



ADEME

Bioaccumulation, bioamplification des polluants dans la faune terrestre

Un outil pour la biosurveillance des écosystèmes

Annette de Vaufleury et Frédéric Gimbert
avec la collaboration de Lucien Gomot

Bioaccumulation, bioamplification des polluants dans la faune terrestre

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p c m { ' i g h v ' d i e p m

Bioaccumulation, bioamplification des polluants dans la faune terrestre

Un outil pour la biosurveillance
des écosystèmes

Annette de Vaufleury et Frédéric Gimbert
avec la collaboration de Lucien Gomot

ADEME et Laboratoire Chrono-environnement UMR
6249 CNRS Université de Franche-Comté UsC INRA :
conventions 98 93 021 - 01 75 037 et 0775C0041

edp sciences



Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-0724-6

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2013



Sommaire

Préface	VII
Avant-propos	1
Remerciements	5
Introduction	7
Chapitre 1 • Quelques définitions et rappels	9
1.1 Biodisponibilité	9
1.2 Voies d'absorption et méthodes d'évaluation du devenir et des transferts des contaminants	25
1.3 Établissement de relations quantitatives entre structure des composés et activité biologique	27

1.4 Bioconcentration, bioaccumulation	27
1.5 Bioamplification	32
1.6 Bioévaluation – biosurveillance	36
1.7 Conclusion	37
Chapitre 2 • Bioaccumulation chez les invertébrés terrestres	41
2.1 Nématodes	44
2.2 Annélides oligochètes (vers de terre et enchytréides)	46
2.3 Mollusques gastéropodes pulmonés	101
2.4 Arthropodes	161
2.5 Apports et perspectives de l'étude de la bioaccumulation des contaminants chez les invertébrés dans l'évaluation des risques environnementaux	207
Chapitre 3 • Bioaccumulation chez les vertébrés terrestres	217
3.1 Reptiles	218
3.2 Oiseaux	222
3.3 Mammifères	329
Chapitre 4 • Bioaccumulation - évaluation du risque écologique ERE (ERA : Ecological Risk Assessment) via les chaînes alimentaires	425
4.1 Intérêt de l'approche par les chaînes alimentaires et calcul des FBAs	425
4.2 Exemples d'analyse de transfert de contaminants	429
4.3 Relations entre bioaccumulation-bioamplification et effets nocifs (au niveau des espèces)	447
4.4 Incidence des transferts de contaminants sur la structure des chaînes alimentaires et limite de l'application de l'écologie des chaînes trophiques aux recherches en écotoxicologie	454
4.5 Discussion – conclusion	456
Chapitre 5 • Discussion – conclusion	459
5.1 Intérêt de l'étude de la faune terrestre	459
5.2 La bioaccumulation : point final (« end point »), biomarqueur et paramètre de l'évaluation du risque écologique	461
5.3 Perspectives	466

Chapitre 6 • Résumé et perspectives	473
6.1 Situation du sujet	474
6.2 Les apports de la mesure de la concentration et de la bioaccumulation des contaminants dans les organismes terrestres	476
6.3 Perspectives	490
Bibliographie	495
Glossaire	623
Index taxonomique	637

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p c m { ' i g h v ' d i r e p m



Préface

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public dans cinq domaines que sont la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit. Dans ce cadre, elle doit apporter notamment des réponses sur l'état de la contamination des milieux et les effets des contaminants sur l'Homme et les écosystèmes.

Souhaitant disposer d'informations sur la contamination des milieux terrestres et sur les moyens de sa surveillance, l'ADEME, à l'initiative de Denis Savanne (alors au Service de la Recherche Impacts Milieux), a démarré il y a une dizaine d'années sa collaboration avec Annette de Vaufleury et Lucien Gomot, tant sur des programmes de recherche que sur l'encadrement de thèses dont celle récente de Frédéric Gimbert. L'ADEME a donc demandé à cette équipe de l'Université de Besançon de réaliser une synthèse des connaissances sur le devenir et les effets des contaminants dans les écosystèmes terrestres. En effet, contrairement au milieu aquatique, aucun document synthétique de ce type n'existe à l'heure actuelle.

