

# Contaminations métalliques des agrosystèmes et écosystèmes péri-industriels

Philippe Cambier, Christian Schwartz,  
Folkert van Oort, coord.

# Pour en savoir plus

Achetez d'autres exemplaires de cet ouvrage  
(papier)

Commentez ce livre en ligne

Recommandez ce titre à un ami, un collègue

Visitez [quæ.com](http://quæ.com)

# Contaminations métalliques des agrosystèmes et écosystèmes péri-industriels

Philippe Cambier,  
Christian Schvartz,  
Folkert van Oort,  
coordinateurs

Éditions Quæ  
c/o Inra, RD 10, 78026 Versailles Cedex

## Collection *Update Sciences & Technologies*

La mise à l'épreuve. Le transfert des connaissances scientifiques en questions  
Christophe Albaladejo, Philippe Geslin, Danièle Magda, Pascal Salembier  
2009, 280 p.

*Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*  
Nadine Brisson, Marie Launay, Bruno Mary, Nicolas Beaudoin  
2008, 304 p.

Les nouvelles ruralités à l'horizon 2030  
Olivier Mora  
2008, 112 p.

L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores  
Benoît Dedieu, Eduardo Chia, Bernadette Leclerc, Charles-Henri Moulin, Muriel Tichit  
2008, 296 p.

*Landscape: from knowledge to action*  
Martine Berlan-Darqué, Yves Luginbühl, Daniel Terrasson  
2008, 312 p.

*Multifractal analysis in hydrology. Application to time series*  
Pietro Bernardara, Michel Lang, Éric Sauquet, Daniel Schertzer, Ioulia Tchiriguyskaia  
2008, 58 p.

Analyse multifractale en hydrologie. Application aux séries temporelles  
Pietro Bernardara, Michel Lang, Éric Sauquet, Daniel Schertzer, Ioulia Tchiriguyskaia  
2008, 58 p.

Paysages : de la connaissance à l'action  
Martine Berlan-Darqué, Yves Luginbühl, Daniel Terrasson  
2007, 316 p.

Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations  
Michel Lang, Jacques Lavabre  
2007, 232 p.

Territoires et enjeux du développement régional  
Amédée Mollard, Emmanuelle Sauboua, Maud Hirczak  
2007, 240 p.

## Préface

La prise en compte par les décideurs politiques des contaminations métalliques des agrosystèmes est apparue au début des années 1970, peu après que le Club de Rome eut lancé son cri d'alarme sur les risques liés à la pollution des sols agricoles par l'abus de fertilisants. Les années qui ont suivi ont vu en France la création du ministère de l'Environnement et la multiplication d'actions de recherche autour de la capacité des sols à recevoir et à épurer de manière durable les déchets qui y étaient épandus, en particulier des boues de stations d'épuration urbaines plus ou moins chargées en métaux potentiellement toxiques. C'était au début des années 1980, avec les programmes du Srétie. Il s'agissait alors essentiellement d'« actions de prévention ». La qualité des terres, et donc celle des récoltes et de l'eau, était concernée et cela touchait directement la santé publique.

Au début des années 1990, le problème des sites pollués a pris de l'ampleur, d'abord aux États-Unis et dans certains pays d'Europe du Nord. À la différence des contaminations précédentes, celles-ci étaient ponctuelles et massives, justifiant pleinement le terme de « pollutions ». La réponse à ce problème fut composée d'« actions préventives », se traduisant par des réglementations nouvelles telles que celles sur les installations classées, mais aussi d'« actions curatives ». Ainsi, la France a engagé en ce sens, dès 1993, trois grands types de démarches, à savoir un inventaire des sites — ce qui conduira à la mise en place de la base de données Basias du BRGM —, la réalisation d'un *Guide de gestion des sites pollués* en 2000 par le BRGM pour le ministère de l'Environnement, et enfin le rapport Hugon-Lubeck ayant pour objet d'aborder le problème de la responsabilité vis-à-vis des sites orphelins et celui de leur réhabilitation. L'importance des enjeux explique, comme on le verra, que de nombreux travaux de recherche soient financés par les pouvoirs publics nationaux à travers l'Europe. Le programme européen Clarinet (2000) a eu pour objet d'en faire l'inventaire.

