



**HAL**  
open science

## Gestion Sites et sols pollués - réhabilitation des sols

Valérie Sappin-Didier

► **To cite this version:**

Valérie Sappin-Didier. Gestion Sites et sols pollués - réhabilitation des sols. Master. EXCE Science de la terre et Environnement, Ecologie, spécialité “ Ecotoxicologie et Chimie de l’environnement ”, Université Bordeaux 1, France. 2024. hal-04712450

**HAL Id: hal-04712450**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04712450v1>**

Submitted on 27 Sep 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Réhabilitation des sols pollués

**Valérie Sappin-Didier**  
valerie.sappin-didier@inrae.fr



MASTER II – EXCE MASTER II – EXCE – 2024 - 2025

UE : Ecotoxicologie terrestre - Gestion et remédiation des sols contaminés



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Plan

- I. Sites et sols pollués ?
- II. Réglementation et Gestion d'un sol pollué : principales composantes d'une pollution
- III. Méthodes de réhabilitation des sols pollués
- IV. Cas particulier : Les sols agricoles
- V. Méthodes biologiques : phytoremédiation (travaux de recherche)
- VI. Immobilisation *in-situ* (travaux de recherche)
- VII. Evaluation de l'efficacité d'une méthode de réhabilitation
- VIII. Surveillance des sols et Conclusion



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# I - Qu'est-ce-qu'un sol ou un site pollué ?



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Qu'est-ce-qu'un sol ou un site pollué ?

Selon le Ministère chargé de l'Environnement,  
un site pollué est :



Site SO.DA.IN à Saix (81)  
© ADEME

« Un site pollué est un site qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement. »

*Pollution ≠ Contamination*

*Source : glossaire à consulter sur la base Basol du Ministère de l'Ecologie et du développement durable.*



Mine d'or – Chatelet (France)

# Qu'est-ce-qu'un sol ou un site pollué ?

Dues à

- **sites industriels, miniers, ... en activité ou abandonnés**
- Et autour de ces sites des pollutions dues à des retombées de **rejets atmosphériques** accumulés **au cours des années** voire des décennies.
- d'anciennes pratiques sommaires **d'élimination des déchets** (dépôts de déchets ou de produits chimiques abandonnés par entreprises ou due à pratiques frauduleuses d'élimination de déchets),
- des **fuites** ou à des **épandages de produits chimiques**, accidentels ou pas.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Sol ou un site pollué

## Les grandes catégories de pollution

- pollutions accidentelles : déversement ponctuel dans le temps de substances polluantes
- pollutions chroniques : apports de longues périodes

## Pollutions ponctuelles ou diffuses

Ponctuelle : présence ponctuelle de fortes [substances dangereuses] non confinées dans les sols et sous-sols

= "sites localement contaminés" (NF ISO 11074 -1, 1997).

Diffuse : dispersion de l'accumulation de substances dangereuses sur d'importantes surfaces de sols (NF ISO 11074-1,1997),

Pas une, mais plusieurs sources de pollution, pas toutes identifiées

- agricole, industrielle, naturelle
- différentes voies de disséminations

Contaminants variés (polluants organiques (CTO) ou inorganique ( exemple ETM))

Concentrations en contaminants variables, effets toxiques ?



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Sol ou un site pollué



**usine de Metaleurop Nord à  
Noyelles- Godault (Pas-de-Calais)**



**Ancienne exploitation à ciel ouvert du cuivre  
à Murdochville en Gaspésie (Canada)**



# Sol ou un site pollué

## Mine de cuivre à ciel ouvert de Bingham canyon (Salt Lake City) Utah) (Photo : A. Berger)

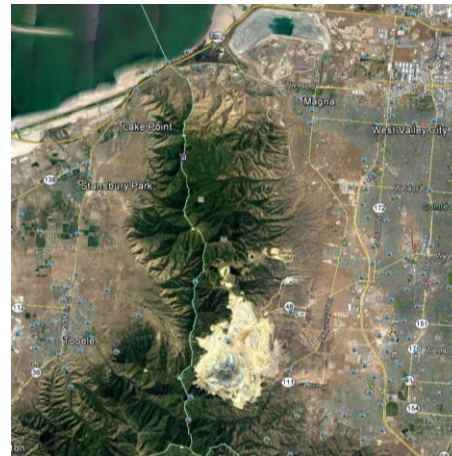
Mine détenue par le groupe Rio Tinto (entreprise internationale d'exploration minière dont siège situé au Royaume-Uni).

Largeur 4 km - Profondeur de plus de 1 200 m,

Visible à l'œil nu depuis la Station spatiale internationale.

L'extraction du minerai a commencé sur le site en 1906.

En 2004, plus de 15 millions de tonnes de cuivre en furent extraites, 5.900 tonnes d'argent et quelque 715 tonnes d'or



# Sol ou un site pollué

Mine de Copper Queen, ancienne mine souterraine de cuivre située près de la ville de Bisbee en Arizona (États-Unis)

*Exploitée depuis 1880 pour l'or, l'argent et le cuivre. Fermée en 1943 après avoir été totalement épuisée.*

*Métaux présents également : Cu-Ag-Au-Pb-Zn*



# Sol ou un site pollué

Friche industrielle (Terraeco.net)



Site industriel abandonné



# II - Réglementation et gestion des sols pollués



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Evolution à partir de 1970

En France à partir des années 1970 : intérêt grandissant pour les sites et sols pollués = suite à une désindustrialisation de plus en plus importante.

Même période, 1971, création du ministère de la Protection de la nature et de l'environnement = prise en compte des contraintes écologiques.

L'arrêt de ces activités industrielles, pose donc de nouvelles questions quant à leur recensement et leur réhabilitation notamment pour les transformer en usage tertiaire.

C'est pour cela, qu'en 1978, un 1<sup>er</sup> inventaire des sites pollués ou susceptibles d'être pollués est effectué.

La France a été l'un des premiers pays européens à réaliser cet inventaire.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Evolution les années 90

Ce n'est qu'à partir des années 1990 que la gestion des sites et sols pollués a pris un tournant.

La politique en matière de gestion des sols pollués fut placée sous l'égide du Ministère en charge de l'environnement.

Elle fut attachée à la législation sur les installations classées et à celle relative aux déchets.

Réalisation de nombreux inventaires historiques régionaux (IHR) = recenser les sites industriels et activités de services en activité ou non.

2 bases de données créées : Afin de répertorier toute ces données, deux bases de données fut créées : **BASIAS** (**CASIAS** depuis 2021) et **BASOL**



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Inventaire: Base de données

**BASIAS** « Base de données des Anciens Sites Industriels et Activités de Services » = **CASIAS** « Carte des Anciens Sites Industriels et Activités de Services »

Base de données française diffusée publiquement depuis 1999.

Elle rassemble les données issues des Inventaires Historiques Régionaux (IHR) qui recensaient des sites ayant pu mettre en œuvre des substances polluantes pour les sols et les nappes en France.

L'inscription d'un site dans BASIAS ne préjuge pas de la présence ou non d'une pollution sols

**BASOL** (nouvellement appelé depuis fin 2021 « Information de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée (EX-BASOL)»)

Base de données nationale qui, sous l'égide du Ministère de l'Écologie, récolte et conserve la mémoire de plusieurs milliers de « sites et sols pollués (SSP) ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif ».

Accessible au public, par internet ou en préfecture ou au service régional du BRGM



INRAE

Valérie Sappin-Didier

<http://basias.brgm.fr> : GéoRisques



# Pourquoi BASIAS ?

La France a été l'un des 1ers pays européens à conduire des inventaires des sites pollués ou susceptibles de l'être d'une façon systématique (1er inventaire en 1978). Les principaux objectifs de ces inventaires sont :

- recenser, de façon large et systématique, tous les sites industriels abandonnés ou non, susceptibles d'engendrer une pollution de l'environnement,
- conserver la mémoire de ces sites,
- fournir des informations utiles aux acteurs de l'urbanisme, du foncier et de la protection de l'environnement.

En mai 2022, la base de donnée recensait 322 964 anciens sites industriels ou activités de services.



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Sites pollués : BASOL

## Tableaux de bord

(le 09/09/2019)

*En mai 2022, la base de donnée*

*recense*

*9957 sites et sols pollués ou*

*potentiellement pollués.*

Alsace	1055	14.83 %
Aquitaine	784	11.02 %
Auvergne	1297	18.23 %
Bourgogne	297	4.17 %
Basse-Normandie	548	7.70 %
Bretagne	90	1.26 %
Centre	431	6.06 %
Champagne-Ardenne	1055	14.83 %
Corse	12	0.17 %
Franche-Comte	297	4.17 %
Guadeloupe	25	0.35 %
Guyane	9	0.13 %
Haute-Normandie	548	7.70 %
Ile-de-France	604	8.49 %
Limousin	784	11.02 %
Lorraine	1055	14.83 %
Languedoc-Roussillon	313	4.40 %
Martinique	46	0.65 %
Mayotte	0	0.00 %
Midi-Pyrénées	313	4.40 %
Nord-Pas-de-Calais	963	13.53 %
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	252	3.54 %
Pays de la Loire	341	4.79 %
Picardie	963	13.53 %
Poitou-Charentes	784	11.02 %
La Réunion	46	0.65 %
Rhône-Alpes	1297	18.23 %
Saint-Martin	3	0.04 %
St-Pierre-et-Miquelon	0	0.00 %
	7116	100.00 %



INRAE

Valérie Sappin-Didier



BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO

# BASOL

**Recherche Cartographique :** par département par régions

Les DOM-TOM

La Réunion

Guadeloupe Saint-Martin Guyane

Saint-Pierre et Miquelon Mayotte Martinique

Choisissez un département



**Etat du site**

- Indifférent
- Site mis en sécurité et/ou devant faire l'objet d'un diagnostic
- Site en cours d'évaluation
- Site en cours de travaux
- Site traité avec surveillance et/ou restriction d'usage
- Site traité et libre de toute restriction

**Lieu**

Site ou Commune

Lancer la recherche

**Polluants**

<input type="checkbox"/> Ammonium	<input type="checkbox"/> Arsenic (As)
<input type="checkbox"/> Baryum (Ba)	<input type="checkbox"/> Cadmium (Cd)
<input type="checkbox"/> Chlorures	<input type="checkbox"/> Chrome (Cr)
<input type="checkbox"/> Cobalt (Co)	<input type="checkbox"/> Cuivre (Cu)
<input type="checkbox"/> Cyanures	<input type="checkbox"/> Hydrocarbures
<input type="checkbox"/> Hydrocarbures aromatiques polycycliques (H.A.P.)	<input type="checkbox"/> Mercure (Hg)
<input type="checkbox"/> Molybdène (Mo)	<input type="checkbox"/> Nickel (Ni)
<input type="checkbox"/> Pesticides	<input type="checkbox"/> Plomb (Pb)
<input type="checkbox"/> Substances radioactives	<input type="checkbox"/> Polychlorobiphényles - Polychloroterpényles (PCB/PCT)
<input type="checkbox"/> Trichloroéthylène (TCE)	<input type="checkbox"/> Sélénium (Se)
<input type="checkbox"/> Solvants halogénés	<input type="checkbox"/> Solvants non halogénés
<input type="checkbox"/> Sulfates	<input type="checkbox"/> Zinc (Zn)
<input type="checkbox"/> Benzène, Toluène, Ethyl-benzène, et Xylènes (BTEX)	
<input type="checkbox"/> Autre	

Impact

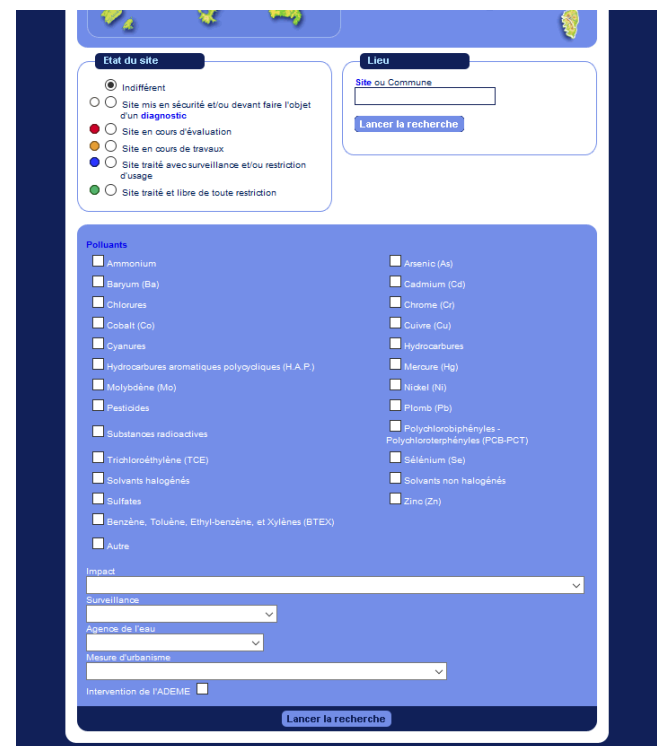
Surveillance

Agence de l'eau

Mesure d'urbanisme

Intervention de l'ADEME

Lancer la recherche



INRAE

Valérie Sappin-Didier



BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO

# Evolution les années 90

Dans les années 1990, création une nouvelle agence public = **l'ADEME**

(Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

Sur les 5 missions de l'ADEME = protection des sols et la remise en état des sites pollués.

