

# DREAL LANGUEDOC ROUSSILLON

**ANCIENS SITES INDUSTRIELS ET MINIERS DE  
ST-FELIX-DE-PALLIERES, THOIRAS ET TORNAC**

**INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES**

*COMMUNES DE THOIRAS ET DE TORNAC DANS LE GARD (30)*

**Rapport : AIX 15 014 IR V1**



## Présentation de la société ICF Environnement

ICF Environnement est une société française d'ingénierie et de conseil en environnement, indépendante, créée en 1991 (Directeur Général Monsieur Gérard Marceau), et filiale du groupe IRH Environnement dont le siège social est situé au 14-30 rue Alexandre, 92635 Gennevilliers Cedex.

Acteur historique et majeur de l'environnement, spécialiste des sites et des sols pollués ainsi que des ressources en eau, ICF Environnement développe depuis plus de 20 ans son savoir-faire de conseil et de maîtrise du risque environnemental.

Plus de 100 spécialistes des sciences de la terre, de la vie et de l'ingénieur, apportent aujourd'hui leur expertise aux industriels, aux professionnels de l'immobilier et aux collectivités.

ICF Environnement s'appuie sur son réseau de 11 agences réparties sur l'ensemble du territoire national pour vous proposer toute une gamme de services à l'environnement :

- Conseil et expertise pour la maîtrise des risques environnementaux associés à vos projets immobiliers et industriels ;
- Etudes de sites nécessitant une expertise fiable dans le cadre de cession, acquisition, réaménagement de sites ayant supporté des activités potentiellement polluantes ;
- Mise en œuvre des techniques de dépollution les plus adaptées en fonction du contexte d'intervention pour le traitement des pollutions accidentelles ou chroniques, depuis la conception jusqu'aux travaux.

ICF Environnement est certifiée ISO 9001:2008, MASE et selon les normes NF X 31-620-1 à 4 de juin 2011 relatives aux prestations de services des sites et sols pollués pour les domaines A (études, assistance et contrôle), B (ingénierie des travaux de réhabilitation) et C (exécution des travaux de réhabilitation).

Système de Management de la  
Qualité certifié ISO 9001



FQA 9910144/A  
Validité 14/09/18

Entreprise certifiée  
MASE



Validité 23/10/18

Certification de service des prestataires  
dans le domaine des sites et sols pollués



SITES ET SOLS POLLUÉS  
NF X 31-620-2  
ÉTUDES, ASSISTANCE  
ET CONTRÔLE

SITES ET SOLS POLLUÉS  
NF X 31-620-3  
INGÉNIERIE DES TRAVAUX  
DE RÉHABILITATION

SITES ET SOLS POLLUÉS  
NF X 31-620-4  
EXÉCUTION DES TRAVAUX  
DE RÉHABILITATION

www.lne.fr  
Validité 20/03/16

## **Résumé non technique**

La DREAL Languedoc-Roussillon a confié au BRGM, selon les modalités de la convention n° SGR/LRO/2012/C056 du 13 mars 2012, une mission de Maîtrise d'œuvre pour la mise en œuvre d'une interprétation de l'état des milieux (IEM) sur les anciens sites miniers et industriels de St-Félix-de-Pallières et Thoiras incluant une étude documentaire et historique permettant de définir le zonage à investiguer.

Dans ce contexte, le BRGM a sélectionné ICF Environnement pour la réalisation d'un diagnostic environnemental de la zone d'étude ainsi qu'une Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM).

Le travail documentaire et historique a conduit à intégrer à l'étude des zones relevant de la commune de Tornac, en plus des deux précédemment identifiées.

Des recommandations d'investigations complémentaires ont été émises par ICF Environnement en conclusion de cette étude.

Par courrier du 19 mars 2015, La DREAL Languedoc-Roussillon a confié à ICF Environnement la réalisation d'investigations complémentaires sur le milieu sol concernant deux zones présentant des caractéristiques particulières.

Les résultats de ces investigations doivent permettre de mettre à jour l'IEM pour préciser sur les deux secteurs étudiés :

- ⇒ Si les sols permettent un maintien des usages constatés,
- ⇒ Si les sols peuvent faire l'objet d'actions simples de gestion,
- ⇒ Si les sols nécessitent la mise en œuvre d'un plan de gestion.

ICF Environnement a réalisé une campagne d'investigations (prélèvement et analyses) sur des sols superficiels des secteurs 1 et 4. Au total, 35 échantillons de sols superficiels ont été prélevés pour analyses des éléments métalliques. Au vu des résultats d'analyses des sols superficiels et des observations menées sur les différents sous-secteurs, certains échantillons ont été sélectionnés en concertation avec la DREAL LR pour réalisation d'une étude de bioaccessibilité (protocole UBM).

Les résultats des tests UBM ont permis de définir des Fractions d'Absorptions Relatives (FAR) concernant les éléments arsenic et plomb (les traceurs de l'activité minière sur ce site) au niveau des deux secteurs étudiés (1 et 4).

L'IEM sur le milieu sol a été mise à jour en tenant compte des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) actuelles et des concentrations biodisponibles en arsenic et plomb.

Les résultats de l'Interprétation de l'Etat des Milieux indiquent qu'en prenant en compte les concentrations biodisponibles des traceurs majeurs de l'activité minière (plomb et arsenic), les niveaux de risque sanitaires pour le scénario ingestion de sols et les cibles étudiés sont incompatibles avec les usages constatés :

- ⇒ quel que soit le scénario, dans deux sous-secteurs sur les trois du secteur 1 pour le plomb ;
- ⇒ pour les enfants pour le plomb dans un sous-secteur (Sud) sur les trois du secteur 4 (sauf pour le scénario moyen / teneurs moyennes en zone d'incertitude).

La discussion des résultats de cette IEM sur le milieu sol a permis de mettre en évidence les facteurs qui ont une influence sur le calcul de risques (biodisponibilité notamment choix sécuritaire des Fractions d'Absorptions Relatives (FAR), taux d'ingestion, choix des concentrations).

La prise en considération de la bioaccessibilité pour améliorer l'appréciation du risque dans la mise à jour de l'IEM a eu tendance à :

- réduire les niveaux de risque associés à l'arsenic, qui sont dorénavant en zone d'incertitude ;
- confirmer les niveaux de risque associés au plomb, notamment dans les zones d'incompatibilité.

Les niveaux de risque incompatibles observés au niveau du **secteur 1** pour le plomb nécessiteraient la mise en œuvre d'un plan de gestion pour rétablir la compatibilité entre l'état des milieux et les usages, conformément aux principes établis par la démarche d'Interprétation de l'Etat des Milieux. A ce stade, et considérant les résultats des IEM menées, les mesures de gestion qui pourraient être envisagées sur le secteur 1, sont les suivantes :

- soit une restriction d'usage (pas d'usage résidentiel, pas de jardins potagers,...) ;
- soit un réaménagement du site : excavation et remplacement, ou recouvrement, des sols contaminés par de la terre saine.

Compte-tenu des niveaux de risque en zone d'incertitude observés au niveau des 3 sous-secteurs du **secteur 4** pour le plomb (certains secteurs) et l'arsenic (ensemble des secteurs), la méthodologie IEM indique deux possibilités :

- la mise en œuvre de mesures de gestion simples supprimant toute exposition des usagers ;
- à défaut, la réalisation d'une EQRS plus approfondie. En cas d'incompatibilité d'usage à l'issue de l'EQRS, l'IEM préconise un plan de gestion.

Dans l'immédiat et sans attendre un plan de gestion ou la mise en œuvre d'une mesure de gestion appropriée (secteur 1), ainsi que d'éventuelles études sanitaires plus approfondies (**secteur 1 et 4**), et considérant la présence de résidents au droit de ces secteurs, des mesures sanitaires simples doivent être adoptées pour limiter le contact direct et indirect avec les sols :

- **pour les adultes** : éviter toute activité en extérieur impliquant un remaniement des sols (à défaut, le port de protection est recommandé), et éviter de faire participer un enfant à de telles activités, lavage soigné des mains après des activités en extérieur, éviter l'accumulation de poussières sur le sol des habitations, lavage soigné des végétaux avant consommation ;
- **pour les enfants** : limiter le contact avec la poussière et les sols du type (laver les mains des enfants avant chaque repas et leur couper les ongles courts, laver les jouets régulièrement, limiter l'entrée dans la maison des poussières extérieures (laisser les chaussures à l'entrée, nettoyer régulièrement les sols de la maison, de préférence avec une serpillière humide, choisir pour les jeunes enfants des zones de jeux enherbées plutôt que des sols nus).

## SOMMAIRE

<b>I.</b>	<b>FICHE SIGNALÉTIQUE .....</b>	<b>5</b>
<b>II.</b>	<b>ABREVIATIONS.....</b>	<b>6</b>
<b>III.</b>	<b>CONTEXTE ET ENJEUX .....</b>	<b>7</b>
<b>IV.</b>	<b>ANALYSE DE L'EXISTANT .....</b>	<b>9</b>
IV.1	DESCRIPTIF DE LA ZONE D'ÉTUDE .....	9
IV.2	ÉTUDES RÉALISÉES ET RECOMMANDATIONS.....	10
<b>V.</b>	<b>DEFINITION ET PREPARATION DE LA MISSION.....</b>	<b>12</b>
V.1	CONSISTANCE DE LA MISSION.....	12
V.2	ZONES D'ÉTUDE .....	13
V.3	DONNÉES ACQUISES PRÉCÉDEMMENT.....	16
V.4	PLANIFICATION DE L'INTERVENTION.....	16
<b>VI.</b>	<b>INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES.....</b>	<b>17</b>
VI.1	CAMPAGNE DE PRÉLEVEMENT DES SOLS DU 15/06/2015.....	17
VI.1	CAMPAGNE DE PRÉLEVEMENT DES SOLS DU 03/08/2015.....	20
<b>VII.</b>	<b>TESTS UBM EN VUE DE L'ÉVALUATION DE LA BIOACCESSIBILITÉ ORALE DE L'ARSENIC ET DU PLOMB.....</b>	<b>21</b>
<b>VIII.</b>	<b>MISE A JOUR DE L'IEM MILIEU SOL.....</b>	<b>32</b>
VIII.1	DONNÉES UTILISÉES.....	32
VIII.2	VOIE D'EXPOSITION .....	32
VIII.3	ÉVALUATION DES EXPOSITIONS.....	32
VIII.4	SELECTION DES SUBSTANCES .....	33
VIII.4.1	Critère de sélection.....	33
VIII.4.2	Teneurs retenues.....	34
VIII.5	RESULTATS .....	36
VIII.6	CONCLUSION IEM SOL .....	39
<b>IX.</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>42</b>
<b>X.</b>	<b>LIMITATIONS DU RAPPORT .....</b>	<b>44</b>

## FIGURES

Figure 1 :	Situation du secteur d'étude (Source : géoportail) .....	9
Figure 2 :	Situation des secteurs 1 et 4 de l'IEM .....	13
Figure 3 :	Localisation de la parcelle AC80 (« G »), Secteur 1, Jardin 4 .....	14
Figure 4 :	Localisation de la parcelle AC80 (« G »), Secteur 1, Jardin 4 sur photographie aérienne .....	14
Figure 5 :	Localisation des parcelles B233 et B234 (« D », « C », « W ») du Secteur 4, la Gravouillère.....	15

Figure 6 : Localisation des parcelles B233 et B234 (« D », « C », « W ») du Secteur 4, la Gravouillère sur photographie aérienne .....	15
Figure 7 : Schématisation du protocole UBM (Caboche, 2009) .....	24
Figure 8 : Grille IEM – Ingestion des sols pour les résidents du secteur 1 et 4 .....	36

## TABLEAUX

Tableau 1 : Résultats des analyses d’arsenic et plomb dans le Secteur 1, parcelle AC80 (« G ») – Campagne du 15/06/2015 .....	18
Tableau 2 : Résultats des analyses d’arsenic et plomb dans le Secteur 4 Gravouillère (parcelles B233 et B234 (« D », « C », « W »)) – Campagne du 15/06/2015 .....	19
Tableau 3 : Résultats des analyses d’arsenic et plomb dans les Secteur 1 et Secteur 4 – campagne du 03/08/2015 (concentrations totales en mg/kg) et première estimation sur la compatibilité avec une hypothèse de biodisponibilité de 30 à 50% .....	20
Tableau 4 : Résultats de bioaccessibilités absolues de l’arsenic et du plomb dans les Secteur 1 et 4 .....	25
Tableau 5 : Détermination de la Fraction d’Absorption Relatif (FAR) pour l’arsenic à partir de l’équation de corrélation <i>in vivo-in vitro</i> du test physiologique UBM .....	28
Tableau 6 : Détermination de la Fraction d’Absorption Relatif (FAR) pour le plomb à partir de l’équation de corrélation <i>in vivo-in vitro</i> du test physiologique UBM.....	28
Tableau 7 : Détermination des concentrations en arsenic biodisponible (mg/kg), par secteur et par échantillon .....	29
Tableau 8 : Détermination des concentrations en plomb biodisponible (mg/kg), par secteur et par échantillon .....	29
Tableau 9 : Paramètres retenus pour les scénarios d’ingestion de sol – Résidents .....	33
Tableau 10 : Teneurs retenues dans les sols superficiels pour la réalisation de l’IEM .....	35

## ANNEXES

Annexe 1 :	Périmètre de l’Etude et sectorisation
Annexe 2 :	Données acquises précédemment
Annexe 3 :	Plan de localisation des investigations (prélèvements des sols)
Annexe 4 :	Bulletins d’analyses du laboratoire Tableaux des résultats d’analyses des éléments métalliques analyses
Annexe 5 :	Synthèse des données toxicologiques
Annexe 6 :	Résultats des calculs d’IEM




## I. FICHE SIGNALÉTIQUE

<b>CLIENT :</b>	
➤ Raison Sociale :	<b>DREAL Languedoc-Roussillon</b>
➤ Coordonnées :	Service Risques 58, avenue Marie de Montpellier 34 000 MONTPELLIER
<b>SITE D'INTERVENTION :</b>	
➤ Raison Sociale :	Anciens sites industriels et miniers de Saint-Félix-de-Pallières / Thoiras / Tornac (30)
➤ Coordonnées :	« G » : Parcelle cadastrée AC80 du territoire communal de TORNAC (30) « D », « C », « W » : Parcelles cadastrées B233 et B234 du territoire communal de THOIRAS (30)
<b>DOCUMENT :</b>	
➤ Type :	Affaire
➤ Référence :	Rapport AIX 15 014
➤ Suivant proposition ICF :	Offre n° AIX1406PIR94YGU V1 de décembre 2014
➤ Code prestation ICF :	IR : IEM
➤ Code prestation selon les normes NF X 31-620 (2 à 4) de juin 2011 :	Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM) intégrant : A200 : Prélèvements, mesures observations et/ou analyses sur les sols A320 : Analyse des enjeux sanitaires

### REVISION

Numéro de version	Date	Observations / Modifications
V1	04/01/2016	Version finale du rapport intégrant les remarques de la DREAL LR (réunion du 03/11/2015, échange téléphonique du 07/12/2015 et mail du 22/12/2015)

### SIGNATAIRES

	Nom	Fonction	Visa
Rédaction	<b>Harry GNANA</b>	Superviseur Agence Aix-en-Provence	
Vérification	<b>Claire DABIN</b>	Superviseur Direction Technique	
Approbation	<b>Yves GUELORGET</b>	Responsable Région Sud-est	

## II. ABREVIATIONS

ARR : Analyses des Risques Résiduels	LOAEL : Lowest-Observed-Adverse-Effect-Level
ATSDR : Agency for Toxic Substances and Disease Registry	LQ : Limite de quantification
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières	MATE : Ministère de l'Aménagement, du Territoire et de l'Environnement
BTEX : Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes	MEEDDAT : Ministère de l'Energie, de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire
BW : Body Weight (Poids corporel)	MS : Matière Sèche
CE : Concentration d'Exposition	NAF : Facteur d'Atténuation Naturelle
CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer	NOAEL : No-Observed-Adverse-Effect-Level
CN : Cyanures	OEHHA : Office of Environmental Health Hazard Assessment
DJA : Dose Journalière Admissible	OHV : Composés Organo-Halogénés Volatils
DJE : Dose Journalière d'Exposition	OMS : Organisation Mondiale de la Santé
ED : Durée d'Exposition	PCB : Polychlorobiphényles
EDR : Evaluation Détaillées de Risques	RAIS : Risk Assessment Information System
EF : Fréquence d'Exposition	VTR: Valeur Toxicologique de Référence
ERI : Excès de Risque Individuel de cancer	
EQRS: Evaluation Quantitatives des Risques Sanitaires	
ERU : Excès de Risque Unitaire	
ET : Temps d'Exposition	
F : Fraction du temps d'exposition	
FAR : Fraction d'Absorption Relative	
Foc : Fraction de carbone organique	
HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	
HCT : Hydrocarbures Totaux	
IEM : Interprétation de l'Etat des Milieux	
INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques	
IR : Indice de Risque	
JE : Johnson & Ettinger (modèle)	



### III. CONTEXTE ET ENJEUX

La DREAL Languedoc-Roussillon a confié au BRGM, selon les modalités de la convention n° SGR/LRO/2012/C056 du 13 mars 2012, une mission de Maîtrise d'œuvre pour la mise en œuvre d'une interprétation de l'état des milieux (IEM) sur les anciens sites miniers et industriels de St-Félix-de-Pallières et Thoiras incluant une étude documentaire et historique permettant de définir le zonage à investiguer.

La zone d'étude comprend deux anciens sites industriels et miniers, séparés par la route départementale D133 reliant Anduze à Saint Félix de Pallières :

- dans la partie Nord, la zone des anciennes mines de la Vieille Montagne ;
- dans la Partie Sud-est, la zone de l'ancienne mine Joseph.

Dans ce contexte, le BRGM a sélectionné ICF Environnement pour la réalisation d'un diagnostic environnemental de la zone d'étude ainsi qu'une Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM) selon les enjeux qui auront été recensés et selon la norme NFX31-620 de juin 2011 relative aux prestations de services en sites et sol pollués.

Le travail documentaire et historique a conduit à intégrer à l'étude des zones relevant de la commune de Tornac, en plus des deux précédemment identifiées.

Cette étude a fait l'objet de trois rapports :

- Diagnostic environnemental – Etude historique et documentaire – recensement des usages (Phase 1 V1 – novembre 2012),
- Caractérisation de l'état des milieux – Interprétation de l'Etat des Milieux (Phase 2&3 – V1 – juin 2013)
- Campagne de caractérisation des eaux superficielles et sédiments – campagne de caractérisation complémentaire de l'air ambiant – mise à jour de l'IEM – milieu air ambiant (rapport additionnel V3 – mars 2014).

Des recommandations ont été émises par ICF Environnement en conclusion de cette étude en conclusion de cette étude.

Parmi les investigations complémentaires préconisées pour affiner les connaissances sur les milieux et les populations figurent les deux points suivants :

*"Investigations complémentaires sur le milieu sols au niveau de l'habitation/gîte du secteur 1 et certaines habitations sur le secteur 4 pour avoir plus de données et resserrer le maillage sur les habitations et non à l'échelle du secteur ;*

*Étude de spéciation géochimique par extraction séquentielle afin de rechercher la forme géochimique des molécules plomb, arsenic et cadmium et/ou une étude de bioaccessibilité afin de compléter les connaissances sur les milieux."*

La DREAL Languedoc-Roussillon a lancé une consultation en novembre 2014 portant sur la réalisation d'investigations complémentaires sur certaines parties des sites des territoires des communes de Thoiras et Tornac (30). Le cahier des charges précisait les éléments suivants :

- l'objectif des investigations sera de caractériser les zones d'impact liées aux anciennes activités minières et industrielles connexes et les voies d'exposition des populations aux polluants contenus dans les sols superficiels au niveau de l'habitation/gîte et ses alentours immédiats (secteur 1) et certaines habitations du secteur 4 (zone limitée à l'ancienne activité d'extraction de pyrite). Ces investigations devront permettre d'avoir plus de données et de resserrer au niveau des habitations le maillage d'investigation déjà réalisé lors du diagnostic environnemental ;
- une étude de bioaccessibilité sera réalisée sur les traceurs de l'activité minière (à savoir plomb et arsenic). Elle a été préférée à l'étude de spéciation pour fournir des données directement exploitables dans le cadre des évaluations de risques sanitaires ;
- l'ensemble des données acquises dans le cadre de l'étude sur le milieu sol sera intégré dans une mise à jour des grilles de calculs de l'IEM.

