

Journée technique
17 octobre 2014

Gestion des sites et
sols pollués



Caractérisation et surveillance des milieux (eaux, sols, gaz du sol et air intérieur), exposition et évaluation des risques sanitaires (bioaccessibilité...)

CARACTÉRISATION DE LA BIOACCESSIBILITÉ (SOLS) : RETOUR D'EXPÉRIENCE POUR SA PRISE EN COMPTE DANS L'EXPOSITION ET L'ÉVALUATION DES RISQUES

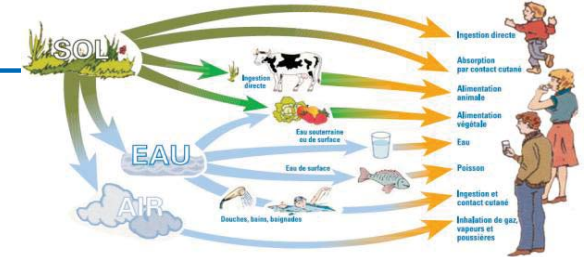
Corinne Hulot (INERIS)

PLAN DE LA PRÉSENTATION

- ❑ Contexte général
- ❑ Définitions – Généralités (biodisponibilité, bioaccessibilité)
- ❑ État des lieux sur la caractérisation de la bioaccessibilité
- ❑ Utilisation de la bioaccessibilité
 - intégration dans les calculs des expositions et des risques
 - retours d'expérience international
- ❑ Intégration de la bioaccessibilité dans l'IEM, illustrations sur des cas (caractérisations, résultats, mise en œuvre dans l'évaluation de l'exposition et des risques)
- ❑ Conclusions
- ❑ Perspectives



CONTEXTE GÉNÉRAL



❑ Dans l'évaluation de l'exposition et des risques sanitaires liés aux sols pollués

- pour les substances non volatiles, l'ingestion de terre et de poussières
 - une des voies d'exposition majeure au niveau des risques
 - notamment pour les cibles sensibles : les enfants
- les doses d'exposition calculées sur la base
 - de la concentration totale de l'élément dans le sol
 - alors que seule la fraction biodisponible de cet élément, à même d'induire un effet toxique dans l'organisme
- en effet, l'effet toxique d'une substance présente dans le sol vis-à-vis des organismes, fonction
 - de la concentration totale de cette substance dans le sol
 - de sa biodisponibilité
 - qui définit la fraction d'un contaminant réellement absorbée par un organisme
- ne reflète pas la réalité de l'exposition
- mais se fonde sur une approche simplifiée par manque de donnée relative à la biodisponibilité pour l'homme des polluants des sols



CONTEXTE GÉNÉRAL

- ❑ Plus exactement, l'estimation des niveaux de risques repose
 - pour la voie orale, sur la comparaison directe de la dose ingérée avec le sol à la valeur toxicologique de référence (VTR)
 - négligeant la différence de biodisponibilité de l'élément considéré dans le sol contaminé et la matrice utilisée pour l'établissement de la VTR
- ❑ Or les modes d'administration pris en compte dans les VTR pour la voie orale
 - plutôt l'ingestion en phase dissoute et l'ingestion dans des aliments
 - confirmation par de nombreuses études in vitro que la biodisponibilité ou la toxicité à partir des sols est plus faible que celle à partir de nourriture ou d'eau
- ❑ Ne pas considérer la biodisponibilité conduit, dans la majorité des cas, à surestimer les niveaux de risque associés à l'ingestion de terre
 - fondamental de considérer ce paramètre
 - en vue d'affiner au mieux les calculs des expositions et des risques
 - de proposer des modalités de gestion les plus optimales



CONTEXTE GÉNÉRAL



- La littérature insiste sur l'importance de considérer la biodisponibilité en vue d'évaluer l'impact réel sur un organisme
- ❑ La majorité des travaux, jusqu'à ces dernières années, relatifs aux végétaux (phytobiodisponibilité) ou aux microorganismes du sol
- ❑ Mais depuis plusieurs années
 - des recherches sur la biodisponibilité des polluants pour l'homme via principalement l'ingestion de terre
 - des protocoles in vitro développés en vue d'approcher la biodisponibilité par la mesure de la bioaccessibilité

CONTEXTE GÉNÉRAL

- ❑ En termes d'objectifs
- ❑ Améliorer l'estimation de l'exposition humaine
 - par la mesure de la bioaccessibilité
 - appliquée en tant que facteur correctif de la concentration totale
 - pour une estimation plus réaliste de l'exposition
- ❑ Améliorer l'estimation des niveaux de risques
- ❑ Proposer des actions mieux proportionnées
- ❑ Mais une application délicate
 - le calcul d'un niveau de risques consistant à comparer la dose d'exposition à une valeur toxicologique de référence (VTR)
 - détermination de cette dernière, fondée sur une matrice de référence (solution ou aliment) servant de vecteur à l'administration du polluant
 - pour le calcul de risque, nécessité d'intégrer la biodisponibilité ou la bioaccessibilité relative du polluant dans le sol par rapport à la biodisponibilité ou bioaccessibilité de ce même polluant dans la matrice de référence
 - peu de données actuellement disponibles concernant ces dernières valeurs
- La mise en œuvre d'hypothèses pour mener à bien l'intégration de la biodisponibilité ou bioaccessibilité relatives dans le calcul des risques



UTILISATION DE LA BIOACCESSIBILITÉ DANS LE DOMAINE DES SSP EN FRANCE



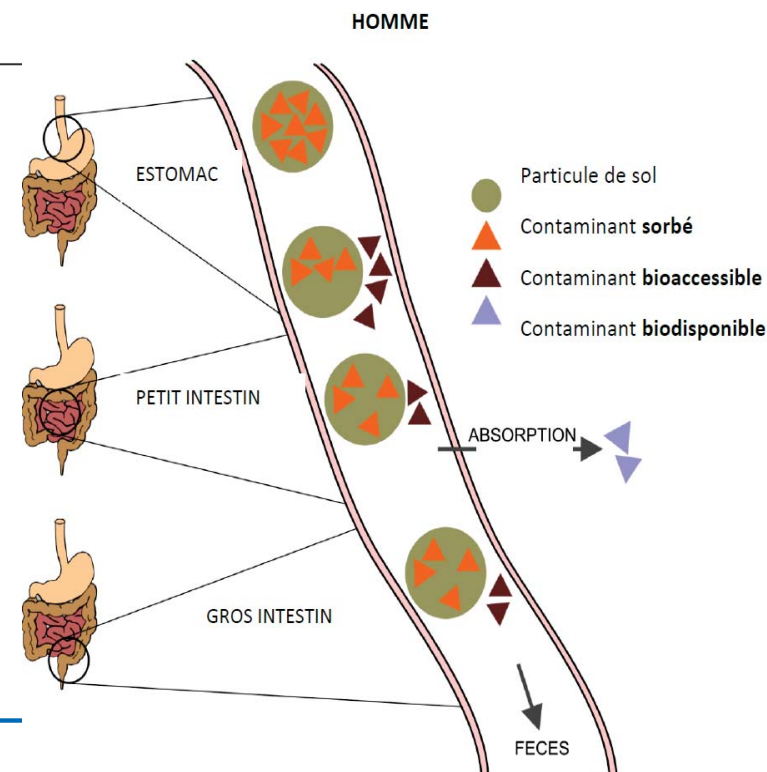
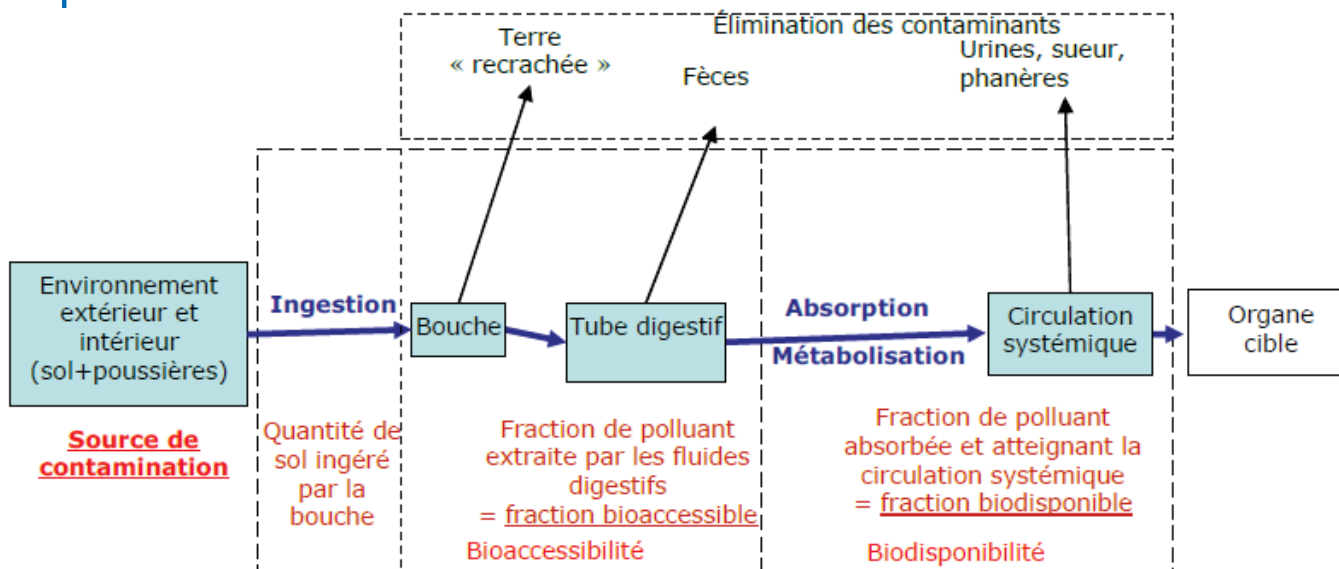
- ❑ Position de la DGS, l'InVS, l'INERIS avec la validation du Ministère en charge de l'environnement (DGPR) mentionnée dans le rapport InVS, INERIS (2012) « Quantité de terre et poussières ingérées par un enfant de moins de 6 ans et bioaccessibilité des polluants. Etat des connaissances et propositions - Guide pratique »
 - la valeur de la bioaccessibilité peut être utilisée pour affiner l'estimation de l'exposition à un polluant présent dans une terre polluée
 - mais seule la démarche d'interprétation de l'état de milieux (IEM) permet plus spécifiquement un recours à la mesure de la bioaccessibilité et à son intégration dans son déroulement
 - dans la démarche de Plan de gestion
 - basé sur le bilan coût/avantage
 - il s'agit de réhabiliter ou de réaménager des sites historiquement pollués ou consécutifs à la mise à l'arrêt définitif d'une installation classée pour un changement d'usage
 - la bioaccessibilité n'a pas à être prise en compte



