



Toxicité des éléments métalliques et risques sanitaires



Jean François Narbonne et André Picot

Éléments en traces et ultra-traces, indispensables et toxiques

Une vingtaine d'éléments peuvent être assimilés à des éléments en traces et ultra-traces indispensables (besoin potentiel $\ll 1$ mg/kg chez l'homme)

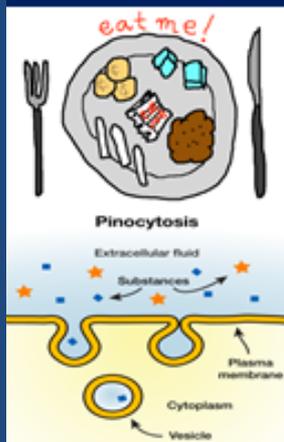
caractère indispensable démontré *éléments considérés comme toxiques*

Al, **As**, B, Br, Cd, Cr, F, Ge, I, **Pb**, Li, Mo, **Ni**, Rb, Se, Si, **Sn**, V
Co, Mn*

Caractéristiques toxicologiques communes aux métaux trace

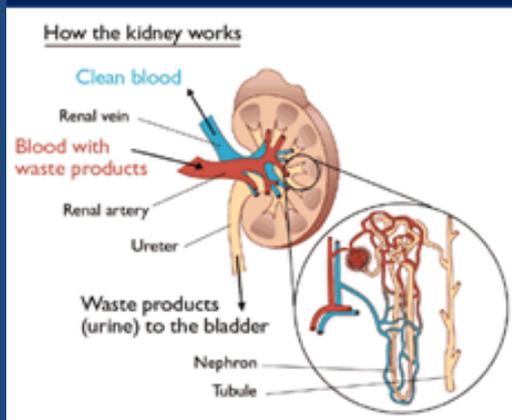
- Éléments-traces **purement toxiques** (pas de rôle physiologique),
- Métaux **ubiquistes** (air, eau, sol, aliments),
- **Réactivité étendue** pour les ligands biologiques (macromolécules),
- **Grande rémanence biologique** (bioaccumulation, biomagnification),
- **Multiplicité des effets toxiques.**

Absorption gastrointestinale



(1) S'introduisent dans le GI via les aliments, l'eau de boisson et la clearance ciliaire (poumons) (2) Sont absorbés dans les cellules intestinales par : Diffusion passive ou facilitée ; Transport spécifique ; Pinocytose. Dépend de : Solubilité dans les fluides intestinaux; La forme chimique (lipio solubilité, MeHg /Hgi fortement ou faiblement absorbés); Présence de chélateurs (Ac. Phytique); Présence d'autres métaux (Zn/Cd, Ca/Pb); Etat physiologique (âge, Vit D)

Excrétion

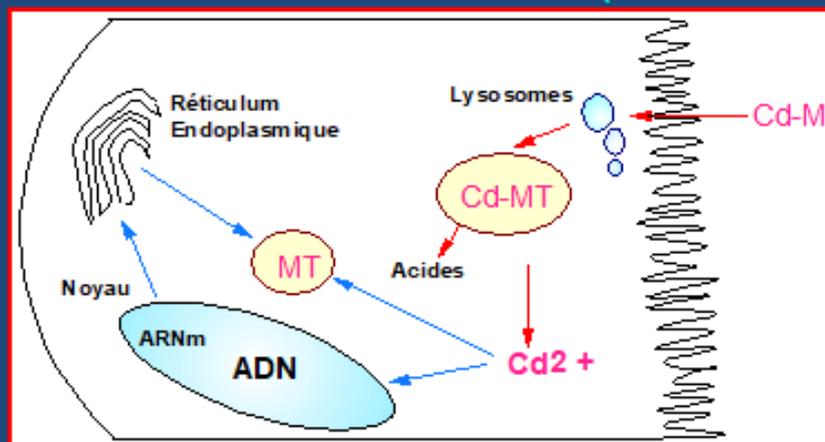


Reins: Voie importante d'excrétion: Dans le plasma les métaux sont liés aux protéins (MT) et AA

-Les métaux liés aux protéins de faible PM sont filtrés dans le glomérule vers le fluide du tubule

-Quelques métaux (Cd & Zn) sont réabsorbés par l'épithélium tubulaire avant d'atteindre la vessie (faible réabsorption)

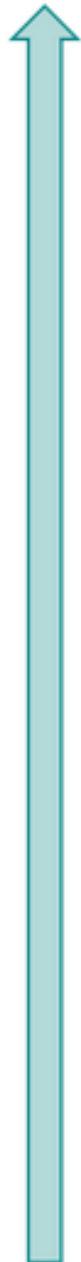
Mécanisme de l'atteinte rénale par Cd
Rôle de la métallothionéine: Les protéines sont hydrolysées par les protéases et le Cd est libéré dans le cortex où il s'accumule.



Effets cliniques de quelques métaux

Éléments	Toxicité
Plomb	Trouble du système nerveux, affection du foie et des reins
Cadmium	Affections respiratoires, troubles rénaux, cancers
Mercure	Troubles du système nerveux (mémoire, fonctions sensorielles...)
Nickel	Maladies respiratoires, asthme, malformations congénitales, cancers
Chrome	Cancers, troubles dermatologiques, anémie
Arsenic	Cancer du poumon et de la peau, Diminution de la capacité intellectuelle chez les enfants

Plus réactif



Lithium (Li)

Potassium (K)

Baryum (Ba)

Calcium (Ca)

Magnésium (Mg)

Aluminium (Al)

Manganèse (Mn)

Zinc (Zn)

Chrome (Cr)

Fer (Fe)

Cobalt (Co)

Nickel (Ni)

Étain (Sn)

Hydrogène (H₂)

Cuivre (Cu)

Argent (Ag)

Mercure (Hg)

Platine (Pt)

Or (Au)

Moins réactif

Mécanismes généraux de toxicité communes aux métaux trace

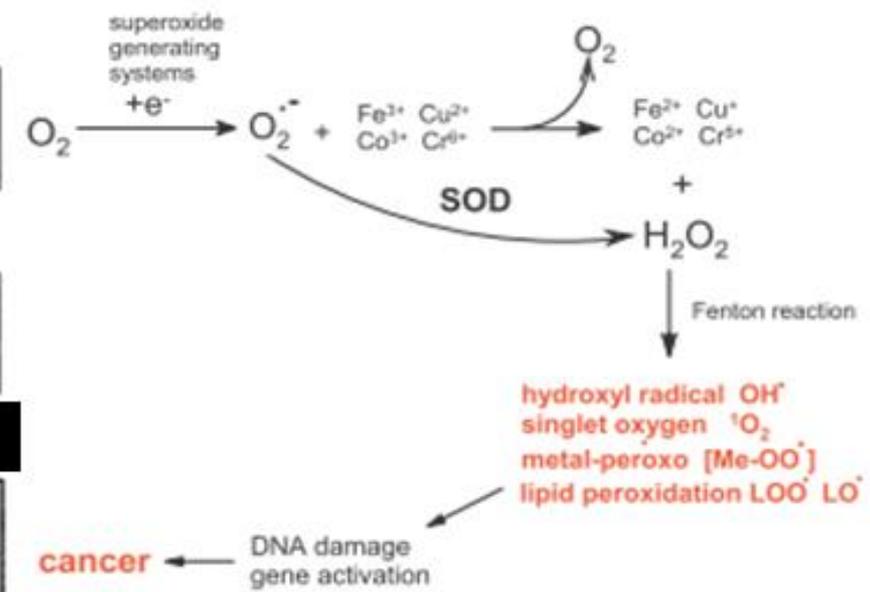
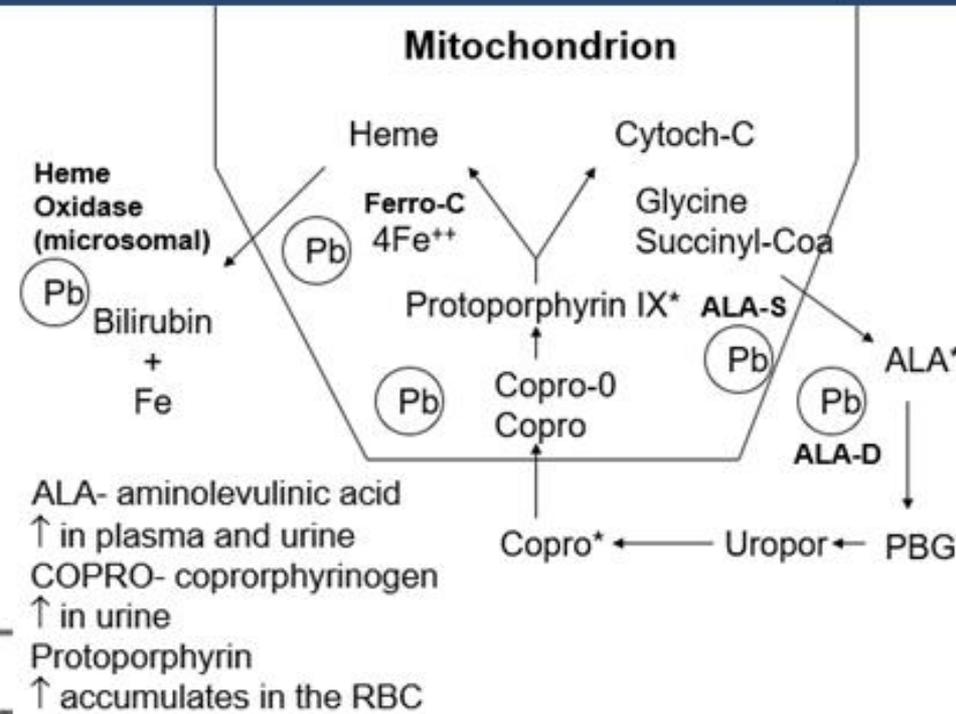
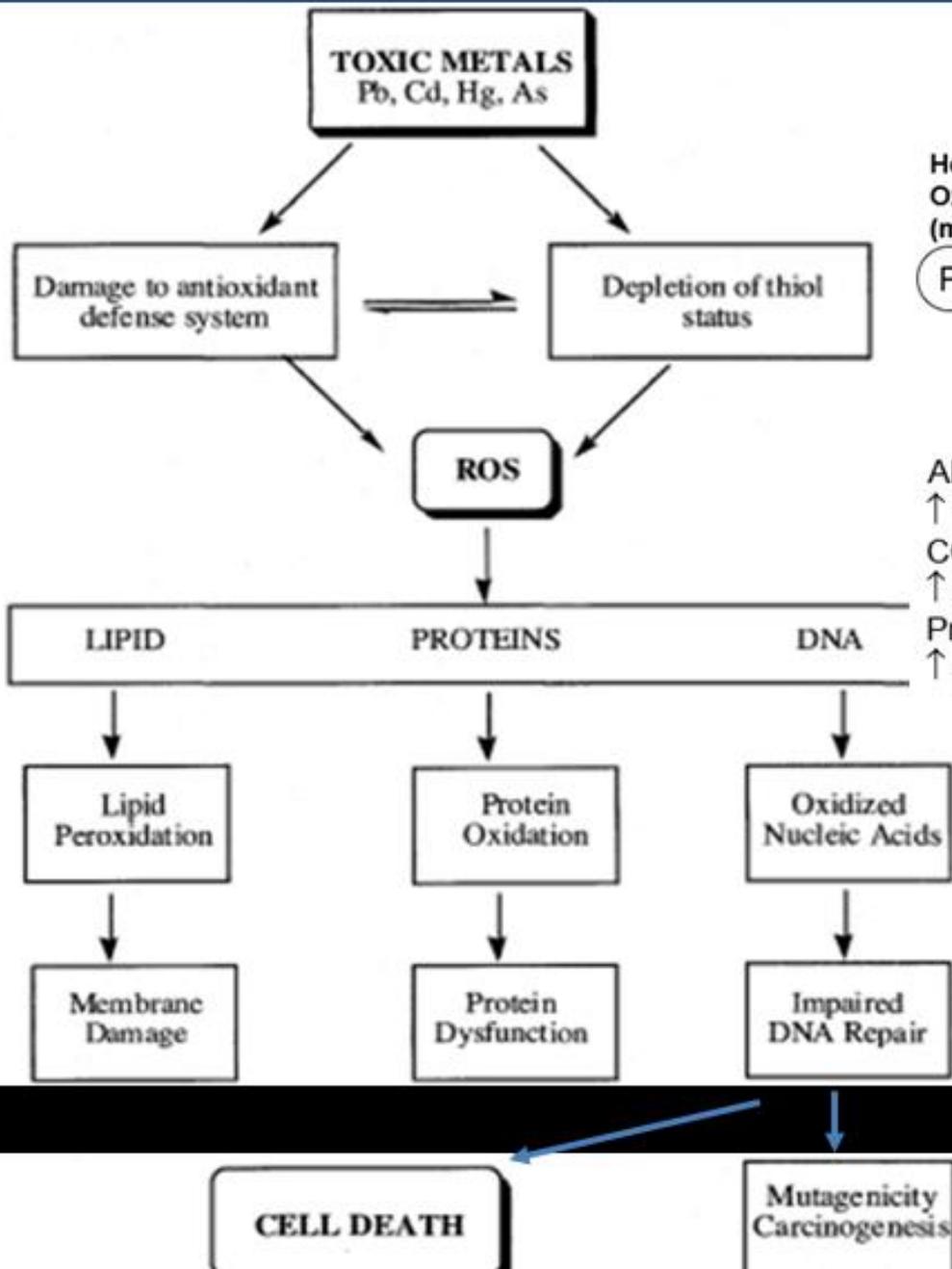
-La toxicité des métaux trace est liée à leur capacité à se lier avec un ou plusieurs ligands des systèmes enzymatiques étant ainsi en mesure de les inactiver.