Le résultat de ce gigantesque travail, fruit d'une veille scientifique sur 10 ans, est à la hauteur des espérances de l'ADEME. En effet, cet ouvrage permet de faire le point sur les connaissances disponibles concernant la dissémination des contaminants organiques et inorganiques

dans les écosystèmes terrestres et leurs effets sur les vertébrés et les invertébrés. Il présente également les outils et les modèles potentiellement utilisables dans le cadre des évaluations environnementales. Par ailleurs, les auteurs de cet ouvrage proposent également des pistes de recherche et des travaux complémentaires à réaliser pour compléter le panel des outils utilisables lors de la caractérisation des milieux. Ils formulent enfin des recommandations sur la mise en place de réseaux de biosurveillance terrestre (comme cela se pratique dans le milieu aquatique) et mettent en avant certains organismes potentiellement utilisables comme des animaux sentinelles, certains étant actuellement testés dans le cadre du programme national de recherche ADEME sur la définition de bio-indicateurs de qualité des sols.

Nous souhaitons bien évidemment féliciter chaleureusement les auteurs qui se sont investis dans ce monumental travail avec enthousiasme et ténacité. Nous remercions également tous ceux qui y ont collaboré, et tout particulièrement François Ramade et Jean Louis Rivière qui ont pris le temps de relire méticuleusement et d'annoter cet ouvrage afin de l'enrichir.

Cet ouvrage s'adresse bien évidemment à la communauté scientifique travaillant sur le devenir et les effets des contaminants en milieu terrestre mais également aux organismes publics impliqués dans les évaluations environnementales, aux bureaux d'études spécialisés en environnement et aux laboratoires d'analyse. Nul doute qu'il trouvera un large public dans un monde en demande d'information sur les effets des contaminants dans notre environnement.

Antonio BISPO – Ingénieur Sols et Environnement
ADEME- Direction Productions et Énergies Durables - Service Agriculture et Forêt
Isabelle FEIX – Expert national Sols
ADEME- Direction Productions et Énergies Durables



Avant-propos

Notre participation aux séances de travail « Écotoxicologie des sols » de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) avec des spécialistes de différents horizons scientifiques et techniques, mais aussi des responsables de la surveillance de l'environnement, nous avait convaincus de l'intérêt que représente la prise en considération de la biologie des divers organismes vivants terrestres (microorganismes, mousses, lichens, plantes et animaux) dans l'analyse des impacts de substances naturelles ou synthétiques libérées dans la nature sur leur physiologie et sur le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Au cours de nos recherches sur les effets des contaminants chez des invertébrés du sol, nous avons fait le constat que si de nombreux travaux avaient montré que plusieurs espèces d'invertébrés étaient de véritables « macroconcentrateurs » d'éléments traces métalliques (ETMs) et que des vertébrés d'extrémité de chaînes alimentaires pouvaient « amplifier » dans leurs organes la concentration des pesticides contenus dans leurs proies, il n'existait pas de synthèse rassemblant ces données. Ainsi dans les années 2000, la bioaccumulation n'était que rarement considérée dans l'évaluation des risques pour les écosystèmes (de Vaufleury, 2005). Aussi la proposition de l'ADEME, nous invitant à réaliser une revue des connaissances sur la bioaccumulation des contaminants de l'environnement chez les animaux terrestres, nous a à la fois séduits et honorés.

Très rapidement, nous nous sommes rendus compte de l'ampleur et des difficultés de la tâche, déjà au niveau des définitions nombreuses et controversées de la biodisponibilité et de bien d'autres termes dont les équivalences ou différences ne sont pas évidentes.

Le monde animal terrestre étant très vaste et très divers, nous avons procédé d'une part au recueil du plus grand nombre possible de travaux publiés sur le sujet, et d'autre part à un regroupement des données par centres d'intérêt dans chaque grand groupe zoologique.

Cette présentation analytique ne donne pas une image synthétique de ce qui caractérise les écosystèmes terrestres, mais nous considérons cette « compilation organisée » comme un état des lieux et un outil à l'usage de personnes qui s'intéressent à l'écotoxicologie, aussi bien dans le domaine de la recherche que dans ses applications à la biosurveillance de l'environnement terrestre. Nous avons opté pour une présentation des groupes systématiques d'animaux par ordre de complexité anatomique croissante car elle est unanimement acceptée (avec quelques modifications au fur et à mesure du développement des connaissances, nous avons laissé les collemboles parmi les insectes bien que des données nouvelles les rapprochent des crustacés).

Les analogies anatomiques étant généralement assorties de processus physiologiques voisins et de modes de développement analogues, cette présentation permet parfois d'expliquer les mécanismes d'action des contaminants chez des espèces proches. De plus, les espèces citées n'étant pas présentes dans toutes les parties du monde, cela peut inciter à des recherches sur des espèces voisines sur d'autres sites qui pourraient fournir des renseignements comparables. L'un de nos objectifs était aussi de savoir si l'on pouvait retenir non seulement des « espèces » bioaccumulatrices, mais aussi peut-être des genres ou des classes d'espèces bioaccumulatrices.