Par courrier du 19 mars 2015, La DREAL Languedoc-Roussillon a confié à ICF Environnement la réalisation des investigations complémentaires sur le milieu sol concernant deux zones :

- ⇒ Sur l'habitation/gîte du secteur 1 (secteur comportant l'ancienne Mine Joseph et les usages en aval du ruisseau de Paleyrolle) sur la commune de Tornac ;
- ⇒ Sur certaines habitations du secteur 4 (secteur Gravouillère et La Fabrique) sur la commune de Thoiras.

Les résultats de ces investigations doivent permettre de mettre à jour l'IEM pour préciser sur les deux secteurs étudiés :

- ⇒ Si les sols permettent le maintien des usages constatés,
- ⇒ Si les sols peuvent faire l'objet d'actions simples de gestion,
- ⇒ Si les sols nécessitent la mise en œuvre d'un plan de gestion.

## IV. ANALYSE DE L'EXISTANT

### IV.1 Descriptif de la zone d'étude

Le secteur d'étude, sur une superficie estimée à environ 4 km<sup>2</sup> (400 ha), est localisé sur les communes de St Felix-de-Pallières, de Thoiras et de Tornac dans le Gard (30). Les limites administratives des communes et la localisation de la zone d'étude sont présentées sur la figure 1 ci-dessous.



Figure 1 : Situation du secteur d'étude (Source : géoportail)

Le site d'étude prend en compte les concessions minières de La Croix de Pallières, Pallières, Gravouillère et Valleraube (ancienne mine Joseph), situées dans le département du Gard (30) à 15 km au sud-ouest d'Alès et à environ 7 km d'Anduze.

La zone d'étude inclut deux anciens sites industriels et miniers, séparés par la route départementale D133 reliant Anduze à Saint Félix de Pallières :

- dans la partie Nord, la zone des anciennes mines de la Vieille Montagne ;
- dans la Partie Sud-est, la zone de l'ancienne mine Joseph.

Le périmètre de l'étude est concerné par deux bassins versants et intègre les abords des deux ruisseaux d'Aiguesmortes et de Paleyrolle jusqu'à leur débouché (Le Gardon de Saint Jean et l'Ourne respectivement).

## IV.2 Etudes réalisées et recommandations

L'étude initiale de Diagnostic environnemental de la zone d'étude ainsi qu'une Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM) a été confiée par le BRGM à ICF Environnement. Elle a fait l'objet de trois rapports :

- Diagnostic environnemental – Etude historique et documentaire – recensement des usages (Phase 1 V1 – novembre 2012),
- Caractérisation de l'état des milieux – Interprétation de l'Etat des Milieux (Phase 2&3 – V1 – juin 2013)
- Campagne de caractérisation des eaux superficielles et sédiments – campagne de caractérisation complémentaire de l'air ambiant – mise à jour de l'IEM – milieu air ambiant (rapport additionnel V3 – mars 2014).

Les objectifs de ces études étaient les suivants :

- déterminer les teneurs des polluants existants et évaluer les risques potentiels pour l'environnement immédiat et la population environnante,
- démontrer la compatibilité des milieux avec les usages actuels, ou indiquer, si nécessaire, si la zone d'étude devrait faire l'objet de mesures simples de gestion voire d'un plan de gestion, au sens des principes de l'IEM.

Pour ce faire, la méthodologie proposée par ICF Environnement, en application de la politique nationale du Ministère en charge de l'Environnement, a consisté à :

- réaliser la synthèse des données documentaires afin de mieux cerner le contexte historique, environnemental et sociétal et réaliser un recensement des usages dans le périmètre de l'étude. Cette première étape permet d'identifier les sources potentielles de pollution, les voies de transfert et les cibles (élaboration du schéma conceptuel),
- effectuer des investigations sur site (hors dépôt UMICORE) en vue de caractériser les milieux d'exposition et déterminer l'impact sur ces différents milieux (sols, eaux souterraines, eaux superficielles, denrées alimentaires, air) et ainsi recueillir les données nécessaires à la réalisation de l'IEM,
- conduire une Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM) afin de s'assurer que l'état des milieux est compatible, ou non, avec les usages constatés.

Pour une meilleure compréhension de l'étude et de l'identification des enjeux, le périmètre d'étude a été sectorisé de la façon suivante :

- le secteur de l'ancienne Mine Joseph et les usages en aval du ruisseau de Paleyrolle (**secteur 1**) à usage promeneurs avec présence de haldes en bordure du ruisseau de Paleyrolle au niveau de l'ancienne mine Joseph et, à usage d'habitations et captage d'Alimentation en Eau Potable à proximité immédiate des ruisseaux de Paleyrolle et de l'Ourne ;
- le secteur riverain au Sud des anciennes mines et installations de la Vieille Montagne (**secteur 2**), usage d'habitations, intégrant également les hameaux de Coumassas, l'Issart, Les Patus, les Marchands et une partie du Mas ;
- le secteur des anciennes mines et installations de la Vieille Montagne (**secteur 3**), couvrant l'ensemble des anciennes activités de surface et une partie des activités souterraines de la concession minière - actuellement, dans la partie nord, à usage promeneurs (GR et PR), manifestations festives et habitations mobiles face au dépôt

de résidus de laverie sur des haldes de produits d'extraction et dans la partie sud, vers le puits n°1 à usage de promeneurs et terrain de moto-cross. Ce secteur comprend également le dépôt de résidus de laverie réhabilité par UMICORE ;

- le secteur Gravouillère et La Fabrique (**secteur 4**) : à usage promeneurs, habitations éparses et des parcelles utilisées en jardin expérimental (greffe des arbres fruitiers) ;
- le secteur du hameau de Pallières et les usages en aval du ruisseau Aiguesmortes jusqu'au Gardon de Saint Jean (**secteur 5**) : hameau de Pallières à usage d'habitations – identification d'une carrière de dolomie actuellement exploitée, à proximité du ruisseau Aiguesmortes et présence de promeneurs.

Le périmètre d'étude et sa sectorisation est présentée sur un extrait de photographie aérienne récente en Annexe 1.

Des recommandations ont été émises par ICF Environnement en conclusion de cette étude.

Parmi les investigations complémentaires préconisées pour affiner les connaissances sur les milieux et les populations figuraient les deux points suivants :

*"Investigations complémentaires sur le milieu sols **au niveau de l'habitation/gîte du secteur 1 et certaines habitations sur le secteur 4** pour avoir plus de données et resserrer le maillage sur les habitations et non à l'échelle du secteur ;*

*Étude de spéciation géochimique par extraction séquentielle afin de rechercher la forme géochimique des molécules plomb, arsenic et cadmium et/ou une étude de bioaccessibilité afin de compléter les connaissances sur les milieux."*

## V. DEFINITION ET PREPARATION DE LA MISSION

### V.1 Consistance de la mission

Les investigations complémentaires préconisées sur le milieu sols consistent à réaliser des prélèvements et analyses de sols de surface au niveau des zones d'exposition (habitations, sentiers, jardins) du secteur 1 et du secteur 4 afin de préciser les concentrations totales en métaux rencontrés à proximité des habitations.

Les investigations complémentaires, qui ont été préconisées sur le milieu « sols » au niveau de l'habitation/gîte du secteur 1 et de certaines habitations du secteur 4, ont pour objectif de préciser les concentrations en métaux rencontrés à proximité des habitations. L'étude de bioaccessibilité, réalisée dans un second temps sur des échantillons sélectionnés, a pour objectif d'approfondir, sur ces zones, **les calculs des expositions et des niveaux de risque et *in fine* de proposer les modalités de gestion optimales.**

Selon la bibliographie et le retour d'expérience d'ICF Environnement, les valeurs de bioaccessibilité pourraient être comprises entre 30 et 50% pour l'arsenic et le plomb.

Une simulation pour la voie d'exposition par ingestion de particules de sol, établie avec les grilles de calculs de l'outil IEM sur la base de ces ratios de bioaccessibilité estimés, indique des niveaux de risque dans la zone d'incompatibilité (même en tenant compte de la bioaccessibilité) pour des valeurs de concentrations de l'ordre de 200 à 300 mg/kg pour l'arsenic, et 900 à 1350 mg/kg pour le plomb :

	Compatible (C) QD < 0,2 ERI < 1 10 <sup>-6</sup>	Zone d'incertitude (ZI) QD : 0,2 à 5 ERI : 1 10 <sup>-6</sup> à 1 10 <sup>-4</sup>	Incompatibilité (INC) QD > 5 ERI > 1 10 <sup>-4</sup>
As	< 2-3 mg/kg	2-3 mg/kg à 200-300 mg/kg	> 200-300 mg/kg
Pb	< 36-54 mg/kg	36-54 mg/kg à 900-1350 mg/kg	> 900-1350 mg/kg

Ainsi, il est intéressant d'utiliser la notion de bioaccessibilité pour améliorer l'appréciation du risque dans les secteurs d'exposition où l'introduction d'un facteur de 30 à 50 % permettra de modifier l'acceptabilité du risque. C'est pourquoi les échantillons sélectionnés pour les tests doivent être réalisés préférentiellement :

- sur des échantillons correspondant à des zones présentant des expositions significatives (fréquence régulière, terrasse d'habitation pérenne, aire de jeux, potagers...);
- sur des échantillons présentant des concentrations en arsenic et plomb inférieures aux seuils d'incompatibilité (200 à 300 mg/kg pour l'arsenic et 900 à 1350 mg/kg pour le plomb).

Les résultats d'analyses des sols superficiels ont été catégorisés sur la base de ces éléments, qui a permis la sélection des échantillons pour les tests UBM.

## V.2 Zones d'étude

Les deux zones investiguées dans le cadre de la présente étude sont présentées ci-après :

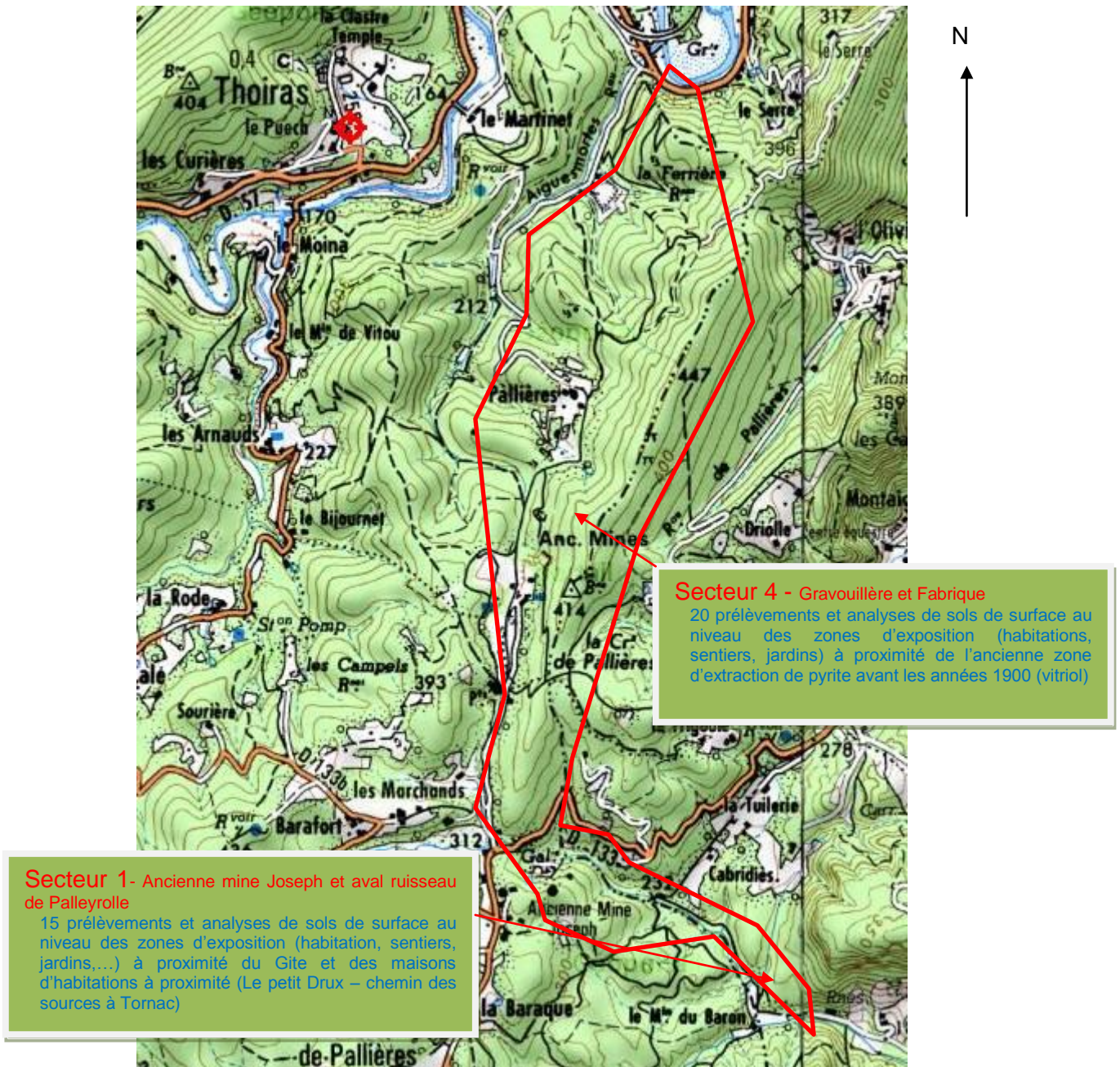


Figure 2 : Situation des secteurs 1 et 4 de l'IEM

### Habitation/Gîte du secteur 1 - Ancienne mine Joseph et aval ruisseau de Palleyrolle

L'habitation / gîte du secteur 1 (Ancienne mine Joseph et aval du ruisseau de Palleyrolle) concerne la parcelle cadastrée AC80 du territoire communal de Tornac :

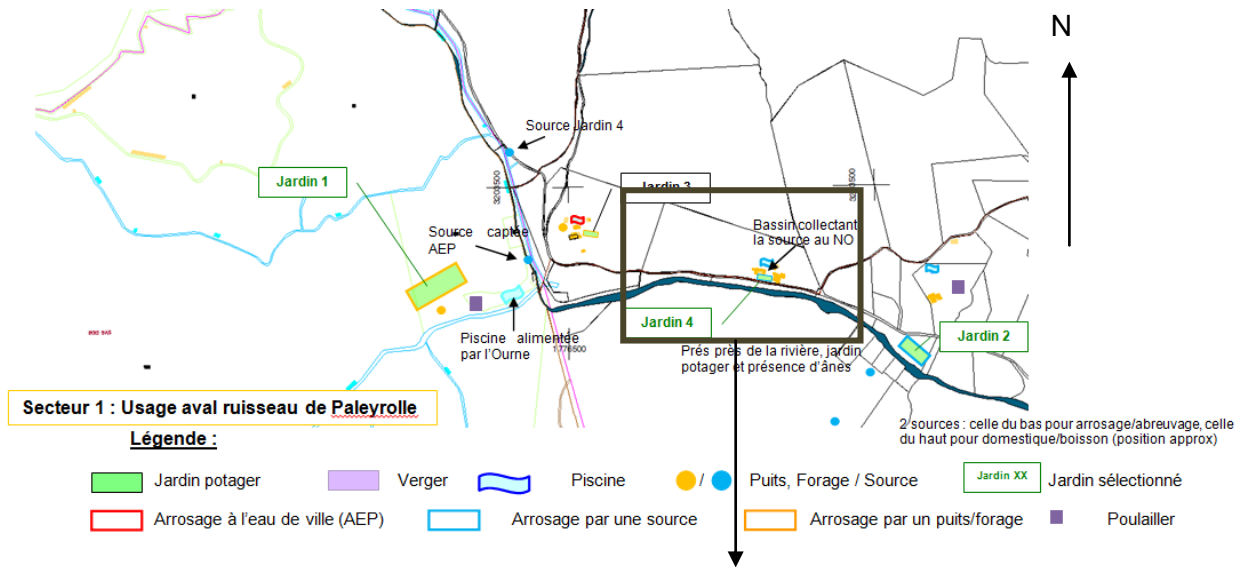


Figure 3 : Localisation de la parcelle AC80 (« G »), Secteur 1, Jardin 4

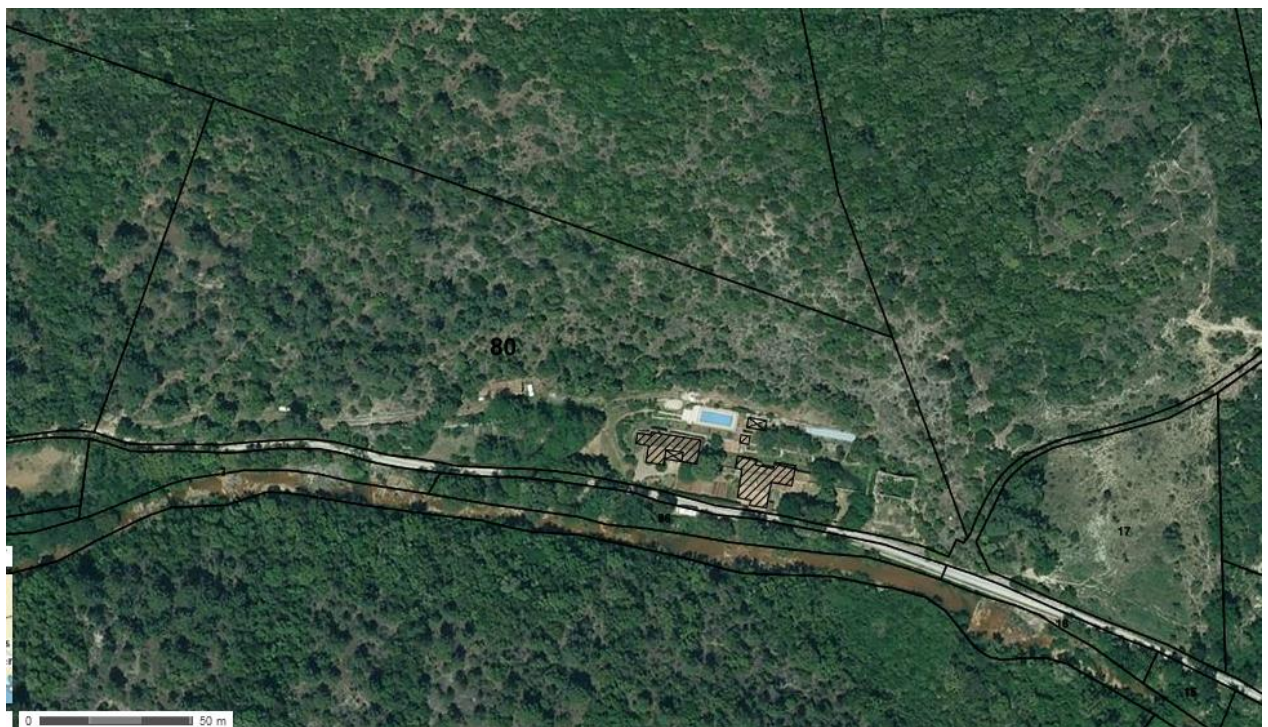


Figure 4 : Localisation de la parcelle AC80 (« G »), Secteur 1, Jardin 4 sur photographie aérienne



### Habitations du secteur 4 - Gravouillère et Fabrique

Les habitations du secteur 4 (Gravouillère et Fabrique) sont localisées sur les parcelles cadastrées B233 et B234 du territoire communal de Thoiras :