DÉFINITIONS - GÉNÉRALITÉS



- ❑ Schéma conceptuel de l'exposition par ingestion de sol
- ❑ Depuis l'introduction de la terre dans la bouche jusqu'à la concentration résultante du polluant dans la circulation sanguine et l'éventuelle atteinte d'un organe cible
- ❑ Illustration des notions de bioaccessibilité et biodisponibilité pour l'Homme



DÉFINITIONS - GÉNÉRALITÉS



- ❑ Distinction de la notion de biodisponibilité et de bioaccessibilité
- ❑ Voie orale
- ❑ Biodisponibilité (absolue)
 - fraction de composés ingérée absorbée, atteignant la circulation systémique
 - le ratio de la dose absorbée sur la dose administrée

$$\text{Biodisponibilité absolue (\%)} = \frac{\text{dose absorbée}}{\text{dose administrée}} \times 100$$

- ❑ La biodisponibilité orale, l'intégration de plusieurs phénomènes
 - la solubilisation du contaminant dans le système salivaire, le tube digestif, gastro-intestinal (correspond à la fraction bioaccessibilité)
 - le transport du contaminant au travers de la barrière gastro-intestinale et absorption
 - la métabolisation du contaminant avant transmission à la circulation systémique

DÉFINITIONS - GÉNÉRALITÉS



□ Mesure de la biodisponibilité

- par le biais d'expérimentation in vivo, le plus souvent sur des modèles animaux dont le système digestif proche de celui de l'homme
- méthodes demandant un savoir faire en expérimentation animale

- coûteuses



- soulevant des questions éthiques (modèles humains le plus souvent utilisés : les porcs juvéniles et, dans une moindre mesure, les singes)

- classiquement en comparant les concentrations de l'élément mesurées dans le sang après injection intraveineuse et après absorption consécutive à une administration par voie orale
- également à partir de la mesure de la concentration de la substance considérée dans un organe cible après une période d'exposition de plusieurs semaines, nécessite, au préalable, l'identification des organes dans lesquels réaliser la mesure

DÉFINITIONS - GÉNÉRALITÉS



❑ Bioaccessibilité orale

- fraction d'une substance dans un sol extraite (mise en solution) par les fluides digestifs au niveau du système salivaire et du tractus gastro-intestinal et donc disponible pour absorption

❑ Bioaccessibilité relative

- ratio de la fraction extraite depuis le milieu d'exposition, ici le sol, sur la fraction absorbée de ce même contaminant depuis la matrice prise en compte pour l'établissement de la VTR

$$\text{Bioaccessibilité relative (\%)} = \frac{\text{Dose extraite depuis le sol}}{\text{Dose extraite depuis le milieu utilisé dans les études de toxicité}} \times 100$$

❑ Mesure de la bioaccessibilité relative



DÉFINITIONS - GÉNÉRALITÉS



- ❑ Bioaccessibilité et biodisponibilité d'un contaminant, fonction de :
 - la matrice ingérée
 - dans le cas du sol : caractéristiques lithologiques, texture, présence de certains éléments, pH, teneur en matière organique, l'origine de la pollution, etc.
 - la forme physico chimique du contaminant au niveau de la barrière gastrique, intestinale
- ❑ Dans la majorité des cas, une partie importante de la fraction bioaccessible n'est pas biodisponible
 - le contaminant formant des complexes avec des constituants du tractus gastro-intestinal
 - ou se liant aux résidus du bol alimentaire, limitant son passage au travers de la barrière intestinale

ETAT DES LIEUX SUR LA MESURE DE LA BIOACCESSIBILITÉ



- ❑ La bioaccessibilité, un estimateur pertinent de la biodisponibilité des éléments métalliques dans le sol ?
- ❑ La mesure de la fraction bioaccessible, avec quel test ?
 - par l'utilisation de tests *in vitro*
 - par extraction séquentielle *ad hoc* de l'élément contenu dans le sol
 - tests développés depuis le début des années 1990, principalement par des équipes nord-américaines ou européennes
- Des protocoles non physiologiques : extraction simple de l'élément à partir du sol, ne simulant pas les conditions physiologiques de la digestion
- Des protocoles physiologiques pour s'approcher au mieux des mécanismes physiologiques de la digestion
 - une première extraction, acide, visant à simuler les conditions de l'estomac
 - une seconde extraction, proche de la neutralité, visant à simuler les conditions intestinales
 - en plus de ces deux phases, certains tests : une phase initiale simulant le passage de la matrice dans la salive
- Des différences en termes de nombre de compartiments digestifs simulés, le ratio solide/liquide, les temps de contact entre le sol contaminé et les extractants, les conditions de pH et E_h utilisées

ÉTAT DES LIEUX SUR LA MESURE DE LA BIOACCESSIBILITÉ

- ❑ 6 tests très souvent utilisés dans la littérature internationale
 - illustration de différences importantes concernant les valeurs de paramètres
 - présentation plus exhaustive de ces tests dans la norme ISO/DIS 17924-1
- ❑ Norme XP ISO/TS 17924 Mars 2008
 - Qualité du sol Évaluation de l'exposition humaine par ingestion de sol et de matériaux du sol
 - Lignes directrices pour l'application et la sélection de méthodes d'extraction fondées sur le point de vue physiologique pour l'estimation de la bioaccessibilité/biodisponibilité pour l'être humain de métaux dans le sol
 - en cours de révision, avec intégration du test UBM (Unified Barge Method)



ÉTAT DES LIEUX SUR LA MESURE DE LA BIOACCESSIBILITÉ

- ❑ BARGE (Bioaccessibility Research Group in Europe), plusieurs laboratoires et instituts de recherche, un test unique et reproductible
 - protocole in-vitro « UBM (Unified Barge Method) procedure for the measurement of inorganic contaminant bioaccessibility from solid matrices »
 - pour objectif, de caractériser la fraction de métaux/métalloïdes digérés au niveau du tractus gastro-intestinal d'un enfant à jeun
 - projet de normalisation dans la mise à jour de la norme XP ISO/TS 17924

- 3 phases
 - buccale, stomacale et intestinale
 - correspondant à la mise en suspension des particules dans des fluides aux propriétés physico-chimiques comparables à celles de la salive, de l'estomac et de l'intestin

