



MAI
2017

LES BIO-INDICATEURS DE L'ÉTAT DES SOLS

PRINCIPE ET EXEMPLES D'UTILISATION

NOUVEAUX RÉSULTATS
DE RECHERCHE
ET DÉMONSTRATION



ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

Remerciements

Cet ouvrage a bénéficié de la relecture et des conseils de :
Marina Le Guédard (LEB AQUITAINE TRANSFERT-ADERA),
Cécile Villenave (ELISOL),
Olivier Faure (ENSMSE),
Gérald Fayolle (EODD Ingénieurs Conseils),
Jean-François Nau (EODD Ingénieurs Conseils),
Benjamin Pauget (Tesora),
Guénola Péres (Agrocampus Ouest),
Annette Devaufleury (Université de Franche-Comté),
Jean-Jacques Bessoule (LBM UMR5200 CNRS/Univ. Bordeaux),
Cécile Grand (ADEME).

Comment citer le document de référence dans vos bibliographies ?

ADEME, ADERA-LEB Aquitaine Transfert, ELISOL, Mines Saint-Etienne, EODD Ingénieurs Conseils. 2017. APPOLINE : Applicabilité à l'étude des sites pollués du biomarqueur lipidique des végétaux et du bio-indicateur nématofaune, 187 pages

Auteur(s) : Marina Le Guédard (ADERA -LEB Aquitaine Transfert), Cécile Villenave (ELISOL), Olivier Faure (Mines Saint-Etienne), Jean-François Nau (EODD Ingénieurs Conseils), Benjamin Pauget (Tesora), Guénola Péres (Agrocampus Ouest)

Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

20 avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéros de contrat :

1372C0058, 1372C0077, 1372C0078, 1372C0079

Coordination technique :

Cécile GRAND, ADEME, Direction villes et territoire durables, service friches urbaines et sites pollués

Suivi d'édition : Sylvie GUYADER-COGNEAU, ADEME,

Direction communication et formation,
service communication et formation des professionnels

Création graphique : A4 éditions, Angers

Crédit photos : ADEME, EODD, Elisol, LEB Aquitaine transfert,
Olivier Faure, Benjamin Pauget, Gwenola Péres.

Brochure réf. 010216

Téléchargeable sur www.ademe.fr/mediathèque

ISBN : 979-10-297-08-244 - Mai 2017

Dépôt légal : ©ADEME Éditions, mai 2017

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (Art L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.



Résumé

Depuis plusieurs années, le risque environnemental des sols contaminés a été principalement abordé par des méthodes physico-chimiques. Bien que ces analyses soient nécessaires à la caractérisation des dangers, ces outils ne permettent pas d'identifier la totalité des molécules et/ou éléments toxiques en contextes multi-pollués.

Par ailleurs, les analyses chimiques ne renseignent en rien sur la biodisponibilité des contaminants, leurs transferts potentiels et leurs niveaux de toxicité vis-à-vis des organismes vivants, lorsqu'ils sont seuls ou en « cocktails » (effets de synergie ou d'antagonisme des contaminants). Inversement, **en intégrant les effets liés à l'ensemble des contaminants, les bio-indicateurs** sont des outils sensibles qui renseignent sur les risques liés à leurs transferts et à l'impact global sur l'écosystème ainsi que sur l'état écologique des sols. Complémentaires des analyses physico-chimiques, ils constituent des outils particulièrement intéressants pour évaluer ces impacts jusqu'alors ignorés (ou non considérés).

Face au constat d'un manque de bio-indicateurs pour décrire la qualité du sol, le programme national « Bio-indicateurs de Qualité des sol » a été mis en place par l'ADEME pour développer ces outils mais aussi pour mettre en avant l'intérêt d'intégrer ces bio-indicateurs dans **les diagnostics de pollution** en complément des analyses physico-chimiques. Au cours de ce programme, les Indices Nématodes, l'Indice Oméga-3 (biomarqueur lipidique) et l'indicateur de bioaccumulation dans les végétaux (CMT-végétaux) étudiés dans le programme APPOLINE se sont révélés être des outils :

- pertinents pour évaluer les incidences écologiques des polluants des sols ;
- opérationnels sur un certain nombre de sites contaminés.

Cependant, malgré les efforts déployés pour faire valoir ces outils, leur utilisation dans l'évaluation des risques est encore à l'heure actuelle peu fréquente car très peu d'études portent sur des cas concrets. Dans ce contexte, le programme de recherche APPOLINE a été mis en œuvre afin de **préciser les conditions d'utilisation de ces outils biologiques** et acquérir un retour d'expériences dans **des opérations de démonstration permettant de montrer leur intérêt auprès d'utilisateurs potentiels** (bureaux d'études, industriels de la dépollution, aménageurs, collectivités...).

Abstract

For several years, the environmental risk of contaminated soils has been mainly measured using physicochemical analytical methods. Although this type of characterization is necessary for the measurement of the danger, it does not make it possible to identify all the molecules and / or toxic elements in multi-polluted contexts.

In addition, chemical analyses provide no information whatsoever about the bioavailability of contaminants, their potential transfer to and their toxicity levels in living organisms, where they are alone or in "cocktails" (synergistic and antagonistic effects of contaminants). On the other hand, if ecotoxic effects relating to all contaminants are integrated, bioindicators prove to be responsive tools that provide information on the risks of global impacts on the terrestrial ecosystem as well as on the ecological status of soils.

In order to overpass the lack of bioindicators for assessing soil quality, ADEME set up a national program, "Bioindicators of Soil Quality". In 2008, the French agency decided to develop this type of tool as well as highlight the benefits of including bioindicators in the diagnosis of soil pollution, as a complement to physicochemical analyses. The program showed that the indicators of bioaccumulation in plants (TMC-Plant Index) and in snails (SET-Snail Index) and the bioindicators of effects (the Nematode, Earthworm and Omega 3-Plant Indices) proved to be:

- relevant tools for assessing the ecological impacts of soil pollutants;
- operational tools on a number of contaminated sites.

However, despite efforts to promote these tools, their use in risk assessment remains infrequent because very few studies focus on concrete cases: the APPOLINE research program was therefore implemented in order to clarify the conditions for utilizing these biological tools and to gain feedback from the demonstrations of their benefits given to potential users (consultants, industrial companies, developers, local governments, etc.).





Objectifs du document

L'objectif de ce document est de présenter les différents outils biologiques de type Bio-indicateurs (Fiche Bio-indicateurs) et leurs applications sur différents cas d'études pilotes afin de montrer leur intérêt dans la gestion des sites pollués et/ou la reconversion des friches et leur caractère opérationnel (Fiches Exemple d'utilisation).

L'utilisation de ces outils de type Bio-indicateurs dans des applications diverses a fait l'objet d'un programme de recherche nommé « APPOLINE » (cf www.ademe.fr/mediathèque) mis en œuvre par 2 start-up et une équipe de recherche ayant développé ces outils et un bureau d'études spécialisé dans la gestion des sites pollués apportant ainsi une bonne connaissance du contexte et de la réglementation dans ce domaine.

A qui s'adresse ce document ?

Il est à destination des différents utilisateurs : bureaux d'études en ingénierie environnementale, gestionnaires sites pollués, industriels de la dépollution, établissements publics d'état, aménageurs, promoteurs.

Sommaire

1/ Qu'est-ce qu'un bio-indicateur ?	05
2/ Domaines d'application	05
3/ Les bio-indicateurs utilisés dans le cadre de ce programme	06
Les fiches pratiques :	07
Présentation des différents bio-indicateurs utilisés (Fiches N°1 à 5)	
- Bio-indicateurs d'accumulation, indice CMT - Végétaux	08
- Bio-indicateurs d'accumulation, indice SET - Escargots	10
- Bio-indicateurs d'effets, indice Nématode	12
- Bio-indicateurs d'effets, indice Omega 3 - Végétaux.....	14
- Bio-indicateurs d'effets, indices Vers de terre.....	16
Exemples d'utilisation (Fiches n°6 à 8)	
- Impacts sur le sol des rejets atmosphériques liés aux activités industrielles.....	18
- Reconversion des sites et friches urbaines potentiellement pollués ou dégradés.....	21
- Réhabilitation de friches industrielles polluées.....	24
Conclusion :	27
Sigles et acronymes :	28





1/ Qu'est-ce qu'un bio-indicateur ?

Les outils de terrain de type bio-indicateurs visent à évaluer l'accumulation et la biodisponibilité des contaminants du sol et/ou leur(s) effet(s) sur un organisme (ou une partie d'un organisme ou encore une communauté d'organismes) suite à leur exposition in situ aux contaminants du sol.

Ces indicateurs renseignent sur l'état et le fonctionnement du sol en place ainsi que sur les risques de transferts des contaminants vers l'écosystème. Pour être utilisés, les réponses de ces organismes à la contamination doivent être connues scientifiquement, et être associées à des fonctions du sol. Par ailleurs, le protocole de caractérisation doit présenter des qualités de mesure (précision, fiabilité, robustesse) et d'interprétation. Ces bio-indicateurs peuvent être basés sur le prélèvement d'organismes vivants (végétaux, faune, microflore) dans le sol (bio-indication passive) ou sur l'introduction sur le site d'organismes d'élevage, généralement encagés ou marqués, afin d'être exposés aux contaminants (bio-indication active). Les temps de réponse des bio-indicateurs peuvent être variables : certains bio-indicateurs, basés sur des modifications/adaptations à l'échelle des communautés ou des populations ne sont aptes à détecter que des changements à long terme des écosystèmes (les modifications peuvent parfois être très longues à se produire et se stabiliser). D'autres indicateurs biologiques tels que des modifications cellulaires ou métaboliques (ex : Indice Oméga 3, activités biologiques) ont une réponse rapide (quelques heures à quelques jours) et permettent de détecter des effets précoces qui peuvent à plus long terme se traduire en atteintes irréversibles sur l'individu, la communauté ou l'écosystème.

