



LA BIODISPONIBILITÉ ENVIRONNEMENTALE

L'INDICE PHYTOAC, INDICATEUR DE LA BIOACCUMULATION DES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES DANS LES VÉGÉTAUX

DESCRIPTION DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

Les végétaux supérieurs étant immobiles car fixés à leur substrat, leur nutrition minérale dépend directement des propriétés du sol sur lequel ils se développent. En tant que producteurs primaires, ils constituent un maillon essentiel des chaînes alimentaires et représentent une voie potentielle de transfert des polluants vers les consommateurs primaires et secondaires. La caractérisation des teneurs en polluants de la végétation d'un site représente donc un outil pertinent pour une bonne évaluation de la biodisponibilité environnementale et des risques de transfert des polluants vers les maillons trophiques supérieurs.

L'indice PhytoAc renseigne sur **la teneur totale en polluants dans la végétation d'un site pollué en excès par rapport aux teneurs habituelles rencontrées dans la végétation d'un sol non pollué**. Cet indice est basé sur **l'analyse de feuilles** (échantillon foliaire) prélevées sur un ensemble d'espèces caractéristiques de la communauté végétale du site. Il donne une image représentative des transferts à l'échelle de la végétation du site prise dans son ensemble.

CONTEXTE D'UTILISATION

La détermination de l'indice PhytoAc peut être envisagée sur **tous les sites présentant une végétation** en place, pour lesquels les études de sol ont **mis en évidence une pollution aux éléments traces métalliques**, quel que soit le ou les éléments traces métalliques et leurs teneurs, et où la question de la biodisponibilité des polluants présente un intérêt pour la gestion du site. Même s'il n'est pas nécessaire que la couverture végétale du site soit complète, il est préférable que la végétation présente soit répartie de façon homogène. De même, les campagnes d'échantillonnage doivent être, si possible, réalisées à l'optimum de végétation c'est-à-dire entre mi-mai et mi-juillet en climat tempéré.

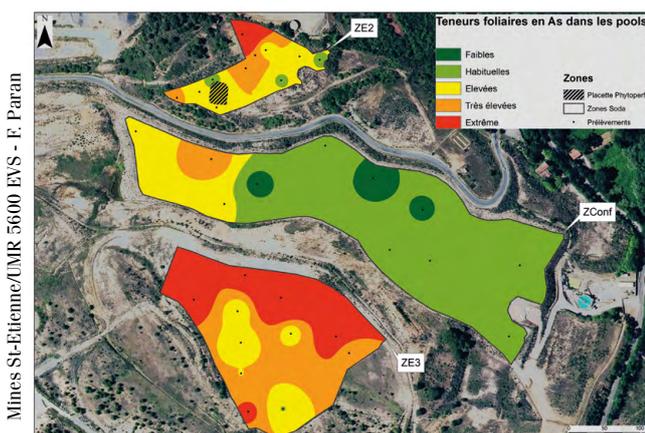
Cet indice peut être considéré **en complément des analyses classiques (teneurs totales)** dans les sols et des mesures de disponibilité environnementale réalisées lors du diagnostic initial du site. Les mesures d'analyses chimiques classiques permettent de mieux guider l'échantillonnage mais ne sont toutefois pas indispensables à la détermination de l'indice PhytoAc.

L'information fournie est une valeur moyenne renseignant sur la **bioaccumulation des polluants** dans la communauté végétale présente sur la zone explorée. L'indice PhytoAc obtenu indique la **phytodisponibilité environnementale c'est-à-dire la biodisponibilité des polluants pour les végétaux** et quantifie un éventuel **excès de transfert des éléments analysés vers la végétation du site par rapport à des teneurs de référence** considérées comme habituelles sur des sites non pollués.

À quelle étape ?

Cet outil est particulièrement pertinent lors du **diagnostic approfondi** et permet de mieux cerner les zones où les transferts et la bioaccumulation sont les plus importants. Les résultats obtenus avec l'indice PhytoAc permettent d'alimenter le **schéma conceptuel** sur la question des transferts vers l'environnement.

