concentrations en métaux mobilisables égales à supérieures à celles mesurées dans des alluvions ferrallitiques du Grand Sud.

Concernant les denrées agricoles animales, les concentrations en métaux étaient généralement faibles et aucun dépassement en As, Cd, Cr, Pb et Ni, n'ont été mis en évidence. En comparaison à la littérature mondiale, les concentrations en EM pour les viandes néo-Calédoniennes (hors gibier et ressources naturelles) se situent plutôt dans les valeurs basses, et ne semblent pas présenter de risques particuliers pour le consommateur. Pour l'élevage en conditions de plein champ, il n'a pas pu être mis en évidence de lien entre concentrations dans la viande, et métaux disponibles dans les sols, les eaux d'abreuvement ; ni avec les métaux présents dans les aliments pour les animaux d'élevage, et aucune tendance géographique nette n'est apparue. Bien que les effectifs soient faibles pour les ressources terrestres prélevées dans le milieu naturel, des contaminations au plomb, parfois particulièrement élevées ont pu être mises en évidence dans la chair (foie et/ou muscle) de roussettes, de cochons sauvages et de cerfs issus de prélèvements cynégétiques. Des concentrations élevées en cadmium ont également pu être mises en avant, et apparaissent comme étant le fait de la qualité des munitions utilisées pour la chasse, et non d'une contamination environnementale. D'autre part, la chair d'escargot présentait des concentrations trop élevées en As, Cd, Cr, et Ni ; en lien probablement avec leur mode et leur milieu de vie. Il conviendrait d'évaluer l'impact de la consommation de gibier et d'escargots au niveau des tribus ou des familles dont l'alimentation inclut régulièrement ces produits.

Les denrées aquatiques d'eau douce et d'estuaires présentaient les concentrations les plus élevées pour l'ensemble des métaux cibles. Les gammes de variation des concentrations pour les différents éléments étaient particulièrement conséquentes, et elles étaient clairement impactées par la nature du substrat géologique et l'influence minière en amont du cours d'eau. Les invertébrés (mollusques, et crustacés) montraient des concentrations plus importantes en élément métalliques que les poissons, et ce particulièrement lorsqu'ils étaient échantillonnés en zone ultrabasique sous influence minière.

Bien que certaines denrées apparaissent comme potentiellement plus problématiques que d'autres au regard de leur concentration en métaux, seule une évaluation des risques sanitaires, tenant compte des habitudes de consommation, et des diverses sources majeures d'exposition, permettra d'appréhender les risques pour le consommateur. À cet égard, le projet METALICA-Santé devrait apporter de premiers éléments de réponse.

Préambule et conditions de réalisation du projet

L'étude METEXPO financée par le CNRT, et finalisée en 2017, a mis en évidence une imprégnation conséquente des populations Calédoniennes, à certains métaux, notamment Co, Cr, Ni et Mn. La Nouvelle-Calédonie est connue à travers le monde pour la richesse en minéraux de ses couvertures d'altération, les sources potentielles d'exposition des populations à ces métaux, sont ainsi probablement nombreuses. En effet, l'ensemble des compartiments des agro-socio-écosystèmes est une source plus ou moins conséquente de métaux. Ces expositions naturelles peuvent être amplifiées, par les activités anthropiques, activités minières, industrielles ou agricoles notamment, qu'il convient d'étudier. Si différents programmes s'intéressent aujourd'hui à ces problématiques, peu sont ceux qui s'articulent autour de l'agriculture néo-Calédonienne, alors même que les questionnements, voire les inquiétudes sont nombreuses concernant les concentrations métalliques des ressources alimentaires produites et/ou prélevées localement.

METALICA-Aliment, propose une première exploration des concentrations en éléments métalliques des denrées alimentaires, particulièrement agricoles. Ainsi, produits végétaux, produits carnés et ovoproduits ont été étudiés. Afin de compléter la liste des denrées consommées, les denrées dulçaquicoles et estuariennes ont également été étudiées. METALICA-Aliment, en tant qu'étude pilote, permet d'appréhender la qualité métallique des denrées alimentaires produites ou prélevées localement.

Toutefois, le décalage entre le calendrier agricole et celui du projet, ainsi que l'impact d'événements climatiques intenses liés à la persistance du phénomène La Niña, ont freiné la mise en œuvre de l'échantillonnage tel qu'il avait été initialement envisagé. Enfin, le caractère opportuniste et aléatoire des prélèvements effectués dans le milieu naturel n'a pas toujours permis de collecter un nombre suffisant d'échantillons pour réaliser des tests statistiques robustes.

D'un point de vue opérationnel, le projet METALICA-Aliment s'est déroulé dans un contexte post-Covid peu favorable, marqué par la reprise progressive des activités et les retards accumulés. Au cours de sa mise en œuvre, trois responsables de lot ont quitté le projet, sans lien avec ses conditions de réalisation, à savoir M. Paquet (Inserm), J. Jeanpert (SGNG) et T. Hue (IAC), ce qui a complexifié l'organisation et l'exécution des tâches prévues. Par ailleurs, malgré de nombreux efforts humains et financiers engagés pour remettre en fonctionnement l'instrumentation analytique essentielle au projet (ICP-MS CRESICA), toutes les tentatives se sont soldées par des échecs. Cette situation a contraint les équipes à recourir à des solutions analytiques hors territoire, générant ainsi des délais supplémentaires et un surcoût non négligeable.

Si toutes les questions n'ont pas trouvé de réponses dans le cadre du projet METALICA-Aliment, les premiers résultats issus de cette étude pilote offrent une première évaluation des concentrations en métaux dans les denrées alimentaires du territoire, en particulier celles d'origine agricole. Une telle démarche n'avait été entreprise qu'une seule fois dans les années 1990, et dans un seul contexte agropédologique : celui des cultures végétales sur Ferralsols.

À partir des données recueillies, une première évaluation des risques sanitaires pourra être conduite dans le cadre du projet METALICA-Santé, et des premières recommandations ont d'ores et déjà été formulées.

Remerciements

Les membres du consortium tiennent à exprimer leurs sincères remerciements à l'ensemble des acteurs et facilitateurs qui ont contribué au succès du projet METALICA-Aliment.

Nous adressons tout d'abord notre profonde gratitude aux agriculteurs et aux éleveurs qui ont accepté de participer au projet, malgré la sensibilité du sujet relatif aux éléments métalliques dans les denrées locales. Soucieux de préserver leur anonymat, nous ne les mentionnons pas nominativement, mais leur engagement et leur collaboration sont pleinement reconnus.

Nos remerciements vont aussi aux conseils coutumiers et municipaux de Thio, Poya et La Foa, pour leur accueil chaleureux et l'intérêt constant porté au projet.

Nous remercions également Mesdames Karine Saumé et Sylvie Duval pour leurs conseils éclairés et leur disponibilité, ainsi que Pascal Guénel, Sylvaine Cordier, Thérèse Truong, Mélanie Paquet et Julie Jeanpert pour leur contribution.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à Monsieur Joseph Manauté, membre du Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, pour le soutien qu'il a exprimé et l'intérêt qu'il a porté à notre projet.

Plusieurs structures locales ont également apporté une contribution précieuse, directe ou indirecte, que nous souhaitons saluer chaleureusement : la Chambre d'Agriculture et de la Pêche : Nicolas Hugot et Laura Henry ; le laboratoire de Nouvelle-Calédonie (SIVAP) : Orélie Mahot et Karine Bourget ; le SIVAP : Ariella Tein-Nalah et Karim Salem ; la Province Sud : Christophe Cassez, Sylvie Edighoffer, Danyela Salmon, Loïc Bourguine et Zacharie Lemerre-Desprez.

Nous remercions également le personnel de l'OCEF, de l'abattoir de Païta, de la Société de Chasse de Nouvelle-Calédonie, ainsi que l'IRD (LAMA IMAGO, et F. Juillot).

Enfin, nous exprimons notre gratitude au CNRTEC, et plus particulièrement à Fabien Trotet, Médéric Suon et Laurence Bariller, pour leur implication et leur accompagnement tout au long de la réalisation de ce travail.

Table des matières

1. CONTEXTE & PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE	23
1.1. LA NOUVELLE-CALEDONIE = UNE TERRE DE METAUX	23
1.2. METAUX & PRODUCTIONS AGRICOLES	27
1.2.1. <i>Origine des métaux dans les agrosystèmes.....</i>	27
1.2.2. <i>Transferts des métaux dans le système sol-plante des agrosystèmes.....</i>	28
1.3. L'IMPREGNATION DES POPULATIONS HUMAINES AUX METAUX :	29
2. QUELS SITES D'ECHANTILLONNAGE ?	32
3. QUELLES HABITUDES DE CONSOMMATIONS DES POPULATIONS NEO-CALEDONIENNES A L'ECHELLE DES MICRO-REGIONS CIBLES ?	39
3.1. FOCUS SUR LES PRODUCTIONS AGRICOLES LOCALES	39
3.1.1. <i>Denrées animales</i>	39
3.1.2. <i>Denrées végétales.....</i>	40
3.2. FREQUENCE DE CONSOMMATION DES ALIMENTS.....	44
3.3. MATERIEL ET METHODES	48
3.3.1. <i>Stratégie d'échantillonnage.....</i>	48
3.3.1.1. Denrées agricoles végétales.....	48
3.3.1.2. Denrées agricoles animales.....	49
- Bœuf, cerf, porc.....	49
- Poulet	49
- Œufs (poules et cailles)	49
- Gibier	49
- Autres denrées	50
3.3.1.3. Caractérisation des concentrations métalliques de l'environnement.....	50
3.3.1.4. Ressources aquatiques.....	51
3.3.2. <i>Protocole de préparation et d'analyses des échantillons</i>	52
3.3.2.1. Denrées agricoles végétales.....	52
3.3.2.2. Denrées agricoles animales.....	56
3.3.2.3. Denrées aquatiques	57
4. RESULTATS & DISCUSSION	59
4.1. BILAN DES ECHANTILLONNAGES REALISES	59
4.1.1. <i>Denrées agricoles végétales</i>	59
4.1.2. <i>Denrées agricoles animales</i>	61
4.1.3. <i>Ressources aquatiques : évaluation globale.....</i>	64
4.2. QUELLES CONCENTRATIONS ELEMENTAIRES DANS LES DENREES ALIMENTAIRES DE NOUVELLE-CALEDONIE.....	65
4.2.1. <i>Concentrations élémentaires dans les végétaux cultivés</i>	65
4.2.1.1. Comparaison entre typologie de denrées - Résultats en matière sèche	65
4.2.1.2. Comparaison à la littérature	70
4.2.1.2.1. Données locales	70
4.2.1.2.2. Données internationales.....	72
4.2.1.3. Le cas des éléments rares	74
4.2.1.4. Comparaison des concentrations en éléments aux seuils maximums définis- Résultats en matière fraîche.....	75
4.2.1.5. Effet du nettoyage des légumes feuilles	83
4.2.1.6. Impact géographique et lien entre concentrations dans les denrées et les sols	87

4.2.1.7.	Relations sols-plantes et facteurs de bioconcentration	92
4.2.1.8.	Denrées agricoles végétales- « Take-Home message »	97
4.2.2.	<i>Concentrations élémentaires dans les denrées animales agricoles et terrestres</i>	99
4.2.2.1.	Comparaison entre typologie de denrées- résultats en matière sèche	99
4.2.2.1.1.	Cas des éléments quantifiés à plus de 50% dans les denrées animales	99
4.2.2.1.2.	Cas des éléments rares et des denrées « originales »	100
4.2.2.2.	Comparaison des concentrations en éléments aux seuils- résultats en matière fraîche	102
4.2.2.3.	Impact géographique sur la qualité des viandes	103
4.2.2.3.1.	Concentrations par denrées, organes et communes de prélèvements.....	103
4.2.2.3.2.	Relations avec les ressources associées.....	107
4.2.2.4.	Denrées animales terrestres- « <i>Take-Home message</i> »	108
4.2.3.	<i>Questionnements autour de l'hétérogénéité des sols</i>	110
4.2.4.	<i>Eaux environnantes</i>	112
4.2.4.1.	Bilan des échantillonnages réalisés.....	112
4.2.4.2.	Analyses au laboratoire.....	115
4.2.4.3.	Contextes géologique et hydrogéologique des échantillons d'eau analysés sur les communes cibles	117
4.2.5.	<i>Ressources aquatiques</i>	122
4.2.5.1.	Concentrations dans les poissons et invertébrés	122
4.2.5.2.	Influence du substrat géologique sur les concentrations.....	122
4.2.5.3.	Influence de l'activité minière	123
4.2.5.4.	Concentrations de chaque élément	124
4.3.	COMPARAISON PRELIMINAIRE DES 3 GRANDES CATEGORIES DE DENREES :	130
5.	CONCLUSIONS & RECOMMANDATIONS	132
ANNEXES	134

LISTE DES SIGLES & ABBREVIATIONS

CNRTEC	Centre du Nickel
DASS	Direction des Affaires Sanitaires
DAVAR	Directions des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales
IAC	Institut Agronomique néo-Calédonien
Inserm	Institut national de la santé et de la recherche médicale
GNS	Geological National Survey
SGNC	Service Géologique de Nouvelle-Calédonie
UNC	Université de la Nouvelle-Calédonie
CNRT	Centre National de Recherche Technologique
BCF	Facteur de Bioconcentration
MF/MS	Matière Fraîche / Matière Sèche
EM	Éléments métalliques
ICP-MS	Spectromètre de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS)
LOD / LOQ	Limite de détection / Limite de quantification
UB	Ultrabasique
VS	Volcano-sédimentaire

CNRTEC, CENTRE DU NICKEL

Mobilité des Métaux vers les ressources Alimentaires en Nouvelle-Calédonie

PROGRAMMATION SCIENTIFIQUE 2020

Procédure négociée- Ni & Société

METAux-ALiments en Nouvelle-CALédonie – Evaluation des concentrations en éléments métalliques dans les ressources ALIMENTaires de Nouvelle-Calédonie.

ACRONYME - METALICA-Aliment

Liste des figures

Figure 1- Occupation des terres émergées dans le monde (©FAO, Food and Agriculture Organization).....	27
Figure 2- Grandes voies de transferts entre l'environnement et les cultures (© Ineris, Institut national de l'environnement industriel et des risques, France).....	28
Figure 3- Logarithme des BCF pour différents éléments et cultures (organes consommés). Source- Ineris, 2017	29
Figure 4- Pourcentages de quantification urinaire des éléments (As total, et inorganique (Asi), l'acide monométhylarsinique (MMA) et de l'acide diméthylarsinique (DMA), mercure, cadmium, chrome, et nickel), de mercure capillaire et de plomb sanguin. Les principaux modes d'imprégnation sont également mentionnés. Les niveaux mesurés par éléments sont également comparés à ceux mesurés dans l'étude ENNS (Étude Nationale Nutrition Santé) de 2006-2007 lorsqu'ils étaient disponibles.	30
Figure 5- Représentation géographique des concentrations en cobalt, chrome, manganèse et nickel (en $\mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine) mesurées dans les urines des populations Calédoniennes, lors de l'étude METEXPO. Les massifs ultrabasiques et les sites miniers sont également représentés.	32
Figure 6- Carte pédologique de la Nouvelle-Calédonie (1/200 000 ^{ème}). Les trois micro-régions ciblées par l'étude sont indiquées. Les cercles jaunes, permettent de visualiser la diversité pédologique 10 kms ou 20 kms autour du point central de la commune.	33
Figure 7- Carte hydrogéologique de la commune de Thio déduit du référentiel BDLISA-NC.....	34
Figure 8- Carte hydrogéologique de la commune de La Foa déduit du référentiel BDLISA-NC.	34
Figure 9- Carte hydrogéologique de la commune de Poya déduit du référentiel BDLISA-NC.....	35
Figure 10- Concentrations en nickel et chrome dans les sédiments des rivières du bassin versant de Poya. Données issues de la base Stream-Sediment.	36
Figure 11- Localisation des sites de collectes des organismes aquatiques sur les communes de Thio, La Foa et Bourail (a) et géologie des sites d'échantillonnage, en vert les substrats ultramafiques (b). Cartes générées par Georep NC.	37
Figure 12- Annexe au rapport de présentation de la proposition portant modification de la délibération n°7/CP du 06 avril 2010.....	40
Figure 13- Exemples de quartage réalisés sur les denrées végétales de façon à obtenir un échantillon composite représentatif des différents individus échantillonnés lors d'une masse unitaire faible, ou de réduire la quantité désirée de l'individu lors d'une masse unitaire élevée. (A) $2 * 1/8^{\text{ème}}$ opposé = $1/4$ de la denrée prélevée ; (B) $4 * 1/8^{\text{ème}}$ opposé = $1/2$ de la denrée prélevée. Dans ces exemples, seules les parties hachurées sont conservées.....	52
Figure 14- Exemple de quartage $2 * 1/8^{\text{e}}$ sur une chouchoute.....	52
Figure 15- Pourcentages de concentrations inférieures aux LOQ pour les éléments étudiés dans les blancs et les jaunes d'œufs d'une part (graphique du haut), et dans les denrées carnées, d'autre part (graphique du bas) ..	63
Figure 16- Diagrammes en boîte des concentrations en cobalt, chrome, manganèse et nickel (en ppm, soit en mg kg^{-1} , en masse sèche) par catégories de denrées agricoles végétales : légumes feuilles (n=29) ; légumes racines (n=30), légumes fruits (n=48), et fruits (n=38). Les concentrations sont présentées en matière sèche des parties consommées et préalablement nettoyées. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les lettres indiquent une différence statistiques significative au seuil $\alpha = 0,05$	66
Figure 17- Diagrammes en boîte des concentrations en cobalt (ppm, ou mg kg^{-1} , en masse sèche) pour les différentes denrées produites localement. Une même couleur représente une même catégorie de denrée.....	67
Figure 18- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome (ppm, ou mg kg^{-1} , en masse sèche) pour les différentes denrées produites localement. Une même couleur représente une même catégorie de denrée.....	67
Figure 19- Diagrammes en boîte des concentrations en manganèse (ppm, ou mg kg^{-1} , de matière sèche) pour les différentes denrées produites localement. Une même couleur représente une même catégorie de denrée.....	68
Figure 20- Diagrammes en boîte des concentrations en nickel (ppm, ou mg kg^{-1} , en masse sèche) pour les différentes denrées produites localement. Une même couleur représente une même catégorie de denrée.....	68
Figure 21- Concentrations moyennes en Ni et Mn, mesurées dans les tiges/feuilles, peau ou fruit, des différentes catégories de denrées agricoles végétales. Ces données sont issues de l'étude de Dupont et Bonzon (1998) menée sur sols ferrallitiques alluvionnaires du Sud de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie. Les barres verticales sont les écarts-types. Les barres hachurées représentent les organes généralement consommés par grandes catégories de denrées.	70
Figure 22- Concentrations moyennes en Ni et Mn (mg.kg^{-1} matière sèche, MS) des 4 grandes catégories de denrées agricoles végétales, mesurées dans l'étude de Dupont et Bonzon (1998) sur sols ferrallitiques alluvionnaires, et dans l'étude METALICA-Aliment, tenant compte de divers contextes agropédologiques. Les barres verticales sont les écarts-types. À la différence de la figure 21, les concentrations représentées ne tiennent compte que des parties consommées des denrées.....	71

Figure 23- Concentrations en nickel (mg.kg^{-1} , en matière fraîche MF) dans l'épiderme et la chair de différentes denrées issues de différents producteurs et origines géographiques. La CMT représente la concentration maximale tolérée dans cette catégorie de denrées alimentaires.	82
Figure 24- Rapport entre les concentrations des denrées lavées ou non lavées pour chaque élément quantifié. La ligne rouge, désignant un rapport = 1 indique une absence d'effet du nettoyage préalable de la denrée sur les éléments.	84
Figure 25- Concentrations en Au (ppb), Co (ppm), Cr(ppm), Fe (%) Mn (ppm), Ni (ppm), Pb (ppm) et Ti (ppm). Éléments pour lesquels, l'effet du nettoyage des denrées au préalable à l'analyse est marqué. L'effet du nettoyage a été observé sur des échantillons d'origine géographique variée, mais les éléments impactés sont marqueurs d'une contamination terrigène. À noter, l'effet particulièrement important du nettoyage sur des denrées issues de la Ouenghi.	86
Figure 26- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome, cobalt, manganèse et nickel par grandes zones géographiques étudiées. Des lettres différentes indiquent une différence statistique au seuil $P < 0,05$. Dans ce graphique, les résultats issus de Boulouparis, sont considérés dans la zone de la Foa.....	87
Figure 27- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome, cobalt, manganèse et nickel de chaque catégorie de denrées et par grandes zones géographiques étudiées. Dans ce graphique, les résultats issus de Boulouparis, sont considérés dans la zone de la Foa.	88
Figure 28- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome, cobalt, manganèse et nickel par grandes zones géographiques étudiées. Des lettres différentes indiquent une différence statistique au seuil $P < 0,05$. Dans ce graphique, les résultats issus de Boulouparis, sont considérés dans la zone du Grand Sud.	90
Figure 29- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome, cobalt, manganèse et nickel de chaque catégorie de denrées et par grandes zones géographiques étudiées. Dans ce graphique, les résultats issus de Boulouparis, sont considérés dans la zone du Grand Sud.	91
Figure 30- Relations entre les concentrations élémentaires (Cr, Co, Mn, et Ni) mesurées dans les parties consommées des denrées agricoles végétales, et les concentrations mesurées dans les sols après extractions à l'EDTA 0,05 M (1h). L'ensemble des concentrations sont présentées sur une base de Log10, et les modèles linéaires présentés ont également été réalisés sur les $\log_{10}(\text{concentrations})$	94
Figure 31- Facteurs de bioconcentration (BCF) Sol-Plante, calculés comme le ratio entre les concentrations métalliques dans la partie consommée de la plante et celle du sol, déterminées par extraction à l'EDTA 0,05M (1h). La figure du dessous représente les moyennes des BCF par catégories de denrées et pour les 4 métaux cibles. Nb. Pour des raisons de lisibilité les écarts-types ne sont pas représentés. Des lettres différentes indiquent une différence statistique au seuil $p < 0,05$	96
Figure 32- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome, cobalt, manganèse (en mg.kg^{-1} matière sèche, MS) dans le foie et le muscle de bœufs, cerfs, porcs et poulets. Les concentrations des blancs et jaunes d'œufs sont également présentées. Des lettres différentes indiquent une différence statistique au seuil $p < 0,05$. Remarque- les œufs sont considérés à part dans l'analyse statistique ; la différence, si elle est mentionnée, concerne la comparaison jaune/blanc).	99
Figure 33- Moyennes par catégories de denrées et communes de prélèvements, tout organe confondu.	105
Figure 34- Diagrammes en boîte des concentrations en Cr, Co, Cu, Fe et Mn (mg kg^{-1} MS), mesurées dans les foies et les muscles de bœufs issus de différentes communes ($n = 26$ par type d'organe).	105
Figure 35- Diagrammes en boîte des concentrations en Cr, Co, Cu, Fe et Mn (mg kg^{-1} MS), mesurées dans les foies et les muscles de cerfs issus de différentes communes ($n = 10$ par type d'organe).	105
Figure 36- Diagrammes en boîte des concentrations en Cr, Co, Cu, Fe et Mn (mg kg^{-1} MS), mesurées dans les foies et muscles de porcs issus de différentes communes ($n = 27$ par type d'organe).	106
Figure 37- Diagrammes en boîte des concentrations en Cr, Co, Cu, Fe et Mn (mg kg^{-1} MS), mesurées dans les blancs et les jaunes d'œufs issus de différentes communes ($n = 11$ par type d'organe).	106
Figure 38- Mesures in situ du pH des échantillons d'eau prélevés.	114
Figure 39- Mesures in situ de la conductivité des échantillons d'eau prélevés.	114
Figure 40- Caractérisation des échantillons d'eau analysés selon un diagramme de Piper (Superficielle Su ; Souterraine So ; Non Mentionné NM).	115
Figure 41- Distribution des concentrations en Magnésium (mg.L^{-1}) dans les eaux prélevées.	116
Figure 42- Contexte géologique des bassins versants en amont des échantillons d'eau analysés.	118
Figure 43- Contexte hydrogéologique des échantillons d'eau analysés sur la commune de La Foa.	119
Figure 44- Contexte hydrogéologique des échantillons d'eau analysés sur la commune de Thio.	120
Figure 45- Contexte hydrogéologique des échantillons d'eau analysés sur la commune de Poya.	121
Figure 46- Diagrammes en boîte des concentrations des 10 éléments (en mg.kg^{-1} MS) chez les invertébrés (en rose, $n= 20$) et les poissons (en bleu, $n= 67$).	122

Figure 47- Concentrations des 10 éléments (en mg.kg^{-1} MS) dans les organismes prélevés sur substrat ultrabasique (en brun, $n=53$) et volcano-sédimentaires (en vert, $n=34$). a/diagrammes en boîte des concentrations de tous les organismes aquatiques ; b/ concentrations moyennes des crevettes prélevées à Kouaré (sur substrat ultrabasique, $n=5$) et à Pocquereux (sur substrat volcano-sédimentaire, $n=5$)..... 123

Figure 48- Diagrammes en boîte des concentrations des 10 éléments (en mg.kg^{-1} MS) pour les poissons sur substrat ultrabasique soumis aux activités minières (en rouge, $n= 16$) et non soumis aux activités minière (en moutarde, $n= 22$)..... 124

Figure 49- Concentrations moyennes (barres bleues) et médianes (barres orange) (mg kg^{-1} , matière fraîche, MF) en cobalt, chrome, manganèse et nickel mesurées dans les différentes catégories de denrées alimentaires produites, et/ou consommées localement. Dans ce rapport, les teneurs en matière fraîche des denrées aquatiques ont été estimées (mollusque bivalve 15% MS, poisson 28% MS, crabe et crevette 25%), les concentrations en matières fraîches sont donc évaluées à des fins de comparaison entre catégorie. 130

Liste des tableaux

Tableau 1- Quantités (tonnes) de viandes importées et produites localement (2022) par grande catégorie de denrées carnées, et taux de couverture des besoins annuels par la production locale. NA = données non disponibles.....	39
Tableau 2- Principaux fruits locaux commercialisés en 2020, 2021, et 2022. Sources- Enquêtes mensuelles DAVAR / Arbofruits, marché de gros. Synthèse agricole DAVAR 08/2023.	41
Tableau 3- Principaux fruits commercialisés en 2020, 2021 et 2022. Source- ISEE – Direction régionales des douanes.....	41
Tableau 4- Principaux légumes locaux commercialisés en 2020, 2021, et 2022. Sources- Enquêtes mensuelles DAVAR / Arbofruits, marché de gros. Synthèse agricole DAVAR 08/2023.	42
Tableau 5- Principaux légumes commercialisés en 2020, 2021 et 2022. Sources- ISEE – Direction régionales des douanes.....	42
Tableau 6- Liste des 5 items produits localement les plus consommés par les populations calédoniennes, par catégorie d'aliment. L'échantillonnage a donc été orienté de façon préférentielle vers ces denrées. Dans chaque catégorie, ils sont présentés de façon décroissante quant à la leur quantité consommée.....	43
Tableau 7- Fréquences de consommation des aliments centre La Foa (adultes et enfants), Nouvelle-Calédonie (n = 51). Données issues du projet METEXPO, fournies par le consortium METALICA.	45
Tableau 8- Fréquences de consommation des aliments centre Poya/Nepoui (adultes et enfants), Nouvelle-Calédonie (n = 24). Données issues du projet METEXPO, fournies par le consortium METALICA-Santé.	45
Tableau 9- Fréquences de consommation des aliments centre Thio (adultes et enfants), Nouvelle-Calédonie (n = 56). Données issues du projet METEXPO, fournies par le consortium METALICA-Santé.	46
Tableau 10- Denrées végétales les plus consommées dans les trois micro-régions cibles. Ces données sont issues des questionnaires alimentaires du projet METEXO. Sont indiqués : l'effectif (n) et la fréquence hebdomadaire de consommation en nombre de fois par semaine/ fournies par le consortium METALICA-Santé.....	46
Tableau 11- Consommations journalières (en g.j ⁻¹) de fruits et légumes par grandes-régions géographiques. Données issues de l'étude sur les cancers de la thyroïde.	47
Tableau 12- Denrées animales les plus consommées dans les trois micro-régions cibles. Ces données sont issues des questionnaires alimentaires du projet METEXO. Sont indiqués : l'effectif (n) et la fréquence hebdomadaire de consommation (en nombre de fois par semaine) fournie par le consortium METALICA-Santé.	47
Tableau 13- Récapitulatif des traitements appliqués aux différentes sous-parties des échantillons végétaux récoltés. C ou H Chair ou Cœur de l'Ananas, respectivement, C, Chair, P, Peau, G, Graine, I intégralité de l'item avec lavage (par exemple feuilles et tiges de brèdes) ; N intégralité de l'item sans lavage	53
Tableau 14- Limites de détection (LD) des analyses élémentaires réalisées par ICP-MS sur les denrées végétales. Ces données sont fournies par le prestataire Bureau Veritas LTD. Canada.	54
Tableau 15- Évaluation de la reproductibilité des résultats sur les 10 éléments également analysés dans les viandes. Moy, moyenne des duplicatas, sd, écart-type des duplicatas, et CV, coefficient de variation ((sd/Moy.) x 100).	55
Tableau 16- Limite de quantification (LOQ) de l'ICP-MS des analyses élémentaires réalisées sur les denrées animales. Ces données sont fournies par le prestataire Inovalys, Nantes, France.....	56
Tableau 17- Évaluation de la reproductibilité des résultats.	56
Tableau 18- Limite de détection (LD) de l'ICP-MS des analyses élémentaires réalisées sur les denrées animales aquatiques. Ces données sont fournies par le service d'analyses des roches et minéraux (SARM) du CNRS, Vandoeuvre-les-Nancy, France.....	57
Tableau 19- Origines géographiques des 160 échantillons dont les analyses élémentaires ont été validées.....	59
Tableau 20- Pourcentages de concentrations supérieures et inférieures aux LD par élément.	60
Tableau 21- Pourcentages d'échantillons, par élément et par type de denrée, dont les concentrations ont été quantifiées. Dans ce tableau, ne sont pas mentionnées les éléments suivants Bi, Te, Th, W, et B, Cr, Cu, Mg, P, Zn ; puisque, leurs concentrations n'ont jamais pu être quantifiées ou ont été quantifiées dans l'ensemble des échantillons, respectivement.	61
Tableau 22- Type de denrée échantillonnée, nombre et nature des échantillons animaux.....	61
Tableau 23- Origine géographique à l'échelle communale des échantillons prélevés de denrées animales, Remarque- Bien qu'issues de trois localités différentes, les biomasses de roussettes ont été mélangées, les concentrations mentionnées dans ce rapport sont donc représentatives d'une donnée moyenne.	62
Tableau 24- Pourcentage de concentrations quantifiées par élément et pour les analyses de denrées animales agricoles, tout organes confondus (n = 164). Les valeurs de LOQ sont mentionnées dans le tableau 16.	63
Tableau 25- Valeurs moyennes (en mg kg ⁻¹ MS), écart-types (sd), min-max, limite de détection (LD) et % de valeurs < à la LD pour les 10 éléments analysés, tous individus et toutes espèces confondues (N= 87). Sd = écart-type.	64

Tableau 26- Concentrations en cobalt (Co), chrome (Cr), manganèse (Mn), et nickel (Ni) (mg kg^{-1} MS) mesurées dans les différentes catégories de denrées agricoles végétales. Les valeurs moyennes, les écarts-types (sd), les médianes, le rapport médiane/moyenne, les valeurs minimales (Min.) et maximales (Max.) ainsi que le ratio entre les deux, sont présentées dans ce tableau. Nb. Hormis les céréales, les données sont toutes issues de denrées produites ou prélevées sur le territoire de la Nouvelle-Calédonie..... 65

Tableau 27- Moyennes, écarts-types (sd), médianes, minima (Min.), et maxima (Max.), des concentrations moyennes (mg kg^{-1} ou %, en matière sèche MS) par catégorie de denrées. Les effectifs (N) utilisés pour ces calculs sont $n=5$ pour les céréales (riz d'importation), $n=29$ pour les légumes feuilles, $n=30$ pour les légumes racines, $n=48$ pour les légumes fruits, et $n=38$ pour les fruits. Seuls sont indiqués dans ce tableau, les éléments pour lesquels les concentrations étaient quantifiées dans plus de 50% des échantillons. 69

Tableau 28- Bilan bibliographique (non exhaustif) des concentrations élémentaires mesurées dans différentes denrées végétales, et contextes agropédologiques. 73

Tableau 29- Concentrations en Al (%), Ga, Sb, Tl et U (en mg.kg^{-1} MS) dont les valeurs étaient supérieures aux LOQ ; seules certaines denrées étaient concernées. 74

Tableau 30- Seuils maximums des concentrations en cadmium (mg.kg^{-1} matière fraîche) contenues dans les végétaux destinés à l'alimentation humaine, et définis par la commission Européenne. Les seuils sont définis considérant des masses fraîches de denrées. Remarque- l'ensemble des seuils maximums définis n'est pas décrit dans ce tableau ; ici, ont été répertoriées les données d'intérêt pour une comparaison aux données acquises. . 77

Tableau 31- Seuils maximums des concentrations en plomb (mg.kg^{-1} matière fraîche) contenues dans les végétaux destinés à l'alimentation humaine, et définis par la commission Européenne. Les seuils sont définis considérant des masses fraîches de denrées. Remarque- l'ensemble des seuils maximums définis n'est pas décrit dans ce tableau ; ici, ont été répertoriées les données d'intérêt pour une comparaison aux données acquises. 77

Tableau 32- Seuils maximums des concentrations en nickel (mg.kg^{-1}) contenues dans les végétaux destinés à l'alimentation humaine, et définis par la commission Européenne selon le règlement 2024/907. Les seuils sont définis considérant des masses fraîches de denrées, et ne seront applicables qu'à compter du 1^{er} juillet 2025. . 78

Tableau 33- Teneurs moyennes en eau (%) et matière sèche (MS) des différents items et catégories des denrées agricoles végétales échantillonnées dans le cadre de l'étude. Sd- écarts types. ANA/MAG, ananas et mangues ; AVO, avocat ; BAN, bananes ; ORA/MAN, oranges et mandarines ; PAP, papayes ; BRE, brèdes ; CBL, choux blancs ou verts, CCH, choux de Chine ; CKA, choux Kanak ; SAL, salades ; CHO, chouchoutes ; CIT, citrouilles ; CON, concombres ; COU, courgettes ; TOM, tomates ; CAR, carottes ; IGN, ignames ; MAC, manioc ; PDT, pommes de terre ; TAR, taros. 79

Tableau 34- Concentrations moyennes en Co, Cr, Mn, et Ni par catégorie de denrées agricoles végétales, mentionnées en matière sèche et en matière fraîche. 80

Tableau 35- Concentrations (en matière fraîche, MF) en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb, dans les différents items de la catégories « fruits ». Les valeurs des moyennes, écarts-types (sd), médianes, minimum (min.) et maximum (max.) sont mentionnées. Notez que les concentrations en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb sont en ppm (mg.kg^{-1} MF), et les concentrations en Hg sont en ppb ($\mu\text{g.kg}^{-1}$ MF). Les concentrations maximales tolérées (CMT) sont indiquées en police rouge. Les valeurs de CMT sont issues du NHCP (National Health Commission, Chine) pour As, Cr, Hg, et Ni, et du journal officiel de l'Union Européenne pour Cd, Ni et Pb (ntot=31). 80

Tableau 36- Concentrations (en matière fraîche, MF) en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb, dans les différents items de la catégories « légumes feuilles ». Les valeurs des moyennes, écarts-types (sd), médianes, minimum (min.) et maximum (max.) sont mentionnées. Notez que les concentrations en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb sont en ppm (mg.kg^{-1} MF), et les concentrations en Hg sont en ppb ($\mu\text{g.kg}^{-1}$ MF). Les concentrations maximales tolérées (CMT) sont indiquées en police rouge. Les valeurs de CMT sont issues du NHCP (National Health Commission, Chine) pour As, Cr, Hg, et Ni, et du journal officiel de l'Union Européenne pour Cd, Ni et Pb (ntot = 24). 81

Tableau 37- Concentrations (en matière fraîche, MF) en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb, dans les différents items de la catégories « légumes fruits ». Les valeurs des moyennes, écarts-types (sd), médianes, minimum (min.) et maximum (max.) sont mentionnées. Notez que les concentrations en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb sont en ppm (mg.kg^{-1} MF), et les concentrations en Hg sont en ppb ($\mu\text{g.kg}^{-1}$ MF). Les concentrations maximales tolérées (CMT) sont indiquées en police rouge. Les valeurs de CMT sont issues du NHCP (National Health Commission, Chine) pour As, Cr, Hg, et Ni, et du journal officiel de l'Union Européenne pour Cd, Ni, et Pb (ntot=53). 82

Tableau 38- Concentrations (matière fraîche, MF) en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb, dans les différents items de la catégories « légumes racines ». Les valeurs des moyennes, écarts-types (sd), médianes, minimum (min.) et maximum (max.) sont mentionnées. Notez que les concentrations en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb sont en ppm (mg.kg^{-1} MF), et les concentrations en Hg sont en ppb ($\mu\text{g.kg}^{-1}$ MF). Les concentrations maximales tolérées (CMT) sont indiquées en police rouge. Les valeurs de CMT sont issues du NHCP (National Health Commission, Chine) pour As, Cr, Hg, et Ni, et du journal officiel de l'Union Européenne pour Cd, et Pb. La CMT pour le nickel concernant les

<i>huiles et produits oléagineux, mais en l'absence d'autres seuils, il est donné à titre indicatif pour Cd, et Pb. La CMT pour le nickel concernant les huiles et produits oléagineux, mais en l'absence d'autres seuils, il est donné à titre indicatif (ntot=25).</i>	83
<i>Tableau 39- Concentrations moyennes (et écarts-types, sd) des différents éléments mesurés dans des couples de denrées nettoyées ou non à l'eau ultra-pure avant analyse.</i>	84
<i>Tableau 40- Concentrations moyennes (et écarts-types) en Co, Cr, Mn, et Ni mesurées après extractions de sols à l'EDTA 0,05 M durant 1h. Les moyennes sont présentées par région géographique pour les régions dont les sols ont pu être échantillonnés.</i>	89
<i>Tableau 41- Concentrations moyennes (et écarts-types) en Co, Cr, Mn, et Ni mesurées après extractions de sols à l'EDTA 0,05 M durant 1h. Les moyennes sont présentées par région géographique pour les régions dont les sols ont pu être échantillonnés. Les données de Boulouparis, sont considérées dans ce tableau dans la région Grand Sud.</i>	92
<i>Tableau 42- Concentrations moyennes (Moy) et écarts-types (sd) en Co, Cr, Mn et Ni, mesurées dans les sols après extractions à l'EDTA-1h (en mg kg⁻¹) et classifiées selon la nature du substrat géologique en place (UB, ultrabasique, VS, volcano-sédimentaire).</i>	92
<i>Tableau 43- Valeurs des moyennes, écarts-types (sd), médianes, minima (Min.) et maxima (Max.) des pH eau et KCl des sols, et des concentrations extraites à l'EDTA 0,05M pour Co, Cr, Mn, Ni. Les extractions sols : EDTA ont été réalisées durant 1h, et les concentrations ainsi obtenues sont susceptibles de renseigner sur les réservoirs rapidement mobilisables dans l'environnement, et potentiellement biodisponibles.</i>	93
<i>Tableau 44- Résumé des CMT, du nombre total d'échantillons et de dépassements de la CMT par catégorie de denrées agricoles végétales (ntot = 145 analyses de denrées agricoles végétales réalisées et validées analytiquement). Pas de CMT de référence pour Mn et Co. Pour le nickel, les CMT du NHFPC (Chine) et de l'Union Européenne (UE 2023/015) sont mentionnées, néanmoins celles de l'UE ne seront appliquées qu'à compter du 1^{er} juillet 2025 pour les fruits et légumes, et 2026 pour les céréales.</i>	97
<i>Tableau 45- Concentrations moyennes (mg.kg⁻¹ matière sèche, MS) en cuivre, fer et zinc (±sd, écarts-types) mesurées dans la chair de foie ou de muscle de bœuf, cerf, porc et poulet ; ainsi que dans le blanc et jaune d'œuf. Des lettres différentes indiquent une différence statistique au seuil p < 0,05. Remarque- les œufs sont considérés à part dans l'analyse statistique ; la différence, si elle est mentionnée, concerne la comparaison jaune/blanc.</i>	100
<i>Tableau 46- Concentrations moyennes et maximales des éléments rarement quantifiés, arsenic, As, cadmium, Cd, nickel, Ni, plomb, Pb, dans les différents organes et denrées étudiées. < LOQ, signifie que les concentrations de l'échantillons sont inférieures aux limites de quantification.</i>	101
<i>Tableau 47- Concentrations élémentaires mesurées dans les échantillons d'escargot, de roussette et de cochon sauvage qui ont pu être récoltés dans le cadre de METALICA-Aliment. Ces échantillons proviennent tous du milieu naturel.</i>	102
<i>Tableau 48- Concentrations (en matière fraîche, MF) pour les différents éléments, denrées et organes étudiés. Dans ce tableau, les concentrations inférieures à la LOQ (en matière sèche) ont été remplacées par la valeur LOQ/2 puis converties en matière fraîche en tenant compte de la teneur en matière sèche de chaque catégorie de denrée. Les concentrations en police rouge dépassent la valeur de la CMT (concentration maximale tolérée) de la denrée concernée. Pour les roussettes, les CMT prises en compte sont celles des volailles, pour les cochons sauvages, celles des porcs ; pour les escargots, celles des mollusques bivalves, et pour les cerfs, celles des bovins. Les CMT prises en compte sont issues du journal officiel de l'UE pour Cd et Pb ; sauf pour les œufs pour lesquels les valeurs sont issues du NHFPC. Enfin les CMT pour As et Cr, sont issues du NHFPC.</i>	102
<i>Tableau 49- Concentrations maximales tolérées (CMT) en mg.kg⁻¹ MF (matière fraîche) décrites dans le journal officiel de l'Union Européenne (règlement (UE) 2023/915 de la commission du 25 avril 2023) ou dans le NHFPC. Seules les CMT d'intérêt pour l'étude METALICA-Aliment ont été relevées dans ces tableaux.</i>	103
<i>Tableau 50- Concentrations en As, Cr, Cd, Cu, Ni et Pb, dans la chair (muscle, et foie) de différentes catégories d'animaux d'élevage et issues de différentes études recouvrant une gamme de pays, de typologie d'élevage et de contextes de contamination (bilan non exhaustif).</i>	103
<i>Tableau 51- Concentrations en Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn (mg kg⁻¹ MS) mesurées dans les aliments destinés à l'élevage porcin. Les identifications producteurs, mentionnées, sont anonymisées de façon aléatoire ; elles ne renseignent ni sur une identification officielle, ni sur aucune autre source potentielle d'identification.</i>	108
<i>Tableau 52- Échantillons de viandes et d'ovoproduits analysés et nombre de dépassement des CMT par éléments.</i>	109
<i>Tableau 53- Échantillons de denrées animales terrestres autres et nombre de dépassement des CMT par éléments.</i>	109

Tableau 54- Concentrations moyennes en Co, Cr, Mn et Ni (mg.kg^{-1}) mesurées dans les extractions de sol (METALICA-Aliment) avec de l'EDTA 0,05M durant 1h. Les moyennes présentées par communes sont réalisées sur l'horizon 00-20 cm.....	110
Tableau 55- Concentrations moyennes en Co, Cr, Mn et Ni (mg.kg^{-1}) mesurées dans les extractions de sol (ValoPRO-NC) avec de l'EDTA 0,05M durant 24h. Les moyennes présentées par communes sont réalisées sur l'horizon 00-30 cm ©F. Juillot / ValoPRO-NC.	111
Tableau 56- Contexte météorologique des prélèvements d'eau.	112
Tableau 57- Caractéristiques des 31 échantillons d'eau prélevés et mesures in-situ.....	113
Tableau 58- Résultats des 17 échantillons d'eau analysés en laboratoire.	115
Tableau 59- Mise en évidence de dépassements de certaines valeurs.	117
Tableau 60- Valeurs des concentrations (en mg.kg^{-1} MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour As en fonction du type de milieux et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 0,05mg/kg.	125
Tableau 61- Valeurs des concentrations (en mg.kg^{-1} MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Co en fonction du type de milieux et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 0,01mg/kg.	125
Tableau 62- Valeurs des concentrations (en mg.kg^{-1} MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Cr en fonction du type de milieux et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 0,05mg/kg.	126
Tableau 63- Valeurs des concentrations (en mg.kg^{-1} MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Cu en fonction du type de milieux et catégories d'espèces. Le %<LOQ indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 0,5mg/kg.	127
Tableau 64- Valeurs des concentrations (en mg.kg^{-1} MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Fe en fonction du type de milieux et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 21mg/kg.	127
Tableau 65- Valeurs des concentrations (en mg.kg^{-1} MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Ni en fonction du type de milieux et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 3,5 mg/kg.....	128
Tableau 66- Valeurs des concentrations (en mg.kg^{-1} MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Zn en fonction du type de milieux et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 3 mg/kg.....	129

1. CONTEXTE & PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

1.1. LA NOUVELLE-CALEDONIE = UNE TERRE DE METAUX

La Nouvelle-Calédonie, archipel français du Pacifique sud-ouest, est mondialement connue pour la richesse en minerais de ses couvertures d'altération (Latham et al., 1978). Ainsi près d'un tiers du territoire est recouvert de substrat ultrabasique : la nappe des péridotites (Avias, 1967), lié au phénomène d'obduction d'un complexe ophiolitique (Cluzel et al., 2001). Les sols développés sur ce type de substrat présentent des concentrations en éléments métalliques (EM) particulièrement importantes. À titre d'exemple, les concentrations en chrome et en nickel peuvent atteindre 30 000 mg.kg⁻¹ et 10 000 mg.kg⁻¹, respectivement. L'économie néo-Calédonienne repose de fait, majoritairement sur l'exploitation des ressources minérales, et les travaux, notamment scientifiques, liés directement ou indirectement à la filière « mine » sont nombreux (de façon non exhaustive) :

- géologie, pédologie, flore ou microbiologie (Becquer et al., 2001 ; Carriconde et al. 2019 ; Dublet et al., 2012 ; 2015 ; Fandeur et al., 2009 ; Gei et al., 2020 ; Gourmelon et al., 2016 ; Houles et al., 2018 ; Lagrange et al., 2011 ; Latham, 1986 ; Latham et al., 1978 ; L'Huillier et al., 2010 ; Isnard et al., 2016 ; Jaffré et al., 1974 ; 1977 ; 1979 ; 1980 ; 1998a, 1998b ; 2010 ; 2013 ; Quantin et al., 2001 ; 2002 ; Pillon et al., 2010 ; 2019 ; Read et al., 2006 ; Wulff et al., 2013 ; 2017),

- impact environnemental de l'extraction minière sur l'érosion (Demenois et al., 2017a ; 2017b ; 2018a ; 2018b ; 2020), la revégétalisation (Losfeld et al., 2015), la dispersion des métaux dans l'environnement par les eaux superficielles (Gunkel-Grillon et al., 2014) ou encore par les dépôts atmosphériques (Fry et al., 2021 ; Roth et al., 2018 ; Pasquet et al., 2015, 2016, 2018).

Au-delà de ces formations superficielles spécifiques, d'autres types de sols peuvent également contenir des concentrations notables en EM (Vincent et al., 2018). Dans les Cambisols, celles-ci excèdent rarement 1 000 mg.kg⁻¹, tandis que dans les Fluvisols elles demeurent encore mal caractérisées, bien que ces sols, en raison de leur fertilité naturelle élevée, soient largement exploités à des fins agricoles sur le territoire. Il peut être attendu que les concentrations en EM dans ces types de sols dépendent de la nature de la couverture pédologique et géologique des bassins versants en amont, et que certaines pourraient se rapprocher de celles rencontrées dans des Ferralsols dans les situations les plus extrêmes comme c'est le cas dans certains sédiments de mangroves développés très en aval des couvertures ferrallitiques (Noel et al. 2017 ; Marchand et al., 2012 ; 2016). Il est étonnant de constater que les connaissances des EM en contexte agricole sont rares alors même qu'une partie de la population subvient directement à ses besoins alimentaires par l'exploitation animale et végétale agricole. Ainsi, si la biogéochimie des Ferralsols cultivés ont fait l'objet de quelques études notamment avec une vocation de valorisation agricole (Becquer et al., 1995 ; 2001 ; 2003 ; 2006 ; 2010), le transfert des EM vers les ressources agricoles demeure méconnu tout autant que leur caractérisation dans les autres types de sols. Certains auteurs ont pourtant fait état de concentrations parfois marquées des différents organes des plantes cultivées sur Ferralsols et mis en exergue des phénomènes de phytotoxicité, notamment sur les situations de bas de pente, dont les sols subissent des périodes, plus ou moins longues, d'hydromorphie (Becquer et al., 1995 ; Edighoffer et Bourdon, 1994 ; L'Huillier et Edighoffer, 1996). Ces résultats, bien que disparates, indiquent des transferts d'EM vers les végétaux cultivés, et questionnent sur la contamination des denrées agricoles consommées.

De récentes études ont suggéré que la géologie locale aurait une part déterminante dans les sources d'exposition menant à une contamination de tous les milieux et contribuant à accroître la charge corporelle en nickel par voie inhalatoire (poussières) et par voie orale (eau, alimentation, poussières) (Projet METEXPO, Cordier et al., 2017). Le nickel et le chrome ont été trouvés en quantité importante dans les urines des populations humaines néo-Calédoniennes (Cordier et al., 2017 ; St-Jean et al., 2018). Respectivement 13% et 90% des enfants présentaient des urines dont les concentrations en nickel et en chrome dépassaient les concentrations de référence (St-Jean et al., 2018). Les concentrations élevées en nickel dans les urines seraient reliées à la présence de sols développés sur des roches ultrabasiques (péridotites, serpentinites) et/ou basiques (basaltes). Dans le cas du chrome, d'autres sources doivent être explorées puisque par exemple, de très fortes concentrations en chrome ont été également mesurées à Lifou, une des Îles Loyauté (St-Jean et al., 2018) dont les sols se sont développés sur des substrats pédo-géologiques largement différents de ceux de la Grande Terre (Latham et Mercky, 1981). Bien qu'aucun lien direct entre métaux et cancer n'ait été établi à l'heure

actuelle en Nouvelle-Calédonie, force est de constater que l'incidence des cancers de la thyroïde aux Îles Loyauté est parmi les plus élevée au monde (Truong et al., 2007).

Ainsi, au regard de l'importance des mécanismes de transfert des EM dans les écosystèmes, et des risques pour le Vivant, différents projets traitent de cette problématique :

- **CAMEVAL**, « Caractérisation quantitative et qualitative des poussières émises par les activités minières et évaluation des risques sanitaires associés » CNRTEC (Coord. GSMA-Université de Reims).

- **ChroNick**, Le chrome et le nickel dans les sols de Nouvelle-Calédonie : Influence des forçages environnementaux et humains sur la biodisponibilité et la mobilité vers la ressource en eau, CNRTEC (Coord. IRD-UPMC).

- **DMML**, Dispersion des Métaux de la Mine au Lagon, CNRTEC (Coord. Université de Bordeaux – UMP EPOC CNRS 5805).

- **Dynamine**, Dynamique des métaux de la mine au lagon dans l'hydrosphère en Nouvelle Calédonie, CNRTEC (Coord. IRD-UPMC).

- **NICKEL-CHROME**, « Étude de l'exposition humaine aux métaux nickel et chrome via l'eau de distribution de l'Île des Pins, Houaïlou, Poya et Lifou. » Cresica (Coord. CHT).

- **PEMPOM**, « Polluants émergents polluants organiques et métaux lourds : sources et devenir dans les écosystèmes recifo-lagonaires en Nouvelle-Calédonie. » Cresica, (Coord. UNC).

- **Quavar**, « Qualité des eaux douces et valeurs de rejet pour les cours d'eau des milieux ultramaïques » CNRTEC (Coord. UNC).

Les études ayant trait aux transferts d'EM en contexte agricole sont plus rares, peuvent-être cités le projet ValoPRO-NC, « valorisation des produits résiduels organiques pour une agriculture durable en Nouvelle-Calédonie », financé par l'appel à projets Graines 2017 (Klein et al., 202a ; 2023b ; Léopold et al., 2022) et coordonné par l'IAC, ou encore le projet ChroNick avec un volet sur les amendements utilisés pour les cultures (tâche coordonnée par l'IAC, projet coordonné par l'IRD-UPMC). Néanmoins, des résultats préliminaires issus du projet METEXPO (Cordier et al., 2017) suggèrent que :

- les fortes concentrations en nickel dans les urines étaient associées avec des consommations de légumineuses (adultes) et de jus de fruit frais (enfants)

- les fortes concentrations en chrome dans les urines des enfants étaient associées à une consommation de poisson d'eau douce

- les fortes concentrations en cobalt dans les urines des adultes étaient associées à des légumes racines cuisinés

- les fortes concentrations en manganèse dans les urines des enfants étaient associées à la consommation de fruits frais

La voie alimentaire représenterait une voie supplémentaire de contamination, néanmoins, il existe peu à pas de données à ce jour sur les concentrations en EM dans les aliments de consommation courante et produits localement en Nouvelle-Calédonie.

Outre le fond pédogéologique naturel, les métaux contenus dans les sols agricoles et denrées alimentaires ont probablement des origines diverses (i) l'activité minière par l'action de l'eau le long des bassins versants, susceptibles de déposer des alluvions enrichies en EM dans les zones inondables des Fluvisols, (ii) les poussières atmosphériques susceptibles de contaminer les sols et les denrées alimentaires par dépôts secs ou humides, (iii) les méthodes de fertilisation et/ou d'amendements, etc.

Sur le territoire, des programmes de recherche-développement ont été menés par l'ORSTOM dans les années 90, visant à la mise en valeur agricole des sols ferrallitiques ferritiques ou Ferralsol développés sur substrats ultrabasiques notamment péridotites (Par exemple, Bonzon et al., 1995 ; Bourdon, 1990a, 1990b ; Dubus et Becquer, 2001 ; L'Huillier et al., 1998). Un bilan complet lié à quatre années d'enquêtes chez les producteurs du Sud, a notamment permis une première évaluation des concentrations en EM des végétaux cultivés sur différents faciès de Ferralsols (Dupont et Bonzon,

1998). Concernant les Ferralsols, leur toposéquence influe directement et largement sur la biodisponibilité des éléments métalliques qu'ils contiennent. Ainsi, les concentrations DTPA¹ en nickel et en manganèse sont plus élevées dans les sols de plaines alluviales, particulièrement les plaines hydromorphes, suggérant une biodisponibilité importante dans ces zones, alors même qu'elles représentent celles qui sont largement mises en cultures, en comparaison des zones de glacis et de piémont (Becquer et al., 1995 ; 2001 ; 2003 ; 2006 ; Bonzon et al., 1997 ; Dupont et al., 2000 ; L'Huillier et Edighoffer, 1996). Les concentrations en EM des légumes et fruits sont généralement plus élevées sur les sols de plaine alluviale (Becquer et al., 2006 ; Dupont et Bonzon, 1998 ; L'Huillier et Edighoffer, 1996). D'autre part, les pratiques agricoles notamment de fertilisation phosphatée seraient susceptibles de favoriser la désorption de chrome sous sa forme hexavalente, et donc de favoriser la mobilité du chrome dans les agroécosystèmes (Becquer et al., 2010).

Bien qu'incomplets, les résultats obtenus sur les Ferralsols du territoire suggèrent (Dupont et Bonzon, 1998) :

- Des concentrations en nickel dans les cultures maraîchères plus importantes que dans les cultures fruitières

- Des concentrations en nickel dans les feuilles ou la peau des fruits généralement plus importantes que dans les fruits, ainsi les légumes feuilles, comme le chou chine, le poireau ou encore la salade, présentaient des concentrations en nickel comprises entre 15 et 50 mg.kg⁻¹ de matière sèche (MS)

- Des concentrations en nickel dans les légumes fruits, néanmoins potentiellement importantes

Au regard de la nature du sol étudié dans cette étude pionnière (Ferralsols développés sur péridotites), il peut être envisagé que les résultats obtenus sur les concentrations en EM représentent probablement des valeurs seuils hautes par rapport à l'ensemble des données qui pourraient être acquises à l'échelle du territoire. En effet, et bien que largement méconnu, la diversité agro-pédologique est particulièrement conséquente, et les concentrations totales et disponibles en EM le sont certainement tout autant. Néanmoins, et en première approche à la lecture de ces résultats, il peut être constaté que les concentrations sont particulièrement élevées en comparaison aux concentrations moyennes en EM des parties consommées des végétaux décrites dans la littérature (ADEME, 2017) :

- Cr : 0,01 à 1 mg.kg⁻¹MS pour le monde, 0 à 3 mg.kg⁻¹MS pour la France
- Ni : 0,1 à 5 mg.kg⁻¹MS pour le monde, 0,1 à 6 mg.kg⁻¹MS pour la France
- Co : 0,01 à 5 mg.kg⁻¹MS pour le monde, 0 à 1 mg.kg⁻¹MS pour la France

D'autre part, les premiers résultats obtenus par Dupont et Bonzon (1998), sont en accord avec la littérature. En effet, et bien que de grandes variations de comportements puissent être observées, la concentration en nickel dans les légumes feuilles est généralement plus élevée que dans les légumes fruits (ADEME, 2017). À une échelle mondiale, il a été suggéré que la capacité des arbres fruitiers à accumuler différents EM serait moindre que celle des céréales, légumes feuilles et légumes racines (ADEME 2017 ; Cheng et al. 2015 ; Roba et al. 2016 ; Samsøe-Petersen et al., 2002 ; von Hoffen et Saümel 2014). Des études ont toutefois montré que les fruits destinés à la consommation humaine pouvaient dépasser les concentrations maximales recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Les fruits, mais également les jus de fruits issus de différentes régions, sols et cultures peuvent ainsi être contaminés par divers EM, suggérant leur possible transfert du sol vers les organes consommés, ou la présence de contaminants sur les fruits dans les peaux sont consommées (Anastácio et al. 2018 ; Grembecka et Szefer 2013). Ainsi, les constats issus de METEXPO concernant l'impact potentiel de la consommation de jus de fruits ou de fruits frais sur les concentrations urinaires en EM, notamment chez les enfants, est à explorer.

Enfin, les capacités d'accumulation des plantes cultivées dépendent du type de « contamination » auquel elles sont exposées. Les légumes feuilles et fruits, sont plus susceptibles d'accumuler du nickel lorsqu'ils sont exposés à une contamination atmosphérique, alors que les légumes racines accumulent plus de nickel lors d'une contamination de sol (ADEME, 2017). Or ces différents types d'exposition des ressources agricoles sont des sources potentielles d'EM en Nouvelle-Calédonie.

¹ DTPA, acide diéthylènetriamine pentacétique

À ce jour, il n'existe pas d'études sur la contamination en EM des produits issus des élevages locaux ou des ressources animales naturelles. Or, les contaminations des animaux d'élevage, de chasse ou de leurs produits (œufs notamment), pourraient être effectives. En effet, les animaux sauvages ou élevés en plein air pourraient présenter des concentrations élevées en EM s'ils sont impactés par des dépositions atmosphériques chargées en EM (inhalation, ingestion de poussières ou de particules de terre), et si les sols sur lesquels ils sont développés sont chargés en EM. De plus, concernant les œufs, une revue de la littérature a indiqué des concentrations moyennes égales à 0,781 mg.kg⁻¹ de nickel et 0,368 mg.kg⁻¹ de chrome, avec une accumulation plus importante des EM dans les œufs de caille que dans les œufs de poules (Atamaleki et al., 2020).

S'il n'existe pas à ce jour d'inventaire exhaustif des teneurs en EM dans les aliments consommés, les résultats parcellaires disponibles suggèrent des ingestions conséquentes et inhabituelles en EM par les populations néo-Calédoniennes.

Bien que l'agriculture, qu'elle soit vivrière ou conventionnelle, constitue une voie essentielle d'approvisionnement alimentaire pour les populations locales, elle n'en représente pas l'unique source. La pêche, en particulier la pêche maritime, occupe une place prépondérante dans l'accès aux ressources d'origine animale, notamment en tribus. Elle représente plus de 3 700 tonnes de produits annuels, dont 65 % issus de prélèvements marins (Guyard et al., 2014). Les captures en rivière et la collecte de crabes constituent les principaux prélèvements après ceux effectués en mer, ces trois types de ressources constituant ainsi la majorité des produits halieutiques consommés en tribus. L'essentiel de ces captures est destiné à l'autoconsommation, chaque groupe domestique pouvant en consommer jusqu'à 400 kg par an.

Cependant, plusieurs travaux ont mis en évidence une contamination des poissons marins et lagunaires liée aux activités minières, bien que décroissante des zones côtières vers le large (Briand et al., 2014 ; Bonnet et al., 2014 ; Fey et al., 2019). Selon Metian et al. (2013), malgré une contamination notable, les risques sanitaires associés à leur consommation demeurent globalement faibles, à l'exception de l'arsenic, dont la présence avérée dans les eaux de surface en aval des sites miniers pourrait représenter un danger pour les populations (Schneider et al., 2020). Néanmoins, la détection de concentrations atteignant près de 40 mg.kg⁻¹ en chrome et 20 mg.kg⁻¹ en nickel dans les chairs de poissons anguilliformes lagunaires suggère un risque d'exposition *via* les produits halieutiques (Bonnet et al., 2014). En revanche, les données relatives à la contamination en éléments métalliques (EM) des ressources alimentaires dulçaquicoles et estuariennes restent encore limitées

Si l'alimentation constitue une voie potentielle d'exposition aux éléments métalliques (EM) pour les populations néo-calédoniennes, les données relatives à la contamination des ressources alimentaires demeurent encore limitées sur le territoire, en particulier dans les contextes agricoles. Le présent travail s'inscrit ainsi dans la continuité du projet METEXPO, en focalisant son attention sur la contamination métallique des aliments produits et consommés localement.

1.2. METAUX & PRODUCTIONS AGRICOLES

1.2.1. ORIGINE DES METAUX DANS LES AGROSYSTEMES

À l'échelle mondiale, les terres agricoles - hors surfaces forestières - couvrent près de 5 milliards d'hectares, soit environ la moitié des terres habitables et plus d'un tiers des terres émergées (Figure 1).

