



ENSP

ÉCOLE NATIONALE DE
LA SANTÉ PUBLIQUE

RENNES



INSTITUT DE
VEILLE SANITAIRE

Cire Réunion-Mayotte

**Ingénieur du Génie Sanitaire
Promotion 2005**

**Etude préalable à la réalisation d'une EQRS
vis-à-vis des ETM présents dans les sols
réunionnais**

Auteur : Manuel RODICQ

Structure d'accueil : Cire Réunion – Mayotte

Accompagnant professionnel : Jean-Louis SOLET

Référent pédagogique : Jean CARRE

Remerciements

Un grand nombre de personnes a permis que ce travail voit le jour. Celles ci doivent être remerciées pour l'aide que chacune a pu m'apporter.

Je tiens donc à remercier en premier lieu ceux qui ont contribué d'un point de vue technique et méthodologique à la mise en œuvre de cette étude.

M. Jean Louis SOLET, Ingénieur épidémiologiste à la Cire Réunion – Mayotte , référent professionnel du mémoire, pour ses conseils avisés et ses relectures.

M. Jean CARRE, Docteur en hydrogéologie et professeur à l'ENSP, référent pédagogique du mémoire, pour son suivi et ses encouragements.

Tout le personnel de la Cire Réunion – Mayotte : M. Phillippe RENAULT (médecin épidémiologiste), M. Daouda SISSOKO (médecin épidémiologiste), M. Vincent PIERRE (pharmacien épidémiologiste et coordonnateur de la Cire), et Mme Yasmine HAFIZOU (secrétaire) pour leur accueil et leur aide à la demande.

Je n'oublierais pas de remercier particulièrement Mlle Elsa BALLEYDIER (infirmière monitrice d'étude à la Cire) pour les moments partagés dans le bureau commun.

Egalement les personnes qui m'ont permis de réunir les données nécessaires à ce travail : M. Emmanuel DOELSH (Cirad – Réunion), M. Jean Claude DENYS et Noël FIARD (Drass Réunion, Service Santé Environnement), M. Francis ALBAREDE (ENS Lyon), Mme Laure DU CHAFFAUT (Afssa) et Jean Paul AMBROSI (IRD Nouméa).

En second lieu, je voudrais remercier, les personnes qui m'ont soutenu en dehors du travail :

Manuel MARQUIS, pour l'humour et la compréhension pendant la collocation forcée.

La bande de stagiaires randonneurs et plagistes de la cité pour les week-ends bien remplis.

Mes parents pour leur visite.

Et merci à Juliette.

Sommaire

Introduction	1
1 Contexte	3
1.1 Généralités	3
1.1.1 Géographie générale :.....	3
1.1.2 Démographie :.....	3
1.2 Les Eléments Traces Métalliques (ETM)	3
2 Identification des indicateurs pertinents à la réalisation d'une EQRS	5
2.1 Particularités géologiques et pédologiques des sols réunionnais	5
2.1.1 Etudes sur les laves réunionnaises.....	5
2.1.2 Etudes sur les sols réunionnais.....	7
2.2 Choix des ETM pertinents à prendre en compte pour la réalisation d'une EQRS	10
2.2.1 Comparaison sols français/sols réunionnais	11
2.2.2 Comparaison par rapport aux valeurs servant de référentiel.....	12
2.3 Le nickel et le chrome	14
2.3.1 Nickel.....	14
A) Généralités	14
B) Comportement dans l'environnement.....	15
2.3.2 Chrome	16
A) Généralités	16
B) Comportement dans l'environnement.....	17
2.4 Choix des spéciations prisent en compte pour la réalisation d'EQRS	18
2.5 Le nickel et le chrome : données environnementales à La Réunion	18
2.5.1 Dans les roches et les sols	18
2.5.2 Dans l'alimentation (animaux, lait, œufs...)	19
2.5.3 Dans les végétaux.....	20
2.5.4 Dans l'air.....	21
2.5.5 Dans l'eau	21
3 Caractérisation des dangers	23
3.1 Nickel	23
3.1.1 Biodisponibilité dans l'organisme	23
3.1.2 Distribution et élimination dans l'organisme	23
3.1.3 Toxicité.....	23
A) Aiguë.....	23
B) Chronique.....	24
3.2 Chrome	24
3.2.1 Biodisponibilité dans l'organisme	24
3.2.2 Distribution et élimination dans l'organisme	24
3.2.3 Toxicité.....	25
A) Aiguë :	25
B) Chronique :	25
4 Choix des VTR (Valeurs Toxicologiques de Référence)	26
4.1 Pour la population générale	26
4.1.1 VTR proposées pour le nickel par les services de recherches spécialisées	26

A)	L'approche de Santé Canada.....	26
B)	L'approche du Rivm.....	27
C)	L'approche de l'OEHHA	27
4.1.2	VTR proposées pour le chrome III par les services de recherches spécialisées	27
A)	L'approche de l'US EPA.....	27
B)	L'approche du Rivm.....	27
4.1.3	Résumé des VTR.....	28
4.2	Valeurs limites pour le milieu professionnel.....	28
4.2.1	Le nickel.....	28
4.2.2	Le chrome	28
5	Scénarii d'exposition.....	29
5.1	Facteurs environnementaux.....	29
5.1.1	Les sols	29
5.1.2	L'alimentation	29
5.1.3	Les végétaux.....	29
5.1.4	L'eau de boisson.....	29
5.1.5	L'air	29
5.2	Facteurs humains	30
5.2.1	Population générale	30
A)	Les enfants.....	30
B)	Les adultes	32
5.2.2	Population professionnelle	34
A)	Ingestion.....	34
B)	Inhalation	34
5.3	Propositions de scénarii d'exposition.....	34
5.3.1	Population générale	34
A)	Les enfants.....	35
B)	Les adultes	36
5.3.2	Population professionnelle	37
6	Discussion.....	39
6.1	Identification des indicateurs pertinents à la réalisation d'une EQRS.....	39
6.1.1	Choix des métaux et des spéciations.....	39
6.1.2	Fond géochimique naturel et teneurs dans l'environnement en nickel et en chrome	39
6.2	Caractérisation des dangers	40
6.3	Choix des valeurs toxicologiques de référence.....	40
6.4	Scénarii d'exposition.....	40
6.4.1	Facteurs environnementaux.....	41
6.4.2	Facteurs humains	42
6.4.3	Proposition de scénarii d'exposition	42
A)	Population générale	43
B)	Population professionnelle	43
6.5	Méthodologie et déroulement du mémoire	44
7	Perspectives.....	45
8	Conclusion.....	46
	Bibliographie.....	47
	Liste des annexes.....	I

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique en éléments traces de laves représentatives du Piton des Neiges (concentrations exprimées en ppm, Nativel et al., 1979).....	5
Tableau 2 : Composition moyenne des cristaux observés dans les laves du Piton de la Fournaise (concentrations exprimées en ppm, Albarède et al., 1997).....	6
Tableau 3 : Teneurs en ETM dans les coulées basaltiques du Piton de la Fournaise (concentrations exprimées en ppm, Albarède et al., 1997).....	7
Tableau 4 : Répartition des unités de milieu par domaines (Cirad, 1991).....	8
Tableau 5 : Caractéristiques de la population partielle des sols réunionnais (Cirad, 2004).....	8
Tableau 6 : Valeurs en ETM sur une coulée du Piton de la Fournaise (Bureau d'études GEISER, 2003).....	9
Tableau 7 : Concentrations ubiquitaires (Ineris – Nickel et ses dérivés – fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques).....	14
Tableau 8 : Caractéristiques physiques du nickel et de ces composés, (Inrs – fiche toxicologique 68).....	15
Tableau 9 : Concentrations ubiquitaires (Ineris – Chrome et ses dérivés – fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques).....	16
Tableau 10 : Teneurs en nickel et en chrome dans les aliments en ppm (Inra, 2004).....	19
Tableau 11 : Résumé des teneurs en Ni et en Cr dans les végétaux en ppm (Cirad, 2004).....	20
Tableau 12 : Résumé des teneurs en Ni et en Cr dans les végétaux en ppm (Inra, 2004).....	20
Tableau 13 : Résultats d'analyse des prélèvements de poussières dans les stations de concassage (CGSS, 2003).....	21
Tableau 14 : Teneurs en nickel et en chrome de l'eau de La Réunion en mg/L (Service Santé Environnement, Drass, 2005).....	21
Tableau 15 : Teneurs en nickel et en chrome de l'eau en mg/L (Inra, 2004).....	22
Tableau 16 : Résumé des VTR du nickel et du chrome.....	28
Tableau 17 : Poids moyen des enfants (US EPA).....	30
Tableau 18 : Consommation d'eau pour les enfants en mL (Afssa, 1999).....	30
Tableau 19 : Consommation alimentaire des enfants de 3 à 14 ans en g/j (Afssa, 1999).....	32
Tableau 20 : Poids des adultes (US EPA).....	32
Tableau 21 : Consommation d'eau pour les adultes en mL (Afssa, 1999).....	33
Tableau 22 : Consommation alimentaire en g/j (Afssa, 1999).....	34
Tableau 23 : Proposition de bol alimentaire pour la zone subsaharienne en g/j.....	37
Tableau 24 : Résumé des facteurs environnementaux.....	41
Tableau 25 : Résumé des facteurs humains.....	42

Liste des figures

Figure 1 : Eléments traces prédominant en fonction de la roche mère.....	4
Figure 2 : Evolution des teneurs en ETM des différentes laves du Piton des Neiges.....	6
Figure 3 : Moyennes des concentrations en métaux des roches métropolitaines et réunionnaises.....	11
Figure 4 : Médianes des concentrations en nickel des laves réunionnaises et des roches métropolitaines.....	12
Figure 5 : Moyennes des concentrations en nickel des laves réunionnaises et des roches métropolitaines.....	12
Figure 6 : Médianes des concentrations en chrome des laves réunionnaises et des roches métropolitaines.....	13
Figure 7 : Moyennes des concentrations en chrome des laves réunionnaises et des roches métropolitaines.....	13
Figure 8 : Moyennes des concentrations en zinc des laves réunionnaises et des roches métropolitaines.....	III
Figure 9 : Moyennes des concentrations en cuivre des laves réunionnaises et des roches métropolitaines.....	III
Figure 10 : Moyennes des concentrations en mercure des laves réunionnaises et des roches métropolitaines.....	IV
Figure 11 : Moyennes des concentrations en cadmium des laves réunionnaises et des roches métropolitaines.....	IV

Liste des sigles utilisés

ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

Afssa : Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments.

ATSDR : Agency for Toxic Substances and Disease Registry.

BCF : Facteur de bioaccumulation.

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

Cirad : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

CGSS : Caisse Générale de Sécurité de Sécurité Sociale de La Réunion.

EHESS : Ecole des Hautes Etudes en Science Sociale.

EQRS : Evaluation Quantitative du Risque Sanitaire.

ETM : Eléments Traces Métalliques.

IAM : Institut Agronomique Méditerranéen.

IARC : International Agency for Research on Cancer.

Inpes: Institut National de Prévention et d'Education pour la Santé.

Inra : Institut National de la Recherche Agronomique.

Inrs : Institut National de Recherches et de Sécurité.

Insee : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques.

IRD : Institut de Recherche pour le Développement.

LICP : Laboratoire Interrégional de Chimie Toxicologie.

OEHHA : Office of Environmental Health Hazard Assessment.

ODR: Observatoire du Développement de La Réunion.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

ORA : Observatoire Réunionnais de l'Air.

Rivm : Rijksinstituut Voor Volksgezondheid en Milieu (Pays Bas).

RHI : Résorption de l'Habitat Insalubre.

US EPA : U.S. Environmental Protection Agency.

VCI : Valeur de Constat d'Impact.

VDSS : Valeur de Définition de Source-Sol.

VME – VLE : Valeur Moyenne d'Exposition – Valeur Limite d'Exposition.

VTR : Valeur Toxicologique de Référence.

INTRODUCTION

L'île de La Réunion est située dans l'Océan Indien, d'origine volcanique elle est formée des laves issues des éruptions du Piton de la Fournaise et, antérieurement, du Piton des Neiges. A ces roches volcaniques sont associées des teneurs en métaux lourds relativement importantes. Ces métaux qui font partie des éléments Eléments Traces Métalliques (ETM), sont en conséquence naturellement présents dans les sols réunionnais à des teneurs pouvant être élevées.

Les ETM correspondent aux 80 éléments de la classification périodique dont la concentration dans la croûte terrestre ne dépasse pas 0,1 %. L'origine et les caractéristiques des ETM sont présentées dans la première de ce travail.

L'abondance de nickel et de chrome dans les sols réunionnais a été mise en évidence à l'occasion de la réhabilitation d'un site anciennement occupé par une station d'épuration. Une étude des sols sous la station relevait des teneurs en nickel et chrome anormalement élevées. En fait, après plus d'investigation, il s'est avéré que les teneurs trouvées sur le site de la station correspondaient aux valeurs naturelles dans cette région de l'île.

Des recherches bibliographiques ont alors révélé le peu de connaissances disponibles sur les teneurs en métaux lourds dans les sols de La Réunion tout en permettant d'expliquer l'existence des teneurs élevées sur le site par la nature géologique des terrains et non par une pollution anthropique.

La mise en œuvre sur ce site des démarches d'évaluation des risques (simplifiée ou détaillée) développées par le MEDD est rendue difficile dans ce contexte par l'existence d'un fond géochimique naturel élevé. Les valeurs guides proposées en matière de pollution des sols (VDSS et VCI, cf. 2.2.2) ne peuvent être utilisées en l'absence de connaissance du fond géochimique naturel local. En 2003 un travail de caractérisation des concentrations en ETM a été réalisé, à La Réunion, par le Cirad sur les trois compartiments : sols-végétaux-déchets. Ce travail d'inventaire, partiel, car ne concernant qu'un nombre limité de points de mesure répartis sur l'ensemble de l'île, constitue une première approche pour la connaissance de la situation locale.

L'étude suivante permettra d'établir un regroupement des données disponibles pour une meilleure prise en compte des problèmes liés à la présence d'ETM dans les sols réunionnais.

Les réponses aux interrogations relatives aux éventuels risques sanitaires liés à la présence d'ETM peuvent favoriser la mise en place d'un programme d'acquisition des connaissances sur les fonds géochimiques naturels à La Réunion et permettre une caractérisation plus précise des teneurs dans les sols d'origine volcanique.

A partir de la connaissance du contexte et des enjeux propres à l'île de La Réunion et des teneurs en ETM dans les différents compartiments de l'environnement, ce travail propose de rechercher les éléments nécessaires et les limites relatives à la réalisation d'une évaluation du risque sanitaire lié à la présence d'ETM dans les sols réunionnais par la méthode EQRS.

Dans un premier temps le contexte particulier de l'île de La Réunion sera présenté et les ETM définis.

Le choix et la description d'indicateurs pertinents seront réalisés dans la seconde partie.

La caractérisation des dangers et la recherche de valeurs toxicologiques de référence (VTR) relatifs aux ETM retenus seront développés dans la troisième et la quatrième partie. Des scénarii d'exposition seront ensuite proposés à partir des connaissances actuelles et d'hypothèses plus ou moins conservatrices sur la présence des ETM dans l'environnement. Une discussion sur les limites de l'exercice mettra en évidence les défauts de connaissance limitant la réalisation d'une EQRS. Cette étape permettra également une critique des choix effectués au cours de l'étude. Des pistes de recherches et des études complémentaires seront préconisées en fin de rapport afin d'améliorer les connaissances.

1 CONTEXTE

1.1 Généralités

1.1.1 Géographie générale :

L'île de La Réunion, île tropicale de l'hémisphère sud, est la partie émergée d'un énorme volcan bouclier de 7000 m de hauteur et d'une circonférence de 700 à 800 km, reposant sur le plateau océanique à 4000 m de profondeur. Sa surface est de 2511 km², de forme ellipsoïdale orientée Nord-Ouest/Sud-Est. Le point culminant est le Piton des Neiges à 3069 m et le volcan actif, le Piton de la Fournaise à 2631 m.

Le climat y est de type tropical humide marqué par deux saisons. L'hiver austral, de mai à novembre, est plutôt frais et sec. L'été austral, de décembre à avril, est nettement plus chaud et pluvieux, avec des précipitations extrêmes et des phénomènes cycloniques

L'île est composée de deux principales régions climatiques, qu'il faut également croiser avec l'altitude qui accentue les différentiels thermiques et pluviométriques (on parle des « hauts » de l'île) :

- la côte "au vent", orientée Nord-Est face aux alizés, reçoit 70% des précipitations (3 à 10 m/an),
- la côte "sous le vent" orientée Sud-Ouest, reçoit moins de 2 m/an et de façon très irrégulière.

1.1.2 Démographie :

La population s'élève à plus de 700 000 habitants (Insee, mai-juin 1998), dont près de 85% vit sur la bande côtière qui concentre l'essentiel des activités économiques. La pression humaine sur l'espace et l'environnement croît très rapidement, puisqu'il y avait 270 000 habitants en 1950 et qu'il en est prévu plus d'un million en 2030.

L'évolution de la population de 1974 à 1990 est très variable selon la région de l'île : avec + 54 % dans l'Ouest, + 36 % dans le Sud, + 19 % dans le Nord et + 29 % dans l'Est.

La répartition actuelle de la population dans l'espace est très polarisée, avec une saturation des régions Nord et Ouest et, d'une façon générale, la zone littorale par opposition aux montagnes et à la zone des Hauts.

1.2 Les Eléments Traces Métalliques (ETM)

• Définitions :

Les éléments traces métalliques sont des éléments chimiques ubiquistes présents à la surface de la terre à des concentrations inférieures à 0.1%.

La plupart des ETM présentent la double propriété d'être à la fois des oligo-éléments et des éléments toxiques. Autrement dit, ces éléments sont indispensables aux processus vitaux mais peuvent devenir toxiques.

• Origine des ETM :

Les éléments traces présents dépendent du type de roche et en particulier du type de lave. En conséquence leur abondance varie dans les sols qui en dérivent.

En général, parmi les roches cristallines, les plus basiques contiennent davantage d'ETM et celles qui sont acides et riches en silice ont des teneurs plus élevées en matière organique.

<u>Type de roche</u>		<u>Eléments traces prédominant</u>
Magmatique ultrabasique		Chrome
Magmatique éruptive (basalte)		Cobalt, Nickel
Argiles – schistes		Zinc
Sédimentaires		Cadmium, Plomb

Figure 1 : Eléments traces prédominant en fonction de la roche mère

Les teneurs en ETM dépendent donc directement de la nature des roches mères sur lesquelles ils se sont formés.

Le comportement des ETM n'est pas bien connu à La Réunion. Des campagnes de recherches sont en cours pour étudier les conditions de présence et les caractéristiques des différentes spéciations. Ces études permettront de mieux apprécier des paramètres comme la solubilité, la mobilité, la stabilité ou la biodisponibilité des ETM trouvés à La Réunion.

2 IDENTIFICATION DES INDICATEURS PERTINENTS A LA REALISATION D'UNE EQRS

2.1 Particularités géologiques et pédologiques des sols réunionnais

Les sols de l'île de La Réunion sont très hétérogènes, ils sont issus de roches différentes car elles proviennent de coulées différentes.

Le Piton des Neiges et le Piton de la Fournaise sont des volcans de point chaud. Ils ne sont pas situés sur une dorsale océanique mais sur la plaque africaine, l'origine des laves est donc un liquide primaire de source mantelique.

Des études du magmatisme d'un point de vue pétrographique et géochimique des volcans réunionnais ont été réalisées (*Nativel et al. (1979)* [1], *Albarède et al. (1997)* [2]). Leurs travaux ont permis de montrer que les produits constitutifs des deux massifs qui composent l'île sont issus d'une cristallisation fractionnée. Les laves du Piton des Neiges peuvent être décrites par trois étapes de cristallisation successives :

- cristallisation d'olivine et de spinelles, laves basiques,
- cristallisation de pyroxène et de plagioclase, laves différenciées intermédiaires,
- cristallisation d'amphibole et de feldspath alcalin, laves acides.

Le Piton de la Fournaise se situe à la première phase d'évolution du Piton des Neiges avec des laves basiques.

Les études de *Nativel et al. (1979)* et de *Albarède et al. (1997)* concernant les laves réunionnaises sont, en partie, résumées ci-dessous. Les travaux du Cirad sur les sols et ceux du bureau d'études GEISER réalisés lors du démantèlement de la station d'épuration de Tanambo sont présentées à la suite.

2.1.1 Etudes sur les laves réunionnaises

- *Le Piton des Neiges (Nativel et al. (1979))*

Dans le cas du Piton des Neiges, l'étude de *Nativel et al. (1979)* permet d'observer en fonction de l'âge des produits volcaniques, une évolution de la composition chimique partielle des laves. Le Piton des Neiges recouvre, d'un point de vue géographique, les deux tiers Nord de l'île.

Le tableau suivant présente les teneurs en ETM dans les différents types de laves du Piton des Neiges (Tableau 1).

	Zr	Ba	Sr	Rb	Co	Ni	Cr
Basalte à olivine	182	124	-	10	64,6	375	637
Océanite	157	120	-	15,3	6	450	533
Océanite fine	233	169	523	11,3	54,1	228	322
Hawaïite	244	205	455	26,2	56,7	33	83
Basalte	263	251	524	39	36,8	44	91
Mugéarite	396	361	559	48,7	24,4	1	47
Mugéarite claire	364	474	746	51,5	11,6	1,1	64
Trachyte porphyrique	711	1118	241	139	2,08	0,6	36
Trachyte quartzifère	647	757	426	123	3,29	0,7	49
Trachyte comenditique en dyke	579	668	205	106	1,02	0,2	20
Trachyte quartzifère hyperalcalin	879	232	-	134	0,6	0,15	29
Trachyte comenditique	612	805	187	154	0,88	0,12	22

Tableau 1 : Composition chimique en éléments traces de laves représentatives du Piton des Neiges (concentrations exprimées en ppm, *Nativel et al., 1979*)

Pour une meilleure interprétation, ces résultats ont été regroupés sur une figure permettant de visualiser l'évolution des teneurs en éléments traces en fonction du temps (Figure 2).