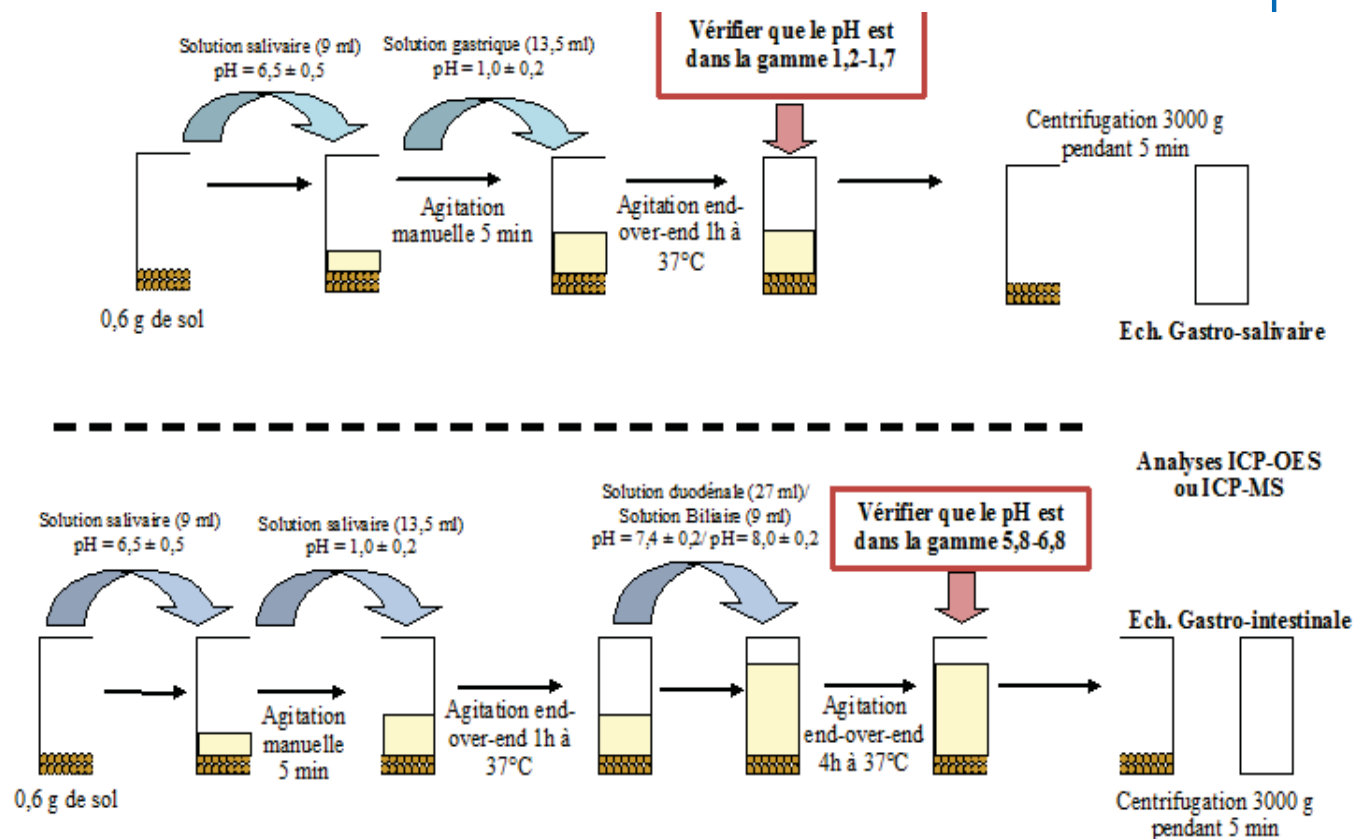


Figure 1 - Schéma récapitulatif du test in vitro unifié BARGE (UBM)

RAPPEL DU CALCUL DE LA DOSE D'EXPOSITION POUR L'INGESTION DE TERRE

- Pour les substances ingérées, la dose journalière d'exposition

$$DJE = \frac{C \times Q \times F}{P} \times \frac{T}{T_m} \times BD$$

Substance à effets à seuil : $T_m = T$

Substance à effets sans seuil : $T_m = 70 \text{ ans (vie entière)}$

DJE : Dose journalière d'exposition (mg/kg_{pc.j})

C : Concentration dans le milieu (mg/kg_{de terre}) *via la mesure*

Q : Quantité de terre et poussières ingérée par jour (mg/j)

P : Poids corporel de la cible (kg)

F : Fréquence d'exposition annuelle (X j / 365 j)

T : Durée d'exposition (an)

T_m : Période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (an)

BD : Biodisponibilité de l'élément issu du sol

Paramètres, les choix :

- selon la cible, le scénario d'exposition
 - issus de la littérature (ex. pour la quantité ingérée de sol par les enfants (InVS et INERIS, 2012, InVS, 2012, etc.)
-

- Le calcul de risques

- substances avec effets à seuil : Quotient de danger (QD) = DJE/VTR

- substances avec des effets sans seuil : Excès de risque individuel (ERI) = DJE x VTR

(VTR : Valeur toxicologique de référence)

GÉNÉRALITÉS SUR LES MODALITÉS D'UTILISATION DE LA BIOACCESSIBILITÉ DANS LE CALCUL DES EXPOSITIONS ET DES RISQUES



- ❑ Rapport InVS et INERIS (2012) : démarche à suivre pour tenir compte de la bioaccessibilité mesurée avec le test UBM (Unified Barge Method) en termes d'évaluation des expositions et des risques
- ❑ Suite aux travaux conduits par l'INERIS sur l'arsenic (As) et le cadmium (Cd)
 - proposition d'un calcul de Biodisponibilité relative ($BD_{relative}$) (Caboche, 2009)
 - via la démonstration pour l'As et le Cd, de l'égalité des absorptions de chacun de ces éléments, qu'il soit issu du sol contaminé ou d'eau de boisson, matrices de référence pour l'établissement des VTR pour ces deux éléments
 - la fraction absorbée de la substance extraite de la matrice terre est égale la fraction absorbée de la substance extraite de la matrice de référence
 - des simplifications conduisant à la relation

$$DJE_{ajustée} = DJE \times (BA_{Terre} / BA_{VTR})$$

avec DJE : dose journalière d'exposition, BA_{Terre} : bioaccessibilité absolue de substance avec la matrice terre, BA_{VTR} : bioaccessibilité absolue de la substance avec la matrice de référence

GÉNÉRALITÉS SUR LES MODALITÉS D'UTILISATION DE LA BIOACCESSIBILITÉ DANS LE CALCUL DES EXPOSITIONS ET DES RISQUES

- ❑ Pour l'As et le Cd, les Bioaccessibilités Absolues en phase gastrique de ces éléments dans l'eau de boisson, proches de 100% (Caboche, 2009)
 - nouvelle simplification et la mesure de la bioaccessibilité de ces éléments pour ajuster la DJE

$$DJE_{ajustée} = DJE \times BA_{Terre}$$

- ❑ Pour le plomb, le même document, avec une formulation mais tenant compte de la VTR proposée par l'OMS à l'époque de la rédaction du rapport (2012)
 - actuellement la VTR proposée par l'ANSES (correspondant à une plombémie totale de 15 µg/l tant pour l'enfant que pour l'adulte, qui considère toutes les voies potentielles d'exposition)
 - mais possibilité de retenir la formulation proposée dans le rapport InVS et INERIS (2012)

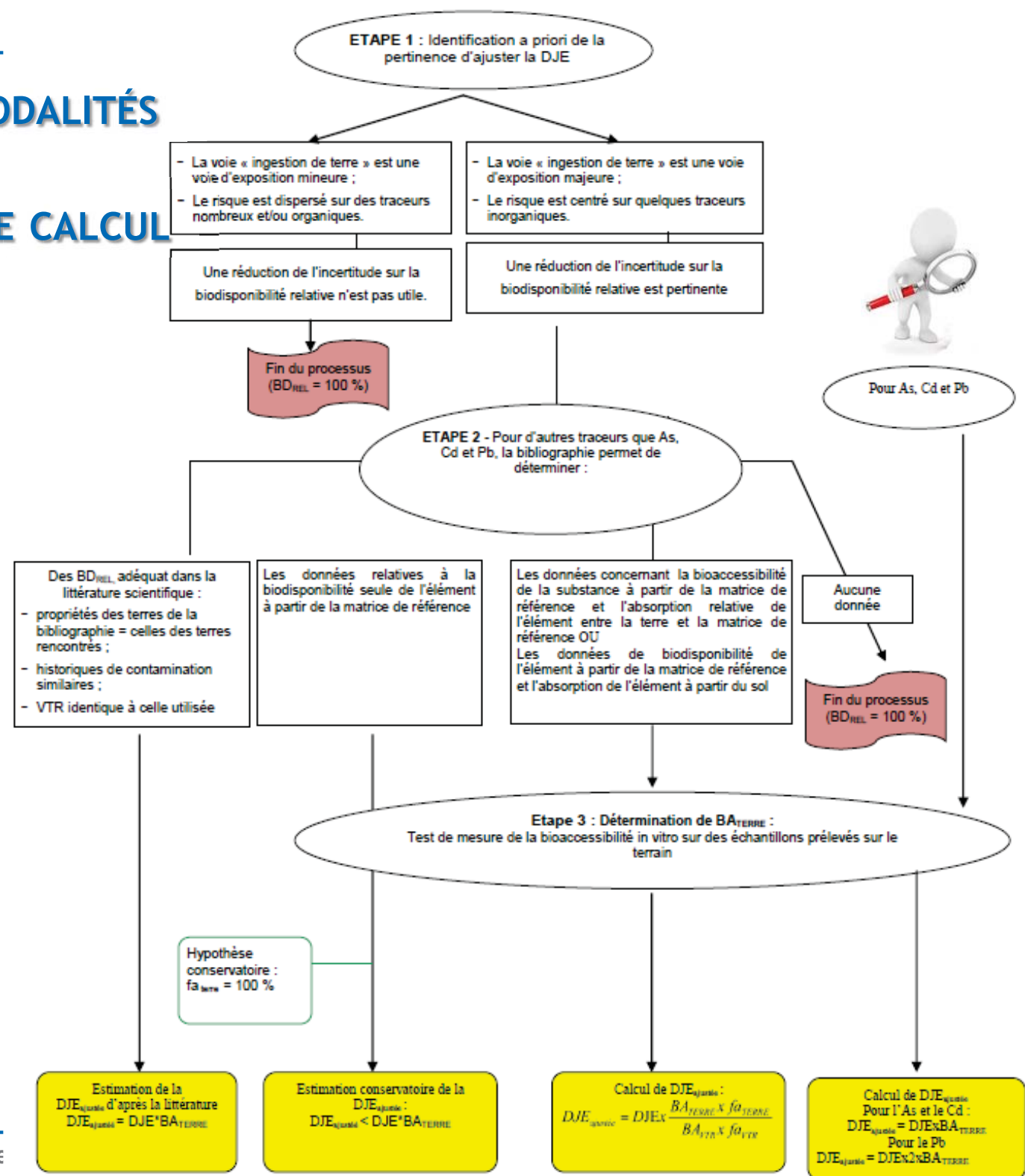
$$DJE_{ajustée} = DJE \times 2 \times BA_{Terre}$$