Base du principe de pollueur-payeur inscrit dans le Code de l'Environnement, « la prévention, la réduction et la réparation des pollutions engendrées par une installation sont de la responsabilité de celui qui l'exploite ou en assume la garde » (Agence de la transition écologique, 2022).

En revanche, en cas de défaillance de ces responsables ou à la non connaissance du propriétaire, et si une menace grave pour la population et/ou l'environnement est connu, alors l'ADEME va prendre en charge la maîtrise d'ouvrage des opérations pour la mise en sécurité du site.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Cadre législatif pour les sites et sols pollués

Depuis 1993, une politique spécifique de prise en compte des sites pollués a été développée selon les 5 principes suivants :

- Prévenir les pollutions futures ;
- Connaître, surveiller et maîtriser les impacts ;
- Mettre en sécurité un site ;
- Traiter et réhabiliter en fonction de l'usage puis pérenniser cet usage ;
- Garder la mémoire, impliquer l'ensemble des acteurs.

Ministère du Développement Durable



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Réglementation

Les sites et sols pollués ne font **pas l'objet d'un cadre juridique spécifique** mais s'appuient

De par l'origine industrielle de la pollution, la législation relative aux installations classées est la réglementation la plus souvent utilisée pour traiter les situations correspondantes.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement

Toute exploitation industrielle ou agricole susceptible de créer des risques ou de provoquer des pollutions ou nuisances (notamment pour la sécurité et la santé des riverains) = statut d'« installation classée ».

Législation des **ICPE** : énumérées dans nomenclature qui les soumet à un régime d'autorisation ou de déclaration en fonction de l'importance des risques ou des inconvénients qui peuvent être engendrés.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# ICPE : réglementation

## En fonction de l'importance des risques :

Déclaration : pour activités les moins polluantes et les moins dangereuses. Une simple déclaration en ligne (portail du Service Public) ;

Enregistrement : autorisation simplifiée visant des secteurs pour lesquels les mesures techniques pour prévenir les inconvénients sont bien connues et standardisées. (ordonnance n°2009-663 du 11 juin 2009 et mis en œuvre par un ensemble de dispositions publiées au JO du 14 avril 2010) ;

Autorisation : pour les installations présentant les risques ou pollutions les plus importants.

L'exploitant doit faire une demande d'autorisation avant toute mise en service, démontrant la maîtrise des risques environnementaux et humains liés à son installation.

Le préfet autorise le fonctionnement en imposant les prescriptions techniques de fonctionnement. Il peut aussi ne pas autoriser le projet.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Cadre législatif pour les sites et sols pollués

2 textes servent base d'intervention en matière de protection de l'environnement

## **Code de l'environnement 9 juin 2018**

### Articles L541-1 et suivants du Code de l'environnement

relatifs à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux

(Livre V, Titre IV : Déchets)

### Articles L511-1 et suivants du Code de l'environnement

Livre V, Prévention des pollutions, des risques et des nuisances. Titre I relatifs aux installations classées pour la protection de l'environnement (Livre V, Titre I : Installations classées pour la protection de l'environnement)

### Articles et suivants du Code de l'environnement

Livre V, Prévention des pollutions, des risques et des nuisances : Titre IV : Déchets (Chap I : Prévention et gestions des déchets);

Titre V Disposition particulière à certains ouvrages et installations (Chap VI Sites et sols pollués, L556-1 à L556-3)

**et**

le décret d'application (n°77-1133 du 21 septembre 1977) pris pour l'application de la Loi n°76-663 du 19 juillet 1976

relative aux installations classées pour la protection de l'environnement

Livre V - Prévention des pollutions, des risques et des nuisances du code de l'environnement (via [legifrance.gouv.fr](http://legifrance.gouv.fr)) (Code de l'environnement , Version consolidée au 8 septembre 2017)

INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Réglementation

Loi régissant la  
gestion des ICPE

Livre V - Prévention des pollutions, des risques et  
des nuisances du code de l'environnement

Loi sur la pollution  
de l'air

Protection et  
réhabilitation des sols  
pollués

Loi sur les  
déchets

Loi sur la gestion et la protection  
des eaux de surface et de nappe  
(loi sur l'eau)

ICPE : installation classé pour la protection de l'environnement



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Politique de traitement des sites et sols pollués menée en France

Textes de gestion des sites pollués de 2007 (Note ministérielle Circulaire du 08 février 2007 et ses annexes) : « *Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués* »

L'appréciation du risque repose en premier lieu sur la compréhension d'un **schéma conceptuel** :

- Quelles sont les sources de pollution ?
- Comment fonctionne le transfert des polluants ?
- Quels sont les enjeux à protéger ?

Une fois que ce schéma conceptuel est connu, deux grands types de situation de gestion peuvent être utilisées : deux outils méthodologiques :

l'Interprétation de l'État des Milieux (IEM) et  
le Plan de Gestion (PG).



INRAE

« *Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués* » 2007

Valérie Sappin-Didier



# Politique de traitement des sites et sols pollués menée en France

- Pour les sites déjà urbanisés ou occupés = démarche **d'interprétation de l'état des milieux (IEM)**. Il s'agit de s'assurer que l'état des milieux est compatible avec des usages présents déjà fixés.
- Pour les sites à urbaniser ou à réhabiliter = **plan de gestion**. Il intervient lorsque la situation permet d'agir aussi bien sur l'état du site (par des aménagements ou des mesures de dépollution) que sur les usages qui peuvent être choisis ou adaptés.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Politique de traitement des sites et sols pollués menée en France

## Actualisation après dix années de mise en œuvre de la circulaire du 8/2/2007 : 2007 - 2017

Note du 19 avril 2017 relative aux sites et sols pollués – Texte complété par la Méthodologie Nationale de Gestion des Sites et Sols Pollués de 2007 (NOR : DEVP1708766N)

(via : [installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr](http://installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr) – PDF)

Toujours : - l'Interprétation de l'État des Milieux (IEM)  
- le Plan de Gestion (PG)

### Nouvelles dispositions réglementaires :

- Statut de déchets des terres excavées hors site prises en compte dans la méthodologie
- Modifications relatives aux évaluations des risques sanitaires sur le calcul et sur les valeurs de références utilisées.

Avec une attention particulière sur la gestion des risques au cas par cas suivant l'usage des milieux et ne s'apprécie pas en fonction de niveaux de dépollution définis a priori.

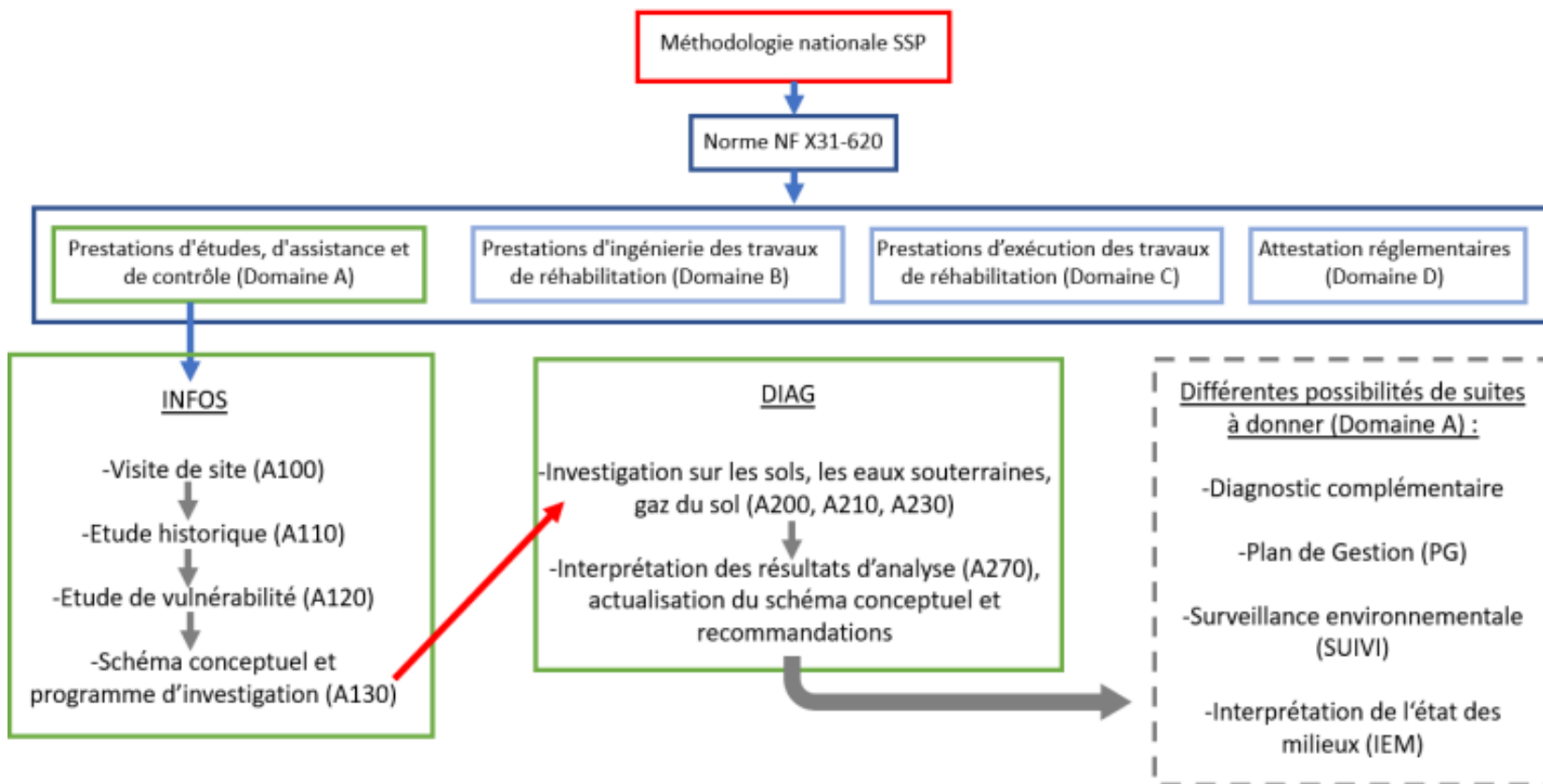


INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Méthodologie nationale SSP



# Gestion des sols et sites contaminants

## Résumé de la démarche : les différentes étapes

1 - **schéma conceptuel** : basé sur campagnes de mesures pour réaliser un bilan factuel de l'état du milieu ou du site étudié,

Puis

2a - **aider à l'interprétation de l'état des milieux**, utile pour vérifier que l'état actuel du site est compatible avec son usage,

2b - **plan de gestion** : définit les actions de réhabilitation à mettre en œuvre pour maîtriser sources de pollution et risques présents après travaux (grâce à l'analyse des risques résiduels).

- **études d'impact approfondies** : réalisées sur ces sites "*afin de définir les travaux à mener ainsi que les objectifs à retenir en fonction de l'usage ultérieur du site*".