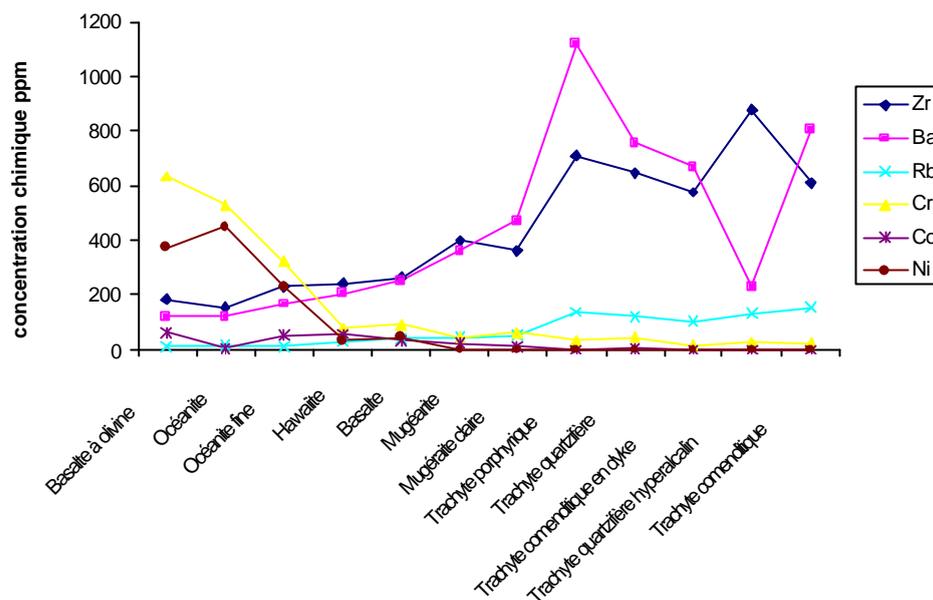


Figure 2 : Evolution des teneurs en ETM des différentes laves du Piton des Neiges

Des variations importantes en fonction de la différenciation des laves sont à signaler. En effet au cours de son activité, le Piton des Neiges n'a pas libéré les mêmes quantités, ni les mêmes types de métaux. Pendant la première phase de son évolution les laves contenaient des teneurs importantes en Nickel et en Chrome qui ont ensuite fortement diminué. A l'inverse, les teneurs en Zirconium et en Baryum ont augmenté avec l'âge du volcan.

- *Le Piton de la Fournaise (Albarède et al. (1997))*

Dans le cas du Piton de la Fournaise – qui d'un point de vue géographique recouvre le tiers Sud de l'île – l'étude d'Albarède et al. (1997) étudie entre autre la composition minéralogique et les teneurs en éléments majeurs et traces. Les roches rencontrées sur les flancs du Piton de la Fournaise sont des basaltes comportant divers minéraux. Les résultats des analyses réalisées pour cette étude sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 2).

	Olivine	Clinopyroxène	Plagioclase	spinnelle	Ti-magnétite 1	Ti-magnétite 2	ilménite
n	97	101	98	50	50	50	50
SiO₂	39,2	49,57	48,12	0,06	0,1	0,4	0,04
TiO₂	0,03	1,67	0,08	3,43	21,93	34,42	49,19
Al₂O₃	0,04	4,19	32,45	16,15	2,21	1,41	0,11
FeO	17,9	7,07	0,64	31,99	67,61	63,64	45,24
MnO	0,26	0,15	0,01	0,25	0,54	0,75	0,59
MgO	42,55	14,57	0,11	10,42	2,76	1,94	2,7
CaO	0,3	21,39	16,02	0,01	0,08	0,22	0,17
Na₂O	0,01	0,35	2,3	0,01	0,02	0,03	0,01
K₂O	0,01	0,01	0,1	0	0,01	0,02	0,02
NiO	-	-	-	0,21	0,03	0,07	0,03
Cr₂O₃	-	-	-	35,84	0,05	0,15	0,06
Total	100,3	98,97	99,83	98,37	95,34	103,05	98,16

Tableau 2 : Composition moyenne des cristaux observés dans les laves du Piton de la Fournaise (concentrations exprimées en ppm, Albarède et al., 1997)

Deux principales familles de minéraux sont présentes sous forme de cristaux dans les basaltes du Piton de la Fournaise :

- les silicates formés autour des tétraèdres SiO_4 , les olivines, les Clinopyroxènes et les Plagioclases,
- les oxydes riches en fer tels que les spinelles chromifère (chromite : FeCr_2O_4) ou la magnétite (Fe_3O_4).

L'analyse des basaltes du Piton de la Fournaise montre des teneurs en ETM variables. Ces valeurs sont répertoriées dans le tableau suivant (Tableau 3).

	Zn	Cu	Pb	Cr	Ni
Nombre de valeurs	88	88	88	88	88
Minimum	87,8	11,4	0,74	1	2,1
1 ^{er} quartile	101,7	65,15	1,64	121,25	69,225
Moyenne	107,18	88,52	1,98	457,99	287,00
Médiane	106,75	74,95	1,98	293	115,45
3 ^{ème} quartile	111,8	101,425	2,24	548,25	251,575
maximum	128,3	985,7	4,85	1731	3802

Tableau 3 : Teneurs en ETM dans les coulées basaltiques du Piton de la Fournaise (concentrations exprimées en ppm, Albarède et al., 1997)

Les valeurs les plus représentatives pour une interprétation à l'échelle de l'île sont les médianes. Cependant, en matière de risque et dans le cadre de la réalisation d'une EQRS, les valeurs maximales seront plus intéressantes pour élaborer un scénario plus conservateur.

2.1.2 Etudes sur les sols réunionnais

- *Les sols de l'île et le principe d'unité de milieu (Raunet, 1991 [3] ; Doelsch, 2000-2004 [4] et [5] ; Cirad)*

Le Cirad est un organisme spécialisé dans l'agronomie qui travaille en particulier sur la connaissance des sols. *E. Doelsch* travaille sur la spéciation et la biomobilité des métaux dans les sols et les végétaux (2000, 2004). *E. Doelsch* et avant lui *M. Raunet* ont tenté la réalisation de carte pédogéochimique de l'île de La Réunion.

La réalisation de la première carte par *M. Raunet (1991)* a vu la mise en place d'unité de milieu. Ces unités permettent grâce, à une simplification, une vision à l'échelle de l'île.

Les unités de milieu sont des ensembles de sols considérés comme similaires, elles sont définies par :

- un matériau donné,
- un climat donné,
- affecté d'un modèle particulier,
- sur lequel c'est formé un sol spécifique,
- couvert par une végétation caractéristique,
- affecté par un certain fonctionnement hydrologique.

La carte des unités de milieu (Annexe 5) est issue d'importants travaux morpho-géologiques et pédologiques. Des cartes ou profils morpho-géologiques sont d'ailleurs présentées en Annexe 3 et Annexe 4.

La carte des unités de milieu ne constitue pas une carte pédologique, elle regroupe des paramètres qui ne concernent pas directement le type de sol, mais qui ont une influence sur la formation ou la transformation de celui-ci. Les deux principaux types de données étant géologiques et climatiques. De ce fait deux sols identiques peuvent être classés dans deux unités de milieu différentes en prenant en compte les différences de modelés.

M. Raunet définit 93 unités de milieu pour l'île de La Réunion réparties en cinq domaines (Tableau 4).

Domaines	Nombre d'unités de milieu	Superficie (ha)	Superficie / Superficie Réunion
Les unités de milieu de haute altitude	4	11000	4,4%
Les unités de milieu sur matériaux volcaniques en place du Piton des Neiges	40	83080	33,1%
Les unités de milieu sur matériaux volcaniques en place du Piton de la Fournaise	23	57435	22,9%
Les unités de milieu des cirques	12	19700	7,8%
Les unités de milieu des formations superficielles	14	17750	7,1%

Tableau 4 : Répartition des unités de milieu par domaines (Cirad, 1991)

A partir de ce travail, *E. Doelsch* a réalisé des analyses de sols sur des échantillons prélevés sur toute l'île. Il a, tout d'abord, simplifié la carte des unités de milieu en ne conservant que les zones cultivées et les unités de milieu possédant une surface supérieure à 800 hectares. Finalement trois domaines de sols ont été retenus :

- les matériaux volcaniques non effondrés du Piton des Neiges,
- les matériaux volcaniques non effondrés du Piton de la Fournaise
- les sols développés sur des formations superficielles formées par les eaux.

Les deux premiers sont ceux qui nous intéressent plus directement puisque ce sont les sols volcaniques qui posent des problèmes relatifs aux ETM. Au total, 52 échantillons ont été analysés pour le Piton des Neiges dont 20 seulement pour les sols de surface. Ces échantillons représentent 9 types de sols et 14 unités de milieu. Pour le Piton de la Fournaise, 23 échantillons ont été analysés dont 14 pour les sols de surface. Ces échantillons représentent 7 types de sols et 9 unités de milieu. Les résultats des analyses sont présentés en Annexe 6 et résumé ci dessous.

	pH _{eau}	pH _{KCl}	M.O. (%)	C _{orga} (%)	N _{total} (‰)	C/N	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Ni (ppm)	Cr (ppm)
Minimum	4,4	4,0	0,6	0,3	0,3	6,0	4,6	10,8	8,1	15,1	35,0
1 ^{er} Quartile	5,4	4,5	2,5	1,4	1,1	11,2	15,7	19,2	18,1	56,6	107,0
Médiane	5,7	5,0	4,4	2,6	1,9	12,4	22,6	22,8	23,7	92,1	165,9
Moyenne	5,7	5,1	7,0	4,0	3,1	13,0	21,6	22,2	23,4	206,4	300,5
3 ^{ème} Quart.	6,1	5,4	9,2	5,3	4,0	14,6	28,6	25,2	28,5	305,3	480,5
Maximum	7,3	6,8	32,9	19,1	11,4	23,4	42,0	32,3	34,5	1037,7	1107,9

Tableau 5 : Caractéristiques de la population partielle des sols réunionnais (Cirad, 2004)

On constate tout d'abord que les sols réunionnais présentent plutôt un caractère acide.

En ce qui concerne les ETM, la gamme des valeurs est extrêmement large. Dans le cas du nickel et du chrome, les ratios entre les valeurs maximales et les minimales sont

respectivement de 68,6 et 31,6. Ces valeurs (sans unités) nous permettent de mettre clairement en évidence l'importante variabilité des teneurs en ETM des sols réunionnais.

- *L'étude lors de la RHI de Tanambo (Bureau GEISER, 2003 [6])*

Le bureau d'étude GEISER est intervenu dans le cadre de la déconstruction sélective d'une ancienne station d'épuration lors de la RHI de Tanambo. Cette station se trouvait en pleine zone urbanisée. L'étude consistait à la réalisation d'analyses portant sur les matières sèches, les éléments organiques et les métaux lourds.

Les résultats de cette étude montrent une présence très importante de nickel et de chrome et sont présentés dans le Tableau 6.

Les prélèvements 1, 2, 3 et 4 ont été réalisés sous les ouvrages de la station à un mètre de profondeur. Les suivants sont réalisés sur la même coulée à des lieux différents. Les profondeurs varient : 30 cm pour les 5.1, 6.1, et 7.1 ; 1 m pour les 5.2, 6.2, et 7.2 et 3 m ou au niveau de la roche pour les 5.3, 6.3.

	Cr (ppm)	Ni (ppm)
Ech. 1	423	820
Ech. 2	540	1613
Ech. 3	496	1050
Ech. 4	583	1268
Ech. 5.1	207	301
Ech. 6.1	1580	1276
Ech. 7.1	1206	1341
Ech. 5.2	273	351
Ech. 6.2	1335	1242
Ech. 7.2	1159	1322
Ech. 5.3	309	626
Ech. 6.3	1475	1270
Maximum	1580	1613
Moyenne	798,83	1040
Médiane	561,5	1255

Tableau 6 : Valeurs en ETM sur une coulée du Piton de la Fournaise (Bureau d'études GEISER, 2003)

Dans le cas de cette étude, vu le petit nombre de mesure, la médiane ne serait pas pertinente. De plus la surface étudiée est faible et les résultats ne sont donc pas représentatifs des sols réunionnais. Par contre, il est à noter que les valeurs correspondent à celles obtenues dans les autres études.

- *Résumé et choix des valeurs pour les teneurs dans les sols*

Ces quatre études ne donnent pas de résultats précis sur la composition des sols de l'île de la Réunion. En effet *Nativel*, *Albarède* et le bureau d'étude GEISER n'ont étudié que de petites surfaces. *E. Doelsch* n'a réalisé qu'une vingtaine de mesures sur les sols de surface pour toute la superficie de l'île. De plus les unités de milieu, éléments par définition hétérogènes, ne peuvent pas réellement servir de base d'échantillonnage fiable.

Il est également à signaler que les trois cirques (zones effondrées du Piton des Neiges) ne sont pas des zones particulièrement bien étudiées dans ces quatre études.

Cependant, ces dernières nous apportent des données sur les teneurs en métaux dans les sols. Leurs résultats analysés en parallèle montrent que les valeurs en ETM à La Réunion sont importantes. L'ordre de grandeur des teneurs en ETM est désormais connu.

2.2 Choix des ETM pertinents à prendre en compte pour la réalisation d'une EQRS

Dans le cadre d'une EQRS, un choix des ETM les plus pertinents est une étape primordiale. Cette étape est délicate en l'absence de références adaptées à La Réunion. Une méthodologie a été élaborée pour faire ce choix. Les teneurs totales pour chaque métal considéré ont alors servi de base de travail. De plus, une attention particulière a été prêté aux métaux avec des teneurs faibles mais possédant des VTR également faibles.

La comparaison entre les valeurs moyennes ou médianes de l'île de La Réunion et les valeurs de métropole a été réalisée (Annexe 2). A La Réunion, les valeurs pour le Piton des Neiges et le Piton de la Fournaise ont été dissociées pour les métaux qui avaient cette précision disponible (nickel et chrome). Sur les figures les VDSS, VCI et les valeurs limites pour l'autorisation de l'épandage agricole ont également été tracées.

Les VDSS et VCI¹ sont calculées pour des sols pollués, et non pour des sols naturellement riches en métaux.

- *Valeurs de Définition de Source-Sol (VDSS) :*

Cette valeur permet de définir si un sol peut être une source de pollution. Pour une substance donnée, la valeur de définition de source-sol est déterminée comme étant égale à la moitié de la valeur de la $VCI_{usage\ sensible}$ pour le sol. Toutes les VDSS doivent cependant être supérieures à x fois le bruit de fond géochimique local, si celui-ci est connu, x étant égale à 2 pour les substances ubiquistes et à 5 pour les autres substances. Elles doivent également être supérieures à la limite de quantification des méthodes d'analyses appropriées. Le fond géochimique naturel réunionnais n'étant pas connu, les VDSS ne sont donc pas obligatoirement des valeurs pertinentes pour l'île de La Réunion.

- *Valeurs de Constat d'Impact (VCI) :*

Ces valeurs définissent le constat de l'impact de la pollution sur le sol selon la sensibilité de l'usage de celui-ci.

Elles sont calculées sur la base d'un excès de risque égale à 1. Un calcul de valeur limite dans le sol est ensuite réalisé en tenant compte d'hypothèses d'exposition. Les hypothèses sont faites sur les facteurs humains d'exposition et les transferts de polluant entre les différents compartiments de l'environnement. En fonction du composé étudié, les hypothèses sont différentes. Les valeurs utilisées sont dans leur quasi-totalité les maximums.

- *Valeurs limites pour l'autorisation de l'épandage agricole*

Ce sont les valeurs de concentrations en métaux que les sols naturels ne doivent pas dépasser. Dans le cas contraire, la surface en question ne peut pas être utilisée dans le cadre du plan d'épandage des boues (Quelle que soit la concentration en métaux de ces boues). Ces valeurs paraissent légitimes pour des choix en matière de risque. Elles sont élaborées pour limiter l'apport en ETM dans les sols et ainsi rendre les sols trop chargés pour son utilisation agricole. On peut alors considérer que si cette limite est utilisée pour ne pas contaminer les cultures, elle peut servir de références pour le choix des métaux à prendre en compte dans une EQRS.

¹ Les méthodes de calcul des VDSS et VCI sont décrites dans l'annexe 5C du rapport ministériel sur la gestion des sites (potentiellement) pollués révisé le 09 décembre 2002 [7] et [8].

2.2.1 Comparaison sols français/sols réunionnais

Les mesures des concentrations en métaux dans les sols réunionnais et métropolitains sont reprises dans le tableau présenté en Annexe 1.

La Figure 3 utilise les valeurs moyennes. On constate sur cette figure que les éléments sont distribués en pourcentage de la même façon en métropole et à La Réunion. Cependant, même si les éléments en question sont identiques, les teneurs sont plus importantes à La Réunion. Le cas le plus marqué est celui du chrome où les teneurs sont de 3 à 6 fois plus importantes qu'en métropole suivant le type de roche. Le nickel, le cuivre et le zinc sont également présents à des concentrations plus importantes qu'en métropole, mais l'écart est seulement de 15 à 20 %.

Il est important de rappeler que les valeurs prises en compte sont des moyennes et ne sont pas tout à fait représentatives des teneurs sur l'île qui sont, par endroit, beaucoup plus importantes.

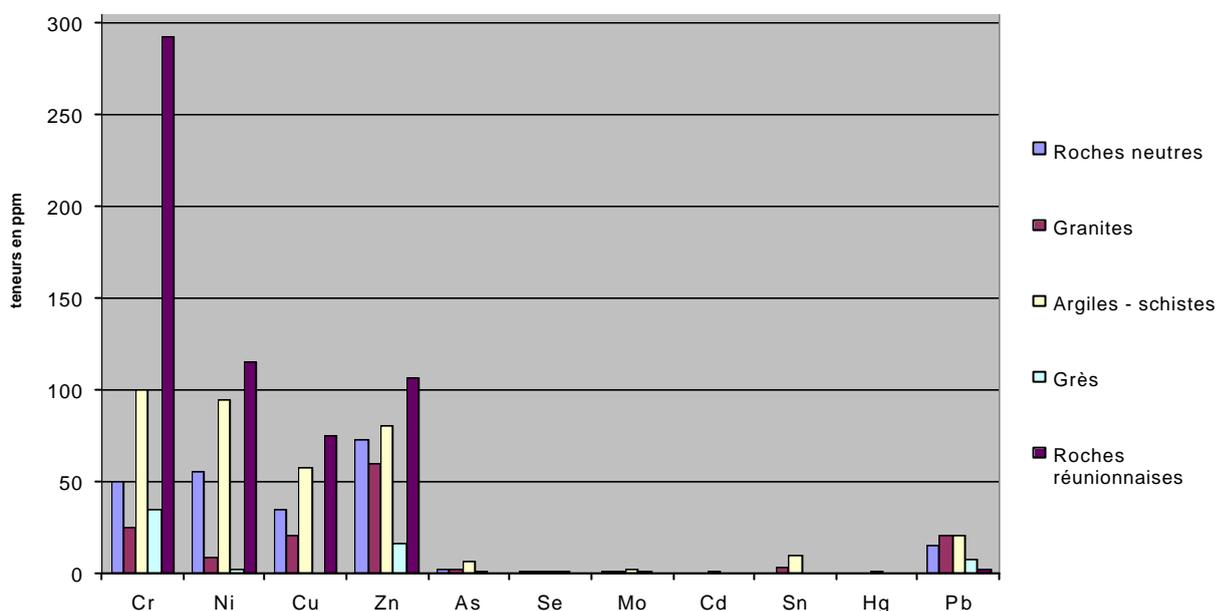


Figure 3 : Moyennes des concentrations en métaux des roches métropolitaines et réunionnaises

2.2.2 Comparaison par rapport aux valeurs servant de référentiel

- *Le Nickel*

Les teneurs en nickel ont été cherchées pour le Piton des Neiges suivant l'âge des magmas, un point pour le Piton de la Fournaise et le basalte océanique, quatre pour la métropole en fonction du type de roche (granites, argiles, schistes et grès).

Les valeurs utilisées sont soit des médianes soit des moyennes.

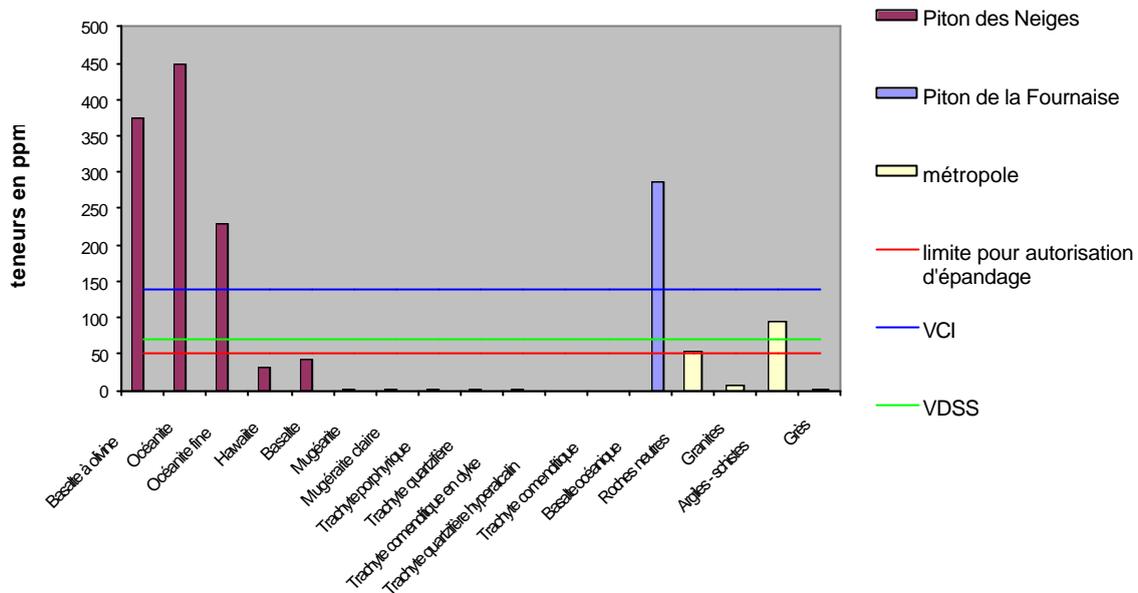


Figure 4 : Médianes des concentrations en nickel des laves réunionnaises et des roches métropolitaines

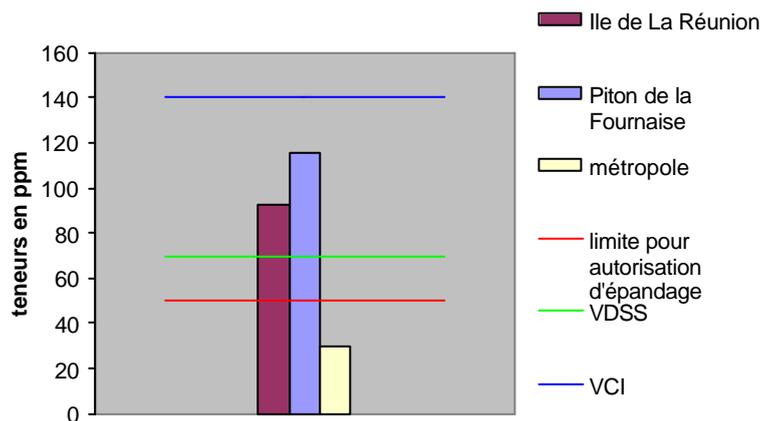


Figure 5 : Moyennes des concentrations en nickel des laves réunionnaises et des roches métropolitaines

On constate que les teneurs dans les laves du Piton de la Fournaise et dans les laves anciennes du Piton des Neiges sont bien plus importantes que les VDSS, VCI et que les concentrations limites préconisées pour l'épandage agricole.

- *Le Chrome*

Les concentrations en chrome dans les laves réunionnaises sont en moyenne deux à quatre fois supérieures à celles des roches de métropole considérées.