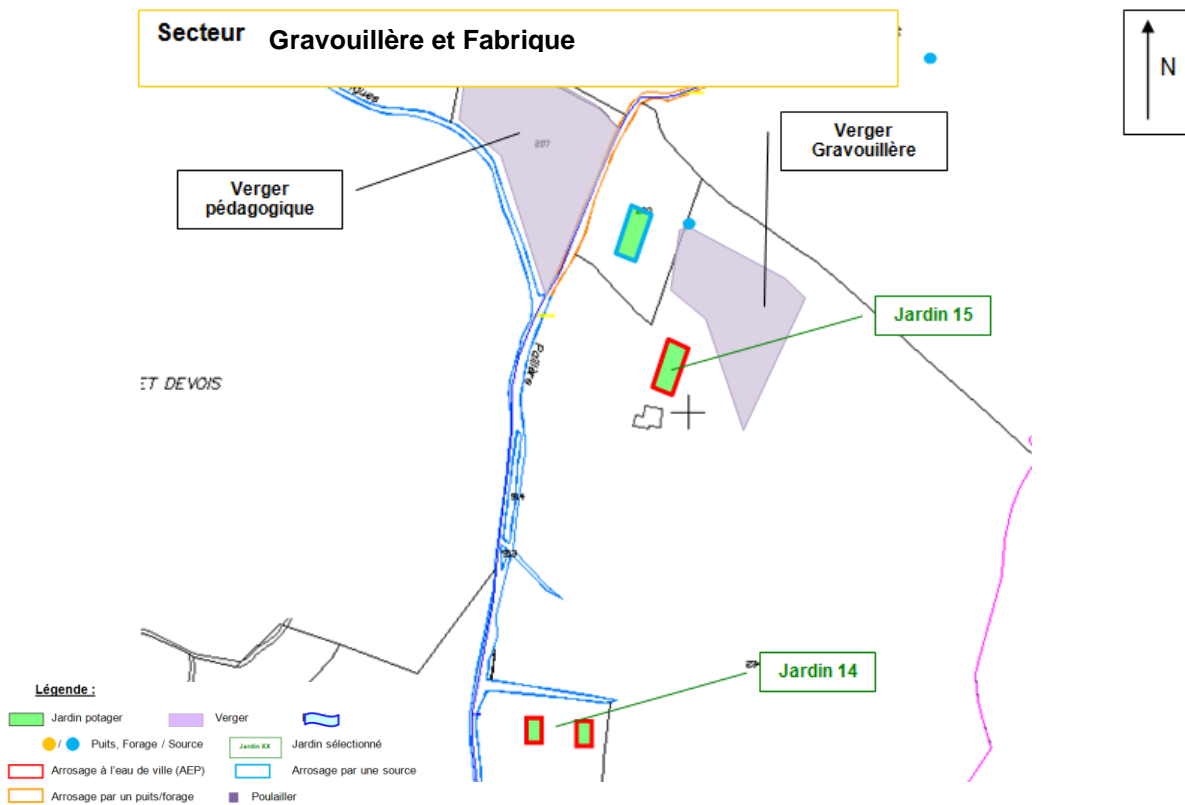


Figure 5 : Localisation des parcelles B233 et B234 (« D », « C », « W ») du Secteur 4, la Gravouillère

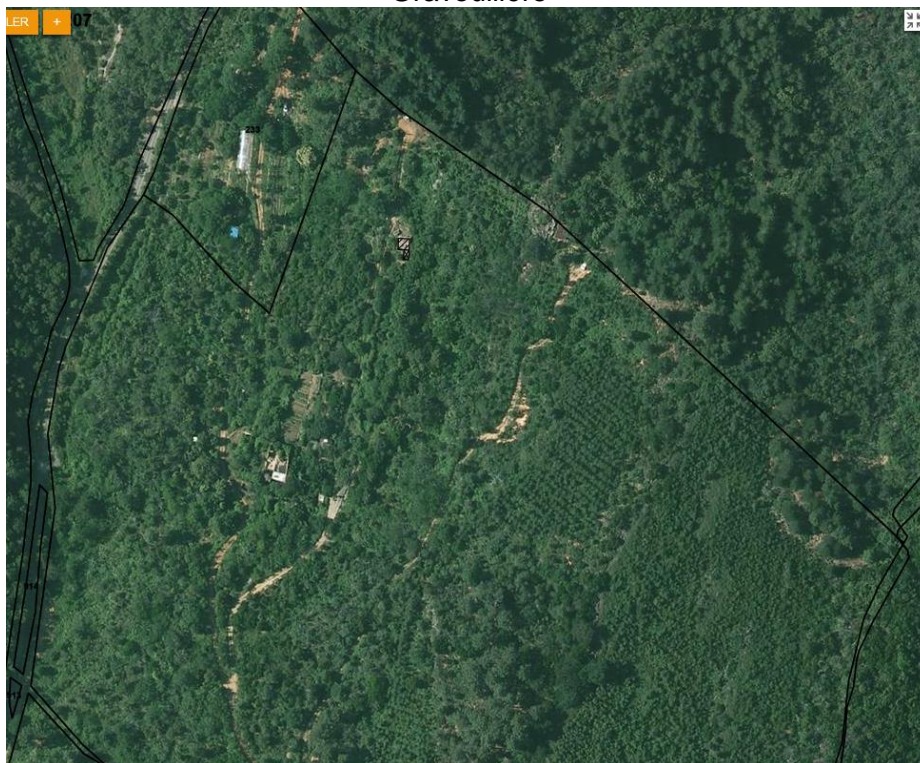


Figure 6 : Localisation des parcelles B233 et B234 (« D », « C », « W ») du Secteur 4, la Gravouillère sur photographie aérienne

### **V.3 Données acquises précédemment**

Les résultats cartographiques des données acquises précédemment sur les sols lors de la caractérisation de l'état des milieux (Annexe 6 du Diagnostic environnemental, IEM rapport phase 2&3 d'ICF Environnement AIX 12 085 IR V1 de juin 2013) sont présentés par secteur en Annexe 2.

### **V.4 Planification de l'intervention**

La planification de l'intervention a été réalisée en deux temps :

- ➔ Demande d'autorisation effectuée par la DREAL Languedoc Roussillon : accord donné par les propriétaires pour la réalisation des investigations complémentaires ;
- ➔ Prise de contact par ICF Environnement pour planifier les interventions (deux campagnes de prélèvement des sols de surface).

Préalablement aux prélèvements, la DREAL Languedoc Roussillon a informé les Maires de Tornac et Thoiras de la réalisation par ICF Environnement d'investigations complémentaires sur les propriétés concernées.

## VI. INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES

### VI.1 Campagne de prélèvement des sols du 15/06/2015

Les investigations réalisées par le personnel d'ICF Environnement le 15/06/2015 ont consisté aux opérations suivantes :

- repérage des zones par rapport aux données précédemment acquises ;
- élaboration d'un plan prévisionnel d'implantation des investigations par ICF Environnement, soumis à l'approbation de la DREAL ;
- acquisition de données auprès des propriétaires des terrains (usage, historique le cas échéant, localisation des aires de jeux, jardin potager, arbres fruitiers...) ;
- réalisation de la première campagne de prélèvements de sols de surface à l'aide de truelle (0-5 cm) ou tarière manuelle (0-50 cm, cas des potagers) pour constitution d'échantillons composites (5 prélèvements unitaires pour confection d'un échantillon composite) :
  - Secteur 1 : échantillon composite S1-1 à S1-15 ;
  - Secteur 4 : échantillon composite S4-1 à S4-20.

Au vu des informations récoltées sur site et observations effectuées, chaque secteur a été divisé en trois sous-secteurs :

- secteur 1 : zone haute, zone basse, zone latérale ;
- secteur 4 : zone Nord, zone Nord Est, zone Sud.

Les plans de localisation des prélèvements unitaires des sols figurant les épaisseurs de terrains prélevés, les coordonnées Lambert RGF 93 des centres des zones ainsi que les photographies sont présentés en Annexe 3.

Les échantillons prélevés ont été placés dans du flaconnage en verre et placés dans des glacières jusqu'au laboratoire d'analyse. Sur chaque échantillon, les analyses suivantes ont été réalisées : Hg, Sb, As, Ba, Pb, Cd, Cr, Fe, Cu, Mn, Ni, Se, Zn, Tl

Toutes les analyses ont été réalisées par le laboratoire Eurofins, accrédité/reconnu par le COFRAC.

Les résultats d'analyses des éléments plomb et arsenic (traceurs de l'activité minière) sont présentés dans les tableaux suivants. Les résultats d'analyses des autres éléments métalliques et les bordereaux d'analyses sont présentés en Annexe 4.

		S1 - 1	S1 - 2	S1 - 3	S1 - 4	S1 - 5
<b>Secteur 1 _ Sous-secteur HAUT</b>						
Fréquentation		Ponctuelle (ADULTES RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTES SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)
Tests	Unités					
Arsenic (As)	mg/kg MS	298	404	218	376	460
Plomb (Pb)	mg/kg MS	95100	61200	27400	89200	85900

		S1 - 7	S1 - 8	S1 - 9	S1 - 11	S1 - 12	S1 - 13	S1 - 14	S1 - 15
<b>Secteur 1 _ Sous-secteur BAS</b>									
Fréquentation		A l'année (aire de jeux) (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (potager) (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (potager) (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)
Tests	Unités								
Arsenic (As)	mg/kg MS	331	303	413	271	763	221	204	721
Plomb (Pb)	mg/kg MS	9980	31800	9510	15200	91500	11300	9120	31900

		S1 - 6	S1 - 10
<b>Secteur 1 _ Sous-secteur Latéral</b>			
Fréquentation		A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)
Tests	Unités		
Arsenic (As)	mg/kg MS	161	111
Plomb (Pb)	mg/kg MS	1600	698

Tableau 1 : Résultats des analyses d'arsenic et plomb dans le Secteur 1, parcelle AC80 (« G ») – Campagne du 15/06/2015

		S4 - 1	S4 - 2	S4 - 3	S4 - 4	S4 - 6	S4 - 7	S4 - 8	S4 - 11
<b>Secteur 4 _ Sous-secteur NORD</b>									
Fréquentation		A l'année ADULTE (terrasse)	A l'année ADULTE (chemin d'accès à l'habitation)	A l'année ADULTE (zone de parking)	Temporaire ADULTE (serre)	A l'année ADULTE Projet de futur potager	Temporaire ADULTE (habitation)	A l'année ADULTE (chemin)	A l'année ADULTE (chemin)
Tests	Unités								
Arsenic (As)	mg/kg MS	467	210	160	151	179	209	241	187
Plomb (Pb)	mg/kg MS	723	644	1130	566	707	871	1110	472

		S4 - 5	S4 - 9	S4 - 10	S4 - 12
<b>Secteur 4 _ Sous-secteur NORD EST</b>					
Fréquentation		Temporaire ADULTE (chemin)	A l'année ADULTE (chemin)	A l'année ADULTE (Terrasse)	Temporaire ADULTE (terrasse)
Tests	Unités				
Arsenic (As)	mg/kg MS	268	221	91,9	30
Plomb (Pb)	mg/kg MS	430	379	294	73,5

		S4 - 13	S4 - 14	S4 - 15	S4 - 16	S4 - 17	S4 - 18	S4 - 19	S4 - 20
<b>Secteur 4 _ Sous-secteur SUD</b>									
Fréquentation		Temporaire ADULTE et ENFANTS (terrasse)	A l'année ADULTE (Potagers)	A l'année ADULTE (vergers)	A l'année ADULTE (Potagers)	A l'année ADULTE Temporairement ENFANT (stockage extérieur)	A l'année ADULTE (vergers)	A l'année ADULTE Temporairement ENFANT (terrasse)	Temporaire ADULTE (terrasse)
Tests	Unités								
Arsenic (As)	mg/kg MS	269	223	235	232	252	236	378	257
Plomb (Pb)	mg/kg MS	3300	1810	4390	1950	837	4350	1280	929

Tableau 2 : Résultats des analyses d'arsenic et plomb dans le Secteur 4 Gravouillère (parcelles B233 et B234 (« D », « C », « W »)) – Campagne du 15/06/2015

## VI.1 Campagne de prélèvement des sols du 03/08/2015

La mesure de la bioaccessibilité a été réalisée pour améliorer l'appréciation du risque dans les secteurs d'exposition où l'introduction d'un facteur de 30 à 50 % pourrait permettre de modifier l'acceptabilité du risque, soit préférentiellement :

- sur des échantillons correspondant à des zones présentant des expositions significatives (fréquence régulière, terrasse d'habitation pérenne, aire de jeux, potagers...);
- sur des échantillons présentant des concentrations en arsenic et plomb inférieures aux seuils d'incompatibilité (200 à 300 mg/kg pour l'arsenic et 900 à 1350 mg/kg pour le plomb).

La sélection des échantillons retenus pour les tests de bioaccessibilité a été discutée avec la DREAL LR sur la base d'une première simulation établie avec les grilles de calculs de l'IEM pour la voie d'exposition par ingestion de particule de sols, et sur la base de ratio de bioaccessibilité estimés (cf. V.1). Les échantillons sélectionnés sont les suivants :

- secteur 1 : S1-3 / S1-14 (potager "W") / S1-10
- secteur 4 : S4-2 (chemin "D") / S4-9 (chemin "C") / S4-17

Une seconde campagne d'investigation a été réalisée par ICF Environnement le 03/08/2015 pour réaliser les prélèvements correspondant aux échantillons sélectionnés. Cette campagne a été réalisée selon le protocole suivi précédemment lors de la première campagne (moyens matériels, flaconnage, emplacements des sondages unitaires et confection des échantillons composites).

Secteur 1		S1 - 3		S1 - 14		S1 - 10	
Fréquentation		A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)		A l'année (potager) (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)		A l'année (ADULTE RESIDENT) Temporaire (ENFANTS ET ADULTE SEJOURNANT DANS LE GITE)	
Tests	Unités	15/06/2015	03/08/2015	15/06/2015	03/08/2015	15/06/2015	03/08/2015
Arsenic (As)	mg/kg MS	218	156	204	206	111	94,6
Plomb (Pb)	mg/kg MS	27400	22 100	9120	11200	698	1020

Secteur 4		S4 - 2		S4 - 9		S4 - 17	
Fréquentation		A l'année ADULTE (chemin d'accès à l'habitation)		A l'année ADULTE (chemin)		A l'année ADULTE Temporairement ENFANT (stockage extérieur)	
Tests	Unités	15/06/2015	03/08/2015	15/06/2015	03/08/2015	15/06/2015	03/08/2015
Arsenic (As)	mg/kg MS	210	227	221	141	252	270
Plomb (Pb)	mg/kg MS	644	453	379	385	837	904

	Compatible (C)	Zone d'incertitude (ZI)	Incompatibilité (INC)
As	< 2-3 mg/kg	2-3 mg/kg à 200-300 mg/kg	> 200-300 mg/kg
Pb	< 36-54 mg/kg	36-54 mg/kg à 900-1350 mg/kg	> 900-1350 mg/kg

**Tableau 3 : Résultats des analyses d'arsenic et plomb dans les Secteur 1 et Secteur 4 – campagne du 03/08/2015 (concentrations totales en mg/kg) et première estimation sur la compatibilité avec une hypothèse de biodisponibilité de 30 à 50%**

## VII. TESTS UBM EN VUE DE L'EVALUATION DE LA BIOACCESSIBILITE ORALE DE L'ARSENIC ET DU PLOMB

### VII.1 CONTEXTE / OBJECTIF

Dans le cadre de la gestion des sols pollués, une des voies d'exposition étudiée est l'ingestion de sol. Actuellement, les évaluations de risque sanitaire considèrent, dans un premier temps, de façon sécuritaire, que la totalité d'une substance présente dans un sol ingéré par un individu, atteindra ses organes cibles et générera un effet toxique.

Or, seule une fraction de la quantité ingérée atteint réellement la circulation sanguine (notion de biodisponibilité) et les organes cibles. Ainsi, un facteur correctif pourrait être mis en œuvre dans le calcul de la dose d'exposition afin de tenir compte des propriétés spécifiques de la matrice sol étudiée, au regard de celles de la matrice de référence utilisée dans l'étude toxicologique (associée à la VTR).

Des travaux de recherche ont été menés afin d'approcher la valeur de biodisponibilité par des tests *in vitro* de bioaccessibilité, moins coûteux à mettre en place que les tests *in vivo* de biodisponibilité. La bioaccessibilité correspond à la fraction de la quantité ingérée qui, après dissolution, est disponible à l'absorption.

Des données bibliographiques de biodisponibilité/bioaccessibilité sont aussi disponibles pour certains contaminants. Toutefois, pour un même polluant, les biodisponibilités et bioaccessibilités sont dépendantes d'autres paramètres (nature du sol, origine de la contamination, spéciation pour les éléments inorganiques). Ceci renforce le besoin de disposer de valeurs spécifiques au site étudié.

Le test élaboré par le groupe européen BARGE (Bioaccessibility Research Group of Europe) : UBM (Unified Barge Method) constitue un des essais de bioaccessibilité développés dans le but de mimer les conditions physiologiques d'ingestion de sol. Il est issu d'un effort de consensus pour l'élaboration d'un test unique. Il est basé sur le test précédemment développé par le RIVM (Institut National pour la Santé Publique et l'Environnement aux Pays Bas), celui-ci ayant été considéré comme le plus représentatif des conditions physiologiques dans le tractus gastro-intestinal de l'enfant (Oomen, *et al.*, 2003<sup>1</sup>).

Au cours de sa thèse, Caboche (2009<sup>2</sup>) a corrélé cet essai UBM à des données de biodisponibilité *in vivo* (modèle porc) pour les trois éléments suivants : Plomb, Arsenic et Cadmium.

Dans ce contexte et afin d'estimer de manière plus fine le risque sanitaire lié à l'ingestion d'arsenic et de plomb dans les sols superficiels des secteurs étudiés, des tests de détermination de la bioaccessibilité de l'arsenic et du plomb ont été réalisés, selon le protocole UBM du groupe BARGE, dans 6 échantillons de sols superficiels contaminés en arsenic et en plomb (3 par secteur).

<sup>1</sup> Oomen, A.G. *et al.* Development of an *in vitro* digestion model for estimating the bioaccessibility of soil contaminants. Arch. Environ. Contam. Toxicol 44, 281-287 (2003).

<sup>2</sup> Caboche J. 2009. Validation d'un test de mesure de bioaccessibilité. Application à quatre éléments traces métallique dans les sols: As,Cd, Pb et Sb. Science Agronomique. PhD. L'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 2009, pp. 348.

Les tests UBM ont été réalisés au sein du laboratoire EUROFINES EXPERTISES ENVIRONNEMENTALES à Maxéville (54). Le protocole décrit a été fourni par le laboratoire en charge des analyses (cf Annexe 4).

## VII.2 PROTOCOLE / ANALYSES

### **Rappel des notions de biodisponibilité et bioaccessibilité**

La fraction bioaccessible, ou bioaccessibilité orale *absolue* d'un polluant présent dans une matrice (ex : nourriture, sol, eau etc.), est définie comme la fraction de ce polluant qui est extraite de cette matrice, et mise en solution par la salive et par les fluides digestifs, dans le tractus gastro-intestinal.

La fraction biodisponible, ou biodisponibilité orale *absolue* d'un polluant présent dans une matrice (ex : nourriture, sol, eau etc.), est la fraction de ce polluant qui atteint la circulation sanguine (circulation systémique).

Ainsi, la biodisponibilité résulte de trois phénomènes successifs :

- ❑ la dissolution de la substance dans la salive, les sucs stomacaux et intestinaux (correspondant à la fraction bioaccessible),
- ❑ l'absorption à travers l'épithélium intestinal,
- ❑ la métabolisation hépatique.

Les essais de bioaccessibilité ont pour objectif de mimer la première étape, soit la dissolution de la substance étudiée dans le tractus digestif.

### **Principe d'un test de bioaccessibilité**

Le principe des tests de bioaccessibilité *in vitro* est de mimer les conditions physiologiques se déroulant dans le corps humain, en particulier chez les enfants considérés comme la population potentiellement la plus exposée, lors de l'ingestion de sols contaminés et des processus digestifs.

Le sol potentiellement contaminé, après préparation est mis en contact avec des solutions digestives représentatives des différents segments (salive, estomac, intestin), aux pH physiologiques et sous agitation à 37°C.

Le test UBM simule des conditions à *jeun*, souvent reconnues, comme les plus conservatoires pour l'étude de la bioaccessibilité des éléments inorganiques (dissolution plus importante aux pH plus faibles rencontrés à *jeun*)<sup>3</sup>.

