

Rapport Scientifique

2025

EXPOSITION ENVIRONNEMENTALE AUX METAUX EN
NOUVELLE-CALÉDONIE : DETERMINANTS,
INCIDENCE DES CANCERS ET EVALUATION DU
RISQUE SANITAIRE

RAPPORT FINAL



*Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche et d'innovation financés par
le CNRTEC- Centre du Nickel, Recherche Technologie Environnement Compétitivité*



Avec la participation de :



« EXPOSITION ENVIRONNEMENTALE AUX METAUX EN NOUVELLE-CALEDONIE : DETERMINANTS, INCIDENCE DES CANCERS ET EVALUATION DU RISQUE SANITAIRE »

Rapport final

Décembre 2025

Ouvrage collectif coordonné par Pascal GUÉNEL (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (Inserm) – Centre de recherche en Épidémiologie et Santé des Populations (CESP))

Pour le consortium Inserm - INSPQ

AUTEURS :

Pascal GUÉNEL (Inserm – CESP)

Émilie CORDINA-DUVERGER (Inserm – CESP)

Elodie FAURE (Inserm – CESP)

Antouria MOHAMED (Inserm – CESP)

Thérèse TRUONG (Inserm – CESP)

Sylvaine CORDIER (Inserm – IRSET)

Pierre AYOTTE (INSPQ)

REVISION DU DOCUMENT

Réf.	CSF N° 3PS2020-CNRT.INSERM/METALICA-Sante du 20/09/21			
Version	Date	Rédacteur(s)	Qualité du rédacteur(s)	Révision pour CNRTEC
V1	15/12/2025	Pascal GUENEL	Coordinateur du programme ou autre qualité	Médéric SUON – Manager des programmes

CITATION DU DOCUMENT

Mots clés : Chrome, Nickel, Cobalt, Manganèse, Expositions environnementales, Système d'Information Géographique, Pédologie, Occupation du sol, captages, transport aérien, concentrations urinaires, cancer, incidence, évaluation des risques

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

P. Guenel, E. Cordina-Duverger, E. Faure, A. Mohamed, T. Truong, S. Cordier, P. Ayotte GUÉNEL (2025) – *Rapport Metalica Santé*. CNRTEC, 67 pages.

TABLE DES MATIERES

1. SYNTHÈSE NON TECHNIQUE.....	9
2. INTRODUCTION ET OBJECTIFS DE METALICA SANTE.....	10
2.1. OBJECTIFS GÉNÉRAUX.....	10
2.2. PLAN DU RAPPORT.....	10
3. DETERMINANTS DE LA CONTAMINATION PAR LES METAUX.....	11
3.1. DONNÉES MISES A DISPOSITION DANS LE CADRE DU PROJET.....	12
3.1.1. <i>Données d'imprégnation par les ETM dans la population de NC.....</i>	<i>12</i>
3.1.2. <i>Données disponibles sur le compartiment SOL.....</i>	<i>14</i>
3.1.3. <i>Données sur le compartiment EAU.....</i>	<i>14</i>
3.1.4. <i>Données sur le compartiment AIR.....</i>	<i>18</i>
3.2. DEVELOPPEMENT D'INDICATEURS D'EXPOSITION AUX ETM.....	19
3.2.1. <i>Indicateurs d'exposition SOL.....</i>	<i>19</i>
3.2.2. <i>Indicateurs d'exposition EAU.....</i>	<i>20</i>
3.2.3. <i>Indicateurs d'exposition AIR.....</i>	<i>23</i>
3.3. DETERMINANTS DES CONCENTRATIONS URINAIRES EN ETM.....	25
3.3.1. <i>Description des modèles de régression.....</i>	<i>25</i>
3.3.2. <i>Résultats des modèles de régression SOL.....</i>	<i>27</i>
3.3.3. <i>Résultats des modèles de régression EAU.....</i>	<i>28</i>
3.3.4. <i>Résultats des modèles de régression AIR.....</i>	<i>29</i>
3.3.5. <i>Modèles de régression multivariés SOL-AIR-EAU.....</i>	<i>30</i>
3.3.5.1. <i>Modèles de régression multivariés SOL et AIR (732 sujets).....</i>	<i>30</i>
3.3.5.2. <i>Modèles de régression combinés SOL-EAU-AIR (581 sujets).....</i>	<i>31</i>
3.4. DISCUSSION SUR LES DETERMINANTS DE LA CONTAMINATION PAR LES ETM.....	32
3.4.1. <i>Synthèse des principaux résultats.....</i>	<i>32</i>
4. INCIDENCE DES CANCERS ET EXPOSITION AUX ETM.....	35
4.1. INCIDENCE DES CANCERS PAR COMMUNE.....	35
4.1.1. <i>Données utilisées.....</i>	<i>35</i>
4.1.1.1. <i>Registre des cancers.....</i>	<i>35</i>
4.1.1.2. <i>ISEE.....</i>	<i>38</i>
4.1.2. <i>Calcul du SIR « lissé ».....</i>	<i>39</i>
4.1.3. <i>Résultats.....</i>	<i>40</i>
4.1.3.1. <i>Cancer du poumon.....</i>	<i>40</i>
4.1.3.2. <i>Cancer de la thyroïde.....</i>	<i>41</i>
4.1.3.3. <i>Cancer colorectal.....</i>	<i>42</i>
4.1.3.4. <i>Cancer de la sphère ORL.....</i>	<i>43</i>
4.1.3.5. <i>Cancer du sein.....</i>	<i>44</i>
4.1.3.6. <i>Cancers de la prostate.....</i>	<i>45</i>
4.1.3.7. <i>Conclusion sur les SIR.....</i>	<i>48</i>
4.2. SCORES D'EXPOSITION PAR COMMUNE.....	48
4.2.1. <i>Données utilisées.....</i>	<i>48</i>
4.2.2. <i>Méthode de calcul du score d'exposition par commune.....</i>	<i>49</i>
4.2.3. <i>Résultats.....</i>	<i>49</i>
4.3. SCORE D'EXPOSITION AUX ETM ET INCIDENCE DES CANCERS : ANALYSE DE DONNÉES AGREGÉES PAR COMMUNE.....	52
4.3.1. <i>Méthode utilisée.....</i>	<i>52</i>
4.3.2. <i>Facteurs d'ajustement utilisés dans les modèles.....</i>	<i>52</i>
4.3.3. <i>Résultats.....</i>	<i>55</i>
4.4. DISCUSSION.....	58

5. ÉVALUATION PRELIMINAIRE DES RISQUES POUR LA SANTE DECOULANT DE L'EXPOSITION PAR INGESTION DE NICKEL ET DE CHROME EN NOUVELLE CALEDONIE : APPROCHE PAR DOSIMETRIE INVERSE A PARTIR DES CONCENTRATIONS URINAIRES DOCUMENTEES DANS METEXPO	59
5.1. INTRODUCTION	59
5.2. APPROCHE RETENUE POUR L'ÉVALUATION DU RISQUE	60
5.2.1. <i>Caractérisation du danger et identification des VTR</i>	60
5.2.1.1. Nickel	60
5.2.1.2. Chrome	61
5.2.2. <i>Caractérisation de l'exposition</i>	61
5.2.3. <i>Caractérisation du risque</i>	64
5.3. RESULTATS	64
5.3.1. <i>Nickel</i>	64
5.3.2. <i>Chrome</i>	66
5.4. DISCUSSION	67
5.5. CONCLUSION	69
5.6. REFERENCES	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Moyenne et distribution des concentrations urinaires dans METEXPO (732 sujets)	9
Tableau 2 : coefficients de corrélation de Pearson entre ETM	9
Tableau 3 : Exemple de données pour UN SUJET METEXPO dont le prélèvement urinaire a été réalisé le 5 juillet 2016	18
Tableau 4 : Matrice de corrélation entre densités de trajectoires à 30 jours, 1 an, 2 ans (732 sujets METEXPO)	19
Tableau 5 : Concentrations urinaires moyennes en µg/L par classe d'âge et sexe des 732 sujets METEXPO	20
Tableau 6 : Régression de la concentration urinaire des ETM sur le pourcentage de surface de péridotite dans une zone tampon de 50, 100 ou 200 m autour du lieu d'habitation (732 sujets METEXPO)	22
Tableau 7 : Régression de la concentration urinaire des ETM sur le pourcentage de surface de péridotite dans les Bassins Versants (PeriEAU_BV) et sur le pourcentage de surface de péridotite sur sols dénudés dans les Bassins Versants (PeriEAU_BV_solsnus) (581 sujets METEXPO)	23
Tableau 8 : Modèles de régression de la concentration urinaire des ETM sur la densité de trajectoires aériennes issues des sites miniers (732 sujets METEXPO)	24
Tableau 9 : Modèles de régression multivariés des concentrations urinaires Ni, Cr, Co et Mn sur le pourcentage de surface de péridotite dans rayon de 200 m autour du lieu d'habitation (PeriSOL200) et la densité de trajectoires aériennes issues des sites miniers dans les 30 jours précédant le prélèvement (DT30j) (732 sujets METEXPO)	25
Tableau 10 : Modèles de régression multivariés des concentrations urinaires Ni, Cr, Co et Mn sur le pourcentage de surface de péridotite dans une zone tampon de 200 m autour du lieu d'habitation (PeriSOL200), le pourcentage de surface de péridotite dans les Bassins Versants à l'origine de l'eau de boisson (PeriEAU_BV), et la densité de trajectoires aériennes issues des sites miniers dans les 30 jours précédant le prélèvement (DT30j) (581 sujets METEXPO sans données manquantes)	26
Tableau 11 : Nombre de cas de cancer incidents 2008-2018 par localisation et par sexe (Source : registre des cancers de Nouvelle-Calédonie)	31
Le Tableau 12 ci-dessous indique les effectifs de cas de cancer toutes localisations confondues par commune de résidence. Le nombre de cas varie avec la taille de la population de chaque commune, Nouméa incluant plus de 40% des cas avec 2211 hommes et 1907 femmes.	32
Tableau 13 : Nombre de cas de cancer incidents 2008-2018 par commune et par sexe (Source : registre des cancers de Nouvelle-Calédonie)	32
Tableau 14 : Effectifs 2014 de population par sexe et par commune en Nouvelle-Calédonie (Source : ISEE recensement de la population 2014)	33

Tableau 15 : SIR lissés de cancer du poumon par commune	35
Tableau 16: SIR lissés de cancer de la thyroïde par commune	36
Tableau 17 : SIR lissés de cancer colorectal par commune.....	37
Tableau 18 : SIR lissés de cancer de la sphère ORL par commune	38
Tableau 19 : SIR lissés de cancer du sein par commune.....	39
Tableau 20 : SIR lissés de cancer de la prostate par commune	40
Tableau 21 : Liste des 20 communes comportant au moins 12 sujets METEXPO utilisées pour le calcul des scores d'exposition.....	43
Tableau 22 : Concentrations urinaires moyennes de Ni, Cr, Co, Mn dans la population METEXPO selon l'âge et le sexe (\pm sd = écart-type de la moyenne).....	44
Tableau 23 : Moyennes brutes et moyennes redressées (scores d'exposition) des concentrations urinaires en Ni, Cr, Co, Mn dans chaque commune	45
Tableau 24 : Co-variables issues du RP 2014 prises en compte dans les modèles de régression ajustés.....	48
Tableau 25 : Co-variables issues du baromètre santé 2015 prises en compte dans les modèles de régression	49
Tableau 26 : Résultats du modèle non ajusté étudiant l'association entre les SIR et les scores d'exposition. Analyse agrégée au niveau communal (20 communes).....	51
Tableau 27 : Résultats du modèle ajusté étudiant l'association entre les SIR et les scores d'exposition. Analyse agrégée au niveau communal (20 communes).....	52
Tableau 28 : Évaluation du risque relié à l'exposition au nickel par la voie orale selon la région géographique, sur la base des concentrations urinaires de l'étude METEXPO	60
Tableau 29 : Évaluation du risque relié à l'exposition au chrome (VI) par la voie orale selon la région géographique, sur la base des concentrations urinaires de l'étude METEXPO	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des lieux de résidence des sujets METEXPO dans les communes de Nouvelle-Calédonie	10
Figure 2 : Organisation schématique de l'alimentation en eau potable	11
Figure 3 : Schéma d'identification d'un bassin versant d'un captage en eau superficielle.....	12
Figure 4 : Exemple de zones dénudées d'une surface de 1km x 1km identifiées comme mines et utilisées pour générer les trajectoires mines /sujet	14
Figure 5 : Exemple de surfaces calculées dans une zone tampon de 200 m autour de la résidence d'un sujet selon la lithologie.....	15
Figure 6 : Répartition des 732 sujets de METEXPO selon le pourcentage de surface de péridotite autour du lieu d'habitation *	15
Figure 7 : Répartition des sujets de METEXPO selon le pourcentage de surface de péridotite dans les BV (PeriEAU_BV)*	16
Figure 8 : Répartition des sujets de METEXPO selon le pourcentage de surface de péridotite sur sols dénudés dans les BV (PeriEAU_BV_solsnus)*	17
Figure 9 : Distribution des densités de trajectoires dans les 30 jours (A), 1 an (B) et 2 ans précédant le prélèvement urinaire.....	19
Figure 10 : SIR par commune Cancer du Poumon.....	41
Figure 11 : SIR par commune Cancer de la Thyroïde	41
Figure 12 : SIR par commune Cancer Colorectal	41
Figure 13 : SIR par commune Cancer de la sphère ORL.....	42
Figure 14 : SIR par commune Cancer du Sein	42
Figure 15 : SIR par commune Cancer de la Prostate	42
Figure 16 : Moyennes redressées des concentrations urinaires en ETM par commune (μ g/g créatinine) ...	46

Figure 17 : Atteinte de l'état d'équilibre lors d'exposition répétées (source : biopharmaservices.com).....47

LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

CNRT	Centre National de Recherche Technologique
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
KNS	Koniambo Nickel SAS
SLN	Société Le Nickel
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature
DASS	Direction des Affaires Sanitaires et Sociales
BRGM	Bureau des Recherches Géologiques et Minières
ETM	Éléments Traces Métalliques
Ni	Nickel
Cr	Chrome
Co	Cobalt
Mn	Manganèse
ESU	Eaux superficielles
ESO	Eaux souterraines
MOS	Mode d'Occupation du Sol
UD	Unité de distribution
ISEE	Institut de la Statistique et des Études Economiques
SIR	Standardized Incidence Ratio (Rapport d'Incidence Standardisé)
IMC	Indice de Masse Corporelle
ORL	Otorhinolaryngologie
VTR	Valeur Toxicologique de Référence
BV	Bassin Versant
LMNH	Lymphome Malin Non-Hodgkinien

1. SYNTHÈSE NON TECHNIQUE

Les sols de Nouvelle-Calédonie sont riches en métaux tels que le Ni, le Cr, le Mn ou le Co pouvant contaminer l'eau, l'air, le sol ou les aliments. Du fait de leur toxicité, les éléments métalliques présents dans l'environnement peuvent conduire à des effets sanitaires chez l'Homme, mais le lien avec les pathologies est difficile à établir. Le projet METALICA-Santé se propose de répondre partiellement à cette question à partir de trois objectifs principaux : identifier les déterminants environnementaux de la contamination humaine par les métaux en Nouvelle-Calédonie ; étudier l'incidence des cancers en fonction de scores d'exposition communaux dans le cadre d'une étude écologique ; évaluer le risque sanitaire à partir des valeurs d'imprégnation par le Ni et le Cr chez les enfants de Nouvelle-Calédonie. Pour répondre à ces objectifs, nous nous sommes appuyés sur les résultats des concentrations urinaires en Nickel, Chrome, Cobalt et Manganèse obtenues dans l'étude METEXPO chez 732 sujets répartis à travers toute la Nouvelle-Calédonie.

L'étude des déterminants environnementaux de la contamination par les métaux est basée sur le développement d'un Système d'Information Géographique qui a permis de mettre en évidence que le niveau d'imprégnation par le Ni et le Co augmente avec la proportion de péridotite dans le sol autour du lieu d'habitation et, de façon indépendante, avec la densité des masses d'air provenant des sites miniers dans la période précédente. En revanche, nous n'avons pas pu mettre en évidence de lien avec la contamination des eaux de boisson, possiblement du fait de données manquantes ou incomplètes sur les captages et les bassins versants. Les données éparses sur la contamination des aliments par les métaux en Nouvelle-Calédonie étaient insuffisantes et ne nous ont pas permis d'explorer cette source de contamination potentiellement importante.

L'étude de l'incidence des cancers par commune était basée sur les données du registre des cancers de Nouvelle-Calédonie entre 2008 et 2018 et sur le développement d'un score d'exposition par commune élaboré à partir des données de METEXPO. Dans cette étude nous avons observé que l'incidence des cancers du poumon calculée par commune augmente avec les scores d'exposition au Ni, Cr et Mn, mais que l'ajustement sur des facteurs de confusion potentiels comme le pourcentage de fumeurs faisait disparaître cette association. Nous avons également observé que l'incidence des cancers de la thyroïde augmentait avec les scores d'exposition au Ni, Cr et Co, y compris après ajustement. Ces résultats basés sur une approche écologique (données agrégées au niveau de la commune) ne permettent pas de conclure à une association causale, mais suggèrent la nécessité de poursuivre des études menées au niveau individuel.

Le troisième objectif nous a permis de conclure que le risque sanitaire chez les enfants en rapport avec l'ingestion de Ni est faible, mais qu'il importe de surveiller l'eczéma chez les personnes sensibilisées. Le risque sanitaire en rapport avec le Cr est également faible, mais nécessite une surveillance du fait de la proximité de l'imprégnation observée avec les valeurs toxicologiques de référence. Il paraît également utile d'évaluer à l'avenir le risque lié à l'inhalation de poussières issues des zones minières.

2. INTRODUCTION ET OBJECTIFS DE METALICA SANTE

2.1. OBJECTIFS GENERAUX

L'objectif général de METALICA Santé était d'étudier les déterminants de l'exposition aux Éléments Traces Métalliques (ETM) en Nouvelle-Calédonie et les risques sanitaires qui leur sont associés. Les effets sanitaires visés initialement étaient le cancer et les pathologies néo-natales (petit poids de naissance) pour lesquels un lien avec cette exposition était suspecté dans la littérature. Il est apparu au début du projet que le registre des poids de naissance maintenu par le Réseau de Périnatalité n'était plus disponible à la suite de la destruction des données en raison de contraintes administratives. Ce registre constituait un point de départ essentiel pour le développement de cet aspect du projet, et les solutions alternatives envisagées pour obtenir des données comparables n'ont pu être retenues. L'étude du risque de cancer en rapport avec l'exposition a été maintenue.

La méthodologie mise en œuvre pour l'étude des sources d'exposition aux ETM et pour l'étude de l'incidence du cancer a été considérablement renforcée par rapport aux objectifs initiaux, en adjoignant à l'équipe des experts en statistique, géomatique et en évaluation des risques. Le projet s'est appuyé en grande partie sur les données recueillies dans le cadre de l'étude METEXPO (rapport scientifique CNRT : https://cnrt.nc/wp-content/uploads/2021/10/CNRT-rappsc-METEXPO_Tome-STE-Edition-2018.pdf), menée par Sylvaine Cordier, et l'exploitation des données de concentrations urinaires de plusieurs ETM. Il a été mené en parallèle avec le projet METALICA-Aliments (Audrey Leopold - IAC) dont les données ont contribué au volet sur l'évaluation des risques. Plusieurs autres équipes extérieures ont également collaboré à ce projet par la fourniture de données ou d'avis.

2.2. PLAN DU RAPPORT

Nous étudierons successivement :

- Les déterminants de la contamination par les métaux en Nouvelle-Calédonie (Chapitre 2).
- Le lien entre l'incidence des cancers et un score d'exposition aux ETM définis au niveau des communes de Nouvelle-Calédonie (Chapitre 3)
- L'évaluation du risque sanitaire lié à l'ingestion d'ETM en Nouvelle-Calédonie (Chapitre 4)

3. DETERMINANTS DE LA CONTAMINATION PAR LES METAUX

Dans ce projet, nous avons cherché à évaluer la contribution des différentes sources d'exposition dans le niveau global d'imprégnation aux ETM observé dans la population de Nouvelle-Calédonie. Nous nous sommes appuyés sur les données de l'étude METEXPO (responsable Sylvaine Cordier) qui disposait de mesures de concentrations urinaires de Nickel, Chrome, Cobalt et Manganèse. Nous nous sommes intéressés en particulier aux contaminants métalliques présents dans le sol au niveau du lieu d'habitation, dans les bassins versants à l'origine de l'eau de boisson, ou transportés par voie aérienne depuis les exploitations minières réparties sur le territoire.