L'affinité la plus forte est avec les AA soufrés ce qui explique les effets toxiques par coupure des ponts S-S qui participant à la conformation des protéines, mais aussi le processus de défense de la cellule qui synthétise des métallothionéïnes (MT), protéines riches en cystéine (6) qui piègent les métaux, en particulier le Cd (MT-Cd).

-Le MoA le plus généralement étudié est le stress oxydatif due à la génération directe d'espèces radicalaires par échange d'électrons (métaux de transition X⁺⁺ et X⁺⁺⁺) et/ou par déplétion des systèmes antioxydants.

-Un mécanisme particulier de la toxicité des métaux est le pouvoir de déplacement par différence de réactivité **durs – mous** ex. **Fe/Zn ; Protoporphyrine, Cd/Ca ; ostéoporose, Cu/Se ; chute de l'effet antioxydant,**

MoA des métaux toxiques: Induction du stress oxydatif



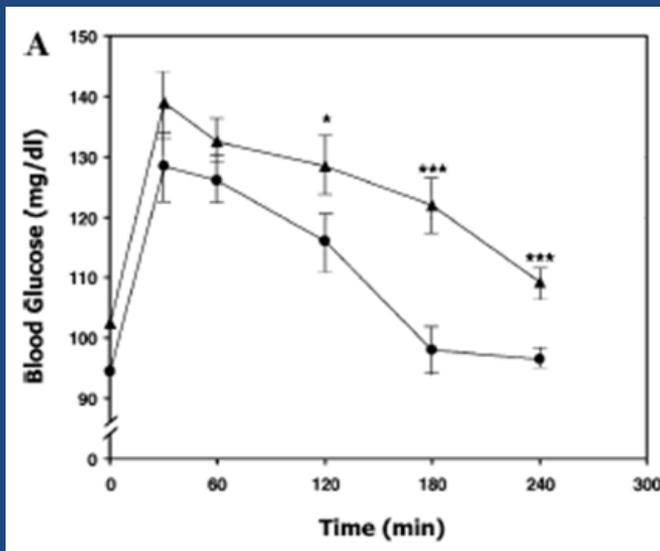
Métaux et EDCs

The estrogenic activity of various elements in an ER

Compounds	RPE (%)	E Screen	ER-CALUX
17β-Estradiol	100	100	100
Antimony chloride	49.2	60.9	60.9
Arsenic oxide	2.4	5.6	5.6
Barium chloride	22.7	46.8	46.8
Bis(tri- <i>n</i> -butyltin)	80.9	93.5	93.5
Cadmium chloride	59.7	73.8	73.8
Chromium chloride	19.5	46.4	46.4
Cobalt chloride	4.2	3.3	3.3
Cupric acetate	3.8	4.4	4.4
Cupric chloride	7.4	Not reactive	Not reactive
Dimethylmercury	10.2	4.2	4.2
Lead acetate	7.1	25.0	25.0
Lead nitrate	4.5	10.5	10.5
Lithium chloride	13.4	7.5	7.5
Lithium hydroxide	39.9	34.6	34.6
Magnesium chloride	13.8	2.0	2.0
Manganese chloride	18.8	9.1	9.1
MMT	15.2	3.8	3.8
Mercuric chloride	16.0	4.4	4.4
Potassium chromate	5.6	5.6	5.6
Potassium tellurite	11.7	Not reactive	Not reactive
Sodium molybdate	15.6	9.3	9.3
Sodium selenate	22.4	26.0	26.0
Sodium selenite	14.2	7.1	7.1
Stannous chloride	15.2	15.0	15.0
Silver nitrate	6.7	5.9	5.9
Titanium chloride	5.2	3.1	3.1
Tungstic acid	3.1	Not reactive	Not reactive
Zinc chloride	10.2	6.6	6.6

Substance	Potency (EC50, M)	
	E Screen	ER-CALUX
17β-estradiol	1.43×10^{-10}	2.65×10^{-11}
Bis(tri- <i>n</i> -butyltin)	5.47×10^{-10}	1.84×10^{-9}
Antimony chloride	1.48×10^{-8}	1.64×10^{-8}
Chromium chloride	3.33×10^{-8}	3.45×10^{-8}
Lithium hydroxide	4.97×10^{-8}	4.71×10^{-8}
Cadmium chloride	1.76×10^{-7}	1.08×10^{-7}
Barium chloride	4.58×10^{-7}	7.43×10^{-7}

Plasma glucose (A) concentrations of rats in oral glucose tolerance test



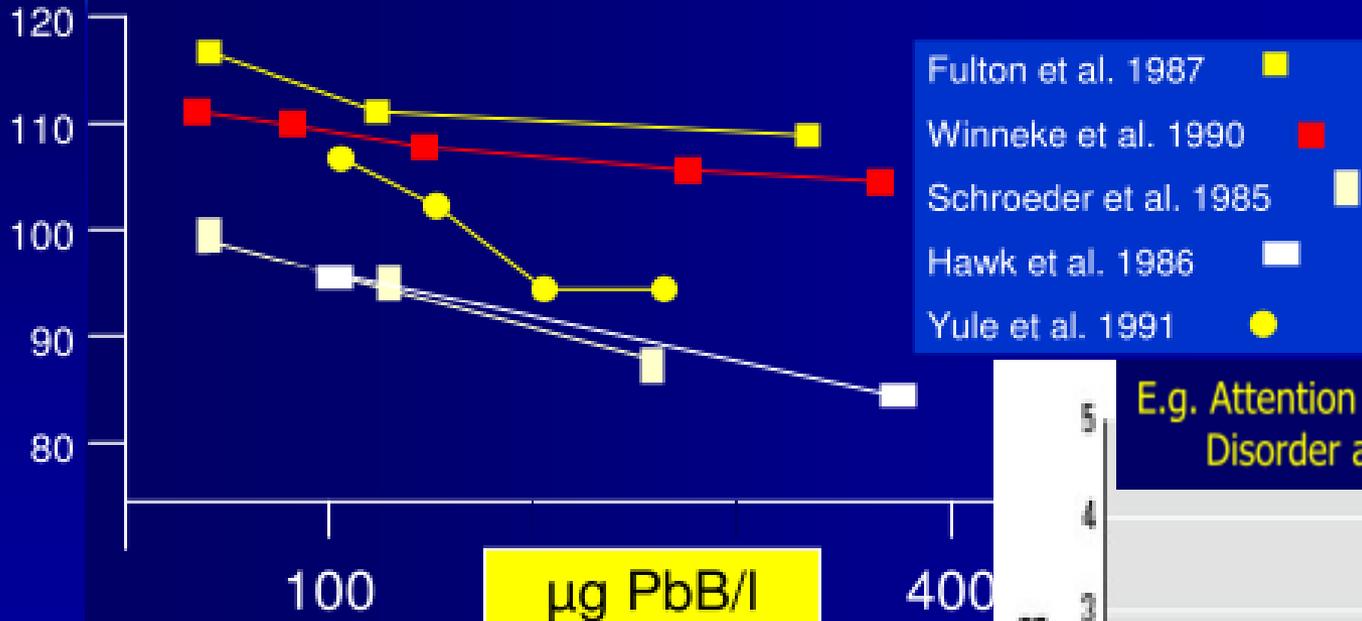
Diabète

Male Sprague–Dawley rats were treated with saline or CdCl₂ (2 mg/kg)

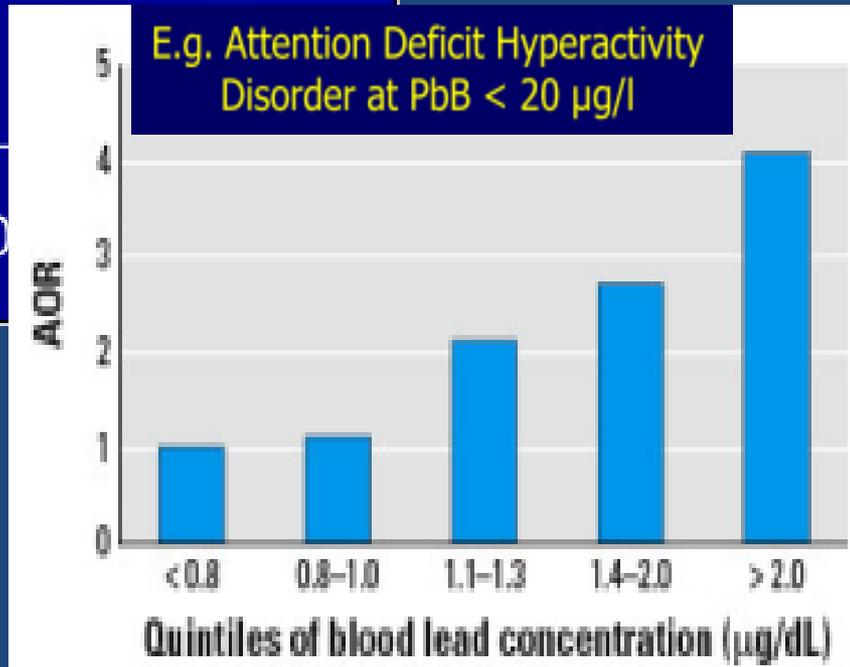
PbB in blood of children/mothers and IQ-levels In line with CDC „level of concern“ 10 µg/dl

IQ

⇒ HBM I: 100 µg/l



FOR PERSONAL USE ONLY



Relation dose / effets:

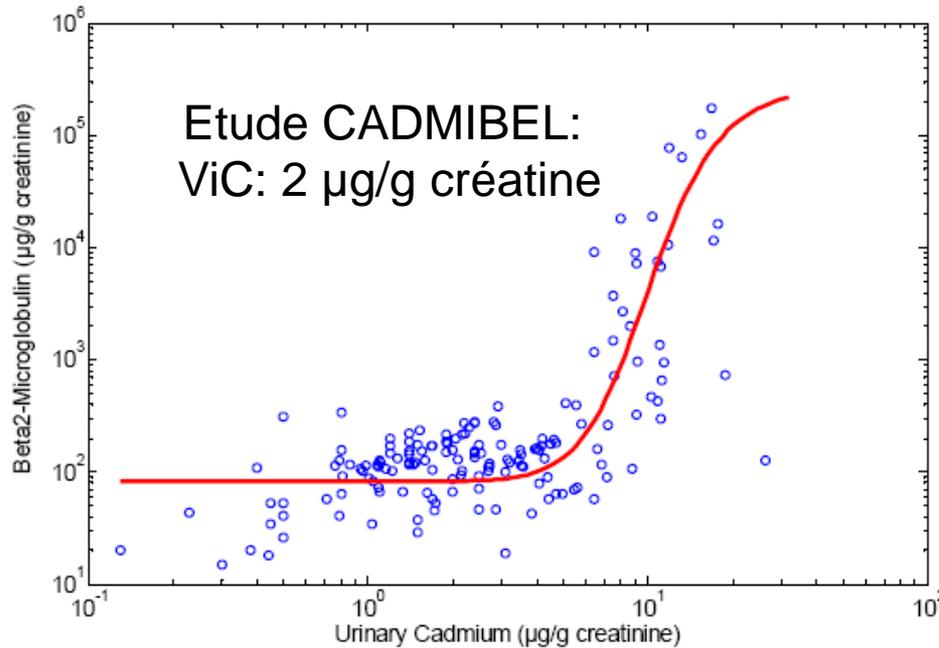
Ex. du Plomb

Relation dose / effets:

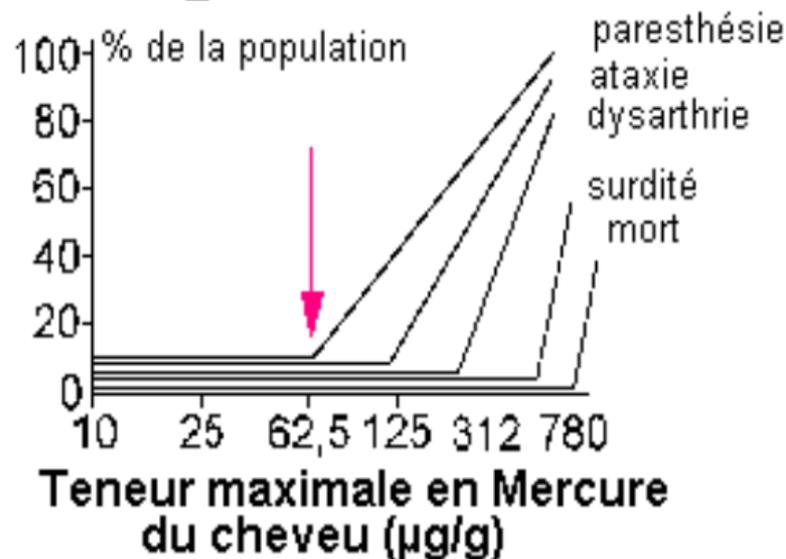
Ex. du Cadmium et du Mercure

Relation dose / effet entre cadmiurie et néphrotoxicité (Microprotéinurie)

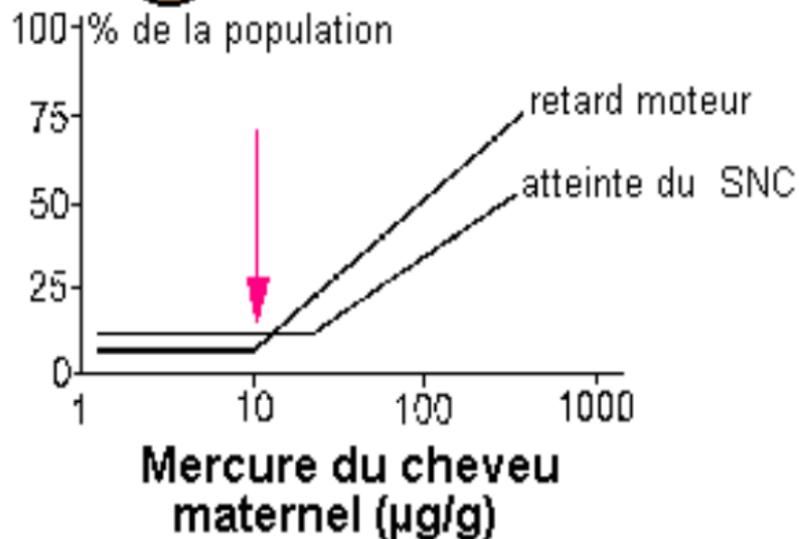
Relation entre la teneur en mercure du cheveu maternel et les effets neurotoxiques, chez l'adulte et chez l'enfant



A adultes



B nouveaux-nés



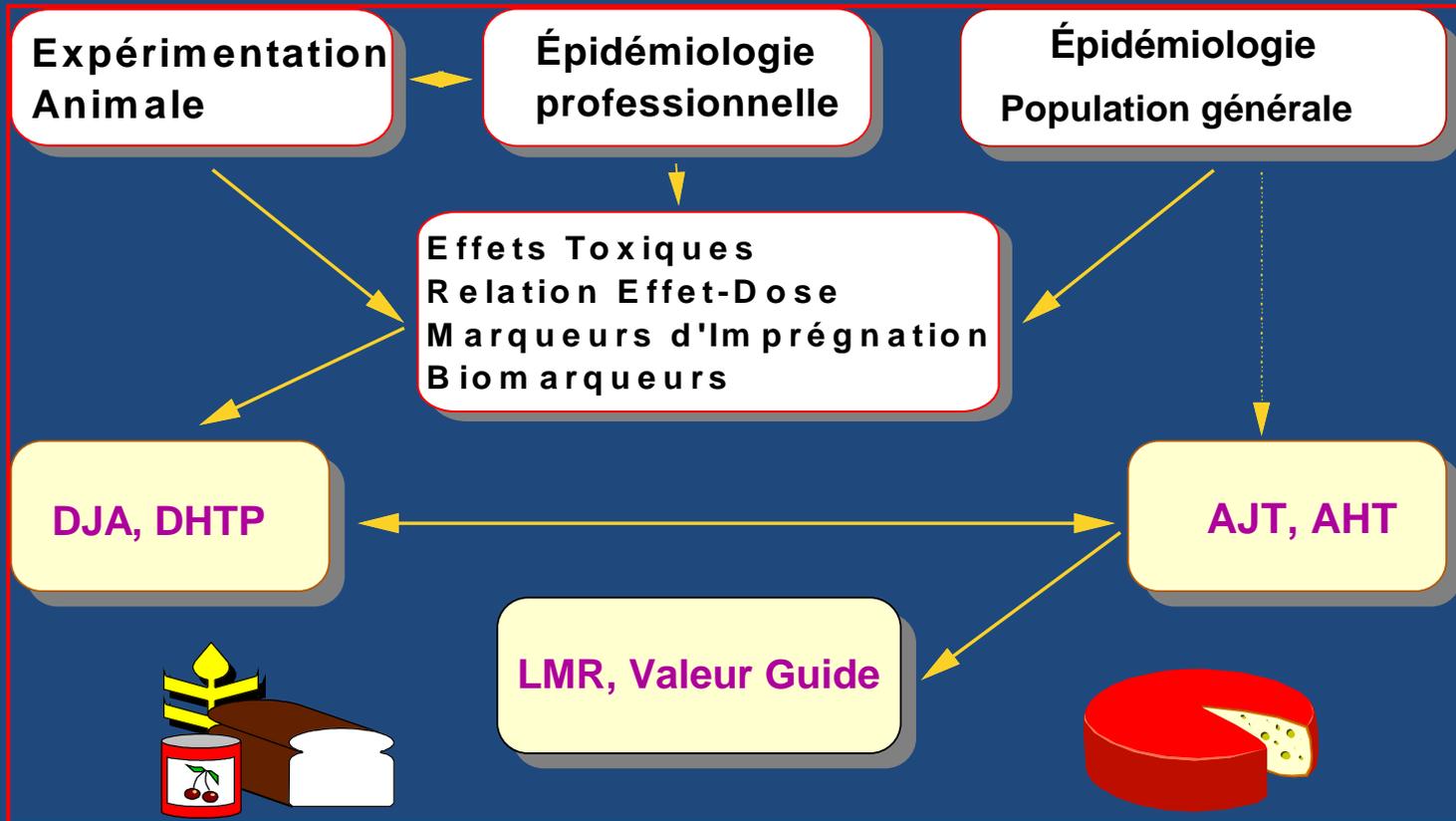
Risques pour la santé Humaine sur les sites miniers

Le risque majeur vient des sites miniers fermés et/ou abandonnés. Les mines en activité sont normalement en conformité avec la réglementation en cours, bien plus restrictive du point de vue environnemental que par le passé.

La revue de l'évaluation de plusieurs sites miniers peut être résumée:

- La présence d'un site minier contaminé n'a pas forcément d'effets sur les risques observés au niveau régional..
- La majorité des sites les plus contaminés sont des mines abandonnées qui n'ont pas eu d'opération de réhabilitation. La contamination se diffuse par les eaux de surface et par l'air qui restent secondaires.
- La voie majeure est l'eau profonde affectée par la lixiviation avec contamination de l'eau potable contribuant majoritairement à l'exposition des populations locales.
- Ces contributions relatives sont difficile à quantifier du fait du manque des données qui restent souvent parcellaires.
- Enfin le profil de présence des substances les plus toxiques est déterminant dans l'index de risque global.

Détermination des doses tolérables de métaux toxiques Et des valeurs limites réglementaires



Cancérogènes Génotoxiques

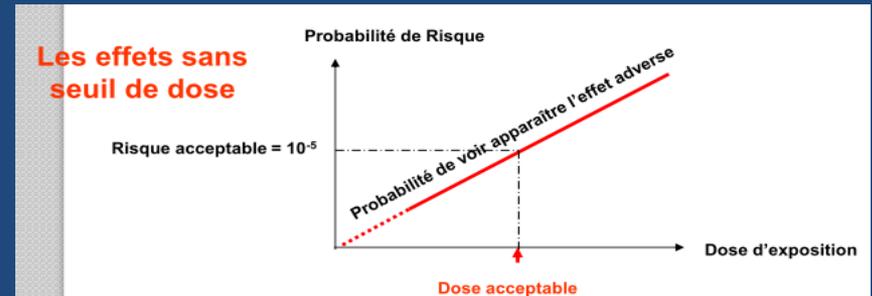
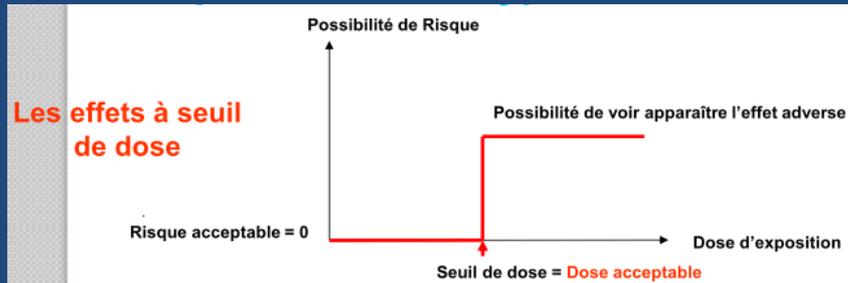
- Pas de DJT
- ALARA
- **DVS** (10^{-5} , -6 , -7)

Substances
sans seuil

Avec ou sans seuil, That the question

Les toxiques peuvent être rangés en deux catégories en fonction de leur mécanisme d'action :

□ **Les toxiques à seuil** qui ont des VTR en dessous desquelles l'exposition est réputée sans risque. Ces VTR sont fournies pour chaque voie d'exposition par l'OMS, l'US-EPA, l'ATSDR, Santé Canada, l'OEHHA ou encore le RIVM .



□ **Les toxiques sans seuil**, tels que la plupart des produits cancérigènes, pour lesquels il n'est pas possible de définir un niveau d'exposition sans risque pour la population. Les VTR sont nommées Excès de Risque Unitaire (ERU) et sont définies par les mêmes instances internationales.

Les ERU correspondent au nombre de cas de cancers attendus pour une exposition unitaire (1 µg/m³ pour l'inhalation et 1 mg/kg pc/j par ingestion) durant toute la vie, 24 heures sur 24. Ainsi, un ERU de 10⁻⁴ signifie qu'une personne exposée durant toute sa vie à 1 µg/m³ de polluant (ou à 1 mg/kg pc/j par voie orale) aurait une probabilité d'un cas de cancer supplémentaire est susceptible d'apparaître pour 10 000 personnes sont exposées,

Espèces chimiques présentant des effets à seuil par ingestion.

Substances	VTRo (mg/kg pc/j)	Source
Mercure (Hg)	1,00E-04	US EPA 2001
Plomb (Pb)	6,30E-04	ANSES 2013
Arsenic (As)	4,50E-04	FoBIG 2009
Cadmium (Cd)	3,60E-04	EFSA 2009
Manganèse (Mn)	1,40E-01	US-EPA 1996
Cobalt (Co)	1,40E-03	RIVM 2000
Nickel (Ni)	1,12E-02	OEHHA 2012
Sélénium (Se)	5,00E-03	ATSDR 2003
Antimoine (Sb)	6,00E-03	OMS 2006
Zinc (Zn)	3,00E-01	ATSDR 2005
Vanadium (V)	9,00E-03	US EPA 1996
Cuivre (Cu)	1,40E-01	RIVM 2001
Etain (Sn)	2,00E-01	RIVM 2008
Chrome III (Cr III)	1,50E+00	US EPA 1998

ERU pour les effets sans seuil par ingestion

Substances	<u>ERUo</u> (mg/kg pc/j)-1	Source
Arsenic (As)	1,50E+00	US EPA 1998 et OEHHA 2009
Plomb (Pb)	8,50E-03	OEHHA 2011

RUi pour les effets sans seuil par inhalation

Substances	<u>RUi</u> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) -1	Source
Arsenic (As)	4,30E-03	US EPA 1998
Plomb (Pb)	1,20E-05	OEHHA 2011
Chrome VI (Cr VI)	4,00E-02	OMS 2000
Nickel (Ni)	3,80E-04	OMS 2000

CANCEROGENESE:

-Classement: Sb (Triox) cat. 2; As groupe 1; Cd groupe 1; Cr^{VI} groupe 1; Co groupe 2B; Sn (TPT) cat. 2; Ni groupe 2B; Pb (dérivés inorg.) groupe 2A; Vn (pentoxyde) groupe 2B