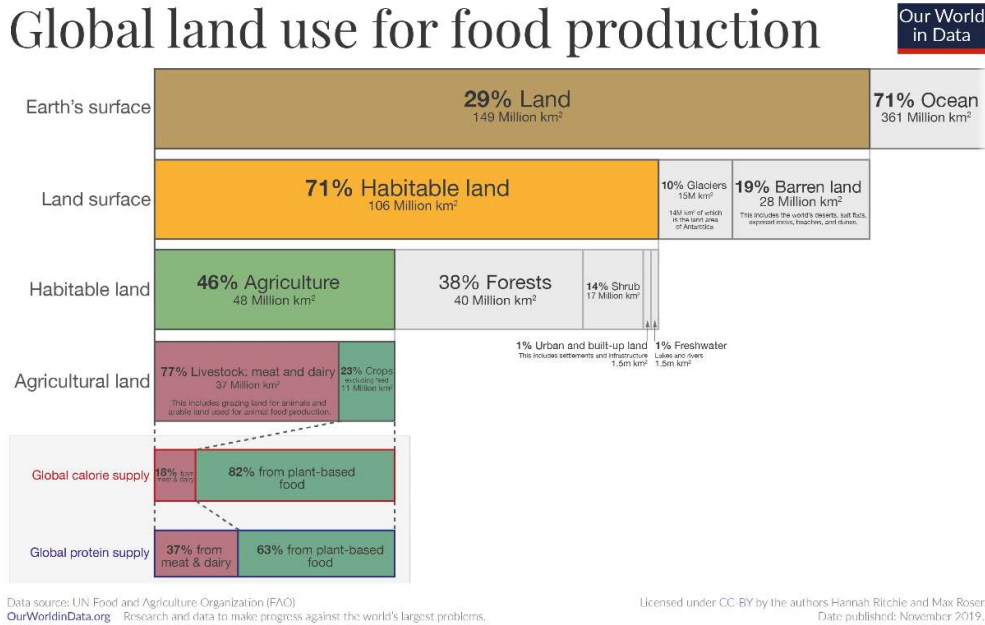


Figure 1- Occupation des terres émergées dans le monde (©FAO, Food and Agriculture Organization).

La présence de métaux dans les systèmes agricoles résulte à la fois de sources naturelles et anthropiques. Parmi les sources naturelles figurent les émissions atmosphériques liées à l'activité volcanique, les dépôts atmosphériques transportant des poussières continentales, ainsi que les métaux issus de l'altération des roches (Ernst, 1998).

Les sources anthropiques, quant à elles, sont multiples :

- la dispersion de métaux d'origine naturelle, notamment en lien avec l'activité minière, via le transport aérien de poussières ou par les cours d'eau (Douay et al., 2013) ;
- la proximité des agrosystèmes avec des zones urbanisées, exposées aux rejets des voies de communication (routières, aériennes) ou de sites industriels, qu'ils soient actuels ou passés ;
- l'utilisation de fertilisants (engrais minéraux chimiques, déchets organiques d'origines diverses) et de pesticides ;
- la mise en culture de sols préalablement contaminés par des activités humaines, en particulier industrielles (Farbat et al., 2002).

Dans les sols, le cobalt, le chrome, le fer, le manganèse et le nickel sont généralement considérés comme des métaux d'origine géogène, tandis que le cadmium, le plomb, le cuivre et le zinc proviennent le plus souvent de sources anthropiques (Mico et al., 2006).

1.2.2. TRANSFERTS DES METAUX DANS LE SYSTEME SOL-PLANTE DES AGROSYSTEMES

Les transferts de métaux vers les plantes sont des processus complexes et multifactoriels, les différents facteurs de contrôle pouvant interagir entre eux (Kabata-Pendias, 2004). Ils dépendent notamment :

- Du métal
- De sa spéciation
- De sa capacité à être mobilisé
- Des paramètres physico-chimiques et biologiques des sols
- Des conditions agro-environnementales
- De l'espèce et de la variété de plante
- Du stade de développement de la plante
- De la physiologie et des organes de la plante
- Des pratiques culturales : fertilisation, agriculture biologique, agriculture raisonnée
- De la qualité des eaux d'irrigation

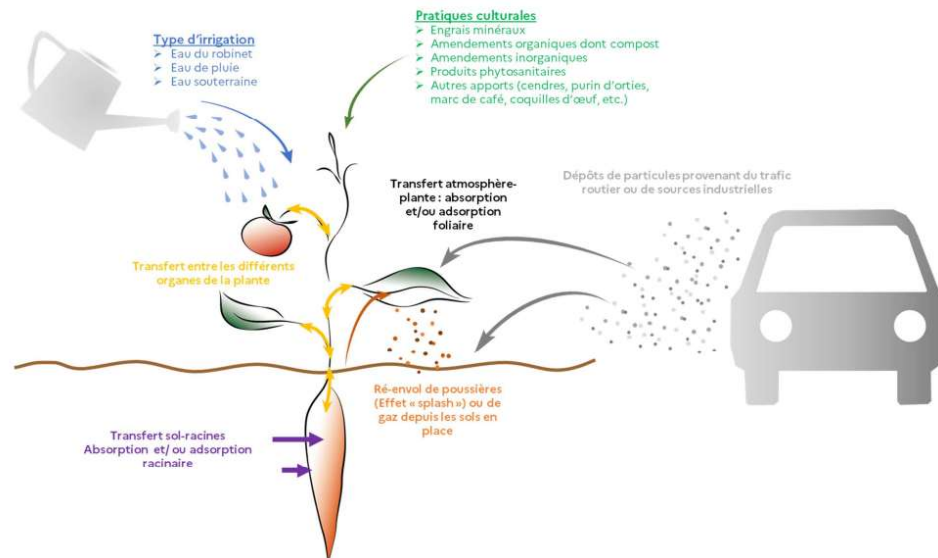


Figure 2- Grandes voies de transferts entre l'environnement et les cultures (© Ineris, Institut national de l'environnement industriel et des risques, France).

Les transferts d'EM de l'environnement vers les plantes s'effectuent principalement par deux voies :

- **L'absorption racinaire**, qui constitue la voie prédominante, notamment en contexte de contaminations métalliques d'origine pédologique.
- **L'absorption foliaire**, dont l'importance dépend de la qualité de l'air et, plus largement, des retombées atmosphériques. L'ampleur de ce type de contamination est fortement conditionnée par les activités environnant les zones cultivées (routes, industries, sites miniers), par la nature des substrats ainsi que par la composition des dépôts secs et humides. Ces derniers peuvent se déposer sur les feuilles et/ou les fruits, traverser leur cuticule et ainsi contribuer à la contamination métallique.

Il est généralement admis que la capacité d'accumulation des productions végétales agricoles, au-delà de leur nature intrinsèque, dépend de la source d'exposition. Ainsi, les contaminations atmosphériques tendent à favoriser l'accumulation d'éléments métalliques (EM) dans les légumes-feuilles et les fruits, tandis que les contaminations pédologiques affectent plus particulièrement les légumes-racines.

La capacité des plantes à accumuler des EM est le plus souvent quantifiée par le calcul du facteur de bioaccumulation ou de bioconcentration (BCF), défini comme le rapport entre la concentration en EM dans la plante et celle mesurée dans le sol (Équation 1).

$$BCF = [EM]_{\text{plante}} / [EM]_{\text{sol}} \quad (\text{Équation 1})$$

À l'échelle globale, les capacités de transfert des métaux dans les denrées végétales suivent généralement la séquence : fruits < légumes-fruits < légumes-racines < légumes-feuilles (ADEME, 2017 ; Cheng et al., 2015 ; Roba et al., 2016 ; Samsøe-Petersen et al., 2002 ; von Hoffen et Saümel, 2014). Cette tendance s'explique notamment par la croissance rapide des légumes-feuilles et leur taux élevé de transpiration, qui favorisent l'absorption racinaire des métaux puis leur translocation vers les parties aériennes de la plante (Kim et al., 2015 ; Roba et al., 2016).

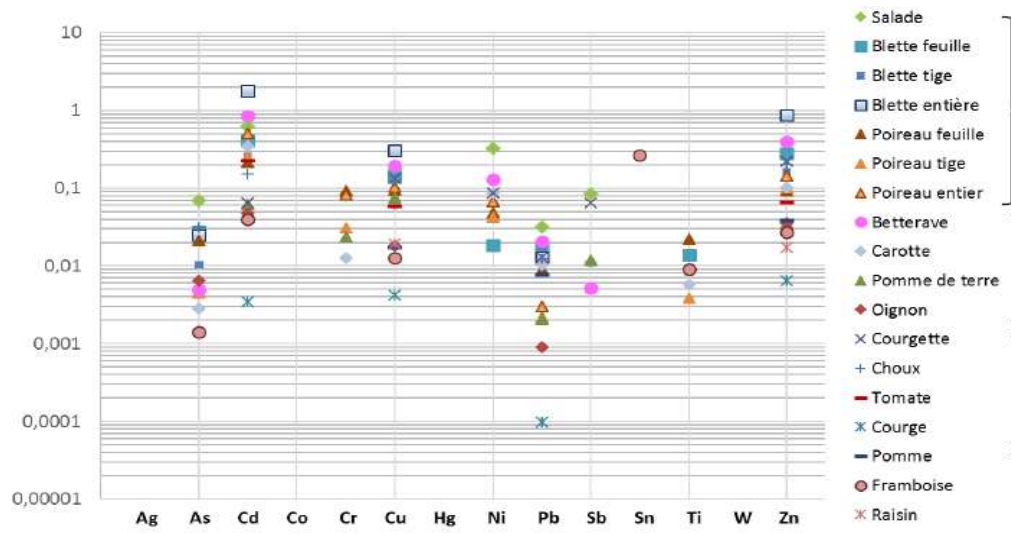


Figure 3- Logarithme des BCF pour différents éléments et cultures (organes consommés). Source- Ineris, 2017

1.3. L'IMPREGNATION DES POPULATIONS HUMAINES AUX METAUX :

Les métaux et métalloïdes présents dans l'environnement, et plus particulièrement dans les agro-éco-socio-systèmes, peuvent avoir des impacts sur la santé humaine. Certains éléments, tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le mercure (Hg) ou l'arsenic (As), sont considérés comme des toxiques systématiques, sans rôle biologique connu. D'autres éléments, dits oligo-éléments, sont indispensables à faible dose au bon fonctionnement physiologique des organismes, mais peuvent devenir toxiques lorsque leur concentration ou leur ingestion quotidienne dépasse un certain seuil (cuivre [Cu], nickel [Ni], zinc [Zn], etc.).

L'imprégnation des populations humaines par les éléments métalliques constitue une problématique de santé publique à l'échelle mondiale. À titre d'exemple, en France, la loi Grenelle de l'environnement (n° 2009-967 du 3 août 2009) a conduit à la mise en place d'un programme national de biosurveillance de la population. Préparé entre mai 2009 et mars 2010 par un Comité de pilotage animé par Santé publique France, ce programme a été intégré au Plan national santé environnement (PNSE) et reposait sur la réalisation de deux études.

L'une d'elles, l'étude nationale transversale Esteban (Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition), avait pour objectif d'estimer l'imprégnation de la population générale âgée de 6 à 74 ans à diverses substances environnementales, notamment les métaux et métalloïdes, et de mieux comprendre les déterminants de l'exposition. Pour la première fois, Esteban a permis de décrire l'exposition urinaire à un certain nombre de métaux chez les adultes -

aluminium, baryum, béryllium, bore, césium, iridium, lithium, manganèse, molybdène, or, palladium, platine, sélénium, thallium, tungstène et zinc - ainsi qu'à l'antimoine, au cobalt, à l'étain, à l'uranium et au vanadium chez les enfants vivant en France métropolitaine entre 2014 et 2016 (2 419 échantillons « adultes » et 1 052 échantillons « enfants » analysés pour les métaux urinaires).

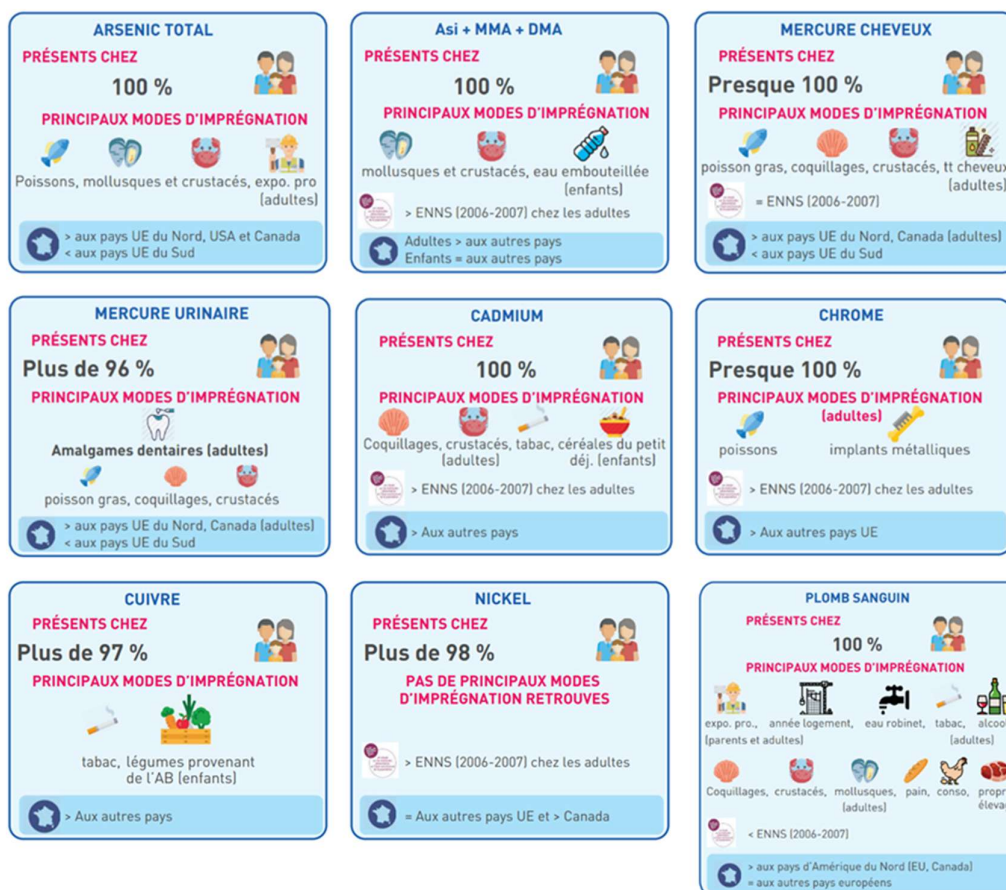


Figure 4- Pourcentages de quantification urinaire des éléments (As total, et inorganique (Asi), l'acide monométhylarsonique (MMA) et de l'acide diméthylarsinique (DMA), mercure, cadmium, chrome, et nickel), de mercure capillaire et de plomb sanguin. Les principaux modes d'imprégnation sont également mentionnés. Les niveaux mesurés par éléments sont également comparés à ceux mesurés dans l'étude ENNS (Étude Nationale Nutrition Santé) de 2006-2007 lorsqu'ils étaient disponibles.

Dans l'étude Esteban, les principaux déterminants de l'imprégnation des populations françaises par les éléments précédemment cités étaient :

- la consommation de poissons et de produits de la mer, influençant les concentrations en arsenic, cadmium, mercure et chrome ;
- la consommation de céréales, associée aux concentrations en cadmium, et en cuivre lorsque les céréales provenaient de l'agriculture biologique ;
- la consommation de légumes issus de l'agriculture biologique, qui influençait les concentrations en cuivre chez les enfants uniquement.

D'autres déterminants, indépendants de la consommation alimentaire, ont également été observés. Ainsi, la consommation de tabac était associée à des concentrations accrues en cadmium et en cuivre, les implants médicaux à des concentrations plus élevées en chrome, et les amalgames dentaires à une augmentation du mercure urinaire.

Pour le nickel, aucun déterminant d'exposition n'a été identifié comme associé aux concentrations chez les adultes ou les enfants, contrairement à l'étude ENNS, où la consommation de fruits et de légumes augmentait l'imprégnation par le nickel. Les auteurs de l'étude Esteban précisent cependant : « Toutefois, l'absence d'association entre les facteurs d'exposition disponible dans l'étude Esteban et l'imprégnation par le nickel doivent être interprétées avec précaution car les études transversales ne permettent pas à elles-seules de déterminer la causalité entre les sources d'exposition potentielles étudiées et les niveaux d'imprégnation mesurés. Ceci est particulièrement le cas pour les biomarqueurs d'exposition à demi-vie relativement courte, tel que le nickel, dosé à partir d'un prélèvement urinaire unique et ponctuel. Compte tenu de sa demi-vie relativement courte, l'absence d'association observée entre une source d'exposition potentielle et les niveaux d'imprégnation, ne signifie pas que cette source d'exposition ne constitue pas une source d'exposition au nickel. »

Cette étude illustre la pluralité des déterminants selon les éléments considérés. Ainsi, au regard des sources d'exposition variées en Nouvelle-Calédonie et de la diversité des contextes pédogéologiques, combinés aux impacts anthropiques potentiels liés aux activités minières sur les concentrations environnementales - particulièrement pour le nickel, le chrome, le manganèse et le cobalt - il est probable que les déterminants de l'imprégnation des populations néo-Calédoniennes diffèrent de ceux observés en France métropolitaine. Les aspects sanitaires seront détaillés dans le projet associé METALICA-Santé.

2. QUELS SITES D'ÉCHANTILLONNAGE ?

En Nouvelle-Calédonie, coexistent une très grande diversité de typologies agricoles - élevage extensif bovin, élevage hors sol, cultures végétales conventionnelles, cultures vivrières, etc. - ainsi que des variations importantes de géologie, de pédologie, de topographie et de climat. L'échantillonnage a donc été réalisé de manière non systématique, en raison du temps limité consacré au projet, afin de collecter un maximum d'informations sur une courte période et de répondre aux objectifs principaux :

- déterminer si les concentrations en éléments traces métalliques (ETM) dans les denrées agricoles consommées ou prélevées dépendent du lieu de production ou de prélèvement ;
- analyser les liens entre les concentrations en ETM et les conditions agro-pédo-climatiques.

Le CNRTEC et d'autres bailleurs financent depuis plusieurs années diverses études visant à comprendre les forçages naturels et anthropiques qui influencent la mobilisation des éléments métalliques dans les différents compartiments des agro-éco-socio-systèmes, notamment, mais pas exclusivement, en lien avec les filières minières.

Les questions scientifiques n'étant résolues qu'au fur et à mesure de l'avancée des recherches, il est nécessaire de conserver une approche intégrative dans la réalisation des projets, souvent complémentaires des travaux précédents. Ainsi, la sélection des sites d'étude centraux pour le projet METALICA-Aliment a été guidée par les résultats scientifiques acquis lors de projets antérieurs, dans un souci d'efficacité de la recherche. Le projet METEXPO (Cordier et al., 2017 ; St Jean et al., 2018) reste une étude pionnière pour l'évaluation des niveaux d'imprégnation et des déterminants de l'exposition humaine aux métaux en Nouvelle-Calédonie. C'est pourquoi les sites échantillonnés dans le cadre de METALICA-Aliment ont été choisis parmi les communes déjà étudiées lors de METEXPO (Figure 5).

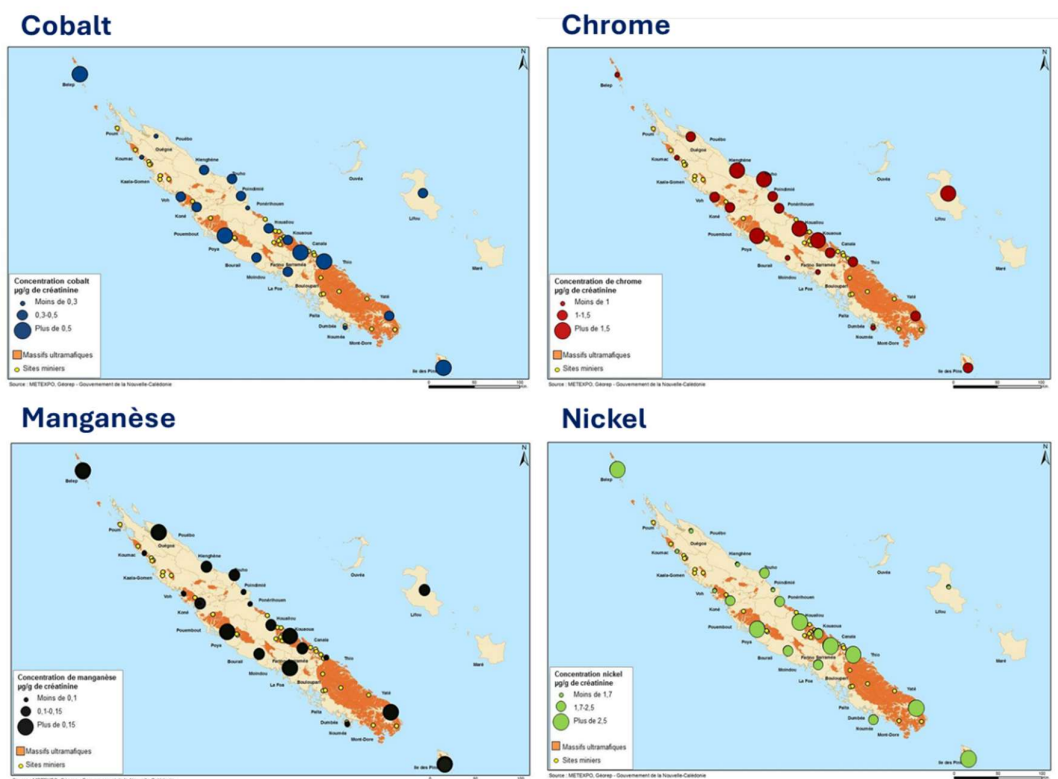


Figure 5- Représentation géographique des concentrations en cobalt, chrome, manganèse et nickel (en $\mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine) mesurées dans les urines des populations Calédoniennes, lors de l'étude METEXPO. Les massifs ultrabasiques et les sites miniers sont également représentés.

À l'issue de l'analyse des différents projets menés sur certaines communes, et au regard des profils d'imprégnation de la population par les métaux ciblés, les communes de La Foa (Province Sud), Thio (Province Sud) et Poya/Népoui (Province Sud/Nord) ont été identifiées comme des sites pertinents pour répondre aux objectifs du projet METALICA (Figure 6). La diversité de la couverture géologique et pédologique, ainsi que l'ampleur variable de l'impact de l'exploitation minière dans ces trois communes, permet d'étudier un large éventail de situations.

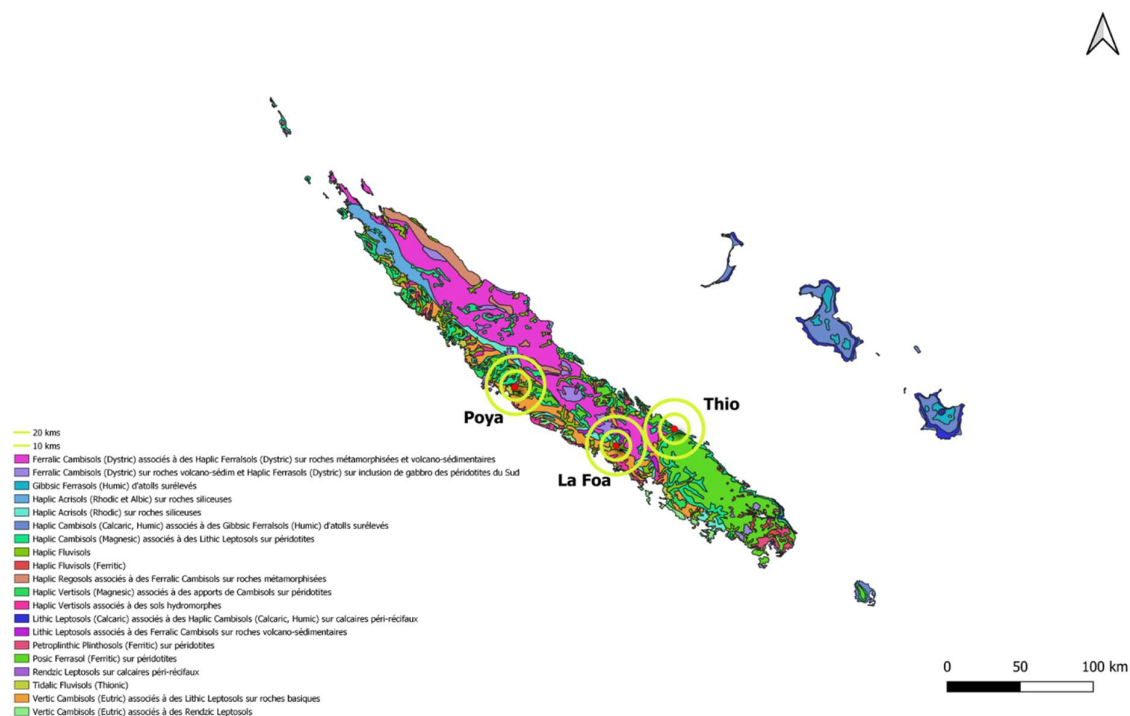


Figure 6- Carte pédologique de la Nouvelle-Calédonie (1/200 000^{ème}). Les trois micro-régions ciblées par l'étude sont indiquées. Les cercles jaunes, permettent de visualiser la diversité pédologique 10 kms ou 20 kms autour du point central de la commune.

Spécifique pour chacune des trois communes, la géologie des bassins versants étudiés est également particulièrement hétérogène au sein d'un même bassin versant.

Pour la Thio, la rive droite du bassin versant est largement occupée par des péridotites, tandis que la rive gauche est dominée par des formations détritiques, notamment les unités de Thio, la Boghen, et Oua-Tom-La Foa, composés de grès volcanoclastiques et silts, en amont ; et Unité de Poya (basaltes) plus en aval (Figure 7). Cependant, péridotites et serpentinites demeurent également présentes sur la rive gauche. Les formations alluvionnaires, les plus jeunes, sont caractérisées par leur très faible pente et marquent les zones de confluence des sous-bassins versants (Garcin et al., 2017). Le bassin versant de Thio (396,7 km²) est impacté par l'exploitation minière conduisant à sur-engravement des rivières et dépôts de substrats miniers sur les zones de cultures des tribus les plus proches de l'estuaire.

Le bassin versant de la Foa (406 km²) est un ensemble de 4 sous-bassins versants principaux : La Foa, Pocquereux, Fonwhary et Focola, majoritairement composés de substrat de type volcano-sédimentaire (Figure 8). La rivière La Foa conflue dans sa partie amont avec son principal affluent, la rivière la Pocquereux. Dans sa zone aval, elle reçoit successivement la Fonwhary et la Focola. Géologiquement, le bassin versant est dominé par la présence de grès volcanoclastiques (Unité de Oua-Tom-La Foa) ; et d'alluvions récentes et anciennes. La Foa se développe dans l'Unité de Sarraméa dans sa partie la plus amont, tandis que ses différents affluents circulent sur des bassins versants géologiquement variés composés de serpentinites, grès et conglomérats volcanoclastiques.

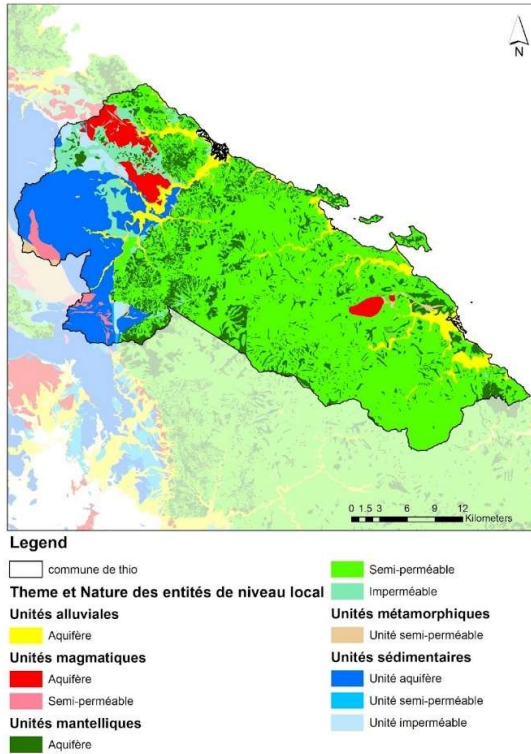


Figure 7- Carte hydrogéologique de la commune de Thio déduit du référentiel BDLISA-NC.

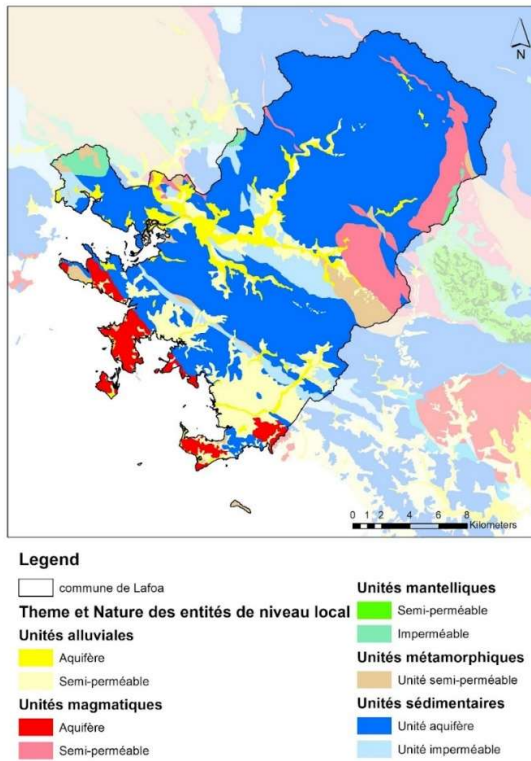


Figure 8- Carte hydrogéologique de la commune de La Foa déduit du référentiel BDLISA-NC.

Enfin le bassin versant de Poya/Népoui est composé par l'unité de Poya (basaltes) du côté de Poya, et par la nappe des péridotites (harzburgites) du côté de Népoui (Figure 9). Entre Poya et Népoui, le massif du Boulinda, massif minier de partie Ouest de la chaîne Centrale constitue le bassin versant des rivières Muéo et Monéo. Les latérites du bassin versant amont de Poya, et l'exploitation minière du Boulinda sont susceptibles d'impacter la qualité chimique des sols alluvionnaires se développant dans la partie aval du bassin versant.

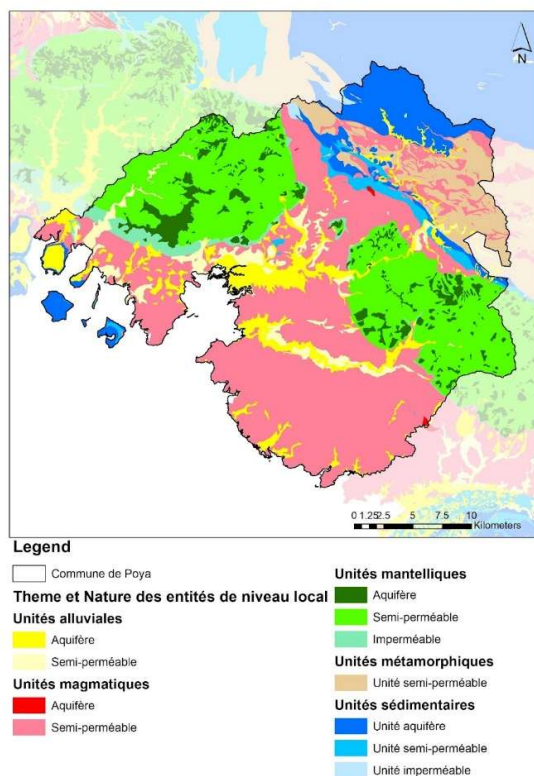


Figure 9- Carte hydrogéologique de la commune de Poya déduit du référentiel BDLISA-NC.

À l'échelle de ces trois bassins versants, mais plus généralement du territoire, les sols les plus propices à l'agriculture demeurent les sols alluvionnaires, ou Fluvisols, sols jeunes développés à partir des matériaux d'apport des fleuves. En effet, les Fluvisols sont généralement cultivés en raison (i) d'un accès à l'eau facilité pour l'irrigation, et (ii) d'une fertilité naturelle généralement plus importante que celle des autres types de sols. Les caractéristiques chimiques de ces sols sont directement liées à la nature des roches mères des différentes formations géologiques drainées, voire les apports par des apports par colluvionnements.

Cette variabilité peut être approchée par la campagne de prélèvements et d'analyses géochimiques systématiques des sédiments de cours d'eau « Stream-Sediment » réalisée en Nouvelle-Calédonie par le BRGM (1981 à 1990). Les données résultent d'un inventaire minier, hors nickel (et massifs de péridotites), et sur lequel des analyses ICP sur sédiments de rivière (fraction granulométrique : 64 ou 125 µm) ont été conduites par le BRGM Orléans. Cet inventaire porte sur 25 800 points à l'échelle de la Grande Terre.

L'exemple ci-après illustre pour la commune de Poya les concentrations en nickel et chrome dans les sédiments des rivières (Figure 10). Les concentrations les plus élevées sont mesurées pour les rivières drainant les massifs de péridotites. Néanmoins ces éléments demeurent également présents dans d'autres contextes géologiques, et des effets de dilution peuvent être observés avec l'éloignement des sources principales en amont des bassins versants.

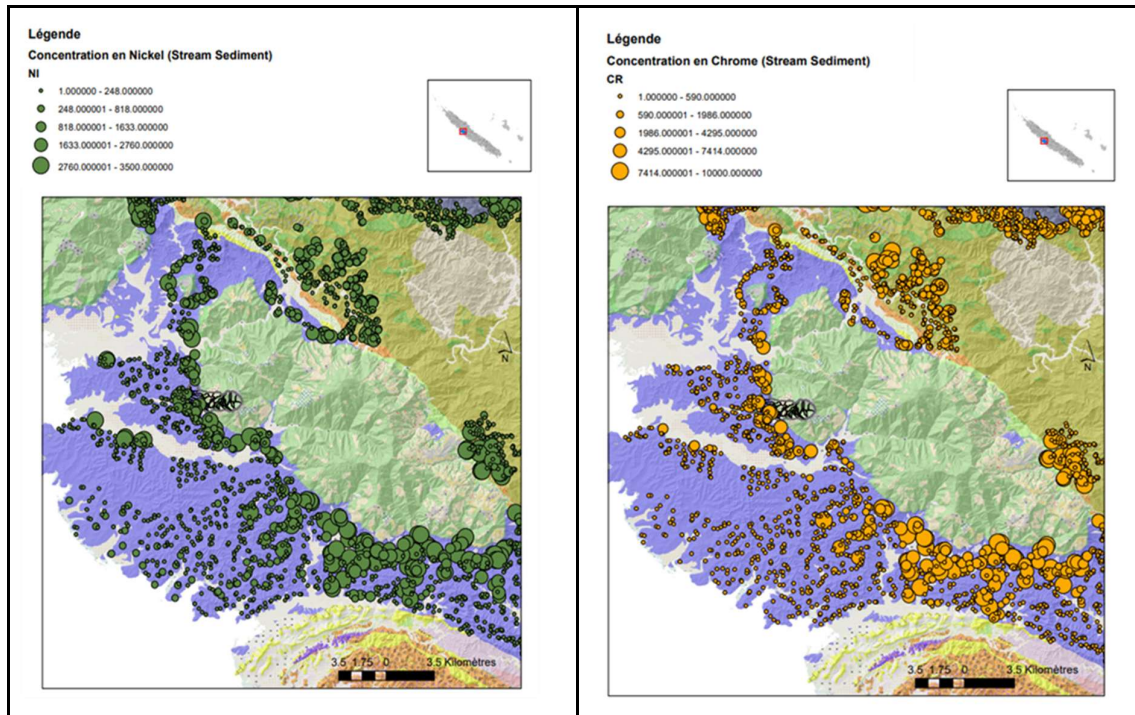


Figure 10- Concentrations en nickel et chrome dans les sédiments des rivières du bassin versant de Poya. Données issues de la base Stream-Sediment.

Outre la diversité des caractéristiques chimiques des sols alluvionnaires présents dans ces différents bassins versants, la nature des roches mères, conjuguée à la topographie et au climat, contribue à une grande variabilité des sols qui les constituent. Ainsi, et sans considérer les Fluvisols, dans la région de Thio, Ferralsols et Cambisols représentent les deux grands types de sols développés.

Les Ferralsols, sols très évolués, présentent des caractéristiques chimiques généralement moins favorables à l'agriculture que les Cambisols, en lien avec leur très longue altération. Les cambisols, ou sols bruns, sont en cours de formation leur altération est moins poussée, et ils sont généralement rajeunis par l'érosion superficielle en raison du relief sur lequel ils se développent.

Les Ferralic Cambisol (Dystric) sont désaturés, acides, présentant un caractère oligotrophe et des quantités variables d'oxydes de fer. Les sols bruns développés sur les flancs des massifs de péridotites, sont eutrophes et magnésiens. Associés à des colluvions ferrallitiques (Haplic Cambisol, Magnésic), ils contiennent généralement des concentrations conséquentes en nickel, chrome, et manganèse assimilables ; leurs concentrations en calcium, phosphore et potassium sont faibles, tandis que leur concentration en magnésium échangeable est importante, entraînant de fait un ratio Ca/Mg défavorable à une mise en culture.

Sans considérer les Fluvisols, les sols des régions de La Foa et Poya sont développés dans des zones à relief moins escarpé, présentant des zones d'accumulation en bas de massif, le drainage y est médiocre mais l'évapotranspiration importante, et favorisée par une saison sèche marquée. L'ensemble de ces paramètres favorisent la formation de sols bruns aux traits vertiques (Vertic Cambisol) et de sols à argiles gonflantes (Vertisols). En amont des bassins versants, sur les versants Ouest de la Chaîne Centrale, se développent des sols bruns acides et désaturés (Ferralic Cambisol (Dystric)). Les sols bruns et les sols à argiles gonflantes sont également cultivés, mais leur fertilité naturelle demeure plus faible. Enfin, quelques régions présentent des sols peu représentés liés à la nature la roche mère, comme des Leptosols (sols caillouteux) et des Acrisols (sols appauvris dont certains présentent des traits podzoliques) dans la partie amont du bassin versant de la Foa.

Si ces zones géographiques ont fait l'objet d'une attention particulière lors de l'échantillonnage, d'autres prélèvements ont été réalisés à travers la Grande Terre afin de couvrir une plus grande diversité de contextes agro-pédo-climatiques. Il convient également de noter que les denrées agricoles d'origine

animale proviennent généralement d'un nombre limité d'élevages, qui ne sont pas nécessairement implantés au sein des micro-régions ciblées.

Le cas des ressources aquatiques (dulçaquicoles et estuariennes)

Les échantillons (poissons, crustacés, bivalves) ont été prélevés dans 2 sites principaux (Figure 11a). Sur la côte est, dans la commune de Thio, sur la côte ouest dans les communes de La Foa. Un complément d'échantillonnage a été réalisé sur la commune de Bourail.

Dans la commune de Thio, les bassins versants des cours d'eau dans lesquels les organismes ont été collectés sont tous totalement ou partiellement sur substrat ultrabasique. Certains cours d'eau sont sous influence minière tandis que d'autres ne sont pas situés en aval de sites d'excavations (Annexe A1). Dans les communes de La Foa, les bassins versants des cours d'eau sont sur substrat volcano-sédimentaire.

Le dernier site de La Foa n'ayant pas pu être échantillonné de façon optimale (météo défavorable, conditions d'accès, etc.), deux autres prélèvements « opportunistes » ont été réalisés à Pocquereux et à Poé (Bourail) pour compléter les données sur substrat volcano-sédimentaire (Figure 11b). Les échantillons ont été collectés dans la commune de Thio de mars à avril 2023, à Pocquereux et à Poé en avril 2023 et à La Foa en juin 2023.

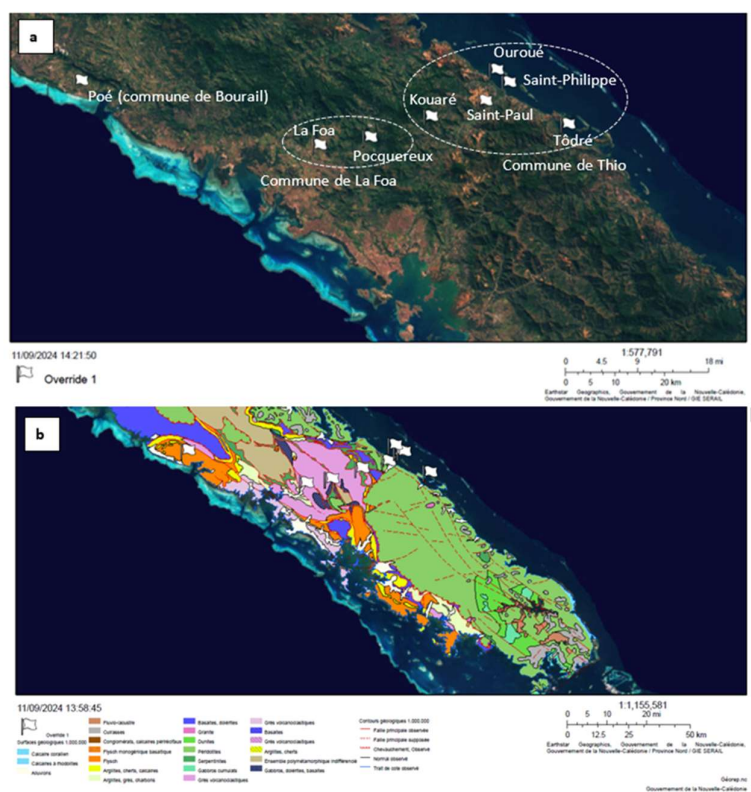


Figure 11- Localisation des sites de collectes des organismes aquatiques sur les communes de Thio, La Foa et Bourail (a) et géologie des sites d'échantillonnage, en vert les substrats ultramafiques (b). Cartes générées par Georep NC.

Pour les prélèvements sur le secteur de Thio, ils ont été intégralement réalisés par les populations locales, avec les aléas que cela a engendré quant au respect des espèces à cibler et du nombre d'individus par espèce souhaités. Il n'était pas envisageable de faire autrement dans ce secteur compte-tenu des exigences des tribus. Les méthodes de capture utilisées ne sont pas connues avec certitude, mais il est vraisemblable qu'elles regroupent des pêches au filet maillant (poissons) ou « cueillettes » manuelles (crevettes et bivalves).

Dans la rivière La Foa, les prélèvements de poissons et crustacés ont été réalisés par pêche électrique. A Pocquereux, les crevettes ont été collectées avec une nasse et à Bourail les poissons ont été collectés par pêche à la ligne. Au total, 87 individus ont été prélevés et analysés, dont 67 poissons et 20 invertébrés (11 crustacés et 9 bivalves) (Annexe A1).

3. QUELLES HABITUDES DE CONSOMMATIONS DES POPULATIONS NEO-CALEDONIENNES A L'ECHELLE DES MICRO-REGIONS CIBLES ?

3.1. FOCUS SUR LES PRODUCTIONS AGRICOLES LOCALES

Afin de compléter la sélection des denrées alimentaires les plus consommées devant être échantillonnées, la production locale a été étudiée à partir de la synthèse des données agricoles et des données DAVAR, et les volumes produits ont été pondérés en fonction des habitudes de consommation. Ces résultats ont ensuite été confrontés aux données issues des questionnaires alimentaires de l'étude METEXPO. En effet, la connaissance des habitudes alimentaires est indispensable dans le cadre des études épidémiologiques, notamment pour l'évaluation des risques sanitaires, mais elle est également essentielle pour orienter le choix des denrées agricoles à échantillonner. Parallèlement à l'exploitation des données METEXPO, les résultats d'autres études sur les habitudes de consommation des Calédoniens ont été pris en compte (données DAVAR).

Un extrait d'une enquête de consommation des ménages, a été fourni par la DAVAR pour le projet METALICA-Aliment. Il liste les items consommés en 2015, 2016 et 2017, exprimés en kg, répartis selon les catégories suivantes :

- Aromates et épices
- Fruits
- Légumes
- Légumes secs
- Pommes de terre et frites
- Tubercules tropicaux
- Gibier
- Autres viandes

3.1.1. DENREES ANIMALES

Les données relatives aux viandes locales sont fournies par le pôle Statistiques et Études Rurales de la DAVAR. Bien que les tonnages produits puissent varier légèrement d'une année sur l'autre, les tendances interannuelles concernant la hiérarchie des productions animales restent similaires. Ainsi, la viande bovine (bœuf et veau confondus) et la viande porcine constituent les denrées animales produites en plus grande quantité, assurant la plus grande couverture des besoins annuels des populations locales. Les autres productions locales restent nettement plus faibles, comme le poulet, voire anecdotiques (Tableau 1).

Tableau 1- Quantités (tonnes) de viandes importées et produites localement (2022) par grande catégorie de denrées carnées, et taux de couverture des besoins annuels par la production locale. NA = données non disponibles.

	2022		
	Importation (tonnes)	Production locale (tonnes)	Couverture des besoins annuels par la production locale (%)
Gros bovins & Veaux	1827	3015	62
Porcs	716	3014	80*
Poulets (dont réformes)	8451	759	8
Cerfs	0	62,6	NA
Ovins	349	4,7	2

Source- DAVAR, 08/2023
 * Hors jambons, poitrines, épaules et lards en produits transformés. Couverture des besoins en équivalent carcasse, viande ressuée, soit : viandes locales / (viandes locales + vente OCEF de viandes d'importation).

Il convient de souligner l'importance du gibier dans la consommation des ménages, en particulier la viande de cerf (*Rusa timorensis*, de Blainville, 1822). Les données présentées au Tableau 1 reflètent les tonnages de produits carnés issus d'animaux abattus par l'OCEF. Cependant, le gibier, notamment le cerf et le cochon sauvage, constitue une source significative de viande pour une partie de la population calédonienne.

Selon l'enquête sur la consommation des ménages (Agence Rurale / DAVAR, 2017), la consommation annuelle dépasse 2 500 tonnes pour le cerf et 1 000 tonnes pour le cochon sauvage. La viande de cerf, entièrement issue de prélèvements locaux, représente ainsi plus de 15 % de la consommation totale de viande sur le territoire et se classe parmi les trois denrées animales locales les plus consommées.

Cette importance de la viande de cerf a conduit le Congrès de la Nouvelle-Calédonie à modifier la délibération n°7/CP du 6 avril 2010, fixant les conditions sanitaires de collecte, de traitement et de mise sur le marché des viandes de cervidés sauvages, ainsi que la délibération n°155 du 29 décembre 1998 relative à la salubrité des denrées alimentaires. Ces modifications ont permis la commercialisation de la viande de cerf sauvage issue de la chasse. La délibération modifiée a été adoptée récemment, en octobre 2023 (Arrêté n° 2024-1085/GNC du 5 juin 2024) (Figure 12).

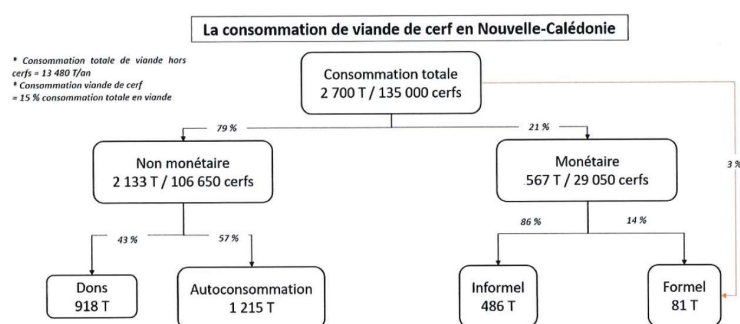


Figure 12- Annexe au rapport de présentation de la proposition portant modification de la délibération n°7/CP du 06 avril 2010.

Concernant les ovoproduits, les sources disponibles ne précisent pas la consommation exacte d'œufs par la population néo-calédonienne, mais indiquent que la production locale couvre près de 90 % des besoins. En 2022, la production annuelle locale s'élevait à 43,4 millions d'œufs (DAVAR, 2022). En considérant une masse comestible moyenne de 55 g par œuf, le tonnage produit localement pourrait atteindre plus de 2 300 tonnes, plaçant les œufs parmi les cinq denrées animales locales les plus consommées.

Pour garantir la cohérence de l'échantillonnage des œufs, les volailles, notamment les poulets, ont également été inclus. Bien que le poulet soit la denrée animale la plus consommée sur le territoire, plus de 90 % des besoins alimentaires sont couverts par les importations. La production locale ne se classe donc qu'au sixième rang des denrées animales les plus consommées produites localement, avec 759 tonnes produites en 2022, contre 8 451 tonnes importées (réformes comprises).

3.1.2. DENREES VEGETALES

Selon le tableau 2, les 5 fruits locaux les plus commercialisés en termes de quantité sont les bananes dessert, oranges, pastèques, ananas et mandarines. Néanmoins, les 5 fruits dont les quantités d'importation sont les plus conséquentes, sont les pommes, poires, raisins, oranges et kiwis (Tableau 3).

Les données fournies par la DAVAR concernant l'enquête de consommation des ménages, indiquent que les 5 fruits les plus consommés sont la pomme, la banane, la mangue, l'orange et les papayes,

chacune de ces denrées en 2017 faisant état d'une consommation supérieure à 1 000 tonnes annuellement.

Tableau 2- Principaux fruits locaux commercialisés en 2020, 2021, et 2022. Sources- Enquêtes mensuelles DAVAR / Arbofruits, marché de gros. Synthèse agricole DAVAR 08/2023.

(tonnes)	2020	2021	2022
Bananes dessert	1238	923	750
Oranges	1018	781	660
Pastèques	1004	620	416
Ananas	526	558	355
Mandarines	206	165	147
Melons	363	182	138
Citrons et limes	223	188	109
Papayes	96	47	53
Mangues	168	134	32
Avoacts	72	24	27
Letchis	59	64	3
Autres*	206	241	170

*Y compris noix de coco, hors vanille et bananes poingo

Tableau 3- Principaux fruits commercialisés en 2020, 2021 et 2022. Source- ISEE – Direction régionales des douanes.

(tonnes)	2020	2021	2022
Pommes	1783	1614	1497
Poires	614	572	539
Raisins	400	430	412
Oranges	331	393	625
Kiwis	420	393	299
Mandarines	178	349	329
Melons et pastèques	74	314	257
Citrons et limes	41	86	NA
Avocats	41	70	73
Prunes	85	61	60
Nectarines	61	24	53
Autres fruits (dont les fruits secs et séchés)	527	458	497

Des différences particulièrement importantes apparaissent entre les quantités consommées de fruits et celles commercialisées, notamment pour les mangues, les papayes et les ananas, ce qui suggère pour ces produits l'existence d'une filière non marchande et/ou une forte part d'autoconsommation. Pour la mangue, les variations interannuelles de production, liées aux événements climatiques, pourraient également expliquer ces écarts.

Une approche similaire a été appliquée aux légumes. Les cinq légumes les plus produits localement sont les tomates, les salades, les concombres, les squashes et les pommes de terre (Tableau 4). Les légumes dont les importations sont les plus importantes sont les oignons, carottes, choux verts ou blancs, tomates et légumes secs (Tableau 5). Il est à noter une variabilité inter-annuelle marquée, en particulier pour les pommes de terre, dont les importations sont passées de 133 tonnes en 2021 à 819 tonnes en 2022, en lien avec une baisse de production majeure, de 2 264 tonnes à 358 tonnes, conséquence directe du phénomène météorologique La Niña. Celui-ci a provoqué une pluviométrie importante sur le territoire, entraînant des inondations qui ont fortement impacté la culture de pommes de terre. Des tendances similaires ont été observées pour la production de squashes. .

Les chiffres précédents ne prennent pas en compte la production et l'auto-consommation de certains légumes largement consommés par les ménages calédoniens, tels que le chou kanak, les brèdes et les chouchoutes, et ne permettent pas de distinguer les différentes variétés de tubercules tropicaux.

Ainsi, dans le cadre du projet METALICA-Aliment et afin de couvrir la plus large gamme possible de légumes, nous avons choisi d'étudier les cinq items les plus consommés pour chacune des trois grandes catégories : légumes-fruits, légumes-feuilles et légumes-racines.

Tableau 4- Principaux légumes locaux commercialisés en 2020, 2021, et 2022. Sources- Enquêtes mensuelles DAVAR / Arbofruits, marché de gros. Synthèse agricole DAVAR 08/2023.

(tonnes)	2020	2021	2022
Tomates	1432	1228	813
Salades	1493	1019	921
Concombres	990	787	1009
Carottes	713	589	172
Choux verts et blancs	507	547	424
Choux de Chine	832	506	455
Courgettes	439	411	278
Citrouilles	211	177	169
Poivrons	166	175	62
Bananes poingo	222	173	223
Aubergines	198	124	153
Autres légumes	812	566	392
Squashes	3094	3002	62
Pommes de terre	2616	2264	358
Oignons	596	388	207
Tubercules tropicaux	646	485	408

Tableau 5- Principaux légumes commercialisés en 2020, 2021 et 2022. Sources- ISEE – Direction régionales des douanes.

(tonnes)	2020	2021	2022
Carottes	667	838	994
Choux verts et blancs	483	561	534
Tomates	340	433	448
Poivrons	104	134	125
Céleris	47	78	66
Poireaux	48	75	67
Choux fleurs	48	65	53
Brocolis	43	57	39
Echalotes	42	44	42
Autres légumes	183	349	243
Légumes secs	444	509	375
Pommes de terres	417	133	819
Oignons	1225	1404	1592

C'est pourquoi afin d'affiner nos recherches concernant les fruits et les 3 catégories de légumes produits localement qui seraient les plus consommés, nous avons estimé la proportion de production locale (P_{locale}) à partir des données les plus récentes des principaux fruits et légumes locaux commercialisés (Tableaux 2 et 4) et importés (Tableaux 3 et 5) :

-Item présent dans le tableau « importés (Tableaux 3 ou 5) » et absent du tableau « Tableaux 2 et 4 » alors ; $P_{locale} = 0\%$.

-Item absent du tableau « importés » et présent dans le tableau « locaux », $P_{locale} = 100\%$

», alors

-Item présent dans les deux tableaux, alors $P_{locale} = Q_{locale} / (Q_{locale} + Q_{importée}) \times 100$, Avec Q, les quantités (en kg, ou tonnes) concernant les masses totales de denrées concernées.

On estime la part locale dans la consommation des ménages à partir des chiffres les plus récents de l'enquête sur la consommation des ménages (2017, *Conso_{totale}*), $Conso_{locale} = Conso_{totale} \times P_{locale}$.

La liste des denrées produites localement et susceptibles d'être les plus consommées, prioritaires pour notre, est indiquée dans le Tableau 6, pour chaque catégorie d'aliment : denrée animale, fruit, légume fruit, légume feuille, légume racine.

Tableau 6- Liste des 5 items produits localement les plus consommés par les populations calédoniennes, par catégorie d'aliment. L'échantillonnage a donc été orienté de façon préférentielle vers ces denrées. Dans chaque catégorie, ils sont présentés de façon décroissante quant à la leur quantité consommée.

Catégorie	Item	Code item
Denrée animale	Bœuf	BOE
	Porc	POR
	Cerf	CER
	Œuf	OEU
	Cochon sauvage	COS
	Poulet	POU
Fruit	Banane	BAN
	Mangue	MAN
	Papaye	PAP
	Ananas	ANA
	Oranges (& mandarines)	ORA
	Avocat	AVO
Légume feuille	Chou de Chine	CCH
	Salade	SAL
	Chou blanc, vert	CHB
	Chou Kanak	CHK
	Brède	BRE
Légume fruit	Tomate	TOM
	Citrouille, squash, courges	CIT
	Concombre	CON
	Courgette	COU
	Chouchoute	CHO
Légume racine	Igname	IGN
	Pommes de terre	PDT
	Manioc	MAN
	Carotte	CAR
	Taro	TAR

Pour les denrées dulçaquicoles et estuariennes, l'évaluation des items potentiellement les plus consommés a été basée sur les questionnaires alimentaires.

3.2. FREQUENCE DE CONSOMMATION DES ALIMENTS

La définition des denrées alimentaires potentiellement les plus consommées dans le travail précédent a été comparé aux données de questionnaires alimentaires issues des études concernant le cancer de la thyroïde et METEXPO ; permettant de disposer d'une certaine précision quant aux habitudes de consommation (production locale et importation) dans les grandes régions de Nouvelle-Calédonie (nord-est : NE, sud-est : SE, sud-ouest : SO, sud-est : SE, Nouméa) et dans différentes communes, notamment les communes/régions cibles. Ce travail a été réalisé avec le consortium METALICA-Santé, et sert de base pour l'évaluation des risques sanitaires à l'échelle des régions cibles.

Avec l'aide du consortium METALICA-Santé, différentes sources de données ont été utilisées afin d'appréhender les habitudes de consommation, et de déterminer la liste des denrées alimentaires locales issues de la production agricole (végétale et animale) et des pêcheries (rivières et estuaires) devant être échantillonnées. Comme énoncé précédemment, le projet METALICA-Aliment propose de s'intéresser aux denrées alimentaires produites et/ou prélevées localement ; afin de quantifier les concentrations en éléments métalliques et d'inférer sur le rôle de l'environnement. Considérant l'absence d'informations sur les denrées agricoles, l'accent est mis dans le projet sur les productions agricoles. Sont exclus de fait, les produits d'importation. Néanmoins, il est important de garder à l'esprit qu'une étude sanitaire complète devra tenir compte de la qualité des produits importés qui peuvent représenter des denrées largement consommées par les ménages comme cela est démontré par la suite.

Les fréquences de consommation des aliments à l'échelle des trois régions cibles sont indiquées dans le tableau 7 pour La Foa, le tableau 8 pour Poya/Népoui, et le tableau 9 pour Thio. Les fréquences de consommation des différents items, notamment des produits d'origine locale, font apparaître quelques différences entre les trois régions. Ainsi, la catégorie « autres légumes » arrive en tête à la Foa, alors que la catégorie « légumes feuilles » (crus et cuits) est la plus fréquemment consommée à Thio et Poya.

La catégorie « fruits frais » est la plus consommée dans les trois micro-régions, mais les fréquences de consommation diminuent selon la séquence : Thio > La Foa > Poya/Népoui. Ces chiffres contrastent avec ceux du baromètre santé qui indique qu'1/4 seulement des calédoniens mange des fruits quotidiennement. Parmi les denrées animales, la viande est la plus consommée à la Foa, et les poissons de mer à Thio et Poya. Néanmoins, les fréquences hebdomadaires de consommation de viandes sont plus élevées sur Thio et Poya que la Foa. Les fréquences mentionnées dans les questionnaires concernant la consommation de viande demeurent faibles, par rapport au chiffre du baromètre santé 2022, qui indiquait qu'1 calédonien sur 2 mange de la viande et des œufs quotidiennement.

Les différences entre les questionnaires alimentaires présentés ici sur les denrées locales et le baromètre santé de 2022 tenant compte de l'ensemble des habitudes alimentaires pourraient être liées au mode de vie des Calédoniens questionnés. En effet, il n'est pas impossible de penser que les personnes vivant en tribu, ou en brousse, aient accès plus facilement à des fruits et des légumes, issus de jardins familiaux ou de l'agriculture vivrière que les personnes vivant en ville.

Tableau 7- Fréquences de consommation des aliments centre La Foa (adultes et enfants), Nouvelle-Calédonie (n = 51). Données issues du projet METEXPO, fournies par le consortium METALICA.

	La Foa	
	Pourcentage de consommateurs n (%)	Fréquence hebdomadaire moyenne ± écart type
Origine locale		
Légumes crus		
Légumes feuilles (n = 49)	27 (40,8)	2,7 ± 3,7
Légumes racines (n = 49)	20 (40,8)	1,1 ± 2,3
Autres légumes (n = 50)	31 (62,0)	4,0 ± 4,8
Légumes secs (n = 51)	2 (3,9)	0,04
Légumes cuits		
Légumes feuilles (n = 51)	32 (62,8)	1,7 ± 2,3
Légumes racines (n = 51)	38 (74,5)	2,6 ± 3,0
Autres légumes (n = 51)	33 (64,7)	1,8 ± 1,8
Fruits frais (n = 51)	37 (72,6)	7,8 ± 10
Poisson		
Poisson de mer (n = 51)	45 (88,2)	1,9 ± 1,8
Poisson d'eau douce (n = 51)	18 (35,3)	0,6 ± 1,6
Poisson d'eau saumâtre (n = 51)	1 (2,0)	-
Crustacés, fruits de mer (n = 50)	43 (86,0)	1,2 ± 1,4
Poisson fumé, séché ou salé (n = 51)	5 (9,8)	0,0 ± 0,0
Viande (n = 50)	31(62,0)	2,6 ± 3,8
Œufs (n =50)	20 (40,0)	1,0 ± 1,7
Noix, fruits secs (n = 51)	2 (3,9)	0,1 ± 0,3

*51 entretiens réalisés en 2016 entre Mai et Juin

Tableau 8- Fréquences de consommation des aliments centre Poya/Nepoui (adultes et enfants), Nouvelle-Calédonie (n = 24). Données issues du projet METEXPO, fournies par le consortium METALICA-Santé.

	Poya/Népoui	
	Pourcentage de consommateurs n (%)	Fréquence hebdomadaire moyenne ± écart type
Origine locale		
Légumes crus		
Légumes feuilles (n = 23)	10 (43,5)	1,5 ± 3,0
Légumes racines (n = 24)	1 (4,2)	-
Autres légumes (n = 24)	4 (16,7)	1,2 ± 4,4
Légumes secs (n = 24)	0 (0,0)	-
Légumes cuits		
Légumes feuilles (n = 24)	16 (66,7)	2,3± 2,2
Légumes racines (n = 24)	16 (66,7)	3,6 ± 4,1
Autres légumes (n = 24)	2 (8,3)	-
Fruits frais (n = 23)	7 (8,3)	2,9 ± 8,8
Poisson		
Poisson de mer (n = 24)	16 (66,7)	4,3 ± 6,1
Poisson d'eau douce (n = 24)	7 (29,2)	0,6 ± 1,2
Poisson d'eau saumâtre (n = 24)	0 (0,0)	-
Crustacés, fruits de mer (n = 24)	5 (20,8)	0,4 ± 1,1
Poisson fumé, séché ou salé (n = 24)	1 (4,2)	-
Viande (n = 24)	16 (66,7)	2,9 ± 2,4
Œufs (n =24)	1 (4,2)	-
Noix, fruits secs (n = 24)	0 (0,0)	-

*24 entretiens réalisés en 2016 entre février et avril, dont la moitié en mars

Tableau 9- Fréquences de consommation des aliments centre Thio (adultes et enfants), Nouvelle-Calédonie (n = 56). Données issues du projet METEXPO, fournies par le consortium METALICA-Santé.