Il ne nous a malheureusement pas été possible d'intégrer l'alimentation dans la recherche des sources de contamination du fait de l'absence de données suffisantes. Le projet METALICA-Aliments sur lequel nous aurions pu baser ce travail ne disposait en effet de données que sur 3 micro-régions de Nouvelle-Calédonie, qui ne pouvaient être considérées comme représentatives de l'ensemble du territoire.

Pour constituer les bases de données nécessaires à la caractérisation de la contamination par les métaux dans les différents compartiments environnementaux (SOL, EAU, et AIR), nous nous sommes notamment appuyés sur l'expertise de Karine Saumë (DASS Nouvelle-Calédonie), Vincent Mardhel (BRGM), et Estelle Roth (Université de Reims Champagne Ardenne, Groupe de Spectrométrie Moléculaire Atmosphérique-UMR 7331). Nous avons mis en place un Système d'Information Géographique et avons collecté un vaste ensemble de données sur la plateforme georep (www.georep.nc) et open data de Nouvelle Calédonie (<https://nouvelle-caledonie.opendatasoft.com/>).

3.1. DONNEES MISES A DISPOSITION DANS LE CADRE DU PROJET

3.1.1. DONNEES D'IMPREGNATION PAR LES ETM DANS LA POPULATION DE NC

Les données de METEXPO, comprenant les mesures de concentrations urinaires en Ni, Cr, Co, Mn effectuées à l'occasion d'un prélèvement urinaire entre février et mi-juillet 2016 chez 732 sujets entre 3 et 84 ans, ont été utilisées pour l'étude des déterminants des expositions. Outre les concentrations urinaires, les données fournies incluaient également des informations sociodémographiques, le lieu de résidence, ou les habitudes de vie*.

Tableau 1 : Moyenne et distribution des concentrations urinaires dans METEXPO (732 sujets), Nouvelle Calédonie, 2016

	Moyenne	Ec-type	Q1	Médiane	Q3	Mini	Maxi
Nickel (µg/L)	4,4	4,9	1,7	3,0	5,0	0,2	42,0
Chrome (µg/L)	2,2	3,2	0,8	1,5	2,6	0,0	58,0
Cobalt (µg/L)	1,0	1,4	0,3	0,6	1,1	0,0	15,0
Manganèse (µg/L)	0,4	1,8	0,1	0,2	0,3	0,1	43,0

Le tableau de corrélation entre ETM indique des valeurs de corrélation moyennement élevées entre le Ni et le Co ($r=0,572$), et faibles dans les autres cas.

Tableau 2 : coefficients de corrélation de Pearson entre ETM

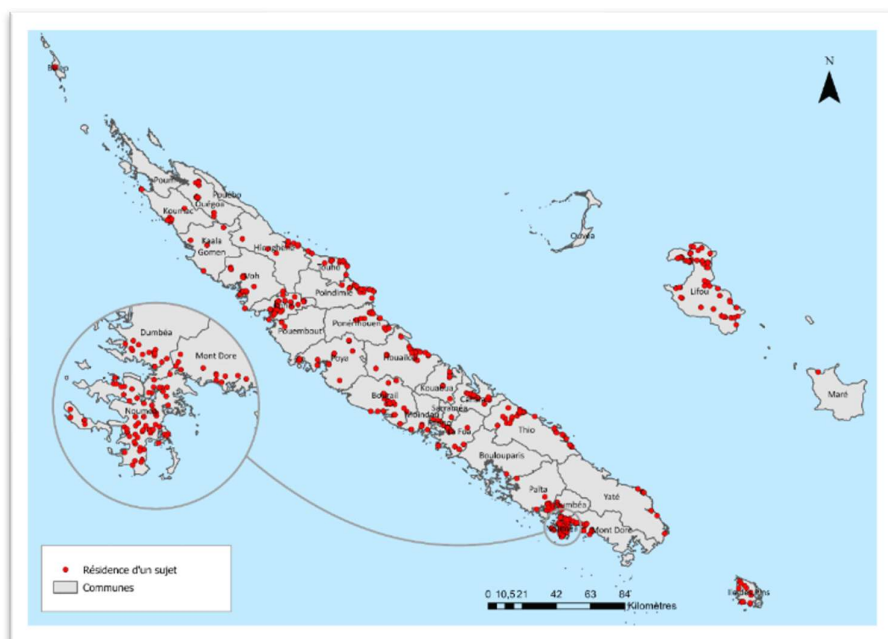
	Ni	Cr	Co	Mn
Ni	1			
Cr	0,154	1		
Co	0,572	0,152	1	
Mn	0,082	0,060	0,105	1

* Saint-Jean A et al. Nickel and associated metals in New Caledonia: exposure levels and their determinants. *Environment International* 118(2018) 106-115

Nous avons géocodé les lieux de résidence de chacun des sujets à partir des adresses collectées dans cette étude. La figure ci-dessous montrent la répartition des 732 sujets dans les 33 communes de Nouvelle-Calédonie.

Figure 1 : Localisation des lieux de résidence des sujets METEXPO dans les communes de Nouvelle-Calédonie

Commune	N sujets
Belep	5
Boulouparis	1
Bourail	49
Canala	20
Dumbéa	23
Farino	4
Hienghène	17
Houailou	25
Ile des Pins	43
Kaala Gomen	4
Koné	42
Kouaoua	10
Koumac	11
La Foa	34
Lifou	95
Maré	1
Moindou	8
Mont Doré	25
Nouméa	77
Ouvéa	0
Païta	16
Poindimié	27
Ponérihouen	15
Pouébo	0
Pouembout	3
Poum	0
Poya	25
Sarraméa	2
Thio	56
Touho	16
Voh	24
Yaté	38
TOTAL NC	732



3.1.2. DONNEES DISPONIBLES SUR LE COMPARTIMENT SOL

Les données portant sur le compartiment SOL dans toute la Nouvelle-Calédonie ont été fournies par Vincent Mardhel :

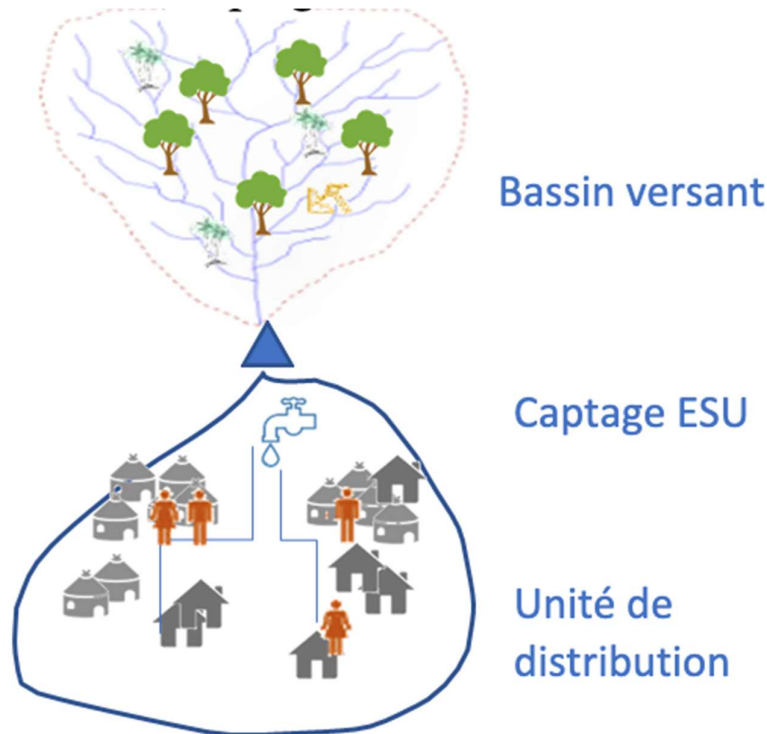
3.1.2.1.1. Les données de lithologie sont divisées en 3 groupes :

- 1) Latérites-Réglolithes et Péridotites
 - 3) Unique catégorie pour Semelle
 - 4) Toutes les autres catégories
- **Occupation du sol** : les données ont été divisées en 10 catégories :
 - 1) culture ; 2) sable ; 3) végétation/forêt ; 4) zones incendiées ; 5) mines ; 6) espace urbain ; 7) sols nus ; 8) terres arables ; 9) terres pastorales ; 10) eau au niveau de chaque bassin versant. La couche MOS 2014 a été téléchargée sur le site Géorep (<https://georep.nc/>)

3.1.3. DONNEES SUR LE COMPARTIMENT EAU

Cette étude porte exclusivement sur l'eau destinée à la consommation humaine, issue des captages et forages recensés par la DASS de Nouvelle-Calédonie. Le principe général d'alimentation en eau potable repose sur le prélèvement d'eaux provenant de ressources souterraines (ESO) ou superficielles (ESU). Ces dernières proviennent de bassins versants, c'est-à-dire d'ensembles géographiques dont les eaux ruissellent vers un même point. Chaque bassin versant présente des caractéristiques propres, notamment en matière de couverture végétale, d'occupation du sol (cultures, forêts, etc.) et de lithologie, variables selon la zone considérée. L'eau captée alimente ensuite un réseau de distribution, desservant les usagers au sein d'une unité de distribution. La figure ci-dessous présente l'organisation entre bassin versant, captage, unité de distribution et usager.

Figure 2 : Organisation schématique de l'alimentation en eau potable



Les données obtenues concernant le compartiment EAU sont les suivantes (voir Annexe Figure 5) :

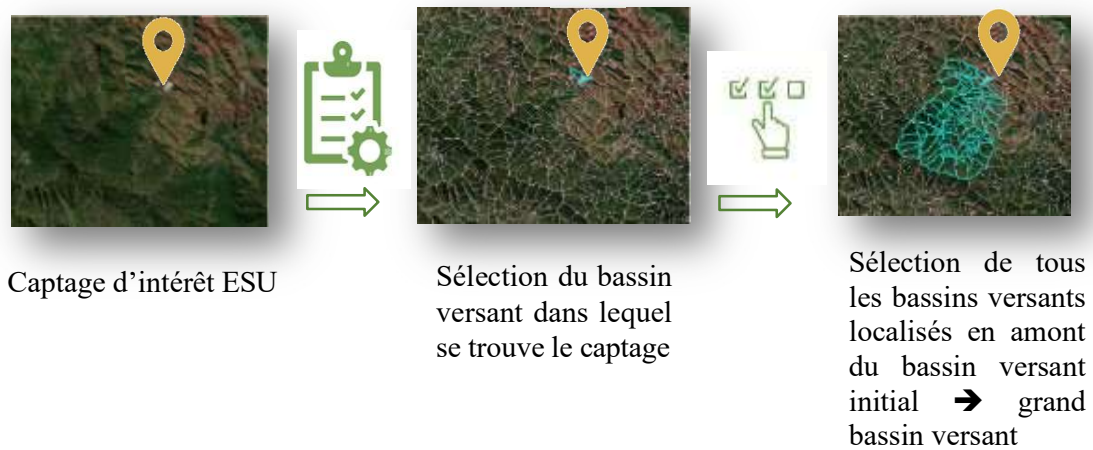
3.1.3.1.1. Captages Alimentation en Eau Potable :

La donnée Les captages d'eau souterraine (ESO) et d'eau superficielle (ESU) ont été recensés et géolocalisés. les données sont téléchargeable sur la plateforme Géorep (<https://georep-dtsi- sgt.opendata.arcgis.com/>). Elle recense les captages d'eau souterraine (ESO) et captages d'eau superficielle (ESU). Néanmoins, nous avons utilisé les données fournies par Vincent Mardhel car son équipe a supprimé les nombreux doublons qui existaient dans la base initiale.

3.1.3.1.2. Bassins versants des captages ESU :

Cette donnée a été créée à partir de données *bassin versant et talweg* fournies par Vincent Mardhel. Nous avons défini 299 grands bassins versants sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie en retravaillant ces données pour identifier le grand bassin versant de chaque captage ESU (voir Figure ci-dessous et exemples de bassins versants en annexe).

Figure 3 : Schéma d'identification d'un bassin versant d'un captage en eau superficielle



3.1.3.1.3. Données lithologiques

Les données ont été fournies par Vincent Mardhel, et sont issues de la Base de Données Lisa*. Nous avons regroupé les formations lithologiques en 3 groupes : 1) Latérites – régolithes et Péridotites 2) Semelle 3) Autres (Annexe Figure 1).

3.1.3.1.4. Données d'occupation du sol, sites miniers, zones incendiées

Nous avons utilisé le MOS (Mode d'Occupation du Sol) 2014, et la couche de point sur les exploitations minières. Ces données ont été téléchargées sur la plateforme Géorep. Nous avons calculé les surfaces en m² pour chaque BV selon 10 catégories d'occupation du sol suivantes : culture, sable, végétation/forêt, zone incendiées, mines, espace urbain, sols nus, terres arables, terres pastorales au niveau de chaque bassin versant. Les figures en annexe illustrent les données utilisées sur les sites miniers et les zones incendiées.

3.1.3.1.5. Données d'altitude (non utilisées dans ce rapport)

Elles ont été calculées à partir du Modèle Numérique de Terrain (NMT) de la Nouvelle-Calédonie téléchargé sur Géorep. Ces données n'ont pas été utilisées dans le cadre de ce rapport.

3.1.3.1.6. Données de pente (non utilisées dans ce rapport)

Elles ont été calculées à partir du MNT de la Nouvelle-Calédonie téléchargé sur Géorep.

3.1.3.1.7. Données de précipitations (non utilisées dans ce rapport)

À l'issue d'une convention de mise à disposition des données par Météo France, nous avons collecté les données de précipitations pour les stations d'intérêt sur l'ensemble des mois de l'année 2016 (Figure en Annexe).

3.1.3.1.8. Unités de distribution

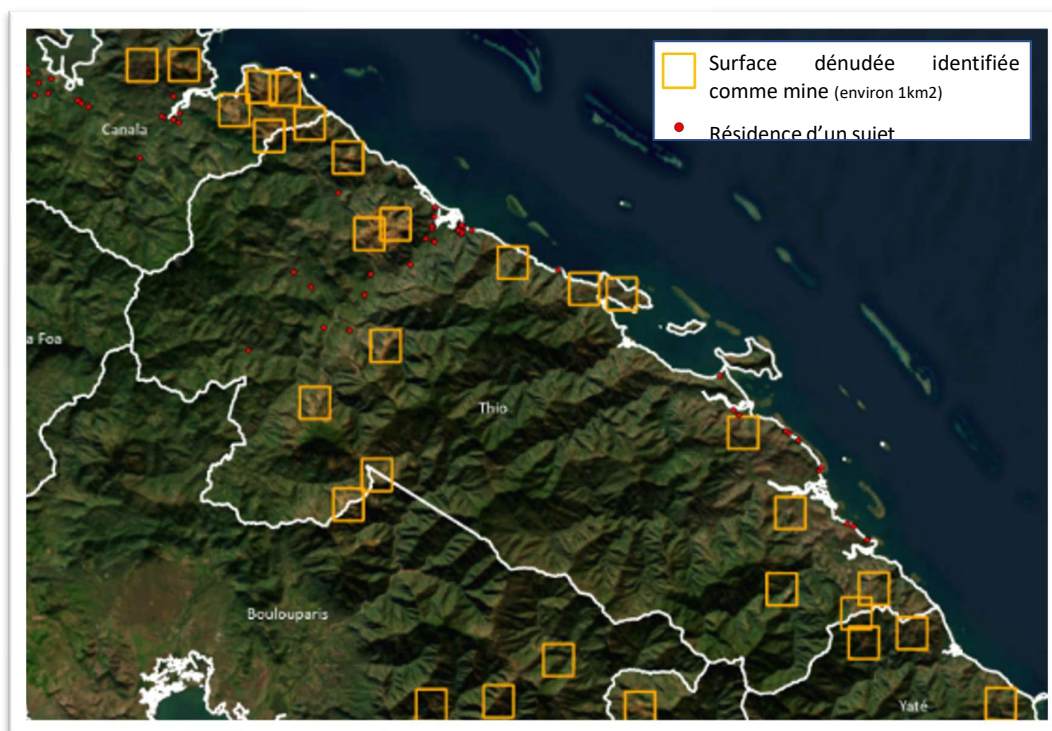
En collaboration avec Karine Saumë, nous avons recueilli des informations sur les unités de distribution (UD) des eaux afin de les associer aux sujets METEXPO. Chaque UD étant reliée à un captage qui dans le cas des ESU est relié à un bassin versant, ce travail nous a permis d'identifier les bassins versants correspondants aux sujets METEXPO.

* <https://georep.nc/cartographie/economie-et-geosciences/explorisa-atlas-hydrogeologique-de-nouvelle-caledonie>

3.1.4. DONNEES SUR LE COMPARTIMENT AIR

L'étude des déterminants de ce compartiment a été réalisée en collaboration étroite avec l'équipe d'Estelle Roth (Université de Reims). Dans un premier temps, nous avons utilisé les données fournies par E. Roth pour identifier les zones contributives à l'exposition aux ETM par voie aérienne. Nous l'avons complété en générant de nouvelles zones de 1km x 1km au niveau des exploitations minières où le sol était à nu. Nous nous sommes appuyés sur l'analyse des images aériennes disponibles sur la période d'étude. Au final nous disposons de 141 zones dénudées identifiées correspondant aux zones minières présentes ou passées (voir Figure 4).

Figure 4 : Exemple de zones dénudées d'une surface de 1km x 1km identifiées comme mines et utilisées pour générer les trajectoires mines /sujet



3.2. DEVELOPPEMENT D'INDICATEURS D'EXPOSITION AUX ETM

3.2.1. INDICATEURS D'EXPOSITION SOL

Le SIG nous a permis de calculer la surface de péridotite dans des zones tampons (buffers) de 50, 100, ou 200 m autour du lieu d'habitation de chaque sujet METEXPO.

Afin de caractériser l'exposition aux métaux provenant de poussières inhalées ou ingérées issues du sol sur le lieu de résidence, le pourcentage de la surface de péridotite autour du lieu d'habitation dans les zones tampons de 50, 100 ou 200 m autour du lieu d'habitation a été utilisée comme indicateur d'exposition. (Les données d'occupation recueillies de ce projet n'ont pas été utilisées pour caractériser l'exposition liée au sol autour du lieu d'habitation).

Figure 5 : Exemple de surfaces calculées dans une zone tampon de 200 m autour de la résidence d'un sujet selon la lithologie

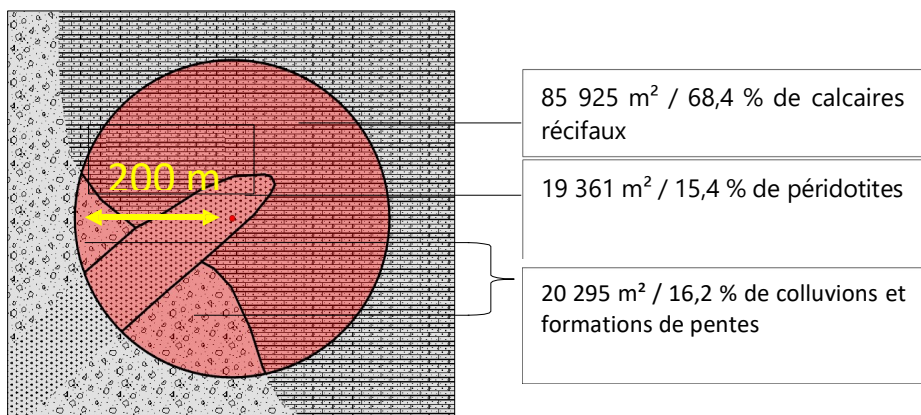
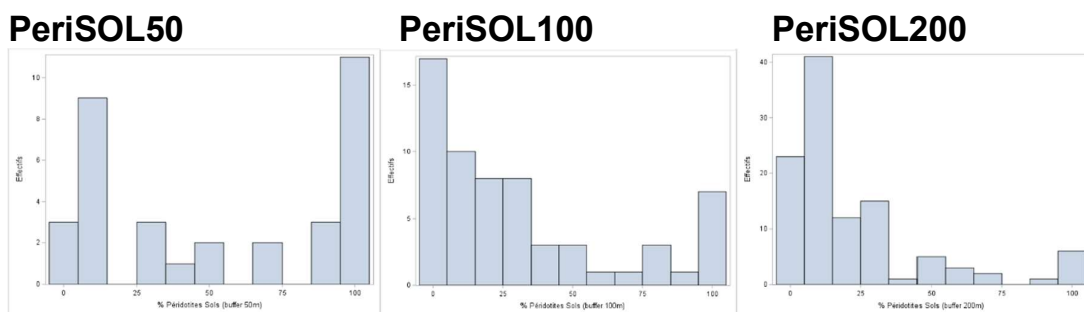


Figure 6 : Répartition des 732 sujets de METEXPO selon le pourcentage de surface de péridotite autour du lieu d'habitation *



* Les histogrammes représentent la répartition des individus chez lesquels la surface de péridotite dans la zone tampon est non nulle. PeriSOL50 : 34 sujets exposés dans la zone tampon de 50 m ; PeriSOL100 : 62 sujets exposés dans la zone tampon de 100 m ; PeriSOL200 : 109 sujets exposés dans la zone tampon de 200 m.