Ces recherches élaborent les bases scientifiques et techniques pour une gestion durable des sols contaminés et des eaux souterraines associées. En effet, sur ces sites, la remédiation naturelle est en général très lente, et les coûts de dépollution industrielle sont colossaux. Le problème du retour ou non à l'état d'origine du milieu se trouve alors posé. Cet objectif semble en fait peu réaliste, et la stratégie d'intervention est plutôt basée sur

une approche raisonnée en termes d'acceptabilité d'un risque et d'évaluation d'un rapport coût/bénéfice. Se pose ensuite un problème de priorités des actions. C'est actuellement un des points majeurs de discussion, voire d'achoppement, autour du projet de directive cadre sur les sols de l'Union européenne.

L'évaluation des risques est généralement limitée au site pollué lui-même. Cependant, la contamination et les risques qu'elle entraîne ne s'arrêtent pas à la clôture d'une friche industrielle. Le site pollué n'est qu'une partie d'un système beaucoup plus vaste au sein duquel les éléments potentiellement toxiques ont été et sont encore affectés par des mouvements de transferts complexes, en surface ou en profondeur, vers les eaux ou vers les organismes vivants.

Cet ouvrage sur les contaminants métalliques des agrosystèmes péri-industriels aborde la globalité du problème et de ses enjeux à travers une recherche intégrée.

Il est original à plusieurs titres.

Il synthétise des travaux réalisés dans le cadre d'un appel à propositions de recherches sur la question des risques liés à la pollution des friches industrielles et sur les possibilités de réhabilitation, appel lancé en 1995 par le ministère de l'Environnement. Il propose un couplage entre les pollutions ponctuelles d'un site et celles, diffuses, de sa périphérie, pour offrir un diagnostic et une analyse des impacts et présenter des solutions.

Pour cela, des disciplines très différentes, des méthodes d'évaluation des dangers et des risques ont été associées, faisant appel d'un côté aux spécialistes des matériaux (géologues, minéralogistes, géochimistes, hydrologues...) plus fréquemment engagés dans l'étude des sites pollués, et de l'autre aux pédologues et spécialistes du vivant (microbiologistes, physiologistes végétal, agronomes...) plus généralement concernés par les impacts des pollutions diffuses. Les impacts sur notre environnement sont devenus ainsi le cœur de l'ouvrage. Comment aborder en effet le problème du risque si la cible n'est pas identifiée et si l'exposition est mal connue ?

Un travail de recherche n'est véritablement fructueux que s'il nous surprend. Le travail sur les collemboles est ici un exemple parmi d'autres. On ne pense généralement pas à ces arthropodes lorsqu'on parle de pollution métallique ; ces insectes sont pourtant des indicateurs sensibles à l'intensité de la pollution : leur comportement et leur habitat en sont profondément modifiés, avec toutes les conséquences écologiques qui en résultent.

Chaque site a ses spécificités. L'appel à recherches avait orienté les propositions vers un site unique, celui de Mortagne-du-Nord, où la production de métaux non ferreux a affecté les environs durant plus de 50 ans. L'ouvrage concerne quelques autres sites, dont le périmètre de Métaeurop où l'État et la région Nord-Pas-de-Calais ont aussi investi dans des travaux scientifiques majeurs. Le lecteur ne devra donc pas chercher ici des recettes mais plutôt des modèles de ce qui peut être fait dans l'esprit d'une évaluation des différentes composantes du risque environnemental, intégrant les multiples aspects du fonctionnement d'un milieu pollué par des métaux, c'est-à-dire dans l'esprit de Rio (1992).