Origine locale	Thio	
	Pourcentage de consommateurs n (%)	Fréquence hebdomadaire moyenne ± écart type
Légumes crus		
Légumes feuilles (n = 54)	25 (46,3)	2,2 ± 4,7
Légumes racines (n = 53)	11 (20,8)	0,5 ± 2,0
Autres légumes (n = 52)	27 (52,0)	2,0 ± 3,0
Légumes secs (n = 54)	0 (0,0)	-
Légumes cuits		
Légumes feuilles (n = 52)	44 (84,6)	3,6 ± 3,8
Légumes racines (n = 55)	53 (96,4)	4,5 ± 3,7
Autres légumes (n = 48)	31 (64,6)	3,1 ± 4,0
Fruits frais (n = 54)	43 (79,6)	14,3 ± 13,1
Poisson		
Poisson de mer (n = 52)	46 (88,5)	6,3 ± 7,2
Poisson d'eau douce (n = 55)	29 (52,7)	2,2 ± 3,9
Poisson d'eau saumâtre (n = 54)	1 (1,8)	-
Crustacés, fruits de mer (n = 52)	37 (71,2)	1,4 ± 2,3
Poisson fumé, séché ou salé (n = 55)	17 (30,9)	0,5 ± 1,2
Viande (n = 51)	41(80,4)	4,4 ± 4,9
Œufs (n =56)	1 (1,8)	-
Noix, fruits secs (n = 56)	0 (0,0)	-

*56 entretiens réalisés en 2016 entre mars et juin

Les items susceptibles d'être les plus couramment consommés dans les régions de Thio, Poya et La Foa, définis à partir des questionnaires alimentaires réalisés dans le cadre de METEXPO, sont présentés dans le tableau 10.

Tableau 10- Dénrées végétales les plus consommées dans les trois micro-régions cibles. Ces données sont issues des questionnaires alimentaires du projet METEXO. Sont indiqués : l'effectif (n) et la fréquence hebdomadaire de consommation en nombre de fois par semaine/ fournies par le consortium METALICA-Santé.

	Thio (n=24)		Poya/Népoui (n=24)		La Foa (n=51)	
	Denrée	n Fréq. (fois/semaine)	Denrée	n Fréq. (fois/semaine)	Denrée	n Fréq. (fois/semaine)
Fruit	Mangue	35 4,8	Banane	6 0,84	Mangues	11 1,66
	Banane	38 4,34	Pomme liane	3 0,78	Bananes	27 1,47
	Ananas	18 2,28	Papayes	x 0,38	Agrumes	15 1,09
	Papayes	11 0,39	Agrumes	3 0,17	Avocat	14 1,05
Légume racine	Manioc	51 2,15	Taros	14 1,19	Manioc	18 0,84
	Ignames	31 0,89	Manioc	15 1,14	Pommes de terre	10 0,54
	Taros	17 0,76	Ignames	12 1,12	Taros	16 0,53
	Carottes	11 0,49			Ignames	15 0,44
				Carottes	15 0,04	
Légume fruit	Chouchoutes	18 0,92	Tomates	x 0,39	Tomates	
	Tomates crues (fqc = 0,80)	23 1,59*	Concombres	x 0,39	Concombres	
	Tomates cuites (fqc = 0,79)	16			Citrouilles	23 0,41
	Citrouilles	25 0,8			Chouchoute	11 0,24
	Concombres	18 0,53				
Légume feuille	Choux Kanak	44 1,58	Choux Kanak	15 0,83	Salades vertes	22 1,89
	Salades vertes	25 1,18	Salades vertes	10 0,81	Choux Kanak	15 0,43
	Choux de Chine	33 1,16	Choux de Chine	15 0,72	Choux	13 0,41
	Choux	17 0,93	Choux	6 0,55	Brèdes	9 0,4
	Feuilles de citrouilles	15 0,59	Feuilles de citrouille	9 0,49	Feuilles de citourilles	14 0,31
					Laiterons	9 0,11

Ainsi, et malgré quelques spécificités, notamment en termes de fréquence de consommation, il y a une concordance entre les denrées définies comme étant susceptibles d'être les plus consommées

dans la section précédente à partir des données de productions, et celles définies à partir des questionnaires alimentaires. Afin de compléter ces constats, et en dernière approche, les données des habitudes alimentaires issues de l'étude sur le cancer de la thyroïde ont également été analysées (Tableau 11), bien qu'elles ne nous permettent pas une granularité fine à l'échelle de la commune, et n'indiquent pas la fréquence de consommation de denrées locales versus importées.

Il apparaît des concordances entre les items sélectionnés précédemment en termes de fréquences de consommations à l'échelle des microrégions cibles et denrées identifiées en considérant les grandes régions Sud-Est (Thio) et Sud-Ouest (La Foa et Poya) (Tableau 11).

Tableau 11- Consommations journalières (en g.j⁻¹) de fruits et légumes par grandes-régions géographiques. Données issues de l'étude sur les cancers de la thyroïde.

		Nord-Ouest	Sud-Ouest	Sud-Est
		données en g.j ⁻¹ (données manquantes = 0)		
Fruit	Ananas	120	173	87
	Papayes jaunes et rouges	109	151	109
	Oranges	146	91	119
	Bananes (bananes dessert)	112	51	79
	Mangues	46	76	65
Légumes feuilles	Choux de Chine	16	20	20
	Laitrons	1	3	8
	Choux de Chine	7	11	7
	Choux Kanak	5	9	3
	Salades vertes	13	14	19
	Brèdes	3	15	7
Légumes fruits	Tomates (cuites+ crues)	12	65	26
	Chouchoutes	12	4	16
	Maïs	12	12	5
	Poireaux	4	8	11
	Courgettes	6	3	11
	Citrouilles	9	3	7
	Légumes racines	Manioc	42	46
Taros		11	47	14
Pommes de terre		16	23	23
Carottes (cuites + crues)		15	14	29
Patates douces		8	19	14

Les différentes approches donnent ainsi des résultats concordants en termes de denrées alimentaires les plus consommées ; c'est pourquoi l'échantillonnage des denrées agricoles végétales a été réalisé selon le tableau 6.

Les denrées animales susceptibles d'être les plus couramment consommées dans les régions de Thio, Poya et La Foa, définies à partir des questionnaires alimentaires réalisés dans le cadre de METEXPO sont présentées dans le tableau 12.

Tableau 12- Denrées animales les plus consommées dans les trois micro-régions cibles. Ces données sont issues des questionnaires alimentaires du projet METEXO. Sont indiqués : l'effectif (n) et la fréquence hebdomadaire de consommation (en nombre de fois par semaine) fournie par le consortium METALICA-Santé.

	Thio (n=56)		Poya/Népoui (n=24)		La Foa (n=51)	
	Denrée	n Fréq. (fois/semaine)	Denrée	n Fréq. (fois/semaine)	Denrée	n Fréq. (fois/semaine)
Viandes	Cerfs	38 1,7	Cerfs	14 0,9	Cerfs	25 1,1
	Porcs	14 0,7	Porcs	6 0,5	Porcs	13 0,3
	Poulets, volailles	10 0,5	Bœufs, veaux	2 0,1	Poulet, volailles	7 0,2
	Bœufs, veaux	2 0,04	Poulets, volailles	0 -	Bœufs, veaux	5 0,07
Ressources dulçaquicoles et estuariennes	Tilapia	24 0,74	Tilapia	7 0,26	Tilapia	10 0,32
	Mulets	16 0,56	Mulets	6 0,17	Carpes	6 0,17
	Carpes	16 0,51	Carpes	6 0,15	Anguilles	7 0,09
	Anguilles	17 0,41	Bénitier	3 0,14	Autres cervettes	28 0,45
	Bénitier	29 0,54	Huitres/moules	2 0,06	Crabes palétuvier	27 0,4
	Crabe palétuvier	29 0,41	Crabes palétuvier	3 0,09		
	Langoustes	14 0,21	Langoustes	7 0,11		

3.3. MATERIEL ET METHODES

3.3.1. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE

Les prises de contact nombreuses avec les exploitants agricoles, ont été permises à travers différents réseaux et projets : CAP-NC, Province Sud, Fédération des Chasseurs, OCEF, projet ValoPRO-NC, Chronick.

3.3.1.1. Denrées agricoles végétales

Différentes approches d'échantillonnage ont été combinées afin d'atteindre les objectifs d'échantillonnage envisagés :

- des échantillonnages dans les marchés locaux et,
- des échantillonnages *in situ* directement chez les exploitants agricoles.

Les échantillonnages réalisés dans les marchés locaux permettent également des échanges et une prise de contact avec les exploitants, sans nécessairement conduire à leur accord pour un échantillonnage des sols et eaux associés à la production achetée. Néanmoins, ces échantillonnages permettent d'augmenter le nombre d'échantillons pour les analyses de métaux, et la représentativité de l'échantillonnage à l'échelle des micro-régions.

Les échantillons végétaux analysés sont issus d'échantillons composites. Néanmoins, les quantités d'individus sélectionnées par type de denrées ont été adaptées aux disponibilités sur le terrain, particulièrement lors des échantillonnages sur les marchés locaux.

Concernant la disponibilité des produits sur les étals, différentes situations ont été rencontrées :

- Lorsque les produits sont vendus par lot (ex : 5 chouchoutes, 1 botte de chou kanak), le lot est sélectionné. Tous les individus du lot sont considérés pour analyse après un quartage le cas échéant si les quantités prélevées sont trop importantes, notamment pour les bottes de légumes feuilles (brèdes, choux Kanak).

- Lorsque les produits sont vendus à l'unité, 1 échantillon = 1 individu si la masse de l'individu est suffisante pour remplir un sachet zippé de 20x20cm après découpe. C'est notamment le cas pour les très gros légumes racines ou fruits : taro, igname, courge.

- Lorsque les produits sont vendus à l'unité, mais que les masses sont trop faibles pour constituer un échantillon conséquent, alors 1 échantillon = n individus. Tous les individus du lot sont considérés pour analyse, c'est notamment le cas des chouchoutes, tomates, oranges ou mandarines.

Au marché, et dans la plupart des cas, les provenances sont indiquées par le vendeur. Néanmoins, et tel que mentionné précédemment, il n'a pas toujours été possible d'obtenir l'accord des exploitants pour échantillonner le sol associé à la culture dans un second temps.

Chez les exploitants, deux cas de figure sont rencontrés :

- par nos prises de contact directes, généralement téléphoniques, les exploitants nous reçoivent chez eux, et productions agricoles et sols sur lesquels se développent les cultures sont échantillonnées. Dans quelques cas de figures, les eaux d'irrigation sont aussi prélevées.

- après nos échantillonnages sur les marchés locaux, les exploitants acceptant la démarche, nous reçoivent sur leur exploitation, afin que l'échantillonnage des sols et des eaux associées aux cultures échantillonnées sur le marché, soit effectué. Dans ce cas de figure, l'échantillonnage a également généralement conduit à l'acquisition de nouveaux échantillons végétaux d'autres types.

3.3.1.2. Denrées agricoles animales

L'échantillonnage défini concernait 3 individus par exploitation sur 3 exploitations de chaque microrégion cible. Dans le cas des animaux, 1 échantillon = 1 individu. Les analyses ne sont pas réalisées sur des échantillons composites comme cela est le cas pour les végétaux, ou les sols. Si 3 individus ne sont pas disponibles au moment de l'abattage, le nombre d'exploitations locales a été augmenté. S'il n'y a pas assez d'exploitations au niveau local, l'acquisition de données est compensée avec des exploitations au niveau territorial.

Remarque- Un cas particulier a été réalisé pour les œufs et les poules. En effet, la quantité de matière sèche par œuf est trop faible pour constituer un seul échantillon. Pour les œufs, 1 échantillon est un échantillon composite de plusieurs œufs, le plus souvent n = 12. Enfin, et bien que le poulet consommé soit largement issu de l'importation, des prélèvements de viande de poule ont également été réalisés, ceci dans un souci de cohérence avec la denrée œuf, et non pour la consommation qui serait faite de sa chair. Pour cet item, dans ce dernier cas uniquement, un individu a été sacrifié par site de production.

- **Bœuf, cerf, porc**

Les animaux d'élevage sont prélevés à l'abattoir en fin de chaîne d'abattage. En amont aux prélèvements, les éleveurs ont été contactés et les objectifs du projet ont été explicités. Lorsque l'éleveur confirmait son intérêt pour l'étude, un document actant son consentement était signé, et présenté à l'OCEF pour pouvoir procéder aux prélèvements.

Les critères suivants sont appliqués lors de la sélection des carcasses :

- Pour ne pas pénaliser la valeur commerciale de la carcasse, on ne prélève que les animaux destinés à l'OCEF, hors prestation.
- Les animaux de réforme, susceptibles d'avoir accumulé plus de métaux au cours de leur existence sont privilégiés.
- De même, les plus grosses carcasses sont sélectionnées, en supposant qu'il s'agit d'animaux plus âgés ayant potentiellement bioaccumulé plus de métaux que des animaux plus jeunes
- Les animaux dont le bloc foie- cœur-poumon est saisi par l'OCEF sont sélectionnés en priorité pour des motifs économiques.

Les bêtes provenant des exploitations d'intérêt sont identifiées avec l'aide du personnel de l'OCEF, afin de s'assurer que les prélèvements de muscle et de foie proviennent de la même bête. Pour les bœufs et les cerfs, 200 g de muscle à l'encolure et 200 g de foie sont prélevées, tandis que pour les porcs, 200 g de muscle échine et 200 g de foie sont prélevées. Les échantillons sont conservés en glacière jusqu'au retour au laboratoire, puis congelés immédiatement et jusqu'à préparation.

- **Poulet**

Là encore, les animaux de réforme, ou des animaux à faible valeur commerciale pour le producteur sont sélectionnés, ou privilégiés pour l'abattage. Si les animaux sont fournis vifs, ils sont abattus par nos soins au laboratoire. Les 2 blancs sont prélevés, ainsi que le foie de l'animal. Les échantillons sont conservés en glacière jusqu'au retour au laboratoire, puis congelés immédiatement et jusqu'à préparation.

- **Œufs (poules et cailles)**

Dans la mesure du possible, et pour chaque exploitation, un échantillon composite est réalisé à partir de 12 œufs, dont on sépare le blanc du jaune, avant lyophilisation et analyse.

- **Gibier**

Les prélèvements sont réalisés par les chasseurs partenaires dans des conditions non maîtrisées. La consigne leur a été donnée de prélever 200 g de muscle encolure (cerf) ou d'échine (cochon sauvage) et 200 g de foie par bête ; en évitant les zones de l'animal impactées par les tirs. La viande a été congelée immédiatement après prélèvement, et jusqu'à préparation en laboratoire.

- **Autres denrées**

Bien qu'anecdotiques, des échantillons de roussettes et d'escargot *Acathina*, ont également été préparés. Ainsi pour les escargots, 2 échantillons composites de chair de 6 individus chacun ont pu être réalisés (origine Dumbéa, Province Sud). Pour les roussettes, 1 seul échantillon composite, soit 1 échantillon de muscle, et 1 de foie, a pu être réalisé à partir de 3 individus issus de régions différentes, en raison des quantités très faibles de matière disponible. Néanmoins, les résultats de ces échantillons demeurent exploratoires, et le très faible effectif ne permet d'envisager une analyses statistique pertinente.

3.3.1.3. Caractérisation des concentrations métalliques de l'environnement

Les échantillonnages chez les exploitants ont également conduit à des prélèvements des ressources sols, et/ou eaux et/ou alimentations.

Les sols, issus de la production agricole végétale échantillonnée, sont prélevés dans la zone rhizosphérique. Au moins 2 prélèvements de sols sont réalisés par végétaux échantillonnés. La profondeur d'échantillonnage dépend du type de culture considéré.

Les eaux d'irrigation, lorsque les cultures sont irriguées, sont prélevées. Il peut s'agit d'eau de surface (rivières), de forages, d'accumulateurs de pluies (artificiels ou retenues), ou encore d'eau des réseaux de ville.

Afin de caractériser des facteurs d'influence possible vis-à-vis des aliments, les eaux d'irrigation pour les cultures ou d'abreuvement pour l'élevage ont été prélevées. Alors que 150 prélèvements d'eau étaient prévus initialement, leur nombre a fortement diminué, d'une part, en raison des possibilités de prélèvements décrites ci-après, et de réorientations budgétaires. L'origine des eaux prélevées chez les agriculteurs n'est pas toujours correctement caractérisée. Au-delà du robinet, il peut s'agir de prélèvements d'eau superficielle (rivières), d'eau souterraine (forage) ou d'un réseau d'adduction public. L'eau aurait pu provenir d'un stockage d'eau de pluie (cuve, retenue) mais ce ne fut pas le cas lors de ce projet. La campagne d'échantillonnage réalisée entre juin et décembre 2022 s'est déroulée durant une phase La Niña du phénomène ENSO (El Niño Southern Oscillation) qui est la principale source de variabilité interannuelle des précipitations et des températures observées en Nouvelle-Calédonie. ENSO désigne les modifications de la circulation atmosphérique dans le Pacifique équatorial ainsi que les anomalies de température de l'océan qui y sont associées. Cet événement La Niña particulièrement long et marqué s'est traduit par une majoration importante des précipitations et par suite un très faible recours à l'irrigation. De ce fait, très peu d'échantillons (n=31) ont été prélevés car beaucoup d'agriculteurs et d'éleveurs ont bénéficié naturellement de l'eau des pluies.

La campagne d'échantillonnage a été effectuée essentiellement par l'équipe de l'IAC avec l'aide du service géologique de la DIMENC. Idéalement, les eaux sont prélevées à proximité des sites d'échantillonnage des aliments ou des sols. Lors des prélèvements une première mesure *in-situ* est réalisée (conductivité et pH de l'eau) avant échantillonnage pour une analyse au laboratoire.

Dans un contexte d'élevage extensif, les pâturages peuvent atteindre plusieurs dizaines d'hectares. Ainsi, un minimum de 6 prélèvements de sol sont réalisés au sein des zones d'aspect visuel homogènes. Sur indication des éleveurs, les eaux d'abreuvement ont également été prélevées lorsque cela était possible. Néanmoins, et selon les conditions du milieu, il peut s'agir d'eaux de surface, ou de points d'eau statiques artificiels. Les différentes zones d'abreuvement sont prélevées, sans qu'il ne soit possible de déterminer avec exactitude la préférence et la fréquence d'abreuvement aux différentes sources.

Concernant les élevages hors sols, les animaux n'étant pas significativement en contact avec le sol (dalle de béton, cage ou litière), seuls les aliments et les eaux d'abreuvement ont été échantillonnés. Pour le gibier, les aires de déplacements des animaux sauvages sont trop vastes pour qu'un prélèvement de sol soit informatif. Aussi, dans ce cas uniquement, les ressources environnantes ne sont pas étudiées. Aucun prélèvement d'eau n'est réalisé, le parcours antérieur des bêtes étant inconnu. Néanmoins, si la zone de chasse est connue, elle est répertoriée afin de permettre un éventuel recoupement avec les informations pédologiques et hydrogéologiques environnantes.

3.3.1.4. Ressources aquatiques

Pour les prélèvements sur le secteur de Thio, ils ont été intégralement réalisés par les populations locales, avec les aléas que cela a engendré quant au respect des espèces à cibler et du nombre d'individus par espèce souhaités. Il n'était pas envisageable de faire autrement dans ce secteur compte-tenu des exigences des tribus. Les méthodes de capture utilisées ne sont pas connues avec certitude, mais il est vraisemblable qu'elles regroupent des pêches au filet maillant (poissons) ou « cueillettes » manuelles (crevettes et bivalves).

Dans la rivière La Foa, les prélèvements de poissons et crustacés ont été réalisés par pêche électrique. A Pocquereux, les crevettes ont été collectées avec une nasse et à Bourail les poissons ont été collectés par pêche à la ligne. Au total, 87 individus ont été prélevés et analysés, dont 67 poissons et 20 invertébrés (11 crustacés et 9 bivalves) (Annexe A1).

3.3.2. PROTOCOLE DE PREPARATION ET D'ANALYSES DES ECHANTILLONS

3.3.2.1. Denrées agricoles végétales

Afin de limiter les contaminations métalliques, les découpes ont été réalisées à l'aide d'un couteau en céramique sur une planche en verre. Un économiste muni de lames en céramique a également été employé lorsque cela était nécessaire. Si la masse totale de l'échantillon est faible alors, l'intégralité de la matière est préparée ; si la masse totale est conséquente (lot important, ou gros légumes), alors un quartage est réalisé selon les modalités décrites ci-après (Figure 13 ; Figure 14). Plusieurs petits individus sont disponibles (ex : 4 chouchoutes), alors un même type de quartage est réalisé sur tous les individus échantillonnés pour constituer un seul échantillon composite. Si un gros individu (ex : une courge), un quartage unique est réalisé de façon à obtenir un échantillon de la taille désirée.

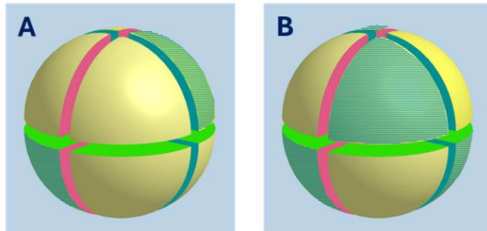


Figure 13- Exemples de quartage réalisés sur les denrées végétales de façon à obtenir un échantillon composite représentatif des différents individus échantillonnés lors d'une masse unitaire faible, ou de réduire la quantité désirée de l'individu lors d'une masse unitaire élevée. (A) $2 \times 1/8^{\text{me}}$ opposé = $1/4$ de la denrée prélevée ; (B) $4 \times 1/8^{\text{me}}$ opposé = $1/2$ de la denrée prélevée. Dans ces exemples, seules les parties hachurées sont conservées.



Figure 14- Exemple de quartage $2 \times 1/8^{\text{e}}$ sur une chouchoute

Les modalités de préparation d'échantillon (composition, traitement) ainsi que les masses pesées sont systématiquement consignées. La préparation des items tient compte de la partie du végétal consommé (ex- chair avec ou sans peau), qui seule sera soumise à analyse chimique. Néanmoins, l'ensemble des sous-parties échantillonnées a été conservé (Tableau 13).

Après préparation, les échantillons sont lyophilisés entre 2 et 7 jours selon la quantité d'eau qu'ils contiennent, ou mis en étuve ventilée à 40°C durant au moins 72h (Tableau 13). Les masses fraîches des échantillons conservés, ainsi que leurs masses sèches sont déterminées. Elles seront utilisées pour convertir les concentrations en éléments mesurées à partir des masses sèches, en masses fraîches. Un sous-échantillon est pesé, mis en tube Falcon© 50 mL, et envoyé au prestataire en charge des analyses Bureau Veritas, Canada LTD.).

Selon le protocole analytique, 5 g d'échantillons sont mis une solution dans de l'acide nitrique puis à l'eau régale. Les concentrations sont déterminées par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) dont les seuils de détection mentionnés dans le tableau 14.

Tableau 13- Récapitulatif des traitements appliqués aux différentes sous-parties des échantillons végétaux récoltés. C ou H Chair ou Cœur de l'Ananas, respectivement, C, Chair, P, Peau, G, Graine, I intégralité de l'item avec lavage (par exemple feuilles et tiges de brèdes) ; N intégralité de l'item sans lavage

Espèce	Sous-partie	Séchage	Broyage & analyse
ANANAS	ANA	P	
		C	Lyophilisation 1
		H	Lyophilisation 1
AVOCAT	AVO	P	
		C	Lyophilisation 1
		G	
BANANE	BAN	P	
		C	Lyophilisation 1
BREDE	BRE	I	Étuvage 1
		N	Étuvage 1
		G	
CAROTTE	CAR	I	Étuvage 1
		N	Étuvage 1
		P	Lyophilisation 1
		C	Lyophilisation 1
CHOU BLANC ou VERT	CBL	I	Étuvage 1
		N	Étuvage 1
CHOU CHINE	CCH	I	Étuvage 1
		N	Étuvage 1
CHOUCROUTE	CHO	P	
		C	Lyophilisation 1
		G	
CITROUILLE, COURGE, SQUASH	CIT	P	Lyophilisation 1
		C	Lyophilisation 1
		G	
CHOU KANAK	CKA	I	Étuvage 1
		N	Étuvage 1
CONCOMBRE	CON	P	Lyophilisation 1
		C	Lyophilisation 1
		G	
COURGETTE	COU	P	Lyophilisation 1
		C	Lyophilisation 1
		G	
IGNAME	IGN	I	
		P	
		C	Lyophilisation 1
MANIOC	MAC	I	
		P	
		C	Lyophilisation 1
MANGUE	MAG	P	
		C	
		G	
MANDARINE	MAN	P	
		C	Lyophilisation 1
		G	
ORANGES	ORA	P	
		C	Lyophilisation 1
		G	
PAPAYE	PAP	P	
		C	Lyophilisation 1
		G	
POMMES DE TERRE	PDT	P	Lyophilisation 1
		C	Lyophilisation 1
SALADE	SAL	I	Étuvage 1
		N	Étuvage 1
TARO	TAR	I	
		P	
		C	Lyophilisation 1
TOMATE	TOM	I	Lyophilisation 1
		N	Lyophilisation 1
		P	Lyophilisation 1
		C	Lyophilisation 1

Tableau 14- Limites de détection (LD) des analyses élémentaires réalisées par ICP-MS sur les denrées végétales. Ces données sont fournies par le prestataire Bureau Veritas LTD. Canada.

Element	Unité	LD	LD/2
Ag, Argent	ppb*	2	1
Al, Aluminium	%	0,01	0,005
As, Arsenic	ppm**	0,1	0,05
Au, Or	ppb	0,2	0,1
B, Bore	ppm	1	0,5
Ba, Baryum	ppm	0,1	0,05
Bi, Bismuth	ppm	0,02	0,01
Ca, Calcium	%	0,01	0,005
Cd, Cadmium	ppm	0,01	0,005
Co, Cobalt	ppm	0,01	0,005
Cr, Chrome	ppm	0,1	0,05
Cu, Cuivre	ppm	0,01	0,005
Fe, Fer	%	0,001	0,0005
Ga, Gallium	ppm	0,1	0,05
Hg, Mercure	ppb	1	0,5
K, Potassium	%	0,01	0,005
La, Lanthane	ppm	0,01	0,005
Mg, Magnésium	%	0,001	0,0005
Mn, Manganèse	ppm	1	0,5
Mo, Molybdène	ppm	0,01	0,005
Na, Sodium	%	0,001	0,0005
Ni, Nickel	ppm	0,1	0,05
P, Phosphore	%	0,001	0,0005
Pb, Plomb	ppm	0,01	0,005
S, Soufre	%	0,05	0,025
Sb, Antimoine	ppm	0,02	0,01
Sc, Scandium	ppm	0,1	0,05
Se, Selenium	ppm	0,1	0,05
Sr, Strontium	ppm	0,5	0,25
Te, Tellure	ppm	0,02	0,01
Th, Thorium	ppm	0,1	0,05
Ti, Titane	ppm	1	0,5
Tl, Thalium	ppm	0,02	0,01
U, Uranium	ppm	0,01	0,005
V, Vanadium	ppm	2	1
W, Tungstène	ppm	0,1	0,05
Zn, Zinc	ppm	0,1	0,05

* ppb, partie par milliard, 10^{-9}

**ppm, partie par million, 10^{-6}

Excepté pour l'arsenic, les duplicatas d'analyses démontrent généralement une bonne reproductibilité avec des coefficients de variation généralement inférieures à- ou proche de- 10% (Tableau 15).

Tableau 15- Évaluation de la reproductibilité des résultats sur les 10 éléments également analysés dans les viandes. Moy, moyenne des duplicatas, sd, écart-type des duplicatas, et CV, coefficient de variation ((sd/Moy.) x 100).

		As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm
BV074		0,20	<0,01	0,01	1,50	2,92	0,002	3	0,30	0,01	6,70
BV074 dup		0,30	<0,01	0,02	1,40	2,77	0,001	3	0,30	<0,01	6,30
	Moy	0,25	-	0,02	1,45	2,85	0,002	3,00	0,30	0,01	6,50
	sd	0,07	-	0,01	0,07	0,11	0,001	0,00	0,00	-	0,28
	CV	28,28		47,14	4,88	3,73	47,14	0,00	0,00	-	4,35
BV175		<0,1	<0,01	0,03	1,20	6,17	<0,001	<1	0,50	<0,01	9,70
BV175 dup		<0,1	<0,01	0,03	1,10	6,00	<0,001	<1	0,50	<0,01	9,20
	Moy	-	-	0,03	1,15	6,09	-	-	0,50	-	9,45
	sd	-	-	0,00	0,07	0,12	-	-	0,00	-	0,35
	CV	-	-	0,00	6,15	1,98	-	-	0,00	-	3,74
BV204		0,10	0,03	0,12	1	4,34	0,003	13	0,20	<0,01	15,40
BV204 dup		0,20	0,03	0,13	1,10	4,49	0,003	12	0,20	<0,01	15,50
	Moy	0,15	0,03	0,13	1,05	4,42	0,003	12,50	0,20	-	15,45
	sd	0,07	0,00	0,01	0,07	0,11	0,000	0,71	0,00	-	0,07
	CV	47,14	0,00	5,66	6,73	2,40	0,00	5,66	0,00	-	0,46
BV217		<0,1	<0,01	<0,01	0,90	2,82	0,004	15	<0,1	<0,01	18,10
BV217 dup		0,30	<0,01	<0,01	0,80	2,80	0,004	15	<0,1	<0,01	17,70
	Moy	0,30	-	-	0,85	2,81	0,004	15,00	-	-	17,90
	sd	-	-	-	0,07	0,01	0,000	0,00	-	-	0,28
	CV	-	-	-	8,32	0,50	0,00	0,00	-	-	1,58
BV232		<0,1	0,06	0,38	1,10	8,92	0,015	55	4,10	0,09	78
BV232 dup		<0,1	0,05	0,37	1,10	8,85	0,015	55	4,10	0,06	76,70
	Moy	-	0,06	0,38	1,10	8,89	0,015	55,00	4,10	0,08	77,35
	sd	-	0,01	0,01	0,00	0,05	0,000	0,00	0,00	0,02	0,92
	CV	-	12,86	1,89	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00	28,28	1,19
BV261		<0,1	<0,01	0,01	0,90	2,83	<0,001	10	0,90	0,02	19,10
BV261 dup		<0,1	<0,01	0,01	0,90	2,81	<0,001	10	0,80	<0,01	19,50
	Moy	-	-	0,01	0,90	2,82	-	10,00	0,85	0,02	19,30
	sd	-	-	0,00	0,00	0,01	-	0,00	0,07	-	0,28
	CV	-	-	0,00	0,00	0,50	-	0,00	8,32	-	1,47
BV232		0,09	0,02	<0,1	<0,01	1,20	<0,1	1,91	1,10	53,40	<0,1
BV232 dup		0,06	0,02	<0,1	<0,01	1,70	<0,1	1,84	1,10	49,70	<0,1
	Moy	0,08	0,02	-	-	1,45	-	1,88	1,10	51,55	-
	sd	0,02	0,00	-	-	0,35	-	0,05	0,00	2,62	-
	CV	28,28	0,00	-	-	24,38	-	2,64	0,00	5,08	-
BV261		0,02	<0,001	<0,1	<0,01	<0,2	<0,1	<0,01	0,90	0,10	<0,1
BV261 dup		<0,01	<0,001	<0,1	<0,01	0,30	<0,1	<0,01	0,90	0,10	<0,1
	Moy	0,02	-	-	-	0,30	-	-	0,90	0,10	-
	sd	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	-
	CV	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	-
	Moy CV	34,57	4,29	10,94	4,35	4,86	11,78	1,38	1,19	11,12	2,13

3.3.2.2. Denrées agricoles animales

Les échantillons de viande (muscles et foie) sont découpés, congelés, au couteau céramique. Les plus gros amas de graisse, s'il y en a, sont retirés, afin d'étudier des échantillons de composition similaire. Un échantillon d'œuf correspond à un échantillon composite d'une douzaine d'œufs. Les blancs sont séparés des jaunes à l'aide d'un clarificateur d'œufs. Les échantillons ainsi préparés sont congelés et lyophilisés. Les analyses des denrées animales devant initialement être réalisées localement, le protocole de préparation est décrit en annexe 2. Néanmoins, au regard de la panne persistante de l'analyseur ICP-MS, un sous-échantillon lyophilisé de l'ensemble des échantillons a été envoyé au laboratoire Inovalys (Nantes, France) pour analyses dont les limites de quantification ont été fournies par élément (Tableau 16).

Tableau 16- Limite de quantification (LOQ) de l'ICP-MS des analyses élémentaires réalisées sur les denrées animales. Ces données sont fournies par le prestataire Inovalys, Nantes, France.

Element	LOQ (mg kg ⁻¹)	LOQ/2
As	0,05	0,025
Cd	0,05	0,025
Cr	0,1	0,05
Co	0,01	0,005
Cu	0,1	0,05
Fe	0,8	0,4
Mn	0,05	0,025
Ni	0,25	0,125
Pb	0,05	0,025
Zn	2	1

Dans une optique de reproductibilité des mesures, 3 échantillons de nature différente, ont été analysés en aveugle pour le prestataire, lors de 2 sessions d'analyses. Les résultats sont mentionnés dans le tableau 17. Bien qu'il ne soit pas possible à partir de ces quelques résultats d'estimer une réelle répétabilité ou reproductibilité de mesure et de méthode, ils tendent à démontrer une bonne reproductibilité des analyses avec des coefficients de variation < 10% pour l'ensemble des éléments, et une moyenne -matrice et élément confondus- égale à 3,38 ± 2,44 %

Tableau 17- Évaluation de la reproductibilité des résultats.

Cession analytique	Catégorie	As	Cd	Cr	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
mg kg ⁻¹ MS											
14/06/2024	Oeuf	<0,05	<0,05	0,22	0,01	2,50	120	2,20	<0,25	0,07	66
04/03/2024	Oeuf	<0,05	<0,05	0,23	0,01	2,40	120	2,00	<0,25	0,07	64
	Moy	-	-	0,23	0,01	2,45	120	2,10	-	0,07	65
	sd	-	-	0,01	0,00	0,07	0,00	0,14	-	0,00	1,41
	CV(%)	-	-	3,14	6,15	2,89	0,00	6,73	-	5,09	2,18
14/06/2024	Muscle	<0,05	<0,05	0,12	0,32	680	540	9,40	<0,25	<0,05	78
04/03/2024	Muscle	<0,05	<0,05	0,13	0,36	700	530	9,60	<0,25	<0,05	83
	Moy	-	-	0,13	0,34	690	535	9,50	-	-	80,50
	sd	-	-	0,01	0,03	14,14	7,07	0,14	-	-	3,54
	CV(%)	-	-	5,66	8,32	2,05	1,32	1,49	-	-	4,39
14/06/2024	Foie	<0,05	<0,05	0,13	<0,010	2,40	82	0,38	<0,25	<0,05	210
04/03/2024	Foie	<0,05	<0,05	0,14	0,01	2,50	86	0,38	<0,25	<0,05	210
	Moy	-	-	0,14	-	2,45	84,00	0,38	-	-	0,00
	sd	-	-	0,01	-	0,07	2,83	0,00	-	-	0,00
	CV(%)	-	-	5,24	-	2,89	3,37	0,00	-	-	0,00

3.3.2.3. Denrées aquatiques

Immédiatement après prélèvements, tous les échantillons ont été disposés directement au congélateur à -20°C lorsque cela était possible, ou bien mis préalablement au frais dans une glacière jusqu'à la mise au congélateur le lendemain dans les autres cas.

Chaque individu de chaque site de prélèvement a été identifié au niveau de l'espèce. Pour chaque individu de chaque espèce, environ 4-5 g de masse musculaire fraîche a été mise en tube, puis lyophilisée durant 48h et ensuite réduite en poudre homogène. La détermination des concentrations en éléments métalliques a été réalisée au service d'analyses des roches et minéraux (SARM) du CNRS de Vandoeuvre-les-Nancy, en utilisant un ICP-MS. Dans les cas où la concentration élémentaire était inférieure à la limite de détection de l'élément considéré (Tableau 18), la valeur retenue pour les analyses statistiques a été LD/2. Toutes les valeurs de concentration présentées ci-après sont données en masse sèche.

Tableau 18- Limite de détection (LD) de l'ICP-MS des analyses élémentaires réalisées sur les denrées animales aquatiques. Ces données sont fournies par le service d'analyses des roches et minéraux (SARM) du CNRS, Vandoeuvre-les-Nancy, France.

	LD (mg.kg ⁻¹)	LD/2
As	0,05	0,025
Cd	0,01	0,005
Co	0,02	0,01
Cr	0,05	0,025
Cu	0,5	0,25
Ni	3,5	1,75
Pb	0,25	0,125
Zn	3	1,5
Fe	21	10,5
Mn	2,3	1,15

4. RESULTATS & DISCUSSION

Dans cette étude, les concentrations totales en éléments métalliques ont été étudiées dans les denrées alimentaires produites ou prélevées en Nouvelle-Calédonie. La spéciation des métaux dans ces denrées n'a pas été réalisée, et les concentrations métalliques des denrées importées n'ont pas non plus été étudiées ; seuls quelques échantillons de riz (provenance Vietnam et Thaïlande) ont été analysés.

4.1. BILAN DES ECHANTILLONNAGES REALISES

4.1.1. DENREES AGRICOLES VEGETALES

Sur les échantillons végétaux et d'alimentation animale récoltés, 208 analyses ont été réalisées : 15 concernent des aliments animaux, 33 concernent des denrées végétales analysées sans nettoyage au préalable, et 160 concernent diverses denrées végétales analysées après un nettoyage à l'eau ultrapure (Tableau 19). Sur ces 208 analyses, 14 n'ont pas pu être validées, et n'ont pas pu faire l'objet de reprise en raison d'une masse restante d'échantillon trop faible (Tableau 19).

Tableau 19- Origines géographiques des 160 échantillons dont les analyses élémentaires ont été validées.

Région	Commune	Catégories de denrées	N
Territoire	KONE	Fruit	1
	CANALA	Fruit	1
	DUMBEA	Légume feuille	2
	ILE DES PINS	Légume fruit	1
		Légume racine	1
	MONT DORE	Fruit	4
		Légume fruit	5
		Légume racine	2
	PAITA	Légume feuille	1
		Légume fruit	1
La Foa		Légume racine	1
		Fruit	5
	BOULOUPARIS	Légume feuille	10
		Légume fruit	22
		Légume racine	6
	FARINO	Fruit	3
		Légume feuille	4
		Légume fruit	2
	LA FOA	Légume racine	2
		Fruit	5
Légume feuille		3	
MOINDOU	Légume racine	5	
	Légume fruit	5	
Poya/Nepoui	POYA	Fruit	7
		Légume feuille	6
		Légume fruit	11
		Légume racine	8
Thio	THIO	Fruit	10
		Légume feuille	6
		Légume fruit	9
IMPORTATION	VIETNAM	Légume racine	5
		Céréales (riz)	3
	THAÏLANDE	Céréales (riz)	2

Sur les 37 éléments analysés, 4 n'étaient jamais quantifiés (Bi, Te, Th, et W), et 6 étaient quantifiés dans l'ensemble des échantillons analysés (B, Cr, Cu, Mg, P, Zn) (Tableau 20). Pour les autres éléments, quantifiés de manière non systématique selon l'échantillon, les pourcentages de quantification variaient de façon conséquente, soit entre 0,7 % pour Se, et 99,3 % pour B. À noter des concentrations inférieures aux LD basses (< 0,01 %) dans 4/5^{ème} des échantillons de riz, et des concentrations en K supérieures aux LD supérieures (> 10 ppm) pour les échantillons de salades. Les éléments cibles : Co, Cr, Mn et Ni, étaient quantifiés respectivement dans 92,7%, 100%, 96% et 98,7% des cas. Les résultats acquis pour ces éléments dans le cadre du présent projet sont donc particulièrement robustes.

Tableau 20- Pourcentages de concentrations supérieures et inférieures aux LD par élément.

Élément	[] > LD _{sup} (%)	[] > LD _{inf} (%)	[] < LD _{inf} (%)
Bi	0	0	100
Te	0	0	100
Th	0	0	100
W	0	0	100
Sc	0	0,7	99,3
Ga	0	1,3	98,7
U	0	1,3	98,7
Al	0	5,3	94,7
Tl	0	6,0	94,0
Sb	0	7,3	92,7
V	0	15,3	84,7
La	0	23,3	76,7
Ag	0	30,7	69,3
Hg	0	38,7	61,3
As	0	42,7	57,3
Cd	0	42,7	57,3
Au	0	44,7	55,3
Se	0	46,7	53,3
Ti	0	69,3	30,7
Pb	0	70,7	29,3
Na	0	86,0	14,0
S	0	90,0	10,0
Fe	0	91,3	8,7
Co	0	92,7	7,3
Mn	0	96,0	4,0
Mo	0	96,0	4,0
Sr	0	96,0	4,0
Ca	0	97,3	2,7
K	2	98,0	0,0
Ni	0	98,7	1,3
Ba	0	99,3	0,7
B	0	100	0
Cr	0	100	0
Cu	0	100	0
Mg	0	100	0
P	0	100	0
Zn	0	100	0

Remarque- Pour des questions d'uniformisation, les données considérées dans cette section, concernent les organes consommés des denrées végétales ; et échantillons lavés lorsque cela est pertinent (légumes feuilles, légumes fruits dont la peau est consommée (Ex- tomates)).

Si les pourcentages de concentrations quantifiées variaient avec les éléments, les résultats indiquaient également un effet « type de denrée » sur le pourcentage de quantification (Tableau 21), mettant d'ores et déjà en évidence des différences de concentrations inter-denrées qui seront étudiées ci-après.

Tableau 21- Pourcentages d'échantillons, par élément et par type de denrée, dont les concentrations ont été quantifiées. Dans ce tableau, ne sont pas mentionnées les éléments suivants Bi, Te, Th, W, et B, Cr, Cu, Mg, P, Zn ; puisque, leurs concentrations n'ont jamais pu être quantifiées ou ont été quantifiées dans l'ensemble des échantillons, respectivement.

	Céréales	Fruits	Légumes feuilles	Légumes fruits	Légumes racines
Ag (ppb)	40	5	41	54	13
Al (%)	0	0	17	0	10
As (ppm)	40	34	48	48	40
Au (ppb)	40	34	76	44	30
Ba (ppm)	100	100	100	98	100
Ca (%)	20	100	100	100	100
Cd (ppm)	20	5	93	44	43
Co (ppm)	100	82	100	96	93
Fe (%)	0	97	100	100	77
Ga (ppm)	0	0	0	0	7
Hg (ppm)	40	18	86	23	43
K (%)	100	100	100	100	100
La (ppm)	0	0	69	19	20
Mn (ppm)	100	100	100	100	80
Mo (ppm)	100	97	100	98	87
Na (%)	40	63	100	96	93
Ni (ppm)	100	100	100	96	100
Pb (ppm)	40	71	97	65	60
S (%)	100	82	100	100	73
Sb (ppm)	40	0	21	4	3
Sc (ppm)	0	0	3	0	0
Se (ppm)	40	11	83	56	43
Sr (ppm)	0	100	100	100	97
Ti (ppm)	0	55	100	83	47
Tl (ppm)	0	0	14	4	10
U (ppm)	0	0	0	0	7
V (ppm)	0	24	14	21	0

4.1.2. DENREES AGRICOLES ANIMALES

Les échantillonnages de denrées animales réalisés sont mentionnés dans le tableau 22. Ces échantillons, proviennent de 30 fournisseurs, éleveurs principalement sauf en ce qui concerne la viande de cerf et de cochon sauvage, parfois issue de chasses ; aussi l'origine géographique des échantillons est mentionnée dans le tableau 23. Les digestions acides et les analyses par ICP-MS des échantillons ont toutes été réalisées par le laboratoire Inovalys suite aux déficiences multiples de l'instrumentation analytique du territoire, et ce, malgré le fait que l'ensemble des digestions acides avaient été réalisées par nos soins. Ces extraits acides ont été conservés, et pourront faire l'objet d'analyses et de comparaisons inter-laboratoires *a posteriori*.

Tableau 22- Type de denrée échantillonnée, nombre et nature des échantillons animaux.

	Nombres d'échantillons	Nature de l'échantillon
Bœuf	52	Muscle / Foie
Porc	54	Muscle / Foie
Œuf	22	Blanc / Jaune
Cerf	19	Muscle / Foie
Poulet	9	Muscle / Foie
Cochon sauvage	4	Muscle / Foie
Escagot bulime	2	Individu complet sans coquille
Roussette	2	Muscle / Foie
Total général	164	

Tableau 23- Origine géographique à l'échelle communale des échantillons prélevés de denrées animales, Remarque- Bien qu'issues de trois localités différentes, les biomasses de roussettes ont été mélangées, les concentrations mentionnées dans ce rapport sont donc représentatives d'une donnée moyenne.

Nature	Localité
Bœufs	La Foa
	Moindou
	Païta
	Poya
	Thio
Porcs	Boulouparis
	Bourail
	Kaala-Gomen
	Moindou
	Mont Dore
	Païta
	Pouembout
	Poya
	Boulouparis
Œufs	Dumbéa
	Ile des Pins
	Mont Dore
	Païta
	Poya
	Sarraméa
	Yaté
	Boulouparis
Cerfs	Poya
	Sarraméa
	Boulouparis
Poulets	Dumbéa
	Ile des Pins
	Moindou
	Païta
Cochons sauvages	La Foa
	Sarraméa

L'échantillonnage des ressources associées est également réalisé lorsque cela est possible ou pertinent. Ainsi, pour les échantillons prélevés directement chez les éleveurs, et lorsque les animaux sont élevés hors-sol, les aliments de nourrissage ont été prélevés et analysés selon le même protocole que celui utilisé pour les denrées végétales. 11 types d'aliments, 21 sols associés et 29 eaux d'abreuvement ont été récoltés.

Remarque- Selon la typologie d'élevage (hors sols, pâturage extensif), il n'est pas nécessairement pertinent ni possible d'étudier la séquence : denrée-sol-eau-aliment.

Les limites de quantification pour les analyses de denrées animales sont mentionnées par élément dans le tableau 16. Les analyses ayant été réalisées sur des échantillons secs, les LOQ indiquées sont considérées comme étant représentatives des concentrations sur masse sèche. Aussi, des valeurs de LOQ sur une base de masse fraîche ont été calculées pour chaque élément et chaque denrée, en tenant compte de leur teneur en matière sèche, afin notamment de pouvoir attribuer une valeur numérique basée sur la LOQ/2.

Seul le cuivre a pu être quantifié dans l'ensemble des échantillons (Tableau 24). Le chrome, le fer, le manganèse et le zinc étaient quantifiés dans la plupart des échantillons. Tandis que l'arsenic, le cadmium, et le plomb présentaient des concentrations généralement inférieures aux LOQ. Le nickel présentait un pourcentage de quantification très faible ([Ni] > LOQ pour 3,66% des échantillons), mais la LOQ pour cet élément était la plus élevée, *i.e.*, 0,25 mg.kg⁻¹ (Tableau 16).

Tableau 24- Pourcentage de concentrations quantifiées par élément et pour les analyses de denrées animales agricoles, tout organes confondus (n = 164). Les valeurs de LOQ sont mentionnées dans le tableau 16.

Element	□ > LOQ _{inf} (%)	□ < LOQ _{inf} (%)
As	6,1	93,9
Cd	22,6	77,4
Cr	95,7	4,3
Co	67,1	32,9
Cu	100,0	0,0
Fe	97,6	2,4
Mn	93,3	6,7
Ni	3,7	96,3
Pb	15,2	84,8
Zn	93,3	6,7

* Les échantillons étant secs au moment de leurs analyses, les valeurs de LOQ ont été également calculées sur une base de masse fraîche afin de pouvoir attribuer une valeur numérique aux échantillons dont les concentrations étaient inférieures aux LOQ.

Dans le détail, et pour les denrées carnées, les concentrations en Cu, Fe, Mn et Zn étaient supérieures aux LOQ pour l'ensemble des échantillons de foie et de muscle (0% d'échantillons < LOQ) (Figure 15). Aucun échantillon de foie ne présentait des concentrations inférieures aux LOQ pour le Cr et le Co. Les concentrations en Cd, Cr, Co, Ni et Pb étaient détectées pour un plus grand nombre d'échantillons de foie que de muscle. Ainsi, un seul échantillon de muscle présentait une concentration quantifiable en cadmium : la chair de roussette. D'ores et déjà, et au regard des valeurs de LOQ relativement faibles indiquées par le laboratoire d'analyse (Tableau 16), ces résultats suggèrent des concentrations généralement faibles pour les éléments les plus toxiques (As, Cd, Pb) qui pourraient être rencontrés dans les viandes ; mais aussi une hétérogénéité importante selon les denrées qu'il convient d'étudier.

Pour les œufs, aucune concentration supérieure aux LOQ n'a pu être mesurée pour Cd et Ni dans le blanc et le jaune d'œuf, et pour Mn, Pb et Zn dans le blanc d'œuf (Figure 15). Cr, Fe, Mn et Zn ont été détectés dans 100% des jaunes d'œuf (0% d'échantillons < LOQ) ; enfin le cuivre était le seul élément dont les concentrations étaient supérieures aux LOQ aussi bien dans les jaunes que dans les blancs d'œufs (0% d'échantillons < LOQ) (Figure 15).

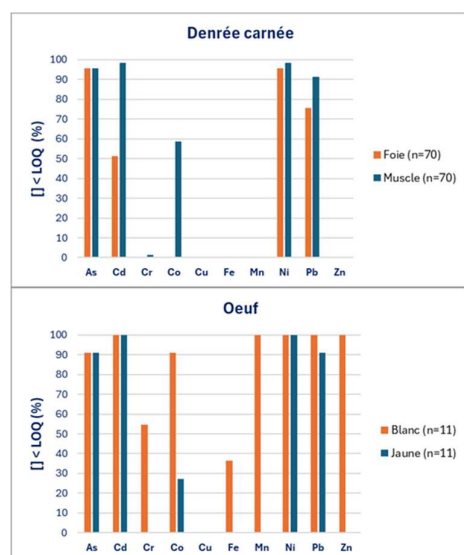


Figure 15- Pourcentages de concentrations inférieures aux LOQ pour les éléments étudiés dans les blancs et les jaunes d'œufs d'une part (graphique du haut), et dans les denrées carnées, d'autre part (graphique du bas).

4.1.3. RESSOURCES AQUATIQUES : EVALUATION GLOBALE

Pour As, et Zn, les LD étaient systématiquement dépassées, pour d'autres éléments (Co, Cr, Cu, Fe), les LD étaient dépassées de façon relativement fréquente à très fréquente, alors que pour Cd, Mn, Ni, Pb, les LD étaient dépassées de façon minoritaire (Tableau 25).

Tableau 25- Valeurs moyennes (en mg kg⁻¹ MS), écart-types (sd), min-max, limite de détection (LD) et % de valeurs < à la LD pour les 10 éléments analysés, tous individus et toutes espèces confondues (N= 87). Sd = écart-type.

	Moyenne	Sd.	Min	Max	LD	% < LD
As	3,13	6,63	0,10	43,11	0,05	0
Cd	0,05	0,19	0,01	1,41	0,01	79,31
Co	0,74	3,17	0,01	29,07	0,02	1,15
Cr	6,21	19,55	0,03	168,6	0,05	14,94
Cu	26,37	124,4	0,25	1129,2	0,5	3,45
Fe	127,8	393,7	10,50	3217,7	0,003	20,69
Mn	5,85	13,83	1,15	89,85	0,003	80,46
Ni	10,00	31,92	1,75	279,8	3,5	65,52
Pb	0,30	0,63	0,13	5,59	0,25	71,26
Zn	237,44	1103,7	10,24	9516,5	3	0

4.2. QUELLES CONCENTRATIONS ELEMENTAIRES DANS LES DENREES ALIMENTAIRES DE NOUVELLE-CALÉDONIE

4.2.1. CONCENTRATIONS ELEMENTAIRES DANS LES VEGETAUX CULTIVES

4.2.1.1. Comparaison entre typologie de denrées - Résultats en matière sèche

Les concentrations moyennes (\pm sd) ainsi que les valeurs médianes en cobalt, chrome, nickel et manganèse, mesurées dans les parties consommées des légumes et fruits, sont présentées dans le tableau 26 et la figure 16.

Les rapports entre les valeurs médianes et les moyennes sont généralement largement inférieurs à 1 suggérant quelques valeurs particulièrement élevées qui tendent à augmenter les valeurs des moyennes. D'autre part, les rapports calculés entre les concentrations maximales et les minimales démontrent une variabilité conséquente des concentrations pour un même élément, et une même catégorie de denrées. Par exemple, pour les légumes fruits, les concentrations en nickel variaient entre 0,1 et 43,6 mg.kg⁻¹MS (Tableau 26). Les concentrations moyennes, toutes denrées confondues, diminuaient selon la séquence : Mn > Ni > Cr > Co.

Bien que l'ordre de variation des concentrations entre les catégories soit fonction de l'élément considéré, il apparaît des concentrations généralement plus élevées (moyennes, médianes et maximum) dans les légumes feuilles pour Co, Cr, Mn et Ni.

Tableau 26- Concentrations en cobalt (Co), chrome (Cr), manganèse (Mn), et nickel (Ni) (mg kg⁻¹ MS) mesurées dans les différentes catégories de denrées agricoles végétales. Les valeurs moyennes, les écarts-types (sd), les médianes, le rapport médiane/moyenne, les valeurs minimales (Min.) et maximales (Max.) ainsi que le ratio entre les deux, sont présentées dans ce tableau. Nb. Hormis les céréales, les données sont toutes issues de denrées produites ou prélevées sur le territoire de la Nouvelle-Calédonie.

		Co	Cr	Mn	Ni
		mg kg ⁻¹ MS			
Fruit	Moyenne	0,06	1,13	15,0	1,39
	sd	0,09	0,28	25,7	1,31
	Médiane	0,02	1,30	4,00	0,85
	Rapport Médiane / Moyenne	0,34	1,15	0,27	0,61
	Min	0,01	0,50	1,00	0,10
	Max	0,40	1,50	134	5,40
	Rapport Max/Min	80,0	3,00	134	54
Légume feuille	Moyenne	0,66	2,51	58,6	12,9
	sd	0,67	2,51	44,9	13,9
	Médiane	0,37	1,70	55,0	8,60
	Rapport Médiane / Moyenne	0,56	0,68	0,94	0,66
	Min	0,05	0,90	15,0	0,30
	Max	2,27	12,2	246	50,9
	Rapport Max/Min	45,4	13,6	16,4	170
Légume fruit	Moyenne	0,39	1,19	14,9	6,85
	sd	0,45	0,33	11,4	9,76
	Médiane	0,19	1,10	11,5	1,90
	Rapport Médiane / Moyenne	0,48	0,93	0,77	0,28
	Min	0,01	0,70	1,00	0,05
	Max	1,70	2,30	50,0	43,6
	Rapport Max/Min	340	3	50,0	872
Légume racine	Moyenne	0,26	1,51	14,6	3,39
	sd	0,54	1,85	22,7	5,73
	Médiane	0,07	1,10	6,00	1,35
	Rapport Médiane / Moyenne	0,27	0,73	0,41	0,40
	Min	0,01	0,90	0,50	0,10
	Max	2,40	11,1	89,0	27,1
	Rapport Max/Min	480	12,3	178	271
Céréales (riz)	Moyenne	0,04	0,92	9,40	0,48
	sd	0,03	0,04	1,95	0,36
	Médiane	0,03	0,90	10,0	0,60
	Rapport Médiane / Moyenne	0,83	0,98	1,06	1,25
	Min	0,01	0,90	7,00	0,10
	Max	0,09	1,00	12,0	0,90
	Rapport Max/Min	9,00	1,11	1,71	9,00

Les concentrations moyennes en cobalt, diminuaient significativement selon la séquence : légumes feuilles > légumes fruits > légumes racines > fruits (aov, $P < 0,001$) (Figure 16). Les concentrations en nickel selon la séquence : légumes feuilles > légumes fruits > légumes racines = fruits (Figure 16). Les concentrations en manganèse et en chrome étaient plus élevées dans les légumes feuilles, mais ne montraient pas de différence significative entre les autres catégories de denrées (Figure 16).

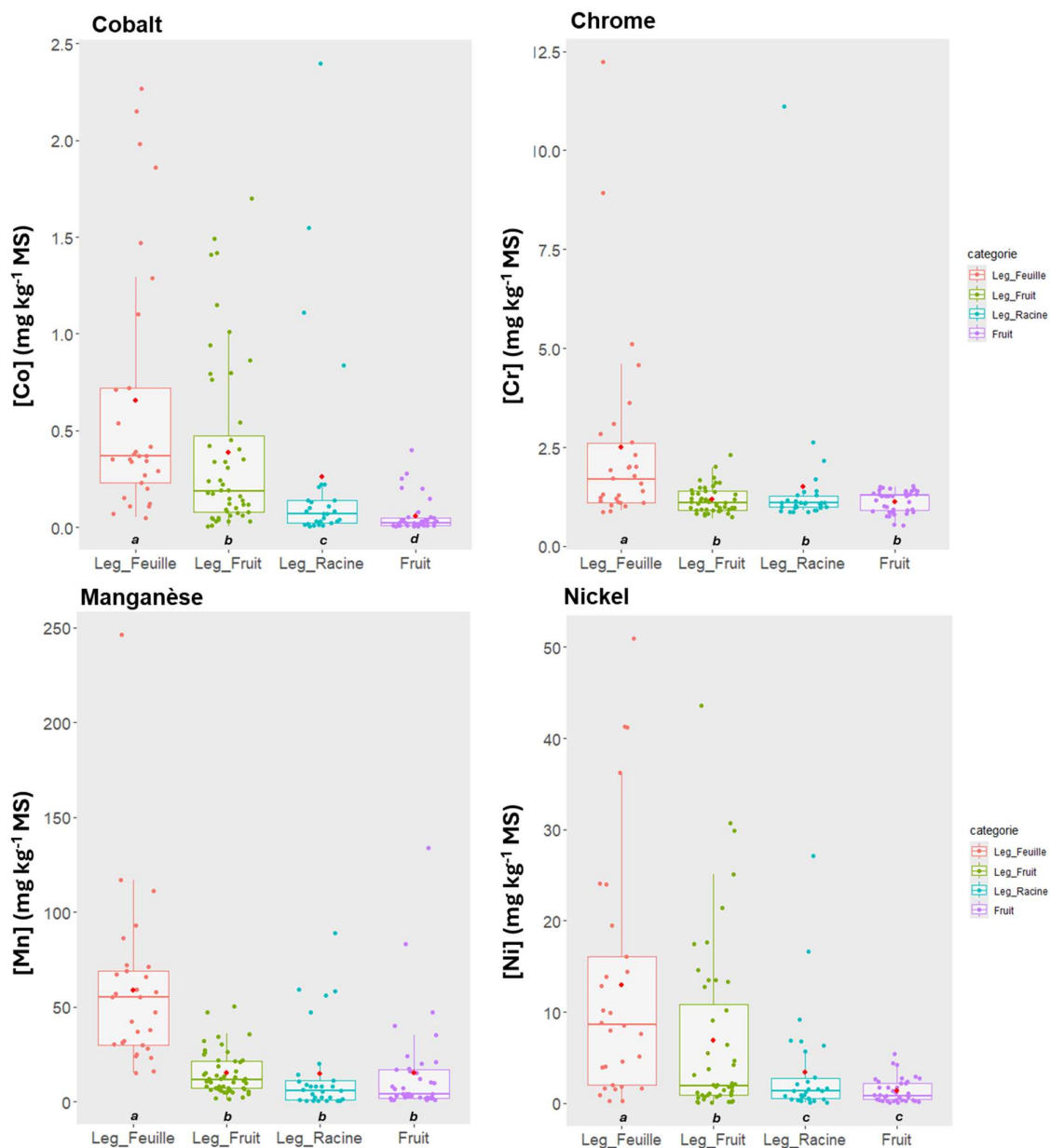


Figure 16- Diagrammes en boîte des concentrations en cobalt, chrome, manganèse et nickel (en ppm, soit en mg kg^{-1} , en masse sèche) par catégories de denrées agricoles végétales : légumes feuilles ($n=29$) ; légumes racines ($n=30$), légumes fruits ($n=48$), et fruits ($n=38$). Les concentrations sont présentées en matière sèche des parties consommées et préalablement nettoyées. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les lettres indiquent une différence statistiques significative au seuil $\alpha = 0,05$.

Les concentrations en Co, Cr, Mn et Ni, pour chaque denrée étudiée sont détaillées dans les Figures 17 à 20.

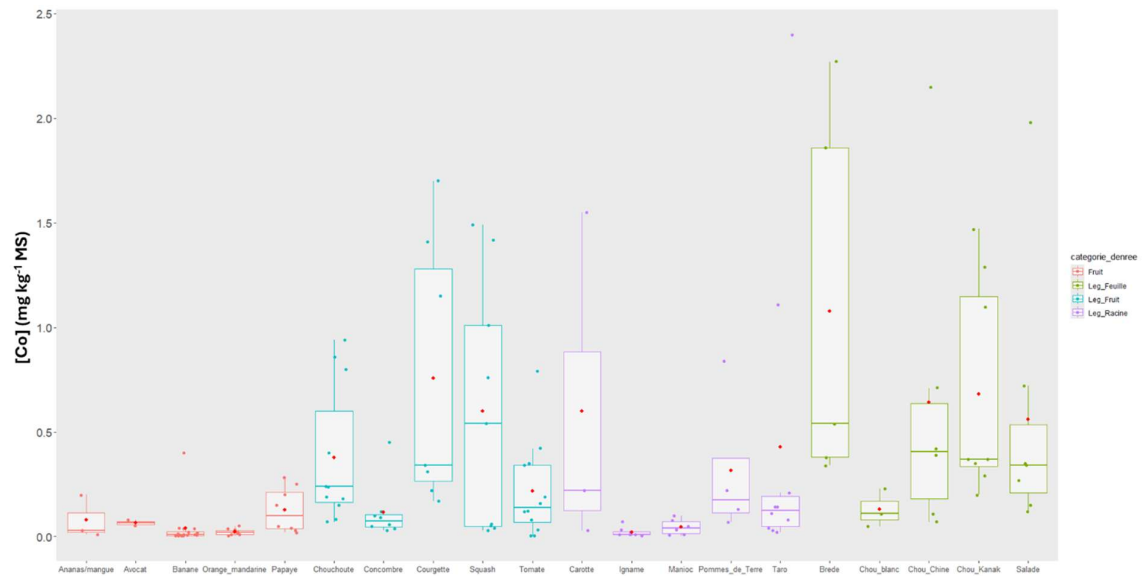


Figure 17- Diagrammes en boîte des concentrations en cobalt (ppm, ou mg kg⁻¹, en masse sèche) pour les différentes denrées produites localement. Une même couleur représente une même catégorie de denrée.