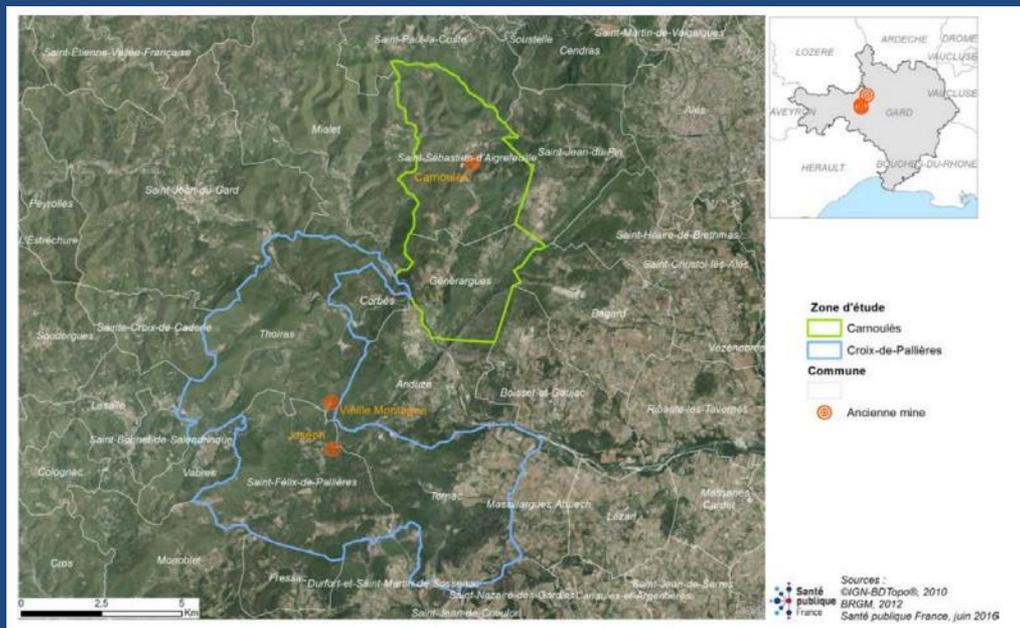
Les étapes de l'évaluation des risques sanitaires dans le cas de sols pollués

L'évaluation présentée s'appuie sur le cadre général défini par le guide de l'InVS et sur les modalités de mise en œuvre décrites par le guide méthodologique pour l'évaluation des risques sanitaires des études d'impact des ICPE établi par l'INERIS. L'évaluation doit être conduite de façon structurée en appliquant les principes de proportionnalité, de transparence et de prudence scientifique. Elle se décompose en 4 étapes indissociables:

- **L'étape 1 est consacrée à la caractérisation du site et de son environnement.** Dans cette étape, l'environnement du site est décrit incluant les populations sensibles présentes et les données de contamination caractérisant l'ensemble du site.
- **L'étape 2 traite de l'identification des dangers.** Dans cette étape sont décrits, pour chacune des substances détectées, les effets sur la santé, les valeurs toxicologiques de référence, les limites d'exposition issues de la bibliographie, les valeurs réglementaires ainsi que les préconisations de l'OMS (ou autres) pour une exposition chronique.
- **L'étape 3 concerne l'évaluation de l'exposition des populations.** Son but est de déterminer les voies de passage du composé traceur de la source vers la cible et d'estimer la fréquence, la durée et l'importance de l'exposition. La détermination des niveaux d'exposition auxquels sont soumises les populations est réalisée au moyen d'un modèle de dispersion des polluants puis au moyen d'un modèle de calcul des transferts dans la chaîne alimentaire, permettant d'estimer les concentrations de polluants dans les différents milieux d'exposition (légumes, végétaux, produits animaux, etc.).
- **L'étape 4 correspond à la caractérisation des risques sanitaires.** Elle est effectuée à partir de la synthèse des informations issues de l'évaluation des expositions et de l'évaluation de la toxicité sous la forme d'une expression qualitative et quantitative du risque. Dans cette étape, les incertitudes sont évaluées et intégrées au processus d'évaluation.

Etape 1: caractérisation du site et de son environnement

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

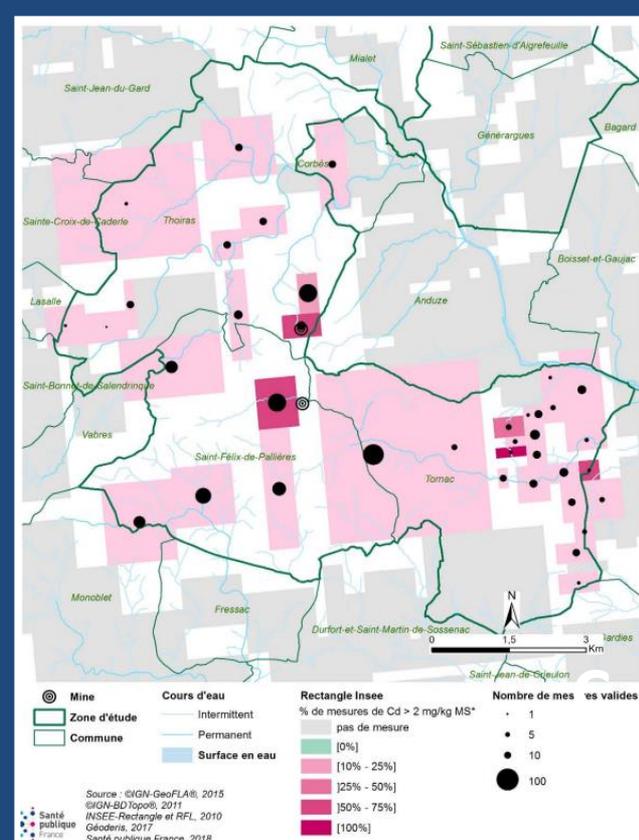
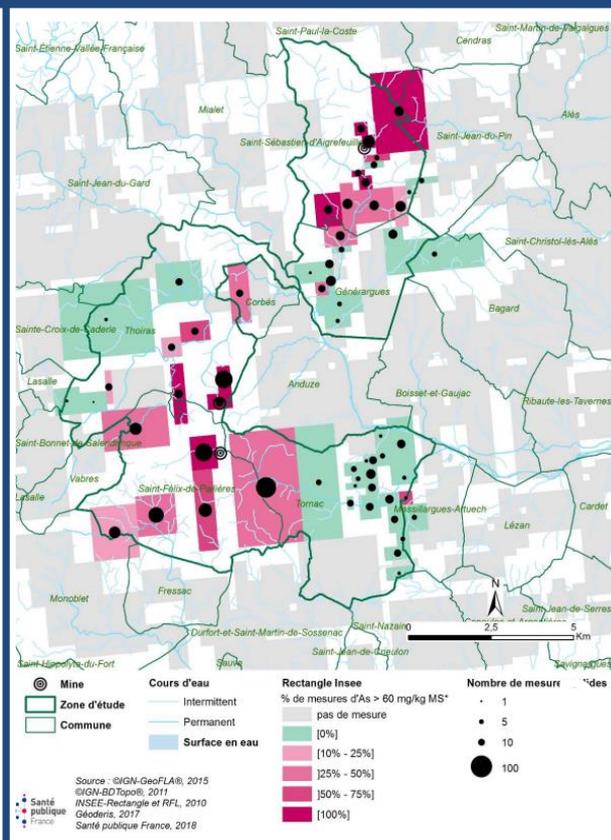
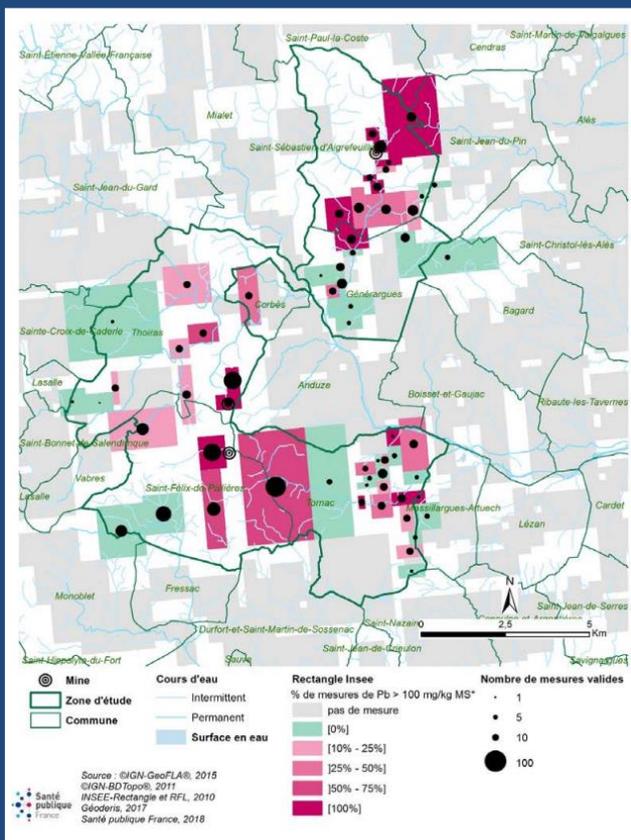


Populations d'étude. Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières

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

Etape 2 : identification des dangers.

Représentation cartographique des **valeurs dans les sols** des foyers enquêtés :
A de plomb (nombre de mesures supérieures à 100 mg/kg* de matière sèche / nombre de mesures totales valides, rapporté au rectangle Insee); **B d'arsenic** (nombre de mesures supérieures à 60 mg/kg* de matière sèche); **C de cadmium** (nombre de mesures supérieures à 2 mg/kg* de matière sèche). Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Palières, Gard, 2016



Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Palières, Gard, 2016

Concentrations en plomb, arsenic et cadmium dans les sols.

	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

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 . On observe des concentrations en arsenic assez élevées dans des sols situés à plusieurs kilomètres des anciens sites miniers. Des valeurs inférieures à 2 mg de cadmium /kg sont retrouvées dans plus de 80 % des jardins. Quelques mesures atteignent 50 mg/kg environ

Concentrations en plomb, arsenic et cadmium dans les eaux de puits et forages.

	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

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).

Concentrations acido-solubles en **plomb**, **arsenic** et **cadmium** dans les poussières des logements enquêtés

	Pb (pièce de vie)	As (pièce de vie)	Cd (pièce de vie)	Pb (chambre)	As (chambre)	Cd (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 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 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 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 $\mu\text{g}/\text{m}^2$)

Méthodologie dans le domaine des Sites et Sols Pollués

- Comparaison des concentrations en métaux mesurées dans l'échantillon analysé aux concentrations mesurées dans un échantillon témoin prélevé hors contexte industriel ou, à défaut, la comparaison à des bases de données existantes,
- Pour les concentrations des autres substances, celles-ci ne pouvant avoir qu'une origine anthropique, toute occurrence dans les sols est signe d'un impact.

Résultats du programme ASPITET (information sur les éléments traces dans les sols en France) INRA

	Gamme des valeurs couramment observées dans les sols ordinaires de toutes granulométrie	Gamme des valeurs observées dans le cas d'anomalies naturelles modérées	Gamme des valeurs observées dans le cas de fortes anomalies naturelles (mg/kg)
Arsenic	1 à 25	30 à 60	60 à 284
Cadmium	0,05 à 0,45	0,7 à 2	2 à 46,3
Chrome	10 à 90	90 à 150	150 à 3180
Cuivre	2 à 20	20 à 62	65 à 160
Mercure	0,02 à 0,1	0,15 à 2,3	-
Nickel	2 à 60	60 à 130	130 à 2076
Plomb	9 à 50	60 à 90	10 à 10180
Zinc	10 à 100	100 à 250	250 à 11426

Les teneurs en métaux dans les sols sont comparées aux gammes de teneurs issues du programme ASPITET. On retient comme valeur de comparaison la borne supérieure de la gamme de valeurs couramment observée dans les sols ordinaires (1ère colonne).

1874 échantillons (horizons de surface et horizons profonds, sols agricoles et forestiers).

Exemple de calcul d'indices de pollution, mine de Croix de Paillères

	Fond géologique France		Mine	Valeurs Hollandaises		Coefficients	
	Bf général	Bf max	Carreau	Référence	Rémédiation	EF	PI
As	25	284	2520	20	50	126 (5)	50 (5)
Cd	0,45	46	879	1	20	879 (5)	439 (5)
Pb	50	10180	27100	50	600	542 (5)	45 (5)
Zn	100	11426	13100	200	3000	65 (5)	4,4 (3)
Hg	0,1	2,3		0,5	10		
Fe	27		65900			2440 (5)	

CPI: 810 (Ultra high contamination level)

(EF) Enrichment factor is the ratio of metal concentration in the sample and the background concentrations

(PI) Pollution index is evaluated by comparing metal concentrations with related environmental guidelines, (Remediation level).