- ❑ L'ensemble des hypothèses et simplifications proposées, valable uniquement lorsque la bioaccessibilité issue du test UBM
- ❑ Dans le cas d'une évaluation des expositions et des risques, prise en compte de la valeur de bioaccessibilité la plus élevée des deux phases

GÉNÉRALITÉS SUR LES MODALITÉS D'UTILISATION DE LA BIOACCESSIBILITÉ DANS LE CALCUL DES EXPOSITIONS

Démarche générale en l'absence de relations simplifiées comme pour l'As, le Cd, le Pb, se référer au guide InVS & INERIS (2012)



EN PRÉAMBULE, QUELQUES EXEMPLES DE VALEURS DE BIOACCESSIBILITÉ DU PLOMB DANS LE SOL (EXTRAIT DE INVS, INERIS, 2012)

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

- Une gamme de valeurs pour
 - la bioaccessibilité gastrique de 4 à 90%
 - la bioaccessibilité gastro-intextinale de 0,3 à 73%

ETAT DES LIEUX - RETOURS D'EXPÉRIENCE INTERNATIONAL

Etats-Unis

Europe

- Grande-Bretagne
- Pays-Bas

France

- mise en œuvre dans quelques études
- des études avec une approche de modélisation statistique (paramètres du sol) pour estimer la bioaccessibilité
- des études au regard de l'influence de certains paramètres du sol sur la bioaccessibilité
- actuellement dans le cadre des travaux de l'INERIS, interprétation en cours au regard de certaines caractéristiques des sols



INTÉGRATION DE LA BIOACCESSIBILITÉ DANS L'EM, ILLUSTRATION SUR CAS

CARACTÉRISATION, RÉSULTATS, MISE EN ŒUVRE DANS L'ÉVALUATION DE L'EXPOSITION ET DES RISQUES



- ❑ Rappel : seule la démarche d'interprétation de l'état de milieux permet plus spécifiquement un recours à la mesure de la bioaccessibilité et à son intégration dans son déroulement

- ❑ Dans le cadre de l'EM

- ❑ Différents contextes historiques de pollution

- cas du site A : contexte industriel



- cas du site B : contexte minier



- quelques autres exemples de résultats

CAS DU SITE A - CONTEXTE GÉNÉRAL

CAS SITE A

□ Contexte général

- en zone rurale, présence de cours d'eau
- aménagements : zones résidentielles avec jardin potager ou espace vert, jardins publics, aires de jeux, écoles
- eaux issues de puits privés, de sources, eaux de surface avec usage d'irrigation de jardins potagers ,etc.

□ Contexte historique

- production et transformation de métaux
- dont minéral utilisé concentré en zinc, cuivre, plomb, cadmium, argent et fer
- différentes périodes de production
 - par voie thermique (des scories et rejets atmosphériques avec une grande variété de métaux, du zinc et également du plomb, du cadmium présents dans le minéral et de l'arsenic issu du charbon
 - par voie électrolytique (des matériaux, des résidus stockés)

DIAGNOSTICS

CAS SITE A



❑ Sur la base du schéma conceptuel

Milieux d'exposition	Voies d'exposition	Populations concernées
<p>Sol de surface au droit des zones de pelouse</p> <p>Sol du jardin potager</p> <p>Poussières déposées sur les planchers de la maison</p> <p>Ingestion de végétaux potagers</p>	<p>Ingestion de terre lors des activités de jeux en extérieur</p> <p>Ingestion de poussières déposées sur les planchers de la maison lors des activités de jeux en intérieur</p> <p>Ingestion de terre lors des activités de jardinage</p> <p>Ingestion de végétaux potagers</p>	<p>Enfant</p> <p>Adulte</p> <p>Enfant et adulte</p>

❑ Programmes analytiques

- paramètres chimiques : concentrations totales en As, Cd, Pb et Zn
- sur la base de ces résultats, fractions bioaccessibles gastrique et intestinale pour As, Cd, Pb dans les matrices sol, poussières déposées sur les planchers des bâtiments, végétaux potagers
- paramètres physiques (taux d'humidité ou de matière sèche, pH et matière organique des sols des jardins potagers, pH des eaux, granulométrie)

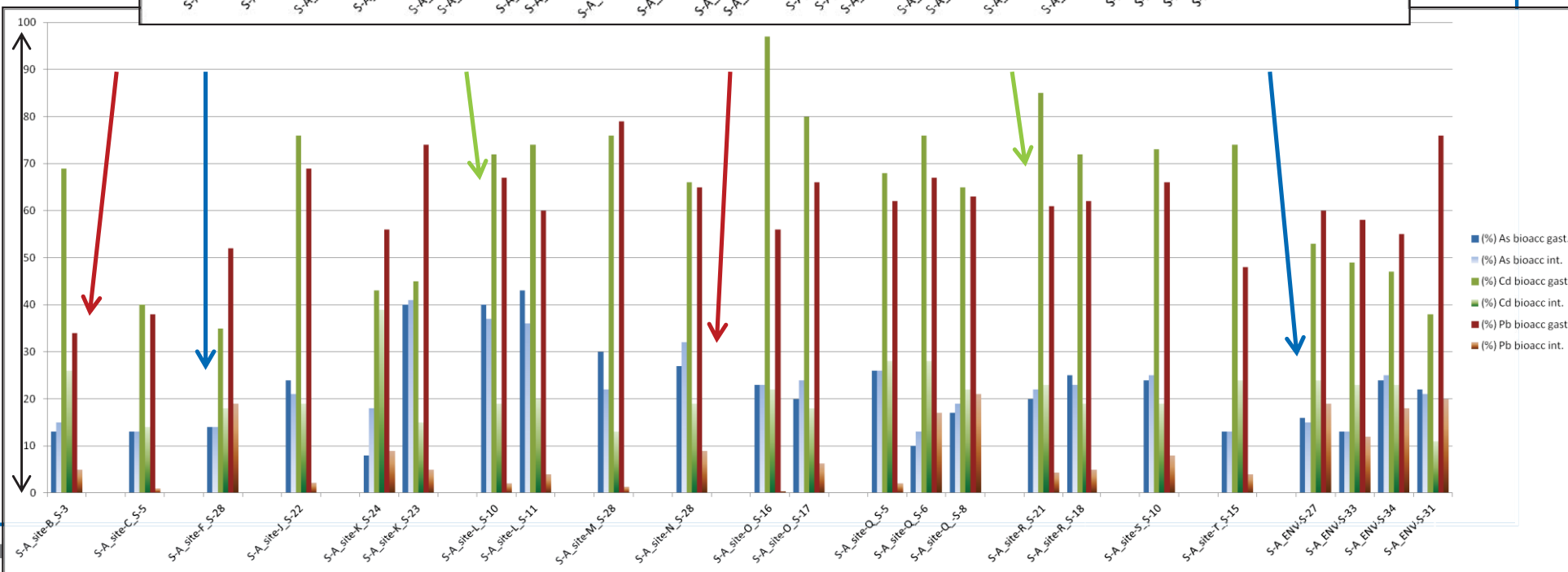
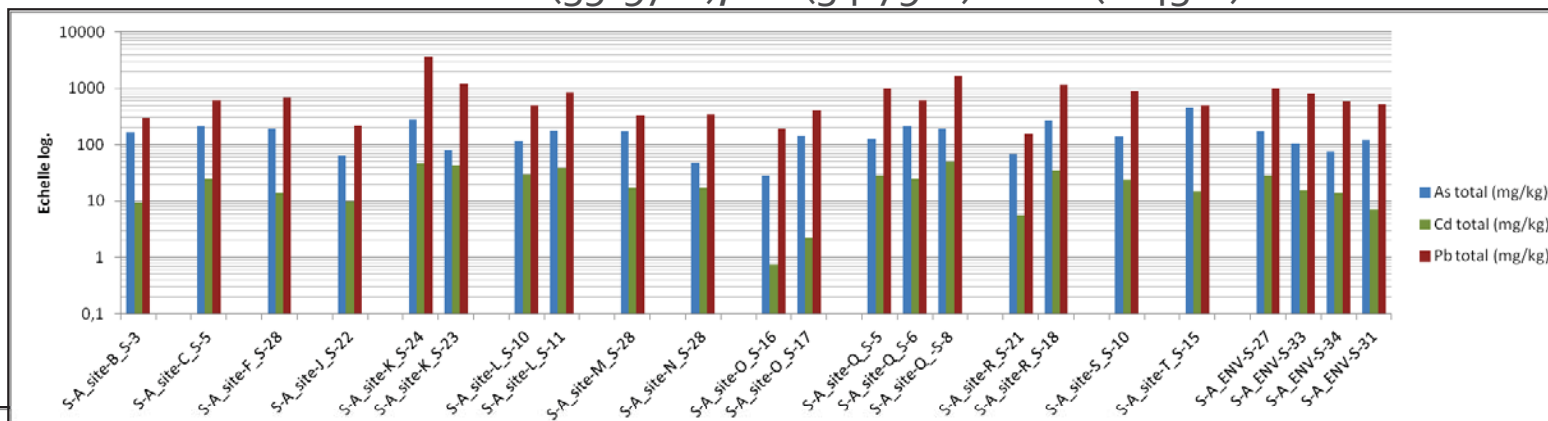
RÉSULTATS DES CARACTÉRISATIONS