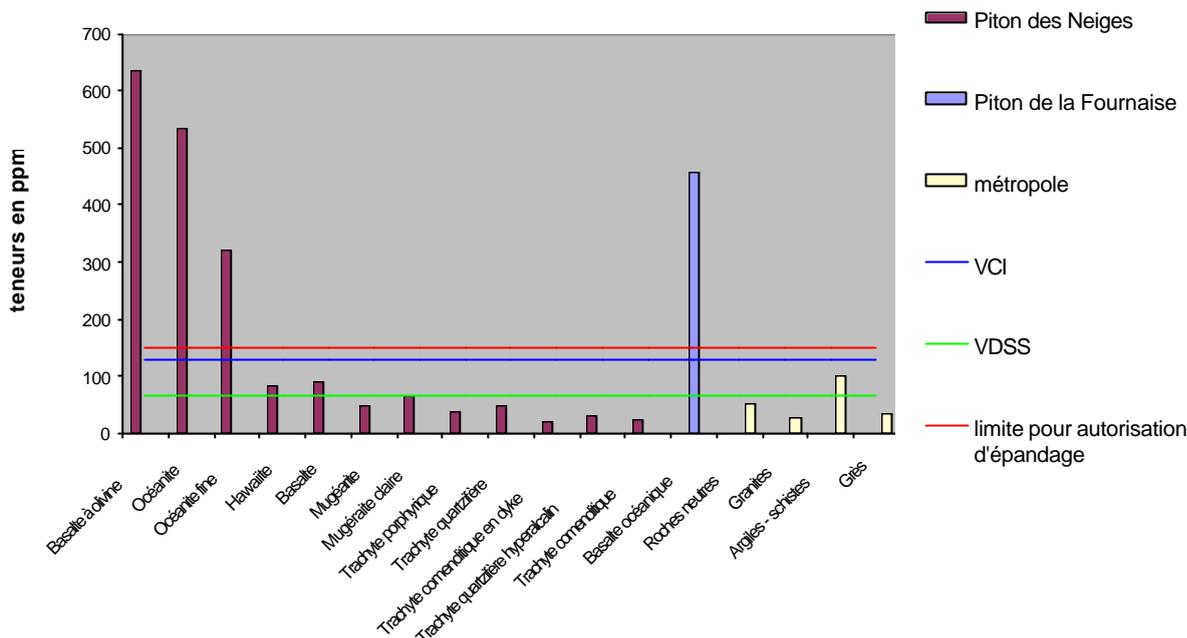


Figure 6 : Médianes des concentrations en chrome des laves réunionnaises et des roches métropolitaines

Les médianes des teneurs en chrome dans les laves de la première phase du Piton des Neiges et dans les laves du Piton de la Fournaise sont au-dessus des trois seuils servant de comparaison.

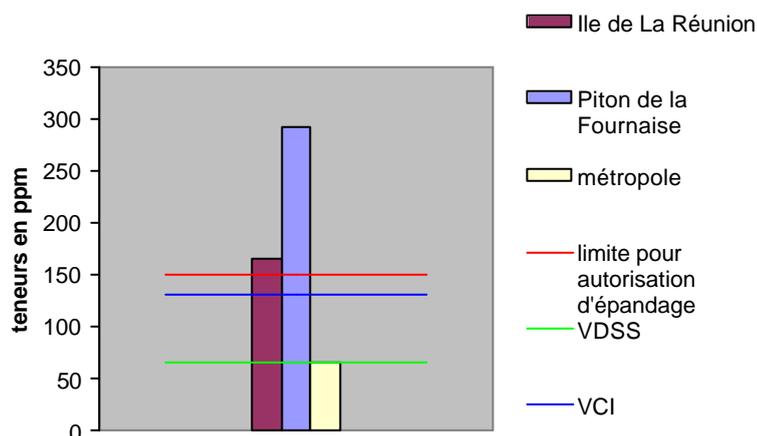


Figure 7 : Moyennes des concentrations en chrome des laves réunionnaises et des roches métropolitaines

Les figures de comparaisons entre les teneurs, des autres éléments, recueillies sur l'île et les valeurs servant de référentiel sont présentées en Annexe 2.

- *Le Zinc*

Les teneurs en zinc sont plus importantes à La Réunion qu'en métropole. Par contre, les valeurs moyennes ne dépassent aucun des trois seuils servant de comparaison.

- *Le Cuivre*

Les teneurs en cuivre sont cinq à sept fois plus fortes à La Réunion qu'en métropole. Les valeurs moyennes ne dépassent aucun des trois seuils servant de comparaison.

- *Le Mercure*

Les teneurs en mercure sont environ deux fois plus fortes à La Réunion qu'en métropole. Les valeurs moyennes ne dépassent cependant aucun des trois seuils servant de comparaison.

- *Le Cadmium*

Les teneurs en cadmium sont à peu près les mêmes à La Réunion qu'en métropole. Les valeurs moyennes ne dépassent aucun des trois seuils servant de comparaison.

Pour résumer, les teneurs en métaux sont globalement plus importantes sur l'île de La Réunion. Cependant tous les métaux ne semblent pas poser de problème, puisqu'ils restent à des concentrations inférieures aux valeurs de référence (VDSS, VCI et limites pour l'épandage agricole). Les seuls métaux dépassant ces valeurs seront retenus pour la suite de ce travail, à savoir **le nickel et le chrome**.

2.3 Le nickel et le chrome

Les données générales suivantes sont issues des documents de l'Inrs ([9] et [10]), de l'Ineris ([11] et [12]) et de Santé Canada ([13] et [14]).

2.3.1 Nickel

A) Généralités

Le nickel est un métal se présentant, soit sous une forme massive blanche bleuâtre, brillante, malléable et ductile, soit sous la forme d'une poudre grise (« nickel chimique »). On trouve le nickel de façon ubiquitaire à des concentrations variables en fonction du milieu (Tableau 7).

Il est utilisé dans le cadre de la production d'aciers inoxydables et d'autres aciers spéciaux, dans la préparation d'alliages non ferreux (pièces de monnaie, outils, ustensiles de cuisine...), dans la fabrication d'aimants ou de catalyse en chimie organique. Les sulfures jouent un rôle important dans les opérations de traitement des minerais et de raffinage du métal. Il est également utilisé dans la fabrication des batteries nickel-cadmium.

Milieu	Concentration
Air	< 3 ng/ m ³ ^{(1) (2)}
Eaux	
- eau douce de surface	< 10 µg/L ^{(1) (3)}
- eau de mer	< 0,5 µg/L ⁽²⁾
- eau de pluie	< 1µg/L ⁽²⁾
Sols	20 mg/kg ⁽⁴⁾
Sédiments	< 20 mg/kg ⁽²⁾

(1) OMS IPCS (1991)

(2) HSDB (2003)

(3) ATSDR (1997), valeur moyenne sur le territoire français

(4) ADEME (1995)

Tableau 7 : Concentrations ubiquitaires (Ineris – Nickel et ses dérivés – fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques)

B) Comportement dans l'environnement

• Dans l'eau

En milieu aqueux aérobie, l'état divalent constitue le principal état d'oxydation du nickel (Nickel II) qui peut former une large gamme de composés. Ainsi le nickel est présent essentiellement en ion hexahydraté.

Le nickel existe sous de nombreuses formes chimiques dont les caractéristiques physiques de solubilité sont décrites dans le tableau ci-dessous :

	Formule Numéro CAS	Solubilité
Nickel métal	Ni 7440-02-0	Insoluble dans l'eau et dans les solvants organiques.
Oxyde de nickel	NiO 1313-99-1	Pratiquement insoluble dans l'eau (de l'ordre de 0,1 mg/100ml à 20°C).
Hydroxyde de nickel	Ni(OH) ₂ 12054-48-7	Très peu soluble dans l'eau (de l'ordre de 10 mg/100ml à 20°C).
Carbonate de nickel	NiCO ₃ 3333-67-3	Très peu soluble dans l'eau (de l'ordre de 10 mg/100ml à 20°C).
Carbonate basique de nickel hydraté	2NiCO ₃ , 3Ni(OH) ₂ , 4H ₂ O 65405-96-1	Insoluble dans l'eau.
Chlorure de Nickel hexahydraté	NiCl ₂ , 6H ₂ O 7718-54-9	Très soluble dans l'eau (254 g/100ml à 20°C).
Nitrate de nickel hexahydraté	Ni(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O 13138-45-9	Très soluble dans l'eau (238 g/100ml à 0°C).
Sulfate de Nickel hexahydraté	NiSO ₄ , 6H ₂ O 7786-84-1	Facilement soluble dans l'eau (65 g/100ml à 20°C).

Tableau 8 : Caractéristiques physiques du nickel et de ces composés, (Inrs – fiche toxicologique 68)

• Dans les sols

Bien plus que la teneur totale, la spéciation et l'état physico-chimique du nickel sont des paramètres essentiels à considérer afin d'évaluer son comportement dans l'environnement et plus particulièrement sa biodisponibilité et sa mobilité. Le nickel contenu dans certains minéraux peut se révéler inerte et non disponible.

Le nickel est présent naturellement dans les sols à des doses de 10 à 100 mg/kg et représente 0,8 à 0,9% de la croûte terrestre.

Il est présent dans divers minerais : la chalcopyrite (Cu Fe S₂), la pentlandite ((Fe,Ni)₉ S₈) et surtout la garniérite. Il est généralement sous forme sulfurée ou oxydée selon le lieu.

Les minerais sulfurés sont de type garniéritique (couleur verte, (Ni,Mg)₆(OH₈Si₄O₁₀)) et les minerais oxydés sont de types limonitiques (dans ce cas le nickel est emprisonné dans une matrice de goethite FeOOH) ou de types saprolitiques (le nickel prend la place de quelques atomes de Mg dans la serpentine de formule (Mg,Fe)₃Si₂O₅(OH)₄).

La mobilité du nickel augmente aux pH faibles, alors que l'adsorption sur certains composés du sol peut devenir irréversible en milieu alcalin. Dans les sols acides, les minéraux nickélifères sulfurés et, dans une moindre mesure, silicatés (et peut-être le monoxyde de nickel) peuvent se dissoudre avec le temps, et une quantité relativement faible de nickel est éliminée de l'eau de porosité par adsorption.

Il faut également tenir compte du fait que la concentration en sulfates réduit l'adsorption du nickel par complexation. La présence de cations bivalents comme Ca²⁺ ou Mg²⁺

entraînent également, par compétition, une diminution de l'adsorption du nickel sur les composés du sol. En raison de sa forte propension à se lier à la matière organique, le nickel est en grande partie présent dans cette fraction des horizons de surface, en particulier dans les sols limoneux (sables fins). On le trouve pour une grande part à l'état échangeable dans les sols sableux.

La biodisponibilité du nickel dans les sols varie, en particulier selon la forme sous laquelle se présente le nickel et le pH du sol. Le nickel formant des complexes avec des ligands organiques dissous dans l'eau de porosité des sols devrait être moins biodisponible que les ions nickel libres.

- *Dans l'air*

Les composés du nickel sont présents sous forme particulaire dans l'atmosphère. C'est l'un des constituants des poussières en suspension avec une concentration de l'ordre de 0,03 % (en relation avec la composition de la croûte terrestre).

Le nickel émis dans l'atmosphère par des sources anthropiques l'est principalement sous forme d'aérosol qui couvre une très large gamme de taille de particules. Le diamètre moyen des particules d'origine anthropique serait de 5,4 µm. La nature du nickel présent dans ces particules varie selon leurs origines.

2.3.2 Chrome

A) Généralités

Le chrome est naturellement présent sous forme trivalente. La forme hexavalente du chrome existe aussi à l'état naturel, mais elle est rare.

On trouve le chrome de façon ubiquitaire à des concentrations variables en fonction du milieu (Tableau 9).

Milieu	Concentration
Air	< 10 ng/ m ³ ⁽⁵⁾
Eaux	
- eau douce (rivières, lacs, eaux souterraines)	1 à 10 µg/L ^{(5) (6)}
- eau de mer	0,1 à 5 µg/L
Sols	50 mg/kg ⁽⁷⁾
Sédiments	< 100 mg/kg ⁽⁵⁾

(5) CE (2000)

(6) OMS IPCS (1988)

(7) Moyenne mondiale, en France elle varie de 3 à 100 mg/kg (Juste, 1995)

Tableau 9 : Concentrations ubiquitaires (Ineris – Chrome et ses dérivés – fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques)

Le chrome est utilisé pour le chromage par électrolyse, le décapage des métaux, la synthèse organique (catalyseur, agent d'oxydation, préparation des chromates), la purification des huiles et de l'acétylène. Il est également manipulé dans la photographie, la tannerie, la teinturerie ou encore la préparation des encres et des vernis.

Le chrome est présent, sous forme de solution, en médecine dans les antiseptiques et les caustiques.

B) Comportement dans l'environnement

• *Dans l'eau*

Le chrome est à l'état naturel hautement insoluble. Il peut être rendu un peu plus soluble par l'érosion, l'oxydation, l'action des bactéries ou des pesticides.

La majeure partie du chrome présent dans les sols ne se dissout pas facilement dans l'eau. La faible fraction soluble se propage en profondeur vers les eaux souterraines.

Les eaux provenant des installations de chromage peuvent contenir du chrome VI. D'autres industries moins lourdes peuvent rejeter du chrome dans l'environnement. Le tannage du cuir, l'industrie textile, la fabrication de teintures et pigments peuvent, par exemple, libérer du chrome III ou du chrome VI dans les cours d'eau.

• *Dans les sols*

Le chrome existe sous plusieurs degrés d'oxydation, principalement en chrome III et plus faiblement en chrome VI.

La plupart des roches et des terrains contiennent de faibles quantités de chrome. Le minéral le plus commun est la chromite, dans lequel le chrome est trivalent.

Moins de 1% du chrome est extractible par des réactifs comme l'EDTA, le chrome est donc très peu mobile.

Selon le pH et le potentiel redox, le chrome peut exister sous forme anionique ou cationique, sous forme trivalente (Cr^{3+} , CrO^{2-}) ou hexavalente (Cr_2O_7 , CrO_4^{2-}). Le chrome trivalent, plus stable, prédomine sous forme organométallique soluble ou, plus généralement, sous forme précipitée d'oxydes hydratés, associés ou inclus dans des oxydes de fer et des complexes organométalliques insolubles. C'est essentiellement sous cette forme qu'il est présent dans les sols.

Le chrome VI est facilement transformé en chrome III dans les sols, les sédiments (favorisé par des conditions anaérobies et un pH faible) et la matière organique. Dans les sédiments et le sol, le chrome III s'adsorbe plus que le chrome VI. Le chrome III est donc moins mobile que le chrome VI dans les sols.

Une étude de l'IRD de Nouvelle Calédonie montre que l'effet des pesticides rend le chrome III plus mobile.

• *Dans l'air*

Le chrome n'est pas volatil. Dans l'air, les composés du chrome sont présents sous forme de fines particules qui se déposent progressivement sur les sols et les surfaces aquatiques. Les précipitations de pluie et de neige favorisent le processus de dépôt.

Les principales sources d'émission de chrome dans l'atmosphère sont l'industrie chimique, la combustion de gaz naturel, d'huile et de charbon.

Le transport par le vent des poussières de route, des usines de ciment, des industries utilisant du chrome ou des composés du chrome constituent d'autres sources d'émission atmosphérique.

• *Dans les animaux et les végétaux*

Des facteurs de bioaccumulation (BCF^2) ont été calculés pour différents types d'organismes.

Le chrome III semble s'accumuler un peu plus que le chrome VI, que les organismes soient exposés à du chrome III ou à du chrome VI. Des BCF de 260 à 800 ont été mesurés.

² Rapport entre la concentration dans l'organisme vivant sur la concentration dans le milieu.

Sous une forme adsorbée sur les hydroxydes métalliques, le chrome est peu disponible pour les végétaux. La concentration de chrome dans les végétaux dépend directement de sa concentration dans la solution de sol. Le chrome dans un sol neutre ou basique sera donc plus disponible vis-à-vis des plantes que dans un sol acide. L'Ineris indique que les essais de culture de plante avec des solutions nutritives contenant du chrome ont montré que 95% du chrome absorbé par la plante reste au niveau de la racine. Cependant aucun résultat concluant ne permet de mettre en évidence un BCF pour les végétaux ayant poussés sur des sols naturellement riches en chrome.

2.4 Choix des spéciations prisent en compte pour la réalisation d'EQRS

Dans le cas d'un travail d'EQRS, les spéciations des métaux doivent être définies pour travailler sur les bons composés et donc les dangers ajustés.

Les spéciations présentes dans les sols pour ces métaux doivent être définies pour pouvoir connaître leur répartition et les teneurs dans les différents compartiments de l'environnement. Cette connaissance permet également de caractériser les dangers, de choisir les VTR appropriées et de définir les expositions afin de pouvoir caractériser le risque.

Le chrome est en grande majorité présent dans les sols sous forme de Chrome III. Ce qui est confirmé par les résultats sur les spéciations demandés lors des investigations complémentaires sur la RHI de Tanambo.

Le Nickel est sous forme Ni II dans des composés sulfurés ou oxydés dans les roches. Une fois oxydé, pendant le passage dans les sols, il est redistribué entre les minéraux du sol, la matière organique (si elle existe) et l'eau interstitielle.

Le chrome et le nickel se trouvent dans les sols en substitution dans les réseaux cristallins. La dissolution de ces phases minérales engendre la libération des métaux en solution qui vont se retrouver sous formes d'espèces solubles aqueuses selon les conditions de pH et de Eh des eaux. Ces composés aqueux vont rentrer soit dans un cycle biologique s'il sont prélevés par la végétation soit dans le cycle hydrique depuis la solution du sol vers les rivières.

Toute la difficulté est de savoir dans quelle proportion, le nickel et le chrome présent dans les sols sont disponibles. Ces données ne sont pas décrites dans la littérature recueillie pour ce qui est de l'ingestion directe de sol. Le Cirad et l'IRD étudient le comportement des végétaux par rapport au ETM et leur capacité à les absorber ou non.

2.5 Le nickel et le chrome : données environnementales à La Réunion

2.5.1 Dans les roches et les sols

Dans l'état actuel des connaissances, pour le calcul de l'exposition lié aux sols, les valeurs les plus importantes devront être utilisées pour aller dans le sens d'hypothèses conservatrices. Dans le cas d'une approche probabiliste, on pourra prendre des valeurs moins réductrices en leur appliquant une distribution de probabilité sur les teneurs dans les sols.

Pour le nickel, les valeurs de la RHI de Tanambo peuvent être utilisées puisque ce sont les valeurs les plus importantes qui ont été relevées. De plus elles concernent directement les sols puisqu'elles ont été mesurées à de faibles profondeurs et sont les seules situées en zone urbaine. On peut supposer que la population générale comme la population professionnelle sont exposées à ces valeurs à Terre Sainte (Commune de Saint-Pierre). La valeur utilisée, dans le cas du nickel, est la valeur maximale soit 1613 ppm.

Pour le Chrome, les valeurs de la RHI de Tanambo peuvent être utilisées pour les mêmes raisons que précédemment. La valeur utilisée, pour le chrome, est la valeur maximale soit 1580 ppm.

2.5.2 Dans l'alimentation (animaux, lait, œufs...)

Les teneurs, en nickel et en chrome, recueillies pour l'alimentation générale sont issues du rapport : Etude de l'alimentation totale française de l'Inra [15]. Cette étude donne des concentrations en ppm pour les aliments prêts à consommer dans l'alimentation métropolitaine (Tableau 10).

	Chrome	Nickel		Chrome	Nickel
Pain biscottes	0,16	0,07	Sandwiches	0,08	0,05
Céréales petit déjeuner	0,13	0,55	Plats composés	0,09	0,06
Pâtes	0,04	0,02	Entremets	0,08	0,2
Riz et semoule	0,06	0,02	Compotes et fruits cuits	0,03	0,03
Viennoiseries	0,16	0,11	Autres céréales	0,01	0,47
Biscuits	0,14	0,28	Huiles	0,04	0,02
Pâtisseries	0,07	0,06	Margarine	0,06	0,02
Lait	0,02	0,07	Abats	0,1	0,04
Ultra frais laitier	0,03	0,06	Crustacés et mollusques	0,09	0,23
Fromages	0,14	0,26	Fruits secs et graines	0,06	1,15
Œufs et dérivés	0,05	0,03	Glaces	0,1	0,37
Beurre	0,07	0,02	Chocolat	0,34	0,63
Viandes	0,05	0,02	Entrées	0,14	0,07
Volailles et gibiers	0,03	0,02	Condiments et sauces	0,12	0,07
Charcuterie	0,17	0,04	Substitut de repas	0,06	0,1
Poissons	0,08	0,05	Eaux	0,01	0,03
Légumes (hors pommes de terre)	0,05	0,08	Jus de fruits et sodas	0,05	0,03
Pommes de terre et dérivés	0,05	0,07	Boissons alcoolisées	0,02	0,02
Légumes secs	0,08	0,33	Café	0,01	0,02
Fruits	0,01	0,03	Thé et boissons chaudes	0,02	0,09
Sucres et dérivés	0,12	0,04	Soupes	0,05	0,14
Pizzas, quiches et tartes salées	0,07	0,02			

Tableau 10 : Teneurs en nickel et en chrome dans les aliments en ppm (Inra, 2004)

Les valeurs mesurées ne sont pas toujours adaptées pour les aliments de La Réunion puisque certains d'entre eux comme les fruits, les légumes, la viande, les œufs, le lait ou

encore les aliments contenant de l'eau ne sont pas de la même origine géographique. Les seules valeurs locales recensées pour les aliments d'origines différentes sont celles mesurées par le Cirad et présentées dans le paragraphe suivant.

2.5.3 Dans les végétaux

Afin d'évaluer le potentiel toxique des métaux, des recherches ont été menées par l'IRD, dans les sols ultrabasiques néo-calédoniens et par le Cirad à La Réunion. Le but de ces recherches est de mieux connaître les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des sols et le caractère assimilable de certains métaux par les végétaux.

Les teneurs en métaux lourds dans les végétaux varient en fonction de nombreux éléments et de facteurs locaux.

Les végétaux ont des stratégies spécifiques vis à vis des métaux. Certains ont la faculté de "passiver" ces métaux dans leurs organismes et de les stocker dans les feuilles. Cette accumulation entraînant des effets toxiques si un seuil de concentration est dépassé. C'est le cas des plantes dites 'hyperaccumulatrices' Ce phénomène est bien connu pour le nickel, l'aluminium ou le Manganèse mais assez peu étudié pour le chrome. D'autres végétaux les rejettent par des stratégies chimiques.

Les valeurs recueillies sont issues d'études récentes du Cirad et de l'Inra et les données sont parcellaires. Les résultats du Cirad sur les végétaux réunionnais en 2004 sont présentés en Annexe 7 et résumés dans le tableau ci après.