3 - mise en place par préfets de région de **structures régionales de concertation et d'information sur les sites et sols pollués**.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



1 - schéma conceptuel

2a - Interprétation de l'état  
des milieux

2b - Plan de gestion

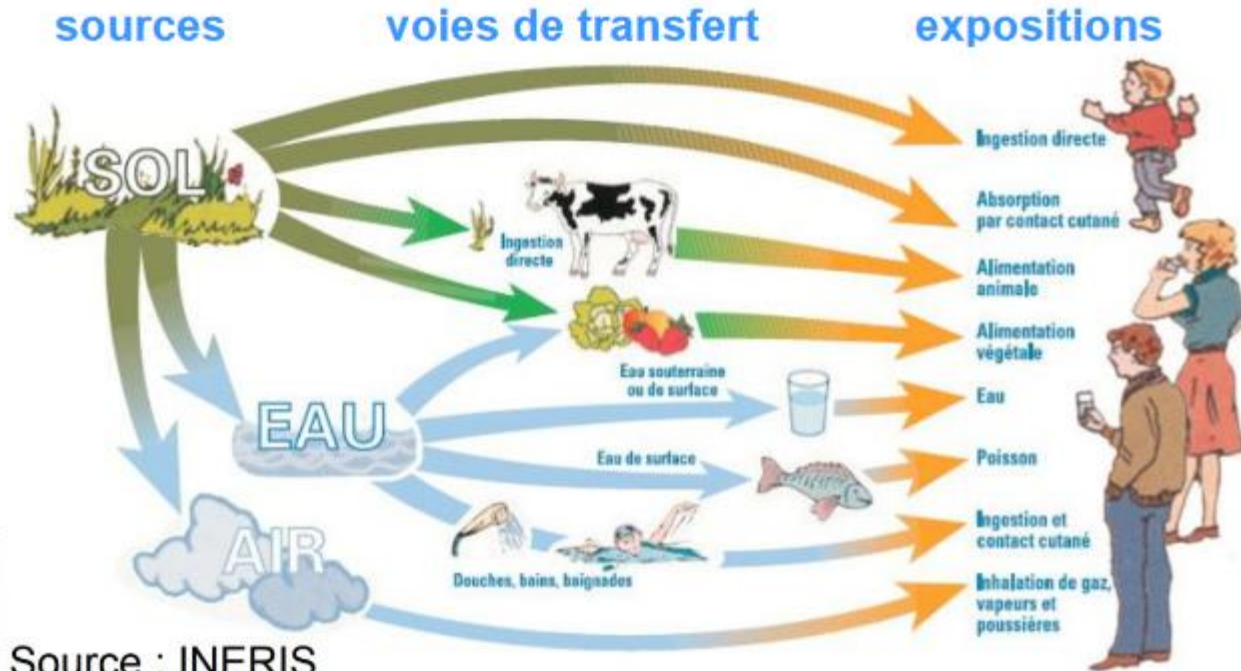


INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Schéma conceptuel



Source : INERIS



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Construction du schéma conceptuel

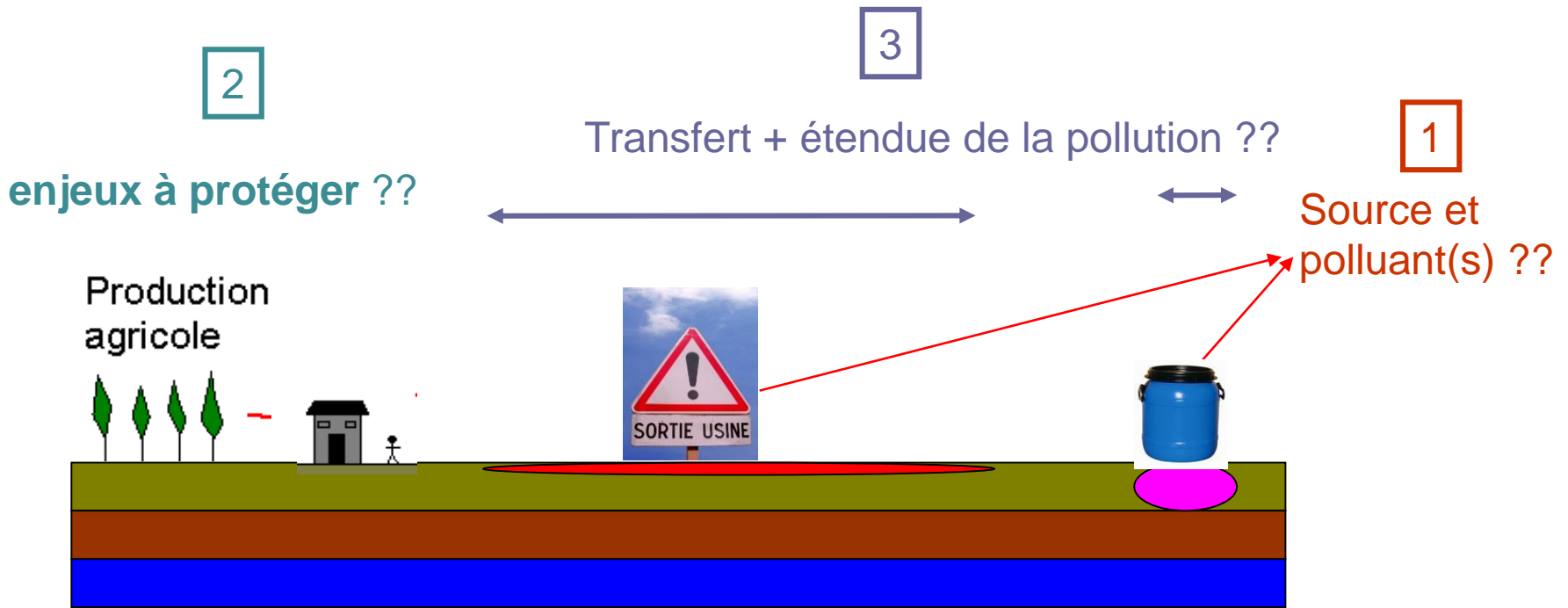


Schéma conceptuel doit permettre de préciser les relations entre :

- Les sources de pollution et les pollutions concentrées
- Les différents milieux de transferts et leurs caractéristiques : étendues de la pollution
- Les enjeux à protéger

# Schéma conceptuel

## Différentes étapes :

- Identifier les enjeux à protéger : population/environnement
- Recueillir les données existantes

- o Etudes historiques et documentaires / visites lieux et entretiens

- Caractériser les milieux et les pollutions

- o Caractérisations intrinsèques des milieux (sol / sous-sols/ eau / gaz du sol) = analyses sols (pédogéochimiques), géologique, hydriques
- o Caractéristiques des polluants (toxicité pour santé / biodisponibilité / bioaccessibilité / dégradation / spéciation)
- o Comportement des polluants dans l'environnement (indicateurs bio / dendrochimie / phytoscreening / géophysique)

- Construire les campagnes de diagnostics spécifiques à chaque site

- o Priorité aux mesures terrain
- o Identification des pollutions (eaux sou et sup, sols, gaz, air int, denrées alimentaires) : Témoin – site
- o De la caractérisation à la quantification
- o Articulation et cohérence avec réglementation sur les déchets
- o Rôles et responsabilité des bureaux d'études et des laboratoires

- Identifier 1<sup>er</sup> mesures de protection des populations et des milieux
- Du schéma conceptuel au modèle de fonctionnement : bilan quadriennal

INRAE

Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, avril 2017, Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer  
Valérie Sappin-Didier



# Principales composantes d'une pollution

- ✓ Cibles (homme, milieux, biens matériels)
- ✓ Source
- ✓ Voies de propagation de la pollution (transfert)



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Cibles : Danger pour la santé et pour l'environnement

- **Cibles :**
  - Population (générale et travailleur), Animaux.
  - Ressources et milieu naturel (eau, biodiversité, ....)

= *Enjeux à protéger*
- **Dangers sur une échelle temps plus ou moins importante :**
  - pour la santé publique
  - pour la qualité des milieux (eaux souterraines et de surface, sol ...)
- **Risque :**
  - à court ou moyen terme pour les eaux souterraines, les eaux superficielles et les écosystèmes.
  - à moyen et long terme pour les populations (les risques pour la santé résultent souvent d'une exposition de longue durée).

Rare qu'un site pollué crée des dangers et des risques immédiats pour populations. Si oui, mesures d'urgence doivent être adoptées = confinement des substances, pose d'une clôture ou enlèvement des produits...



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Principales composantes d'une pollution

- ✓ Cibles (homme, milieux, biens matériels)
- ✓ **Source**
- ✓ Voies de propagation de la pollution (transfert)



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Sources : Principaux polluants du sol

## Catégories de contaminants

- Contaminants organiques (pesticides, PCB, HAP, dioxines...)
- Contaminants minéraux (éléments traces): métaux (Cu, Cr, Cd, Hg, Ni, Pb, Zn...) et métalloïdes (As, Se...)
- Contaminants organo-minéraux : organo-étains (Tributylétain, triphénylétain....)



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Sources : Principaux polluants du sol

Selon la base de données BASOL, nature des polluants au 09/09/2019 =

Arsenic (As)	4.33 %
Baryum (Ba)	0.83 %
Cadmium (Cd)	2.11 %
Cobalt (Co)	0.21 %
Chrome (Cr)	4.64 %
Cuivre (Cu)	4.47 %
Mercure (Hg)	1.83 %
Molybdène (Mo)	0.21 %
Nickel (Ni)	3.30 %
Plomb (Pb)	6.01 %
Sélénium (Se)	0.14 %
Zinc (Zn)	3.50 %
Sulfates	0.11 %
Chlorures	0.07 %
Ammonium	0.24 %
BTEX	1.10 %
TCE	0.39 %
Hydrocarbures	12.17 %
H.A.P.	5.71 %
Cyanures	1.81 %
PCB-PCT	1.81 %
Solvants halogénés	4.47 %
Solvants non halogénés	1.25 %
Pesticides	0.52 %

BASOL : recense les sites pollués par activités industrielles

<http://basol.environment.gouv.fr>



INRAE

Valérie Sappin-Didier



BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO

# Caractérisation des polluants

Déterminer la toxicité pour la santé humaine

Déterminer la biodisponibilité des polluants

Déterminer leur bioaccessibilité orale

Déterminer leur devenir dans les milieux (spéciation, localisation, dégradations, ....)

.....



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Principales composantes d'une pollution

- ✓ Cibles (homme, milieux, biens matériels)
- ✓ Source
- ✓ Voies de propagation de la pollution (transfert)



INRAE

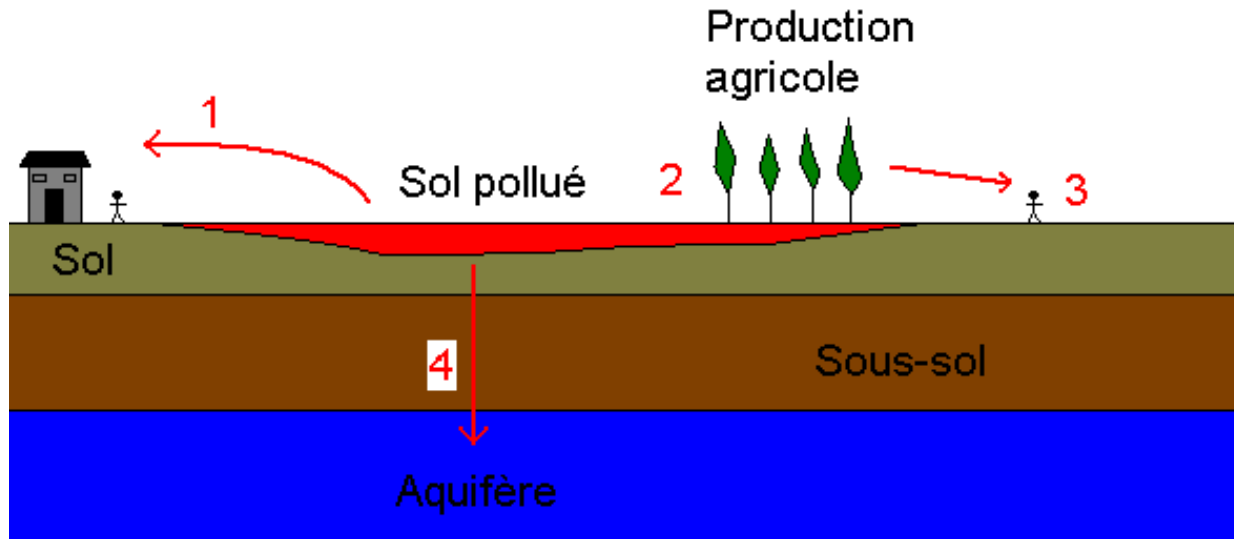
Valérie Sappin-Didier



# Voies de propagation de la pollution = Risques

## Les risques liés à la pollution des sols :

- 1 : dissémination dans le voisinage (envol de poussières)
- 2 : risques phytotoxiques (effets négatifs sur la plante)
- 3 : contamination de la chaîne alimentaire (accumulation dans les plantes)
- 4 : contamination des aquifères (infiltration ou percolation)



Plusieurs risques car plusieurs cibles

- ↳ L'usage du sol est compromis (agriculture, aménagement du territoire...)
- ↳ Il faut protéger ou réhabiliter le sol