L'indice PhytoAc peut également être utilisé lors du **suivi de sites réhabilités**, afin de s'assurer de la gestion durable du couvert végétal, en termes de limitation des transferts. Il peut conduire à mieux orienter les modes de gestion et les usages futurs d'un site en reconversion mais ne remplace pas les mesures qui doivent être réalisées dans les milieux exposés, notamment les eaux souterraines et superficielles.



Exemple de cartographie de la phytodisponibilité de l'arsenic sur un site d'étude.

LA BIODISPONIBILITÉ ENVIRONNEMENTALE

POLLUANTS CONCERNÉS

La détermination de l'indice PhytoAc peut être envisagée pour **tous les éléments traces métalliques, à condition de disposer de données de référence** (valeurs habituelles sur des sols non pollués). A l'heure actuelle, des valeurs de référence sont disponibles pour **l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le**

plomb (Pb) et le zinc (Zn).

L'indice n'est pas adapté aux polluants organiques tels que les hydrocarbures pour lesquels l'accumulation, le métabolisme et les produits de dégradation sont mal connus chez les végétaux.

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

La partie terrain nécessite un matériel très simple : des ciseaux pour le prélèvement, des sachets pour le conditionnement et une glacière pour le transport. De même, le matériel de laboratoire reste classique et consiste en un broyeur, une étuve et un minéralisateur. Pour l'analyse, des techniques d'ICP (Inductively Coupled Plasma) masse (ICP-

MS) ou optique (ICP-AES) sont généralement choisies mais la technique d'absorption atomique peut également être utilisée. La sélection de la méthode analytique dépend des limites de quantification pour les différents éléments qui doivent être inférieures aux données de références.

MÉTHODOLOGIE

Prélèvement

La stratégie et le plan d'échantillonnage dépendent de la typologie du site d'étude (surface, occupation du sol, répartition des polluants) et de l'importance de la végétation en place. Le site d'étude est découpé en zones d'environ 10 à 100 m², en fonction de la taille du site et du couvert végétal.

Pour chaque zone d'intérêt retenue pour l'étude, cinq **échantillons foliaires** sont prélevés à chacun des 4 angles et au centre. Chaque échantillon est constitué de feuilles prélevées sur les trois à cinq espèces les plus abondantes au point de prélèvement (environ 1 g de feuille pour chaque espèce prélevée). L'identification des espèces n'est pas nécessaire, il suffit de s'assurer que les espèces prélevées sont différentes, mais elle est fortement recommandée.

Préparation et analyse

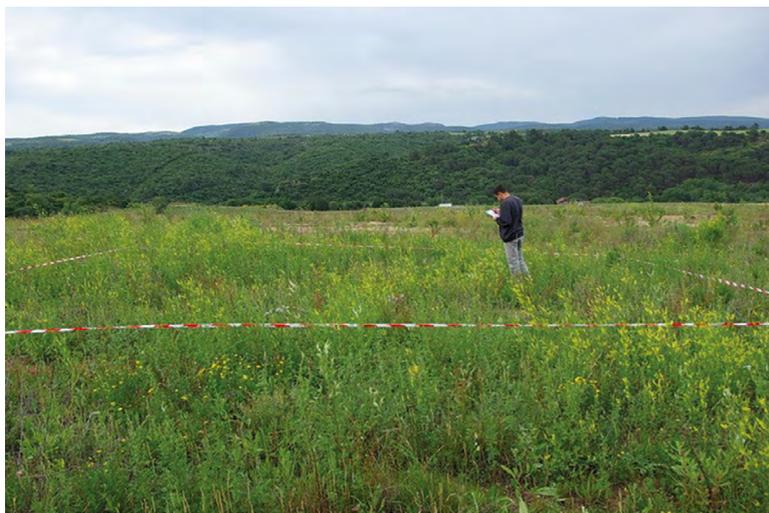
Les feuilles sont lavées individuellement à l'eau courante, séchées jusqu'à déshydratation complète (à l'air libre ou à l'étuve à 40°C), puis broyées (< 2 mm). Pour chaque point de prélèvement, un échantillon composite (pool) est préparé en mélangeant 50 mg (matière sèche) de chacune des

espèces récoltées (typiquement 3 à 5 espèces par échantillon composite) et est minéralisé par attaque acide avant mesure des teneurs en polluants par ICP-MS ou autre méthode de quantification adaptée au regard des enjeux analytiques.

