

Etude d'imprégnation autour d'anciens sites miniers dans le Gard et échanges avec les parties prenantes : analyse et propositions d'un comité d'appui scientifique

Rédaction du rapport

Amandine Cochet¹, Clémence Fillol², Marie-Laure Bidondo³, Julie Chesneau³, Agnès Guillet³, Tek Ang Lim², Alain Le Tertre², Damien Mouly¹

¹ Direction des régions, Occitanie

² Direction santé environnement

³ Direction appui, traitements et analyses des données

Coordination de l'étude : Amandine Cochet, Clémence Fillol

Analyses statistiques : Alain Le Tertre

SIG : Agnès Guillet

Gestion des données : Julie Chesneau

Métérologie : Marie-Laure Bidondo, Marie Pécheux

Action juridiques, administratives et financières : Karine de Proft

Relecteur extérieur : Cécile Durand

Validation : Sébastien Denys (directeur de la DSE), Franck Golliot (Directeur adjoint de la Dire), Yann Le Strat (directeur de la Data)

Partenaires ayant contribué à l'étude :

Agence Régionale de Santé Occitanie : Coordination de l'enquête de terrain de mesures d'imprégnation

Association des infirmiers libéraux du bassin alsésien (AILBA) : Prélèvements biologiques

Laboratoire Cerba : Analyses biologiques

Geoderis : Prélèvements sols et poussières (sous-traitance à Socotec pour les poussières)

Eurofins : Analyses de sols

Laboratoire d'Etude et de Recherche en Environnement et Santé (LERES) : Analyses de poussières

Membres du comité d'appui à l'étude :

Gérard Lasfargues, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) (président du comité)

Ghislaine Bouvier, Université de Bordeaux, Institut de santé publique, d'épidémiologie et de développement (ISPED), unité Inserm U897

Guillaume Chauvet, École nationale de la statistique et de l'analyse de l'information (Ensa), UMR-6625 IRMAR

Alain Epelboin, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Muséum National d'Histoire Naturelle

Cyril Feidt, Université de Lorraine/Institut national de la recherche agronomique (INRA)

France Lert, Centre de recherche en épidémiologie et santé des populations (Cesp), Inserm U1018

Paule Vasseur, Université de Lorraine/Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Financeurs

Agence régionale de santé Occitanie, Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement Occitanie, Santé publique France

Remerciements

Nos remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de cette étude, en particulier aux participants à l'étude et aux parties prenantes.

Nous remercions également Cécile Durand pour sa relecture attentive du rapport, Agnès Verrier pour son expertise concernant la surveillance des plombémies et Edwige Bertrand pour les recherches bibliographiques.

Résumé

Dans le Gard, les sites de Carnoulès et Croix-de-Pallières ont hébergé une importante activité d'extraction de minerais métalliques jusqu'au siècle dernier. Des études environnementales ont mis en évidence des teneurs en plomb et en arsenic exceptionnellement élevées pour les deux sites, ainsi que des teneurs en cadmium élevées pour le site de la Croix-de-Pallières.

Afin de mieux comprendre les sources et modes d'exposition des populations riveraines de ces anciens sites miniers, Santé publique France a réalisé une étude d'imprégnation et s'est appuyée sur un comité d'appui externe pluridisciplinaire pour accompagner la transposition des résultats en propositions de gestion.

Cette étude avait pour objectifs de mesurer l'imprégnation des riverains, d'identifier les déterminants de l'imprégnation et de formuler des propositions adaptées au contexte local pour réduire les expositions.

Une étude transversale d'exposition biologique a été réalisée en population générale, à partir :

- de prélèvements biologiques pour le dosage des biomarqueurs (plombémies, arsenic et cadmium urinaires) ;
- de questionnaires sur les comportements et habitudes alimentaires ;
- de mesures environnementales dans les sols des jardins des participants et les poussières des logements.

L'inclusion s'est faite sur la base du volontariat et les facteurs de risque liés aux imprégnations au plomb, à l'arsenic et au cadmium ont été quantifiés à partir d'un modèle linéaire généralisé.

Le taux global de participation était de 23,5% (651/2774). Près d'un quart des participants présentaient une surimprégnation en arsenic par rapport aux données en population générale et 12% une surimprégnation en cadmium. Les niveaux d'imprégnation en plomb n'étaient pas différents de ceux observés au sein de la population française. Aucun cas de saturnisme infantile n'a été identifié.

En plus des déterminants classiques habituellement décrits dans la littérature (âge, sexe, consommation d'alcool et de tabac), les niveaux d'imprégnation étaient influencés par les concentrations en polluants dans les sols et la consommation de certains produits locaux (œufs, volailles, lapins, gibiers, champignons). Les concentrations en poussières n'étaient pas corrélées aux niveaux d'imprégnation des participants par contre, la fréquence de passage de la serpillière humide, proxy des concentrations dans les poussières, a été retrouvée associée à une diminution de l'imprégnation en plomb et en arsenic.

Le comité d'appui a souhaité compléter la démarche par la rencontre de différentes parties prenantes (élus, autorités locales, associatifs et représentants des riverains). Ces échanges ont permis de mieux cerner les enjeux et attentes au niveau des populations locales et d'adapter les propositions au plus près du terrain.

Trois catégories de propositions ont été dégagées de ce travail, des propositions :

- visant à réduire les expositions : au niveau de la gestion collective des sources de contamination, au niveau du comportement individuel (concernant les poussières dans les logements et l'alimentation) et en accompagnant les personnes par un dispositif spécifique ;
- d'ordre méthodologique : préférer les études multicentriques, intégrer en amont les parties prenantes, adapter le plan d'échantillonnage et améliorer les connaissances ;
- d'ordre organisationnel : impliquer les autorités sanitaires et les professionnels de santé et d'action sociale au tout début de l'étude, veiller à une meilleure coordination des services de l'Etat et de leurs opérateurs, nécessité d'une communication claire et transparente et veiller à harmoniser la gestion des différents sites de « l'après-mine » en France.

Table des matières

1.	Introduction	7
1.1.	Contexte environnemental	7
1.2.	Saisines de Santé publique France par l'Agence régionale de santé Occitanie	7
1.3.	Justification de la démarche	7
2.	Etude d'imprégnation	8
2.1.	Objectifs	8
2.2.	Problématique sanitaire	8
2.2.1.	Effets sanitaires du plomb et sources d'exposition	8
2.2.2.	Effets sanitaires de l'arsenic et sources d'exposition	9
2.2.3.	Effets sanitaires du cadmium et sources d'exposition	10
2.3.	Matériel et méthodes	10
2.3.1.	Type d'étude	10
2.3.2.	Zones, populations et période d'étude	10
2.3.3.	Recrutement des participants et recueil des données	12
2.3.3.1.	Information de la population	12
2.3.3.2.	Mesures biologiques	12
2.3.3.3.	Recueil des caractéristiques individuelles et données comportementales	15
2.3.3.4.	Mesures environnementales	15
2.3.4.	Gestion des données recueillies	16
2.3.5.	Analyses statistiques	17
2.3.5.1.	Analyses descriptives	17
2.3.5.2.	Représentations cartographiques	17
2.3.5.3.	Analyse des déterminants de l'exposition au plomb, au cadmium et à l'arsenic ..	18
2.3.6.	Aspects éthiques	19
2.3.6.1.	Consentement éclairé des participants à l'étude	19
2.3.6.2.	Mode de circulation des données	20
2.3.6.3.	Confidentialité	20
2.3.6.4.	Autorisations réglementaires	20
2.3.6.5.	Déontologie et communication des résultats	20
2.4.	Résultats	20
2.4.1.	Analyses descriptives	20
2.4.1.1.	Taux de réponse	20
2.4.1.2.	Représentativité	23
2.4.1.3.	Caractéristiques individuelles et données comportementales des participants ...	25
2.4.1.4.	Distribution des mesures d'imprégnation	26
2.4.1.5.	Distribution des mesures environnementales	33
2.4.2.	Analyse des facteurs environnementaux de l'imprégnation au plomb, au cadmium et à l'arsenic	38
2.5.	Discussion	48
2.5.1.	Synthèse des principaux résultats	48
2.5.2.	De la contamination de l'environnement aux effets sanitaires	48
2.5.3.	Limites méthodologiques de l'étude	49
2.5.3.1.	Participation et biais possibles	49
2.5.3.2.	Limites d'interprétation des mesures	49
2.5.3.3.	Limites de l'analyse statistique	51
3.	Recours à un comité d'appui	51
3.1.	Composition et modalités de fonctionnement	51
3.2.	Entretiens avec les parties prenantes	51
3.2.1.	Objectifs et déroulement	51
3.2.2.	Synthèse des échanges avec les parties prenantes	52
4.	Propositions	53
4.1.	Formulation et champ des propositions	53
4.2.	Propositions pour réduire les expositions	54

4.3. Propositions d'ordre méthodologique à prendre en compte pour d'autres situations similaires.....	55
4.4. Propositions organisationnelles	56
5. Références bibliographiques.....	57
6. Annexes.....	58

Abréviations

AILBA	Association des infirmiers libéraux du bassin alésien
ARS	Agence régionale de santé
As	Arsenic
Asi	Arsenic inorganique
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CCTIRS	Comité Consultatif sur le Traitement de l'Information en matière de Recherche dans le domaine de la Santé
Cd	Cadmium
Cire	Cellule d'intervention en région
CNIL	Commission nationale de l'informatique et des libertés
DGS	Direction générale de la santé
DMA	Acide diméthylarsinique
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
EDTA	Ethylène diamine tétraacétique
ENNS	Etude nationale Nutrition Santé
GEE	Generalized estimating equation (équation d'estimation généralisée)
GIP	Groupement d'intérêt public
GLM	Generalized Linear Model (modèle linéaire généralisé)
HAS	Haute autorité de santé
HCSP	Haut Conseil de la santé publique
ICP-AES	Inductively Coupled Plasma - Atomic emission spectrometry (spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif)
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (spectroscopie de masse à plasma à couplage inductif)
IEM	Interprétation de l'état des milieux
IMC	Indice de masse corporelle
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRS	Institut national de recherche et de sécurité
Insee	Institut national de la statistique et des études économiques
LOD	Limite de détection
LOQ	Limite de quantification
MICE	Multiple Imputation by Chained Equations (méthode d'imputation multiple par équations chaînées)
MMA	Acide mono- méthylarsonique
MS	Matière sèche
Pb	Plomb
RFL	Revenus fiscaux localisés
SpFrance	Santé publique France
TGI	Tribunal de grande instance

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte environnemental

Les communes gardoises de Saint-Sébastien-d'Aigrefeuille (site de Carnoulès) et de Saint-Félix-de-Pallières, Thoiras et Tornac (site de la Croix-de-Pallières) ont hébergé une importante activité d'extraction de minerais métalliques jusqu'au siècle dernier.

En application de la politique nationale du ministère en charge de l'environnement, des études d'interprétation de l'état des milieux (IEM) ont été réalisées en 2012 et 2013 pour les deux sites. Elles ont mis en évidence des teneurs environnementales en plomb et en arsenic exceptionnellement élevées pour les deux sites, ainsi que des teneurs en cadmium élevées pour le site de la Croix-de-Pallières. Les niveaux de contamination des sites de Carnoulès et Croix-de-Pallières sont en effet nettement supérieurs à ceux habituellement observés sur des sites naturellement riches en métaux lourds [1] (**Annexe 1**).

1.2. Saisines de Santé publique France par l'Agence régionale de santé Occitanie

Dans les suites des études environnementales IEM, l'Agence régionale de santé (ARS) Occitanie a saisi Santé publique France (SpFrance) pour demander une expertise sur les risques sanitaires encourus par les populations riveraines des anciens sites miniers de Carnoulès (saisine en 2012) et Croix-de-Pallières (saisine en 2013) (**Annexe 2**).

En réponse à ces saisines, SpFrance a préconisé (i) la réalisation d'une action de dépistage du saturnisme infantile et (ii) la réalisation de mesures d'imprégnation au plomb, à l'arsenic et au cadmium au sein des populations potentiellement exposées, ainsi qu'une analyse des déterminants de l'imprégnation.

1.3. Justification de la démarche

Une étude d'imprégnation permet d'objectiver l'exposition aux polluants mesurés en amont de l'apparition d'un effet éventuel sur la santé. Cette approche a été retenue pour les sites de Carnoulès et Croix-de-Pallières, d'une part car elle permet d'identifier des niveaux d'expositions pouvant justifier la mise en place de mesures de gestion sans attendre l'apparition d'effets sanitaires éventuels, d'autre part car les effectifs de population dans les communes concernées sont trop faibles (manque de puissance statistique) pour étudier la relation entre une exposition environnementale et la survenue de maladies (autre approche épidémiologique envisageable dans le cas d'une pollution environnementale).

Les concentrations en plomb mesurées dans l'environnement des anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières sont largement supérieures à la valeur de contamination à partir de laquelle le Haut Conseil de la santé publique (HCSP) recommande la réalisation d'un dépistage du saturnisme dans la population des enfants de moins de 7 ans et chez les femmes enceintes ou envisageant une grossesse à court terme (dans les 6 mois) (300 mg/kg) [2]. SpFrance a ainsi préconisé la mise en œuvre d'un dépistage organisé du saturnisme au sein des populations riveraines des deux sites.

Les très fortes teneurs en cadmium mesurées sur le site de La Croix-de-Pallières justifient la mise en place de mesures de cadmiurie afin d'identifier une surimprégnation éventuelle des riverains par rapport aux niveaux d'imprégnation en cadmium mesurés dans la population générale. Les personnes présentant des niveaux de cadmium urinaire à partir desquels sont susceptibles d'apparaître des anomalies tubulaires rénales ont pu bénéficier d'un dépistage des atteintes rénales et, le cas échéant, d'une prise en charge médicale (diagnostique et thérapeutique) et de mesures individuelles de réduction des expositions.

Concernant l'arsenic, bien qu'il n'existe pas de bénéfice individuel direct lié à la mesure de l'imprégnation (dosages non prédictifs de l'apparition de pathologies et absence de valeur de référence sanitaire), SpFrance a préconisé la réalisation d'un dosage des concentrations en arsenic afin d'étudier les déterminants de l'exposition.

Etant donné la similitude des actions à mener, la proximité géographique des sites de Carnoulès et Croix-de-Pallières (<10 km) et l'effectif de population permanente cumulée (environ 2800 habitants), l'ARS Occitanie et SpFrance ont jugé opportun de mutualiser l'intervention sanitaire sur les deux sites.

L'ARS Occitanie a ainsi coordonné la mise en œuvre d'une campagne de mesures d'imprégnation au plomb et à l'arsenic pour les populations riveraines des anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, ainsi que des mesures d'imprégnation au cadmium pour les riverains du site de Croix-de-Pallières. Ce dispositif a permis aux participants de connaître leur niveau d'imprégnation au plomb, à l'arsenic et au cadmium et de bénéficier d'une prise en charge médicale si nécessaire.

L'analyse des déterminants de l'imprégnation a été confiée à SpFrance qui s'est appuyée sur un comité d'appui pour l'analyse et l'interprétation des données de l'étude d'imprégnation ainsi que la formulation des propositions émises à l'issue de l'étude.

La mise en œuvre de l'étude d'imprégnation est intervenue dans un contexte sensible, avec une multiplicité des enjeux locaux (sanitaires, environnementaux, fonciers, juridiques...) et une pression médiatique importante. Certaines personnalités locales sont très actives pour dénoncer la pollution, l'insuffisance de mesures de gestion sur le site de Croix-de-Pallières et sont critiques vis-à-vis des services de l'Etat. Le site de Croix-de-Pallières a fait l'objet d'une forte médiatisation avec notamment la diffusion d'une émission « Pièces à conviction. Cévennes : révélations sur une pollution cachée » en janvier 2016, relayée par de nombreux articles dans la presse nationale et locale.

Dans ce contexte, le comité d'appui a souhaité compléter son expertise par une approche qualitative et a rencontré différentes parties prenantes sur le dossier.

Les parties suivantes distinguent ce qui relève de l'étude d'imprégnation (partie 2) et ce qui relève du recours au comité d'appui (partie 3).

2. ETUDE D'IMPREGNATION

2.1. Objectifs

L'objectif principal de cette étude est de mieux comprendre les sources et modes d'exposition des populations locales.

Les objectifs spécifiques sont :

- Décrire les niveaux d'imprégnation observés et identifier des groupes de population particulièrement exposés au plomb, à l'arsenic (pour les deux sites) et au cadmium (uniquement pour le site de la Croix de Pallières) ;
- Identifier les déterminants de l'imprégnation au plomb, à l'arsenic et au cadmium (uniquement pour le site de la Croix de Pallières) ;
- Formuler des propositions adaptées au contexte local pour réduire les expositions.

2.2. Problématique sanitaire

L'étude a porté sur les trois éléments minéraux les plus présents dans l'environnement d'après les résultats des études IEM et potentiellement les plus à risque pour la santé du fait de leur caractère bioaccumulable et de leur toxicité: le plomb, l'arsenic et le cadmium.

2.2.1. Effets sanitaires du plomb et sources d'exposition

Les effets toxiques du plomb [2] sont principalement neurologiques, hématologiques et rénaux. L'intoxication au plomb (saturnisme) est souvent asymptomatique et lorsqu'on décèle des signes cliniques, ils sont tardifs et non spécifiques (troubles du comportement, de l'humeur, de la motricité, baisse des performances scolaires, douleurs abdominales, diarrhées, constipation, anorexie, pâleur, asthénie).

Les enfants de moins de 6 ans et les femmes enceintes sont les catégories de population les plus vulnérables. Les enfants sont plus à risque du fait de leur coefficient d'absorption digestive élevé, d'un risque d'exposition plus important liée à l'activité main-bouche et parce que leur système nerveux est en développement ; les femmes enceintes le sont également du fait des risques encourus pour elles-mêmes (hypertension gravidique) et pour le fœtus (avortement, prématurité, malformations congénitales, et toxicité retardée notamment sous la forme de retards psychomoteurs).

Chez les adolescents et les adultes, l'imprégnation au plomb peut être à l'origine d'une augmentation des risques de maladie rénale chronique et d'hypertension artérielle, d'une altération de la fertilité masculine, d'une diminution du débit de filtration glomérulaire et d'une augmentation de la pression artérielle [3].

Les données épidémiologiques disponibles indiquent, en outre, que les effets neurologiques et les effets sur le développement staturo-pondéral et sexuel, ainsi que sur l'acuité auditive, chez le jeune enfant, sont probablement sans seuil ; de même que les effets rénaux chez l'adulte et l'adolescent et les effets cardio-vasculaires chez l'adulte [3].

Le plomb a une grande variété d'applications industrielles : dans la fabrication de batteries, de soudures (alliages Pb/Sn), la production et l'utilisation d'alliages métalliques (dont certains types de laiton, bronze et acier), de matières plastiques (comme pigment ou stabilisant), de verre (surtout le cristal), de munitions (dont plombs de chasse), d'émaux (céramique, médailles), d'anciens caractères d'imprimerie (typographie, linotypie) et d'isolants contre le bruit, les vibrations et les rayonnements ionisants. On le retrouve également dans des pigments, des vernis, des mastics ou des peintures (comme le minium) dont l'utilisation n'a pas cessé de diminuer au cours des dernières décennies [4].

Pour les enfants, les sources majeures d'exposition sont la peinture au plomb, la poussière et la contamination du sol. Chez les adultes, les expositions principales ont tendance à être limitées à certaines sources professionnelles et de loisirs. Hormis le cas d'expositions professionnelles (essentiellement soudeurs, peintres), l'ingestion est en pratique le principal mode d'entrée du plomb dans l'organisme. Pour la population générale, les principales sources d'exposition au plomb sont l'alimentation, l'eau de boisson et la poussière. Les aliments les plus contaminés par le plomb sont les crustacés, les mollusques, les abats, mais aussi le pain, le sucre et ses dérivés. Les situations qui favorisent une forte exposition au plomb, hormis les expositions professionnelles, sont de résider dans un habitat ancien (anciennes peintures au plomb et canalisations en plomb) et de pratiquer certains loisirs tels que le tir, la chasse, certains types d'artisanat (avec peintures, vernis, émaux, poterie, vitraux...) [4].

2.2.2. Effets sanitaires de l'arsenic et sources d'exposition

La connaissance des effets de l'arsenic et de ses composés repose sur les résultats d'études réalisées en milieu professionnel et pour des populations exposées à des niveaux très élevés en arsenic dans l'eau de boisson [5,6].

L'arsenic a des effets cancérogènes (cancers pulmonaires, cutanés, hépatiques, des voies urinaires) [7], reprotoxiques (malformations congénitales, retard de croissance intra-utérins) ou systémiques (hyperkératoses, atteintes cardiovasculaires, neurologiques ou hématologiques).

L'état des connaissances sur le lien entre les concentrations dans les milieux biologiques et la toxicité de l'arsenic et de ses composés reste encore limité pour les faibles doses.

Les sources liées aux activités humaines sont principalement la fonderie et la métallurgie de métaux non ferreux et l'utilisation d'énergie fossile, en particulier du charbon. L'arsenic peut ainsi se retrouver dans l'eau ou les sols à partir de sites industriels ou de traitement des déchets. Il a de nombreux usages commerciaux. Il est utilisé dans la production d'alliages métalliques, du verre, dans la fabrication de composants électroniques, comme pigment (émaux, peinture, verre), pour le tannage des peaux et la naturalisation des animaux, pour le traitement protecteur du bois (CCA, association cuivre-chrome-arsenic), et comme médicament chez l'homme et l'animal. En agriculture, les composés arséniés ont principalement été utilisés comme insecticides, herbicides, fongicides. La fumée de cigarette contient de l'arsenic. L'exposition de la population générale à l'arsenic est principalement alimentaire. Bien que la concentration d'arsenic varie selon le type d'aliment, dans la majorité des cas, la concentration d'arsenic inorganique présente dans les aliments est faible. Contrairement à l'arsenic organique des produits de la mer, l'arsenic apporté par le sol et l'eau est inorganique et de toxicité élevée [4].

2.2.3. Effets sanitaires du cadmium et sources d'exposition

Les effets sur la santé de l'exposition au cadmium sont historiquement connus à partir d'études menées auprès de salariés exposés par inhalation aux vapeurs de cadmium. Lors d'ingestion de cadmium, les principaux organes cibles sont le système osseux et le rein. L'effet toxique du cadmium est cumulatif. Il est responsable de maladies rénales (néphropathies tubulaires) pouvant évoluer vers une insuffisance rénale chronique, d'atteintes osseuses (ostéoporose, ostéomalacie) consécutives à des troubles du métabolisme phosphocalcique, ainsi que d'atteintes pulmonaires. Le risque de cancer (pulmonaire et prostatique) est également établi [8].

L'exposition conjointe au cadmium et à l'arsenic d'une part, au cadmium et au plomb d'autre part, semble avoir un effet potentialisateur notamment sur le rein.

Le cadmium a été abondamment utilisé pour protéger l'acier contre la corrosion (cadmiage). On s'en sert dans de nombreux alliages, pour la fabrication de piles et batteries (Ni-Cd), de câbles, de roulements à bille, de colorants et comme stabilisant pour les matières plastiques. Le cadmium est présent dans les minerais de zinc, de plomb et de cuivre et il est souvent associé au plomb et au zinc lors de pollutions d'origine industrielle. Ainsi, c'est un contaminant qui se retrouve dans les différents compartiments de l'environnement, mais en particulier dans le sol, du fait de l'érosion, des activités industrielles humaines (sous-produits de l'industrie des métaux non ferreux) et des pratiques agricoles (engrais phosphatés, épandage de boues d'épuration) ; ces dernières contribuent largement à l'enrichissement du sol en cadmium et donc à la contamination des terres agricoles. Il se retrouve dans les effluents de nombreux processus de combustion tels que l'incinération des déchets. Le cadmium pénètre facilement dans les végétaux par leurs racines et il entre ainsi dans la chaîne alimentaire [4].