André-Bernard DELMAS,  
directeur de recherches à l'Inra,  
ancien chargé de mission « Sols » au SRP du Meeddat

# Table des matières

<b>Préface</b> .....	3
<b>Remerciements</b> .....	7
<b>Introduction</b> .....	9
<b>Partie 1 – Devenir des métaux</b> .....	13
Pollutions métalliques : distributions hétérogènes du Zn, Pb, Cd, et Cu et relations avec l'usage des sols .....	15
Suivi <i>in situ</i> de la composition des eaux gravitaires dans des sols sableux contaminés : déterminisme de la mobilité de Zn et Pb .....	45
Contribution des colloïdes bactériens au transfert rapide de cadmium et de zinc dans les sols sableux .....	67
<b>Partie 2 – Transfert sol-plante-homme</b> .....	83
Exposition de végétaux aux éléments traces, évaluation et gestion des risques ....	85
Utilisation agricole de sols contaminés par des ETM dans le sud-ouest de la Chine .....	117
Évaluation du degré de contamination des pelouses .....	129
Transfert d'ETM toxiques des sols arables vers les pommes de terre, le froment et l'épeautre .....	149
Effets du pH de la rhizosphère sur la mobilisation de Zn par les plantes .....	163
Fractionnement cinétique des ETM des sols et application à la prévision de leur biodisponibilité .....	177
<b>Partie 3 – Faune du sol</b> .....	191
Impact des ETM sur les communautés de macro-invertébrés et de micro-organismes de sols du Nord-Pas-de-Calais .....	193
Biodisponibilité des métaux et faune invertébrée du sol .....	207
Dynamique du peuplement de collemboles sous l'effet d'une pollution croissante par des ETM .....	219
Détection de la métallothionéine chez <i>Eisenia andrei</i> : trois méthodes comparées .....	229
Adjonction de cendres LFC à des sols contaminés : effets sur <i>Eisenia andrei</i> ...	239
<b>Partie 4 – Métallophyte</b> .....	251
Structuration génétique spatiale à l'échelle d'une population d' <i>Arabidopsis halleri</i> , espèce tolérante aux ETM .....	253

Origine des populations métalloïdes d' <i>Arabidopsis halleri</i> .....	265
Variation de l'accumulation des métaux chez des populations métalloïdes et non métalloïdes de <i>Thlaspi caerulescens</i> .....	277
Adaptation des végétaux aux milieux pollués par des métaux toxiques et phytoremédiation – cas de la région Languedoc-Roussillon .....	287
<b>Sigles</b> .....	299
<b>Liste des auteurs</b> .....	301

## Remerciements

Par-delà le charme du Plat Pays, des collines du Boulonnais ou du bocage de l'Avesnois, la région Nord-Pas-de-Calais a payé un lourd tribut au riche passé industriel reposant sur l'exploitation de son charbon. Derrière cette formule se cachent notamment des sols discrètement mais souvent fortement contaminés par les émissions des installations métallurgiques passées. Partagés entre ville et campagne, champs et jardins, loisirs et production agroalimentaire, ces sols ne pouvaient être abandonnés au fil du temps. Des études et des travaux de recherche ont donc été conduits, visant à évaluer les risques et à optimiser la gestion de ces sols, dans des contextes d'utilisation très divers.

Ces travaux n'auraient cependant pu être menés isolément et doivent beaucoup aux réseaux régionaux, nationaux et internationaux qui se sont progressivement établis avec l'aide du conseil régional Nord-Pas-de-Calais, des services des ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement et de l'Union européenne.

Que soient donc ici particulièrement remerciés la direction de l'Isa, qui a accueilli le colloque « Devenir et effets des contaminants métalliques dans des agrosystèmes et écosystèmes péri-industriels », ainsi que l'équipe du laboratoire « Sols et Environnement » qui a assuré la logistique, l'organisation et la convivialité de ces journées, les membres du comité scientifique, et enfin le service de la recherche et de la prospective du ministère de l'Environnement qui a lancé ces travaux et accordé son soutien dans le cadre du programme Gessol.

Le présent ouvrage est le fruit d'un important travail mené ensuite par les intervenants de ces journées, afin de présenter leurs travaux de façon complète et coordonnée, bien au-delà de ce qui est habituellement demandé pour les actes de colloques scientifiques. Leurs efforts... et leur patience ont été indispensables pour arriver au terme de ce projet. Nous n'oublions pas non plus les différents relecteurs qui ont anonymement apporté le regard extérieur et les conseils nécessaires à l'homogénéisation de l'ensemble des textes.