Calcul des indices

Le calcul de l'indice PhytoAc est basé sur **la comparaison des distributions des teneurs foliaires en polluant dans les échantillons du site étudié, avec celles mesurées dans des échantillons de référence.**

Les valeurs de référence obtenues pour chaque élément dans le programme Bioindicateurs [1] renseignent deux variables : les teneurs foliaires médianes mesurées sur sols non pollués (Med_{Ref}) et la valeur d'analyse de la situation (vibrisse supérieure interne de la distribution de référence $VAS_{Ref} = Q_{75} + 1.5 \times (Q_{75} - Q_{25})$). Des valeurs de référence spécifiques au contexte local ou à d'autres éléments traces métalliques peuvent être constituées, selon les besoins de l'étude à l'aide d'un site de référence non pollué, à proximité du site d'étude et présentant des caractéristiques agropédologiques similaires à celles du site d'étude.



Prélèvements d'échantillons composites sur site.

ÉLÉMENT \ VALEURS DE RÉFÉRENCE	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Med* _{Ref}	0,45	0,16	0,59	9,1	1,65	0,23	46,9
VAS** _{Ref}	1,72	0,67	1,32	17,4	6,12	0,67	105,3

* Médiane de la distribution de référence

** Valeur d'analyse de la situation : vibrisse supérieure interne de la distribution de référence

Valeurs de référence (mg/kg MS) proposées pour le calcul de l'indice PhytoAc

Pour chaque élément considéré, l'excès de concentration foliaire ($EC_{élément}$) est calculé sur chaque zone d'intérêt.

$$EC_{élément} = \frac{Med_{Obs}}{Med_{Ref}} \times Freq_{Out}$$

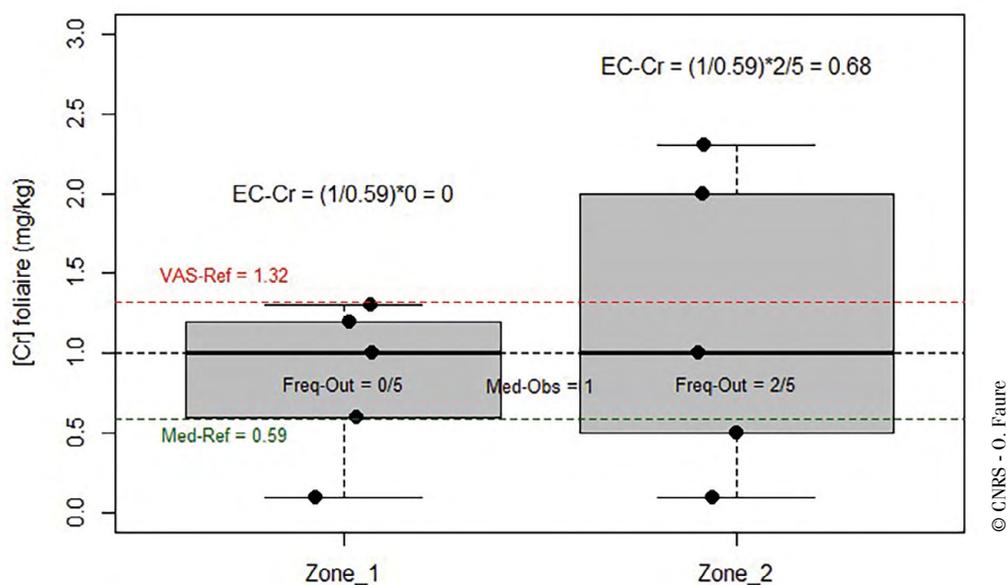
avec : Med_{Obs} = médiane de la distribution observée et Med_{Ref} = médiane de la distribution de référence,

$Freq_{Out} = \frac{\text{Nombre de mesures supérieures à } VAS_{Ref}}{\text{Nombre total de mesures}}$ la fréquence des valeurs inhabituelles (outliers) dans la distribution observée.