Pour la population générale, la principale source de cadmium est l'alimentation. Dans la mesure où il est bien assimilé par les végétaux et qu'il se concentre dans les abats et les produits de la mer, on le retrouve en particulier dans les légumes, les céréales et certains aliments d'origine animale comme les abats, les coquillages, les crustacés et les poissons. La pollution industrielle et le tabagisme peuvent sensiblement augmenter les doses de cadmium absorbées. En milieu professionnel, les principales sources de contamination sont l'exposition aux vapeurs et aux fumées [4].

2.3. Matériel et méthodes

2.3.1. Type d'étude

Une étude transversale d'exposition biologique a été réalisée en population générale, à partir :

- de prélèvements biologiques pour le dosage des biomarqueurs ;
- de questionnaires ;
- de mesures environnementales.

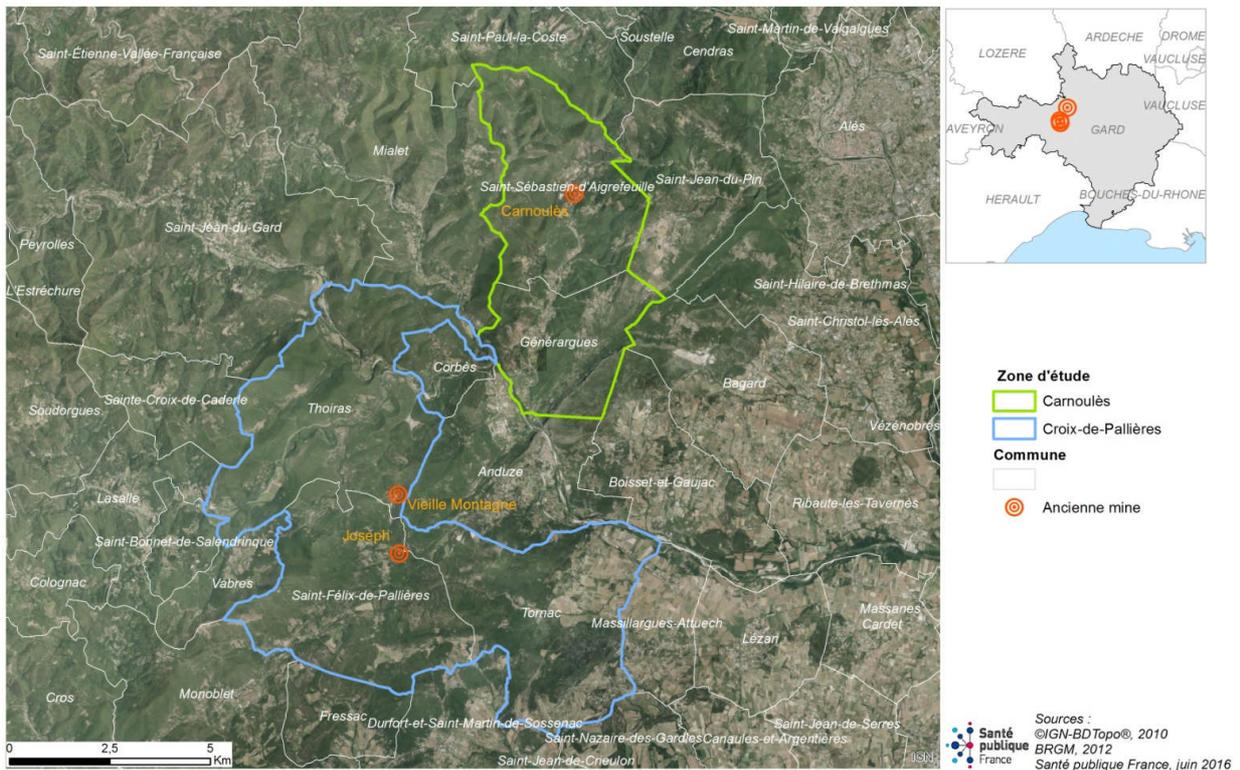
2.3.2. Zones, populations et période d'étude

Les zones d'étude ont été délimitées à partir des zones des études IEM, déterminées en fonction des données historiques d'activités et des caractéristiques géomorphologiques (bassins versants...) et usages constatés. Ainsi, la zone d'étude du site de la Croix de Pallières comprend les communes de St Félix de Pallières, Thoiras et Tornac et celle du site de Carnoulès comprend la commune de St Sébastien d'Aigrefeuille. Pour l'étude d'imprégnation, la commune de Générargues a été ajoutée à la zone d'étude pour le site de Carnoulès car en aval immédiat de St Sébastien d'Aigrefeuille.

Deux zones d'étude ont été définies en fonction de la localisation des anciens sites miniers (Figure 1) :

- Zone 1 (site de Carnoulès) : communes de Saint-Sébastien d'Aigrefeuille et Générargues ;
- Zone 2 (site de la Croix-de-Pallières) : communes de Saint-Félix-de-Pallières, Thoiras et Tornac.

Figure 1 : Zones d'étude autour des anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard.



Les deux zones regroupaient au total près de 2800 personnes (Tableau 1).

Tableau 1 : Populations d'étude. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard (source Insee, RP 2012).

Nom de la commune	Population municipale (tous âges)	Enfants <15 ans	Enfants <6 ans
Site de Carnoulès (zone 1)			
	Effectif	Effectif	Effectif
Généragues	709	108	48
Saint-Sébastien-d'Aigrefeuille	529	74	33
Total site de Carnoulès	1238	182	81
Site de Croix-de-Pallières (zone 2)			
Saint-Félix-de-Pallières	219	23	6
Thoiras	440	82	29
Tornac	877	144	38
Total site de Croix-de-Pallières	1 536	248	73
Total 2 sites	2 774	431	154

La participation à l'étude a été proposée, sur la base du volontariat, à l'ensemble des adultes résidant et des enfants résidant dans l'une des communes des deux zones d'étude.

Critère d'exclusion pour l'étude d'imprégnation au plomb :

- nourrissons de moins de 6 mois. En effet, la plombémie nécessite un acte invasif (prise de sang) difficilement acceptable pour cette tranche d'âge. De plus, ces enfants sont peu exposés par l'ingestion de sol et de poussières.

Critères d'exclusion pour l'étude d'imprégnation à l'arsenic et au cadmium (pour des raisons pratiques de mise en œuvre des prélèvements urinaires) :

- enfants de moins de 2 ans ;
- personnes incontinentes ou prenant un traitement pour incontinence urinaire.

La période d'étude (inclusion des participants) allait d'octobre à décembre 2015.

2.3.3. Recrutement des participants et recueil des données

2.3.3.1. *Information de la population*

Une campagne d'information annonçant le dispositif sanitaire proposé par l'ARS Occitanie et l'étude d'imprégnation a été coordonnée par l'ARS en collaboration directe avec les acteurs locaux (rencontres des infirmiers et médecins libéraux du secteur, maires, associations, réunions publiques, affiches, communiqués de presse, courrier d'information dans les boîtes aux lettres de l'ensemble des foyers des zones d'étude) (**Annexe 3**).

2.3.3.2. *Mesures biologiques*

a) Marqueurs biologiques et choix des valeurs de référence

Les premières valeurs biologiques de référence d'exposition pour la population française ont été proposées à partir du volet environnemental de l'étude nationale nutrition santé (ENNS) [4]. Ces valeurs ont été construites à partir de valeur arrondie de la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95% du 95^e percentile. Ces valeurs ne sont pas des valeurs à partir desquelles s'exprime un effet sanitaire ; ce sont plutôt des valeurs - guide qui doivent permettre d'attirer l'attention sur l'exposition, ses sources et ses possibles risques sur la santé. La définition et la stratégie d'élaboration de ces valeurs est décrite plus précisément dans un rapport disponible sur le site de SpFrance : <http://invs.santepubliquefrance.fr/Publications-et-outils/Rapports-et-syntheses/Environnement-et-sante/2017/Elaboration-de-valeurs-de-referance-d-exposition-a-partir-de-donnees-de-biosurveillance>.

Les valeurs de référence d'exposition françaises sont disponibles pour des populations d'adultes (18-74 ans ou femmes enceintes). Il n'existe jusqu'à présent pas de valeurs de référence d'exposition établies chez les enfants. Dans la suite du paragraphe, les valeurs de référence d'exposition sont décrites pour les populations adultes pour les 3 polluants et lorsqu'une valeur de référence sanitaire existe, celle-ci est également mentionnée.

Marqueur biologique pour l'étude d'imprégnation au plomb et le dépistage du saturnisme

L'indicateur retenu pour évaluer l'imprégnation par le plomb est la plombémie (concentration en plomb dans le sang) mesurée sur sang veineux. La plombémie reflète un état ponctuel d'équilibre entre un processus d'imprégnation éventuellement en cours, le stockage ou le déstockage du plomb osseux, et l'élimination (excrétion, phanères, sueur). Après arrêt d'un processus d'intoxication, la plombémie diminue avec une demi-vie de 20 à 30 jours jusqu'à un nouvel équilibre dont le niveau est fonction du stock osseux (demi-vie de 10 à 20 ans).

La valeur de référence d'exposition de la plombémie proposée chez les femmes et les hommes de moins de 40 ans est de 70 µg/L [4]. Chez les hommes de 40 ans et plus, elle est de 120 µg/L.

La valeur sanitaire seuil de plombémie retenue pour définir un cas de saturnisme infantile (enfant mineur) est de 50 µg/L (arrêté du 8 juin 2015 modifiant le modèle de la fiche de notification figurant à l'annexe 27 de l'arrêté du 22 août 2011 relatif à la notification obligatoire des maladies infectieuses et autres maladies mentionnées à l'article D. 3113-7 du code de la santé publique).

Cette valeur de 50 µg/L correspond au niveau d'intervention défini par le HCSP pour la réalisation d'une enquête environnementale et la mise en œuvre de mesures collectives et individuelles [2]. Le HCSP propose également un niveau de vigilance pour les plombémies égales ou supérieures à 25 µg/L ; son dépassement indique l'existence probable d'au moins une source d'exposition au plomb dans l'environnement et justifie une information des familles sur les dangers du plomb et les sources usuelles d'imprégnation, ainsi qu'une

surveillance biologique rapprochée, accompagnée de conseils hygiéno-diététiques visant à diminuer l'exposition.

Marqueur biologique pour l'étude d'imprégnation au cadmium

L'indicateur biologique d'exposition retenu est la cadmiurie (concentration en cadmium dans les urines). La cadmiurie est bien corrélée à la charge rénale en cadmium et est généralement utilisée comme premier indicateur biologique de l'exposition au cadmium. Elle reflète l'exposition chronique et la charge corporelle tant que la fonction rénale est normale et que les sites de stockage ne sont pas saturés. Lors de faibles niveaux d'exposition, la concentration urinaire du cadmium reflète essentiellement la charge corporelle, tandis qu'à des niveaux d'exposition plus élevés, elle reflète davantage l'exposition récente que la charge corporelle. Son élimination se fait surtout par voie urinaire et est très lente (plusieurs années). La cadmiurie est exprimée en μg de cadmium/g de créatinine pour tenir compte de la diurèse.

Les valeurs de référence d'exposition pour la population française adulte découlant de l'étude ENNS [4] sont :

- pour les personnes adultes de moins de 40 ans : 0,5 $\mu\text{g/g}$ de créatinine ;
- pour les personnes adultes de plus de 40 ans : 0,7 $\mu\text{g/g}$ de créatinine chez les hommes et 1,2 $\mu\text{g/g}$ de créatinine chez les femmes.

En l'absence de valeur de référence dans la population française de moins de 18 ans, la valeur de 0,5 $\mu\text{g/g}$ de créatine a été utilisée pour les enfants.

Les seuils sanitaires de cadmium urinaire à partir desquels apparaissent des anomalies tubulaires rénales ne font pas l'objet d'un consensus. Des études ont montré la présence d'altérations rénales à partir de 2 μg de cadmium excrété par 24h [9-10]. En France, l'Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS) préconise une surveillance de l'atteinte rénale en médecine du travail pour les valeurs supérieures à 2 μg de cadmium/g de créatinine [11]. Cependant, dans l'étude Cassiopée menée à Viviez dans l'Aveyron [12], parmi les 19 atteintes rénales dépistées, 17 personnes présentaient une cadmiurie comprise entre 1 et 2 $\mu\text{g/g}$ de créatinine.

Marqueur biologique pour l'étude d'imprégnation à l'arsenic

On distingue l'arsenic inorganique (ou minéral), d'origine environnementale et industrielle, toxique par voies respiratoire et digestive, de l'arsenic organique d'origine alimentaire très faiblement toxique, qui transite simplement dans l'organisme avant d'être éliminé rapidement dans les urines. La principale source alimentaire d'arsenic organique est constituée par les poissons de mer et les coquillages. L'arsenic inorganique (Asi) est métabolisé au niveau du foie en acide monométhylarsinique (MMA) et en acide diméthylarsinique (DMA). Ces métabolites et une fraction de l'arsenic inorganique absorbé sont excrétés dans les urines. Environ 70% des composés inorganiques absorbés sont rapidement éliminés dans les urines (demi-vie de 2 à 6 jours), sous forme de MMA pour 25% et de DMA pour 50%.

Le dosage d'arsenic urinaire représentant la somme de l'arsenic inorganique (Asi), de l'acide méthylarsonique (MMA) et de l'acide diméthylarsinique (DMA) dans l'urine est l'indicateur de choix de l'exposition à l'arsenic inorganique.

Les teneurs mesurées dans les urines sont le reflet d'une exposition récente (derniers jours). Il est recommandé de ne pas consommer de poissons de mer ni de crustacés au cours des 72h précédant le prélèvement d'urines car cette consommation peut entraîner une augmentation de DMA dans les urines [13]. Chez les individus non professionnellement exposés à l'arsenic et ne vivant pas dans une région contaminée, la somme des concentrations Asi+MMA+DMA est généralement inférieure à 20 $\mu\text{g/g}$ de créatinine.

La valeur de référence d'exposition pour la population française adulte découlant de l'étude ENNS [4] est de 10 $\mu\text{g/g}$ de créatinine.

En l'absence de valeur de référence dans la population française de moins de 18 ans, la valeur de 10 $\mu\text{g/g}$ de créatine a été utilisée pour les enfants.

b) Modalités de prélèvements

L'ARS Occitanie a passé une convention avec AILBA, Association des infirmiers libéraux du bassin alésien, pour la réalisation des prélèvements biologiques.

Du 12 octobre 2015 au 31 décembre 2015, une équipe d'infirmiers a assuré une permanence une fois par semaine dans chacune des cinq communes des zones d'étude, soit une permanence chaque jour ouvré pendant toute la période, ainsi que 2 samedis pour permettre la participation du plus grand nombre.

Les participants volontaires ont été invités à prendre rendez-vous au préalable via un numéro dédié et à récupérer un flacon en mairie pour le recueil des urines. Les précautions à prendre pour obtenir un prélèvement exempt de source d'erreur de mesure (ne pas consommer de poisson et de fruits de mer 72 heures avant le prélèvement urinaire et placer les urines du matin au réfrigérateur à +4°C) leur ont été précisées.

Pour les personnes ne pouvant se déplacer sur l'un des lieux de prélèvements, un infirmier s'est rendu à domicile.

Prélèvements sanguins pour l'étude d'imprégnation au plomb et le dépistage du saturnisme

Les prélèvements sanguins ont été effectués par un infirmier (V = 1 mL au minimum). Les tubes ont été enregistrés et étiquetés au moyen du numéro de confidentialité. Les échantillons ont été placés dans une glacière et transportés, dans les 24h, dans un laboratoire de proximité pour y être stockés à -20°C. Ils ont ensuite été transportés, à -20 °C, vers le laboratoire de dosage par un transporteur spécialisé, avec un délai maximum de 48h entre l'enlèvement auprès du laboratoire de stockage et la livraison au laboratoire doseur.

Prélèvements urinaires pour les études d'imprégnation au cadmium et à l'arsenic

Le recueil des premières urines du matin était effectué dans un flacon de 50 mL (5 à 10 mL nécessaires pour les analyses) à conserver au réfrigérateur et à remettre le jour même à l'infirmier. Les flacons ont été enregistrés et étiquetés au moyen du numéro de confidentialité. Les échantillons ont été stockés, dans les 24h, à -20°C dans un laboratoire de proximité et transportés à -20 °C vers le laboratoire de dosage par un transporteur spécialisé, avec un délai maximum de 48h entre l'enlèvement auprès du laboratoire de stockage et la livraison au laboratoire doseur.

c) Analyses de laboratoire

Après réponse à un appel d'offres passé par l'ARS Occitanie selon une procédure conforme au code des marchés publics, le laboratoire Cerba¹ a été retenu pour la réalisation des dosages.

Le dosage des plombémies était effectué par ICP-MS (Spectroscopie de masse à plasma à couplage inductif) en milieu acide (HNO₃), à partir du prélèvement de sang total conditionné dans des tubes contenant de l'éthylène diamine tétraacétique (EDTA), avec l'utilisation d'un standard interne d'iridium et un étalonnage sur 5 concentrations. Les limites de détection et de quantification étaient respectivement de 0,1 µg/L et 0,2 µg/L.

Le dosage de l'arsenic était effectué par ICP-MS en milieu acide (HNO₃), à partir du prélèvement d'urine conditionnée dans des tubes en polypropylène, avec l'utilisation d'un standard interne de germanium et un étalonnage sur 5 concentrations. Les limites de détection (LOD) et de quantification (LOQ) étaient respectivement de 0,2 µg/L et 1 µg/L.

Le dosage du cadmium était effectué par ICP-MS en présence de butanol et d'ammoniac avec l'utilisation de standards internes (Germanium, Iridium, Rhodium, Scandium, Indium) et un étalonnage sur 5 concentrations à partir du prélèvement d'urine conditionnée dans des tubes en polypropylène. Les LOD et LOQ étaient respectivement de 0,1 µg/L et 0,2 µg/L.

Les prélèvements d'urine devant faire l'objet d'un dosage de cadmium (uniquement ceux des riverains du site de la Croix-de-Pallières) étaient identifiables à partir du premier chiffre du code de confidentialité reporté sur les tubes.

¹ Le laboratoire Cerba est accrédité COFRAC n°8-0945, Examens Médicaux selon la norme NF EN ISO 15189.

La créatinine urinaire était analysée par la méthode de Jaffé et exprimée en g/L. Les résultats de cadmium et arsenic urinaires sont exprimés en µg/L puis en µg/g de créatinine.

2.3.3.3. *Recueil des caractéristiques individuelles et données comportementales*

Des questionnaires ont été administrés en face à face par un infirmier, au moment du recueil des prélèvements biologiques, afin de recueillir des informations sur les modalités d'exposition des participants aux métaux lourds.

Un questionnaire « Foyer » permettait de renseigner les caractéristiques de l'habitat (commune, type d'habitat, surface, âge du logement, présence d'un jardin, d'un puits, d'un animal domestique, entretien du logement...) et du ménage (composition, diplôme, emploi...).

Des questionnaires « Adulte » (à partir de 15 ans) et « Enfant » (moins de 15 ans) comprenaient des questions détaillées sur les caractéristiques individuelles des participants (données socio-démographiques, état de santé déclaré, données de mesures corporelles), leurs comportements et habitudes (alimentation, tabagisme, consommation d'alcool, expositions de loisirs ou professionnelles,...) (**Annexe 4**).

2.3.3.4. *Mesures environnementales*

Les polluants mesurés dans les matrices biologiques des participants ont également été mesurés dans des matrices environnementales à proximité de leurs habitations, le plomb et l'arsenic sur les deux sites de Carnoulès et de Croix-de-Palières (zones 1 et 2), le cadmium uniquement sur le site de Croix-de-Palières (zone 2).

a) Dans les sols

Les prélèvements de sols ont été effectués, de septembre à octobre 2016, chez les personnes ayant accepté des investigations environnementales à leur domicile.

Cette campagne de prélèvements a été menée par Geoderis, Groupement d'Intérêt Public (GIP) constitué par le BRGM et l'INERIS qui apporte à l'Etat (administrations centrales et services déconcentrés, en particulier les DREAL) une assistance et expertise en matière d'après-mine.

Des prélèvements composites (plusieurs prélèvements effectués selon les mêmes modalités de volume, profondeur (0-30 cm), répartis de manière uniforme sur une zone homogène) ont été réalisés sur les parcelles des riverains puis poolés par parcelle pour analyses. Les prélèvements ont été reportés sur un Système d'information géographique (QGis) sur un fond BD ORTHO®, avec une précision au mètre.

Une fraction de cet échantillon a ensuite été envoyée au laboratoire Eurofins à qui a été confiée l'analyse par ICP-AES (spectrométrie d'émission atomique avec plasma couplé par induction) avec minéralisation à l'eau régale.

Le plomb, l'arsenic et le cadmium ont été analysés dans ces échantillons et les résultats sont exprimés en mg/kg MS (matière sèche).

La LOQ du plomb dans les sols était de 5 mg/kg MS, avec une incertitude d'environ 15 %.

La LOQ de l'arsenic dans les sols était de 1 mg/kg MS, avec une incertitude d'environ 45 %.

La LOQ du cadmium dans les sols était de 0,4 mg/kg MS, avec une incertitude d'environ 40 %.

b) Dans les puits ou forages individuels

Des prélèvements d'eaux ont également été réalisés, entre septembre et octobre 2016, chez les riverains possédant un puits ou forage sur leur parcelle et ayant donné leur accord pour cette analyse par ICP-MS. Les résultats des analyses sans filtration sont exprimés en µg/L. La limite de quantification du plomb dans l'eau était de 0,5 µg/L, avec une incertitude d'environ 25%.

La LOQ de l'arsenic dans l'eau était de 0,2 µg/L, avec une incertitude d'environ 20%.

La LOQ du cadmium dans l'eau était de 0,2 µg/L, avec une incertitude d'environ 20%.

Les limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine sont de 10 µg/L pour le plomb et l'arsenic et de 5 µg/L pour le cadmium [14].

c) Dans les poussières des logements

Les prélèvements de poussières ont été effectués, de mars à mai 2017, chez les personnes ayant accepté des investigations environnementales à leur domicile.

Dans chaque foyer, un prélèvement de poussières dans la pièce de vie a été réalisé ainsi qu'un échantillon témoin pour vérifier une éventuelle contamination des échantillons lors de l'acheminement au laboratoire. Lorsque le foyer comprenait un enfant inclus dans l'étude, un prélèvement supplémentaire était effectué dans la chambre de celui-ci. L'échantillon était prélevé à l'aide d'une lingette humidifiée à l'endroit du sol le plus approprié en fonction de la zone la plus fréquentée ou par défaut au centre de la pièce. Le préleveur s'équipait avec des sur-chaussures et des gants en nitrile afin d'éviter toute contamination extérieure. Un gabarit en carton (cadre de 33,3 x 33,3 cm) a permis d'échantillonner une surface de sol identique pour chaque prélèvement, en déplaçant la lingette en S verticalement puis horizontalement et enfin en essuyant les contours du cadre. Chaque lingette était ensuite placée dans un tube en polypropylène préalablement rincé avec de l'eau acidifiée à 0,5% d'acide nitrique, puis étiqueté. Une fiche de prélèvement était remplie par foyer avec le numéro du lot de lingette, la localisation des points de prélèvement dans le logement et dans la pièce, la nature de la surface sur laquelle s'effectuaient les prélèvements, la surface approximative des pièces investiguées.

Lors de l'analyse en laboratoire, les lingettes ont subi deux étapes de minéralisation et les deux minéralisats ont ensuite été analysés par ICP-MS (7900 Agilent). Le dosage réalisé sur la première minéralisation, appelée acido-soluble, permettait de simuler des conditions proches de celles rencontrées dans l'estomac. La fraction acido-soluble permet d'approcher une bioaccessibilité gastrique. Un second dosage dit pseudo total a également été réalisé. Le résultat des 2 minéralisations permet de calculer la concentration totale des éléments présents dans la poussière retenue dans une lingette.