CAS SITE A



Concentrations dans les sols de surface et bioaccessibilités gastriques (*couleur unie*) et intestinales (*couleur dégradée*)

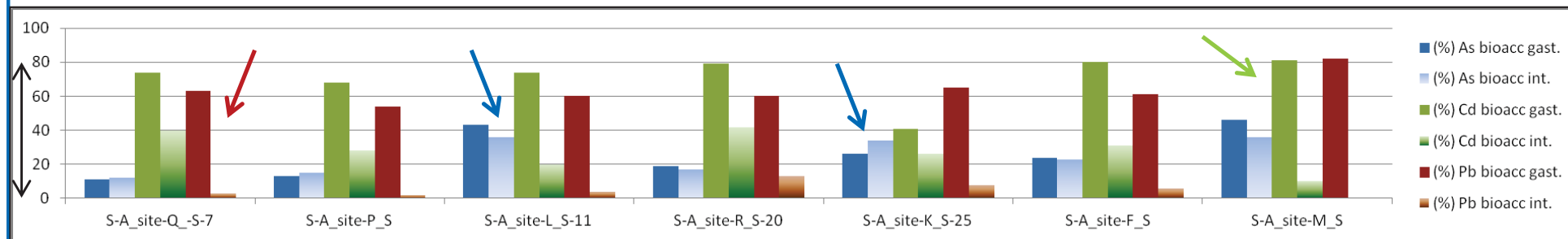
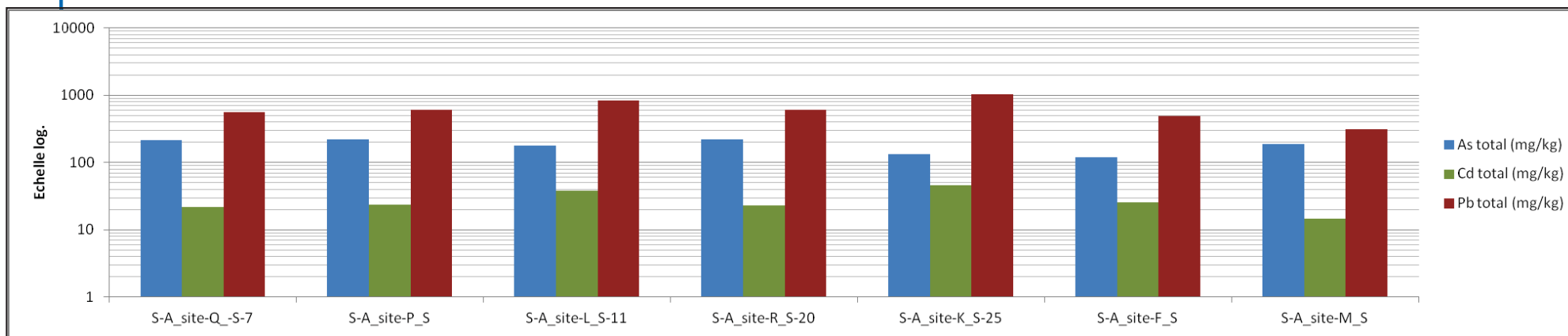
- pour le **Cd** et le **Pb**, bioacc. Gast. > bioacc. Int. (-> facteur 3), plus marqué pour le Pb
- a contrario* de l'**As**, avec des valeurs généralement plus faibles
- gamme de la bioacc. Gast.: Cd (35-97%), Pb (34-79%) et As (8-43%)



RÉSULTATS DES CARACTÉRISATIONS

CAS SITE A

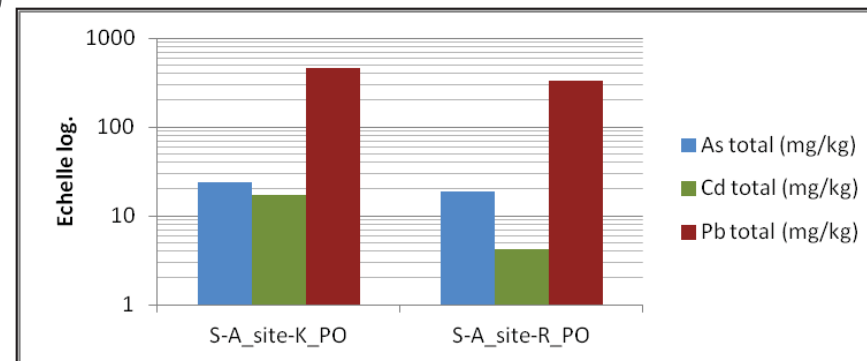
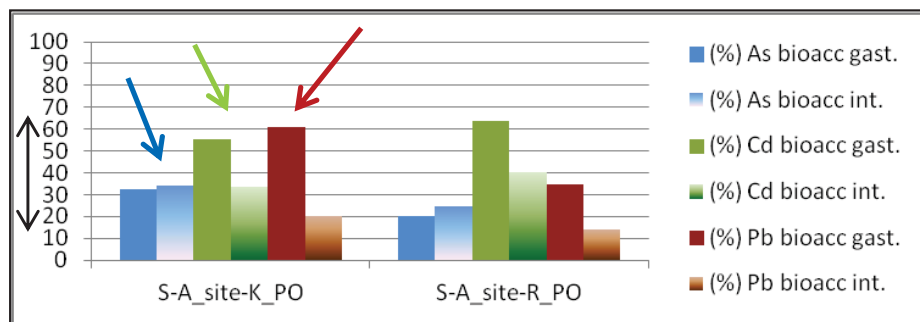
- ❑ Concentrations dans les sols de jardin potager et bioaccessibilités gastriques (*couleur unie*) et intestinales (*couleur dégradée*)
 - pour le **Cd** et le **Pb**, bioacc. Gast. > bioacc. Int. (-> facteur 10), plus marqué pour le Pb
 - *a contrario* de l'**As**, des valeurs généralement plus faibles et des cas avec la bioacc. Int. > bioacc. Gast.
 - gammes de la bioaccessibilité Gast. associées au Cd (41-81%), au Pb (54-82%) et à l'As (11-46%)



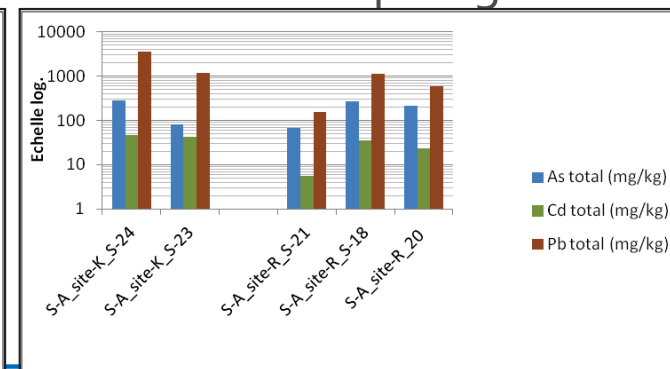
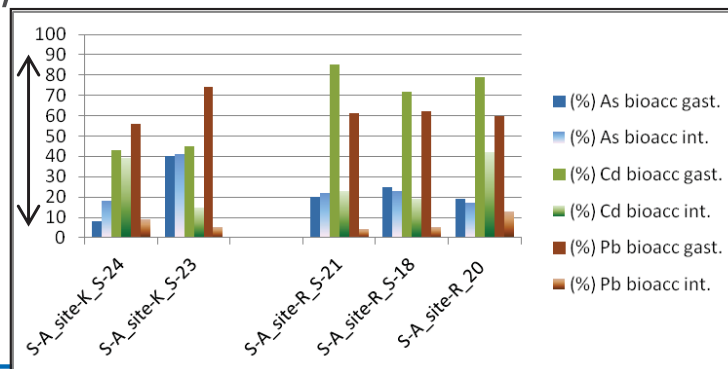
RÉSULTATS DES CARACTÉRISATIONS

CAS SITE A

- Concentrations dans les poussières déposées sur les planchers des habitations et bioaccessibilités
 - pour le **Cd** et le **Pb**, bioacc. Gast. > bioacc. Int. (-> facteur 3), plus marqué pour le Pb
 - a contrario* de l'**As**, avec des valeurs généralement plus faibles et cas avec bioacc. Int. > bioacc. Gast.
 - gamme de la bioaccessibilité : Cd (55-63%) et Pb (35-61%) (bioacc. Gast.) et As (25-34%) (dans ce cas bioacc. Int.)