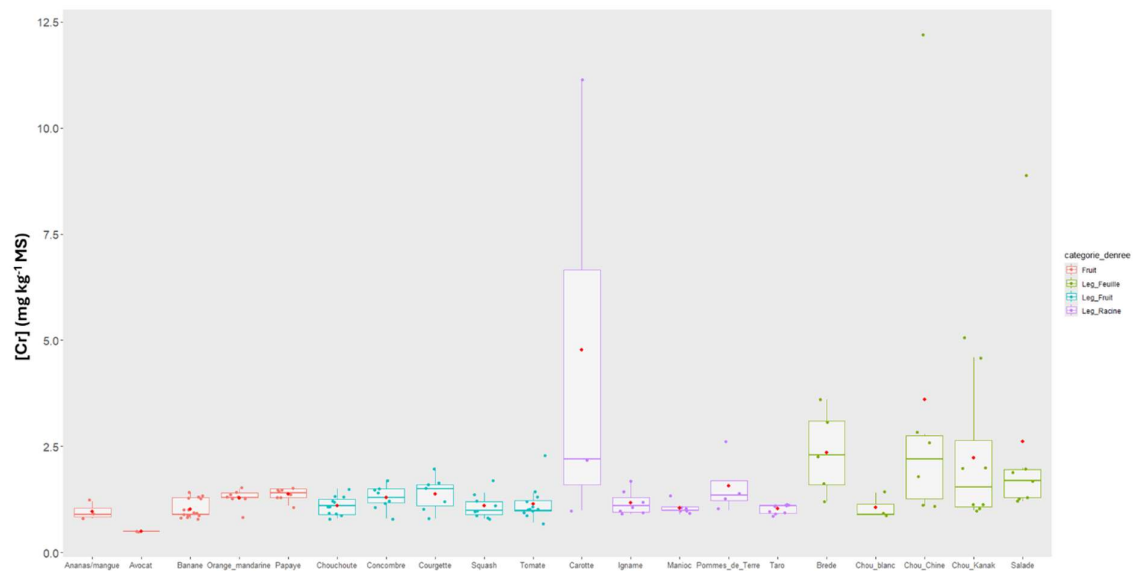


Figure 18- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome (ppm, ou mg kg⁻¹, en masse sèche) pour les différentes denrées produites localement. Une même couleur représente une même catégorie de denrée.

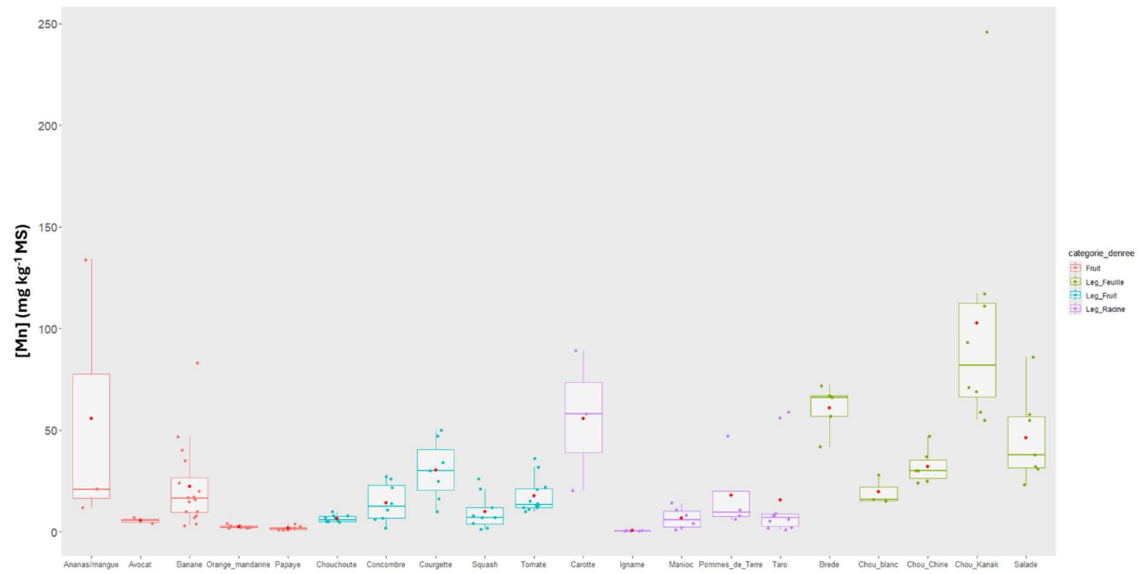


Figure 19- Diagrammes en boîte des concentrations en manganèse (ppm, ou mg kg⁻¹, de matière sèche) pour les différentes denrées produites localement. Une même couleur représente une même catégorie de denrée.

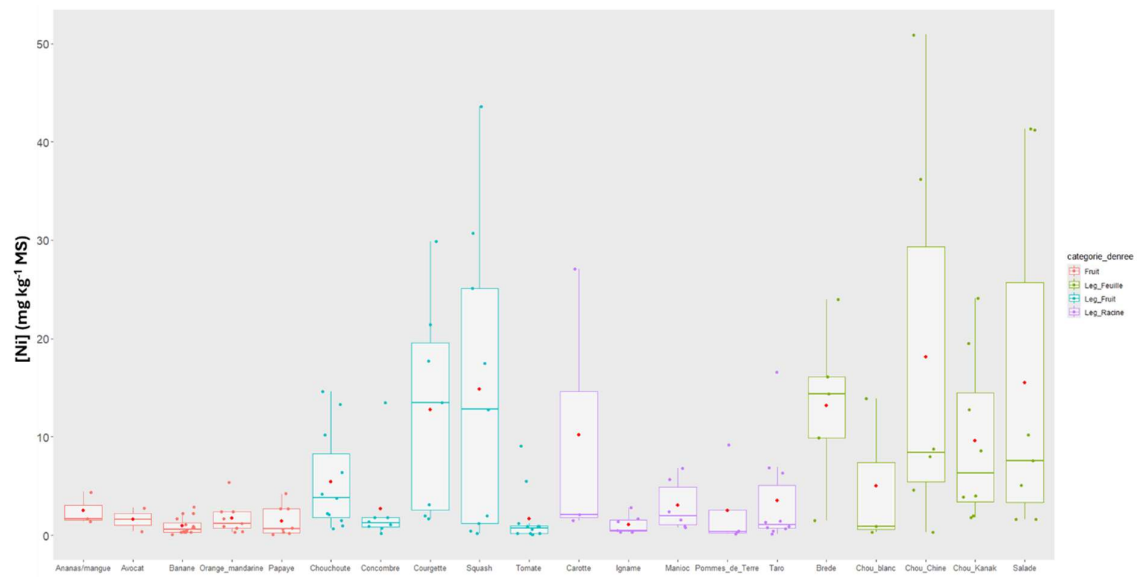


Figure 20- Diagrammes en boîte des concentrations en nickel (ppm, ou mg kg⁻¹, en masse sèche) pour les différentes denrées produites localement. Une même couleur représente une même catégorie de denrée.

À titre informatif, les statistiques descriptives pour les autres métaux quantifiés sont précisées dans le tableau 27. Ainsi, et considérant l'ensemble des éléments étudiés, les concentrations moyennes et les médianes, variaient de façon décroissante selon la séquence : légumes feuilles > légumes fruits > légumes racines > fruits ; même si de légers écarts à cette séquence apparaissaient selon l'élément considéré (e.g., Fe, Na, Pb, Ti) (Tableau 27).

Tableau 27- Moyennes, écarts-types (sd), médianes, minima (Min.), et maxima (Max.), des concentrations moyennes (mg kg⁻¹ ou %, en matière sèche MS) par catégorie de denrées. Les effectifs (N) utilisés pour ces calculs sont n=5 pour les céréales (riz d'importation), n=29 pour les légumes feuilles, n=30 pour les légumes racines, n=48 pour les légumes fruits, et n=38 pour les fruits. Seuls sont indiqués dans ce tableau, les éléments pour lesquels les concentrations étaient quantifiées dans plus de 50% des échantillons.

		B	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mo	Na	P	Pb	S	Sr	Ti	Zn
		mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	%	%	%	mg kg ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
Céréales (Riz)	Moyenne	1,20	0,20	0,050	2,01	0,001	0,098	0,021	0,74	0,001	0,096	0,01	0,116	0,25	0,50	17,28
	sd	0,45	0,14	0,000	0,81	0,000	0,026	0,013	0,26	0,000	0,028	0,01	0,017	0,00	0,00	1,15
	Médiane	1,00	0,10	0,050	2,10	0,001	0,090	0,012	0,65	0,001	0,081	0,01	0,120	0,25	0,50	16,80
	Min.	1,00	0,10	0,050	1,12	0,001	0,070	0,011	0,56	0,001	0,073	0,01	0,090	0,25	0,50	16,30
	Max.	2,00	0,40	0,050	2,83	0,001	0,130	0,036	1,19	0,001	0,133	0,02	0,130	0,25	0,50	19,10
Légume feuille	Moyenne	34,00	26,71	1,522	6,52	0,023	5,899	0,890	1,05	0,169	0,558	0,08	0,556	60,11	4,10	50,25
	sd	9,37	38,07	0,836	3,62	0,018	5,173	0,478	1,08	0,205	0,184	0,11	0,273	55,33	3,41	27,23
	Médiane	32,00	12,50	1,360	5,90	0,018	4,030	0,774	0,58	0,110	0,533	0,06	0,480	37,80	3,00	47,50
	Min.	20,00	0,50	0,270	1,45	0,003	1,880	0,194	0,05	0,015	0,219	0,01	0,250	4,00	2,00	14,50
	Max.	60,00	162,60	3,920	16,73	0,076	20,000	2,150	3,71	1,084	1,042	0,62	1,440	223,80	15,00	153,00
Légume fruit	Moyenne	21,17	4,88	0,289	5,56	0,005	3,486	0,299	0,42	0,022	0,460	0,02	0,219	10,78	2,15	23,04
	sd	8,63	6,68	0,248	3,27	0,003	1,521	0,176	0,67	0,036	0,212	0,03	0,126	9,92	1,24	11,01
	Médiane	20,00	1,95	0,190	4,52	0,004	3,260	0,230	0,25	0,010	0,416	0,02	0,190	8,25	2,00	19,95
	Min.	10,00	0,05	0,050	0,45	0,002	1,140	0,061	0,01	0,001	0,099	0,01	0,060	1,10	0,50	6,80
	Max.	44,00	27,30	0,930	15,64	0,015	6,990	0,957	3,64	0,225	1,054	0,13	0,590	42,90	5,00	59,00
Légume racine	Moyenne	8,57	6,38	0,160	5,18	0,007	1,895	0,153	0,11	0,069	0,217	0,05	0,109	7,92	2,57	23,18
	sd	10,73	13,67	0,402	3,76	0,016	1,418	0,190	0,11	0,176	0,106	0,08	0,101	14,65	5,12	15,24
	Médiane	5,00	1,75	0,045	4,99	0,002	1,415	0,110	0,09	0,008	0,189	0,01	0,070	3,35	0,50	17,70
	Min.	2,00	0,10	0,010	0,22	0,001	0,570	0,041	0,01	0,001	0,062	0,01	0,025	0,25	0,50	4,10
	Max.	44,00	73,00	1,780	14,36	0,076	7,710	1,098	0,46	0,671	0,514	0,30	0,420	63,70	21,00	64,10
Fruit	Moyenne	14,05	1,74	0,115	3,88	0,002	1,687	0,158	0,10	0,008	0,149	0,02	0,073	5,87	0,93	8,56
	sd	11,14	2,10	0,096	2,68	0,001	0,548	0,051	0,13	0,011	0,053	0,03	0,045	5,24	0,52	3,97
	Médiane	10,00	0,80	0,070	2,85	0,002	1,710	0,153	0,05	0,003	0,139	0,01	0,060	4,55	1,00	7,80
	Min.	3,00	0,20	0,010	0,62	0,001	0,690	0,090	0,01	0,001	0,046	0,01	0,025	0,50	0,50	3,60
	Max.	66,00	10,10	0,340	12,91	0,003	3,120	0,292	0,56	0,041	0,279	0,20	0,210	21,10	2,00	23,50

Remarque- Peu concluantes, les analyses discriminantes par les moindres carrés (PLS-DA) basées sur la typologie de denrée, ou la région géographique, sont mentionnées dans l'annexe 3.

4.2.1.2. Comparaison à la littérature

4.2.1.2.1. Données locales

Il n'existe pas d'études systématiques des concentrations en métaux dans les denrées agricoles végétales du territoire. Seule l'étude de Dupont et Bonzon (1998) visant notamment à comprendre les risques de toxicité nickélique et manganique lors de cultures végétales sur différents faciès topographiques de Ferralsols, permet de comparer les données obtenues dans METALICA-Aliment à des données issues de denrées produites localement.

Outre le rôle de la toposéquence sur la disponibilité environnementale du nickel et du manganèse dans ces sols, et de fait sur les possibilités de transfert et translocation aux plantes cultivées, cette étude mentionnait des concentrations dans les parties végétatives (feuilles, tiges) et reproductives (fruits) de différentes typologies de cultures. Les concentrations des organes tiges/feuilles voire des peaux étaient plus élevées que celles de la chair des fruits consommés (Figure 21). Ainsi, et comme suggéré par les résultats de METALICA-Aliment, les légumes feuilles apparaissent comme étant plus sensibles à l'accumulation métaux, Ni et Mn, et le retrait des épidermes consommables permettraient de limiter l'ingestion de métaux.

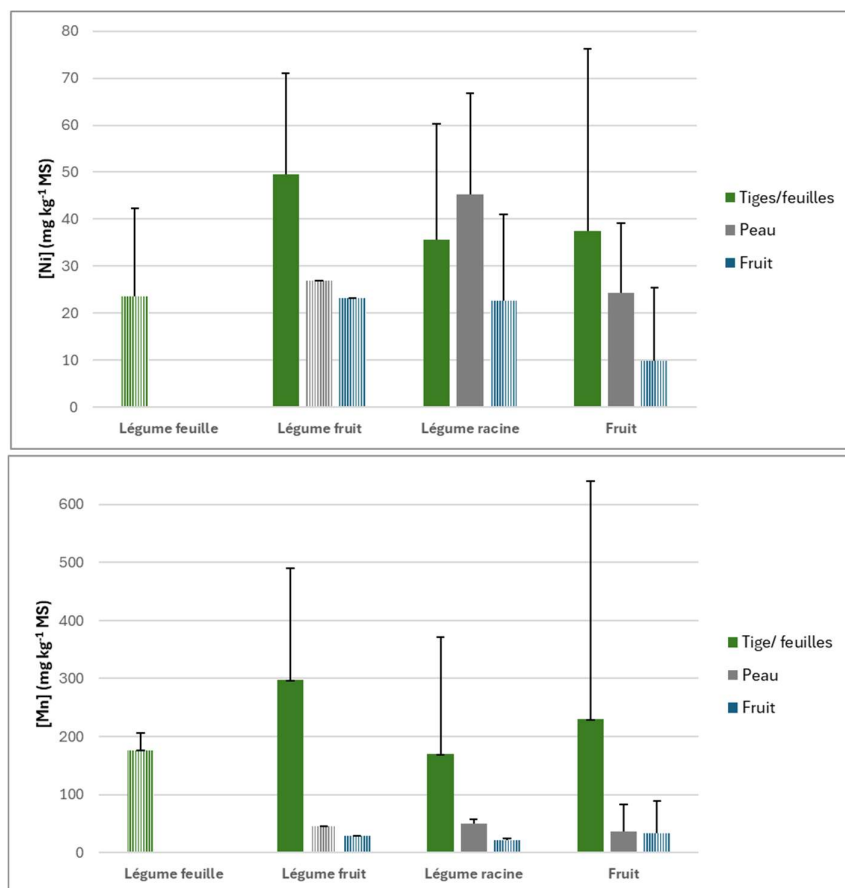


Figure 21- Concentrations moyennes en Ni et Mn, mesurées dans les tiges/feuilles, peau ou fruit, des différentes catégories de denrées agricoles végétales. Ces données sont issues de l'étude de Dupont et Bonzon (1998) menée sur sols ferrallitiques alluvionnaires du Sud de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie. Les barres verticales sont les écarts-types. Les barres hachurées représentent les organes généralement consommés par grandes catégories de denrées.

Il doit être noté que les gammes des concentrations en Ni et Mn dans les cultures mesurées par Dupont et Bonzon (1998) sont probablement représentatives des valeurs hautes en raison de la nature

des sols étudiés (sol ferrallitique alluvionnaire). Cependant, considérant d'une part, la diversité pédologique du territoire de la Nouvelle-Calédonie, et d'autre part, les caractéristiques chimiques subséquentes probablement très contrastées des sols sur lesquels les cultures sont réalisées, les gammes des concentrations métalliques des denrées végétales sont attendues être particulièrement conséquentes.

Nous avons pu comparer les données moyennes par grandes catégories de denrées obtenues dans l'étude suscitée, à celles obtenues dans METALICA-Aliment (Figure 22). Ces graphiques, ne tenant compte que de la partie consommée des denrées, font apparaître des concentrations moyennes contrastées particulièrement en nickel selon l'étude, et donc les contextes agropédologiques considérés. Ces résultats dénotent un effet particulièrement prononcé de la qualité des sols sur les concentrations métalliques qui seront détectées dans les cultures. Et ce particulièrement pour le Ni, mais également pour les concentrations en Mn des légumes feuilles.

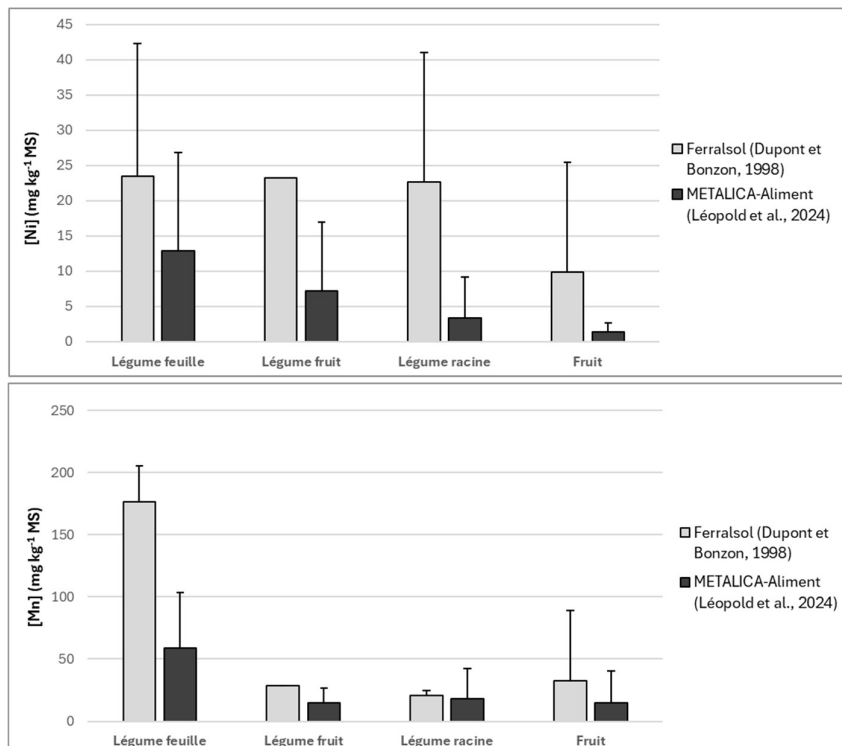


Figure 22- Concentrations moyennes en Ni et Mn (mg.kg^{-1} matière sèche, MS) des 4 grandes catégories de denrées agricoles végétales, mesurées dans l'étude de Dupont et Bonzon (1998) sur sols ferrallitiques alluvionnaires, et dans l'étude METALICA-Aliment, tenant compte de divers contextes agropédologiques. Les barres verticales sont les écarts-types. À la différence de la figure 21, les concentrations représentées ne tiennent compte que des parties consommées des denrées.

4.2.1.2.2. *Données internationales*

Bien que pouvant présenter des variabilités inter-éléments et inter-dénrées, les résultats obtenus recoupent ceux obtenus généralement dans la littérature, à savoir des concentrations en EM (sur une base de matière sèche) plus élevées dans les légumes feuilles et dans les légumes racines que dans les fruits (Tableau 28).

Par exemple pour le chrome, Warming et al. (2015) ont mis en évidence une accumulation plus importante par les laitues que par les carottes, les choux frisés, les pommes de terre, les radis dans des conditions des potagers urbains contaminés. Si certains auteurs, ont mis en évidence des concentrations en chrome plus élevées dans les légumes racines que dans des légumes feuilles, notamment lors d'une contamination métallique suite à des apports de déchets organiques (Bai et al., 2010 ; Ghosh et al., 2012) ; les légumes feuilles, laitues particulièrement, seraient capables d'accumuler des quantités importantes de chrome (Kumar et al., 1995). En Nouvelle-Calédonie, une expérimentation en salle de culture avait démontré un potentiel de toxicité de chrome particulièrement élevé, mais fonction de l'espèce végétale considérée. Ainsi, des phénomènes de phytotoxicité ont été relevés dès 0,2 μM de concentration en chrome ; le maïs démontrait une tolérance généralement plus importante que le haricot et le melon. Néanmoins, concernant les concentrations mesurées dans les choux Kanak, et les choux Chine, il est difficile d'avoir des éléments de comparaison dans des contextes agrépédologiques semblables. Ainsi, dans notre étude, les concentrations en chrome les plus élevées étaient mesurées dans les choux de Chine et les salades, soit au maximum 12,2 et 8,9 mg kg^{-1} MS respectivement. Dans les légumes, les concentrations en chrome seraient fonction de la contamination du milieu. L'étude Phytexpo a mis évidence des concentrations en chrome dans les légumes généralement plus élevés en contexte de sols contaminés que de sols de potagers moins contaminés ; même si cela n'était pas systématique selon l'espèce végétale considérée. Lia et al. (2011) ont mis en évidence des concentrations moyennes comprises entre $6,5 \pm 3,0 \text{ mg.kg}^{-1}$ et $15,8 \pm 5,0 \text{ mg.kg}^{-1}$ dans différents légumes feuilles, avec des BCF diminuant selon la séquence : chou de Chine > laitue > céleri. Néanmoins et contrairement aux résultats de Samsøe-Petersen et al. (2002) et Säumel et al., (2012), les BCF tendaient à diminuer avec la contamination métallique, en lien notamment avec les caractéristiques physico-chimiques des sols. Cherfi et al. (2014) dans une analyse des denrées alimentaires en Algérie, ont montré des concentrations comprises entre 3 mg.kg^{-1} dans les fraises et 16,33 mg.kg^{-1} dans les oignons. Ces auteurs ont fait état de concentrations en chrome particulièrement élevées dans les légumes racines.

Ces constats, non exhaustifs, mettant en évidence la complexité des mécanismes à la fois physico-chimiques et biologiques impliqués dans le transfert des éléments métalliques vers les plantes cultivées, et plus précisément vers les organes qui pourraient être consommés directement ou indirectement par l'être humain. Ainsi, les gammes de variation par éléments et par denrées sont extrêmement variables, et sont fonction du contexte agrépédologique, de la contamination (typologie, magnitude) des milieux, ou encore de la culture (espèce, variétés, cycle de vie) (Tableau 28). Cependant, et malgré les concentrations particulièrement importantes en éléments métalliques qui peuvent être trouvées dans les sols de Nouvelle-Calédonie, les résultats montrent que les denrées alimentaires végétales produites ou prélevées en Nouvelle-Calédonie ne se démarquent pas particulièrement des concentrations décrites à l'internationale (Tableau 28), voire qu'elles se situent même dans la tranche basse de valeur particulièrement pour les métaux toxiques : As, Cd, ou encore Pb.

Tableau 28- Bilan bibliographique (non exhaustif) des concentrations élémentaires mesurées dans différentes denrées végétales, et contextes agropédologiques.

Item	En mg.kg ⁻¹ Pays	As		Cd		Co		Cr		Cu		Fe		Mn		Ni		Pb		Zn		Reference	
		MS	FM	MS	FM	MS	FM	MS	FM	MS	FM	MS	FM	MS	FM	MS	FM	MS	FM	MS	FM		
Bananes	Papua New Guinea								1.51		3.39						1.97		1.93			Puri & Killur 2024	
Papaye	Bangladesh				0.042 ± 0.02				4.97 ± 0.17				79.21 ± 12.04				2.50 ± 0.10		1.15 ± 0.31			Chowdhury et al., 2024	
Fruits	Nouvelle-Calédonie	0.091	0.016	0.006	0.001	0.059	0.010	1.129	0.202	3.877	0.869	16.447	2.945	15.026	3.394	1.387	0.244	0.022	0.004	8.558	1.805	METALICA-Aliment	
Courgette	Iran		0.05		0.01		0.04										0.07		0.001			Taghizadeh et al., 2024	
Courgette	Algérie										9.36		0.94						0.43		6.54	Aksouh et al., 2024	
Courgette	Spain		0.029 ± 0.019		0.050 ± 0.036		0.192 ± 0.144		0.592 ± 0.742		11.76 ± 4.51						1.53 ± 1.61		0.11 ± 0.08		48.28 ± 19.08	Rossini-Oliva & Nunez 2024	
Okra	Nigeria				0.003-0.01				0.03-0.08								0-0.17		0.01-0.11			Ishola et al., 2023	
Concombre	Iran		0.05		0.01		0.04										0.1		0.001			Taghizadeh et al., 2024	
Courges et citrouilles	Bangladesh				0.402 ± 0.15				5.68 ± 0.20				61.83 ± 10.9				4.096 ± 0.002		4.23 ± 0.29			Chowdhury et al., 2024	
Courges et citrouilles	Iran		0.04		0.006		0.01										0.05		0.001			Taghizadeh et al., 2024	
Tomates	Bangladesh				0.053 ± 0.002				0.21 ± 0.008										0.16 ± 0.006			Alam 2023	
Tomates	Algérie										13.01		1.75				0.24		1.1		8.4	Aksouh et al., 2024	
Tomates	Bangladesh				0.93 ± 0.06				5.42 ± 0.04				83.14 ± 0.95				3.456 ± 0.15		1.773 ± 0.65			Chowdhury et al., 2024	
Tomates	Spain		0.017 ± 0.002		0.23 ± 0.017		0.187 ± 0.035		0.10 ± 0.021		9.35 ± 0.86						0.160 ± 0.008		0.166 ± 0.026		28.72 ± 1.538	Rossini-Oliva & Nunez 2024	
Tomates	France															0.42						Cherfi et al., 2016	
Tomates	Inde																					Roychowdhury et al., 2003	
Tomates	Algérie																					Cherfi et al., 2014	
Tomates	USA																					Pennington and Young, 1990	
Tomates	Suède																1.02					Becker et al., 2011	
Tomates	Pakistan																					Parveen et al., 2003	
Tomates	Chine																4.15					Song et al., 2009	
Légume fruit	Nouvelle-Calédonie	0.180	0.012	0.022	0.001	0.386	0.028	1.185	0.079	5.561	0.367	50.625	3.229	14.938	0.923	6.848	0.527	0.024	0.002	23.040	1.502	METALICA-Aliment	
Laitue	Algérie				<LOD				0.11		5.62		54.2				1.01		3.45		19.52	Aksouh et al., 2024	
Laitue	Camaroon				0.83				3.61		8.9				23.1		2.28		2.28		20.3	Meskelu et al., 2024	
Laitue	Espagne		0.094 ± 0.009		1.140 ± 0.055		0.102 ± 0.004		0.294 ± 0.018		11.74 ± 0.207						0.263 ± 0.013		0.420 ± 0.140		75.64 ± 2.516	Rossini-Oliva & Nunez 2024	
Laitue	France										2.76										1.56	Cherfi et al., 2016	
Laitue	Algérie										0.31										1.75	Cherfi et al., 2014	
Laitue	USA										0.27										1.6	Pennington and Young, 1990	
Bitter leaf	Nigeria				0-0.01				0.03-0.1								0.1-0.2		0.4-0.8			Ishola et al., 2023	
Epinard	Iran			1-4						8-13		300-1100		20-80		5-8		11-22		25-68		Jalali & Meyari, 2022, 2023	
Epinard	Pakistan				0-0.54				1.7-4.9		1.5-3.3						1.3-3.1				2.2-4.5	Rahim et al., 2024	
Blettes	Espagne		0.069 ± 0.044		0.142 ± 0.089		0.192 ± 0.082		0.481 ± 0.457		10.31 ± 7.456						0.455 ± 0.381		0.217 ± 0.127		34.13 ± 8.405	Rossini-Oliva & Nunez 2024	
Légume feuille	Nouvelle-Calédonie	0.126	0.012	0.094	0.009	0.655	0.064	2.510	0.218	6.519	0.625	234.828	21.801	58.621	5.968	12.934	1.104	0.077	0.008	50.248	4.770	METALICA-Aliment	
Patate douce	China		0.45		0.14													0.61				Zhou et al., 2016	
Patate douce	Afrique du Sud		16.9		19.2		19.5		16.7		10.3		20.2		21.7		14.5		11.4		20.9	Zondo 2024	
Patate douce	Afrique du Sud			0.57												9.34						Moyo et al., 2020	
Patate douce	Papouasie Nelle Guinée								3.02		4.38						4.2		2.59			Puri & Killur 2024	
Taro	Bangladesh				2.558 ± 0.20				8.115 ± 0.14				108.04 ± 1.03				3.632 ± 0.06		7.746 ± 0.50			Chowdhury et al., 2024	
Taro	Papouasie Nelle Guinée								4.01		7.78						7.63		1.99			Puri & Killur 2024	
Taro	Papouasie Nelle Guinée								1.57		4.28						5.88		1.92			Puri & Killur 2024	
Carottes	Bangladesh				0.254 ± 0.10				8.623 ± 0.15				64.57 ± 10.61				4.272 ± 0.02		1.785 ± 0.54			Chowdhury et al., 2024	
Carottes	Algérie				<LOD				0.09		6.75		17.87				0.62		2.91		12.21	Aksouh et al., 2024	
Carottes	France																0.67					Cherfi et al., 2016	
Carottes	Afrique du Sud		19		19.1		16.3		16.7		8.05		20.2		21.7		14.5		11.4		24.9	Zondo 2024	
Carottes	China		0.19		0.023														0.23			Zhou et al., 2016	
Carottes	Zimbabwe		0.19-0.8		0.04-0.05			6.35-26.9									0.7-3.0		3.38-31.2			Meck et al., 2020	
Carottes	Afrique du Sud				0.01-0.73			0.85-14.5									0.03-5.16		0.2-9.96			Malan et al., 2015	
Pomme de terre	Bangladesh				0.452 ± 0.10				3.912 ± 0.14				33.23 ± 1.104				3.055 ± 0.02		0.298 ± 0.07			Chowdhury et al., 2024	
Pomme de terre	Algérie										4.86		30.72				0.82		0.77		13.14	Aksouh et al., 2024	
Pomme de terre	Afrique du Sud		8.43		18.9		19.5		16.8		10.1		20.4		21.7		14.6		10.6		20.9	Zondo, 2024	
Pomme de terre	Algérie							0.26-4.14											0.01-7.21			Cherfi et al., 2015	
Pomme de terre	Iran				0.16-0.36			0.42-0.61											0.94-1.29			Cheshmazar et al., 2018	
Pomme de terre	Suède				0.002-0.27														0.003-2.2			Augustsson et al., 2015	
Pomme de terre	Bangladesh				0.050 ± 0.002				0.328 ± 0.012										0.450 ± 0.016			Alam 2023	
Pomme de terre	France										4.14						1.05				1.78	Cherfi et al., 2016	
Pomme de terre	Inde										0.94						0.3				4.28	Roychowdhury et al., 2003	
Pomme de terre	Algérie										0.8										3.32	Cherfi et al., 2014	
Pomme de terre	USA										0.51										2.2	Pennington and Young, 1990	
Pomme de terre	Suède										0.77										2.77	Becker et al., 2011	
Pomme de terre	Pakistan										0.1											Parveen et al., 2003	
Pomme de terre	Chine										1.03								0.05			3.77	Song et al., 2009
Légume racine	Nouvelle-Calédonie	0.137	0.040	0.031	0.007	0.259	0.074	1.513	0.397	5.179	1.490	73.833	14.418	14.633	3.721	3.393	0.950	0.048	0.011	23.180	6.935	METALICA-Aliment	

4.2.1.3. Le cas des éléments rares

Dans les denrées végétales, certains éléments présentaient un pourcentage de quantification très faible dans l'ensemble des échantillons. Ainsi, l'antimoine (Sb), le thallium (Tl), l'aluminium (Al), l'uranium (U), le gallium (Ga) et le scandium (Sc) étaient quantifiés dans moins de 10 % des échantillons. Lorsqu'ils étaient détectés, ces éléments se retrouvaient principalement dans les légumes à feuilles ou dans les légumes racines (Tableau 29).

En particulier, Ga et U ont été identifiés dans deux échantillons de pommes de terre, surtout dans l'épiderme comestible des tubercules provenant de deux origines géographiques distinctes. Ces observations corroborent les résultats de Neves et al. (2012), qui ont montré une translocation majoritaire de U, Mn et Al vers les parties aériennes des plants de pommes de terre (U : 73-87 % ; Al : 85-96 % ; Mn : 85-94 %), limitant ainsi leur accumulation dans les tissus consommables. De même, les concentrations d'U et d'Al dans le tubercule se concentraient majoritairement dans l'épiderme (88-96 % et 76-85 %, respectivement).

Plus généralement, lorsque ces éléments rares étaient quantifiés, ils étaient surtout présents dans l'épiderme des légumes racines et fruits, que l'analyse porte sur l'épiderme seul ou sur l'ensemble épiderme + chair. L'absence de ces éléments dans la chair des denrées dépourvues d'épiderme suggère que consommer les fruits ou légumes pelés réduit le risque d'exposition pour le consommateur.

Tableau 29- Concentrations en Al (%), Ga, Sb, Tl et U (en mg.kg⁻¹ MS) dont les valeurs étaient supérieures aux LOQ ; seules certaines denrées étaient concernées.

		Al	Ga	Sb	Tl	U
		%		mg kg ⁻¹ MS		
Céréales	Riz	-	-	0,02	-	-
Légumes feuilles	Brède	0,02	-	0,03	-	-
	Chou Chine	0,01	-	-	0,043	-
	Chou kanak	0,02	-	0,03	-	-
	Salade	-	-	0,023	-	-
Légumes fruits	Citrouille, squash, courge	-	-	-	0,02*, **	-
	Tomate	-	-	0,025*, **	-	-
Légumes racines	Carotte	0,02**	-	-	-	-
	Manioc	-	-	0,02	-	-
	Pommes de terre	0,085*	0,150*	-	0,105*	0,045*
	Taro	-	-	-	0,03	-

* épiderme seul, ** chair avec épiderme

4.2.1.4. Comparaison des concentrations en éléments aux seuils maximums définis- Résultats en matière fraîche

Il n'existe pas d'harmonisation globale des concentrations ou teneurs maximales à respecter pour les différents éléments dans les denrées alimentaires. Dans le contexte de la Nouvelle-Calédonie, territoire d'outre-mer français, la législation européenne a été privilégiée, notamment :

- Le règlement (CEE) 315/93 du Conseil du 8 février 1993 établissant les procédures communautaires relatives aux contaminants dans les denrées alimentaires, en particulier son article 2, paragraphe 3 ;
- Le règlement (CE) n°1881/2006 de la Commission du 19 décembre 2006 fixant des teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires, abrogé par le règlement (UE) 2023/915 de la Commission du 25 avril 2023 concernant les teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires.

Par ailleurs, des normes alimentaires internationales, définies dans le Codex Alimentarius par la Commission du Codex Alimentarius (CAC), sont également prises en compte. Cette commission, créée conjointement par la FAO et l'OMS, a pour objectif de protéger la santé des consommateurs et de promouvoir des pratiques commerciales loyales dans le domaine des denrées alimentaires.

Selon le règlement (UE) 2023/915 de la Commission du 25 avril 2023, publié au Journal Officiel de l'Union Européenne :

« Article (2). Les teneurs maximales devraient être fixées de façon stricte à un niveau pouvant raisonnablement être atteint grâce au respect des bonnes pratiques dans le domaine de la fabrication, de l'agriculture et de la pêche, compte tenu du risque lié à la consommation des denrées alimentaires. Dans le cas d'un risque possible pour la santé, il convient de fixer des teneurs maximales à un niveau aussi bas que raisonnablement possible (ALARA). Cette façon de procéder garantit l'application par les exploitants du secteur alimentaire de mesures qui préviennent ou réduisent autant que possible la contamination en vue de protéger la santé publique. Il est en outre opportun, pour la protection de la santé des nourrissons et des enfants en bas âge, lesquels constituent un groupe vulnérable, d'établir les teneurs maximales les plus basses possibles, au moyen d'une sélection stricte des matières premières utilisées dans la fabrication des denrées alimentaires qui leur sont destinées, combinée, le cas échéant, à des pratiques de fabrication spécifiques. Cette stricte sélection des matières premières devrait aussi être effectuée pour la fabrication de certaines denrées alimentaires mises sur le marché pour le consommateur final, pour lesquelles une teneur maximale stricte a été fixée afin de protéger les populations vulnérables. »

Le règlement couvre :

- les mycotoxines (aflatoxines, ochratoxine A, toxines du Fusarium, patuline et citrinine, alcaloïdes de l'ergot),
- le 3-monochloro-propane-1,2-diol (3-MCPD) et ses esters d'acides gras, ainsi que les esters d'acides gras glycidyliques,
- les dioxines et les polychlorobiphényles (PCB),
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP),
- la mélamine,
- l'acide érucique, l'acide cyanhydrique, les alcaloïdes tropaniques, les alcaloïdes pyrrolizidiniques,
- les nitrates,
- le perchlorate,
- les métaux : plomb (Tableau 30), cadmium (Tableau 31), mercure, étain inorganique et arsenic.

Concernant le nickel, la commission Européenne a publié en 2024 des recommandations (2024/907) aux États membres et aux exploitants du secteur alimentaire afin de fournir régulièrement des données de surveillance à l'Autorité qui compilera ces données, ainsi que les informations dans le format de rapport électronique qu'elle spécifie, dans une base de données unique (programme de surveillance 2025-2027).

La surveillance doit porter sur : les compléments alimentaires, le chocolat, les pâtes à tartiner à base de chocolat, les pâtes à tartiner à base de noix, les fèves de cacao, les produits à base de céréales (en particulier les céréales pour petit-déjeuner, les flocons de céréales et les produits de mouture d'avoine), les soupes prêtes à consommer, le café, le thé, les légumes, les algues marines, les graines oléagineuses, les produits à base de soja (tels que le tofu et les boissons au soja), les légumes secs, les fruits à coque, les poissons et autres fruits de mer.

Par ailleurs, le règlement (UE) 2024/1987 de la Commission Européenne du 30 juillet 2024 a modifié le règlement (UE) 2023/915 concernant les teneurs maximales en nickel dans certaines denrées alimentaires. Des limites ont été ajoutées en annexe pour certains légumes et fruits avant leur mise sur le marché. Ces teneurs maximales devront être appliquées à partir du 1er juillet 2025 (et pour certaines céréales, à partir de 2026). Les denrées déjà légalement commercialisées avant ces dates peuvent rester sur le marché jusqu'à leur date de durabilité minimale ou de péremption. Ces seuils ont été utilisés à des fins de comparaison dans l'étude METALICA-Aliment.

En dehors du nickel, certains métaux tels que le cobalt (Co), le manganèse (Mn) et le chrome (Cr) présentent des niveaux d'exposition alimentaire qui soulèvent des interrogations en Nouvelle-Calédonie. Toutefois, aucune teneur maximale réglementaire n'a été définie pour ces éléments dans les denrées alimentaires, au-delà de laquelle celles-ci seraient considérées comme impropres à la consommation.

À des fins comparatives, les concentrations seuils en chrome et nickel totaux mentionnées par le NHFPC², ont également été utilisées comme références. À savoir, pour le chrome, 0,5 mg.kg⁻¹ pour les produits végétaux et végétaux frais, et 1 mg.kg⁻¹ pour les grains et produits à base de grains de riz.

Cependant, pour ces métaux en particulier, et au regard de l'incertitude de leurs effets à l'ingestion (nickel, et chrome 3 notamment), il peut être plus pertinent d'estimer l'absorption journalière en nickel et en chrome total, en les comparant aux doses journalières tolérables (DJT) redéfinies récemment par l'EFSA, soit :

- **Nickel**- 13 µg.kg⁻¹ de poids corporel par jour (EFSA³ 2020). La précédente DJT mentionnait 2,8 µg.kg⁻¹ de poids corporel par jour (EFSA 2015)

- **Chrome**- 300 µg.kg⁻¹ de poids corporel par jour en considérant que le chrome total est sous une forme trivalente dans les denrées alimentaires agricoles et prélevées dans le milieu naturel. En effet, il existe de nombreuses interrogations dans le milieu scientifique sur les méthodes utilisées pour discriminer la présence de Cr(VI) dans les aliments (Milačič et Sčančar, 2020). Plus généralement, le chrome ne serait pas sous forme (VI) dans les matrices biologiques.

"The fact that specific behavior of Cr in complex matrices, such as biological samples (human blood, serum and urine) and foodstuffs of plant and animal origin, was not considered resulted in numerous reports in the scientific literature where Cr(VI) content was overestimated." (Milačič et Sčančar, 2020)

Les seuils maximums définis sont basés sur les concentrations élémentaires en matière fraîche de denrées. Il doit être mentionné ici, que les seuils aussi bien en termes de concentrations maximales dans les denrées, qu'en termes de dose de référence ou journalière admissible, varient avec les pays et les réglementations. Les informations d'intérêt pour le projet METALICA-Aliment ont été sélectionnées et décrites dans le tableau 30, et le tableau 31 pour le cadmium et le plomb, respectivement.

² NHFPC, National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China

³ EFSA, European Food Safety Authority

Tableau 30- Seuils maximums des concentrations en cadmium (mg.kg⁻¹ matière fraîche) contenues dans les végétaux destinés à l'alimentation humaine, et définis par la commission Européenne. Les seuils sont définis considérant des masses fraîches de denrées. Remarque- l'ensemble des seuils maximums définis n'est pas décrit dans ce tableau ; ici, ont été répertoriées les données d'intérêt pour une comparaison aux données acquises.

Cadmium	
	Concentrations maximum (mg.kg⁻¹ matière fraîche)
Fruits et noix	
Fruits cités ci-après	0,05
Agrumes, fruits à pépins, fruits à noyau, olives de table, kiwis, bananes, mangues, papayes et ananas	0,02
Baies et petits fruits, à l'exclusion des framboises	0,03
Framboises	0,04
Fruits à coque*, à l'exclusion des pignons	0,20
Pignons	0,30
Légumes racines et légumes tubercules	
Racines et tubercules** à l'exception des betteraves, céleris-raves, raiforts, panais, salsifis, radis	0,10
Betteraves	0,06
Céleris-raves	0,15
Raiforts, panais, salsifis	0,20
Radis	0,02
Racines et tubercules tropicaux, persil à grosse racine, navets	0,05
Légumes fruits	
Légumes fruits sauf aubergines	0,02
Aubergines	0,03
Légumes du genre Brassica sauf choux feuilles	0,04
Choux-feuilles	0,10
Légumes feuilles et fines herbes	
Légumes feuilles sauf épinards et assimilés	0,10
Épinards et feuilles similaires, plants de moutarde et herbes fraîches	0,20
Légumineuses potagères	0,02
Légumes tiges sauf céleris et poireaux	0,03
Céleris	0,10
Poireaux	0,40

La teneur maximale s'applique au poids à l'état frais. La teneur maximale s'applique après lavage et séparation de la partie destinée à être consommée.

*Les teneurs maximales ne s'appliquent pas aux fruits à coque destinés au broyage et au raffinage d'huiles, à condition que les fruits à coque pressés restants ne soient pas mis sur le marché en tant que denrées alimentaires. Si les fruits à coque pressés restants sont mis sur le marché en tant que denrées alimentaires, les teneurs maximales s'appliquent, en tenant compte de l'article 3, paragraphes 1 et 2.

**Dans le cas des pommes de terre, la teneur maximale s'applique aux pommes de terre pelées.

Tableau 31- Seuils maximums des concentrations en plomb (mg.kg⁻¹ matière fraîche) contenues dans les végétaux destinés à l'alimentation humaine, et définis par la commission Européenne. Les seuils sont définis considérant des masses fraîches de denrées. Remarque- l'ensemble des seuils maximums définis n'est pas décrit dans ce tableau ; ici, ont été répertoriées les données d'intérêt pour une comparaison aux données acquises.

Plomb	
	Concentrations maximum (mg.kg⁻¹ matière fraîche)
Fruits	
Airelles, groseilles, baies de sureau, arbouses	0,20
Autres fruits	0,10
Légumes racines et légumes tubercules	
Racines et tubercules** à l'exception du gingembre frais, curcuma frais et salsifis	0,10
Gingembre frais, curcuma frais	0,80
Salsifis	0,30
Légumes bulbes	0,10
Légumes fruits	0,02
Légumes fruits sauf maïs	0,05
Maïs doux	0,10
Légumes du genre Brassica sauf choux feuilles	0,10
Choux-feuilles	0,30
Légumes-feuilles, à l'exclusion des herbes fraîches et des fleurs comestibles	0,30
Légumineuses potagères	0,10
Légumes-tiges	0,10

Tableau 32- Seuils maximums des concentrations en nickel (mg.kg^{-1}) contenues dans les végétaux destinés à l'alimentation humaine, et définis par la commission Européenne selon le règlement 2024/907. Les seuils sont définis considérant des masses fraîches de denrées, et ne seront applicables qu'à compter du 1^{er} juillet 2025.

Nickel UE 2023/915 (modifié par UE 2024/1987)	Concentrations maximum (mg / kg matière fraîche)
Légumes-racines et tubercules et légumes bulbes	0,90
Légumes fruits	0,40
Crucifères	0,50

Les teneurs maximales sont applicables aux masses fraîches, après séparation et nettoyage des parties consommables. Pour les pommes de terre, la teneur maximales s'applique au tubercule sans peau.

Les seuils maximums définis pour le mercure, concernent les produits de la pêche et les mollusques bivalves (de $0,30$ à 1 mg.kg^{-1} , en masse fraîche) selon la catégorie (crustacés, poissons, mollusques)), ainsi que les compléments alimentaires et le sel ($0,10 \text{ mg.kg}^{-1}$). Il n'y a pas de seuil spécifique pour les denrées agricoles végétales et animales. Néanmoins, le NHFPC mentionne un seuil de $0,01 \text{ mg.kg}^{-1}$ pour les produits végétaux et végétaux frais.

Pour l'arsenic, les seuils concernent l'arsenic inorganique dans les céréales (riz notamment et produits à base de riz, de $0,030 \text{ mg.kg}^{-1}$ pour les boissons non alcooliques à base de riz à $0,30 \text{ mg.kg}^{-1}$ pour les galettes de riz soufflé, feuilles et crackers de riz, gâteaux à la farine de riz, flocons de riz, et riz soufflé pour le petit déjeuner), les aliments pour bébé, et les jus de fruits ; et les concentrations en arsenic total dans le sel. Le NHFPC mentionne un seuil de $0,50 \text{ mg.kg}^{-1}$ pour les produits végétaux et végétaux frais.

Une première approche, réalisée ici, consiste à comparer nos données à ces différents seuils. Une seconde approche, réalisée avec l'Inserm, dans le cadre du projet METALICA-Santé, nécessitera l'évaluation des risques sanitaires en comparant les doses journalières ingérées théoriquement aux doses journalières tolérables. Cette approche sera appréhendée dans le volet Santé du projet METALICA réalisé par l'Inserm, une fois l'ensemble des données acquises dans le volet Aliment.

Afin de pouvoir comparer les concentrations mesurées sur matière sèche aux seuils maximaux réglementaires, il est nécessaire de convertir ces concentrations en équivalent matière fraîche, en utilisant les teneurs moyennes en matière sèche propres à chaque catégorie de denrées (Tableau 33). Les valeurs moyennes de matière sèche augmentaient selon la séquence suivante : légume fruit ($8,3 \pm 2,9 \%$) < légume feuille ($8,6 \pm 2,4 \%$) < fruit ($20,1 \pm 5,3 \%$) < légume racine ($27,8 \pm 3,0 \%$). Cette hiérarchie met en évidence un effet potentiel sur les concentrations exprimées en matière fraîche, et par conséquent sur les quantités de métaux susceptibles d'être ingérées. En effet, plus la teneur en eau d'une denrée est élevée, plus la dilution des concentrations initiales mesurées en matière sèche sera importante.

Tableau 33- Teneurs moyennes en eau (%) et matière sèche (MS) des différents items et catégories des denrées agricoles végétales échantillonnées dans le cadre de l'étude. Sd- écarts types. ANA/MAG, ananas et mangues ; AVO, avocat ; BAN, bananes ; ORA/MAN, oranges et mandarines ; PAP, papayes ; BRE, brèdes ; CBL, choux blancs ou verts, CCH, choux de Chine ; CKA, choux Kanak ; SAL, salades ; CHO, chouchoutes ; CIT, citrouilles ; CON, concombres ; COU, courgettes ; TOM, tomates ; CAR, carottes ; IGN, ignames ; MAC, manioc ; PDT, pommes de terre ; TAR, taros.

Catégorie	Denrée	Moyenne		sd (%)
		Teneur en eau (%)	Teneur en matière sèche (MS) (%)	
Céréales	RIZ	13,14	86,86	8,60
	ANA/MAG	83,44	16,56	2,25
	AVO	69,30	30,70	NA
Fruit	BAN	73,83	26,17	4,50
	ORA/MAN	83,64	16,36	12,96
	PAP	89,50	10,50	1,27
	BRE	86,73	13,27	6,31
	CBL	94,10	5,90	0,85
Légume feuille	CCH	93,89	6,11	1,92
	CKA	88,04	11,96	5,40
	SAL	94,08	5,92	1,97
	CHO	91,77	8,23	1,03
	CIT	86,78	13,22	7,32
Légume fruit	CON	94,98	5,02	1,74
	COU	95,09	4,91	1,59
	TOM	89,82	10,18	5,78
	CAR	87,08	12,92	2,89
Légume racine	IGN	70,93	29,07	9,70
	MAC	60,17	39,83	5,58
	PDT	78,47	21,53	2,39
	TAR	64,12	35,88	7,18

Les concentrations moyennes (MS, et MF) par catégories de denrées sont mentionnées dans le tableau 34. La comparaison des données en matière sèche et fraîche permet d'appréhender le rôle de la dilution par le contenu en eau sur les concentrations en éléments des denrées, et donc sur les quantités d'éléments qui seront réellement ingérées par le consommateur.

Le tableau 34 met en évidence des modifications dans le classement des concentrations en métaux des denrées fonction des éléments et des denrées, et les conclusions de l'étude descriptive réalisée dans la section précédente sont ainsi modifiées. Si les légumes feuilles faisaient état de concentrations plus conséquentes en matière sèche, leur contenu élevé en eau, tend à diluer leur concentration en matière fraîche de façon plus importante que ce qui peut être observé pour les légumes racines, notamment en ce qui concerne Co et Cr. Les concentrations en Mn et Ni, même en masse fraîche demeurent plus importantes dans les légumes feuilles. Deux groupes se distinguent, ainsi, d'un côté les légumes feuilles et racines pour les concentrations moyennes les plus élevées, et de l'autre les légumes fruits et les fruits pour les concentrations moyennes les plus faibles

Tableau 34- Concentrations moyennes en Co, Cr, Mn, et Ni par catégorie de denrées agricoles végétales, mentionnées en matière sèche et en matière fraîche.

		Co		Cr		Mn		Ni	
		mg.kg ⁻¹							
		Moy	sd	Moy	sd	Moy	sd	Moy	sd
Matière sèche	Légume feuille	0,62 ^a	0.74	2,38 ^a	2.61	52,28 ^a	44.20	12,29 ^a	14.61
	Légume fruit	0,41 ^b	0.51	1,21 ^b	0.35	15,71 ^b	13.28	7,47 ^b	10.94
	Légume racine	0,28 ^c	0.58	1,92 ^b	2.97	19,30 ^b	29.68	4,08 ^c	8.14
	Fruit	0,07 ^d	0.09	1,03 ^b	0.38	17,55 ^b	39.17	1,64 ^c	1.60
Matière fraîche	Légume feuille	0,06 ^a	0.09	0,20 ^b	0.20	5,25 ^a	5.88	1,05 ^a	1.14
	Légume fruit	0,13 ^a	0.04	0,08 ^c	0.03	0,89 ^c	0.67	0,55 ^c	0.98
	Légume racine	0,07 ^a	0.15	0,42 ^a	0.36	3,99 ^b	5.43	0,94 ^b	1.45
	Fruit	0,01 ^b	0.02	0,18 ^b	0.06	3,47 ^{bc}	6.86	0,31 ^c	0.34

Ainsi, les concentrations en matière fraîche des éléments pour lesquels des concentrations maximales tolérées (CMT) sont disponibles dans la littérature sont mentionnées dans les tableaux 35 (fruit), tableau 36 (légume feuille), tableau 37 (légume fruit), et tableau 38 (légume racine). Les CMT (en matière fraîche), sont indiquées en police rouge.

Pour les fruits (Tableau 35), aucun dépassement n'a pas pu être constaté pour As, Cd, Cr, Hg et Pb, considérant aussi bien les différents items que les différents éléments. Pour le nickel si les concentrations seuils du NHPFC sont considérées, alors aucun dépassement n'a été mis en évidence. Néanmoins, si les concentrations seuils, définies en juillet 2024 par la commission européenne, devant être appliquées en juillet 2025, sont considérées, alors 8 dépassements sont constatés (1 avocat, 1 mangue, 1 mandarine, 1 papaye et 4 bananes).

Tableau 35- Concentrations (en matière fraîche, MF) en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb, dans les différents items de la catégories « fruits ». Les valeurs des moyennes, écarts-types (sd), médianes, minimum (min.) et maximum (max.) sont mentionnées. Notez que les concentrations en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb sont en ppm (mg.kg⁻¹ MF), et les concentrations en Hg sont en ppb (µg.kg⁻¹ MF). Les concentrations maximales tolérées (CMT) sont indiquées en police rouge. Les valeurs de CMT sont issues du NHCP (National Health Commission, Chine) pour As, Cr, Hg, et Ni, et du journal officiel de l'Union Européenne pour Cd, Ni et Pb (ntot=31).

		As	Cd	Cr	Hg	Ni (NHPFC)	Ni (UE 2023/915)	Pb	
		mg kg ⁻¹ MF	mg kg ⁻¹ MF	mg kg ⁻¹ MF	µg kg ⁻¹ MF	mg kg ⁻¹ MF	mg kg ⁻¹ MF	mg kg ⁻¹ MF	
	CMT	0,5	0,1	0,5	10	1	0,4	0,02	
Fruits	Ananas/Mangue/Avocat	Moyenne	0,011	0,004	0,160	0,376	0,459	0,459	0,006
		sd	0,004	0,005	0,022	0,375	0,343	0,343	0,005
		Médiane	0,009	0,001	0,154	0,181	0,282	0,282	0,007
		Min	0,008	0,001	0,145	0,083	0,123	0,123	0,001
		Max	0,015	0,012	0,199	0,921	0,86	0,86	0,012
	Banane	Moyenne	0,022	0,001	0,271	0,21	0,248	0,248	0,003
		sd	0,019	0,000	0,057	0,190	0,230	0,230	0,002
		Médiane	0,013	0,001	0,236	0,131	0,131	0,131	0,003
		Min	0,013	0,001	0,210	0,131	0,026	0,026	0,001
		Max	0,079	0,001	0,367	0,786	0,76	0,760	0,052
	Orange/mandarine	Moyenne	0,012	0,001	0,158	0,061	0,203	0,203	0,003
		sd	0,007	0,000	0,029	0,006	0,179	0,179	0,004
		Médiane	0,011	0,001	0,169	0,056	0,135	0,135	0,001
		Min	0,006	0,001	0,090	0,056	0,034	0,034	0,001
		Max	0,022	0,001	0,188	0,067	0,607	0,607	0,013
	Papaye	Moyenne	0,012	0,001	0,144	0,059	0,151	0,151	0,001
		sd	0,012	0,000	0,015	0,019	0,162	0,162	0,001
		Médiane	0,005	0,001	0,147	0,052	0,068	0,068	0,002
		Min	0,005	0,001	0,115	0,052	0,010	0,010	0,001
		Max	0,031	0,001	0,157	0,105	0,441	0,441	0,002

Pour les légumes feuilles (Tableau 36), 3 dépassements en chrome, soit 13,8% des échantillons, ont été mis en évidence. Pour le nickel 12 dépassements, soit 41,4% des échantillons, ont été mis en évidence selon le NHFPC, et 15 dépassements, soit 51,7% des échantillons selon l'UE (2023/915). Ces dépassements ont été mesurés sur des échantillons d'origine géographique variée : Thio, Boulouparis, Farino, et Poya. Ainsi, pour cet élément, les concentrations moyennes et médianes dépassées la CMT pour les brèdes, ainsi que pour les moyennes des choux blancs (verts) et choux Kanak.

Pour le chrome, ni la moyenne ni la médiane des concentrations n'étaient supérieures à la CMT.

Tableau 36- Concentrations (en matière fraîche, MF) en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb, dans les différents items de la catégories « légumes feuilles ». Les valeurs des moyennes, écarts-types (sd), médianes, minimum (min.) et maximum (max.) sont mentionnées. Notez que les concentrations en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb sont en ppm (mg.kg^{-1} MF), et les concentrations en Hg sont en ppb ($\mu\text{g.kg}^{-1}$ MF). Les concentrations maximales tolérées (CMT) sont indiquées en police rouge. Les valeurs de CMT sont issues du NHFPC (National Health Commission, Chine) pour As, Cr, Hg, et Ni, et du journal officiel de l'Union Européenne pour Cd, Ni et Pb (ntot = 24).

		As	Cd	Cr	Hg	Ni (NHFPC)	Ni (UE 2023/915)	Pb	
		mg.kg^{-1} MF	mg.kg^{-1} MF	mg.kg^{-1} MF	$\mu\text{g.kg}^{-1}$ MF	mg.kg^{-1} MF	mg.kg^{-1} MF	mg.kg^{-1} MF	
CMT		0,5	0,1	0,5	10	1	0,5	0,3	
Légumes feuilles	Brèdes	Moyenne	0,016	0,02	0,314	0,878	1,753	1,753	0,008
		sd	0,01	0,01	0,133	0,152	1,101	1,101	0,006
		Médiane	0,013	0,017	0,306	0,931	1,915	1,915	0,005
		Min	0,007	0,011	0,16	0,665	0,200	0,200	0,003
		Max	0,027	0,036	0,479	1,064	3,192	3,192	0,017
	Chou Chine	Moyenne	0,004	0,008	0,22	0,412	1,106	1,106	0,003
		sd	0,002	0,006	0,261	0,473	1,247	1,247	0,001
		Médiane	0,003	0,007	0,134	0,305	0,512	0,512	0,003
		Min	0,003	0,002	0,067	0,031	0,018	0,018	0,002
		Max	0,006	0,019	0,744	1,342	3,105	3,105	0,004
	Chou Blanc	Moyenne	0,006	0,001	0,063	0,030	0,297	0,297	0,002
		sd	0,005	0,001	0,017	0,000	0,453	0,453	0,001
		Médiane	0,003	0,000	0,053	0,030	0,053	0,053	0,002
		Min	0,003	0,000	0,053	0,030	0,018	0,018	0,000
		Max	0,012	0,002	0,083	0,030	0,820	0,820	0,003
	Chou Kanak	Moyenne	0,023	0,008	0,267	1,057	1,142	1,142	0,017
		sd	0,02	0,006	0,199	0,515	1,009	1,009	0,023
		Médiane	0,018	0,006	0,185	1,013	0,751	0,751	0,009
		Min	0,006	0,004	0,119	0,238	0,214	0,214	0,006
		Max	0,06	0,02	0,608	1,787	2,871	2,871	0,074
Salade	Moyenne	0,007	0,005	0,158	0,736	0,94	0,94	0,003	
	sd	0,006	0,003	0,169	0,614	1,082	1,082	0,001	
	Médiane	0,003	0,007	0,103	0,424	0,461	0,461	0,004	
	Min	0,003	0,002	0,073	0,061	0,097	0,097	0,002	
	Max	0,018	0,008	0,539	1,697	2,503	2,503	0,004	

Pour les légumes fruits (Tableau 37), seul le nickel présentait des concentrations supérieures à la CMT dans 8 échantillons, soit 15% des échantillons analysés. Les dépassements étaient observés pour des items et organes variés (chouchoute, squash/citrouilles, courgette ; épiderme, chair), mais également pour diverses origines géographiques (Boulouparis, Poya, Thio). Cependant, hormis pour l’item squash/citrouille, aucune médiane, ni moyenne ne dépassaient la CMT.

Tableau 37- Concentrations (en matière fraîche, MF) en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb, dans les différents items de la catégories « légumes fruits ». Les valeurs des moyennes, écarts-types (sd), médianes, minimum (min.) et maximum (max.) sont mentionnées. Notez que les concentrations en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb sont en ppm (mg.kg^{-1} MF), et les concentrations en Hg sont en ppb ($\mu\text{g.kg}^{-1}$ MF). Les concentrations maximales tolérées (CMT) sont indiquées en police rouge. Les valeurs de CMT sont issues du NHCPC (National Health Commission, Chine) pour As, Cr, Hg, et Ni, et du journal officiel de l’Union Européenne pour Cd, Ni, et Pb (ntot=53).

			As	Cd	Cr	Hg	Ni (NHFPC) / Ni (UE 2023/915)	Pb
			mg.kg^{-1} MF	mg.kg^{-1} MF	mg.kg^{-1} MF	$\mu\text{g.kg}^{-1}$ MF	mg.kg^{-1} MF	mg.kg^{-1} MF
CMT			0,5	0,02	0,5	10	1	0,05
Légumes fruits	Chouchoute	Moyenne	0,009	0,000	0,091	0,108	0,449	0,001
		sd	0,007	0,000	0,018	0,150	0,414	0,001
		Médiane	0,004	0,000	0,091	0,041	0,313	0,001
		Min	0,004	0,000	0,066	0,041	0,058	0,000
		Max	0,025	0,000	0,123	0,411	1,201	0,002
	Concombre	Moyenne	0,009	0,001	0,045	0,063	0,093	0,001
		sd	0,011	0,001	0,01	0,092	0,154	0,001
		Médiane	0,004	0,001	0,045	0,017	0,044	0,001
		Min	0,002	0,000	0,028	0,017	0,007	0,000
		Max	0,028	0,004	0,059	0,279	0,472	0,003
	Courgette	Moyenne	0,009	0,001	0,06	0,105	0,539	0,002
		sd	0,011	0,001	0,016	0,109	0,438	0,001
		Médiane	0,002	0,001	0,062	0,054	0,526	0,001
		Min	0,002	0,000	0,034	0,021	0,073	0,000
		Max	0,03	0,004	0,086	0,279	1,285	0,004
	Squash	Moyenne	0,023	0,001	0,114	0,057	1,534	0,003
		sd	0,017	0,000	0,031	0,017	1,622	0,004
		Médiane	0,031	0,001	0,103	0,052	1,323	0,001
		Min	0,005	0,001	0,083	0,052	0,021	0,001
		Max	0,041	0,001	0,176	0,103	4,508	0,013
Tomate	Moyenne	0,01	0,003	0,072	0,045	0,104	0,001	
	sd	0,009	0,002	0,026	0,045	0,175	0,001	
	Médiane	0,006	0,003	0,063	0,031	0,047	0,001	
	Min	0,003	0,000	0,044	0,031	0,003	0,000	
	Max	0,031	0,006	0,145	0,189	0,573	0,003	

Néanmoins, doit être mentionné ici, que sur 8 dépassements, 3 étaient liés à des épidermes consommables de denrées (courgette et squash). Ainsi, la chair de la denrée est généralement moins concentrée en nickel que l’épiderme, même si elle pouvait tout de même présenter un dépassement de la CMT (Figure 23). Là encore, ces résultats suggèrent qu’en retirant les peaux des légumes fruits, même si ces dernières sont consommables et bien nettoyées, l’ingestion de nickel par le consommateur peut être diminuée.