	Fraction	M.S.	Ni (ppm)	Cr (ppm)
Canne à sucre	Chou	32,57	1,30	2,24
	Bagasse	53,87	2,07	1,37
	Jus	19,62	1,71	0,83
Salade		3,88	0,82	1,18
Carotte		10,20	2,53	0,80
Fourrage		25,60	2,15	1,33
Clémentine		11,70	1,70	0,90
Moyenne			1,75	1,23
Maximum			2,53	2,24
Médiane			1,71	1,18

Tableau 11 : Résumé des teneurs en Ni et en Cr dans les végétaux en ppm (Cirad, 2004)

L'étude de l'alimentation totale française de l'Inra donne les teneurs en métaux dans l'alimentation. Les résultats sur les fruits et légumes sont présentés dans le Tableau 12 ci-dessous.

	Ni (ppm)	Cr (ppm)
Légumes (hors pommes de terre)	0,08	0,05
Pommes de terre et dérivés	0,07	0,05
Légumes secs	0,33	0,08
Fruits	0,03	0,01

Tableau 12 : Résumé des teneurs en Ni et en Cr dans les végétaux en ppm (Inra, 2004)

Les teneurs en métaux dans les végétaux à prendre en compte doivent être issues de données réunionnaises, afin de tenir compte de tous les facteurs locaux. Les valeurs du

Cirad sont donc les plus adaptées pour un calcul de dose journalière d'exposition. De plus elles sont de 6 à 100 fois supérieures que les valeurs métropolitaines.

2.5.4 Dans l'air

Ni le chrome, ni le nickel ne sont volatils dans les états de valence et les formes minérales dans lesquelles ils sont présents de façon naturelle à La Réunion.

Ces métaux sont rencontrés dans l'air sous forme d'aérosol. Le terme 'aérosol' désigne d'une façon générale, la suspension dans les gaz de particules solides ou liquides dont la vitesse de chute est négligeable (rapport sur l'échantillonnage des aérosols, Inrs [16]).

Les concentrations en chrome et en nickel dans l'air peuvent être extrapolées à partir de celles contenues dans les sols. Une hypothèse peut être que le sol est mis en suspension et que la part en métaux dans les poussières est la même que dans les sols. Ainsi en connaissant la part d'aérosol dans l'air on peut connaître les teneurs en nickel et en chrome.

Cependant les concentrations de poussières n'ont pu être recueillies qu'après de la CGSS qui a réalisé des mesures pour les travailleurs des centrales de concassage. Ces valeurs sont présentées dans le tableau ci dessous :

Station	Prélèvement	Poussières inhalables (mg/m ³)	Poussières alvéolaires (mg/m ³)	Fibres
St Louis	Ambiance cabine concasseur	2,49 +/-0,43	0,22 (0,07-0,36)	0,04 fibre/cm ³ (+/- 0,02)
	Ambiance chargeuse	0,85 +/-0,21	0,07 (0,00-0,24)	-
St Joseph	Ambiance cabine concasseur	1,35 +/-0,29	0,15 (0,00-0,34)	0,04 fibre/cm ³ (+/- 0,03)
Le Port	Manœuvre zone concassage	4,55 +/-0,74	0,42 (0,25-0,58)	-
	Manœuvre zone lavage	2,01 +/-0,36	0,15 (0,00-0,31)	-
	Chef de fabrication	0,96 +/-0,21	0,09 (0,00-0,24)	-
Bras Panon	Opérateur maintenance	2,96 +/-0,50	0,09 (0,00-0,26)	-
	Respons able de poste	2,27 +/-0,40	0,08 (0,00-0,25)	-

Tableau 13 : Résultats d'analyse des prélèvements de poussières dans les stations de concassage (CGSS, 2003)

2.5.5 Dans l'eau

Les teneurs en métaux dans les eaux dépendent directement de la concentration dans les sols. Les eaux d'alimentation sont surveillées par le service Santé Environnement de la Drass. Les teneurs en nickel et en chrome sont connues et résumées dans le tableau ci dessous.

	Nickel		Chrome
	Eau du robinet	Eau de Cilaos	Eau du robinet
Maximum	7,10E-02	3,70E-02	1,70E-02
Moyenne	3,30E-04	3,17E-02	1,30E-04

Tableau 14 : Teneurs en nickel et en chrome de l'eau de La Réunion en mg/L (Service Santé Environnement, Drass, 2005)

L'Inra propose également des valeurs en nickel et en chrome dans l'eau d'alimentation mesurées en métropole qui sont rappelées ci-dessous.

	Chrome	Nickel
Eaux	0,01	0,03

Tableau 15 : Teneurs en nickel et en chrome de l'eau en mg/L (Inra, 2004)

3 CARACTERISATION DES DANGERS

Dans cette partie de description des dangers, les composés qui ne semblaient pas pertinents dans l'évaluation d'un risque lié aux teneurs du fond géochimique naturel ne sont pas pris en compte. Ces composés essentiellement issus de l'industrie chimique ne sont pas présents dans le sol.

Les dangers décrits ci-après sont donc associés aux produits sulfurés et oxydés de Nickel ou directement au nickel métal. Dans le cas du chrome, la spéciation étudiée est le chrome III.

Les données générales suivantes sont issues des documents de l'Inrs ([9] et [10]), de l'Ineris ([11] et [12]) et de Santé Canada ([13] et [14]).

3.1 Nickel

3.1.1 Biodisponibilité dans l'organisme

D'une manière générale, le nickel et ses composés sont bien mieux absorbés par la voie pulmonaire que par les deux autres voies (gastro-intestinal et cutanée). La déposition, la rétention et l'absorption pulmonaires des composés du nickel sont régies par les propriétés physico-chimiques des particules. Même en cas de dépôts pulmonaires de fortes doses de produits insolubles, la concentration de nickel dans le sang reste très faible.

Suite à une inhalation, environ 20 à 35% de la quantité inhalée sont absorbés dans le sang.

La biodisponibilité du nickel par voie orale est mal connue. Elle est très variable, jusqu'à quarante fois supérieure pour une administration par l'eau de boisson par rapport à une source alimentaire via la nourriture (respectivement $27 \pm 17\%$ et $0,7 \pm 0,4\%$).

La voie cutanée permet également l'absorption du nickel. D'un point de vue quantitatif, cette voie d'assimilation est faible, cependant les allergies de contact au nickel sont courantes. Les sujets hypersensibles ne présentent pas de différence en ce qui concerne les valeurs d'absorption par la voie cutanée.

3.1.2 Distribution et élimination dans l'organisme

La distribution du nickel varie selon la voie d'exposition. Les organes cibles du nickel sont divers. Il se fixe essentiellement dans les poumons et les reins. Une étude relève également la présence de nickel dans la thyroïde, les glandes surrénales, le cœur, le cerveau, la rate et le pancréas sur des personnes non exposées (*Rezuke et al.*, 1987).

Dans le sang, le nickel absorbé est en partie libre, mais surtout lié à des protéines et à l'histidine. La demi-vie du nickel dans le sérum est de l'ordre de 10 heures.

Le nickel est rapidement rejeté par les urines et la sueur pour la partie absorbée ou par voie fécale (pour la partie non absorbée).

3.1.3 Toxicité

A) Aiguë

Deux types de symptômes sont associés à une intoxication aiguë au nickel, ils ressemblent à ceux d'une pneumologie virale.

Les premiers sont immédiats, les personnes exposées sont sujettes à des maux de tête, des vertiges, des nausées, des vomissements, de l'insomnie et de l'irritabilité.

En raison du temps d'élimination du nickel de certains tissus (notamment pulmonaires et rénaux), une administration unique peut, dans un second temps, provoquer des effets durables. Les principales manifestations sont pulmonaires avec des douleurs dans la poitrine, une toux sèche, une dyspnée, une cyanose et tachycardie. La littérature décrit également des symptômes gastro-intestinaux occasionnels, une sudation, des perturbations visuelles et une débilité.

B) Chronique

a) Effets systémiques

Des doses létales par inhalation pour une exposition répétée (6 heures/jours, 5 jours/semaine pendant 12 jours) ont été mises en évidence chez le rat. La dose mise en évidence dans le cas du sous sulfure est $7,3 \text{ mg/m}^3$ et $26,3 \text{ mg/m}^3$ dans celui de l'oxyde. Des expositions prolongées ou répétées à des doses de nickel entraînent essentiellement des signes nasaux et pulmonaires. Il s'agit de réactions inflammatoires interstitielles, d'une hyperthémie avec évolution possible vers un emphysème ou une fibrose.

Le nickel est connu comme l'allergène le plus courant. La sensibilité au nickel dans la population générale est élevée. L'exposition professionnelle semble moins souvent en cause que le contact journalier avec des objets usuels. Les personnes sensibilisées au nickel, développent dans 40 à 50% des cas des dermatoses eczématiformes récidivantes.

b) Effets cancérogènes

Le nickel est considéré comme un cancérogène probable. Aucun des essais réalisés par voie orale n'a mis en évidence d'action cancérogène du nickel ou de ces composés minéraux. Il est classé C3 par l'Union Européenne.

3.2 Chrome

3.2.1 Biodisponibilité dans l'organisme

La biodisponibilité du chrome III est très peu documentée. Le chrome hexavalent constitue le principal objet des études relatives au chrome car il est beaucoup plus toxique.

Le niveau de déposition pulmonaire du chrome n'est pas connu, il dépend de la solubilité des dérivés du chrome considéré (*Aitio et al.*, 1988).

L'absorption du chrome III, par voie gastro-intestinale, est nettement plus faible que celle du chrome hexavalent. Cette dernière est estimée entre 2 et 9 %. Cependant une partie du chrome VI non absorbé par l'organisme est réduite en chrome III.

Le chrome trivalent ne pénètre que difficilement à travers la peau (sauf en cas de lésion cutanée) et le risque de sensibilisation est donc faible. Comme pour la voie gastro-intestinale, une partie du chrome VI est réduit en chrome III une fois dans l'organisme. Le passage transcutané du chrome VI à travers une peau intacte est estimé entre 1 et 4%.

3.2.2 Distribution et élimination dans l'organisme

Les organes cibles du chrome sont essentiellement le tractus respiratoire, plus généralement les poumons et les voies nasales. Quelques cas d'atteintes oculaires sont décrits dans la littérature.

Dans le sang, le chrome III se lie aux protéines plasmatiques telle que la transferrine.

Le chrome III est éliminé principalement dans les fécès (environ 95%) après une administration par voie orale ou duodénale. L'excrétion par les urines est de l'ordre de 0,5% (IARC, 1990).

3.2.3 Toxicité

A) Aiguë :

L'ingestion de sel de chrome entraîne une inflammation massive du tube digestif suivie d'une nécrose s'étendant de la bouche au jéjunum. Cette exposition provoque différents troubles : douleurs abdominales, vomissement, diarrhées, hématuries.

La dose létale de trioxyde de Chrome par la voie orale est estimée entre 1 et 3 g (*Lauwerys, 1999*).

B) Chronique :

a) *Effets systémiques*

Le chrome III est un composé naturel de l'organisme mais il possède également une action toxique.

Le chrome ou ses dérivés peuvent avoir un effet sensibilisant qui se manifeste par de l'asthme ou des dermatites.

Même si ceux-ci pénètrent difficilement à travers la peau, les dérivés du chrome III peuvent se comporter comme des allergènes si la concentration est suffisamment élevée.

Le chrome métal n'est en principe pas un allergène.

Le nombre de personnes sensibilisées au chrome est faible surtout par comparaison aux concentrations parfois élevées.

Les symptômes cutanés sont observés lors d'expositions par la voie dermique, ils correspondent à des dermatites eczématiformes ou des ulcérations.

Quelques atteintes hépatiques et gastro-intestinales ont été décrites lors de l'exposition professionnelle au trioxyde de chrome (*Pascal, 1952 ; Lucas et Kramkowski, 1975 ; Mancuso, 1951 ; Sassi, 1956 ; Strerechova et al, 1978*).

b) *Effets cancérogènes*

Plusieurs études épidémiologiques ont été réalisées sur des salariés d'usines de production de chrome. Les résultats dépendent du composé en cause et ne permettent pas de conclure clairement sur la cancérogénicité du chrome III.

Le chrome III est classé différemment en fonction de l'organisme :

- catégorie C1 pour l'Union Européenne : « substance que l'on sait être cancérogène pour l'homme »,
- groupe 3 pour le CIRC et l'IARC : « l'agent (ou le mélange) ne peut être classé pour sa cancérogénicité pour l'homme » (1990),
- groupe D pour l'US EPA : « substance non classifiable quant à sa cancérogénicité pour l'homme » (1996).

4 CHOIX DES VTR (VALEURS TOXICOLOGIQUES DE REFERENCE)

La pratique actuelle consiste à rassembler les données disponibles dans la littérature puis, à l'aide de quelques critères, à opérer la sélection de la VTR adéquate. Ces critères sont, notamment, la notoriété de l'organisme qui a élaboré la VTR, la date de son élaboration, l'origine des données (animales ou humaines) qui ont permis de la construire et la cohérence entre la voie d'exposition et la durée de l'étude par rapport à la situation étudiée. Toutes choses égales par ailleurs, la plus sévère des VTR pertinentes est généralement retenue.

L'étape de sélection des VTR accorde donc une grande confiance aux organismes les proposant. Les premières VTR ont été construites il y a plus d'un demi-siècle, et celles classiquement utilisées aujourd'hui datent déjà du milieu des années 80 pour les plus anciennes. Se pose ainsi la question de la prise en compte de l'avènement de nouvelles méthodes et de l'amélioration des connaissances notamment sur la compréhension des processus biologiques.

Dans le cas de notre étude, les fiches de l'Ineris ([11] et [12]), de Inrs ([9] et [10]) et le site Internet TERA Iter Data Base [17] ont été utilisés, rassemblant ainsi les valeurs de l'US EPA, de l'ATSDR ou l'OMS. Ces valeurs ne sont pas toujours adaptées suivant le composé en cause.

Pour les populations professionnelles, des valeurs spécifiques sont utilisées, les VME ou VLE (Valeurs Limites ou Moyennes d'Exposition). Ces valeurs sont proposées pour l'Union Européenne par l'Inrs, elles ont pour objectif de protéger les travailleurs et doivent être appliquées par les entreprises.

Un glossaire des différentes VTR est proposé en Annexe 8.

4.1 Pour la population générale

4.1.1 VTR proposées pour le nickel par les services de recherches spécialisées

Les valeurs pertinentes sont relatives au nickel métal et aux éléments sulfurés ou oxydés du nickel. Le disulfure de trinickel est exclu des choix puisqu'il fait parti des éléments trouvés dans les raffineries et non à l'état naturel.

Les valeurs décrites ci dessous sont résumées en Annexe 9.

A) L'approche de Santé Canada

Santé Canada propose une concentration admissible provisoire (Cap) de $1,8 \cdot 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'exposition chronique par inhalation au nickel métal.

Cette valeur est calculée à partir d'un LOEL de $0,0178 \text{ mg}/\text{m}^3$. Un facteur de 1000 tenant compte de l'extrapolation des données, de la variabilité de l'espèce humaine et du manque de données a été appliqué.

Santé Canada propose également une concentration admissible (CA) de $2 \cdot 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'exposition chronique par inhalation au monoxyde de nickel.

Cette valeur a été établie à partir d'un LOEL de $0,02 \text{ mg}/\text{m}^3$. Un facteur de 1000 tenant compte de l'extrapolation des données (de l'animal à l'homme et d'effets minimes à une exposition chronique) et de la variabilité de l'espèce humaine et du manque de données a été appliqué.

B) L'approche du Rivm

Le Rivm propose un apport journalier acceptable (TDI) de **50 µg/kg/j** pour l'exposition chronique par voie orale au nickel et ces composés.

Cette valeur a été calculée à partir d'un NOAEL de 5 mg/kg/j associé à un facteur d'incertitude 100 pour l'extrapolation de l'animal à l'homme et de la variabilité de l'espèce humaine.

C) L'approche de l'OEHHA

L'OEHHA propose deux valeurs de références.

La première est un niveau d'exposition de référence REL de **50 µg/kg/j** pour l'exposition chronique par voie orale au nickel et ces composés. Cette valeur est calculée de la même façon que celle proposée par le RIVM.

Un second REL de **0,10 µg/m³** est proposé pour l'exposition chronique par inhalation au monoxyde de nickel.

Cette valeur a été établie à partir d'un LOAEL de 89,5 µg/m³. Un facteur de 1000 tenant compte de l'extrapolation des données (de l'animal à l'homme et d'effets minimes à une exposition chronique) et de la variabilité de l'espèce humaine et du manque de données a été appliqué.

4.1.2 VTR proposées pour le chrome III par les services de recherches spécialisées

Les valeurs décrites ci dessous sont résumées en Annexe 9.

A) L'approche de l'US EPA

L'US EPA propose une dose de référence RfD pour les composés insolubles du chrome III de **1,5 mg/kg/j**. Cette valeur a été établie à partir d'une étude réalisée chez le rat (*Ivankovic and Preussman, 1975*). La RfD est calculée à partir d'un NOAEL de 1,8 mg/kg. Ce NOAEL est associé à un facteur d'incertitude de 1000, 100 pour le passage du rat à l'homme en tenant compte de différence de sensibilité chez l'homme et 10 pour caractériser le manques de données expérimentales.

B) L'approche du Rivm

Le Rivm propose trois valeurs de référence. Elles sont toutes issues des mêmes documents (ATSDR, 2000).

Les deux premières valeurs sont relatives à l'exposition par voie orale. L'une concerne les composés solubles (**5 µg/kg/j**) et l'autre les composés insolubles (**5 mg/kg/j**) du chrome trivalent. L'ATSDR donne un NOAEL de 0,46 mg.kg.j pour les composés solubles. Les composés insolubles sont 1000 fois moins toxique (ATSDR, 2000). Pour les deux valeurs, un facteur d'incertitude 10 est utilisé pour l'extrapolation des données expérimentales à l'homme et un autre de 10 pour tenir compte des différences de sensibilités au sein de l'espèce humaine.

La dernière valeur proposée par le Rivm concerne la voie respiratoire. Des NOAECs compris entre 0,6 mg/m³ et 2 mg/m³ ont été rapportés par l'ATSDR. D'après ces valeurs, le Rivm propose une TCA (équivalent d'une DJA) de **60µg/m³**.

4.1.3 Résumé des VTR

Les VTR proposés par les différents instituts de recherche, ainsi que les méthodes d'élaboration, sont maintenant connues. Un choix peut être fait à partir de la fiabilité et de la disponibilité de ces valeurs (Tableau 16).

Les choix sont orientés par une approche conservatrice qui consiste à utiliser les valeurs les plus défavorables, c'est à dire dans ce cas, les VTR les plus basses. Le second critère de choix est la volonté de se rapprocher au maximum des composés présents dans les sols. Dans le cas du nickel comme du chrome, ce sont les valeurs relatives aux composés insolubles qui ont été conservées.

Aucune valeur n'est proposée pour la voie cutanée et pour les effets sans seuil.

Métal	composés	voie d'exposition	
		Orale	Respiratoire
nickel	Oxyde	50 µg/kg/j	$2.10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Métal		$1,8.10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3$
chrome	chrome III	1,5 mg/kg/j	$60 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Tableau 16 : Résumé des VTR du nickel et du chrome

L'utilisation de ces VTR dans un éventuel calcul de risque appliqué aux sols réunionnais devra être faite avec précautions. En effet les métaux dans les sols ont une disponibilité limitée et les composés peuvent être variables.

Les VTR proposées ici sont relatives aux composés supposés être présent dans les sols, à savoir le chrome III et les oxydes de nickel.

4.2 Valeurs limites pour le milieu professionnel

Ces valeurs sont issues de documents de l'Inrs [18]

Ces valeurs sont prises pour protéger les professionnels, mais les méthodes retenues pour les fixer ne sont pas explicitées dans les documents recueillis au cours de cette étude. Les VLE ou VME peuvent être admises dans l'air des locaux de travail. Le budget espace temps du travailleur n'est pas explicité, il est uniquement précisé que la durée de travail est de 8 heures.

4.2.1 Le nickel

L'Inrs ne propose pas de VLE pour le nickel, mais a fixé comme VME la valeur **1 mg/m³** de nickel dans l'air pour le nickel métal et les oxydes de nickel.

Aux USA, l'ACGIH a fixé en 1991 la valeur de 1 mg/m³ (exprimé en Ni) pour le nickel métal et ses composés insolubles. Il propose d'abaisser cette valeur à 0,05 mg/m³.

4.2.2 Le chrome

L'Inrs a fixé les valeurs de **0,1** et **0,05 mg/m³** de chrome dans l'air respectivement comme VLE et VME pour les expositions au trioxyde de chrome.

5 SCENARII D'EXPOSITION

5.1 Facteurs environnementaux

Les facteurs environnementaux utilisables pour la mise en œuvre de scénarii d'exposition sont décrits dans la partie consacrée au bruit de fond lié au fond géochimique naturel réunionnais (cf. 2.5). Ils sont résumés ici avec des propositions de choix.

5.1.1 Les sols

Dans la partie 2.5.1, des valeurs de concentrations, en nickel et en chrome, dans les sols sont définies comme utilisables dans un calcul de dose journalière d'exposition. Ces concentrations dans le sol sont de 1613 ppm pour le nickel et de 1580 ppm pour le chrome. Elles sont associées à la zones géographique de Terre Sainte (commune de Saint-Pierre).

5.1.2 L'alimentation

Toutes les concentrations relatives à l'alimentation nécessaire pour un calcul de DJE devront être issues du rapport : Etude de l'alimentation totale française de l'Inra. Ce rapport constitue, en l'état actuel des recherches, la seule source de données sur les concentrations en métaux dans les aliments (cf. Tableau 10).

Ces valeurs sont mesurées dans l'alimentation métropolitaine et ne sont pas forcément adaptées à La Réunion. Des extrapolations ou des modélisations sont possibles pour les ajuster.

5.1.3 Les végétaux

Les teneurs du Cirad mesurées dans les végétaux seront choisies, car elles sont locales. De plus elles constituent le maximum des concentrations relevées dans la littérature. Une hypothèse doit être, néanmoins, réalisée pour l'utilisation des données du Cirad. Cela suppose que tous les végétaux ont le même comportement vis à vis des ETM et qu'ils en contiennent la même concentration. L'utilisation des médianes paraît donc plus pertinente pour tenir compte de cette hypothèse.

La valeur pour le nickel est 1,71 ppm et 1,18 ppm pour le chrome.

Les compartiments de l'alimentation associés à ces valeurs devront être définis dans chaque scénario.

5.1.4 L'eau de boisson

Les teneurs en métaux dans l'eau de consommation courante sont très faibles quel que soit l'endroit de l'île considéré. L'hypothèse que les personnes boivent de l'eau minérale de Cilaos (en bouteille) peut être faite. Cette eau contient au maximum $3,7 \cdot 10^{-2}$ mg/L de nickel (cf. 2.5.5). Pour la valeur en chrome dans l'eau, par défaut, la teneur de 0,01 mg/L donnée par l'Inra peut être utilisée. En effet elles constituent le maximum en comparaison avec celles de la Drass Réunion.

5.1.5 L'air

Aucune source sur les teneurs en poussières de sols dans l'air n'a été trouvée pour la population générale. Des valeurs sur la pollution particulaire dans l'air (PM10 ou particules totales en suspension) pourraient être demandées à l'ORA.