2/ Domaines d'application

Pour évaluer les risques liés à une pollution des sols, les outils couramment utilisés reposent essentiellement sur des analyses physico-chimiques. Bien qu'ils soient essentiels dans une analyse de risques, ces outils ne permettent pas toujours d'identifier la totalité des molécules et/ou éléments toxiques en contextes multi-contaminés. Par ailleurs, les analyses chimiques ne renseignent pas sur la biodisponibilité des contaminants présents dans le sol, ni sur leurs transferts potentiels et leurs niveaux de toxicité vis-à-vis des organismes vivants qu'ils soient présents seuls ou en mélange (interactions, effets de synergie ou d'antagonisme).

Les indicateurs biologiques, en intégrant les effets liés à l'ensemble des contaminants, renseignent sur l'état écologique des sols, les risques de transferts de ces contaminants et **l'impact global** sur l'écosystème et constituent, de fait, des outils particulièrement intéressants.

Dans le domaine des sites et sols pollués, les outils biologiques peuvent être utilisés dans le cadre de :

1) L'élaboration des plans de gestion où ils peuvent :

- > Compléter la caractérisation physico-chimique des sols pollués ;
- > Améliorer l'évaluation des risques pour les écosystèmes (mesure des transferts et des effets vers les premiers maillons d'une chaîne trophique terrestre) ;
- > Aider à la faisabilité d'une technique de phytomanagement ;
- > Être intégrés dans un plan de surveillance des sols ayant fait l'objet d'un traitement (physique, chimique, biologique ou phytomanagement).

2) Les études environnementales et réglementaires où ils peuvent :

- > Compléter les études requises pour répondre à des besoins réglementaires ;
- > Évaluer les impacts sur la biodiversité des sols dégradés maintenus en place.

3) Les études de réaménagement des friches urbaines et industrielles où ils peuvent :

- > Aider à la faisabilité d'un projet de phytomanagement ;
- > Évaluer la pérennité d'un couvert végétal maintenu en place sur un sol dégradé ;
- > Suivre l'adaptation d'une nouvelle végétation implantée sur un sol dégradé ;
- > Aider à l'élaboration d'un plan de réaménagement (sélectionner les zones les plus adaptées pour accueillir une biodiversité végétale et animale).

Ainsi, pour approfondir la caractérisation de l'état biologique d'un sol et mesurer les effets liés aux perturbations/altérations chimiques ou physiques, il est nécessaire d'avoir recours aux trois analyses complémentaires suivantes : physico-chimiques, écotoxicologiques basées sur des bioessais de laboratoire et écologiques basées sur des outils de terrain de type bioindicateurs intégrant l'ensemble des facteurs environnementaux grâce à des organismes sentinelles.



LES BIO-INDICATEURS UTILISÉS

		Caractéristique de la mesure	Sens de variation de la mesure
Physico-chimie		Teneurs totales et extractibles	
Bio-indicateurs d'accumulation	Accumulation plantes (CMT - Végétaux)	Transfert vers les végétaux	
	Accumulation escargots (SET - Escargots)	Transfert vers les escargots	
Bio-indicateurs d'effets	Indices Nématodes <i>in situ</i> NF EN ISO 23611-4	Etat biologique du sol	
	Test éco-toxicologique <i>C. elegans</i> NF ISO 10872	Toxicité des polluants sur les invertébrés du sol	
	Indice Oméga 3 - Végétaux <i>in situ</i> ISO/CD 21479	État de santé des végétaux et des sols	
	Test écotoxicologique Oméga 3 - Végétaux <i>ex situ</i> AFNOR XP X31-233	Phytotoxicité des polluants	
	Indices Vers de terre <i>in situ</i>	Écobiologie du sol	

Références et contacts

Bioindicateurs validés dans le cadre du programme ADEME « Bioindicateurs de qualité des sols ».

Pour de plus amples informations concernant ces bioindicateurs, des fiches outils sont à votre disposition sur ce site : <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/>

Indice CMT - Végétaux : Mines Saint-Etienne, UMR 5600 (EVS), Saint-Etienne
Contact : Olivier FAURE - ofaure@emse.fr



Indice SET - Escargots : TESORA- Le Visium - 22 avenue Aristide Briand - 94110 Arcueil
Laboratoire Chrono-Environnement, UMR 6249, Besançon
Contacts : Annette de VAUFLEURY, Benjamin PAUGET
annette.devaufleury@univ-fcomte.fr, benjamin.pauget@tesora.fr



Indices Nématodes : ELISOL environnement, Gard
Contact : Cécile VILLENAVE- contact@elisol-environnement.fr



Indice Oméga-3 - Végétaux : LEB Aquitaine Transfert/ADERA/UMR5200, Villenave d'Ornon
Contact : Marina LE GUEDARD - marina.le-guedard@u-bordeaux.fr



Indices Vers de terre : Agrocampus Ouest Rennes / Université de Rennes 1
Contact : Guénola PERES - guenola.peres@agrocampus-ouest.fr



LES FICHES PRATIQUES

PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS
BIO-INDICATEURS UTILISÉS (fiches N° 1 à 5)

EXEMPLES D'UTILISATION (fiches N° 6 à 8)



Bio-indicateurs d'accumulation

Indice CMT - Végétaux

Principe de l'indicateur

L'indice CMT est un bio-indicateur d'accumulation des éléments trace métalliques chez les végétaux. Il renseigne sur les transferts effectifs des contaminants métalliques à l'échelle de la communauté végétale du site d'étude. **Cet indice permet donc d'estimer la phytodisponibilité globale des contaminants métalliques et d'évaluer la contamination secondaire des végétaux, premiers maillons des réseaux trophiques.**

Prélèvements et mesures

Les analyses sont réalisées sur des échantillons composites de feuilles prélevées sur des espèces représentatives de la communauté végétale en place. En démarche de routine, cinq échantillons composites regroupant quatre à cinq espèces chacun sont récoltés sur la parcelle d'étude (à chaque angle et au centre). Les échantillons sont lavés, séchés et minéralisés en vue d'une analyse multi-élémentaire (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn).

Conditions d'utilisation

Les prélèvements doivent, si possible, être réalisés durant la période de développement optimal de la végétation (juin-juillet). Après récolte les échantillons peuvent être conservés 1 à 2 jours au réfrigérateur, mais ils doivent être lavés et séchés (à l'air libre ou à l'étuve à 40°C) le plus rapidement possible. Les échantillons secs peuvent être conservés indéfiniment.

Résultats

Le calcul de l'indice CMT - Végétaux est basé sur une comparaison des distributions des teneurs en éléments traces métalliques dans les échantillons étudiés avec celle d'échantillons témoins, caractéristiques de sites non contaminés (valeurs disponibles dans la base de données «Bio-indicateurs»). Cet indice reflète l'écart entre les teneurs mesurées dans les végétaux présents sur le site contaminé et les valeurs mesurées dans les végétaux retrouvés sur site non contaminé.

Les bornes de l'indice CMT - Végétaux, définies dans le programme de l'ADEME « Bio-indicateurs de qualité des sols », pouvant être utilisés dans l'évaluation des risques pour les écosystèmes sont les suivantes :

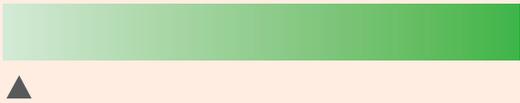
Interprétation de l'indice CMT - Végétaux

Etat des transferts	Aucun transfert anormal	Transfert faible à modéré	Transfert élevé
	Aucune préconisation	Mise en place d'une surveillance	Zone à risque (mesure de gestion)
Indice CMT - Végétaux	0 à 5	5 à 15	> 15



Exemples contrastés de communautés végétales

Evaluation de l'outil par un bureau d'étude de gestion des sites et sols pollués

Thématique	Avis
Compétences techniques	Aucune compétence en botanique nécessaire puisqu'il s'agit de prélever des feuilles sur des plantes identiques mais sans avoir besoin de connaître l'espèce.
Applicabilité à tous les sites	Nécessite de pouvoir trouver un nombre suffisant d'espèces sur tous les secteurs à étudier (fort taux de recouvrement de la végétation).
Représentativité	Nécessite un nombre suffisant d'espèces par échantillon.
Caractéristiques des prélèvements	Nécessite un repérage des prélèvements qu'il ne faut pas sous-estimer. La contribution d'un botaniste (même niveau débutant) peut permettre de gagner du temps. Prélèvement rapide et sans difficulté.
Contraintes techniques	Aucune difficulté physique, il suffit de se déplacer sur site, la matière prélevée étant des feuilles, les échantillons sont très légers. Echantillons à prélever durant la période de développement optimal des végétaux (en général juin / juillet).
Facilité de mise en œuvre	<p>Facile Difficile</p> 



Prélèvement végétaux sur le terrain



Analyse des métaux (ICP-MS)

Photos Mines Saint-Etienne

Bio-indicateurs d'accumulation Indice SET - Escargots

Principe de l'indicateur :

Les escargots se nourrissent de végétaux, de sol et d'humus. Leur capacité à accumuler des contaminants comme les métaux a été utilisée pour révéler la contamination des milieux à l'interface sol-air-végétaux. Les escargots sont importants pour de nombreux consommateurs (vers luisant, oiseaux, hérisson et l'homme). **L'indice SET-Escargots est un indicateur de la biodisponibilité des contaminants métalliques des sols.** On dispose des escargots d'origine et d'âge connus dans des cages sur le terrain puis on analyse après 28 jours d'exposition les concentrations en métaux accumulées.