INRAE

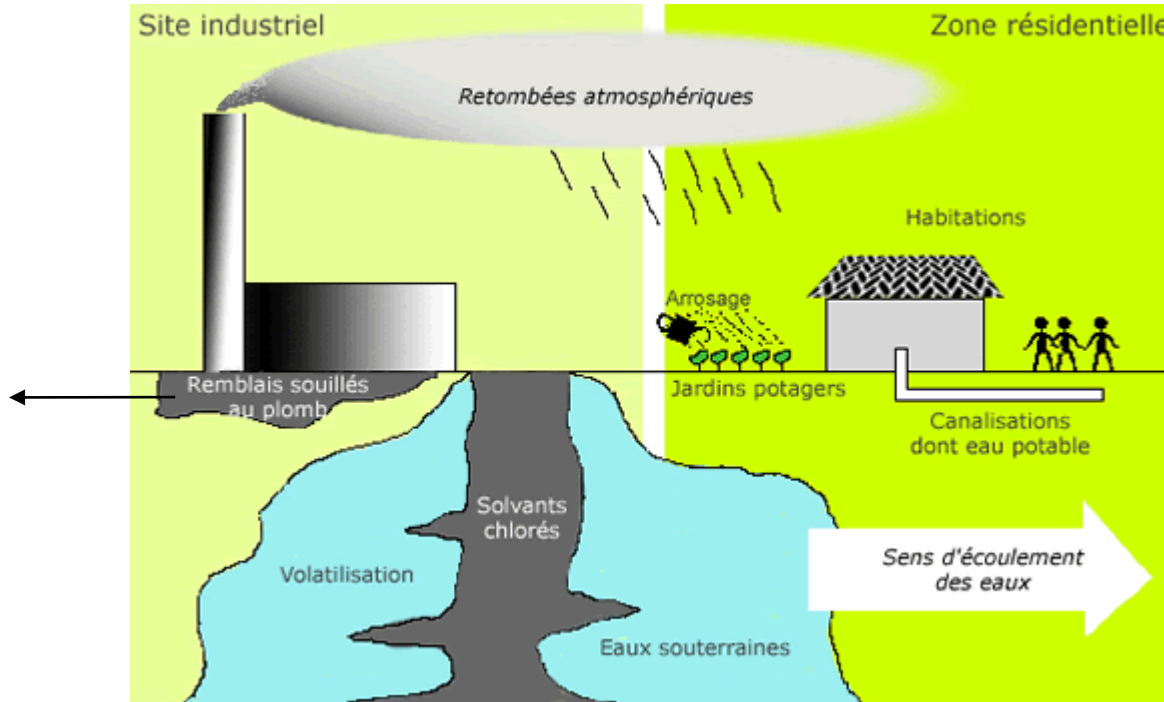
Valérie Sappin-Didier



# Exemple de voies de propagation de la pollution

## Transferts

Utilisation par le passé des déchets comme remblais pour les routes et les chemins



# Voies de propagation de la pollution = Risques



# Voies de propagation de la pollution = Risques



**Climat méditerranéen semi-aride**

**Terril DIII**

**Population en danger**

# Voies de propagation de la pollution = Risques



# Voies de propagation de la pollution = Risques



Dabaoshan Mine

Taiping River

Hengshi River

Yangzigang

Beng Gangxia

Yuxi

Image © 2017 CNES / Airbus

Google earth



Valérie Sappin-Didier



BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO

# Recueillir les données existantes

## Etudes historiques et documentaires :

**But :** recenser et localiser les activités et pratiques exercées, incidents et accidents passés

identifier les zones potentielles polluées

déterminer nature et quantités produits utilisés et polluants

## Sources info :

Archive du site, archives municipales et départementales, administratives (DREAL, Préfectures, photo aériennes, BD BASIAS, BASOL, documents d'urbanisme, inventaires miniers, .....)

## Etudes de vulnérabilité des milieux :

Permettent de caractériser les 1ers éléments des processus de transferts polluants vers cibles (paramètres physico-chimiques influençant transferts et devenir des polluants)

## Visites des lieux et entretien avec les personnes



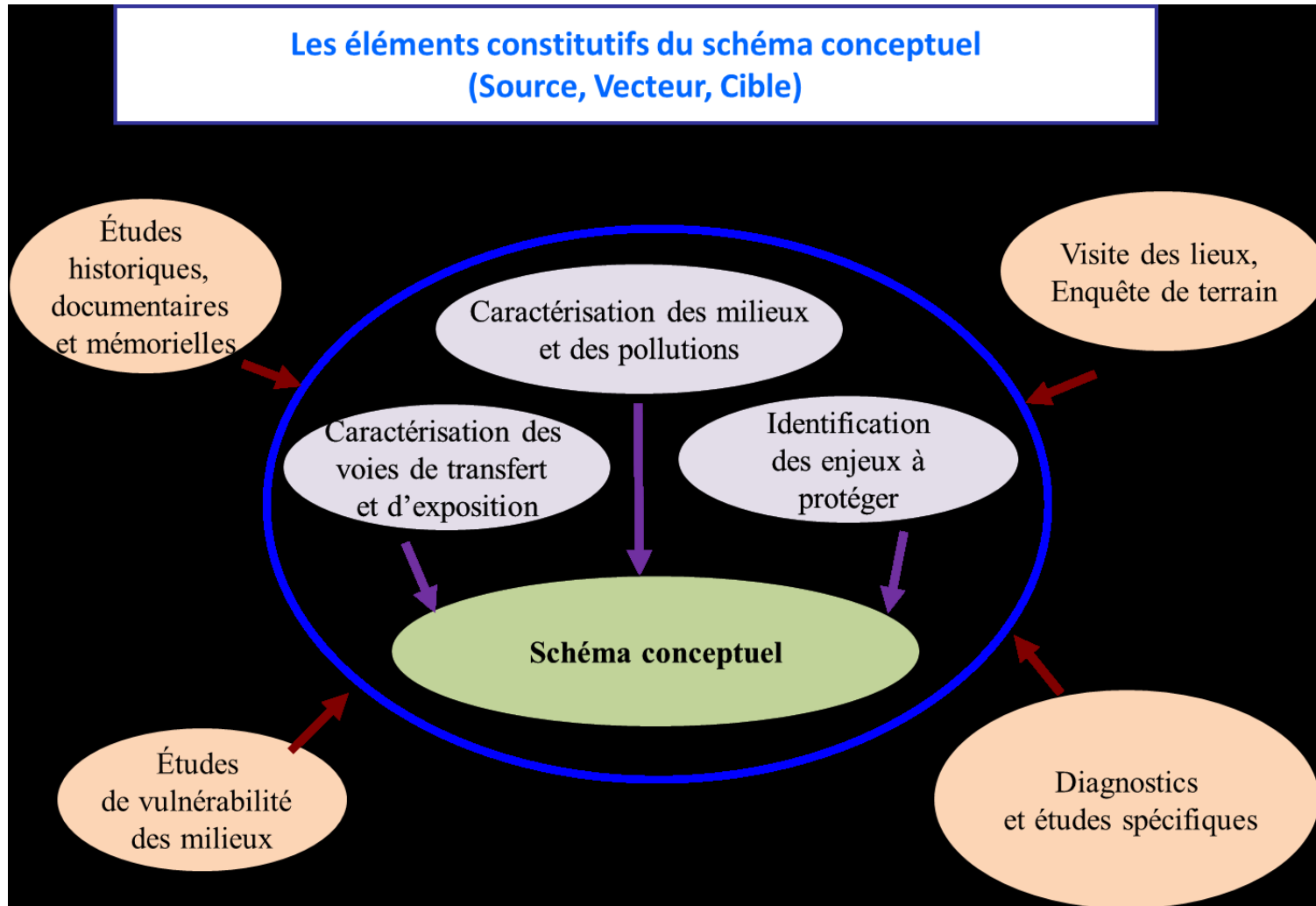
INRAE

Valérie Sappin-Didier





# En résumé



Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, avril 2017, Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer

INRAE

Valérie Sappin-Didier



1 - schéma conceptuel

2a - Interprétation de l'état  
des milieux

2b - Plan de gestion



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Démarche d'Interprétation de l'État des Milieux

Cette démarche permet de déterminer si les milieux :

Nécessite aucune action particulière (pas d'exposition car risques non excessifs)

Actions simples de gestion pour rétablir la compatibilité entre état de milieux et usages

Mise en œuvre d'un plan de gestion

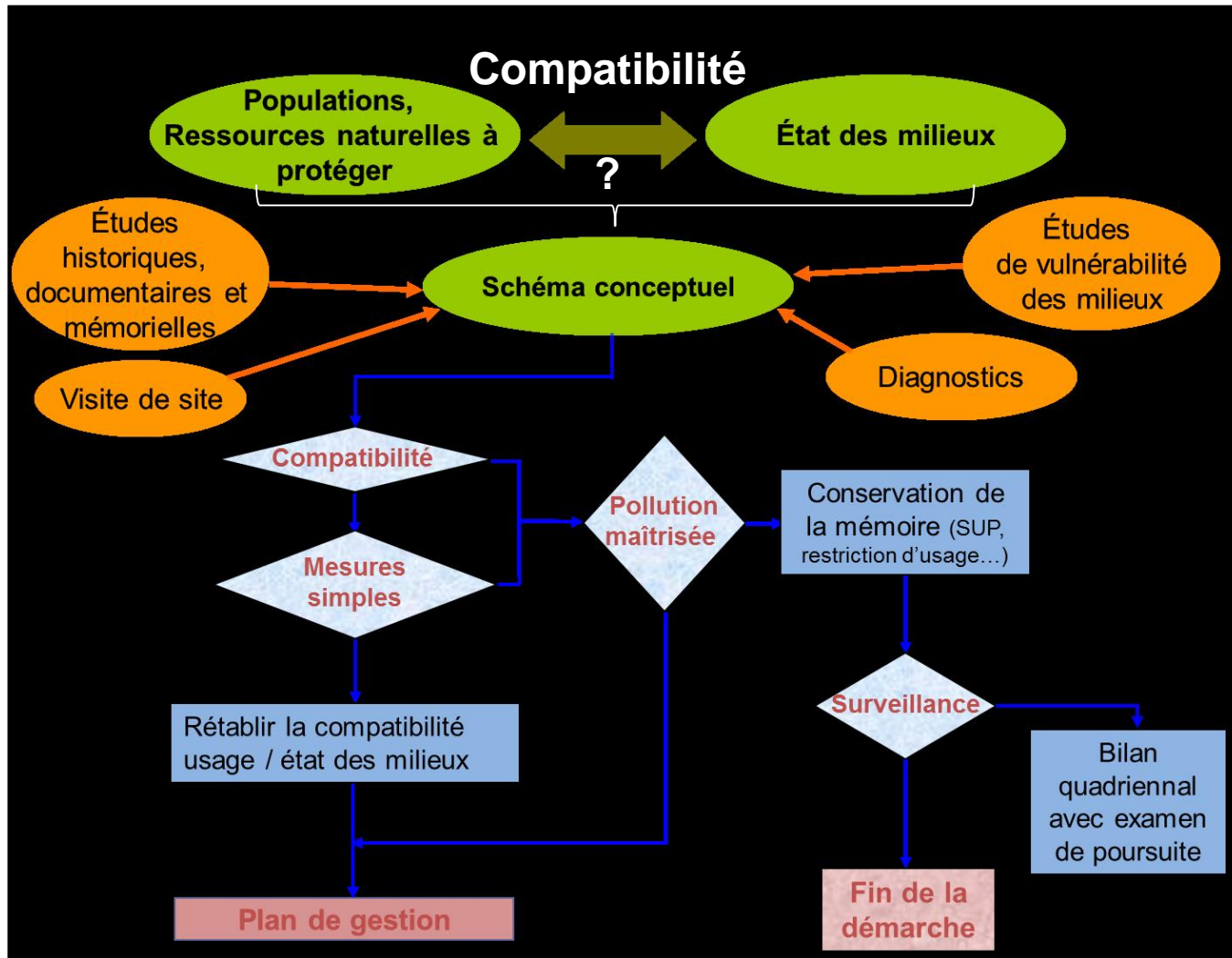


INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Démarche d'Interprétation de l'État des Milieux



Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, avril 2017, Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer

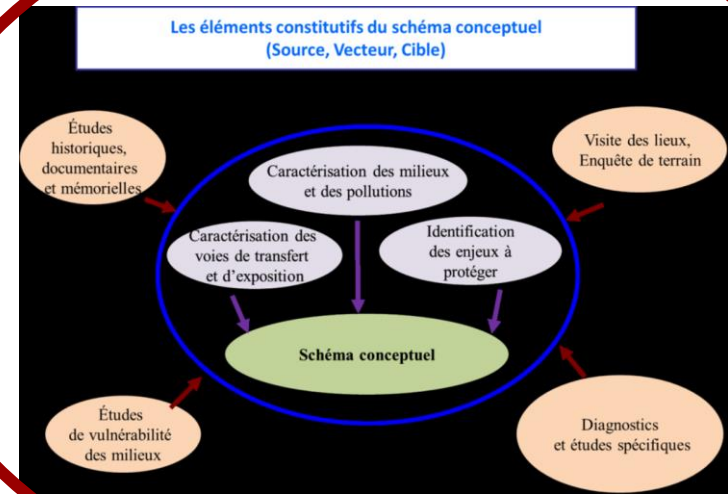
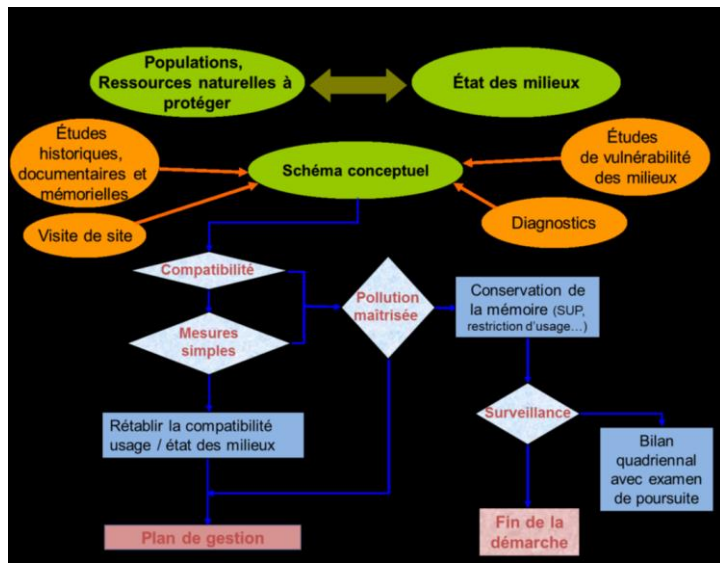
INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Exemple de situation à l'origine d'une IEM