- pour rappel, concentrations dans les sols de surface et sols du potager

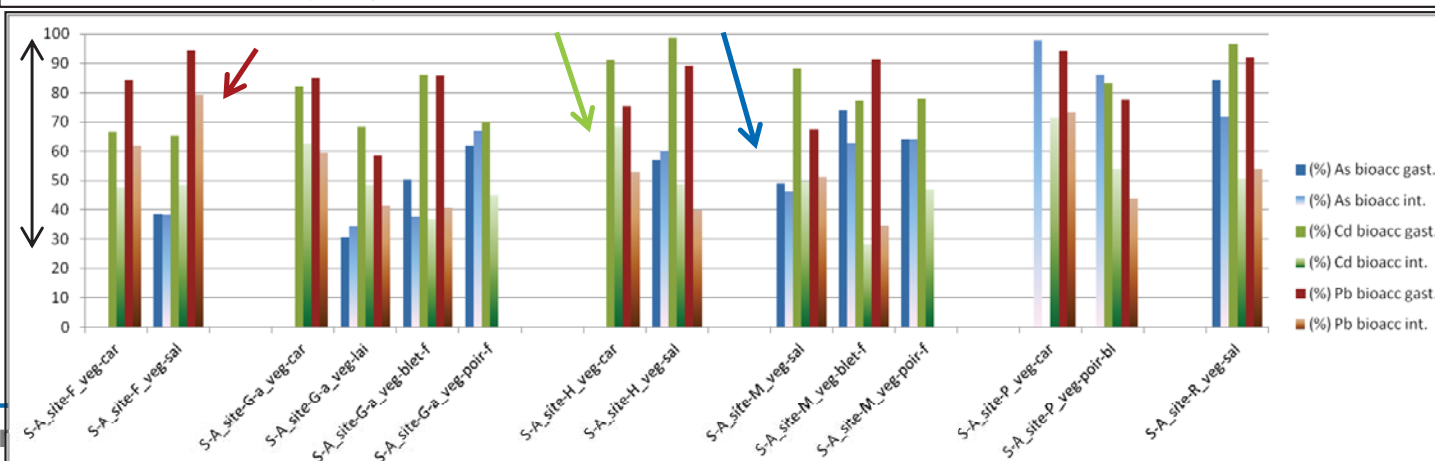
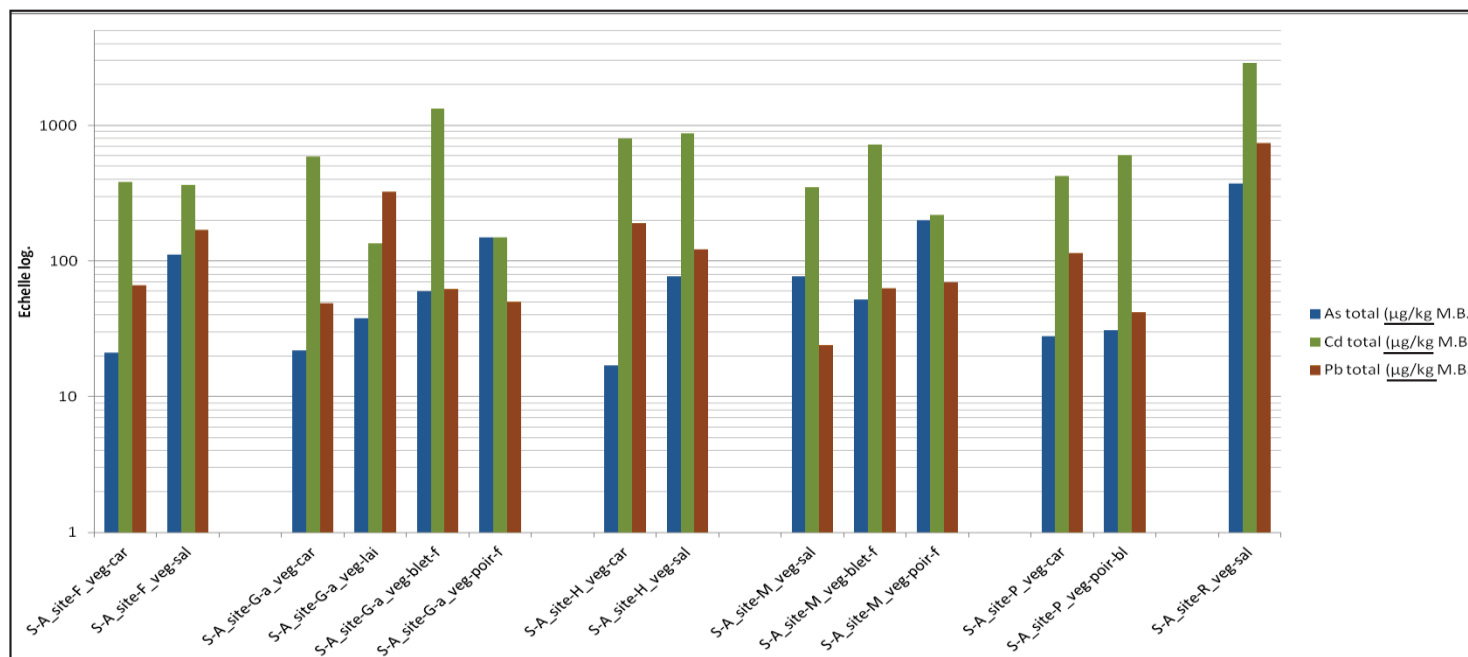


RÉSULTATS DES CARACTÉRISATIONS

CAS SITE A

Concentrations dans les végétaux potagers et bioaccessibilités

- pour le **Cd** et le **Pb**, bioacc. Gast. > bioacc. Int. (-> facteur 3), plus marqué pour le Pb
- a contrario* de l'**As**, avec des valeurs généralement plus faibles
- gamme de la bioacc. Gast. : Cd (65-98%), au Pb (58-95%) et à l'As (31-84%)



CALCULS DES EXPOSITIONS ET DES RISQUES

CAS SITE A

- ❑ Cas d'une parcelle avec prise en compte de la bioaccessibilité pour la voie ingestion de sol par un enfant lors des activités de jeux en extérieur

➤ Risques < critères d'acceptabilité

Concentrations retenues dans le milieu d'exposition (sol) et bioaccessibilité (maximale) pour le scénario du Site B

Site (échantillon)	arsenic	cadmium	plomb	zinc
Concentration maximale dans les sols (mg/kg MS) et bioaccessibilité (%)				
Site B - (pelouse)	181	9,53	304	1 120
Bioaccessibilité (%)	13,0 (G)	69,0 (G)	34,0 (G)	n.c.

Légende :

n.c. : non concerné par la mesure de bioaccessibilité (le zinc n'a pas fait l'objet de mesure de bioaccessibilité au regard principalement de sa moindre toxicité)
(G) : bioaccessibilité gastrique

Synthèse des calculs de risques pour les substances avec des effets à seuil (Quotient de Danger - QD) et des effets sans seuil (Excès de Risques Individuel - ERI) pour le scénario du Site B

Scénario du Site B	arsenic	cadmium	plomb	zinc
Quotient de Danger (QD)				
Ingestion de sol lors des activités de jeux en extérieur (100 jours par an)	1,0E-01	3,5E-02	6,2E-01	7,2E-03
Excès de Risques Individuel (ERI)				
Enfant résident (6 mois à 6 ans)	5,3E-06	n.c.	2,6E-07	n.c.
Démarche d'approfondissement : EQRS avec l'ensemble des substances et voies et critères de risques de 1 (QD) et 10 ⁻⁵ (ERI)				
Enfant résident	QD _{total} = 7,6E-01 et ERI _{total} = 5,6E-06			
Légende :				
n.c. : substance non concernée car absence de VTR pour les effets concernés				
	QD < 0,2 ; ERI < 10 ⁻⁵ – l'état des milieux est compatible avec les usages			
	0,2 < QD < 5 ; 10 ⁻⁶ < ERI < 10 ⁻⁴ – zone d'interprétation nécessitant une réflexion plus approfondie de la situation avant de s'engager dans un plan de gestion			
	QD > 5 ; ERI > 1.10 ⁻⁴ – l'état des milieux n'est pas compatible avec les usages			
	QD > 1 ; ERI > 1.10 ⁻⁵ (cf. dans le cadre de la démarche d'approfondissement)			

- ❑ En l'absence de prise en compte de la bioaccessibilité

- de l'arsenic
 - QD_{As} de 0,7
 - ERI_{As} de 4.10⁻⁵
- du plomb
 - QD_{Pb} de 0,9
- avec la démarche d'approfondissement
 - QD_{total} de 1,6 (approche conservatoire avec additivité)
 - ERI_{total} de 4.10⁻⁵