Chaque série d'analyse comprenait :

- un blanc réactif utilisé pour la calibration
- une gamme d'étalonnage
- un blanc tube laboratoire 10 mL
- un échantillon certifié nist 1640
- des blancs de minéralisation
- un contrôle poussière SRM 2583 ou un contrôle sol CRM SS1
- les échantillons et les blancs terrains correspondants
- les points de gamme 4 et 5 analysés tous les 10 échantillons

Les étalons et matériaux de référence utilisés étaient commercialisés par Analab, Techlab ou SCP Science. Les résultats sont exprimés en µg/m².

Les LOQ du plomb acido-soluble et du plomb total étaient respectivement de 0.7 µg/m² et 1.6 µg/m².

Les LOQ de l'arsenic acido-soluble et de l'arsenic total étaient respectivement de 0.3 µg/m² et 0.6 µg/m².

Les LOQ du cadmium acido-soluble et du cadmium total étaient respectivement de 0.4 µg/m² et 0.8 µg/m².

2.3.4. Gestion des données recueillies

Un contrôle qualité de la saisie des données questionnaires a été effectué sur l'ensemble des variables pour 10% des questionnaires individuels « Adulte » et « Enfant », à partir d'un tirage aléatoire. Les questionnaires « Foyer » correspondants ont également été contrôlés.

Des contrôles de cohérence ont été effectués sur les données issues des questionnaires. Ces contrôles étaient de deux types, le premier permettant de contrôler la cohérence entre les réponses des questions d'un même questionnaire et le second la cohérence entre certaines informations redondantes dans les questionnaires Foyer et les questionnaires Adulte ou Enfant.

Les prélèvements des personnes résidant hors zone d'étude (n=24) ainsi que les échantillons pour lesquels la créatinine était inférieure à 0,3 g/L (n=41) ou supérieure à 3 g/L (n=7) ont été exclus de l'analyse [15].

Concernant les modèles construits pour l'analyse de l'arsenic chez les adultes, ont également été exclus, les échantillons des personnes ayant consommé des produits de la mer dans les 3 jours précédant le prélèvement (n= 156).

Traitement des données censurées à gauche

Pour chaque biomarqueur de cette étude, la LOD et la LOQ étaient constantes pour l'ensemble des échantillons analysés. Certaines concentrations pouvaient être à des niveaux non détectés (inférieurs à la LOD), ou détectés mais non quantifiés (compris entre la LOD et la LOQ). Les valeurs censurées représentaient moins de 15% des résultats ; elles ont été remplacées par la LOQ/2.

Pour les plombémies, aucune valeur n'était censurée. Pour l'arsenic et le cadmium, les données censurées ont été traitées par substitution et remplacées par la LOQ/2, soit 0,5µg/L pour l'arsenic et 0,1µg/L pour le cadmium.

Pour les cadmiuries, 12,7% des valeurs ont été remplacées par LOQ/2 = 0.1 µg/L. Pour l'arsenic urinaire, 0,9 % des valeurs ont été remplacées par LOQ/2=0,5 µg/L.

Pour traiter les données censurées des mesures environnementales (sols et poussières), les valeurs ont été remplacées par LOQ/2.

Fusion des données

Une table Adultes et une table Enfants ont été constituées en fusionnant les données issues des questionnaires Foyer, des questionnaires individuels, des résultats de mesures biologiques et des résultats de mesures environnementales.

2.3.5. Analyses statistiques

2.3.5.1. Analyses descriptives

La participation à l'étude (taux de réponse et représentativité des répondants par rapport à la population d'étude) a été analysée à partir des données de population par classes d'âge de l'Insee (recensement de population 2012).

Les caractéristiques sociodémographiques, les facteurs de confusion et les facteurs d'exposition ont été décrits sous forme de distribution (médiane, min-max) pour les variables quantitatives et d'effectif et de pourcentage dans chaque classe pour les variables qualitatives.

Une transformation logarithmique des variables d'imprégnation a été effectuée. Les concentrations en plomb, cadmium et arsenic suivent généralement des distributions asymétriques (distribution log-normale). Les distributions des niveaux d'imprégnation (plombémie, cadmiurie et arsenic urinaire) ont été décrites.

Les prévalences du saturnisme et de la surimprégnation au plomb, au cadmium et à l'arsenic parmi les participants (en utilisant les valeurs de référence établies en population générale, voir 2.3.3.2.) ont également été calculées.

Enfin, les distributions des niveaux de concentration en plomb, arsenic et cadmium, dans les sols, puits/forages et les poussières, ont été décrites.

2.3.5.2. Représentations cartographiques

Afin de préserver l'identité des participants, les données ont été agrégées par rectangle Insee. Les rectangles Insee constituent un découpage du territoire associé aux données de population issues des Revenus fiscaux

localisés (RFL). Chaque rectangle comprend au moins 10 foyers, ce qui garantit la diffusion de l'information dans le respect du secret statistique.

Le taux de participation en pourcentage représenté sur la carte est égal au nombre de participants divisé par le nombre d'habitants de la zone issu des données RFL, multiplié par 100.

Les résultats des mesures d'imprégnation individuelles valides, valeur et comparaison aux valeurs de référence, ont ensuite été appariés à la couche d'adresses géocodées, grâce à l'identifiant anonyme. Les résultats ont ensuite été agrégés par rectangle Insee : nombre des mesures valides, nombre des valeurs supérieures aux valeurs de référence.

Une cartographie par polluant a été réalisée. Chaque carte présente le pourcentage de mesures valides supérieures aux valeurs de référence et le nombre de mesures valides par rectangle Insee.

2.3.5.3. Analyse des déterminants de l'exposition au plomb, au cadmium et à l'arsenic

a) Construction de nouvelles variables

Des variables indicatrices de facteur de risque d'exposition au plomb, au cadmium ou à l'arsenic ont été créées à partir des données de la littérature et des données recueillies via les questionnaires (**Annexe 5**).

b) Sélection des variables les plus explicatives dans des groupes de variables homogènes

Des groupes de variables homogènes ont été définis *a priori*, par exemple tels que les variables socio-économiques ou de consommation. Une analyse factorielle des correspondances a permis de sélectionner dans chaque groupe, la ou les deux variables considérée(s) : une variable représentant l'information portée par le premier axe, éventuellement une seconde dès lors qu'elle était située sur le second axe indiquant un effet indépendant de la première. Cette ou ces variable(s) sont dès lors considérée(s) comme les représentantes de leurs groupes respectifs. Ceci permet d'éviter d'introduire simultanément dans le modèle des variables très corrélées. L'interprétation de ces variables doit se faire comme traceur de leur groupe et non pas comme ayant un effet propre.

c) Imputation des données manquantes

La non réponse partielle résulte de questionnaires incomplets, lorsque l'unité échantillonnée (l'individu dans cette étude) ne répond pas à toutes les questions. Dans ce cas de figure, le choix a été fait d'utiliser des méthodes d'imputation qui consistent à remplacer les valeurs manquantes par des valeurs plausibles. Pour traiter ce type de données, la méthode d'imputation multiple par équations chaînées (Multiple Imputation by Chained Equations, MICE), sous R a été utilisée. Cette procédure a été appliquée à l'ensemble des variables, questionnaires, mesures biologiques ou environnementales, présentant des valeurs manquantes. L'imputation était réalisée avec au moins les mesures d'imprégnation et les variables définies dans la modélisation (questionnaires et environnementales) pour les enfants. Pour les adultes, elle recourait également aux autres variables tierces afin d'apporter davantage d'information pour l'imputation. Cela ne pouvait être retenu pour les enfants en raison de la faiblesse des effectifs. Initialement, l'imputation des variables continues devait être réalisée en les intégrant sous forme non-linéaire, mais dû à des problèmes de singularité, elles ont été imputées sous leur forme linéaire. Les variables de biomarqueurs et de contaminations environnementales ont été log-transformées avant imputation pour répondre à deux objectifs. Le premier afin de s'assurer de la normalité, requise pour l'imputation. Le second afin de recentrer les données afin d'éviter une influence trop forte des valeurs élevées. L'imputation a été réalisée en définissant une graine et pour 51 jeux avec un nombre maximal d'itérations de 50. L'adéquation entre les données imputées et observées a été vérifiée en comparant leurs distributions.

d) Modèles

Les facteurs de risque liés aux imprégnations au plomb, à l'arsenic et au cadmium ont été quantifiés à partir d'un modèle linéaire généralisé (GLM). Les facteurs de risque et d'ajustement ont été sélectionnés *a priori* pour la modélisation, à partir des données connues concernant l'influence de chaque variable sur la plombémie, la cadmiurie et la concentration en arsenic urinaire. En plus des variables d'exposition liées au site, on peut citer :

- concernant la plombémie : la présence de peintures au plomb (céruse) dans les logements construits avant 1949, les travaux de rénovation, réalisés sans précaution, la consommation de crustacés, de

mollusques, d'abats, d'eau du robinet, de vin, de tabac ainsi que les expositions professionnelles et de loisir citées en annexe 5.

- concernant l'arsenic urinaire : la consommation d'eau en bouteille, de vin ou de bière, de produits de la mer (poisson, coquillages et crustacés), de tabac, ainsi que les expositions professionnelles et de loisirs citées dans l'annexe 5.
- concernant le cadmium, pour la population générale, la principale source d'exposition au cadmium est l'alimentation. Le cadmium pénètre dans les végétaux essentiellement par le bois des racines et il entre ainsi dans la chaîne alimentaire (il est particulièrement présent dans les légumes racines). Dans la mesure où il est bien assimilé par les végétaux et qu'il se concentre dans les abats et les produits de la mer, on le retrouve en particulier dans ces aliments (légumes, coquillages, crustacés, céréales, poissons et abats) et certains autres aliments d'origine animale. Le tabagisme ainsi que l'exposition professionnelle ou de loisirs cités dans l'annexe 5 peuvent également influencer les concentrations en cadmium urinaire.

La forme de la relation des facteurs de risque et d'ajustement de type continu a été ajustée en utilisant des fonctions splines naturelles avec 3 degrés de liberté. Ceci permet une souplesse dans l'ajustement de la forme de la relation, tout en la contraignant à une forme plausible. Le modèle prend par ailleurs en compte le logarithme de la concentration en biomarqueur afin de stabiliser les résidus du modèle. La validation du modèle (vérification de la normalité et de l'homoscédasticité des résidus) a été effectuée sur un jeu de données imputées.

Pour chaque polluant, 2 modèles ont été réalisés. L'un comprenant uniquement les variables explicatives provenant des données des questionnaires ; l'autre comportant les variables environnementales (sols et poussières) ainsi que les variables issues des questionnaires ne représentant pas un proxy des mesures environnementales (par exemple, la fréquence de passage de la serpillère a été retirée).

e) Analyses de sensibilité

Trois analyses de sensibilité ont été menées.

L'échantillon recueilli a montré des différences avec la structure sociodémographique de la population d'étude. Afin de mieux appréhender cette distorsion de l'échantillon sur les résultats observés, nous avons procédé à une calibration permettant de donner un poids plus important ou plus faible aux franges de la population respectivement sous ou sur-représentées. Ce redressement s'est effectué sur la variable emploi qui contenait 6 classes : actif ayant un emploi, chômeur, retraité ou préretraité, élève ou étudiant ou stagiaire, femme ou homme au foyer, autre inactif.

Par ailleurs, plusieurs individus enquêtés pouvaient vivre au sein d'un même foyer. Ces individus ont alors tendance à avoir les mêmes comportements et facteurs de risque. Ce mimétisme tend à sous-estimer la variance du modèle et donc les intervalles de confiance lorsqu'il n'est pas pris en compte. Un modèle à équation d'estimation généralisée (GEE) avec une matrice échangeable, a ainsi été mis en œuvre afin d'apprécier la sous-estimation des intervalles de confiance de l'approche principale.

Enfin, afin d'apprécier l'effet de l'imputation sur les résultats, une analyse cas complets a été réalisée. Néanmoins, il n'a pas été possible de la réaliser stricto sensu sur les cas complets du fait du grand nombre de valeurs manquantes liées au taux de participation des ménages à la campagne de prélèvements environnementaux (sols et poussières) et de leurs répartitions sur les individus. Cette analyse a alors porté sur un jeu de données imputées sur lequel seules les variables de contaminations environnementales pour le plomb n'étaient pas imputées.

2.3.6. Aspects éthiques

2.3.6.1. *Consentement éclairé des participants à l'étude*

Le consentement éclairé pour participer à l'étude a été formellement recueilli par écrit. Pour l'enfant, le formulaire devait avoir été signé par les deux parents (**Annexe 6**– Formulaire de consentement : adulte et parents).

Les personnes ont été informées du caractère volontaire et bénévole de leur participation ainsi que de leur droit d'accès et de rectification des données les concernant.

2.3.6.2. *Mode de circulation des données*

Les questionnaires papiers ont été centralisés par la personne de l'ARS en charge de la coordination de l'enquête terrain puis transmis par pli confidentiel ou en mains propres à SpFrance – Cire Occitanie où ils étaient conservés dans une armoire forte. Les données des questionnaires - ne comportant aucune information d'identification directe - ont été saisies par SpFrance. La base de données contenait l'ensemble des données des questionnaires ainsi que les résultats d'analyses biologiques et de mesures environnementales (fusionnés à partir du numéro de confidentialité). L'ensemble des données était stocké sur un répertoire indépendant et sécurisé à SpFrance.

Le protocole prévoit la destruction des questionnaires papiers et des fiches de confidentialité à la fin de l'étude (publication des résultats).

Le fichier contenant l'ensemble des données d'enquête est conservé 5 ans après la collecte des données.

2.3.6.3. *Confidentialité*

Toutes les données ont été recueillies par des personnes habilitées, dans le strict respect du secret professionnel. La confidentialité des données individuelles était assurée. Les informations les concernant, notamment les résultats des marqueurs biologiques, n'ont été communiquées qu'aux individus eux-mêmes, aux parents pour les enfants mineurs, et aux médecins traitants ou spécialistes si les personnes en avaient fait la demande. Les données ont été anonymisées avant d'être saisies et analysées collectivement.

2.3.6.4. *Autorisations réglementaires*

Le protocole d'étude a obtenu l'avis favorable du Comité Consultatif sur le Traitement de l'Information en matière de Recherche dans le domaine de la Santé (CCTIRS) et l'autorisation de la Commission Nationale Informatiques et Libertés (CNIL) (décision DR-2016-184).

2.3.6.5. *Déontologie et communication des résultats*

L'étude a été conduite en respectant les recommandations en matière de déontologie et de bonnes pratiques en épidémiologie [16], en particulier en ce qui concerne les modalités de publication scientifique des résultats de l'enquête.

2.4. Résultats

2.4.1. Analyses descriptives

2.4.1.1. *Taux de réponse*

La participation à l'étude d'imprégnation était de 20,4% pour le site de Carnoulès et 26,0% pour le site de Croix-de-Pallières (Figure 2).

Figure 2 : Participation à l'étude d'imprégnation (réponse aux questionnaires) – Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2015.

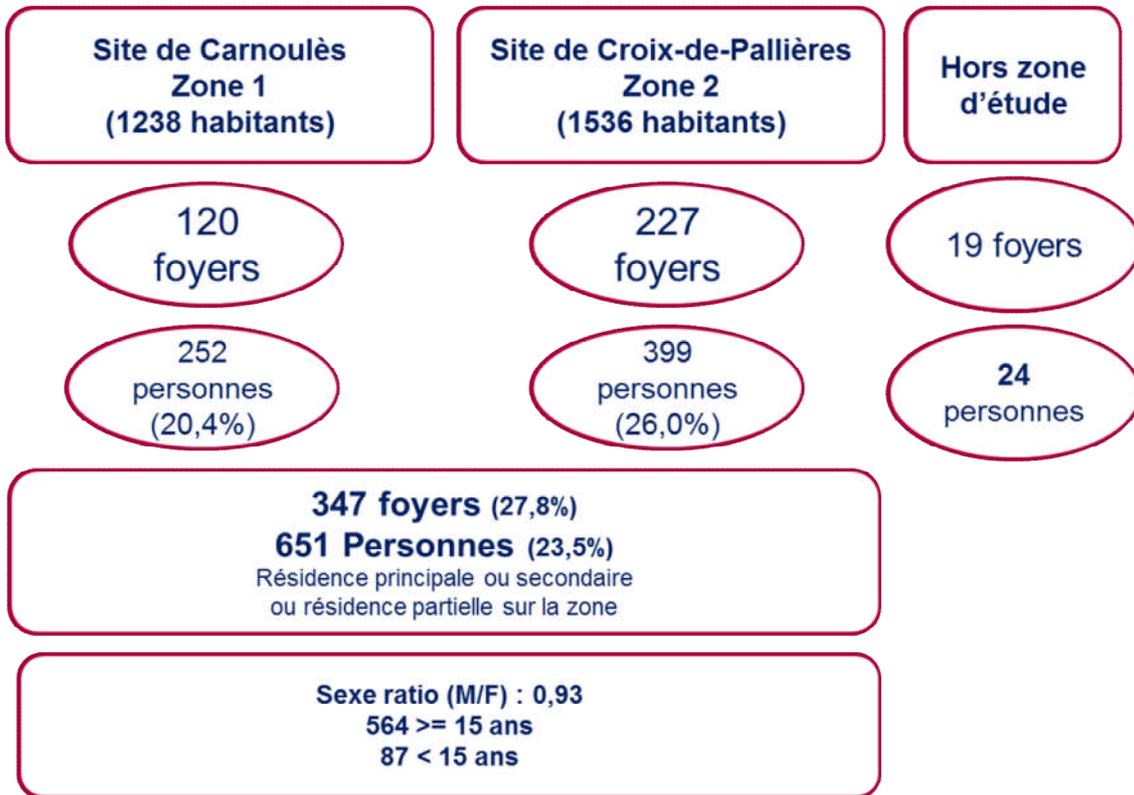
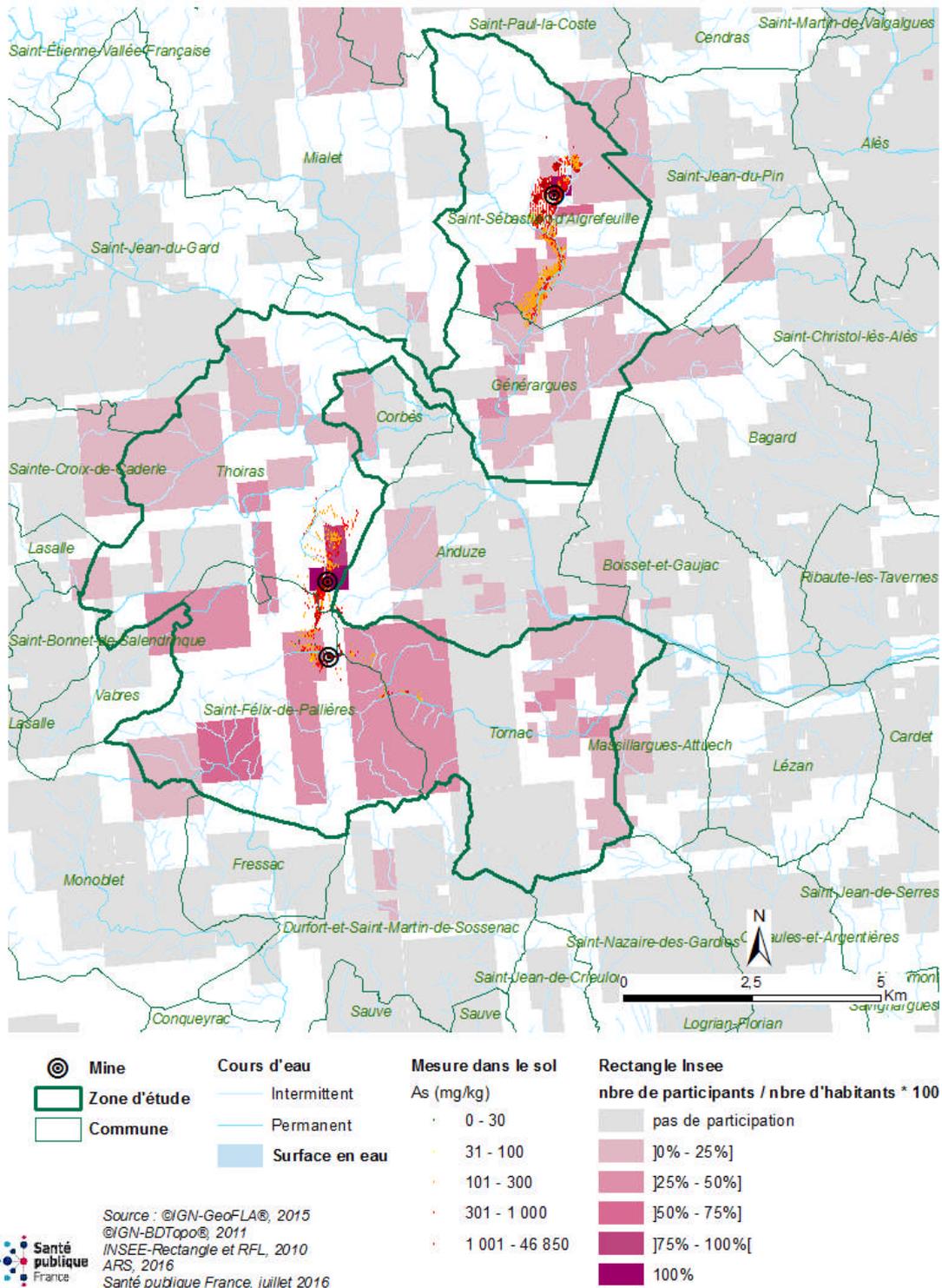


Figure 3 : Représentation cartographique de la participation à l'étude d'imprégnation (réponse aux questionnaires) – Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2015.



NB : Les zones blanches ne sont pas habitées. Chaque rectangle Insee comprend au moins 10 foyers.

Remarque : Quelques adresses sont situées en dehors des rectangles Insee. Il peut s'agir soit de personnes vivant dans des caravanes au lieu-dit « La Mine », soit d'habitations récentes. Dans les deux cas, les personnes ne sont pas comptabilisées dans les données RFL. Afin d'intégrer ces personnes à la cartographie, la couche des rectangles Insee a été modifiée : certains rectangles ont été agrandis, d'autres créés. Le nombre de participants « surnuméraires » a été additionné aux données de population issues de l'Insee.

2.4.1.2. Représentativité

La comparaison des caractéristiques des participants à l'étude (répondants aux questionnaires) avec celles des populations d'étude (habitants des sites de Carnoulès et de Croix-de-Pallières) a mis en évidence dans l'échantillon une sous-représentation des 15-29 ans et une sur-représentation des 60-74 ans (

Tableau 2) et des retraités (

Tableau 3).

On observait également, parmi les participants à l'étude, une surreprésentation des plus diplômés, avec 47% des personnes ayant un diplôme de l'enseignement supérieur contre 36% dans l'ensemble de la population de ces deux zones (Tableau 4).