- Découverte pollution dans milieu d'exposition, y compris dans denrées alimentaires
- Mise en application de dispositions réglementation en vue d'évaluer l'impact d'une ICPE en fonctionnement
- Suite à un signal sanitaire (ex découverte d'un groupement de cas pour pathologie donnée)



# Situations pour lesquelles l'IEM est à proscrire

- Lorsque plan de gestion ou mémoire de réhabilitation est d'emblée requis  
Ex : IEM pourrait montrer une qualité de l'air intérieur de bâtiments respectant les valeurs de gestion en vigueur alors que les sources de pollutions ou polluants concentrés sont présents dans bâtiments.
- A l'issue d'un plan de gestion, pour vérifier l'efficacité des mesures mises en œuvre .
- Sur l'emprise d'un site industriel en exploitation : acceptabilité des expositions des travailleurs aux substances manipulés relève des dispositions du code du travail et donc de l'inspection du travail (suivi médical)



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Mesures à effectuer

Priorités aux mesures de terrain pour caractériser le milieu, tenant compte :

De la nature des polluants,

Des milieux d'exposition identifiés

Vecteurs de transfert mis en évidence dans le schéma conceptuel

⇒ Pas de modélisation dans cette première étude.

**Eaux** : diagnostic en amont et aval hydraulique du site, sur eaux superficielles, eaux souterraines.

Disponible base de données ADES et InfoTerre

Utilisation de piézomètres

**Sols** : Analyses de sol, pédogéochimiques, ... Contribution de la pollution de celle liée à sa nature ?

BD référence : **RMQS**, FGU, ASPITET, référence local, sol témoin (attention bien choisir)

**Gaz/air** : pollutions volatiles, prélèvement de gaz : comportement dépend de la nature chimique polluant, du milieu, variations environ. (météo, anthropiques, géol, hydrogéo ...) = variation spatiale et temporelle des [ ].

Conseillé : 2 campagnes de prélèvement par an avec conditions météo différentes

Données Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI)

**Denrées alimentaires** : difficile de corrélérer [polluant denrée alim] et [polluant sol]

Analyses végétaux s'imposent.

base référencée : valeur EAT (Etude de l'alimentation totale) de l'ANSES

FGU : fond géochimique urbain



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Article 173 de la loi ALUR

Accès au logement et un urbanisme rénové :

Loi ALUR et création de CASIAS : L'article 173 de la loi ALUR (loi n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové) et le décret d'application 2015-1353 du 26 octobre 2015 mentionnent que l'Etat publie la Carte des Anciens Sites Industriels et Activités de Services (CASIAS).

Le certificat d'urbanisme indiquera si le terrain est concerné par un ancien site industriel ou de service inventorié et localisé sur la carte. La carte CASIAS est élaborée à partir de la base nationale BASIAS.

- prévoit que l'État élabore des Secteurs d'information sur les sols (SIS) répertoriant les « terrains où la connaissance de la pollution des sols justifie, notamment en cas de changement d'usage, la réalisation d'études de sols et de mesures de gestion de la pollution » (article L125-6 du code de l'environnement) ;
- créé également, afin de faciliter la reconversion des friches industrielles, le dispositif Tiers demandeur qui permet qu'un tiers, tel qu'un aménageur par exemple, remplisse les obligations de réhabilitation portée par l'ancien exploitant du site au titre du code de l'environnement.

[ALUR - Loi n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové \(via legifrance.gouv.fr\)](#)

[Article 173 de la loi ALUR \(via legifrance.gouv.fr\)](#)

[Article L125-6 du code de l'environnement \(via legifrance.gouv.fr\)](#)

[Dossier thématique "Pollution des sols" de Géorisques \(via georisques.gouv.fr\)](#)

[Aide pour l'outil de saisie Secteur d'Informations sur les Sols \(via georisques.gouv.fr\)](#)



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Article 173 de la loi ALUR

## la loi ALUR

l'État élabore des Secteurs d'information sur les sols (SIS) répertoriant les « terrains où la connaissance de la pollution des sols justifie, notamment en cas de changement d'usage, la réalisation d'études de sols et de mesures de gestion de la pollution » (article L125-6 du code de l'environnement) ;

Actuellement 5128 SIS sont répertoriés.

- prévoit que créé également, afin de faciliter la reconversion des friches industrielles, le dispositif Tiers demandeur qui permet qu'un tiers, tel qu'un aménageur par exemple, remplisse les obligations de réhabilitation portée par l'ancien exploitant du site au titre du code de l'environnement.

[ALUR - Loi n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové \(via \[legifrance.gouv.fr\]\(http://legifrance.gouv.fr\)\)](#)

[Article 173 de la loi ALUR \(via \[legifrance.gouv.fr\]\(http://legifrance.gouv.fr\)\)](#)

[Article L125-6 du code de l'environnement \(via \[legifrance.gouv.fr\]\(http://legifrance.gouv.fr\)\)](#)

[Dossier thématique "Pollution des sols" de Géorisques \(via \[georisques.gouv.fr\]\(http://georisques.gouv.fr\)\)](#)

[Aide pour l'outil de saisie Secteur d'Informations sur les Sols \(via \[georisques.gouv.fr\]\(http://georisques.gouv.fr\)\)](#)



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Pour améliorer la qualité des prestations dans le domaine des sites et sols pollués, le ministère en charge de l'environnement homologue en 2011

la norme NF X31-620 - « Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués ».

Norme NF X 31-620 « Qualité du sol – Prestations de services relatives aux sites et sols pollués (études, ingénierie, réhabilitation de sites pollués et travaux de dépollution) », publiée en septembre 2003, révisée 1<sup>er</sup> juin 2011 ([site de l'Afnor](#)). **( modifier décembre 2018)**

Le document fixe les exigences générales auxquelles le prestataire doit satisfaire. Il définit les conditions d'exécution concernant les domaines de prestations suivants :

- A - Études, assistance et contrôle ;
- B - Ingénierie des travaux de réhabilitation ;
- C - Exécution des travaux de réhabilitation.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



1 - schéma conceptuel

2a - IEM

2b - Plan de gestion :  
Réhabilitation des sols



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Objectifs de la réhabilitation

- maîtriser les sources de pollution,
- maîtriser les impacts de ces pollutions s'il n'est pas possible de supprimer les pollutions elles-mêmes.

## La méthodologie

- déterminer les mesures de gestion à réaliser en prenant en compte le bilan « coûts-avantages »,
- Définir et engager les travaux de réhabilitation nécessaires (1<sup>ère</sup> étape plan gestion)
- réaliser une analyse des risques résiduels (ARR) quand voies de transfert subsistent pour savoir si les risques sont acceptables en fonction des usages constatés ou futurs (2<sup>ème</sup> étape plan gestion).



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Plan de gestion

Document d'orientation visant à étudier ≠ scénarios de gestion de la pollution.

Fait la synthèse des études visant à caractériser la pollution du site et son environnement (schéma conceptuel, IEM, ...)

⇒ Définir stratégie de gestion à appliquer en vue de la réalisation des travaux dans la phase ultérieure.

**Ce n'est pas un cahier des charges des travaux de réhabilitation.**

Suivant le contexte, un donneur d'ordre peut décider d'intégrer dans son plan de gestion des essais de faisabilité ou de le compléter.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Le Plan de gestion

## Délimitation spatiale source de pollution et pollution concentrées

(délimitation des seuils de coupures)

## Définition des objectifs de réhabilitation

(absence de capacité de relargage et de dégradation de la qualité des eaux, respect des objectifs de qualité des milieux, compatibilité sanitaire)

## Etudes des scénarios de gestion

Choix techniques de dépollution  
Mesures constructives (actives / passives)  
Restrictions d'usage  
Bilan coûts-avantages avec démonstrations financières structurées  
Validation sanitaire (ARR prédictive)  
Définition des contrôles en phase travaux  
Définition d'un programme de surveillance (bilan quadriennal)  
Mécanismes de conservation de la mémoire

## Performances techniques de dépollution

(Outil SélecDEPOL, Guide BRGM sur les techniques de traitement)

## Gestion des terres excavées dans le cadre de opérations de réhabilitation

Schémas conceptuels :  
État actuel / état futur

## Finalité du plan de gestion :

Maitriser les sources et les impacts  
Proposer au moins 2 scénarios de gestion  
Définir des essais à réaliser dans le cadre du PCT, si celui-ci est nécessaire et pas intégrer au PG

PCT : Plan de Conception des Travaux

Différentes étapes du plan de gestion

# Analyse critique de la méthodologie nationale SSP

## Evolution :

Méthodologie non été figée.

Peu évoluer via

- retours d'expérience
- textes de lois
- évolutions techniques (méthodes d'analyses, de dépollution, les logiciels...)
- connaissances scientifiques

Emergence de nouveaux polluants (polluants émergents) ou d'anciens polluants dont on découvre les effets/l'étendue de la pollution (ex substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS)).



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Analyse critique de la méthodologie nationale SSP

## Défaillances :

Evolue oui mais lente (long processus réglementaires, scientifiques...)

Actuellement la recherche sur les polluants émergents est d'autant plus difficile que chaque année de très nombreuses substances sont mises sur le marché. Contrôles (encadrement de l'ECHA – European Chemical Agency- en Europe)).

L'aspect financier à jusque-là peu était abordé.

Mais la norme, dans la réalisation des diagnostics prévoit de choisir les investigations/travaux ayant la meilleure balance coût –avantages, sacrifiant une recherche plus poussée des impacts. Là où dans le même temps la norme (et celles spécifique aux prélèvements) décrit de manière précise la réalisation des prélèvements pour justement caractériser au mieux la pollution. Ces deux aspects s'opposent.

***AVOIR TOUJOURS UN ESPRIT CRITIQUE***



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# III - Méthodes de réhabilitation des sols pollués



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Choix d'une méthode de réhabilitation

## Différents schémas :

- Eliminer la contamination
- Diminuer son danger
- Diminuer son transfert vers d'autres milieux et vers les organismes vivants

## Le choix d'une méthode de réhabilitation en fonction :

- Du type de contaminant ou des contaminants
- Du milieu
- Des enjeux
- Du plan de gestion
- Du coût



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Choix d'une méthode

## Trois familles de procédés de décontamination des sols

- Traitements hors-sites (les sols sont emmenés vers une installation extérieure),
- Traitements sur sites
- Traitements in-situ.

## Les technologies de traitement des sites sont constituées globalement par 3 approches :

- 1<sup>er</sup> : considère la terre polluée comme un déchet qu'il faut excaver puis mettre en décharge ou incinérer.
- 2<sup>ème</sup> : est celle des chimistes et des hydrogéologues. Techniques pompage, extraction sous vide, confinement, lavage.
- 3<sup>ème</sup> : constituée par les biotechnologies (bioremédiation...)

Avec possibilité de combiner les techniques



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Méthodes

- ↳ Méthodes physiques
- ↳ Méthodes chimiques
- ↳ Méthodes biologiques

= Méthodes « dures » / méthodes « douces »

Choix d'une méthode sera aussi fonction

- du degré de contamination du sol,
- de son usage



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Méthodes

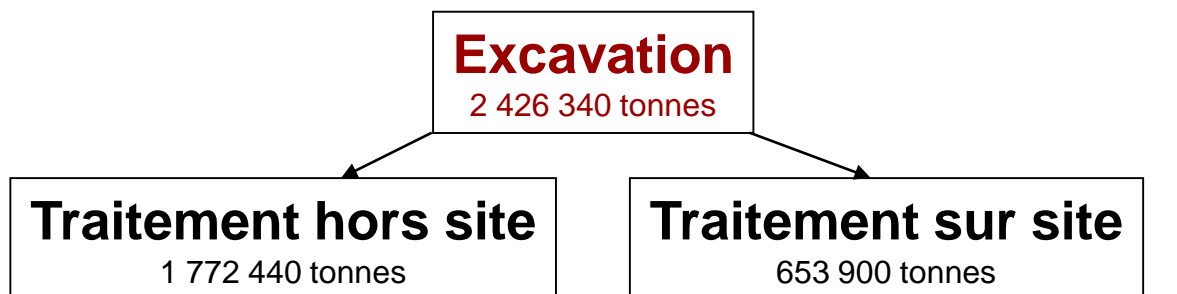
- Opinion des experts :
  - pas réalisable de déterminer une séquence de traitement universelle.
  - Il faut effectuer des essais préalables en laboratoire sur des échantillons ou avec des pilotes sur sites
- Bonne connaissance de la géochimie des contaminants, de leur devenir dans le milieu et de leur comportement vis-à-vis des organismes vivants (prélèvement, effet, ...).