Au cours du test, des échantillons sont prélevés après les différentes étapes de digestion mises en œuvre (sauf après la phase salivaire) afin d'évaluer une bioaccessibilité stomacale (ou gastrique) et une bioaccessibilité intestinale (ou gastro-intestinale).

Les extraits ainsi obtenus sont analysés selon des méthodes adéquates. Les résultats issus des tests *in vitro* sont exprimés comme étant la fraction bioaccessible (FAB) en % selon l'équation :

<sup>3</sup> A noter que toutefois, des bioaccessibilités plus élevées ont été observées en présence de nourriture, y compris pour des contaminants inorganiques (RECORD, 2011)



$$\text{FAB (\%)} = ([\text{Elément}] \text{ bioaccessible} / [\text{Elément}] \text{ total}) \times 100$$

*[Elément] bioaccessible = concentration en élément ou substance extraite après la phase stomacale ou intestinale*

*[Elément] total = concentration en élément ou substance présente initialement dans le sol (mesurée selon méthodes analytiques classiquement employées)*

Les concentrations en élément ou substance bioaccessibles sont exprimées en mg/kg ou µg/kg de matières sèches (MS).

A noter que ces essais permettent de déterminer la bioaccessibilité absolue des contaminants dans une matrice donnée. Des bioaccessibilités relatives peuvent ensuite être calculées en référence, par exemple, à un autre sol (sol témoin) ou une autre matrice (ex : matrice de référence utilisée dans des essais de biodisponibilité in vivo et/ou celle utilisée pour déterminer la valeur toxicologique de référence)<sup>4</sup>.

### **Protocole UBM**

Deux sous-échantillons sont constitués et traités afin de déterminer la bioaccessibilité gastrique et la bioaccessibilité gastro-intestinale.

Pour chaque phase, des duplicats (des échantillons, blancs, sols et formes de référence) sont réalisés.

La réalisation du protocole UBM pour sol(s) et forme de référence permet de s'assurer du bon déroulement de la procédure.

Le sol de référence utilisé dans la présente étude est le sol « BGS 102 » du British Geological Survey, pour lequel il existe des valeurs certifiées.

Euofins Expertises Environnementales a mis en œuvre ce protocole, sans ajout d'aliment, pour :

- les 6 échantillons de sols prélevés par ICF Environnement,
- le sol de référence,
- 1 forme de référence,
- des blancs.

Pour chaque phase, des duplicats (des échantillons, blancs, sols et formes de référence) ont été réalisés (conformément à ce qui est préconisé dans le protocole du groupe BARGE).

La réalisation du protocole UBM pour sol(s) et forme de référence permet de s'assurer du bon déroulement de la procédure.

Les sols de référence sont des sols contaminés dont on connaît les teneurs totales en éléments étudiés (ici l'arsenic et le plomb) (les concentrations étant certifiées) et, qui ont été utilisés dans le cadre de travaux sur la bioaccessibilité.

Une forme de référence est une forme choisie pour être totalement bioaccessible, c'est-à-dire disponible à l'absorption. En plus de vérifier que la procédure se déroule correctement, le résultat de la bioaccessibilité *absolue* de la matrice de référence permet de déterminer une bioaccessibilité *relative* pour une matrice donnée (= Bioaccessibilité

<sup>4</sup> RECORD, 2011.

matrice/bioaccessibilité forme de référence). Ceci permet d'éviter tout biais d'interprétation pour comparer des données de biodisponibilités et bioaccessibilités relatives (Caboche, 2009).

La forme de référence employée pour l'arsenic est l'arséniate de sodium.

La forme de référence employée pour le plomb est l'Acétate de plomb.

Enfin un blanc (en duplicat) par série analytique et par phase sera également étudié (ajout des solutions digestives sans sol) afin de vérifier l'absence de contamination de la verrerie notamment.

Au préalable, le sol sera préparé : séchage à une température inférieure à 40°C, tamisage à 2 mm puis broyage à 250 µm.

La teneur totale en arsenic et en plomb est également mesurée par échantillon.

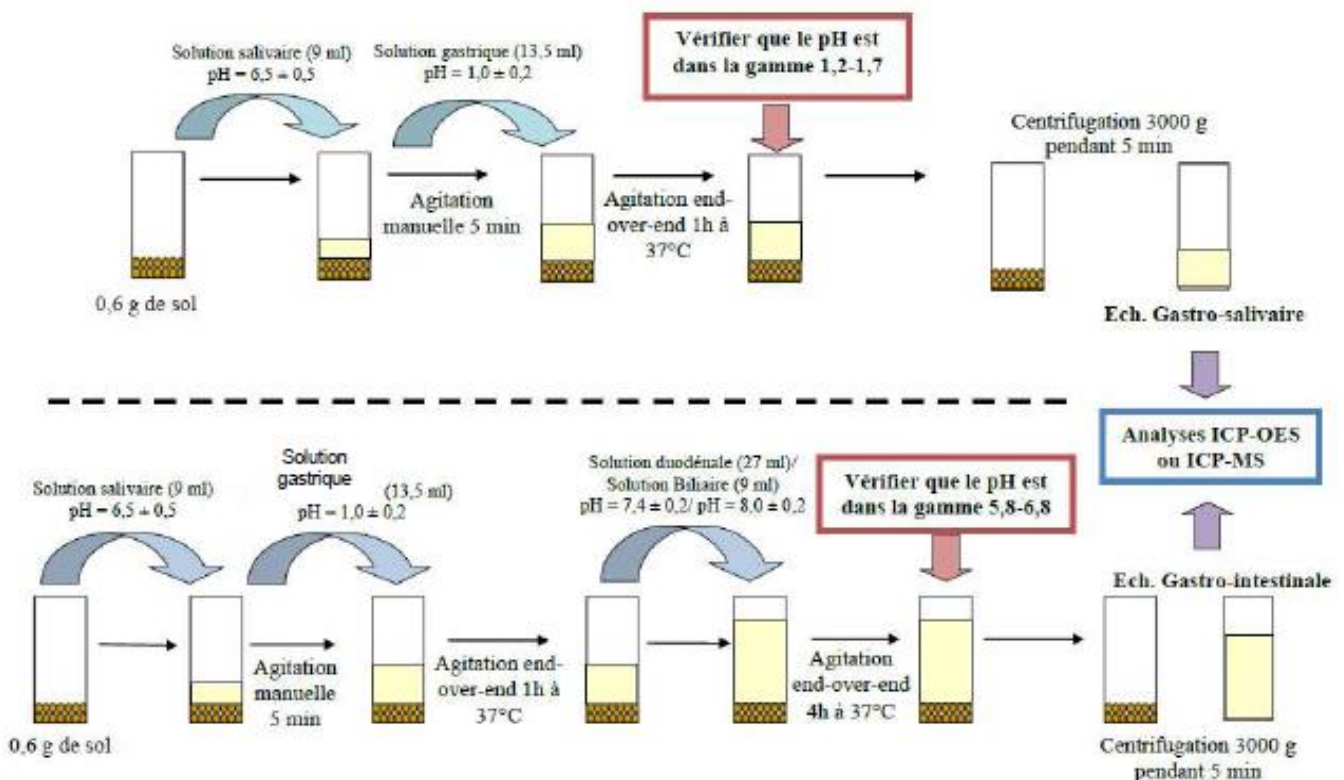


Figure 7 : Schématisation du protocole UBM (Caboche, 2009)

### VII.3 RESULTATS DES TESTS UBM

L'ensemble des contrôles qualités des essais sont satisfaisants. Les bulletins d'analyses du laboratoire sont présentés en Annexe 4.

Les résultats de bioaccessibilité de l'arsenic et du plomb dans les échantillons de sols sont présentés ci-après par secteur :

	Secteur 1				Secteur 4				
	Echantillons	Compartiment	Teneur totale (mg/kg MS)	Bioaccessibilité totale mesurée exprimée en %	Echantillons	Compartiment	Teneur totale (mg/kg MS)	Bioaccessibilité totale mesurée exprimée en %	
<b>Résultats de bioaccessibilité de l'arsenic</b>	S1-3 / 15E052588-001 / 15G006330-001	Gastro – Intestinal	156	5.1 %	S4-2 / 15 <sup>E</sup> 052588-004 / 15G006330-004	Gastro – Intestinal	227	3.1 %	
		Gastrique		9.6 %		Gastrique		2.8 %	
	S1-10 / 15E052588-002 / 15G006330-002	Gastro – Intestinal	94.6	8.5 %	S4-9 / 15 <sup>E</sup> 052588-005 / 15G006330-005	Gastro – Intestinal	141	7.0 %	
		Gastrique		13.3 %		Gastrique		6.2 %	
	S1-14 / 15E052588-003 / 15G006330-003	Gastro – Intestinal	206	4.6 %	S4-17 / 15 <sup>E</sup> 052588-006 / 15G006330-006	Gastro – Intestinal	270	8.8 %	
		Gastrique		8.5 %		Gastrique		9.6 %	
	<b>Résultats de bioaccessibilité du plomb</b>	S1-3 / 15E052588-001 / 15G006330-001	Gastro – Intestinal	22100	0.3 %	S4-2 / 15 <sup>E</sup> 052588-004 / 15G006330-004	Gastro – Intestinal	453	7.0 %
			Gastrique		61.8 %		Gastrique		32.5 %
S1-10 / 15E052588-002 / 15G006330-002		Gastro – Intestinal	1020	0.5 %	S4-9 / 15 <sup>E</sup> 052588-005 / 15G006330-005	Gastro – Intestinal	385	12.1 %	
		Gastrique		76.2 %		Gastrique		41.1 %	
S1-14 / 15E052588-003 / 15G006330-003		Gastro – Intestinal	11200	0.4 %	S4-17 / 15 <sup>E</sup> 052588-006 / 15G006330-006	Gastro – Intestinal	904	14.8 %	
		Gastrique		51.4 %		Gastrique		41.3 %	

Tableau 4 : Résultats de bioaccessibilités absolues de l'arsenic et du plomb dans les Secteur 1 et 4

## VII.4 INTERPRETATION DES TESTS UBM

Le test UBM a été retenu car il est le seul bénéficiant d'un protocole harmonisé au niveau européen. Ce test a par ailleurs été validé *in vivo*. De cette validation, a été générée une équation de corrélation *in vivo-in vitro* démontrant la bonne représentativité physiologique du test, la robustesse de cette corrélation, ainsi que la reproductibilité et la répétabilité du test.

Ces équations de corrélation *in vivo-in vitro* permettent d'estimer la fraction biodisponible *in vivo* (BDrel) à partir de la fraction bioaccessible mesurée *in vitro* (BAc). La biodisponibilité estimée est *relative* car issue d'une étude de corrélation menée, d'une part, sur des sols, et d'autre part, sur une matrice de référence.

Par ailleurs, le facteur correctif, appelé **Fraction d'Absorption Relatif ou FAR**, à intégrer dans les calculs de risque, est celui mettant en relation la matrice sol étudiée avec la matrice de référence de l'étude toxicologique associée à la VTR.

**Dans le cas de l'arsenic**, la matrice de référence utilisée dans les études de corrélation *in vivo-in vitro*, et celle utilisée dans les études toxicologiques sont similaires (respectivement, solution et eaux de boisson), de même que les modèles expérimentaux (respectivement, porcine et humaine). Ainsi, le FAR peut être estimé à partir de l'équation de corrélation *in vivo-in vitro* du test physiologique UBM. Plusieurs équations de corrélation *in vivo-in vitro* existent dans la littérature scientifique :

- Equation de J. Caboche<sup>5</sup> :
  - o  $BDrel (\%) = BAc (\%) + 0,01$  (phase gastrique)
  - o  $BDrel (\%) = 0,990 \times BAc (\%) - 0,039$  (phase gastro-intestinale)
- Equation de Wragg<sup>6</sup> :
  - o  $BDrel (\%) = 1,12 \times BAc (\%)$  (phase gastrique)
  - o  $BDrel (\%) = 1,14 \times BAc (\%)$  (phase gastro-intestinale)

Les **valeurs de FAR** les plus sécuritaires par secteur ont été retenues pour les calculs de risque associés à l'arsenic.

**Dans le cas du plomb**, la matrice de référence utilisée dans les études de corrélation *in vivo-in vitro*, et celle utilisée dans les études toxicologiques sont différentes (respectivement, solution et formes multi-matricielles<sup>7</sup>). Les modèles expérimentaux (respectivement, porcine et humaine) demeurent similaires. Le FAR peut être estimé à partir de l'équation de corrélation *in vivo-in vitro* du test physiologique UBM. Toutefois, la bioaccessibilité du sol apparaît potentiellement sous-estimée avec le test UBM, en particulier avec la phase gastro-intestinale. Plusieurs équations de corrélation *in vivo-in vitro* existent dans la littérature scientifique :

- Equation de J. Caboche<sup>8</sup> :
  - o  $BDrel (\%) = 0,909 \times BAc (\%) - 1,691$  (phase gastrique)

<sup>5</sup> Caboche J. Validation d'un test de mesure de bioaccessibilité. Application à 4 éléments traces métalliques dans les sols: As, Cd, Pb et Sb. 2009

<sup>6</sup> Wragg J, Cave M, Basta N, Brandon E, Casteel S, Denys S, et al. An inter-laboratory trial of the unified BARGE bioaccessibility method for arsenic, cadmium and lead in soil. Sci Total Environ [Internet]. 2011 juin 22 [cité 2011 juill 20]; Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21703664>

<sup>7</sup> Nourriture, poussières, atmosphère

<sup>8</sup> Caboche J. Validation d'un test de mesure de bioaccessibilité. Application à 4 éléments traces métalliques dans les sols: As, Cd, Pb et Sb. 2009

- $BDrel (\%) = 0,917 \times BAc (\%) - 1$  (phase gastro-intestinale)

L'équation de corrélation de Wragg pour le plomb n'est pas retenue ici car non explicitée dans la publication<sup>9</sup> (seule une lecture graphique est possible pour la phase gastrique, mais jugée approximative).

Les **valeurs de FAR** les plus sécuritaires par secteur ont été retenues pour les calculs de risque associés au plomb.

Les valeurs des FAR sont présentées dans les tableaux suivants par paramètre (arsenic / plomb) et par secteur (secteur 1 et 4). Dans une démarche sécuritaire, les concentrations biodisponibles ont été calculées en tenant compte du facteur correctif (FAR) le plus élevé, quel que soit le compartiment (gastrique ou gastro-intestinal).

---

<sup>9</sup> Wragg J, Cave M, Basta N, Brandon E, Casteel S, Denys S, et al. An inter-laboratory trial of the unified BARGE bioaccessibility method for arsenic, cadmium and lead in soil. Sci Total Environ [Internet]. 2011 juin 22 [cité 2011 juill 20]; Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21703664>

Teneurs totales en Arsenic en mg/kg MS	Echantillon	Bioaccessibilité absolues		Caboche et al		Wragg et al		Fraction d'Absorption Relatif FAR* (%)	FAR retenu par secteur (%)
		Bioaccessibilité gastrique	Bioaccessibilité gastro intestinale	Gastrique (G)	Gastro-intestinal (GI)	Gastrique (G)	Gastro-intestinal (GI)		
		en %		BDsol G = Bac(%) +0,01	BDsol GI = 0,990 Bac(%) - 0,039	BDsol G = 1,12 Bac(%)	BDsol GI = 1,14 Bac(%)		
156	S1-3	9,6	5,1	11,2	5,6	12,5	6,5	12,5	17,3
94,6	S1-10	13,3	8,5	15,5	9,4	17,3	10,9	17,3	
206	S1-14	8,5	4,6	9,9	5,1	11,1	5,9	11,1	
227	S4-2	2,8	3,1	3,4	3,4	3,8	4,0	4,0	13,0
141	S4-9	6,2	7,0	7,5	7,7	8,4	9,0	9,0	
270	S4-17	9,6	8,8	11,6	9,7	13,0	11,3	13,0	

BDsol : Biodisponibilité relative du sol analysé

Bac(%) : bioaccessibilité relative (%) = bioaccessibilité absolue du sol analysé/bioaccessibilité absolue de la forme de référence analysée (aséniate de sodium)

\* FAR =  $BD_{sol}/BD_{VTR}$ . Ici, les matrices de référence et modèles expérimentaux sont similaires entre l'étude toxicologique et l'étude *in vivo*, et  $BD_{VTR} = 100\%$  (eau de consommation). D'où FAR =  $BD_{sol}$ . La valeur retenue est la valeur maximale quel que soit le compartiment étudié ( $BD_{sol}$  G ou  $BD_{sol}$  GI). En outre, le FAR maximal a été appliqué à l'ensemble du secteur.

Tableau 5 : Détermination de la Fraction d'Absorption Relatif (FAR) pour l'arsenic à partir de l'équation de corrélation *in vivo-in vitro* du test physiologique UBM

Teneurs totales en Plomb en mg/kg MS	Echantillon	Bioaccessibilité absolues		Caboche et al		Fraction d'Absorption Relatif FAR* (%)	FAR retenu par secteur (%)
		Bioaccessibilité gastrique	Bioaccessibilité gastro intestinale	Gastrique (G)	Gastro-intestinal (GI)		
		en %		BDsol G = 0,909Bac(%) - 1,691	BDsol GI = 0,917 Bac(%) - 1		
22100	S1-3	61,8	0,3	64,4	0	64,4	79,8
1020	S1-10	76,2	0,5	79,8	0	79,8	
11200	S1-14	51,4	0,4	53,3	0	53,3	
453	S4-2	32,5	7,0	33,9	10,1	33,9	56,0
385	S4-9	41,1	12,1	43,3	18,1	45,2	
904	S4-17	41,3	14,8	43,5	22,4	56,0	

BDsol : Biodisponibilité relative du sol analysé

Bac(%) : bioaccessibilité relative (%) = bioaccessibilité absolue du sol analysé / bioaccessibilité absolue de la forme de référence analysée (acétate de plomb)

\* FAR =  $BD_{sol}/BD_{VTR}$ . Ici, les matrices de référence et modèles expérimentaux ne sont pas similaires entre l'étude toxicologique et l'étude *in vivo*, et  $BD_{VTR} \neq 100\%$  (aliments, eau, air). Considérant les recommandations du RIVM pour le plomb<sup>10</sup>, la biodisponibilité du sol  $BD_{sol}$  correspond à la biodisponibilité obtenue en phase gastro-intestinale ou «  $BD_{sol}$  GI » estimé grâce à l'équation de corrélation du test UBM. La biodisponibilité de la matrice de référence de l'étude toxicologique  $BD_{VTR}$  est estimée à 40% en moyenne chez l'enfant<sup>11</sup>. Le FAR ainsi calculé correspond donc au ratio  $BD_{sol} GI / 0,4$ , soit  $BD_{sol} GI \times 2,5$ . Dans une démarche sécuritaire, la valeur maximale de FAR estimé pour la phase gastrique (FAR =  $BD_{sol}$  G) et la phase gastro-intestinale (FAR =  $2,5 \times BD_{sol} GI$ ) est retenue. En outre, le FAR maximal a été appliqué à l'ensemble du secteur.

Tableau 6 : Détermination de la Fraction d'Absorption Relatif (FAR) pour le plomb à partir de l'équation de corrélation *in vivo-in vitro* du test physiologique UBM

<sup>10</sup> Oomen A., Brandon E., Swartjes FA, Sips A., How can information on oral bioavailability improve human risk assessment for lead-contaminated soils? Implementation and scientific basis. 2006. A noter que dans cette publication, les auteurs insistent sur l'utilisation des résultats du test *in vitro* de bioaccessibilité en phase gastro-intestinale car l'absorption du plomb a lieu au niveau intestinal. L'utilisation de la bioaccessibilité en phase gastrique conduirait à une surestimation de la biodisponibilité relative (FAR <  $BD_{sol}$  G).

<sup>11</sup> L'absorption du plomb dans l'alimentation est de 20 à 80 % chez l'enfant selon son âge. A titre indicatif, elle est de 5 à 10 % chez l'adulte (Guide pratique InVS et INERIS, 2012). Le RIVM retient la valeur moyenne de 40% chez l'enfant.