# Introduction

Dans la plupart des régions industrialisées, les sites métallurgiques ont contaminé, durant parfois plus d'un siècle et dans un rayon de plusieurs kilomètres, les sols urbains, agricoles et forestiers, ainsi que d'autres terrains plus ou moins anthropisés. Les contaminants en cause sont des métaux ou métalloïdes, normalement en traces dans les milieux et souvent appelés « métaux lourds », ou plus justement « éléments traces métalliques » (ETM). Ce sont aussi pour une majeure partie d'entre eux des oligo-éléments, utiles et même indispensables aux organismes vivants, mais qui tous peuvent devenir toxiques au-delà de certains seuils de concentrations. Leur présence dans les sols représente donc un risque pour la durabilité des écosystèmes, la qualité des produits végétaux, et *in fine* pour la santé humaine. La majeure partie des ETM incorporés aux sols restent en place, car ils sont non dégradables, peu solubles et fortement retenus par les différents constituants des sols. Leur mobilité n'est cependant pas nulle, et leur migration en profondeur ou vers les biotopes voisins a été mise en évidence sur différents sites. Leur biodisponibilité est aussi en cause au travers de la contamination de la chaîne alimentaire, et des effets toxiques peuvent s'exprimer à différents niveaux des chaînes trophiques ; elle dépend de nombreux facteurs liés aux sols et aux organismes. Les moyens de décontamination de surfaces étendues modérément polluées sont souvent inapplicables, notamment pour des raisons économiques. Des mesures permettant de réduire la mobilité ou de corriger la toxicité des ETM sont en revanche possibles, ainsi que des recommandations quant à l'usage des sols et de leurs productions. Les écosystèmes et les organismes colonisant les milieux contaminés possèdent eux-mêmes un certain pouvoir d'adaptation et de correction des effets en présence de substances toxiques.

Le présent ouvrage s'attache à éclairer, à partir de résultats de différents programmes de recherche sur les sites et sols contaminés par des métaux, sur le devenir de ces contaminants dans les sols agricoles, les effets et les risques relatifs aux plantes cultivées ou poussant spontanément en zone péri-industrielle, les effets sur les organismes et notamment sur la mésofaune des sols. Enfin, la question de l'adaptation de végétaux aux milieux fortement chargés en métaux est abordée au travers de quelques travaux visant à la compréhension de leur développement et à la maîtrise du choix d'espèces qui peuvent recouvrir les surfaces polluées et réduire ainsi les risques de transfert.

Dans une première partie, la contribution de van Oort *et al.* présente d'abord une petite région affectée par l'activité d'un ancien complexe métallurgique (Mortagne-du-Nord) et qui est le cadre de plusieurs études présentées ensuite. Ces auteurs décrivent la distribution des contaminants, zinc et plomb principalement, à l'échelle kilométrique, décimétrique et à l'échelle des constituants des sols. Ils mettent en évidence les principaux facteurs de cette distribution : sources, climat, pratiques humaines, couvert végétal et usage des

terrains. Cet usage intervient directement et indirectement sur le fonctionnement des sols, et *in fine* sur le devenir des métaux. Un des processus de la migration des contaminants évoqué par van Oort *et al.*, le lessivage de particules minérales, organominérales et biologiques dans les sols sableux de la région, est suivi directement et quantifié par Citeau *et al.*, à l'aide de lysimètres installés dans la même région. Enfin, Guiné et Martins étudient plus particulièrement, au laboratoire, le rôle des bactéries et de la force ionique de la solution sur le transport du cadmium et du zinc dans la porosité des sols.