Une seule source de donnée pour les concentrations en poussière a été trouvée dans le milieu professionnel. Les mesures du LICT sont réalisées sur les travailleurs de centrale de

concassage. La valeur maximale permettant la mise en place d'un scénario conservateur est de 4,55 mg/m³.

D'autres métiers particuliers peuvent être exposés comme les travailleurs du BTP, les autres métiers de carrières, les tailleurs de pierre, les agriculteurs....

5.2 Facteurs humains

Dans le cadre de cette partie consacrée à la recherche des facteurs humains, de nombreuses sources de données ont été utilisées.

Les principales sont :

- l'US EPA avec le cd-rom cd (Exposure Factors Handbook) [19],
- les résultats de l'enquête INCA réalisée par l'Afssa [20] et [21],
- le rapport de l'InVS : la situation et l'évolution des apports alimentaires de la population en France (1997-2003) [22],
- le volet sanitaire de l'étude d'impact sanitaires liés aux rejets atmosphériques des unités de production thermique de Bois Rouge (commune de Sainte-Marie) : exposition par inhalation et exposition par ingestion [23],
- les valeurs de consommation alimentaire dans la zone d'Afrique subsaharienne dont fait partie La Réunion (FAO) [24].

Quel que soit le type de population étudiée, aucune donnée sur la voie cutanée n'a été trouvée.

5.2.1 Population générale

A) Les enfants

a) *Le poids*

Pour les enfants, le poids varie en fonction de l'âge. L'US EPA propose les valeurs suivantes :

	Poids	Ecart type
3 ans	15	2
6 ans	20	4
9 ans	29	6,3
12 ans	41	10,1

Tableau 17 : Poids moyen des enfants (US EPA)

b) *Ingestion*

- *Eau de boisson*

Aucune donnée propre à La Réunion n'est trouvée dans la littérature concernant la quantité d'eau d'alimentation consommée dans une journée.

La consommation d'eau du robinet ou d'eau de boisson est chiffrée par l'US EPA à un litre par jour. Cette valeur est plutôt majorante.

L'enquête INCA propose également des valeurs de consommation d'eau, pour les enfants en fonction des tranches d'âge, qui semblent plus proche de la réalité.

Produit	3-5 ans	6-8 ans	9-11 ans	12-14 ans	Ensemble
Eau	401,1	496,8	467,4	537,1	

Tableau 18 : Consommation d'eau pour les enfants en mL (Afssa, 1999)

- *Ingestion de sol et de poussières*

L'ASTEE fait le bilan de plusieurs études. Les valeurs moyennes se situent entre 39 et 271 mg/j de sol ingéré, avec une moyenne globale de 146 mg/j pour les sols et 191 mg/j de sols et de poussières ingérés.

L'Ineris dans l'étude d'impact appliqué à la centrale de Bois Rouge utilise comme valeur 150 mg/j de sol ingéré pour un enfant ce qui semble 'une évaluation raisonnablement majorante et non aberrante'.

L'US EPA propose pour l'ingestion de sols et de poussières chez les enfants la valeur moyenne de 100 mg/j avec un percentile 95 % de 400 mg/j.

Dans le cas d'un enfant pica, l'US EPA propose une valeur d'ingestion de sol et poussière de 10g/j.

- *L'alimentation*

Les habitudes de consommation alimentaire réunionnaises sont le fruit d'un mélange de cultures. De nombreuses communautés ethniques et religieuses sont présentes sur l'île impliquant des façons de consommer très différentes suivant les individus.

Seulement deux sources fiables sur le comportement alimentaire ont été trouvées l'enquête INCA (Tableau 19) réalisée par l'Afssa et les données de la FAO. Les résultats de l'enquête INCA sont relatifs à un bol alimentaire métropolitain. Les données fournies par la FAO sont relatives à la zone SSA (Afrique subsaharienne), cette zone correspond à un regroupement de nombreux pays africain et de l'Océan Indien. Le tableau de résultat et la liste des pays de la zone SSA sont présentés en Annexe 11.

Pour les raisons citées ci dessus, ces données ne semblent pas particulièrement adaptées au comportement réunionnais. Celui ci serait plutôt considéré comme influencé par plusieurs modes de vie. Dans le cas de l'utilisation des données actuellement recensées, des précautions devront être prises.

Produit	3-5 ans	6-8 ans	9-11 ans	12-14 ans	Ensemble
Pain biscottes	35,1	57,9	63,4	87,5	61,5
Céréales petit déjeuner	15,4	20,5	21,1	17,3	18,6
Pâtes	26,3	33	43,8	44,7	37
Riz et semoule	16,5	18,6	23,1	26,7	21,3
Viennoiseries	19,3	24,4	25,3	27,7	24,3
Biscuits	30,4	32,7	26,3	27,8	29,3
Pâtisseries	22,6	32,4	34,9	38,8	32,3
Lait	247,1	232	201,3	196,2	219
Ultra frais laitier	89,6	86,2	67,3	63,4	76,6
Fromages	18,3	21,6	23,7	25,3	22,3
Œufs et dérivés	9,4	11,8	13,4	11,5	11,5
Beurre	7,6	10,3	10,8	11,8	10,2
Viandes	34,2	41,7	51,1	59,2	46,7
Volailles et gibiers	17,5	23,5	31,5	29,9	25,6
Charcuterie	23,6	27,2	26,4	32,8	27,6
Poissons	17,8	21,1	21,1	21,2	20,3
Légumes (hors pommes de terre)	57,8	72,6	82,6	84,4	74,5
Pommes de terre et dérivés	44,4	56,1	67	73	60,3
Légumes secs					
Fruits	71,2	87,2	95,7	80,2	83,5

Produit	3-5 ans	6-8 ans	9-11 ans	12-14 ans	Ensemble
Sucres et dérivés	15,5	19	16,88	21,8	18,4
Eau	401,1	496,8	467,4	537,1	
Jus de fruits et sodas	180,3	173,6	198,5	236,8	197,7
Boissons alcoolisées					
Café	2,3	6,4	14,3	18,4	10,5
Thé et boissons chaudes	16,7	17,9	24,1	19,9	19,6
Soupes	35,4	46,2	43,4	42,3	42
Pizzas, quiches et tartes salées	11,2	15,6	20,2	24,3	17,9
Sandwiches	5,6	8,1	11,5	15,5	10,2
Plats composés	49	62,2	78,1	86	69
Entremets	36,2	30,2	36,3	28,1	32,5
Compotes et fruits cuits	10,8	12,6	10,7	8,9	10,8
Autres céréales					
Huiles					
Margarine					
Abats					
Crustacés et mollusques					
Fruits secs et graines					
Glaces					
Chocolat					
Entrées					
Condiments et sauces					
Substitut de repas					

Tableau 19 : Consommation alimentaire des enfants de 3 à 14 ans en g/j (Afssa, 1999)

c) *Inhalation*

L'US EPA fournit des valeurs de quantité d'air absorbée en une journée par un enfant en fonction de l'activité de celui-ci, ces valeurs sont présentées en Annexe 10. La valeur maximale donnée pour un enfant très actif est de 1,9 m³/h.

B) Les adultes

a) *Le poids*

L'US EPA propose les valeurs de poids suivantes :

	Poids	Ecart type
moyenne	71,8	
homme	78,1	13,5
femmes	65,4	13,5

Tableau 20 : Poids des adultes (US EPA)

b) *Ingestion*

• *Eau de boisson*

Comme pour les enfants, aucune donnée propre à La Réunion n'est trouvée dans la littérature concernant la quantité d'eau d'alimentation consommée dans une journée.

La consommation d'eau du robinet ou d'eau de boisson est chiffrée par l'US EPA à deux litres par jour. Cette valeur est plutôt majorante.

L'enquête INCA propose également des valeurs de consommation d'eau pour les adultes en fonction des tranches d'âge.

Produit	15-24 ans	25-44 ans	45-64 ans	+ de 65 ans	Ensemble
Eau	570,2	574,2	541,5	526	556,9

Tableau 21 : Consommation d'eau pour les adultes en mL (Afssa, 1999)

- *Ingestion de sol et de poussières*

La valeur proposée par l'US EPA pour la quantité de sols et de poussières ingérée par un adulte est de 50 mg/j. Cette valeur fait office de référence dans de nombreuses études.

- *L'alimentation*

Pour les mêmes raisons que les enfants, tous les types de comportements doivent être pris en compte. Les données de la FAO (Annexe 11) et de l'enquête INCA pourront être utilisés avec des précautions importantes.

Produit	15-24 ans	25-44 ans	45-64 ans	+ de 65 ans	Ensemble
Pain biscottes	83,7	119	138,3	146,5	122,6
Céréales petit déjeuner					
Pâtes	45,1	37,3	34,7	26	36,1
Riz et semoule	24	24,3	18,9	12	208
Viennoiseries	24,3	21,6	11	9,9	17,3
Biscuits	19,2	15,3	10,6	10,1	13,9
Pâtisseries	33,8	33,9	40,8	34,8	35,8
Lait	146,7	124,2	96,1	117	119,5
Ultra frais laitier	76,2	78,5	70,7	75,3	75,5
Fromages	26	40,1	44,7	42,3	39,3
Œufs et dérivés	15,9	16,2	23,4	17,8	18,3
Beurre	11,1	13,8	14,3	14,7	13,6
Viandes	61,3	60	63,3	50,8	59,6
Volailles et gibiers	31,1	37,4	43,8	31,1	37
Charcuterie	32,9	41,3	41,1	32,9	38,4
Poissons	23	26,9	34,6	34,7	29,5
Légumes (hors pommes de terre)	93,9	116,4	146,4	128,5	122,5
Pommes de terre et dérivés	68,6	60,1	63,4	64,8	63,2
Légumes secs	8,1	10,7	12,4	8,2	10,3
Fruits	77,3	108	164,2	206	134,2
Sucres et dérivés	18,6	30,1	30,1	29	27,9
Eau	570,2	574,2	541,5	526	556,9
Jus de fruits et sodas	200,2	106,8	53,7	52,2	99,8
Boissons alcoolisées	49,7	158,1	229,6	167,7	159,9
Café	66,1	228,5	254,2	188,5	200,7
Thé et boissons chaudes	34,6	65,7	108,1	76,6	73,3
Soupes	44,1	56,6	110,9	162,3	86,4
Pizzas, quiches et tartes salées	36,1	27,8	16,6	11,4	23,6
Sandwiches	19,9	20,2	7,8	1,7	13,8
Plats composés	88,9	93,8	67,1	56	79,6
Entremets	31,2	28,1	17,5	19,8	24,5
Compotes et fruits cuits	8,5	10,2	12	12,4	10,7
Autres céréales					
Huiles					

Produit	15-24 ans	25-44 ans	45-64 ans	+ de 65 ans	Ensemble
Margarine					
Abats					
Crustacés et mollusques					
Fruits secs et graines					
Glaces					
Chocolat					
Entrées					
Condiments et sauces					
Substitut de repas					

Tableau 22 : Consommation alimentaire en g/j (Afssa, 1999)

c) Inhalation

Comme pour les enfants, l'US EPA fournit des valeurs de quantité d'air absorbé en une journée en fonction de l'activité, ces valeurs sont présentées en Annexe 10. La valeur maximale donnée pour un adulte très actif est de 3,2 m³/h.

5.2.2 Population professionnelle

Quelle que soit la voie d'exposition considérée, il faut tenir compte des mesures de protection utilisées dans chaque corps de métier. Les travailleurs utilisent-ils des vêtements de sécurité (bleus de travail, gants, masques, lunettes...)? Avec manches longues ou courtes? Dans quelles conditions utilisent-ils ces protections?

Certains métiers sont directement en relation avec les sols ou les particules qui en sont issues (carriers, travailleurs du BTP...) et d'autres sont en contact avec du nickel, du chrome ou leurs dérivés. Pour ces métiers il est important de connaître l'exposition professionnelle qui vient alors s'ajouter à celle du prorata d'une journée de la population générale.

Il n'existe pas à La Réunion d'usine de traitement des métaux provoquant des expositions à des composés particuliers (plus solubles, volatils ou sous d'autres formes que les composés issus du sol).

A) Ingestion

Les données pour la population professionnelle sont les mêmes pour l'eau de boisson et l'alimentation.

Aucune valeur sur l'ingestion de sols et de poussière n'a été recueillie pour les travailleurs.

B) Inhalation

Comme pour la population générale, l'US EPA propose des valeurs de quantité d'air inhalé par les travailleurs, extérieurs ou intérieurs, en une journée. Ces valeurs sont présentées en Annexe 10. La valeur maximale donnée pour un travailleur extérieur actif est de 2,5 m³/h.

5.3 Propositions de scénarii d'exposition

5.3.1 Population générale

A partir des connaissances actuelles, des hypothèses peuvent être utilisées dans le cadre de la mise en place de scénarii d'exposition. Ces hypothèses sont le plus souvent choisies comme conservatrices pour ne pas minimiser les chiffres dans le cas d'un calcul de dose d'exposition.

Avec ces hypothèses majorantes, les connaissances suffisent, aujourd'hui, pour élaborer un profil type pour la population générale. Ce profil s'applique aux adultes comme aux enfants. Il s'agit d'une personne résidant et restant (ou scolarisée) sur la commune de Saint-Pierre dans le quartier de Terre Sainte. Cette personne boit de l'eau de Cilaos en bouteille et consomme des fruits et légumes locaux.

A partir de ce profil type, plusieurs exemples de scénarii sont proposés. Ils sont élaborés uniquement pour les voies d'exposition orale. Aucun scénario relatif aux voies cutanée et respiratoire n'est proposé, le manque important de données recouvrant cette exposition ne permet pas de les réaliser.

Les scénarii tiennent compte de la variation du bol alimentaire ou de comportement impliquant des modifications sur les quantités de sols et de poussières ingérées. Pour plus de facilité dans la description, les scénarii ont été numérotés.

A) Les enfants

a) *Ingestion*

Quatre scénarii d'exposition sont élaborés à partir de deux hypothèses pour l'alimentation et deux pour le comportement.

- *Scénario 1 : Enfants avec consommation alimentaire de type métropolitaine*

Sur la base du profil décrit au-dessus, on considérera le bol alimentaire d'un enfant métropolitain.

La consommation alimentaire métropolitaine est décrite par les résultats de l'enquête INCA. Les teneurs, en chrome et en nickel, correspondantes sont celles données par l'Afssa.

Pour les fruits et les légumes, les valeurs du Cirad seront utilisées. Les éléments des résultats de l'enquête INCA concernés sont : les légumes (hors pommes de terre), les pommes de terre et dérivés, les légumes secs et les fruits.

Pour l'hypothèse concernant le comportement de l'enfant sur l'ingestion de sols et de poussières, la valeur de l'US EPA de 400 mg/j paraît pertinente. De plus elle constitue une valeur majorante et donc allant dans le sens de la sécurité au moment des calculs.

- *Scénario 2 : Enfants pica avec consommation alimentaire de type métropolitaine*

La consommation métropolitaine est définie de la même façon que dans le scénario 1.

Le comportement de l'enfant pica est défini par la valeur de 10 g/j proposée par l'US EPA.

- *Scénario 3 : Enfants avec consommation alimentaire de type mixte*

La consommation alimentaire de type mixte est un mélange entre les données de la FAO et les résultats de l'enquête INCA. Ce type de comportement alimentaire a été défini par l'Ineris dans le volet sanitaire relatif à l'ingestion de l'étude d'impact de la centrale de bois rouge.

L'Ineris a travaillé à partir du constat que les consommations alimentaires de la région SSA (subsaharienne) par rapport aux pays industrialisés sont :

- trois fois plus importante pour les fruits et légumes,
- inférieur de moitié pour la viande,
- inférieur de moitié pour le lait,
- divisées par 3 pour les œufs.

A partir de ces hypothèses, certaines valeurs de l'enquête INCA peuvent être modifiées pour la réalisation de calcul d'exposition.

Les valeurs de quantité ingérée qui seront multipliées par trois sont : riz et semoule, légumes (hors pommes de terre), pommes de terre et dérivés, légumes secs et fruits.

Les valeurs réduites de moitié sont : lait, ultra frais laitier, fromage, volailles et gibiers, viandes et charcuterie.

Une seule valeur sera divisée par trois, celle des œufs et de leurs dérivés.

Comme dans le scénario 1, la valeur de 400 mg/j préconisée par l'US EPA peut être utilisée pour l'ingestion de sols et de poussières.

- *Scénario 4 : Enfants pica avec consommation alimentaire de type mixte*

Le scénario 4 est un compromis entre les scénarii 2 et 3.

La consommation alimentaire est la même que celle définie dans le scénario 3 et l'ingestion de sol et de poussières sera prise identique au scénario 2.

B) Les adultes

a) *Ingestion*

Trois scénarii d'exposition ont été élaborés. Ils concernent tous les trois le comportement alimentaire.

- *Scénario 5 : Adultes avec consommation alimentaire de type métropolitaine*

Comme pour le scénario 1, la consommation métropolitaine est définie par l'utilisation des valeurs de l'enquête INCA (pour les adultes) et les teneurs dans les aliments ont celles mesurées par l'Afssa et le Cirad.

La valeur de 50 mg/j préconisée par l'US EPA peut être utilisée pour l'ingestion de sols et de poussières.

- *Scénario 6 : Adultes avec consommation alimentaire mixte*

La consommation mixte est définie de la même façon que dans le scénario 3.

Comme pour le scénario 5, la valeur de 50 mg/j préconisée par l'US EPA peut être utilisée pour l'ingestion de sol et de poussières.

- *Scénario 7 : Adultes avec consommation alimentaire de Type Afrique subsaharienne*

Le comportement alimentaire subsaharien est défini par les données de consommation de la FAO. Ces dernières sont couplées avec les teneurs dans les aliments données par l'Afssa, le Cirad ou le service santé environnement de la Drass.

Le travail à partir des données de la FAO implique un regroupement préalable de certains aliments. La FAO propose des quantités annuelles d'aliments avant leur transformation pour la consommation. L'Afssa donne les teneurs en métaux dans l'alimentation prête à consommer. Il faut tenir compte de cette différence pour associer les deux sources et connaître la quantité totale de nickel et de chrome ingéré par l'alimentation avec une alimentation de la zone SSA.

Dans cet objectif, la proposition de synthèse est la suivante :

Produits	Q: Quantité du milieu administrée	Produits	Q: Quantité du milieu administrée
Pain biscottes		Café	1,37
Céréales petit déjeuner		Thé et boissons chaudes	0,82
Pâtes		Sucres et dérivés	36,99
Riz et semoule	49,04	Eaux	2000
Viennoiseries		Boissons alcoolisées	97,53
Biscuits		Pizzas, quiches et tartes salées	
Pâtisseries		Sandwiches	
Lait	79,45	Plats composés	
Ultra frais laitier		Entremets	
Fromages		Compotes et fruits cuits	
Oufs et dérivés	3,56	Autres céréales	278,36
Beurre		Huiles	20,27
Viandes	21,1	Magarine	
Volailles et gibiers	10,14	Abats	3,84
Charcuterie		Crustacés et mollusques	0,27
Poissons	19,18	Fruits secs et graines	
Légumes (hors pommes de terre)	86,03	Glaces	
Epices	1,92	Chocolat	
Pommes de terre et dérivés	60,82	Entrées	
Légumes secs	27,4	Condiments et sauces	15,34
Fruits	135,07	Substitut de repas	

Tableau 23 : Proposition de bol alimentaire pour la zone subsaharienne en g/j

Dans le cas des légumes, pommes de terre, épices, légumes secs, fruits, café et thé, ce sont les valeurs du Cirad (applicable aux cultures locales) qui pourront être utilisées, et pour les autres, les valeurs de l’Afssa.

Comme pour les deux scénarii précédents, la valeur de 50 mg/j préconisée par l’US EPA peut être utilisée pour l’ingestion de sols et de poussières.

5.3.2 Population professionnelle

Les données sont très parcellaires pour le milieu professionnel pour élaborer des scénarii.

A partir des valeurs mesurées par la CGSS, on peut comparer les valeurs en nickel et en chrome avec les VLE et VME.

Nickel : $4,55 \text{ mg/m}^3$ multiplié par $1,61 \cdot 10^{-3} = 7,32 \cdot 10^{-3} \text{ mg/m}^3$. Avec une VME de 1 mg/m^3 on trouve un rapport de 136 entre la VME et la valeur mesurée.

Chrome : $4,55 \text{ mg/m}^3$ multiplié par $1,58 \cdot 10^{-3} = 7,19 \cdot 10^{-3} \text{ mg/m}^3$. Avec une VLE de $0,1 \text{ mg/m}^3$ on trouve un rapport de 14 entre la VLE et la valeur mesurée.

Les concentrations dans l’air pour ce poste de travail (particulièrement exposé) dans une centrale de concassage ne dépassent pas les valeurs réglementaires en milieu professionnel.

Il est possible de proposer des axes de travail pour le calcul de doses d’exposition. Le travailleur étudié dans les scénarii serait résident à Terre Sainte et travaillerait dans le concassage au Port. Les caractéristiques en dehors du travail seraient les mêmes que pour un adulte de la population générale

a) *Ingestion*

La quantité de sols et de poussières ingérée en milieu professionnel ne peut être évaluée avec précision en l'état des connaissances. Les concentrations de poussières ou de particules dans l'air et la part associée à l'ingestion ne sont pas connues.

En fait, une quantité de poussières inhalables est donnée par la CGSS et dans une hypothèse très conservatrice, elle peut servir pour l'ingestion en supposant que toutes les poussières sont ingérées. Ces mesures concernent uniquement les métiers du concassage, la valeur maximale est $4,55 \text{ mg/m}^3$ et un travailleur très actif inhale $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Un travailleur ingère donc 91 mg/j de poussières au travail (pour 8h de travail).

Pour le reste de la journée, il est possible de retenir le prorata de la quantité de métal ingérée appliquée à la population générale soit $(50 \times 16)/24 = 33,3 \text{ mg/j}$.

En une journée, avec ces hypothèses très simplificatrices et majorantes, le travailleur sur un poste de concassage ingère $124,4 \text{ mg}$ de sols et poussières.

Il faut alors ajouter la part de l'alimentation que l'on pourra calculer à partir des mêmes suppositions que les scénarii 5, 6 et 7.

b) *Inhalation*

Avec les hypothèses formulées, les calculs de la partie ingestion restent valables pour l'inhalation. Le travailleur sur un poste de concassage inhale alors 91 mg/j de poussières au travail.

Pour le reste de la journée, la valeur d'inhalation ne peut être connue pour les mêmes raisons que celles indiquées pour la population générale. Des données de l'ORA sur les teneurs en particules dans l'air pourraient permettre de réaliser de nouvelles hypothèses et le calcul d'une dose d'exposition.

6 DISCUSSION

6.1 Identification des indicateurs pertinents à la réalisation d'une EQRS

6.1.1 Choix des métaux et des spéciations

Le choix du nickel et du chrome comme métaux à étudier dans le cadre de l'EQRS peut être sujet de discussion.