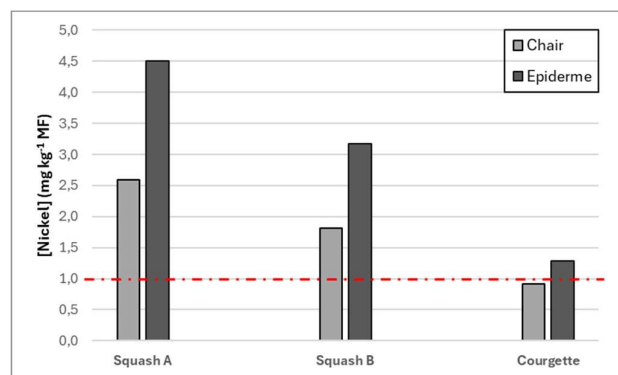


Figure 23- Concentrations en nickel (mg.kg^{-1} , en matière fraîche MF) dans l’épiderme et la chair de différentes denrées issues de différents producteurs et origines géographiques. La CMT représente la concentration maximale tolérée dans cette catégorie de denrées alimentaires.

Enfin, l'étude des légumes racines a fait apparaître 3 dépassements en chrome, soit 10% des échantillons étudiés. Pour le nickel, les dépassements étaient au nombre de 7 ou 8, considérant respectivement les CMT du NFPHC, ou de l'UE, soit 23,3% et 24% (Tableau 38). À nouveau, différents organes (épiderme, chair), items (carotte, pomme de terre, manioc, taro) et communes (Boulouparis, Île des Pins, Poya, Thio) étaient concernés. Les dépassements maximaux sont de 2,97 fois la CMT pour le chrome et de 6,6 fois la CMT pour le nickel. Mais sur les 3 dépassements en chrome, 2 étaient liés à la seule analyse de l'épiderme ou de l'épiderme avec la chair de la denrée.

Tableau 38- Concentrations (matière fraîche, MF) en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb, dans les différents items de la catégories « légumes racines ». Les valeurs des moyennes, écarts-types (sd), médianes, minimum (min.) et maximum (max.) sont mentionnées. Notez que les concentrations en As, Cd, Cr, Hg, Ni et Pb sont en ppm (mg.kg⁻¹ MF), et les concentrations en Hg sont en ppb (µg.kg⁻¹ MF). Les concentrations maximales tolérées (CMT) sont indiquées en police rouge. Les valeurs de CMT sont issues du NHFPC (National Health Commission, Chine) pour As, Cr, Hg, et Ni, et du journal officiel de l'Union Européenne pour Cd, et Pb. La CMT pour le nickel concernant les huiles et produits oléagineux, mais en l'absence d'autres seuils, il est donné à titre indicatif pour Cd, et Pb. La CMT pour le nickel concernant les huiles et produits oléagineux, mais en l'absence d'autres seuils, il est donné à titre indicatif (ntot=25).

		As	Cd	Cr	Hg	Ni (NHFPC)	Ni (UE 2023/915)	Pb
		mg kg ⁻¹ MF	mg kg ⁻¹ MF	mg kg ⁻¹ MF	µg kg ⁻¹ MF	mg kg ⁻¹ MF	mg kg ⁻¹ MF	mg kg ⁻¹ MF
CMT		0,5	0,1	0,5	10	1	0,9	0,1
Carotte	Moyenne	0,013	0,013	0,639	0,558	1,371	1,371	0,02
	sd	0,012	0,01	0,739	0,426	1,958	1,958	0,01
	Médiane	0,007	0,012	0,295	0,804	0,281	0,281	0,015
	Min	0,007	0,004	0,134	0,067	0,201	0,201	0,013
	Max	0,027	0,024	1,487	0,804	3,631	3,631	0,031
Pommes de Terre	Moyenne	0,051	0,024	0,354	0,703	0,562	0,562	0,033
	sd	0,022	0,016	0,158	0,677	1,005	1,005	0,026
	Médiane	0,056	0,024	0,304	0,562	0,079	0,079	0,03
	Min	0,022	0,004	0,225	0,112	0,022	0,022	0,004
	Max	0,067	0,043	0,585	1,575	2,07	2,07	0,067
CMT		0,5	0,05	0,5	10	1	0,9	0,1
Légumes racines Igname	Moyenne	0,064	0,001	0,341	0,208	0,312	0,312	0,003
	sd	0,051	0	0,085	0,165	0,274	0,274	0,003
	Médiane	0,087	0,001	0,32	0,145	0,145	0,145	0,001
	Min	0,015	0,001	0,262	0,145	0,087	0,087	0,001
	Max	0,145	0,001	0,494	0,581	0,814	0,814	0,009
Manioc	Moyenne	0,056	0,004	0,418	0,398	1,208	1,208	0,005
	sd	0,055	0,004	0,055	0,308	1,028	1,028	0,004
	Médiane	0,03	0,002	0,398	0,199	0,797	0,797	0,004
	Min	0,02	0,002	0,358	0,199	0,319	0,319	0,002
	Max	0,159	0,012	0,518	0,797	2,708	2,708	0,012
Taro	Moyenne	0,018	0,004	0,37	0,448	1,27	1,27	0,009
	sd	0	0,003	0,034	0,441	1,865	1,865	0,017
	Médiane	0,018	0,002	0,395	0,269	0,395	0,395	0,003
	Min	0,018	0,002	0,323	0,179	0,036	0,036	0,002
	Max	0,018	0,007	0,395	1,435	5,955	5,955	0,057

4.2.1.5. Effet du nettoyage des légumes feuilles

L'évaluation de cette action a été réalisée préférentiellement sur les légumes feuilles. En effet, ils tendent à accumuler plus de métaux que les autres types de légumes ou fruits, mais ils sont également sensibles aux dépôts atmosphériques secs et humides, ou encore à la déposition de particules de sols particulièrement lorsqu'ils ne sont pas buissonnants. Aussi, des analyses ont été réalisées sur des échantillons préparés avec ou sans nettoyage à l'eau ultra pure. Sur les 34 couples de denrées analysés avec ou sans lavage, les données de 31 couples ont pu être étudiées.

Dans le tableau 39, sont présentés les moyennes, et écarts-types des différents éléments des couples lavés/non lavés, toutes denrées confondues ; ainsi que le rapport entre les concentrations moyennes des denrées non lavées et lavées.

Tableau 39- Concentrations moyennes (et écarts-types, sd) des différents éléments mesurés dans des couples de denrées nettoyées ou non à l'eau ultra-pure avant analyse.

		Lavé		Non lavé	
		Moyenne	sd	Moyenne	sd
Au	PPB	1,06	1,31	2,46	6,50
B	PPM	32,47	12,20	31,53	12,26
Ba	PPM	26,90	38,88	23,42	33,42
Ca	%	1,43	0,94	1,33	0,85
Cd	PPM	0,10	0,08	0,08	0,06
Co	PPM	0,52	0,56	1,41	4,63
Cr	PPM	2,27	2,52	8,92	35,08
Cu	PPM	6,67	3,81	6,75	3,46
Fe	%	0,02	0,02	0,07	0,21
Hg	PPB	8,30	5,87	9,29	7,40
K	%	4,34	2,00	4,37	2,03
La	PPM	0,08	0,10	0,09	0,12
Mg	%	0,78	0,53	0,79	0,58
Mn	PPM	53,70	47,16	66,20	77,03
Mo	PPM	0,95	1,05	0,95	1,03
Na	%	0,17	0,21	0,17	0,23
Ni	PPM	11,40	14,17	26,71	86,05
P	%	0,52	0,21	0,53	0,19
Pb	PPM	0,09	0,12	0,11	0,16
S	%	0,51	0,31	0,53	0,29
Se	PPM	0,22	0,12	0,26	0,17
Sr	PPM	57,63	56,56	54,59	56,90
Ti	PPM	4,20	4,14	7,30	8,44
V	PPM	2,25	1,71	2,50	1,76
Zn	PPM	45,64	29,10	45,37	25,32

Les éléments pour lesquels le nettoyage au préalable a eu un impact significatif sont l'Au, le Co, le Cr, Fe, Mn, Ni, Pb et le Ti (Figure 24). Ces éléments sont des marqueurs d'origine terrigène, indiquant un dépôt de poussières et/ou de particules de sols sur les denrées étudiées. Toutes denrées, et origines confondues, les écarts-types étaient particulièrement importants, suggérant un effet hétérogène du nettoyage sur les concentrations élémentaires, fonction de la nature et/ou de l'origine des denrées. Ainsi, les couples de données pour les éléments Au, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb et Ti, sont présentés en Figure 25. Ces graphiques permettent de mettre en évidence les différences parfois très conséquentes de concentrations entre les denrées lavées et non lavées ; mais également le fait que les différences qui apparaissent entre éléments et entre les concentrations des denrées lavées et non lavées, ne sont pas le fait d'une seule commune ou région. Ces résultats suggèrent une « contamination » très localisée fonction de la nature pédo-géologique du terrain sur lequel les denrées végétales sont cultivées ou prélevées.

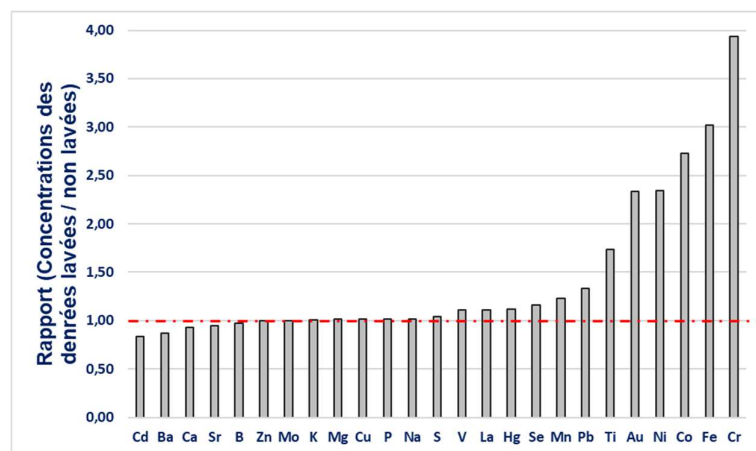


Figure 24- Rapport entre les concentrations des denrées lavées ou non lavées pour chaque élément quantifié. La ligne rouge, désignant un rapport = 1 indique une absence d'effet du nettoyage préalable de la denrée sur les éléments.

Différents auteurs ont pu mettre en évidence un effet du nettoyage sur les concentrations en métaux (Augusttson et al., 2023 ; Nabulo et al., 2010). Néanmoins, l'amplitude de l'effet demeure fonction des éléments et de leur phytoaccessibilité. Ainsi, Augustsson et al. (2023) ont montré que 50% du Pb, Co, Cr et As, étaient retirés lorsque les denrées végétales, cultivées en contexte urbain, étaient nettoyées avant analyses. Cependant, l'effet quantitatif du nettoyage demeurait très hétérogène, en lien avec la nature de la contamination, l'élément considéré, mais aussi, des spécificités architecturales et physiologiques des plantes. La typologie de croissance, la durée du cycle de culture, l'architecture, la surface foliaire, la rugosité, ou la présence de cire sur les feuilles, sont autant de paramètres susceptibles d'influencer la capture de particules (sols, dépôts secs ou humides) déposées sur la plante (feuilles particulièrement), et donc l'effet du nettoyage (Xiong et al., 2014, 2016). Augusttson et al. (2023) ont indiqué que l'ingestion moyenne journalière pouvait être augmentée de 130% pour le Pb, 126% pour Co ; 121% pour le Cr, 82 pour l'As, 55% pour Sb, et 50% pour Ni. Nabulo et al. (2010) montèrent également un effet du nettoyage des denrées sur les concentrations en Pb, et Cr notamment.

Ainsi, **le nettoyage des denrées végétales avant leur consommation, demeure une solution simple à mettre en œuvre pour diminuer l'exposition alimentaire aux métaux** ; même si la qualité des eaux de lavage, particulièrement en zone rurale, et minière, pourrait questionner quant à l'efficacité de ce nettoyage.

4.2.1.6. Impact géographique et lien entre concentrations dans les denrées et les sols

Une première analyse par zone géographique, toutes denrées confondues, ne permet pas de mettre en évidence de différences marquées par micro-régions, excepté pour le nickel dont les concentrations moyennes étaient significativement plus élevées dans la région de Thio (Figure 26).

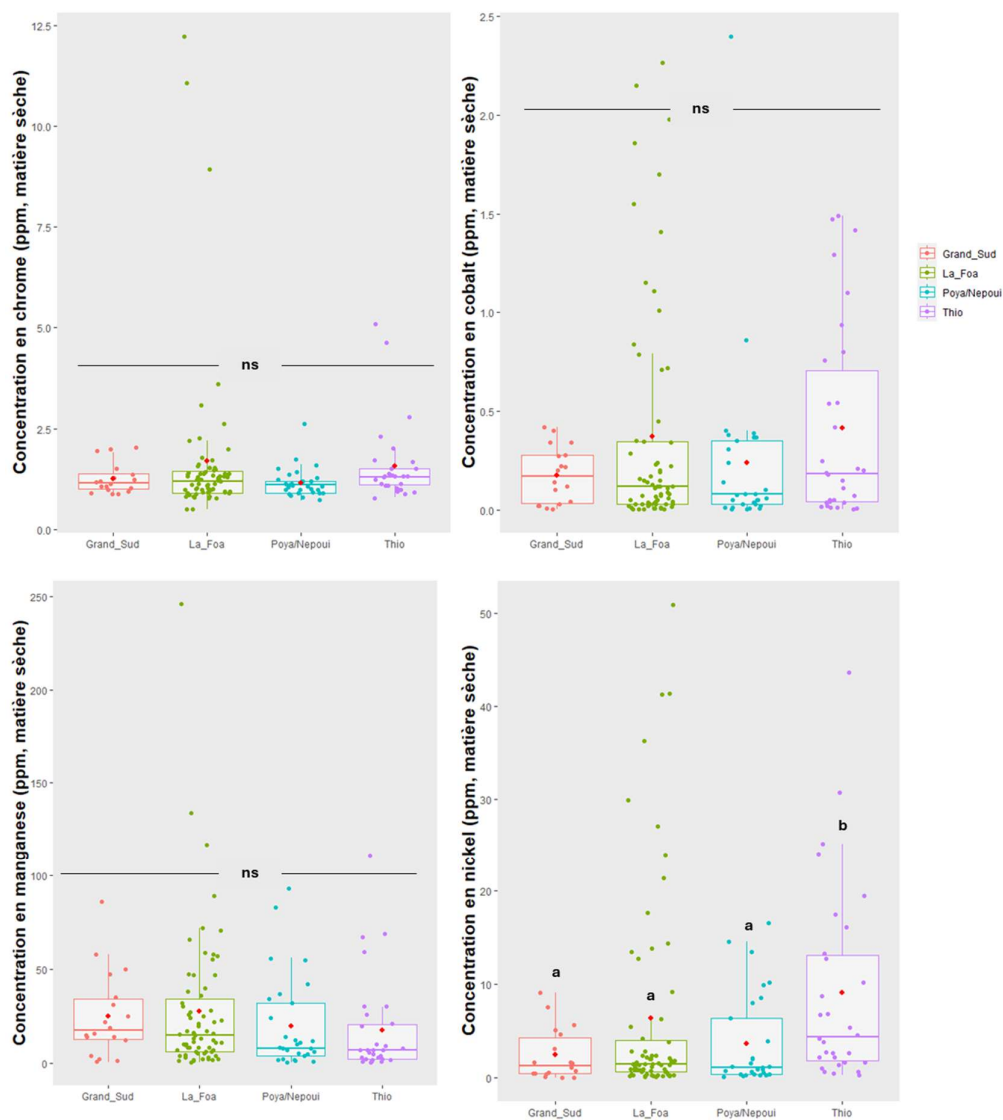


Figure 26- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome, cobalt, manganèse et nickel par grandes zones géographiques étudiées. Des lettres différentes indiquent une différence statistique au seuil $P < 0,05$. Dans ce graphique, les résultats issus de Boulouparis, sont considérés dans la zone de la Foa.

Des constats semblables sont réalisés lors de l'observation de la distribution des concentrations entre denrées et micro-régions (Figure 27). Comme décrit précédemment, les légumes feuilles se démarquent pour leurs concentrations métalliques, et ce, quelle que soit la région considérée. Néanmoins, il est étonnant de constater une grande dispersion des données pour la région de la Foa, et des concentrations en Cr, Co, Mn et Ni, semblables à celles observées dans les denrées alimentaires du Grand Sud et de Thio ; alors même que la nature des substrats pédologiques et géologiques divergent grandement.

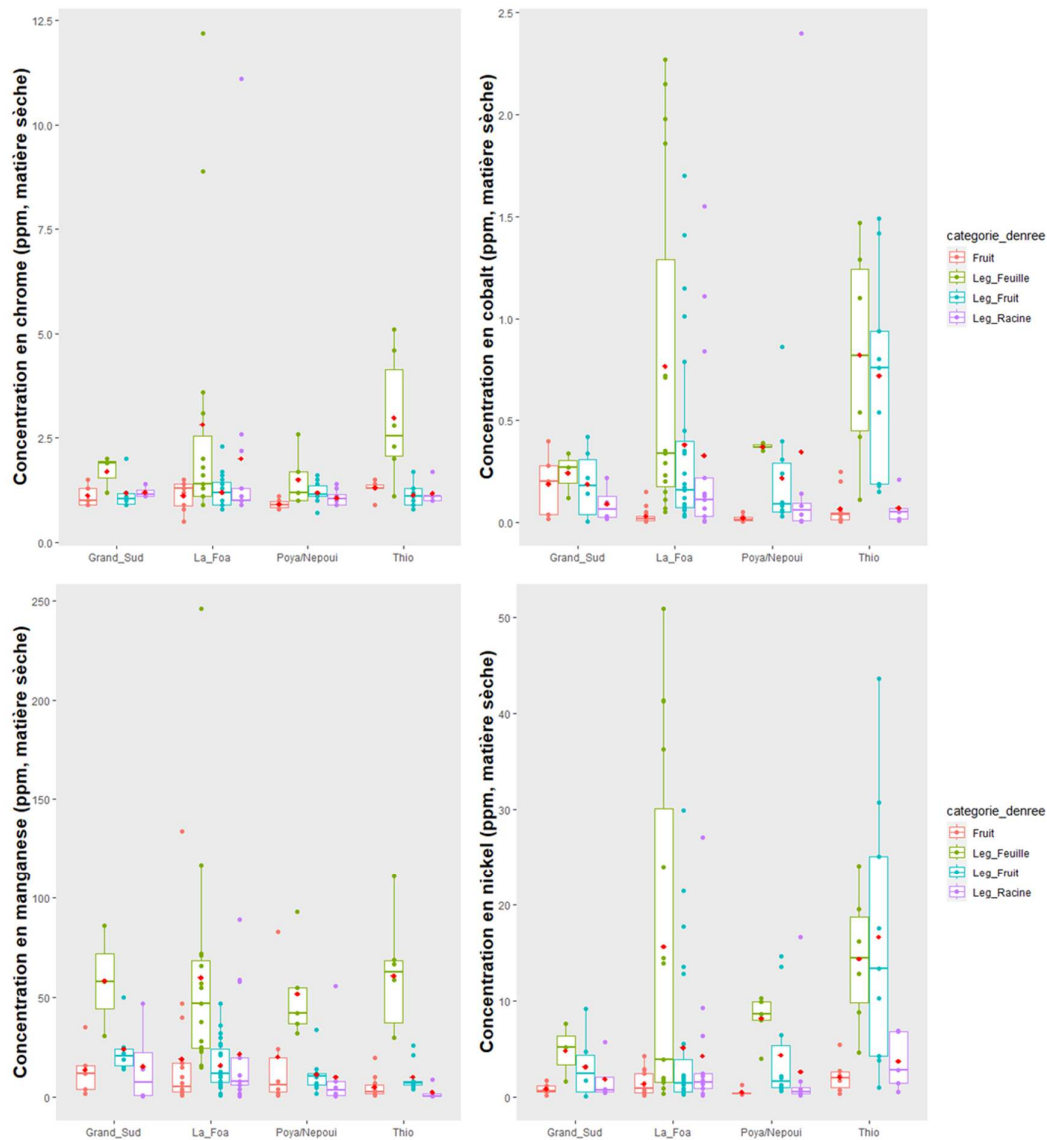


Figure 27- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome, cobalt, manganèse et nickel de chaque catégorie de denrées et par grandes zones géographiques étudiées. Dans ce graphique, les résultats issus de Boulouparis, sont considérés dans la zone de la Foa.

Les échantillonnages de denrées végétales échantillonnées à Thio, ont tous été réalisés sur sols ferrallitiques développés sur alluvions ultrabasiques récentes. Ainsi, et bien que classées dans la catégorie Fluvisols, en raison de leur caractère jeune et de leur développement sur substrat d'apport (alluvions), ces sols présentent des caractéristiques chimiques typiques des sols de bas de toposéquence des substrats ultrabasiques, notamment en ce qui concerne la disponibilité du nickel, mesurée par EDTA (Tableau 40) (Bourdon et Becquer, 1992). Il est cependant étonnant de constater que les denrées de la région de la Foa, et les sols de cette même région, exhibaient des concentrations en nickel du même ordre de grandeur que celles issues du Grand Sud, alors même que les substrats géologiques divergent grandement (volcano-sédimentaire pour la Foa ; ultrabasique pour le Grand Sud).

Tableau 40- Concentrations moyennes (et écarts-types) en Co, Cr, Mn, et Ni mesurées après extractions de sols à l'EDTA 0,05 M durant 1h. Les moyennes sont présentées par région géographique pour les régions dont les sols ont pu être échantillonnés.

	Co-EDTA 1h (mg kg ⁻¹)		Cr-EDTA 1h (mg kg ⁻¹)		Mn-EDTA 1h (mg kg ⁻¹)		Ni-EDTA 1h (mg kg ⁻¹)	
	Moy.	sd	Moy.	sd	Moy.	sd	Moy.	sd
Grand Sud	15,17	20,31	1,64	2,30	289,35	360,22	16,82	20,53
La Foa	4,55	2,29	0,32	0,36	373,62	236,79	17,77	31,05
Thio	12,80	11,98	0,45	0,32	206,47	109,21	101,84	129,11

Dans un second temps, des graphiques semblables ont été tracés mais en considérant les résultats issus de Boulouparis, dans la zone du Grand Sud, et non de la Foa (Figure 28). Ce faisant, les concentrations présentaient des divergences plus marquées entre régions, avec notamment des concentrations en métaux Cr, Co et Ni, dans les denrées agricoles végétales, plus élevées dans la zone du Grand Sud et de Thio, que dans la zone de la Foa. Toutes denrées confondues, l'effet région est apparu significatif pour Cr, et Co (aov, P < 0,01 pour Cr, Co), et Ni (aov, P < 0,001). Cependant, aucun effet croisé -catégorie de denrée et région- n'a été mis en évidence (Figure 29).

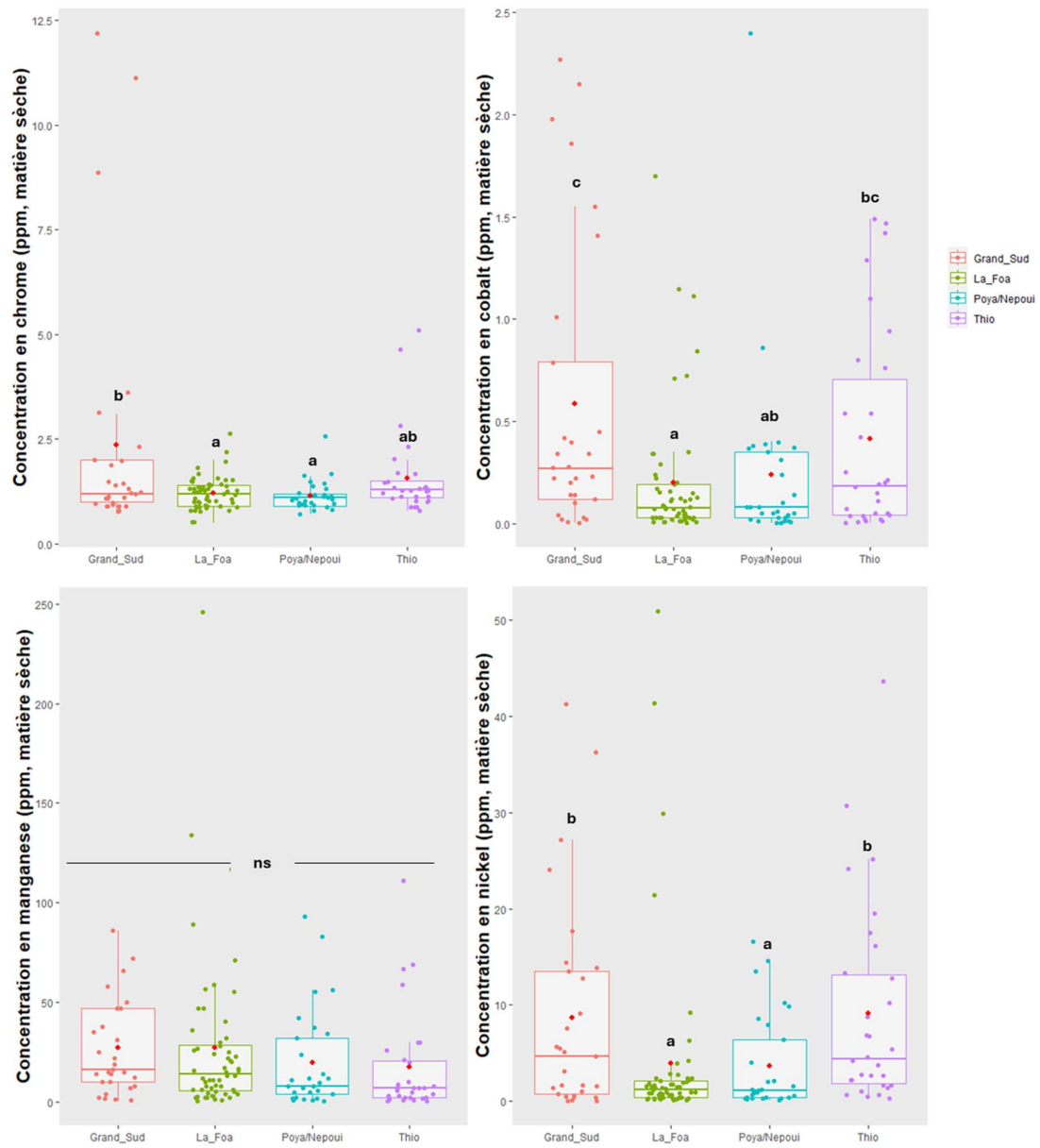


Figure 28- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome, cobalt, manganèse et nickel par grandes zones géographiques étudiées. Des lettres différentes indiquent une différence statistique au seuil $P < 0,05$. Dans ce graphique, les résultats issus de Boulouparis, sont considérés dans la zone du Grand Sud.

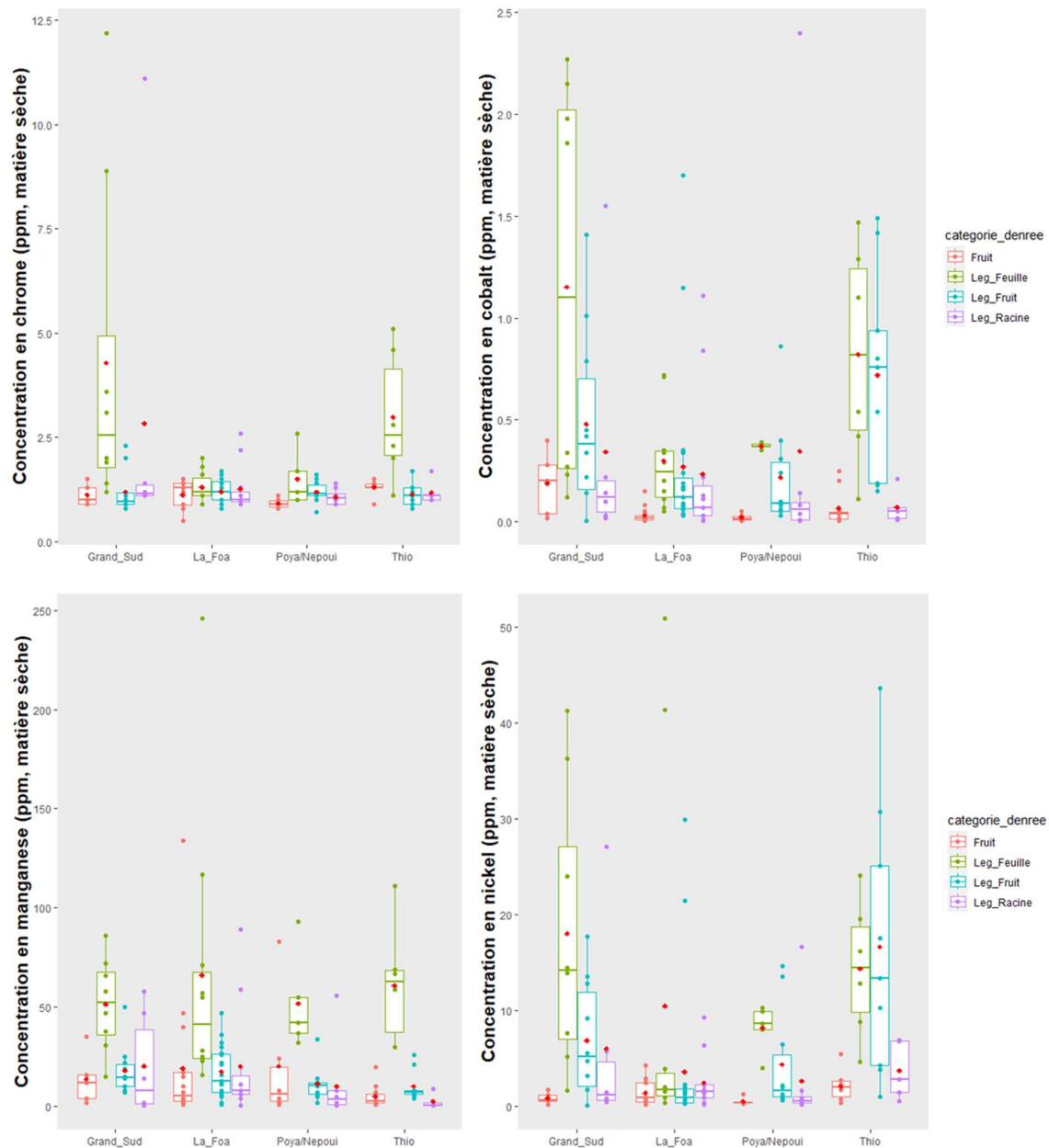


Figure 29- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome, cobalt, manganèse et nickel de chaque catégorie de denrées et par grandes zones géographiques étudiées. Dans ce graphique, les résultats issus de Boulouparis, sont considérés dans la zone du Grand Sud.

De la même façon, en considérant les données des concentrations extraites à l'EDTA dans les sols, les différences entre la Foa et le Grand Sud étaient plus marquées avec des concentrations plus élevées en Ni et Cr, dans la zone du Grand Sud (Tableau 41). Néanmoins, il convient de mentionner que l'ensemble des sols sur lesquels les denrées ont été cultivées, n'ont pas nécessairement été prélevés (échantillonnages aux marchés municipaux, non autorisation des producteurs pour des prélèvements de sols *a posteriori*). Aussi, les rapprochements qui pourraient être réalisés entre les concentrations moyennes dans les sols et celles dans les denrées, ne tiennent ainsi pas compte de l'ensemble de la diversité pédologique et donc chimique des sols d'origine.

Tableau 41- Concentrations moyennes (et écarts-types) en Co, Cr, Mn, et Ni mesurées après extractions de sols à l'EDTA 0,05 M durant 1h. Les moyennes sont présentées par région géographique pour les régions dont les sols ont pu être échantillonnés. Les données de Boulouparis, sont considérées dans ce tableau dans la région Grand Sud.

	Co-EDTA 1h (mg kg ⁻¹)		Cr-EDTA 1h (mg kg ⁻¹)		Mn-EDTA 1h (mg kg ⁻¹)		Ni-EDTA 1h (mg kg ⁻¹)	
	Moy.	sd	Moy.	sd	Moy.	sd	Moy.	sd
Grand Sud	13,17	18,06	1,36	2,07	270,26	321,55	25,35	30,44
La Foa	3,82	1,15	0,28	0,39	436,25	235,59	4,26	4,01
Thio	12,80	11,98	0,45	0,32	206,47	109,21	101,84	129,11

Ces résultats bien qu'incomplets suggèrent **un effet de la nature du substrat sur les concentrations en éléments dans les cultures, avec des concentrations plus importantes en Cr, Co et Ni sur substrats ultrabasiques (Grand Sud et Thio) que substrat volcano-sédimentaire (la Foa)**. Cependant, il peut être noté une **très grande hétérogénéité de concentrations** en métaux dans les denrées végétales au sein des communes/régions étudiées en lien avec les caractéristiques physico-chimiques des sols à une échelle parcellaire. En effet, les écarts-types estimés pour les concentrations EDTA mesurées dans les sols pour les différents éléments dénotent **une variabilité importante, mettant en évidence la nécessité de considérer l'échelle parcellaire, plutôt que l'unité pédologique ou la typologie du substrat géologique**.

À titre d'exemple, la région de Boulouparis n'est pas développée sur substrat ultrabasique, mais les concentrations des denrées végétales produites, particulièrement celles situées à la Ouenghi, ont des caractéristiques métallifères plus proches de celles des sols alluvionnaires de Thio que de celles de la zone de la Foa. Ainsi les concentrations mesurées dans les sols de la Ouenghi étaient 1,6 ; 4,5 et 20,5 fois plus élevées en Co, Cr et Ni, respectivement, que dans les sols de Boulouparis côté mer.

Ainsi, **la partition classique entre sols d'origine volcano-sédimentaire vs. sols ultrabasiques, fait clairement apparaître des différences moins prononcées qu'attendues** (Tableau 42). Les sols agricoles étudiés, largement du type sols alluvionnaires, pourraient être à l'origine de ces différences peu marquées, et mettent en évidence l'intérêt d'évaluer la qualité physico-chimique des sols à des échelles spatiales fines. En effet, et même lorsqu'ils ne sont pas développés sur substrat UB, les sols alluvionnaires pourraient être impactés par les dépôts sédimentaires et limoneux, en lien avec les crues des fleuves. La qualité géologique de l'amont des bassins versants et la présence d'exploitations minières pourraient ainsi largement impacter la qualité physico-chimique des sols fluviaux. **La variabilité spatiale des concentrations en métaux dans les sols du territoire, notamment en termes de disponibilité environnementale, est abordé dans le cadre du premier lot de travail du projet ValoPRO-NC** (ADEME, Coord. IAC).

Tableau 42- Concentrations moyennes (Moy) et écarts-types (sd) en Co, Cr, Mn et Ni, mesurées dans les sols après extractions à l'EDTA-1h (en mg kg⁻¹) et classifiées selon la nature du substrat géologique en place (UB, ultrabasique, VS, volcano-sédimentaire).

	Co-EDTA		Cr-EDTA		Mn-EDTA		Ni-EDTA	
	Moy.	sd	Moy.	sd	Moy.	sd	Moy.	sd
	mg kg ⁻¹							
UB	14.60	16.33	1.11	1.80	289.28	263.60	54.99	94.54
VS	12.06	15.40	0.35	0.31	301.17	265.10	49.44	62.45

4.2.1.7. Relations sols-plantes et facteurs de bioconcentration

La nature du sol, et ses caractéristiques physico-chimiques représentent généralement des facteurs de contrôle du transfert des métaux vers les plantes cultivées.

Le tableau 43 décrit les caractéristiques moyennes des sols échantillonnés et analysés. Concernant les pH, ils sont en moyenne proches de la neutralité à légèrement basiques, et ce même considérant des sols naturellement très acides (cas des Ferralsols développés sur péridotites). En effet, le pH est un paramètre généralement contrôlé dans les sols agricoles, et notamment l'horizon arable, en raison de son effet potentiel sur la toxicité de certains éléments (Ex- toxicité aluminique) et sur l'assimilation des nutriments par les cultures.

Les réservoirs mobilisables à court terme, susceptibles d'être biodisponibles ont été évalués, par une extraction des sols à l'EDTA 0,05M durant 1h. Concernant les 4 éléments cibles, les concentrations moyennes augmentaient selon l'ordre suivant : Cr < Co < Ni < Mn. Néanmoins, les gammes de variation étaient particulièrement importantes, soit entre les valeurs minimales et maximales : 500 fois pour le Co, 374 fois pour le Cr, 141 fois pour le Mn, et 700 fois pour le nickel, en lien avec la très grande diversité de sols du territoire. D'autre part, et bien que ne faisant pas l'objet de cette présente étude, les caractéristiques physico-chimiques pour un même type de sol, sont susceptibles d'être modifiées par les pratiques agronomiques mises en œuvre et les activités anthropiques environnantes (mines, industries, élevages, etc.).

Tableau 43- Valeurs des moyennes, écarts-types (sd), médianes, minima (Min.) et maxima (Max.) des pH eau et KCl des sols, et des concentrations extraites à l'EDTA 0,05M pour Co, Cr, Mn, Ni. Les extractions sols : EDTA ont été réalisées durant 1h, et les concentrations ainsi obtenues sont susceptibles de renseigner sur les réservoirs rapidement mobilisables dans l'environnement, et potentiellement biodisponibles.

	pHeau	pHKCl	Co-EDTA 1h	Cr-EDTA 1h	Mn-EDTA 1h	Ni-EDTA 1h
	mg kg ⁻¹ MS					
Moyenne	6,82	5,97	10,94	0,79	254,12	46,81
sd	0,64	0,77	13,81	1,44	226,58	76,86
Médiane	6,83	6,10	4,33	0,33	234,54	11,30
Min.	5,69	4,40	0,13	0,02	8,65	0,56
Max.	8,47	7,74	65,18	7,77	1215,59	392,20

Les relations linéaires entre les éléments métalliques mesurés dans la plante et ceux mesurés à l'EDTA dans le sol, étaient très significatives pour le nickel ; significatives pour Cr et Co, et non significatives pour Mn (Figure 30).

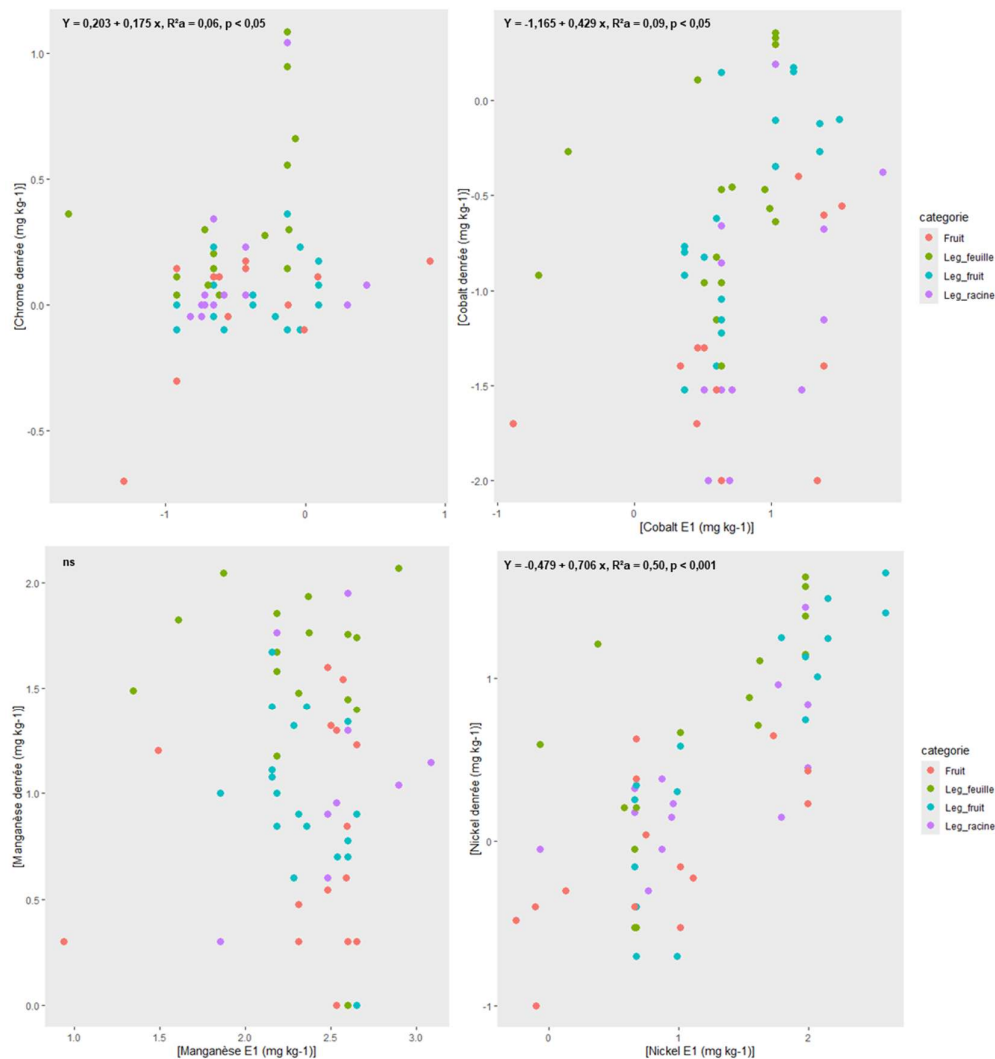


Figure 30- Relations entre les concentrations élémentaires (Cr, Co, Mn, et Ni) mesurées dans les parties consommées des denrées agricoles végétales, et les concentrations mesurées dans les sols après extractions à l'EDTA 0,05 M (1h). L'ensemble des concentrations sont présentées sur une base de Log10, et les modèles linéaires présentés ont également été réalisés sur les log10(concentrations).

Les mécanismes d'absorption racinaire par les plantes sont espèces-spécifiques et dépendent généralement des éléments considérés, complexifiant la définition de la biodisponibilité d'un élément.

Ce concept de biodisponibilité peut être décomposé en trois sous-concepts (Peijnenburg et al., 1997) : la disponibilité environnementale, la biodisponibilité environnementale et la biodisponibilité toxicologique. Dans les travaux comme ceux présentés dans METALICA-Aliment, les deux premiers concepts sont particulièrement importants. En effet, la disponibilité environnementale représente la fraction du contaminant potentiellement disponible pour des organismes et qui résulte des processus physico-chimiques de désorption (ISO 17402, 2008). Elle peut être évaluée à travers différentes approches chimiques opérationnelles d'extraction avec des extractants de différence force susceptibles d'extraire plus ou moins de métaux des phases solides du sol. Les extractions chimiques simples ou séquentielles permettent de mimer les phénomènes contrôlant la solubilité et la mobilité des métaux. La biodisponibilité environnementale représente, elle, la fraction du contaminant disponible dans l'environnement qu'un organisme absorbe par des processus physiologiques. Elle peut donc être estimée par la quantité de métal accumulée dans une plante, préalablement exposée au sol contaminé. La biodisponibilité vraie est ainsi fonction de l'espèce végétale et du temps d'exposition (Harsem et al., 2005).

En ce sens, la norme ISO 17402 suggère que la biodisponibilité environnementale puisse être approchée *via* des mesures chimiques ou biologiques, les mesures chimiques n'étant alors qu'un

indicateur de la biodisponibilité pour les organismes et non une mesure directe de la biodisponibilité environnementale (Harmsen, 2007 ; Harmsen et al., 2005). L'évaluation de la biodisponibilité des éléments traces au travers de mesures chimiques de disponibilité de ces éléments dans le sol ne peut donc pas être envisageable car ne tient pas compte de la spécificité de l'organisme. Les solutions salines non tamponnées permettent généralement d'approximer les fractions échangeables des sols, tandis que les complexants permettent de mimer la fraction mobilisable en métaux des sols. Par exemple, la norme NF 31-120, utilise de l'EDTA 0,01M afin de déterminer la disponibilité du cuivre, zinc, manganèse et fer dans les sols, ces concentrations étant susceptibles de représenter les fractions potentiellement phytodisponibles en ces éléments. Néanmoins, l'EDTA, chélatant organique, peut être saturé par les cations présents en solution, sous-estimant ainsi le réservoir de métaux potentiellement mobilisables. Ainsi, de précédents tests (ValoPRO-NC) sur des sols du territoire, suggèrent qu'il serait plus juste d'utiliser de l'EDTA 0,05M dans les conditions agropédologiques de la Nouvelle-Calédonie, selon le protocole défini par le bureau communautaire des références (Quevauviller et al., 1996).

Dans cette étude, bien que significative les relations Cr- plantes et Cr- EDTA demeuraient particulièrement faibles, suggérant que les concentrations en Cr, extraites à l'EDTA 0,05 M durant 1h, n'étaient pas un bon indicateur de la biodisponibilité de ces éléments pour les cultures considérées. Dans les sols, le chrome existe majoritairement sous deux états d'oxydation : la forme trivalente, chrome III, peu soluble et donc généralement peu mobile, et la forme hexavalente, cancérigène avérée, très soluble et donc très mobile. Or, les mécanismes d'absorption du chrome demeurent incertains. Il semblerait que l'absorption du Cr(III) soit un mécanisme passif, tandis que l'absorption du chrome(VI) serait un mécanisme actif *via* les transporteurs de sulfate ou de phosphate, en raison de la ressemblance structurale des ions chromates avec les deux précédents (de Oliveira et al., 2016, 2015, 2014 ; Shahid et al., 2017). L'absorption de chrome sera donc fonction des mécanismes physiologiques mis en œuvre par la culture, adossée à la spéciation du chrome en solution. Ainsi, l'évaluation des concentrations du chrome dans la solution du sol, plutôt que celle des concentrations mobilisables, pourrait être plus informative sur les relations Cr-sols-plantes.

Pour Co et Mn, les relations entre les concentrations mesurées dans les cultures et celles extraites par l'EDTA étaient très faibles à inexistantes, suggérant là encore que l'EDTA n'est pas un indicateur intéressant pour l'évaluation de la biodisponibilité des éléments étudiés.

Ces constats diffèrent pour le nickel, puisque le Ni-EDTA semble être un indicateur pertinent du nickel biodisponible pour les cultures considérant l'ensemble des cultures, et des contextes agropédologiques. Dupont et Bonzon (1997) avait trouvé de faibles corrélations entre le Ni-DTPA et les teneurs en nickel des parties aériennes de diverses plantes cultivées ($R^2=0,28$), bien que des corrélations particulièrement fortes avaient été obtenues pour l'aubergine ($R^2=0,82$) et la tomate ($R^2=0,78$) (L'Huillier et al., 1996). Ainsi, les cultures, seront plus susceptibles de faire état de concentrations importantes en nickel, si elle se développent sur des sols présentant des concentrations élevées en Ni mobilisable à l'EDTA. Néanmoins, et au regard de la variabilité importante de la réponse des plantes cultivées au Ni-EDTA, d'autres facteurs géochimiques (CEC, matière organique, pH), et/ou biologiques, physiologiques, notamment, sont probablement impliqués dans les concentrations en Ni des cultures.

Remarque- Les chélatants organiques extraient généralement plus de métaux que leur fraction réellement solubles (Anjos et al., 2012). Pour ce faire, les solutions salines, notamment le $CaCl_2$ sont de meilleurs alliés. Ainsi, dans cette étude, était initialement envisagée des extractions au $CaCl_2$, nécessitant alors une analyse par ICP-MS. Au regard du non-fonctionnement puis de l'état hors -service de l'instrumentation durant l'ensemble du projet, les dosages n'ont pas pu être réalisés. L'ensemble des échantillons de sols a été conservée dans l'attente de solutions analytiques. En effet, les solutions de $CaCl_2$ étant des solutions salines, il est difficile de trouver un prestataire acceptant de réaliser ces analyses.

Les facteurs de bioconcentration ont été calculés en tenant compte des concentrations de métaux extraites à l'EDTA du sol, et non à partir des concentrations totales. Lorsque les valeurs de BCF sont supérieures à 1, cela implique que les concentrations dans la plante sont supérieures à celles mesurées dans le sol, et suggère ainsi une accumulation du métal considéré. Ainsi, au regard des concentrations très faibles en chrome EDTA dans les sols, par rapport aux concentrations mesurées dans les plantes, cet élément a été accumulé par la plupart des plantes cultivées étudiées.

Pour les autres éléments et cultures (hormis Ni-brèdes et Ni-chou Kanak), les concentrations sont généralement plus faibles dans les plantes que dans les extraits de sols à l'EDTA, suggérant une non-accumulation de ces éléments.

Néanmoins, et pour l'ensemble des éléments étudiés, les légumes feuilles présentaient, en moyenne, clairement la plus grande capacité à bioaccumuler des métaux (Figure 31). Ces résultats, en accord

avec ce qui est généralement décrit dans la littérature (Gupta et al., 2019), sont liés à un taux plus important de translocation racine-feuille. Cette translocation, favorisée, serait expliquée par de forts taux de transpiration, et des croissances rapides (Khan et al., 2009 ; Gao et al., 2010).

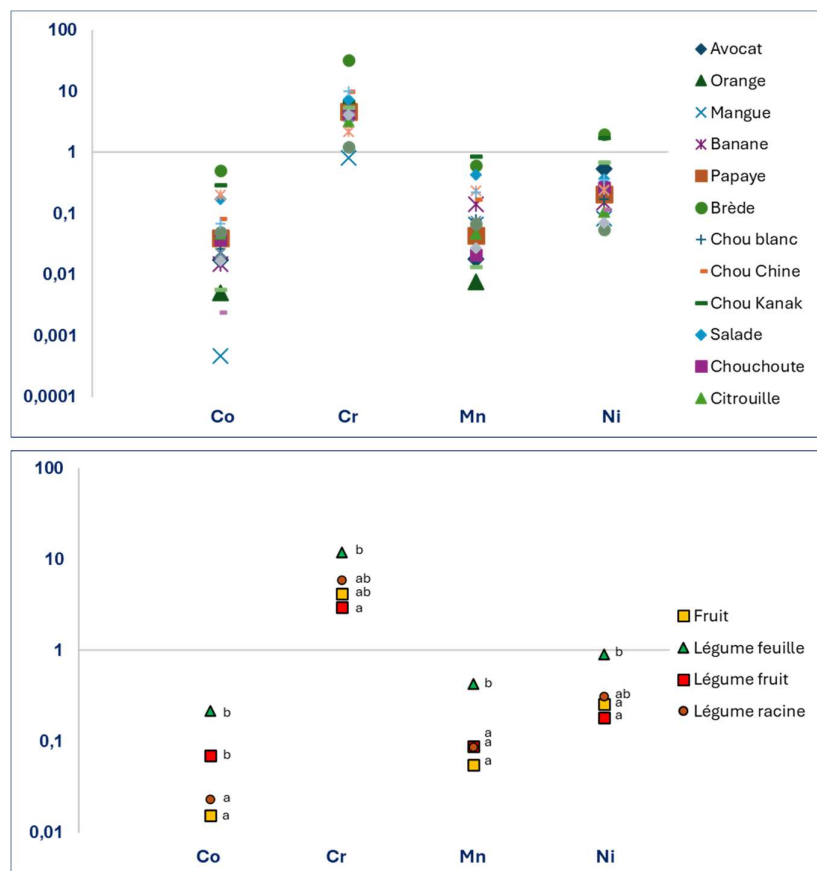


Figure 31- Facteurs de bioconcentration (BCF) Sol-Plante, calculés comme le ratio entre les concentrations métalliques dans la partie consommée de la plante et celle du sol, déterminées par extraction à l'EDTA 0,05M (1h). La figure du dessous représente les moyennes des BCF par catégories de denrées et pour les 4 métaux cibles. Nb. Pour des raisons de lisibilité les écarts-types ne sont pas représentés. Des lettres différentes indiquent une différence statistique au seuil $p < 0,05$.

4.2.1.8. Denrées agricoles végétales- « Take-Home message »

Sur l'ensemble des denrées agricoles végétales étudiées, les concentrations moyennes pour les métaux cibles (Co, Cr, Mn, et Ni), toutes denrées confondues, diminuaient selon la séquence : Mn ($25,8 \pm 38,3 \text{ mg kg}^{-1} \text{ MS}$) > Ni ($6,14 \pm 10,7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ MS}$) > Cr ($1,58 \pm 1,6 \text{ mg kg}^{-1} \text{ MS}$) > Co ($0,34 \pm 0,56 \text{ mg kg}^{-1} \text{ MS}$). Sur une base de matière sèche, les légumes feuilles présentaient les concentrations les plus élevées, pour l'ensemble de ces éléments. Ils étaient suivis par les légumes fruits, les légumes racines, et les fruits ; les différences étant généralement les plus marquées entre les légumes feuilles et les fruits. Des variations importantes au sein des mêmes catégories ont été observées, reflétant la diversité des situations agropédologiques d'origine des denrées.

Si l'étude des concentrations sur matière sèche est préférable pour les comparaisons avec la littérature scientifique, il est important de rappeler que les concentrations exprimées en **matière fraîche** sont indispensables pour les **évaluations de risques alimentaires**. Dans ce cadre, les dépassements étaient :

- inexistants pour As, Cd, Hg et Pb
- rares pour Cr
- plus fréquents pour Ni, particulièrement considérant la réglementation applicable en Europe à compter de juillet 2025 (Tableau 44).

Tableau 44- Résumé des CMT, du nombre total d'échantillons et de dépassements de la CMT par catégorie de denrées agricoles végétales (ntot = 145 analyses de denrées agricoles végétales réalisées et validées analytiquement). Pas de CMT de référence pour Mn et Co. Pour le nickel, les CMT du NHFPC (Chine) et de l'Union Européenne (UE 2023/015) sont mentionnées, néanmoins celles de l'UE ne seront appliquées qu'à compter du 1^{er} juillet 2025 pour les fruits et légumes, et 2026 pour les céréales.

		As	Cd	Cr	Hg	Ni (NHFPC)	Ni (2023/915)	Pb
Fruits	CMT (ppm)	0,5	0,1	0,5	0,01	1,00	0,4	0,02
	Ntotal					38		
	N dépassements	0	0	0	0	0	8	0
Légumes feuilles	CMT	0,5	0,1	0,5	0,01	1,00	0,5	0,3
	Ntotal					29		
	N dépassements	0	0	4	0	12	15	0
Légumes fruits	CMT	0,5	0,02	0,5	0,01	1,00	1,00	0,05
	Ntotal					48		
	N dépassements	0	0	0	0	8 (dont 3 peaux consommées)		0
Légumes racines	CMT (ppm) (Carottes, pommes de terre)	0,5	0,1	0,5	0,01	1,00	0,90	0,1
	Ntotal					7		
	N dépassements	0	0	2 (dont 2 peaux)	0	2 (dont 2 peaux)	2 (dont 2 peaux)	0
Légumes racines	CMT (ppm) (Tubercules tropicaux)	0,5	0,05	0,5	0,01	1,00	0,90	0,1
	Ntotal					23		
	N dépassements	0	0	1	0	5	6	0

Outre les concentrations plus élevées observées dans les **épidermes** des légumes et fruits, nos résultats montrent un **effet significatif du nettoyage à l'eau** sur les concentrations en métaux, en particulier ceux liés à une contamination terrigène : Au, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb et Ti. D'un point de vue pratique pour le consommateur, ces résultats suggèrent de limiter l'exposition en :

1. **Pelant** les fruits et légumes dont l'épiderme est consommable, notamment les pommes de terre et les squashes ;
2. **Lavant** les denrées à l'eau claire avant consommation.

Nos données indiquent également que plus la **disponibilité environnementale du nickel** (approximée par l'extraction à l'EDTA 0,05 M) est élevée, plus les végétaux cultivés sont susceptibles d'accumuler ce métal, surtout les **légumes feuilles**, pour lesquels les facteurs de bioconcentration sont systématiquement les plus élevés pour les quatre éléments cibles (Co, Cr, Mn et Ni).

En revanche, la disponibilité du Co, Cr et Mn estimée par l'EDTA ne peut pas être considérée comme un indicateur fiable de leur **biodisponibilité pour les plantes**. Peu de relations statistiques significatives ont été observées entre les concentrations dans les fruits et légumes et les concentrations disponibles dans les sols, suggérant que **d'autres mécanismes géochimiques ou physiologiques** contrôlent le transfert sol-plante.

Les comparaisons entre les trois micro-régions étudiées révèlent des différences moins marquées que prévu, malgré la diversité des substrats géologiques. Bien que les sols dérivés de substrats ultrabasiques présentent souvent des concentrations élevées en métaux cibles, il n'est pas systématique que les sols développés sur substrats volcano-sédimentaires aient des concentrations plus faibles. La grande variabilité des concentrations de métaux, notamment le nickel, extraits à l'EDTA, indique que **l'héritage de la roche mère, seul**, ne suffit pas à expliquer les concentrations observées.

D'autres facteurs naturels (topographie, hydromorphie) et anthropiques (activité minière, agricole, urbanisation) pourraient contribuer aux concentrations parfois élevées de nickel dans des sols non ultrabasiques. Cependant, compte tenu de la diversité pédologique du territoire, les **déterminants de la disponibilité environnementale des métaux** à l'échelle des bassins versants ou du territoire ne sont pas encore connus ni quantifiés. Le projet **ValoPRO-NC**, ainsi que la cartographie en cours des éléments métalliques, devrait fournir de premiers éléments de réponse.

En conclusion, bien que les cultures sur substrat ultrabasique puissent présenter des concentrations plus élevées en métaux, notamment en nickel et chrome, nos résultats montrent que ce n'est **pas systématique**. La prise en compte des **caractéristiques pédologiques à l'échelle parcellaire** reste donc indispensable.

4.2.2. CONCENTRATIONS ELEMENTAIRES DANS LES DENREES ANIMALES AGRICOLES ET TERRESTRES

4.2.2.1. Comparaison entre typologie de denrées- résultats en matière sèche

4.2.2.1.1. Cas des éléments quantifiés à plus de 50% dans les denrées animales

Pour les denrées les plus consommées (bœuf, cerf (élevage et gibier), porc, poulet et œuf), et les éléments dont le pourcentage de quantification est supérieur à 50%, les données sont présentées dans la figure 32 (Cr, Co, et Mn) et le tableau 45 (Cu, Fe, Zn).

Les concentrations moyennes en chrome étaient toutes inférieures à 0,35 mg kg⁻¹ MS (gamme des valeurs : < LOQ à 1,90 mg kg⁻¹ MS), mais l'effet denrée était significatif (aov, p < 0,001) (Figure 32). Les concentrations en chrome (en MS) étaient les plus élevées dans la chair de bœuf, et les plus faibles dans la chair de cerf (tout organe confondu). Cependant, l'effet organe n'est pas apparu significatif, et aucune différence marquée n'a pu être mise en évidence entre les concentrations en Cr des foies et celles des muscles (aov, p > 0,05).

Concernant le cobalt, les concentrations étaient également faibles et inférieures en moyenne à 0,60 mg kg⁻¹ MS (gamme des valeurs : < LOQ à 1,00 mg kg⁻¹ MS). Un effet très significatif du facteur 'organe' (aov, p < 0,001) et du facteur 'denrée' (aov, p < 0,001) a pu être mis en évidence (Figure 32). Ainsi, les foies présentaient des concentrations moyennes plus de 12 fois supérieures à celles mesurées dans les chairs. La chair de porc, présentait des concentrations en cobalt significativement plus basses que les autres denrées (aov, p < 0,001), notamment en raison de concentrations plus faibles dans les foies. De même les concentrations en cobalt dans les foies de poulet étaient significativement plus faibles que celles mesurées dans les foies de bovins ou de cerfs (Figure 32).

Les concentrations en manganèse (gamme de valeurs : 0,19 à 15 mg kg⁻¹ MS), d'un ordre de grandeur plus important que les concentrations des deux éléments précédents, étaient impactées par le type d'organe considéré (aov, p < 0,001) et le type de denrée (aov, p < 0,001) (Figure 32). Ainsi les foies, toutes denrées carnées confondues (bœuf, cerf, porc, poulet), contenaient plus de 23 fois plus de manganèse que les muscles. Les chairs de bœuf et de cerf exhibaient des concentrations en manganèse plus élevées que la chair de porc et que celle de poulet.

Enfin, pour les œufs, leurs concentrations moyennes en chrome, cobalt et manganèse étaient moins élevées que celles mesurées dans la viande ; mais les jaunes d'œuf possédaient des concentrations plus élevées en chrome et manganèse que les blancs (aov, p < 0,001). En effet, le blanc d'œuf était l'unique denrée pour laquelle le manganèse n'était jamais quantifiable.

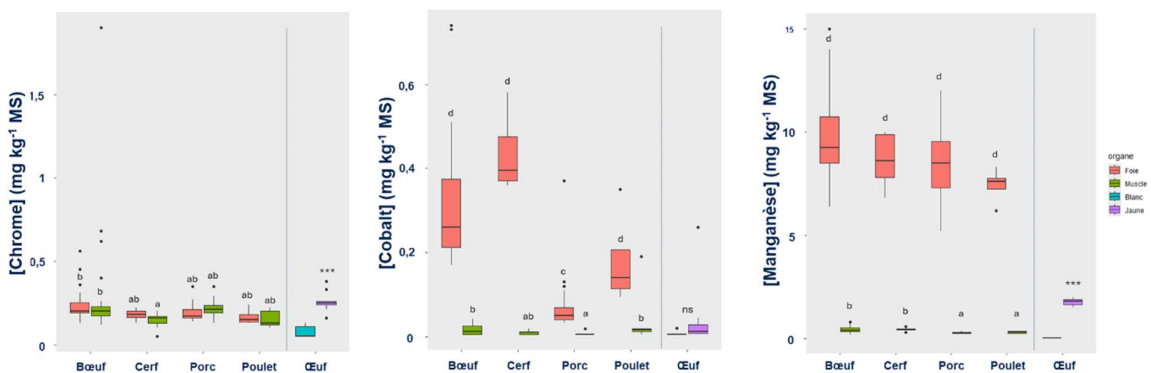


Figure 32- Diagrammes en boîte des concentrations en chrome, cobalt, manganèse (en mg.kg⁻¹ matière sèche, MS) dans le foie et le muscle de bœufs, cerfs, porcs et poulets. Les concentrations des blancs et jaunes d'œufs sont également présentées. Des lettres différentes indiquent une différence statistique au seuil p < 0,05. Remarques: les œufs sont considérés à part dans l'analyse statistique ; la différence, si elle est mentionnée, concerne la comparaison jaune/blanc).