Secteurs	Echantillon	Teneurs totales moyennes en arsenic (mg/kg)	Teneurs totales maximales en arsenic (mg/kg)	FAR (%) retenu par secteur	Concentrations moyennes en arsenic biodisponible (mg/kg)	Concentrations maximales en arsenic biodisponible (mg/kg)
Secteur 1	S1-3	318,7	460	17,3	55,2	79,7
	S1-10	136	161		23,6	27,9
	S1-14	381,4	763		66,1	132,2
Secteur 4	S4-2	225,7	467	13,0	29,2	60,5
	S4-9	152,7	268		19,8	34,7
	S4-17	261,3	378		33,8	49,0

**Tableau 7 : Détermination des concentrations en arsenic biodisponible (mg/kg), par secteur et par échantillon**

Secteurs	Echantillon	Teneurs totales moyennes en plomb (mg/kg)	Teneurs totales maximales en plomb (mg/kg)	FAR (%) retenu par secteur	Concentrations moyennes en plomb biodisponible (mg/kg)	Concentrations maximales en plomb biodisponible (mg/kg)
Secteur 1	S1-3	63 483,3	95 100	79,8	50 658,5	75 888,1
	S1-10	1 149	1 600		916,9	1 276,8
	S1-14	24 612,2	91 500		19 640,1	73 015,3
Secteur 4	S4-2	741,8	1 130	56,0	415,4	632,8
	S4-9	312,3	430		174,9	240,8
	S4-17	2 194,4	4 390		1 228,9	2 458,4

**Tableau 8 : Détermination des concentrations en plomb biodisponible (mg/kg), par secteur et par échantillon**

- Les résultats de tests UBM ont permis de définir des Fractions d’Absorption Relatifs (FAR) concernant les éléments arsenic et plomb au niveau des deux secteurs étudiés (1 et 4). Ces tests ont mis en évidence les éléments suivants, qui illustrent les informations bibliographiques disponibles<sup>12</sup> :

- ⇒ Secteur 1 : les valeurs des FAR correspondant aux biodisponibilités gastriques et gastro intestinales sont relativement proches pour l’arsenic, tandis que pour le plomb elles sont comprises entre 0 (gastro-intestinal) et 80 % (gastrique) ;
- ⇒ Secteur 4 : les valeurs des FAR correspondant aux biodisponibilités gastriques et gastro intestinales sont relativement proches pour l’arsenic, tandis que pour le plomb elles sont comprises entre 10 et 56 %.

- Les valeurs de bioaccessibilité gastriques et gastro-intestinales pour le Pb et l’As retrouvées dans la littérature et obtenues selon différents tests de bioaccessibilité sont présentées ci-dessous, et comparés aux résultats obtenus :

A : Bioaccessibilité du plomb

Historique de contamination	Nombre d'échantillons considérés	Phase considérée et bioaccessibilité correspondante (en % de la concentration totale)
Sols miniers	5	Gastrique : 55-80
	19	Gastrique : 4,5-80,4
	10	Gastrique : 3,9-70,4 Gastro-intestinale : 1,9-49,8
	5	Gastrique : 48-75 Gastro-intestinale : 5-27
Sols miniers fortement carbonés	4	Gastrique : 15-56 Gastro-intestinale : 5-25
Déchets miniers	5	Gastrique : 20-90
	5	Gastrique : 15-80
Déchets terres céramique	13	Gastro-intestinale : 0,3-73
Jardins, sédiments, sols miniers, terres agricoles	15	Gastro-intestinale : 2-21

Résultats des Tests UBM :

Plomb	Gastrique	Gastro intestinal
Secteur 1	53-80%	0%
Secteur 4	33-44%	10-20%

<sup>12</sup> Quantités de terre et poussières ingérées par un enfant de moins de 6 ans et bioaccessibilité des polluants : état des connaissances et propositions – InVS – INERIS, 2012.  
 RECORD, Biodisponibilité et Bioaccessibilité dans le cas des sols pollués : état des connaissances et pistes de recherche, 2011, 138 pages, n°10-0671/1A.



B : Bioaccessibilité de l'arsenic

Historique de contamination	Nombre d'échantillons considérés	Phase considérée et bioaccessibilité correspondante (en % de la concentration totale)
Déchets terres calcinés	5	Gastrique : 0,45-3,69 Gastro-intestinale : 0,53-3,28
Déchets ferreux	5	Gastrique : 17,6-29,6 Gastro-intestinale : 9,5-23,5
Terres agricoles et Sols miniers	15	Gastrique : 2-76 Gastro-intestinale : 3-90
Sols collectés à proximité des structures en bois traitées (CCA)	10	Gastrique : 20,7-63,6 Gastro-intestinale : 25-66,3
Terres miniers	87	Gastro-intestinale*** : 0,5-42
Terres minéralisés	20	Gastro-intestinale : 6,8-16,7
Fond géochimique	5	Gastro-intestinale : 5,6-12,5
Terres fonderie	22	Gastro-intestinale : 0,6-61,1
Déchets terres calcinés	5	Gastrique : 0,1-1,44 Gastro-intestinale : 0,1- 1,4
Déchets ferreux	5	Gastrique : 12,5-40 Gastro-intestinale : 12-20
Sols chemins de fer	18	Gastrique : 6-89
Site fonderie	13	Gastrique : 9-89
Sols miniers	8	Gastrique : 5-36
Fond géochimique	11	Gastrique : 1-22

Résultats des Tests UBM :

Arsenic	Gastrique	Gastro intestinal
Secteur 1	9-17%	5-10%
Secteur 4	3-13%	3-11%

Le rapport d'étude indique que les valeurs de bioaccessibilité varient fortement d'un historique de contamination à un autre ainsi que d'un type de sol à un autre [Caboche 2009]. En outre, les gammes de valeurs rencontrées pour un historique donné peuvent être larges. C'est par exemple le cas du plomb dans des déchets miniers dont la bioaccessibilité peut varier entre 15 et 80 % de la concentration totale.

Les valeurs obtenues à l'issue des tests UBM sont comprises dans les gammes de valeurs observées dans la bibliographie.

- Certaines études s'intéressent au lien entre la bioaccessibilité d'un élément donné et la répartition de l'élément entre les phases porteuses du sol. Dans ce cadre, l'étude de Denys conclut, pour le plomb, que la bioaccessibilité est significativement différente en fonction des différentes phases minéralogiques en présence dans les sols ; c'est notamment le cas en présence de sulfures. En présence d'une teneur élevée en carbonates, la bioaccessibilité du plomb dans des sols peut être faible (inférieure à 20 % de la concentration totale en plomb). Cette étude démontre que les valeurs de bioaccessibilité mesurées diffèrent, notamment, en fonction de la nature de la contamination du sol. En outre, en dehors du mode de contamination, les variations observées de bioaccessibilité peuvent s'expliquer par la spéciation de l'élément avec les différentes phases minérales du sol.

Les importantes variations observées entre le secteur 1 et 4 peuvent être rapprochées des formes chimiques du plomb, notamment dans le secteur 1 qui a été le siège d'une ancienne activité minière.

Contrairement à la simple mesure de la concentration totale, l'intégration de la bioaccessibilité de l'arsenic et du plomb a permis de considérer de façon plus approfondie l'exposition des usagers aux contaminants plomb et arsenic, via l'ingestion de terre. Il ressort que selon les paramètres et les secteurs étudiés, l'intégration de la bioaccessibilité/biodisponibilité peut sensiblement affiner les concentrations à prendre en considération dans le calcul des risques sanitaires (cas de l'arsenic biodisponible : 13 à 17% de la concentration totale), ou affiner les calculs dans une mesure plus limitée (cas du plomb biodisponible : 56 à 79% de la concentration totale). Ainsi, au regard des concentrations totales observées sur les différents secteurs, la prise en considération de la

biodisponibilité peut, ou non, sensiblement diminuer les niveaux de risque sanitaire pour les usagers par ingestion de sol.

## VIII. MISE A JOUR DE L'IEM MILIEU SOL

L'Interprétation de l'Etat des Milieux (rapport ICF Environnement AIX/12/085IR – V1, Rapport final phases 2 et 3 - Juin 2013) a été mise à jour au vu des données précédemment collectées.

### VIII.1 Données utilisées

Les données utilisées pour chaque sous-secteur sont les suivantes :

- ⇒ Les concentrations en éléments métalliques dans les sols de surface analysées durant les deux campagnes menées par ICF Environnement (juin et août 2015). Les concentrations moyennes et maximales par sous-secteur ont été considérées ;
- ⇒ les concentrations biodisponibles en plomb et arsenic issues des tests UBM de bioaccessibilité *in vitro*. Les concentrations moyennes et maximales par sous-secteur ont été considérées.

### VIII.2 Voie d'exposition

Le rapport ICF Environnement n°AIX/12/085IR –V1 (phases 2 et 3 de Juin 2013) a étudié la voie par ingestion de particules de sol. **Les éléments du schéma conceptuel n'ayant pas évolué, les connaissances complémentaires acquises permettent la mise à jour des grilles IEM pour la voie d'exposition par ingestion de particules de sol, pour les secteurs 1 et 4.**

### VIII.3 Evaluation des expositions

Les cibles retenues dans le cadre de cette IEM sont **les résidents adultes et enfants**.

A noter que les cibles « résidents adultes et enfants » couvrent les autres cibles adultes et enfants qui pourraient être présentes sur le site mais qui sont moins exposées du fait d'une durée d'exposition plus faible (notamment les promeneurs).

Les paramètres retenus pour le calcul de risque sanitaire sont détaillés dans le tableau ci-après.

Paramètre	Scénario moyen		Scénario sécuritaire	
	Adultes résidents	Enfants résidents	Adultes résidents	Enfants résidents
Taux d'ingestion de sols	10 mg/j	20 mg/j	50 mg/j	100 mg/j
Durée d'exposition	30 ans	6 ans	30 ans	6 ans
Fréquence d'exposition	365 j/an	365 j/an	365 j/an	365 j/an
Poids corporel	70 kg	15 kg	70 kg	15 kg

**Tableau 9 : Paramètres retenus pour les scénarios d'ingestion de sol – Résidents**

N.B. Le scénario sécuritaire **est le plus majorant en termes de risque**. Le scénario moyen considère un taux d'ingestion moins important, les autres paramètres ne changent pas. Les quantités ingérées font références aux médianes (P50) (pour le scénario "moyen") et aux percentiles 95 (pour le scénario « sécuritaire ») des distributions publiées par Stanek et al.<sup>13</sup>

## VIII.4 Sélection des substances

Les substances sélectionnées pour l'étude sont celles connues pour être toxiques pour l'homme et pour lesquelles il existe des valeurs toxicologiques de référence accessibles et fiables. Les calculs de risque porteront sur ces substances.

### VIII.4.1 Critère de sélection

Conformément au guide IEM, les substances sont sélectionnées sur la base d'un bruit de fond ou sur la base d'un témoin.

- Pour les **métaux** :
  - Eléments métalliques pour lesquels des dépassements par rapport aux valeurs de fond géochimique ambiant qui avaient été calculé en local à l'aide des points XRPF mesurés dans l'environnement témoin. Il s'agit des métaux suivants : **As, Pb, Zn, Cd, Sb, Mn**;
  - Eléments métalliques pour lesquels des dépassements par rapport aux valeurs de fond géochimique régional ont été observés. Il s'agit des métaux suivants : **Ba, Cu et Hg**.

*N.B. Pour le mercure, il n'existe pas de valeurs de fond géochimique régional. Les concentrations varient de :*

- 0,19 à 38,6 mg/kgMS pour le secteur 1 ;
- 0,11 à 1,43 mg/kgMS pour le secteur 4.

*Dans une démarche sécuritaire, cet élément a donc été retenu.*

Les valeurs toxicologiques de référence prises en compte sont présentées en Annexe 5.

<sup>13</sup> Stanek, et al. 1997. Soil ingestion in adults – Results of a second pilot study. Toxicol. Environ Safety 36 : 249-257. + Stanek, E.J., Calabrese E.J. 2000. Daily soil ingestion estimates for children at a Superfund Site. Risk Analysis ; 20 : 627-635.

Les études de Stanek et al ont été recommandées par l'INVS dans deux ouvrages :

- INVS, Synthèse des travaux du Département santé environnement sur les variables humaines d'exposition, 2012.
- InVS (Dor F), INERIS (Denys S) et les membres du GT. Quantités de terre et poussières ingérées par un enfant de moins de 6 ans et bioaccessibilité des polluants. État des connaissances et propositions. Saint-Maurice (Fra) : Institut de veille sanitaire, septembre 2012, 83 p

### VIII.4.2 *Teneurs retenues*

Pour le scénario d'ingestion de sols, la campagne de prélèvement sur les sols superficiels a été menée en particulier pour quantifier ce type de risque.

Les teneurs en métaux retenues **au niveau de chaque secteur impacté**, sont **les teneurs maximales et la moyenne des teneurs** calculées pour chaque élément avec les mesures en laboratoire.

**Pour la teneur maximale**, cette démarche est **très sécuritaire et majore les niveaux de risques sanitaires associés**, en particulier dans les secteurs des anciennes activités industrielles et minières. Les critères de sélection retenus pour cette étude sont sécuritaires vis-à-vis de l'évaluation du risque (substances quantifiées et teneurs maximales retenues).

**Les teneurs moyennes** ont été privilégiées aux médianes dans une démarche sécuritaire car les moyennes sont globalement supérieures aux médianes dans l'analyse statistique pour chaque secteur.

Nota : lorsque les niveaux de risque apparaissent compatibles pour une teneur donnée, les calculs n'ont pas été menés pour des teneurs inférieures (pour le même scénario et la même cible).

Les teneurs retenues dans les sols superficiels pour la réalisation d'une grille IEM sont présentées dans le tableau 10.

		Antimoine (Sb)	Arsenic (As) <sup>14</sup>	Baryum (Ba)	Cadmium (Cd)	Cuivre (Cu)	Manganèse (Mn)	Plomb (Pb) <sup>15</sup>	Zinc (Zn)	Mercuré (Hg) <sup>16</sup>
<b>Secteur 1</b> Sous secteur Haut (S1-3)	effectif	5		5	5	5	5		5	5
	moyenne	311,7	55,2	28,7	10,3	110,5	549,6	50658,5	1640,4	17
	max	721	79,7	44,2	15,3	152	777	75888,1	2160	38,6
<b>Secteur 1</b> Sous secteur Bas (S1-10)	effectif	8		8	8	8	8		8	8
	moyenne	108,4	66,1	54,8	14,4	179,6	1002,4	19640,1	3656,3	2,7
	max	374	132,2	98,9	45,7	418	1430	73015,3	15500	7,7
<b>Secteur 1</b> Sous secteur Latéral (S1-14)	effectif	2		2	2	2	2		2	2
	moyenne	5,6	23,6	26,2	1,4	15,8	1125	916,9	264	0,3
	max	6,1	27,9	34,5	2	18,7	1430	1276,8	364	0,3
<b>Secteur 4</b> Gravouillère Sous secteur nord (S4-2)	effectif	8		8	8	8	8		8	8
	moyenne	19,8	29,2	183,7	2,3	33	1646,5	415,4	689,1	0,6
	max	32,5	60,5	430	5,2	51	2830	632,8	1940	0,8
<b>Secteur 4</b> Gravouillère Sous secteur Nord est (S4-9)	effectif	4		4	4	4	4		4	4
	moyenne	9,6	19,8	248	1,7	62,1	975,3	174,9	1119,8	0,4
	max	14	34,7	347	2,8	153	1460	240,8	3650	0,9
<b>Secteur 4</b> Gravouillère Sous secteur Sud (S4-17)	effectif	8		8	8	8	8		8	8
	moyenne	36,2	33,8	504,8	1,8	79	945	1228,9	451,6	1
	max	51,3	49	793	2,6	113	1490	2458,4	558	1,4

Tableau 10 : Teneurs retenues dans les sols superficiels pour la réalisation de l'IEM

<sup>14</sup> Concentration biodisponible par sous secteur

<sup>15</sup> Concentration biodisponible par sous secteur

<sup>16</sup> Le mercure organique est fréquemment considéré pour la voie orale car c'est sous cette forme que cette substance s'accumule dans l'organisme. Ainsi, pour la voie d'exposition par ingestion de sol, on considère que 97% de la concentration mesurée correspond à du mercure inorganique et 3% à du mercure organique.

### VIII.5 Résultats

Les résultats des calculs pour l'ingestion de sol dans les grilles IEM sont présentés en **Annexe 6**, ils sont donnés par substance et selon les hypothèses retenues dans cette étude. L'interprétation des résultats relative à l'acceptabilité du risque, est synthétisée, par substance, dans les tableaux suivants.

**Figure 8 : Grille IEM – Ingestion des sols pour les résidents du secteur 1 et 4**  
**SCENARIO MOYEN / TENEURS MOYENNES**

Résidents : Scénario moyen – Teneurs moyennes												
Substance sélectionnée	Secteur 1 Sous secteur Haut		Secteur 1 Sous secteur Bas		Secteur 1 Sous secteur Latéral		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur nord		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur Nord est		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur Sud	
	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes
	antimoine											
arsenic*	QD	ERI	QD	ERI	QD	ERI	QD	ERI	QD	ERI	QD	ERI
baryum												
cadmium												
cuivre												
manganèse												
plomb*												
Zinc												
mercure												

### SCENARIO MOYEN / TENEURS MAXIMALES

Résidents : Scénario moyen – Teneurs maximales												
Substance sélectionnée	Secteur 1 Sous secteur Haut		Secteur 1 Sous secteur Bas		Secteur 1 Sous secteur Latéral		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur nord		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur Nord est		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur Sud	
	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes
	antimoine											
arsenic*	QD	ERI	QD	ERI	QD	ERI	QD	ERI	QD	ERI	QD	ERI
baryum												
cadmium												
cuivre												
manganèse												
plomb*												
Zinc												
mercure												

\* biodisponible

Incompatible    Zone d'incertitude    Compatible

QD : Quotient de danger

ERI : Excès de risque Individuel

### SCENARIO SECURITAIRE / TENEURS MOYENNES

Résidents : Scénario sécuritaire – Teneurs moyennes												
Substance sélectionnée	Secteur 1 Sous secteur Haut		Secteur 1 Sous secteur Bas		Secteur 1 Sous secteur Latéral		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur nord		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur Nord est		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur Sud	
	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes
antimoine												
arsenic*		QD ERI		QD ERI		QD ERI		QD ERI		QD ERI		QD ERI
baryum												
cadmium												
cuivre												
manganèse												
plomb*												
Zinc												
mercure												

### SCENARIO SECURITAIRE / TENEURS MAXIMALES

Résidents : Scénario sécuritaire – Teneurs maximales												
Substance sélectionnée	Secteur 1 Sous secteur Haut		Secteur 1 Sous secteur Bas		Secteur 1 Sous secteur Latéral		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur nord		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur Nord est		Secteur 4 Gravouillère Sous secteur Sud	
	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes	Enfants	Adultes
antimoine												
Arsenic*		QD ERI		QD ERI		QD ERI		QD ERI		QD ERI		QD ERI
baryum												
cadmium												
cuivre												
manganèse												
Plomb*												
Zinc												
mercure												

\* biodisponible

Incompatible    Zone d'incertitude    Compatible

QD : Quotient de danger

ERI : Excès de risque Individuel

En considérant les scénarii **résidents**, les résultats montrent des niveaux de risques pour l'**ingestion** de particules de sols :

<b>CIBLES : RESIDENTS</b>	
<b>SECTEUR 1</b> Habitation/gîte	
<b>1-Sous-secteur Haut</b>	⇒ <b>incompatibles</b> pour le <b>plomb</b> pour tous les scénarii adultes et enfants. ⇒ <b>zone d'incertitude</b> pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>l'arsenic</b> pour les adultes et enfants pour tous les scénarii ;</li> <li>- <b>le cadmium</b> pour le scénario sécuritaire pour les enfants et teneurs maximales ;</li> </ul> ⇒ <b>compatibles</b> pour les autres éléments métalliques.
<b>1-Sous-secteur Bas</b>	⇒ <b>incompatibles</b> pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>le plomb</b> pour tous les scénarii adultes et enfants (hormis le scénario moyen pour les adultes et teneurs moyennes) ;</li> <li>- <b>l'arsenic</b> pour le scénario sécuritaire et teneurs maximales pour les enfants ;</li> </ul> ⇒ <b>zone d'incertitude</b> pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>le plomb</b> pour le scénario moyen pour les adultes et teneurs moyennes ;</li> <li>- <b>l'arsenic</b> pour les adultes et enfants pour tous les scénarii hormis le scénario sécuritaire et teneurs maximales pour les enfants</li> <li>- <b>le cadmium</b> pour le scénario sécuritaire et teneurs moyennes et maximales pour les enfants ;</li> <li>- <b>L'antimoine, le manganèse et le zinc</b> pour le scénario sécuritaire et teneurs maximales pour les enfants ;</li> </ul> ⇒ <b>compatibles</b> pour les autres éléments métalliques.
<b>1-Sous-secteur Latéral</b>	⇒ <b>incompatibles</b> pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>le plomb</b> pour le scénario sécuritaire et teneurs moyennes et maximales pour les enfants ;</li> </ul> ⇒ <b>zone d'incertitude</b> pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>le plomb</b> pour les autres scénarii ;</li> <li>- <b>l'arsenic</b> pour tous les scénarii adultes et enfants</li> <li>- <b>le manganèse</b> pour le scénario sécuritaire et teneurs maximales pour les enfants ;</li> </ul> ⇒ <b>compatibles</b> pour les autres éléments métalliques.
<b>SECTEUR 4</b> Gravouillère	
<b>4-Sous-secteur Nord</b>	⇒ <b>incompatibles</b> pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>le plomb</b> pour le scénario sécuritaire et teneurs maximales pour les enfants ;</li> </ul> ⇒ <b>zone d'incertitude</b> pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>le plomb</b> pour les deux scénarii moyen pour les enfants et sécuritaires et teneurs moyennes (enfants et adultes) et maximales (adultes) ;</li> <li>- <b>l'arsenic</b> pour tous les scénarii adultes et enfants ;</li> <li>- <b>l'antimoine et le manganèse</b> pour le scénario sécuritaire et teneurs moyennes pour les enfants et teneurs maximales pour les enfants (manganèse uniquement) ;</li> </ul> ⇒ <b>compatibles</b> pour les autres éléments métalliques.
<b>4-Sous-secteur Nord Est</b>	⇒ <b>zone d'incertitude</b> pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>le plomb</b> pour l'ensemble des scénarii pour les enfants et le scénario sécuritaire et teneurs maximales pour les adultes ;</li> <li>- <b>l'arsenic</b> pour tous les scénarii adultes et enfants ;</li> <li>- <b>le manganèse</b> pour le scénario sécuritaire et teneurs maximales pour les enfants ;</li> </ul> ⇒ <b>compatibles</b> pour les autres éléments métalliques.



