



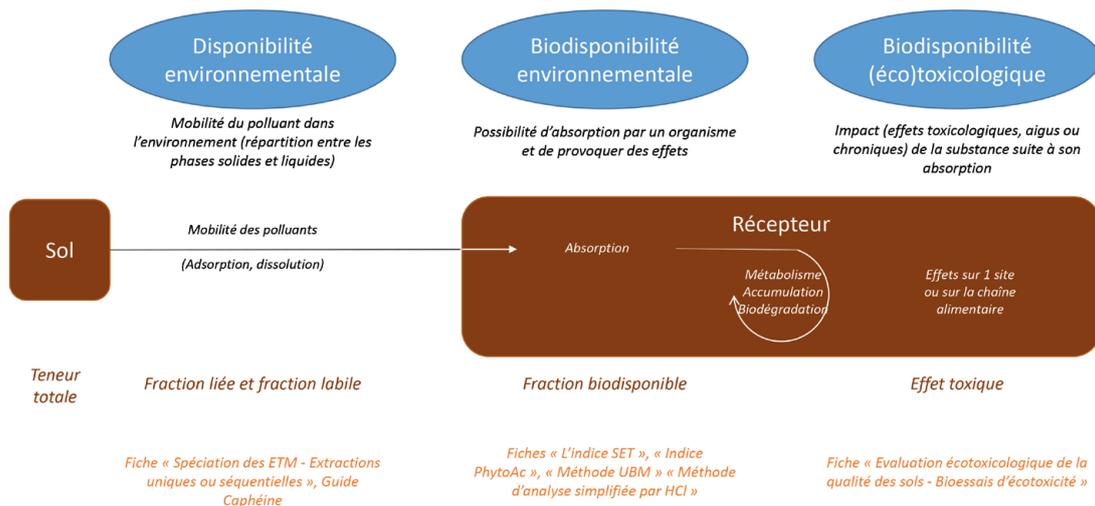
DISPONIBILITÉ ENVIRONNEMENTALE, BIODISPONIBILITÉ ENVIRONNEMENTALE ET BIODISPONIBILITÉ ECOTOXICOLOGIQUE

OUTILS D'ÉVALUATION DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

DESCRIPTION DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

Dans le domaine des sites et sols pollués, il est usuel d'identifier et de quantifier les polluants dans les différents milieux. C'est la **teneur totale** qui est classiquement mesurée : elle comprend la fraction liée au sol qui n'est pas assimilable par les organismes et la fraction labile qui leur est plus ou moins accessible. Elle ne permet pas d'estimer réellement les impacts d'une pollution car elle surévalue la plupart du temps le risque pour les écosystèmes en intégrant

la partie non accessible aux organismes [1]. Pour améliorer la pertinence de l'évaluation du risque, les mesures de teneurs totales peuvent être **complétées par des analyses de la fraction disponible** (ce qui est réellement disponible pour le vivant) ou de la fraction biodisponible (ce qui est assimilé par le vivant) qui renseignent sur le comportement du polluant dans le sol, permettant ainsi une **meilleure caractérisation des milieux et une meilleure évaluation des risques**.



Schématisation des notions de disponibilité environnementale, biodisponibilité environnementale et biodisponibilité écotoxicologique.

La **disponibilité environnementale** gouverne les processus physico-chimiques qui influent sur la **répartition de la substance entre la phase solide et la phase liquide du sol** et donc sur sa **mobilité**. Elle dépend des caractéristiques agrépédologiques du sol (typologie, granulométrie, pH, potentiel Redox, teneur en matière organique et en argile...) et du type de pollution (origine, substance et teneur). La caractériser consiste à mesurer la fraction dissoute à partir de la concentration dans l'eau interstitielle des sols directement mobilisable par les organismes. En première approche, il est possible de l'estimer avec des modèles faisant intervenir des coefficients de partition sol/eau.