Les concentrations en cuivre, fer et zinc, n'étaient pas du même ordre de grandeur que les concentrations en chrome et cobalt. Elles pouvaient atteindre en moyenne 956 mg kg⁻¹ MS pour le cuivre, et 1 100 mg kg⁻¹ MS pour le fer, dans le foie de cerf et de poulet, respectivement. L'ensemble des foies présentait des concentrations plus élevées en cuivre et en fer que la chair de muscle, soit en moyenne 109 fois et 12 fois plus. Le rapport des concentrations foie/muscle pour le cuivre était le plus élevé pour le cerf (207) et le plus faible pour le poulet (8) ; alors que pour le fer, il était le plus élevé pour le poulet (78), et le plus faible pour le bœuf (3). Les concentrations en zinc tendaient à être plus élevées dans les muscles de bœuf et de cerf que dans les foies, alors que l'inverse était constaté pour le porc et le poulet. Pour ces éléments, les concentrations étaient également plus élevées dans les jaunes d'œufs que dans les blancs (Tableau 45).

Tableau 45- Concentrations moyennes (mg.kg⁻¹ matière sèche, MS) en cuivre, fer et zinc (±sd, écarts-types) mesurées dans la chair de foie ou de muscle de bœuf, cerf, porc et poulet ; ainsi que dans le blanc et jaune d'œuf. Des lettres différentes indiquent une différence statistique au seuil p < 0,05. Remarque- les œufs sont considérés à part dans l'analyse statistique ; la différence, si elle est mentionnée, concerne la comparaison jaune/blanc.

		Cu		Fe		Zn	
		Moy.	sd	Moy.	sd	Moy.	sd
mg kg⁻¹ MS							
Bœuf	Foie	100,48 ^d	85,04	320,77 ^d	360,37	112,81 ^b	21,44
	Muscle	2,60 ^{abc}	0,54	100,77 ^c	19,40	232,69 ^d	55,03
Cerf	Foie	956,00 ^e	607,59	635,00 ^e	314,65	94,90 ^b	18,77
	Muscle	4,62 ^{bc}	0,56	91,33 ^c	13,67	158,89 ^c	27,59
Porc	Foie	101,30 ^d	217,82	929,63 ^e	566,64	153,11 ^c	42,91
	Muscle	2,44 ^{ab}	1,00	39,41 ^b	9,24	96,59 ^b	20,77
Poulet	Foie	9,33 ^c	2,92	1100,00 ^e	1340,35	87,25 ^b	13,15
	Muscle	1,13 ^a	0,24	14,00 ^a	3,94	19,00 ^a	1,41
Œuf	Blanc	1,26 ^{...}	0,40	0,98 ^{...}	0,87	1,00 ^{...}	0,00
	Jaune	2,61	0,18	125,45	13,68	64,45	3,80

Outre les variations entre denrées, ces résultats suggèrent d'ores et déjà, que les risques pour le consommateur ne seront pas les mêmes selon qu'il consomme des muscles ou du foie. En effet, le foie, mais également les reins sont décrits comme étant susceptibles d'accumuler plus d'éléments métalliques que les muscles en raison de leurs rôles biologiques, comme organes de détoxification (Akele et al., 2022 ; Hashemi et al., 2018 ; Waegeneers et al., 2009).

4.2.2.1.2. Cas des éléments rares et des denrées « originales »

Tel que mentionné dans le tableau 24, certains éléments n'étaient que peu quantifiés dans les denrées animales terrestres. Ainsi, As, Cd, Ni et Pb ont été détectés respectivement dans 6,1%, 22,6%, 3,7% et 15,2% des échantillons. Lorsque quantifiés (Tableau 46), ces éléments étaient trouvés dans différents organes et, différents types de denrées, sans qu'il ne soit possible de mettre en évidence une relation systématique entre leur quantification (corrélation non significative).

- L'arsenic a été quantifié dans 6 échantillons : 3 échantillons de poulet (2 fois, 1 chair), 1 blanc et 1 jaune d'œuf (même producteur), et 1 échantillon de muscle de cerf.

- Le cadmium a été détecté dans 31 échantillons, tous appartenant à la catégorie foie, l'ensemble des denrées était concerné ; mais les concentrations en MS demeuraient toutes inférieures à 0,5 mg kg⁻¹.

- Le nickel n'a été quantifié que dans 4 échantillons, dont 3 échantillons de foie (bœuf, porc, poulet) et 1 échantillon de muscle de porc.

- Le plomb a été quantifié dans 18 échantillons, dont 14 échantillons de foie, 3 échantillons de muscles, et 1 jaune d'œuf. Il est à noter ici qu'un échantillon de muscle de cerf présente une concentration particulièrement importante de plomb, 810 mg kg⁻¹ MS, soit plus de 4 400 fois, la

concentration moyenne mesurée dans les autres denrées. Cet échantillon est également l'échantillon de cerf dans lequel a été quantifié l'arsenic (0,39 mg kg⁻¹). Issu de chasses de régulation à Sarraméa, il est ainsi probable que cette concentration soit marqueur d'un tir plutôt que d'une réelle contamination environnementale de la viande ; et ce, malgré les précautions prises pour limiter l'impact de la balle ou de la chevrotine sur la qualité de la viande. En effet, concernant le cerf, il convient de mentionner que les données présentées ici, intègrent les viandes de cerf issues de prélèvements cynégétiques, mais également les viandes de cerfs issues d'« élevage » (animaux sauvages parqués avant abattage). Ainsi, les chairs des muscles ces deux typologies de viande présentent des différences de concentrations en arsenic et plomb, suggérant là encore un impact du tir, plutôt que d'une contamination environnementale.

L'âge des animaux, facteur non disponible dans cette étude, pourrait également être un facteur de contrôle au moins partiel de ces différences. En effet, si le cadmium et le cuivre peuvent s'accumuler, notamment dans le foie (Johnston et al., 2014 ; Strickland et al., 2019), alors des animaux plus âgés pourraient présenter des concentrations plus élevées (Emami et al., 2023). Counotte et al. (2019) ont démontré une intoxication au cuivre, définie comme un taux de cuivre hépatique supérieur à 1000 mg.kg⁻¹ MS, chez les bovins de 3 à 4 ans, en comparaison à des animaux plus jeunes. Cependant, une étude menée sur des cerfs et des wapiti de Nouvelle-Zélande a démontré que les animaux les plus jeunes présentaient des concentrations en cuivre significativement plus importantes que les animaux plus âgés (Reid et al., 1980) ; d'autre part cette étude avait mis en évidence des concentrations plus élevées en cuivre dans les foies des cerfs issus de chasses, que dans les foies des cerfs issus d'élevage ; suggérant un déclin des concentrations en cuivre après capture, et mise en parc. Ces pratiques étant les mêmes qu'en Nouvelle-Calédonie, elles pourraient également être impliquées dans les différences mentionnées. Néanmoins, il est indispensable de rappeler qu'au regard du nombre d'échantillons acquis pour les cerfs, il demeure impossible d'inférer quant aux paramètres environnementaux susceptibles d'influencer les concentrations mesurées. Seules, les concentrations en Pb, peuvent être sans doute, attribuée aux pratiques de chasse.

Tableau 46- Concentrations moyennes et maximales des éléments rarement quantifiés, arsenic, As, cadmium, Cd, nickel, Ni, plomb, Pb, dans les différents organes et denrées étudiées. < LOQ, signifie que les concentrations de l'échantillons sont inférieures aux limites de quantification.

Denrée	Organe	As moy.	As Max.	Cd moy.	Cd Max.	Ni moy.	Ni Max.	Pb moy.	Pb Max
mg kg⁻¹ MS									
Bœuf	Foie	<LOQ	<LOQ	0,10	0,18	0,27	0,27	0,07	0,09
	Muscle	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Cerf	Foie	<LOQ	<LOQ	0,12	0,15	<LOQ	<LOQ	0,18	0,43
	Muscle	0,39	0,39	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	810	810
Porc	Foie	<LOQ	<LOQ	0,09	0,29	0,25	0,25	0,13	0,44
	Muscle	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,79	0,79	0,12	0,12
Poulet	Foie	1,07	1,80	0,30	0,40	0,29	0,29	0,06	0,07
	Muscle	0,18	0,18	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,06	0,06
Œuf	Blanc	0,06	0,06	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	Jaune	0,11	0,11	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,07	0,07

Le constat réalisé sur l'échantillon de cerf issu de chasse, pose la question de la « contamination » des denrées prélevées dans le milieu naturel par des méthodes de chasse au tir. Les concentrations en métaux pour les quelques denrées issues du milieu naturel sont indiquées dans le Tableau 47. Il peut également être constaté des concentrations plus importantes en Cd, et Pb, dans les échantillons de roussettes (muscles et foies) et de muscles de cochon sauvages (2 échantillons / 2) ; denrées issues là encore de tirs de chasse.

Enfin, pour la chair d'escargots, des concentrations parmi les plus élevées ont été mesurées pour l'ensemble des éléments ; mais une grande hétérogénéité existe concernant les deux lots analysés.

Tableau 47- Concentrations élémentaires mesurées dans les échantillons d'escargot, de roussette et de cochon sauvage qui ont pu être récoltés dans le cadre de METALICA-Aliment. Ces échantillons proviennent tous du milieu naturel.

Denrée Organe	Escargot A	Escargot B	Roussette		Cochon sauvage		
	Chair	Chair	Foie	Muscle	Foie	Muscle	Muscle
As	20	0,065	< LOQ	< LOQ	0,1	< LOQ	0,44
Cd	0,94	0,29	5,7	0,19	0,55	< LOQ	< LOQ
Cr	13	0,42	0,13	0,24	0,16	0,2	0,38
Cu	49	25	22	11	19	3,9	5,5
Fe	1700	120	350	170	870	94	300
Mn	99	29	4,4	1,2	15	0,3	2,5
Ni	5,8	0,96	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Pb	0,71	< LOQ	0,37	180	0,72	2,9	940
Zn	100	72	99	49	130	150	140

4.2.2.2. Comparaison des concentrations en éléments aux seuils- résultats en matière fraîche

Les concentrations en matière fraîche, tenant compte de la teneur en matière sèche de chaque type de denrées, sont présentées dans le tableau 48.

Tableau 48- Concentrations (en matière fraîche, MF) pour les différents éléments, denrées et organes étudiés. Dans ce tableau, les concentrations inférieures à la LOQ (en matière sèche) ont été remplacées par la valeur LOQ/2 puis converties en matière fraîche en tenant compte de la teneur en matière sèche de chaque catégorie de denrée. Les concentrations en police rouge dépassent la valeur de la CMT (concentration maximale tolérée) de la denrée concernée. Pour les roussettes, les CMT prises en compte sont celles des volailles, pour les cochons sauvages, celles des porcs ; pour les escargots, celles des mollusques bivalves, et pour les cerfs, celles des bovins. Les CMT prises en compte sont issues du journal officiel de l'UE pour Cd et Pb ; sauf pour les œufs pour lesquels les valeurs sont issues du NHPFC. Enfin les CMT pour As et Cr, sont issues du NHPFC.

Denrée	Organe	As	Cd	Cr	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
		mg kg ⁻¹ MF									
Bœuf	Foie	0,008	0,016	0,072	0,096	32,869	97,193	2,990	0,040	0,010	34,181
	Muscle	0,006	0,006	0,074	0,004	0,627	24,285	0,105	0,030	0,006	56,079
Cerf	Foie	0,007	0,016	0,052	0,124	278,196	184,785	2,529	0,036	0,021	27,616
	Muscle	0,016	0,006	0,035	0,002	1,109	21,920	0,106	0,030	21,605	38,133
Porc	Foie	0,007	0,017	0,055	0,020	28,869	264,944	2,417	0,037	0,013	43,637
	Muscle	0,007	0,007	0,061	0,002	0,692	11,152	0,079	0,042	0,008	27,336
Poulet	Foie	0,147	0,063	0,045	0,049	2,499	294,800	1,990	0,045	0,012	23,383
	Muscle	0,016	0,007	0,045	0,014	0,332	4,116	0,088	0,037	0,010	5,586
Œuf	Blanc	0,004	0,003	0,011	0,001	0,168	0,131	0,003	0,017	0,003	0,133
	Jaune	0,016	0,012	0,123	0,018	1,245	59,842	0,837	0,060	0,014	30,745
Escargot	Chair	2,057	0,126	1,376	0,112	7,585	186,550	13,120	0,693	0,075	17,630
Cochon sauvage	Foie	0,028	0,154	0,045	0,036	5,320	243,600	4,200	0,035	0,202	36,400
	Muscle	0,053	0,006	0,066	0,004	1,067	44,719	0,318	0,028	107,019	32,915
Roussette	Foie	0,007	1,528	0,035	0,046	5,896	93,800	1,179	0,034	0,099	26,532
	Muscle	0,009	0,065	0,082	0,006	3,762	58,140	0,410	0,043	61,560	16,758

La réglementation ne définit de CMT que pour certains éléments, notamment As(total), Cd, Cr, et Pb (Tableau 49), mais des doses journalières tolérables (DJT) et des doses de référence (Rfd) sont mentionnées dans diverses réglementations, et serviront de base pour les calculs de quotient de danger (THQ, pour Target Hazard Quotient).

Concernant les valeurs de CMT disponibles, et dans cette étude, leur dépassement est particulièrement rare pour l'ensemble des données acquises (Tableau 47, Tableau 48). Ces dépassements n'ont été mis en évidence que dans des denrées issues du milieu naturel, à savoir pour la chair d'escargot dépassements en As, Cr et Ni ; pour le muscle et le foie de roussette, dépassements en Cd et Pb ; et dépassements en Pb pour le muscle de cerf et de cochon sauvage. Ces dépassements ont certainement des origines variées, à savoir en lien avec le mode de vie et la qualité du milieu naturel pour les escargots ; et en lien avec le mode de chasse pour la roussette, le cochon sauvage et le cerf. En effet la nature des munitions de chasse tend à contaminer la viande, notamment en raison d'une large dispersion des fragments dans le gibier, qui peuvent être difficiles à détecter et éliminer par le consommateur (Green et al., 2022). Il est ainsi fréquent que le gibier, tué avec des munitions contenant

du Pb, contiennent des concentrations importantes en cet élément, mais également en Cd, Hg, et As (Ciobanu et al., 2020 ; Nkosi et al., 2021, 2022).

Dans la viande d'élevage et les œufs, aucun dépassement ni moyen, ni individuel n'a été montré, que les animaux soient issus d'élevage hors sol (porc, poulet) ou plein air (bœuf, cerf, poulet). Cependant, il peut être noté les concentrations particulièrement élevées en cuivre, fer, et zinc, notamment dans les foies, pouvant questionner sur les risques quant aux quantités ingérées par le consommateur. Ainsi, la consommation de viande et de foie de bœuf a déjà été démontrée comme étant une source significative de Cu, Fe et Zn (Rodriguez-Marin et al., 2019).

Tableau 49- Concentrations maximales tolérées (CMT) en mg.kg⁻¹ MF (matière fraîche) décrites dans le journal officiel de l'Union Européenne (règlement (UE) 2023/915 de la commission du 25 avril 2023) ou dans le NHFPC. Seules les CMT d'intérêt pour l'étude METALICA-Aliment ont été relevées dans ces tableaux.

As (mg.kg ⁻¹ MF)	
Viandes et sous-produits	0,5**
Cd (mg.kg ⁻¹ MF)	
Viande de bovin, de mouton, de porc et de volaille (à l'exception des abats)	0,05*
Viande de cheval, à l'exclusion des abats	0,20*
Foies de bovin, de mouton, de porc, de volaille et de cheval	0,5*
Rognons de bovin, de mouton, de porc, de volaille et de cheval	1,0*
Mollusques bivalves	1,0*
Œufs et sous produits	0,05**
Cr (mg.kg ⁻¹ MF)	
Viandes et sous-produits	1,0**
Pb (mg.kg ⁻¹ MF)	
Viande de bovin, de mouton, de porc et de volaille (à l'exclusion des abats) (6)	0,10*
Abats de bovins et d'ovins	0,2*
Abats de porcins	0,15*
Abats de volailles	0,1*
Mollusques bivalves	1,5*
Œufs et sous produits	0,2**

* Journal de l'Union Européenne,
** NHFPC, National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China

En comparant les données acquises dans ce projet, aux concentrations issues de la littérature (Tableau 50), il apparaît que les viandes de porc, bœuf et poulet se situent dans la fourchette basse des valeurs pour As, Cr, Ni et Pb ; et dans des gammes similaires pour Cd, et Cu. Au regard de la nature pédogéologique du territoire, l'effet « nickel » et « chrome » n'apparaît ainsi pas particulièrement marqué sur les concentrations élémentaires des viandes, et notamment pour les animaux de plein-air (bœuf, cerf).

Tableau 50- Concentrations en As, Cr, Cd, Cu, Ni et Pb, dans la chair (muscle, et foie) de différentes catégories d'animaux d'élevage et issues de différentes études recouvrant une gamme de pays, de typologie d'élevage et de contextes de contamination (bilan non exhaustif).

	n	As		Cd		Cr		Co		Cu		Fe		Mn		Ni		Pb		Zn		
		Muscle	Foie	Muscle	Foie	Muscle	Foie	Muscle	Foie	Muscle	Foie	Muscle	Foie	Muscle	Foie	Muscle	Foie	Muscle	Foie	Muscle	Foie	
Porc																						
Italy (sous produits)	100	-	-	0,01-0,03	-	0,15-0,23	-	-	-	-	1,08-1,21	-	-	-	-	-	-	-	0,22-0,38	-	-	Barone et al., 2020
Beijing, Chine	-	0,043	-	0,003	-	0,483	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,029	-	-	Liang et al., 2019
Zhejiang, Chine	511	0,020	-	0,002	-	0,062	-	-	-	0,633	-	-	-	-	-	-	0,058	-	0,058	-	-	Han et al., 2022
Nouvelle-Calédonie	27	0,007	0,007	0,007	0,017	0,061	0,055	0,002	0,020	0,692	28,87	11,15	264,94	0,079	2,42	0,042	0,037	0,008	0,013	27,34	43,64	METALICA-Aliment
Boeuf																						
Beijing, Chine	-	0,077	-	0,015	-	0,504	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,201	-	-	Liang et al., 2019
France	-	-	-	0,0004-0,005	-	-	-	-	-	0,48	-	-	-	-	-	-	-	-	0,002	-	48,2-53,0	Dervilly-Pinel & al., 2017
Iran	72	-	-	0,028	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Hashemi, 2018
Canary Islands, Spain	180	-	-	0,002-0,01	0,03-0,11	-	-	-	-	0,68-1,15	26-186	16,8-21,6	37,5-131	0,09-0,11	1,84-7,99	-	-	0,01	0,05-0,23	28,9-47,9	29,3-136	Rodriguez-Marin & al., 2019
Zhejiang, Chine	184	0,018	-	0,002	-	0,062	-	-	-	0,673	-	-	-	-	-	0,061	-	0,061	-	-	-	Han et al., 2022
Nouvelle-Calédonie	26	0,006	0,008	0,006	0,016	0,074	0,072	0,004	0,096	0,627	32,87	24,29	97,19	0,105	2,99	0,030	0,040	0,006	0,010	56,08	34,18	METALICA-Aliment
Poulet																						
Beijing, Chine	-	0,045	-	0,031	-	0,650	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,291	-	-	Liang et al., 2019
Egypte	360	-	-	0,014-0,088	0,027-0,104	0,170-2,215	0,16-1,42	0,014-0,083	0,028-0,053	0,67-1,42	3,07-4,11	4,58-31,60	24,15-48,41	-	-	0,14-0,26	0,11-0,22	0,33-3,55	0,15-0,95	7,96-22,79	22,95-31,98	Kamaly et Sharkawy, 2023
Guangzhou, Chine	30	0,029	-	0,002	-	0,110	-	-	-	0,757	-	-	-	-	-	0,069	-	0,073	-	-	-	Hu et al., 2018
Pakistan	60	-	-	0,017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,390	-	-	-	Abbas et al., 2019
Zhejiang, Chine	250	0,018	-	0,003	-	0,060	-	-	-	0,535	-	-	-	-	-	0,042	-	0,058	-	-	-	Han et al., 2022
Nouvelle-Calédonie	5	0,016	0,147	0,007	0,063	0,045	0,045	0,014	0,049	0,332	2,50	4,12	294,80	0,088	1,99	0,037	0,045	0,010	0,012	5,59	23,38	METALICA-Aliment

4.2.2.3. Impact géographique sur la qualité des viandes

4.2.2.3.1. Concentrations par denrées, organes et communes de prélèvements

Il n'est pas possible d'étudier les variations géographiques des concentrations en métaux dans les viandes à l'échelle des 3 micro-régions cibles dans cette étude. D'une part, le faible taux de quantification de certains éléments rend complexe une analyse comparative (As, Cd, Pb, Ni) ; et d'autre

part, la majorité de la viande et des œufs consommés (hors chasse) est issue de quelques exploitations qui ont toutes été échantillonnées, mais qui ne sont pas nécessairement localisées dans les micro-régions cibles. Enfin, le nombre de répétitions par localité demeure faible, ne permettant pas de réaliser des tests statistiques puissants afin de mettre en évidence des différences avec confiance.

Dans la figure 33 sont présentées les moyennes des éléments quantifiés dans plus de 50% des échantillons pour les différentes denrées et par communes de prélèvement. Le détail par organe et denrées est représenté dans la figure 34 (bœuf), figure 35 (cerf), figure 36 (porc), et figure 37 (œuf) (les données pour les poulets ne sont pas représentées en détails en raison du trop petit nombre d'échantillons au total, n =4 / organe).

Pour le chrome, les concentrations intra- et inter-catégorie étaient homogènes, et ne variaient pas avec la région géographique. 1 seul échantillon de muscle de bœuf sur Thio présentait une concentration de chrome égale à 1,9 mg.kg⁻¹ MS. Cette valeur a été confirmée par reprise analytique, néanmoins, les autres échantillons du même producteur présentaient des valeurs inférieures à 0,17 mg.kg⁻¹ MS.

Pour les autres éléments, et particulièrement le fer, le cuivre et le cobalt, les variations intra-catégorie étaient plus importantes, en lien possiblement avec la région d'élevage, et/ou la complémentation alimentaire, notamment en matière d'apports de micro-nutriments.

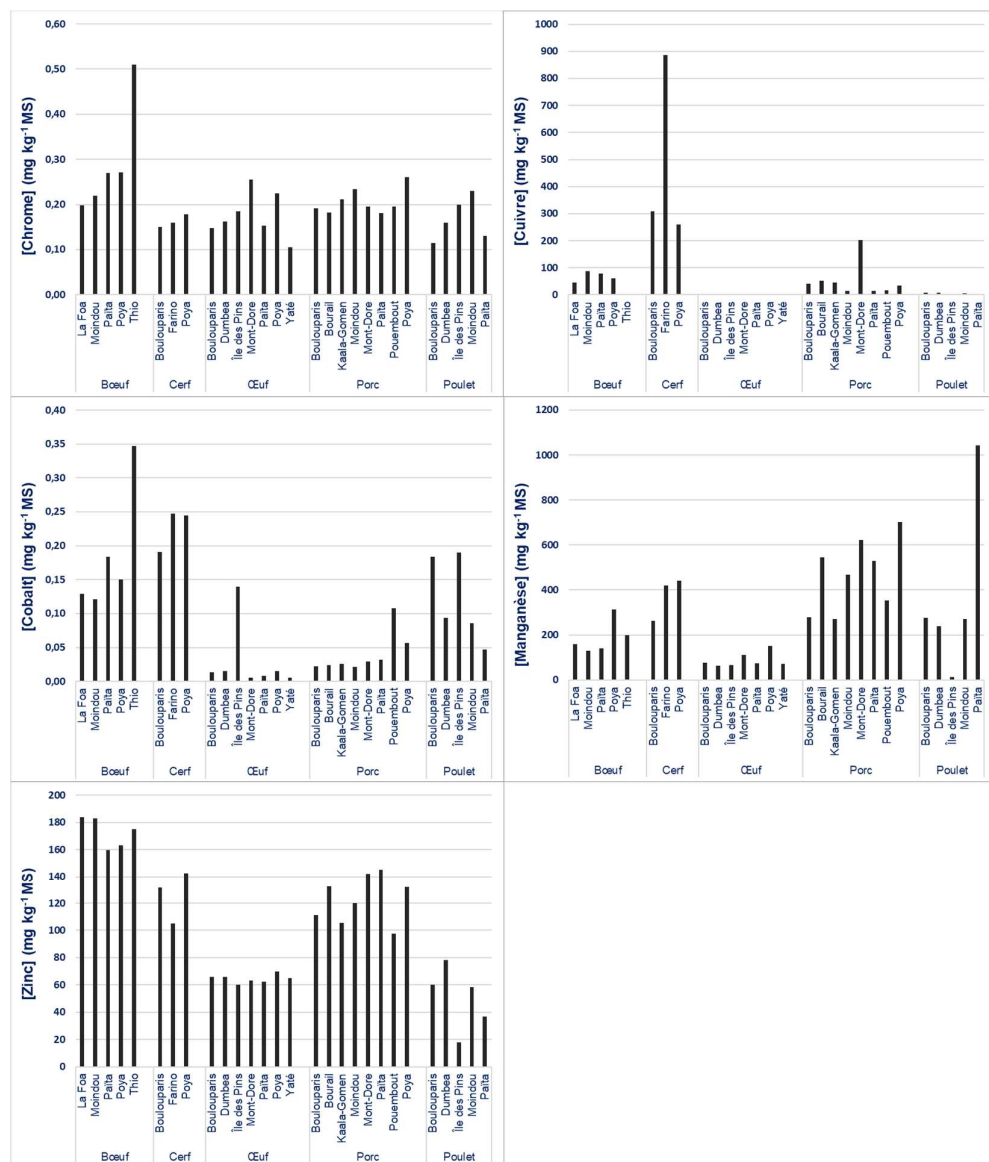


Figure 33- Moyennes par catégories de denrées et communes de prélèvements, tout organe confondu.

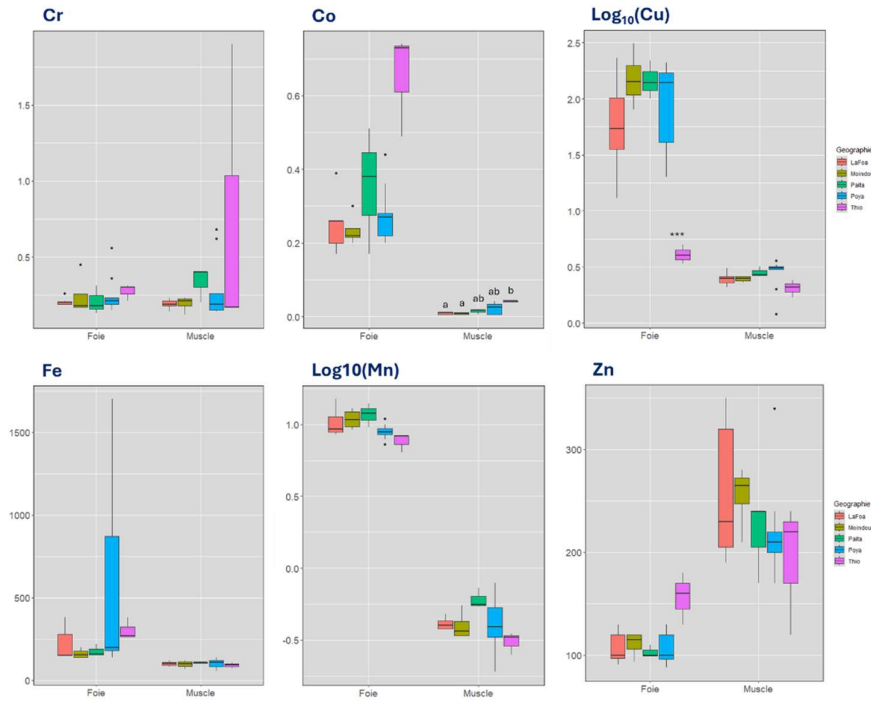


Figure 34- Diagrammes en boîte des concentrations en Cr, Co, Cu, Fe et Mn (mg kg⁻¹ MS), mesurées dans les foies et les muscles de bœufs issus de différentes communes (n = 26 par type d'organe).

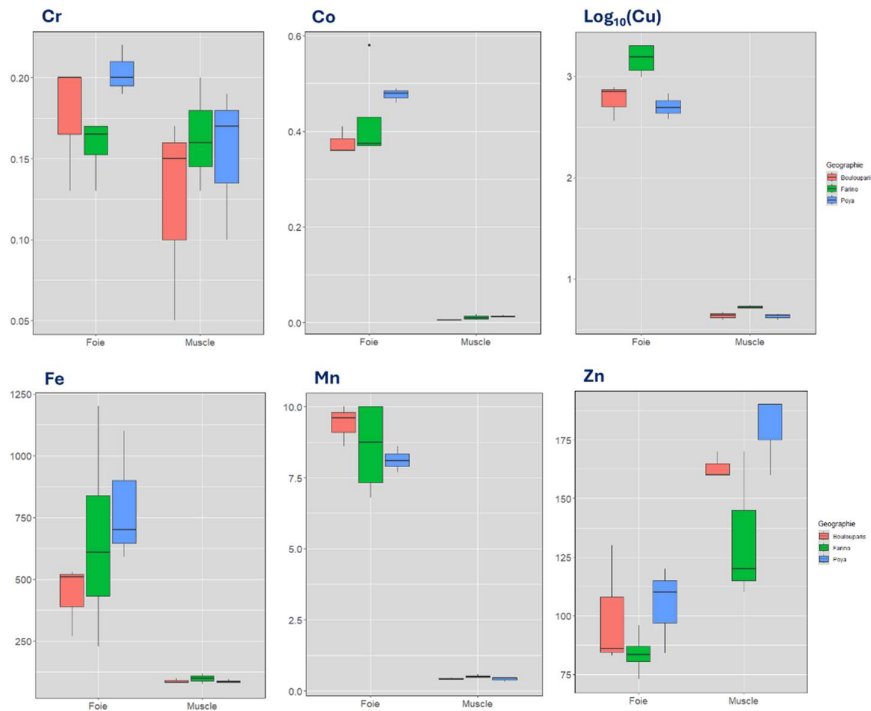


Figure 35- Diagrammes en boîte des concentrations en Cr, Co, Cu, Fe et Mn (mg kg⁻¹ MS), mesurées dans les foies et les muscles de cerfs issus de différentes communes (n = 10 par type d'organe).

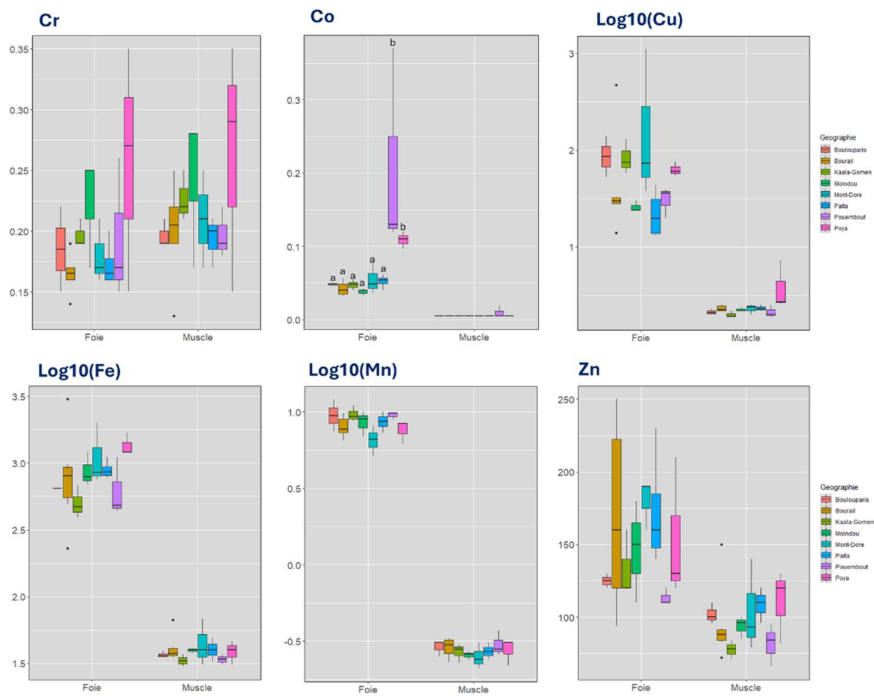


Figure 36- Diagrammes en boîte des concentrations en Cr, Co, Cu, Fe et Mn (mg kg^{-1} MS), mesurées dans les foies et muscles de porcs issus de différentes communes ($n = 27$ par type d'organe).

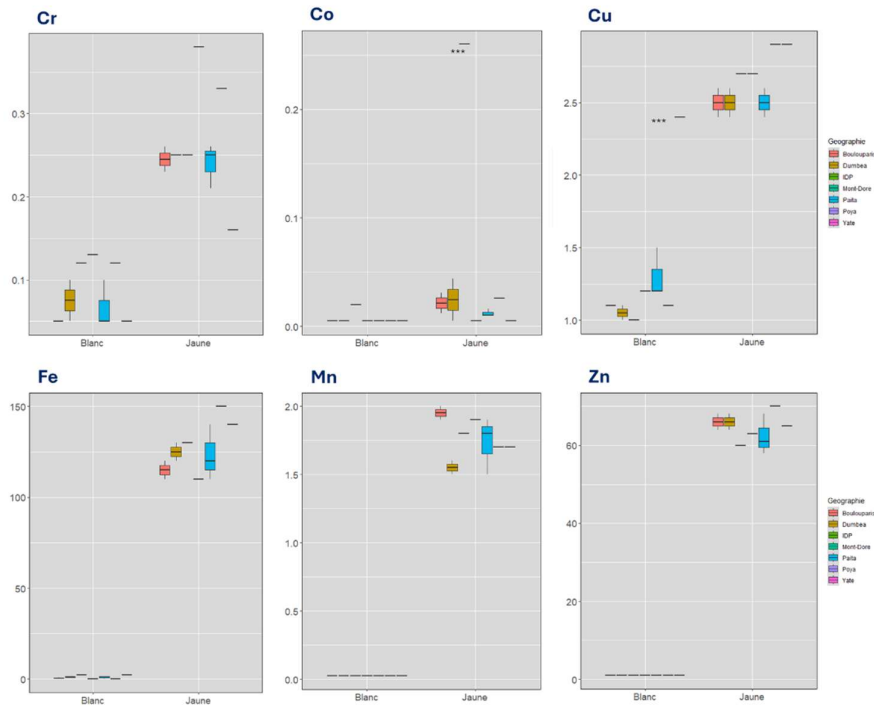


Figure 37- Diagrammes en boîte des concentrations en Cr, Co, Cu, Fe et Mn (mg kg^{-1} MS), mesurées dans les blancs et les jaunes d'œufs issus de différentes communes ($n = 11$ par type d'organe).

4.2.2.3.2. Relations avec les ressources associées

○ Qualité des sols et concentrations en métaux dans la viande de bœuf

Les relations entre la qualité des sols et celle des viandes n'ont pu être étudiées que pour la viande de bœuf, seule typologie d'élevage propice à une telle comparaison. Aussi, lorsque les pourcentages de quantification dans la viande le permettaient (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, et Zn), les relations ont été étudiées entre les concentrations d'un même élément dans la viande (foie, muscle) de bœuf, et dans les sols (extraction à l'EDTA 0,05 M, 1h). Seules deux relations sont apparues significatives :

- Une relation positive faiblement significative entre les concentrations en cobalt dans le foie, et celles dans les sols $[Co]_{\text{foie}} = 0,2329 + 0,0023 [CoE_1]_{\text{sol}}$, $R^2a = 0,2773$; $P < 0,05$.
- Une relation négative faiblement significative entre les concentrations en cuivre dans le foie, et celle dans les sols $[Cu]_{\text{foie}} = 191,5 - 8,56 [CuE_1]_{\text{sol}}$, $R^2a=0,2743$; $P < 0,05$. Le métabolisme du cuivre chez les ruminants, notamment les bovins est particulièrement complexe, d'une part en raison d'une part d'adaptation spécifiques aux sols de pâturages pauvres en cuivre ; et d'autre part en raison d'antagonisme potentiel dans le rumen entre Cu, S et des éléments courants trouvés dans les sols comme Mn, Fe, et Mo rendant propice des carences en cuivre chez les bovins (Lopez-Alonso et Miranda, 2020). À titre d'exemple, même de faibles concentrations dans l'alimentation en cuivre des bovins est susceptible de conduire à des cas d'intoxication au cuivre ; car à la différence des non-ruminants (porcs, poulets), l'excrétion biliaire du cuivre demeure très limitée ; il aura donc tendance rapidement à s'accumuler. D'autre part, chez les bovins, le statut en cuivre est également affecté par l'âge, le sexe, la gestation et la maternité (Spears et al., 2022). Dans notre étude, la gamme de variation des concentrations hépatiques bovines en cuivre était particulièrement importante, soit de 3,4 à 310 mg.kg⁻¹ MS, mais ne connaissant pas l'âge des bovins, ni leur complémentation alimentaire, il demeure plus que risqué de discuter de la significativité de la relation négative trouvée entre les concentrations hépatiques bovines, et les concentrations en cuivre disponibles dans les sols, au regard de la multitude de processus biogéochimiques, et physiologiques en jeu.

○ Qualité de l'alimentation et concentrations en métaux dans la viande de porc

Les concentrations en éléments d'intérêt utilisés en élevage hors sol porcin, sont mentionnées dans le tableau 51. Globalement, la qualité des aliments porcins, en termes de concentrations en Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn, demeure relativement homogène entre les différents élevages, et ce considérant des communes de prélèvement différentes, et des sources d'aliments différentes. Ainsi, aucune relation statistique significative n'a pu être mise en évidence entre les concentrations en ces éléments dans la viande (muscle, ou foie) et celles mesurées dans les aliments. Les différences observées dans les concentrations en EM de la viande de porc pourraient ainsi être imputables aux complémentations minérales données par les éleveurs, aux eaux d'abreuvement, ou aux animaux eux-mêmes (âge, physiologie, ...).

Tableau 51- Concentrations en Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn (mg kg⁻¹ MS) mesurées dans les aliments destinés à l'élevage porcin. Les identifications producteurs, mentionnées, sont anonymisées de façon aléatoire ; elles ne renseignent ni sur une identification officielle, ni sur aucune autre source potentielle d'identification.

	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
	mg kg ⁻¹ MS						
P25	0,24	2,37	23,98	0,03	118,33	0,90	125,43
P63	0,30	1,90	22,15	0,02	134,00	1,60	126,10
P64	0,15	1,97	21,61	0,03	118,67	1,43	120,40
P65	0,40	2,80	25,46	0,05	94,00	1,30	97,20
P66	0,54	2,80	27,54	0,07	120,00	1,70	127,50
P70	0,34	2,60	19,74	0,05	109,00	0,90	114,00
P72	0,56	2,90	22,83	0,07	139,00	1,40	122,10
P76	0,17	2,80	19,19	0,06	131,00	1,30	103,90
Moyenne	0,34	2,52	22,81	0,05	120,50	1,32	117,08
sd	0,15	0,40	2,81	0,02	14,53	0,29	11,18
CV	45,83	15,75	12,31	37,80	12,06	22,15	9,55

Bien que très partielles dans le cadre de cette étude, l'absence de relation entre la qualité des sols, et/ou de l'alimentation et celle des viandes, reflète la complexité des mécanismes en jeu. En effet, et à l'image de l'imprégnation en métaux des êtres humains, les sources potentielles d'exposition pour les animaux d'élevage. D'une part, les sources « naturelles » pour les animaux de plein-air sont nombreuses et diversifiées : inhalation, ingestion de denrées, et ou d'eau « contaminées », ingestion de poussières et particules de sols concentrées en éléments métalliques. D'autre part, la complémentation alimentaire, et la micro-nutrition sont également impliquées dans la qualité finale des produits. Outre ces sources naturelles, ou liées aux conditions d'élevage, la présence de zones industrielles ou métallurgiques peut également impactée le bétail et la qualité de leurs produits (Beyer et al., 2007).

Emami et al., (2023), réalisant une étude au Moyen Orient, ont démontré une contamination aux métaux des produits carnés en lien avec l'élevage en zones polluées (mines, eaux usées, effluents industriels, ou émissions des véhicules), mais également en lien avec la qualité des compléments alimentaires. En Chine, une étude menée sur volailles a montré le rôle des aliments sur volailles dans la qualité métallique de la viande. Ainsi, si le Se, le Co, le Cd, le Mn, le Cr, le Ni et le Pb provenaient principalement des matières premières utilisées dans les aliments, Cu, Zn et As provenaient quant à eux principalement des additifs pour aliments, or, ils étaient largement retrouvés dans les tissus des volailles à destination de la consommation humaine (Hu et al., 2018). L'effet de la complémentation a également été suggérée à l'origine des différences de concentration en Zn et Cd entre des élevages de porc conventionnels ou label Rouge, et des élevages biologiques (Parinet et al., 2018). En effet, le cuivre et le zinc, sont deux éléments indispensables à la bonne croissance des animaux d'élevage, et la complémentation en micro-nutriments est autorisée sous conditions par la législation (EC 1334/2003).

L'âge des animaux au moment de l'abattage apparaît également comme un facteur de contrôle des concentrations métalliques rencontrées, particulièrement dans le foie. Ainsi, Counotte et al., (2019), ont montré que les jeunes bœufs présentaient des concentrations significativement plus élevées de fer et de zinc dans leur foie que les animaux âgés de plus d'un an. Au contraire, les animaux plus âgés présentaient des concentrations significativement plus élevées de cadmium et de molybdène dans leur foie. Les animaux âgés de 1 à 2 ans présentaient les niveaux de cuivre et de sélénium les plus faibles. L'intoxication par le plomb n'a été observée que dans le groupe de bovins le plus jeune, tandis que l'intoxication par le cuivre, définie comme un taux de cuivre hépatique supérieur à 1000 mg.kg⁻¹ MS, était démontrée chez les animaux plus âgés, principalement chez les animaux de 3 à 4 ans.

Enfin, pour l'ensemble des denrées, bien que les contenus en métaux puissent être faibles dans la viande brute, le contenu réel ingéré sera fonction des pratiques de conservation, et des modalités de préparations avant consommation (Emami et al., 2023).

4.2.2.4. Denrées animales terrestres- « Take-Home message »

Sur les **156 échantillons animaux étudiés** (hors roussette, escargot et cochon sauvage), aucun dépassement des **CMT** n'a été observé pour l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr) et le nickel

(Ni). Comparativement à la littérature mondiale, les concentrations en éléments métalliques (EM) dans les viandes calédoniennes (hors gibier et ressources naturelles) se situent plutôt dans les valeurs basses et ne semblent pas présenter de risques particuliers pour le consommateur.

Seul un dépassement notable en **plomb (Pb)** a été observé dans le muscle d'un échantillon de cerf (Tableau 52), contamination très probablement liée au **mode de chasse** plutôt qu'à une contamination environnementale.

Pour l'élevage en **conditions de plein champ**, aucune corrélation n'a été identifiée entre les concentrations de métaux dans la viande et :

- Les métaux disponibles dans les sols ;
- Les métaux présents dans les aliments pour animaux d'élevage.

Aucune tendance géographique nette n'a été relevée.

Tableau 52- Échantillons de viandes et d'ovoproduits analysés et nombre de dépassement des CMT par éléments.

	As	Cd	Cr	Ni	Pb
Viandes et ovoproduits N total			156		
N dépassements	0	0	0	0	1 muscle de cerf

Les contaminations au plomb ont également été observées dans la chair (foie et/ou muscle) de roussettes et de cochons sauvages, également issues de prélèvements cynégétiques (Tableau 53). Pour la roussette, des concentrations en cadmium supérieures aux CMT ont aussi été relevées, probablement en lien avec la qualité des munitions utilisées.

La chair d'escargot présentait des concentrations élevées en As, Cd, Cr et Ni, en lien avec son mode de vie et son habitat. L'impact de la consommation de cette denrée devrait être évalué à l'échelle des tribus ou familles, particulièrement lorsque les escargots proviennent de sols ultrabasiques, comme à l'île des Pins.

Il est important de noter que les mesures sur le gibier terrestre et les escargots restent exploratoires, avec un nombre d'échantillons très limité. Ces résultats doivent être consolidés par des analyses plus étendues sur les denrées animales terrestres chassées ou prélevées, afin d'évaluer de manière fiable les risques pour les consommateurs, surtout en cas de consommation récurrente.

Tableau 53- Échantillons de denrées animales terrestres autres et nombre de dépassement des CMT par éléments.

	As	Cd	Cr	Ni	Pb
Denrées animales terrestres autres N total			7		
N dépassements	1 chair escargot	2 chairs de roussettes (foie et muscle)	1 chair escargot	1 chair escargot	4 (1 muscle roussette, 1 foie et 2 muscles cochon sauvage)

4.2.3. Questionnements autour de l'hétérogénéité des sols

Dans les études environnementales réalisées sur le territoire de la Nouvelle-Calédonie, il est fréquent de considérer deux grands types de substratum : ultrabasique versus volcano-sédimentaire. En cause la nature des roches, et donc l'impact direct de leur altération sur la nature et la qualité des sols s'y développant ou sur la qualité des eaux superficielles ou souterraines y circulant. Ainsi, les substrats ultrabasiques, péridotites notamment, sont liées à des milieux généralement riches en métaux de transition : Ni, Cr, Mn, Co, en comparaison aux substrats dits volcano-sédimentaires.

De façon intuitive, des sols développés sur substrat ultrabasique présentent des concentrations généralement supérieures en Ni et Cr que des sols développés sur substrat volcano-sédimentaire. Dans cette étude, et notamment par la diversité pédologique échantillonnée, et l'hétérogénéité des concentrations en métaux dans les denrées végétales pour un même type de substrat géologique, se pose la question de l'hétérogénéité de la qualité chimique de sols, sous contrainte de facteurs naturels (topographie, diversité végétale), ou anthropiques (mines, agricultures). Ainsi, dans le tableau 54, il peut être constaté des écarts à ces tendances générales. Par exemple, les concentrations en Ni-EDTA dans les sols de la Ouenghi (alluvions récentes), sont du même ordre de grandeur que celles des sols de (Thio) (alluvions récentes ferrallitiques). Les concentrations en Ni-EDTA mesurées au Mont Dore (sol ferrallitique de piémont) plus faibles que les concentrations mesurées dans les sols de Moindou (sol brun et sol à argiles gonflantes, sur substrat volcano-sédimentaire).

La majeure partie des sols échantillonnés dans le présent travail, concerne des sols classés comme sols alluvionnaires. Ainsi, et bien que classé dans une unité pédologique commune, nos résultats indiquent une très grande hétérogénéité de caractéristiques chimiques (Tableau 54). Une telle variabilité est également suggérée par les résultats en cours d'acquisition dans le projet ValoPRO-NC (Tableau 55). **L'ensemble de ces résultats indiquent la nécessité de comprendre les déterminants de la disponibilité environnementale des éléments métalliques en tenant compte de la diversité pédologique, et des forçages naturels ou anthropiques impliqués, puisqu'il semblerait qu'elle ne soit pas liée simplement à leurs concentrations totales.**

Tableau 54- Concentrations moyennes en Co, Cr, Mn et Ni (mg.kg^{-1}) mesurées dans les extractions de sol (METALICA-Aliment) avec de l'EDTA 0,05M durant 1h. Les moyennes présentées par communes sont réalisées sur l'horizon 00-20 cm.

	Co-EDTA 1h	Cr-EDTA 1h	Mn-EDTA 1h	Ni-EDTA 1h
	mg.kg^{-1}			
Dumbea	24,92	0,64	306,71	139,05
Thio	11,63	0,45	220,62	86,49
Boulouparis (Ouenghi)	6,34	0,48	96,87	80,69
Poya	22,68	0,28	593,98	66,29
Ile des Pins	65,18	1,98	1215,59	58,54
Kone	21,50	0,97	317,10	53,70
Païta	15,67	0,29	261,21	37,01
La Foa	5,19	0,15	240,66	31,74
Pouembout	1,72	0,12	58,48	12,22
Moindou	1,57	0,66	143,03	9,91
Mont-Dore	13,46	2,55	230,84	5,30
Farino	4,32	0,22	396,07	4,57
Boulouparis	3,95	0,10	379,73	3,93
Pocquereux	2,91	0,12	392,80	0,79

Tableau 55- Concentrations moyennes en Co, Cr, Mn et Ni (mg.kg^{-1}) mesurées dans les extractions de sol (ValoPRO-NC) avec de l'EDTA 0,05M durant 24h. Les moyennes présentées par communes sont réalisées sur l'horizon 00-30 cm ©F. Juillot / ValoPRO-NC.

Commune	Co-EDTA 24h	Cr-EDTA 24h	Mn-EDTA 24h	Ni-EDTA 24h
mg kg^{-1}				
Dumbea	167,50	3,60	1355,70	492,00
Kone	265,49	2,40	2389,61	213,74
Thio	100,87	2,60	1137,98	182,63
Mont_Dore	246,28	9,57	1567,74	175,68
Koumac	71,66	0,73	1047,40	170,88
Voh	38,23	1,95	596,70	152,63
Pouembout	43,39	1,62	585,04	140,58
Canala	46,07	1,85	774,59	128,79
Paita	37,98	1,37	586,67	109,32
Poya	68,95	0,88	1285,29	96,73
Bourail	67,50	3,16	896,88	93,10
Kaala_Gomen	41,94	0,56	1807,79	84,88
Yate	87,48	14,50	938,80	71,66
Boulouparis	116,33	5,99	1238,39	63,86
Poum	72,72	0,72	1898,97	53,16
Moindou	7,65	1,50	368,00	18,60
Noumea	2,40	0,10	167,20	12,80
La_Foa	8,95	0,52	464,68	9,06
Farino	16,10	0,80	449,00	3,90
Touho	0,90	0,20	29,40	3,40
Sarramea	6,22	0,47	492,34	2,47
Ponerihouen	6,57	0,16	204,96	0,61
Hienghene	0,10	0,10	5,60	0,20

4.2.4. EAUX ENVIRONNANTES

4.2.4.1. Bilan des échantillonnages réalisés

31 échantillons d'eau ont été prélevés (Tableau 56), donnant lieu à des mesures *in situ* : pH (précision $\pm 0,002$), température et conductivité (précision $\pm 0,5\%$). Afin de replacer dans leurs contextes météorologiques les prélèvements et ainsi d'intégrer ce paramètre dans l'analyse des résultats, les chroniques journalières des stations Météo France situées dans un rayon de moins de 10 km autour des points prélevés ont été récupérées (*via* le site internet : <https://meteo.data.gouv.fr/datasets>). Les données disponibles sont présentées dans le tableau 56 ci-après.

Ces données mettent également les tendances suivantes :

- L'échantillon EAU-023-P78 (Dumbéa) est réalisé dans un contexte pluvieux journalier notable (cumul > 20 mm). Toutefois n'ayant pas accès aux chroniques horaires il n'est pas possible pas de situer temporellement le prélèvement vis-à-vis des pluies enregistrées.
- Le cumul des 5 jours précédents le prélèvement est supérieur à 50 mm pour les échantillons EAU-003-P02 (eau superficielle) et EAU-019-P70 (origine inconnue). Il est supérieur à 30 mm pour les échantillons EAU-021-P69 (abreuvoir alimenté par un creek) et EAU-031-P83 (abreuvoir alimenté par un lac). Ces prélèvements font donc probablement suite à des crues dans les cours d'eau, ce qui était encore le cas pour l'échantillon EAU-003-P02.
- Un contexte météorologique global humide avec des cumuls trimestriels supérieurs à 300 mm pour EAU-030-P82 (Dumbéa) et EAU-031-P83 (Païta). Contexte très humide avec plus de 500 mm cumulés pour EAU-018-P68 (La Foa) et EAU-019-P70 (Kaala-Gomen) et plus de 600 mm pour EAU-021-P69 (Païta).

Il s'agit bien là de tendances car les pluviomètres utilisés sont éloignés du site de prélèvement ou parfois situé en aval ou sur un autre bassin versant, sauf pour les prélèvements EAU-005-P11 et EAU-015-P67 pour lesquels les appareils sont situés à proximité (respectivement 630 m et 1 300 m).

Tableau 56 - Contexte météorologique des prélèvements d'eau.

Référence échantillon	Date prélèvement	Pluviomètre Météo France NC le plus proche (< 10 km)	Distance pluviomètre / échantillon (km)	Cumul journalier (mm)	Cumul 5 jours avant le prélèvement (mm)	Cumul des 3 mois avant le prélèvement (mm)
EAU-001-P01	23/06/22	Rivière blanche	5.0		Pas de données	
EAU-002-P01	23/06/22	Rivière blanche	5.3		Pas de données	
EAU-003-P02	12/07/22	La Foa	7.3	0	54,5	222,3
EAU-004-P08	04/08/22	Thio	8.6		Pas de données	
EAU-005-P11	04/08/22	Thio	0.6		Pas de données	
EAU-006-P60	30/08/22	Poya	7.7	0	0	264,3
EAU-007-	30/08/22	Poya	6.3	0	0	264,3
EAU-008-P61	30/08/22	Poya	7.9	0	0	264,3
EAU-009-P61	30/08/22	Poya	7.3	0	0	264,3
EAU-010-P62	30/08/22	-				
EAU-011-P63	30/08/22	-				
EAU-012-P64	30/08/22	Poya	5.8	0	0	264,3
EAU-013-P72	15/09/22	-				
EAU-014-P76	?	-				
EAU-015-P67	08/09/22	Poya	1.3	0	1,9	266,2
EAU-016-P73	15/09/22	-				
EAU-017-P25	07/11/22	Erreur de coordonnées				
EAU-018-P68	15/09/22	La Foa	6.0	0	16,4	550,3
EAU-019-P70	09/09/22	Gomen	5.6	0	50,6	522,1
EAU-020-P59	03/10/22	-				
EAU-021-P69	03/10/22	Port Laguerre	7.3	2,4	35,8	618,2
EAU-022-P65	02/11/22	La Tontouta	3.2	0	0,3	263
EAU-023-P78	07/11/22	Nakutakoïn	3.1	22,8	21,4	429,4
EAU-024-P77	18/11/22	Boulouparis	5.8		Pas de données	
EAU-025-P66	18/11/22	-				
EAU-026-P79	18/11/22	Boulouparis	7.1		Pas de données	
EAU-027-P57	18/11/22	Boulouparis	3.8		Pas de données	
EAU-028-P75	28/11/22	Nepoui	4.4		Pas de données	
EAU-029-P04	28/11/22	Boulouparis	6.8		Pas de données	
EAU-030-P82	02/12/22	Nakutakoïn	4.8	9,2	27,3	348,6
EAU-031-P83	02/12/22	Port Laguerre	5	2	39,9	327,4

Pour les 4 prélèvements réalisés à la suite de pluies notables (cumul 5 jours précédents >30 mm), EAU-003-P02, EAU-019-P70, EAU-031-P83 et EAU-021-P69, l'interprétation des analyses devra tenir compte de ce contexte (effet de dilution, augmentation des MES et modification de la géochimie du fait du transport solide via le ruissellement et la remise en suspension de particules sédimentées, etc.). Ce sera également le cas pour l'échantillon EAU-023-P78 (pluie le jour de l'échantillonnage).

Les mesures de pH (précision $\pm 0,002$) in-situ (Figure 38) oscillent entre 6,3 et 9,1. 5 prélèvements sont en dehors des références de qualité (6,5 à 9,0). La valeur la plus basique (9,1 pour l'échantillon EAU-018-P68 à La Foa) est mesurée au niveau d'un abreuvoir. Elle pourrait être due à la présence de matière organique en décomposition dans l'abreuvoir et au non-renouvellement régulier de l'eau (eau très trouble).

Les mesures de conductivité (Figure 39) sont très variables puisqu'elles oscillent entre 3 et 1 109 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (précision appareil mesure $\pm 0,5\%$). 9 prélèvements sont en dehors des références de qualité⁴ (180 à 1100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). La valeur la plus faible a été mesurée dans un abreuvoir alimenté par un forage. Après vérification il n'y a pas eu d'erreur de mesure, cette valeur semble représentative d'eau de pluie très faiblement minéralisée néanmoins l'absence de données pluviométriques ne permet pas de valider cette hypothèse.

L'origine des eaux n'est connue que dans 55 % des cas (Tableau 57). Il s'agit essentiellement d'eaux superficielles (42 %) et plus rarement d'eaux souterraines (6,5 %) ou du réseau d'adduction. Dans 45 % des cas l'origine n'a pu être précisée ou s'avère douteuse :

- Un trou d'eau alimenté par une source qui ne coulerait qu'en cas de pluie (EAU-015-P67) ;
- Un forage qui alimente un abreuvoir avec une conductivité quasi-nulle (EAU-024-P77)

Tableau 57- Caractéristiques des 31 échantillons d'eau prélevés et mesures in-situ.

Commune	Référence échantillons	Origine de l'eau	pH	Conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Commentaires	Analyses
Boulouparis	EAU-024-P77	Douteuse	6,6	3	Abreuvoir de parcelle 2. Forage	Non
Dumbéa	EAU-023-P78	Inconnue	6,8	104		Non
Mont Dore	EAU-001-P01	Superficielle	8,5	112	Rivière	Oui
Poya	EAU-015-P67	Douteuse	7,6	133	Trou d'eau alimenté par une source (quand il pleut)	Oui
Poya	EAU-012-P64	Inconnue	7,5	135		Oui
Mont Dore	EAU-002-P01	Superficielle	8,6	144	Rivière	Oui
-	EAU-017-P25	Inconnue	6,6	168	Points non pris en compte car en dehors de la carte	Non
Moindou	EAU-010-P62	Inconnue	7,6	175		Oui
La Foa	EAU-018-P68	Inconnue	9,1	198	Abreuvoir	Oui
Boulouparis	EAU-026-P79	Inconnue	6,7	209		Non
Kaala-Gomen	EAU-019-P70	Inconnue	7,4	210		Oui
Boulouparis	EAU-029-P04	Superficielle	6,3	217	Captage rivière Ouenghi	Non
La Foa	EAU-003-P02	Superficielle	8,6	271	Captage rivière, prélèvement dans tuyau après	Oui
Païta	EAU-021-P69	Superficielle	8,9	297	Abreuvoir captage creek	Non
Poya	EAU-009-P61	Superficielle	8,4	310	Creek Amik vient de la mine. Dernière pluie	Oui
Boulouparis	EAU-027-P57	Adduction	6,9	319	Eau du robinet	Non
Poya	EAU-007	Superficielle	8,4	329	Rivière Moindah	Non
Boulouparis	EAU-025-P66	Superficielle	6,8	396	Captage rivière, prélèvement au tuyau arrosage	Non
Bourail	EAU-013-P72	Adduction	7,6	434	Eau de ville au tuyau (pas tétine)	Oui
Dumbéa	EAU-030-P82	Superficielle	6,4	485	Captage dans la rivière, géré par la DAVAR	Non
Thio	EAU-005-P11	Inconnue	7,6	506	Tuyau arrosage sur robinet	Oui
Poya	EAU-008-P61	Souterraine	7,7	561	Source	Oui
Païta	EAU-031-P83	Superficielle	6,4	582	Captage dans le lac Tamoa	Non
Poya	EAU-006-P60	Superficielle	7,8	634		Oui
Pouembout	EAU-028-P75	Souterraine	7,7	664	Pompage nappe phréatique qui alimente le village	Non
Thio	EAU-004-P08	Inconnue	8	664	Tuyau arrosage sur robinet	Oui
Moindou	EAU-020-P59	Superficielle	6,5	669	retenue collinaire près du stockyard	Non
Moindou	EAU-016-P73	Superficielle	7,3	729	Creek sur pâturage de finition	Oui
Bourail	EAU-011-P63	Inconnue	7,1	841		Oui
Pouembout	EAU-014-P76	Inconnue	6,8	976		Oui
Païta	EAU-022-P65	Inconnue	6,3	1109		Non

⁴ Arrêté du 30 décembre 2022 modifiant l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine.

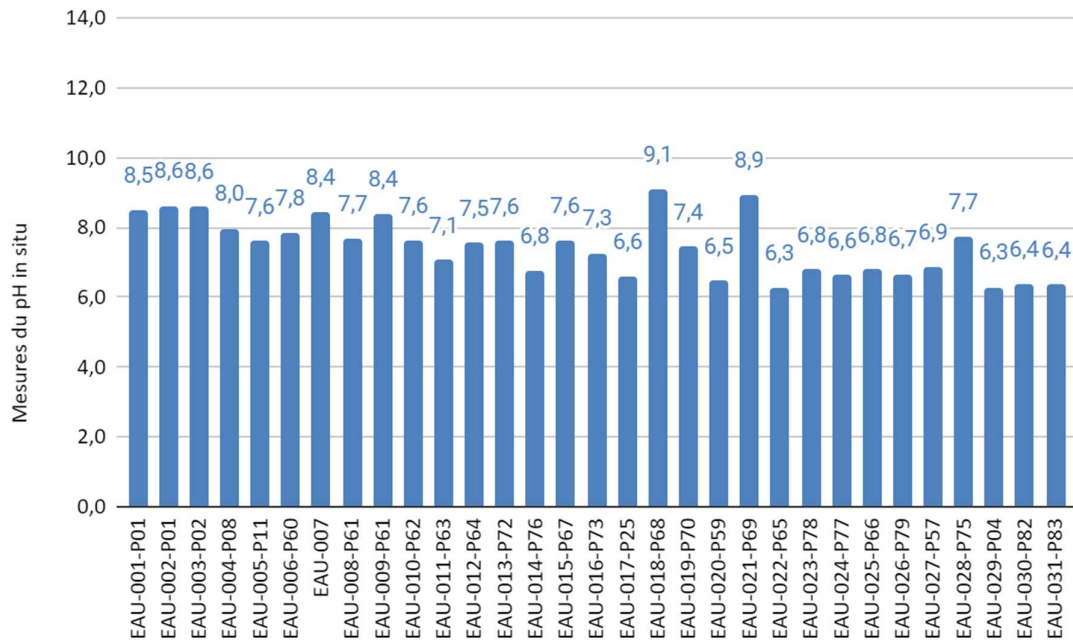


Figure 38- Mesures in situ du pH des échantillons d'eau prélevés.