3.2.2. INDICATEURS D'EXPOSITION EAU

L'objectif était de décrire les caractéristiques environnementales des bassins versants (BV) en amont des captages d'eau potable, et d'associer ces caractéristiques (lithologie, occupation du sol, etc) aux sujets de la population d'étude METEXPO.

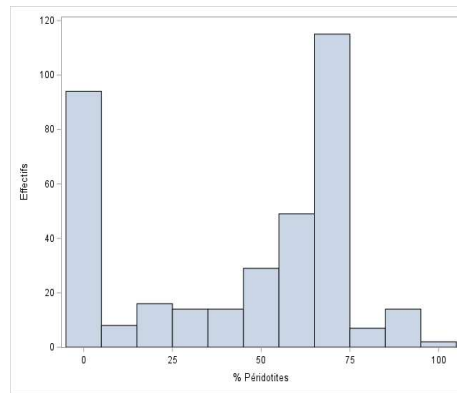
Les captages d'eau souterraine (ESO) et certains captages d'eau de surface (ESU) situés sur le littoral de la Grande Terre ne sont associés à aucun BV. Pour ces ressources, nous avons remplacé le BV par une zone tampon de 50, 100 ou 200 mètres autour des captages. Pour les captages ESU localisés sur l'Ile des Pins, l'ensemble de la surface de l'île a été considérée comme BV. Sur Lifou et Maré, seuls existent des forages d'eaux souterraines (ESO).

A chaque sujet METEXPO ont été associés un ou plusieurs captages (jusqu'à 15 captages par sujet) identifiés à partir des unités de distribution (voir 2.1.3), ou en fonction de la proximité avec le lieu de résidence lorsque les informations sur les UD n'étaient pas disponibles. En dépit des efforts, 41 sujets METEXPO n'ont pu être associés à au moins un BV, et pour 110 autres sujets, les informations relatives à au moins un BV n'ont pu être retrouvées. Dans les analyses (Cf. infra), nous avons exclu ces 151 sujets pour lesquels les données sur les captages d'eau de boisson étaient manquantes en partie ou en totalité.

Pour les 581 sujets METEXPO restants sans information manquante, un indicateur d'exposition aux ETM lié à l'eau de boisson a été calculé sur la base des informations obtenues sur les BV associés à chaque captage. Cet indicateur basé sur les données lithologiques a été calculé de la façon suivante :

- **Pourcentage de surface de péridotites dans les BV (PeriEAU_BV)** = surface totale de péridotite (en m²) dans les BV / surface totale des BV associés à chaque sujet (en m²).

Figure 7 : Répartition des sujets de METEXPO selon le pourcentage de surface de péridotite dans les BV (PeriEAU_BV)*.



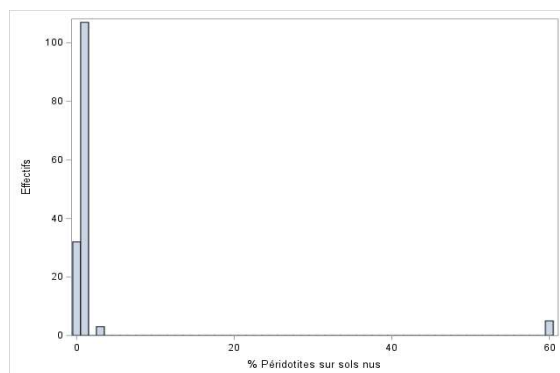
** L'histogramme montre la répartition de PeriEAU_BV chez les 362 individus pour lesquels la surface de péridotite dans les BV est non nulle.*

Les zones dénudées des BV étant susceptibles d'entraîner un niveau de contamination plus élevé dans les eaux de boisson, nous avons également calculé le pourcentage de péridotites présente dans les zones dénudées des BV :

3.2.2.1.1. Pourcentage de surface de péridotites sur sols nus dans les BV (PeriEAU_BV_solsnus)

= surface totale de péridotite sur zones dénudées (en m²) dans les BV / surface totale des BV associés à chaque sujet (en m²). Parmi les 147 individus pour lesquels l'indicateur PeriEAU_BV_solsnus est non nul, le pourcentage est très faible (<5%) pour la quasi-totalité d'entre eux, et n'atteint 60% que pour un sujet (Figure 8)

Figure 8 : Répartition des sujets de METEXPO selon le pourcentage de surface de péridotite sur sols dénudés dans les BV (PeriEAU_BV_solsnus)*



* L'histogramme montre la répartition de PeriEAU_BV_solsnus des 147 individus pour lesquels la surface de péridotite sur sols nus dans les BV est non nulle.

Les autres caractéristiques des BV disponibles dans le cadre du projet (altitude, pente, précipitations) ne sont pas analysées dans ce rapport mais pourraient être mises si besoin à la disposition d'autres équipes de recherche pour caractériser de façon plus fine l'exposition aux ETM.

3.2.3. INDICATEURS D'EXPOSITION AIR

Pour estimer le rôle des transferts de poussière provenant des sites miniers dans la contamination des sujets, l'indicateur d'exposition utilisé dans les analyses est **la densité des trajectoires de masses d'air entre les sites miniers et le lieu de résidence**. La densité de trajectoires (DT) a été calculée dans les 30 jours (DT_{30j}), un an (DT_{1an}), ou deux ans (DT_{2ans}) précédant le prélèvement urinaire.

Pour ce calcul de densité de trajectoires, l'équipe d'Estelle Roth nous a fourni les données du nombre de trajectoires par sujet déterminé selon le modèle utilisé pour l'étude de la dispersion du Nickel en Nouvelle-Calédonie*.

Tableau 3 : Exemple de données pour UN SUJET METEXPO dont le prélèvement urinaire a été réalisé le 5 juillet 2016.

DATE	...	KNSZ	KOPETO1	KOPETO2	KOPETO3	KOPETO4	KOPETO5	...	TOTAL
06/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	0
07/07/2014	...	0	0	0	1	2	0	...	5
08/07/2014	...	0	0	0	0	0	1	...	4
09/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	1
10/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	0
11/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	3
12/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	5
13/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	3
14/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	4
15/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	4
16/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	3
17/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	0
18/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	2
19/07/2014	...	3	0	0	0	0	0	...	3
20/07/2014	...	0	1	1	1	1	1	...	12
21/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	7
22/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	3
23/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	11
24/07/2014	...	0	0	0	0	0	0	...	25
...
05/07/2016	...	0	0	0	0	0	0	...	3
TOTAL	...	58	79	74	77	61	52	...	4665

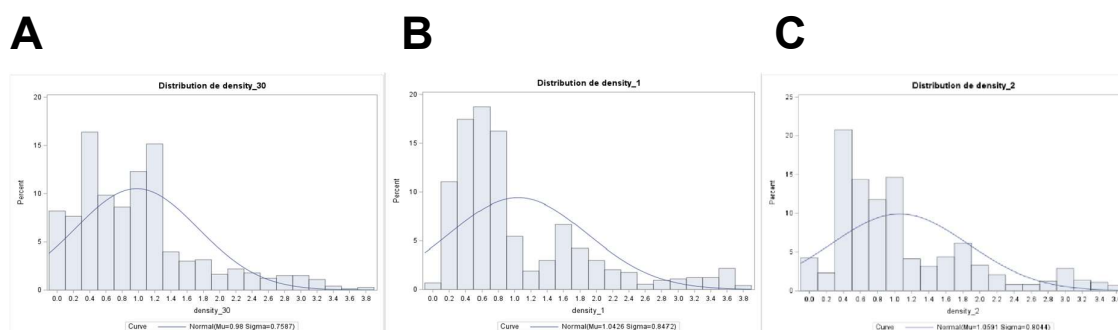
Le tableau est un exemple de données fourni pour un sujet METEXPO. Il contient une ligne par jour dans les deux années précédant le prélèvement urinaire (05/07/2016 pour le sujet), soit 730 lignes au total, et 141 colonnes correspondant chacune à un site minier. A l'intersection des lignes et des colonnes est indiqué le nombre quotidien de trajectoires issues de chaque site et parvenant sur le lieu de résidence du sujet. Une mesure de trajectoire est effectuée toutes les 3 heures ; le nombre maximum de trajectoires par jour est donc de 8. Dans l'exemple fourni portant sur les trajectoires dans les 2 années précédant le prélèvement, 4665 trajectoires de masse d'air issues des sites miniers ont atteint la résidence du sujet METEXPO.

A partir de ces informations, la densité de trajectoires sur le lieu de résidence a été calculée pour chaque sujet METEXPO sur des périodes de 30 jours, 1 an ou 2 ans avant le prélèvement. Dans l'exemple, la densité de trajectoire du sujet METEXPO correspond au nombre total de trajectoires sur 2 ans divisé par 365 x 2 x 8 mesures par jour, soit $4665/5840=0,799$.

* Roth E, Burgalat J, Riviere E, Zaiter M, Chakir A, Pasquet C, Gunkel-Grillon P. Nickel spreading assessment in New Caledonia by lichen biomonitoring coupled to air mass history. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2021;28(5):6058-67.

Les figures et tableau ci-dessous montrent la distribution des densités de trajectoires chez les 732 sujets METEXPO calculées sur les 30 jours, 1 an ou 2 ans avant le prélèvement urinaire.

Figure 9 : Distribution des densités de trajectoires dans les 30 jours (A), 1 an (B) et 2 ans précédant le prélèvement urinaire



Densité de trajectoires	Moyenne	Ec-type	Q1	Médiane	Q3	Minimum	Maximum
30 jours	0,98	0,76	0,40	0,88	1,24	0,00	3,78
1 an	1,04	0,85	0,48	0,75	1,52	0,06	3,85
2 ans	1,06	0,80	0,45	0,82	1,47	0,09	3,61

La matrice de corrélation indique que les densités de trajectoires à 30 jours avant le prélèvement sont moyennement à fortement corrélées avec les densités de trajectoires sur 1 an ou 2 ans. (Tableau 4) Une très forte corrélation est observée entre les densités de trajectoire sur 1 an et sur 2 ans.

Tableau 4 : Matrice de corrélation entre densités de trajectoires à 30 jours, 1 an, 2 ans (732 sujets METEXPO)

	Densité sur 30 j	Densité sur 1 an	Densité sur 2 ans
Densité sur 30j	1		
Densité sur 1 an	0,786	1	
Densité sur 2 ans	0,653	0,963	1

3.3. DETERMINANTS DES CONCENTRATIONS URINAIRES EN ETM

L'objectif est de quantifier l'effet de chaque source d'exposition (SOL, EAU, AIR) sur les concentrations urinaires observées pour chacun des ETM (Ni, Cr, Co, Mn). Des méthodes de régression linéaire sont utilisées.

3.3.1. DESCRIPTION DES MODELES DE REGRESSION

Dans les modèles, la variable dépendante (à expliquer) est la concentration urinaire en ETM exprimée en µg/L et la variable indépendante (explicative ou prédictive) est l'indicateur d'exposition SOL, EAU ou AIR défini ci-dessus. Certaines co-variables sont également susceptibles d'interférer avec les concentrations urinaires en ETM et ont été incluses dans les modèles comme variables d'ajustement. Il s'agit :

- Du taux de créatinine urinaire, un indicateur de la fonction rénale. La créatinine a été mesurée dans les urines en même temps que les concentrations d'ETM et a été incluse dans tous les modèles
- De l'âge des sujets
- Du sexe

L'étude METEXPO a mis en évidence montre que les valeurs d'ETM varient sensiblement en fonction de l'âge et du sexe chez les 732 sujets METEXPO. Les concentrations urinaires en ETM sont généralement plus élevées chez les 10-17 ans que dans les autres classes d'âge et plus élevées chez les femmes que chez les hommes.

Tableau 5 : Concentrations urinaires moyennes en µg/L par classe d'âge et sexe des 732 sujets METEXPO, Nouvelle Calédonie, 2016

	n	Nickel (µg/L)		Chrome (µg/L)		Cobalt (µg/L)		Mn (µg/L)		
		Moyenne	sd	Moyenne	sd	Moyenne	sd	Moyenne	sd	
Age (année)										
<10	153	3,85	3,68	2,18	2,59	0,86	0,75	0,79	3,72	
10-17	121	5,44	6,62	2,78	3,56	1,47	2,14	0,35	0,64	
18-39	242	4,20	4,32	2,01	3,95	0,92	1,12	0,25	0,34	
40-59	167	4,30	4,82	2,05	1,93	0,91	1,50	0,30	0,34	
≥60	49	4,80	5,96	2,33	2,66	0,44	0,36	0,35	0,86	
Sexe										
Homme	385	4,20	4,80	2,15	3,34	0,75	0,85	0,32	0,75	
Femme	347	4,60	5,00	2,26	2,95	1,20	1,74	0,48	2,43	

Au total, les modèles présentés s'écrivent de la façon suivante :

$$3.3.1.1.1. ETM = \alpha + \beta_1 \times Indic_expo + \beta_2 \times \hat{A}ge + \beta_3 \times Sexe + \beta_4 \times Cr\acute{e}at$$

Où :

- ETM représente la concentration urinaire de l'ETM (Ni, Cr, Co ou Mn). L'unité utilisée dans les modèles pour exprimer la concentration urinaire de l'ETM est l'intervalle interquartile (IQR) de la distribution des concentrations (IQR Ni = 3,3 µg/L ; IQR Cr = 1,75 µg/L ; IQR Co = 0,8 µg/L ; IQR Mn = 0,25 µg/L).
- α est l'ordonnée à l'origine
- β_i est le coefficient de régression linéaire associé à chacune des variables prédictives du modèle

Après avoir décrit les modèles associés à chacune des variables SOL, EAU, AIR séparément, nous présenterons des modèles multivariés combinant les différents indicateurs d'exposition.

3.3.2. RESULTATS DES MODELES DE REGRESSION SOL

Les modèles de régression montrent que le pourcentage de surface de péridotite dans une zone tampon de 50 m (PeriSOL50), 100 m (PeriSOL100) ou 200 m (PeriSOL200) autour du lieu d'habitation est significativement associé aux concentrations urinaires de Ni et de Co observé chez les sujets de METEXPO (tableau 6). Cette association est d'autant plus forte que la zone tampon considérée est étendue. En revanche, les indicateurs d'exposition PeriSOL ne sont pas associés aux concentrations urinaires de Cr et de Mn. Le R² représente la part de la variance de la concentration urinaire des ETM expliquée par les variables du modèle.

Tableau 6 : Régression de la concentration urinaire des ETM sur le pourcentage de surface de péridotite dans une zone tampon de 50, 100 ou 200 m autour du lieu d'habitation (732 sujets METEXPO)

Zone Tampon 50 m (PeriSOL50)

	β	95%CI		p	R ²
Nickel	0,014	0,007	0,021	<.0001	18,0%
Chrome	0,002	-0,007	0,011	0,70	3,7%
Cobalt	0,026	0,018	0,034	<.0001	21,1%
Manganèse	0,000	-0,036	0,036	0,99	1,7%

Zone Tampon 100 m (PeriSOL100)

	β	95%CI		p	R ²
Nickel	0,017	0,010	0,025	<.0001	18,6%
Chrome	0,002	-0,007	0,012	0,66	3,7%
Cobalt	0,033	0,025	0,041	<.0001	22,9%
Manganèse	0,001	-0,038	0,040	0,96	1,7%

Zone Tampon 200 m (PeriSOL200)

	β	95%CI		p	R ²
Nickel	0,022	0,014	0,030	<.0001	19,8%
Chrome	0,003	-0,006	0,013	0,49	3,7%
Cobalt	0,042	0,033	0,050	<.0001	25,8%
Manganèse	0,021	-0,019	0,062	0,30	1,9%

* Modèles ajustés sur âge, sexe, et créatinine urinaire

Exemple : pour une augmentation d'une unité de PeriSOL200 (=1%), le modèle prédit que la concentration de nickel urinaire augmente d'un facteur β égal à 0,022. Ce facteur β représente la pente de la relation entre la concentration urinaire et le pourcentage de surface de péridotite dans la zone tampon et est significativement différent de 0 ($p < 0,0001$). La part de variance du Ni expliqué par les variables du modèle (Créatinine urinaire, âge, sexe, PeriSOL200) dans la zone tampon de 200 m est de 19,8%.

3.3.3. RESULTATS DES MODELES DE REGRESSION EAU

Les résultats indiquent que le pourcentage de surface de péridotite dans les bassins versants (PeriEAU_BV) chez les 581 sujets METEXPO sans données manquantes est associé à la concentration urinaire de Co ($\beta=0,005$; $p=0,02$) et à la concentration de Ni ($\beta=0,003$; $p=0,07$). PeriEAU_BV n'est pas associé aux concentrations urinaires de Cr et de Mn.

Dans les modèles portant sur le pourcentage de surface de péridotite sur sols dénudés (PeriEAU_BV_sols_nus), les associations avec le Ni ($\beta=0,046$; $p<10^{-4}$) et le Co ($\beta=0,135$; $p<10^{-4}$) sont plus marquées. On n'observe pas d'association avec les concentrations de Cr et de Mn. Comme indiqué plus haut, la valeur de la variable PeriEAU_BV_solsnus est très faible rendant difficile l'interprétation des résultats.

Les R^2 montrent que le pourcentage de variance expliquée pour les concentrations urinaires de ces deux métaux est supérieur à 15%, et atteint 35% pour le Co lorsque la variable sur sols nus est considérée.

Tableau 7 :
Régression de la concentration urinaire des ETM sur le pourcentage de surface de péridotite dans les Bassins Versants (PeriEAU_BV) et sur le pourcentage de surface de péridotite sur sols dénudés dans les Bassins Versants (PeriEAU_BV_solsnus) (581 sujets METEXPO)

PeriEAU_BV					
	β	95%CI		p	R^2
Nickel	0,003	0,000	0,007	0,07	15,5%
Chrome	-0,004	-0,008	0,001	0,11	3,2%
Cobalt	0,005	0,001	0,009	0,02	16,6%
Manganèse	-0,009	-0,028	0,011	0,39	2,2%

PeriEAU_BV_sols nus					
	β	95%CI		p	R^2
Nickel	0,046	0,026	0,066	<.0001	17,9%
Chrome	0,004	-0,022	0,030	0,74	2,8%
Cobalt	0,135	0,115	0,155	<.0001	35,3%
Manganèse	-0,007	-0,123	0,108	0,90	2,0%

* Modèles ajustés sur âge, sexe et créatinine urinaire

3.3.4. RESULTATS DES MODELES DE REGRESSION AIR

Les densités de trajectoires aériennes issues des sites miniers dans les 30 jours précédant le prélèvement urinaire (DT30j) permettent de prédire les concentrations urinaires de Ni ($\beta=0,244$; $p<10^{-4}$), Cr ($\beta=0,397$; $p<10^{-4}$) et Co ($\beta=0,300$; $p<10^{-4}$) chez les 732 sujets METEXPO. Aucune association n'est observée avec le Mn. Les densités de trajectoire calculées sur l'année précédant le prélèvement (DT1an) sont également associées aux concentrations urinaires des trois métaux. Les densités de trajectoires aériennes calculées sur les deux années précédant le prélèvement (DT2ans) prédisent les concentrations urinaires de Ni et de Cr, avec des valeurs de coefficient β diminuées, mais ne sont plus associées significativement aux concentrations de Co ($p=0,23$).

Les R² montrent que la part de la variance des concentrations urinaires expliquée par les densités de trajectoires aériennes, quelle que soit la durée, avoisine 18% pour le Ni, 18% pour le Co et 7% pour le Cr.

Tableau 8 : Modèles de régression de la concentration urinaire des ETM sur la densité de trajectoires aériennes issues des sites miniers (732 sujets METEXPO)

Densité de trajectoire 30 jours (DT30j)

	β	95%CI		p	R ²
Nickel	0,244	0,111	0,377	<0,0001	17,7%
Chrome	0,397	0,231	0,563	<.0001	6,5%
Cobalt	0,300	0,147	0,452	<0,0001	18,2%
Manganèse	-0,101	-0,791	0,590	0,775	1,7%

Densité de trajectoire sur 1 an (DT1an)

	β	95%CI		p	R ²
Nickel	0,254	0,136	0,372	<.0001	18,3%
Chrome	0,361	0,214	0,508	<.0001	6,6%
Cobalt	0,189	0,053	0,326	0,007	17,4%
Manganèse	-0,248	-0,860	0,365	0,428	1,8%

Densité de trajectoire sur 2 ans (DT2ans)

	β	95%CI		p	R ²
Nickel	0,215	0,091	0,340	0,001	17,6%
Chrome	0,297	0,141	0,452	0,000	5,5%
Cobalt	0,088	-0,056	0,231	0,23	16,7%
Manganèse	-0,390	-1,034	0,253	0,23	1,9%

* Modèles ajustés sur âge, sexe et créatinine urinaire

3.3.5. MODELES DE REGRESSION MULTIVARIÉS SOL-AIR-EAU

Après avoir étudié séparément le rôle des indicateurs d'exposition SOL, AIR et EAU, nous avons développé des modèles multivariés incluant ces indicateurs d'exposition simultanément afin d'étudier le rôle de chaque source d'exposition potentielle compte tenu des deux autres. Nous avons tout d'abord développé un modèle incluant les indicateurs SOL et AIR basé sur les 732 sujets de METEXPO. Les indicateurs EAU n'ont pu être étudiés que sur des modèles multivariés incluant les 581 sujets sans données manquantes.