Un second volet important concerne les transferts sol-plante-homme. Mench *et al.* passent en revue, à partir de l'exemple des sols du même périmètre agricole de la région de Mortagne-du-Nord, les différentes approches de l'évaluation de la contamination des sols et des plantes par des ETM, ainsi que l'évaluation des risques pour l'homme. Schwartz *et al.* décrivent une situation dans la région de Yunnan (Chine) où des problèmes analogues sont soulevés : réglementation, référentiels et évaluation des risques réels, relations entre contamination des sols et des récoltes, en relation avec certaines pratiques. Pruvot *et al.* ont mené des travaux détaillés sur une autre voie d'exposition de l'homme aux éléments toxiques déposés autour d'un autre site métallurgique (Metaleurop) : les pelouses urbaines. En Belgique, De Temmerman et Hoening recherchent aussi le lien entre les caractéristiques agrochimiques des sols et les teneurs des récoltes en cadmium, plomb, arsenic et mercure ; pour certains éléments, ils soulignent l'importance de la contamination par dépôt atmosphérique sur les parties aériennes. Straczek *et al.* étudient un autre mécanisme favorisant cette fois le prélèvement de zinc par les racines, sur des systèmes modèles au laboratoire mais aussi sur un sol contaminé réel du Nord : l'acidification par la plante de sa rhizosphère. Enfin, Bermond *et al.* proposent une méthode opérationnelle de l'évaluation de la fraction biodisponible de métaux dans les sols, basée sur l'étude cinétique d'extractions chimiques.

Outre les risques pour la santé humaine, la contamination des sols par des métaux toxiques affecte les écosystèmes et d'abord celui du sol lui-même. Quatre contributions concernant la faune et la mésofaune du sol illustrent ceci. Nahmani *et al.* montrent que la contamination métallique, toujours dans le périmètre de l'ancien complexe industriel, diminue la densité, et surtout modifie la structure des populations ; une conséquence sur le fonctionnement du sol se situe au niveau des réseaux de pores créés par les vers de terre, et de la bioturbation en général. Descamps *et al.* précisent les ordres de grandeur des teneurs critiques en cadmium, plomb ou zinc pour différents groupes d'espèces, et les phénomènes de bioaccumulation dans des chaînes allant jusqu'aux gastéropodes. Gillet et Ponge relèvent les changements de structure de communautés de collemboles, et certaines adaptations de leur comportement à des niveaux de pollution élevée (dans d'anciens dépôts d'effluents métallifères) : habitat, alimentation, reproduction. Grumiaux *et al.* évaluent les performances de méthodes biochimiques et de biologie moléculaire appliquées au ver *Eisenia andrei* pour détecter la métallothionéine, indicateur d'exposition à une toxicité métallique. Enfin, Demuynck *et al.* abordent les effets des amendements visant à corriger cette toxicité : des cendres alcalines peuvent dans une certaine mesure diminuer la biodisponibilité et la toxicité de métaux pour *Eisenia andrei*, mais également augmenter la mortalité de ce dernier, selon les conditions d'ajout au sol et le type de cendre.

Les métallobytophytes sont des plantes tolérantes de fortes concentrations en métaux normalement toxiques pour d'autres plantes. Selon les espèces, elles peuvent stocker des quantités importantes de certains ETM dans leurs parties aériennes ou seulement au niveau des

racines. Par ailleurs la tolérance et le caractère accumulateur de métaux d'une espèce telle qu'*Arabidopsis halleri* ou *Thlaspi caerulescens* ne sont pas du tout uniformes, mais dépendent des populations, voire des individus, souvent en lien apparent avec les conditions locales. Van Rossum *et al.*, d'une part, et Pauwels *et al.*, d'autre part, étudient les relations spatiales et de descendance entre génotypes d'*A. halleri* et les caractéristiques chimiques et édaphiques du milieu, ainsi que les modes de dissémination et de reproduction ; on en déduit que les caractères de tolérance et d'accumulation peuvent être acquis par des mécanismes multiples à partir de populations non tolérantes d'*A. halleri* exposées aux métaux toxiques. Dechamps *et al.* font le point dans le même domaine sur l'espèce *T. caerulescens*, et étudient aussi la variation de paramètres telles que la biomasse. Ces travaux ouvrent des perspectives pour la sélection de génotypes intéressant la phytoremédiation et la phytoextraction. Dans un dernier chapitre, Frérot *et al.* recherchent les espèces et combinaisons performantes pouvant se développer en conditions hydroponiques, puis *in situ* et en utilisant des mélanges, afin de réduire la mobilité des métaux toxiques dans des sites affectés par l'extraction du zinc et du plomb dans une région minière du Gard.