	<b>CIBLES : RESIDENTS</b>
<b>4-Sous-secteur Sud</b>	<p>⇒ <b>incompatibles</b> pour :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>le plomb</b> pour le scénario sécuritaire et teneurs moyennes et maximales et scénario moyen et teneurs maximales pour les enfants ;</li></ul> <p>⇒ <b>zone d'incertitude</b> pour :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>le plomb</b> pour l'ensemble des autres scénarii pour les enfants et adultes ;</li><li>- <b>l'arsenic</b> pour tous les scénarii adultes et enfants ;</li><li>- <b>le manganèse</b> pour le scénario sécuritaire et teneurs maximales pour les enfants ;</li></ul> <p>⇒ <b>compatibles</b> pour les autres éléments métalliques.</p>

Les résultats de l'interprétation de l'Etat des Milieux indiquent qu'en prenant en compte les concentrations biodisponibles des traceurs majeurs de l'activité minière (plomb et arsenic), les niveaux de risque sanitaires pour le scénario ingestion de sols et les cibles étudiés sont :

- ⇒ Incompatibles avec les usages constatés quel que soit le scénario, dans deux sous-secteurs sur les trois du secteur 1 pour le **plomb** ;
- ⇒ Incompatibles avec les usages constatés pour les enfants pour le **plomb** dans un sous-secteur (Sud) sur les 3 du secteur 4 (sauf pour le scénario moyen / teneurs moyennes en zone d'incertitude).

## VIII.6 Conclusion IEM Sol

Les hypothèses de travail retenues lors de l'IEM précédente sont les suivantes :

- Compte tenu de la surface de chaque secteur et du nombre de points de mesures importants pour les traceurs de risque (Plomb et arsenic), les conclusions basées sur la teneur maximale par secteur peuvent être considérées comme non réalistes ;
- En tentant d'être raisonnablement réaliste et pour pouvoir dégager des recommandations plus claires, il a été décidé de distinguer le secteur 1 et le secteur 4, et de conserver les scénarios suivants pour chaque secteur
  - Secteur 1 : scénario sécuritaire (résidents au droit des zones à concentrations élevées et comportant des vestiges d'anciennes installations industrielles) ;
  - Secteur 4 : scénario moyen (résidents proches de lieux d'extractions minières anciennes).

**Cette conclusion tient donc compte de ces hypothèses, en considérant :**

- **pour le secteur 1, le scénario sécuritaire et teneurs moyennes ;**
- **pour le secteur 4, le scénario moyen et teneurs moyennes.**

En comparaison avec les résultats de l'IEM réalisée en 2013 (rapport ICF Environnement AIX/12/085IR –V1, phases 2 et 3 - Juin 2013), la prise en considération de la bioaccessibilité a permis de préciser les niveaux de risque concernant :

- **Secteur 1 :**
  - Les niveaux de risque qui avaient précédemment été définis en zone d'incompatibilité pour l'arsenic pour les adultes et les enfants ont évolué en zone d'incertitude pour les trois sous-secteurs ;
  - Les niveaux de risque qui avaient précédemment été définis en zone d'incompatibilité pour le plomb pour les enfants et en zone d'incertitude pour

les adultes demeurent en zone d'incompatibilité pour ce paramètre pour les trois sous-secteurs (hormis les adultes pour le sous-secteur Latéral).

➤ **Secteur 4 :**

- Les niveaux de risque qui avaient précédemment été définis en zone d'incompatibilité pour l'arsenic pour les enfants et en zone d'incertitude pour les adultes ont évolué en zone d'incertitude pour ce paramètre pour les adultes et les enfants pour les trois sous-secteurs ;
- Les niveaux de risque qui avaient précédemment été définis en zone d'incertitude pour le plomb pour les enfants et en zone compatible pour les adultes se sont maintenus, hormis pour les adultes au niveau du sous-secteur Sud qui a évolué en zone d'incertitude.

Ainsi, la prise en considération de la bioaccessibilité pour améliorer l'appréciation du risque a eu tendance à :

- réduire les niveaux de risque associés à l'arsenic, qui sont dorénavant en zone d'incertitude ;
- confirmer les niveaux de risque associés au plomb, notamment dans les zones d'incompatibilité.

**Les conclusions de cette IEM, intégrant la notion de biodisponibilité du plomb et de l'arsenic ainsi que les scénarios considérés, sont les suivantes :**

⇒ **Secteur 1 (scénario sécuritaire et teneurs moyennes) :**

Les niveaux de risque sanitaire sont :

✚ **incompatibles** pour :

- **le plomb**, pour les adultes et les enfants pour les trois sous-secteurs, hormis les adultes dans le sous-secteur latéral ;

✚ **zone d'incertitude** pour :

- **le plomb** pour les adultes dans le sous-secteur latéral ;
- **l'arsenic** pour les enfants et les adultes de tous les sous-secteurs.
- **l'antimoine** pour les enfants dans le sous-secteur haut ;
- **le cadmium**, pour les enfants du sous-secteur Bas ;

Les niveaux de risque incompatibles observés au niveau du **secteur 1** pour le plomb nécessiteraient la mise en œuvre d'un plan de gestion pour rétablir la compatibilité entre l'état des milieux et les usages, conformément aux principes établis par la démarche d'Interprétation de l'Etat des Milieux.

A ce stade, et considérant les résultats des IEM menées, les mesures de gestion qui pourraient être envisagées sur le secteur 1, sont les suivantes :

- soit une restriction d'usage (pas d'usage résidentiel, pas de jardins potagers,...) ;
- soit un réaménagement du site : excavation et remplacement, ou recouvrement, des sols contaminés par de la terre saine.

⇒ **Secteur 4 (scénario moyen et teneurs moyennes) :**

Les niveaux de risque sanitaire sont :

✚ **en zone d'incertitude** pour :

- **l'arsenic** pour les adultes et les enfants pour les trois sous-secteurs ;

- **le plomb** pour les enfants pour les sous-secteurs Nord et Nord-est, et les adultes et les enfants pour le sous-secteur Sud.

Compte-tenu des niveaux de risque en zone d'incertitude observés au niveau des 3 sous-secteurs du **secteur 4** pour le plomb (certains secteurs) et l'arsenic (ensemble des secteurs), la méthodologie IEM indique deux possibilités :

- la mise en œuvre de mesures de gestion simples supprimant toute exposition des usagers ;
- à défaut, la réalisation d'une EQRS plus approfondie. En cas d'incompatibilité d'usage à l'issue de l'EQRS, l'IEM préconise un plan de gestion.

## IX. CONCLUSION

Par courrier du 19 mars 2015, La DREAL Languedoc-Roussillon a confié à ICF Environnement la réalisation d'investigations complémentaires sur le milieu sol pour permettre de mettre à jour l'IEM concernant deux zones présentant des caractéristiques particulières.

- ⇒ Sur l'habitation/gîte du secteur 1 (secteur de l'ancienne Mine Joseph et des usages en aval du ruisseau de Paleyrolle) sur la commune de Tornac ;
- ⇒ Sur certaines habitations du secteur 4 (secteur Gravouillère et La Fabrique) sur la commune de Thoiras.

ICF Environnement a réalisé une **campagne d'investigations** (prélèvement et analyses) sur des sols superficiels des secteurs 1 et 4, qui ont chacun été divisés en trois sous-secteurs. Six échantillons ont été sélectionnés en concertation avec la DREAL LR pour réalisation d'une étude de bioaccessibilité (tests UBM).

Les **résultats des tests UBM** ont permis de définir des Fractions d'Absorptions Relatifs (FAR) concernant les éléments arsenic et plomb (les traceurs de l'activité minière sur ce site) au niveau des deux secteurs étudiés (1 et 4).

L'**IEM** sur le milieu sol a été mise à jour en tenant compte des Valeur Toxicologique de Référence (VTR) actuelles et des concentrations biodisponibles en arsenic et plomb. Les résultats de l'Interprétation de l'Etat des Milieux indiquent des niveaux de risque sanitaires pour le scénario ingestion de sols et les cibles étudiés sont :

- ⇒ Incompatibles avec les usages constatés quel que soit le scénario, dans deux sous-secteurs sur les trois du **secteur 1** pour le plomb ;
- ⇒ Incompatibles avec les usages constatés pour les enfants pour le plomb dans un sous-secteur (Sud) pour les 3 du **secteur 4** (sauf pour le scénario moyen / teneurs moyennes en zone d'incertitude).

**En comparaison avec l'IEM réalisée en 2013**, la prise en considération de la bioaccessibilité pour améliorer l'appréciation du risque dans la mise à jour de l'IEM a eu tendance à :

- **réduire les niveaux de risque associés à l'arsenic**, qui sont dorénavant en zone d'incertitude ;
- **confirmer les niveaux de risque associés au plomb**, notamment dans les zones d'incompatibilité.

**Les niveaux de risque incompatibles observés au niveau du secteur 1** pour le plomb nécessiteraient la mise en œuvre d'un plan de gestion pour rétablir la compatibilité entre l'état des milieux et les usages, conformément aux principes établis par la démarche d'Interprétation de l'Etat des Milieux. A ce stade, et considérant les résultats des IEM menées, les mesures de gestion qui pourraient être envisagées sur le secteur 1, sont les suivantes :

- soit une restriction d'usage (pas d'usage résidentiel, pas de jardins potagers,...) ;
- soit un réaménagement du site : excavation et remplacement, ou recouvrement, des sols contaminés par de la terre saine.

**Compte-tenu des niveaux de risque en zone d'incertitude observés au niveau des 3 sous-secteurs du secteur 4** pour le plomb (certains secteurs) et l'arsenic (ensemble des secteurs), la méthodologie ministérielle indique deux possibilités :

- la mise en œuvre de mesures de gestion simples supprimant toute exposition des usagers ;
- à défaut, la réalisation d'une EQRS plus approfondie. En cas d'incompatibilité d'usage à l'issue de l'EQRS, l'IEM préconise un plan de gestion.

**Dans l'immédiat et sans attendre un plan de gestion ou la mise en œuvre d'une mesure de gestion appropriée (secteur 1), ainsi que d'éventuelles études sanitaires plus approfondies (secteur 1 et 4),** et considérant la présence de résidents au droit de ces secteurs, des mesures sanitaires simples doivent être adoptées pour limiter le contact direct et indirect avec les sols pour tous les résidents, et plus particulièrement pour les enfants :

- **pour les adultes** : éviter toute activité en extérieur impliquant un remaniement des sols (à défaut, le port de protection est recommandé), et éviter de faire participer un enfant à de telles activités, lavage soigné des mains après des activités en extérieur, éviter l'accumulation de poussières sur le sol des habitations, lavage soigné des végétaux avant consommation ;
- **pour les enfants** : limiter le contact avec la poussière et les sols du type (laver les mains des enfants avant chaque repas et leur couper les ongles courts, laver les jouets régulièrement, limiter l'entrée dans la maison des poussières extérieures (laisser les chaussures à l'entrée, nettoyer régulièrement les sols de la maison, de préférence avec une serpillière humide, choisir pour les jeunes enfants des zones de jeux enherbées plutôt que des sols nus).

## X. LIMITATIONS DU RAPPORT

Le rapport, remis par ICF, est rédigé à l'usage exclusif du client et de manière à répondre à ses objectifs indiqués dans la proposition commerciale d'ICF (cf. fiche signalétique). Il est établi au vu des informations fournies à ICF et des connaissances techniques, réglementaires et scientifiques connues le jour de la commande définitive.

La responsabilité d'ICF ne pourra être engagée si le client lui a transmis des informations erronées ou incomplètes.

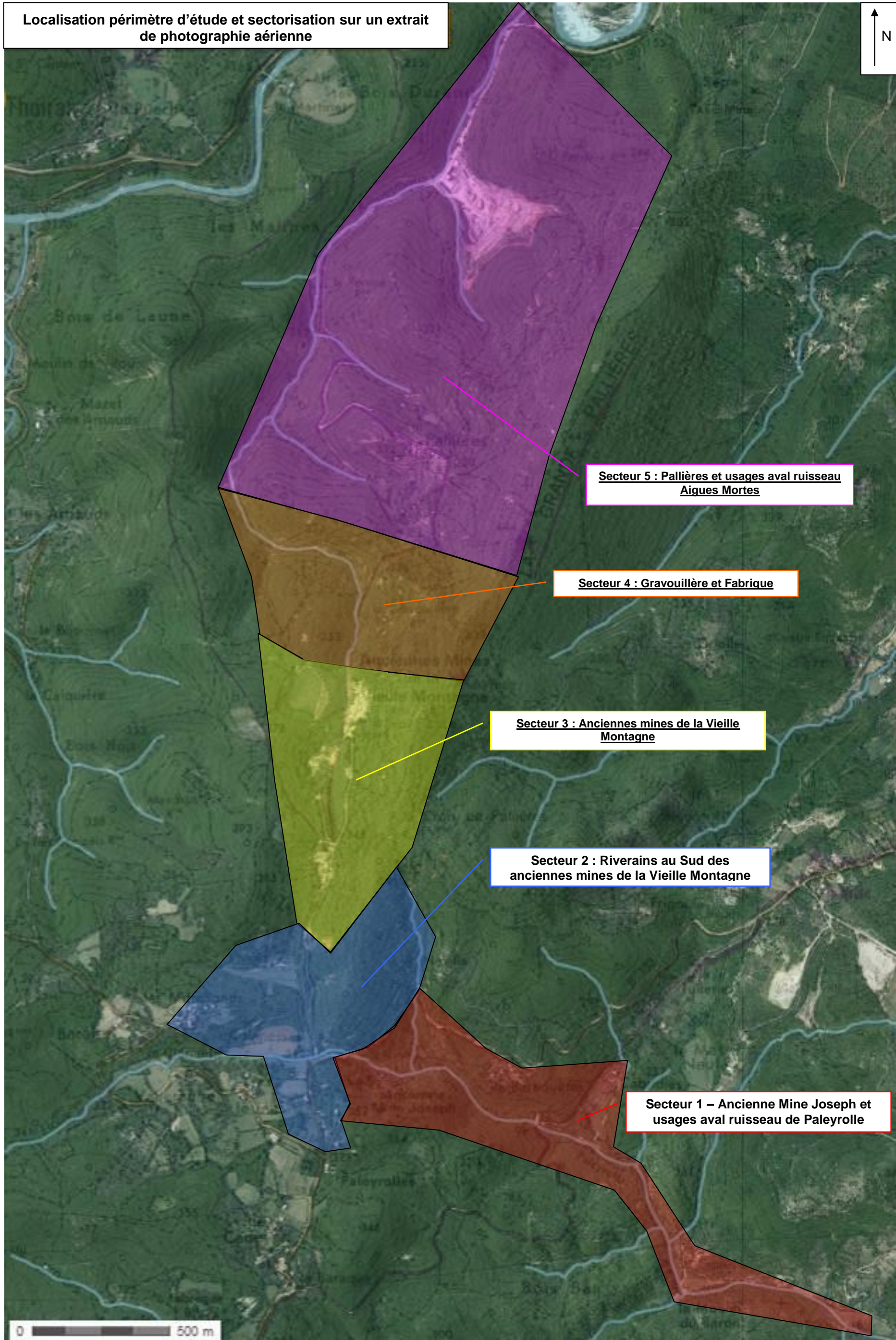
ICF n'est notamment pas responsable des décisions de quelque nature que ce soit prises par le client à la suite de la prestation fournie par ICF, ni des conséquences directes ou indirectes que ces décisions ou interprétations erronées pourraient causer. Toute utilisation partielle ou inappropriée ou toute interprétation dépassant les conclusions des rapports émis ne saurait engager la responsabilité d'ICF.