(CPI) The Combined Pollution Index is the sum of enrichment factors for analysed contaminants divided by the number of enrichment factors included in the calculation.

$$EF = \frac{C_n / X_n}{C_r / X_r}$$

$$PI = \frac{C_n}{B_n}$$

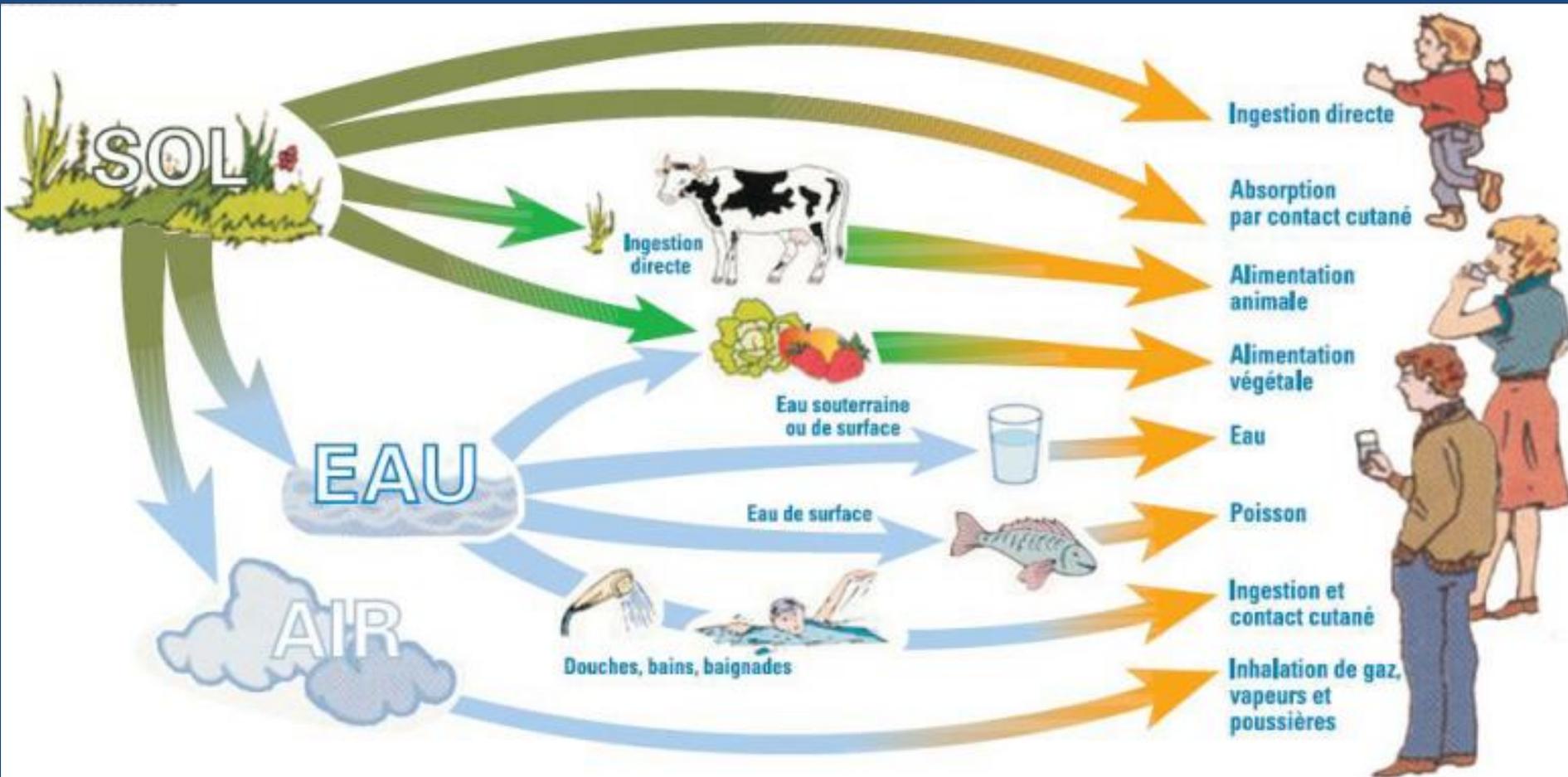
$$CPI = \frac{\sum EF}{nEF}$$

Index class	I_{geo}	EF	PI	Description of classes
1	$I_{geo} < 0$	$EF < 2$	$PI < 1$	Uncontaminated
2	$0 \leq I_{geo} < 1$	$2 \leq EF < 5$	$1 \leq PI < 3$	Moderately contaminated
3	$1 \leq I_{geo} < 3$	$5 \leq EF < 20$	$3 \leq PI < 6$	Considerable contaminated
4	$3 \leq I_{geo} < 5$	$20 \leq EF < 40$	$6 \leq PI < 12$	High contaminated
5	$5 \leq I_{geo}$	$40 < EF$	$12 < PI$	Extremely contaminated

Index	Value	Degree of contamination
CPI	< 1.5	Nil to very low
	1.5–2	Low
	2–4	Moderate
	4–8	High
	8–16	Very high
	16–32	Extremely high
	> 32	Ultra high

Etape 3: évaluation de l'exposition des populations

Exposition externe



Paramètres de l'exposition

Résultats	Unités
Sol	
Concentration dans le sol	mg/kg
Eau	
Concentration dans l'eau potable	mg/L
Concentration dans l'eau de surface	mg/L
Air intérieur	
Concentration des gaz (sol)	mg/m ³
Concentration des gaz (bâtiment)	mg/m ³
Air extérieur	
Concentration des particules	mg/m ³
Concentration dans la nourriture	
- légumes racine (poids frais)	mg/kg
- autres légumes (poids frais)	mg/kg
- poissons (poids frais)	mg/kg
- gibier (poids frais)	mg/kg

Population canadienne						
Caractéristique du récepteur	Nourrisson	Jeune enfant	Enfant	Adolescent	Adulte	Travailleur
Âge	0 à 6 mois	7 mois à 4 ans	5 à 11 ans	12 à 19 ans	> 20 ans	> 20 ans
Masse corporelle (kg)	8,2 ± 2,9	16,5 ± 4,5	32,9 ± 8,9	59,7 ± 13,5	70,7 ± 14,5	70.7
Taux d'ingestion de sol (g/j)	0,02 ± 0,02*	0,08 ± 0,08*	0,02 ± 0,02*	0,02 ± 0,02*	0,02 ± 0,02*	0.1
Taux d'inhalation (m ³ /j)	2,1 ± 0,6	9,3 ± 2,6	14,5 ± 3,2	15,8 ± 4,0	15,8 ± 3,9	15.8
Taux d'ingestion d'eau (l/j)	0,3 ± 0,2	0,6 ± 0,4	0,8 ± 0,4	1 ± 0,06	1,5 ± 0,8	1.5
Temps passé à l'extérieur (hre/j)	1 ± 1*	1 ± 1*	1 ± 1*	1,42 ± 1,17	1,42 ± 1,28	8
Surface de la peau (cm ²)						
- Mains	320	430	590	800	890	890
- Bras (de l'épaule au poignet)	550	890	1480	2230	2500	2500
- Jambes (de l'aîne au pied)	910	1690	3070	4970	5720	5720
TOTAL	1780	3010	5140	8000	9110	9110
Charge du sol sur la peau exposée (g/cm ² /événement d'exposition)						
- Mains	1 x 10 ⁻⁴	1 x 10 ⁻³				
- Surface autre que celle des mains	1 x 10 ⁻⁵	1 x 10 ⁻⁴				
Ingestion d'aliment (g/jour) ²						
- Légumes-racines	83	105	161	227	188	NA
- Autres légumes	72	67	98	120	137	
- Poisson	0	56	90	104	111	

* valeurs estimées

INPUT



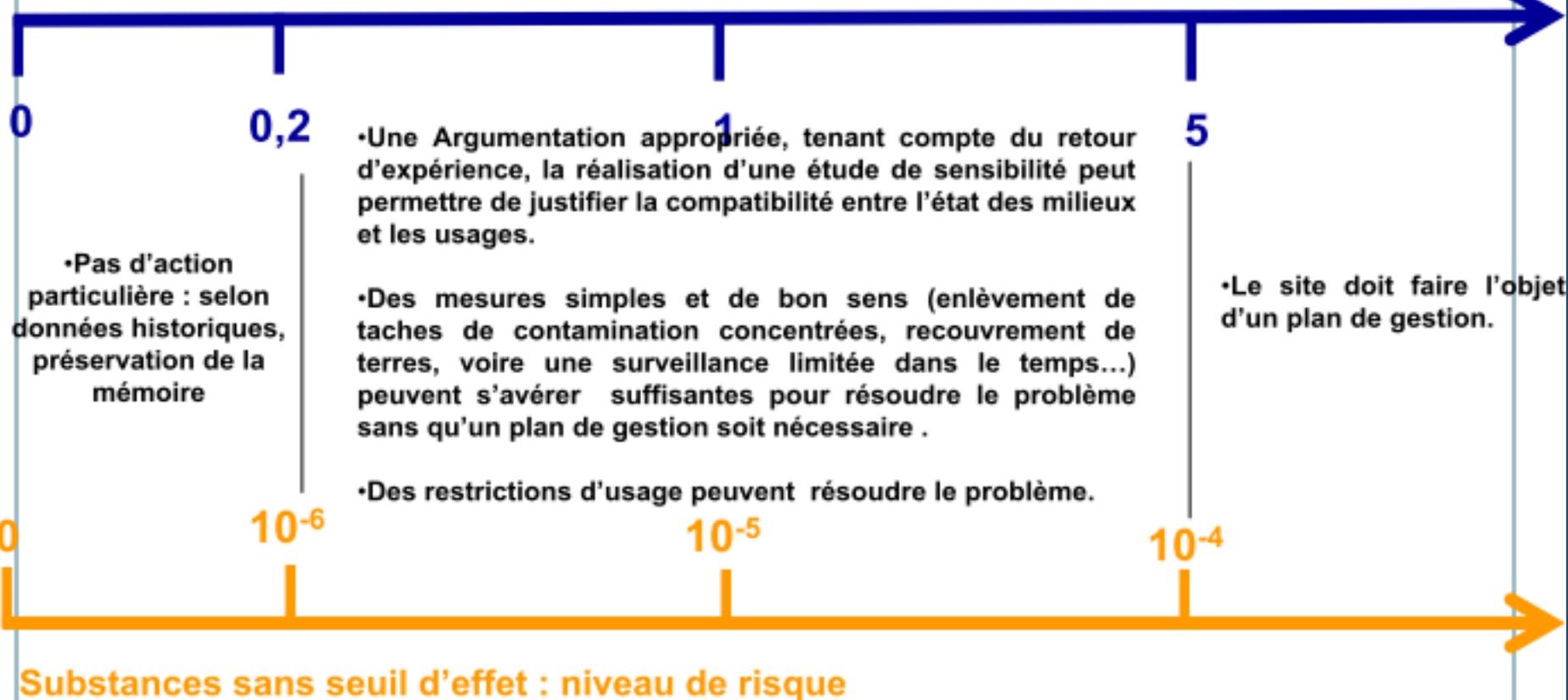
MODÉLISATION



OUTPUT

Etape 4: Caractérisation des risques sanitaires

Substances avec seuil d'effet : niveau de risque



Scenario d'exposition aux particules de sol: cas des résidents et promeneurs

Paramètre	Scénario moyen				Scénario sécuritaire			
	Adultes résidents	Enfants résidents	Promeneurs Adultes	Promeneurs enfants	Adultes résidents	Enfants résidents	Promeneurs Adultes	Promeneurs enfants
Taux d'ingestion de sols	10 mg/j	20 mg/j	10 mg/j	20 mg/j	50 mg/j	100 mg/j	50 mg/j	100 mg/j
Durée d'exposition	30 ans	6 ans	30 ans	6 ans	30 ans	6 ans	30 ans	6 ans
Fréquence d'exposition	365 j/an	365 j/an	52 j/an	52 j/an	365 j/an	365 j/an	52 j/an	52 j/an
Poids corporel	70 kg	15 kg	70 kg	15 kg	70 kg	15 kg	70 kg	15 kg

Exemple de Risk assessment: Le cas de St Félix (France)

	Pb (3,5)	Zn (300)	Sb (0,4)	Cd (0,5)	Mn (50)	As (0,3)
Moyennes						
QD enfant	19	0,13	3,35	0,42	0,31	21
QD adultes	1,0	0,007	0,19	0,02	0,005	1,2
Max						
QD enfants	209	1,38	157	2,8	0,29	89
QD adultes	12	0,07	8,4	0,15	0,016	5