Tableau 2 : Répartition par tranches d'âges et sexe des participants et comparaison aux données Insee (RP 2012)

	Zone 1		Zone 2		Zones 1 et 2		Insee	
	N	%	N	%	N	%	N	
Ensemble	252	100	399	100	651	100	2773	
Homme	119	47,2	194	48,6	313	48,1	1374	
Femme	133	52,8	205	51,4	338	51,9	1399	
Hommes	0 à 14 ans	23	19,3	29	14,9	52	16,6	216
	15 à 29 ans	10	8,4	18	9,3	28	8,9	204
	30 à 44 ans	18	15,1	33	17,0	51	16,3	208
	45 à 59 ans	27	22,7	40	20,6	67	21,4	346
	60 à 74 ans	27	22,7	65	33,5	92	29,4	282
	75 à 89 ans	14	11,8	9	4,6	23	7,3	112
	90 ans ou plus	0	0,0	0	0,0	0	0,0	6
Femmes	0 à 14 ans	20	15,0	15	7,3	35	10,4	215
	15 à 29 ans	8	6,0	13	6,3	21	6,2	154
	30 à 44 ans	23	17,3	36	17,6	59	17,5	211
	45 à 59 ans	28	21,1	58	28,3	86	25,4	367
	60 à 74 ans	41	30,8	71	34,6	112	33,1	291
	75 à 89 ans	13	9,8	12	5,9	25	7,4	142
	90 ans ou plus	0	0,0	0	0,0	0	0,0	19

Tableau 3 : Répartition de la personne de référence du foyer des participants selon la situation vis-à-vis de l'emploi et comparaison aux données Insee (RP 2012)

		Zone			Insee
		Zone 1	Zone 2	1 et 2	
Ensemble	(effectif renseigné)	115	221	336	1250
Actifs en %		47,8	50,2	49,4	53,1
	actifs ayant un emploi en %	41,7	39,8	40,5	46,0
	chômeurs en %	6,1	10,4	8,9	7,1
Inactifs en %		52,2	49,8	50,6	46,9
	retraités ou préretraités en %	48,7	44,3	45,8	41,4
	élèves, étudiants et stagiaires en %	0,0	0,5	0,3	0,2
	autres inactifs en %	3,5	5,0	4,5	5,3

Tableau 4 : Répartition selon le diplôme de la personne de référence du foyer des participants et comparaison aux données Insee (RP 2012)

Niveau de diplôme	Zone 1		Zone 2		Zone 1 et 2		Insee	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Pas de scolarité	1	0,9	3	1,4	4	1,2	6	0,5
Aucun diplôme mais scolarité jusqu'en école primaire ou au collège	6	5,2	5	2,3	11	3,3	128	10,2
Aucun diplôme mais scolarité au delà du collège	0	0,0	2	0,9	2	0,6	59	4,7
Certificat d'études primaires	11	9,6	10	4,5	21	6,3	132	10,6
BEPC, brevet élémentaire, brevet des collèges	10	8,7	20	9,0	30	8,9	84	6,7
Certificat d'aptitudes professionnelles, brevet de compagnon	12	10,4	19	8,6	31	9,2	159	12,7
Brevet d'études professionnelles	10	8,7	19	8,6	29	8,6	115	9,2
Baccalauréat général, brevet supérieur	17	14,8	33	14,9	50	14,9	113	9,0
Bac technologique ou pro, brevet pro ou de technicien...	10	8,7	18	8,1	28	8,3	116	9,3
Diplôme universitaire de 1er cycle, BTS, DUT...	19	16,5	36	16,3	55	16,4	158	12,6
Diplôme universitaire de 2ème ou 3ème cycle	19	16,5	56	25,3	75	22,3	180	14,4
Tous	115	100,0	221	100,0	336	100,0	1250	100,0

2.4.1.3. Caractéristiques individuelles et données comportementales des participants

Les caractéristiques individuelles et données comportementales des participants à l'étude d'imprégnation sont détaillées en **Annexe 7**.

Plus particulièrement, 67 personnes soit près de 12% de l'échantillon adulte ont déclaré avoir eu une exposition professionnelle exposante au plomb. Parmi elles, 25 personnes (37%) ont travaillé sur des pièces métalliques déjà peintes : décapage mécanique ou au chalumeau, oxycoupage, soudage ; 14 (21%) ont fait de la fabrication, ensachage ou ont utilisé des pigments minéraux et des émaux (teintures pour textile, décoration de la porcelaine et émaux, fabrication de peintures d'encres...) ; 12 (18%) ont déclaré travailler dans des fonderies de première et deuxième fusion ou dans la fabrication d'objets en cuivre, plomb, étain, bronze, laiton, zinc... et 10 (15%) ont fabriqué ou recyclé des batteries.

Pour l'arsenic, 64 personnes soit 11% de l'échantillon adulte ont déclaré les mêmes expositions professionnelles que pour l'exposition au plomb hormis 13 personnes (19%) qui ont déclaré encore utiliser des pesticides arsenicaux pour l'arboriculture, la culture de pommes de terre ou la viticulture.

Pour le cadmium, 51 personnes (14%) ont déclaré avoir eu une exposition professionnelle exposante au cadmium. Il s'agissait des mêmes expositions professionnelles que celles exposantes au plomb.

Concernant les activités de loisirs, 331 personnes soit près de 59 % de l'échantillon adulte ont déclaré pratiquer une activité exposante au plomb. Les principales activités déclarées sont l'utilisation de peinture,

verniss, encres et colorants ; la réalisation de travaux dans un habitat ancien ; la manipulation de métaux et la soudure ou découpage au chalumeau.

Pour l'arsenic, 47 personnes soit 8% de l'échantillon adulte ont déclaré pratiquer une activité de loisirs exposante à l'arsenic. Il s'agissait des mêmes activités principales que celles déclarées pour le plomb hormis la soudure ou découpage au chalumeau.

Enfin, pour le cadmium, 90 personnes soit 25% de l'échantillon adulte ont déclaré pratiquer une activité de loisirs exposante au cadmium qui était la manipulation de métaux.

2.4.1.4. Distribution des mesures d'imprégnation

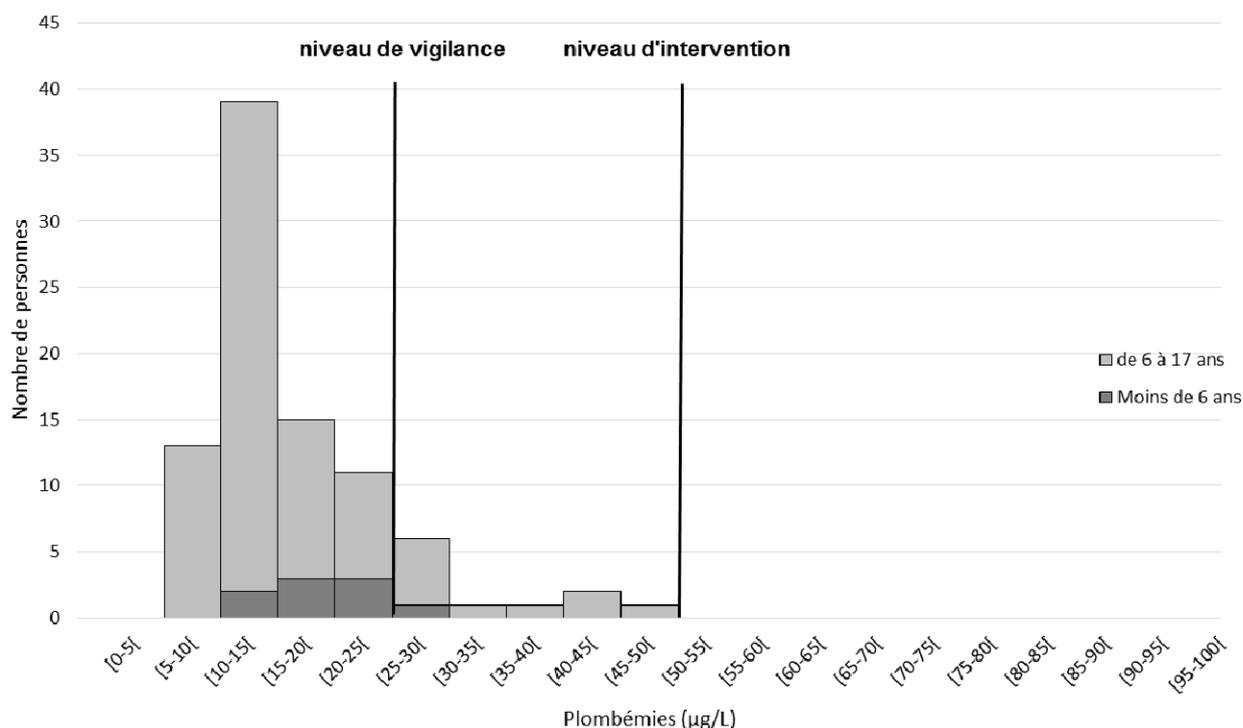
Les distributions des mesures d'imprégnation au plomb, à l'arsenic et au cadmium des participants à l'étude sont présentées sous forme de tableaux en **Annexe 8**.

a) Mesures d'imprégnation au plomb

Sur les 89 participants âgés de moins de 18 ans pour lesquels une plombémie a été réalisée, aucun cas de saturnisme (plombémie supérieure ou égale à 50 µg/L) n'a été dépisté (Figure 4).

Sur les 9 enfants participant de moins de 6 ans, un seul présentait une plombémie de 26,5 µg/L, valeur supérieure au seuil de vigilance établi à 25 µg/L.

Figure 4 : Distribution des valeurs de plombémie parmi les moins de 18 ans. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2015. (N=89)



Sur les 549 adultes (de 18 ans et plus) pour lesquels une plombémie a été réalisée, seuls 30 (5%) présentaient des niveaux de plombémie supérieurs aux valeurs de référence en population générale :

- 17 femmes et 8 hommes de moins de 40 ans présentaient une plombémie supérieure à 70 µg/L (Figure 5),
- 5 hommes de 40 ans et plus présentaient une plombémie supérieure à 120 µg/L (Figure 6).

Figure 5 : Distribution des valeurs de plombémie parmi les femmes adultes et hommes de 18 à 39 ans. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2015. (N=346)

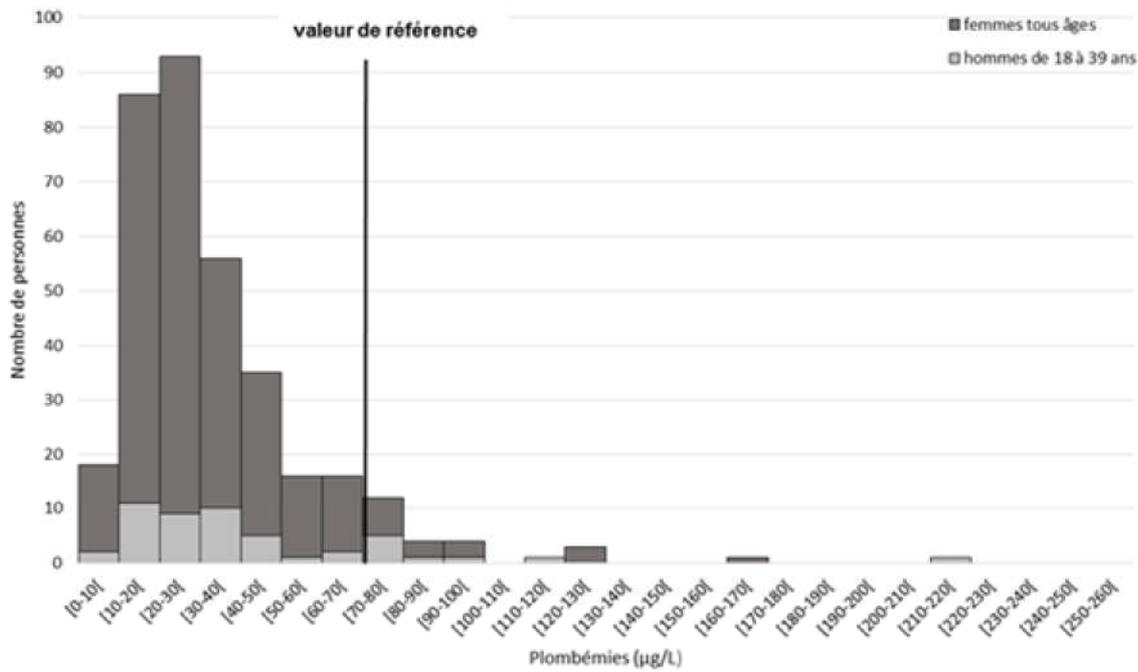


Figure 6 : Distribution des valeurs de plombémie parmi les hommes de 40 ans et plus. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2015. (N=203)

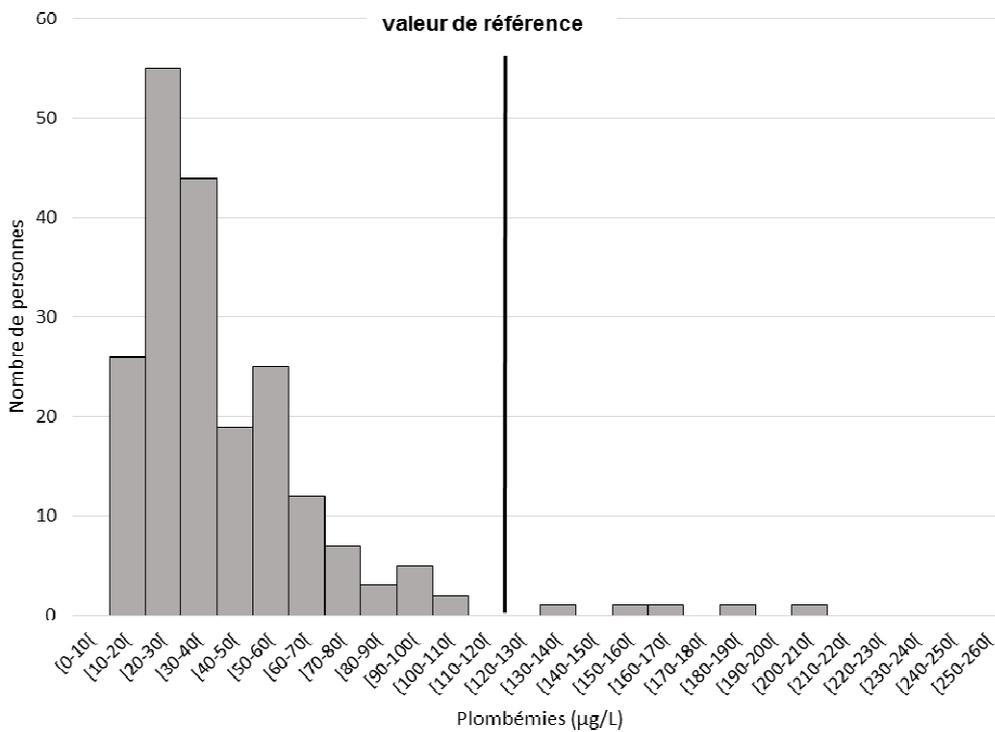
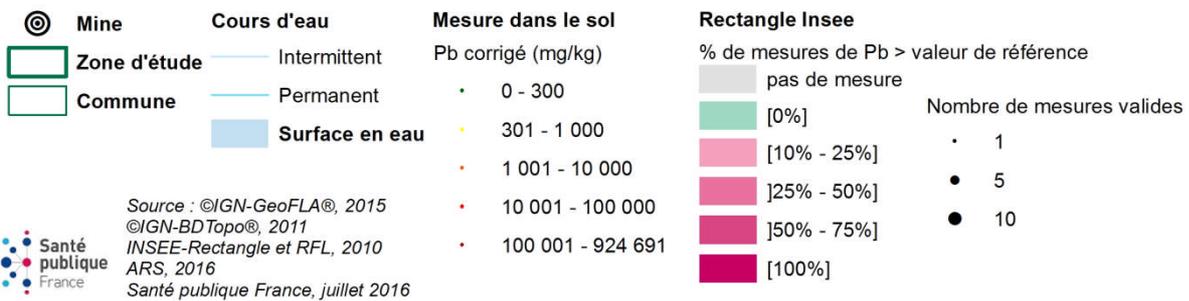
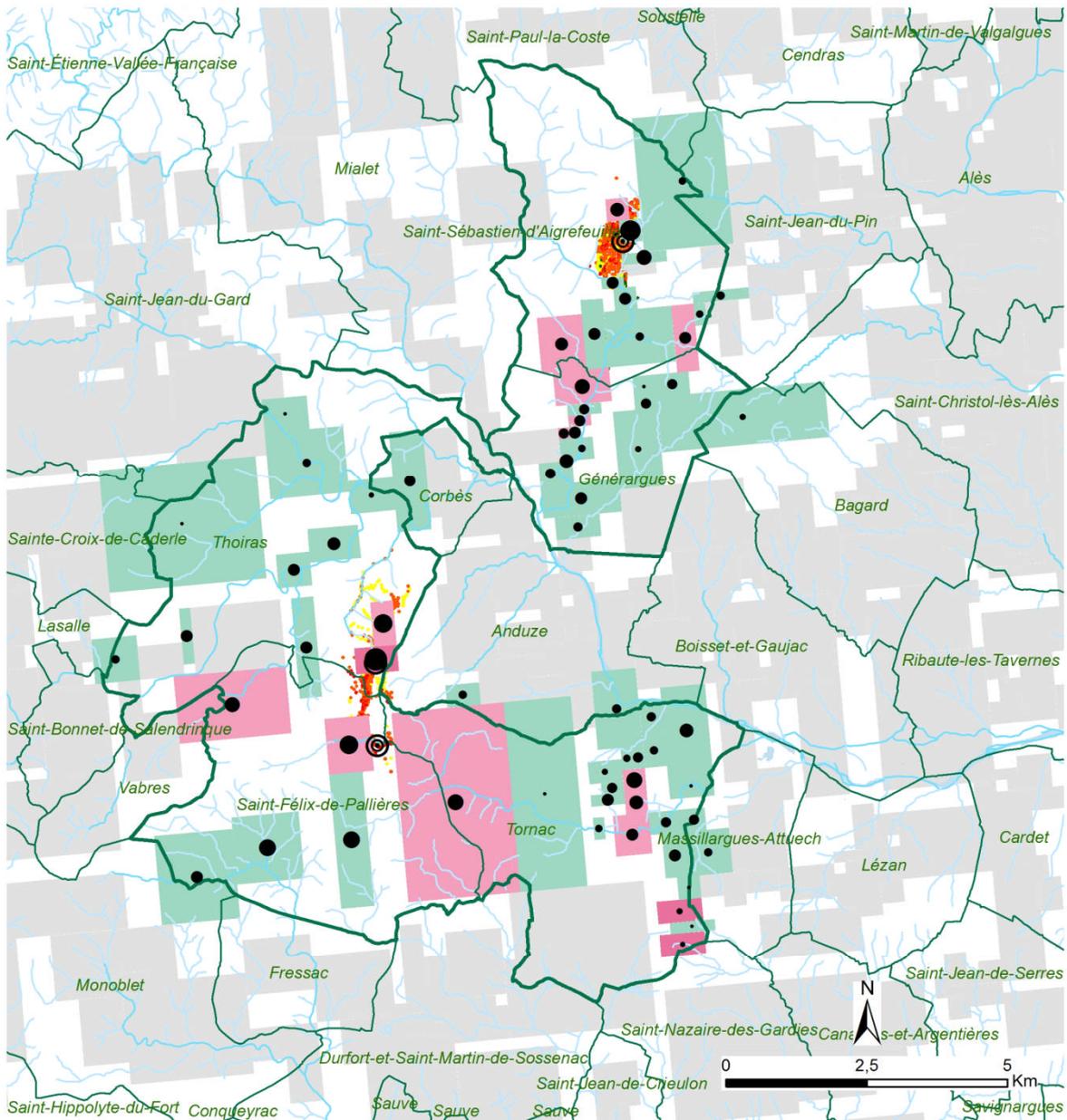


Figure 7 : Représentation cartographique des plombémies des personnes enquêtées (nombre de mesures supérieures aux valeurs de référence en population générale / nombre de mesures totales valides, rapporté au rectangle Insee). Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2015.



b) Mesures d'imprégnation au cadmium

Sur les 361 participants à l'étude (site de Croix-de-Pallières uniquement) avec dosage de cadmium urinaire, 42 (12%) présentait une imprégnation au cadmium supérieure ou égale aux valeurs de référence en population générale :

3 enfants de moins de 15 ans présentait une imprégnation au cadmium supérieure à 0,5 µg/g de créatinine (

- Figure 8) ;
- 6 femmes et 3 hommes de moins de 40 ans présentaient une imprégnation au cadmium supérieure à 0,5 µg/g de créatinine (Figure 9) ;

19 hommes de 40 ans et plus présentaient une imprégnation au cadmium supérieure à 0,7 µg/g de créatinine (

- Figure 10) ;
- 11 femmes de 40 ans et plus présentaient une imprégnation au cadmium supérieure à 1,2 µg/g de créatinine (Figure 11).

Figure 8 : Distribution des valeurs de cadmium urinaire parmi les moins de 15 ans. Ancien site minier de Croix-de-Palières, Gard, 2015. (N=40)

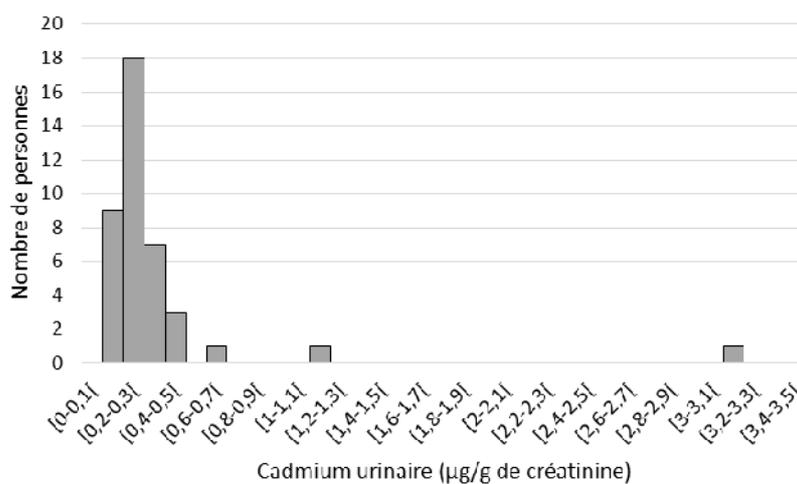


Figure 9 : Distribution des valeurs de cadmium urinaire parmi les femmes et hommes de 15 ans à 39 ans. Ancien site minier de Croix-de-Palières, Gard, 2015. (N=69)

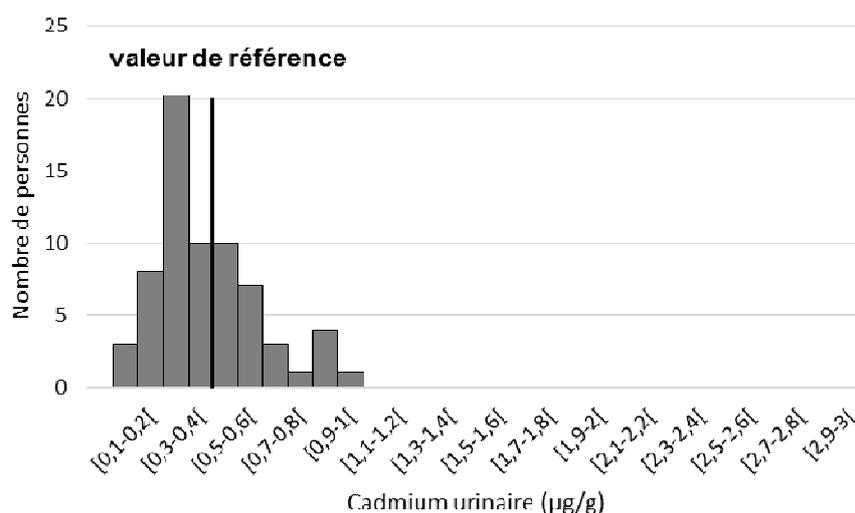


Figure 10 : Distribution des valeurs de cadmium urinaire parmi les hommes de 40 ans et plus. Ancien site minier de Croix-de-Palières, Gard, 2015. (N=112)