## ANNEXE 1

### PERIMETRE DE L'ETUDE ET SECTORISATION

CETTE ANNEXE CONTIENT 1 PAGE

Localisation périmètre d'étude et sectorisation sur un extrait  
de photographie aérienne



**Secteur 5 : Pallières et usages aval ruisseau  
Aigues Mortes**

**Secteur 4 : Gravouillère et Fabrique**

**Secteur 3 : Anciennes mines de la Vieille  
Montagne**

**Secteur 2 : Riverains au Sud des  
anciennes mines de la Vieille Montagne**

**Secteur 1 – Ancienne Mine Joseph et  
usages aval ruisseau de Paleyrolle**

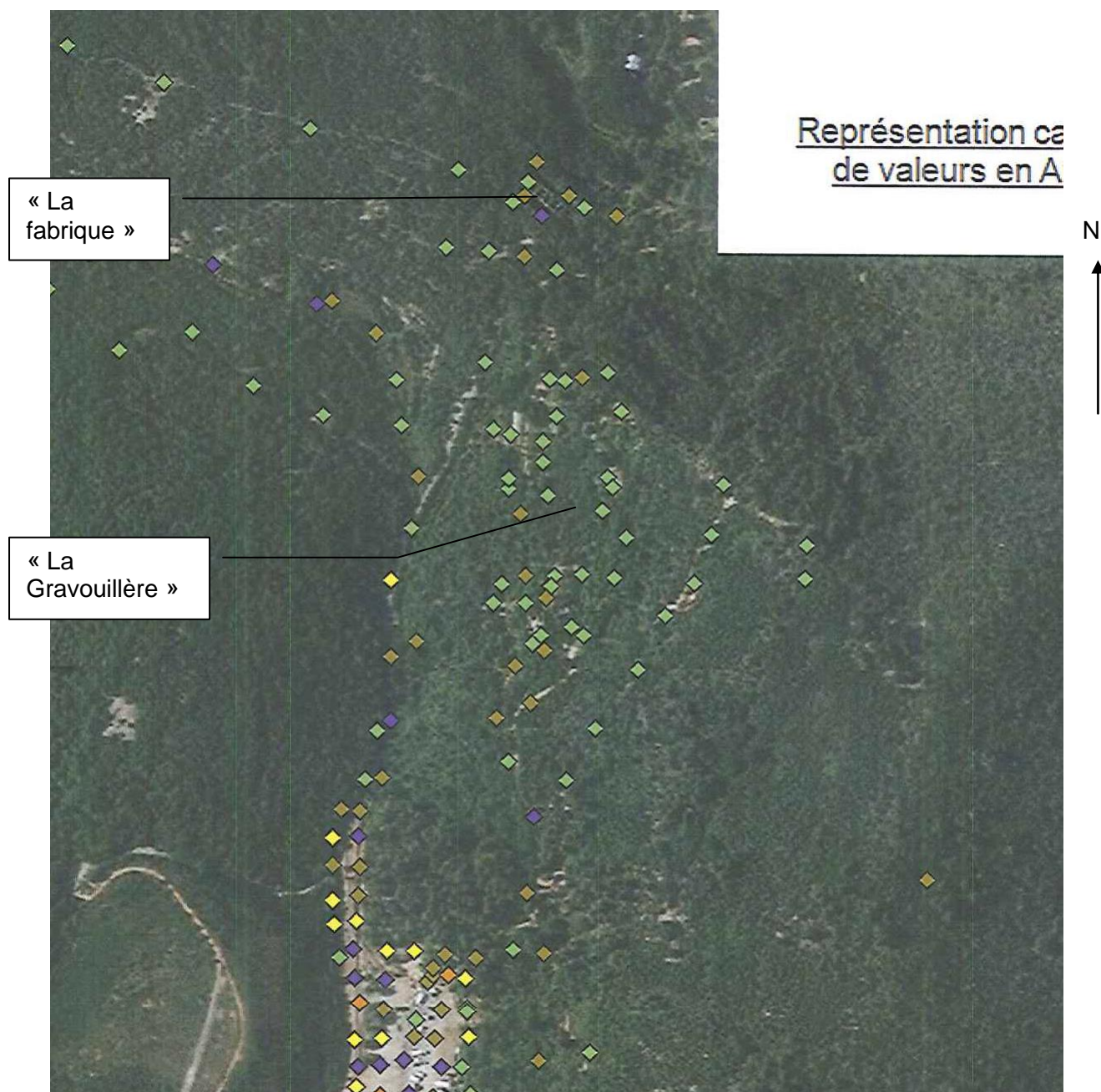
0 500 m



## ANNEXE 2

### DONNEES ACQUISES PRECEDEMMENT

CETTE ANNEXE CONTIENT 4 PAGES



**SECTEUR 4 - Répartition des valeurs en Arsenic (mg/kg M)**

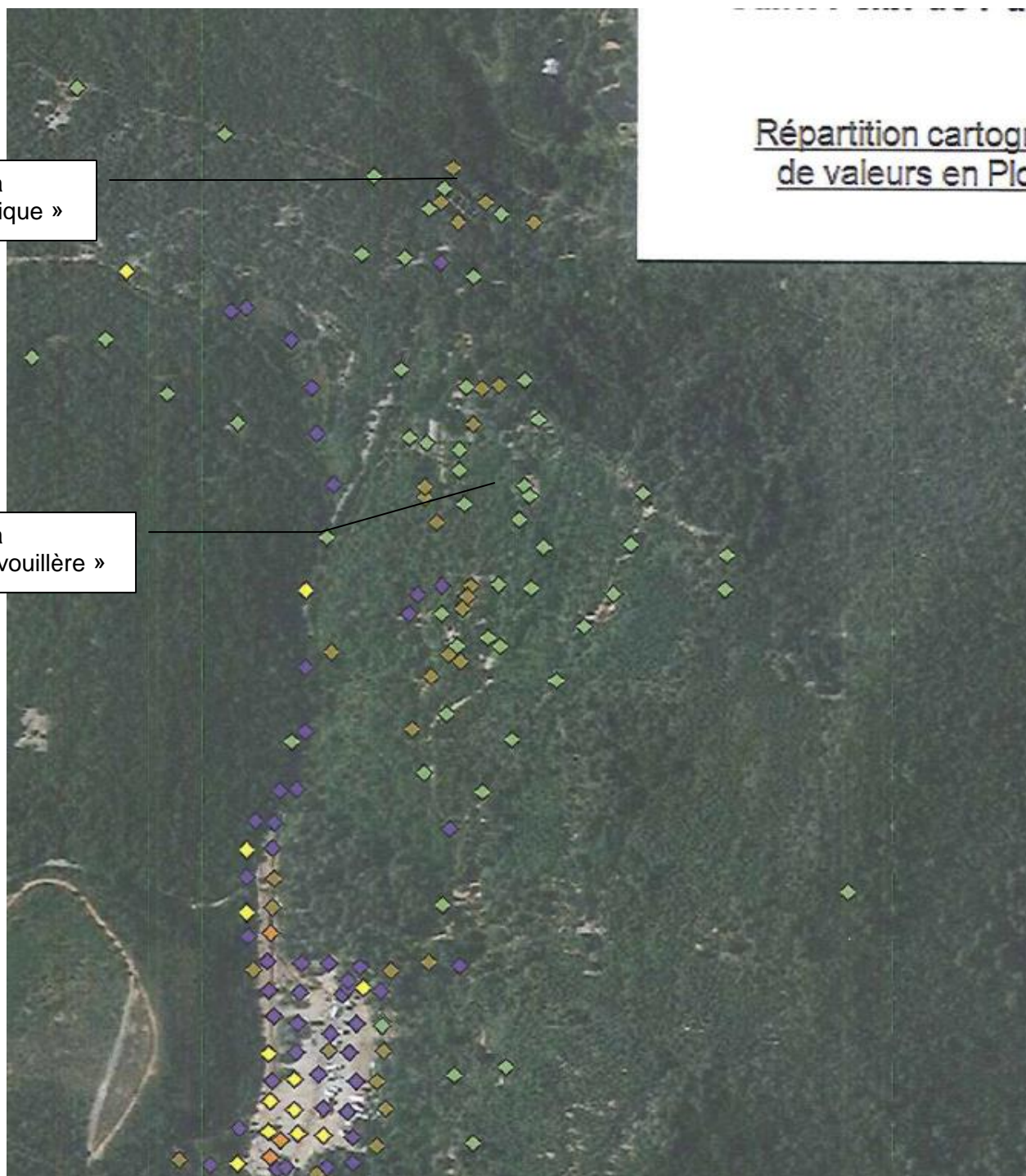
■ 2 060 à 17 944 (e)	(0)
■ 1 125 à 2 060 (d)	(1)
■ 664 à 1 125 (c)	(6)
■ 374 à 664 (b)	(22)
■ LOD à 374 (a)	(64)

Extrait de la carte de profil des teneurs en arsenic au droit du secteur 4  
(secteur Gravouillère et la Fabrique)  
(rapport ICF Environnement AIX/12/085 IR V1 du 28/06/2013)

Répartition cartogr  
de valeurs en Plom

« La  
fabrique »

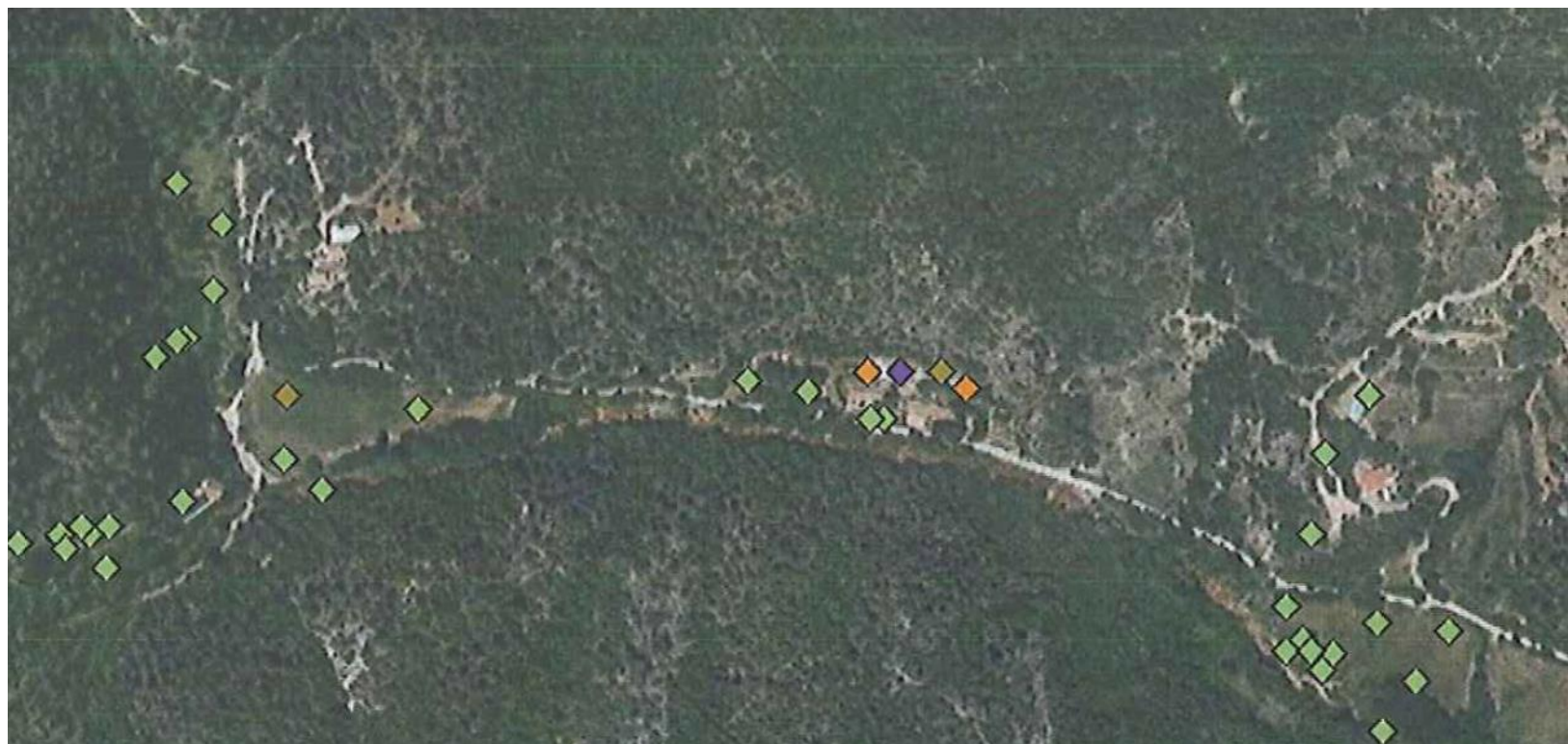
« La  
Gravouillère »



**SECTEUR 4 - Répartition des valeurs en Plomb (mg/kg M)**

- ◆ 29 221 à 421 127 (e) (0)
- ◆ 13 500 à 29 221 (d) (2)
- ◆ 2 278 à 13 500 (c) (19)
- ◆ 1 239 à 2 278 (b) (20)
- ◆ LOD à 1239 (a) (52)

Extrait de la carte de profil des teneurs en plomb au droit du secteur 4  
(secteur Gravouillère et la Fabrique)  
(rapport ICF Environnement AIX/12/085 IR V1 du 28/06/2013)



Répartition des valeurs en Arsenic (mg/kg M):

2 060 à 17 944 (e)	(34)
1 125 à 2 060 (d)	(18)
664 à 1 125 (c)	(16)
374 à 664 (b)	(13)
LOD à 374 (a)	(71)

(a): LOD à moyenne BDF local  
(b): moyenne BDF local à P90 BDF local  
(c): P90 BDF local à ~ moyenne toutes zones  
(d): ~ moyenne toutes zones à P90 toutes zones  
(e): P90 toutes zones à max toutes zones

Extrait de la carte de profil des teneurs en arsenic au droit du secteur 1  
(secteur de l'ancienne mine Joseph et usages en aval du ruisseau de Paleyrolle)  
(rapport ICF Environnement AIX/12/085 IR V1 du 28/06/2013)



Répartition des valeurs en Plomb (mg/kg M)

- ◆ 29 221 à 421127 (e) (27)
- ◆ 13 500 à 29 221 (d) (14)
- ◆ 2 278 à 13 500 (c) (28)
- ◆ 1 239 à 2 278 (b) (30)
- ◆ LOD à 1239 (a) (53)

- (a) : LOD à moyenne BDF local
- (b) : moyenne BDF local à P90 BDF local
- (c) : P90 BDF local à ~ moyenne toutes zones
- (d) : ~ moyenne toutes zones à P90 toutes zones
- (e) : P90 toutes zones à max toutes zones

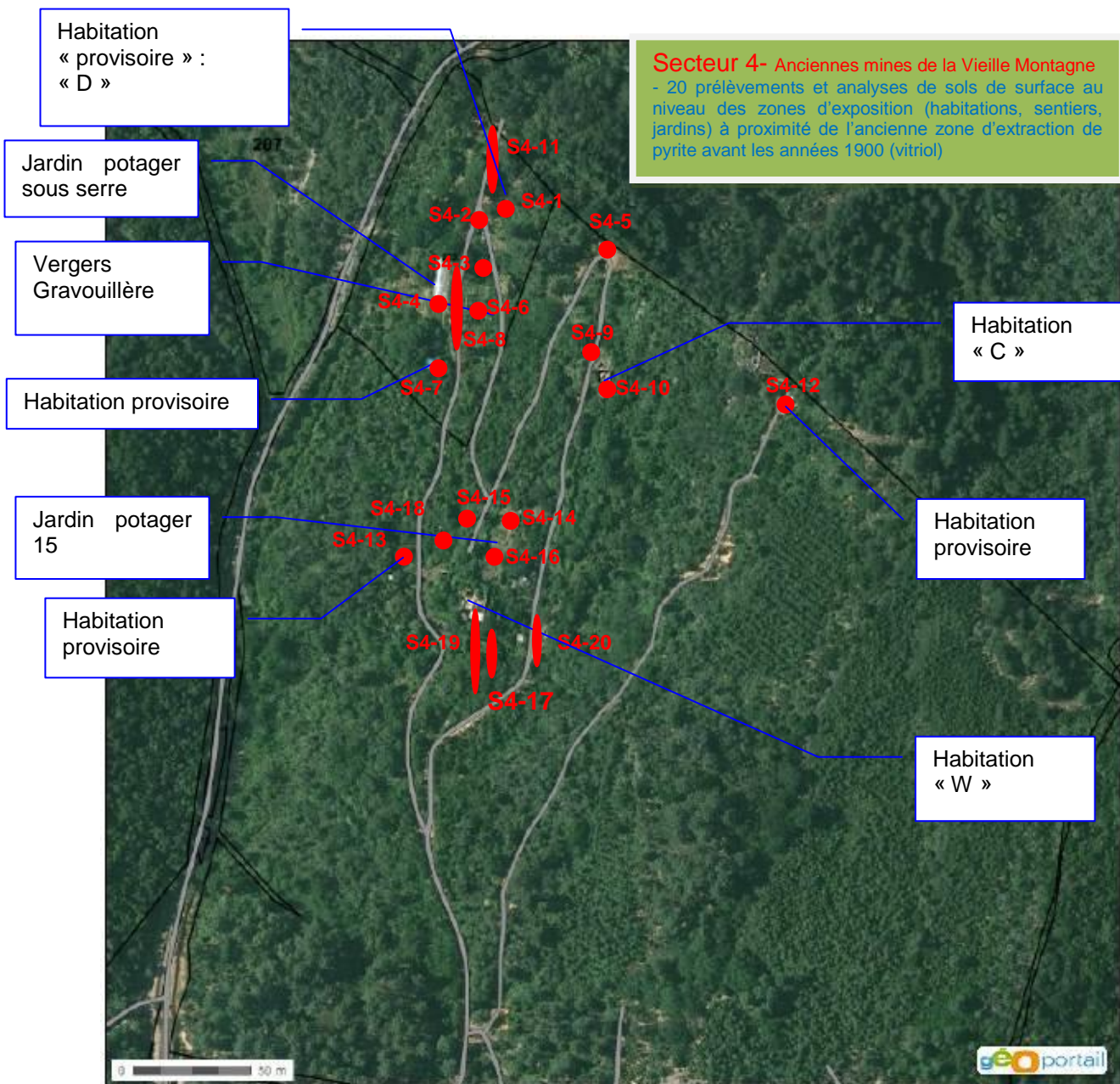
Extrait de la carte de profil des teneurs en plomb au droit du secteur 1  
(secteur de l'ancienne mine Joseph et usages en aval du ruisseau de Paleyrolle)  
(rapport ICF Environnement AIX/12/085 IR V1 du 28/06/2013)

## ANNEXE 3

### PLAN DE LOCALISATION DES INVESTIGATIONS (PRELEVEMENTS DES SOLS)

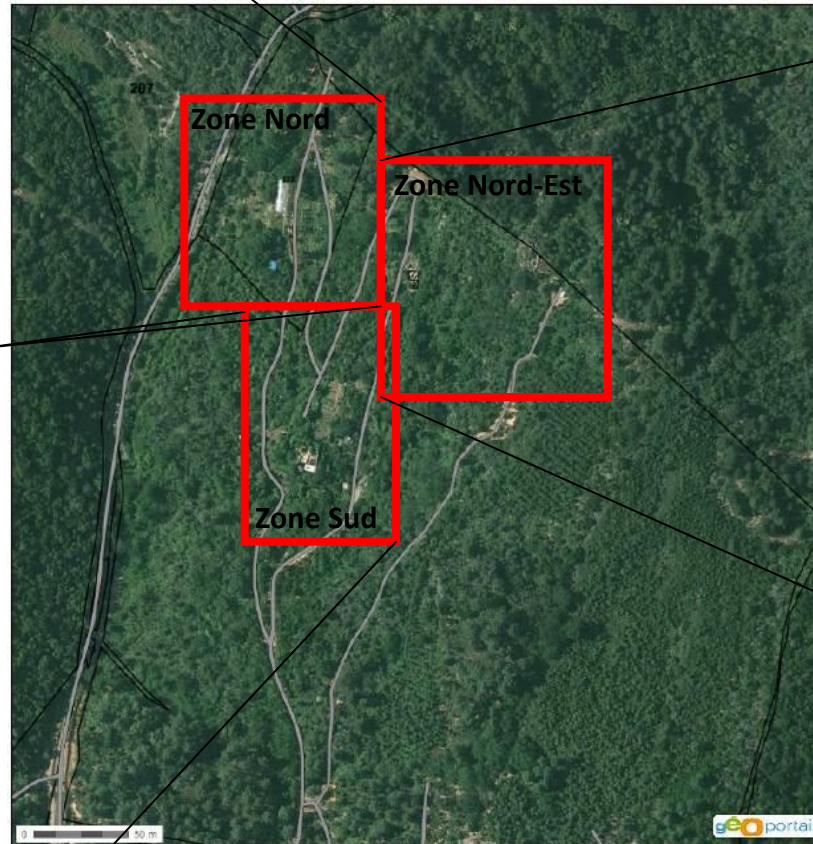
CETTE ANNEXE CONTIENT 6 PAGES

## PLAN D'INVESTIGATION DU SECTEUR 4 : LA GRAVOUILLERE

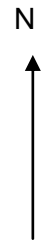


Plan de localisation des investigations complémentaires – Secteur 4 – La Gravouillère

### Plan des investigations secteur 4 Gravouillère







**Chemin : 0-5cm**



**Zone de stockage : 0-5cm**



**Chemin : 0-5cm**



**Accès « D » : 0-5 cm**



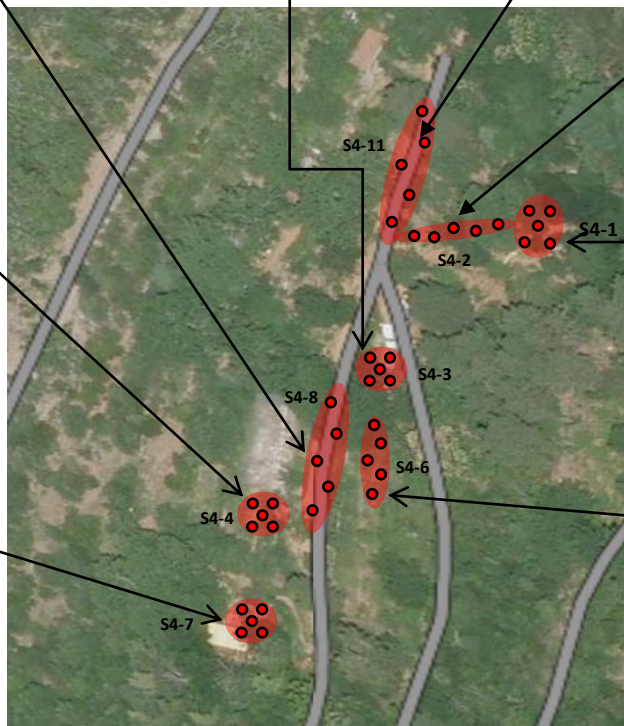
**Serre – stockage : 0-5cm**



**« D » (terrasse) : 0-5 cm**



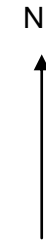
**Habitation temporaire  
(terrasse) : 0-5cm**