Les niveaux de connaissances ne sont pas identiques pour tous les animaux, mais il paraît indispensable de s'appliquer à analyser le phénomène de bioaccumulation à l'échelle de la biodiversité, qui est menacée dans de nombreux secteurs terrestres de la biosphère, indépendamment des nationalités car les contaminants n'ont pas de frontières. Or, à l'analyse des ouvrages et des publications, on constate que de grandes parties du monde sont peu étudiées et ne disposent pas des moyens ou de la culture nécessaires pour le faire. Dans les pays dits « développés » (parfois très proches les uns des autres...), il apparaît aussi que la surveillance ou la biosurveillance tiennent une place plus ou moins importante, ce qui a des incidences sur l'évaluation objective des risques environnementaux.

Le rassemblement des connaissances sur le devenir (transferts et transformations) et les effets des contaminants déversés dans l'environnement et pouvant présenter des risques, par classes ou embranchements d'animaux, nous a conduits parfois à des répétitions. Celles-là ont été maintenues afin de permettre aux lecteurs qui seraient principalement intéressés par un seul groupe d'animaux de disposer d'informations générales permettant l'interprétation des données. Dans la mesure du possible, nous avons essayé de situer les investigations sur la biodiversité et la bioaccumulation dans leurs contextes écologiques. Cependant, il s'avère que des expérimentations en laboratoire et sur le terrain sont indispensables pour analyser et comprendre les mécanismes de ces phénomènes. En même temps que la présentation des différents aspects de la bioaccumulation et de la bioamplification, nous nous sommes intéressés aux relations éventuelles entre bioaccumulation et effets physiologiques pouvant être utilisées dans l'évaluation du risque écologique (ERE), qui correspond à une démarche utile et nécessaire pour organiser les étapes d'actions appropriées afin de protéger ou restaurer les fonctions écologiques perturbées.

Toutefois, la bioaccumulation est seulement l'une des facettes de l'écotoxicologie dont les bases fondamentales et les applications font l'objet de traités qui présentent les multiples branches de cette discipline en pleine évolution.

Dans notre revue, nous nous sommes efforcés de faire référence aux articles concernant l'Europe et les pays autres que ceux d'Amérique du Nord car la diffusion des connaissances des différents pays européens est handicapée par la pluralité des langages et les traités de synthèse anglophones résument principalement les travaux de langue anglaise. L'absence d'édition de revues internationales d'écotoxicologie en français est préjudiciable au transfert dans notre pays des connaissances entre les centres de recherche nationaux ou internationaux et les organismes d'application, ainsi qu'à l'information du public pour l'évaluation objective des risques environnementaux et leur prévention. Dans certains cas, l'information par les médias se résume à des cas d'accidents exceptionnels ou à des controverses trop largement médiatisées.

Nous espérons dans ce travail, ni simple compilation, ni synthèse explicative, ne pas avoir trahi ou déformé les résultats des auteurs ainsi que leurs interprétations ; si tel était le cas, nous nous en excusons et nous sommes prêts à apporter les rectificatifs nécessaires. Pour certaines études et conclusions, nous avons émis des critiques et des suggestions qui nous semblent justifiées, en particulier pour les extrapolations de modèles de bioaccumulation des contaminants en milieu aquatique à ceux du milieu terrestre. En effet, il y a actuellement un certain nombre de modèles originaux révélant que la bioaccumulation et la bioamplification (lorsqu'elle existe), obéissent à des mécanismes physiologiques caractéristiques des milieux terrestre et aérien, qui sont fondamentalement différents de ceux qui régissent la biologie des organismes aquatiques.

Nous n'avons pas la prétention de proposer de solutions miracles permettant de construire une approche parfaitement définie de l'étude et de la surveillance des sols contaminés et de l'environnement terrestre, comme le souhaiterait Suter (2003) dans sa critique du livre édité par Lanno (2003) résumant les actes du Pellston Workshop (septembre 1998). Cependant, le manque d'imagination (« a lack of vision ») des scientifiques qui s'occupent du sol évoqué par Suter (2003) est sans doute exagéré mais, comme ce dernier le reconnaît, le retard des connaissances en milieu terrestre par rapport au milieu aquatique (« soil scientists and assessors are attempting to catch up with their aquatic counterparts, but instead are falling behind ») est probablement dû pour une grande part à la complexité des sols et au moindre intérêt et soutien du public et des agences environnementales sur les effets écologiques des contaminations du sol. Nous pensons que dans le règne animal terrestre, il existe suffisamment d'espèces (invertébrés et vertébrés) représentatives de la biodiversité des principaux écosystèmes, qui possèdent des capacités de bioaccumulation (voir de bioamplification) aptes à être utilisées dans la biosurveillance des milieux en complément des tests classiques d'effets (létaux, sublétaux, action sur les biomarqueurs...).