Prélèvements et mesures :

On place des escargots subadultes issus de l'élevage dans des cages (15 escargots/cage ; cage = cylindres en acier inoxydable, 25 cm de diamètre, 25 cm de hauteur). Ils sont humidifiés (pour les réveiller) quelques heures avant d'être placés dans les microcosmes où ils sont exposés au sol ainsi qu'aux végétaux ayant poussé sur le site et à l'air ambiant pendant 28 jours. Des morceaux de tuiles sont mis dans la cage en guise d'abris. On ferme la cage avec une grille (inox) et on la maintient avec des piquets (inox). Après 28 jours d'exposition, les escargots sont remis dans les boîtes de stockage et envoyés au laboratoire pour analyses. Les concentrations des contaminants sont mesurées dans les tissus mous (viscères). Pour les contaminants métalliques, on analyse 6 escargots prélevés après 28 jours d'exposition sur le terrain par ICP-MS après digestion en milieu acide. Pour d'autres contaminants (pesticides, HAP, PCB, dioxines...) des masses plus importantes de tissus peuvent être nécessaires ; dans ce cas les 15 escargots seront analysés.



Microcosme escargots (cage)

Conditions d'utilisation :

Les expositions peuvent se dérouler entre avril et novembre (hors période de gel). Il faut cependant éviter les conditions extrêmes (très forte sécheresse, fortes températures...)

Résultats :

L'interprétation des résultats de l'indicateur se fait par comparaison avec des concentrations internes de références (CIRef). Les CIRef sont disponibles pour 14 contaminants métalliques : As, Cd, Co, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Tl, Zn. Cet indice reflète l'écart entre les teneurs mesurées dans les escargots exposés sur le site contaminé et les valeurs mesurées dans des escargots exposés sur site non contaminé.

Les bornes de l'indice SET-Escargots, définies dans le programme de l'ADEME « Bio-indicateurs de Qualité des sols », pouvant être utilisés dans l'évaluation des risques pour les écosystèmes sont les suivantes :

Interprétation de l'indice SET-Escargots

État des transferts	Aucun transfert anormal	Transfert faible à modéré	Transfert élevé
	Aucune préconisation	Mise en place d'une surveillance	Zone à risque (mesure de gestion)
Indice SET - Escargots	0 à 1	1 à 5	> 5

Evaluation de l'outil par un bureau d'étude de gestion des sites et sols pollués

Thématique	Avis
Compétences techniques	La pose des microcosmes ne requiert aucune compétence technique particulière. Cependant, des connaissances de base du site sont préférables pour le choix de la disposition des microcosmes.
Applicabilité à tous les sites	Le dispositif peut être mis en place sur n'importe quel site. Il est préférable d'avoir un minimum de végétation (même très peu) afin de ne pas biaiser la part de sol que consomme les escargots.
Représentativité	Il faut adapter le protocole selon la contamination du site. Nécessite un nombre suffisant de microcosmes par zone étudiée (ex : 3 microcosmes / 1000 m ² si hétérogénéité). Eviter les conditions climatiques extrêmes (fortes températures, sécheresse...).
Caractéristiques des prélèvements	Une heure de mise en place et une heure de récupération du matériel et des escargots par site.
Contraintes techniques	Il faut généralement protéger les microcosmes notamment sur les sites ouverts à la population. Cela nécessite 2 campagnes: une campagne pour déposer les microcosmes et une autre campagne pour les récupérer.
Facilité de mise en œuvre	<p style="text-align: center;">Facile Difficile</p> 



Pose microcosme escargots



Engagement des escargots

Bio-indicateurs d'effets

Indices Nématodes

Principe de l'indicateur :

Les indices Nématodes sont des bio-indicateurs d'effets et d'impacts mesurés *in situ*. Ils sont basés sur l'analyse de la nématofaune qui est la communauté des nématodes du sol. **Ces organismes sont des vers microscopiques (de l'ordre d'1 mm de longueur) ubiquistes et abondants qui sont sensibles aux conditions du milieu et aux perturbations physiques ou chimiques.** Par conséquent, les indices Nématodes renseignent sur l'état biologique du sol et sa biodiversité.

Par ailleurs, le test écotoxicologique utilisant le Nématode *Caenorhabditis elegans* mesure *in vitro* la toxicité du sol sur des organismes pluricellulaires.

Prélèvements et mesures :

L'analyse nématofaunique est réalisée à partir d'échantillons composites de sol de 300 à 500 g. Le prélèvement de sol est simple (carottages dans la strate 0-20 cm du sol) et peut être réalisé par les gestionnaires de site. L'échantillonnage peut se faire toute l'année ; le printemps et l'automne sont cependant les périodes les plus favorables. Les organismes sont extraits du sol, dénombrés et identifiés afin d'obtenir un tableau d'abondances des différents types de nématodes qui sert de base pour le diagnostic.

Conditions d'utilisation :

La méthode d'étude de la nématofaune est normalisée : NF EN ISO 23611-4. L'analyse requière que les échantillons de sol soient envoyés immédiatement après le prélèvement. En effet, les échantillons doivent être traités dans les 15 jours qui suivent leur prélèvement car l'analyse nécessite que les nématodes soient vivants.

Une analyse de la nématofaune du sol peut être utilisée seule (i.e. sans site de référence) pour caractériser le fonctionnement biologique du sol sur un site grâce au référentiel ELIPTO®. Toutefois, il est souvent plus informatif de faire l'interprétation des données en utilisant une situation de référence sur le site étudié. Le test écotoxicologique *in vitro* est également normalisé : NF ISO 10872 ; il est réalisé sur de faibles quantités de sol (< 10g).

Résultats :

Chaque sol est caractérisé par les abondances des différents groupes fonctionnels de nématodes et par des indices nématofauniques reflétant le fonctionnement biologique du sol. Dans le contexte des sites et sols pollués, on s'intéresse particulièrement à l'indice de structure (SI), qui reflète la stabilité du milieu : plus il est élevé, moins le milieu est perturbé. Par ailleurs, plus les abondances des différents groupes fonctionnels sont élevées, plus l'activité biologique du sol est importante et satisfaisante.



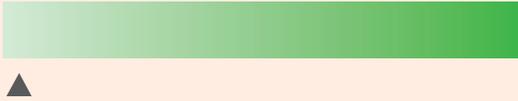
Nématodes vus au microscope

Interprétation des indices Nématodes

État biologique*	Etat satisfaisant	Etat intermédiaire	Etat dégradé
	Aucune préconisation	Mise en place d'une surveillance	Mise en place d'une mesure de gestion
Abondance des nematodes phytophages	Dépend de l'occupation du sol (végétation du site étudié) : interprétation réalisée en utilisant l'outil d'aide à la décision (OAD) ELIPTO® développé par ELISOL.		<200 nématodes / 100g sol
Abondance des nematodes microbivores			<200 nématodes / 100g sol
Abondance des nematodes omnivores et carnivores			<20 nématodes / 100g sol
Indice de structure (SI)	>50	20 à 50	et <20

* Interprétation établie pour un usage du sol (de type prairial ou forestier)

Evaluation de l'outil par un bureau d'étude de gestion des sites et sols pollués

Thématique	Avis
Compétences techniques	Le prélèvement ne demande aucune compétence spécifique ; il suffit simplement de faire un plan d'échantillonnage représentatif du secteur investigué ce qui est couramment réalisé dans les études sites et sols pollués.
Applicabilité à tous les sites	La méthode peut être utilisée sur tous les sites, des nématodes ayant été retrouvés dans tous les échantillons.
Représentativité	La représentativité de l'échantillon n'est pas critique puisqu'il s'agit d'un échantillon moyen, la multiplicité des prélèvements sur le site investigué garantit la représentativité de l'échantillon. Il faut cependant respecter des zones homogènes.
Caractéristiques des prélèvements	Les prélèvements sont très rapides permettant de couvrir de grandes surfaces. Les quantités de sol prélevées sont très faibles.
Contraintes techniques	Le prélèvement se fait à la surface du sol et est donc plutôt aisé sauf si les sols sont très compacts. La technique demande de multiplier les trous imposant une certaine répétitivité du geste. Les risques sont avant tout dorsaux avec de plus un geste asymétrique.
Facilité de mise en œuvre	<p>Facile Difficile</p> 



Prélèvement Nématodes



Identification Nématodes

Bio-indicateurs d'effets

Indice Oméga-3 - Végétaux

Principe de l'indicateur

L'indice Oméga-3-Végétaux est un biomarqueur métabolique d'exposition et d'effets précoces des métaux mais aussi de différents types de polluants organiques (notamment HAP et herbicides). **Il est basé sur l'analyse de la quantité relative de lipides des membranes chlorophylliennes, molécules très sensibles à la présence de dérivés réactifs de l'oxygène (DRO) générées en présence de polluants dans les sols.** Ces lipides sont indispensables pour le bon fonctionnement de la photosynthèse, elle-même importante pour la croissance des végétaux. L'indice Oméga-3-Végétaux renseigne ainsi sur l'état de santé des végétaux.