➤ Risques > critères d'acceptabilité

CALCULS DES EXPOSITION ET DES RISQUES

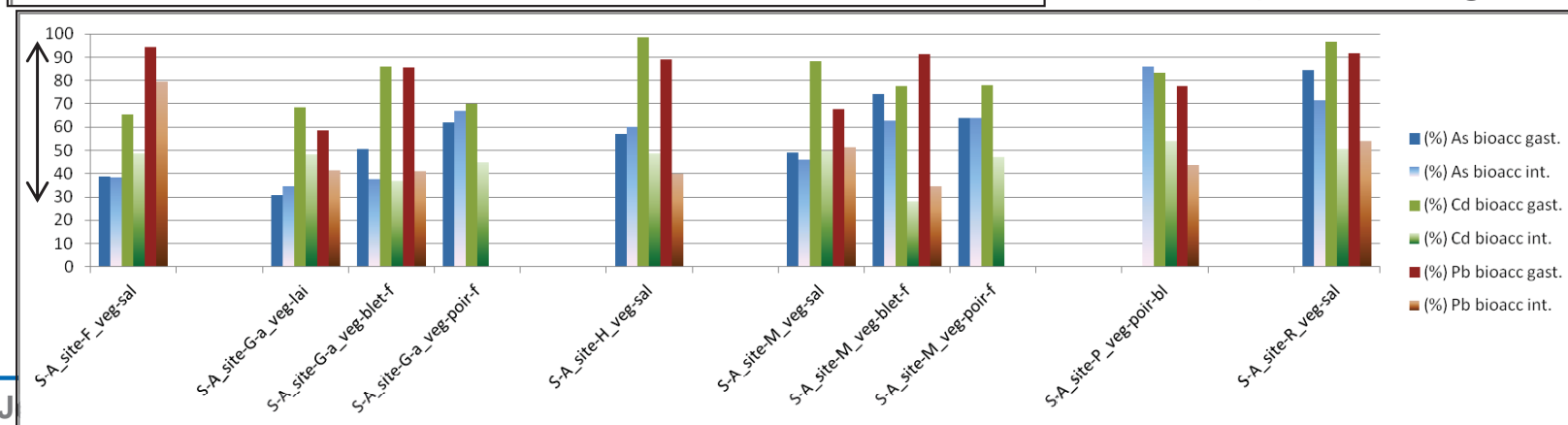
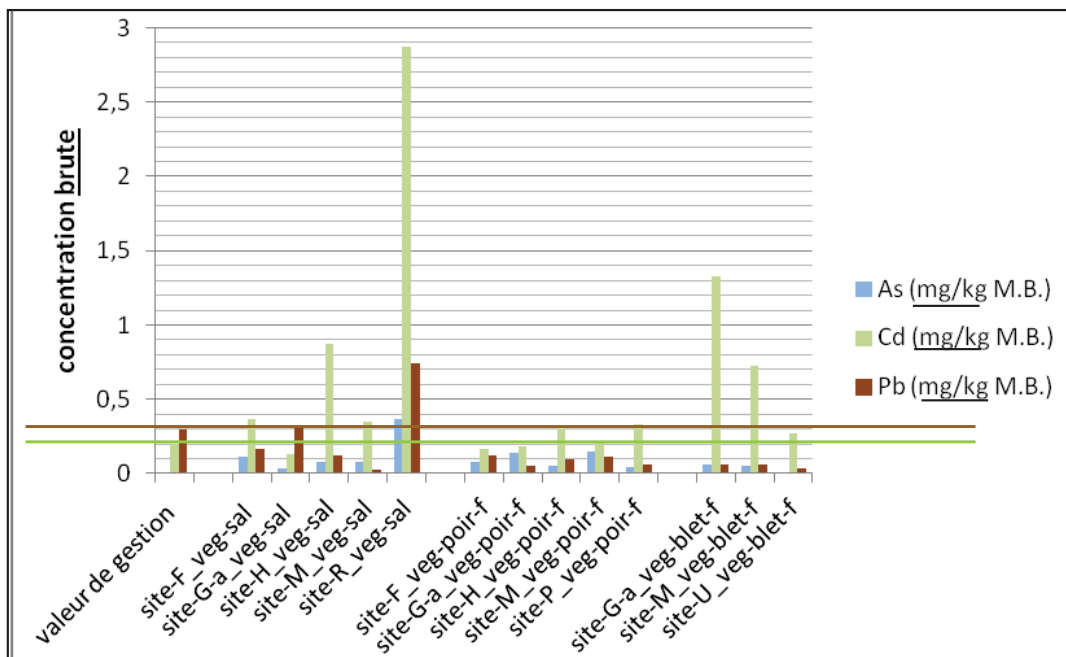
CAS SITE A

☐ Ingestion de végétaux autoproduits de type feuilles

- en rappel : présence de valeurs réglementaires de gestion pour le **Cd** (0,2 mg/kg M.B.) et le **Pb** (0,3 mg/kg M.B.) (*règlement européen CE 1881/2006 modifié : concentrations maximales fixées réglementairement dans les denrées alimentaires*)

➤ Prise en compte de la bioaccessibilité dans

- la phase de comparaison aux valeurs de gestion
- le calcul des expositions et des risques en l'absence de valeur de gestion pour l'As et également pour le cas du Cd et du Pb lors de l'étape d'ajustant de paramètres d'exposition dont les quantités ingérées



CAS DU SITE B - CONTEXTE GÉNÉRAL

CAS SITE B






- ❑ Cas du Site B
- ❑ Contexte historique
 - un ancien site minier
 - du minerai concentré en plomb
 - des unités de traitement de minerai, des bassins de décantation, des dépôts de résidus de laverie
- ❑ Enjeux
 - en termes de populations et d'usages des sols, parcelles avec des usages collectifs, des parcelles privées avec espace vert ou jardin potager

DIAGNOSTICS

CAS SITE B

❑ Diagnostic (actuellement milieux sol et eau)

Milieux d'exposition	Voies d'exposition	Populations concernées
<p>Sol de surface au droit des zones de pelouse</p> <p>Sol de jardin potager</p>	<p>Ingestion de terre lors des activités de jeux en extérieur</p> <p>Ingestion de terre lors des activités de jardinage</p>	<p>Enfant</p>   <p>Adulte</p> 

❑ Programmes analytiques

- paramètres chimiques : concentrations totales en antimoine (Sb), arsenic (As), cadmium (Cd) et plomb (Pb)
- sur la base de ces résultats, fractions bioaccessibles gastrique et intestinale pour As, Cd, Pb, Sb dans la matrice sol
- paramètres physiques

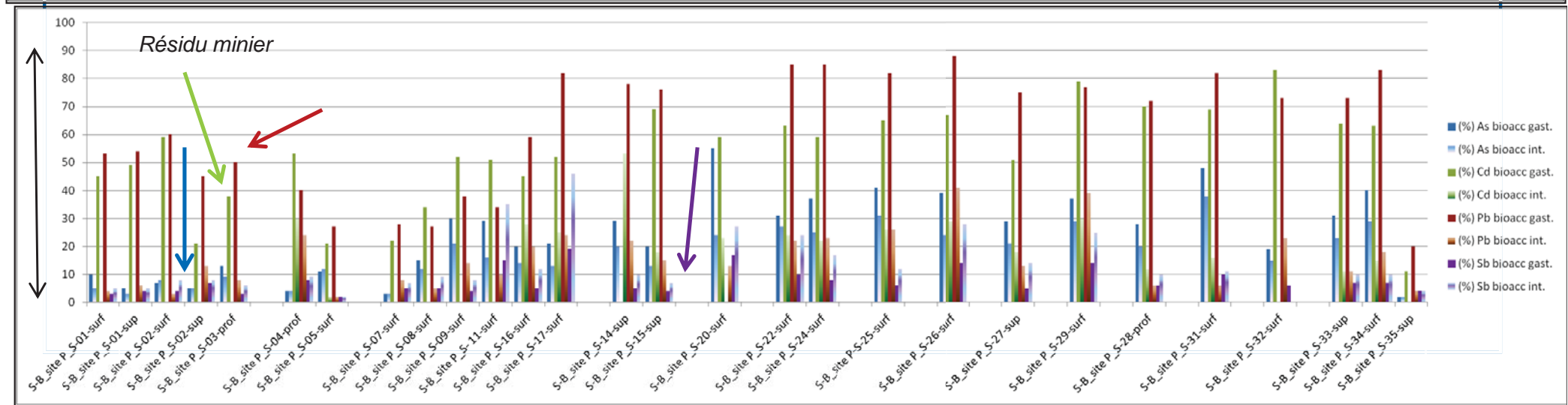
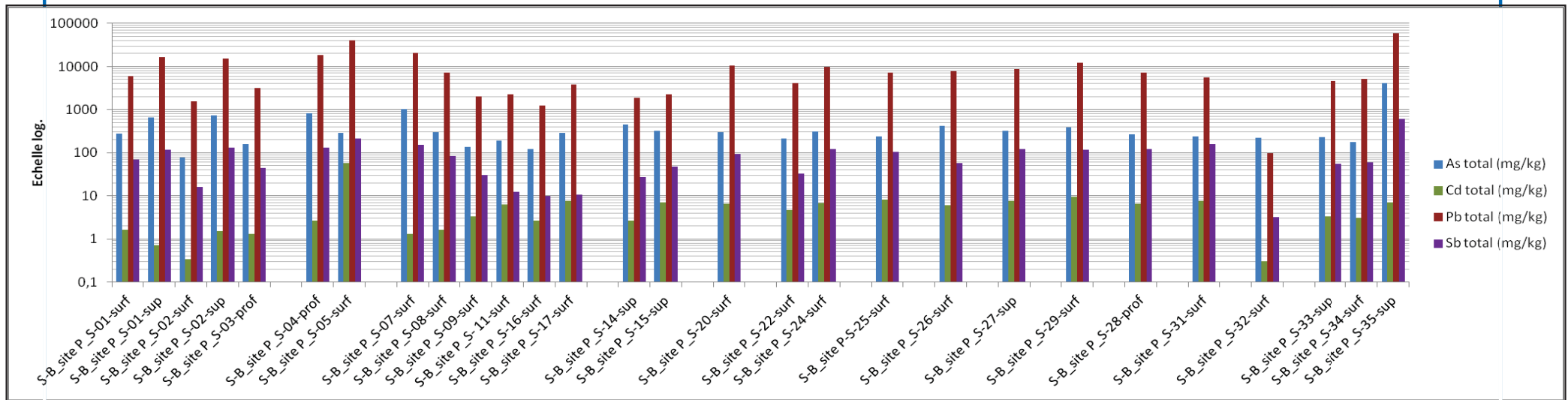
RÉSULTATS DES CARACTÉRISATIONS

CAS SITE B



Concentrations dans les sols (site P) et bioaccessibilités

- pour le **Cd** et le **Pb**, bioacc. Gast > bioacc. Int. (-> facteur 20), plus marqué pour le Pb
- a contrario* de l'**As** et de l'**Sb**, avec des valeurs généralement plus faibles
- gamme de la bioacc. Gast.: Cd (11-83%), Pb (20-88%), As (2-55%), Sb (2-19%)