La **biodisponibilité environnementale** représente la **fraction de la teneur d'une substance réellement assimilée par un organisme qui provoque des effets [1]**. Elle dépend de processus physiologiques régissant l'absorption et la bioaccumulation de la substance et donc du mode d'exposition et/ou d'alimentation des organismes. Elle varie selon les espèces exposées et les substances. L'information sur cette biodisponibilité dans le sol est

rarement recherchée. On peut quantifier la biodisponibilité environnementale à l'aide de bioindicateurs d'accumulation qui mesurent la quantité de polluant réellement assimilée par des organismes vivants exposés aux polluants, sur le terrain ou au laboratoire, et qui permettent une interprétation par rapport à des référentiels. Une analyse plus robuste consiste à utiliser de façon conjointe sur un site des approches chimiques et biologiques pour mesurer la fraction biodisponible dans le sol et son transfert aux organismes exposés.

La **biodisponibilité (éco)toxicologique décrit les effets toxicologiques**, aigus ou chroniques, à la suite de l'absorption par un organisme vivant de la matrice polluée (sol, eau, sédiment). Elle dépend du récepteur biologique, de la matrice et des substances présentes. La mesure de ces effets, par exemple un pourcentage d'inhibition de la croissance d'une plante, rend compte à la fois de la biodisponibilité des polluants et de la toxicité de ces derniers. Ces techniques sont capables de caractériser l'exposition pour les écosystèmes liés à un sol pollué. Elles sont mesurables à l'aide de bioindicateurs d'effet.

CONTEXTE D'UTILISATION

Les outils d'évaluation de l'exposition du vivant s'utilisent **en complément de l'analyse de la teneur totale des substances dans le sol** : ils précisent la mobilité et les transferts de la substance dans l'environnement. La sensibilité de ces techniques dépend du type de sol, des substances polluantes mais aussi des organismes exposés à la pollution.

A quelle étape ?

Les essais pour déterminer la (bio)disponibilité environnementale sont utilisables à toutes les étapes de gestion d'un site pollué mais sont particulièrement importants dans les études d'**évaluation de l'exposition des organismes vivants aux polluants du sol**.

La détermination de la (bio)disponibilité environnementale est une aide au **diagnostic**, dans les procédures d'évaluation des risques écologiques, pour statuer sur le **transfert des polluants du sol vers les matrices environnementales** (eaux et écosystèmes terrestres) et ainsi mieux évaluer

l'exposition puis le risque lié à la pollution. Il existe pour certains essais, un référentiel permettant de déterminer le caractère « anormal » du transfert des polluants vers les organismes vivants [3].

Lors des travaux, au moment **du plan de conception des travaux** (PCT) ou du suivi de dépollution, mais aussi lors de la surveillance environnementale, les données obtenues permettent de **conforter le choix de la technique de dépollution ou du mode de gestion du site** lorsque des solutions fondées sur la nature ont été choisies pour gérer la pollution résiduelle. Ces essais permettent alors d'estimer l'exposition du vivant ou d'orienter vers des mesures de gestion pour limiter l'exposition. Ils peuvent conduire à mieux orienter les modes de gestion et les usages futurs d'un site en reconversion mais ne remplacent pas les mesures qui doivent être réalisées dans les milieux exposés, notamment les eaux souterraines et superficielles.

POLLUANTS CONCERNÉS

L'analyse de la disponibilité et de la biodisponibilité environnementale est possible sur l'ensemble des polluants. Les techniques sont néanmoins différentes selon le type de polluant et il existe plus d'outils pour les polluants inorganiques

que pour les polluants organiques. La biodisponibilité est la plus étudiée pour les polluants inorganiques (As, Pb, Zn, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg)

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

Le matériel pour les essais d'extraction chimique nécessaire à l'estimation de la disponibilité environnementale correspond à du matériel de laboratoire classique avec éventuellement des solvants spécifiques (voir fiche « Extractions uniques ou séquentielles »).

Dans certains cas, la mesure de la bioaccumulation des polluants dans le vivant et la réalisation de bioessais de laboratoire nécessite du matériel spécifique lié à la mise en place d'un élevage de laboratoire et des chambres d'exposition aux conditions contrôlées (température, concentration, durée d'exposition).