Nous souhaitons que le panorama des très nombreuses recherches présentées aide au choix des animaux bioindicateurs d'accumulation les plus pertinents et suscite de nouvelles recherches (harmonisées) et collaborations entre centres de recherches, groupes industriels, agriculteurs, organismes législateurs et associations de sauvegarde de l'environnement, afin d'exploiter au mieux les connaissances acquises dans le domaine de la bioaccumulation des polluants à des fins de biosurveillance efficace.

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p c m { ' i g h v ' d r e p m



Remerciements

Nous n'avons pas fait de liste exhaustive de remerciements par crainte de faire des oublis, mais nous avons bénéficié de l'envoi de documents (publications, illustrations...) de très nombreux collègues et instituts que nous remercions chaleureusement.

Notre représentation de l'ADEME à l'AFNOR (Commission T90B Biosurveillance de l'environnement – T95E Écotoxicologie) et à l'ISO (International Standardisation Organisation ; ISO/TC190 – Qualité des sols – SC4 : Méthodes biologiques, WG2 : Faune du sol – et SC7 : Évaluation des sols et des sites, WG8 : Biodisponibilité) nous a permis de bénéficier des avis de spécialistes internationaux et de prendre la mesure de l'ampleur des tâches à accomplir pour l'évaluation des risques écologiques et la préservation de l'environnement terrestre à l'échelle de la biosphère.

Le plan général de la synthèse a été élaboré en collaboration avec L. Gomot et D. Savanne, initiateur de l'ouvrage, puis au fur et à mesure de l'avancement du travail, nous avons bénéficié des conseils d'I. Feix et d'A. Bispo de l'ADEME que nous remercions chaleureusement pour leur soutien dans ce travail de longue haleine.

J.L. Rivière a bien voulu nous assurer de son bienveillant soutien en examinant les versions successives de la synthèse et en nous suggérant des améliorations du manuscrit ; son expérience, sa compétence et son autorité en écotoxicologie ont été de précieux encouragements et nous lui sommes vivement reconnaissants pour sa collaboration et son aide spontanée.

À F. Ramade qui, malgré la lourde tâche que lui imposent les nouvelles éditions de ses nombreux ouvrages, a accepté de relire notre volumineuse compilation et l'a aimablement critiquée en l'amendant de ses connaissances encyclopédiques en écotoxicologie, nous témoignons notre admiration pour son œuvre et le remercions pour ses encouragements.

Enfin, la pluridisciplinarité de notre environnement universitaire régional, largement impliqué dans l'étude des effets de toutes sortes de stress environnementaux sur la biologie et l'écologie des organismes vivants, a constitué un milieu favorable à notre entreprise. Les divers échanges et collaborations internationaux établis au cours de la recherche des documents ont contribué à confirmer l'importance de la connaissance des charges en contaminants des animaux dans la mise en place de la biosurveillance de l'environnement terrestre.

Merci à V Bruyant pour son aide dans la réalisation des tableaux et le relevé d'une partie de la bibliographie.



Introduction

Les polluants (métalliques, organiques, organométalliques) doivent être considérés comme des intrants susceptibles d’agir sur le fonctionnement et la structure des écosystèmes. Si la nature et les propriétés intrinsèques des polluants conditionnent leur devenir dans l’environnement, de nombreux facteurs chimiques, physiques et biologiques vont moduler leur transfert. En particulier, une variable importante à prendre en considération pour évaluer les flux de polluants dans les écosystèmes est la biodisponibilité, concept complexe sur lequel les scientifiques débattent depuis trois décennies. Ainsi, biodisponibilité, bioconcentration, bioaccumulation et bioamplification sont des notions clés de l’écotoxicologie, science pluridisciplinaire qui étudie le devenir et les effets des polluants dans les écosystèmes (Ramade, 2007). L’évaluation de ces processus permet d’obtenir des informations fondamentales sur le transfert des polluants dans les différents compartiments des écosystèmes terrestres.