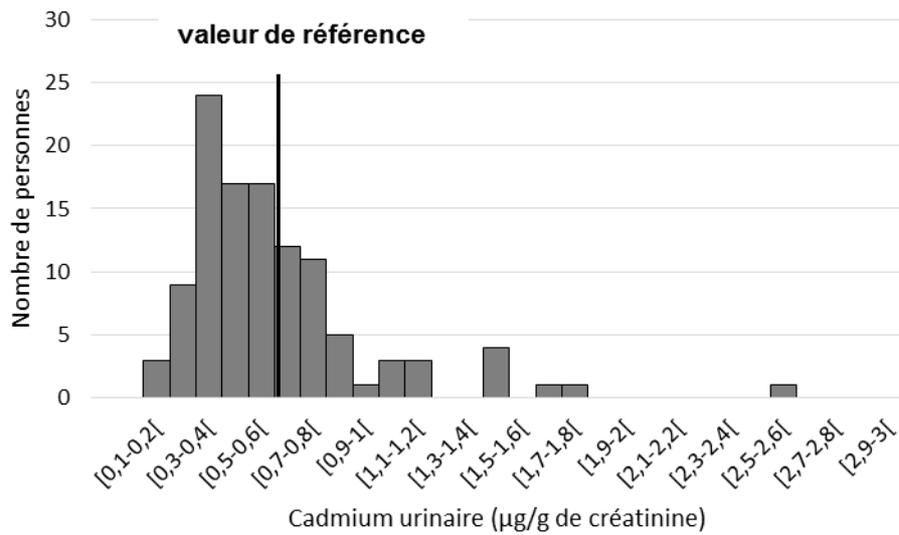
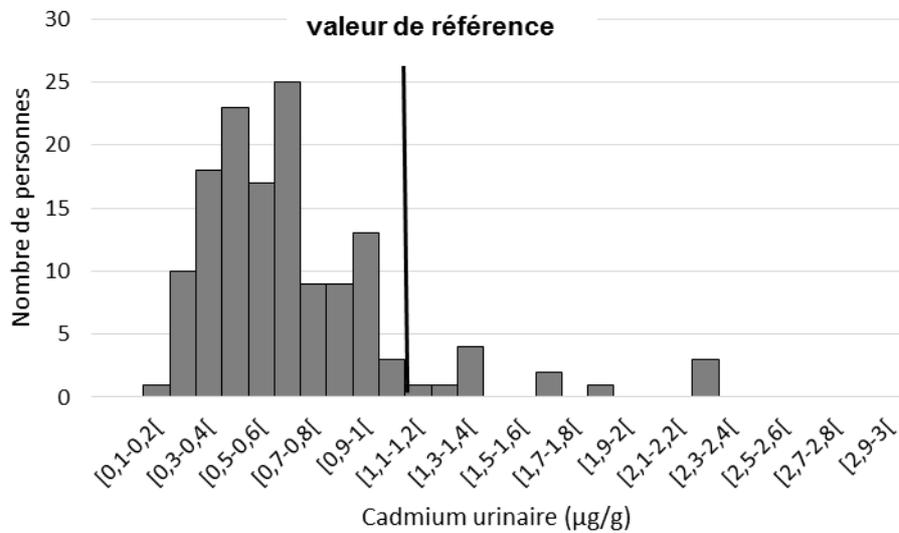
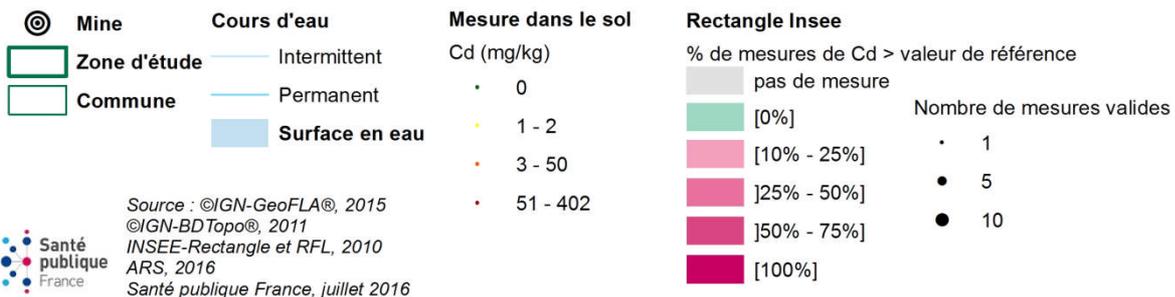
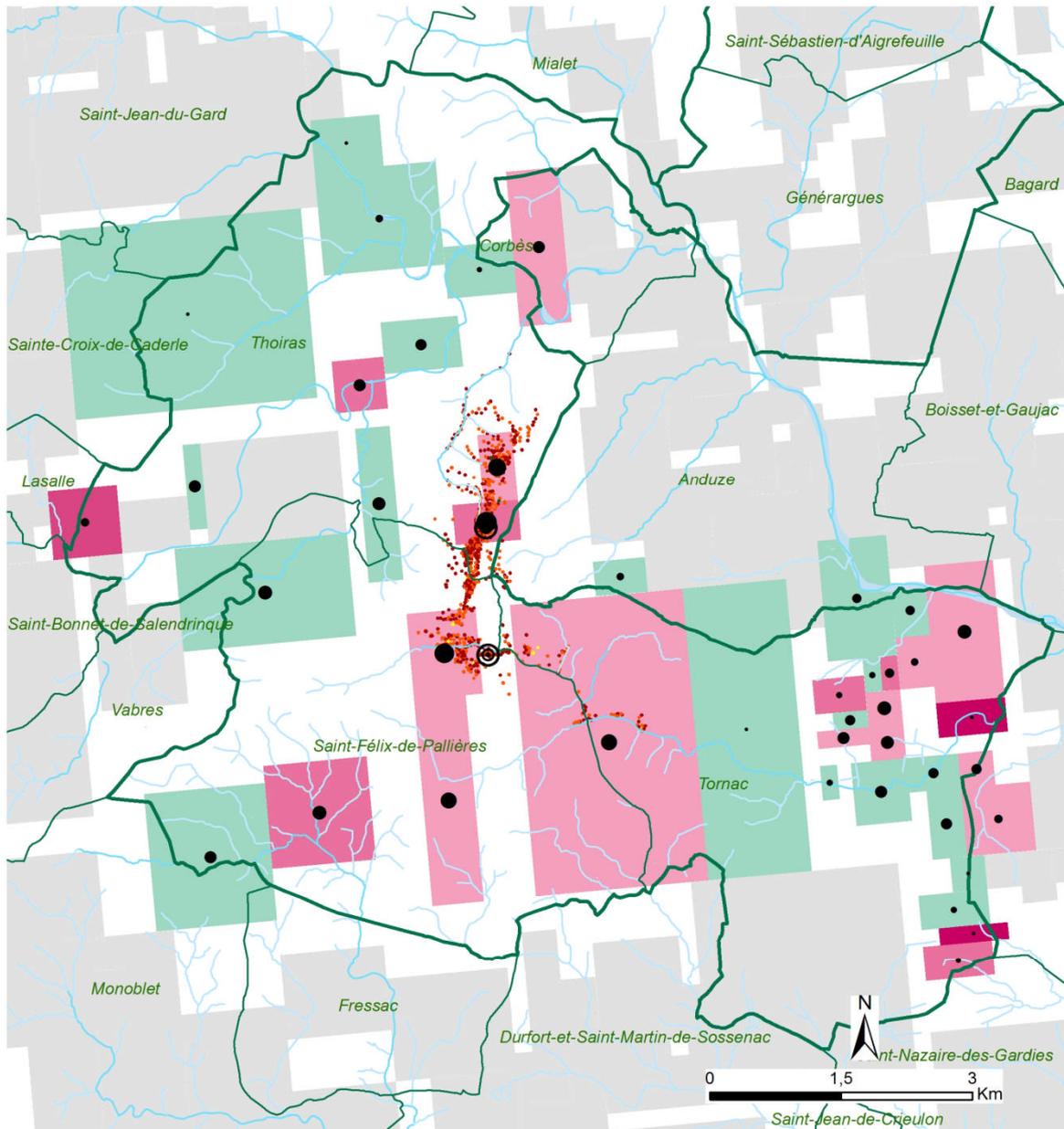


Figure 11 : Distribution des valeurs de cadmium urinaire parmi les femmes de 40 ans et plus. Ancien site minier de Croix-de-Pallières, Gard, 2015. (N=140)



La répartition spatiale (**Figure 12**) met en évidence la présence de personnes imprégnées au cadmium à distance de l'ancienne mine de Croix-de-Pallières.

Figure 12 : Représentation cartographique des valeurs de cadmium urinaire des personnes enquêtées (nombre de mesures supérieures aux valeurs de référence en population générale / nombre de mesures totales valides, rapporté au rectangle Insee). Ancien site minier de Croix-de-Pallières, Gard, 2015.



c) Mesures d'imprégnation à l'arsenic

Sur les 603 participants à l'étude avec dosage d'arsenic urinaire, 135 (22%) dont 25 enfants de moins de 15 ans, présentaient une imprégnation à l'arsenic supérieure ou égale à la valeur de référence en population générale (10 µg/g créatinine) (Figure 13 et Figure 14).

La répartition spatiale (Figure 15) met en évidence la présence de personnes imprégnées en arsenic à distance des deux anciennes mines.

Figure 13 : Distribution des valeurs d'arsenic urinaire parmi les moins de 15 ans. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2015. (N=82)

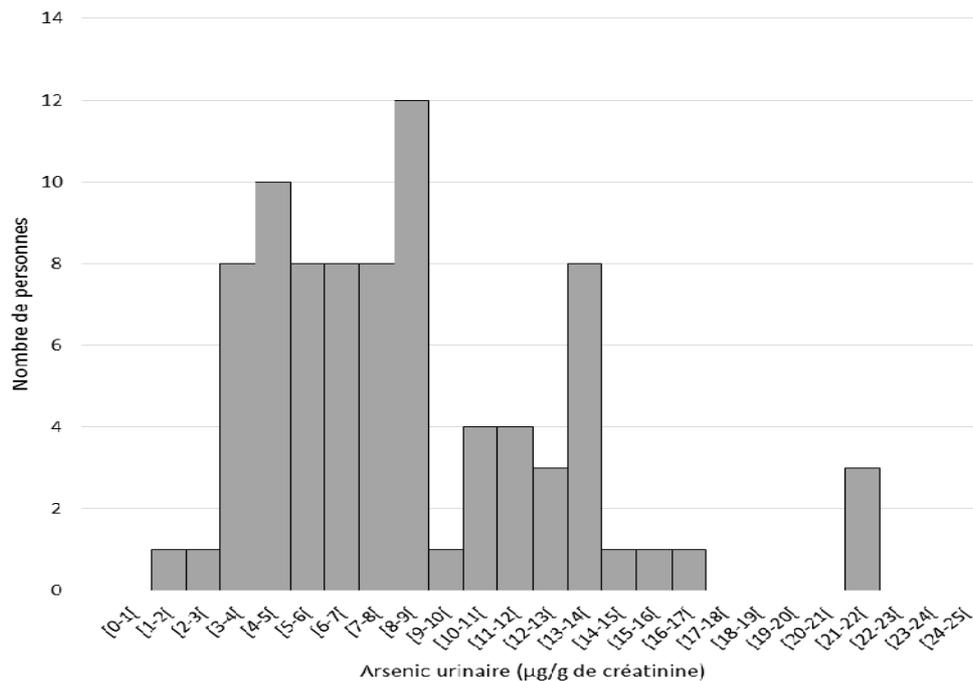


Figure 14 : Distribution des valeurs d'arsenic urinaire parmi les 15 ans et plus. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2015. (N=521)

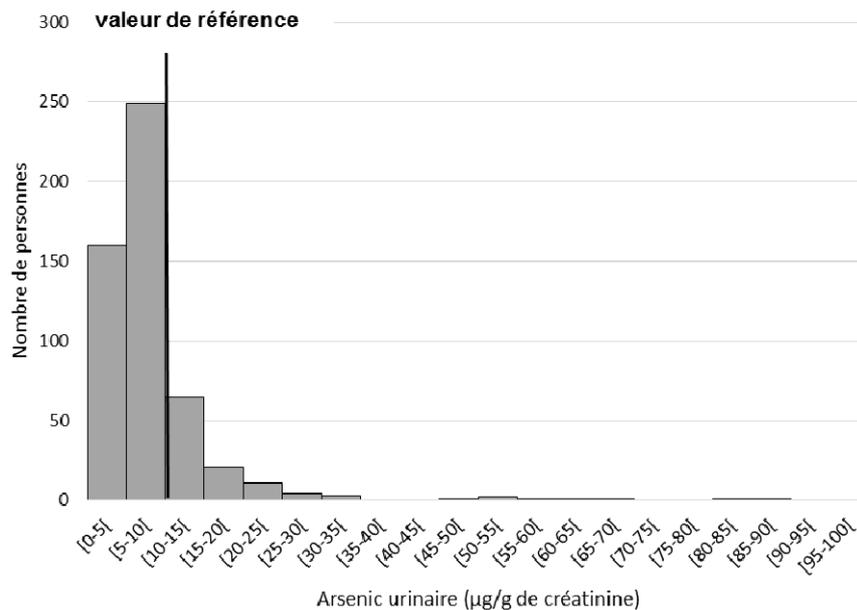
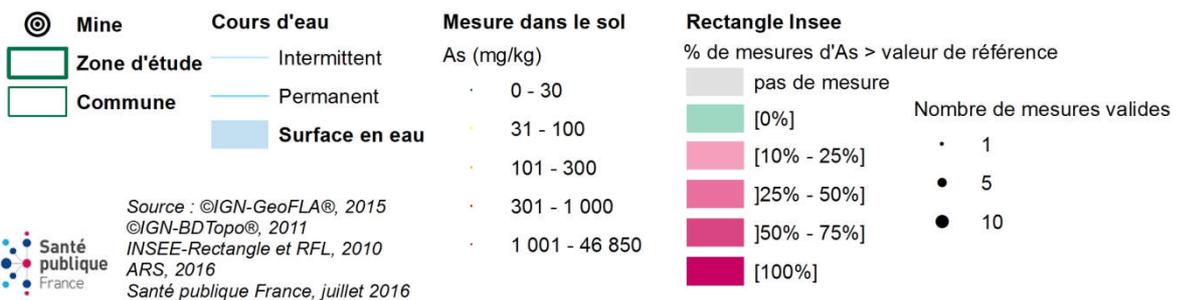
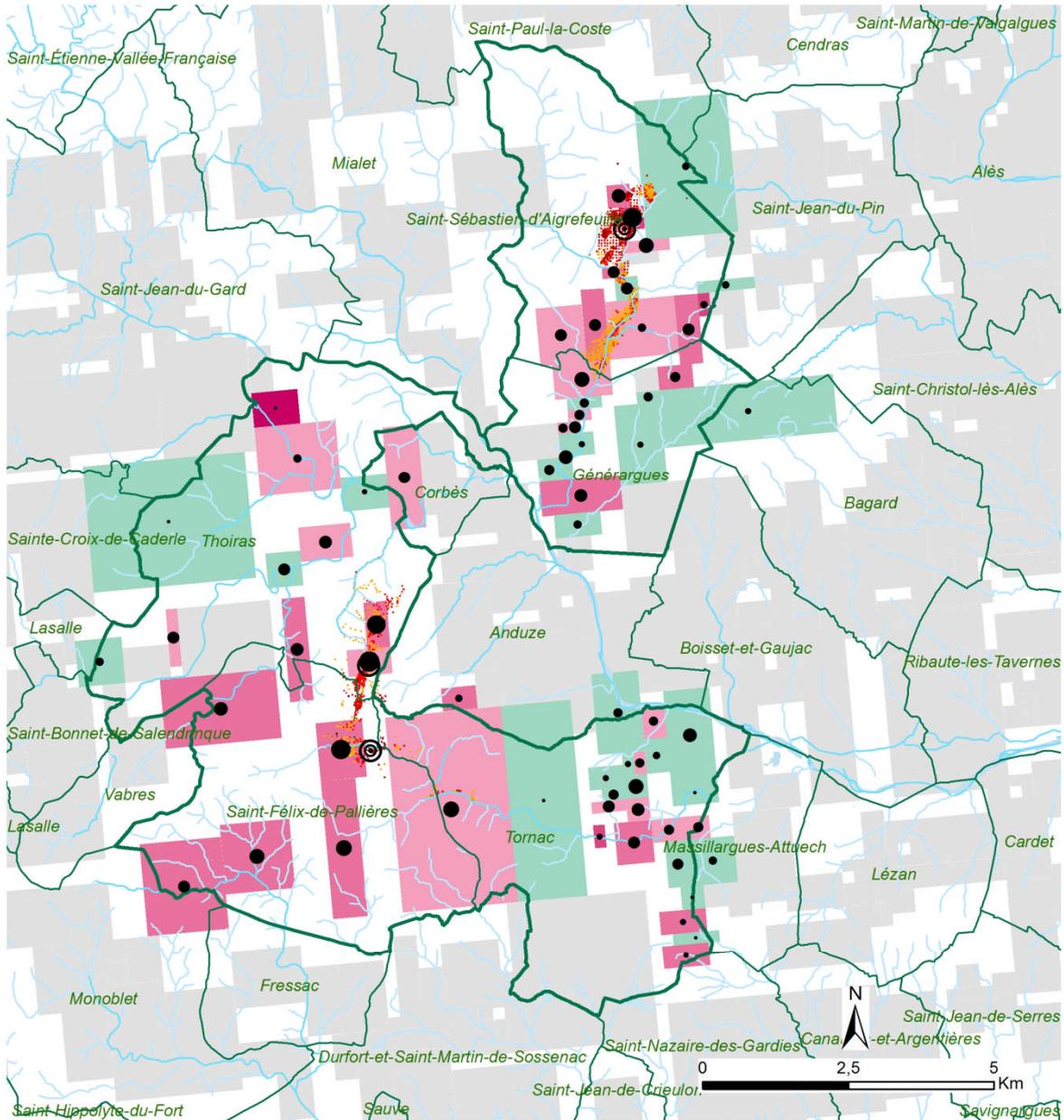


Figure 15 : Représentation cartographique des valeurs de l'arsenic urinaire des personnes enquêtées (nombre de mesures supérieures aux valeurs de référence en population générale / nombre de mesures totales valides, rapporté au rectangle Insee). Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2015.



2.4.1.5. Distribution des mesures environnementales

a) Mesures dans l'eau des puits et les sols des jardins

Parmi les 347 foyers ayant eu des mesures d'imprégnation, 210 foyers répartis sur les deux zones d'étude ont donné leur accord de principe pour des investigations environnementales.

Lors de la campagne de prélèvements de sols réalisée par Geoderis, 174 foyers ont finalement accepté des prélèvements de sols pour analyses, soit environ un foyer sur deux.

Les mesures dans les sols ont été effectuées dans 174 foyers de l'étude pour le plomb et l'arsenic (sites de Carnoulès et de Croix-de-Pallières) et dans 124 foyers pour le cadmium (site de Croix-de-Pallières uniquement) (Tableau 5).

Tableau 5 : Distribution des concentrations en plomb, arsenic et cadmium dans les sols. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2016.

	Pb	As	Cd
Nombre de foyers investigués	174	174	124
LOQ (mg/kg MS)	5	1	0,4
% de valeurs quantifiées	100	100	69
Moyenne (mg/kg MS)	424,2	69,9	1,6
P10 (mg/kg MS)	35,5	14,6	< LOQ
P25 (mg/kg MS)	63,1	23,9	< LOQ
P50 (mg/kg MS)	90,3	37,7	0,6
P75 (mg/kg MS)	232,9	83,9	1,3
P90 (mg/kg MS)	601,3	152,3	1,9
P95 (mg/kg MS)	1188	219,6	4,8
Valeur max (mg/kg MS)	22642	947	47,5

MS : matière sèche

Trente foyers disposaient d'un puits ou forage individuel, ce qui a donné lieu à des prélèvements et analyses d'eaux dans ces ouvrages (Tableau 6). Les résultats des analyses d'eau réalisées dans ces ouvrages, montraient que 2 foyers (7%) dépassaient la valeur limite utilisée pour les eaux destinées à la consommation humaine pour le plomb (10 µg/L) et 4 (13%) pour l'arsenic. Aucune analyse ne dépassait la valeur limite pour le cadmium (5µg/L). En raison du faible nombre d'analyses d'eau de puits ou forages individuels, ces données n'ont pas pu être conservées dans l'analyse des déterminants de l'imprégnation.

Tableau 6 : Distribution des concentrations en plomb, arsenic et cadmium dans les eaux de puits et forages. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2016.

	Pb	As	Cd
Nombre de foyers investigués	30	30	30
LOQ (µg/L)	0,5	0,2	0,2
% de valeurs quantifiées	60	82	6
Moyenne (µg/L)	1,98	3,14	
P10 (µg/L)	< LOQ	< LOQ	
P25 (µg/L)	< LOQ	0,34	
P50 (µg/L)	1,07	0,66	
P75 (µg/L)	2,23	2,25	
P90 (µg/L)	4,37	6,23	
P95 (µg/L)	5,11	17,26	
Valeur max (µg/L)	15,9	38,9	1,48

En dehors des sites miniers, quelques valeurs entre 300 et 1000 mg de plomb /kg sont observées dans les mesures de sols des jardins sur les communes de Tornac, Saint-Félix de Pallières et Générargues. Plus de 75 % des mesures sont inférieures à 300 mg/kg (Figure 16).

On observe des concentrations en arsenic assez élevées dans des sols situés à plusieurs kilomètres des anciens sites miniers (Figure 17).

Des valeurs inférieures à 2 mg de cadmium /kg sont retrouvées dans plus de 80 % des jardins. Quelques mesures atteignent 50 mg/kg environ (

Figure 18).

Figure 16 : Représentation cartographique des valeurs de plomb dans les sols des foyers enquêtés (nombre de mesures supérieures à 100 mg/kg* de matière sèche / nombre de mesures totales valides, rapporté au rectangle Insee). Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Palières, Gard, 2016.

*Borne inférieure de la gamme des valeurs de concentrations mesurées dans les sols à fortes anomalies naturelles [1]

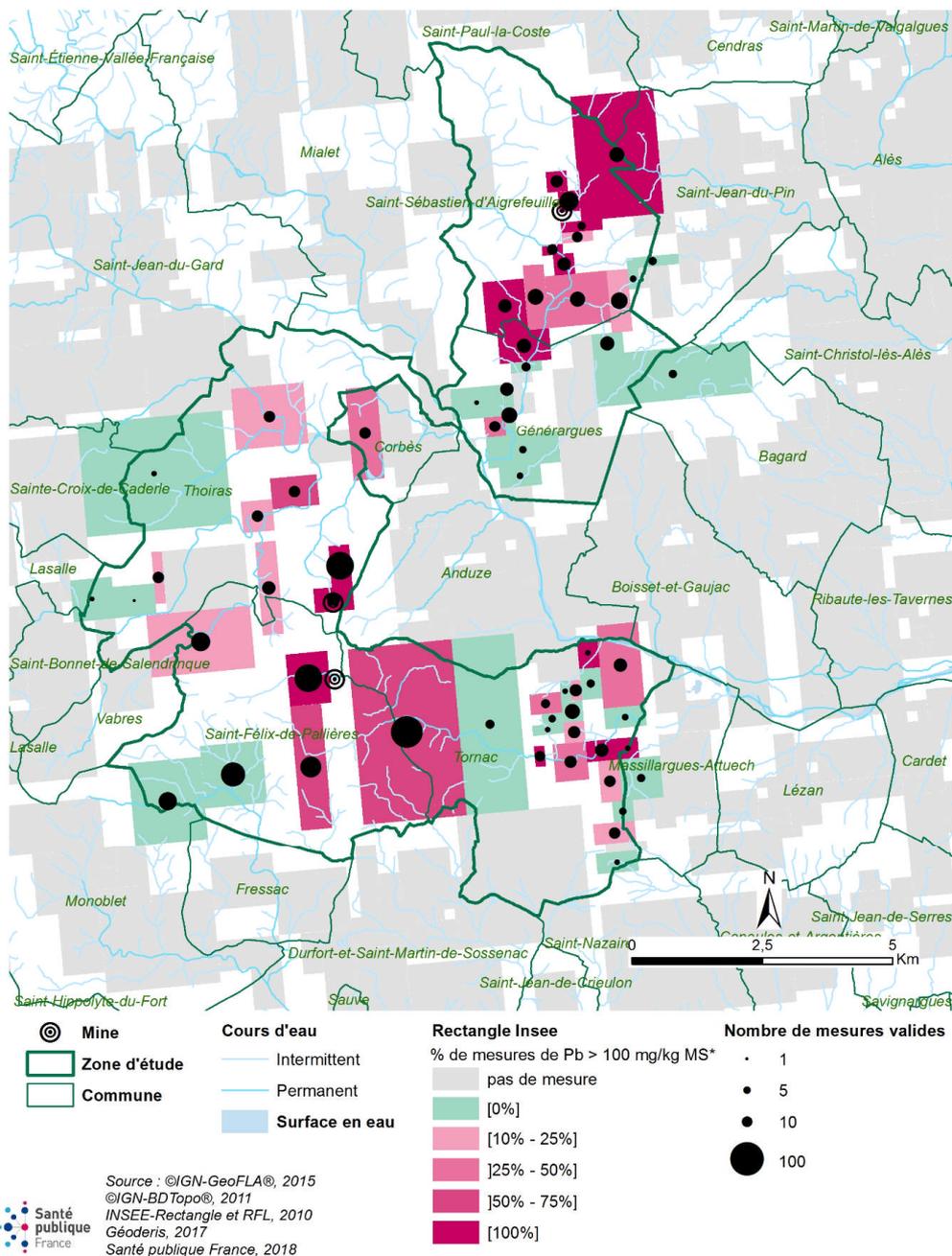


Figure 17 : Représentation cartographique des valeurs d'arsenic dans les sols des foyers enquêtés (nombre de mesures supérieures à 60 mg/kg* de matière sèche / nombre de mesures totales valides, rapporté au rectangle Insee). Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Palières, Gard, 2016.