MÉTHODOLOGIE

Les données concernant la (bio)disponibilité environnementale sont encore éparpillées, peu nombreuses dans la littérature et donc pas toujours adaptées au contexte étudié : la disponibilité environnementale du polluant dépend de la substance et du type de sol ; sa biodisponibilité environnementale dépend de sa concentration labile et de la capacité des espèces considérées à l'assimiler. Il est recommandé d'utiliser en priorité des **valeurs mesurées dans les milieux d'exposition (sols, eaux souterraines et superficielles) et dans les matrices biologiques (organismes vivants) prélevées directement sur le site d'étude**.

La méthodologie proposée pour l'évaluation de la (bio)disponibilité dépend des objectifs de l'étude :

- Les essais **d'extractions chimiques** sont à privilégier pour évaluer le comportement du polluant dans le sol et son éventuel transfert vers les eaux souterraines ou superficielles (disponibilité environnementale).
- Les essais de **bioaccumulation** dans le vivant et/ou **bioessais** sont à privilégier en complément de la mesure de l'évaluation de la disponibilité environnementale pour

évaluer le comportement du polluant et son transfert vers la chaîne trophique terrestre (biodisponibilité environnementale et (éco)toxicologique).

C'est l'objectif qui détermine l'essai ou la batterie d'essais à mettre en œuvre. La norme NF EN ISO 17402 [2] propose des essais par voie d'exposition spécifique ou par objectif mais ne fournit pas une sélection des meilleures méthodes applicables. Le choix de l'organisme est également guidé par différents critères : sensibilité aux polluants, présence sur le site et niveau dans les chaînes trophiques (producteur, consommateur primaire, consommateur secondaire).

Les quantités de sols à prélever peuvent varier de quelques centaines de grammes à plusieurs kilos (voire dizaines de kilo) dans le cas où l'on souhaite mettre en place une batterie d'essais étendue. En l'absence d'un référentiel adapté, la présence de sols identiques/similaires proches géographiquement en tant qu'**environnement local témoin non pollué** est nécessaire pour pouvoir réaliser des comparaisons. L'échantillon doit être prélevé dans les mêmes conditions (météo, saison). Pour les essais sur le vivant, ce sont les mêmes organismes qui doivent être échantillonnés.