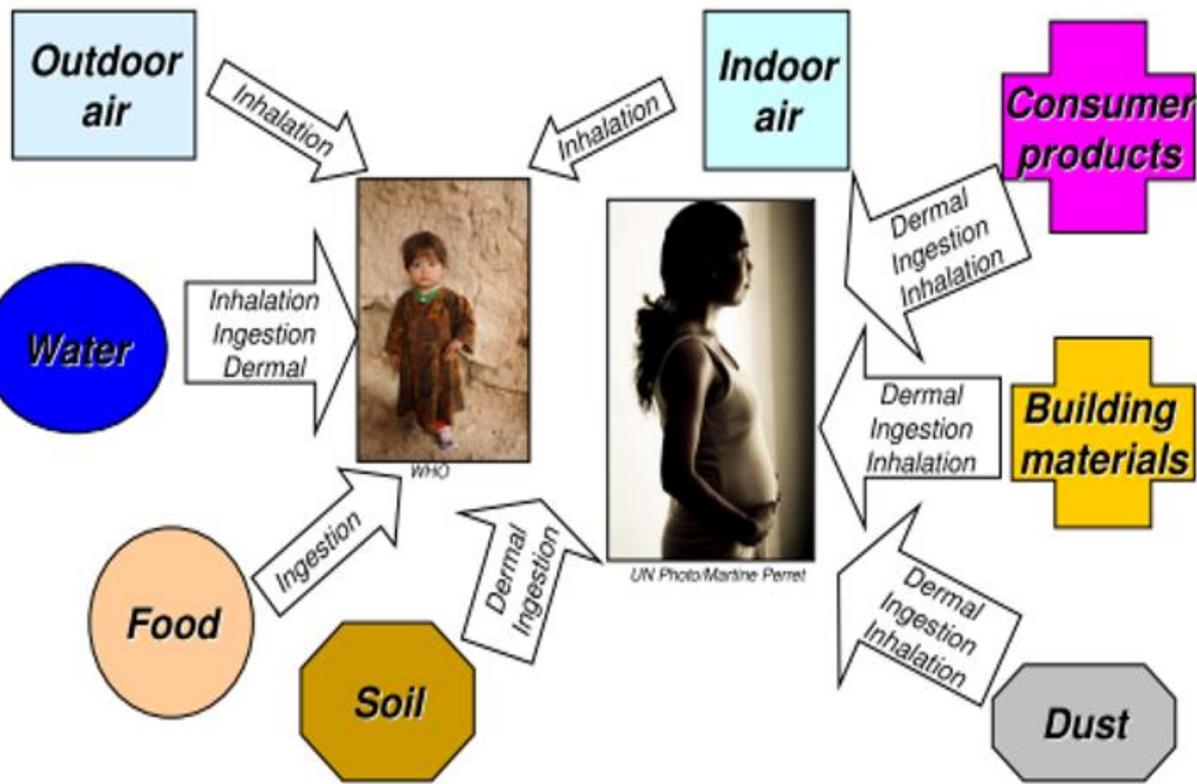
QD < 0,2 OK > 5 Risques

Pollution des eaux: Risques environnementaux

Tableau de comparaison des concentrations mesurées dans l'eau collectée à St Félix par rapport aux seuils de référence environnementaux **PNEC** (valeur limite de risque pour les organismes aquatiques), **NQE** (norme qualité environnementale) et **DW** source (limite pour une eau destinées à l'alimentation humaine avant traitement). *Les valeurs sont en µg/l,*

Élément	St Félix	PNEC	NQE	DW source
Mn	105560			
Zn	65180	18,6	7,8	4000
As	30334	4,4	4,2	100
Cu	58525	1,6	1,4	2000
Cd	7124		0,2	5
Cr	480	4,1		
Pb	2217		7,2	50
Co	1836			
Ni	1921		20	2000
Th	10			
Sb	148		11,3	

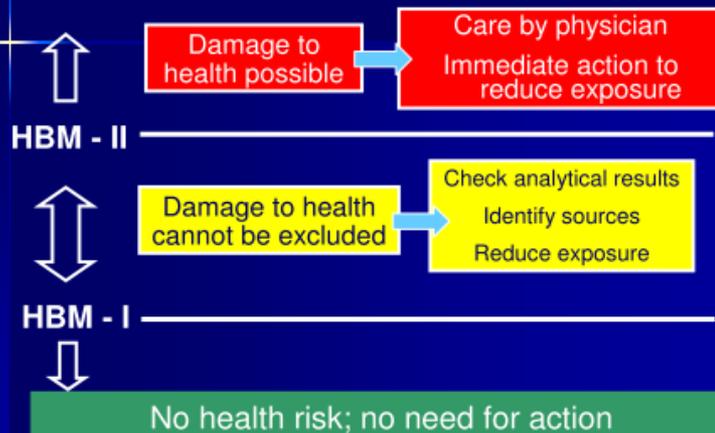
Internal Dose: Biomarkers & Human Monitoring



“The Matrix”

- ❖ Blood
- ❖ Urine
- ❖ Breast milk
- ❖ Expelled air
- ❖ Hair
- ❖ Nails
- ❖ Saliva
- ❖ Teeth
- ❖ Meconium
- ❖ Amniotic fluid
- ❖ Adipose tissue
- ❖ Other tissues and fluids

Health risk assessment: HBM values derived on the basis of toxicological/epidemiological studies by expert judgement

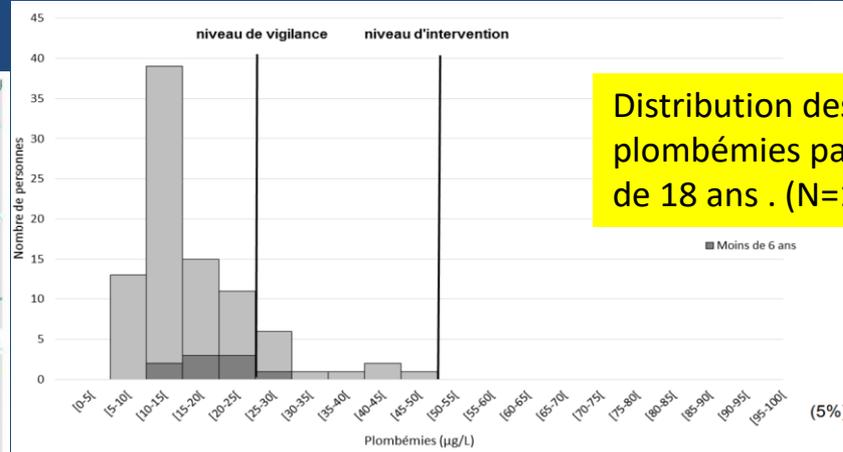
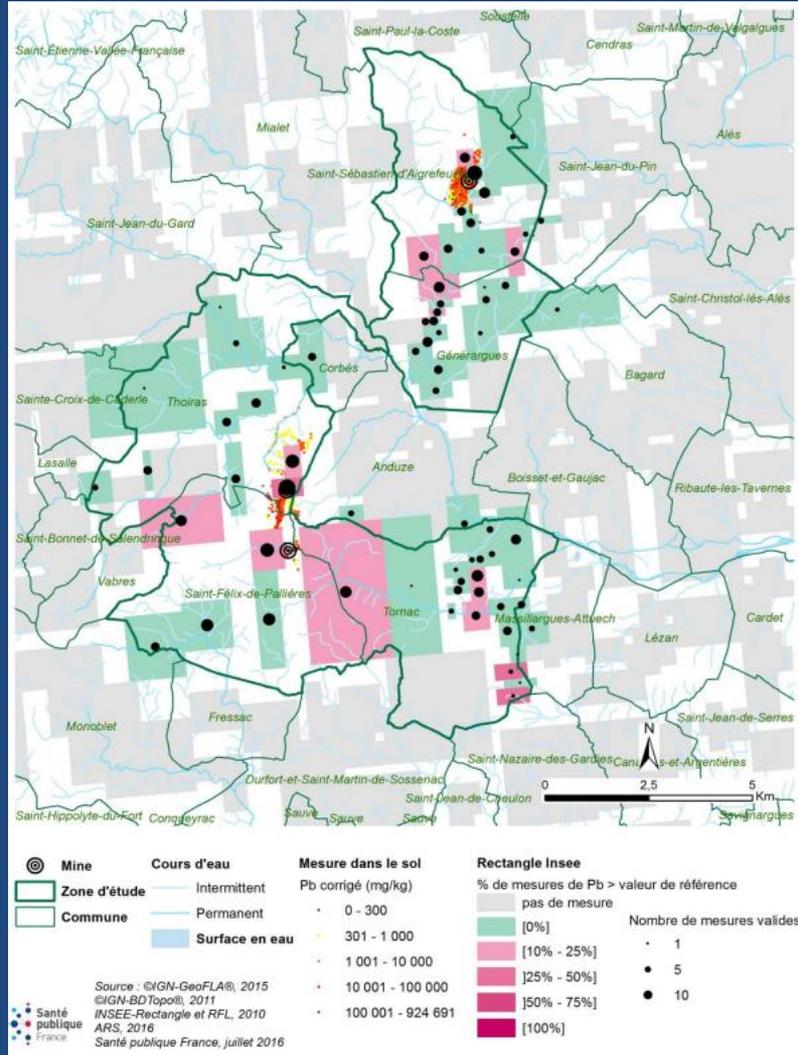


Rf:

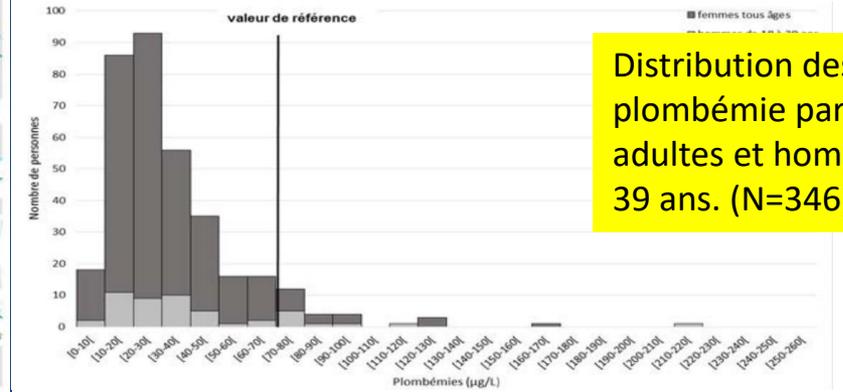
Valeur de référence
par rapport à la
population
générale (95°)

Représentation cartographique des **plombémies** des personnes enquêtées

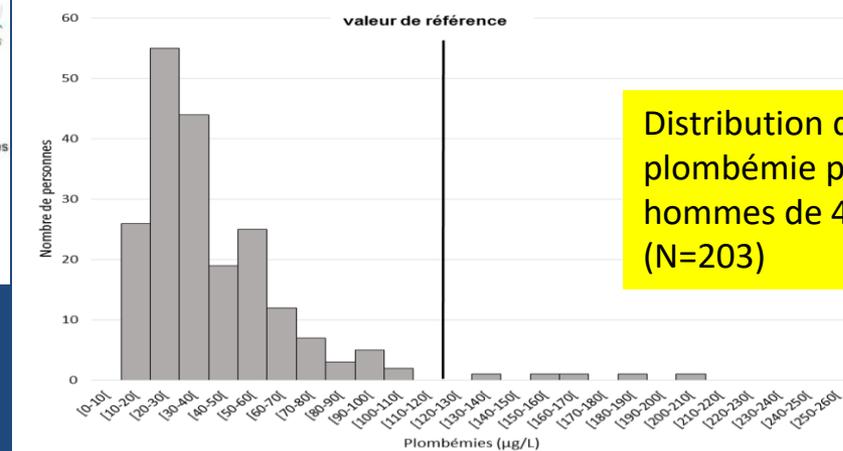
(nombre de mesures supérieures aux valeurs de référence en population générale / nombre de mesures totales valides, rapporté au rectangle Insee).