Prélèvements et mesures

La mesure peut être réalisée soit à partir de feuilles de l'espèce modèle *Lactuca sativa* cultivées sur un échantillon de sols à tester en conditions contrôlées au laboratoire (bio-essai) selon la norme AFNOR XP X31-233, soit à partir de feuilles de plantes prélevées directement sur le terrain (test *in situ*). Pour l'application sur le terrain et selon la question à aborder, cet indice peut être déterminé à partir d'une ou plusieurs espèces végétales. La teneur en lipides des membranes chlorophylliennes, est évaluée en mesurant la composition en acide gras des feuilles des végétaux par chromatographie en phase gazeuse. Les pourcentages d'acides gras obtenus permettent ensuite de calculer l'indice Oméga-3-Végétaux.

Conditions d'utilisation

Cet indice ne peut pas être utilisé pour déterminer la qualité intrinsèque d'un sol provenant d'une zone spécifique (considérée comme homogène). Cet indice est un outil de comparaison. La réalisation de ce test doit donc obligatoirement se faire en comparant différentes zones d'études (au moins 2) ayant les mêmes conditions climatiques.

Résultats

L'indice Oméga-3-Végétaux diminue en présence de contaminants. Les données acquises sont interprétées par rapport à une situation de référence choisie sur le site étudié et varient de 0 à 1, la valeur 1 étant la valeur obtenue sur la zone témoin. Pour le test *in situ*, uniquement dans le cas où plusieurs espèces végétales sont prélevées, des notes pour chaque zone du site étudiée sont calculées à partir de l'indice Oméga-3. Ces notes varient aussi de 0 à 1, la valeur 1 étant la valeur obtenue sur la zone témoin.



Mise en œuvre en labo : bio-essai



Mise en œuvre sur le terrain : test *in situ*

Interprétation de l'indice Oméga 3 - Végétaux*

Etat de santé des végétaux	Bon	Moyen	Mauvais
	Aucune préconisation	Mise en place d'une surveillance	Zone à risque (mesure de gestion)
Indice Oméga-3	1 à 0,93	0,93 à 0,85	< 0,85

* Interprétation établie pour un usage du sol (de type prairial ou forestier) à établir à partir d'un sol témoin non contaminé sur site

Evaluation de l'outil par un bureau d'étude de gestion des sites et sols pollués

Thématique	Avis
Compétences techniques	Aucune compétence en botanique nécessaire puisqu'il s'agit de prélever des feuilles sur des plantes identiques mais sans avoir besoin de connaître l'espèce.
Applicabilité à tous les sites	Nécessite de pouvoir trouver un nombre suffisant d'espèces sur tous les secteurs à étudier (fort taux de recouvrement de la végétation).
Représentativité	Nécessite un nombre suffisant de plantes par échantillon. Il faut éviter de prendre les feuilles les plus jeunes, s'orienter vers des feuilles matures et éviter les feuilles abîmées. Il faut prendre des feuilles sur des plantes de même taille pour tous les échantillons ou bien procéder pour tous les secteurs à des échantillons moyens contenant des feuilles de plantes de toute taille. L'horaire des prélèvements semble avoir peu d'impact sur la représentativité des résultats
Caractéristiques des prélèvements	Nécessite un repérage des prélèvements qu'il ne faut pas sous-estimer. La contribution d'un botaniste (même niveau débutant) peut permettre de gagner du temps. Prélèvement rapide et sans difficulté.
Contraintes techniques	Aucune difficulté physique, il suffit de se déplacer sur site, la matière prélevée étant des feuilles, les échantillons sont très légers.
Facilité de mise en œuvre	<p>Facile Difficile</p> 



Transestérification des acides

Analyse des acides gras
(chromatographie en phase gazeuse)

Bio-indicateurs d'effets

Indices Vers de terre

Principe de l'indicateur :

Les indices Vers de terre sont des bio-indicateurs d'effets et d'impacts mesurés *in situ*. Ils sont basés sur l'analyse des communautés lombriciennes et notamment leur structure fonctionnelle qui repose sur l'importance des trois catégories écologiques (CE) :

- 1) les épigés (vers de compost, 1-5 cm), vivant à la surface du sol dans les amas organiques et très actifs dans l'évolution de la matière organique ;
- 2) les anéciques (lombric commun, 10-110 cm) qui créent des galeries verticales permanentes favorisant l'infiltration, et qui déposent leurs déjections soit à la surface du sol ce qui réduit le ruissellement et l'érosion ou dans leur galerie, tapissant d'un manchon organique les parois ce qui permet l'adsorption de contaminants ;
- 3) les endogés (5-20 cm) qui vivent dans le sol, créant des réseaux de galeries horizontales très ramifiées et temporaires dans lesquelles ils déposent leurs déjections, favorisant la rétention de l'eau dans le sol. Par ailleurs, les vers de terre, en créant des conditions d'habitats favorables, stimulent l'activité des microorganismes. Les vers de terre sont généralement très abondants dans les sols et sont très sensibles aux conditions du milieu et aux perturbations physiques ou chimiques. Les indices Vers de terre renseignent donc sur l'état biologique du sol et le fonctionnement de l'écosystème.



Prélèvements et mesures :

Les vers de terre peuvent être facilement prélevés par tri manuel (un bloc de sol de 20 * 20 cm sur 25 cm est extrait par une bêche et trié manuellement pour collecter les vers de terre ; 6 répétitions sont nécessaires), ou par un extractant chimique (sur une surface de 1 m², 2 arrosages de 10 L de solution moutardée (300 g de moutarde dans 10 L d'eau) sont appliqués, espacés de 15 minutes; trois répétitions sont nécessaires). Le prélèvement peut être réalisé par les gestionnaires de site. L'échantillonnage se fait au printemps ou à l'automne, quand l'activité des vers, conditionnée par l'humidité, est optimale. Les individus peuvent être quantifiés et partiellement identifiés au terrain, ou au laboratoire où ils sont identifiés jusqu'à l'espèce.

Conditions d'utilisation :

La méthode d'étude des vers de terre est issue de la norme : NF EN ISO 23611-1. Une analyse des communautés peut être réalisée indépendamment de la présence d'un site de référence, en positionnant les valeurs obtenues à des valeurs de références grâce au référentiel observatoire participatif vers de terre (OPVT) <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT> , mais une situation de référence et des métadonnées du site (pédologie, données physico-chimiques) permettent d'affiner le diagnostic.

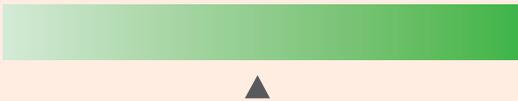
Résultats :

Les communautés lombriciennes de chaque site sont caractérisées par les abondances totales (nombre, poids) et les abondances des catégories écologiques, dont les fortes valeurs rendent compte du bon fonctionnement biologique du sol, et par la structure spécifique (nombre d'espèces, diversité, équitabilité) dont les fortes valeurs renseignent de la capacité de résilience du milieu.

Interprétation des indices Vers de terre

État biologique	Etat satisfaisant	Etat intermédiaire	Etat dégradé
	Aucune préconisation	Mise en place d'une surveillance	Mise en place d'une mesure de gestion
Abondance total (nb i/m ²)	Dépend de l'occupation du sol (végétation du site étudié, végétation) et des paramètres intrinsèques du sol (pédologie, texture, matière organique, pH : interprétation réalisée en utilisant le référentiel OPVT)		<40
Abondance des anéciques			et <5
Abondance des endogés (nb i/m ²)			et <20
Richesse spécifique et indice de diversité (Shannon)			Richesse <3 ; Diversité <1

Evaluation de l'outil par un bureau d'étude de gestion des sites et sols pollués

Thématique	Avis
Compétences techniques	Le prélèvement ne demande aucune compétence spécifique ; il doit seulement suivre un plan d'échantillonnage représentatif du secteur étudié comme cela est couramment fait en sol pollué.
Applicabilité à tous les sites	Les méthodes (bêche ou moutarde) peuvent être utilisées sur tous les sites ; l'utilisation de la méthode bêche est plus difficile dans des sols présentant une très forte charge en éléments grossiers.
Représentativité	Pour assurer la représentativité des résultats, il faut faire 6 répétitions pour le test bêche ou 3 répétitions pour le test moutarde, espacées de 6 m, le tout dans une zone homogène. Les résultats obtenus sont ensuite moyennés et rapportés au m ² .
Caractéristiques des prélèvements	Les prélèvements prennent du temps (3 heures pour les 6 répétitions du test bêche ; 1h30 pour le test moutarde), mais il est possible de faire directement au terrain un pré-diagnostic d'état (nombre de vers) et de fonctionnement (détermination des catégories écologiques avec la clé de détermination de l'OPVT https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT).
Contraintes techniques	Les prélèvements se font à la surface du sol ou sur les 25 premiers centimètres ; ils sont donc plutôt aisés sauf si les sols sont très compacts ou très chargés en éléments grossiers. Le test moutarde nécessite de se pencher pour récupérer les vers ; le test bêche en plus d'extraire le bloc de sol nécessite d'être courbé lors du tri. Les risques sont avant tout dorsaux.
Facilité de mise en œuvre	<p style="text-align: center;">Facile Difficile</p> <div style="text-align: center;">  </div>



Zone de prélèvement vers de terre



Prélèvement vers de terre



Identification communautés de vers de terre

Impact sur le sol des rejets atmosphériques liés aux activités industrielles

Les activités concernées

Toute activité générant des rejets gazeux ou particulaires susceptibles d'avoir des impacts environnementaux (sur site et hors site).