Notre objectif est de réaliser une revue des cas les plus typiques de bioconcentration, de bioaccumulation et de bioamplification mis en évidence tant pour les éléments traces métalliques que pour les composés organiques dans le milieu terrestre. Cette synthèse vise tout d’abord à rassembler les données existantes afin de proposer des axes de recherches, si possible concertées et coordonnées dans différents groupes animaux pour :

- préciser les connaissances sur les modes d’absorption, de transfert et de bioaccumulation des contaminants au sein des chaînes alimentaires ;

- établir dans quels cas existe une correspondance entre bioaccumulation des polluants et effets toxiques ;
- déterminer les espèces, écologiquement significatives, les plus aptes à fournir des informations sur la pollution de l'environnement (macroconcentrateurs) pour évaluer les dangers et les risques (biosurveillance).

Si ces informations revêtent un intérêt fondamental indéniable, leur utilisation à des fins appliquées s'avère également d'actualité comme en témoigne l'adoption de réglementations de plus en plus strictes visant à lutter contre les pollutions, à évaluer et prévenir les dangers potentiels des substances chimiques pour l'Homme et l'environnement. Ainsi la directive REACH (en anglais : *Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals*), adoptée le 18 décembre 2006 et entrée en application le 1^{er} juin 2007, implique une connaissance approfondie des risques pour l'environnement associés à l'usage de toutes les substances chimiques, produites ou importées, existantes ou nouvelles, à partir d'un volume annuel supérieur à une tonne. Ce sont ainsi quelques 30 000 substances chimiques qui devront être (ré)évaluées d'ici 2018 vis-à-vis de leur impact sur la santé publique et les écosystèmes. Ce travail colossal génère par conséquent des besoins accrus de recherche pour le développement d'outils de contrôle et de surveillance des polluants dans l'environnement et de leurs impacts potentiels.

Dans un souci de simplification et après avoir défini quelques notions essentielles relatives aux transferts des contaminants dans les écosystèmes terrestres, nous proposons un récapitulatif des recherches concernant la bioaccumulation et la bioamplification dans le règne animal, mais aussi en prenant des exemples dans le règne végétal qui représente le niveau des producteurs primaires dans les chaînes trophiques. Dans chacun des cas, nous recensons les principaux essais de biosurveillance utilisant des indicateurs biologiques d'accumulation. En discussion-conclusion, nous dégagerons les réflexions essentielles inspirées par l'état actuel des connaissances dans ces domaines et nous suggérerons quelques pistes de recherches coordonnées en harmonie avec les programmes déjà engagés par l'ADEME sur ces sujets.



Quelques définitions et rappels

Ce chapitre vise à définir les termes utilisés dans cet ouvrage. Les différents concepts traités n'étant pas tous stabilisés, ce chapitre ne cherche pas obligatoirement à imposer une définition, mais fait état des principales discussions en cours dans la communauté scientifique.

1.1 Biodisponibilité

Il existe une grande diversité de définitions de la biodisponibilité et même pour l'environnement aquatique, relativement plus homogène que le milieu terrestre, les spécialistes ne réussissent pas à donner une définition consensuelle (Dickson *et al.*, 1994) du concept proposé par Pavlou *et al.* (1977). Les définitions varient en fonction des disciplines et de leurs perspectives ; en particulier, il se pose de nombreuses questions suivant que l'on considère l'approche chimique (McMillen *et al.*, 2003 ; Peijnenburg *et al.*, 2007) ou biologique (Alexander *et al.*, 2003) de la biodisponibilité et qu'on la définisse en valeur absolue ou en valeur relative. Encore aujourd'hui, chimistes, biologistes animaux ou végétaux et écotoxicologistes tentent, au niveau national et international, d'unifier et de définir la biodisponibilité des contaminants (de Vaufleury *et al.*, 2011 ; Harmsen, 2007 ; ISO/FDIS 17042, 2007), ce qui témoigne de la nécessité de préciser les aspects conceptuels et opérationnels de la biodisponibilité retenus ici.



Photo 39 *Mulot sylvestre : Apodemus sylvaticus. Ordre des rongeurs ; corps + queue = 10 cm.*



Photo 40 *Musaraigne carrelet. Sorex araneus. Ordre des insectivores ; corps + queue = 7 cm.*



Photo 41 *Campagnol agreste* *Microtus agrestis* (tête + queue environ 13 cm).



Photo 42 *Lièvre commun d'Europe* (*Lepus europaeus*).