Les concentrations servant de comparaison avec les valeurs de références sont des moyennes ou des médianes. En matière de risque, l'utilisation de valeurs maximales serait plus adaptée. Les seules valeurs ressorties de la bibliographie (pour la métropole) sont des moyennes et les valeurs de références sont utilisées classiquement en comparaison avec ce type de valeurs. C'est dans un souci d'homogénéité que les moyennes ont été prises en compte.

Le chrome et le nickel ne sont pas les métaux les plus toxiques que l'on trouve dans les sols. L'arsenic est certainement le métal étant le plus problématique mais il est retrouvé uniquement dans les eaux d'alimentation à des doses ne dépassant que momentanément et faiblement les normes imposées aux eaux d'alimentation.

La connaissance des roches n'implique pas de facto celle des sols. Si dans le cas du chrome, l'utilisation du chrome III paraît tout à fait légitime, celle des éléments sulfurés et oxydés du nickel peut être discutée. D'autres composés du nickel pourraient éventuellement être pris en compte pour la réalisation de l'EQRS. L'altération des roches et le passage de celles ci sous forme de sols ne sont pas suffisamment décrits en ce qui concerne la mobilité et la disponibilité finale des métaux dans les sols.

6.1.2 Fond géochimique naturel et teneurs dans l'environnement en nickel et en chrome

Les études dans les sols retenues dans la bibliographie ne couvrent pas la totalité de l'île, elles sont soit très localisées (*Nativel*, *Albarède* et le bureau d'études GEISER) soit issues d'un faible nombre de mesures (Cirad). De plus aucune précision ne peut être apportée sur la disponibilité des métaux à partir des études réalisées.

Pour les fruits et légumes, ce sont les médianes mesurées par le Cirad qui ont été utilisées. Celles ci sont les plus importantes et les plus pertinentes car elles sont mesurées localement. Cependant les travaux du Cirad sur les métaux ne font que commencer et les teneurs dans les végétaux sont très variables en fonction de la variété étudiée.

Les teneurs dans le reste de l'alimentation (étude TDS, Inra) sont calculées dans les plats déjà préparés. Cela permet une corrélation directe avec les résultats de l'enquête INCA mais pas avec les données de la FAO.

En l'absence de données sur l'alimentation locale, on aurait pu considérer que la valeur du rapport entre tous les aliments métropolitains et réunionnais était le même que celui des fruits et légumes que l'on peut calculer avec les valeurs de l'Afssa et du Cirad.

D'une façon générale, le bruit de fond en nickel et en chrome sur l'île n'est pas bien connu. Les connaissances actuelles permettent d'avoir un ordre de grandeur et surtout de savoir que les concentrations sont fortes à La Réunion. Le manque de connaissances sur la disponibilité est important. L'interprétation de calculs de risque à partir des données relevées dans ce rapport paraît alors délicate.

6.2 Caractérisation des dangers

Les métaux présents dans les sols sont nombreux et les composés ou minerais dont ils sont issus ou extraits le sont d'autant plus. Ainsi les dangers que l'on peut leur associer sont très différents. En fonction des minéraux dans lesquels ils sont présents, les métaux sont plus ou moins disponibles. Dans certains cas ils ne le seront pas du tout, alors aucun danger ne pourra être retenu.

Les connaissances actuelles des sols de La Réunion sont limitées et ne permettent pas de connaître la disponibilité des éléments insérés dans les cristaux. Cette absence de connaissance ne permet de conclure réellement sur leur toxicité. De nouvelles études pourraient apporter des réponses et remettre en question le choix du nickel et du chrome s'il était avéré que le passage des métaux contenus dans les sols à l'organisme n'est pas possible.

L'étude des dangers a consisté en un travail sur les données sur l'homme uniquement. Les recherches sur les animaux n'ont pas servi à la description des symptômes possibles.

Les fiches toxicologiques de l'Inrs et de l'Ineris proposent des bilans d'études expérimentales réalisées sur des rats, des souris, des chiens et d'autres animaux de laboratoire, mais les produits testés peuvent varier. Ces produits ne sont pas précisés à chaque fois et les valeurs données ne correspondent pas toujours à un composé bien identifié. Il n'est, alors, pas simple de caractériser les dangers associés à chaque produit.

Les connaissances sur la cancérogénèse du nickel comme du chrome III sont contradictoires et ne permettent pas de conclure quant à un éventuel effet de ces produits sur les cancers pulmonaires.

6.3 Choix des valeurs toxicologiques de référence

Les valeurs de références sont retenues en fonction des composés du métal en question.

Au final, celles relatives uniquement au chrome III et aux composés oxydés ou sulfurés du nickel ne sont pas nombreuses. De plus il n'est pas certain que ce soit uniquement ces composés qui soient en cause dans la présence importante de ces métaux dans les sols réunionnais.

Les instituts servant traditionnellement de référence dans ce domaine (US EPA et ATSDR) ne proposaient pas de valeurs correspondant aux spéciations relevées dans les sols. Les valeurs présentées dans la partie 4 sont les seules recueillies durant l'étude. Le manque de connaissance est important pour les effets sans seuil et pour la voie cutanée. Aucune des valeurs relatives à ces expositions n'est connue.

Le pourcentage de nickel et de chrome libre dans les sols n'étant pas connu, l'utilisation des VTR comme éléments de comparaison par rapport à des valeurs d'exposition paraît alors délicate.

6.4 Scénarii d'exposition

Les facteurs environnementaux et humains permettant la réalisation des scénarii d'exposition ne sont pas parfaitement connus ou ne sont pas toujours adaptés aux spécificités réunionnaises.

6.4.1 Facteurs environnementaux

Facteurs environnementaux		
	Nickel	Chrome
Les sols	1613 ppm	1580 ppm
L'alimentation	Valeurs de l'étude TDS (Inra)	
L'eau	0,037 mg/L	0,01 mg/L
L'air	4,55 mg/m ³ de poussières (professionnel)	

Tableau 24 : Résumé des facteurs environnementaux

Les éléments de discussions des facteurs environnementaux rejoignent directement ceux sur le fond géochimique et les teneurs dans l'environnement.

Une connaissance plus complète de tous les compartiments de l'environnement influant sur la dose d'exposition doit être en possession des personnes ayant pour objectif de réaliser une EQRS lié aux teneurs en métaux dans les sols réunionnais.

Les valeurs de concentrations dans les sols sont issues de la zone de Terre Sainte et ne représentent pas la totalité de l'île. Pour chaque coulée de lave, la composition du sol peut être totalement différente. Les mesures utilisées pour les scénarii sont des mesures de nickel, ou de chrome, total ne tenant pas compte de la disponibilité des éléments dans les minéraux.

Les teneurs en chrome et en nickel dans l'alimentation locale sont peu nombreuses, elles existent en faible quantité pour les fruits et légumes mais pas du tout pour la viande, le lait, les œufs, le poisson... Il est possible de les évaluer à partir de connaissances sur le fond géochimique naturel en utilisant des logiciels comme Caltox.

Les teneurs en nickel et en chrome pour l'eau d'alimentation sont variables en fonction de l'endroit de l'île où elles sont mesurées. Le cas le plus défavorable pour le nickel est le cirque de Cilaos, c'est à cet endroit qu'est embouteillée l'eau minérale de Cilaos. Mais l'eau minérale est d'origine et de composition différente que les eaux d'adduction publiques qui sont les plus consommées.

Les seules valeurs dans l'air recueillies pendant l'étude sont celles mesurées par le LICP dans des centrales de concassage, elles sont donc utilisables uniquement pour les professions dont les conditions de travail sont proches.

Des valeurs de concentration de particules dans l'air peuvent être données par l'ORA. Ces valeurs permettraient, en connaissant la part de particules issues du sol, de connaître les teneurs en nickel et en chrome dans l'air. Les teneurs en nickel ou en chrome pourraient aussi être mesurées en cas de besoin.

6.4.2 Facteurs humains

	Facteurs humains		
	Enfants	Adultes	Professionnels
Le poids	15 à 41 kg	50 à 90 kg	
Les sols	100 mg/j à 10 mg/j	50 mg/j	
L'alimentation	Enquête INCA (Afssa) ou FAO		
L'eau	INCA ou 1 L/j	INCA ou 2 L/j	
L'air	1,9 m ³ /h	3,2 m ³ /h	2,5 m ³ /h

Tableau 25 : Résumé des facteurs humains

Comme il est déjà précisé dans la partie consacrée à la proposition de scénarii, la population réunionnaise est issue d'un mélange de cultures se côtoyant depuis plus de trois siècles. De ce melting-pot culturel ressort une consommation alimentaire créole propre à La Réunion. Les seules données trouvées dans la littérature et permettant de s'en approcher sont les résultats de l'enquête INCA et les tableaux de consommation de la zone SSA de la FAO. Ces données ne permettent pas de caractériser le comportement alimentaire de la population réunionnaise. Elles décrivent soit le bol alimentaire métropolitain soit un comportement alimentaire plutôt africain.

Le niveau de vie étant plus élevé à La Réunion que dans les autres pays de la zone SSA définie par la FAO, la consommation doit y être un peu différente, mais globalement l'utilisation des céréales comme base de l'alimentation et la consommation plus faible de viande est plutôt bien représentative du comportement réunionnais. Ce constat est appuyé par le document 33 de l'observatoire du développement de La Réunion [25].

Avec les valeurs de l'US EPA, la quantité d'eau consommée dans la journée est largement surévaluée. Le scénario le plus défavorable pour la consommation d'eau suppose que la personne étudiée boive uniquement de l'eau de Cilaos embouteillée. Cette hypothèse paraît quelque peu improbable car elle ne correspond pas aux habitudes de la majorité de la population.

Les valeurs de poids, de quantité de sols ingérés et d'air respiré semblent être adaptées puisque l'US EPA sert de référence dans ce domaine. Elles pourraient être plus représentatives si elles étaient issues d'études locales. De plus les comportements pourraient être revus de façon plus précise en reprenant le budget espace temps de façon global (temps de sommeil, temps à la maison, à l'école ou au travail, à l'intérieur et à l'extérieur et savoir si c'est sur terrain bétonné ou non bétonné). Il ne paraît, cependant, pas incohérent d'utiliser ces valeurs dans le cas d'une mise en oeuvre de calcul de doses d'exposition.

6.4.3 Proposition de scénarii d'exposition

Aucun travail ne peut être proposé pour la voie cutanée du fait d'une absence de connaissance considérant cette voie d'exposition. Les éléments chrome et nickel étant sous

forme particulière dans l'air et de cristaux dans les sols, ils ne sont certainement pas dans des conditions adéquates pour passer la barrière cutanée.

Plus que la voie cutanée, ce sont les problèmes liés aux contacts qui peuvent être décelés. Ce sont, alors, les propriétés allergènes des métaux qui sont concernées. Les réactions allergiques dépendent autant de la sensibilité de la population que de la dose en contact avec la peau (et donc des teneurs dans les sols et les poussières). Elaborer des scénarii pour le contact sur une population relève alors d'un travail sur chaque personne.

A) Population générale

Les scénarii 1 à 7 présentés dans la partie 5.3 sont basés sur des hypothèses majorantes.

Les scénarii élaborés pour la population générale ne représentent qu'une partie de la population réunionnaise. Les personnes habitant loin de la zone d'étude couverte par le bureau d'études GEISER et les personnes n'ayant pas les mêmes habitudes alimentaires (les végétariens, la communauté chinoise... ou simplement ne buvant pas d'eau de Cilaos) ne sont pas prises en compte dans les hypothèses retenues.

Le fait de croiser les résultats de plusieurs études (INCA et FAO) peut provoquer des erreurs dans la détermination du bol alimentaire.

a) *Enfants*

Pour caractériser la diversité des comportements alimentaires, seulement deux profils de consommation ont été élaborés chez les enfants.

L'utilisation des données de la FAO n'est pas proposée pour le calcul de la DJE des enfants. Utiliser ces résultats aurait provoqué une hausse importante de la consommation alimentaire (d'un point de vue quantitatif) qui aurait alors été totalement erronée. Ce constat est fait lorsque l'on calcule la somme de nourriture consommée en g/j.

b) *Adultes*

Pour caractériser la diversité des comportements alimentaires, seulement trois profils de consommation ont été élaborés chez les adultes. Ces trois hypothèses sont le fruit des connaissances actuelles et ne reflètent que partiellement la population réunionnaise. De plus le scénario 7 préconise un regroupement de plusieurs groupes d'aliments pour pouvoir associer ces aliments aux teneurs mesurées par l'Inra. Ce rassemblement a certainement des conséquences et invalide la qualité des travaux réalisés par la FAO.

B) Population professionnelle

Les scénarii proposées pour les milieux professionnels sont uniquement basés sur les concentrations de poussières dans les centrales de concassage. De plus c'est la maximale qui est retenue, les scénarii sont donc élaborés sur une seule mesure associée à un seul métier (celui ci étant exposé de façon importante).

L'hypothèse consistant à prendre la même valeur en ingestion qu'en inhalation est issue de la méconnaissance de la part destinée à l'ingestion dans les poussières, mais elle est forcément la source d'une erreur importante.

Tenir compte des mêmes hypothèses alimentaires que pour la population générale implique alors les mêmes biais. De plus, il est important de préciser que l'ajout des doses obtenues pendant les heures de travail et le reste de la journée est source d'erreurs. En effet, l'ajout du prorata de 16 heures sur 24 peut être discuté puisque le sommeil prend alors une place plus importante que pour un calcul journalier.

6.5 Méthodologie et déroulement du mémoire

Certains éléments de réflexion n'ont pas pu être explorés faute de temps. Les quatre mois du mémoire sont apparus bien courts devant l'ampleur de la tâche. L'étape de caractérisation des risques n'a pas pu être abordée.

Une étude de sensibilité pour mesurer la contribution de chaque paramètre aurait pu être réalisée. Ainsi des orientations sur les connaissances prioritaires à apporter aurait pu être proposées.

L'utilisation de modèles informatiques pour étoffer les données d'exposition disponibles en se fixant des hypothèses et à partir de bonnes connaissances sur les sols était également possible.

7 PERSPECTIVES

A ce jour, des travaux doivent être développés localement pour faciliter la réalisation d'une EQRS réellement complète.

Dans un premier temps les travaux à mener concernent prioritairement la biodisponibilité, la concentration en poussières dans l'air et la part de l'ingestion par rapport à l'inhalation pour les poussières et les particules.

Une étude de sensibilité afin de déterminer quels sont les éléments les plus influents dans l'exposition pourra être réalisée. A partir des résultats obtenus, et en fonction de la contribution respective des paramètres, il sera possible de faire une hiérarchisation des paramètres pour lesquels une amélioration des connaissances est indispensable pour réduire l'incertitude.

Après ce travail sur la sensibilité, il sera intéressant de mettre en œuvre des études à plus long terme. Celles ci sont longues, coûteuses et doivent être lancées en cas de réels besoins. Elles peuvent être issues de modélisation ou de campagnes de mesures.

Les teneurs dans certains compartiments de l'environnement peuvent être obtenues à partir d'une caractérisation plus précise du nickel et du chrome dans les sols. Avec des logiciels comme Caltox, il est possible de connaître les concentrations dans les bovins, la volaille, les œufs, le lait et d'autres éléments locaux.

Les formes chimiques des composés minéraux contenant le nickel et le chrome dans les sols doivent être mieux connues. Le but de ces travaux étant de compléter la connaissance des spéciations et surtout de connaître la biodisponibilité des éléments à partir des composés dans lesquels ils sont intégrés.

Des mesures de nickel et de chrome dans les poussières intérieures, extérieures et en environnement professionnel pour certains cas (carrière, BTP...) devraient être réalisées.

Les origines des produits alimentaires consommés localement doivent être précisées et les teneurs dans l'alimentation réunionnaise mieux connues. Les aliments tels que la viande, le lait, les œufs, le fromage, les fruits et les légumes doivent être étudiés dans le but de connaître leurs concentrations en métaux.

Des connaissances sur les consommations alimentaires réunionnaises, autant quantitatives que qualitatives doivent être apportées.

Un travail de caractérisation de la sensibilité au chrome et au nickel de la population réunionnaise pourrait être mené comme base d'étude relative aux allergies.

8 CONCLUSION

L'exercice présenté est un préalable à la réalisation d'une EQRS liés à la présence de métaux dans les sols. A partir des données recueillies pendant le mémoire, il en ressort plusieurs points.

De nombreuses données existent sur les roches réunionnaises mais relativement peu sur les sols. Les connaissances sur les spéciations des métaux et la nature précise des minéraux qui les contiennent dans les sols sont assez faibles. Des hypothèses peuvent être formulées par rapport aux études déjà réalisées dans d'autres lieux (Nouvelles Calédonie ou Hawaii).

Le problème de l'inaptitude à déterminer la disponibilité des métaux à partir des matériaux dans lesquels ils sont insérés est le principal frein à la connaissance et à la caractérisation du risque. En effet, la part de métal libre à partir des sols doit être chiffrée si on veut pouvoir comparer ces valeurs d'exposition au VTR. Les teneurs dans les différents compartiments de l'environnement peuvent être estimées et le sont déjà en partie.

La réalisation de calculs de dose d'exposition à partir des données de concentration totale en nickel et en chrome est réalisable avec l'aide de mesures environnementales complémentaires et en se fixant des hypothèses préalables. Toutefois, compte tenu des incertitudes existantes sur certains paramètres, les résultats risquent d'être difficilement interprétables.

La volonté de chiffrer un risque paraît prématurée mais avec le renfort de modélisation ou de connaissances précises (bibliographiques ou issus de recherches sur le terrain), la réalisation d'une EQRS sera alors possible et pertinente.

Bibliographie

- [1] P. Nativel, J-L. Joron *et al.*, 1979, Etude pétrographique et géochimique des volcans de La Réunion, Bulletin de la Société Géologique de France 21 (4) : 427-440.
- [2] F. Albarède, B. Luais *et al.*, 1997, The géolchemical regimes of Piton de la Fournaise volcano (Réunion) during the last 530 000 years, Journal of Petrology 38 (2) : 171-201.
- [3] M. Raunet, 1991, Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion – Conséquences pour la mise en valeur agricole, Cirad, 515 p.
- [4] E. Doelsch, 2003. Eléments traces métalliques – Etat des lieux et des connaissances pour l'île de La Réunion (roches, sols, végétaux et déchets), Cirad, 74 p.
- [5] E. Doelsch, 2004. Eléments traces métallique – Etat des lieux et des connaissances pour l'île de La Réunion (sols, déchets et végétaux), Cirad, 125 p.
- [6] Bureau d'études GEISER, 2003, Déconstruction sélective de la station d'épuration de la RHI Tanambo commune de Saint Pierre, prélèvements et analyses d'échantillons de sol, diagnostic du sol, rapport n° EN 34602/03, indice 2, 11 p.
- [7] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2000, Gestion des sites (potentiellement) pollués, Evaluation Simplifiée des Risques, I à V, 137 p.
- [8] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2000, Gestion des sites pollués, Evaluation Détaillée des Risques, partie I à X, 170 p.
- [9] Inrs, 1992, Fiche toxicologique n°68 – Nickel et composées minéraux, 6 p.
- [10] Inrs, 1997, Fiche toxicologique n°1 – Trioxyde de chrome, 4 p.
- [11] M. Bisson *et al.*, 2005, Nickel et ses dérivés – fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, Ineris-DRC-01-DR029.doc, Version 1, 64 p.
- [12] M. Bisson *et al.*, 2000, Chrome – fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, Ineris-DRC-01-25590-ETSC-Api/SD-n°00df253.doc, Version 1, 47 p.
- [13] Santé Canada, 1994, Liste des substances d'intérêt prioritaire – Le chrome et ses composés, ISBN 0-662-99806-5, 72 p.
- [14] Santé Canada, 1994, Liste des substances d'intérêt prioritaire – Le nickel et ses composés, ISBN 0-662-99255-5, 101 p.

- [15] J.C. Leblanc *et al.*, 2004, Etude de l'alimentation totale française – mycotoxines, minéraux et éléments traces, Inra, 72 p.
- [16] Inrs, 2001, Fiche HI – Echantillonnage des aérosols Généralités, 12 p.
- [17] Site Internet TERA Iter Data base www.iter.ctcnet.net.
- [18] Inrs, 1999, Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France, Cahier des notes documentaires – Hygiène et sécurité du travail – N°174, 1^{er} trimestre 1999, 59-79, ND 2098-174-99.
- [19] Office of Research and Development Washington DC 20460, 1999, Exposure Factors Handbook (EFH), U.S. E.P.A.
- [20] Afssa, 1999, Enquête Individuelle et Nationale sur les Consommations Alimentaires (INCA) – Graphiques et tableaux, 21 p.
- [21] Afssa, 1999, Enquête Individuelle et Nationale sur les Consommations Alimentaires (INCA) – Principaux résultats, 6 p.
- [22] InVS et Cnam, 2005, Situation et évolution des apports alimentaires de la population en France, 1997-2003, 96 p.
- [23] C. Mandin, 2004, Evaluation des risques sanitaires liés aux rejets atmosphériques des unités de production thermique de Bois Rouge : Exposition par ingestion, Ineris – ERSA – DRC, 50 p.
- [24] FAO, 2002, Africa South of Sahara, food balance sheet, 3 p.
- [25] Chan-Ou-Teung K., 2000, Les tendances alimentaires, document n°33, ODR.