Distribution des valeurs plombémies parmi les moins de 18 ans . (N=15)



Distribution des valeurs de plombémie parmi les femmes adultes et hommes de 18 à 39 ans. (N=346)

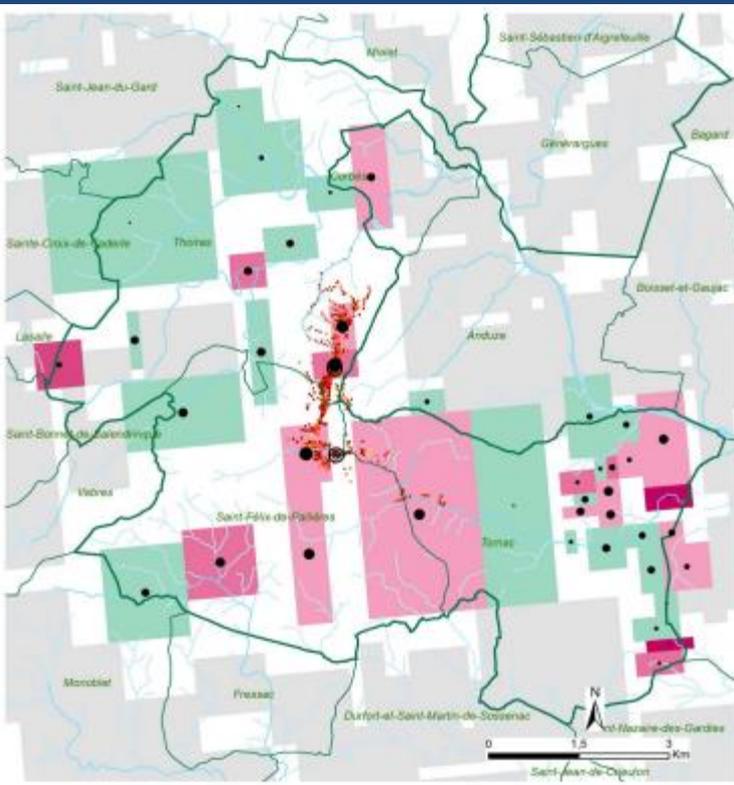


Distribution des valeurs de plombémie parmi les hommes de 40 ans et plus. (N=203)

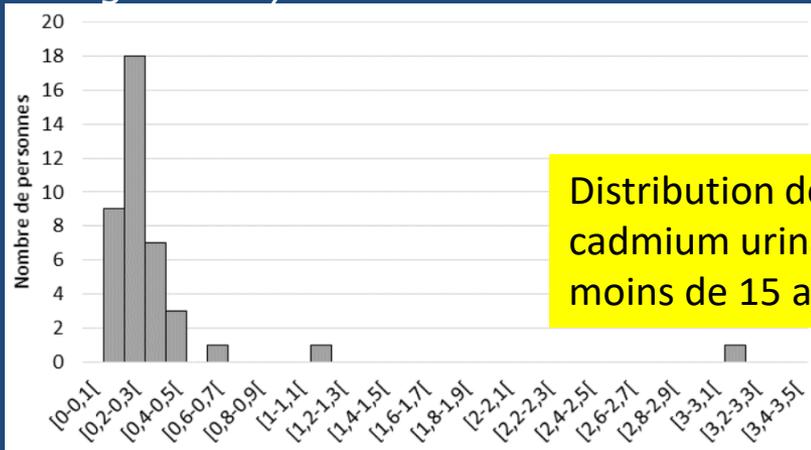
Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Pallières, Gard, 2015

Cartographique des cadmiuries des personnes enquêtées

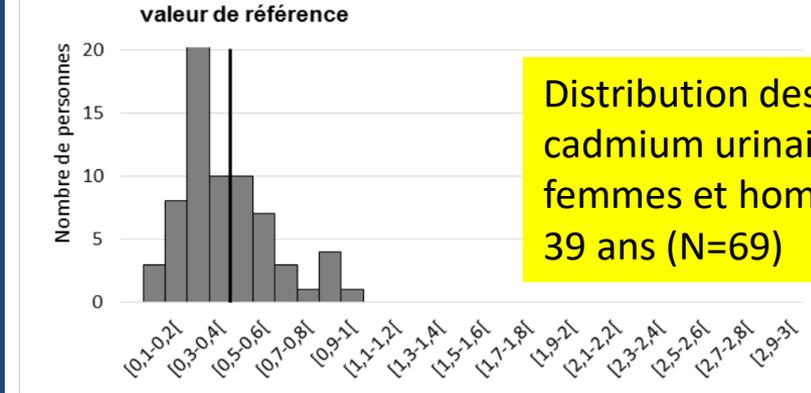
**(nombre de mesures supérieures aux valeurs de référence en population générale / nombre de mesures totales valides, rapporté au rectangle Insee).*



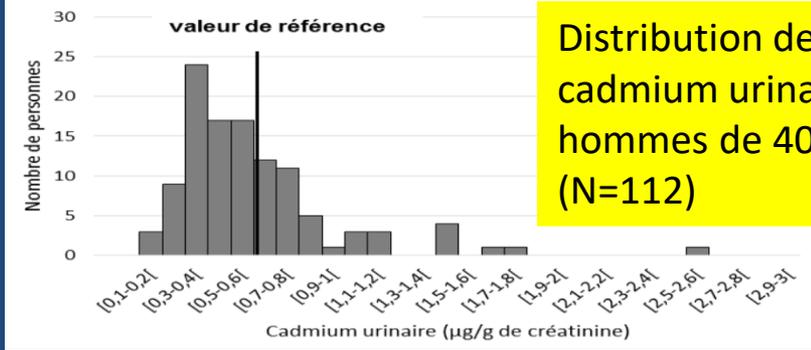
Mine
 Zone d'étude
 Commune
 Cours d'eau
 Intermittent
 Permanent
 Surface en eau
 Mesure dans le sol
 Cd (mg/kg)
 0
 1 - 2
 3 - 50
 51 - 402
 Rectangle Insee
 % de mesures de Cd > valeur de référence
 pas de mesure
 [0%]
 [10% - 25%]
 [25% - 50%]
 [50% - 75%]
 [100%]
 Nombre de mesures valides
 • 1
 • 5
 • 10
 Source : SIGM-GeoFLAB, 2015
 SIGM-SD TopoSI, 2017
 INSEE: Rectangle et RPL, 2010
 ARS, 2018
 Santé publique France, juillet 2016



Distribution des valeurs de cadmium urinaire parmi les moins de 15 ans. (N=40)



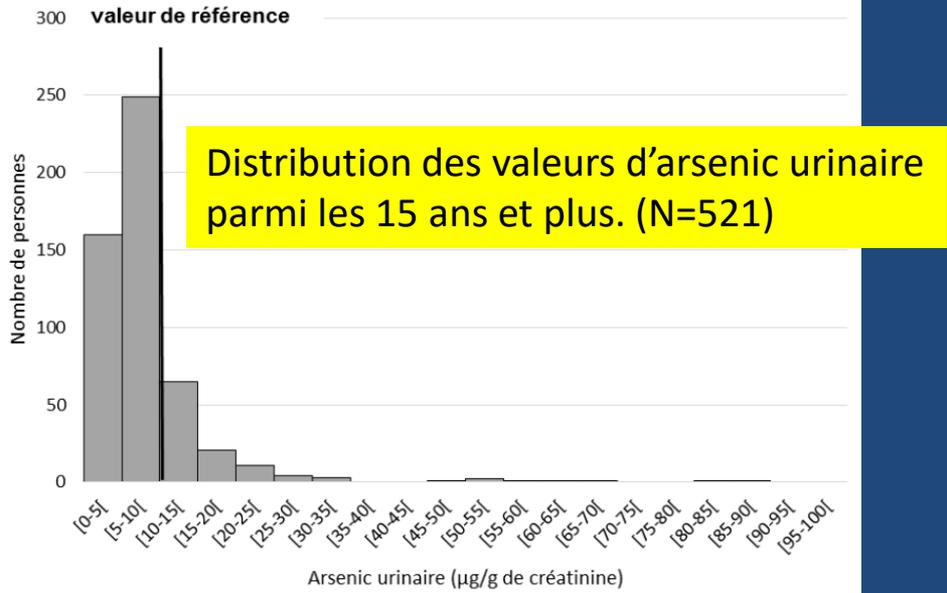
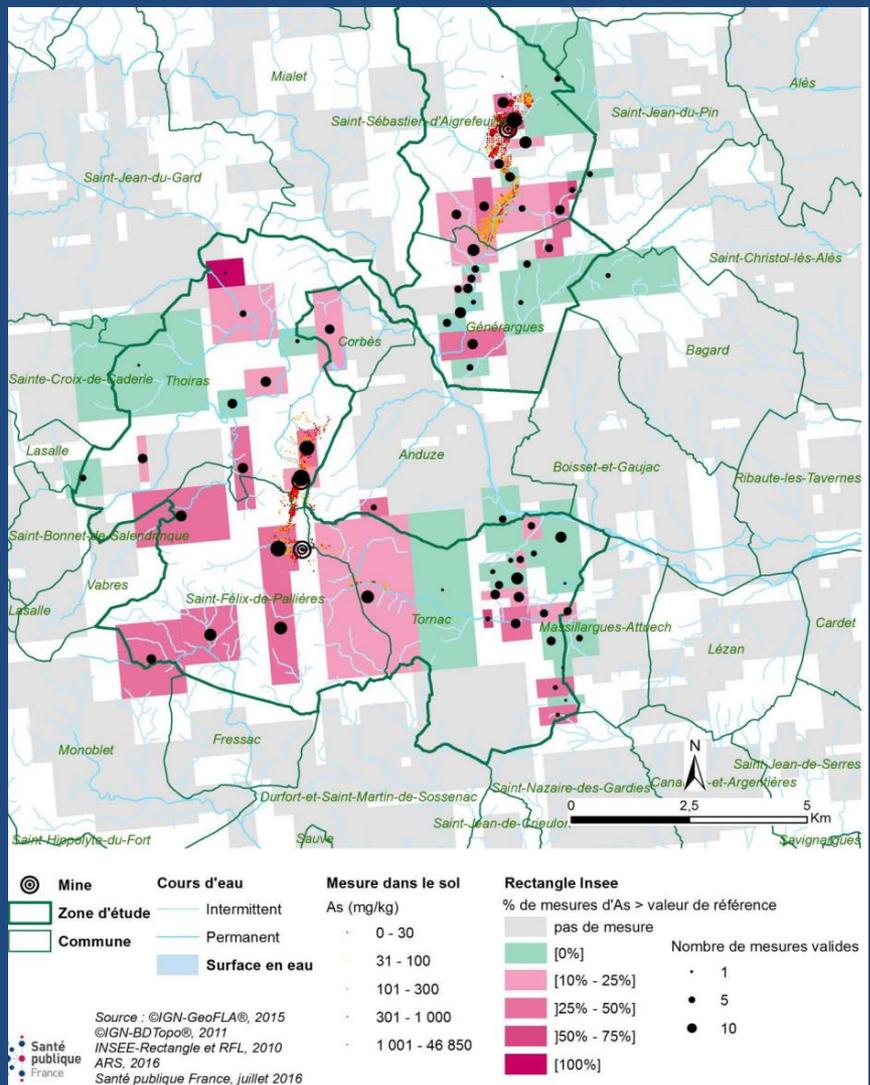
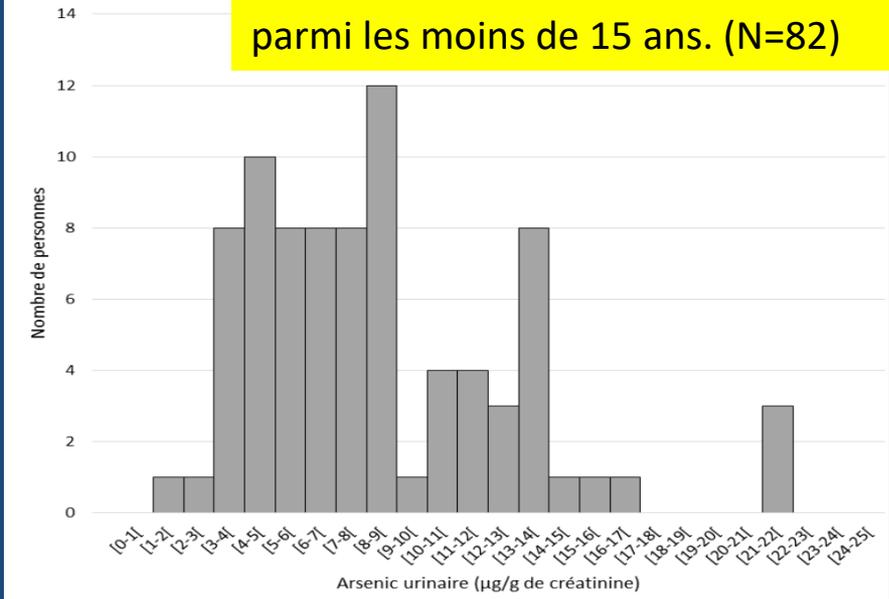
Distribution des valeurs de cadmium urinaire parmi les femmes et hommes de 15 ans à 39 ans (N=69)



Distribution des valeurs de cadmium urinaire parmi les hommes de 40 ans et plus. (N=112)

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).