FRACTION DE LA POLLUTION	CATÉGORIE D'OUTIL	OBJECTIF	EXEMPLE D'OUTIL : MÉTHODE / NORME / RÉFÉRENTIEL D'INTERPRÉTATION / MATURITÉ [* À ***]
Mesure de la disponibilité environnementale	Extraction partielle par solvants (pour polluants organométalliques et ETM*) * Certains ETM tels que l'As et le Hg nécessitent de prendre des précautions particulières	Extraire les fractions disponibles des polluants inorganiques	Extraction des éléments traces biodisponibles (DTPA 0.005M) / NF ISO 14870 / Pas de valeurs seuils de référence / Maturité = ***
			Extraction des éléments traces (Acétate d'ammonium 1M + EDTA 0.01M) et dosage spectrométrique / NF X31-120 / RMQS / Maturité = ***
			Extraction des éléments traces disponibles (HNO ₃ 0.43M) / NF ISO 17586 / Pas de valeurs seuils de référence / Maturité = ***
			Extraction des éléments traces (CaCl ₂ 0.01M) / NEN 5704 / Pas de valeurs seuils de référence / Maturité = ***
			Extraction des éléments traces (NaNO ₃) / - / Pas de valeurs seuils de référence / Maturité = ***
			Extraction des éléments traces facilement solubles (NH ₄ NO ₃ 1M) / NF ISO 19730 / Valeurs fréquemment mesurées dans les sols dans l'annexe de la norme / Maturité = ***
	Extraction partielle par agent adsorbant (pour polluants organiques)	Extraire les fractions biodisponibles des polluants organiques	Techniques d'extraction non exhaustives (Tenax) / XP ISO / TS 16751 / Maturité = **
			Techniques d'extraction non exhaustives (Cyclodextrine) / XP ISO / TS 16751 / Maturité = **
	Lixiviation (pour polluants inorganiques)	Extraire les fractions solubles	Lixiviation rapport liquide/solide 2L/kg / NF EN ISO 21268-1 / Pas de valeurs seuils de référence / Maturité = ***
Lixiviation rapport liquide/solide 10L/kg / NF EN ISO 21268-2 / Pas de valeurs seuils de référence / Maturité = ***			
Lixiviation par percolation / NF EN ISO 21268-3 / Pas de valeurs seuils de référence / Maturité = ***			
Mesure de la biodisponibilité environnementale	Echantillonneurs passifs	Extraire les fractions biodisponibles	DMT (Donnan Membrane Technique) / - / Pas de valeurs seuils de référence / Maturité = *
			DGT (Diffusive Gradient in Thin film, Gradient de Diffusion en couches minces) pour les métaux extractibles à l'eau / - / Pas de valeurs seuils de référence / Maturité = *
			SPMD (Semi Permeable Membrane Device) / - / Pas de valeurs seuils de référence / Maturité = *
			Bougies poreuses / - / Pas de référentiel d'interprétation / Maturité = *
	Bioindicateurs d'accumulation (pour polluants organiques et inorganiques)	Mesurer la bioaccumulation directement dans l'organisme exposé (plante ou invertébré), ponctuelle ou après plusieurs durées d'exposition pour quantifier les flux de transfert.	Indice SET escargots (Somme des excès de transfert) / ISO/DIS 24032 / Valeur de référence calculée par le laboratoire ayant mis en place la méthodologie / Maturité = ***
			Bioaccumulation vers de terre / Essai n°317 OCDE Ligne directrice de l'OCDE 207 / Valeur de référence calculée par le laboratoire ayant mis en place la méthodologie / Maturité = ***
			Indice PhytoAc / - / Valeur de référence calculée par le laboratoire ayant mis en place la méthodologie / Maturité = **
RHIZOtest / NF EN ISO 16198 / Pas de valeurs seuils de référence / Maturité = ***			
Mesure de la biodisponibilité (éco) toxicologique	Bioessais d'écotoxicité	Mesurer les effets toxiques sur les organismes vivants par exposition directe	Voir fiche « Evaluation écotoxicologique de la qualité des sols » / Maturité = ***

Catégories d'outils et exemples d'outils pour caractériser la fraction (bio)disponible ou (éco)toxicologique d'une pollution dans le sol.

INTERPRÉTATION

Les mesures réalisées mettent en évidence l'exposition et/ou l'impact des polluants sur la ressource en eau et/ou sur les organismes terrestres ou aquatiques.

L'idéal est de comparer les résultats obtenus sur sols pollués (concentration dans l'eau interstitielle, teneurs en polluants bioaccumulés dans le vivant...) aux valeurs obtenues sur sol non pollué pour un même organisme vivant ou aux teneurs habituelles rencontrées dans les sols non pollués ou dans le vivant sur des sols non pollués. Néanmoins, l'interprétation, réalisée en fonction du contexte et de l'objectif, est encore peu aisée car il existe peu de référentiels d'interprétation des données. Certains référentiels d'interprétation pour les essais de biodisponibilité environnementale sont disponibles grâce au programme Bioindicateurs de l'ADEME [3].

Points de vigilance :

- La disponibilité et la biodisponibilité environnementale ne sont pas fixes dans le temps, elles répondent aux variations environnementales (météo, saison) et à des processus physico-chimiques (RECORD, 2021). La récolte de végétaux sur le terrain doit être adaptée en conséquence et l'interprétation des résultats ne sera possible que si les échantillonnages ont eu lieu au cours d'une période similaire considérant le cycle de vie des animaux et/ou végétaux examinés.
- Il est nécessaire d'utiliser plusieurs outils pour améliorer la justesse de la mesure de la (bio)disponibilité environnementale. En l'absence de référentiel, le choix de la batterie des essais nécessite une certaine expertise.

AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

AVANTAGES

Échantillonnage

- Identique à un prélèvement de sol classique,
- Simple à mettre en œuvre,

Polluants

- Utilisable quels que soient les polluants pour la biodisponibilité environnementale,

Laboratoires, matériel d'analyse

- Essais réalisés en routine par les laboratoires,
- Pas de matériel d'analyse coûteux,

Résultats d'interprétation

- Approche intégratrice : prend en compte l'interaction des substances entre elles, les autres paramètres physico-chimiques du milieu et les organismes,
- Pour les extractions chimiques, une valeur par polluant.

INCONVÉNIENTS

Polluants

- Peu de techniques disponibles pour la mesure de la biodisponibilité des polluants organiques,

Influence sur les résultats et incertitudes

- Certains paramètres du sol (structure, composition) influent sur la biodisponibilité,
- Nécessite de prendre en compte l'évolution temporelle (météo, saison, cycle de vie de l'organisme) de la biodisponibilité,

Résultats d'interprétation

- Peu de référentiels d'interprétation,
- Chaque technique a son domaine d'application et présente des limites dans son utilisation,
- La complémentarité des outils et le choix de la batterie des essais nécessitent une bonne connaissance des outils.

MATURITÉ DE LA TECHNIQUE



R&D aboutie, référentiels d'interprétation en cours de développement, outils peu utilisés sur le terrain et manque de retour d'expérience avec une méthodologie d'utilisation des batteries d'essais

DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

La phase d'échantillonnage sur site est similaire à un échantillonnage classique des sols sur un site pollué et peut être réalisée à la même occasion. La durée de mise en œuvre de la technique dépend des polluants et de la

combinaison d'essais sélectionnés : quelques jours pour une extraction à plusieurs mois pour certains essais avec élevage d'organismes.

PHASE

INVESTIGATIONS

ANALYSE (EXPOSITION, EXTRACTION, MESURE) ET TRAITEMENT DES RÉSULTATS

Délai associé



⌚ : jour / ⌚⌚ : semaine / ⌚⌚⌚ : mois

ÉLÉMENTS DE COÛTS

Les coûts d'analyse peuvent être élevés pour certains des essais qui sont mis en œuvre par des laboratoires spécialisés. Ils sont variables selon l'objectif de la mesure et de l'utilisation ultérieure des données. Pour les tests de lixiviation et ou

d'extraction, ils sont réalisés par les laboratoires commerciaux pour des coûts peu élevés (centaine d'euros pour l'extraction de quelques métaux pour un échantillon).

PHASE

INVESTIGATIONS

ANALYSE (EXPOSITION, EXTRACTION, MESURE) ET TRAITEMENT DES RÉSULTATS

Coût associé



€ < 100 € / €€ < 1 000 € / €€€ > 1 000 €

POUR EN SAVOIR PLUS – RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] *Etude TIPOMO - Identification de friches polluées éligibles à une reconversion écologique - rapport final*. INERIS. Mines Saint-Etienne. Août 2022
- [2] Norme NF EN ISO 17402 - Lignes directrices pour la sélection et l'application des méthodes d'évaluation de la biodisponibilité des contaminants dans le sol et les matériaux du sol - Août 2021
- [3] *Bioindicateurs : des outils biologiques pour des sols durables : fiches outils - 2017*
- [4] *Guides du projet de recherche CaPhéInE CARactérisation des PHÉnomènes de transfert en zone INsaturée des Eléments traces - 2012 - Ademe, BRGM, l'INERIS, EDF et CEA dont Guide « Caractérisation de la mobilité des éléments traces minéraux dans la zone non saturée du sol : diagnostic du site »*
- [5] *Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués (nouveaux résultats de recherche et démonstration)*. 2017 - ADEME, INERIS, ISA-Lille. Mines Saint-Etienne - 2017