Exemple : unité de valorisation énergétique de déchets, cimenterie, métallurgique, infrastructures de transport, etc.

Vos besoins

Évaluer l'impact de vos rejets atmosphériques sur la qualité des sols à proximité de votre installation (zone résidentielle, sols agricoles, espace naturel...).

Contexte d'application

Dans le cadre de vos obligations réglementaires de surveillance environnementale et vos actions de communication, vous recherchez des outils pour évaluer la qualité des sols, en complément de vos outils actuels d'évaluation de la qualité de l'air (indice lichénique) et de l'eau (IBGN, IBD...).

- **Pour une nouvelle installation** : état initial de l'étude d'impact, état « 0 » en amont de la surveillance environnementale.
- **Pour une installation existante** : mise à jour des études environnementales et réexamen périodique des conditions d'autorisation en application de la directive 2011/75/4E relative aux émissions industrielles (directive IED). Évaluation des effets de l'installation, mise en relation avec les modélisations aérodispersives. Évaluation des modifications après changement de process. Discussion avec les parties prenantes lors des enquêtes publiques et autres phases de concertation. Surveillance environnementale.
- **Lors de l'élaboration du dossier de cessation d'activités** : diagnostic environnemental, schéma conceptuel / interprétation de l'état des milieux (IEM), définition du périmètre d'influence des panaches et prise en compte dans la définition des servitudes.



© Elisol



© Elisol

Exemple : pollution métallique avérée autour d'une usine métallurgique

L'étude a été conduite dans la zone de contamination d'une ancienne usine métallurgique dont les retombées de poussières ont engendré une contamination essentiellement pluri-métallique des sols sur plusieurs kilomètres alentours.

La zone d'étude a été divisée en 4 sous-zones correspondant chacune à un bois (plantations plurispécifiques) :

1/ Fortement contaminé dont les principaux polluants sont le plomb (Pb) et le cadmium (Cd) :

$$[\text{Pb}]_{\text{moyen}} = 2\,500 \text{ ppm} - [\text{Cd}]_{\text{moyen}} = 35 \text{ ppm}$$

2/ Moyennement contaminé $[\text{Pb}]_{\text{moyen}} = 725 \text{ ppm} - [\text{Cd}]_{\text{moyen}} = 13 \text{ ppm}$

3/ Faiblement contaminé $[\text{Pb}]_{\text{moyen}} = 325 \text{ ppm} - [\text{Cd}]_{\text{moyen}} = 5 \text{ ppm}$

4/ Témoin $[\text{Pb}]_{\text{moyen}} = 50 \text{ ppm} - [\text{Cd}]_{\text{moyen}} = 1 \text{ ppm}$

Evaluation des risques de transfert

Transfert vers les escargots

Le calcul de l'indice SET - Escargots (Fig. 1) montre un excès de transfert modéré sur les parcelles témoins et moyennement contaminées, ce qui indique que les contaminants métalliques ont une biodisponibilité assez élevée même sur la parcelle témoin qui ne présente pas les plus faibles teneurs en métaux dans le sol. Sur les parcelles faiblement et fortement contaminées, de forts excès de transferts sont identifiés montrant que (i) de forts transferts sont quasi-inévitables lorsque les teneurs dans les sols sont élevées et que (ii) les transferts ne sont pas fonction de la concentration dans les sols, les excès de transferts étant plus forts sur la parcelle faiblement contaminée que sur la parcelle moyennement contaminée.

Transfert vers la végétation

Le calcul de l'indice CMT - Végétaux (Fig. 2) montre un fort excès de transfert des éléments traces sur les 4 parcelles testées. En particulier, sur la parcelle considérée comme témoin, l'indice est très significativement supérieur à 0, ce qui indique une très forte phytodisponibilité des éléments traces, malgré des concentrations dans le sol relativement faibles. De plus, les transferts sont globalement équivalents sur les 3 parcelles contaminées ($15,6 < CMT < 18,6$) malgré des niveaux de contamination des sols très différents.

Il n'y a donc pas de lien direct entre les teneurs totales des contaminants mesurées dans le sol et les teneurs accumulées dans la végétation. L'ensemble de la zone étudiée est donc caractérisée par une phytodisponibilité anormalement élevée des éléments traces, conduisant à un risque de transfert important vers les réseaux trophiques.

Evaluation de l'état de santé du couvert végétal

Les notes obtenues à partir de l'Indice Oméga-3 mesuré sur différentes espèces végétales montrent que, contrairement à ce qui était attendu, les zones les moins contaminées impactent le plus les végétaux (Fig. 3).

La complémentarité entre les bioindicateurs d'accumulation et l'Indice Oméga-3 a ainsi permis de détecter une pollution autre que celle liée aux métaux. Des analyses complémentaires de la physico-chimie du sol ont révélé la présence d'herbicides.

Indice SET - Escargots

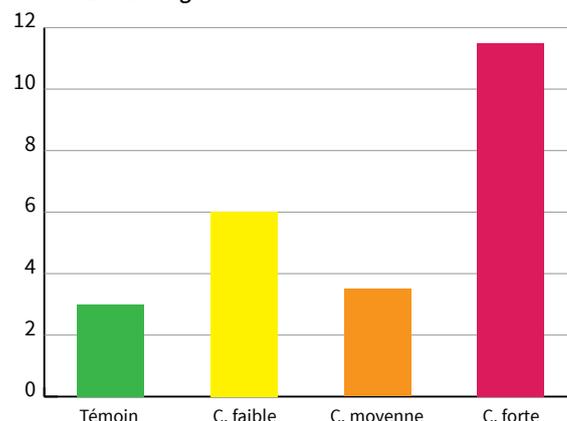


Figure 1 : transfert des éléments traces métalliques vers les escargots des parcelles contaminées, évalué par l'indice SET - Escargots

Indice CMT - Végétaux

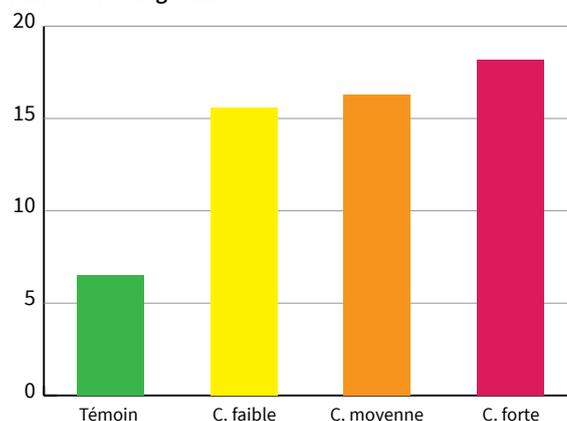


Figure 2 : transfert des éléments traces métalliques vers les communautés végétales de parcelles diversement contaminées, évalué par l'indice CMT - Végétaux

Indice Oméga 3 - Végétaux

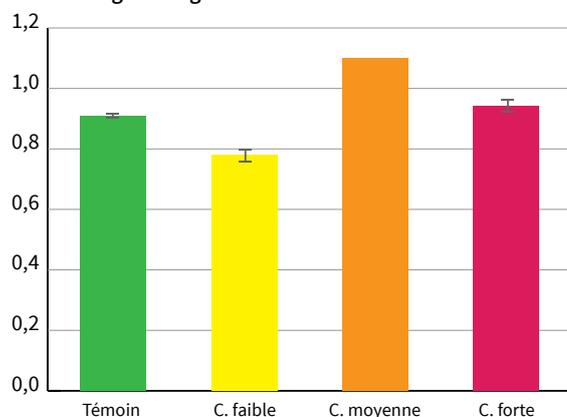


Figure 3 : notes des zones étudiées calculées à partir de l'indice Oméga-3 - Végétaux de différentes espèces végétales

Evaluation du fonctionnement biologique d'un sol

L'analyse de l'abondance des trois grands types de nématodes du sol montre que : (1) l'abondance de tous les types de nématodes diminue de manière graduelle lorsque la concentration augmente; (2) les nématodes omnivores et carnivores, qui sont des organismes connus pour leur sensibilité aux polluants, sont présents à des densités très faibles pour les trois sites contaminés par rapport au site témoin.