INRAE

Valérie Sappin-Didier





## Traitement in situ

846 400 tonnes

- ventilation forcée des sols et traitements biologiques (645 100 tonnes)
- oxydation chimique (115 700 tonnes)
- confinement (77 600 tonnes)
- stabilisation physico-chimique (8 000 tonnes)
- lavage de terre (nd)
- phytoextraction (nd)
- phytostabilisation (nd)

- Installation de stockage de déchets *inertes* (867 800 tonnes)
- Installation de stockage de déchets *dangereux* (241 200 tonnes)
- Installation de stockage de déchets *non dangereux* (63 800 tonnes)
- Installation de traitements biologiques (434 000 tonnes)
- Installation de désorption thermique (62 600 tonnes)
- Installation de stabilisation physico-chimique (33 300 tonnes)
- Installation de lavage de terre (7 800 tonnes)
- Incinérateur (17 600 tonnes)
- Cimenterie (44 300 tonnes)

- stabilisation physico-chimique (370 900 tonnes)
- traitements biologiques et ventilation forcée des sols (197 600 tonnes)
- confinement (69 000 tonnes)
- désorption thermique (3 500 tonnes)
- lavage de terre (12 000 tonnes)

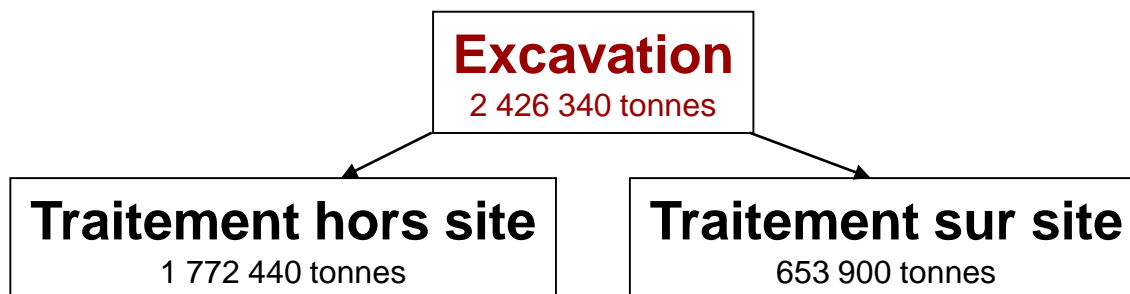
Chiffres tiennent compte de l'excavation de sol lors de construction



INRAE

Valérie Sappin-Didier





**Surface faible,  
Forte pollution  
Forte pression foncière,  
  
= coût élevé**



**Surface étendue,  
Faible pression foncière,  
  
= coût faible**

# Excavation des terres pollués

## Excavation

2 426 340 tonnes



Méthode simple, rapide et définitive.

Terres retirées du site expédiées en *centre de traitement* ou en *décharge* suivant la concentration et les types de polluants qu'elles contiennent.

Coûts = proportionnels au volume à traiter.

Peuvent rapidement devenir prohibitifs pour des surfaces importantes à traiter.

**Application** : tous types de polluants, sous réserve d'acceptation par les centres de traitement ou de mise en décharge.

Il permet de traiter principalement la zone non saturée en eau du sol. En zone saturée, les venues d'eau peuvent conduire à une dispersion de la pollution.



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Gestion des terres excavées

Dans le cadre de projets d'aménagement, la gestion de terres excavées = enjeux majeurs pour le projet et pour l'environnement.

Le Ministère, le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) ont développé un guide (paru en février 2012), exposant les règles et les modalités sous lesquelles certaines terres excavées issues de sites pollués peuvent être réutilisées dans une optique de développement durable et d'économie circulaire.

3 guides techniques = « Caractérisation des terres », « Utilisation d'un outil d'évaluation de l'impact sur les eaux souterraines », et « élaboration de seuils vis-à-vis de risques sanitaires »

[Bureau de recherches géologiques et minières \(BRGM\) - Environnement et Ecotechnologies \(via brgm.fr\)](http://brgm.fr)

[Institut national de l'environnement industriel et des risques \(INERIS\) \(via ineris.fr\)](http://ineris.fr)

[Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement - Documents associés \(via installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr\)](http://installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr)

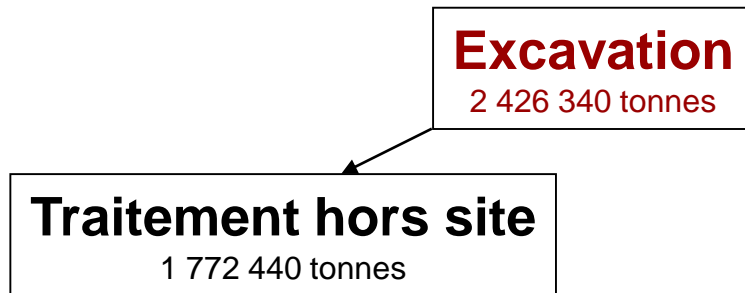


INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Méthodes : Excavation + traitement hors site



- Enlèvement et traitement hors site :

= Implique *identification, tri, conditionnement* ou *reconditionnement* et *transport* des résidus, sols, matériaux et eaux contaminées en vue d'être traités et *éliminés* dans des installations existantes.

**Domaine d'application :** bien adaptée aux résidus déposés ou enfouis sur un site.

# Excavation + traitement sur site ou traitement in situ



- **Confinement** :

= Isoler la source de pollution pour empêcher la migration des substances polluantes ;

↳ mise en place de barrières étanches naturelles (argiles) ou synthétiques (verticales, horizontales pour confiner le fond et horizontales pour imperméabiliser la surface).

**Domaine d'application :**

← Pas à proprement parler une technique de dépollution

← Pas de possibilité, pour des raisons techniques et économiques, de décontamination du site considéré.

← Technique d'attente, en cas d'urgence, avant une dépollution ultérieure.

# Excavation + traitement sur site ou traitement in situ

**Excavation**

2 426 340 tonnes

**Traitement in situ**

846 400 tonnes

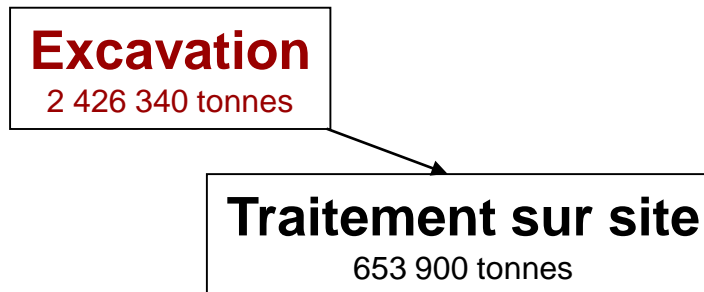
**Traitement sur site**

653 900 tonnes

- Confinement :



# Méthodes : Excavation + traitement sur site



- Stabilisation et solidification :

= Fixer les substances polluantes sur le site avec des réactifs ou composés (polymérisation, vitrification, ciments, ...) pour assurer la stabilité mécanique des produits traités ou leur immobilisation dans le sol.

**Domaine d'application** : boues, résidus plus ou moins visqueux et sols contaminés par des substances minérales et éventuellement organiques.

# Méthodes : Excavation + traitement sur site

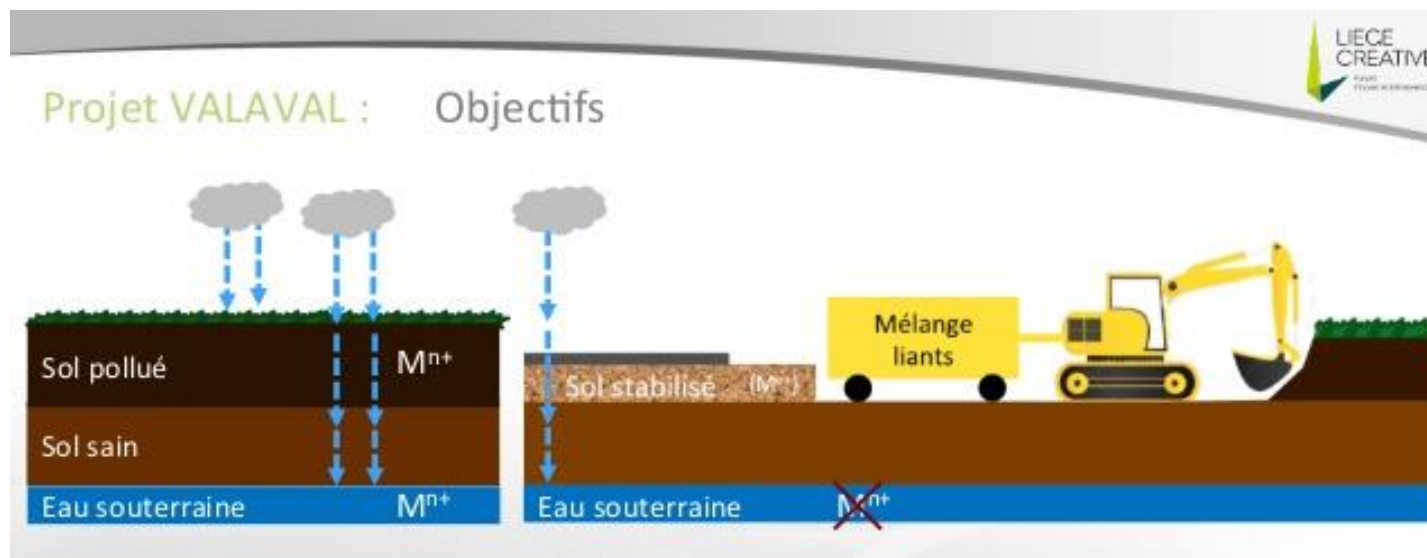
**Excavation**

2 426 340 tonnes

**Traitement sur site**

653 900 tonnes

- Stabilisation et solidification :



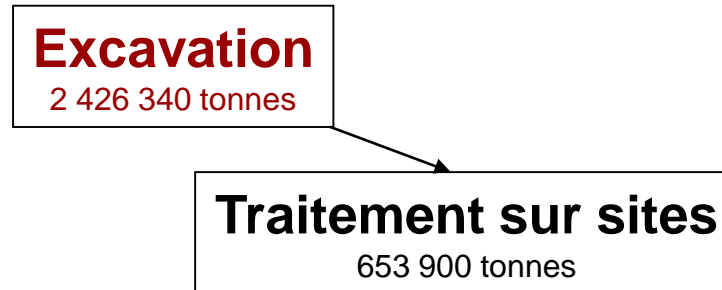
<https://www.slideshare.net/liegecreative/une-composition-originale-mixte-comme-alternative-linertage-des-sols-pollus-par-jonathan-jonlet-et-antoine-gobeaut-liege-creative-080316>

INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Méthodes : Excavation + traitement hors site



- Traitement thermique sur site :

Sols pollués chauffés afin de provoquer une désorption thermique

= extraction des différents gaz qui seront ensuite incinérés (utilisation de fours rotatifs, à lit fluidisé, ou des micro-ondes et des infra-rouges).

**Domaine d'application** : bien adapté aux hydrocarbures, HAP.

# Traitements des terres pollués

## Désorption thermique

### *Principe :*

Dépolluer des terres dans un four rotatif entre 250 et 500 °C

Polluants sont alors volatilisés

puis oxydation des polluants dans un four de post-combustion chauffé à 1000°C :

Principe retenu pour traiter une partie des terres de l'ancienne cokerie d'Auby dans le Nord (carbochimie) : **70 000 tonnes de terre à traiter**

Installé début 2004 sur le site, terminé fin 2004

Chantier mobile de traitement (automatisé, 24 h sur 24)

Application : composés organiques (hydrocarbures, solvants, goudrons)

La qualité de traitement se traduit par une dépollution homogène et quasi totale (faibles concentrations résiduelles en polluants) qui rend le matériau traité facilement valorisable (remblais...).





# Cokerie d'Auby : à la date du 04/05/2012 (BASOL):

- Étude des sols initiale réalisée en 1993.
- Étude diagnostic approfondi du site réalisée
- Étude de faisabilité des solutions de réhabilitation réalisée.
- Arrêté préfectoral du 20/03/1998 : prescriptions pour remise en état du site + suivi qualité eaux souterraines
- Mise en place barrière active sur site pour contenir pollution de la nappe superficielle.
- Surveillance des eaux souterraines : nappe superficielle et nappe de la craie (piézomètres)
- Travaux d'excavation et tri des terres achevés en mars 2003 (100 000 t). Les terres à traiter stockées sur une zone dépolluée. Le site mis en sécurité par une clôture.
- Suivi de l'efficacité de la barrière active est effectué.
- Traitement des terres par désorption thermique : fin 2003, achevé en fin 2004
- Remise du dossier de cessation d'activité en janvier 2005.
- Le captage d'alimentation en eaux potable le plus proche est situé à 1 km en amont du site, cela minore le risque pour les populations alentours. Il en va de même pour les puits privés recensés, ceux-ci sont situés en amont du site.
- Le site est mis en sécurité vis à vis des tiers.
- Une action de l'administration est toujours en cours sur ce site.