3.3.5.1. Modèles de régression multivariés SOL et AIR (732 sujets)

Le pourcentage de surface de péridotite dans la zone tampon de 200 m autour du lieu d'habitation (PeriSOL200) et la densité de trajectoires dans les 30 jours précédant la date de prélèvement urinaire (DT30j) ont été utilisés comme indicateurs d'exposition dans les modèles multivariés incluant simultanément les compartiments SOL et AIR, ces indicateurs étant les plus fortement associés aux concentrations urinaires en ETM dans leur catégorie respective.

Nickel : PeriSOL200 ($\beta=0,020$; $p<10^{-4}$) et DT30j ($\beta=0,166$; $p=0,02$) sont des prédicteurs indépendants de la concentration urinaire de Ni. Le pourcentage de variance des concentrations urinaires en Ni expliqué par les variables du modèle est de 20,4%.

Chrome : seul DT30j ($\beta=0,405$; $p<10^{-4}$) reste prédicteur de la concentration urinaire de Cr. Le pourcentage de variance des concentrations urinaires en Cr expliqué par les variables du modèle est de 6,5%.

Cobalt : PeriSOL200 ($\beta= 0,040$; $p<10^{-4}$) et DT30j ($\beta=0,146$; $p=0,06$) sont des prédicteurs indépendants de la concentration urinaire de Co. Le β associé à DT30j est diminué par rapport au modèle incluant DT30j seul, et est à la limite du seuil de signification statistique. Le pourcentage de variance des concentrations urinaires en Co expliqué par les variables du modèle est de 26,2%.

Manganèse : les concentrations urinaires de Mn ne sont pas associées aux indicateurs d'exposition du modèle.

Tableau 9 : Modèles de régression multivariés des concentrations urinaires Ni, Cr, Co et Mn sur le pourcentage de surface de péridotite dans rayon de 200 m autour du lieu d'habitation (PeriSOL200) et la densité de trajectoires aériennes issues des sites miniers dans les 30 jours précédant le prélèvement (DT30j) (732 sujets METEXPO)

	Nickel		Chrome		Cobalt		Manganèse	
	β	p	β	p	β	p	β	p
PeriSOL200	0,020	<.0001	-0,002	0,70	0,040	<.0001	0,024	0,26
DT30j	0,166	0,02	0,405	<.0001	0,146	0,06	-0,194	0,59
R ²	20,4%		6,5%		26,2%		1,9%	

* Modèles ajustés sur âge, sexe et créatinine urinaire

3.3.5.2. Modèles de régression combinés SOL-EAU-AIR (581 sujets)

Le pourcentage de surface de péridotite dans la zone tampon de 200 m autour du lieu d'habitation (PeriSOL200), le pourcentage de surface de péridotite dans les Bassins Versants (PeriEAU_BV) et la densité de trajectoires dans les 30 jours précédant la date de prélèvement urinaire (DT30j) ont été utilisés comme indicateurs d'exposition dans les modèles multivariés incluant simultanément les compartiments SOL, EAU et AIR. Les modèles ont été réalisés chez 581 sujets METEXPO sans données manquantes sur les BV.

Nickel : PeriSOL200 ($\beta=0,023$; $p<10^{-4}$) et DT30j ($\beta=0,153$; $p=0,05$) apparaissent prédictifs de la concentration urinaire de Ni indépendamment l'un de l'autre. Le pourcentage de variance des concentrations urinaires en Ni expliqué par les variables du modèle est de 19,9%. L'ajout de l'indicateur EAU dans le modèle ne modifie qu'à la marge les β du modèle précédent basé sur SOL et AIR.

Chrome : seul DT30j ($\beta=0,519$; $p<10^{-4}$) est associé à la concentration urinaire de Cr. Le pourcentage de variance des concentrations urinaires en Cr expliqué par les variables du modèle est de 7,8%. L'ajout de l'indicateur EAU ne modifie que marginalement les β du modèle précédent basé sur SOL et AIR.

Cobalt : seul l'indicateur PeriSOL200 ($\beta= 0,047$; $p<10^{-4}$) est associé à la concentration urinaire de Ni. PeriEAU_BV et DT30j ne sont pas associés avec la concentration urinaire de Co. Le pourcentage de variance des concentrations urinaires en Co expliqué par les variables du modèle est de 28,0%, peu modifié par rapport au modèle précédent associant les indicateurs d'exposition SOL et AIR.

Manganèse : Les concentrations urinaires ne sont pas associées aux indicateurs d'exposition du modèle.

Tableau 10 : Modèles de régression multivariés des concentrations urinaires Ni, Cr, Co et Mn sur le pourcentage de surface de péridotite dans une zone tampon de 200 m autour du lieu d'habitation (PeriSOL200), le pourcentage de surface de péridotite dans les Bassins Versants à l'origine de l'eau de boisson (PeriEAU_BV), et la densité de trajectoires aériennes issues des sites miniers dans les 30 jours précédant le prélèvement (DT30j) (581 sujets METEXPO sans données manquantes)

	Nickel		Chrome		Cobalt		Manganèse	
	β	p	β	p	β	p	β	p
PeriSOL200	0,023	<.0001	-0,002	0,76	0,047	<.0001	0,031	0,29
PeriEAU_BV	0,001	0,51	-0,005	0,02	0,001	0,45	-0,010	0,32
DT30j	0,153	0,05	0,519	<.0001	0,087	0,30	-0,124	0,78
R ²	19,9%		7,8%		28,0%		2,4%	

* Modèles ajustés sur âge, sexe et créatinine urinaire

3.4. DISCUSSION SUR LES DETERMINANTS DE LA CONTAMINATION PAR LES ETM

L'objectif était de quantifier le rôle de différents milieux environnementaux comme source d'exposition aux ETM dans la population de Nouvelle-Calédonie. Ce projet était basé sur les mesures de Ni, Cr, Co, Mn réalisées dans les prélèvements urinaires de 732 sujets de l'étude METEXPO, à partir duquel un Système d'Information Géographique permettant d'estimer les expositions environnementales a été développé. L'inhalation ou l'ingestion de poussières présentes dans le sol et l'air, ou l'ingestion d'eau ou d'aliments contenant des ETM constituent les principales voies de contamination de la population. Nous nous sommes intéressés en particulier au rôle joué par la présence de péridotite dans les sols à proximité du lieu de résidence ou dans les bassins versants à l'origine de l'eau de boisson, ainsi qu'aux transferts de masses d'air depuis les sites miniers jusqu'au lieu de résidence. Les informations apportées par le projet METALICA-Aliments dans trois micro-régions de Nouvelle-Calédonie ont été jugées non-représentatives de l'ensemble du territoire et n'ont pas permis d'étudier le rôle de l'alimentation dans les niveaux de contamination par les ETM.

3.4.1. SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RESULTATS

Le niveau de Ni mesuré dans les urines est positivement associé à la fois à l'existence de péridotites autour du lieu d'habitation ainsi qu'au déplacement des masses d'air depuis les sites miniers. La présence de péridotites dans les bassins versants à l'origine de l'eau de boisson ne semblait pas associée aux concentrations urinaires de Ni dans le modèle multivarié. La part de la variance des concentrations urinaires en Ni prédite par les variables du modèle multivarié (âge, sexe, créatinine urinaire et ensemble des indicateurs d'exposition) était de 20%, suggérant que d'autres facteurs non pris en compte (alimentation, autres ?) jouent un rôle dans les niveaux de contamination par le Ni.

Le niveau de Cr mesuré dans les urines est associé positivement au déplacement des masses d'air depuis les sites miniers. Nous n'avons pas observé d'association avec la présence de péridotite autour du lieu d'habitation ou dans les bassins versants. La part de la variance de la concentration urinaire en Cr expliquée par les variables du modèle multivarié varie entre 6 et 8%, suggérant que d'autres facteurs non pris en compte jouent un rôle dans les niveaux de contamination par le Cr.

Le niveau de Co mesuré dans les urines est positivement associé à l'existence de péridotites autour du lieu d'habitation ainsi qu'au déplacement des masses d'air depuis les sites miniers. La présence de péridotite dans les bassins versants à l'origine de l'eau de boisson n'apparaissait pas associée aux concentrations urinaires de Co dans le modèle multivarié. La part de la variance des concentrations urinaires en Co prédite par les variables du modèle multivarié (âge, sexe, créatinine urinaire et ensemble des indicateurs d'exposition) était de 25%, suggérant que d'autres facteurs non pris en compte jouent un rôle dans les niveaux de contamination par le Co. L'existence d'une corrélation Ni-Co (Pearson $r^2=0,572$) explique les similitudes avec les résultats du Ni et suggère l'existence de sources d'exposition communes.

Enfin, les concentrations de Mn observées chez les sujets de METEXPO ne sont associées ni aux surfaces de péridotites autour du lieu d'habitation ou dans les bassins versants, ni aux masses d'air issues des sites miniers.

Cette étude a permis de mieux caractériser les sources d'exposition aux ETM à partir de données objectives de la contamination par les ETM chez un grand nombre de sujets répartis sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie, et basée sur un SIG comportant un large ensemble de données (lithologie, occupation du sol, déplacements de masses d'air, bassins versants etc.) dont une partie reste à exploiter. Elle présente certaines limites. Les indicateurs d'exposition utilisés sont des « proxy » d'exposition aux d'ETM, et ne peuvent donc refléter précisément les expositions réelles aux ETM de chacun des sujets. D'autre part, ces indicateurs étaient destinés à caractériser l'exposition sur le lieu de résidence des individus, et ne tient pas compte du temps effectivement passé à la maison ou des habitudes de vie pouvant modifier l'exposition réellement subie. Ces imprécisions dans la construction des indicateurs d'exposition ont pu masquer certaines associations avec les niveaux d'ETM, ou diminuer la force de ces associations. L'indicateur d'exposition à l'eau de boisson (pourcentage de surface de péridotite sur l'ensemble des bassins versants), en particulier, a nécessité plusieurs approximations liées à des données manquantes ou incomplètes qui ont pu conduire aux résultats négatifs observés. Ces résultats pourraient être très différents à partir d'un indicateur plus pertinent d'exposition à l'eau de boisson contaminée, ce qui serait le cas si la Nouvelle-Calédonie disposait d'une réglementation sur l'eau destinée à la consommation humaine imposant des contrôles sanitaires aux producteurs et distributeurs d'eau potable. Nous avons également utilisé le pourcentage de péridotite sur sol dénudé dans les bassins versants comme indicateurs d'exposition plus pertinent, le sol dénudé étant a priori plus susceptible de contaminer les eaux superficielles (voir supra). Toutefois le faible pourcentage de surface dénudée concernée observée ici ne nous a pas

permis d’approfondir ces analyses.

Au total, nos résultats indiquent qu’un sol à base de péridotite autour du lieu d’habitation et que les déplacements de masses d’air prédisent les niveaux de contamination par le nickel, le cobalt principalement et dans une moindre mesure pour le chrome. L’inhalation ou l’ingestion de poussières contenant des ETM générées localement ou provenant des sites miniers est vraisemblablement responsable des associations observées. Les situations sont toutefois contrastées entre le Ni et le Co d’un côté et le Cr de l’autre, suggérant des différences entre les modes de contamination ou les sources d’exposition.

Le tableau ci-dessous résume les principaux résultats :

Source	Indicateur	Ni	Cr	Co	Mn
SOL	% surface de péridotite autour du lieu d'habitation	+	-	+	-
EAU	% surface de péridotite dans les bassins versants	-	-	-	-
AIR	Densité de trajectoires aériennes depuis les sites miniers	+	+	+	-
	<i>R2</i>	~20%	~7%	~25%	~2%

4. INCIDENCE DES CANCERS ET EXPOSITION AUX ETM

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'incidence des cancers selon la commune de résidence et avons tenté d'expliquer les variations en fonction de « scores d'exposition » aux ETM définis pour chaque commune.

Nous avons décomposé ce chapitre en 3 parties :

- Étude de l'incidence des cancers selon la commune de résidence : ce travail a été réalisé grâce aux données fournies par le registre des cancers de Nouvelle-Calédonie.
- Estimation d'un niveau d'exposition moyen aux ETM par commune à l'aide d'un score d'exposition Ni, Cr, Co, Mn calculé sur la base des données de concentrations urinaires de l'étude METEXPO.
- Étude des variations de l'incidence des cancers dans les communes de Nouvelle-Calédonie en fonction des scores d'exposition.

4.1. INCIDENCE DES CANCERS PAR COMMUNE

4.1.1. DONNEES UTILISEES

4.1.1.1. Registre des cancers

Le registre des cancers de Nouvelle-Calédonie a fourni des tableaux du nombre de cas de cancer incidents (nouveaux cas diagnostiqués) sur la période 2008 à 2018 (11 années) par localisation de cancer, sexe, groupe d'âge quinquennal, et commune de résidence.

Le tableau ci-dessous indique le nombre de cas incidents par localisation de cancer. Au total, 9851 cas (5222 cas chez les hommes et 4629 cas chez les femmes) ont été diagnostiqués au cours de la période parmi les résidents de Nouvelle-Calédonie. Les cancers les plus fréquents sont les cancers du sein, les cancers de la prostate, les cancers broncho-pulmonaires, les cancers colo-rectaux, les cancers de la thyroïde et les cancers de la sphère ORL.

Tableau 11 : Nombre de cas de cancer incidents 2008-2018 par localisation et par sexe
(Source : registre des cancers de Nouvelle-Calédonie)

Localisation du cancer	Code CIM-10	Hommes	Femmes	Total
ORL	C00-14, C30-32, C76	351	94	445
Œsophage	C15	92	13	105
Estomac	C16	186	102	288
Autres digestifs	C17, C21, C26	38	54	92
Colon-rectum	C18-20	431	346	777
Hépto-Cellulaire	C22	164	55	219
Vésicule - Voies biliaires	C23-24	66	74	140
Pancréas	C25	133	111	244
Bronches-Poumon	C34	935	453	1388
Mélanomes	C43	136	70	206
Mésothéliome	C45	18	22	40
Sarcomes des tissus mous	C49	28	24	52
Sein	C50	14	1466	1480
Col de l'utérus	C53	0	231	231
Autres organes génitaux Féminins	C51-52, C55, C57	0	43	43
Utérus	C54	0	339	339
Ovaire	C56	0	146	146
Prostate	C61	1357	0	1357
Testicule	C62	50	0	50
Autres organes génitaux M	C60, C63	8	0	8
Rein	C64	129	58	187
Vessie-Voies urinaires	C65-68	158	43	201
SNC	C70-72	73	39	112
Thyroïde	C73	101	348	449
Maladie de Hodgkin	C81	30	14	44
	C82-86, C96	150	104	254
Myélomes	C88-90	91	54	145
Leucémies	C91-93	170	91	261
Autres hémopathies	D45-47	115	79	194
Autres cancers	C33, C37-41, C44, C48, C69, C74-75	109	66	175
Sites mal définis - Primitif inconnu	C80	89	90	179
TOTAL		5222	4629	9851

Le Tableau 12 ci-dessous indique les effectifs de cas de cancer toutes localisations confondues par commune de résidence. Le nombre de cas varie avec la taille de la population de chaque commune, Nouméa incluant plus de 40% des cas avec 2211 hommes et 1907 femmes.

Tableau 12 : Nombre de cas de cancer incidents 2008-2018 par commune et par sexe (Source : registre des cancers de Nouvelle-Calédonie)

Tous cancers			
Commune	Hommes	Femmes	Total
Belep	18	13	31
Boulouparis	63	53	116
Bourail	142	115	257
Canala	45	49	94
Dumbea	437	429	866
Farino	6	11	17
Hienghene	25	48	73
Houailou	74	68	142
Ile des Pins	34	40	74
Kaala Gomen	39	45	84
Kone	80	105	185
Kouaoua	27	15	42
Koumac	61	67	128
La Foa	90	65	155
Lifou	201	202	403
Mare	111	135	246
Moindou	18	15	33
Mont Dore	552	471	1023
Noumea	2211	1907	4118
Ouegoa	46	33	79
Ouvea	76	68	144
Paita	342	254	596
Poindimie	103	73	176
Ponerihouen	56	45	101
Pouebo	51	48	99
Pouembout	32	32	64
Poum	27	22	49
Poya	47	42	89
Sarramea	7	10	17
Thio	46	43	89
Touho	55	33	88
Voh	55	46	101
Yate	45	27	72
Total	5222	4629	9851

4.1.1.2. ISEE

Les données du Recensement de la Population 2014 par sexe, âge, commune a été fourni par l'ISEE. Le RP 2014 situé au milieu de la période d'incidence des cancers (2008-2018) a été utilisé préférentiellement au RP2009 et au RP2019.

Comme attendu, près des deux-tiers de la population réside dans le Grand-Nouméa.

Tableau 13 : Effectifs 2014 de population par sexe et par commune en Nouvelle-Calédonie
(Source : ISEE recensement de la population 2014)

Commune	Homme		Femme		Total	
BELEP	435	0,3%	408	0,3%	843	0,3%
BOULOUPARIS	1 527	1,1%	1 478	1,1%	3 005	1,1%
BOURAIL	2 830	2,1%	2 614	2,0%	5 444	2,0%
CANALA	1 941	1,4%	1 746	1,3%	3 687	1,4%
DUMBEA	15 838	11,7%	15 974	12,0%	31 812	11,8%
FARINO	308	0,2%	304	0,2%	612	0,2%
HIENGHENE	1 259	0,9%	1 224	0,9%	2 483	0,9%
HOUAILOU	2 185	1,6%	2 055	1,5%	4 240	1,6%
ILE DES PINS	995	0,7%	963	0,7%	1 958	0,7%
KAALA-GOMEN	1 073	0,8%	960	0,7%	2 033	0,8%
KONE	3 843	2,8%	3 497	2,6%	7 340	2,7%
KOUAOUA	763	0,6%	689	0,5%	1 452	0,5%
KOUMAC	2 171	1,6%	2 081	1,6%	4 252	1,6%
LA FOA	1 755	1,3%	1 787	1,3%	3 542	1,3%
LIFOU	4 755	3,5%	4 520	3,4%	9 275	3,5%
MARE	2 878	2,1%	2 770	2,1%	5 648	2,1%
MOINDOU	379	0,3%	330	0,2%	709	0,3%
MONT DORE	13 799	10,2%	13 356	10,0%	27 155	10,1%
NOUMEA	49 218	36,3%	50 708	38,1%	99 926	37,2%
OUEGOA	1 249	0,9%	1 111	0,8%	2 360	0,9%
OUVEA	1 747	1,3%	1 627	1,2%	3 374	1,3%
PAITA	10 430	7,7%	10 186	7,6%	20 616	7,7%
POINDIMIE	2 489	1,8%	2 379	1,8%	4 868	1,8%
PONERIHOUEN	1 244	0,9%	1 126	0,8%	2 370	0,9%
POUEBO	1 295	1,0%	1 157	0,9%	2 452	0,9%
POUEMBOUT	1 311	1,0%	1 280	1,0%	2 591	1,0%
POUM	763	0,6%	700	0,5%	1 463	0,5%
POYA	1 569	1,2%	1 467	1,1%	3 036	1,1%
SARRAMEA	303	0,2%	281	0,2%	584	0,2%
THIO	1 391	1,0%	1 252	0,9%	2 643	1,0%
TOUHO	1 054	0,8%	1 033	0,8%	2 087	0,8%
VOH	1 853	1,4%	1 307	1,0%	3 160	1,2%
YATE	892	0,7%	855	0,6%	1 747	0,7%
Total général	135 542	100,0%	133 225	100,0%	268 767	100,0%

4.1.2. CALCUL DU SIR « LISSE »

Nous avons calculé un SIR (Rapport d'Incidence Standardisé ou *Standardized Incidence Ratio* en anglais) par type de cancer et par commune. Le SIR est une mesure de l'incidence des cancers standardisée sur l'âge et le sexe. Il correspond au rapport du nombre de nouveaux cas de cancer diagnostiqués dans une commune au cours de la période considérée (2008-2018) et du nombre de cas attendus dans cette commune au cours de la même période. Le nombre de cas attendus est calculé en appliquant les taux d'incidence spécifiques par âge et sexe d'un cancer donné dans une population de référence à la distribution par âge et sexe de la commune. Dans les calculs réalisés, la population de référence est l'ensemble de la population de Nouvelle-Calédonie. Un SIR supérieur à 1 indique un excès de cancer dans la commune par rapport à l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie, un SIR proche de l'unité indique que l'incidence est proche de celle de l'ensemble du territoire, et un SIR inférieur à 1 indique que l'incidence y est plus faible.