**Futur potager : 0-50 cm**

**Plan de localisation des investigations complémentaires – Secteur 4 Gravouillère Zone Nord**

<sup>17</sup> Coordonnées en Lambert 93 RGF de chaque zone de sondage définie en son centre



Futur Jardin potager / griottier : 0-50 cm



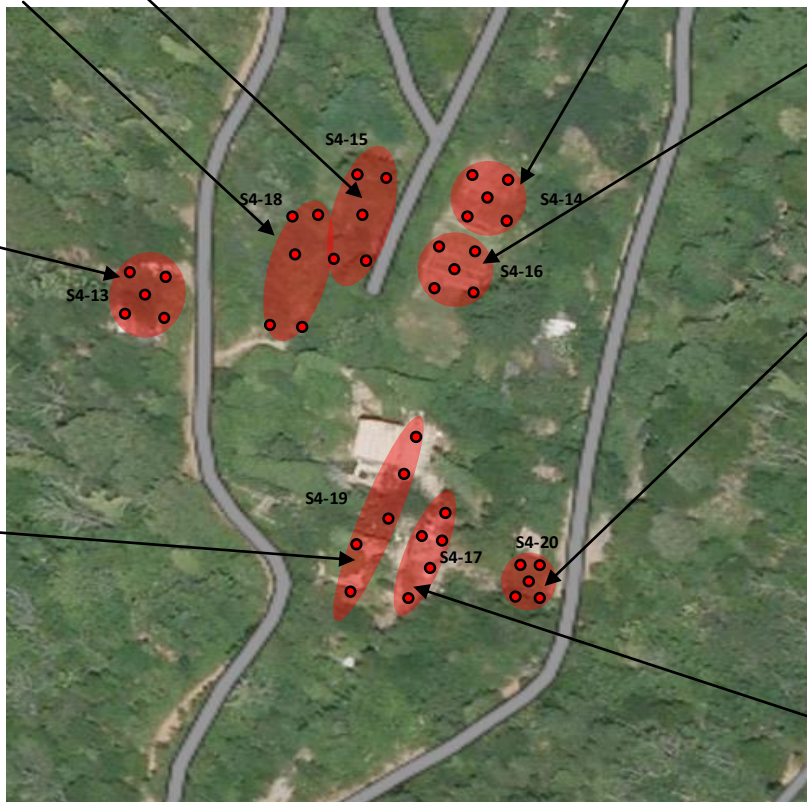
Jardin potager : 0-50 cm



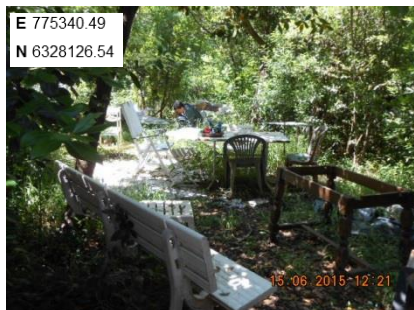
Jardin potager : 0-50 cm



Habitation temporaire (terrasse) : 0-5 cm



Habitation temporaire (terrasse) : 0-5 cm



« W » Habitation – terrasse : 0-5cm



Terrasse - stockage : 0-5 cm

Plan de localisation des investigations complémentaires – Secteur 4 Gravouillère Zone Sud

Rapport AIX 15 014 IR V1



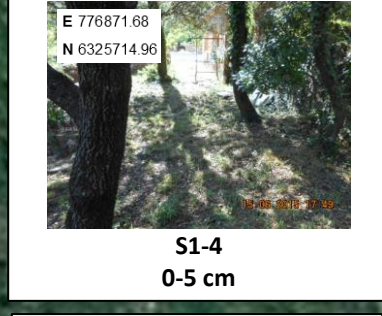
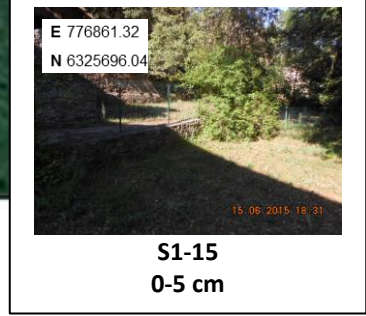
Chemin et terrasse habitation : 0-5cm

Plan de localisation des investigations complémentaires – Secteur 4 Gravouillère Zone Est



**Secteur 1- Ancienne mine Joseph et aval ruisseau de Palleyrolle**

- 15 prélèvements et analyses de sols de surface au niveau des zones d'exposition (habitation, sentiers, jardins,...) à proximité du Gîte et des maisons d'habitations à proximité (Le petit Drux – chemin des sources à Tornac)



Plan de localisation des investigations complémentaires « G » –Secteur 1

<sup>18</sup> Coordonnées en Lambert 93 RGF de chaque zone de sondage définie en son centre

**ANNEXE 4**

**BULLETINS D'ANALYSES DU LABORATOIRE**  
**TABLEAUX DES RESULTATS D'ANALYSES DES ELEMENTS METALLIQUES ANALYSES**  
CETTE ANNEXE CONTIENT 36 PAGES

		S4 - 1	S4 - 2	S4 - 3	S4 - 4	S4 - 6	S4 - 7	S4 - 8	S4 - 11	Médiane	Moyenne	Max
<b>SOUS SECTEUR NORD</b>												
Tests	Unités											
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	21,9	15,9	15,6	10,5	15,4	29,8	32,5	16,8	16,4	19,8	32,5
Arsenic (As)	mg/kg MS	467	210	160	151	179	209	241	187	198,0	225,5	467,0
Baryum (Ba)	mg/kg MS	430	58,4	143	152	163	199	251	73,4	157,5	183,7	430,0
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	2,25	<0.41	5,19	1,16	1,12	1,48	3,07	1,65	1,7	2,3	5,2
Chrome (Cr)	mg/kg MS	23,7	31,5	25,8	30,5	31,2	23,2	21,5	29,7	27,8	27,1	31,5
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	51	30,8	31,2	31,7	28,4	31,2	31,2	28,6	31,2	33,0	51,0
Fer (Fe)	mg/kg MS	102000	86700	69800	61900	83200	54600	53000	80900	75 350,0	74 012,5	102 000,0
Manganèse (Mn)	mg/kg MS	1930	742	1500	2010	2830	1590	1130	1440	1 545,0	1 646,5	2 830,0
Nickel (Ni)	mg/kg MS	26,4	17,4	16	18,6	18,1	13,4	8,48	16	16,7	16,8	26,4
Plomb (Pb)	mg/kg MS	723	644	1130	566	707	871	1110	472	715,0	777,9	1 130,0
Selenium (Se)	mg/kg MS	<5.00	<5.11	<5.00	<5.00	<5.00	<5.00	<5.00	<5.04			
Thallium (Tl)	mg/kg MS	6,75	<5.11	<5.00	<5.00	7,92	<5.00	<5.00	<5.04	7,3	7,3	7,9
Zinc (Zn)	mg/kg MS	521	489	1940	432	576	429	671	455	505,0	689,1	1 940,0
Mercure (Hg)	mg/kg MS	0,54	0,65	0,5	0,79	0,67	0,53	0,79	0,35	0,6	0,6	0,8

		S4 - 5	S4 - 9	S4 - 10	S4 - 12	Médiane	Moyenne	Max
<b>SOUS SECTEUR NORD EST</b>								
Tests	Unités							
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	14	8,46	10,4	5,49	9,4	9,6	14,0
Arsenic (As)	mg/kg MS	268	221	91,9	30	156,5	152,7	268,0
Baryum (Ba)	mg/kg MS	121	267	347	257	262,0	248,0	347,0
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	1,26	2,8	1	<0.40	1,3	1,7	2,8
Chrome (Cr)	mg/kg MS	18,2	50,5	32,6	71,6	41,6	43,2	71,6
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	54,8	153	21,9	18,6	38,4	62,1	153,0
Fer (Fe)	mg/kg MS	94800	34200	32300	36600	35 400,0	49 475,0	94 800,0
Manganèse (Mn)	mg/kg MS	1260	1460	862	319	1 061,0	975,3	1 460,0
Nickel (Ni)	mg/kg MS	17,2	15,4	12,5	18,4	16,3	15,9	18,4
Plomb (Pb)	mg/kg MS	430	379	294	73,5	336,5	294,1	430,0
Selenium (Se)	mg/kg MS	<5.00	<5.28	<5.81	<5.00			
Thallium (Tl)	mg/kg MS	50,7	<5.28	<5.81	<5.00	50,7	50,7	50,7
Zinc (Zn)	mg/kg MS	393	3650	166	270	331,5	1 119,8	3 650,0
Mercure (Hg)	mg/kg MS	0,87	0,28	0,29	0,11	0,3	0,4	0,9

		S4 - 13	S4 - 14	S4 - 15	S4 - 16	S4 - 17	S4 - 18	S4 - 19	S4 - 20	Médiane	Moyenne	Max
<b>SOUS SECTEUR SUD</b>												
Tests	Unités											
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	51,3	23,1	38,7	31,9	27,3	42,1	41	34,4	36,6	36,2	51,3
Arsenic (As)	mg/kg MS	269	223	235	232	252	236	378	257	244,0	260,3	378,0
Baryum (Ba)	mg/kg MS	203	568	355	793	524	331	645	619	546,0	504,8	793,0
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	1,76	0,98	2,06	1,45	1,84	2,01	2,6	2,05	1,9	1,8	2,6
Chrome (Cr)	mg/kg MS	13,3	14,4	11,9	13	12,1	12,5	14,7	15,6	13,2	13,4	15,6
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	58	66,8	64,2	77,4	99	85,2	113	68,6	73,0	79,0	113,0
Fer (Fe)	mg/kg MS	41500	45300	39400	40200	29700	38000	45900	49700	40 850,0	41 212,5	49 700,0
Manganèse (Mn)	mg/kg MS	1050	1000	862	1190	487	988	493	1490	994,0	945,0	1 490,0
Nickel (Ni)	mg/kg MS	11,7	12,8	9,65	12,4	7,51	9,69	10,1	17,5	10,9	11,4	17,5
Plomb (Pb)	mg/kg MS	3300	1810	4390	1950	837	4350	1280	929	1 880,0	2 355,8	4 390,0
Selenium (Se)	mg/kg MS	<5.00	<5.07	<5.00	<5.00	<5.00	<5.00	<5.00	<5.00			
Thallium (Tl)	mg/kg MS	5,97	<5.07	<5.00	<5.00	<5.00	<5.00	5,61	9,3	6,0	7,0	9,3
Zinc (Zn)	mg/kg MS	518	325	549	348	382	558	523	410	464,0	451,6	558,0
Mercure (Hg)	mg/kg MS	1	1,43	1,3	1,01	0,83	1,18	0,98	0,65	1,0	1,0	1,4

		S1 - 1	S1 - 2	S1 - 3	S1 - 4	S1 - 5	Médiane	Moyenne	Max
<b>SOUS-SECTEUR HAUT</b>									
Tests	Unités								
<b>Antimoine (Sb)</b>	mg/kg MS	721	176	95,5	261	305	261,0	311,7	721,0
<b>Arsenic (As)</b>	mg/kg MS	298	404	218	376	460	376,0	351,2	460,0
<b>Baryum (Ba)</b>	mg/kg MS	15,3	21	44,2	25	38,1	25,0	28,7	44,2
<b>Cadmium (Cd)</b>	mg/kg MS	6,4	13,9	3,74	15,3	12,1	12,1	10,3	15,3
Chrome (Cr)	mg/kg MS	<5.00	10,6	10,2	9,1	9,21	9,7	9,8	10,6
<b>Cuivre (Cu)</b>	mg/kg MS	51	152	80,7	139	130	130,0	110,5	152,0
Fer (Fe)	mg/kg MS	17900	54800	47100	51800	53200	51 800,0	44 960,0	54 800,0
<b>Manganèse (Mn)</b>	mg/kg MS	140	777	534	720	577	577,0	549,6	777,0
Nickel (Ni)	mg/kg MS	1,86	8,36	7,92	7,24	8,38	7,9	6,8	8,4
<b>Plomb (Pb)</b>	mg/kg MS	95100	61200	27400	89200	85900	85 900,0	71 760,0	95 100,0
Selenium (Se)	mg/kg MS	<5.00	<5.00	<5.00	<5.00	<5.00			
Thallium (Tl)	mg/kg MS	81,4	61,7	26,5	57,1	32	57,1	51,7	81,4
<b>Zinc (Zn)</b>	mg/kg MS	1350	1900	712	2080	2160	1 900,0	1 640,4	2 160,0
<b>Mercure (Hg)</b>	mg/kg MS	38,6	6,96	3,71	19	16,9	16,9	17,0	38,6

		S1 - 7	S1 - 8	S1 - 9	S1 - 11	S1 - 12	S1 - 13	S1 - 14	S1 - 15	Médiane	Moyenne	Max
<b>SOUS-SECTEUR BAS</b>												
Tests	Unités											
<b>Antimoine (Sb)</b>	mg/kg MS	45,9	92,9	45,9	63,8	374	51,6	40,7	152	57,7	108,4	374,0
<b>Arsenic (As)</b>	mg/kg MS	331	303	413	271	763	221	204	721	317,0	403,4	763,0
<b>Baryum (Ba)</b>	mg/kg MS	50,8	43,6	38,6	52,3	60,1	49,3	44,6	98,9	50,1	54,8	98,9
<b>Cadmium (Cd)</b>	mg/kg MS	11,9	13,3	17,2	6,88	10,1	6,17	4,19	45,7	11,0	14,4	45,7
Chrome (Cr)	mg/kg MS	17,1	13,1	15,3	18,4	11,5	17,7	17,6	20,2	17,4	16,4	20,2
<b>Cuivre (Cu)</b>	mg/kg MS	144	134	191	119	418	99,4	77	254	139,0	179,6	418,0
Fer (Fe)	mg/kg MS	81100	74100	96000	65200	125000	51500	48500	139000	77 600,0	85 050,0	139 000,0
<b>Manganèse (Mn)</b>	mg/kg MS	1430	968	884	934	405	1400	1410	588	951,0	1 002,4	1 430,0
Nickel (Ni)	mg/kg MS	19,2	14,6	17,9	15,6	11,9	14,7	14,8	19,3	15,2	16,0	19,3
<b>Plomb (Pb)</b>	mg/kg MS	9980	31800	9510	15200	91500	11300	9120	31900	13 250,0	26 288,8	91 500,0
Selenium (Se)	mg/kg MS	<5.20	<5.00	<5.18	<5.00	<5.40	<5.00	<5.00	<5.21			
Thallium (Tl)	mg/kg MS	12,6	26,9	26,1	6,97	91,4	9,72	<5.00	36	26,1	30,0	91,4
<b>Zinc (Zn)</b>	mg/kg MS	2000	2440	3370	1670	2000	1270	1000	15500	2 000,0	3 656,3	15 500,0
<b>Mercure (Hg)</b>	mg/kg MS	1,49	3,41	1,78	1,18	3,97	0,88	0,79	7,7	1,6	2,7	7,7

		S1 - 6	S1 - 10	Médiane	Moyenne	Max
<b>SOUS-SECTEUR LATERAL</b>						
Tests	Unités					
<b>Antimoine (Sb)</b>	mg/kg MS	6,12	5,11	5,6	5,6	6,1
<b>Arsenic (As)</b>	mg/kg MS	161	111	136,0	136,0	161,0
<b>Baryum (Ba)</b>	mg/kg MS	34,5	17,8	26,2	26,2	34,5
<b>Cadmium (Cd)</b>	mg/kg MS	2,04	0,84	1,4	1,4	2,0
Chrome (Cr)	mg/kg MS	20,8	10,4	15,6	15,6	20,8
<b>Cuivre (Cu)</b>	mg/kg MS	18,7	12,8	15,8	15,8	18,7
Fer (Fe)	mg/kg MS	42500	19500	31 000,0	31 000,0	42 500,0
<b>Manganèse (Mn)</b>	mg/kg MS	1430	820	1 125,0	1 125,0	1 430,0
Nickel (Ni)	mg/kg MS	15,9	7,21	11,6	11,6	15,9
<b>Plomb (Pb)</b>	mg/kg MS	1600	698	1 149,0	1 149,0	1 600,0
Selenium (Se)	mg/kg MS	<5.12	<5.15			
Thallium (Tl)	mg/kg MS	<5.12	<5.15			
<b>Zinc (Zn)</b>	mg/kg MS	364	164	264,0	264,0	364,0
<b>Mercure (Hg)</b>	mg/kg MS	0,33	0,19	0,3	0,3	0,3

## ANNEXE 5

### SYNTHESE DES DONNEES TOXICOLOGIQUES

CETTE ANNEXE CONTIENT 1 PAGE



N° CAS	Composé	CHOIX CIRCULAIRE "BASIQUE" - ADULTES						CHOIX CIRCULAIRE "BASIQUE" - ENFANTS					
		Valeur NC	Organisme	Date de mise à jour	Valeur C	Organisme	Date de mise à jour	Valeur NC	Organisme	Date de mise à jour	Valeur C	Organisme	Date de mise à jour
7440382	arsenic	4,5E-04	FoBiG 2009 (choix INERIS 2010)	09/10/2015	1,5E+00	US-EPA 1998, OEHHA 2009 (choix INERIS 2010)	09/10/2015	4,5E-04	FoBiG 2009 (choix INERIS 2010)	09/10/2015	1,5E+00	US-EPA 1998, OEHHA 2009 (choix INERIS 2010)	09/10/2015
7440439	cadmium	3,6E-04	EFSA 2011 (INERIS 2013)	09/10/2015	-	INERIS 2013	09/10/2015	3,6E-04	EFSA 2011 (INERIS 2013)	09/10/2015	-	INERIS 2013	09/10/2015
7440508	cuivre	1,4E-01	RIVM 2000 (selon INERIS 2009)	09/10/2015	-	-	09/10/2015	1,4E-01	RIVM 2000 (selon INERIS 2009)	09/10/2015	-	-	09/10/2015
7439976	mercure inorganique	2,0E-03	OMS 2004	09/10/2015	-	-	09/10/2015	2,0E-03	OMS 2004	09/10/2015	-	-	09/10/2015
115093	mercure organique	1,0E-04	US EPA 2001	09/10/2015	-	-	09/10/2015	1,0E-04	US EPA 2001	09/10/2015	-	-	09/10/2015
7439921	plomb	6,3E-04	ANSES 2013	09/10/2015	-	-	09/10/2015	6,3E-04	ANSES 2013	09/10/2015	-	-	09/10/2015
7440666	zinc	3,0E-01	US EPA 2005	09/10/2015	-	-	09/10/2015	3,0E-01	US EPA 2005	09/10/2015	-	-	09/10/2015
7440360	antimoine	6,0E-03	OMS	13/10/2015	-	-	13/10/2015	6,0E-03	OMS	13/10/2015	-	-	13/10/2015
7440393	barium	2,0E-01	ATSDR 2007	18/09/2015	-	-	18/09/2015	2,0E-01	ATSDR 2007	18/09/2015	-	-	18/09/2015
7439965	manganese	4,7E-02	US-EPA 1996	17/09/2015	-	-	17/09/2015	4,7E-02	US-EPA 1996	17/09/2015	-	-	17/09/2015

## ANNEXE 6

### RESULTATS DES CALCULS D'IEM

CETTE ANNEXE CONTIENT 12 PAGES