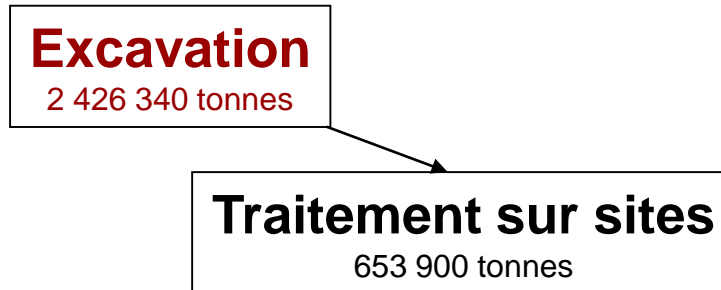


INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Méthodes : Excavation + traitement hors site



## Extraction des substances polluantes - lavage de sols :

= déplacer les contaminants dans une phase liquide pour un traitement ultérieur.

**Domaine d'application** : Sols contaminés par substances minérales (quelquefois composés organiques).

# Méthodes : Excavation + traitement hors site

**Traitement in situ**

846 400 tonnes

- **Bioventing (procédé in situ)**

= procédé d'injection de nutriment similaire à la bioremédiation, mais dans lequel le fluide porteur de nutriment est de l'eau ou de l'air.

→ développement bactérien optimum pour la dégradation des polluants.

**Application** : polluants volatils résiduels, huiles et lubrifiants du gasoil.



INRAE

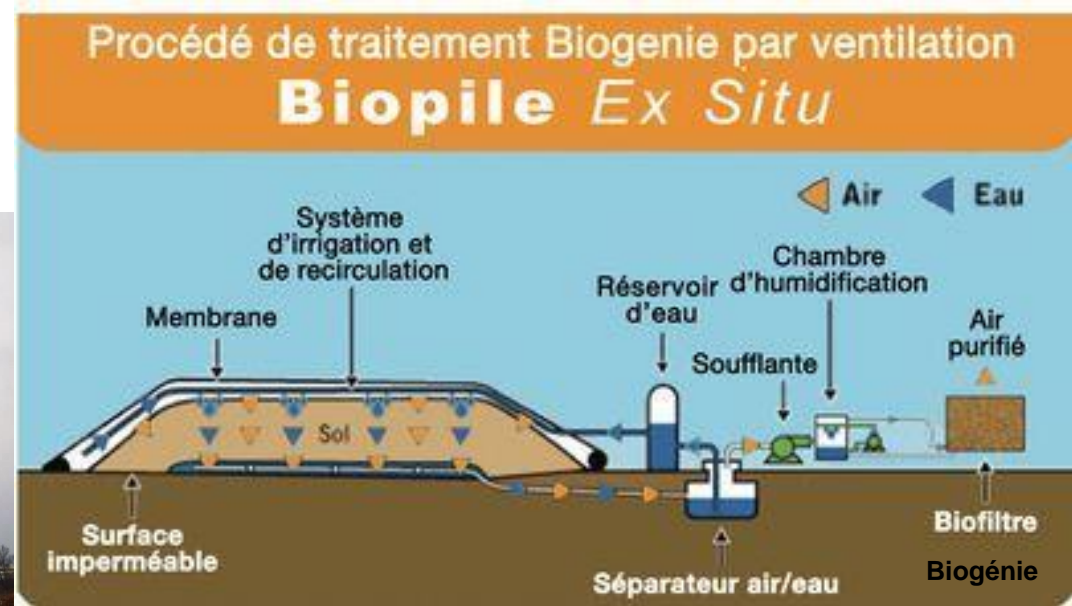
Valérie Sappin-Didier



# Méthodes : Excavation + traitement hors site

## Bioventing (procédé in situ)

= Stimulation du métabolisme microbien par apport d'eau, d'air, de calories, d'éléments nutritifs (C, N et P), voire d'un inoculum adapté



# Méthodes : Traitements in situ

**Traitement in situ**

846 400 tonnes

- Extraction des substances polluantes - Volatilisation :

Extraction des contaminants contenus dans le sol en transférant ces derniers en phase gazeuse pour ensuite les traiter.

**Domaine d'application** : applicable essentiellement aux composés organiques et organohalogénés volatils.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Méthodes : Traitements in situ

**Traitement in situ**

846 400 tonnes

- Extraction des substances polluantes par végétaux

(phytoextraction)

Extraction des contaminants contenus dans le sol par des plantes capables d'extraire des quantités importantes de contaminants et produisant une biomasse importante.

**Domaine d'application** : applicable aux polluants minéraux et aux composés organiques.

*(Partie développée dans la suite du cours)*



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Méthodes : Traitements in situ

**Traitement in situ**

846 400 tonnes

- Dégradation microbologique (bioremédiation) :

Utilisation de micro-organismes pour la dégradation des composés polluants.

**Domaine d'application** : essentiellement aux sols et aux eaux souterraines pollués par des contaminants organiques.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Méthodes : Traitements in situ

**Traitement in situ**

846 400 tonnes

- Immobilisation des substances polluantes dans le sol :

Apport dans le sol de phases sorbantes ou de phase modifiant des propriétés du sol

**Domaine d'application :** applicable aux sols pollués par polluants minéraux

*(Partie développée dans la suite du cours)*



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Méthodes : Traitements in situ (Exemple)

**Traitement in situ**

846 400 tonnes

## Pompage écrémage (in situ)

= système de pompage sélectif éliminant le produit contaminant, en général des hydrocarbures.

Généralement utilisé pour des aquifères.



# Gestion projets d'aménagement sur sites pollués

De nombreux sites urbains ayant accueilli par le passé des activités industrielles se retrouvent à l'état de friches polluées.

La reconquête de ce foncier = enjeu majeur de la recomposition des fonctionnalités et des paysages urbains.

Les projets d'aménagement représentent environ 70% du marché de la dépollution (études et travaux) et concernent principalement des sites en zone urbaine.

Ces sites représentent souvent les particularités suivantes :

- ont accueilli une activité industrielle ou de service ayant cessé son activité de longue date ;
- pollutions découvertes résultent d'activités industrielles historiques ou d'apports de remblais d'origine et de nature diverses ;
- dans certains cas, des habitations y ont été implantées.

Le guide de l'aménageur permet d'intégrer cette contrainte et de fournir des méthodes et des outils aux collectivités territoriales, aux aménageurs ou promoteurs dans leurs projets de réhabilitation de sites pollués.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Maitre d'ouvrage et Maitre d'œuvre

Bureaux qui réalisent l'étude, le plan de gestion

Bureaux ou entreprises qui réalisent les travaux de réhabilitation

Bureaux qui réalisent la « surveillance écotoxique » du site



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Maitre d'ouvrage et Maitre d'œuvre : qqs exemples



**Société TERÉO** assure prestations suivantes :

- Etudes préliminaires de recherche et d'identification d'une pollution,
- Etudes approfondies de caractérisation détaillée des pollutions et des risques,
- Ingénierie des travaux de dépollution et/ou maîtrise d'œuvre : études de faisabilité, conception, consultation des entreprises, suivi et contrôle,
- Surveillance : conception, réalisation et entretien, prélèvement et analyse, interprétation.



**Société Valgo** assure prestations suivantes :

- Décontamination (traitement amiante/Pb, déconstruction, gestion des déchets)
- Dépollution (sol, nappe)
- Développement (ingénierie de reconversion immobilière, valorisation du patrimoine)



**Société Bio-Tox** assure prestations suivantes :

- Expertises environnementales (Evaluation des risques, accompagnement projet...)
- Expertises produits (élaboration de dossier de demande d'autorisation),
- Biosurveillance et bio-indicateur.



**Société Ginger** assure prestations suivantes :

- Expertise de la Construction
- Ingénierie de la Construction
- Ingénierie de l'Environnement (diagnostics de pollution des sols, réhabilitation des sites, valorisation des déchets, eau, captage, eaux de surface, eau potable, eaux pluviales, plans de prévention des risques, infrastructures, aménagement du territoire, études d'impact, etc.).

INRAE

Valérie Sappin-Didier



# IV - Cas particulier : Les sols agricoles



INRAE

Valérie Sappin-Didier

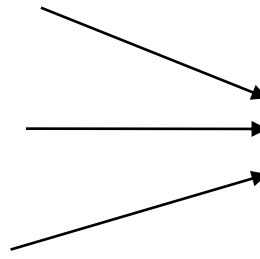


# Sols agricoles

Sols proche de site industriel

Sols proche de mines

Sols proches d'agglomération



Pollution diffuse

Avec [polluants] dans  
sol + ou - importantes

↪ *[métaux et métalloïdes] dans les sols > [métaux et métalloïdes] fond pédogéochimique*

↪ *Présence de polluants organiques*

***Problèmes : chute de rendement, toxicité suite à changement de culture, [métaux et métalloïdes] dans récolte > réglementation*** (Teneurs

max des produits végétaux : EC 2005/87 : Alimentation animale  
EC 2008/629 : Alimentation humaine)



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Gestion des sols cultivés contaminants

## Objectif : diminuer la teneur en contaminants dans les produits récoltés

- ↳ Minimiser les apports
- ↳ Choisir la bonne espèce végétale
- ↳ Diminuer la disponibilité chimique des contaminants pour les organismes vivants

Il faut trouver une solution sans détruire l'agrosystème : pas d'excavation, pas de traitement thermique, ....