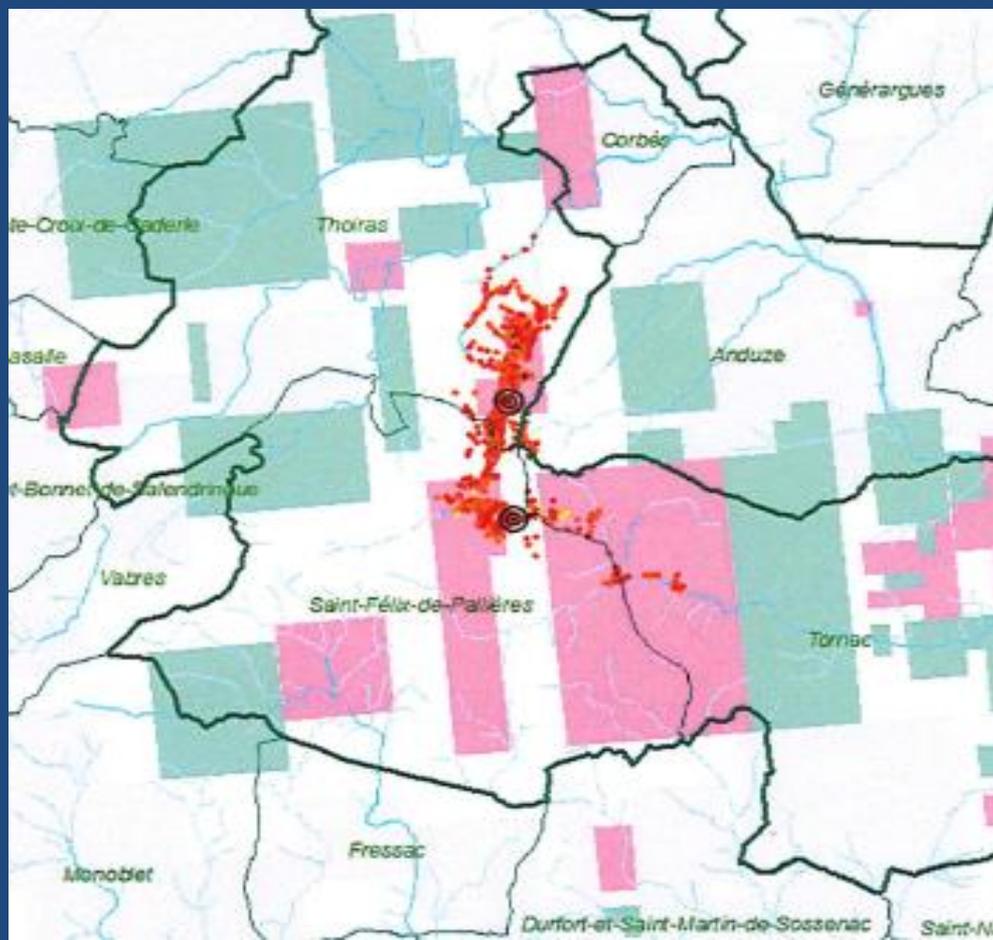
Distribution des valeurs d'arsenic urinaire parmi les moins de 15 ans. (N=82)



Anciens sites miniers de Carnoulès et Croix-de-Palières, Gard, 2015.

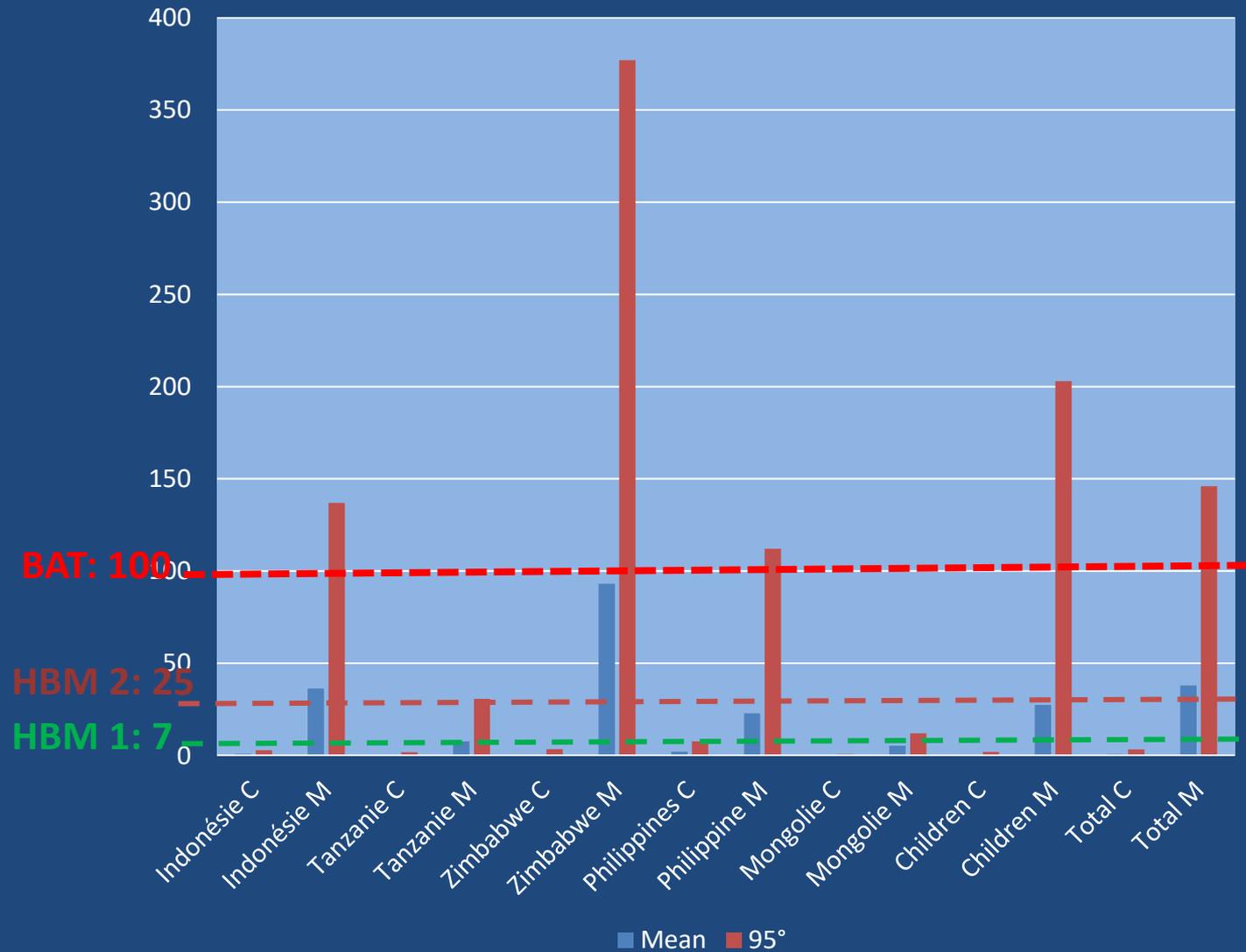
Résultats de l'étude d'imprégnation ARS (St Félix de Paillères)

Une campagne épidémiologique a été menée sur 651 personnes (soit 23% des habitants des communes visées) par l'Agence Régionale de Santé (ARS). Cette étude montre que **20%** personnes ont un taux d'Arsenic urinaire plus élevé que la normale et **7%** un taux de Cadmium urinaire anormal. **7%** de situations prioritaires ont été identifiées et ces personnes feront l'objet d'un suivi médicalisé.



La carte des localisations des personnes contaminées montre une concentration des cas (en rose) autour de la mine (points rouges) mais également aux alentours.

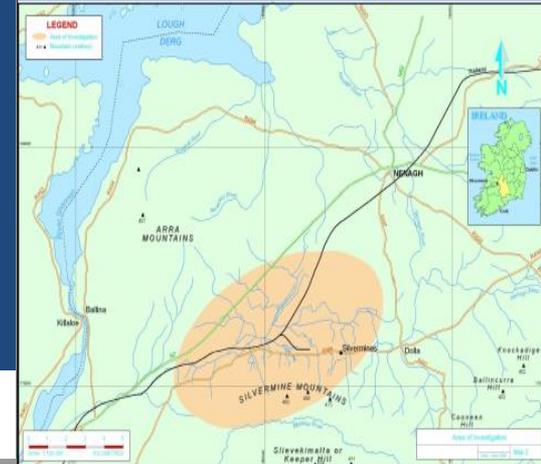
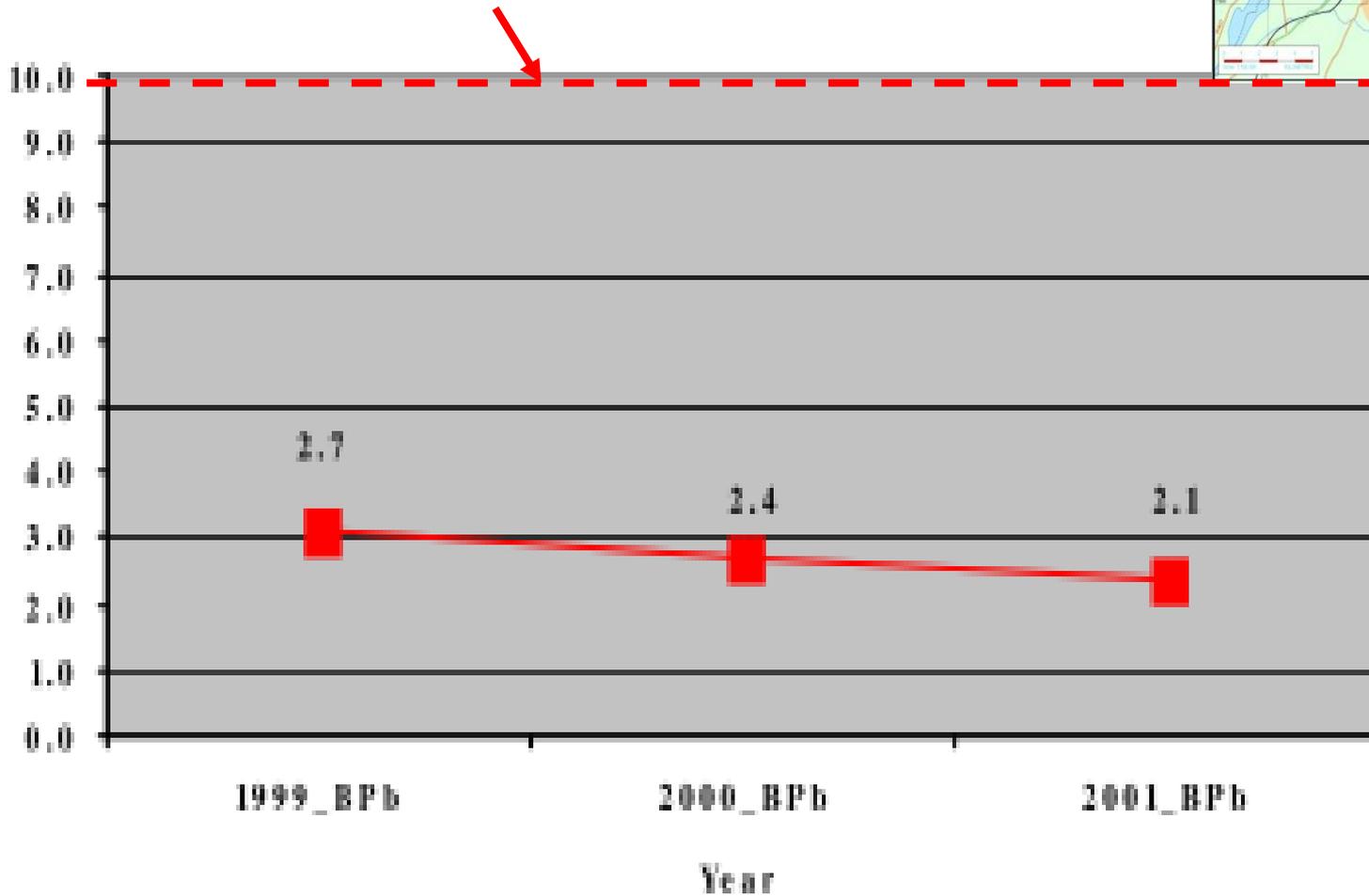
Mercury in human urine specimen from mining or control



Human Biomonitoring Data from Mercury Exposed Miners in Six Artisanal Small-Scale Gold Mining Areas in Asia and Africa, Baeuml et al. Minerals 2011, 1, 122-143;

Children's Blood Lead Levels 1999-2001 in former mining area in Ireland ($\mu\text{g/l}$)

Intervention levels for BPb in children



Les grands principes de la **gestion** des mines et de l'après mine

- **Prévenir** la pollution des sols (Traitement des effluents gazeux liquides et solides)
- **Mettre en sécurité** les sites découverts (Séquestration, surveillance, compartimentation)
- **Connaître, surveiller, maîtriser** les impacts (Monitoring, évaluation des risques)
- **Gérer** selon l'impact et selon l'usage (Réhabilitation proportionnée)
- **Pérenniser** l'usage et garder la **mémoire** (Réusage différencié)
- **Impliquer** tous les acteurs (Comité de suivi et de concertation public privé associations usagers riverains... communication coordonnée)

A sunset over the ocean with a white rectangular box containing the text "Merci de votre attention". The sky is filled with vibrant orange and red clouds, and the water below is dark and calm. A small boat is visible on the horizon.

Merci de votre attention