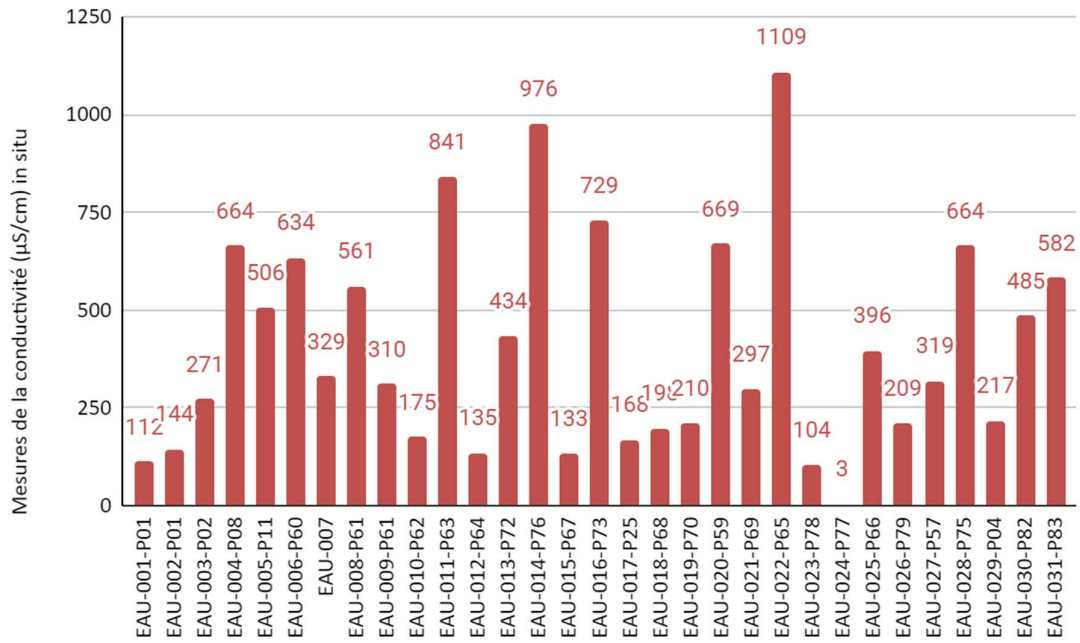


Figure 39- Mesures in situ de la conductivité des échantillons d'eau prélevés.

4.2.4.2. Analyses au laboratoire

Nous remercions l'UAR IMAGO pour ses moyens analytiques et les analyses effectuées. Au moment de la panne de l'appareil ICP du LAMA, seulement 17 échantillons avaient été analysés (55%). L'analyse des 14 échantillons restants a été suspendue compte tenu des priorités budgétaires. Les échantillons ont néanmoins été conservés afin d'être analysés pour leur concentration totale en EM. Les résultats d'analyses sont présentés ci-après (Tableau 58) et selon un diagramme de Piper (Figure 40). Toutefois, en l'absence d'analyses de l'alcalinité, la détermination des anions est incomplète. Sur le diagramme ternaire des cations on note des eaux magnésiennes d'une part et d'autres sans cations dominants.

Tableau 58- Résultats des 17 échantillons d'eau analysés en laboratoire.

Echantillons Références demandeur	Anions					Cations et Métaux																		
	Cl mg/l	SO4 mg/l	NO3 mg/l	Si(OH)4 µmol/l	ICP OES/MS																			
					Ca	Mg	Na	K	P	Si	Fe	Mn	Ni	Al	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Co			
EAU-001-P01	6.79	1.87	0.02	314.99	0.34	13.35	3.87	0.27	0.00	11.02	2.94	0.63	2.31	0.32	10.78	0.31	0.47	0.05	0.01	0.02	0.02			
EAU-002-P01	7.88	1.87	0.12	439.21	0.96	17.61	4.87	0.13	0.00	15.63	9.00	0.56	33.05	8.36	9.06	0.29	0.77	0.06	0.00	0.10	0.05			
EAU-003-P02	7.76	4.70	0.11	281.16	11.29	8.35	9.57	0.78	0.00	8.19	13.93	0.90	1.07	15.38	0.65	1.43	5.11	0.48	0.00	0.07	0.06			
EAU-004-P08	4.76	1.29	0.99	257.04	0.26	13.27	2.70	0.12	0.00	7.71	3.57	0.35	8.49	5.00	6.71	1.09	2.64	0.02	0.00	0.78	0.04			
EAU-008-P11	5.51	1.40	0.30	269.54	0.47	14.36	3.34	0.22	0.01	8.16	9.09	1.42	11.44	7.94	3.23	2.10	15.75	0.02	0.02	0.10	0.10			
EAU-006-P60	31.57	7.89	<ldd	1231.01	43.25	32.06	61.22	0.72	0.04	45.16	11.08	61.53	2.22	11.35	0.31	1.80	2.85	0.49	0.00	0.10	0.40			
EAU-006-P61	11.12	0.25	<ldd	903.71	51.96	45.07	20.61	0.63	0.01	34.12	78.12	312.01	4.56	4.59	0.33	1.01	1.01	0.15	0.00	0.03	1.33			
EAU-009-P61	10.07	2.24	0.33	668.90	5.40	39.47	7.74	0.16	0.01	23.46	12.14	2.68	5.08	6.96	3.43	0.26	0.96	0.08	0.00	0.03	0.04			
EAU-010-P62	13.69	6.12	<ldd	452.49	9.44	10.12	11.65	1.10	0.01	16.13	33.12	0.48	0.51	16.32	0.39	38.54	21.41	0.24	0.00	0.41	0.02			
EAU-011-P63	50.37	14.59	8.87	771.10	59.25	52.66	58.51	0.52	0.01	26.78	2.83	1.17	0.17	11.79	0.12	4.48	15.73	0.66	0.00	0.55	0.02			
EAU-012-P64	4.61	1.49	0.13	350.11	0.26	17.34	2.76	0.09	0.00	12.10	2.10	0.15	10.37	15.43	1.83	0.56	2.04	0.01	0.00	0.07	0.02			
EAU-013-P72	5.83	1.66	0.47	373.57	0.47	19.34	3.11	0.15	0.00	13.03	1.82	0.17	6.35	20.25	6.51	1.35	1.84	0.02	0.00	0.04	0.01			
EAU-014-P76	87.87	23.44	0.11	1113.61	69.92	48.11	77.78	0.24	0.02	38.79	1.94	2602.71	2.81	9.28	0.14	1.47	1.18	0.26	0.03	0.15	1.18			
EAU-015-P67	7.42	1.47	0.07	398.94	11.97	7.87	5.73	1.89	0.01	14.07	110.78	83.99	3.56	67.33	0.66	4.41	39.48	0.04	0.00	0.04	0.42			
EAU-016-P73	148.55	24.84	0.14	333.69	21.98	15.77	101.48	6.22	0.02	11.01	99.15	323.47	1.01	17.84	0.26	0.67	2.44	1.17	0.00	0.15	0.49			
EAU-018-P68	9.51	4.45	0.04	396.88	16.25	13.86	9.20	1.24	0.00	13.90	4.89	2.15	1.08	25.47	0.24	22.04	3.19	0.46	0.01	0.07	0.15			
EAU-019-P70	9.45	6.18	0.51	699.45	0.46	26.42	5.31	0.15	0.00	24.70	50.32	5.54	21.39	16.17	45.88	1.42	3.62	0.02	0.00	0.10	0.22			

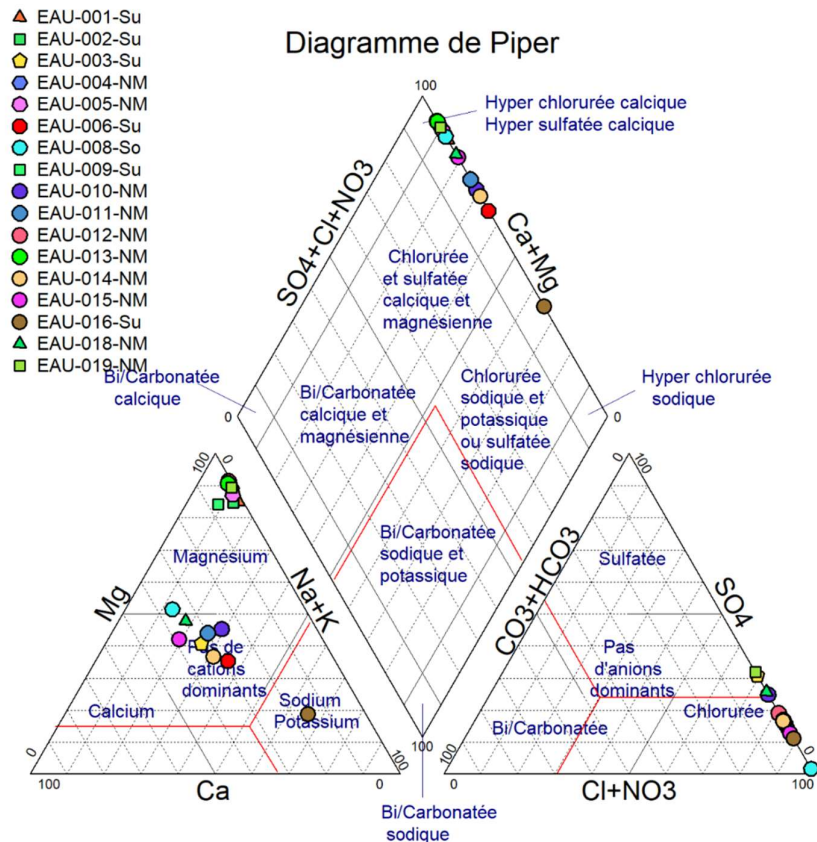


Figure 40- Caractérisation des échantillons d'eau analysés selon un diagramme de Piper (Superficielle Su ; Souterraine So ; Non Mentionné NM).

Sur la carte ci-dessous on remarque que la concentration élevée du magnésium est imputée à la semelle serpentineuse, particulièrement représentée en pied des massifs de péridotites de la côte ouest (Figure 41).

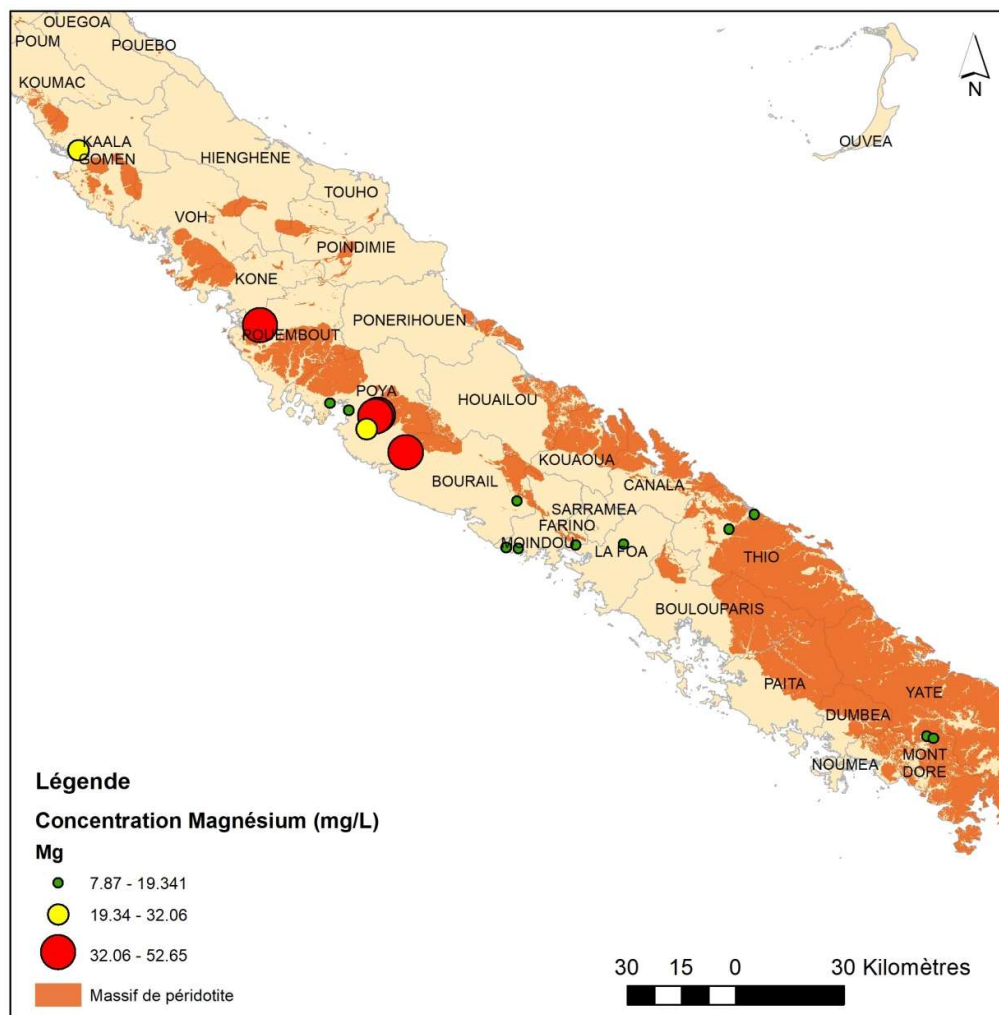


Figure 41- Distribution des concentrations en Magnésium (mg.L^{-1}) dans les eaux prélevées.

Si on compare les concentrations en métaux des eaux prélevées aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, 95% des analyses sont inférieures aux seuils hexagonaux, en attendant une réglementation locale. Les dépassements constatés sont les suivants (Tableau 59) :

- 5 dépassements de la référence qualité pour le **Manganèse** ($50 \mu\text{g.L}^{-1}$) pour les échantillons EAU-006-P60, EAU-008-P61, EAU-014-P76, EAU-015-P67 et EAU-016-P73.
- 2 dépassements de la limite de qualité pour le **Nickel** ($20 \mu\text{g.L}^{-1}$) pour les échantillons EAU-002-P01 et EAU-019-P70.
- 1 dépassement de la limite de qualité pour le **Chrome** ($25 \mu\text{g.L}^{-1}$) pour l'échantillon EAU-019-P70.

À noter qu'il n'y a pas de valeurs de seuil pour le Zinc ni pour le Cobalt.

Tableau 59- Mise en évidence de dépassements de certaines valeurs.

	MS			µg/L								
Echantillons	Fe	Mn	Ni	Al	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Co	
EAU-001-P01	2,94	0,63	2,31	0,32	10,78	0,31	0,47	0,05	0,01	0,02	0,02	
EAU-002-P01	9,00	0,56	33,05	8,36	9,06	0,29	0,77	0,06	0,00	0,10	0,05	
EAU-003-P02	13,93	0,90	1,07	15,38	0,65	1,43	5,11	0,48	0,00	0,07	0,06	
EAU-004-P08	3,57	0,35	8,48	5,00	6,71	1,09	2,64	0,02	0,00	0,78	0,04	
EAU-005-P11	9,09	1,42	11,44	7,94	3,23	2,10	15,75	0,02	0,02	0,10	0,10	
EAU-006-P60	11,08	61,53	2,22	11,35	0,31	1,60	2,85	0,49	0,00	0,10	0,40	
EAU-008-P61	76,12	312,01	4,56	4,59	0,33	1,01	1,01	0,15	0,00	0,03	1,33	
EAU-009-P61	12,14	2,68	5,08	6,66	3,43	0,26	0,96	0,08	0,00	0,03	0,04	
EAU-010-P62	33,12	0,48	0,51	16,32	0,39	38,54	21,41	0,24	0,00	0,41	0,02	
EAU-011-P63	2,83	1,17	0,17	11,79	0,12	4,48	15,73	0,66	0,00	0,55	0,02	
EAU-012-P64	2,10	0,15	10,37	15,43	1,83	0,56	2,04	0,01	0,00	0,07	0,02	
EAU-013-P72	1,82	0,17	6,35	20,25	6,51	1,35	1,84	0,02	0,00	0,04	0,01	
EAU-014-P76	1,94	2602,71	2,81	9,28	0,14	1,47	1,18	0,26	0,03	0,15	1,18	
EAU-015-P67	110,78	63,99	3,56	67,33	0,66	4,41	39,48	0,04	0,00	0,04	0,42	
EAU-016-P73	99,15	323,47	1,01	17,84	0,26	0,67	2,44	1,17	0,00	0,15	0,49	
EAU-018-P68	4,89	2,15	1,08	25,47	0,24	22,04	3,19	0,46	0,01	0,07	0,15	
EAU-019-P70	50,32	5,54	21,39	16,17	45,88	1,42	3,62	0,02	0,00	0,10	0,22	
µg/L	200	50	20	200	25	1000		10	5	5		
Consommation humaine	Référence de qualité	Référence de qualité	Limite de qualité	Référence de qualité	Limite de qualité	Référence de qualité	N/A	Limite de qualité	Limite de qualité	Limite de qualité	N/A	

4.2.4.3. Contextes géologique et hydrogéologique des échantillons d'eau analysés sur les communes cibles

Les échantillons d'eau analysés sont classés selon le contexte géologique du bassin-versant en amont du prélèvement (Figure 42). L'exercice est toutefois limité quand l'origine de l'eau prélevée n'est pas déterminée. Il ressort :

- Sédimentaire et alluvial : La Foa (2), Moindou (2) et un échantillon sur Bourail ;
- Magmatique (basaltes de l'unité de Poya) et alluvial : Kaala-Gomen (1), Pouembout (1), Poya (4) et un échantillon sur Bourail ;
- Essentiellement mantellique (péridotites) : Mont-Dore (2) et un échantillon sur Thio ;
- Mixte mantellique / magmatique et sédimentaire / mantellique : respectivement pour un échantillon de Poya et de Thio.

Les 9 prélèvements effectués sur les communes de La Foa, Thio et Poya sont de plus représentés cartographiquement du point de vue hydrogéologique.

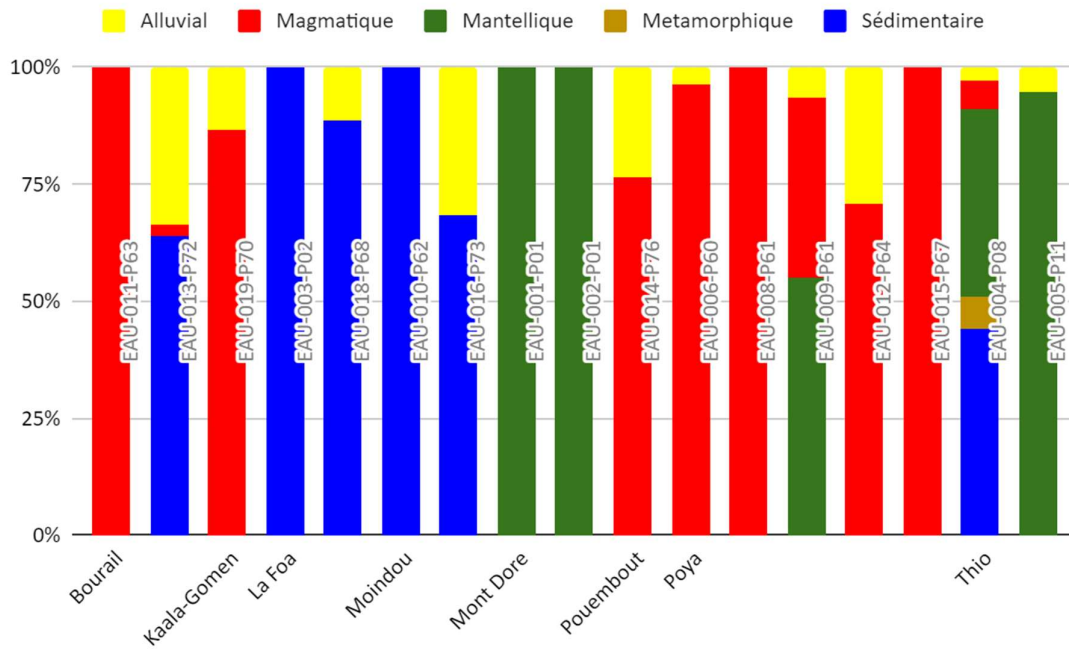


Figure 42- Contexte géologique des bassins versants en amont des échantillons d'eau analysés.

Sur la commune de La Foa (Figure 43) le prélèvement d'eau superficielle EAU-003-P02 est à l'aval d'un domaine exclusivement volcano-sédimentaire. Le second prélèvement, dans un abreuvoir d'origine indéterminée, se situe dans un bassin versant comportant également des alluvions (11%). Aucun de ces prélèvements n'a donné lieu à des dépassements de seuils en métaux.

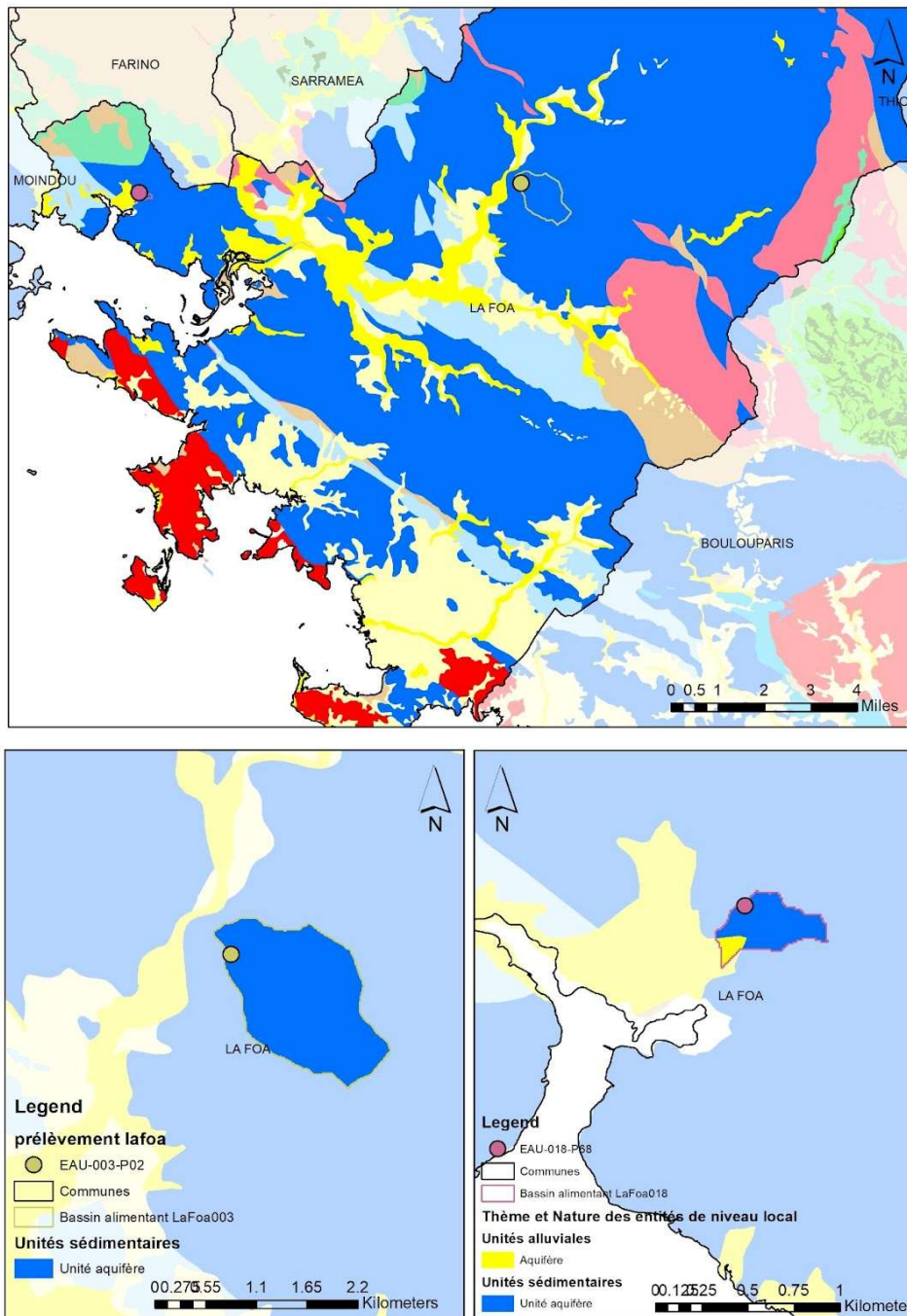
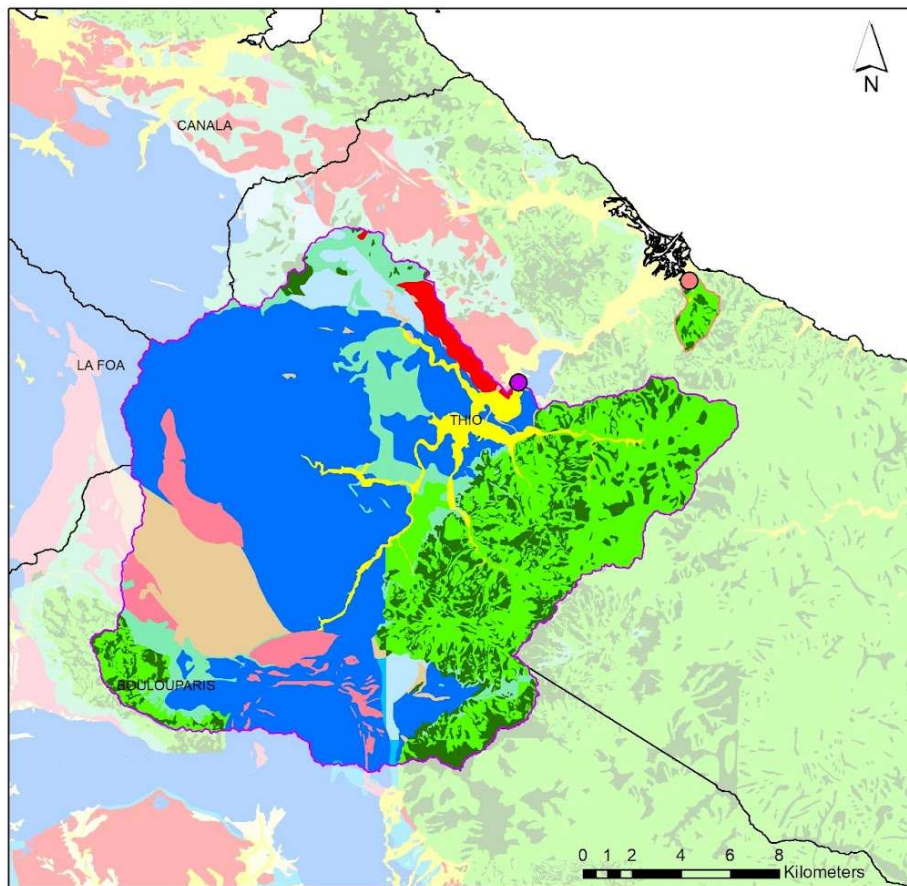


Figure 43- Contexte hydrogéologique des échantillons d'eau analysés sur la commune de La Foa.

Sur la commune de Thio (Figure 44), l'origine des deux prélèvements est indéterminée (robinet et tuyau d'arrosage). Le site d'échantillonnage EAU-004-P08 est situé à l'aval d'un bassin versant très étendu (345 km²) et très varié du point de vue géologique. À l'inverse, le second site d'échantillonnage (EAU-005-P11) est situé à l'aval d'un bassin versant réduit (3,4 km²) quasi exclusivement constitué de péridotites. Aucun de ces prélèvements n'a donné lieu à des dépassements de seuils en métaux.



Legend

<p>prélèvement thio</p> <ul style="list-style-type: none"> ● EAU-004-P08 ● EAU-005-P11 □ Communes 	<p>□ Bassin alimentant Thio_EAU-004</p> <p>Thème et Nature des entités de niveau local</p> <p>Unités alluviales</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Aquifère <p>Unités magmatiques</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Aquifère ■ Semi-perméable <p>Unités mantelliques</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Aquifère ■ Semi-perméable ■ Imperméable <p>Unités métamorphiques</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Unité semi-perméable <p>Unités sédimentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Unité aquifère ■ Unité semi-perméable ■ Unité imperméable 	<p>□ Bassin alimentant Thio_EAU-005</p> <p>Thème et Nature des entités de niveau local</p> <p>Unités alluviales</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Aquifère <p>Unités mantelliques</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Aquifère ■ Semi-perméable <p>Unités sédimentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Unité semi-perméable
--	--	---

Figure 44- Contexte hydrogéologique des échantillons d'eau analysés sur la commune de Thio.

Cinq prélèvements d'eau ont été analysés sur la commune de Poya (Figure 45). Quatre prélèvements se situent uniquement ou majoritairement dans le domaine des basaltes, éventuellement avec des colluvions ou alluvions. Le cinquième prélèvement (EAU-009-P61) est superficiel et draine un bassin versant (5,8 km²) où se trouvent des péridotites et des basaltes de l'Unité de Poya.

Les analyses de trois des cinq prélèvements (EAU-006-P60, EAU-008-P61, EAU-015-P67) montrent des dépassements parfois importants (jusqu'à 312 µg L⁻¹) de la valeur de référence qualité en Manganèse fixée à 50 µg L⁻¹ par l'arrêté hexagonal. Il s'agit de prélèvements effectués en domaine magmatique. Cette concentration élevée en manganèse dans les basaltes est effectivement connue et se retrouve aussi pour la valeur maximale, mesurée sur un échantillon prélevé à Pouembout (2,6 mg L⁻¹, EAU-014-P76).

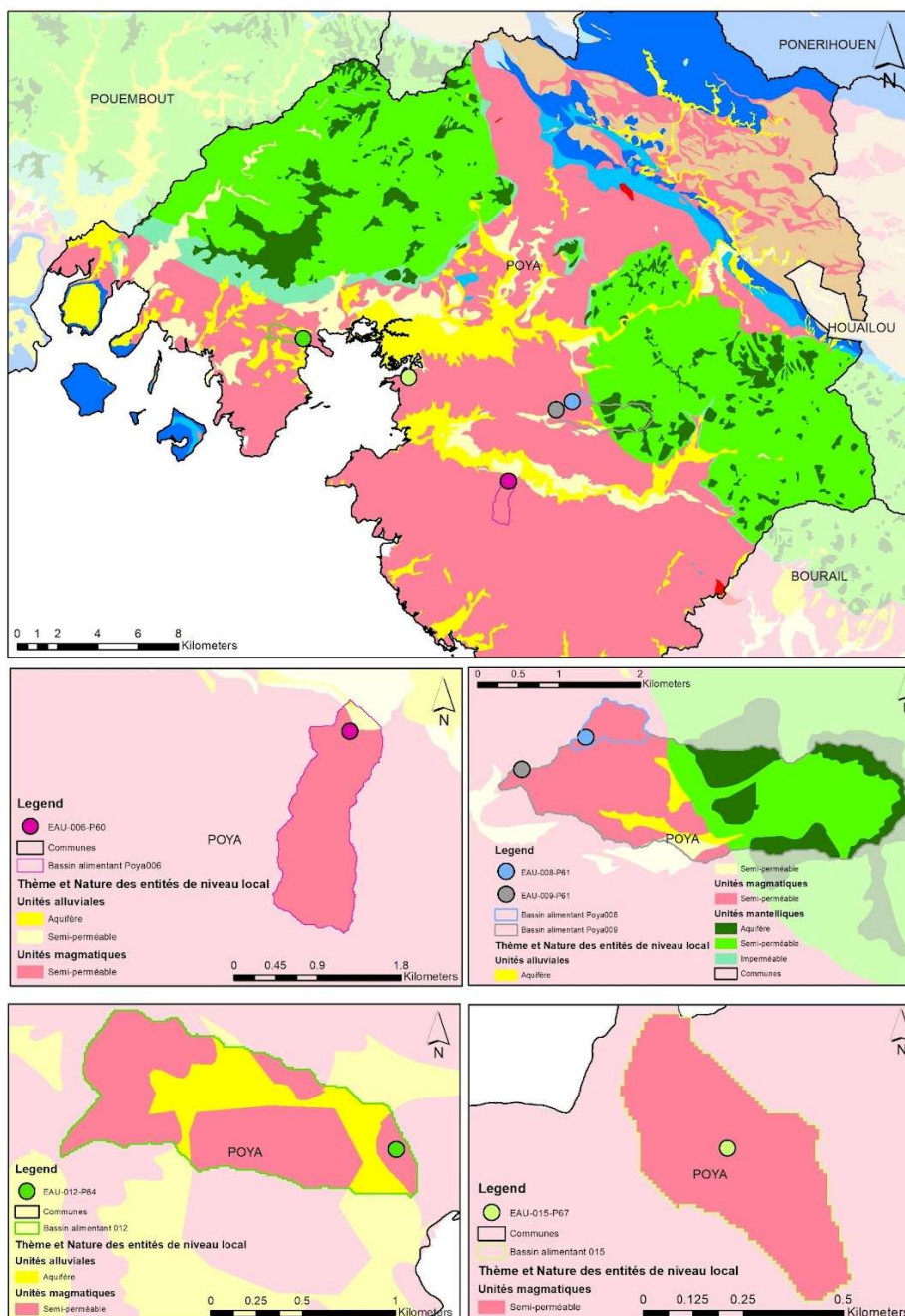


Figure 45- Contexte hydrogéologique des échantillons d'eau analysés sur la commune de Poya.

4.2.5. RESSOURCES AQUATIQUES

4.2.5.1. Concentrations dans les poissons et invertébrés

Dans les poissons, les concentrations moyennes sont par ordre croissant (en mg/kg) : Cd (0,006) < Pb (0,19) < Co (0,23) < Cu (1,0) < As (1,2) < Mn (1,3) < Cr (2,4) < Ni (3,6) < Zn (25,8) < Fe (33,5). Dans les invertébrés, les concentrations moyennes sont par ordre croissant (en mg/kg) : Cd (0,2) < Pb (0,7) < Co (2,4) < As (9,6) < Cr (19,1) < Mn (21,2) < Ni (35,1) < Cu (111,4) < Fe (443,7) < Zn (976,6)

Si l'on regarde les concentrations élémentaires en fonction du type d'organismes (poissons versus invertébrés) tous sites confondus, il apparaît que les invertébrés présentent des concentrations systématiquement plus élevées que les poissons (Figure 45). Les différences de concentrations sont les plus marquées pour le Cu et Zn avec des concentrations médianes pour le Cu de 0,9 et 52,5 mg/kg et pour le Zn de 19,5 et 125,1 mg/kg. Mais on note également des différences de concentrations médianes importantes pour l'As (0,7 et 4,5 mg/kg) pour le Cr (0,6 et 2,8 mg/kg) et le Fe (28 et 84 mg/kg).

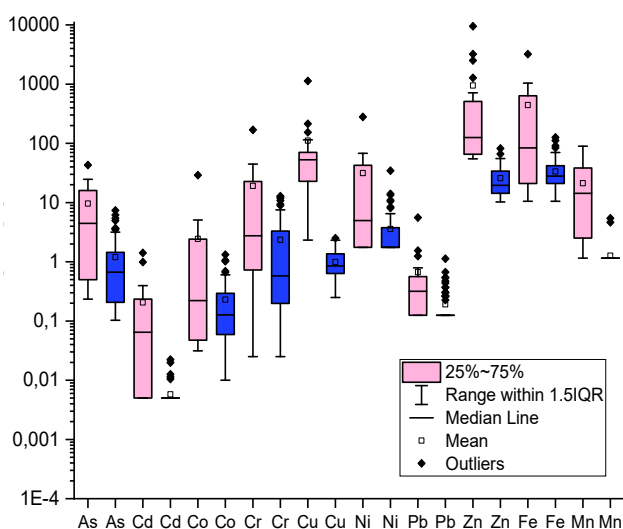


Figure 46- Diagrammes en boîte des concentrations des 10 éléments (en mg.kg⁻¹ MS) chez les invertébrés (en rose, n= 20) et les poissons (en bleu, n= 67).

4.2.5.2. Influence du substrat géologique sur les concentrations

La distribution des données de concentrations mesurées dans les organismes (poissons plus invertébrés) prélevés sur substrats ultramafiques et ceux prélevés sur substrats volcano-sédimentaires sont présentés figure 46. Ces résultats montrent que les concentrations moyennes des différents éléments sont toujours plus élevées dans les organismes prélevés sur substrats ultrabasiqes par rapport aux organismes prélevés sur substrat volcano-sédimentaires (Figure 46-a). Les différences de concentrations médianes sont particulièrement grandes pour Co, Cr et Fe dont les concentrations médianes sont respectivement 0,24 et 0,06 mg/kg ; 3,03 et 0,29 mg/kg et 42 et 21 mg/kg. La nature géologique du substrat influence donc également fortement les concentrations en métaux des organismes aquatiques.

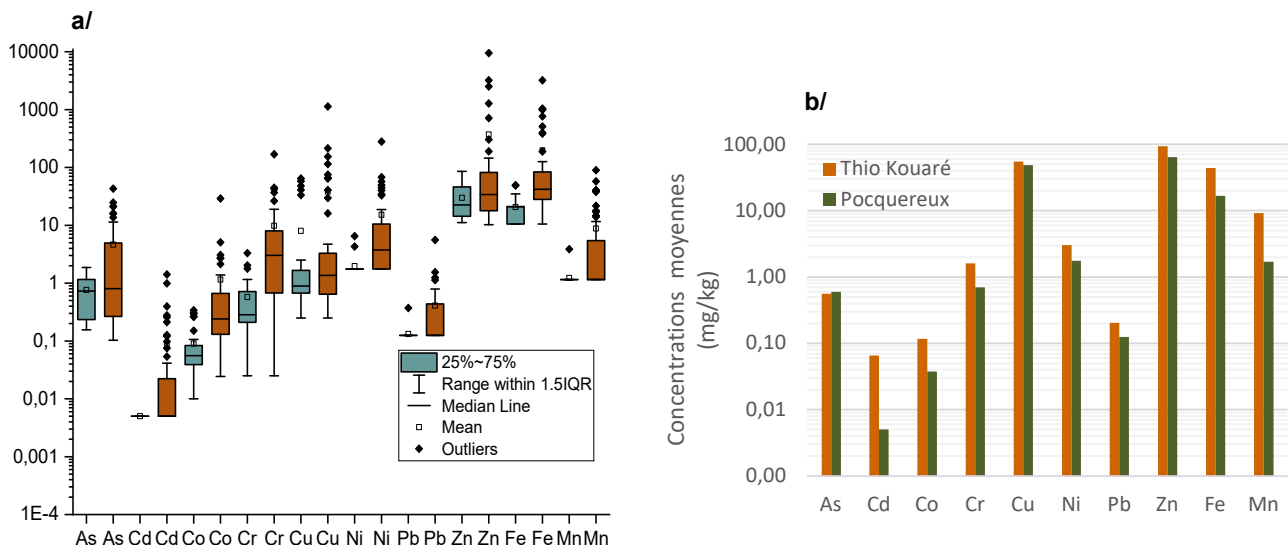


Figure 47- Concentrations des 10 éléments (en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS) dans les organismes prélevés sur substrat ultrabasique (en brun, $n=53$) et volcano-sédimentaires (en vert, $n=34$). a/ diagrammes en boîte des concentrations de tous les organismes aquatiques ; b/ concentrations moyennes des crevettes prélevées à Kouaré (sur substrat ultrabasique, $n=5$) et à Pocquereux (sur substrat volcano-sédimentaire, $n=5$).

Lorsque les échantillons de poissons sont séparés des échantillons d'invertébrés, les résultats montrent les mêmes tendances avec des différences de concentrations chez les poissons plus prononcées pour Co, Cr, Ni, Pb, Fe et Mn. Les échantillons comptaient 5 crevettes collectées à Kouaré (substrat ultrabasique) et 5 à Pocquereux (substrat volcano-sédimentaire). Nous pouvons donc comparer les concentrations moyennes des mêmes espèces d'invertébrés sur les deux types de substrat. Les résultats montrent bien des concentrations moyennes qui sont supérieures sur substrat ultrabasique, sauf pour l'As (Figure 46-b).

4.2.5.3. Influence de l'activité minière

Sur substrat ultrabasique, les échantillons prélevés en aval d'une influence minière sont séparés des autres. Le nombre d'échantillons des différentes catégories est limité : 16 poissons prélevés sous influence minière, 22 sans et 9 invertébrés prélevés sous influence minière et 6 sans. Seules les concentrations des poissons sont alors présentées, ce type de représentation n'étant pas recommandé lorsque le nombre d'échantillon est inférieur à 20. Les concentrations moyennes mesurées sont supérieures en aval d'activités minières pour Ni (7,0 contre 3,2 mg/kg) et légèrement supérieures pour l'As (1,9 contre 1,2 mg/kg), le Cd (0,007 mg/kg contre 0,006 mg/kg), le Pb (0,32 contre 0,18 mg/kg) et le Mn (1,4 contre 1,3 mg/kg) (Figure 47). Par contre, les concentrations moyennes mesurées dans les poissons sont légèrement inférieures en aval d'activités minières pour le Cr (3,0 contre 4,3 mg/kg), le Zn (21 contre 32 mg/kg) et le Cu (0,8 contre 1,2 mg/kg).

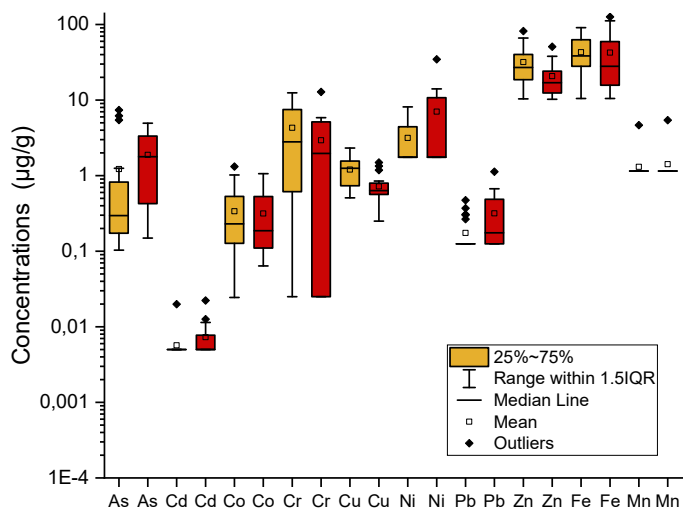


Figure 48- Diagrammes en boîte des concentrations des 10 éléments (en mg.kg^{-1} MS) pour les poissons sur substrat ultrabasique soumis aux activités minières (en rouge, $n= 16$) et non soumis aux activités minière (en moutarde, $n= 22$)

4.2.5.4. Concentrations de chaque élément

Nous présenterons ici les résultats des éléments ayant des concentrations parmi les plus importantes et/ou ayant un faible % de valeurs < LD (As, Co, Cr, Fe et Zn), ainsi que le Ni compte-tenu de la nature des activités minières bien que pour cet élément 65,5% des mesures sont inférieures à la LD. Les résultats détaillés relatifs aux autres éléments sont présentés en annexes (Annexes A3 à A5).

- **Arsenic**

Les résultats pour As sont parmi les plus robustes puisqu'aucune valeur n'est sous la limite de quantification (Tableau 59). Les concentrations varient de 0,10 à 43,11 mg/kg.

Qu'il s'agisse de la moyenne ou de la médiane, il apparait nettement que les poissons accumulent moins l'As que les invertébrés. Les moyennes sont respectivement 1,19 et 9,60 mg/kg et les médianes sont respectivement 0,67 et 4,45 mg/kg.

Dans les milieux volcano-sédimentaires, les concentrations moyennes sont inférieures dans les organismes (0,76 contre 4,64 mg/kg), mais les médianes sont toutefois très proches (0,73 et 0,80 mg/kg).

Pour les poissons, les valeurs moyennes et médianes obtenues dans les milieux ultramafiques (1,50 et 0,57 mg/kg) et volcano-sédimentaires (0,79 et 0,79 mg/kg) sont proches. Les différences de concentrations moyennes et médianes entre secteurs ultramafiques soumis ou non aux activités minières sont nettes. La concentration moyenne dans les poissons est légèrement supérieure sous influence minière (1,89 contre 1,22 mg/kg) et dans les invertébrés très nettement supérieure sous influence minière (19,83 contre 1,77 mg/kg) (Tableau 59).

Tableau 60- Valeurs des concentrations (en mg.kg⁻¹ MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour As en fonction du type de milieux et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 0,05mg/kg.

	N	Moy	E-type	Min	Méd	Max	%<LD
Global	87	3,13	6,63	0,10	0,79	43,11	0
Tous milieux, poissons	67	1,19	1,52	0,10	0,67	7,37	0
Tous milieux, invertébrés	20	9,60	11,56	0,23	4,45	43,11	0
Ultrabasique, toutes espèces	53	4,64	8,16	0,10	0,80	43,11	0
Ultrabasique, poissons	38	1,50	1,91	0,10	0,57	7,37	0
Ultrabasique, poissons mine	16	1,89	1,54	0,15	1,78	4,95	0
Ultrabasique, poissons pas mine	22	1,22	2,12	0,10	0,30	7,37	0
Ultrabasique, invertébrés	15	12,60	11,95	0,27	11,40	43,11	0
Ultrabasique, invertébrés mine	9	19,83	9,87	11,31	16,12	43,11	0
Ultrabasique, invertébrés pas mine	6	1,77	2,98	0,27	0,62	7,84	0
Volcano-sédimentaire, toutes espèces	34	0,76	0,57	0,16	0,73	1,87	0
Volcano-sédimentaire, poissons	29	0,79	0,60	0,16	0,79	1,87	0
Volcano-sédimentaire, invertébrés	5	0,60	0,34	0,23	0,45	1,06	0

- **Cobalt**

Les résultats pour le Co sont également très robustes puisque 1,1% de l'ensemble des valeurs étaient sous la LOQ (Tableau 60).

Là également, les poissons accumulent moins que les invertébrés avec une concentration moyenne de 0,23mg/kg contre 2,44 mg/kg.

Dans les poissons, les concentrations moyennes et médianes sont légèrement supérieures dans les milieux ultrabasiques avec des concentrations moyennes de 0,33 mg/kg et 0,10 mg/kg et des concentrations médianes de 0,21 et 0,006mg/kg. Les concentrations ne sont pas différentes que le milieu soit influencé par une activité minière ou non.

Dans les invertébrés, les concentrations sont également plus élevées dans les milieux ultrabasiques (3,24 contre 0,004 mg/kg et 0,95 contre 0,004 mg/kg). en revanche, les différences de concentrations moyennes et médianes sont plus fortes en aval d'activités minières pour les invertébrés (5,11 contre 0,45 et 2,70 contre 0,15 mg/kg).

Tableau 61- Valeurs des concentrations (en mg.kg⁻¹ MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Co en fonction du type de milieux et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 0,01mg/kg.

	N	Moy	sd	Min	Méd	Max	%<LD
Global	87	0,74	3,17	0,01	0,14	29,07	1,1
Tous milieux, poissons	67	0,23	0,26	0,01	0,13	1,32	1,5
Tous milieux, invertébrés	20	2,44	6,42	0,03	0,22	29,07	0
Ultrabasique, toutes espèces	53	1,15	4,02	0,02	0,24	29,07	0
Ultrabasique, poissons	38	0,33	0,31	0,02	0,21	1,32	0
Ultrabasique, poissons mine	16	0,32	0,29	0,06	0,19	1,06	0
Ultrabasique, poissons pas mine	22	0,34	0,33	0,02	0,23	1,32	0
Ultrabasique, invertébrés	15	3,24	7,30	0,05	0,95	29,07	0
Ultrabasique, invertébrés mine	9	5,11	9,11	0,28	2,70	29,07	0
Ultrabasique, invertébrés pas mine	6	0,45	0,82	0,05	0,15	2,13	0
Volcano-sédimentaire, toutes espèces	34	0,09	0,09	0,01	0,06	0,34	2,9
Volcano-sédimentaire, poissons	29	0,10	0,09	0,01	0,06	0,34	3,4
Volcano-sédimentaire, invertébrés	5	0,04	0,00	0,03	0,04	0,04	0

- **Chrome**

Les résultats concernant le Cr sont un peu moins robustes que les précédents, mais le pourcentage de valeurs sous la LD demeure « acceptable » puisque 14,9% des données étaient inférieures à la LD (Tableau 61).

Là également, les poissons accumulent moins que les invertébrés avec une concentration moyenne de 2,35mg/kg contre 19,12 mg/kg.

Dans les milieux ultramafiques, les concentrations en Cr sont très nettement supérieures, par comparaison aux milieux volcano-sédimentaires tant pour les poissons (moyenne de 3,72 mg/kg contre 0,55 mg/kg) que pour les invertébrés (moyenne de 25,26 contre 0,70 mg/kg).

Au sein des substrats ultramafiques, les valeurs pour les poissons sont étonnamment légèrement plus fortes dans les secteurs non soumis aux activités minières que dans les secteurs impactés (moyenne de 4,29 contre 2,94 mg/kg). Toutefois, c'est l'inverse qui est relevé pour les invertébrés (37,12 contre 0,70mg/kg).

Tableau 62- Valeurs des concentrations (en mg.kg⁻¹ MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Cr en fonction du type de milieu et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 0,05mg/kg.

	N	Moy	sd	Min	Méd	Max	%<LD
Global	87	6,21	19,55	0,03	0,96	168,6	14,9
Tous milieux, poissons	67	2,35	3,40	0,03	0,58	12,84	17,9
Tous milieux, invertébrés	20	19,12	38,24	0,03	2,75	168,6	5
Ultrabasique, toutes espèces	53	9,82	24,45	0,03	3,03	168,6	20,8
Ultrabasique, poissons	38	3,72	3,97	0,03	2,51	12,84	26,3
Ultrabasique, poissons mine	16	2,94	3,50	0,03	1,97	12,84	30,5
Ultrabasique, poissons pas mine	22	4,29	4,27	0,03	2,80	12,47	18,2
Ultrabasique, invertébrés	15	25,26	42,69	0,03	8,03	168,6	6,7
Ultrabasique, invertébrés mine	9	37,12	51,62	1,96	18,88	168,6	0
Ultrabasique, invertébrés pas mine	6	7,47	14,43	0,03	2,00	36,84	16,7
Volcano-sédimentaire, toutes espèces	34	0,57	0,67	0,03	0,29	3,30	5,9
Volcano-sédimentaire, poissons	29	0,55	0,71	0,03	0,26	3,30	6,9
Volcano-sédimentaire, invertébrés	5	0,70	0,22	0,43	0,72	1,03	0

- **Cuivre**

Les résultats concernant le Cu sont un peu moins robustes que les précédents, mais le pourcentage de valeurs sous la LD demeure « acceptable » puisque 14,9% des données étaient inférieures à la LD (Tableau 62).

Pour cet élément encore, les poissons accumulent moins que les invertébrés avec une concentration moyenne de 0,99 mg/kg contre 111,4 mg/kg.

Dans les milieux ultramafiques, les concentrations en Cu des poissons sont similaires de celles des milieux volcano-sédimentaires avec des concentrations moyennes respectives de 1,00 et 0,98 mg/kg. Par contre dans les invertébrés les concentrations sont supérieures dans les milieux ultrabasiques (moyenne de 132,2 contre 48,88 mg/kg).

Au sein des substrats ultramafiques, les valeurs pour les poissons sont proches sous influence minière ou non (moyenne de 0,72 contre 1,20 mg/kg). Toutefois, pour les invertébrés les concentrations sont supérieures en aval d'activités minières (moyenne de 189,5 contre 46,35 mg/kg).

Tableau 63- Valeurs des concentrations (en mg.kg⁻¹ MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Cu en fonction du type de milieu et catégories d'espèces. Le %<LOQ indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 0,5mg/kg.

	N	Moy	sd	Min	Méd	Max	%<LD
Global	87	26,37	124,4	0,25	1,02	1129,2	3,4
Tous milieux, poissons	67	0,99	0,50	0,25	0,85	2,50	4,5
Tous milieux, invertébrés	20	111,4	245,3	2,32	52,95	1129,2	0
Ultramafique, toutes espèces	53	38,15	158,2	0,25	1,37	1129,2	3,8
Ultramafique, poissons	38	1,00	0,51	0,25	0,78	2,32	5,3
Ultramafique, poissons mine	16	0,72	0,35	0,25	0,63	1,49	12,5
Ultramafique, poissons pas mine	22	1,20	0,52	0,51	1,25	2,32	0
Ultramafique, invertébrés	15	132,2	282,4	2,32	64,57	1129,2	0
Ultramafique, invertébrés mine	9	189,5	360,4	3,28	64,96	1129,2	0
Ultramafique, invertébrés pas mine	6	46,35	27,52	2,32	52,62	75,19	0
Volcano-sédimentaire, toutes espèces	34	8,03	17,77	0,25	0,89	64,31	2,9
Volcano-sédimentaire, poissons	29	0,98	0,49	0,25	0,86	2,50	3,4
Volcano-sédimentaire, invertébrés	5	48,88	12,51	33,38	47,95	64,31	0

- **Fer**

La robustesse des résultats du Fe est correcte avec 20,7% des mesures inférieures à la LD (Tableau 63). Les concentrations en fer sont très élevées pour les invertébrés avec une concentration moyenne de 443,7mg/kg et les poissons accumulent moins le Fe avec une concentration moyenne de 33,46 mg/kg).

Dans les milieux ultrabasiqes on observe des teneurs en Fe très nettement supérieures que cela soit dans les poissons (concentration moyenne de 42,71 contre 21,35 mg/kg) ou dans les invertébrés (585,9 contre 16,79 mg/kg). Au sein des milieux ultrabasiqes, il n'existe pas de différence marquée chez les poissons de milieux soumis aux activités minières (moyenne de 42,41 mg/kg) versus milieu non soumis à ces activités (moyenne de 42,92 mg/kg). Par contre, les différences sont très marquées chez les invertébrés qui accumulent bien plus le Fe lorsqu'ils sont soumis aux activités minières (moyenne de 895,6 contre 121,8 mg/kg).

Tableau 64- Valeurs des concentrations (en mg.kg⁻¹ MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Fe en fonction du type de milieu et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 21mg/kg.

	N	Moy	E-type	Min	Méd	Max	%<LD
Global	87	127,8	393,7	10,50	27,98	3217,7	20,7
Tous milieux, poissons	67	33,46	24,69	10,50	27,98	125,91	22,4
Tous milieux, invertébrés	20	443,7	750,3	10,50	83,94	3217,7	15
Ultrabasiqique, toutes espèces	53	196,5	493,9	10,50	41,97	3217,7	13,2
Ultrabasiqique, poissons	38	42,71	28,31	10,50	34,97	125,9	15,8
Ultrabasiqique, poissons mine	16	42,41	36,39	10,50	27,98	125,9	25
Ultrabasiqique, poissons pas mine	22	42,92	21,59	10,50	38,47	90,93	9,1
Ultrabasiqique, invertébrés	15	585,9	822,9	10,50	384,72	3217,7	6,7
Ultrabasiqique, invertébrés mine	9	895,4	944,8	69,95	762,45	3217,7	0
Ultrabasiqique, invertébrés pas mine	6	121,8	192,9	10,50	45,47	510,6	16,7
Volcano-sédimentaire, toutes espèces	34	20,68	10,02	10,50	20,98	48,96	32,4
Volcano-sédimentaire, poissons	29	21,35	10,50	10,50	20,98	48,96	31
Volcano-sédimentaire, invertébrés	5	16,79	5,74	10,50	20,98	20,98	40

- **Nickel**

Le cas du Ni est intéressant en ce sens où, bien que cible principale des activités minières, sa présence dans les organismes aquatiques n'est confirmée que dans environ un tiers des cas puisque 65,5% des concentrations étaient inférieures à la LD de 3,5 mg/kg (Tableau 64). La LD est en effet élevée (3,5 mg/kg) comparativement aux éléments comme As, Cd, Co Cr et Cu pour lesquels la LD < 0,5 mg/kg.

On note cependant des concentrations plus élevées dans les invertébrés que dans les poissons avec des concentrations moyennes respectives de 3,58 et 31,50 mg/kg.

Dans les milieux ultrabasiques, les concentrations sont nettement supérieures par comparaison avec les milieux volcano-sédimentaires avec une moyenne respective dans les poissons de 4,79 et 2,00 mg/kg et dans les invertébrés de 41,42 et 1,75 mg/kg.

Dans les milieux ultrabasiques, les poissons accumulent en moyenne d'avantage le Ni dans les sites soumis à une activité minière que dans ceux non soumis (7,03 contre 3,15 mg/kg), mais à noter toutefois que les valeurs médianes sont similaires. Les différences sont en revanche nettement plus marquées pour les invertébrés qui accumulent bien plus de Ni dans les secteurs sous influence minière avec des concentrations moyennes respectives de 61,84 et 10,79 mg/kg.

Tableau 65- Valeurs des concentrations (en mg.kg⁻¹ MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Ni en fonction du type de milieu et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 3,5 mg/kg.

	N	Moy	sd	Min	Méd	Max	%<LD
Global	87	10,00	31,92	1,75	1,75	279,8	65,5
Tous milieux, poissons	67	3,58	4,78	1,75	1,75	34,57	73,1
Tous milieux, invertébrés	20	31,50	62,44	1,75	4,98	279,8	40
Ultrabasique, toutes espèces	53	15,16	40,18	1,75	3,75	279,8	47,2
Ultrabasique, poissons	38	4,79	6,05	1,75	1,75	34,57	57,9
Ultrabasique, poissons mine	16	7,03	8,70	1,75	1,75	34,57	56,3
Ultrabasique, poissons pas mine	22	3,15	1,94	1,75	1,75	8,11	59,1
Ultrabasique, invertébrés	15	41,42	69,78	1,75	18,76	279,8	20
Ultrabasique, invertébrés mine	9	61,84	84,39	3,76	40,31	279,8	0
Ultrabasique, invertébrés pas mine	6	10,79	19,07	1,75	2,75	49,54	50
Volcano-sédimentaire, toutes espèces	34	1,96	0,91	1,75	1,75	6,49	94,1
Volcano-sédimentaire, poissons	29	2,00	0,98	1,75	1,75	6,49	93,1
Volcano-sédimentaire, invertébrés	5	1,75	0	1,75	1,75	1,75	100

- **Zinc**

Le Zn est systématiquement détecté dans tous les organismes (Tableau 65).

Comme tous les éléments les concentrations sont plus élevées dans les invertébrés avec une concentration moyenne de 946,6 mg/kg contre 25,75 mg/kg dans les poissons.

Les concentrations dans les poissons des milieux ultrabasiques sont très légèrement supérieures avec une moyenne de 27,11 contre 23,97 mg/kg. Les concentrations dans les invertébrés des milieux ultrabasiques sont très fortement supérieures avec une moyenne de 1240,7 contre 64,30 mg/kg.

Dans les milieux ultrabasiques, et dans les poissons, les concentrations sont légèrement inférieures sous influence minière avec des concentrations moyennes de 20,70 contre 31,77 mg/kg. Et dans les invertébrés, les concentrations en zinc sont bien supérieures sous influence minière (concentration moyenne de 2001,1 contre 99,98 mg/kg).

Tableau 66- Valeurs des concentrations (en mg.kg⁻¹ MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Zn en fonction du type de milieux et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 3 mg/kg.

	N	Moy	E-type	Min	Méd	Max	%<LD
Global	87	237,4	1103,7	10,24	27,47	9516,5	0
Tous milieux, poissons	67	25,75	15,10	10,24	19,53	81,82	0
Tous milieux, invertébrés	20	946,6	2196,7	54,75	125,1	9516,5	0
Ultrabasique, toutes espèces	53	370,6	1402,9	10,24	34,00	9516,5	0
Ultrabasique, poissons	38	27,11	16,14	10,24	20,45	81,82	0
Ultrabasique, poissons mine	16	20,70	11,00	10,24	16,98	50,80	0
Ultrabasique, poissons pas mine	22	31,77	17,85	10,36	27,00	81,82	0
Ultrabasique, invertébrés	15	1240,7	2485,6	54,75	145,0	9516,5	0
Ultrabasique, invertébrés mine	9	2001,1	3030,6	137,6	715,4	9516,5	0
Ultrabasique, invertébrés pas mine	6	99,98	30,90	54,75	113,53	130,62	0
Volcano-sédimentaire, toutes espèces	34	29,90	19,67	11,16	22,48	85,47	0
Volcano-sédimentaire, poissons	29	23,97	13,68	11,16	17,59	55,31	0
Volcano-sédimentaire, invertébrés	5	64,30	12,12	56,32	59,43	85,47	0

- **Cadmium, plomb et manganèse**

Les tableaux de résultats de ces trois éléments sont donnés en annexe (A4, A5 et A6) et peu discuté du fait de la forte proportion de données inférieures à la LD (73,1 à 80,5%) Les LD pour Cd et Pb sont faibles (respectivement 0,001 et 0,25mg/kg). Ces deux éléments sont donc très peu concentrés dans les organismes néo-calédoniens.

On retiendra cependant quelques points marquants. Le Cd n'est jamais détecté dans les organismes (poissons ou invertébrés) des milieux volcano-sédimentaires (100%<LD) mais est détecté dans les invertébrés des milieux ultrabasiques (13,3%<LD) ; les seules différences marquantes semblent concerner les concentrations chez les invertébrés entre milieux ultrabasiques soumis ou non soumis aux activités minières, la concentration moyenne en aval de sites miniers étant de 0,41mg/kg contre 0,006 mg/kg.

Le plomb est détecté dans les invertébrés des milieux des milieux ultramafiques (26,7% <LD) et dans tous les invertébrés collectés sous influence d'une activité minière (0%<LD) indiquant une accumulation en aval de sites miniers.

Pour le Mn, la LD est de 2,3 mg/kg, donc plutôt haute par rapport aux deux éléments précédents, et seulement 19,5% des valeurs sont supérieures à la LD. Il est cependant détecté dans les invertébrés des milieux ultrabasiques (6,7%<LD) et dans la totalité des invertébrés en aval de sites miniers (0%<LD) indiquant, comme pour le plomb, une accumulation dans les invertébrés en aval des sites miniers.

4.3. COMPARAISON PRELIMINAIRE DES 3 GRANDES CATEGORIES DE DENREES :

La figure 48 mentionne les moyennes et médianes, toutes localités confondues, mesurées dans les différentes denrées alimentaires étudiés. Elle permet de rapidement mettre en évidence les concentrations élevées en Co, Cr, Mn, et Ni dans les mollusques aquatiques (bivalves et huitres), en comparaison des autres denrées.