Partie I

## **Devenir des métaux**



## Chapitre 1

# **Pollutions métalliques : distributions hétérogènes du Zn, Pb, Cd, et Cu et relations avec l'usage des sols**

FOLKERT VAN OORT, MÉDARD THIRY, TOINE JONGMANS, HOCINE BOURENNANE, PHILIPPE CAMBIER, ISABELLE LAMY, LAÉTITIA CITEAU, JOHANNE NAHMANI

Ce travail présente une synthèse de plus de 10 ans de recherches sur le devenir de polluants métalliques (Zn, Pb, Cd, Cu) dans les sols d'un site pollué, celui de Mortagne-du-Nord (59) — terrains industriels et sols agricoles et forestiers environnants. Ce site *sensu largo*, d'une superficie d'environ 5 000 ha, représente globalement la zone affectée, mais à des degrés variables, par plus de 60 ans d'activités de l'industrie métallurgique et chimique. Ce travail se focalise sur les distributions verticales des teneurs totales en métaux dans des sols représentatifs de différents secteurs pollués. Le développement de ces sols a été plus ou moins contraint par la présence de polluants métalliques. Ainsi, chaque secteur se caractérise par un niveau de pollution en métaux, avec des profils verticaux de teneurs totales caractéristiques, parfois une voie spécifiques de dissémination des polluants, une nature et un usage particulier des sols et/ou encore un type de couverture végétale. Sur le site de l'ancien complexe industriel, il ne s'agit pas de sols au sens pédologique du terme, mais d'ANTHROPOSOLS ARTIFICIELS, constitués de l'entassement de matériaux divers de déchets industriels parfois sur plusieurs mètres. Nous discutons des facteurs intrinsèques ou externes au sol qui régissent le devenir des polluants métalliques dans les sols, et les processus et mécanismes de leur rétention ou migration : phyto-immobilisation, néogenèse de phases métallifères secondaires, transport colloïdal, bioturbation, lixiviation conduisant parfois à l'élimination de grandes quantités de métaux hors du solum, vers la nappe hydrographique. Enfin, en établissant des stocks de métaux cumulés sur 1 m de profondeur du sol et en extrapolant ces données à l'échelle de la surface des différents secteurs, un ordre de grandeur des tonnages de

métaux aujourd'hui présent dans le site *sensu largo* est proposé. Ces calculs indiquent la présence de près de 12 000 t de métaux (Zn + Pb + Cd + Cu) dans les sols du périmètre de sols agricoles et forestiers, à comparer à environ 19 000 t concentrées sur l'ancien site industrielle, totalisant ainsi plus de 30 000 t de métaux sur une surface d'environ 5 000 ha.

## Introduction

De nombreuses études sont menées aujourd'hui, qui visent à porter un diagnostic sur l'ampleur et les effets toxicologiques de pollutions métalliques d'origine industrielle pour l'environnement et pour l'homme. Elles mettent généralement en jeu des approches de recherche sur la spéciation des métaux dans les sols, sur les processus et les mécanismes de leur rétention dans les sols, et sur leur passage dans les êtres vivants (biodisponibilité) ou leur migration vers les nappes (mobilité). Cependant, la pertinence de telles études dépend très largement de la qualité de l'échantillonnage, qui doit être adapté à la complexité d'un site pollué. Car c'est elle qui garantit la représentativité des résultats et donc la validité des interprétations, par exemple en termes de recommandations de réhabilitation. Trop souvent, par manque de moyens ou de temps, par absence d'autorisation ou tout simplement par ignorance de l'organisation du milieu naturel, la phase d'échantillonnage se limite à un ou quelques prélèvements dans les matériaux de surface. Le présent travail expose des résultats de travaux de recherche obtenus par plusieurs équipes sur la friche industrielle de la métallurgie de métaux non ferreux de Mortagne-du-Nord et sur les sols des agrosystèmes environnants. L'essentiel de ces recherches s'est déroulé au cours de la période 1995 à 2004 dans le cadre d'un programme de recherche « Devenir et impacts des polluants présents dans les friches et sites industriels », piloté par le ministère de l'Environnement (Thiry et van Oort, 1996 ; Cambier, 2001). Un des objectifs de nos équipes dans ce programme consistait à étendre les études de reconnaissance et de mécanismes au-delà du terrain d'un site industriel proprement dit aux sols des agro- et écosystèmes environnants. Il s'est rapidement avéré nécessaire de considérer non pas *la* pollution d'un site mais *les* pollutions de différents secteurs composant un site qui se sont individualisés au cours du temps, sous la contrainte des activités socio-économiques locales et de l'utilisation des sols par l'homme.