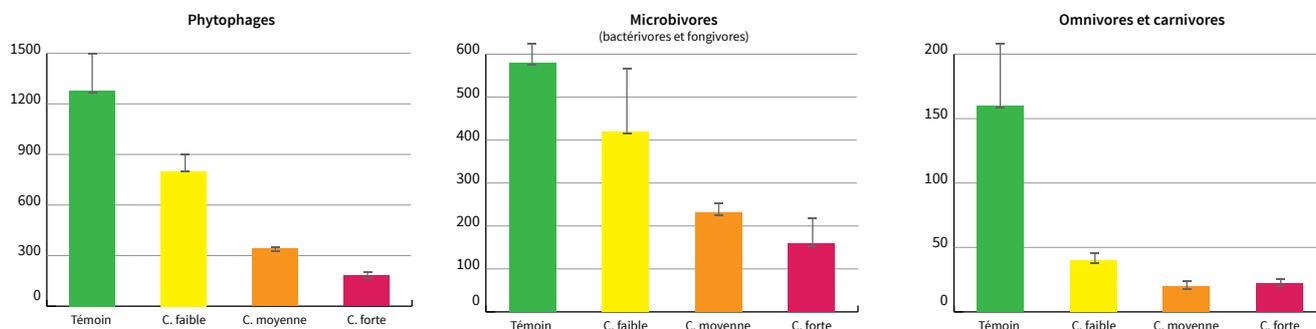


Figure 4 : abondance (individus pour 100 g de sol sec) des trois grands types de nématodes du sol

L'indice de structure (SI) permet de distinguer la zone non contaminée des zones contaminées (Fig. 5). En effet, le SI est plus élevé pour le bois témoin que les bois contaminés car il présente une plus forte biodiversité. Cet indice, calculé en tenant compte de l'abondance relative des différentes guildes fonctionnelles de nématodes, indique que le bois témoin présente une communauté de nématodes plus complexe où des taxons fragiles sont présents.

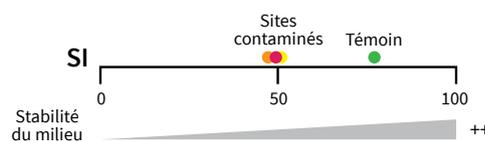


Figure 5 : indice de structure (SI)

L'analyse simultanée de l'abondance des différents groupes de nématodes et du SI permet de mettre en évidence une dégradation de l'état biologique du sol lorsque la contamination métallique augmente ; cette dégradation est graduelle seulement pour certaines communautés de nématodes (phytophages et microbivores).

Conclusion

La mise en œuvre des bio-indicateurs sur différentes zones contaminées a permis de montrer que des transferts pouvaient avoir lieu même sur des zones faiblement contaminées, sur lesquelles la biodisponibilité des contaminants anormalement élevée est susceptible d'induire des risques pour les écosystèmes non suspectés initialement par les analyses physico-chimiques. Ainsi, les transferts et les effets des contaminants sur les écosystèmes terrestres ne sont pas toujours corrélés aux teneurs totales de ces contaminants dans le sol.

Par ailleurs, sur les zones moins contaminées, l'indice Oméga-3 met en évidence un stress supplémentaire sur les plantes probablement liés aux contaminants organiques (résidus d'herbicides notamment) non suspectés.

De même, la présence d'une pollution métallique ou organique induit des changements significatifs des communautés de nématodes traduisant une dégradation de l'état biologique du sol (diminution de la complexité de la microchaîne trophique du sol, i.e. diminution en nombre et en diversité des différents organismes impliqués dans le fonctionnement biologique du sol).

Dans cet exemple, les bio-indicateurs fournissent des informations globales concernant l'impact environnemental des pollutions historiques et permettent d'orienter les futurs plans de gestion et de restriction d'usage.

* Pour une meilleure interprétation des résultats, se référer aux fiches de présentation des bioindicateurs situées au début de ce document

Reconversion des sites et des friches urbaines potentiellement pollués ou dégradés

Les activités concernées

Tout projet d'aménagement laissant une place importante à la végétalisation et à la biodiversité sur des sols potentiellement pollués ou dégradés : parcs naturels et urbains, espaces verts des écoquartiers ou de zones d'activités, trames vertes et bleues à l'échelle des agglomérations, espaces extérieurs des bâtiments...

Vos besoins

Évaluer l'impact de la pollution potentielle sur le milieu naturel.

Évaluer le potentiel de revégétalisation de votre friche.

Évaluer la pérennité des techniques de végétalisation

Vérifier, suivre, tester les performances des techniques de végétalisation.

Spatialiser les enjeux pour adapter un projet de reconversion aux types de sols rencontrés.

Contexte d'application

En tant que collectivités, aménageurs ou promoteurs, vous souhaitez requalifier une ancienne friche. Un changement d'usage doit s'assurer de la compatibilité de l'état des milieux avec les nouveaux usages. En absence de risque sanitaire et dans le cadre d'un projet de reconversion d'un site, vous désirez mettre en place des formations végétales et des espaces plantés tout en limitant l'apport de terres végétales (coût environnemental et financier). En raison de la nature du sol, vous vous interrogez sur :

- **Son impact potentiel sur le fonctionnement du sol :**

Vous souhaitez connaître les risques de transfert associés aux pollutions résiduelles vers les écosystèmes pour adapter les usages sur cette friche (mise en place d'une trame verte, d'espaces de nature, habitats pour des espèces patrimoniales, agriculture urbaine...).

- **La capacité de revégétalisation du site :**

Vous souhaitez dans un premier temps choisir au mieux les techniques de végétalisation (travaux du sol et mélanges grainiers) à appliquer en fonction des sols rencontrés puis suivre leur refunctionalisation. Cela permet de maîtriser la restauration écologique des sites réaménagés, évaluer la pérennité de vos aménagements et les adapter au besoin.

Exemple : réaménagement d'une friche urbaine en parc urbain

Une collectivité souhaite aménager un parc naturel urbain sur des sols contaminés par des éléments traces métalliques. Après s'être assurée de l'absence de risque sanitaire et avant de déployer d'importants moyens techniques et financiers, la collectivité voulait s'assurer de la pérennité des aménagements et des plantations qu'elle va mettre en place. Par ailleurs, la collectivité veut mettre en place un parc naturel urbain et restaurer les écosystèmes, il est indispensable de vérifier que la pollution des sols ne transfère pas vers la faune et la flore qui coloniseront ultérieurement le site. La zone d'étude correspondant à différents usages (jardins, prairie, bois) est divisée en 5 sous-zones définies suivant leurs teneurs totales éléments traces métalliques :

- **3 zones d'anciens jardins** comprenant :

- **la zone 10**, zone la plus contaminée ($[Pb]_{\text{moyen}} = 300 \text{ ppm}$ - $[Zn]_{\text{moyen}} = 500 \text{ ppm}$) ;

- **la zone 60**, moyennement contaminée ($[Pb]_{\text{moyen}} = 170 \text{ ppm}$ - $[Zn]_{\text{moyen}} = 500 \text{ ppm}$) ;

- **la zone 100**, faiblement contaminée ($[Pb]_{\text{moyen}} = 100 \text{ ppm}$ - $[Zn]_{\text{moyen}} = 300 \text{ ppm}$) ;

- **le bois**, moyennement contaminé ($[Pb]_{\text{moyen}} = 200 \text{ ppm}$ - $[Cd]_{\text{moyen}} = 400 \text{ ppm}$) ;

- **la prairie** faiblement contaminée ($[Pb]_{\text{moyen}} = 100 \text{ ppm}$ - $[Zn]_{\text{moyen}} = 200 \text{ ppm}$).



Plan d'aménagement

Evaluation des risques de transfert (cf fig.1)

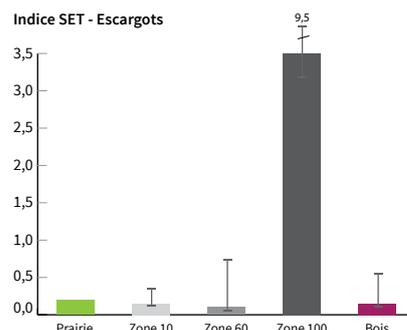
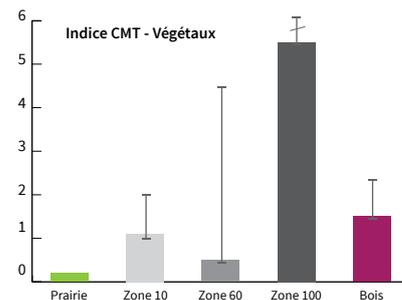
Transfert vers la végétation et vers les escargots

Les indicateurs d'accumulation (CMT-Végétaux et SET-Escargots) ont été mis en œuvre dans les 5 sous-zones ayant différents usages (prairies, anciens jardins familiaux - Zones 10, 60 et 100, bois).

Pour l'indice CMT-Végétaux et l'indice SET-Escargots, la zone 100 est celle qui présente les plus fortes variations de transfert des contaminants vers les récepteurs biologiques. La zone 10 présente de faibles excès de transfert alors qu'il s'agit de la zone qui présente des teneurs totales en polluants les plus élevées.

La forte variabilité de la contamination des zones de jardin souligne l'intérêt d'étudier les transferts de contaminants métalliques non pas à l'échelle de la zone, mais bien à l'échelle de la parcelle. Les usages des jardins ayant pu être très divers (agrément, culture bio, apport de pesticides ou d'engrais...), une caractérisation des transferts à une échelle parcellaire est donc requise dans ce cas.