Dans le calcul classique du SIR, les communes sont considérées comme des entités indépendantes. Nous avons préféré calculer un SIR « lissé » grâce à une modélisation BYM* (Besag, 1991) qui tient compte de la structure spatiale des communes de Nouvelle-Calédonie grâce à une matrice de voisinage. Ce SIR lissé permet de mieux prendre en compte la variabilité aléatoire des valeurs de SIR d'une commune à l'autre. Le principe des modèles BYM repose sur une modélisation hiérarchique de type bayésien basé sur une distribution de Poisson log normale. Le modèle BYM est constitué d'une composante d'hétérogénéité et d'une composante de clustering. Le modèle BYM a été implémenté à partir du package INLA dans R version 4.3 :

```
INLA (Observed_case ~ 1 + f(commune id, model = "bym", graph = mat_voisinage), data =  
donnees, E = Expected_case, family = "poisson", control.predictor = list(compute = TRUE),  
control.compute = list(dic = TRUE, waic = TRUE)).
```

* Besag J, York J, Mollié A. Bayesian image restoration with two applications in spatial statistics. Ann Inst Stat Math. 1991;43:1-59.

4.1.3. RESULTATS

Nous présentons ci-dessous les résultats des SIR lissés par commune et un intervalle de confiance de 95% pour les cancers les plus fréquents (>400 cas entre 2008 et 2018). Les tableaux de résultats pour les autres localisations de cancers sont donnés en annexe (*SIR_LISSE_BY_COMMUNE_BYM_Method_Kxx_20231009.xlsx*).

4.1.3.1. Cancer du poumon

Dans le tableau ci-dessous, les SIR lissés par commune sont classés par ordre décroissant. Les SIR varient entre 2,08 (Maré) et 0,8 (Nouméa). La figure permet de visualiser clairement l'existence d'un excès de cancer du poumon dans les Iles Loyauté, l'île des Pins, et plusieurs communes de la côte est.

Tableau 14 : SIR lissés de cancer du poumon par commune

Commune	Cas Observés	Cas attendus	SIR lissé	IC 95%
Maré	63	27,4	2,08	1,61-2,64
Touho	24	11,3	1,80	1,23-2,56
Poindimié	46	23,7	1,78	1,34-2,33
Ile des Pins	18	8,7	1,69	1,10-2,50
Belep	10	4,4	1,67	1,00-2,68
Ouégoa	21	10,9	1,65	1,12-2,36
Ponérihouen	22	12,4	1,56	1,07-2,22
Lifou	69	45	1,49	1,18-1,85
Thio	18	11	1,44	0,96-2,09
Pouébo	16	10,7	1,41	0,93-2,05
Ouvéa	26	17,6	1,40	0,99-1,94
Yaté	12	8	1,36	0,86-2,06
Voh	20	14,7	1,32	0,90-1,86
Hienghène	16	12	1,31	0,87-1,89
Kaala-Gomen	13	9,8	1,29	0,83-1,90
Kouaoua	8	5,6	1,29	0,78-2,03
Houailou	23	18	1,25	0,88-1,74
Poum	8	6,7	1,25	0,76-1,93
Poya	18	14,6	1,23	0,83-1,74
Moindou	5	5,1	1,15	0,67-1,82
Païta	97	84,4	1,15	0,95-1,38
Mont Dore	149	150,9	1,00	0,85-1,16
Sarraméa	1	3,3	0,99	0,54-1,64
Kone	22	25,5	0,98	0,68-1,34
Canala	13	15,7	0,97	0,64-1,40
Bourail	28	32,2	0,96	0,69-1,29
Farino	2	4,6	0,96	0,53-1,56
Koumac	14	18,2	0,95	0,63-1,36
Pouembout	5	9,5	0,89	0,53-1,38
Boulouparis	16	21,7	0,88	0,60-1,25
La Foa	14	22,4	0,81	0,54-1,16
Dumbéa	107	139,2	0,80	0,67-0,96
Nouméa	464	582,9	0,80	0,73-0,88

4.1.3.2. Cancer de la thyroïde

Dans le tableau ci-dessous, les SIR lissés par commune sont classés par ordre décroissant. Les SIR varient entre 2,44 (Lifou) et 0,64 (Païta). Un excès (quasi-)significatif de cancers de la thyroïde supérieur à 50 % est observé à Lifou, Thio, l’Ile des Pins, Canala, Maré, La Foa et Ouvéa.

Tableau 15 :SIR lissés de cancer de la thyroïde par commune

Commune	Observés	Attendus	SIR_LISSE	IC 95%
Lifou	40	14.8	2.44	[1.76;3.30]
Thio	12	3.89	2.21	[1.24;3.70]
Ile des Pins	8	3.04	1.90	[0.99;3.39]
Canala	12	5.4	1.80	[1.04;2.92]
Mare	18	8.77	1.78	[1.13;2.69]
La Foa	13	6.48	1.70	[1.01;2.70]
Ouvéa	11	5.51	1.69	[0.97;2.78]
Kouaoua	5	2.05	1.65	[0.80;3.12]
Moindou	3	1.31	1.53	[0.68;3.07]
Ponerihouen	7	3.86	1.50	[0.79;2.61]
Pouebo	6	3.6	1.45	[0.75;2.58]
Sarramea	2	1	1.42	[0.60;2.91]
Poya	7	4.61	1.36	[0.73;2.34]
Ouegoa	4	3.42	1.19	[0.58;2.16]
Yate	3	2.77	1.19	[0.56;2.23]
Pouembout	4	3.65	1.16	[0.57;2.08]
Farino	1	1.21	1.15	[0.48;2.32]
Poum	2	2.17	1.15	[0.51;2.21]
Kaala Gomen	3	3.11	1.11	[0.53;2.05]
Koumac	6	6.35	1.08	[0.58;1.82]
Poindimie	7	7.7	1.04	[0.58;1.73]
Kone	9	9.78	1.03	[0.60;1.65]
Bourail	8	9.22	1.00	[0.57;1.63]
Belep	0	1.37	0.98	[0.39;1.97]
Dumbea	46	48.49	0.98	[0.74;1.27]
Voh	3	4.48	0.95	[0.46;1.71]
Hienghene	2	3.95	0.93	[0.43;1.70]
Houailou	4	6.32	0.89	[0.45;1.55]
Touho	1	3.61	0.86	[0.38;1.60]
Noumea	153	183.9	0.84	[0.72;0.98]
Boulouparis	2	5.66	0.78	[0.36;1.40]
Mont Dore	31	46.9	0.72	[0.52;0.97]
Païta	16	30.58	0.64	[0.41;0.93]

4.1.3.3. Cancer colorectal

Il existe très peu de variation d'incidence du cancer colorectal entre les communes, toutes les valeurs du SIR étant proches de l'unité.

Tableau 16 : SIR lissés de cancer colorectal par commune

commune	Observés	Attendus	SIR_LISSE	IC 95%
Bourail	30	17,82	1,06	[0.91;1.50]
Touho	15	6,27	1,06	[0.90;1.59]
La Foa	20	12,49	1,03	[0.89;1.38]
Pouebo	10	5,91	1,03	[0.87;1.34]
Noumea	355	329,77	1,02	[0.94;1.13]
Poindimie	14	12,97	1,01	[0.85;1.20]
Ponerihouen	9	6,9	1,01	[0.86;1.23]
Poum	6	3,68	1,01	[0.84;1.28]
Houailou	11	10,07	1,00	[0.85;1.19]
Kaala Gomen	5	5,3	1,00	[0.80;1.18]
Moindou	4	2,8	1,00	[0.84;1.21]
Pouembout	6	5,23	1,00	[0.83;1.20]
Voh	9	8,05	1,00	[0.83;1.20]
Belep	1	2,43	0,99	[0.74;1.20]
Kone	11	14,05	0,99	[0.78;1.14]
Kouaoua	2	3,06	0,99	[0.78;1.15]
Koumac	9	10,21	0,99	[0.80;1.17]
Lifou	25	25,38	0,99	[0.85;1.14]
Mare	14	15,19	0,99	[0.81;1.14]
Ouegoa	4	5,97	0,99	[0.76;1.16]
Ouvea	9	9,89	0,99	[0.81;1.15]
Sarramea	2	1,83	0,99	[0.81;1.17]
Canala	6	8,73	0,98	[0.75;1.12]
Farino	0	2,47	0,98	[0.73;1.13]
Ile des Pins	4	4,96	0,98	[0.77;1.15]
Mont Dore	80	84,27	0,98	[0.85;1.09]
Poya	3	8,05	0,98	[0.69;1.13]
Yate	4	4,55	0,98	[0.79;1.13]
Boulouparis	8	11,6	0,97	[0.74;1.10]
Hienghene	1	6,69	0,97	[0.67;1.13]
Dumbea	62	77,57	0,96	[0.76;1.07]
Paita	37	46,87	0,96	[0.75;1.08]
Thio	1	6,08	0,96	[0.67;1.09]

4.1.3.4. Cancer de la sphère ORL

Les SIR lissés pour les cancers de la sphère ORL ne montrent pas de variation entre les communes, les valeurs variant autour de l'unité entre 0,96 et 1,03.

Tableau 17 : SIR lissés de cancer de la sphère ORL par commune

commune	Observés	Attendus	SIR_LISSE	IC 95%
Noumea	208	182,48	1,03	[0.92;1.17]
Bourail	12	10,08	0,99	[0.84;1.14]
Canala	6	5,33	0,99	[0.84;1.13]
Houailou	10	5,91	0,99	[0.85;1.16]
Ile des Pins	3	2,91	0,99	[0.83;1.16]
Kouaoua	4	1,9	0,99	[0.84;1.14]
Lifou	17	14,44	0,99	[0.85;1.13]
Mont Dore	45	48,09	0,99	[0.85;1.11]
Paita	28	27,89	0,99	[0.85;1.12]
Ponerihouen	7	4,05	0,99	[0.84;1.15]
Thio	5	3,62	0,99	[0.85;1.14]
Yate	3	2,52	0,99	[0.84;1.13]
Boulouparis	6	6,88	0,98	[0.83;1.13]
Farino	0	1,46	0,98	[0.81;1.13]
Kaala Gomen	5	3,21	0,98	[0.81;1.14]
Kone	10	8,9	0,98	[0.82;1.14]
La Foa	3	6,98	0,98	[0.8;1.11]
Mare	9	8,98	0,98	[0.83;1.13]
Moindou	0	1,55	0,98	[0.81;1.12]
Pouebo	6	3,56	0,98	[0.81;1.15]
Poum	4	2,22	0,98	[0.8;1.15]
Sarramea	0	1,04	0,98	[0.82;1.13]
Voh	5	4,92	0,98	[0.8;1.13]
Belep	0	1,44	0,97	[0.76;1.15]
Dumbea	32	45,6	0,97	[0.78;1.1]
Hienghene	0	3,91	0,97	[0.77;1.11]
Ouegoa	2	3,65	0,97	[0.78;1.13]
Ouvea	3	5,66	0,97	[0.8;1.12]
Poindimie	6	7,97	0,97	[0.8;1.12]
Pouembout	1	3,26	0,97	[0.79;1.12]
Poya	2	4,68	0,97	[0.8;1.12]
Touho	1	3,68	0,97	[0.77;1.12]
Koumac	2	6,06	0,96	[0.76;1.12]

4.1.3.5. Cancer du sein

Il existe très peu de variation d'incidence du cancer du sein entre communes, toutes les valeurs de SIR étant proches de l'unité.

Tableau 18 : SIR lissés de cancer du sein par commune

commune	Observés	Attendus	SIR_LISSE	IC 95%
Noumea	671	627,07	1,03	[0.96;1.10]
Mont Dore	161	155,96	1,00	[0.92;1.08]
Bourail	36	30,81	0,99	[0.89;1.09]
Ile des Pins	8	9,85	0,99	[0.87;1.11]
Lifou	58	49,96	0,99	[0.90;1.08]
Boulouparis	18	18,94	0,98	[0.88;1.08]
Dumbea	139	156,7	0,98	[0.88;1.06]
Farino	4	4,03	0,98	[0.87;1.08]
Houailou	20	19,77	0,98	[0.88;1.08]
Kone	35	28,81	0,98	[0.87;1.09]
La Foa	20	22,14	0,98	[0.87;1.07]
Moindou	4	4,49	0,98	[0.87;1.08]
Paita	94	96,01	0,98	[0.89;1.07]
Ponerihouen	14	12,4	0,98	[0.87;1.08]
Poya	16	14,52	0,98	[0.88;1.08]
Thio	9	11,9	0,98	[0.87;1.07]
Yate	6	9,02	0,98	[0.88;1.07]
Canala	13	16,6	0,97	[0.86;1.07]
Kaala Gomen	13	9,52	0,97	[0.85;1.08]
Kouaoua	3	6,04	0,97	[0.86;1.07]
Koumac	22	19,85	0,97	[0.84;1.08]
Mare	26	28,8	0,97	[0.86;1.07]
Ouvea	17	18,23	0,97	[0.86;1.07]
Poindimie	21	23,75	0,97	[0.86;1.07]
Pouembout	11	10,9	0,97	[0.87;1.08]
Sarramea	0	3,3	0,97	[0.86;1.07]
Belep	2	4,41	0,96	[0.80;1.09]
Hienghene	6	12,6	0,96	[0.84;1.06]
Ouegoa	4	10,43	0,96	[0.82;1.07]
Pouebo	8	11,11	0,96	[0.83;1.07]
Poum	3	6,85	0,96	[0.81;1.07]
Touho	7	11,58	0,96	[0.83;1.07]
Voh	11	13,52	0,96	[0.84;1.07]

4.1.3.6. Cancers de la prostate

Les SIR pour les cancers de la prostate ne montrent que peu de variation d'une commune à l'autre. On note cependant un SIR de 1,10 pour Nouméa significativement élevé.

Tableau 19 : SIR lissés de cancer de la prostate par commune

commune	Observés	Attendus	SIR_LISSE	IC 95%
Bourail	46	33,25	1,12	[0.89;1.45]
Noumea	632	563,09	1,10	[1.02;1.19]
Pouebo	16	10,39	1,05	[0.79;1.44]
Koumac	22	17,40	1,02	[0.79;1.35]
Paita	85	81,35	1,00	[0.84;1.19]
Touho	14	11,10	1,00	[0.75;1.34]
Boulouparis	26	23,76	0,98	[0.76;1.26]
Poya	17	14,84	0,98	[0.75;1.29]
Houailou	19	17,58	0,97	[0.74;1.26]
La Foa	24	22,99	0,97	[0.75;1.24]
Lifou	42	41,80	0,97	[0.77;1.20]
Mont Dore	148	149,36	0,97	[0.84;1.12]
Poum	8	6,73	0,97	[0.70;1.31]
Pouembout	10	9,10	0,96	[0.71;1.27]
Kone	25	25,16	0,95	[0.74;1.21]
Moindou	6	5,37	0,95	[0.69;1.28]
Yate	7	7,26	0,94	[0.68;1.25]
Sarramea	3	3,23	0,93	[0.66;1.26]
Farino	4	4,83	0,92	[0.65;1.23]
Belep	3	4,29	0,91	[0.63;1.23]
Poindimie	21	24,11	0,91	[0.69;1.16]
Kaala Gomen	7	10,26	0,89	[0.63;1.16]
Ouegoa	8	11,36	0,89	[0.63;1.15]
Ponerihouen	8	12,32	0,88	[0.62;1.13]
Ile des Pins	4	7,80	0,87	[0.60;1.15]
Voh	10	14,56	0,87	[0.63;1.13]
Thio	6	11,25	0,86	[0.6;1.11]
Kouaoua	1	5,62	0,85	[0.57;1.12]
Canala	8	15,30	0,84	[0.58;1.08]
Ouvea	9	17,18	0,83	[0.58;1.07]
Hienghene	4	12,05	0,82	[0.55;1.06]
Mare	15	26,93	0,81	[0.57;1.03]
Dumbea	99	135,42	0,80	[0.66;0.96]

Figure 10 : SIR par commune Cancer du Poumon

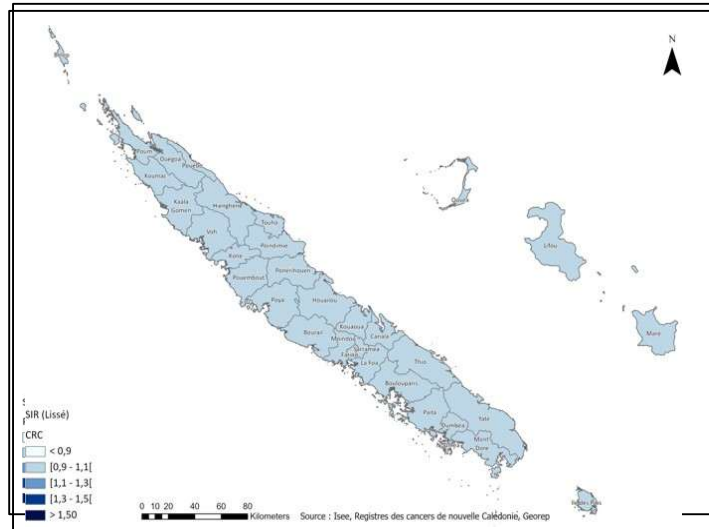


Figure 11 : SIR par commune Cancer de la Thyroïde

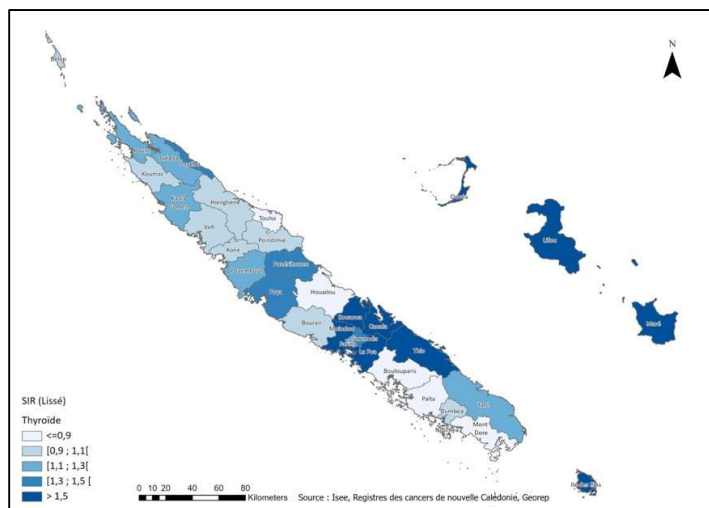


Figure 12 : SIR par commune Cancer Colorectal

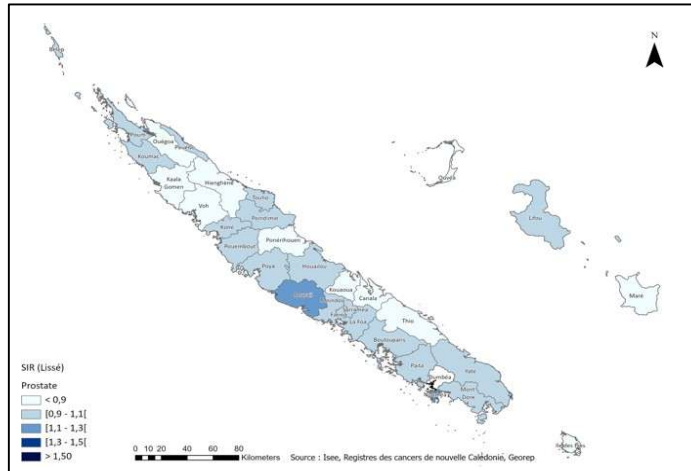


Figure 13 : SIR par commune Cancer de la sphère ORL

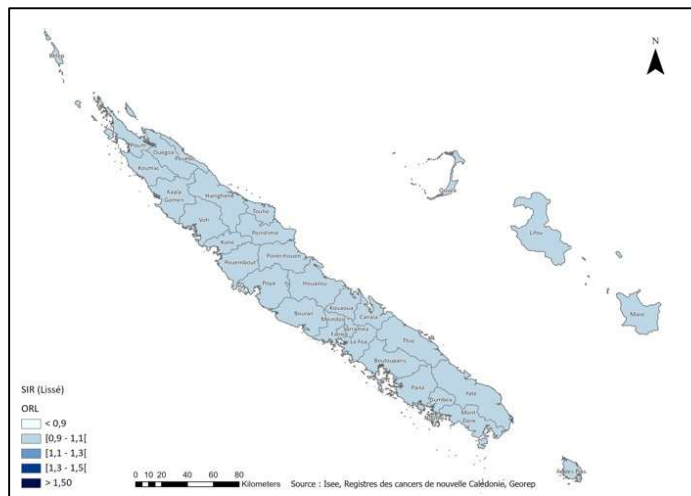


Figure 14 : SIR par commune Cancer du Sein

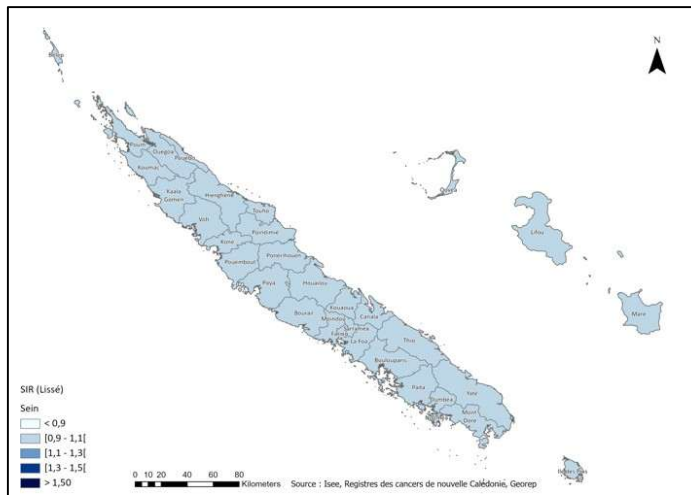


Figure 15 : SIR par commune Cancer de la Prostate

4.1.3.7. Conclusion sur les SIR

L'incidence des cancers du poumon et l'incidence des cancers de la thyroïde varient très sensiblement d'une commune à l'autre avec des augmentations de plus de 50% dans certaines d'entre elles par rapport à l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie. Ces variations ne sont pas retrouvées pour les autres cancers étudiés. Les figures 10 à 15 ci-dessus complètent les tableaux fournis et permettent de visualiser clairement les variations de l'incidence entre les communes de Nouvelle-Calédonie.