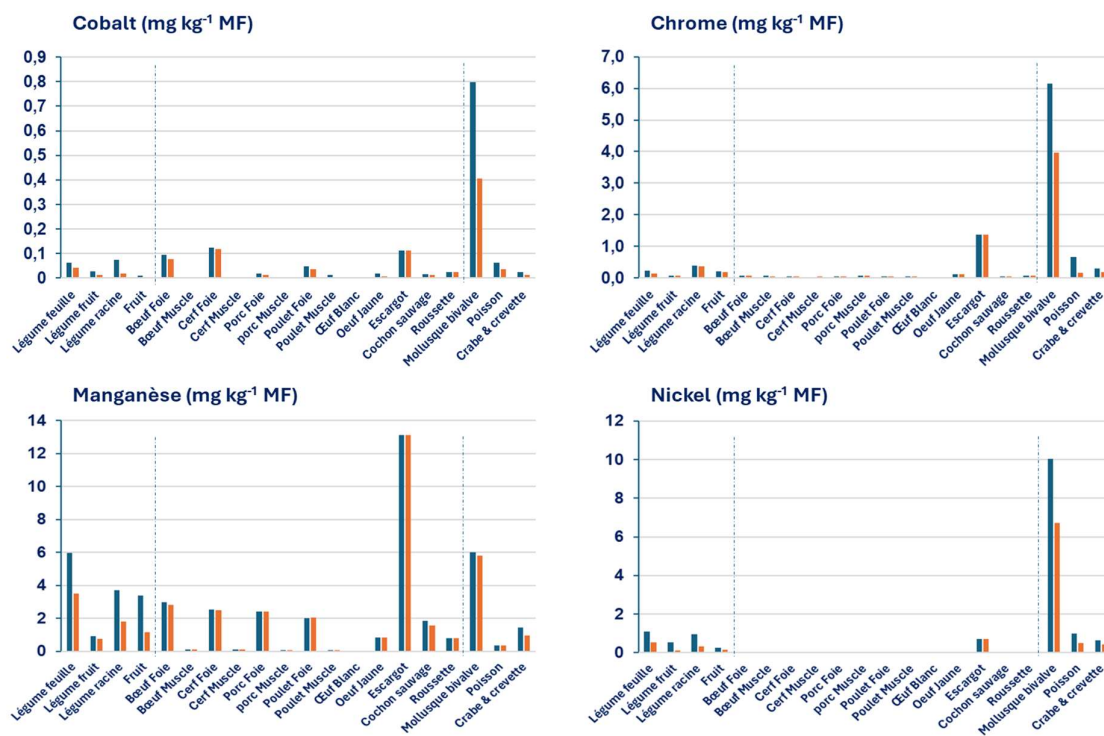


Figure 49- Concentrations moyennes (barres bleues) et médianes (barres orange) (mg kg⁻¹, matière fraîche, MF) en cobalt, chrome, manganèse et nickel mesurées dans les différentes catégories de denrées alimentaires produites, et/ou consommées localement. Dans ce rapport, les teneurs en matière fraîche des denrées aquatiques ont été estimées (mollusque bivalve 15% MS, poisson 28% MS, crabe et crevette 25%), les concentrations en matières fraîches sont donc évaluées à des fins de comparaison entre catégorie.

Seule l'évaluation des risques sanitaires en cours de réalisation dans le projet METALICA-Santé, et en partenariat avec le présent projet permettra d'évaluer réellement le rôle de l'alimentation locales dans l'exposition des populations. Néanmoins, il convient de mentionner ici qu'outre la consommation de mollusques aquatiques et terrestres, les poissons, crustacés, légumes racines et feuilles constitueraient les plus gros apports potentiels de chrome et de nickel. Doit être noté que la majeure partie des concentrations en chrome dans les denrées alimentaires sont particulièrement faibles ; 13 catégories sur 21 présentent des valeurs moyennes à 0,2 mg.kg⁻¹ MF. Pour le nickel, il existe un facteur 640 entre les concentrations moyennes les plus faibles (blanc d'œuf), et les plus élevées (bivalve). 8 catégories de denrées alimentaires démontrent des concentrations moyennes supérieures à 0,5 mg.kg⁻¹ MF, à savoir dans l'ordre décroissant : bivalves, huitres, légumes feuilles, poissons, légumes racines, crabes et crevettes, escargots, et légumes fruits. En **considérant les médianes, les denrées bivalves, huitres, escargots et légumes feuilles, apparaissent comme les denrées potentiellement les plus problématiques pour le consommateur en termes d'exposition au nickel.** Les ressources carnées, ne présentent pas de particularités quant à leurs concentrations en chrome et nickel, et ne contribuent probablement que très peu aux taux d'imprégnation mesurées dans METEXPO.

Les concentrations en cobalt et manganèse sont distribuées de façon plus homogène entre les différentes catégories de denrées (hors muscle de denrées animales terrestres, et blanc d'œuf). Néanmoins, là encore, les concentrations totales en Co sont très faibles, et dans la plupart des cas

inférieures à $0,1 \text{ mg.kg}^{-1}$ MF. Celles en manganèse sont globalement plus élevées, et 10 catégories sur 21 présentent des concentrations supérieures ou égales à 2 mg.kg^{-1} MF.

5. CONCLUSIONS & RECOMMANDATIONS

Les échantillonnages réalisés dans le cadre du projet **METALICA-Aliment**, bien que non systématiques, ont permis de couvrir une **diversité significative de denrées alimentaires produites ou prélevées localement** ainsi que des **situations agro-pédo-hydro-environnementales variées**. Les concentrations en éléments métalliques totaux (As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) ont été étudiées dans les denrées locales les plus consommées, et les liens avec la qualité agro-environnementale (pédologie, eaux environnantes, géologie, impact minier) ont été évalués.

Concernant les denrées végétales, aucun dépassement à la réglementation, n'a été constaté pour les éléments les plus toxiques, comme As, Cd, et Pb dans l'ensemble des échantillons étudiés. Contrairement à ce qui était attendu, au regard de la qualité métallifère des sols du territoire, les dépassements en Cr étaient particulièrement rares. Pour le Ni, les dépassements, mis en évidence particulièrement dans les légumes feuilles, étaient plus fréquents, notamment considérant la réglementation qui sera appliquée en Europe à compter de juillet 2025.

Les concentrations en métaux dans les denrées végétales présentaient peu à pas de lien avec les métaux disponibles dans les sols, excepté pour le nickel pour lequel la relation positive entre les concentrations en Ni-EDTA des sols et en Ni total des denrées végétales indique que plus la disponibilité du nickel dans les sols est élevée plus cet élément sera susceptible d'être absorbé par la plante. Cependant, et contrairement à ce qui aurait pu être attendu, il n'existe pas de liens simples entre les concentrations en Ni-EDTA dans les sols, et l'unité pédologique d'où elles sont issues. En effet, La simple distinction entre **sols volcano-sédimentaires et sols ultrabasiqes** ne suffit pas à évaluer la disponibilité des éléments métalliques.

La majorité des sols agricoles échantillonnés étaient des sols alluvionnaires. Il est probable que la **nature pédogéologique du bassin versant** et la **présence d'activités minières en amont** influencent la qualité physico-chimique des sols développés en bas de toposéquence. La cartographie de la disponibilité des métaux en cours dans le projet **ValoPRO-NC** devrait apporter des éléments de réponse. Par exemple, des sols ferrallitiques de plaine sur substrat ultrabasique pouvaient présenter des concentrations en Ni-disponible plus faibles que des sols développés sur substrat volcano-sédimentaire mais enrichis par des **apports alluvionnaires ferrallitiques**. Ces observations expliquent en partie les **différences géographiques relativement peu marquées** dans les concentrations moyennes en métaux des denrées végétales.

Cette grande hétérogénéité est également retrouvée dans la qualité des eaux environnantes étudiées dans METALICA-Aliment et souligne que la dichotomie simpliste **sols volcano-sédimentaires vs ultrabasiqes** ne constitue pas un outil fiable pour évaluer le risque de transfert des métaux en agriculture. Nos résultats démontrent également (i) des concentrations en métaux plus élevées dans les épidermes consommables que dans la chair des denrées ; certains éléments « originaux » comme l'uranium ont été mis en évidence dans les épidermes de pommes de terre ; (ii) un effet significatif du nettoyage des denrées végétales sur les concentrations en métaux. **Ainsi, en termes de recommandations en vue de limiter l'exposition, le consommateur est invité à nettoyer à l'eau les denrées végétales pour retirer les dépôts des sols/poussières pourvoyeurs de métaux ; et peler les denrées avant consommation, même lorsque l'épiderme est consommable.**

Les concentrations en métaux dans les **denrées animales d'élevage** étaient généralement faibles. **Aucun dépassement des teneurs maximales réglementaires n'a été observé pour l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le plomb (Pb) ou le nickel (Ni)**. Comparativement à la littérature mondiale, les concentrations en éléments métalliques (EM) pour les viandes calédoniennes (hors gibier et ressources naturelles) se situent plutôt dans les valeurs basses et ne semblent pas présenter de risque particulier pour le consommateur. Pour l'élevage en plein champ, aucun lien n'a été identifié entre les concentrations en métaux dans la viande et celles disponibles dans les sols, les eaux d'abreuvement, ou les aliments pour animaux. Aucune tendance géographique nette n'a été observée. Pour les **ressources terrestres prélevées dans le milieu naturel**, les effectifs d'échantillons étaient faibles. Néanmoins, des **contaminations au plomb**, parfois élevées, ont été détectées dans le foie et/ou muscle de roussettes, cochons sauvages et cerfs issus de prélèvements cynégétiques. Des

concentrations élevées en cadmium ont également été relevées, probablement liées à la **qualité des munitions utilisées pour la chasse, et non à une contamination environnementale**. La **chair d'escargot** présentait aussi des **concentrations élevées en As, Cd, Cr et Ni**, probablement en lien avec leur **mode de vie et leur habitat**. Si certaines espèces comme les *Acathina* peuvent être consommées, les bulimes sont préférées localement. Bien que cette denrée ne soit pas parmi les plus consommées à l'échelle territoriale, l'impact de sa consommation devrait être surveillé au niveau des tribus ou familles, en particulier lorsque les escargots évoluent dans des milieux ultrabasiques, comme à l'Île des Pins.

Les denrées aquatiques d'eau douce et d'estuaires présentaient les concentrations les plus élevées pour l'ensemble des métaux cibles. Les gammes de variation des concentrations pour les différents éléments étaient particulièrement conséquentes, et étaient clairement impactées par la nature du substrat géologique et l'influence minière en amont du cours d'eau. **Les invertébrés (mollusques, et crustacés) montraient des concentrations plus importantes en métaux que les poissons, et ce particulièrement lorsqu'ils étaient échantillonnés en zone ultrabasique sous influence minière.** Au regard des fréquences de consommation de ces types de denrées, leurs concentrations parfois très élevées en métaux pourraient représenter un risque pour le consommateur qu'il conviendra d'évaluer, particulièrement pour les populations habitant en contexte minier ultrabasique.

Les résultats préliminaires obtenus dans le cadre de **METALICA-Aliment** mettent en évidence une **très grande hétérogénéité des concentrations en métaux** dans les denrées alimentaires du territoire. En première approximation, les quantités les plus importantes de nickel (Ni) et de chrome (Cr) absorbées par les consommateurs seraient liées à la consommation de légumes feuilles, légumes racines et invertébrés aquatiques (eaux douces et estuaires). Toutefois, seule une évaluation globale prenant en compte l'ensemble des sources d'exposition permettrait d'estimer le risque réel pour le consommateur. Le projet METALICA-Santé devrait fournir des éléments de réponse à ce sujet. Il est important de noter que l'étude METALICA-Aliment s'est concentrée sur les denrées produites ou prélevées localement, et ne prend donc pas en compte les denrées importées, qui peuvent constituer une part importante de l'alimentation et de l'exposition aux métaux (par exemple, le poulet). Enfin, d'autres sources alimentaires indirectes, comme la qualité des ustensiles de cuisine ou les méthodes de préparation, n'ont pas été étudiées mais devraient être considérées dans le cadre d'une **évaluation sanitaire globale**.

ANNEXES

Annexe A1. Lieux de collectes des organismes aquatiques et espèces des organismes collectés.

Organismes	Espèces	Commune/district /lieu-dit	Cours d'eau	Géologie du bassin versant	Influence minière
Poissons	<i>Scatophagus argus</i>	Thio	Kuenthio delta	Ultrabasique	+++
	<i>Anodonstoma chacunda</i>				
	<i>Gerres longirostris</i>				
	<i>Acanthopagrus akazakii</i>				
	<i>Upeneus vittatus</i>				
Crabe	<i>Scylla serrata</i>				
Bivalves	<i>Geloina bengalensis, n=4</i>				
Huitres	<i>Saccostrea cucullata echinata, n=4</i>				
Poissons	<i>Gerres oyena, n=2</i>	Thio	Kuenthio embouchure	Ultrabasique	+++
	<i>Siganus lineatus</i>				
	<i>Scatophagus argus</i>				
	<i>Cestraeus plicatis</i>				
	<i>Caranx sp (cf. sexfasciatus)</i>				
Poissons	<i>Lutjanus argentimaculatus</i>	Thio/Saint-Philippe	Kuenthio	Ultrabasique	+++
	<i>Kulhia rupestris</i>				
	<i>Oreochromis mossambicus</i>				
	<i>Ophiocara porocephala, n=2</i>				
Poissons	<i>Leiognathus equulus</i>	Thio/Ouroué	Do Thio	Ultrabasique	++
	<i>Megalops cyprinoides</i>				
	<i>Pomadasys argenteus</i>				
Bivalve	<i>Geloina bengalensis</i>				
Poissons	<i>Anguilla marmorata</i>	Thio/Saint-Paul	Kuenthio	Ultrabasique	+
	<i>Scatophagus argus</i>				
	<i>Kulhia rupestris</i>				
	<i>Oreochromis mossambicus</i>				
	<i>Bunaka gyrinoides</i>				
Poissons	<i>Siganus lineatus</i>	Thio	Tôdre embouchure	Ultrabasique	
	<i>Lutjanus argentimaculatus</i>				
	<i>Plectrorhincus gibbosus</i>				
	<i>Anguilla marmorata</i>				
	<i>Kulhia rupestris, n=2</i>				
	<i>Kulhia munda</i>				
	<i>Cestraeus plicatis</i>				
Crevettes	<i>Macrobrachyum lar, n=5</i>	Thio/Kouaré	Xwè Xârâge	Mixte	

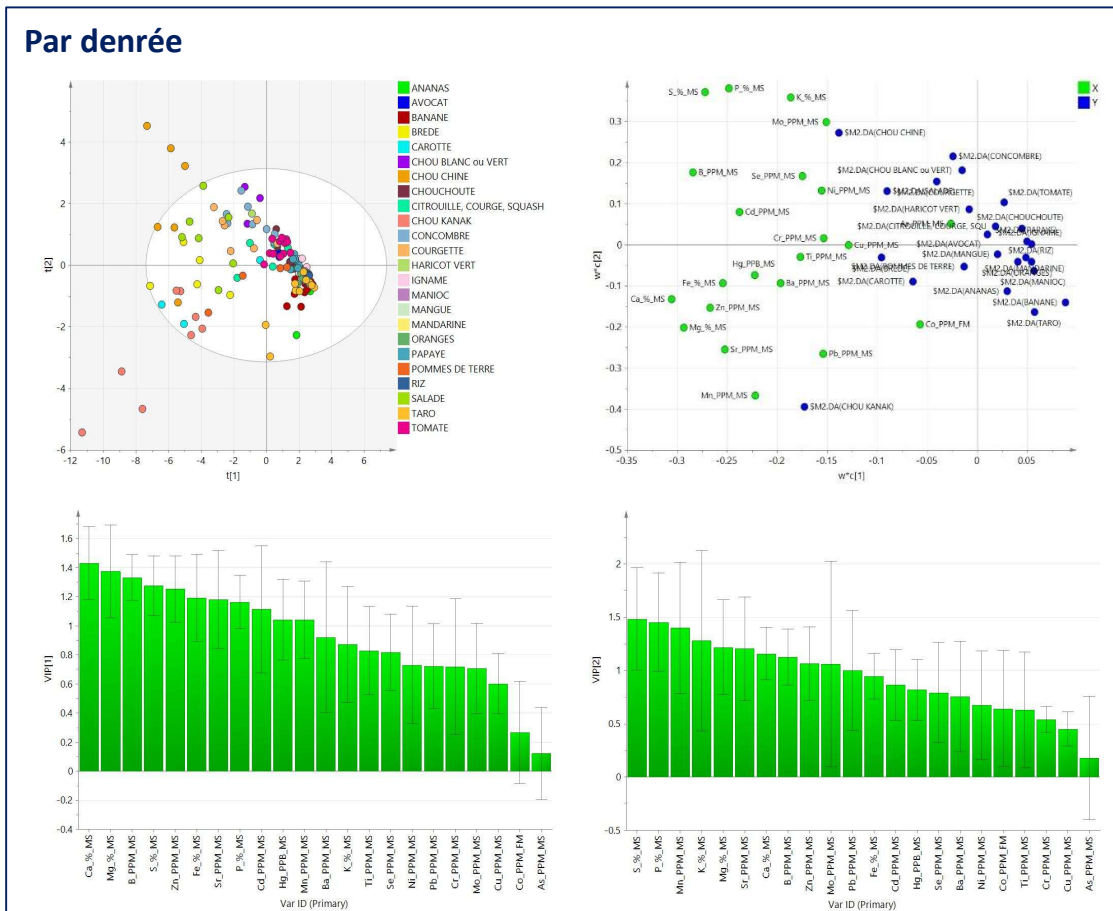
Poissons	<i>Kulhia rupestris</i> , n=4				
	<i>Anguilla marmorata</i> , n=2				
Poissons	<i>Butris amboinensis</i> , n=3	La Foa	La Foa	Volcano-sédimentaire	
	<i>Cestraeus plicatis</i> , n=8				
	<i>Kulhia rupestris</i> , n=7				
	<i>Anguilla marmorata</i> , n=6				
Crevettes	<i>Macrobrachyum lar</i> , n=5	La Foa/Pocquereux	Oua'Pocquereux	Volcano - sédimentaire	
Poissons	<i>Oreochromis mossambicus</i> , n=5	Bourail/Poé	No Koriye	Volcano-sédimentaire	

Annexe A2- Protocole de digestion des denrées carnées, et ovoproduits

Les échantillons sont lyophilisés durant au moins 48h. 500 ± 5 mg d'échantillons sont pesés et placés dans des cupules en téflon. Les échantillons sont mis en contact avec un mélange d'acide nitrique à 70% (9 mL) et de peroxyde d'hydrogène (1 mL) de qualité analytique. Les cupules en téflon sont ensuite fermées hermétiquement et placées sur le carrousel du micro-onde. Les échantillons sont soumis à un cycle de chauffe de 40 min à 210 °C et à 90 bars de pression. Une fois refroidit, les échantillons sont digérés et liquides. Le volume de ces minéralisats est ajusté à 50 mL en fiole jaugée avec de l'eau ultra pure. Ils sont stockés à 4°C en vue des analyses par ICP-MS.

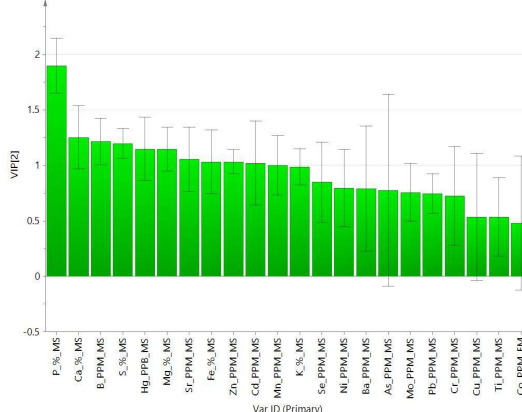
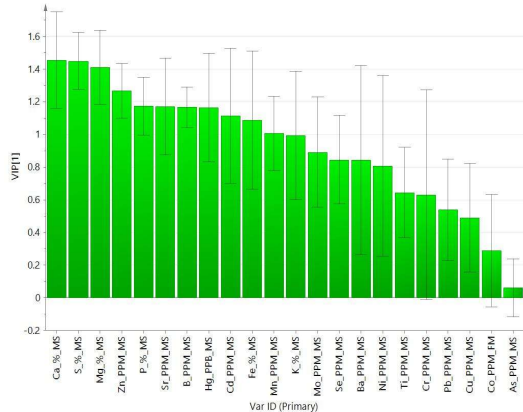
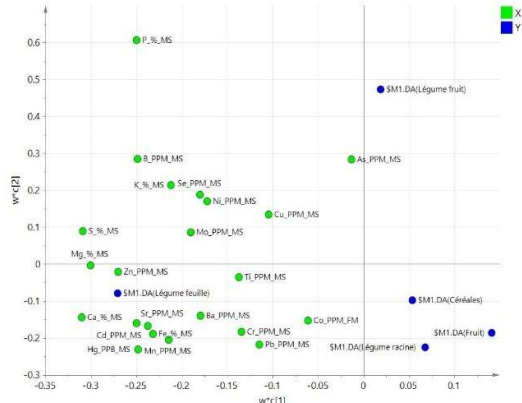
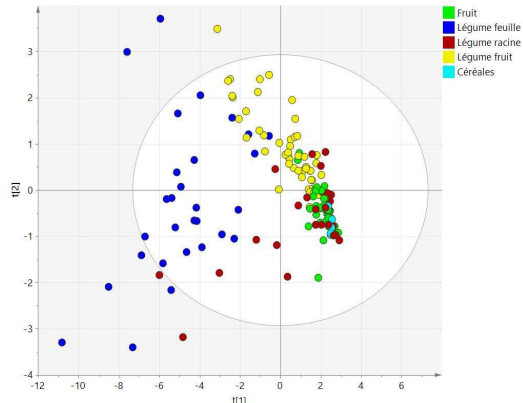
Annexe 3- Résultats des analyses discriminantes par la méthode des moindres carrés (PLS-DA).

Annexe 3.1-

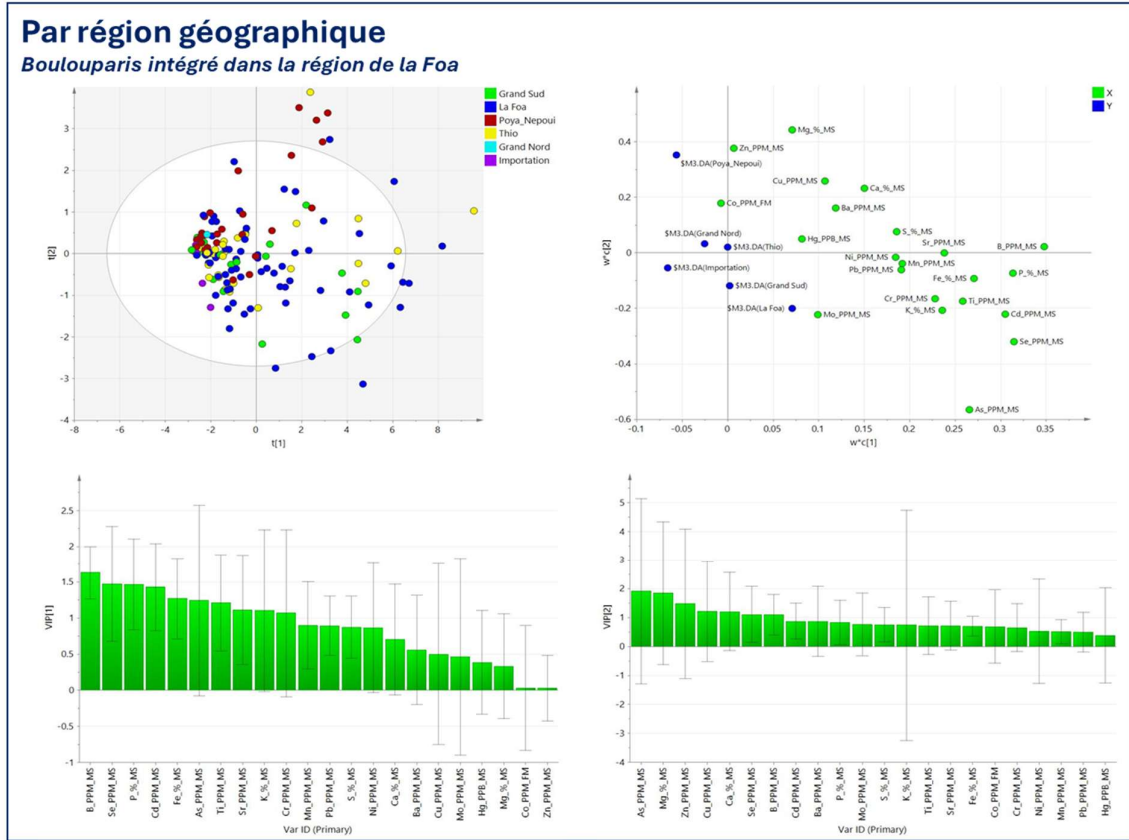


Annexe 3.2-

Par typologie de denrée

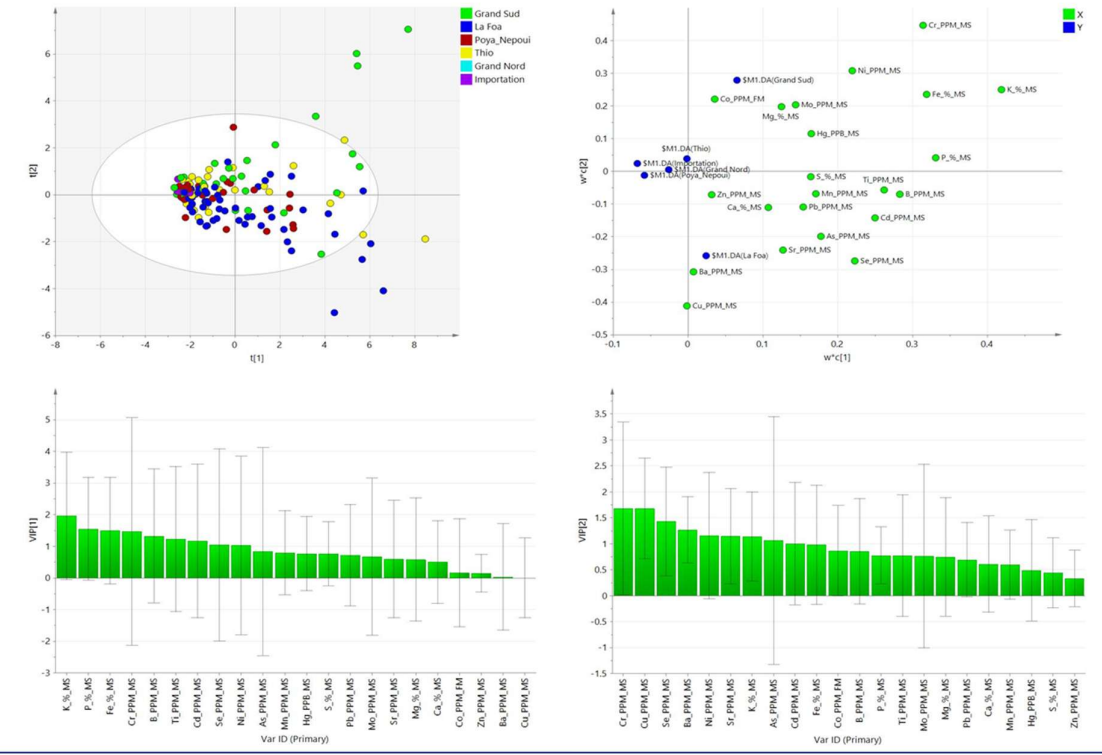


Annexe 3.3-



Annexe 3.4-

Par région géographique
Boulouparis intégré dans la région Grand Sud



Annexe A4- Valeurs des concentrations (en mg.kg⁻¹ MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Cd en fonction du type de milieux et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 0,001 mg/kg.

	N	Moy	sd	Min	Méd	Max	%<LD
Global	87	0,05	0,19	0,01	0,01	1,41	79,3
Tous milieux, poissons	67	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	92,5
Tous milieux, invertébrés	20	0,21	0,36	0,01	0,06	1,41	35,0
Ultramafique, toutes espèces	53	0,08	0,24	0,01	0,01	1,41	66,0
Ultramafique, poissons	38	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	86,8
Ultramafique, poissons mine	16	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	75,0
Ultramafique, poissons pas mine	22	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	95,5
Ultramafique, invertébrés	15	0,27	0,40	0,01	0,12	1,41	13,3
Ultramafique, invertébrés mine	9	0,41	0,47	0,01	0,26	1,41	11,1
Ultramafique, invertébrés pas mine	6	0,06	0,05	0,01	0,06	0,13	16,7
Volcano-sédimentaire, toutes espèces	34	0,01	0	0,01	0,01	0,01	100
Volcano-sédimentaire, poissons	29	0,01	0	0,01	0,01	0,01	100
Volcano-sédimentaire, invertébrés	5	0,01	0	0,01	0,01	0,01	100

Annexe A5- Valeurs des concentrations (en mg.kg⁻¹ MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Pb en fonction du type de milieu et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 0,25 mg/kg.

	N	Moy	sd	Min	Méd	Max	%<LD
Global	87	0,30	0,63	0,13	0,13	5,59	73,1
Tous milieux, poissons	67	0,19	0,17	0,13	0,13	1,13	79,1
Tous milieux, invertébrés	20	0,67	1,22	0,13	0,32	5,59	45
Ultramafique, toutes espèces	53	0,41	0,79	0,13	0,13	5,59	54,7
Ultramafique, poissons	38	0,23	0,21	0,13	0,13	1,13	65,8
Ultramafique, poissons mine	16	0,32	0,28	0,13	0,18	1,13	50
Ultramafique, poissons pas mine	22	0,17	0,10	0,13	0,13	0,47	77,3
Ultramafique, invertébrés	15	0,85	1,38	0,13	0,45	5,59	26,7
Ultramafique, invertébrés mine	9	1,29	1,66	0,35	0,59	5,59	0
Ultramafique, invertébrés pas mine	6	0,19	0,11	0,13	0,13	0,37	66,7
Volcano-sédimentaire, toutes espèces	34	0,13	0,04	0,13	0,13	0,37	97,1
Volcano-sédimentaire, poissons	29	0,13	0,05	0,13	0,13	0,37	89,7
Volcano-sédimentaire, invertébrés	5	0,13	0	0,13	0,13	0,13	100

Annexe A6- Valeurs des concentrations (en mg.kg⁻¹ MS) moyenne, écart-type, minimum, médiane et maximum pour Mn en fonction du type de milieu et catégories d'espèces. Le %<LD indique le pourcentage d'individus dont les concentrations étaient sous la limite de quantification de 2,3 mg/kg.

	N	Moy	E-type	Min	Méd	Max	%<LD
Global	87	5,85	13,83	1,15	1,15	89,85	80,5
Tous milieux, poissons	67	1,27	0,67	1,15	1,15	5,42	97
Tous milieux, invertébrés	20	21,20	23,28	1,15	14,33	89,85	25
Ultramafique, toutes espèces	53	8,81	17,12	1,15	1,15	89,85	69,8
Ultramafique, poissons	38	1,35	0,88	1,15	1,15	5,42	94,7
Ultramafique, poissons mine	16	1,42	1,07	1,15	1,15	5,42	93,8
Ultramafique, poissons pas mine	22	1,31	0,75	1,15	1,15	4,65	95,5
Ultramafique, invertébrés	15	27,70	23,53	1,15	17,82	89,85	6,7
Ultramafique, invertébrés mine	9	38,64	24,46	8,52	38,73	89,85	0
Ultramafique, invertébrés pas mine	6	11,29	7,40	1,15	12,78	21,69	16,7
Volcano-sédimentaire, toutes espèces	34	1,23	0,47	1,15	1,15	3,87	97,1
Volcano-sédimentaire, poissons	29	1,15	0	1,15	1,15	1,15	100
Volcano-sédimentaire, invertébrés	5	1,69	1,22	1,15	1,15	3,87	80

Références bibliographiques

- ADEME (2017). Bidar G., Waterlot C., Sahmer K., Pelfrène A., Pourrut B., Schwartz C., Douay F. PhytExPPo : Phytodisponibilité des ETM pour les plantes potagères et extrapolations dans la quantification de l'exposition des consommateurs. Pp. 176.
- Akelele, M.L., Desalegn, S.K., Asfaw, T.B., Assefa, A.G., Alemu, A.K., de Oliveira, R.R. (2022). Research article Heavy metal contents in bovine tissues (kidney, liver and muscle) from Central Gondar Zone, Ethiopia. *Heliyon* 8, e12416.
- Anastácio, M., Marreilha dos Santos, A.P., Aschner, M., Mateus, L. (2018). Determination of trace metals in fruit juices in the Portuguese market. *Toxicology reports* 5, 434-439.
- Anjos, C., Magalhães, M.C.F., Abreu, M.M. (2012). Metal (Al, Mn, Pb and Zn) soils extractable reagents for available fraction assessment: Comparison using plants, and dry and moist soils from the Braçal abandoned lead mine area, Portugal. *Journal of Geochemical Exploration* 113, 45-55.
- Atamaleki, A., Sadani, M., Raofi, A., Miri, A., Bajestani, S., Fakhri, Y., Heidarinejad, Z., Mousavi Khaneghah, A. (2019). The concentration of potentially toxic elements in eggs: A systematic review-meta-analysis and probabilistic health risk assessment. *Trends in Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.003>.
- Augustsson, A., Lundgren, M., Qvarforth, A., Engström, E., Paulukat, C., Rodushkin, I., Moreno-Jiménez, E., Bessley, L., Trakal, L., Hough, R.L. (2023). Urban vegetable contamination - The role of adhering particles and their significance for human exposure. *Science of the Total Environment* 900, 165633.
- Avias, J. (1967). Overthrust structure of the main ultrabasic New Caledonian massives. *Tectonophysics* 4: 531–541.
- Barré, N., Chazeau, J., Jourdan, H. (2010). La faune des milieux sur roches ultramafiques. In: L'Huillier L, Jaffré T, Wulff A, eds. Mines et environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration. Nouméa : Éditions IAC, 105–128.
- Baudrimont, M., Dominique, Y., Feurtet-Mazel A., Gonzalez, P., Gourvès P-Y., Gunkel-Grillon, P., Laporte-Magoni C. Lefrançois, E., Letourneur, Y., Marquié, J., Maury-Brachet R., Monna F., Pasquet C., Rivière, E., Roth, E. (2019) Rapport scientifique final. Programme « Dispersion des métaux de la mine au lagon. CNRT Nickel & son environnement, 192 pages.
- Becquer, T., Boudron, E., L'Huillier, L. (1995). Mobilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie. In *Ecologie des milieux sur roches ultramafiques et sur roches métallifères*. Jaffré, T., Reeves, R.D., and Becquer, T. (Eds).
- Becquer, T., Pétard, J., Duwig, C., Bourdon, E., Moreau, R., Herbillon, A.J. (2001). Mineralogical, chemical and charge properties of geric Ferralsols from New Caledonia. *Geoderma* 103 : 291–306.
- Becquer, T., Quantin, C., Sicot, M., Boudot, J.P. (2003). Chromium availability in ultramafic soils from New Caledonia? *Science of the Total Environment* 301: 251-261.
- Becquer, T., Quantin, C., Rotte-Capet, S., Ghanbaja, J., Mustin, C., Herbillon, A.J. (2006). Sources of trace metals in Ferralsols in New Caledonia. *European Journal of Soil Science* 57: 200–213.
- Becquer, T., Quantin, C., Boudot, J.P. (2010). Toxic levels of metals in Ferralsols under natural vegetation and crops in New Caledonia. *European Journal of Soil Science* 61, 994-1004.
- Becker, W., Jorhem, L., Sundström, B., Grawé, K. P. (2011). Contents of mineral elements in Swedish market basket diets. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(2), 279–287.
- Beyer, W.N., Gaston, G., Brazzle, R., O'Connell Jr, A.F., Audet, D.J. (2007). Deer exposed to exceptionally high concentrations of lead near the Continental Mine in Idaho, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal* 26: 1040-1046.

- Bonnet, X., Briand, M. J., Brischoux, F., Letourneur, Y., Fauvel, T., Bustamante, P. (2014). Anguilliform fish reveal large scale contamination by mine trace elements in the coral reefs of New Caledonia. *Science of the total environment* 470-471: 876–882. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.027>
- Boula, A., Laporte-Magoni, C., Gunkel-Grillon, P., Bour, O., Selmaoui-Folcher, N. (2022) Potential contamination of stream waters by ultramafic mining sediments: Identification of geochemical makers (New Caledonia). *Journal of Geochemical Exploration* 232 : 106879.
- Bourdon, E. (1990a). Observation d'une toposéquence dans le parc naturel de la Rivière Bleue. Nouméa : ORSTOM. 6 p., multigr.10.
- Bourdon, E. (1990b). Variations morphologiques et physico-chimiques d'une parcelle d'expérimentation de la Vallée de la Coulée (Sud de la Nouvelle-Calédonie). Nouméa : ORSTOM. *Conv. : Sci. Vie : Agropbdol.*, 5 : 36p.
- Bourdon, E., Becquer, T. (1992) - Étude de l'organisation pédologique des sols ferrallitiques des massifs du sud de la Grande Terre : zone de La Coulée et de la Lembli. Caractérisation physico-chimique des sols. Nouméa : ORSTOM. *Conv.: Sci. Vie: Ag ropédol.*, 16 ; 88p., multigr.
- Briand, M.J., Letourneur, Y., Bonnet, X., Wafo, E., Fauvel, T., Brischoux, F., Guillou, G., Bustamante, P. (2014). Spatial variability of metallic and organic contamination of anguilliform fish in New Caledonia. *Environmental Science and Pollution Research*, Springer Verlag, 2014, 21 (6): 4576-4591.
- Briand, M.J., Bustamante, P., Bonnet, X., Churlaud, C., Letourneur, Y. (2018). Tracking trace elements into complex coral reef trophic networks. *Science of The Total Environment* 612 : 1091–1104. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.257>.
- Bustamante, P., Grigioni, S., Boucher-Rodoni, R., Caurant, F., Miramand, P. (2000). Bioaccumulation of 12 Trace Elements in the Tissues of the Nautilus Nautilus macromphalus from New Caledonia. *Marine Pollution Bulletin* 40 : 688–696. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00005-9)
- Carriconde, F., Gardes, M., Bellanger, J.M., Letellier, K., Gigante, S., Gourmelon, V., Ibanez, T., McCoy, S., Goxe, J., Read, J., Maggia, L. (2019). Host effects in high ectomycorrhizal diversity tropical rainforests on ultramafic soils in New Caledonia. *Fungal Ecology* 39: 201–212.
- Cheng, J., Ding, C., Li, X., Zhang, T., Wang, X. (2015). Heavy metals in navel orange orchards of Xinfeng County and their transfer from soils to navel oranges. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 122: 153-158.
- Cherfi, A., Abdoun, S., Gaci, O. (2014). Food survey: levels and potential health risks of chromium, lead, zinc and copper content in fruits and vegetables consumed in Algeria. *Food and Chemical Toxicology*, 70, 48–53.
- Cherfi, A., Cherfi, M., Maache-Rezzoug, Z., Rezzoug, S.-A. (2016). Risk assessment of heavy metals via consumption of vegetables collected from different supermarkets in La Rochelle, Franc. *Environmental Monitoring and Assessment* 188:136.
- Ciobanu, M.M., Munteanu, M., Postolache, A.N., Boisteanu, P.C. (2020). Toxic heavy metals content in wild boar and venison meat: a brief review. *Scientific Papers. Series D. Animal Science. Vol. LXIII, No. 1, 2020*.
- Cordier, S., Barguil, Y., Dominique, Y., St-Jean, A., Mengant, S., Le Bot, B., et al. 2017. Niveaux d'imprégnation et déterminants de l'exposition humaine aux métaux en nouvelle-calédonie (metexpo). (CNRT « Nickel et son environnement »).
- Counotte, G., Holzhauser, M., Carp-van Dijken, S., Muskens, J., Van der Merwe, D. (2019). Levels of trace elements and potential toxic elements in bovine livers: A trend analysis from 2007 to 2018. *PLoS ONE* 14(4): e0214584. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214584>
- Cluzel, D., Meffre, S., Maurizot, P., Crawford, A.J. (2006). Earliest Eocene (53 Ma) convergence in the Southwest Pacific: evidence from pre-obduction dikes in the ophiolite of New Caledonia: earliest Eocene (53 Ma) convergence in the Southwest Pacific. *Terra Nova* 18 : 395–402.
- Cluzel, D., Chiron, M.D., Courme, M.D. (1998). Upper Eocene unconformity and pre-obduction events in New Caledonia. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences. Science de la terre et des planètes* 327 : 485–491.

- Douay, F., Pelfrène, A., Planque, J., Fourrier, H., Antoine Richard, A., Roussel, H., Girondelot, B., (2013). Assessment of potential health risk for inhabitants living near a former lead smelter. Part 1: metal concentrations in soils, agricultural crops, and homegrown vegetables. *Environmental Monitoring and Assessment* 185(5): 3665-3680. doi: 10.1007/s10661-012-2818-3.
- Dublet, G., Juillot, F., Morin, G., Fritsch, E., Fandeur, D., Ona-Nguema, G., Brown Jr., G.E. (2012). Ni speciation in a New Caledonian lateritic regolith: a quantitative X-ray absorption spectroscopy investigation. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 95: 119-133.
- Dublet, G., Juillot, F., Morin, G., Fritsch, E., Fandeur, D., Brown Jr., G.E. (2015). Goethite aging explains Ni depletion in upper units of ultramafic lateritic cores from New Caledonia. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 160: 1-15.
- Dublet, G., Juillot, F., Brest, J., Noël, V., Fritsch, E., Proux, O., Olivi, L., Ploquin, F. Morin, G. (2017). Vertical changes of the Co and Mn speciation along a lateritic regolith developed on peridotites (New Caledonia). *Geochimica and Cosmochimica Acta* 217: 1-15.
- Dubus, I.G., and Becquer, T. (2001). Phosphorus sorption and desorption in oxide-rich Ferralsols of New Caledonia. *Australian Journal of Soil Research* 39 : 403–414.
- Dupont, S., Bonzon, B. (1996) mise en valeur des sols dérivés des massifs ultrabasiques du sud de la Nouvelle-Calédonie. Enquête sur le statut des nutriments et des métaux lourds chez les végétaux cultivés sur différents faciès ferritiques. 7. Bilan complet de quatre années d'enquêtes, 45. Nouméa (NCL) : ORSTOM (Sciences de la Vie. Agropédologie. Conventions (NCL)), 1998.
- Dupont, S., L'Huillier, L., Laubreaux, P., Bonzon B., Ouckewen, J., Taputuarai L., Nigote, W., Barreteau R., Souète, G. (2000). Mise en valeur des sols dérivés des massifs ultrabasiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie : rapport final, 52. Nouméa (NCL) : IRD (Sciences de la Vie. Agropédologie. Conventions (NCL)).
- Edighoffer, S., and Bourdon, E. (1994). Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du sud de la Nouvelle-Calédonie. Enquête sur le statut des nutriments et des métaux lourds chez les végétaux cultivés sur différents faciès ferritiques. *Agropédologie* N°27. ORSTOM.
- Emami, M.H., Saberi, F. Mohammadzadeh, S., Fahim, A., Abdolvand, M., Ali Ehsan Dehkordi, S., Mohammadzadeh, S., Maghool, F. (2023). A review of Heavy Metals Accumulation in Red Meat and Meat Products in the Middle East. *Journal of Food Protection* 86 (3), 100048.
- Fey, P., Bustamante, P., Bosserelle, P., Espiau, B., Malau, A., Mercader, M., Wafo, E., Letourneur, Y. (2019) Does trophic levels drive organic and metallic contamination in coral reef food webs? *Science of the Total Environment*, 667: 208-221.
- Fritsch, E. (2012). Les sols. In: Bonvallet J, Gay JC, Habert E, eds. Atlas de la Nouvelle-Calédonie. Marseille : IRD Editions : 73–76.
- Fry, K.L., Gillings, M.M., Isley, C.F., Gunkel-Grillon, P., Taylor, M.P. (2021). Trace element contamination of soil and dust by a New Caledonian ferronickel smelter: Dispersal, enrichment, and human health risk. *Environmental Pollution* 288 : 117593.
- Garcin, M., Richard, D., Liébault, F., Recking, A., Piton, G., Sabinot, C., Worliczek, E., Lesimple, S., Bertrand, M., GastaLOQi, Y., Burlat, T., Gosset, L., Pidjo, A.-T. (2017). Gestion du passif de l'activité minière. Rapport scientifique. [Rapport de recherche] Programme Gestion du passif. Tome Nickel et Environnement, CNRT Nickel et son environnement : 123 p. ird-01934436v2.
- Gei, V., Isnard, S., Erskine, P.D., Echevarria, G., Fogliani, B., Jaffré, T., van der Ent, A. (2020). A systematic assessment of the occurrence of trace element hyperaccumulation in the flora of New Caledonia. *Botanical Journal of the Linnean Society* 194 : 1–22, <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boaa029>.
- Germande, O., Gunkel-Grillon, P., Dominique, Y., Feurtet-Mazel A., Bierque E., Dassi E., Daffe G., Pierron F., Baudrimont, I., Baudrimont, M. (2022) Impact of nickel mining in New Caledonia on marbled eels *Anguilla marmorata*, *Journal of Hazardous Materials* 436: 129285.

- Green, R., Taggart, M., Pain, D., Smithson, K. (2022). Implications for food safety of the size and location of fragments of lead shotgun pellets embedded in hunted carcasses of small game animals intended for human consumption. *PLoS One* 17 : e0268089.
- Grembecka, M., and Szefer, P. (2013). Comparative assessment of essential and heavy metals in fruit from different geographical origins. *Environmental Monitoring and Assessment* 185: 9193-9160.
- Gunkel-Grillon, P., Laporte-Magoni, C., Lemestre, M., Bazire, N. (2014) Toxic chromium release from nickel mining sediments in surface waters, New Caledonia. *Environmental Chemistry Letters* 12 : 511-516
- Guyard, S., Apithy, L., Bouard, S., Sourisseau, J-M., Passouant, M., Bosc, P-M., Bélières, J-F. (2014). L'agriculture des tribus en Nouvelle-Calédonie Résultats d'une enquête de 2010 sur la place et les fonctions de l'agriculture, l'élevage, la pêche et la chasse pour les groupes domestiques résidant en tribu. IAC/CIRAD. Pouembout.
- Hashemi, M. (2018). Heavy metal concentrations in bovine tissues (muscle, liver and kidney) and their relationship with heavy metal contents in consumed feed. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 5: 154:263-267. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.02.058.
- Hédouin, L., Pringault, O., Metian, M., Bustamante, P., Warnau, M. (2007). Nickel bioaccumulation in bivalves from the New Caledonia lagoon: Seawater and food exposure. *Chemosphere* 66: 1449–1457. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.015>
- Hédouin, L., Bustamante, P., Churlaud, C., Pringault, O., Fichez, R., Warnau, M. (2009). Trends in concentrations of selected metalloid and metals in two bivalves from the coral reefs in the SW lagoon of New Caledonia. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72: 372–381. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.04.004>
- Hédouin, L., Metian, M., Lacoue-Labarthe, T., Fichez, R., Teyssié, J.L., Bustamante, P., Warnau M. (2010). Influence of food on the assimilation of selected metal in tropical bivalves from the New Caledonia lagoon: qualitative and quantitative aspects. In: Grenz Christian (ed.), Le Borgne R. (ed.). *New Caledonia tropical lagoons: an overview of multidisciplinary investigations. Marine Pollution Bulletin*, 61 (7-12), p. 568-575. ISSN 0025-326X.
- Hédouin, L., Pringault, O., Bustamante, P., Fichez, R., Warnau, M. (2011). Validation of two tropical marine bivalves as bioindicators of mining contamination in the New Caledonia lagoon: Field transplantation experiments. *Water Research* 45: 483-496.
- Houlès, A., Vincent, B., David, M., Ducouso, M., Galiana, A., Juillot, F., Hannibal, L., Carriconde, F., Fritsch, E., Jourand, P. (2018). Ectomycorrhizal communities associated with the legume *Acacia spirorbis* growing on contrasted edaphic constraints in New Caledonia. *Microbial Ecology* 76: 964–975.
- Hu, Y., Zhang, W., Chen, G., Cheng, H., Tao, S. (2018). Public health risk of trace metals in fresh chicken meat products on the food markets of a major production region in Southern China. *Environmental Pollution* 34 : 667-676.
- Isnard, S., L'Huillier, L., Rigault, F., Jaffré, T. (2016). How did the ultramafic soils shape the flora of the New Caledonian hotspot? *Plant and Soil* 403 : 53-76.
- Jaffré, T., Latham, M. (1974). Contributions à l'étude des relations sol-végétation sur un massif de roches ultrabasiqes de la côte ouest de la Nouvelle-Calédonie : le Boulinda. *Adansonia* 14 : 311–336.
- Jaffré, T., Latham, M., Schmid, M. (1977). Aspects de l'influence de l'extraction du minerai de nickel sur la végétation et les sols en Nouvelle-Calédonie. *Cahiers ORSTOM, série Biologie* 12 : 307–327.
- Jaffré, T. (1980). Étude écologique du peuplement végétal des sols dérivés de roches ultrabasiqes en Nouvelle-Calédonie. Paris : ORSTOM.
- Jaffré, T., Bouchet, P., Veillon, J.M. (1998a). Threatened plants of New Caledonia: is the system of protected areas adequate? *Biodiversity and Conservation* 7 : 109–135.
- Jaffré, T., Rigault, F., Dagostini, G. (1998b). Impact des feux de brousse sur les maquis ligno-herbacés des roches ultrabasiqes de Nouvelle-Calédonie. *Adansonia* 20: 173–189.

- Jaffré, T., Munzinger, J., Lowry, P.P. (2010). Threats to the conifer species found on New Caledonia's ultramafic massifs and proposals for urgently needed measures to improve their protection. *Biodiversity and Conservation* 19: 1485–1502.
- Jaffré, T., Pillon, Y., Thomine, S., Merlot, S. 2013. The metal hyperaccumulators from New Caledonia can broaden our understanding of nickel accumulation in plants. *Frontiers in Plant Science* 4: 279.
- Johnston, H., Beasley, L., MacPherson, N. (2014). Copper toxicity in a New Zealand dairy herd. *Irish Veterinary Journal* 67: 20.
- Kamal, H.F., and Sharkawy, A.A. (2023). Health risk assessment of metals in chicken meat and liver in Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment* 195: 802. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11365-9>.
- Klein, P., Gunkel-Grillon, P., Juillot, F., Kaplan, H., Pain, A. Feder, F., Léopold, A. (2023b). Addition of compost to soils increases metal mobility in ultramafic New Caledonian ferralsols. *Environmental Chemistry Letters* <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01650-x>.
- Klein, P., Gunkel-Grillon, P., Juillot, F., Feder, F., Kaplan, H., They, G., Pain, A., Bloc, M., Léopold, A. (2023a). Behavior of trace metals during composting of mixed sewage sludge and tropical green waste: a combined EDTA kinetic and BCR sequential extraction study in New Caledonia. *Environmental monitoring and assessment* <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11151-7>.
- Lagrange, A., Ducouso, M., Jourand, P., Majorel, C., Amir, H. (2011). New insights into the mycorrhizal status of Cyperaceae from ultramafic soils in New Caledonia. *Canadian Journal of Microbiology* 57 : 21–28.
- Latham M. (1986). Altération et pédogénèse sur roches ultrabasiqes en Nouvelle-Calédonie. Genèse et évolution des accumulations de fer et de silice en relation avec la formation du modelé. Paris : ORSTOM.
- Latham, M., Quantin, P., Aubert, G. (1978). Étude des sols de la Nouvelle-Calédonie. Carte pédologique et d'aptitudes culturales et forestières des sols à l'échelle du 1/ 1 000 000 ième.
- Latham, M., Mercky, P. (1981). Étude des sols des Iles Loyauté. Carte des sols et carte d'aptitude culturale et forestière. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer : 99.
- Letourneur, Y. (2020) Étude de la contamination des récifs coralliens par les polluants : un outil d'aide à la gestion de la ressource et d'information des populations. Rapport final projet COREPO, UNC - Fonds Pacifique, 103 pages.
- Letourneur, Y., Barguil, Y., Boher, L., Brunet, N., Bustamante, P., Fey, P., Vidal, E., Wafo, E. (2022) Recherche des polluants émergents, polluants organiques et métaux lourds et leur devenir dans les écosystèmes récifolagoneaires. Rapport final du projet « PEMPOM », CRESICA, 26 pp.
- L'Huillier, L., Edighoffer S. (1996). Extractability of nickel and its concentration in cultivated plants in Ni rich ultramafic soils of New Caledonia. *Plant and Soil* 186 : 255–264.
- L'Huillier, L., Jaffré, T., Wulff, A. (2010). Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration. Nouméa : Editions IAC.
- Lopez-Alonso, M., and Miranda, M. (2020). Copper supplementation, a challenge in cattle. *Animals* 10(10):1890.
- Losfeld, G., L'Huillier, L., Fogliani, B., Coy, S.M., Grison, C., Jaffré, T. (2015). Leaf-age and soil-plant relationships: key factors for reporting trace-elements hyperaccumulation by plants and design applications. *Environmental Science and Pollution Research* 22 : 5620–5632.
- Marchand, C., Fernandez, J.M., Moreton, B., Landi, L., Lallier-Verges, E., Baltzer, F. (2012). The partitioning of transitional metals (Fe, Mn, Ni, Cr) in mangrove sediments downstream of a ferralitized ultramafic watershed (New Caledonia). *Chemical Geology* 300 : 70-80.
- Marchand, C., Fernandez, J.M., Moreton, B. (2016). Trace metal geochemistry in mangrove sediments and their transfer to mangrove plants (New Caledonia). *Science of the Total Environment* 562, 216-227.

- Parinet, J., Royerb, E., Saint-Hilaire, M., Chafeya, C., Noël, L., Minvielled, B., Dervilly-Pinele, G., Englef, E., Guérin, T. (2018). Classification of trace elements in tissues from organic and conventional French pig production. *Meat Science* 141, 28-35.
- Metian, M., Bustamante, P., Hédouin, L., Warnau, M. (2008). Accumulation of nine metals and one metalloid in the tropical scallop *Comptopallium radula* from coral reefs in New Caledonia. *Environmental Pollution* 152 : 543-552.
- Metian, M., Hédouin, L., Lacoue-Labarthe, T., Eltayeb, M.M., Teyssié, J.-L., Mugnier, C., Warnau, M. (2010). Metal and metalloid bioaccumulation in the Pacific blue shrimp *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson) from New Caledonia: laboratory and field studies. *Marine Pollution Bulletin* 61(7-12) : 576-584.
- Metian, M., Warnau, M., Chauvelon, T., Pedraza, F., Rodriguez y Baena, A.M., Bustamante, P. (2013). Trace element bioaccumulation in reef fish from New Caledonia: Influence of trophic groups and risk assessment for consumers. *Marine Environmental Research* 87–88 : 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.03.001>.
- Micó, C., Recatalá, L., Peris, M., Sánchez, J. (2006). Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere* 65 (5) : 863-8720.
- Nabulo, G., Young, S.D., Black, C.R. (2010). Assessing risk to human health from tropical leafy vegetables grown on contaminated urban soils. *Science of the Total Environment* 1408(22):5338-5351.
- Neves, M.O., Figueiredo, V.R. Abreu, M.M. (2012). Transfer of U, Al and Mn in the water–soil–plant (*Solanum tuberosum* L.) system near a former uranium mining area (Cunha Baixa, Portugal) and implications to human health. *Science of the Total Environment* 416 : 156-163.
- Nkosi, D.V., Bekker, J.L., Hoffman, L.C. (2021). Toxic Metals in Wild Ungulates and Domestic Meat Animals Slaughtered for Food Purposes: A Systemic Review. *Foods* 10 : 2853. <https://doi.org/10.3390/foods10112853>.
- Nkosi, D.V., Bekker, J.L., Hoffman, L.C. (2022). Toxic Metals in Meat contributed by Helicopter and Rifle Thoracic Killing of Game Meat Animals. *Appliedsciences* 12 : 8095. <https://doi.org/10.3390/>
- Noel, V., Juillot, F., Morin, G., Marchand, C., Ona-Nguema, G., Viollier, E., Prevot, F., Dublet, G., Maillot, F., Delbes, L., Marakovic, G., Bargar, J.R., Brown, Jr. G.E. (2017). Oxidation of Ni-rich mangrove sediments after isolation from the sea (Dumbea Bay, New Caledonia) : Fe and Ni behavior and environmental implications. *ACS Earth and Space Chemistry* 1 : 455-464.
- Pasquet, C., Le Monier, P., Monna, F., Durlet, C., Brigaud, B., Losno, R., Château, C., Laporte-Magoni, C., Gunkel-Grillon, P. (2016) Impact of nickel mining in New Caledonia assessed by compositional data analysis of lichens. *Springer Plus* 5: 2022.
- Pasquet C., Monna F., van Oort F., Gunkel-Grillon P., Laporte-Magoni C., Losno R., Château C. (2018) Mobility of Ni, Co, and Mn in ultramafic mining soils of New-Caledonia assessed by kinetic EDTA extractions. *Environmental Monitoring and Assessment* 190: 638.
- Pennington, J. A. T., and Young, B. (1990). Iron, zinc, copper, manganese, selenium, and iodine in foods from the United States total diet study. *Journal of Food Composition and Analysis*, 3(2), 166–184.
- Pernice, M., Boucher, J., Boucher-Rodoni, R., Joannot, P., Bustamante, P. (2009). Comparative bioaccumulation of trace elements between *Nautilus pompilius* and *N. macromphalus* (Cephalopoda: Nautiloidea) from Vanuatu and New-Caledonia. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72 (2) : 365- 371.
- Pillon, Y., González, D.A., Randriambanona, H., Lowry, P.P., Jaffré, T., Merlot, S. (2019). Parallel ecological filtering of ultramafic soils in three distant island floras. *Journal of Biogeography* 46 : 2457–2465.
- Quantin, C., Berthelin, J. (2001). Oxide weathering and trace metal release by bacterial reduction in a New Caledonia Ferralsol. *Biogeochemistry* 53 : 323-340.
- Quantin, C., Becquer, T., Rouiller, J.H., Berthelin, J. (2002). Redistribution of metals in a New Caledonia ferralsol after microbial weathering. *Soil Science Society of America Journal* 66 : 1797-1804.

- Read, J., Jaffré, T., Ferris, J.M., McCoy, S., Hope, G.S. (2006). Does soil determine the boundaries of monodominant rain forest with adjacent mixed rain forest and maquis on ultramafic soils in New Caledonia? *Journal of Biogeography* 33 : 1055–1065.
- Reid, T.C., McAllum, H.J.F., Johnston, P.D. (1980). Liver copper concentrations in red deer (*Cervus elaphus*) and wapiti (*C. canadensis*) in New Zealand. *Research in Veterinary Science* 28: 261-262.
- Roba, C., Rosu, C., Pistea, I., Ozunu, A., Baciuc, C. (2016). Heavy metal content in vegetables and fruits cultivated in Baia Mare mining area (Romania) and health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research* 23 : 6062-6073.
- Rodriguez-Marin, N., Hardisson, A., Gutiérrez, A.J., Luis-Gonzales, G., Gonzales-Weller, D., Rubio, C., Pas, S. (2019). Toxic (Al, Cd, and Pb) and trace metal (B, Ba, Cu, Fe, Mn, Sr, and Zn) levels in tissues of slaughtered steers : risk assessment for the consumers. *Environmental Science and Pollution Research* 26 : 28787-28795.
- Roth E.; Burgalat J.; Riviere E.; Zaiter M.; Chakir A.; Pasquet C.; Gunkel-Grillon P. (2020) Nickel spreading assessment in New Caledonia by lichen biomonitoring coupled to air masses history. *Environmental Science and Pollution Research* 28 : 6058-6067.
- Roychowdhury, T., Tokunaga, H., & Ando, M. (2003). Survey of arsenic and other heavy metals in food composites and drinking water and estimation of dietary intake by the villagers from an arsenic-affected area of West Bengal, India. *Science of the Total Environment*, 308(1), 15–35.
- Samsøe-Petersen, L., Larsen, E.H., Larsen, P.B., Bruun, P., (2002). Uptake of Trace Elements and PAHs by Fruit and Vegetables from Contaminated Soils. *Environ. Science & Technology* 36 : 3057–3063. <https://doi.org/10.1021/es015691t>.
- Schneider, K., Le Mestre, M., Desrioux, I., Gunkel-Grillon, P. (2020). Occurrence of arsenic in ultramafic rocks laterites from nickel mines in new caledonia: Implications for the contamination of surface waters. *Environmental Chemistry Letters* 18 :1397-1402.
- Song, B., Lei, M., Chen, T., Zheng, Y., Xie, Y., Li, X., Gao, D. (2009). Assessing the health risk of heavy metals in vegetables to the general population in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 21(12), 1702–1709.
- Spears, H.X., Brandao, V.L.N., Heldt, J. (2022). Invited Review: Assessing trace mineral status in ruminants, and factors that affect measurements of trace mineral status. *Applied Animal Science* 38(3) :252-267.
- Strickland, J.M., Herdt, T.H., Sledge, D.G., Buchweitz, J.P. (2019). *Short communication*: Survey of hepatic copper concentrations in Midwest dairy cows. *Journal of Dairy Science* 102 : 4209–4214. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15566>
- St-Jean, A., Barguil, Y., Dominique, Y., Le Bot, B., Ayotte, P., Cordier S. (2018). Nickel and associated metals in new caledonia: Exposure levels and their determinants. *Environment International* 118 : 106-115.
- Truong, T., Rougier, Y., Dubourdieu, D., Guihenneuc-Jouyau, C., Orsi, L., Hemon, D., Guénel, P. (2007). Time trends and geographic variations for thyroid cancer in new caledonia, a very high incidence area (1985-1999). *European Journal of Cancer Prevention* 16 : 62-70.
- von Hoffen, L.P., and Säumel, I. (2016). Orchards for edible cities: cadmium and lead content in nuts, berries, pome and stone fruits harvested within the inner-city neighbourhoods in Berlin, Germany. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 101 : 233-239.
- Waegeneers, N., Pizzolon, J.C., Hoenig, M., De Temmerman, L. (2009). Accumulation of trace elements in cattle from rural and industrial areas in Belgium. *Food Additives & Contaminants* 26 : 326-332.
- Wulff, A.S., Hollingsworth, P.M., Ahrends, A., Jaffré, T., Veillon, J.M., L'Huillier, L., Fogliani, B. (2013). Conservation priorities in a biodiversity hotspot: analysis of narrow endemic plant species in New Caledonia. *PLOS One* 8 : e73371.

- Wulff, A.S., Hollingsworth, P.M., Piquet, M., Ahrends, A., L'Huillier, L., Fogliani B. (2017). High levels of population differentiation in two New Caledonian *Scaevola* species (Goodeniaceae) and its implications for conservation prioritisation and restoration. *Australian Journal of Botany* 65 : 140.
- Xiong, T.T, Leveque, T., Austruy, A., Goix, S., Schreck, E., Dappe, V., Sobanska, S., Foucault, Y., Dumat, C. (2014). Foliar uptake and metal(loid) bioaccessibility in vegetables exposed to particulate matter. *Environmental Geochemistry and Health* 36 : 897-909
- Xiong, T.T, Dumat, C., Pierart, A., Shadid, M., Kang, Y., Li, N., Bertoni, G., Laplanche, C. (2016). Measurement of metal bioaccessibility in vegetables to improve human exposure assessments: fieLOQ study of soil–plant–atmosphere transfers in urban areas, South China. *Environmental Geochemistry and Health* 38 : 1283-1301.