Liste des annexes

<i>Annexe 1 : Teneurs moyennes en métaux en fonction du type de roche.....</i>	<i>II</i>
<i>Annexe 2 : Comparaison par rapport aux valeurs servant de référentiel.....</i>	<i>III</i>
<i>Annexe 3 : Perspectives morpho-géologiques schématiques de l'île de La Réunion.....</i>	<i>V</i>
<i>Annexe 4 : Carte morpho-géologique de l'île de La Réunion.....</i>	<i>VI</i>
<i>Annexe 5 : Carte des unités de milieu de l'île de La Réunion.....</i>	<i>VII</i>
<i>Annexe 6 : Résultats des analyses des sols du CIRAD (2004).....</i>	<i>VIII</i>
<i>Annexe 7 : Résultats des analyses des végétaux du CIRAD (2004).....</i>	<i>IX</i>
<i>Annexe 8 : Glossaire des VTR.....</i>	<i>X</i>
<i>Annexe 9 : Résumé des VTR et de leurs méthodes d'obtention.....</i>	<i>XII</i>
<i>Annexe 10 : Quantité d'air inhalé en fonction du type de population (US EPA, 1999).....</i>	<i>XIII</i>
<i>Annexe 11 : Consommation alimentaire de la zone Subsaharienne (FAO, 2002).....</i>	<i>XIV</i>

Annexe 1 : Teneurs moyennes en métaux en fonction du type de roche

Eléments	Métropole				Moyenne française	Roches réunionnaises	
	Roches cristallines		Roches sédimentaires			Ile de La Réunion	Piton de la fournaise
	Roches neutres	Granites	Argiles - schistes	Grès	basaltes océaniques		
Cr	50	25	100	35	64,8	165,9	293
Ni	55	8	95	2	29,7	92,14	115,45
Cu	35	20	57	-	12,4	52,93	74,95
Zn	72	60	80	16	72	146,1	106,75
As	2,4	1,5	6,6	1	-	-	-
Se	0,5	0,5	0,6	0,5	-	-	-
Mo	0,9	1	2	0,2	-	-	-
Cd	-	0,1	0,3	<0,01	0,13	0,15	-
Sn	-	3	10	<0,1	-	-	-
Hg	-	0,08	0,4	0,03	0,05	0,16	-
Pb	15	20	20	7	-	-	1,98
Source : Wedepohl (1961) et Vinogradov (1962), cités mais non référencés par le CSHPF (1998)					Baize (2000)	Doelsch (2004)	Albarède (1997)

Annexe 2 : Comparaison par rapport aux valeurs servant de référentiel

- *Le Zinc*

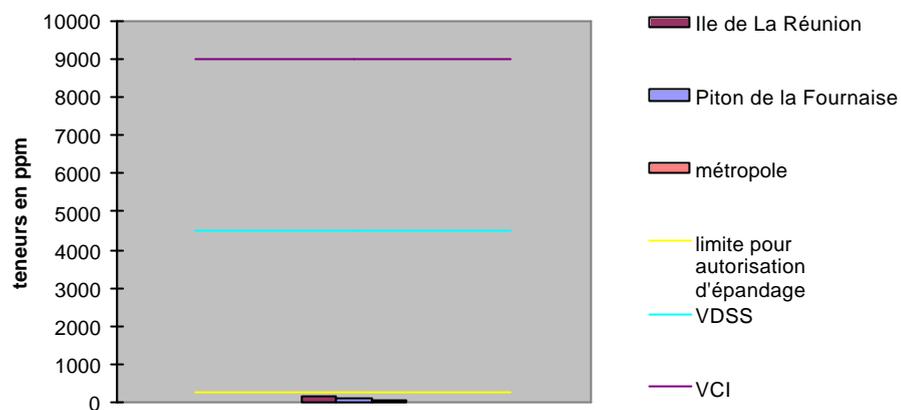


Figure 8 : Moyennes des concentrations en zinc des laves réunionnaises et des roches métropolitaines

- *Le Cuivre*

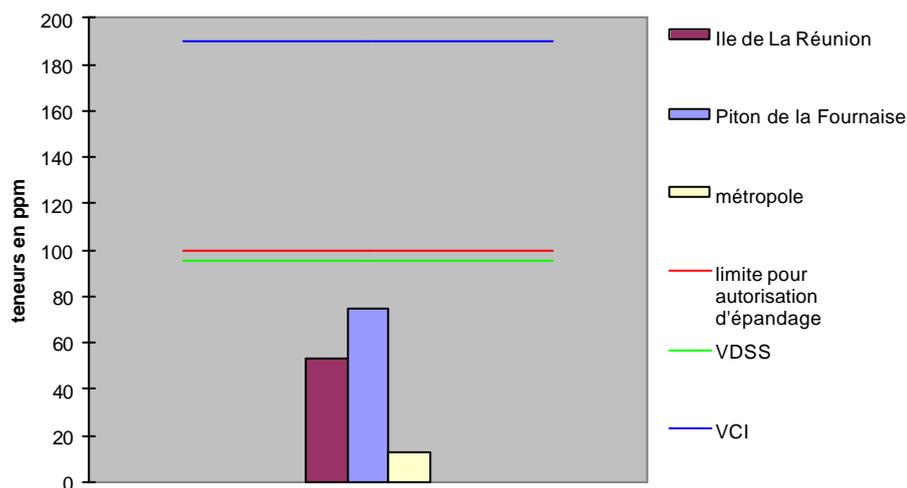


Figure 9 : Moyennes des concentrations en cuivre des laves réunionnaises et des roches métropolitaines

- *Le Mercure*

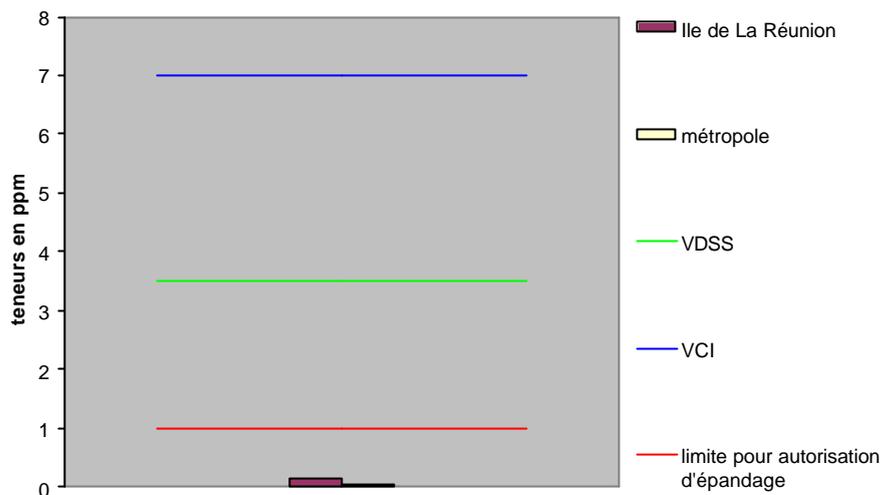


Figure 10 : Moyennes des concentrations en mercure des laves réunionnaises et des roches métropolitaines

Le Cadmium

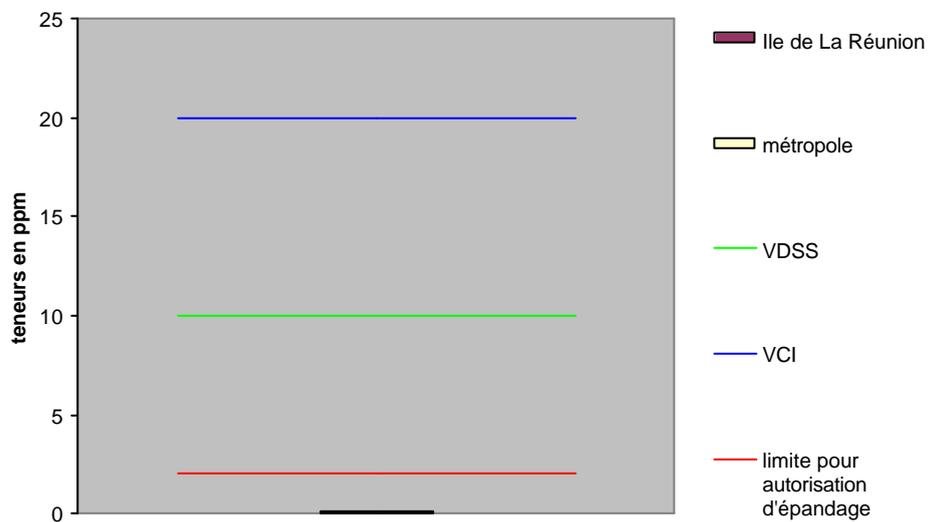
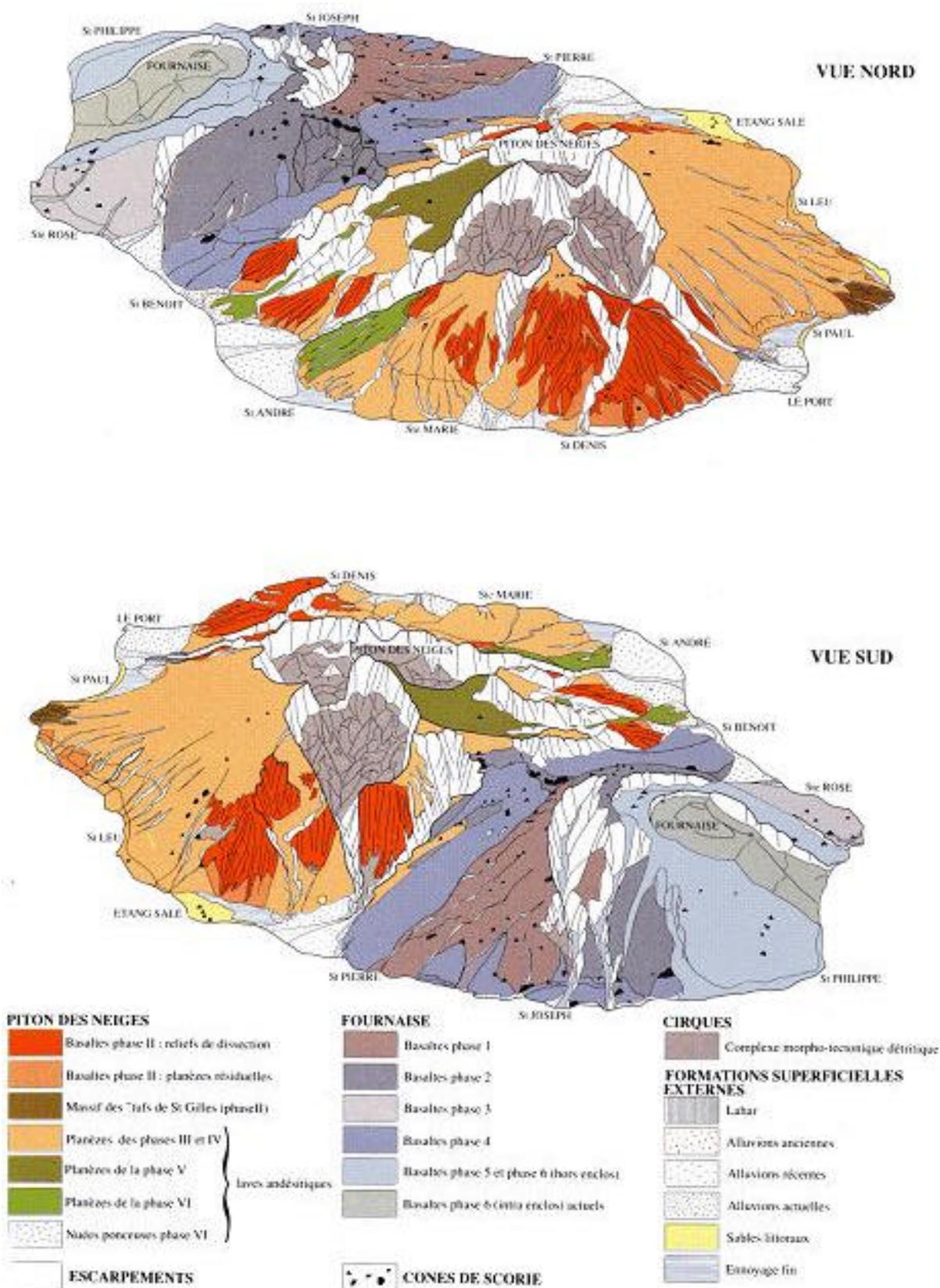


Figure 11 : Moyennes des concentrations en cadmium des laves réunionnaises et des roches métropolitaines

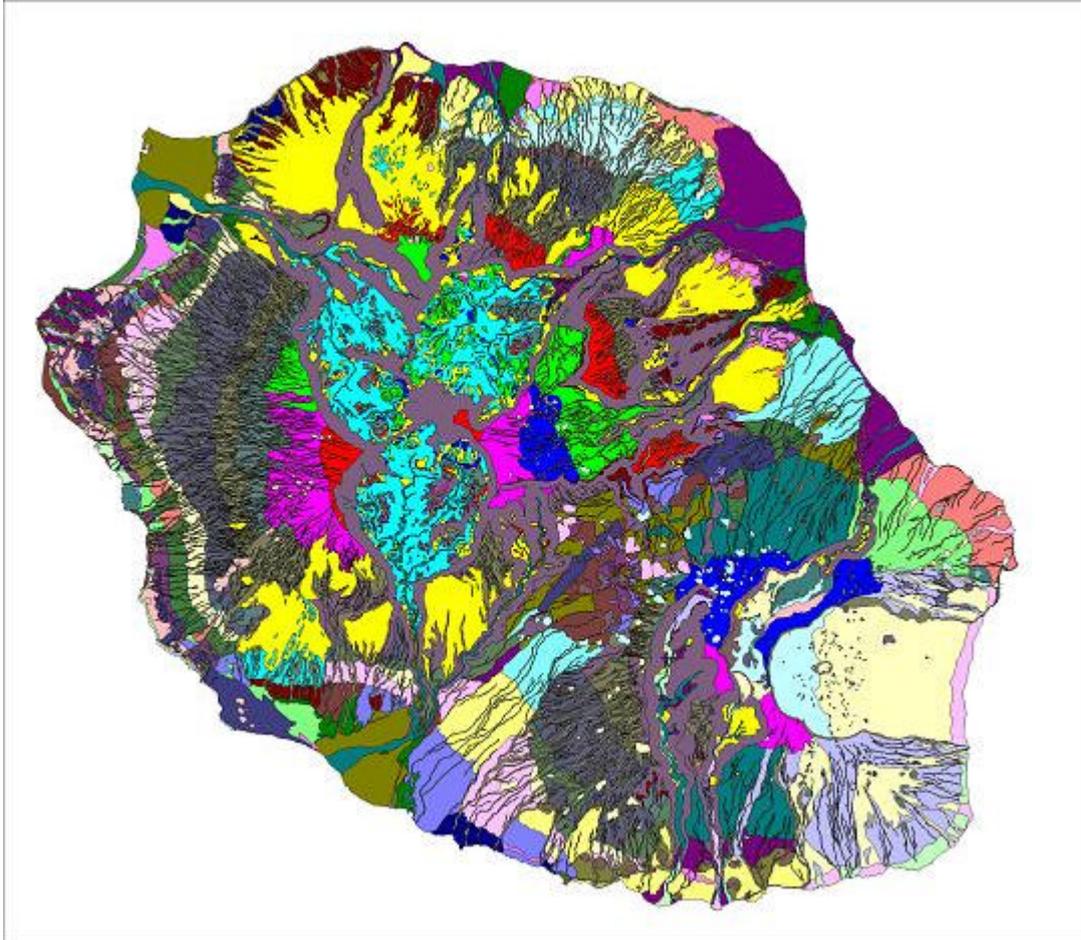
Annexe 3 : Perspectives morpho-géologiques schématiques de l'île de La Réunion

M. Raunet, CIRAD, 1991



Annexe 5 : Carte des unités de milieu de l'île de La Réunion

M. Raunet, 1991



Annexe 6 : Résultats des analyses des sols du CIRAD (2004)

	Localisation	Cultivé / Non Cultivé	pH _{eau}	pH _{KCl}	M.O. (%)	C _{orga} (%)	N _{total} (pour mille)	C/N	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (ppm)	Cd (ppm)	Hg (ppm)	Pb (ppm)	Cu (ppm)
Piton des Neiges	Lianes	C	5,52	4,98	9,09	5,27	4,07	12,95	13,47	22,96	23,28	2588	0,27	0,27	<1	93,5
	La Bretagne	C	5,7	4,9	2,91	1,69	2,07	8,16	30,35	19,1	25,35	3071	0,23	0,13	<1	13
	Chapelle pointue	NC	5,41	4,3	2,47	1,43	1,29	11,09	28,66	24,05	19,29	6693,31	0,35	0,1	<1	40,28
	Chapelle pointue	C	5,9	4,82	3,07	1,78	1,74	10,23	31,1	23,15	22,2	5835,63	0,45	0,1	80,25	49,47
	Trois Bassins	C	6,5	5,1	22,67	13,15	8,76	15,01	23,58	13,91	11,11	916,38	0,18	0,45	4,63	15,75
	Grand Hazier	C	4,56	4,04	4,4	2,55	2,08	12,26	23,84	26,92	26,54	1930,38	0,07	0,08	<1	26,25
	Grand Hazier	NC	6,51	5,47	5,47	3,17	2,63	12,05	28,59	24,81	22,27	2927,88	0,24	0,29	78,75	56,88
	Bras Pistolet	C	5,48	4,8	9,38	5,44	4,08	13,33	6,85	26,35	29,34	1865,38	0,06	0,31	<1	17,75
	Bras Pistolet	NC	5,71	4,78	6,38	3,7	2,54	14,57	6,71	28,54	31,93	2066,88	0,04	0,15	<1	13
	Beaufond	C	5,75	5,15	4,4	2,55	1,68	15,18	11,19	25,18	33,76	1874,63	0,03	0,17	<1	13,13
	Beaufond	NC	5,6	4,58	5,67	3,29	2,24	14,69	16,01	27,01	29,62	2503,38	0,04	0,12	<1	35
	Bois Rouge	C	5,07	4,21	3,59	2,08	1,76	11,82	24,59	24,22	27,97	2661,75	0,12	0,09	<1	37,38
	Bois Rouge	NC	5,21	4,34	4,05	2,35	1,86	12,63	23,55	24,6	29,15	1481	0,06	0,11	<1	70,75
	Dos d'Ane	C	7,27	6,83	9,96	5,78	5,78	10	7,66	14,94	28,13	1065	0,24	0,25	<1	46,75
	Dos d'Ane	NC	6,12	5,24	8,12	4,71	3,99	11,8	18,03	21,4	24,06	1433,38	0,17	0,37	<1	43,63
	Bassin Plat	C	5,36	4,42	3,83	2,22	1,92	11,56	22,4	29,93	23	7038	0,53	0,16	<1	120
	Les Colimacons	C	5,66	4,83	5,69	3,3	3,48	9,72	18,77	21,45	29,92	3387,96	-	-	<5	66,56
	La Mare	C	6,13	5	3,27	1,9	1,77	10,71	31,91	22,09	25,71	3490,08	-	-	<5	46,64
St-Gilles les Hauts	C	5,87	5,06	1,48	0,86	0,85	10,12	29,08	23,16	24,73	6107,38	0,27	0,13	<1	24,75	
Menciol	C	5,51	4,7	6,28	3,64	2,54	14,33	9,8	26,31	29,98	2224,5	0,15	0,29	9,88	29,63	
Piton de la Fournaise	Ligne des Quatre Cents	C	5,9	5,2	14,02	8,15	8,55	10	18,1	16,11	17,11	1702	0,48	0,25	<1	57,4
	Ligne des Quatre Cents	C	5,7	5,2	14,12	8,21	9,32	6	15,28	22,09	22,02	2094	0,52	0,28	<1	71,1
	Ste Rose NC	NC	4,42	4,56	17,81	10,33	7,09	14,57	17,56	11,94	9,58	882	0,14	0,18	<1	52,6
	Ste Rose 1960	C	4,56	4,43	13,02	7,55	5,52	13,68	22,17	16,36	12,72	1430	0,21	0,17	<1	8,8
	Ste Rose 100 ans	C	5,48	4,52	14,14	8,2	6,18	13,27	26,75	18,14	12,62	1669,63	0,21	0,11	<1	7675
	Ste Rose 3 ans	C	5,51	4,53	11,36	6,59	5,23	12,6	25,65	18,8	13,12	1692,63	0,17	0,11	<1	86
	Cambourg	C	4,92	4,26	24,6	14,27	8,86	16,11	20,59	14,79	12,76	1589,38	0,18	0,18	<1	83025
Cambourg	NC	5,63	4,45	32,89	19,08	9,67	19,73	13,22	14,26	11,35	1511,25	0,06	0,25	<1	47,63	

Annexe 7 : Résultats des analyses des végétaux du CIRAD (2004)

Fraction ou traitement		M.S.	Cd (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	
Canne à sucre	Chou	St André	32,15	0,08	3,7	5,2	1,4	1,1	24,3	946	98,6
		Le Grand Hazier	35,09	0,04	3,5	4,5	1,5	1,4	22,3	1099	256,5
		Ste Rose	39,25	<0,01	2,6	4,2	1,5	4	19,2	405	172,8
		Cambourg	36,34	<0,01	2,3	4,3	2,5	2,9	18,3	342	227,9
		Colimacons	33,64	<0,01	2	3,6	0,9	0,6	19,1	139,8	50,9
		Beaufond	25,9	<0,01	1,7	3,5	0,8	0,8	23,3	298,1	168,3
		Bois Rouge	27	0,01	1,8	4,2	0,9	<0,5	27,1	1046,3	250,5
		Ligne des Quatre Cents	36,8	<0,01	2	2,9	1,33	<1	12,27		
		Ligne des Quatre Cents	36,5	<0,01	1,5	3,3	1,05	<1	12,8		
		Lianes	30,1	<0,01	1,9	3,1	0,99	<1	13,2		
	Lianes	25,5	<0,01	1,6	4,6	1,42	<1	11,4			
	Bagasse	St André	52,38	0,03	1,9	3,2	9,7	2,7	16,5	386	16,2
		Le Grand Hazier	56,16	0,06	1,7	2,9	2,3	2,1	14,6	385	74,1
		Ste Rose	55,51	0,01	1,6	2,5	1,3	2,3	12,6	192,3	32,8
		Cambourg	55,09	0,02	1,4	3,5	2,6	2,1	16,7	166,2	69,6
		Colimacons	57,35	0,01	2,2	2,4	1	1,5	11,6	238,6	11
		Beaufond	55,16	<0,01	1,4	2,8	0,8	<0,5	16,9	248,6	34,3
		Bois Rouge	51,86	0,05	1,3	3,5	1	0,9	12,6	241,1	39,8
		Ligne des Quatre Cents	57,4	0,01	0,8	2,2	1,08	<1	6,7		
		Ligne des Quatre Cents	36,5	0,01	1,5	3,3	1,05	<1	12,8		
		Lianes	58,9	0,01	0,4	1,3	0,94	<1	7,6		
	Lianes	56,3	0,02	0,9	2,4	0,97	1,8	8,4			
	Jus	St André	14,82	0,04	1,2	2,5	5,1	0,9	30,1	189,7	38
		Le Grand Hazier	18,84	0,03	0,8	2,2	1,6	<0,5	15,1	77,4	108,4
		Ste Rose	17,4	0,02	2	2,7	2,4	0,6	17,1	134,8	71,9
		Cambourg	20,39	0,02	1,1	4,9	2,3	0,6	15,4	110,1	102,9
		Colimacons	18,84	0,01	0,7	2,7	1,1	0,7	10,5	86,7	17,2
		Beaufond	19,84	<0,01	<0,5	2,5	1,3	<0,5	10,7	98,4	50,9
		Bois Rouge	18,94	0,06	0,8	2	0,9	<0,5	13	74,4	90,3
		Ligne des Quatre Cents	22,2	0,01	0,4	1,4	1,56	<1	6,5		
		Ligne des Quatre Cents	21	0,01	0,7	1,1	0,97	<1	6,9		
		Lianes	24,3	0,02	0,9	1,9	0,6	<1	7		
	Lianes	19,2	0,01	0,5	1,4	1	<1	8,7			
Salade	fumier de bovin cycle 1	La Bretagne	3,33	0,1	0,6	4,5	0,7	0,4	37,2	668,3	70,8
	engrais cycle 1	La Bretagne	3,59	0,23	0,5	2,6	0,7	0,8	39,6	348,8	199,8
	fientes de pondeuse cycle 1	La Bretagne	4,07	0,19	1,1	2,9	2,7	0,1	30,7	3571,2	117,2
	fumier de bovin cycle 1	La Bretagne	4,13	0,26	0,6	4,2	0,6	0,2	44,2	595	199
	engrais cycle 1	La Bretagne	4,16	0,15	0,5	4,1	0,6	0,8	41,7	267,2	115,4
	fientes de pondeuse cycle 1	La Bretagne	4,88	0,15	2,4	3,4	3,4	0,7	33,3	7517,4	255,8
	fumier de bovin cycle 3	La Bretagne	3,77	0,17	1	3	<0,5	0,5	36,1	149,8	78,5
	engrais cycle 3	La Bretagne	4,64	0,63	2,1	2,5	0,7	<0,5	57,8	141,6	1047
	fientes de pondeuse cycle 3	La Bretagne	3,37	0,13	1,4	3,2	<0,5	<0,5	34,7	172,4	62,8
	fumier de bovin cycle 3	La Bretagne	3,59	0,14	1,1	3,3	<0,5	0,9	36,2	315	46,1
	engrais cycle 3	La Bretagne	3,77	0,37	1,6	2,9	<0,5	0,5	62,1	179,4	912
	fientes de pondeuse cycle 3	La Bretagne	2,98	0,11	1,3	4,9	0,6	<0,5	33,3	190,4	42,7
		Dos d'Ane	4,2	0,06	1,1	5,1	0,7	<0,5	33,3	190,4	42,7
Carotte	Tampon	10,2	0,34	0,8	5,7	2,53	<1	29,1			
Clémentine	Chapelle Pointue	11,7	<0,01	0,9	5,9	1,7	<0,5	5,9	21,6	3,4	
Fourrage	Plaine des Cafres	25,3	<0,01	1,8	5,7	2,47	<1	27,3			
	Petite Plaine	31,6	0,07	1,2	5,3	1,9	<1	21,2			
	Plainde des palmistes	19,9	0,07	1	4,6	2,09	<1	10,7			

Annexe 8 : Glossaire des VTR

CAA°: Concentration Admissible dans l'air. Elle représente la concentration dans l'air à laquelle une personne pourrait être exposée continuellement pendant sa vie sans subir d'effets nocifs. Elle s'applique à des effets non cancérogènes et s'exprime en mg/m³.