4.2. SCORES D'EXPOSITION PAR COMMUNE

4.2.1. DONNEES UTILISEES

Nous avons utilisé les concentrations urinaires en Ni, Cr, Mn, Co mesurées chez les sujets de METEXPO pour déterminer des scores d'exposition moyen par commune. Dans les analyses réalisées, les données issues de seulement 20 communes représentées par au moins 12 sujets dans l'étude METEXPO ont été considérées (682 sujets au total) afin d'obtenir des estimations suffisamment fiables.

Tableau 20 : Liste des 20 communes comportant au moins 12 sujets METEXPO utilisées pour le calcul des scores d'exposition

Commune	N
Bourail	46
Canala	19
Dumbéa	24
Hienghène	17
Houailou	26
Ile des Pins	43
Kone	44
La Foa	34
Lifou	95
Mont Dore	25
Nouméa	73
Ouégoa	17
Paita	18
Poindimié	29
Ponérihouen	14
Poya	25
Thio	56
Touho	14
Voh	25
Yaté	38
TOTAL	682

4.2.2. METHODE DE CALCUL DU SCORE D'EXPOSITION PAR COMMUNE

Les concentrations urinaires, exprimées en µg/gramme créatinine varient selon l'âge et le sexe dans la population METEXPO.

Tableau 21 : Concentrations urinaires moyennes de Ni, Cr, Co, Mn dans la population METEXPO selon l'âge et le sexe (±sd = écart-type de la moyenne)

Age (années)	Ni (µg/g créat)		Cr (µg/g créat)		Co (µg/g créat)		Mn (µg/g créat)	
	Moyenne	± sd	Moyenne	± sd	Moyenne	± sd	Moyenne	± sd
<10	4,32	3,78	2,45	2,21	0,95	0,73	1,76	12,28
10-17	3,28	3,47	1,77	2,05	0,85	1,08	0,24	0,40
18-39	2,14	1,98	1,65	11,26	0,46	0,47	0,16	0,28
40-59	2,56	2,18	1,32	1,21	0,53	0,77	0,23	0,35
≥60	3,03	2,59	1,49	1,15	0,30	0,23	0,31	0,98
Sexe								
Homme	2,80	3,12	1,86	8,98	0,51	0,57	0,27	0,73
Femme	3,09	2,63	1,63	1,89	0,77	0,89	0,83	8,17

Afin d'obtenir une mesure standardisée de l'exposition aux ETM, et obtenir des évaluations de l'exposition comparables d'une commune à l'autre, nous avons calculé une concentration urinaire moyenne pondérée tenant compte de la structure d'âge et de sexe dans chacune des communes. Ces moyennes pondérées peuvent être considérées comme un score d'exposition spécifique de chaque commune.

Pour ce calcul, nous nous sommes basés sur la macro SAS CALMAR de l'Insee*. Le redressement consistait à caler les marges de 8 strates issues du croisement des variables auxiliaires considérées : sexe (homme/femme) et classe d'âge (≤ 9 ; 10-19 ; 20-39 ; ≥ 40) sur des effectifs connus dans la population de la Nouvelle-Calédonie. Ainsi on s'attend à ce que les effectifs pondérés des modalités des variables auxiliaires dans l'échantillon METEXPO soient égaux aux effectifs connus dans la population générale de la Nouvelle-Calédonie après redressement.

4.2.3. RESULTATS

Les tableaux suivants indiquent les valeurs des moyennes redressées (scores d'exposition) par commune pour les 4 métaux considérés. Les communes ont été classées par valeur croissante du score de chaque ETM, et catégorisée dans un quartile de 1 à 4.

* https://github.com/InseeFr/Calmar/blob/main/Doc_Calmar_fran%C3%A7ais.pdf

Pour le Ni par exemple, les 5 communes ayant les scores les plus élevés sont Houailou, l’Ile des Pins, le Mont Dore, Poya et Thio. Pour le chrome, ce sont les communes de Houailou, Kone, Poindimie, Poya et Thio. Les figures permettent de visualiser les quartiles sur la carte de Nouvelle-Calédonie.

Tableau 22 : Moyennes brutes et moyennes redressées (scores d'exposition) des concentrations urinaires en Ni, Cr, Co, Mn dans chaque commune

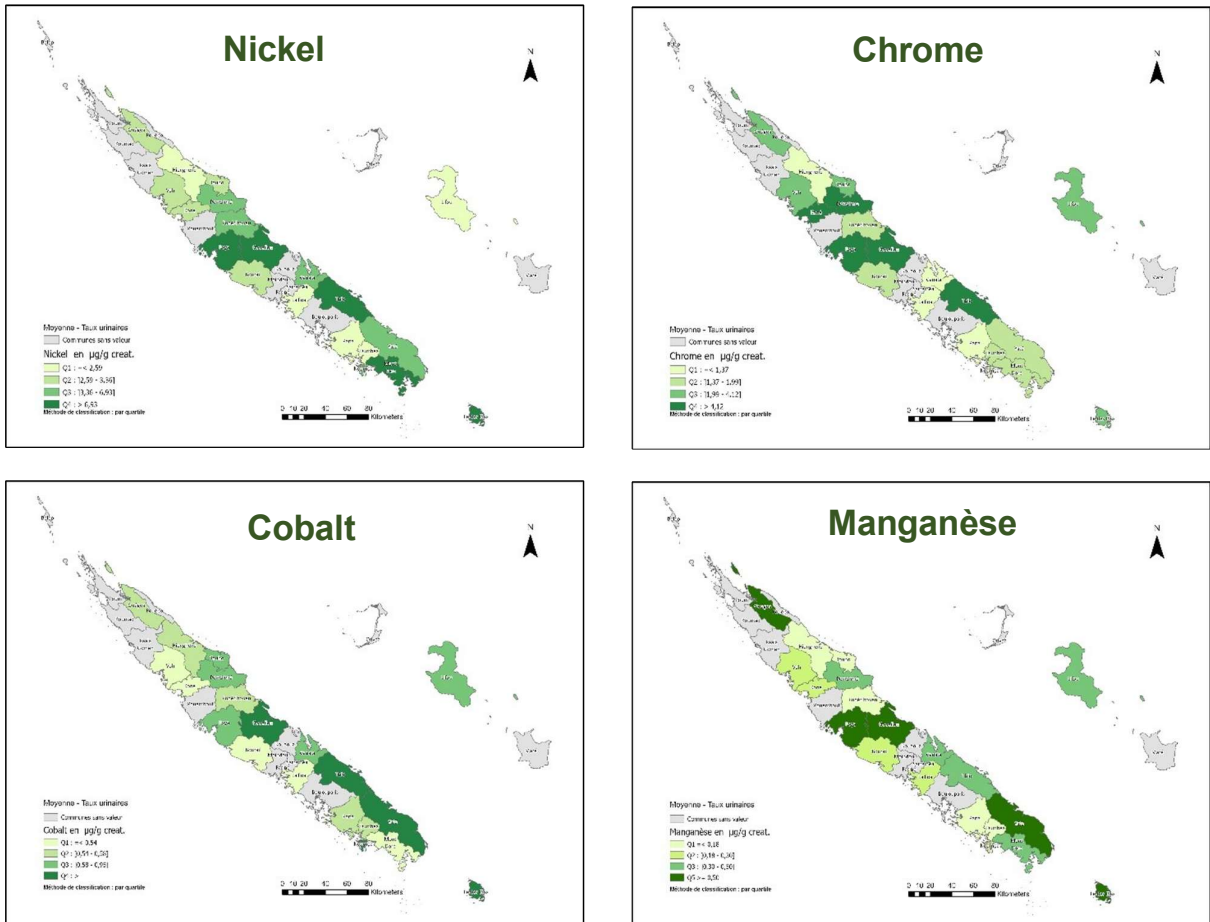
Commune	N	Ni µg/g creat	sd	Ni moyenne redressée	Q1-Q4
Hienghene	17	1,89	0,94	1,72	Q1
La Foa	34	2,22	1,34	1,99	Q1
Paita	18	2,69	2,99	2,55	Q1
Dumbea	24	2,2	1,25	2,57	Q1
Lifou	95	1,69	1,3	2,59	Q1
Ouegoa	17	2,59	1,92	2,63	Q2
Voh	25	2,19	2,34	2,71	Q2
Bourail	46	2,85	2,87	2,98	Q2
Touho	14	2,88	2,45	3,24	Q2
Kone	44	2,25	1,71	3,36	Q2
Canala	19	3,03	1,59	4,01	Q3
Noumea	73	2,69	2,81	4,3	Q3
Poindimie	29	2,15	1,16	5,24	Q3
Ponerihouen	14	4,75	6,17	5,28	Q3
Yate	38	4,9	4,68	6,93	Q3
Mont Dore	25	2,25	1,12	7,17	Q4
Poya	25	2,83	1,29	8,29	Q4
Ile des Pins	43	5,35	4,71	9,48	Q4
Houailou	26	4,38	2,87	10,81	Q4
Thio	56	4,28	3,55	11,36	Q4

Commune	N	Cr µg/g creat	sd	Cr moyenne redressée	Q1-Q4
Paita	18	0,59	0,52	0,53	Q1
Dumbea	24	0,69	0,43	0,53	Q1
La Foa	34	0,81	0,94	0,67	Q1
Bourail	46	1,12	0,9	1,23	Q1
Noumea	73	0,79	0,87	1,37	Q1
Hienghene	17	1,92	1,12	1,38	Q2
Canala	19	1,46	0,89	1,84	Q2
Ponerihouen	14	2,24	1,96	1,91	Q2
Mont Dore	25	0,86	0,88	1,93	Q2
Yate	38	1,66	1,41	1,99	Q2
Ouegoa	17	2,57	3,47	2,03	Q3
Voh	25	1,72	1,41	2,31	Q3
Touho	14	1,79	0,83	2,43	Q3
Lifou	95	2,1	2,17	3,77	Q3
Ile des Pins	43	1,49	1,17	4,12	Q3
Poindimie	29	1,95	1,7	4,54	Q4
Kone	44	1,64	1,38	4,74	Q4
Poya	25	2,6	2,71	4,75	Q4
Houailou	26	2,35	2,65	5,87	Q4
Thio	56	4,59	23,32	9,67	Q4

Commune	N	Co µg/g creat	sd	Co moyenne redressée	Q1-Q4
La Foa	34	0,53	0,74	0,41	Q1
Bourail	46	0,5	0,55	0,43	Q1
Voh	25	0,35	0,22	0,43	Q1
Mont Dore	25	0,31	0,23	0,53	Q1
Kone	44	0,44	0,32	0,54	Q1
Paita	18	0,58	0,7	0,55	Q2
Dumbea	24	0,55	0,43	0,55	Q2
Hienghene	17	0,69	1,08	0,55	Q2
Ouegoa	17	0,47	0,53	0,57	Q2
Ponerihouen	14	0,52	0,41	0,58	Q2
Touho	14	0,56	0,65	0,59	Q3
Poindimie	29	0,51	0,29	0,69	Q3
Canala	19	0,82	0,65	0,78	Q3
Lifou	95	0,54	0,54	0,79	Q3
Poya	25	0,71	0,47	0,95	Q3
Noumea	73	0,55	0,64	0,96	Q4
Houailou	26	0,63	0,5	0,96	Q4
Ile des Pins	43	0,9	0,73	1,13	Q4
Thio	56	1,08	1,44	1,34	Q4
Yate	38	1,06	1,15	1,49	Q4

Commune	N	Mn µg/g creat	sd	Mn moyenne redressée	Q1-Q4
Dumbea	24	0,15	0,13	0,13	Q1
Hienghene	17	0,15	0,12	0,14	Q1
Paita	18	0,2	0,43	0,15	Q1
Ponerihouen	14	0,13	0,16	0,16	Q1
Touho	14	0,17	0,16	0,18	Q1
Voh	25	0,13	0,17	0,21	Q2
La Foa	34	0,29	0,34	0,23	Q2
Noumea	73	0,16	0,29	0,25	Q2
Bourail	46	0,24	0,35	0,26	Q2
Kone	44	0,14	0,12	0,3	Q2
Poindimie	29	0,17	0,22	0,39	Q3
Lifou	95	0,23	0,36	0,4	Q3
Thio	56	0,18	0,22	0,48	Q3
Mont Dore	25	0,18	0,19	0,49	Q3
Canala	19	0,49	0,91	0,5	Q3
Poya	25	0,37	0,64	0,56	Q4
Yate	38	0,87	1,96	0,87	Q4
Houailou	26	0,32	0,73	1,48	Q4
Ile des Pins	43	1,46	5,57	1,53	Q4
Ouegoa	17	9,07	35,73	5,11	Q4

Figure 16 : Moyennes redressées des concentrations urinaires en ETM par commune ($\mu\text{g/g}$ créatinine)



4.3. SCORE D'EXPOSITION AUX ETM ET INCIDENCE DES CANCERS : ANALYSE DE DONNEES AGREGÉES PAR COMMUNE

4.3.1. METHODE UTILISEE

Nous avons utilisé une méthode de régression destinée à étudier le lien potentiel entre les SIR calculés au chapitre 3.1 et les scores d'exposition aux ETM définis au chapitre 3.2. Ces analyses portent sur les 20 communes pour lesquelles des scores d'exposition ont pu être calculés. Il s'agit ici d'une analyse agrégée au niveau communal, et non d'une étude de risque individuel. Ce type d'étude présente plusieurs limites qui seront discutées ultérieurement.

Pour chacun des ETM et chacune des localisations de cancer, nous présenterons les résultats des modèles non ajustés (incluant uniquement le score d'exposition par commune comme variable explicative du SIR) et des modèles ajustés incluant diverses co-variables d'intérêt, potentiellement liées à l'incidence du cancer, et également disponibles au niveau communal.

Le modèle de régression utilisé est un modèle de Poisson log normal qui s'écrit de la façon suivante :

$$\text{Log}(y) = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i$$

Avec

- y la variable d'intérêt suivant une loi de Poisson (SIR par commune)
- α ordonnée à l'origine
- β_i coefficient associé à la $i^{\text{ème}}$ variable explicative x

4.3.2. FACTEURS D'AJUSTEMENT UTILISES DANS LES MODELES

Les facteurs d'ajustement utilisés dans les modèles ont été obtenus soit à partir du Recensement de la Population (RP 2014) de l'ISEE soit à partir du Baromètre Santé 2015. Les variables ont été sélectionnées en fonction de leur effet sur l'incidence des cancers.

Les données issues du RP 2014 sont indiquées dans le tableau ci-dessous. Nous avons considéré le groupe ethnique (% de Kanak, % d'Européens, % Autres, % non déclarés), le niveau d'éducation (% non diplômés, % < baccalauréat, % \geq baccalauréat), le sexe (% hommes), et le % de cases mélanésiennes. Ce dernier paramètre a été pris en compte en considérant une exposition potentiellement plus élevée à des fumées de cuisine ou à des expositions environnementales spécifiques de ce type d'habitat.

Tableau 23 : Co-variables issues du RP 2014 prises en compte dans les modèles de régression ajustés

Commune	Communautés d'appartenance				Niveau d'éducation			Sexe	Habitat
	Kanak	Européens	Autres comm.	Non déclarés	Non diplômés	Edu < Bac	Edu ≥ Bac	Hommes	% cases mélanésiennes
Bourail	33%	37%	7%	23%	24%	42%	34%	52%	0%
Canala	96%	2%	2%	1%	46%	44%	10%	53%	4%
Dumbéa	27%	21%	32%	21%	25%	41%	33%	50%	0%
Hienghène	94%	3%	2%	2%	58%	30%	12%	51%	1%
Houaïlou	86%	2%	6%	6%	39%	46%	15%	52%	1%
Ile des Pins	89%	5%	4%	2%	30%	54%	16%	51%	4%
Koné	54%	19%	11%	16%	23%	41%	36%	52%	2%
La Foa	28%	25%	24%	23%	29%	45%	26%	50%	0%
Lifou	92%	4%	3%	1%	32%	45%	23%	51%	4%
Mont Dore	21%	27%	26%	26%	21%	44%	36%	51%	0%
Nouméa	24%	43%	15%	18%	17%	33%	51%	49%	0%
Ouégoa	72%	7%	3%	18%	49%	41%	10%	53%	3%
Paita	20%	24%	34%	22%	21%	42%	37%	51%	0%
Poindimié	76%	9%	8%	8%	41%	38%	21%	51%	2%
Ponérihouen	89%	3%	5%	4%	42%	44%	14%	52%	4%
Poya	56%	14%	14%	16%	37%	43%	20%	52%	4%
Thio	77%	8%	11%	4%	43%	42%	15%	53%	1%
Touho	77%	8%	5%	10%	38%	46%	17%	51%	1%
Voh	56%	21%	9%	14%	31%	50%	20%	59%	5%
Yaté	96%	2%	2%	1%	43%	45%	12%	51%	2%

Nous avons également extrait du Baromètre Santé 2015 des informations par commune sur le statut tabagique et sur l'Indice de Masse Corporelle moyen (moyenne par commune). Les données sur la consommation d'alcool ont été considérées comme peu fiables et n'ont pas été prises en compte.

Pour le tabac, les effectifs de personnes interrogées dans certaines communes étaient très faibles, voire nuls, et insuffisants pour obtenir une estimation fiable de la consommation tabagique sur l'ensemble de la commune. Nous avons donc regroupé les communes en 5 districts : Nord-est, Nord-ouest, Sud rural, Grand Nouméa et Iles, et avons considéré les % de fumeurs actuels, ex-fumeurs et non-fumeurs dans chacun d'eux pour les hommes et les femmes séparément. Nous avons ensuite calculé un score tabac en affectant arbitrairement un poids de

5 au % de fumeurs actuels et de 1 au % d'ex-fumeurs. Le score tabac par commune est représenté ci-dessous.

Tableau 24 : Co-variables issues du baromètre santé 2015 prises en compte dans les modèles de régression

Communes	Hommes		Femmes		H+F	
	IMC moyen (kg/m ²)	Score Tabac	IMC moyen (kg/m ²)	Score Tabac	IMC moyen (kg/m ²)	Score Tabac
BOURAIL	26,4	2,84	28,19	2,35	27,52	2,61
CANALA	27,32	3,27	28,34	2,67	27,83	2,98
DUMBEA	29,32	2,92	27,79	2,39	28,53	2,65
HIENGHENE	28,94	3,25	30,62	2,67	29,95	2,96
HOUAILOU	24,88	3,17	25,50	2,67	25,19	2,93
ILE DES PINS*	27,35	2,96	27,63	2,63	27,53	2,80
KONE	27,21	2,87	26,45	2,65	26,80	2,77
LA FOA	25,80	2,90	27,68	2,38	27,23	2,64
LIFOU	27,68	2,76	29,13	2,16	28,47	2,47
MONT DORE	29,67	2,89	27,51	2,35	28,59	2,63
NOUMEA	27,09	2,82	24,96	2,30	25,87	2,56
OUEGOA	28,73	3,04	29,72	2,67	29,17	2,87
PAITA	28,35	2,90	26,14	2,36	27,06	2,64
POINDIMIE	26,26	3,08	28,93	2,66	27,66	2,88
PONERIHOUEN	25,67	3,21	28,94	2,67	27,63	2,95
POYA	28,63	2,89	26,91	2,67	27,53	2,78
THIO	28,73	2,95	26,52	2,59	27,26	2,78
TOUHO	27,47	3,09	26,91	2,66	27,13	2,88
VOH	28,91	2,89	27,11	2,65	27,84	2,79
YATE	22,12	2,98	27,55	2,67	25,74	2,83

** Ile des Pins : aucune donnée sur l'île des Pins n'était disponible dans le BSA 2015. Les valeurs de l'IMC ont été inférées comme la moyenne de l'IMC dans les autres communes. Le score tabac a été calculé comme indiqué dans le texte.*

4.3.3. RESULTATS

Dans les Tableaux ci-dessous sont présentés les résultats des modèles d'association entre les SIR et les scores d'exposition agrégés par commune. Le Tableau 30 présente les β non ajustés et le Tableau 31 les β ajustés sur l'IMC moyen par commune, le pourcentage d'hommes, le score de tabagisme, le niveau d'éducation, la communauté d'appartenance et le pourcentage de cases Kanak dans l'habitat.