Ces équipes ont abordé différents aspects liés à la pollution des sols par des métaux, dans des secteurs et des sites bien identifiés quant à l'origine des pollutions et la nature et l'usage des sols. Ces aspects concernent aussi bien les impacts de métaux sur la biodiversité de la faune (IRD Bondy) que les transferts sol-plante des métaux (Inra Bordeaux et Versailles), leur devenir dans les sols en termes de distribution et de localisation, à différentes échelles, leur migration *via* la solution du sol (Inra Versailles), ou encore la phytoremédiation (Inra-Ensaia Nancy). Au-delà d'une multitude de rapports d'étape et finaux pas toujours facilement accessibles au public, ces recherches ont donné lieu à un grand nombre de publications, aussi bien dans des revues scientifiques spécialisées que dans des ouvrages de synthèse et/ou de restitution. Les principales références des contributions à ce programme, et en particulier celles traitant les sols environnants, sont présentées à la fin de ce travail.

En outre, les recherches sur le devenir des polluants dans les sols du périmètre agricole ont à tout moment été menées en concertation directe et en phase avec les travaux de reconnaissance, de caractérisation et de suivi du site industriel (ENSMP Fontainebleau). De ce fait, nous avons bénéficié de leurs résultats, en particulier de la connaissance

détaillée de la nature, des caractéristiques et de l'évolution des différents types de déchets, qui constituaient les sources. Cette connaissance nous a souvent guidés dans la recherche de la localisation des éléments trace dans les sols. Enfin, la confrontation dans ce travail de résultats obtenus dans les différents secteurs pollués permet de mieux apprécier les quantités de métaux polluants en jeu, et de fournir des éléments pour raisonner les stratégies de réhabilitation et de gestion des sites et sols pollués.

## Cadre environnemental

### *Hétérogénéité du milieu*

La pollution des sites industriels et des sols périphériques se caractérise presque toujours par une très grande hétérogénéité qui apparaît, au premier abord, peu organisée. En effet, au cours de l'activité d'un site de métallurgie, des quantités diverses de déchets polluants sont disséminées dans l'environnement, à la fois par voie terrestre, hydrique et/ou aérienne. La taille et la nature des déchets arrivant aux sols sont très variables, selon la voie de dissémination. Le devenir des polluants à la surface du sol dépend ensuite de la nature du sol et de son utilisation par l'homme. Par conséquent, un site pollué *sensu largo* se différencie au cours du temps en plusieurs secteurs caractérisés par un degré de pollution et un système sol- plante qui reflètent les multiples facettes de l'activité socio-économique et agricole dans la région (Thiry et van Oort, 1999a,b ; van Oort *et al.*, 2002b). Les facteurs qui régissent cette hétérogénéité sont en partie externes (direction des vents dominants, distance, obstacles), anthropiques (travaux liés aux infrastructures, gestion des sols) ou intrinsèques aux sols (nature pédologique, composition minéralogique, texture, activité biologique). L'ensemble de ces facteurs détermine les quantités et la manière dont les polluants métalliques s'incorporent au sol, s'altèrent dans des conditions physico-chimiques des sols, et libèrent des métaux qui seront ensuite redistribués sur d'autres constituants organo-minéraux par le biais du cycle biogéochimique spécifique aux sols.