*Borne inférieure de la gamme des valeurs de concentrations mesurées dans les sols à fortes anomalies naturelles [1]

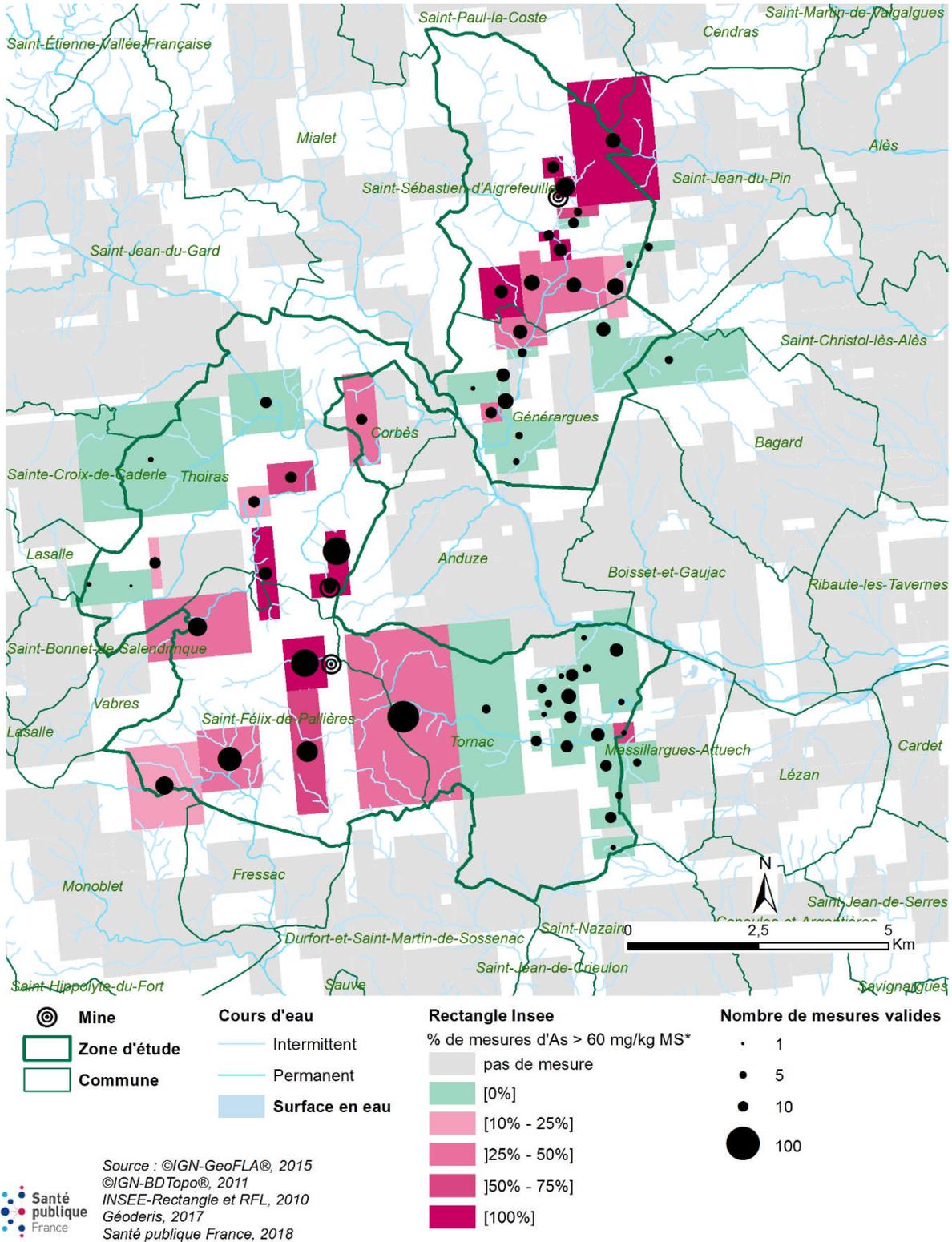
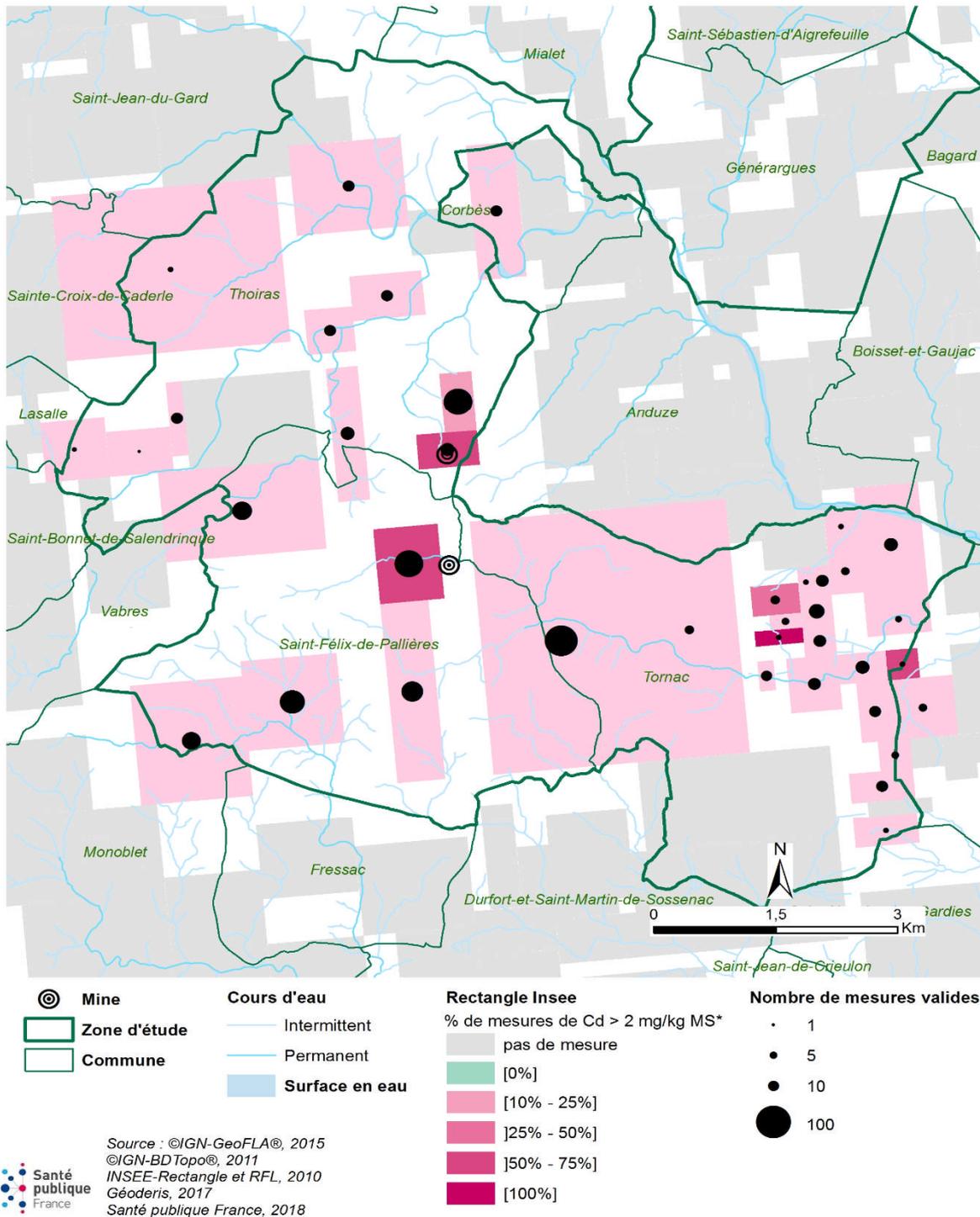


Figure 18 : Représentation cartographique des valeurs de cadmium dans les sols des foyers enquêtés (nombre de mesures supérieures à 2 mg/kg* de matière sèche / nombre de mesures totales valides, rapporté au rectangle Insee). Ancien site minier Croix-de-Pallières, Gard, 2016.

*Borne inférieure de la gamme des valeurs de concentrations mesurées dans les sols à fortes anomalies naturelles [1]



b) Mesures dans les poussières des logements

Les mesures de poussières ont été effectuées dans 154 foyers de l'étude, soit dans 154 pièces principales de vie. Parmi ces 154 foyers, 34 foyers incluaient des enfants de l'étude, ce qui a conduit à la réalisation de 52 mesures dans les chambres des enfants. Le tableau ci-dessous présente les distributions en Pb, Cd et As (fractions acido-solubles) dans les poussières de la pièce principale de vie ainsi que dans les chambres des enfants inclus dans l'étude. Les résultats des fractions totales sont présentés en **Annexe 9**.

Tableau 7 : Distribution des concentrations acido-solubles en plomb, arsenic et cadmium dans les poussières des logements enquêtés. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2016.

	Pb (pièce de	As (pièce de	Cd (pièce de	Pb	As	Cd
--	--------------	--------------	--------------	----	----	----

	vie)	vie)	vie)	(chambre)	(chambre)	(chambre)
Nombre de foyers investigués	154	154	105			
Nombre de chambres investiguées				52	52	25
LOQ ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	0,7	0,3	0,4	0,7	0,3	0,4
% de valeurs quantifiées	100	76	26	96	62	29
Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	76,2	1,7	0,5	19,3	0,8	<LOQ
P10 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	3,6	<LOQ	<LOQ	2,1	<LOQ	<LOQ
P25 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	5,7	<LOQ	<LOQ	4,2	<LOQ	<LOQ
P50 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	13,7	0,6	<LOQ	6,7	0,4	<LOQ
P75 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	39,1	1,4	<LOQ	19,1	0,8	<LOQ
P90 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	106,5	3,3	0,8	53,7	1,6	0,5
P95 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	218,9	4,8	1,5	74,7	3,9	0,8
Valeur max ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	1650	50,7	5,9	195,3	6,8	1,6

Les concentrations moyenne et médiane des fractions acido-solubles quantifiées en plomb étaient respectivement de $76,2 \mu\text{g}/\text{m}^2$ et $13,7 \mu\text{g}/\text{m}^2$ dans les pièces principales de vie et de $19,3 \mu\text{g}/\text{m}^2$ et $6,7 \mu\text{g}/\text{m}^2$ dans les chambres des enfants.

Les concentrations moyenne et médiane des fractions acido-solubles quantifiées en arsenic étaient respectivement de $1,7 \mu\text{g}/\text{m}^2$ et $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^2$ dans les pièces principales de vie et de $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^2$ et $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^2$ dans les chambres des enfants.

Les concentrations acido-solubles en cadmium n'étaient pas quantifiables dans 74% des pièces principales de vie et 71% des chambres et les valeurs médianes inférieures à la LOQ ($0,4 \mu\text{g}/\text{m}^2$).

2.4.2. Analyse des facteurs environnementaux de l'imprégnation au plomb, au cadmium et à l'arsenic

Pour les variables issues des réponses aux questionnaires retenues dans les modèles, le pourcentage maximum de données manquantes par variable était de 7%. Toutefois, étant donné le grand nombre de variables renseignées dans les questionnaires, peu d'individus ne présentaient aucune valeur manquante.

Parmi les adultes ayant participé à l'étude, les hommes présentaient des niveaux de plombémie plus élevés que les femmes (Tableau 8) et la plombémie augmentait avec l'âge (augmentation de 1,2% par an), tel qu'habituellement retrouvé dans la littérature.

Après ajustement sur le sexe, l'âge et l'indice de masse corporelle (IMC), une augmentation des niveaux d'imprégnation au plomb avec la consommation d'alcool et de tabac et en lien avec une exposition professionnelle au plomb était retrouvée.

Concernant les variables d'exposition liées au site, une association avec la zone d'étude était observée : les riverains du site de Croix-de-Pallières étaient en effet plus imprégnés que ceux du site de Carnoulès. La consommation de certains aliments produits sur la zone d'étude (œufs, lapins, volailles, gibiers et champignons) était associée à une augmentation des niveaux de plombémie. Les niveaux de plombémie n'étaient pas associés à la pratique d'activités extérieures. En revanche, les niveaux de concentration en plomb dans les sols étaient corrélés aux niveaux de plombémie, qui augmentaient avec la durée de résidence sur site (augmentation de 4% pour 10 années). La consommation d'eau de puits, de forage ou de source individuels semblait également corrélée à une augmentation de la plombémie, sans pouvoir être confirmée sur plan statistique.

Le modèle comprenant uniquement les variables du questionnaire (Tableau 9) a mis en évidence les mêmes relations que ci-dessus, ainsi qu'une influence protectrice du ménage, illustrée par la variable « fréquence de passage de la serpillière ».

Les femmes présentaient des niveaux de cadmium et d'arsenic urinaires plus élevés que les hommes et la cadmiurie augmentait avec l'âge, tel qu'habituellement retrouvé dans la littérature. Après ajustement sur le sexe, l'âge et l'IMC, l'analyse a mis en évidence une association entre cadmiurie et tabagisme et une tendance avec la pratique d'activités de loisirs exposantes au cadmium. Aucun autre déterminant n'a été retrouvé pour l'imprégnation au cadmium.

Après exclusion des consommateurs de produits de la mer, les concentrations en arsenic urinaire augmentaient avec la consommation d'alcool et comme pour le plomb, une influence de la fréquence du ménage, illustrée par la variable « fréquence de passage de la serpillère », était observée.

Pour les enfants, l'analyse met en évidence une association entre l'imprégnation au cadmium et le comportement mains/bouche ainsi que la consommation d'eau de puits, forage ou source individuels (Tableau 10, Tableau 11).

Tableau 8 : Résultats des modèles Adultes (15 ans et plus). Données questionnaires + environnement. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2018.

	Plomb (N=564)			Cadmium (N=328)			Arsenic (N=365)		
	estimateur	Intervalle de confiance à 95%		estimateur	Intervalle de confiance à 95%		estimateur	Intervalle de confiance à 95%	
Variables non liées au site									
(Intercept)	2,33	1,91	2,74	-1,65	-2,10	-1,20	1,08	0,53	1,62
Log([créatinine]) en g/l	-	-	-	0,84	0,72	0,97	0,83	0,72	0,93
Sexe (Femme/Homme)	-0,12	-0,21	-0,02	0,24	0,09	0,39	0,13	0,01	0,25
Fréquence consommation d'abats dans le mois	-0,01	-0,10	0,08	-0,03	-0,16	0,10	-	-	-
Fréquence consommation d'abats dans les 7 jours	-	-	-	-	-	-	0,09	-0,08	0,26
Fréquence consommation de poisson/crustacés dans le mois	-0,11	-0,28	0,07	-0,08	-0,32	0,15	-	-	-
Fréquence consommation de poisson/crustacés dans les 7 jours	-	-	-	-	-	-	0,04	-0,07	0,15
Conso. habituelle de vin/champagne (au moins un verre/jour)	0,18	0,08	0,29	0,03	-0,11	0,17	-	-	-
Conso. habituelle de bière/cidre (au moins un verre/jour)	0,31	0,14	0,48	0,02	-0,19	0,23	-	-	-
Conso. habituelle d'alcool fort (au moins un verre/jour)	0,16	-0,10	0,42	0,08	-0,21	0,38	-	-	-
Conso. récente de vin/champagne (au moins un verre/jour)	-	-	-	-	-	-	0,12	-0,01	0,24
Conso. récente de bière/cidre (au moins un verre/jour)	-	-	-	-	-	-	-0,06	-0,23	0,12
Conso. récente d'alcool fort (au moins un verre/jour)	-	-	-	-	-	-	-0,04	-0,25	0,17
Consommation d'eau riche en As (1 verre/jour)	-	-	-	-	-	-	0,07	-0,18	0,33
Consommation d'eau riche en As (2 à 4 verres/jour)	-	-	-	-	-	-	-0,12	-0,38	0,14
Consommation d'eau riche en As (+ de 4 verres/jour)	-	-	-	-	-	-	0,10	-0,22	0,42
Dents avec plombages	-0,04	-0,13	0,04	-	-	-	-	-	-
Pays de naissance à risque d'exposition au Pb	0,13	-0,10	0,36	-	-	-	-	-	-
Loisirs exposant au polluant	0,02	-0,08	0,11	0,15	-0,02	0,31	0,04	-0,17	0,26
Exposition professionnelle au polluant	0,22	0,08	0,36	0,12	-0,07	0,32	-0,18	-0,48	0,13
Travaux de terrassement	0,07	-0,02	0,17	-0,02	-0,15	0,11	0,06	-0,07	0,18
Fumeurs	0,24	0,12	0,36	0,28	0,12	0,44	0,02	-0,12	0,17
Ex-fumeurs	0,19	0,05	0,33	0,15	-0,04	0,35	-0,09	-0,26	0,08
Fumeurs passifs	0,04	-0,09	0,17	-0,23	-0,44	-0,02	-0,07	-0,23	0,09

	Plomb (N=564)			Cadmium (N=328)			Arsenic (N=365)		
Variables liées au site									
Zone (Thoiras, Tornac, Saint Félix de Pallières)	0,19	0,09	0,29	-	-	-	0,03	-0,10	0,16
Utilisation de l'eau du puits /forage pour arroser le potager	-0,10	-0,21	0,01	-0,17	-0,32	-0,02	-0,01	-0,20	0,17
Consommation d'eau du robinet	0,08	-0,05	0,20	-0,03	-0,21	0,16	0,03	-0,10	0,16
Consommation d'eau du puits, forage, source	0,14	-0,02	0,29	0,10	-0,11	0,30	0,02	-0,17	0,21
Part des fruits et légumes conso. de la zone : un peu	0,06	-0,07	0,20	-0,15	-0,35	0,05	0,03	-0,12	0,17
Part des fruits et légumes conso. de la zone : la moitié	0,09	-0,08	0,26	-0,14	-0,38	0,10	0,08	-0,09	0,26
Part des fruits et légumes conso. de la zone : la majorité	0,01	-0,16	0,18	-0,05	-0,28	0,18	-0,04	-0,22	0,15
Conso. habituelle œufs, volaille, lapins, gibiers de la zone	0,12	0,02	0,21	0,12	-0,02	0,26	-	-	-
Conso. récente de gibier de la zone	-	-	-	-	-	-	0,04	-0,25	0,33
Conso. champignons cueillis sur la zone	0,13	0,04	0,22	0,04	-0,09	0,17	0,06	-0,05	0,18
Entretien de la pelouse	0,00	-0,12	0,12	-0,08	-0,25	0,08	-0,11	-0,26	0,04
Marche à pied	0,04	-0,10	0,19	-0,07	-0,15	0,30	0,04	-0,14	0,22
Fréquentation des espaces publics	0,02	-0,09	0,12	-0,10	-0,26	0,07	-0,02	-0,12	0,16
log(polluant_poussières_pièce de vie)	0,02	-0,03	0,07	-0,02	-0,12	0,08	0,01	-0,05	0,07
log(polluant_sols)	0,07	0,03	0,12	-0,01	-0,09	0,07	0,12	0,03	0,21
Absence de la zone d'étude pendant l'enquête	-	-	-	-	-	-	-0,06	-0,24	0,13

- : variable non incluse dans le modèle
en rouge : Association observée (IC n'incluant pas 0)
en vert : Association possible (IC incluant 0)

Tableau 9 : Résultats des modèles Adultes (15 ans et plus). Données questionnaires. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2018.

	Plomb (N=564)			Cadmium (N=328)			Arsenic (N=365)		
	estimateur	Intervalle de confiance à 95%		estimateur	Intervalle de confiance à 95%		estimateur	Intervalle de confiance à 95%	
Variables non liées au site									
(Intercept)	2,87	2,45	3,30	-1,66	-2,17	-1,14	1,77	1,30	2,16
Log([créatinine]) en g/l	-	-	-	0,85	0,73	0,98	0,83	0,72	0,94
Sexe (Femme/Homme)	-0,11	-0,21	-0,02	0,22	0,07	0,37	0,14	0,02	0,26
Fréquence consommation d'abats dans le mois	0,01	-0,08	0,10	-0,04	-0,18	0,09	-	-	-
Fréquence consommation d'abats dans les 7 jours	-	-	-	-	-	-	0,09	-0,08	0,26
Fréquence consommation de poisson/crustacés dans le mois	-0,08	-0,25	0,09	-0,04	-0,28	0,19	-	-	-
Fréquence consommation de poisson/crustacés dans les 7 jours	-	-	-	-	-	-	0,03	-0,07	0,14
Conso. habituelle de vin/champagne (au moins un verre/jour)	0,17	0,07	0,27	0,02	-0,12	0,16	-	-	-
Conso. habituelle de bière/cidre (au moins un verre/jour)	0,34	0,17	0,51	<0,01	-0,21	0,22	-	-	-
Conso. habituelle d'alcool fort (au moins un verre/jour)	0,16	-0,10	0,42	0,07	-0,23	0,36	-	-	-
Conso. récente de vin/champagne (au moins un verre/jour)	-	-	-	-	-	-	0,12	<0,01	0,24
Conso. récente de bière/cidre (au moins un verre/jour)	-	-	-	-	-	-	-0,07	-0,25	0,10
Conso. récente d'alcool fort (au moins un verre/jour)	-	-	-	-	-	-	-0,02	-0,22	0,19
Consommation d'eau riche en As (1 verre/jour)	-	-	-	-	-	-	0,06	-0,20	0,32
Consommation d'eau riche en As (2 à 4 verres/jour)	-	-	-	-	-	-	-0,07	-0,34	0,19
Consommation d'eau riche en As (+ de 4 verres/jour)	-	-	-	-	-	-	0,08	-0,24	0,39
Dents avec plombages	-0,06	-0,15	0,03	-	-	-	-	-	-
Pays de naissance à risque d'exposition au Pb	0,10	-0,12	0,33	-	-	-	-	-	-
Canalisations en plomb dans le logement	-0,07	-0,31	0,17	-	-	-	-	-	-
NSP si canalisations en plomb dans le logement	0,01	-0,25	0,27	-	-	-	-	-	-
Loisirs exposant au polluant	-0,01	-0,10	0,08	0,15	-0,01	0,32	0,04	-0,18	0,25
Exposition professionnelle au polluant	0,25	0,11	0,38	0,11	-0,08	0,30	-0,18	-0,46	0,10
Travaux de terrassement	0,06	-0,03	0,15	-0,04	-0,17	0,09	0,06	-0,06	0,18
travaux de rénovation datant de moins de 6 mois	-0,08	-0,17	0,02	-0,03	-0,17	0,11	-0,02	-0,14	0,10
Fumeurs	0,23	0,11	0,34	0,27	0,11	0,43	0,03	-0,11	0,18
Ex-fumeurs	0,18	0,04	0,32	0,16	-0,03	0,37	-0,07	-0,24	0,10
Fumeurs passifs	0,02	-0,11	0,15	-0,22	-0,43	-0,01	-0,07	-0,23	0,09

	Plomb (N=564)			Cadmium (N=328)			Arsenic (N=365)		
Variables liées au site									
Zone (Thoiras, Tornac, Saint Félix de Pallières)	0,14	0,04	0,23	-	-	-	-0,06	-0,19	0,06
Possession d'un jardin	-0,05	-0,23	0,13	<0,01	-0,23	0,24	0,04	-0,17	0,26
Utilisation de l'eau du puits /forage pour arroser le potager	-0,11	-0,22	<0,01	-0,18	-0,33	-0,02	-0,07	-0,20	0,06
Animal domestique accédant à l'intérieur du domicile	-0,02	-0,11	0,06	0,11	-0,02	0,24	0,05	-0,07	0,16
Passage de la serpillère humide (1 fois/semaine)	-0,23	-0,35	-0,11	<0,01	-0,16	0,15	-0,20	-0,35	-0,05
Passage de la serpillère humide (plus d'1 fois/semaine)	-0,25	-0,38	-0,13	0,09	-0,09	0,26	-0,19	-0,34	-0,03
Consommation d'eau du robinet	0,06	-0,07	0,19	-0,02	-0,20	0,16	0,07	-0,07	0,22
Consommation d'eau du puits, forage, source	0,13	-0,03	0,29	0,12	-0,08	0,32	0,07	-0,12	0,27
Part des fruits et légumes conso. de la zone : un peu	0,02	-0,11	0,16	-0,14	-0,34	0,06	0,02	-0,12	0,16
Part des fruits et légumes conso. de la zone : la moitié	0,05	-0,11	0,22	-0,14	-0,38	0,10	0,07	-0,11	0,25
Part des fruits et légumes conso. de la zone : la majorité	0,01	-0,16	0,18	-0,06	-0,29	0,17	0,02	-0,17	0,20
Conso. habituelle œufs, volaille, lapins, gibiers de la zone	0,10	0,01	0,19	0,12	-0,01	0,26	-	-	-
Conso. récente de gibier de la zone	-	-	-	-	-	-	0,09	-0,20	0,38
Conso. champignons cueillis sur la zone	0,13	0,04	0,22	0,04	-0,09	0,17	0,07	-0,04	0,18
Entretien de la pelouse	0,02	-0,10	0,14	-0,11	-0,28	0,06	-0,12	-0,27	0,03
Marche à pied	0,03	-0,12	0,18	-0,09	-0,31	0,13	<0,01	-0,18	0,17
Fréquentation des espaces publics	<0,01	-0,11	0,10	-0,09	-0,25	0,07	-0,03	-0,16	0,10
Absence de la zone d'étude pendant l'enquête	-	-	-	-	-	-	0,03	-0,15	0,22

Tableau 10 : Résultats des modèles Enfants (moins de 15 ans). Données questionnaires + environnement. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2018.