4.3.3.1.1. Tous cancers :

Les modèles non ajustés indiquent que l'incidence globale des cancers augmente avec le score du Cr. Cette association disparaît après ajustement.

4.3.3.1.2. Cancer du poumon :

- Avant ajustement (Tableau 30), les SIR de cancer du poumon augmentent de façon significative avec les scores de Ni, Cr et Mn par commune. Dans les modèles étudiant séparément les hommes et les femmes, les associations existent dans les deux sexes pour le Cr et le Mn, mais ne sont apparentes que chez les hommes pour le Ni.

- Après ajustement (Tableau 31), aucune des associations observées précédemment ne persiste de façon significative.

4.3.3.1.3. Cancer de la thyroïde :

- Avant ajustement, les SIR de cancer de la thyroïde augmentent de façon significative avec le score de Cr chez les hommes comme chez les femmes.

- Après ajustement, l'association entre le cancer de la thyroïde et le score de Cr persiste chez les femmes à la limite du seuil de signification. Des associations apparaissent entre les SIR de cancer de la thyroïde chez les femmes et les scores de Ni et Co.

4.3.3.1.4. Autres cancers :

L'incidence des cancers ORL augmente avec le score de Co dans les modèles non ajustés. Cette association disparaît après ajustement

Les SIR de cancer de la prostate augmentent avec le score de Co dans les modèles non ajustés. Cette association positive s'inverse après ajustement.

Les SIR du cancer colorectal sont associés négativement avec les scores de Ni, Cr et Co dans les modèles ajustés.

Aucune autre association d'intérêt n'est apparente pour les autres cancers examinés.

Tableau 25 : Résultats du modèle non ajusté étudiant l'association entre les SIR et les scores d'exposition. Analyse agrégée au niveau communal (20 communes)

	N cas (20 communes)	Nickel			Chrome			Cobalt			Manganèse		
		β	IC95%	p	β	IC95%	p	β	IC95%	p	β	IC95%	p
Tous cancers	8781	0,006	(-0,007 ; 0,018)	0,40	0,024	(0,007 ; 0,041)	0,01	0,102	(-0,007 ; 0,211)	0,07	0,017	(-0,032 ; 0,062)	0,49
Colon-rectum	701	-0,020	(-0,061 ; 0,022)	0,37	-0,04	(-0,102 ; 0,017)	0,19	0,000	(-0,335 ; 0,334)	1,00	-0,08	(-0,282 ; 0,074)	0,35
Estomac	249	-0,023	(-0,094 ; 0,044)	0,52	-0,005	(-0,104 ; 0,083)	0,92	-0,308	(-0,872 ; 0,253)	0,28	0,057	(-0,204 ; 0,25)	0,62
Pancréas	210	-0,006	(-0,082 ; 0,066)	0,88	-0,088	(-0,215 ; 0,023)	0,15	0,102	(-0,51 ; 0,713)	0,74	-0,063	(-0,443 ; 0,194)	0,69
ORL	405	0,040	(-0,011 ; 0,088)	0,12	0,04	(-0,029 ; 0,103)	0,24	0,587	(0,148 ; 1,026)	0,01	-0,022	(-0,251 ; 0,154)	0,83
Poumon	1201	0,036	(0,007 ; 0,065)	0,02	0,111	(0,077 ; 0,144)	<0,01	-0,178	(-0,434 ; 0,077)	0,17	0,187	(0,105 ; 0,260)	<0,01
Poumon H	812	0,047	(0,007 ; 0,065)	0,01	0,124	(0,077 ; 0,144)	<0,01	-0,107	(-0,434 ; 0,077)	0,50	0,182	(0,105 ; 0,260)	<0,01
Poumon F	389	0,012	(-0,043 ; 0,064)	0,67	0,078	(0,010 ; 0,140)	0,02	-0,326	(-0,778 ; 0,125)	0,16	0,198	(0,041 ; 0,326)	0,01
Prostate	1227	0,004	(-0,026 ; 0,034)	0,78	-0,019	(-0,063 ; 0,023)	0,39	0,268	(0,016 ; 0,52)	0,04	-0,068	(-0,204 ; 0,048)	0,29
Sein	1349	0,007	(-0,022 ; 0,035)	0,64	0,004	(-0,037 ; 0,042)	0,86	0,138	(-0,104 ; 0,379)	0,26	-0,133	(-0,289 ; -0,001)	0,07
Thyroïde	386	0,012	(-0,041 ; 0,063)	0,64	0,142	(0,086 ; 0,194)	<0,01	0,414	(-0,035 ; 0,862)	0,07	0,117	(-0,062 ; 0,261)	0,15
Thyroïde H	89	-0,058	(-0,183 ; 0,054)	0,33	0,117	(-0,010 ; 0,224)	0,05	0,792	(-0,136 ; 1,717)	0,09	-0,026	(-0,580 ; 0,300)	0,90
Thyroïde F	297	0,032	(-0,028 ; 0,088)	0,28	0,150	(0,086 ; 0,207)	<0,01	0,300	(-0,213 ; 0,812)	0,25	0,152	(-0,043 ; 0,306)	0,08
Vessie	189	-0,009	(-0,090 ; 0,067)	0,83	-0,071	(-0,202 ; 0,044)	0,26	0,166	(-0,478 ; 0,81)	0,61	-0,041	(-0,429 ; 0,218)	0,80
Leucémie	236	-0,048	(-0,122 ; 0,022)	0,20	-0,037	(-0,142 ; 0,056)	0,46	-0,024	(-0,599 ; 0,549)	0,93	-0,034	(-0,356 ; 0,195)	0,81
LNH	238	-0,026	(-0,098 ; 0,042)	0,47	-0,029	(-0,133 ; 0,063)	0,56	-0,037	(-0,612 ; 0,536)	0,90	-0,107	(-0,484 ; 0,152)	0,50

Tableau 26 : Résultats du modèle ajusté étudiant l'association entre les SIR et les scores d'exposition. Analyse agrégée au niveau communal (20 communes).

	N cas (20 communes)	Nickel			Chrome			Cobalt			Manganèse		
		β	IC95	p	β	IC95	p	β	IC95	p	β	IC95	p
Tous cancers	8781	-0,008	(-0,033 ; 0,017)	0,55	0,000	(-0,028 ; 0,027)	0,99	-0,268	(-0,500 ; -0,039)	0,02	0,007	(-0,051 ; 0,061)	0,80
Colon-rectum	701	-0,129	(-0,229 ; -0,038)	0,01	-0,093	(-0,194 ; 0,000)	0,06	-1,608	(-2,399 ; -0,840)	0,00	-0,072	(-0,324 ; 0,119)	0,52
Estomac	249	-0,058	(-0,228 ; 0,086)	0,47	-0,127	(-0,337 ; 0,045)	0,19	0,373	(-0,888 ; 1,601)	0,56	0,008	(-0,35 ; 0,255)	0,96
Pancréas	210	-0,053	(-0,237 ; 0,103)	0,54	-0,138	(-0,360 ; 0,050)	0,18	0,620	(-0,770 ; 1,950)	0,37	0,024	(-0,386 ; 0,295)	0,89
ORL	405	0,030	(-0,074 ; 0,126)	0,55	0,014	(-0,099 ; 0,118)	0,81	-0,431	(-1,416 ; 0,515)	0,38	-0,020	(-0,334 ; 0,205)	0,88
Poumon	1201	0,006	(-0,045 ; 0,055)	0,81	0,030	(-0,023 ; 0,08)	0,26	-0,109	(-0,589 ; 0,362)	0,65	0,058	(-0,042 ; 0,148)	0,23
Poumon H	812	0,015	(-0,032 ; 0,059)	0,52	0,030	(-0,031 ; 0,087)	0,32	-0,099	(-0,517 ; 0,323)	0,64	0,048	(-0,074 ; 0,153)	0,41
Poumon F	389	-0,085	(-0,194 ; 0,02)	0,12	0,014	(-0,097 ; 0,118)	0,80	-0,730	(-1,697 ; 0,207)	0,13	0,092	(-0,100 ; 0,251)	0,29
Prostate	1227	-0,013	(-0,078 ; 0,048)	0,68	0,008	(-0,062 ; 0,074)	0,81	-0,649	(-1,229 ; -0,084)	0,03	0,024	(-0,131 ; 0,154)	0,74
Sein	1349	0,012	(-0,048 ; 0,07)	0,68	0,027	(-0,038 ; 0,089)	0,40	-0,429	(-0,985 ; 0,116)	0,13	-0,115	(-0,315 ; 0,044)	0,20
Thyroïde	386	0,099	(0,018 ; 0,175)	0,01	0,082	(-0,007 ; 0,166)	0,06	0,915	(0,095 ; 1,720)	0,03	-0,016	(-0,251 ; 0,165)	0,88
Thyroïde H	89	0,011	(-0,161 ; 0,152)	0,89	0,049	(-0,157 ; 0,225)	0,61	-0,192	(-1,436 ; 1,114)	0,77	0,045	(-0,625 ; 0,418)	0,85
Thyroïde F	297	0,144	(0,036 ; 0,25)	0,01	0,102	(-0,007 ; 0,206)	0,06	1,118	(0,093 ; 2,147)	0,03	-0,029	(-0,296 ; 0,171)	0,80
Vessie	189	-0,213	(-0,453 ; -0,014)	0,06	-0,094	(-0,313 ; 0,093)	0,37	-0,426	(-1,96 ; 1,025)	0,58	0,021	(-0,463 ; 0,325)	0,91
Leucémie	236	0,021	(-0,118 ; 0,143)	0,76	0,065	(-0,088 ; 0,202)	0,38	0,159	(-1,066 ; 1,329)	0,80	0,101	(-0,193 ; 0,319)	0,43
LNH	238	0,043	(-0,111 ; 0,177)	0,56	0,066	(-0,099 ; 0,214)	0,40	0,051	(-1,334 ; 1,381)	0,94	0,035	(-0,324 ; 0,282)	0,81

Note : Ajustement sur : IMC moyen, % hommes, score de tabagisme, % éducation < Bac, % éducation ≥ Bac, % Européens, % Kanak, % Cases kanak

4.4. DISCUSSION

Dans ce chapitre, l'objectif était d'étudier l'incidence des cancers par commune de Nouvelle-Calédonie, déterminée à l'aide d'un SIR, et le lien avec un score d'exposition aux ETM calculé sur la base des données issues de METEXPO. Les résultats indiquent que l'incidence du cancer du poumon par commune augmente avec les scores d'exposition au Ni, Cr et Mn, mais que l'ajustement sur des facteurs de confusion potentiels tels que le tabac fait disparaître cette association. Nous observons par ailleurs un lien entre l'incidence des cancers de la thyroïde chez la femme et les scores d'exposition au Ni, Cr et Co qui, quant à lui, persiste après ajustement.

Il est important de souligner les limites de cette analyse :

- le score d'exposition est calculé sur la base des concentrations urinaires des sujets de l'étude METEXPO. Nous avons restreint le calcul aux communes pour lesquelles au moins 12 sujets étaient disponibles dans l'étude METEXPO, mais le nombre réduit de sujets dans les plus petites communes a pu entraîner des imprécisions dans la mesure de cet indicateur.

- l'analyse présentée porte sur des données agrégées qui sont à l'origine de biais de type écologique qui ne permettent pas de tirer des conclusions sur les risques individuels à partir de données collectées à l'échelle des communes. Les associations observées entre les scores d'ETM et les cancers du poumon ou de la thyroïde sont suggestives d'un lien possible mais ne permettent pas d'établir l'existence d'un lien de causalité.

Des études approfondies disposant de données d'exposition aux ETM au niveau individuel et recueillant des informations sur les co-expositions à de nombreux facteurs de risque des cancers, permettraient de mieux comprendre les associations observées dans ce projet. Le cancer de la thyroïde, en particulier, constitue une piste de recherche intéressante, d'une part en raison de l'association avec les scores d'exposition qui persiste chez les femmes après ajustement, et d'autre part du fait de l'incidence des cancers de la thyroïde reconnue pour être particulièrement élevée en Nouvelle-Calédonie.

5. ÉVALUATION PRELIMINAIRE DES RISQUES POUR LA SANTE DECOULANT DE L'EXPOSITION PAR INGESTION DE NICKEL ET DE CHROME EN NOUVELLE CALEDONIE : APPROCHE PAR DOSIMETRIE INVERSE A PARTIR DES CONCENTRATIONS URINAIRES DOCUMENTEES DANS METEXPO

5.1. INTRODUCTION

Le projet METEXPO a révélé une exposition relativement élevée à quatre métaux largement répandus dans les sols ultramafiques de la Nouvelle Calédonie : nickel, chrome, cobalt et manganèse (St-Jean et al., 2018). Dans le cadre du projet METALICA-Santé, des données sur les teneurs d'aliments locaux ont été obtenues dans trois régions atelier de l'Île, soit Thio, La Foa, dont l'environnement est influencé par l'activité minière, et Poya, une région témoin. L'objectif était d'évaluer les risques pour la santé découlant de l'exposition de la population aux éléments d'intérêt par la voie orale (eaux potables, aliments locaux, poussières/sols).

Or, bien que les données obtenues soient utiles afin de mieux comprendre l'état de contamination de l'environnement dans ces régions atelier, et en particulier celle des aliments locaux, il s'avère impossible de procéder à l'évaluation des risques associés à cette contamination par l'approche traditionnelle combinant les quantités d'aliments et d'eau ingérées et les concentrations des différents métaux présentes dans ceux-ci. Les problèmes rencontrés sont les suivants :

- Données parcellaires quant aux concentrations retrouvées dans les aliments consommés par la population
 - o Données limitées aux 3 régions atelier
 - o Aucune donnée pour certaines catégories d'aliments
- Données extrêmement parcellaires concernant les concentrations des métaux dans l'eau potable
- Incertitudes au sujet des habitudes alimentaires récentes de la population.
Étant confrontés au manque de données nécessaires à la caractérisation de l'exposition

par la méthode habituellement utilisée en évaluation des risques, nous avons plutôt opté pour une approche par « dosimétrie inversée ». Cette approche a été utilisée pour estimer les doses absorbées, à partir des concentrations urinaires mesurées dans le cadre de l'enquête

METEXPO. Elle a été appliquée au nickel et au chrome, deux éléments dont la principale voie d'excrétion est la voie rénale (ATSDR, 2005; ATSDR, 2012; Suzuki et al., 1984) et dont la demi-vie est relativement courte : 24 à 48 heures pour le nickel (ATSDR, 2005); 40 heures pour le chrome (VI) et 10 heures pour le chrome (III) (ATSDR, 2012).

Rappelons que le nickel et le chrome étaient les deux éléments dont les concentrations urinaires étaient les plus élevées dans l'étude METEXPO, comparativement à celles mesurées chez d'autres populations à travers le monde (St-Jean et al., 2018).

5.2. APPROCHE RETENUE POUR L'ÉVALUATION DU RISQUE

Afin d'évaluer le risque découlant de l'exposition au nickel et au chrome, différentes étapes sont nécessaires : 1) caractérisation du danger, menant à l'identification des valeurs toxicologiques de référence (VTR); 2) caractérisation de l'exposition; et 3) caractérisation du risque. L'évaluation du risque sera réalisée pour les enfants âgés de 3 à 9 ans, soit le sous-groupe ayant montré les concentrations urinaires de nickel et de chrome les plus élevées dans METEXPO (St-Jean et al., 2018).

5.2.1. CARACTÉRISATION DU DANGER ET IDENTIFICATION DES VTR

5.2.1.1. Nickel

Haber et al. (2017) ont établi des VTR pour trois populations d'intérêt : les adultes, les enfants en bas-âge et les personnes sensibilisées au nickel par la voie cutanée. La VTR pour une exposition chronique chez l'adulte par la voie orale, fixée à 20 µg/kg poids corporel (p.c.)/jour, est fondée sur la perte post-implantatoire et la mortalité périnatale observées dans une étude de reproduction sur deux générations chez le rat. L'Agence de protection l'environnement américaine (EPA) avait proposé la même VTR de 20 µg/kg p.c./jour sur la base de la même étude et de la même manifestation toxique (IRIS, 1987). Le point de départ (PoD) à la base de cette VTR est une dose de 2,2 mg/kg p.c./jour, correspondant au NOEL (no-observed effect level) pour l'effet critique retenu (Haber et al., 2017). Selon ces auteurs, les données toxicocinétiques chez le rat et l'humain indiquent que les facteurs d'incertitude appliqués lors de l'élaboration de cette VTR sont très conservateurs.

Comme l'effet critique est lié à l'exposition fœtale et n'est pas pertinent pour les enfants en bas-âge, une VTR distincte pour ce sous-groupe a été dérivée sur la base d'une diminution du poids corporel observée chez de jeunes rats; cette VTR est également de 20 µg Ni/kg p.c./jour. Une VTR distincte de 4 µg Ni/kg p.c. pour une exposition aiguë par la voie orale a

été établie pour protéger les personnes sensibilisées au nickel contre les poussées de dermatite, sur la base d'études chez l'humain impliquant des expositions uniques dans des conditions maximisant l'absorption orale (Haber et al., 2017). De son côté, l'Autorité européenne pour la sécurité des aliments (EFSA, 2020) n'a pas défini une VTR pour cet effet d'exacerbation de l'eczéma chez les individus sensibilisés, mais a plutôt identifié un PoD de 4,3 µg/kg p.c./jour pour ce même effet et est d'avis qu'une ME de 30 et plus indique un risque peu préoccupant pour la santé.

5.2.1.2. Chrome

L'examen de l'ensemble de la littérature concernant les effets sur la santé du chrome ingéré révèle que le chrome (VI) est la forme la plus toxique de ce métal, et que l'intestin grêle est le tissu le plus sensible. Les tumeurs de l'intestin grêle constituaient le paramètre de cancérogénicité le plus sensible après une exposition chronique par la voie orale (observées à partir d'une dose de 1,4 mg de Cr (VI)/kg p.c./jour chez la souris (NTP, 2008). Les effets non néoplasiques les plus sensibles dans cette étude ont été également notés dans l'intestin grêle, soit une infiltration histiocytaire chez le rat et une hyperplasie épithéliale diffuse chez la souris à partir de doses de 0,8 et de 0,2 mg Cr (VI)/kg p.c./jour, respectivement (NTP, 2008). Le développement des tumeurs intestinales chez la souris est probablement lié à l'hyperplasie épithéliale dans l'intestin grêle. Cette dernière constitue l'effet critique sur lequel repose la VTR pour le chrome (VI) de 0,9 µg/kg p.c./jour établie par l'Agence américaine de protection de l'environnement (IRIS, 2024). Alors que le chrome (VI) est considéré cancérogène pour le tractus gastro-intestinal par voie orale, le chrome (III) est un élément essentiel pour lequel des VTR ont aussi été élaborées. Les VTR pour le chrome (VI) étant davantage contraignantes et en l'absence d'information sur la spéciation du chrome dans les principales sources d'exposition, la VTR pour le chrome (VI) a été retenue dans la présente évaluation des risques.

5.2.2. CARACTERISATION DE L'EXPOSITION

L'estimation de l'exposition a été réalisée par dosimétrie inversée, à partir des concentrations urinaires des métaux d'intérêt, lesquelles ont été corrigées pour la concentration urinaire de créatinine.

Selon les principes pharmacocinétiques, lors d'expositions répétées à un xénobiotique, un équilibre est atteint dans le sang (plasma) après une période équivalente à 4-5 demi-vies (Rowland et Tozer, 2011). Il y a alors équilibre entre la quantité d'une substance absorbée et celle éliminée (Fig. 17). Pour une substance majoritairement excrétée dans l'urine dont la demi-

vie est relativement courte, la quantité excrétée quotidiennement dans l'urine devrait refléter la quantité absorbée par l'ensemble des voies et sources d'exposition. Il est donc possible d'estimer une dose moyenne pour la population exposée, laquelle est ensuite comparée à une valeur toxicologique de référence (VTR) pour caractériser le risque.