L'indice **PhytoAc** est ensuite calculé sur chaque zone en sommant les excès de concentration foliaire de chaque élément.

$$PhytoAc = \sum_{éléments} EC_{élément}$$

L'interprétation est enfin réalisée en comparant les indices PhytoAc calculés sur les différentes zones du site.



Représentation statistique des distributions de concentrations foliaires du chrome pour 2 zones d'un site d'étude et excès de concentration foliaire associé.

Points de vigilance

- La technique nécessite un taux de recouvrement de la végétation suffisant, sur tous les secteurs à caractériser.
- Le prélèvement sur plantes herbacées est à privilégier.
- Une évaluation de la diversité végétale du site et des zones de prélèvements est recommandée.
- Le calcul de l'indice est d'autant plus robuste que le nombre d'espèces végétales prélevées est important (prise en considération de la variabilité du comportement des espèces végétales vis-à-vis de la pollution).

AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

AVANTAGES

Échantillonnage

- Prélèvement et échantillonnage rapides,
- Peu de connaissances en botanique nécessaires,
- Peu d'effets environnementaux par rapport aux méthodes de prélèvements conventionnelles,
- Technique non destructive et non intrusive,

Polluants

- Technique applicable avec un cocktail d'éléments traces métalliques,

Laboratoires, matériel d'analyse

- Matériel de laboratoire fréquemment retrouvé chez les prestataires d'analyses,

Résultat

- Mesure directe de la phytodisponibilité des polluants,
- Approche intégratrice : prend en compte l'interaction des substances entre elles, les autres paramètres physico-chimiques du milieu et les organismes (phytodisponibilité),
- Résultat par rapport à une référence simple à communiquer.

INCONVÉNIENTS

Investigations

- Réalisable au printemps ou début d'été afin de bénéficier d'un maximum d'espèces végétales différentes,

Polluants

- Calcul de l'indice pour un nombre limité de polluants,

Laboratoires, matériel d'analyse

- Pré-traitement des échantillons (lavage et séchage) à réaliser rapidement après prélèvement,

Résultats d'interprétation

- Valeurs de références pour un nombre limité de polluants.

MATURITÉ DE LA TECHNIQUE



La technique est aboutie mais encore très peu utilisée sur le terrain.

DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

La phase d'échantillonnage sur site est très rapide et peut être réalisée en une journée pour un site de plusieurs hectares. Le pré-traitement des échantillons (lavage et le séchage) doit être mené rapidement après le prélèvement (conservation au frais quelques jours uniquement). Cette étape avant analyse peut prendre du temps si le nombre d'échantillons est élevé (2 jours pour une cinquantaine d'échantillons). Le temps

d'analyse est de l'ordre de la journée pour plusieurs dizaines d'échantillons mais les délais des laboratoires réalisant les analyses peuvent ajouter une contrainte temporelle vis-à-vis de la réception des résultats. Enfin, le traitement des résultats dépend de la taille du site et du nombre de prélèvements mais est de l'ordre de la journée.

PHASE

INVESTIGATIONS

ANALYSE

TRAITEMENT

Délai associé



⌚ : jour / ⌚⌚ : semaine / ⌚⌚⌚ : mois

ÉLÉMENTS DE COÛTS

De même que pour les délais, les coûts de l'échantillonnage sont très faibles ; ils correspondent au coût d'un opérateur sur site (attention au travailleur isolé). Le coût d'une analyse en laboratoire est d'une centaine d'euros par échantillon pour la

préparation, l'envoi, l'analyse, la vérification de la qualité et le rapport analytique. À ces coûts s'ajoutent le prix de traitement des résultats obtenus par un ingénieur (environ 1000 € pour un site non complexe).

PHASE

INVESTIGATIONS

ANALYSE

TRAITEMENT

Coût associé



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

POUR EN SAVOIR PLUS – RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Fiches outils ADEME - Bioindicateurs : des outils biologiques pour des sols durables – Septembre 2012

[2] Etude ADEME - Evaluation des transferts et des effets liés la contamination des sols dans le cadre d'un projet de réaménagement urbain à l'aide d'outils de type bioindicateurs – Septembre 2015

[3] Rapport ADEME - Identification de friches polluées éligibles à une reconversion écologique TIPOMO – Juin 2022