	Plomb (N=92)			Arsenic (N=88)		
	estimateur	Intervalle de confiance à 95%		estimateur	Intervalle de confiance à 95%	
Variables non liées au site						
(Intercept)	2,30	1,18	3,42	2,30	1,13	3,48
Log([créatinine]) en g/l	-	-	-	0,93	0,65	1,20
Sexe (Fille/Garçon)	0,12	-0,12	0,37	-0,30	-0,56	-0,05
Fréquence consommation d'abats dans le mois	-0,17	-0,43	0,10	-	-	-
Fréquence consommation d'abats dans les 7 jours	-	-	-	0,19	-0,36	0,73
Fréquence consommation de poisson/crustacés dans le mois	0,45	0,06	0,83	-	-	-
Fréquence consommation de poisson/crustacés dans les 7 jours	-	-	-	0,21	-0,10	0,52
Fréquence consommation de poisson/crustacés dans les 3 jours	-	-	-	0,16	-0,17	0,49
Consommation d'eau riche en As (1 verre/jour)	-	-	-	0,26	-0,84	1,36
Consommation d'eau riche en As (2 à 4 verres/jour)	-	-	-	-0,12	-0,56	0,31
Consommation d'eau riche en As (+ de 4 verres/jour)	-	-	-	-0,76	-1,92	0,39
Exposition professionnelle des parents au polluant	-0,02	-0,41	0,38	0,53	-0,42	1,49
Enfant vivant avec des fumeurs	0,21	-0,08	0,51	-0,29	-0,61	0,03

	Plomb (N=92)			Arsenic (N=88)		
Variabes liées au site						
Zone (Thoiras, Tornac, Saint Félix de Pallières)	0,28	-0,01	0,56	-0,08	-0,36	0,21
Utilisation de l'eau du puits /forage pour arroser le potager	-0,04	-0,40	0,31	-0,02	-0,42	0,39
Animal domestique accédant à l'intérieur du domicile	-0,15	-0,57	0,26			
Consommation d'eau du robinet	0,06	-0,49	0,37	-0,19	-0,79	0,41
Consommation d'eau du puits, forage, source	0,36	-0,04	0,76	0,05	-0,44	0,55
Part des fruits et légumes conso. de la zone : un peu	0,26	-0,19	0,72	0,09	-0,23	0,42
Part des fruits et légumes conso. de la zone : la moitié	0,02	-0,44	0,49	0,17	-0,26	0,59
Part des fruits et légumes conso. de la zone : la majorité	0,27	-0,41	0,95	0,71	-0,03	1,45
Conso. œufs, volaille, lapins, gibiers de la zone	0,03	-0,23	0,28	-	-	-
Conso. œufs produits sur la zone dans les 3 jours	-	-	-	0,10	-0,24	0,43
Conso. lapin chassé sur la zone dans les 3 jours	-	-	-	-0,28	-0,95	0,39
Conso. champignons cueillis sur la zone	0,20	-0,14	0,54	0,09	-0,25	0,44
Fréquentation des espaces publics	0,05	-0,24	0,33	0,11	-0,24	0,45
Enfant scolarisé/gardé sur la zone	-0,01	-0,27	0,26	-0,22	-0,52	0,08
Porte les mains à sa bouche	0,05	-0,21	0,32	0,10	-0,19	0,39
Joue à creuser la terre	0,08	-0,19	0,34	-0,22	-0,51	0,06
log(polluant_poussières_chambre)	0,03	-0,05	0,12	0,06	-0,14	0,26
log(polluant_poussières_pièce de vie)	0,02	-0,09	0,13	-0,01	-0,24	0,22
log(polluant_sols)	<0,01	-0,11	0,11	-0,03	-0,21	0,16

- : variable non incluse dans le modèle
- en rouge : Association observée (IC n'incluant pas 0)
- en vert : Association possible (IC incluant 0)

Tableau 11 : Résultats des modèles Enfants (moins de 15 ans). Données questionnaires. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2018.

	Plomb (N=92)			Cadmium (N=40)			Arsenic (N=88)		
	estimateur	Intervalle de confiance à 95%		estimateur	Intervalle de confiance à 95%		estimateur	Intervalle de confiance à 95%	
Variables non liées au site									
(Intercept)	2,17	1,12	3,22	-2,48	-4,21	-0,74	1,45	0,38	2,52
Log([créatinine]) en g/l	-	-	-	0,78	0,35	1,22	0,92	0,64	1,20
Sexe (Fille/Garçon)	0,12	-0,12	0,37	-0,07	-0,49	0,35	-0,20	-0,46	0,06
Fréquence consommation d'abats dans le mois	-0,08	-0,35	0,20	0,29	-0,33	0,90	-	-	-
Fréquence consommation d'abats dans les 7 jours	-	-	-	-	-	-	0,11	-0,43	0,66
Fréquence consommation de poisson/crustacés dans le mois	0,55	0,19	0,92	-0,25	-1,23	0,74	-	-	-
Fréquence consommation de poisson/crustacés dans les 7 jours	-	-	-	-	-	-	0,12	-0,18	0,43
Fréquence consommation de poisson/crustacés dans les 3 jours	-	-	-	-	-	-	0,12	-0,19	0,44
Consommation d'eau riche en As (1 verre/jour)	-	-	-	-	-	-	0,26	-0,83	1,35
Consommation d'eau riche en As (2 à 4 verres/jour)	-	-	-	-	-	-	-0,07	-0,58	0,43
Consommation d'eau riche en As (+ de 4 verres/jour)	-	-	-	-	-	-	-0,44	-1,61	0,72
Exposition professionnelle des parents au polluant	0,01	-0,37	0,39	0,21	-1,01	1,42	0,27	-0,85	1,40
Epoque de construction du logement (après 1949)	-0,04	-0,29	0,20	-	-	-	-	-	-
Epoque de construction du logement (ne sait pas)	-0,13	-0,78	0,52	-	-	-	-	-	-
Peinture écaillée	-0,29	-0,61	0,02	-	-	-	-	-	-
Travaux de rénovation au cours des 6 derniers mois	-0,05	-0,29	0,19	-0,20	-0,85	0,45	-0,06	-0,37	0,25
Enfant vivant avec des fumeurs	0,33	-0,05	0,62	0,63	0,10	1,17	-0,26	-0,61	0,09

	Plomb (N=92)			Cadmium (N=40)			Arsenic (N=88)		
Variables liées au site									
Zone (Thoiras, Tornac, Saint Félix de Pallières)	0,14	-0,16	0,45	-	-	-	0,19	-0,15	0,53
Possession d'un jardin	0,08	-0,39	0,55	-0,05	-0,92	0,82	0,11	-0,49	0,71
Utilisation de l'eau du puits /forage pour arroser le potager	-0,10	-0,42	0,22	0,12	-0,61	0,86	-0,05	-0,42	0,32
Animal domestique accédant à l'intérieur du domicile	-0,22	-0,54	0,11	0,25	-0,35	0,85	-0,39	-0,81	0,04
Passage de la serpillère humide (1 fois/semaine)	-0,19	-0,51	0,13	<0,01	-0,55	0,55	0,11	-0,26	0,49
Passage de la serpillère humide (plus d'1 fois/semaine)	-0,29	-0,63	0,05	0,17	-0,44	0,78	-0,01	-0,41	0,39
Consommation d'eau du robinet	-0,11	-0,52	0,30	0,11	-0,53	0,74	-0,08	-0,41	0,57
Consommation d'eau du puits, forage, source	-0,20	-0,77	0,38	1,17	0,21	2,12	0,16	-0,35	0,67
Part des fruits et légumes conso. de la zone : un peu	0,31	-0,17	0,79	0,16	-1,07	1,40	0,13	-0,21	0,46
Part des fruits et légumes conso. de la zone : la moitié	0,08	-0,44	0,59	0,34	-0,96	1,64	-0,03	-0,51	0,45
Part des fruits et légumes conso. de la zone : la majorité	0,36	-0,30	1,01	0,87	-1,27	3,00	0,61	-0,14	1,35
Conso. œufs, volaille, lapins, gibiers de la zone	0,05	-0,21	0,30	0,21	-0,30	0,73	-	-	-
Conso. œufs produits sur la zone dans les 3 jours	-	-	-	-	-	-	0,17	-0,15	0,49
Conso. lapin chassé sur la zone dans les 3 jours	-	-	-	-	-	-	-0,21	-0,86	0,44
Conso. champignons cueillis sur la zone	0,29	-0,05	0,62	0,46	-0,02	0,95	0,08	-0,27	0,43
Fréquentation des espaces publics	0,12	-0,17	0,40	-0,28	-1,11	0,56	<0,01	-0,32	0,33
Enfant scolarisé/gardé sur la zone	0,07	-0,20	0,33	0,03	-0,55	0,61	-0,11	-0,41	0,19
Porte les mains à sa bouche	0,12	-0,14	0,38	0,66	0,18	1,14	0,16	-0,13	0,45
Joue à creuser la terre	0,09	-0,16	0,33	0,13	-0,39	0,64	-0,11	-0,42	0,20
Présence dans la zone d'étude pendant l'enquête	-	-	-	-	-	-	0,23	-0,31	0,77

- : variable non incluse dans le modèle
- en rouge : Association observée (IC n'incluant pas 0)
- en vert : Association possible (IC incluant 0)

Les trois analyses de sensibilité réalisées, que ce soit sur le redressement de la population sur la variable emploi, la prise en compte d'un effet foyer ou l'analyse cas complets, ont montré des résultats comparables à ceux de l'analyse principale. Le redressement n'a que très peu d'impact sur le sens et la force des associations des facteurs de risque. L'effet foyer aurait théoriquement dû accroître les intervalles de confiance autour des estimations mais cela reste marginal, probablement lié au grand nombre de valeurs manquantes pour lesquelles l'imputation apporte une variabilité plus grande au modèle (**Annexe 10**). L'analyse cas complets, limitée aux données environnementales de plomb, n'a pas non plus montré d'effet sur le sens et la force des associations.

2.5. Discussion

2.5.1. Synthèse des principaux résultats

Malgré des niveaux de concentrations en plomb très élevés dans les sols, la distribution des plombémies des riverains ayant participé à l'étude ne différait pas de celle observée en population générale. Par ailleurs, aucun cas de saturnisme infantile n'a été identifié parmi les enfants ayant participé à l'étude, mais seuls 9 enfants ont été dépistés. En revanche, une surimprégnation à l'arsenic des populations étudiées était observée par rapport à la population générale française et, dans une moindre mesure, en cadmium : 22% des personnes de l'échantillon présentaient des valeurs en arsenic supérieures à la valeur de référence et 12% pour le cadmium.

Bien que peu de valeurs de plombémies soient supérieures aux valeurs de référence et que l'imprégnation globale de la population d'étude ne se distingue pas de celle observée en population générale, des déterminants de l'imprégnation au plomb ont été identifiés.

Une association a été retrouvée entre les niveaux de concentrations dans les sols en arsenic, mais également en plomb, et les niveaux biologiques mesurés chez les adultes. Cette relation n'a pas été retrouvée pour le cadmium chez les adultes, ni chez les enfants pour les 3 polluants, probablement parce que les effectifs étudiés pour le cadmium et pour les 3 polluants chez les enfants étaient trop faibles.

D'autres déterminants de l'imprégnation au plomb ont été retrouvés : le nombre d'années habitées sur la zone, la consommation d'eau de puits ou de forage individuel, la consommation habituelle d'œufs, volaille, lapins ou gibiers des zones et la consommation de champignons cueillis sur les zones d'étude et le comportement mains/bouche chez les enfants.

Les concentrations en plomb et en arsenic mesurées dans les logements des participants à l'étude étaient plus élevées que celles retrouvées en population générale lors de la campagne Plomb-Habitat pilotée par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur en 2008-2009 [17]. Les concentrations médianes étaient ainsi plus de 2 fois plus élevées pour le plomb et plus de 3 fois plus élevées pour l'arsenic, par rapport aux niveaux retrouvés dans la campagne Plomb-Habitat.

Toutefois, dans cette étude, les concentrations en poussières n'étaient pas corrélées aux niveaux d'imprégnation des participants au plomb. Par contre, la variable « fréquence de passage de la serpillère humide », qui traduit la fréquence de nettoyage de l'habitat et qui est un proxy des concentrations dans les poussières, a été retrouvée associée à une diminution de l'imprégnation en plomb et en arsenic chez les adultes.

2.5.2. De la contamination de l'environnement aux effets sanitaires

Plomb

Il est difficile d'établir un lien direct entre les teneurs en plomb dans les sols et les plombémies attendues pour les personnes vivant sur un site pollué par le plomb. Le HCSP préconise, dans ses avis de juin 2014 et d'octobre 2017, un dépistage du saturnisme des enfants de moins de 6 ans et des femmes enceintes ou envisageant une grossesse à court terme (dans les 6 mois), exposés dans leurs lieux de vie à des sols présentant une concentration en plomb supérieure ou égale à 300 mg/kg [2]. Pourtant, aucun cas de saturnisme infantile n'a été identifié parmi les participants à cette étude.

Cadmium

Plusieurs études épidémiologiques menées auprès de populations résidant sur des sols pollués au cadmium ont mis en évidence une association entre la pollution des sols d'une part, et la concentration urinaire en cadmium et divers marqueurs d'atteinte rénale, notamment la présence de microprotéinurie d'origine tubulaire d'autre part. Les concentrations mesurées dans les jardins privés

du site de la Croix-de-Pallières sont toutefois inférieures à celles mesurées à Viviez, dans l'Aveyron, où une surimprégnation au cadmium pouvant être à l'origine d'atteintes rénales a été démontrée [12].

Arsenic

Il existe également plusieurs études mettant en évidence une association entre la présence d'arsenic dans les sols et l'imprégnation en arsenic des populations [12, 18, 19, 20, 21, 22]. Dans une étude d'imprégnation australienne réalisée chez des riverains d'une ancienne mine d'or dont les sols étaient pollués en arsenic, le principal facteur explicatif de la concentration en arsenic urinaire était la concentration en arsenic dans les sols des jardins [22]. En France, plusieurs études d'imprégnation à l'arsenic ont été menées par SpFrance, concernant des origines industrielles autour des communes de Salsigne (Aude) [18] et de Viviez (Aveyron) [12] et des origines naturelles à Neuves-Maisons (Meurthe-et-Moselle) [19]. L'étude menée auprès des populations vivant sur l'ancien site minier de Salsigne [18] a montré que le niveau d'arsenic urinaire était significativement associé à la consommation de produits de jardin, mais la relation avec l'ingestion ou l'inhalation de poussières n'avait pas été quantifiée. L'étude d'imprégnation menée à Viviez dans le cadre d'une importante pollution à l'arsenic a montré que les adultes vivant dans la zone et non exposés professionnellement avaient, dans une moindre mesure, des concentrations en arsenic urinaire supérieures à celles relevées dans la population de la zone témoin [12].

2.5.3. Limites méthodologiques de l'étude

2.5.3.1. *Participation et biais possibles*

Le recrutement pour participer à l'étude était basé sur le volontariat. La comparaison des caractéristiques des participants à l'étude avec celles des populations d'étude, présentée en 2.4.1.2, a mis en évidence dans l'échantillon une sous-représentation des jeunes adultes et une surreprésentation des pré-retraités et retraités ainsi que des plus diplômés, résultats retrouvés habituellement dans les études ayant trait à la santé. En plus de ce biais de participation, un biais de déclaration est possible dans les réponses aux questionnaires sur les comportements et habitudes de vie.

Contrairement à ce qui a été décrit pour les sites de Viviez [12] et Salsigne [18], l'analyse n'a pas mis en évidence d'association entre la consommation de fruits et légumes produits localement et l'imprégnation des riverains. Ce résultat pourrait être lié à un manque de puissance et/ou à une mauvaise compréhension des questions concernant ce mode d'exposition. Il est en effet possible que la formulation des questions (**Annexe 4**) ait entraîné une confusion entre la consommation de fruits et légumes produits localement et la consommation globale de ce type de produits, indépendamment de leur provenance.

Une part importante des participants n'a pas respecté la consigne de ne pas consommer de produits de la mer dans les 3 jours précédant les prélèvements biologiques (156 personnes), difficulté rencontrée habituellement dans ce type d'étude [8]. Le non-respect de cette consigne a diminué la puissance statistique de l'analyse des déterminants de l'imprégnation à l'arsenic.

En termes de représentativité, il n'est donc pas envisageable en toute rigueur, de considérer que les résultats obtenus sont représentatifs de l'ensemble de la population des cinq communes étudiées. Il n'en reste pas moins qu'il s'agit d'indications sérieuses pour statuer sur les niveaux de plombémie, d'arsenic urinaire ou de cadmium urinaire (pour le site de la Croix de Pallières) et les déterminants des imprégnations.

2.5.3.2. *Limites d'interprétation des mesures*

a) Choix des biomarqueurs et représentativité des mesures à un instant t

La mesure de biomarqueurs de pollution dans des échantillons biologiques reflète le taux d'imprégnation par les polluants ayant pénétré dans l'organisme via les différentes voies d'exposition (inhalation, ingestion, contact cutané). En fonction de la demi-vie d'élimination de la substance, la mesure peut refléter une exposition récente (pour les composés de demi-vie courte) ou une exposition cumulée au cours des années précédentes (pour les substances de demi-vie longue).

La mise en place de cette étude a conduit à effectuer un certain nombre de choix méthodologiques notamment en termes de choix de biomarqueurs. Alors que la plombémie reflète un état ponctuel d'équilibre entre exposition et élimination, la cadmiurie reflète plutôt une exposition chronique, et l'arsenic urinaire reflète l'exposition à court terme. Pour étudier l'exposition environnementale, la somme de l'arsenic inorganique et de ses métabolites est un meilleur reflet de l'exposition à l'arsenic inorganique (forme la plus toxique) que l'arsenic total qui inclut l'arsenic organique d'origine alimentaire, peu toxique pour le consommateur et sans lien avec la pollution présente (produits de la mer,...).

Les concentrations biologiques de biomarqueurs sont variables au cours de la journée. Un seul prélèvement a été recueilli pour chaque participant. Le choix a été fait de recueillir les premières urines du matin et non les urines de 24 heures, du fait de la difficulté d'un recueil complet par une population non hospitalisée et non entraînée. De plus la première miction présente moins de variabilité qu'un échantillon prélevé au cours de la journée, compte tenu de l'influence de l'alimentation, de l'état d'hydratation (ou consommation d'eau) et de la diurèse sur le flux urinaire. Les prélèvements de sang consistaient en des prélèvements uniques et ponctuels réalisés lors des permanences ou à domicile par un(e) infirmier(ère). Contrairement à une prise de sang à jeun, ce mode de recueil ne permet pas d'homogénéiser l'heure de la collecte, élément d'importance compte-tenu de l'évolution des concentrations de biomarqueurs au cours de la journée.

Par ailleurs, les prélèvements biologiques ont été réalisés entre octobre et décembre, ce qui ne correspond peut-être pas à la période d'autoconsommation la plus importante.

Les résultats permettent ainsi d'obtenir une photographie à un instant t de l'imprégnation de la population étudiée. Si la réalisation d'une seule mesure urinaire notamment en arsenic (reflet de l'exposition à court terme) paraît satisfaisante pour étudier l'influence des facteurs d'exposition, il est nécessaire d'avoir recours à des mesurages répétés à cause de la variabilité intra-individuelle du biomarqueur urinaire pour caractériser un niveau d'imprégnation « moyen » chez un individu.

b) Conditions de prélèvements, de transport et d'analyse

La campagne de mesures d'imprégnation et la passation des questionnaires sur les caractéristiques et comportements des participants se sont déroulées simultanément entre octobre et décembre 2015. L'étude de la répartition spatiale des participants et de leurs résultats d'analyses biologiques a mis en évidence la présence de personnes ayant des niveaux d'imprégnation supérieurs aux valeurs de référence, en dehors des secteurs ayant fait l'objet de campagnes de mesures environnementales lors de la réalisation des études d'interprétation de l'état des milieux.

Pour étudier plus finement les modalités d'exposition des participants à l'étude, SpFrance a demandé à pouvoir disposer de données environnementales complémentaires au plus près de l'exposition (mesures dans les sols des jardins et poussières des habitations) pour l'ensemble des participants, quels que soient leurs niveaux d'imprégnation.

Des campagnes de mesures environnementales ont ainsi été réalisées dans un second temps : de septembre à octobre 2016 pour les sols des jardins et de mars à avril 2017 pour les poussières à l'intérieur des logements. Ce décalage dans le temps et la différence de climat et des conditions météorologiques (hiver vs printemps) ont pu biaiser la relation statistique entre les mesures environnementales et les mesures d'imprégnation. Ceci pourrait expliquer que l'on ait mis en évidence une influence du passage de la serpillière sur les niveaux d'imprégnation (information recueillie par questionnaire au moment du prélèvement biologique) mais pas directement d'association entre les niveaux d'imprégnation et les concentrations en polluants mesurés dans les poussières à distance des prélèvements biologiques (15 à 18 mois plus tard).

Les prélèvements de poussières ont été réalisés dans les foyers ayant donné leur accord, et devant respecter des préconisations particulières (ne pas faire le ménage au minimum 2 jours avant le passage du préleveur au domicile). Etant donné la faible quantité de poussières récoltées lors du passage de certains enquêteurs, il est probable que ces consignes n'aient pas été respectées par tous les ménages enquêtés, pouvant introduire une erreur dans l'estimation de l'exposition environnementale.

Les prélèvements biologiques ont été stockés à -20°C puis transportés vers le laboratoire d'analyse. Les prélèvements environnementaux (sols, eaux, poussières) ont été transportés vers différents laboratoires d'analyses. Ces différentes étapes de transport peuvent altérer l'intégrité des échantillons avant leur analyse et introduire des erreurs sur les résultats d'analyse.