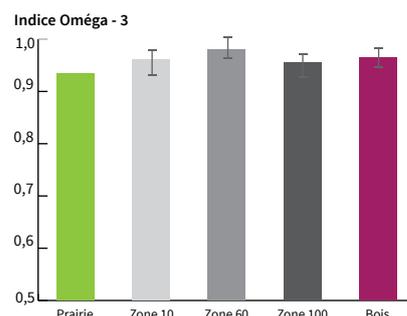
Figure 1 : indicateurs CMT-Végétaux (dessus) et SET-Escargot (dessous) pour les trois modes d'usage des sols rencontrés sur la friche : prairie, anciens jardins familiaux (zones 10, 60 et 100), bois.



Evaluation de l'état de santé du couvert végétal (cf fig.2)

Les zones les moins contaminées (la zone 100 et les prairies) sont celles qui impactent le plus la santé des végétaux. Ces effets mesurés, qui restent cependant minimes, peuvent être en lien avec la présence d'un sol dégradé hors contamination métallique sur ces deux zones (remblais ou présence de produits phytosanitaires).

Figure 2 : notes des zones étudiées, calculées à partir de l'indice Oméga-3 Végétaux de différentes espèces végétales pour les trois modes d'usage des sols rencontrés sur la friche : prairie, anciens jardins familiaux (zones 10, 60 et 100), bois.



Evaluation du fonctionnement biologique des sols (cf fig.3)

L'analyse de l'abondance des trois grands types de nématodes du sol montre que tous les types de nématodes sont plus abondants dans la prairie témoin que dans le bois et en abondance intermédiaire dans les différentes zones d'anciens jardins (zones 10, 60 et 100). Les abondances de nématodes phytophages, de nématodes microbivores et de nématodes carnivores et omnivores mesurées dans les zones 10, 60 et 100 sont, en moyenne, des abondances témoignant d'une bonne activité biologique même si localement quelques points présentent des dysfonctionnements.

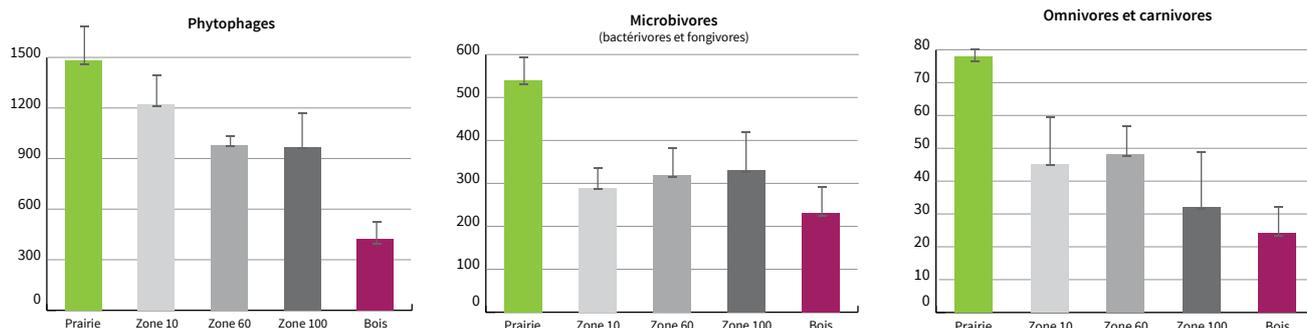


Figure 3 : abondance (individus pour 100 g de sol sec) des trois grands types de nématodes du sol : prairie, anciens jardins familiaux (zones 10, 60 et 100), bois.

L'indice de structure (SI) est supérieur à 60 dans toutes les situations (prairie témoin, zones 10, 60 et 100) : la diversité fonctionnelle est importante en moyenne sur les 5 zones.

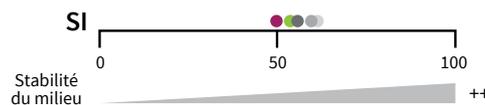


Figure 4 : indice de structure (SI)

Les indices Nématodes montrent que ce site présente globalement un bon état biologique, même si en quelques points, l'activité biologique était réduite de façon significative mais non préoccupante.

Autres outils utilisés pour évaluer le fonctionnement biologique des sols

D'autres bio-indicateurs, tels que la biomasse microbienne et les communautés de vers de terre, ont été utilisés. Les mesures de biomasse microbienne varient peu en fonction des usages du sol et des zones de contamination et les valeurs obtenues sont supérieures aux valeurs de référence indiquant un bon état microbien des sols sur toutes les zones qui ne se différencient pas entre elles. En ce qui concerne les communautés de vers de terre, des densités plutôt élevées apparaissent également sauf au niveau de la prairie liée certainement à des paramètres du sol peu favorables pour ces communautés (présence de sols dégradés de type remblais, produits phytosanitaires). Mais c'est au niveau des zones 10 et 60 qui sont les plus contaminées que l'on trouve les communautés les plus affectées.

Conclusion

La caractérisation de la biodisponibilité, des transferts et de la toxicité des contaminants à l'aide de bio-indicateurs (CMT-végétaux, SET-Escargots et indice Oméga-3) a permis de mettre en évidence des transferts, relativement faibles vers les végétaux et les animaux bien que les sols présentent des concentrations en plomb non négligeables sur certaines parcelles. De plus, l'utilisation des Indices Nématodes, biomasse microbienne et vers de terre a permis de montrer que les sols sont, en moyenne, d'une bonne qualité biologique bénéficiant d'une bonne diversité et d'une forte abondance des organismes du sol.

Par ailleurs, la caractérisation biologique des sols a également mis en évidence que les sols présentant les teneurs totales en contaminants les plus faibles peuvent être une source de transfert vers les chaînes trophiques terrestres plus importante que les sols présentant des teneurs plus élevées. Ainsi, ce sont les zones les plus faiblement contaminées qui doivent faire l'objet d'une priorité de gestion.

Les données acquises dans cette étude montrent ainsi l'intérêt d'utiliser ces outils pour évaluer la biodiversité, les risques pour les écosystèmes et évaluer les fonctions biologiques des sols. Ces outils permettent d'aider à hiérarchiser les modes de gestion et valider la qualité environnementale du projet d'aménagement.

* Pour une meilleure interprétation des résultats, se référer aux fiches de présentation des bioindicateurs situées au début de ce document



Prairie en zone urbaine



Bois en zone urbaine

Réhabilitation de friches industrielles polluées

Les activités concernées

Anciens sites industriels à grande échelle sur lequel un projet de phytomanagement pourrait être envisagé : ancien site minier, crassier, zone de stockage de sédiments ou terres polluées

Vos besoins

Évaluer l'impact de la pollution sur le milieu naturel
 Choisir les techniques de revégétalisation de l'ancien site industriel
 Évaluer la pérennité des techniques de végétalisation
 Vérifier, suivre et tester les performances des techniques de végétalisation
 Spatialiser les enjeux pour adapter le projet aux types de sols rencontrés

Contexte d'application

En tant qu'industriels ou gestionnaires de fonciers, vous êtes propriétaires de friches industrielles pour lesquelles vous devez garantir la maîtrise de leurs impacts sanitaires et environnementaux.

Vos obligations peuvent être diverses : intégration paysagère, confinement de la pollution, maîtrise des émissions de poussières...

A ce titre, vous devez engager des travaux nécessitant des enveloppes financières importantes pour réhabiliter vos sites.

Il est indispensable pour vous d'avoir des arguments concrets, lors de vos échanges avec les Services de l'État, pour évaluer le besoin ou non de mettre en place des opérations de dépollution ou de confinement des sols pollués pour maîtriser les risques environnementaux (hors risque sanitaire).

En raison des coûts de réhabilitation, vous devez vous assurer que les techniques de végétalisation retenues soient pérennes dans le temps et adaptées à vos sites.

La surface généralement importante de vos sites nécessite des réponses variées en fonction de la diversité des sols rencontrés.



Exemple : le crassier métallurgique

L'étude réalisée visait à évaluer l'efficacité d'opérations de phytostabilisation aidée en cours sur l'ancien site métallurgique à l'aide de bioindicateurs d'impact (Indices Nématodes et Oméga-3 Végétaux) et d'accumulation (CMT-Végétaux). Ce crassier est constitué de déchets sidérurgiques ayant de fortes teneurs en éléments traces (Cr >2000 ppm, Ni >2000 ppm, Mo >500 ppm, Pb >150 ppm), une faible teneur en matières organiques et en éléments nutritifs ainsi qu'un pH très élevé (>9). L'efficacité de la phytostabilisation aidée a été testée avec différents types d'amendements organiques : bois raméal fragmenté (BRF) et matières d'intérêt agronomique issues du traitement des eaux (MIATE).

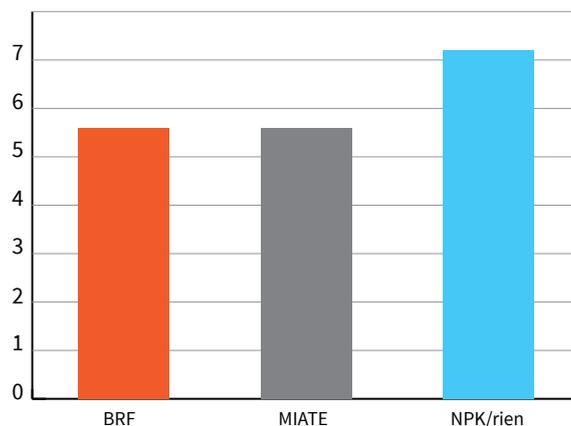
Evaluation des risques de transfert

Transfert vers la végétation

Le calcul de l'indice CMT-Végétaux montre que, quelles que soient les conditions de sol, la végétation des parcelles accumule des éléments trace en quantité supérieure à celle d'une végétation naturelle (CMT>0). Cependant, l'utilisation d'amendements (BRF et MIATE) diminue sensiblement l'accumulation des métaux dans les végétaux par rapport à la modalité non amendée.