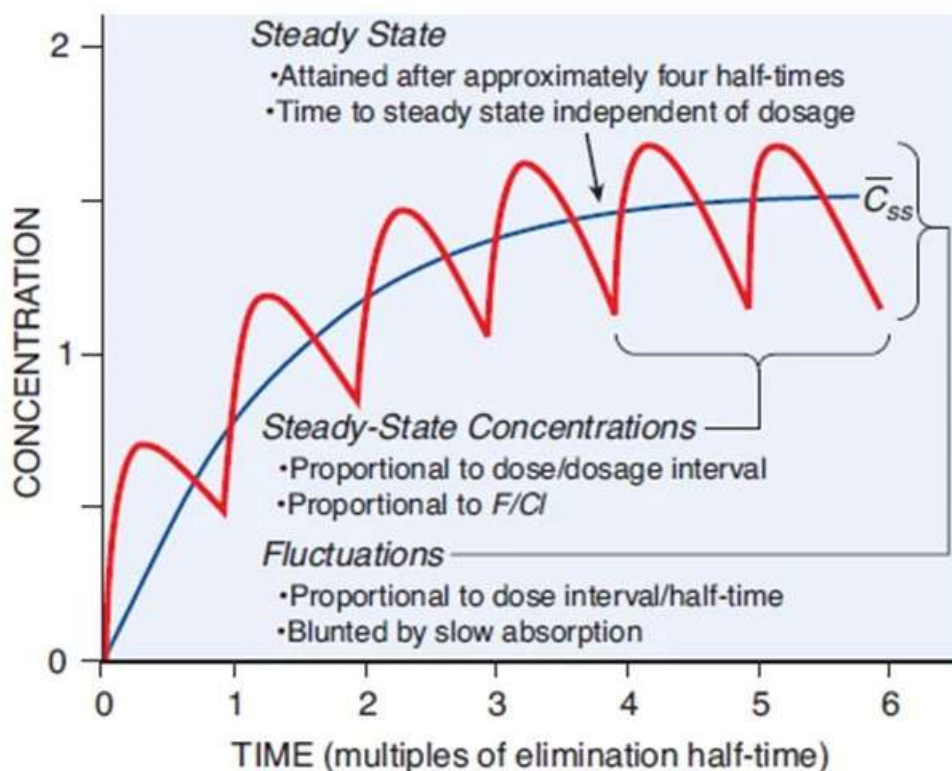


Figure 17 : Atteinte de l'état d'équilibre lors d'exposition répétées (source : biopharmaservices.com)

De nombreux contaminants ne s'accumulent pas dans l'organisme, mais sont plutôt éliminés rapidement à la suite de leur absorption. Cette élimination se fait dans bien des cas par l'excrétion urinaire, généralement dans les heures suivant l'ingestion. Le modèle le plus couramment utilisé pour reconstituer la dose de contaminants éliminés par l'urine est le modèle de correction par la créatinine.

Les muscles produisent quotidiennement de la créatinine, laquelle est excrétée dans l'urine. La créatinine est mesurée pour ajuster les concentrations urinaires des contaminants excrétés dans l'urine (Mage et al., 2008). Il existe des situations pour lesquelles des concentrations élevées de contaminants sont dues à un faible volume urinaire, et non à une forte excrétion du contaminant. Le volume urinaire dépend de l'hydratation, tandis que l'excrétion de créatinine est censée être plus constante et indépendante de l'hydratation. Par conséquent, une concentration urinaire ajustée sur la créatinine tend à être plus stable qu'une concentration

basée sur le volume urinaire. Dans METEXPO, la créatinine a été mesurée dans l'urine des participants, et les concentrations des métaux d'intérêt ont été exprimées en masse de contaminant par masse de créatinine (CU_{créat}).

L'approche de correction par la créatinine préconisée ici peut être utilisée pour estimer l'apport quotidien du contaminant si l'exposition est continue. L'excrétion rénale étant la principale voie d'excrétion, et la demi-vie étant relativement courte, l'équilibre entre l'absorption et l'excrétion peut être assumé au moment de la collecte urinaire. Ces conditions nous semblent être rencontrées pour le nickel et le chrome, et l'exposition quotidienne à ces métaux est assumée correspondre à leur excrétion urinaire. Le taux d'excrétion de la créatinine chez l'enfant varie entre 15 et 25 mg/kg p.c./jour (Kliegman et al., 2016). Pour un enfant de 18 kg, un taux d'excrétion de 0,5 g/jour correspond à la limite supérieure des valeurs prédites selon les modèles appliqués en néphrologie pédiatrique.

● **Estimation de l'excrétion journalière du métal (µg/j)**

$$\text{Excrétion journalière (}\mu\text{g/j)} = \text{CU}_{\text{créat}} (\mu\text{g/g créat.}) \times \text{Excrétion créatinine (g/j)} \quad (\text{Éq. 1})$$

Excrétion de créatinine standard chez les enfants (3–9 ans) : 0,5 g/jour

● **Calcul de la dose journalière (µg/kg pc/j)**

La dose journalière (DJ) est calculée en corrigeant la quantité de métal excrétée quotidiennement selon la fraction du métal absorbée, en présumant que l'exposition provient essentiellement de son ingestion (Fabs-orale), puis est rapportée au poids corporel :

$$\text{DJ (}\mu\text{g/kg pc/j)} : \text{Excrétion journalière (}\mu\text{g/j)} / \text{Fabs-orale} / \text{poids corporel (Kg)} \quad (\text{Éq.2})$$

Poids moyen utilisé pour les enfants (3–9 ans) : 18 kg

Fabs-orale : ce facteur varie en fonction du métal et des caractéristiques de la matrice environnementale.

5.2.3. CARACTERISATION DU RISQUE

- **Calcul de l'indice de danger (Hazard Index, HI)**

Le risque est caractérisé par le rapport à la valeur toxicologique de référence :

$$HI = DJ / VTR \quad (\text{Éq. 3})$$

- **Interprétation de l'indice de danger (HI)**

- HI < 1 : risque négligeable
- HI ≥ 1 : risque non-négligeable (caractérisation plus poussée requise)

- **Calcul de la marge d'exposition**

La marge d'exposition (ME) est parfois calculée pour caractériser le risque selon :

$$ME = PoD / \text{dose journalière (DJ)} \quad (\text{Éq. 4})$$

Une ME > 100 est peu préoccupante lorsqu'il s'agit d'un effet toxique avec seuil. Pour les cancérigènes génotoxiques, une ME >10 000 indique un risque faible.

5.3. RESULTATS

5.3.1. NICKEL

La limite supérieure de l'intervalle de confiance à 95% sur la concentration moyenne (géométrique) de nickel dans l'urine de l'ensemble des enfants de 3 à 9 ans ayant participé à l'enquête METEXPO est de 3,44 µg/g de créatinine. Selon l'équation 1, la quantité de nickel excrétée dans les urines quotidiennement est :

$$\text{Excrétion journalière de Ni (}\mu\text{g/j)} = 3,44 \mu\text{g/g créatinine} \times 0,5 \text{ g/j} = 1,72 \mu\text{g/j}$$

La dose journalière de nickel assumée provenir de la voie orale est ensuite calculée selon l'équation 2, en considérant une absorption de 5% du nickel ingéré (Fabs-orale = 0,05).

$$DJ_{Ni} (\mu\text{g/kg pc/j}) = 1,72 \mu\text{g/j} / 0,05 / 18 \text{ kg} = 1,9 \mu\text{g/kg pc/j}$$

Le HI pour l'hyperplasie de l'épithélium intestinal est calculé selon l'équation 3 :

$$HI = 1,9 \mu\text{g/kg p.c./jour} / 20 \mu\text{g/kg p.c./jour} = 0,10$$

La ME pour l'hyperplasie de l'épithélium intestinal est calculée selon l'équation 4 :

$$ME = 2200 \mu\text{g/kg p.c./jour} / 1,9 \mu\text{g/kg p.c./jour} = 1158$$

La ME pour l'exacerbation de l'eczéma chez les enfants sensibilisés est calculée selon l'équation 4 :

$$ME = 4 \mu\text{g/kg p.c./jour} / 1,9 \mu\text{g/kg p.c./jour} = 2,10$$

Le tableau 28 présente les résultats de l'évaluation des risques associés à l'exposition au nickel par la voie orale des enfants de 3 à 9 ans par zone géographique. Même pour les enfants de la zone Sud-Est, chez qui la concentration urinaire de nickel était la plus élevée dans l'étude METEXPO, l'indice de danger demeure bien en-deçà de 1, tandis que la marge d'exposition excède 500. Quant à la marge d'exposition pour la dermatite chez les enfants sensibilisés, elle est pratiquement inexistante (égale à 1).

Tableau 27 : Évaluation du risque relié à l'exposition au nickel par la voie orale selon la région géographique, sur la base des concentrations urinaires de l'étude METEXPO

Zone	Concentration urinaire ($\mu\text{g Ni/g créat}$) ¹	Excrétion ($\mu\text{g/j}$)	DJNi ($\mu\text{g/kg g/j}$)	HI Retard croissance ²	ME Retard croissance ³	ME Eczéma ⁴
Nord-Ouest	4.04	2.02	2.24	0.11	982	1.78
Nord-Est	4.9	2.45	2.72	0.14	809	1.47
Sud-Est	7.05	3.52	3.92	0.2	561	1.02
Sud-Ouest	4.82	2.41	2.68	0.13	821	1.49
Nouméa	3.64	1.82	2.02	0.1	1089	1.98
Îles Loyauté	2.23	1.12	1.24	0.06	1774	3.23

1 Limite supérieure de l'intervalle de confiance à 95% sur la moyenne géométrique (Cordier et al., 2018)

2 Indice de danger pour les effets toxiques sur le tractus gastro-intestinal

3 Marge d'exposition pour les effets toxiques sur le tractus gastro-intestinal

4 Marge d'exposition pour l'exacerbation de l'eczéma chez les enfants sensibilisés au nickel

5.3.2. CHROME

L'absorption du chrome par la voie orale est relativement faible tant chez les rongeurs que chez l'humain. Celle-ci est généralement inférieure à 2% dans le cas du chrome (III), tandis qu'elle est environ 7 % pour le chrome (VI) (ATSDR, 2012). Aux fins de la présente estimation du risque, nous allons assumer une absorption de 7% de la dose ingérée de chrome (VI) chez l'humain.

La limite supérieure de l'intervalle de confiance à 95% sur la concentration moyenne (géométrique) de chrome dans l'urine des enfants de 3 à 9 ans ayant participé à l'enquête METEXPO est de 1,63 µg/g de créatinine. Selon l'équation 1, la quantité de chrome (VI) excrétée dans les urines quotidiennement est :

$$\text{Excrétion journalière de Cr (VI) (}\mu\text{g/j)} = 1,63 \mu\text{g/g créatinine} \times 0,5 \text{ g/j} = 0,82 \mu\text{g/j}$$

La dose de chrome hexavalent assumée provenir de l'ingestion est ensuite estimée selon l'équation 2, en assumant que 7% du chrome hexavalent ingéré est absorbé ($F_{\text{abs-ora}} = 0,07$).

$$\text{DJCR(VI) (}\mu\text{g/kg p.c./jour)} = 0,82 \mu\text{g/j} / 0,07 / 18 \text{ kg} = 0,65 \mu\text{g/kg p.c./jour}$$

Selon l'équation 3, l'indice de danger correspondant est :

$$\text{HI} = 0,65 \mu\text{g/kg p.c./jour} / 0,9 \mu\text{g/kg p.c./jour} = 0,83$$

La ME pour l'exposition au chrome (VI) est calculée selon l'équation 4 :

$$\text{ME} = 200 \mu\text{g/kg p.c./jour} / 0,65 \mu\text{g/kg p.c./jour} = 308$$

Le tableau 2 présente les résultats de l'évaluation des risques associés à l'exposition au chrome VI par la voie orale des enfants de 3 à 9 ans par zone géographique. Pour les enfants de toutes les zones géographiques, à l'exception de Nouméa, l'indice de danger est légèrement supérieur à 1, alors que la marge d'exposition dépasse 100 dans toutes les zones.

Tableau 28 : Évaluation du risque relié à l'exposition au chrome (VI) par la voie orale selon la région géographique, sur la base des concentrations urinaires de l'étude METEXPO

Région	Concentration urinaire (µg Cr/g créat) ¹	Excrétion (µg/j)	DJCr (µg/kg/j)	HI Hyperplasie epithelium intestinal ²	ME Hyperplasie epithelium intestinal ³
Nord-Ouest	2,97	1,49	1,18	1,31	170
Nord-Est	3,32	1,66	1,32	1,46	152
Sud-Est	2,85	1,43	1,13	1,26	177
Sud-Ouest	2,46	1,23	0,98	1,08	205
Nouméa	1,25	0,63	0,50	0,55	403
Îles Loyauté	2,84	1,42	1,13	1,25	177

1 Limite supérieure de l'intervalle de confiance à 95% sur la moyenne géométrique (Cordier et al., 2018)

2 Indice de danger pour les effets toxiques sur le tube digestif

3 Marge d'exposition pour les effets toxiques sur le tube digestif

5.4. DISCUSSION

Dans le cadre de cette évaluation préliminaire des risques, nous avons assumé que la quantité totale de nickel et de chrome excrétée dans l'urine des enfants de 3 à 9 ans découlait de l'absorption des métaux par la voie gastro-intestinale. Les résultats indiquent que l'exposition au nickel est en moyenne en deçà des VTR pour une exposition chronique par la voie orale. Pour l'exposition à court terme, nous avons aussi considéré l'exacerbation de l'eczéma chez les enfants préalablement sensibilisés au nickel comme effet critique. Puisque la dose d'exposition excède la dose la plus faible ayant induit de tels effets dans les études épidémiologiques, le risque dans ce cas est jugé préoccupant. Nous n'avons pas trouvé d'information sur la prévalence de la sensibilisation au nickel dans la population de Nouvelle-Calédonie. L'EFSA considère que l'incertitude entourant la VTR pour ces effets cutanés est grande. Cette agence recommande la réalisation de nouvelles études avec un plus grand nombre de personnes sensibilisées au nickel et en utilisant différents protocoles d'administration et niveaux de doses. Cela permettrait une meilleure caractérisation de la relation dose-réponse et faciliterait une approche fondée sur la « benchmark dose ». De telles études constitueraient la base d'une évaluation plus précise des risques de réactions cutanées et systémiques liées à

l'exposition au nickel par l'alimentation et l'eau potable chez les individus sensibilisés au nickel (EFSA, 2020).

Dans le cas du chrome, la dose moyenne estimée se rapproche de la VTR, mais la ME se situe entre 100 et 1000, soit dans une plage de valeurs correspondant à un risque faible, dans le cas des substances toxiques non-génotoxiques. Rappelons que face à l'incertitude quant à la forme de chrome présente dans les aliments, l'eau potable et les poussières/sols, nous avons assumé la présence de la forme hexavalente du chrome, dont la toxicité est supérieure à celle de la forme trivalente. Ces hypothèses conservatrices ont été retenues afin de ne pas sous-estimer le risque, en présence des incertitudes importantes entourant l'exposition à ces métaux en Nouvelle Calédonie. S'il s'avère que l'exposition est majoritairement au chrome III, alors le risque pourrait être encore plus faible.

5.4.1.1.1.Limites de l'approche

La dosimétrie inversée ne permet pas d'attribuer l'exposition à une source ou une voie d'exposition précise. Nous avons considéré que l'ensemble de l'exposition provient de l'ingestion d'aliments, d'eau potable et de poussières/sol. Ceci a pour effet de surestimer l'exposition par la voie orale, puisqu'une partie de la dose absorbée et excrétée dans l'urine provient vraisemblablement de la voie respiratoire. Dans ces conditions, notre évaluation indique que l'exposition moyenne de la population par la voie orale au nickel et au chrome n'excède pas les seuils toxicologiques.

Il serait important d'évaluer le risque pour les autres voies d'exposition, notamment l'inhalation de particules en suspension dans l'air. Les organismes gouvernementaux considèrent l'inhalation de particules de nickel (différentes formes) ou de chrome hexavalent comme cancérigène pour l'humain (IARC, 1990; IARC, 2012). L'inhalation de particules contenant les métaux d'intérêt, en particulier résultant des transports aériens sur de longues distances découlant de l'activité des sites miniers (Roth et al., 2021), devrait faire l'objet d'une évaluation spécifique des risques de cancer en particulier des voies respiratoires. L'évaluation des risques sanitaires résultant des émissions métalliques issues de l'activité industrielle de Doniambo dans la métropole de Nouméa devrait également être complétée (Scalair 2016, 2019; Fry et al., 2021).

5.5. CONCLUSION

L'application de la dosimétrie inversée aux données de l'étude de St-Jean et al. (2018) indique que le risque sanitaire associé à l'exposition au nickel et au chrome par la voie orale semble en deçà des seuils préoccupants d'un point de vue de santé publique. L'exacerbation de l'eczéma chez les enfants sensibilisés au nickel est un risque préoccupant qui devrait faire l'objet d'études futures. Enfin, le risque découlant de l'exposition aux métaux par la voie respiratoire devra faire l'objet d'une évaluation spécifique basée sur les concentrations mesurées dans l'air ambiant.

5.6. REFERENCES

ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2005). Toxicological Profile for Nickel. U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, Georgia.

ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2012). Toxicological profile for chromium. U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, Georgia.

Cordier S, Barguil Y, Dominique Y, St-Jean A, Mengant S, Le Bot B, Ayotte P. (2018) – Niveaux d'imprégnation et déterminants de l'exposition humaine aux métaux en Nouvelle-Calédonie. Programme « METEXPO ». CNRT « Nickel & son environnement. 240 pages.

De Brouwere K., et al. (2012). Assessment of indirect human exposure to environmental sources of nickel. *Sci Tot Environ* 419:25–36.

EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain. (2020). Scientific Opinion on the update of the risk assessment of nickel in food and drinking water. *EFSA Journal* 2020;18(11):6268, 101 pp. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6268>

Fry KL, Gillings MM, Isley CF, Gunkel-Grillon P, Taylor MP. (2021). Trace element contamination of soil and dust by a New Caledonian ferronickel smelter: Dispersal, enrichment, and human health risk. *Environ Pollut* 288:117593.

Haber L.T., et al. (2017). Derivation of an oral toxicity reference value for nickel. *Regul Toxicol Pharmacol* 87(Suppl 1):S1–S18.

IARC – International Agency for Research on Cancer. (1990). Nickel and Nickel Compounds. Volume 49. Lyon, France.

IARC – International Agency for Research on Cancer. (2012). Arsenic, metals, fibres, and dusts. Volume 100 C - A review of human carcinogens. Lyon, France.

Institute of Medicine. (2001). Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. Washington, DC: National Academies Press.

IRIS – Integrated Risk Information System. (1987). Nickel, soluble salts. Chemical Assessment Summary. National Center for Environmental Assessment, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

IRIS – Integrated Risk Information System. (2024). IRIS Toxicological Review of Hexavalent Chromium [Cr(VI)] CASRN 18540-29-9. National Center for Environmental Assessment, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Kliegman R M, et al. (2016). Nelson Textbook of Pediatrics (20th ed.). Elsevier. Mage DT, Allen RH, Kodali A. (2008). Creatinine corrections for estimating children's and adult's pesticide intake doses in equilibrium with urinary pesticide and creatinine concentrations. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 18:360-8.

NTP – National Toxicology Program. (2008). Toxicology and carcinogenesis studies of sodium dichromate dihydrate (Cas No. 7789-12-0) in F344/N rats and B6C3F1 mice (drinking water studies). *Natl Toxicol Program Tech Rep Ser. Jul;(546):1-192.*

Roth E, Burgalat J, Rivière E, Zaiter M, Chakir A, Pasquet C, Gunkel-Grillon P. (2021). Nickel spreading assessment in New Caledonia by lichen biomonitoring coupled to air mass history. *Environ Sci Pollut Res Int* 28(5):6058-6067.

Rowland M, Tozer TN. (2011). *Clinical Pharmacokinetics and Pharmacodynamics: Concepts and Applications* (4th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.

SCAL-AIR. (2019). *Mesure des métaux lourds dans l'air ambiant à Nouméa en 2014-2017*

SCAL-AIR, DASS-NC, SEPIA-Santé et al. (2016). *Études sur la santé en relation avec la qualité de l'air à Nouméa. Étude écologique géographique.*

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. *Environ Int* 118:106-115.

Suzuki, Y., Homma, K., Minami, M. et Yoshikawa, H. (1984). Distribution of chromium in rats exposed to hexavalent chromium and trivalent chromium aerosols. *Ind. Health*, 22: 261-267.