### *Spécificité de la pollution*

L'industrie métallurgique produit de grandes quantités de déchets, grossiers ou fins, plus ou moins riches en métaux. La dissémination des polluants par la route (transport de déchets, travaux d'infrastructure), par l'eau (curage de sédiments) ou par l'air (poussières), est à l'origine de contaminations locales fortes (pollutions concentrées), ou générales (pollutions diffuses de proximité). L'importance de la pollution décroît inversement avec la distance par rapport au site (Godin *et al.*, 1987). Mais ces pollutions de nature minérale sont très différentes des contaminations liées à l'épandage de déchets dans les sols (boues, composts d'ordures ménagères, eaux usées, sédiments de curage), où les polluants sont liés à des composés organiques, qui servent en quelque sorte d'antidote à leurs effets toxiques potentiels (van Oort *et al.*, 2008). Dans notre cas, il s'agit de polluants minéraux, formés dans des conditions de température et/ou de pression très différentes de celles qui règnent dans les couches supérieures des sols. Ainsi, les particules de déchets — surtout les plus fines — s'altèrent, les phases minérales réduites (sulfures) s'oxydent et s'hydrolysent, et les métaux sont libérés dans la solution du sol. Cette libération des métaux s'opère selon leur présence dans des phases minérales plus ou moins stables dans les sols : sulfures, oxydes, silicates. Ceci représente par conséquent un risque de mobilisation variable au cours du temps.

### *Redistribution des métaux dans les sols*

Dans la région de Mortagne-du-Nord, les métaux disséminés à partir du site industriel vers les sols environnants se retrouvent incorporés dans des sols sableux, riches en quartz, en présence de minéraux argileux à la fois peu abondants et peu réactifs et d'un taux de matières organiques faible (en général < 2 %). Les risques de mobilité de ces métaux en milieu sableux sont donc *a priori* non négligeables. Par conséquent, si des teneurs en métaux observées dans les horizons de surface sont généralement assez fortes, on ne peut rien conclure quant à leur immobilisation. En effet, pour établir un diagnostic de la mobilité des polluants, il faut également étudier leurs distributions dans les horizons sous-jacents, avec des approches méthodologiques et des outils analytiques adaptés, et des échelles d'observation appropriée.

### Motivations scientifiques et objectifs

#### *Signification de la teneur totale en métaux*

L'importance d'une pollution des sols est encore souvent évaluée au travers de la teneur totale en polluants d'un ou de quelques échantillons, dont la localisation et le mode de prélèvement ne sont pas toujours bien renseignés. La teneur totale représente donc une quantité d'éléments métalliques ( $X$ ) dans un volume de sol ( $Y$ ), déterminée à un moment ( $T$ ). Compte tenu de l'hétérogénéité spatiale qui caractérise les sites pollués, le prélèvement d'échantillons qui doivent servir *in fine* à établir un diagnostic de l'état de la pollution, et par là même à raisonner la gestion future du site et des sols, est une affaire hasardeuse... La reconnaissance exhaustive du site pollué, prenant en compte l'historique industriel et socio-économique local, les aspects pédogéochimiques des sols ainsi que leur gestion, apparaît indispensable pour comprendre la structure en mosaïque d'éléments imbriqués des pollutions, mais aussi pour définir des stratégies d'échantillonnages adaptées aux exigences inhérentes à des études précises. À défaut de disposer de telles données globales de reconnaissance, il faut se donner le temps et les moyens de les acquérir...

#### *Échelles d'étude*

Des études de diagnostic ou de pronostic des sites pollués se font à des échelles d'approches très variables (Schmitt *et al.*, 2001), de la cartographie de teneurs totales dans les sols d'une petite région ou d'un bassin versant jusqu'à des études fines de spéciation chimique à l'échelle des constituants, voir à l'échelle atomique. Très rarement, des études combinent les différentes échelles. Selon l'échelle d'étude choisie, les données sur la distribution des polluants font ressortir différents facteurs, soit intrinsèques, soit extrinsèques aux sols. Il est donc important de s'assurer que l'échelle d'approche scientifique correspond bien au type d'informations recherchées.

#### *Objectifs*

Ce travail vise à décomposer la complexité d'un site pollué par une synthèse des travaux de recherche menés sur des sols dans la région de Mortagne-du-Nord. Ces études concernent des sols plus ou moins pollués de différents agro- et écosystèmes naturels et anthropisés, que l'on peut distinguer sur la base de relations entre *le degré de pollution, la nature des sols et de la couverture végétale et leur usage par l'homme*. Pour chaque système identifié, nous détaillerons successivement l'origine de la pollution métallique,