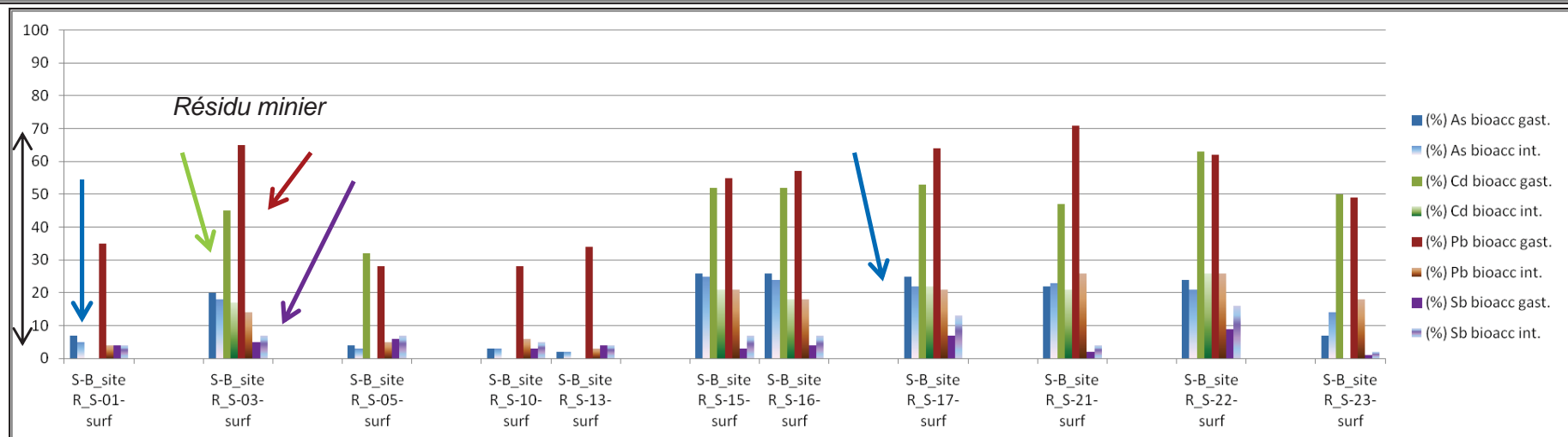
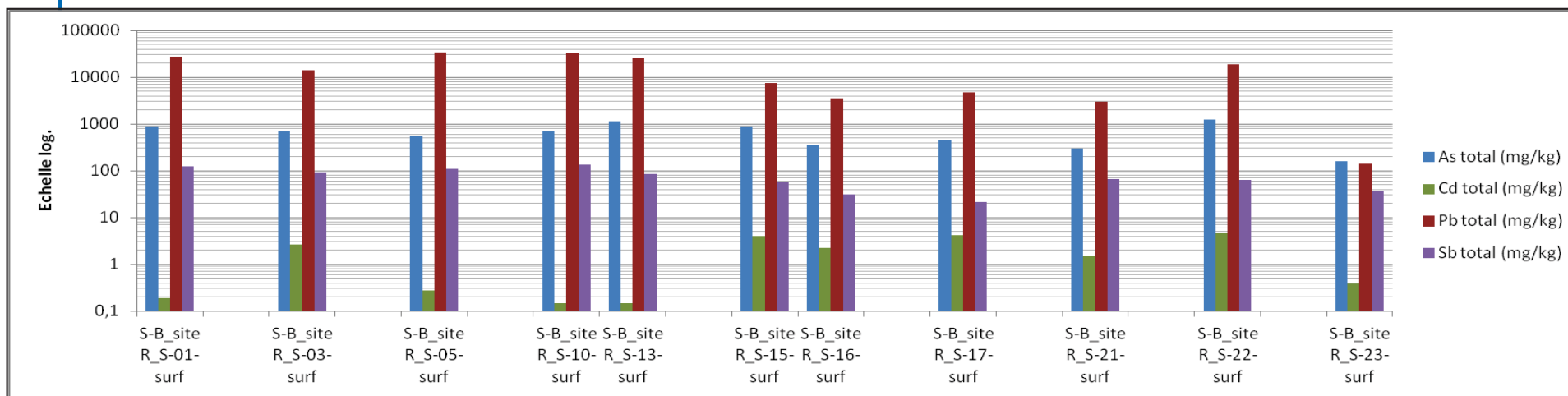




RÉSULTATS DES CARACTÉRISATIONS

Concentrations dans les sols de surface (site R) et bioaccessibilités

- pour le **Cd** et le **Pb**, bioacc. Gast > bioacc. Int. (-> facteur 20), plus marqué pour le Pb
- a contrario* de l'**As** et de l'**Sb** avec des valeurs généralement plus faibles
- gamme de la bioacc. Gast.: Cd (32-63%), Pb (28-71%), As (2-26%), Sb (2-19%)



CAS D'AUTRES SITES

CAS SITE C-D-E




- ❑ Cas des sites C, D et E
- ❑ Contextes historiques
 - site C : un ancien site minier avec une exploitation principalement d'arsenic, des anciennes installations de traitement, des dépôts de résidus de laverie
 - site D : un ancien site minier avec une exploitation principalement de plomb, des anciennes installations de traitement, des dépôts de résidus de laverie
 - site E : un ancien site minier avec une exploitation principalement de plomb, des anciennes installations de traitement, des dépôts de résidus de laverie
- ❑ Enjeux
 - en termes d'usages des sols et de populations, la présence de zones de promenades, de loisirs, de parcelles privées avec espace vert ou jardin potager
- ❑ En termes de résultats de bioaccessibilité sur les sols et les végétaux
 - notamment quelques échantillons de sols avec des valeurs de bioaccessibilité pour le plomb nettement inférieures dans le cas d'un des sites (site C), de l'ordre de la dizaine de %

CONCLUSIONS

- ❑ Lors des diagnostics pour les métaux et métalloïdes
 - analyses de concentrations totales en métaux et métalloïdes (As, Cd, Pb, Sb...)
 - au regard des résultats, choix des échantillons pour la mesure de bioaccessibles gastriques et intestinales
 - étude dans certains cas de la spéciation
 - mesures également d'autres caractéristiques des matrices
 - les paramètres physico-chimiques du sol (granulométrie, pH, matière organique,...) et autres éléments que ceux étudiés (carbonates, oxydes, etc.)
 - ❑ Mais certains verrous
 - analyses de bioaccessibilité non encore réalisées en routine par les laboratoires en France
 - analyses seulement pour quelques métaux
 - test UBM s'applique uniquement aux métaux et métalloïdes
 - ❑ En termes de résultats de bioaccessibilité de dossiers en cours
 - une large gamme de valeurs dans les sols pour une même substance
 - majoritairement la bioaccessibilité gastrique > bioaccessibilité intestinale
 - un facteur plus important pour le Pb, Cd, As, *a contrario* même gamme pour l'Sb
 - mais des exceptions
 - une gamme moins large de valeurs pour les végétaux pour une même substance
- réalisation de mesures de bioaccessibilité spécifiques au site étudié



CONCLUSIONS

- ❑ Lors du calcul des expositions et des risques, dans le cas de métaux et métalloïdes
 - l'intégration de la bioaccessibilité relative dans l'évaluation des expositions et des risques reflète de manière plus pertinente les concentrations d'exposition
 - la bioaccessibilité permet d'affiner le calcul d'exposition
 - la prise en compte de la bioaccessibilité maximale
 - l'ensemble des hypothèses et simplifications proposées : uniquement valable si la bioaccessibilité mesurée par le test UBM
-  ➤ seul protocole qui puisse, en toute rigueur, être utilisé pour une mesure adéquate de la bioaccessibilité en vue de son intégration dans un calcul d'exposition tel que présenté
- ❑ L'extrapolation présentée ici, à d'autres substances ou à d'autres tests de mesure de la bioaccessibilité doit être impérativement démontrée
 - en particulier, pour le bien fondé de cette extrapolation, apporter des justifications concernant les quatre points suivants
 - la validation du test utilisé pour caractériser la bioaccessibilité de la substance considérée
 - la nature de la matrice de référence utilisée pour élaborer la VTR de la substance considérée
 - l'égalité d'absorption de la substance considérée, entre la substance issue du sol et la matrice de référence utilisée pour élaborer la VTR
 - la bioaccessibilité de la substance considérée dans la matrice de référence



PERSPECTIVES



□ Dossiers INERIS

- liens entre les valeurs de bioaccessibilité et d'autres caractéristiques des sols, l'historique, etc., en cours d'étude

□ Des études, travaux de recherche complémentaires

- pour la voie ingestion et d'autres métaux et métalloïdes
 - des développements pour la mise en œuvre dans les calculs d'exposition et de risques sanitaires
 - notamment dans les études de bases des valeurs toxicologiques de référence
- pour la voie ingestion et les substances organiques
 - actuellement test FOREhST (Fed ORGganic Estimation human Simulation, UK), validé uniquement pour les HAP
 - faisabilité sur les sols pour les PCB et dioxines dans le cadre du projet TROPHé : Transferts et Risques des Organiques Persistants pour l'Homme et les écosystèmes (projet GESIPOL)
- pour la voie inhalation de particules
 - peu d'études de test de bioaccessibilité pulmonaire
 - des développements nécessaires
- des liens avec les autres caractéristiques des sols, historique, etc.

Point
d'actualité

Merci de votre attention

Vos questions