Enfin, toute analyse physico-chimique ou biologique introduit une incertitude sur les résultats, du fait de nombreux facteurs comme l'étalonnage de l'appareil, l'instrument en lui-même, l'opérateur qui réalise la préparation et l'analyse, la température, etc. Ces éléments métrologiques doivent être pris en compte dans l'interprétation des résultats.

2.5.3.3. *Limites de l'analyse statistique*

Les effectifs de participants, y compris adultes, restaient faibles au regard du nombre important de facteurs de risque devant être pris en compte pour expliquer les niveaux des biomarqueurs. Pour rappel, une règle communément admise précise qu'il est nécessaire de disposer d'environ 10 observations par degré de liberté afin d'obtenir une bonne estimation des paramètres d'un modèle. Dans notre étude, le respect de cette règle aurait nécessité la suppression de plusieurs variables pouvant expliquer l'imprégnation aux polluants, au risque de biaiser les résultats (inversion de certaines associations et/ou non mise en évidence d'associations pour des variables supprimées). Le choix a donc été fait de conserver un certain nombre de variables, ce qui a pu entraîner une imprécision des paramètres. La situation était encore plus marquée pour les enfants. Cet échantillon restreint nous a d'ailleurs contraints à retirer du modèle certains facteurs de risque connus mais de faibles effectifs dans cette étude (présence de canalisations en plomb,...). Les facteurs de risque restants sont donc entachés d'un biais puisque estimés sans ajustement sur les variables omises.

L'imputation multiple réalisée pour prendre en compte les données manquantes permet d'utiliser l'ensemble des individus pour l'analyse, mais dans le meilleur des cas, si elle donne des estimations non biaisées, l'incertitude les entourant est plus importante que si nous avions pu disposer des valeurs observées. Ce phénomène est amplifié lors de l'étude des liens avec les données environnementales recueillies. En effet, un certain nombre de ménages ont refusé ces prélèvements, ce qui a augmenté le nombre de données manquantes dans l'analyse de la relation entre imprégnation et prélèvements de sol et poussières.

3. RECOURS A UN COMITE D'APPUI

3.1. Composition et modalités de fonctionnement

SpFrance a réuni un comité d'appui pour l'analyse et l'interprétation des données de l'étude d'imprégnation ainsi que la formulation des propositions émises à l'issue de l'étude. Ce comité était constitué d'experts externes à SpFrance, spécialistes en épidémiologie, anthropologie, expologie, biostatistique et toxicologie. Chaque expert a rempli une déclaration publique d'intérêt et était représenté *intuitu personae*.

Le comité s'est réuni à quatre reprises en présence de l'équipe projet en charge de l'étude : le 13 juin 2016, le 5 décembre 2016, le 22 novembre 2017 et le 29 mars 2018.

3.2. Entretiens avec les parties prenantes

3.2.1. Objectifs et déroulement

Il a souhaité échanger avec différentes parties prenantes (riverains, associations locales, organisations institutionnelles, etc.). L'objectif de ces rencontres était de quatre ordres : i) déterminer le degré de connaissance des acteurs auditionnés sur l'étude d'imprégnation menée par SpFrance, ii) compléter les connaissances du comité sur le contexte, iii) comprendre la perception, l'implication et les attentes des parties prenantes sur le sujet et enfin, iv) identifier d'autres acteurs éventuellement impliqués. Ainsi, deux séries d'échanges ont été organisées dans les locaux de SpFrance à Saint-

Maurice, en mars et septembre 2017, principalement sous forme de rencontres en face à face ou par conférence téléphonique lorsque la personne invitée ne pouvait pas se déplacer. La liste des personnes rencontrées figure en **Annexe 11**. Chaque rencontre a fait l'objet d'un *verbatim*, communicable sur demande à SpFrance.

3.2.2. Synthèse des échanges avec les parties prenantes

Les temps d'échanges entre le comité d'appui et les parties prenantes ont mis en évidence une forte attente pour un rendu des résultats de l'étude à la population sur site et des différences notables de gestion et de perception entre l'ancien site minier de Carnoulès et celui de Croix-de-Pallières.

Le site de Carnoulès, qui concerne les communes de Saint-Sébastien-d'Aigrefeuille et Généralgues, a été classé site à responsable défaillant (site « orphelin ») et sa dépollution est gérée par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) depuis 2010. Au niveau des autorités locales, le problème de la dépollution du site a été pris en compte dès 2009. Il est rapporté une bonne coordination pour associer et informer la population et il y a une relative confiance entre les différentes parties prenantes (riverains, associations et services de l'Etat). Les riverains semblent accepter l'idée qu'il est impossible de totalement dépolluer le site et prêts à adapter leurs réflexes et modes de vie au milieu. Le danger existe ; ils ont appris à vivre avec.

A contrario, pour le site minier dit de Croix-de-Pallières qui s'étend sur les communes de Saint-Félix-de-Pallières, Thoiras et Tornac, le contexte est plus sensible. L'ancien exploitant minier existe toujours. Il a obtenu la cessation officielle de la concession de ce site minier par arrêté de renonciation en 2004, après la réalisation de travaux de mise en sécurité du site. Les contacts entre l'ancien exploitant et les autorités locales se font à travers la préfecture et le Comité de Suivi et de d'Information mis en place par le préfet. La circulation des informations ne semble pas aussi fluide que sur le site de Carnoulès. Par exemple, la mairie de Tornac n'a eu connaissance des résultats des études environnementales par la préfecture qu'en 2014. De plus, au niveau de la population vivant dans ces communes, une différence d'appréciation des risques est décrite entre les personnes ayant toujours vécu là et les nouveaux arrivants. Les personnes ayant toujours vécu là semblent moins inquiètes de la pollution liée à l'activité minière que les nouveaux arrivants. Un climat de défiance vis à vis des services de l'Etat est manifeste ; des riverains ont l'impression que des choses leur sont cachées et que, malgré les nombreuses études menées, les mesures de gestion qui s'imposent ne sont pas prises. Il y a une très forte attente de la population concernant le rendu des résultats des analyses (sols, poussières, etc.).

Plusieurs parties prenantes ont demandé des mesures de confinement des sources les plus polluées et plaidé pour qu'une végétalisation des anciennes exploitations à ciel ouvert soit réalisée (pose de géotextile pré-ensemencé) afin de réduire l'exposition de la population aux métaux lourds. Quatre dépôts ont été identifiés par la DGPR sur le site de Saint-Félix comme pouvant faire l'objet de travaux pour limiter les envols de poussières et assurer la stabilité des dépôts.

Toutefois, les potentiels impacts sanitaires ne semblent pas être l'enjeu principal pour une partie de la population. Il y a une forte inquiétude quant à de potentiels impacts économiques négatifs sur les communes (dépréciation immobilière) du site suite à la médiatisation de la pollution.

Une cinquantaine de plaintes au pénal contre X a été déposée au tribunal de grande instance (TGI) de Marseille ainsi que plusieurs requêtes au tribunal administratif pour indemnisation de la dépréciation des biens immobiliers.

Par ailleurs, une problématique de conflits de voisinage est décrite, en lien avec la présence d'une zone d'habitat précaire au niveau d'un terril de résidus miniers sur le site de Croix-de-Pallières et avec l'organisation de rave-parties et de sorties en quads, sources de nuisances et de tensions entre les riverains.

Points saillants suite aux temps d'échanges :

- Des différences notables de gestion et de perception entre l'ancien site minier de Carnoulès et celui de Croix-de-Pallières sont rapportées ;
- Il y a une forte demande des différents acteurs pour un rendu des résultats des analyses et de l'étude à la population sur site ;
- Concernant les familles les plus impactées, la demande porte sur une dépollution ou une solution de relogement acceptable ;
- Les enjeux locaux sont multiples : environnementaux, sanitaires, juridiques, économiques, conflits de voisinage ; les enjeux sanitaires ne représentent qu'une partie des préoccupations des riverains ;
- Les autorités sanitaires ont émis le souhait d'obtenir des éléments plus probants pour comprendre le rapport exposition/imprégnation/effets aux métaux lourds ;
- Les différents acteurs ont reconnu qu'une meilleure coordination des services de l'Etat à tous les niveaux aurait permis de mieux gérer ce dossier et d'apporter une réponse plus efficace aux attentes de la population.

4. PROPOSITIONS

4.1. Formulation et champ des propositions

Les propositions ont été élaborées par le comité d'appui, pluridisciplinaire. Ces propositions ont été établies en intégrant un ensemble de données ou connaissances concernant :

- Le déroulement et les résultats de l'étude d'imprégnation, en considérant les limites de cette étude ;
- Les temps d'échange avec les parties prenantes ;
- Les connaissances scientifiques disponibles de la littérature.

Les objectifs de l'étude d'imprégnation étaient de caractériser les expositions des populations locales et de mieux comprendre leurs sources et modes d'exposition. Ainsi, les résultats de cette étude contribuent à formuler des propositions plus adaptées des mesures de réduction des expositions. Il est important de rappeler ici que les résultats de cette étude d'imprégnation doivent être interprétés à l'échelle de la population et qu'ils ne permettent pas de déterminer ou prédire, pour chaque participant, les facteurs qui contribuent à son exposition. Par ailleurs, il convient de rappeler également les limites du dispositif mis en place et relatives à la non-représentativité de la population échantillonnée, basée sur le volontariat ainsi qu'à la temporalité de réalisation de l'enquête, comprenant les mesures biologiques avec les mesures environnementales (sols, eau et poussières).

Enfin, cette étude ne permet pas de faire un lien entre les facteurs d'exposition et l'apparition éventuelle de pathologies puisqu'un niveau d'imprégnation élevé constitue une alerte qui ne traduit pas nécessairement un effet sur la santé.

Pour compléter les informations issues des résultats de cette étude, le comité d'appui a souhaité auditionner et discuter avec des parties prenantes intéressées (élus municipaux, associations, représentants de société minière, acteurs de santé, lanceurs d'alerte...). Ces échanges ont permis de compléter les connaissances historiques et contemporaines du comité sur le contexte écologique, politique, économique, sociologique, et de comprendre les perceptions, les implications et les attentes des parties prenantes sur le sujet, et vis-à-vis des travaux de SpFrance.

Ces propositions ne concernent pas la prise en charge diagnostique et thérapeutique des risques médicaux liés à une exposition élevée puisque celle-ci fait l'objet d'une saisine de la Direction générale de la santé (DGS) à la Haute autorité de santé (HAS).

Considérant les limites évoquées ci-dessus, on peut considérer que toute la population des zones d'étude est concernée par les propositions formulées. Ces propositions visent notamment à réduire

l'exposition aux polluants mesurés dans l'étude d'imprégnation, ainsi que, plus généralement aux autres polluants qui pourraient être présents.

Trois catégories de propositions ont été dégagées de ce travail, des propositions :

- visant à réduire les expositions ;
- d'ordre méthodologique ;
- d'ordre organisationnel.

4.2. Propositions pour réduire les expositions

Cette première catégorie de propositions est à destination de la population et du gestionnaire. L'exposition aux substances chimiques est le fait, d'une part de la contamination environnementale et, d'autre part de comportements individuels. Il est ainsi utile d'agir sur ces 2 composantes.

Propositions au niveau de la gestion des sources de contamination

1. Réduire le contact de la population avec les polluants par des mesures appropriées de gestion environnementale des sources ou des voies d'exposition. La détermination des mesures de réhabilitation à mettre en place ne relève pas des missions de Santé publique France. A ce titre, certaines mesures ont pu être prises par le passé ou préconisées par les opérateurs du Ministère de la transition écologique et solidaire. Il serait ainsi important d'une part de pouvoir disposer d'un recensement exhaustif des mesures de réhabilitation mises en place et d'autre part d'évaluer l'efficacité de ces mesures au regard de la prévention des expositions des populations. Une concertation entre spécialistes de la dépollution, gestionnaires et population permettra de définir les mesures adaptées au contexte local.
2. Une attention particulière doit être portée à la problématique de l'exposition aux poussières, en particulier pour les populations les plus sensibles² (femmes en âge de procréer et enfants). Ainsi des actions de caractérisation des phénomènes de dispersion des poussières sur la zone sont recommandées afin de gérer au mieux les sources d'envols de poussières, et aussi de retombées. Cette problématique a également été soulignée au décours des entretiens des parties prenantes ; l'exposition aux poussières est favorisée lors de certaines activités de loisirs pratiquées sur les zones d'étude, comme les sorties en quad ou la pratique de motocross.
3. Mieux identifier les zones les plus polluées afin de limiter la fréquentation de la population (signalisation, barrières...).

Propositions au niveau du comportement individuel

Les propositions suivantes issues de l'enquête d'imprégnation renforcent certaines recommandations habituellement préconisées dans des situations de sites et sols pollués ; elles ne sont pas exclusives des conseils sanitaires généraux pour les personnes vivant sur, ou à proximité des sols fortement concentrés en métaux et métalloïdes, conseils qui ont été transmis aux habitants des zones d'étude par l'ARS Occitanie.

Concernant les poussières dans les logements :

4. Les résultats de l'étude d'imprégnation mettent en évidence une augmentation du taux d'imprégnation au cadmium des enfants ayant tendance à porter souvent leurs mains ou à mettre des objets à la bouche. Ils mettent également en évidence une diminution de l'imprégnation en lien avec la fréquence de passage d'une serpillière humide, ce qui renforce les recommandations d'essuyage humide des poussières aux sols, sur les meubles et les objets susceptibles d'être portés à la bouche par les jeunes enfants.
5. L'observation de concentrations plus élevées en polluants dans les poussières des pièces de vie par rapport aux chambres, encourage à pratiquer des mesures d'hygiène telles que le brossage et l'essuyage énergique des semelles, voire le déchaussement à l'entrée des habitations.

² Détermination de nouveaux objectifs de gestion des expositions au plomb. Synthèse et recommandations. HCSP. Juin 2014.

Concernant l'alimentation :

6. Les données de l'étude d'imprégnation confirment un lien entre la consommation de denrées produites ou chassées localement (champignons, œufs, volailles, lapins et gibiers) et l'imprégnation de la population : il est proposé d'éviter une consommation régulière de ces produits. Pour le gibier en particulier, l'avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif au «risque sanitaire lié à la consommation de gibier au regard des contaminants chimiques environnementaux (dioxines, polychlorobiphényles (PCB), cadmium et plomb)³ » conforte cette proposition et notamment vis-à-vis des populations les plus sensibles. Toutefois l'étude ne permet pas de quantifier des limites de consommation.
7. D'après les résultats de l'étude d'imprégnation, il est rappelé qu'il est préférable de boire l'eau du robinet qui fait l'objet de contrôles réglementaires réguliers et qui n'a pas présenté de contamination, plutôt que des eaux non contrôlées (eau de puits, forage, source...). En l'absence d'un nombre suffisant de prélèvements réalisés dans les eaux de puits et de données sur la contamination des légumes autoproduits, il apparaît comme souhaitable de limiter l'arrosage des cultures autoproduites avec les eaux en provenance des puits.

Dispositif d'accompagnement

8. Prévoir un dispositif d'accompagnement pour réduire les expositions individuelles (exemple : conseils personnalisés aux personnes vivant sur les zones d'étude pour les informer sur les mesures à prendre pour réduire leur exposition : leur faire prendre conscience de pollutions microlocales particulières de l'écosystème domestique ou péri-domestique, identifier les habitudes et les pratiques d'hygiène corporelle ou domestique ou alimentaires, exposant au risque ; valorisation de pratiques déjà existantes d'hygiène corporelle ou domestique, alimentaires permettant une réduction des risques ; identification des populations les plus sensibles et au sein de celles-ci d'individus particulièrement à risque, mères en situation de précarité, enfants aux comportements différents ou hyperactifs.

Par ailleurs, certains comportements individuels déjà recensés dans la littérature sont à risque d'exposition aux différents polluants et ont été retrouvés dans l'analyse de l'étude d'imprégnation : alcool, tabac et exposition professionnelle, ce qui rappelle l'intérêt de renforcer la prévention générale sur ces facteurs de risque.

4.3. Propositions d'ordre méthodologique à prendre en compte pour d'autres situations similaires

9. Réaliser des études d'imprégnation multicentriques (sur différents sites) plutôt que des études dans une zone avec des effectifs de population limités, afin d'augmenter la puissance des études et la portée des conclusions.
10. Intégrer en amont les parties prenantes (société civile, associations, professionnels de santé, préventeurs, syndicats professionnels, élus...) pour prendre en compte leurs préoccupations et leurs connaissances des spécificités locales dans des situations de sites et sols pollués, et pour adapter la méthodologie de l'étude aux réalités de la situation.
11. Adapter le plan d'échantillonnage à la typologie des populations d'intérêt (sensibles, exposées...) identifiées à partir de l'analyse du contexte local.
12. Améliorer les connaissances :
 - sur la construction de valeurs de référence sanitaire ;
 - sur les situations susceptibles d'augmenter ou de réduire les expositions (par rapport aux scénarios d'exposition type).

³ Avis de l'ANSES. Saisine n° 2015-SA-0109

4.4. Propositions organisationnelles

La dernière catégorie de propositions, en lien avec les propositions du rapport IGAS/CGEDD, est destinée à améliorer la mise en œuvre des études à venir et à rendre plus fluide la communication et leur organisation. **Ces propositions ont été établies sur la base du déroulement de l'étude d'imprégnation et des entretiens avec les parties prenantes.**

13. Impliquer les autorités sanitaires et les professionnels de santé et d'action sociale (publics et privés) au tout début de l'étude avant la planification des premières investigations environnementales et dès lors qu'un risque pour la santé des populations est suspecté.
14. Veiller à une meilleure coordination des services de l'Etat et de leurs opérateurs. Ainsi, une instruction interministérielle (DGS/EA1/DGPR/DGAL/2017/145) est parue le 27 avril 2017 relative à la gestion des sites pollués et de leurs impacts nécessitant la mise en œuvre de mesures de gestion sanitaire et d'études de santé et/ou de mesures de gestion sanitaire des productions animales et végétales. Cette instruction doit être appliquée. A titre d'exemple, une concertation en amont entre les services de santé et de l'environnement aurait permis de synchroniser les mesures environnementales et les mesures biologiques de l'étude d'imprégnation, ce qui aurait facilité l'analyse de leurs relations .
15. Une communication claire et transparente est nécessaire tout au long des études et lors de la restitution des résultats vis-à-vis des personnes enquêtées et institutions impliquées.
16. Il est important de veiller à harmoniser la gestion des différents sites de « l'après-mine » en France. En effet, dans cette situation, la différence de gestion des deux sites et les inégalités créées a été particulièrement soulignée dans les entretiens avec les différentes parties prenantes.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Baize D. Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français. Résultats généraux du programme ASPITET. Courrier de l'environnement de l'INRA n°39, février 2000. 39-54.
2. Haut Conseil de la Santé Publique. Mise à jour du guide pratique de dépistage et de prise en charge des expositions au plomb chez l'enfant mineur et la femme enceinte, 2017.
3. National Toxicology Program. NTP Monograph on health effects of low-level lead. Research Triangle Park, NC: National Institute of Environmental Health Services; 2012. 176 p.
4. Fréry N, Saoudi A, Garnier R, Zeghnoun A, Falq G. Exposition de la population française aux substances chimiques de l'environnement. Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire; 2011. 151 p.
5. Yoshida T, Yamauchi H, Fan SG. Chronic health effects in people exposed to arsenic via the drinking water: dose-response relationships in review. *Toxicol Appl Pharmacol* 2004;198(3):243-52
6. Mouly D, Jusot JF, Berat B, Gorla S, Stempfelet M, Beaudeau P. (2011) Étude de la relation entre l'exposition chronique à l'arsenic hydrique d'origine naturelle et la survenue de cancers en Auvergne. Saint Maurice: Institut de veille sanitaire ; 2011 75 p.
7. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some Drinking-Water Disinfectants and Contaminants, Including Arsenic : IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon, France: IARC Press [Volume 84]. 2004.
8. Jarup L., Berglund M., Elinder C.G., Nordberg G. and Vahter M., Health effects of cadmium exposure-a review of the literature and a risk estimate, *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health* 1998: 24(3): 240.
9. Staessen J.A., Lauwerys R.R., Ide G., Roels H.A., Vyncke G., Amery A. Renal function and historical environmental cadmium pollution from zinc smelters. *Lancet* 1994; 343: 1523-7.
10. Buchet J.P., Lauwerys P., Roels H., et al. Renal effects of cadmium body burden of the general population; *Lancet*, 1990 ; 336: 699-702.
11. Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS). Base de données Biotox. <http://www.inrs.fr/>]
12. Durand C, Sauthier N, Schwoebel V. Évaluation de l'exposition à des sols pollués au plomb, au cadmium et à l'arsenic en Aveyron. Étude Cassiopée (cadmium et arsenic dans les sols : impact observé sur une population exposée) - Octobre 2008. Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire; 2011. 307 p.
13. Johnson LR, Farmer JG. Use of human metabolic studies and urinary arsenic speciation in assessing arsenic exposure. *Bull Environ Contam Toxicol* 1991; 46: 53-61.
14. Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du Code de la santé publique.
15. World Health Organization. Office of Occupational Health. (1996). Biological monitoring of chemical exposure in the workplace: guidelines. Geneva. <http://www.who.int/iris/handle/10665/41856>

16. Association des Epidémiologistes de Langue Française (ADELF), Association pour l'Étude de l'Épidémiologie des Maladies Animales (AEEMA), Association pour le Développement des Études et Recherches Épidémiologiques en Santé Travail (ADEREST), Association pour le développement de l'Epidémiologie de Terrain (Epiter). Recommandations de déontologie et bonnes pratiques en épidémiologie. Version France 2007, Paris. Adelf. 37 p.
17. Lucas JP., Le Bot B., Glorennec P., Etchevers A., Bretin P., Douay F., Sebillé V.; Bellanger L.; Mandin C. Lead Contamination in French Children's Homes and Environment. Environ Res in press.
18. Fréry N, Ohayon A, Quénel P. Evaluation des risques sanitaires liés à la pollution d'origine industrielle de Salsigne (Aude). Enquête sur l'exposition de la population aux polluants du site. Saint-Maurice: Réseau national de santé publique; 1998. 52 p et annexes.
19. Fillol C, Dor F, Labat L, Boltz P, Le Bouard J, Mantey K, Mannschott C, Puskarczyk E, Viller F, Momas I, Seta N. Urinary arsenic concentrations and speciation in residents living in an area with naturally contaminated soils. Sci Total Environ 2010;408:(5):1190-4.
20. Kalman DA, Hughes J, Van BG, Burbacher T, Bolgiano D, Coble K, et al. The effect of variable environmental arsenic contamination on urinary concentrations of arsenic species. Environ Health Perspect 1990 ;89:145-51
21. Reif JS, Tsongas TA, Mitchell J, Keefe TJ, Tessari JD, Metzger L, et al. Risk factors for exposure to arsenic at a hazardous waste site. J Expo Anal Environ Epidemiol 1993;3 Suppl 1:73-86
22. Hinwood AL, Sim MR, Jolley D, de KN, Bastone EB, Gerostamoulos J, et al. Exposure to inorganic arsenic in soil increases urinary inorganic arsenic concentrations of residents living in old mining areas. Environ Geochem Health 2004 ;26(1):27-36

6. ANNEXES

Annexe 1 : Teneurs en plomb, arsenic et cadmium mesurées au niveau de différents sites (mg/kg)

Annexe 2 : Saisines

Annexe 3 : Courriers d'information

Annexe 4 : Questionnaires

Annexe 5 : Construction de nouvelles variables

Annexe 6 : Formulaire de consentement

Annexe 7 : Caractéristiques individuelles et données comportementales des participants à l'étude d'imprégnation

Annexe 8 : Distributions des imprégnations

Annexe 9 : Distribution des concentrations en plomb, arsenic et cadmium (fractions totales) dans les poussières des logements enquêtés

Annexe 10 : Résultats de l'analyse de sensibilité sur l'effet foyer

Annexe 11 : Liste des personnes rencontrées par le comité d'appui à l'étude