Figure 1 : transfert des éléments traces métalliques vers les communautés végétales de parcelles diversement amendées, évalué par l'indice CMT-Végétaux

Indice CMT - Végétaux

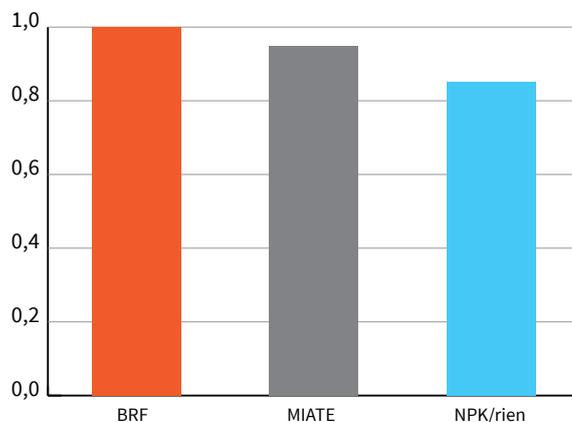


Evaluation de l'état de santé du couvert végétal

D'après les notes obtenues à partir de l'indice Oméga-3 mesuré sur différentes espèces végétales, les végétaux sont moins stressés sur les zones ayant reçu un amendement en comparaison avec les parcelles témoins ayant reçu un engrais minéral (NPK). Ce résultat met en évidence que l'apport des deux amendements (MIATE ou BRF) permet d'améliorer la « qualité » du sol pour les végétaux.

Figure 2 : notes des zones étudiées calculées à partir de l'indice Oméga-3 de différentes espèces végétales

Indice Oméga 3



Evaluation du fonctionnement biologique d'un sol

Les nématodes microvivores (qui consomment les micro-organismes du sol) sont quasiment les seuls à se développer sur le site et leur abondance est favorisée par l'apport de BRF et de MIATE. Par ailleurs, les nématodes omnivores et carnivores, organismes connus pour leur sensibilité aux polluants, sont quasiment absents. Enfin, les nématodes phytophages, qui se nourrissent des racines de végétaux, ne sont détectables que dans les zones où du BRF a été apporté.

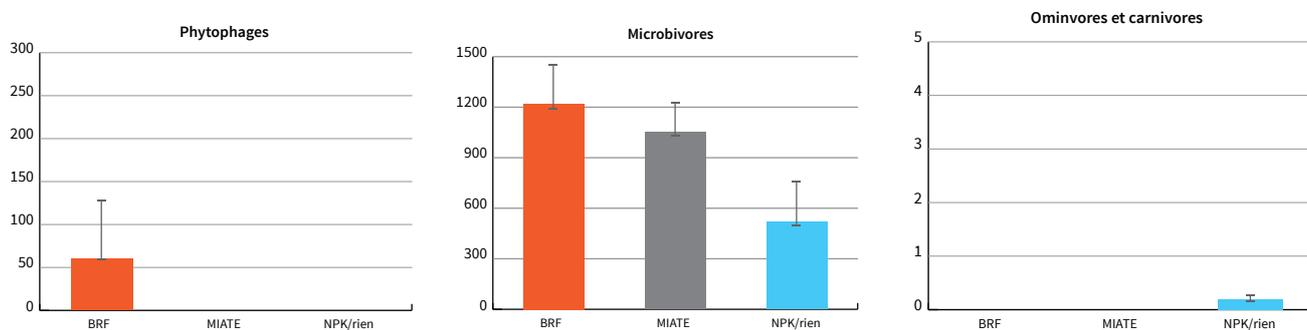


Figure 3 : abondance (individus pour 100 g de sol sec) des trois grands types de nématodes du sol

L'indice de structure (SI) ne montre pas de différences importantes entre les différents procédés de phytostabilisation; en effet, le SI est extrêmement faible (<6) quel que soit le procédé utilisé. Après 5 ans, le sol du crassier phytostabilisé ne présente toujours pas une communauté diversifiée d'organismes, les espèces fragiles sont encore absentes.

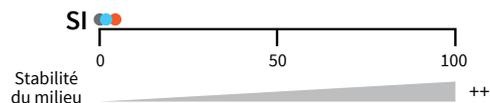


Figure 4 : indice de structure (SI)

Les apports des amendements de type MIATE et de type BRF ont un effet positif sur le développement d'une activité biologique dans le sol ; celle-ci reste toutefois restreinte à un nombre extrêmement limité de groupes biologiques : très faible diversité.

Conclusion

Le gestionnaire avait pour obligation la mise en œuvre d'un mode de gestion du site et avait fait le choix de retenir la phytostabilisation aidée. Les bioindicateurs ont montré que les apports d'amendements permettent d'améliorer la santé des végétaux et l'activité biologique des sols entraînant ainsi un développement rapide du couvert végétal.

L'ensemble des analyses réalisées ont ainsi permis d'orienter la stratégie de réhabilitation du site avant le passage à grande échelle.

* Pour une meilleure interprétation des résultats, se référer aux fiches de présentation des bioindicateurs situées au début de ce document

CONCLUSION

Ces outils ont montré leur intérêt dans la gestion des sites pollués. Ils sont d'ores et déjà proposés dans la méthodologie française de gestion des sites et sols (potentiellement) pollués (cf. Politique nationale de gestion des sites et sols pollués, MEEM 2017 – guide méthodologique de gestion des sites pollués - www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/politique-de-gestion-des-sites-et.html). Ils sont mentionnés comme des outils pertinents pour apprécier l'impact des contaminants sur des cibles environnementales.

Ces outils biologiques sont également intégrés dans l'approche TRIADE normalisée à l'ISO (ISO/FDIS 19204) et concernant l'évaluation des risques environnementaux liés aux sites pollués.

Les bio-indicateurs d'accumulation et d'effet sur les végétaux sont présentés dans le guide « Les phytotechnologies appliquées aux sites pollués » téléchargeable sur www.ademe.fr/mediathèque réf. 0101191. Ils sont utilisés comme outils d'aide à l'évaluation d'un traitement par phyto-management.

Les pratiques dans les domaines du diagnostic et de la gestion des sites et sols pollués vont ainsi pouvoir évoluer en jouant sur la complémentarité et les synergies avec les analyses physico-chimiques strictes.

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
Al	Aluminium
As	Arsenic
APPOLINE	Applicabilité à l'étude des sites pollués du biomarqueur lipidique des végétaux et du bio indicateur nématofaune
BRF	Bois raméal fragmenté
BTEX	Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes
Ca	Calcium
Cd	Cadmium
CEC	Capacité d'échange cationique
CIREF	Concentration interne de référence
CMT	Charge métallique totale
Co	Cobalt
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
Directive IED	Directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles
DRO	Dérivés réactifs de l'oxygène
ETM	Eléments traces métalliques
Fe	Fer
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCT	Hydrocarbures totaux
Hg	Mercurie
IBD	Indice biologique global normalisé
IBGN	Indice biologique diatomé
ICP-MS	Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif
IEM	Interprétation de l'état des milieux
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
ISA-Lille	Groupe Institut supérieur d'agriculture de Lille
K	Potassium
MEEM	Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer
Mg	Magnésium
MIATE	Matière d'intérêt agronomique issues du traitement des eaux
Mn	Manganèse
Mo	Molybdène
OPVT	Observatoire participatif vers de terre
Ni	Nickel
NPK	Azote Phosphore et Potassium
Pb	Plomb
PCB	Polychlorobiphényles
pH	Potentiel hydrogène
ppm	Partie par million (par exemple : mg/kg ou µg/g)
Sb	Antimoine
SET	Somme des excès de transferts
SI	Indice de structure
Sn	Etain
Sr	Strontium
TCR	Taillis à courte rotation
Tl	Thallium
TTCR	Taillis à très courte rotation
VAN	Valeur actuelle nette
UE	Union européenne
Zn	Zinc

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer et du ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





LES BIO-INDICATEURS DE L'ETAT DES SOLS

PRINCIPES ET EXEMPLES D'UTILISATION

Complémentaires des analyses physico-chimiques, les bio-indicateurs constituent des outils pertinents pour évaluer les transferts et les effets des contaminants vers les chaînes trophiques terrestres ainsi que l'état écologique des sols.

Ces outils biologiques ont été mis en œuvre dans plusieurs exemples d'application. Ces études ont fourni des informations pour mieux répondre aux contraintes réglementaires et aider à l'élaboration d'un projet de réaménagement d'une friche industrielle ou urbaine.

Les bio-indicateurs de l'état des sols méritent d'être mieux connus et plus souvent utilisés par les bureaux d'études, les industriels, les collectivités et aménageurs en situation de gestion de sites pollués.

Ces nouveaux résultats de recherche constituent un premier retour d'expériences qui doit permettre de faire évoluer les pratiques dans les domaines du diagnostic et de la gestion des sites et sols pollués.



www.ademe.fr



ISBN 979-10-297-08-244

010216



9 791029 708244