CR°: Risque Cancérogène (oral ou inhalation). C'est la quantité de substance induisant un excès de risque cancérogène soit par absorption orale, soit par inhalation (souvent de l'ordre de 10⁻⁴).

CT_{0,05}°: Concentration Tumorigène. C'est la concentration généralement dans l'air qui cause une augmentation de 5% de l'incidence des tumeurs ou de la mortalité due aux tumeurs.

TD_{0,05} : Tumourigenic Dose, 5%. C'est la dose totale qui causerait une augmentation de 5% de l'incidence des tumeurs ou de la mortalité due à des tumeurs.

DJA°: Dose Journalière Admissible. Utilisée par plusieurs organisme, c'est une estimation de la dose qui peut être absorbée pendant toute une vie sans risque appréciable pour la santé. Elle peut avoir différentes valeurs en fonction de la voie d'exposition considérée. Elle s'exprime en masse de substance absorbée par une unité de masse corporelle. Dans le cas de la DJA, la dose est journalière, mais elle peut être hebdomadaire ou hebdomadaire provisoire.

Elles sont aussi utilisées sous les sigles suivant°: TC (or TCA) : Tolerable Concentration (or Tolerable Concentration in Air) pour les valeurs d'inhalation et TDI (or TI) : Tolerable Daily Intake (or Tolerable Intake) pour l'ingestion.

ERU : Excès de Risque Unitaire. Il est fait l'hypothèse que la relation entre la probabilité d'effets associée à une faible dose et cette faible dose est une relation linéaire. L'ERU (ou Slope factor) est la pente de cette droite. Cette hypothèse permet de calculer la probabilité associée à une faible dose en deçà du domaine des doses réellement expérimentées.

LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level. C'est la plus faible dose d'une substance qui provoque des modifications distinctes de celles observées chez les animaux témoins.

LOEL : Lowest Observed Effect Level. C'est la plus faible dose d'une substance qui provoque des modifications distinctes de celles observées chez les animaux témoins.

MRL : Minimal Risk Levels. C'est une estimation de la concentration d'exposition journalière à une substance chimique qui est probablement sans risque appréciable d'effets néfastes non cancérogènes sur la santé pour une durée spécifique d'exposition.

NOAEL : No Observed Adverse Effect Level. C'est la dose la plus élevée d'une substance pour laquelle aucun effet toxique (adverse) n'est observé (OMS, 1990).

NOAEC : No Observed Adverse Effect Concentration. C'est la concentration la plus élevée d'une substance pour laquelle aucun effet toxique (adverse) n'est observé (OMS, 1990).

NOEL : No Observed Effect Level. C'est la dose la plus élevée d'une substance qui ne provoque pas de modifications distinctes de celles observées chez les animaux témoins (OMS, 1990).

REL : Référence Exposure Level. C'est la concentration ou la dose pour laquelle ou en dessous de laquelle des effets néfastes ne sont pas susceptibles de se produire, pour des conditions spécifiques d'exposition.

RfC : Reference Concentration. C'est une estimation de l'exposition par l'inhalation continue d'une population humaine (y compris les sous-groupes sensibles) sans risque appréciable d'effets néfastes durant une vie entière. Elle s'exprime en masse de substance par m³ d'air inhalé.

RfD : Reference Dose. C'est une estimation de l'exposition journalière d'une population humaine (y compris les sous-groupes sensibles) qui, vraisemblablement ne présente pas de risque d'effets néfastes durant une vie entière. Elle s'exprime en masse de substance par unité de masse corporelle.

VLE : Valeur limites d'exposition en milieu professionnel dont le respect permet d'éviter le risque d'effets toxiques immédiat ou à court terme. La VLE est une valeur plafond mesurée sur une durée maximale de 15 minutes, en fonction de la nature du risque, des conditions de travail et des possibilités techniques de mesurage.

VME : Valeurs limites de moyenne d'exposition destinées à protéger les travailleurs des effets à terme, mesurées ou estimées sur la durée d'un poste de travail de 8 heures. La VME peut être dépassée sur une courte période, sous réserve de ne pas dépasser la VLE, lorsqu'elle existe.

Annexe 9 : Résumé des VTR et de leurs méthodes d'obtention

Nickel :

Composés du nickel	Type de VTR (Organisme)	Voie d'exposition	Durée exposition	Espèce / souche	Effets considérés, organes cibles	NOAEL ou LOAEL	UF	Modèle extrapolation	VTR avec seuil	VTR sans seuil	Date révision	Etude toxicologique
nickel métal	Cap (Santé Canada)	Inhalation	6h/j 5j/7 durant huit mois	Lapins	-	LOEL : 17,8 µg/m ³	1000	-	1,8.10 ⁻² µg/m ³	-	1993 1996	<i>Cammer et Johansson, 1992; Curstedt et al., 1983 ; Johansson et al., 1983</i>
oxyde de nickel	REL (OEHHA)	Orale	2 ans	Rats	Poids, cœur, foie	REL (OEHHA)	100	-	50 µg/kg/j	-	2000	<i>Ambrose et al., 1976</i>
	TDI (RIVM)					REL (OEHHA)					2001	
	CA (Santé Canada)	Inhalation	6h/j 5j/7 pendant 2 ans	Poumon	LOEL : 20 µg/m ³	1000	2.10 ⁻² µg/m ³		1993 1996		<i>Spiegelberg et al., 1984</i>	
	REL (OEHHA)			Poumons, épithélium nasal, ganglions lymphatiques	LOAEL : 89,5 µg/m ³	300	0,1 µg/m ³		2000		NTP, 1994	

Chrome :

Composés du chrome	Type de VTR (Organisme)	Voie d'exposition	Durée exposition	Espèce / souche	Effets considérés, organes cibles	NOAEL ou LOAEL	UF	Modèle extrapolation	VTR avec seuil	VTR sans seuil	Date révision	Etude toxicologique
chrome III	RfD (US EPA)	Orale	Composés insolubles	Rats	-	NOAEL : 1,8 g/kg/j	1000	-	1,5 mg/kg/j	-	1998	<i>Ivankovic and Preussman, 1975</i>
	TDI (RIVM)		Composés insolubles			NOAEL : X 1000 / composés solubles	100	5 mg/kg/j	2001		<i>Baars et al., 2001</i>	
			Composés solubles			NOAEL : 0,46 mg/kg/j	100	5 µg/kg/j	2001			
	TCA (RIVM)	Inhalation	-	Rats	NOAEC : 0,6 mg/m ³	10	-	60 µg/m ³	-	2001	<i>Baars et al., 2001</i>	

Annexe 10 : Quantité d'air inhalé en fonction du type de population (US EPA, 1999)

Table 5-23. Summary of Recommended Values for Inhalation		
Population	Mean	Upper Percentile
<u>Long-term Exposures</u>		
Infants <1 year	4.5 m ³ /day	---
Children		
1-2 years	6.8 m ³ /day	---
3-5 years	8.3 m ³ /day	---
6-8 years	10 m ³ /day	---
9-11 years		
males	14 m ³ /day	---
females	13 m ³ /day	---
12-14 years		
males	15 m ³ /day	---
females	12 m ³ /day	---
15-18 years		
males	17 m ³ /day	---
females	12 m ³ /day	---
Adults (19-65+ yrs)		
females	11.3 m ³ /day	---
males	15.2 m ³ /day	---
<u>Short-term Exposures</u>		
Adults		
Rest	0.4 m ³ /hr	---
Sedentary Activities	0.5 m ³ /hr	---
Light Activities	1.0 m ³ /hr	---
Moderate Activities	1.6 m ³ /hr	---
Heavy Activities	3.2 m ³ /hr	---
Children		
Rest	0.3 m ³ /hr	---
Sedentary Activities	0.4 m ³ /hr	---
Light Activities	1.0 m ³ /hr	---
Moderate Activities	1.2 m ³ /hr	---
Heavy Activities	1.9 m ³ /hr	---
Outdoor Workers		
Hourly Average	1.3 m ³ /hr	3.3 m ³ /hr
Slow Activities	1.1 m ³ /hr	
Moderate Activities	1.5 m ³ /hr	
Heavy Activities	2.5 m ³ /hr	
Note: See Tables 5-25, 5-26, and 5-27 for reference studies.		

Annexe 11 : Consommation alimentaire de la zone Subsaharienne (FAO, 2002)

1

Africa South of Sahara FOOD BALANCE SHEET (Year 2002)

Population 637,053,000

PRODUCTS	DOMESTIC SUPPLY					DOMESTIC UTILIZATION						PER CAPITA SUPPLY			
	Prod-	Impo-	Stock	Exp-	TOTAL	Feed	Seed	F/Manu-	Waste	Uses	Food	Kg / Yr.	PER DAY		
	1000 Metric tons												CAL- No.	PRO Gr.	FAT Gr.
Grand Total												2207	53.5	44.1	
Vegetal Products												2068	43.2	35.1	
Animal Products												140	10.3	9.0	
Cereals - Excluding Beer	72278	19486	4102	1075	94791	4208	2064	2545	9311	594	76107	119.5	1021	26.5	7.2
Wheat	2476	10319	904	361	13337	20	116	0	409	142	12649	19.9	158	4.6	0.6
Rice (Milled Equivalent)	7495	5481	292	167	13101	157	403	43	941	196	11388	17.9	177	3.6	0.4
Barley	1173	459	44	25	1651	1	62	530	59	44	957	1.5	12	0.3	0.0
Maize	26017	2844	2339	404	30795	2670	588	424	2922	212	23979	37.6	328	8.4	3.0
Rye		46	0	9	37	7					39	0.1	0	0.0	0.0
Oats	48	20	0	2	65	2	4	0	0		60	0.1	1	0.0	0.0
Millet	13890	3	96	43	13946	564	351	377	2174	0	10481	16.5	129	3.1	1.3
Sorghum	19118	180	270	39	19529	766	482	1171	2650	0	14459	22.7	185	5.6	1.8
Cereals, Other	2062	135	158	25	2330	22	58	0	156	0	2095	3.3	30	0.8	0.1
Starchy Roots	168829	283	685	74	169723	17747	2066	0	33422	13563	102934	161.6	431	4.3	0.7
Cassava	101562	8	415	19	101965	16970		0	19021	1377	64598	101.4	270	1.9	0.4
Potatoes	5719	259	270	31	6218	32	686	0	638	5	4862	7.6	15	0.3	0.0
Sweet Potatoes	11048	1	0	2	11046	159			1557	0	9330	14.6	38	0.5	0.1
Yams	38137	2	0	15	38123	325	1283		9584	10217	16714	26.2	72	1.1	0.1
Roots, Other	12363	13	0	6	12370	260	97		2622	1964	7430	11.7	37	0.5	0.0
Sugarcrops	43905	0	0	0	43905	151	196	39942	527	1409	1681	2.6	2	0.0	0.0
Sugar Cane	43905	0	0	0	43905	151	196	39942	527	1409	1681	2.6	2	0.0	0.0
Sugar Beet		0		0	0	0					0	0.0	0		
Sugar & Sweeteners	5111	4115	-138	1617	7470			28		490	6957	10.9	106	0.0	
Sugar, Non-Centrifugal	56	0	0	0	56			29			26	0.0	0	0.0	
Sugar (Raw Equivalent)	4898	3964	-139	1587	7136			0		488	6648	10.4	102		
Sweeteners, Other	32	150	1	30	154			-1		1	158	0.2	2	0.0	
Honey	125	1	0	1	125						125	0.2	2	0.0	
Pulses	8316	264	354	199	8736	440	671		926	312	6393	10.0	93	6.1	0.5
Beans	2558	105	234	80	2817		167		201		2452	3.8	36	2.3	0.2
Peas	334	56	0	34	356		21		19		319	0.5	5	0.3	0.0
Pulses, Other	5423	103	121	85	5562	440	483		706	312	3622	5.7	53	3.4	0.3
Treenuts	941	25	-18	396	551				25		536	0.8	7	0.2	0.3
Oilcrops	13658	209	597	832	13633	38	746	8001	782	574	3569	5.6	67	3.1	5.2
Soyabeans	786	21	56	17	846	0	36	146	102	1	560	0.9	10	0.8	0.4
Groundnuts (Shelled Eq)	5727	37	350	65	6049		426	3244	378	294	1707	2.7	40	1.7	3.3
Sunflowerseed	104	1	11	8	108		3	86	3	0	16	0.0	0	0.0	0.0
Rape and Mustardseed	17	6	0	0	23		0	17		0	6	0.0	0	0.0	0.0
Cottonseed	2003	33	114	190	1959	4	197	1532	21	205					
Coconuts - Incl Copra	1746	23	0	79	1691			930	134	1	626	1.0	4	0.0	0.4
Sesameseed	718	1	20	314	424		22	137	45	0	251	0.4	6	0.2	0.5
Palmkernels	1016	21	0	45	992			935	5	46	6	0.0	0	0.0	0.0
Olives		1	0	0	1						1	0.0	0	0.0	0.0
Oilcrops, Other	1543	65	46	114	1539	34	61	975	92	26	397	0.6	7	0.3	0.6

Africa South of Sahara
FOOD BALANCE SHEET
(Year 2002)

Population 637,053,000

PRODUCTS	DOMESTIC SUPPLY					DOMESTIC UTILIZATION						PER CAPITA SUPPLY				
	Prod-	Impo-	Stock	Exp-	TOTAL	Feed	Seed	F/Manu-	Waste	Uses	Food	Kg / Yr.	PER DAY			
						1000 Metric tons							CAL- No.	PRO Gr.	FAT Gr.	
Vegetable Oils	4552	1906	-19	451	5987			5	38	1230	4733	7.4	179	0.0	20.2	
Soyabean Oil	28	381	-22	11	376					11	365	0.6	14	0.0	1.6	
Groundnut Oil	1283	2	-30	118	1138					81	1057	1.7	40		4.5	
Sunflowerseed Oil	27	58	10	5	90					5	85	0.1	3		0.4	
Rape and Mustard Oil	5	20	0	0	25					0	25	0.0	1		0.1	
Cottonseed Oil	275	13	-20	11	257					9	248	0.4	9	0.0	1.1	
Palmkernel Oil	426	13	2	7	433					38	395	0.6	15		1.7	
Palm Oil	1864	1158	2	165	2860				38	929	1909	3.0	72	0.0	8.2	
Coconut Oil	107	13	1	19	102					5	97	0.2	4		0.4	
Sesameseed Oil	65	0	0	0	65					0	65	0.1	2		0.3	
Olive Oil		16	8	0	24					4	19	0.0	1		0.1	
Ricebran Oil																
Maize Germ Oil	72	6	0	1	77						77	0.1	3		0.3	
Oilcrops Oil, Other	400	226	29	115	540			5		147	391	0.6	14	0.0	1.6	
Vegetables	21509	866	3	193	22184	0			0	2211	0	20013	31.4	24	1.2	0.2
Tomatoes	2863	521	0	46	3338				0	345		2993	4.7	3	0.1	0.0
Onions	1712	172	2	13	1873					110		1763	2.8	3	0.1	0.0
Vegetables, Other	16934	173	0	135	16973	0			0	1756	0	15257	23.9	18	1.0	0.2
Fruits - Excluding Wine	44425	554	10	1138	43851	2519		5255	4566	122	31436	49.3	87	0.9	0.4	
Oranges, Mandarines	920	126	3	110	939			8	94		841	1.3	1	0.0	0.0	
Lemons, Limes	145	3	0	7	142				16		127	0.2	0	0.0	0.0	
Grapefruit	172	15	0	38	149				19		135	0.2	0	0.0	0.0	
Citrus, Other	3693	6	0	7	3693			34	533	0	3127	4.9	3	0.1	0.0	
Bananas	5466	43	0	508	5002			946	492	1	3563	5.6	9	0.2	0.0	
Plantains	23472	0	0	0	23472	2519		4236	2246	100	14372	22.6	55	0.5	0.1	
Apples	13	91	0	5	99			1	2		97	0.2	0	0.0	0.0	
Pineapples	2446	7	0	362	2091				224		1867	2.9	3	0.0	0.0	
Dates	313	5	0	1	317				30		287	0.5	2	0.0	0.0	
Grapes	40	20	0	6	54	0		16	1	0	37	0.1	0	0.0	0.0	
Fruits, Other	7744	237	7	94	7894			15	908	21	6984	11.0	13	0.1	0.2	
Stimulants	3515	140	145	2860	940			-10	80	318	550	0.9	2	0.2	0.1	
Coffee	990	38	89	677	441			-10	17	95	334	0.5	1	0.1		
Cocoa Beans	2073	16	236	1961	364			0	62	222	82	0.1	1	0.0	0.1	
Tea	452	85	-179	223	135				1	0	134	0.2	0	0.1		
Spices	492	19	-2	38	472					15	3	454	0.7	6	0.2	0.2
Pepper	10	3	1	6	8					0	8	0.0	0	0.0	0.0	
Pimento	306	2	5	13	300					15	285	0.4	4	0.2	0.2	
Cloves	31	1	-8	10	14					0	13	0.0	0	0.0	0.0	
Spices, Other	145	13	0	9	149					0	2	148	0.2	2	0.1	0.1
Alcoholic Beverages	23623	586	1	121	24089					1250	157	22692	35.6	43	0.4	0.0
Wine	13	169	0	11	171					2	170	0.3	1			
Beer	3587	268	0	85	3770					35	3735	5.9	7	0.1		
Beverages, Fermented	19817	16	0	1	19832					1250	14	18568	29.1	32	0.3	0.0
Beverages, Alcoholic	189	46	1	13	223					7	219	0.3	3			
Meat	6826	488	12	108	7217			-6		4	7233	11.4	55	4.4	4.0	

Africa South of Sahara
FOOD BALANCE SHEET
(Year 2002)

Population

637,053,000

PRODUCTS	DOMESTIC SUPPLY					DOMESTIC UTILIZATION						PER CAPITA SUPPLY			
	Prod-	Impo-	Stock	Exp-	TOTAL	Feed	Seed	F/Manu-	Waste	Uses	Food	Kg / Yr.	PER DAY		
													CAL- No.	PRO Gr.	FAT Gr.
1000 Metric tons															
Bovine Meat	2866	85	0	47	2903			-6		0	2909	4.6	24	1.9	1.8
Mutton & Goat Meat	1258	9	0	15	1251						1251	2.0	9	0.8	0.7
Pigmeat	632	55	0	6	681			0		1	680	1.1	10	0.3	0.9
Poultry Meat	1043	318	12	11	1363					0	1363	2.1	7	0.7	0.4
Meat, Other	1027	21	0	29	1019			0		3	1030	1.6	5	0.8	0.2
Offals, Edible	807	55	0	1	862	0				0	862	1.4	4	0.6	0.1
Animal Fats	260	340	19	9	611	4			0	310	300	0.5	10	0.0	1.1
Butter, Ghee	76	16	0	1	92					0	92	0.1	3	0.0	0.3
Cream	1	7		1	7						7	0.0	0	0.0	0.0
Fats, Animals, Raw	178	313	19	5	506			0		308	201	0.3	7	0.0	0.8
Fish, Body Oil	5	3	0	2	6	4				1	0	0.0	0		0.0
Fish, Liver Oil	0	1	0	0	0	0				0	0	0.0	0		0.0
Milk - Excluding Butter	17720	2341	40	166	19935	296		2	945	242	18498	29.0	52	2.7	2.9
Eggs	1008	32		9	1032		95	0	79	2	857	1.3	5	0.4	0.3
Fish, Seafood	4427	1566	3	1273	1389	191		-18	0	45	4506	7.1	14	2.1	0.5
Freshwater Fish	1795	12	0	165	1641	7			0	28	1606	2.5	5	0.8	0.2
Demersal Fish	616	108	0	236	488			0		5	483	0.8	1	0.2	0.0
Pelagic Fish	1474	1091	1	708	1858	173		-18		8	1695	2.7	6	0.9	0.2
Marine Fish, Other	397	340	1	90	649	11		0		3	635	1.0	2	0.3	0.1
Crustaceans	94	6	1	39	62					0	61	0.1	0	0.0	0.0
Cephalopods	41	4	0	33	11						11	0.0	0	0.0	0.0
Molluscs, Other	11	5	0	1	15			0			15	0.0	0	0.0	0.0
Aquatic Products, Other	1	0	0	0						0	1	0.0	0	0.0	0.0
Meat, Aquatic Mammals															
Aquatic Animals, Others	1	0	0	0	1					0	1	0.0	0	0.0	0.0
Aquatic Plants															
Miscellaneous													1	0.1	0.0

Les pays associés à la zone d'Afrique subsaharienne définie par la FAO sont les suivants : Angola, Botswana, Burundi, Cameroun, Cap vert, Centrafrique, Tchad, Comores, Congo, Bénin, Guinée équatoriale, Ethiopie Djibouti, Gabon, Gambie, Ghana, Guinée, Côte d'Ivoire, Kenya, Lesotho, Libéria, Madagascar, Malawi, Mali, Mauritanie, Maurice, Mozambique, Namibie, Niger, Nigeria, Guinée-Bissau, Erythrée, Zimbabwe, Réunion, Rwanda, Sainte-Hélène, Sao Tomé et principe, Sénégal, Seychelles, Sierra Leone, Somalie, Sahara occidental, Soudan, Swaziland, Tanzanie, Togo, Ouganda, Burkina Faso, Zambie, Mayotte.