Il faut conserver structure du sol, fertilité du sol, ... = optimale



INRAE

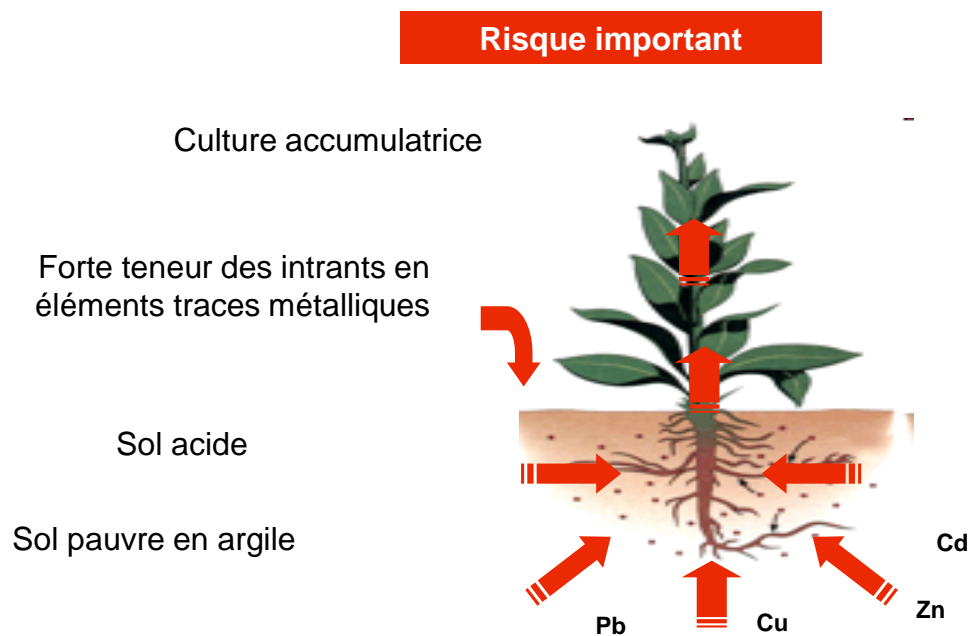
Valérie Sappin-Didier



# Stratégies de gestion de sols agricoles

↳ Fonction du niveau de contamination du sol et de l'usage

Evaluer le risque



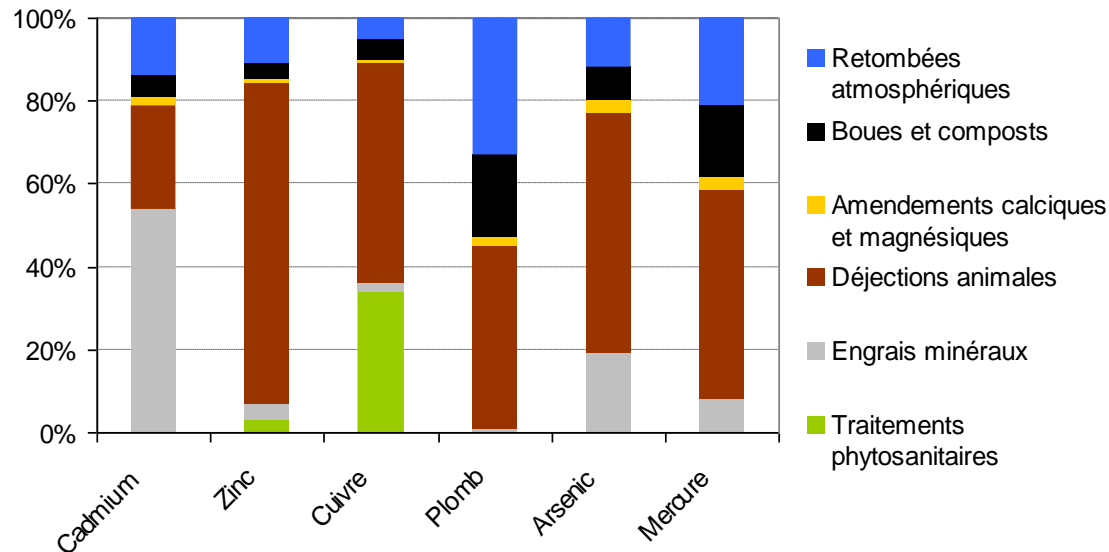


# Gestion des sols cultivés contaminants

## Objectif : diminuer la teneur en contaminants dans les produits récoltés

↳ Minimiser les apports

### Minimiser les apports

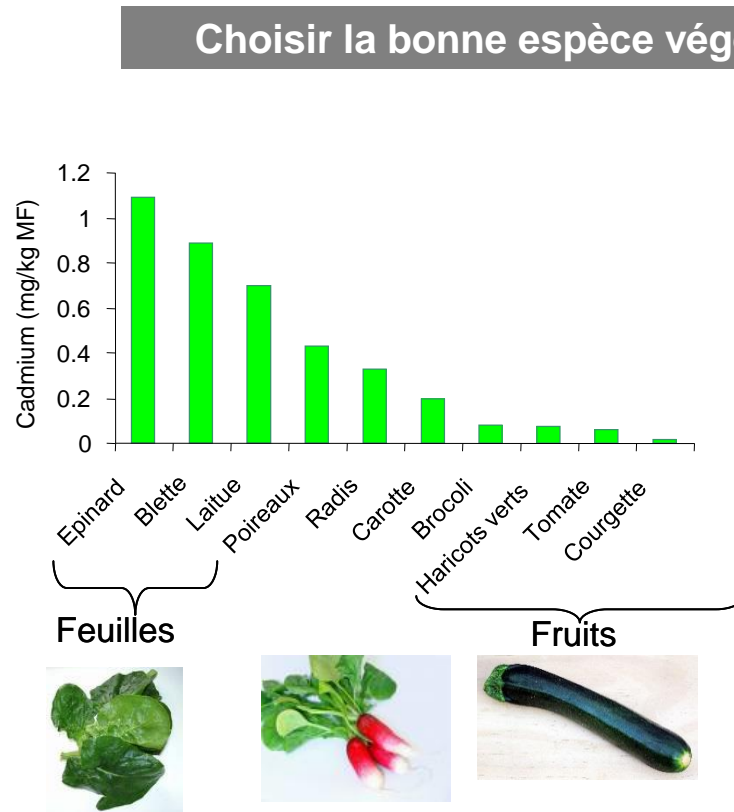


Surveiller la qualité des produits apportés aux cultures

# Gestion des sols cultivés contaminants

## Objectif : diminuer la teneur en contaminants dans les produits récoltés

→ Choisir la bonne espèce végétale

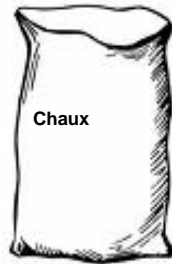


# Gestion des sols cultivés contaminants

## Objectif : diminuer la teneur en contaminants dans les produits récoltés

→ Diminuer la disponibilité chimique des contaminants pour les organismes vivants

Réduire la disponibilité chimique des éléments traces pour la plante



Augmenter le pH



Apporter de la matière organique



Apporter des matières complexantes

# V - Méthodes biologiques : phytoremédiation



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Exemples d'applications : phytoremédiation

## Phytoremédiation :

Toutes technologies utilisant des plantes, des algues (phycoremédiation) ou des champignons (mycoremédiation) pour éliminer, contrôler ou accélérer la dégradation par l'activité microbienne des contaminations.

Objectifs

- ↳ réduire,
- ↳ dégrader
- ↳ immobiliser

composés organiques (naturels ou de synthèses), inorganiques (ETM, radionucléides, explosifs).

- Domaine d'application : dépollution des sols, épuration des eaux usées ou l'assainissement de l'air intérieur.



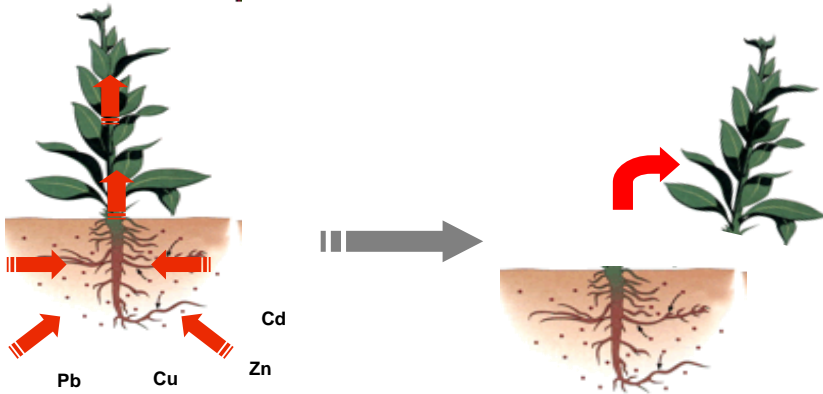
INRAE

Valérie Sappin-Didier



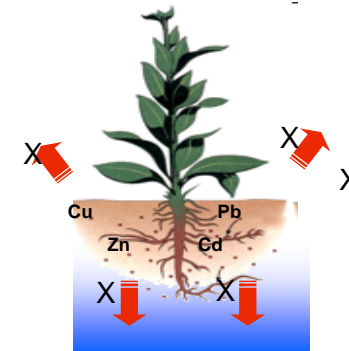
# Exemples d'applications : phytoremédiation

## Phytoextraction



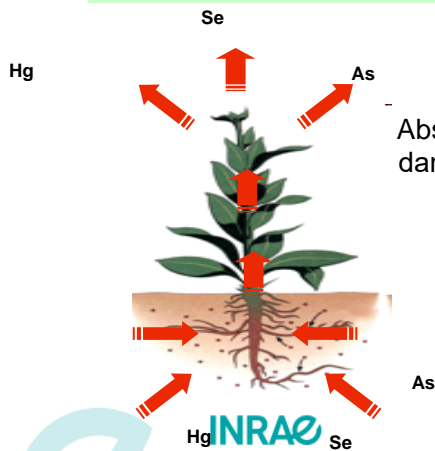
récolte et traite partie aérienne qui ont accumulé les contaminants

## Phytostabilisation



limitent lessivage, ruissellement, l'absorption des contaminants en les immobilisant dans le sol

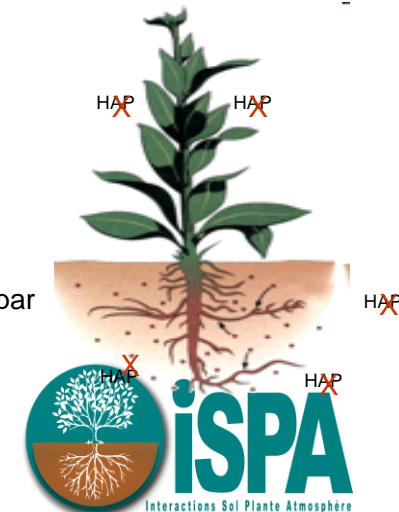
## Phytovolatilisation



Absorption des éléments puis élimination dans l'atmosphère par la transpiration de la plante

## Phytodégradation

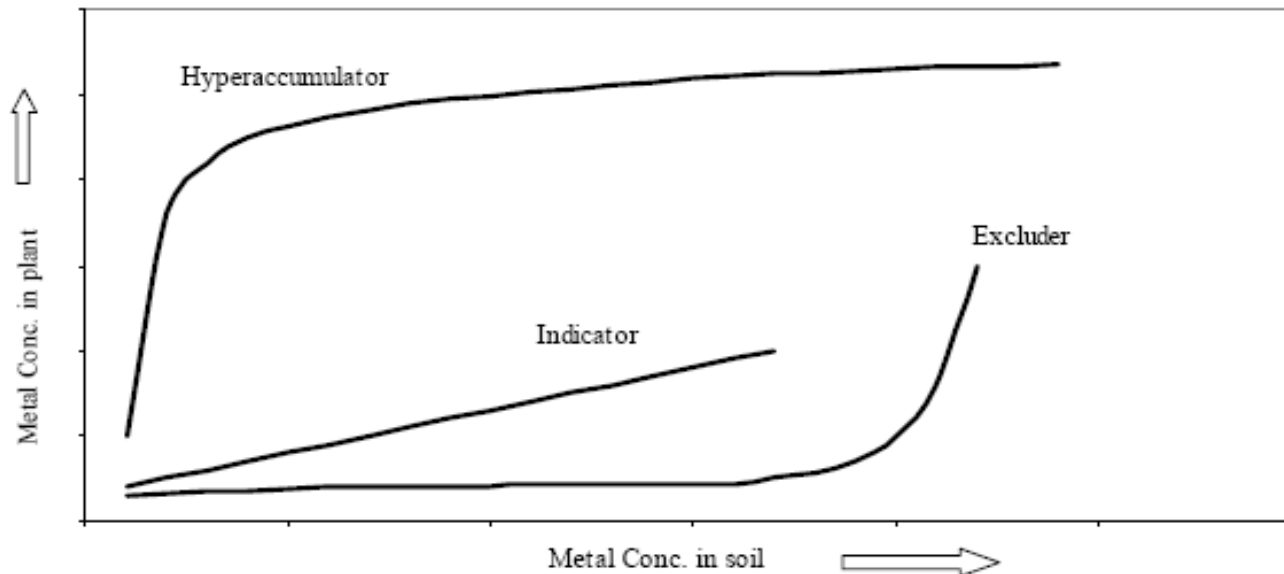
Dégradation des polluants organiques par la plante



# Plantes : 3 stratégies

- **Hyperaccumulation** : accumulation importante de métal dans P.A. / à [métal] dans le sol
- **Indicateur** : régulation du transfert de métal dans P.A. jusqu'à toxicité
- **Excluders** : plante tolérante. Régulation du prélèvement qd [metal] dans sol important ➔ couvert végétal évitant la dispersion contamination par érosion éolienne.

*Figure 1. Conceptual response strategies of metal concentrations in plant tops in relation to increasing total metal concentrations in the soil*



*Figure. 1 - Conceptual response Strategies of metal concentrations in plant tops in relation to increasing total metal concentrations in the soil*

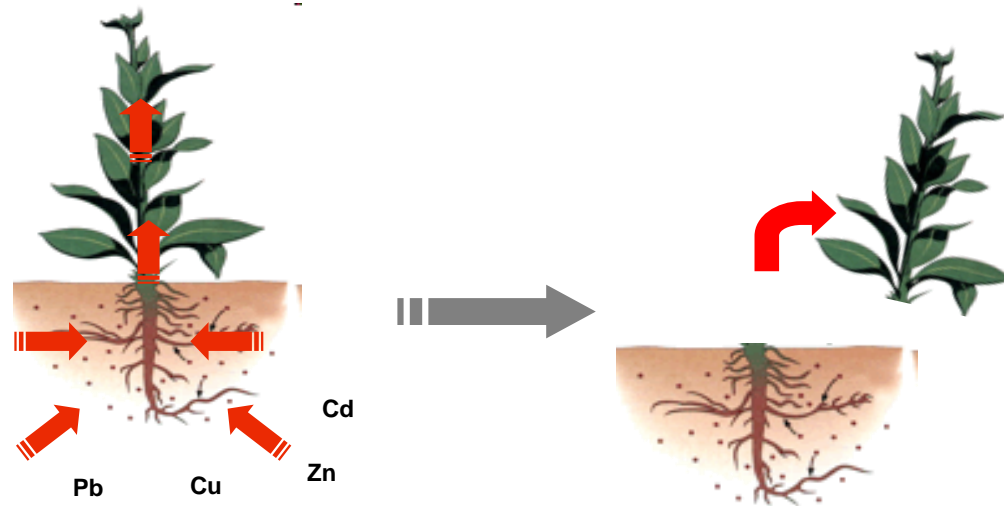
# Phytoremédiation : Phytoextraction

Plantes : absorbent et concentrent dans feuilles, tiges les polluants

Plantes récoltées et incinérées : cendres stockées ou valorisées pour récupérer les métaux accumulés (on parle alors de **phytomining**).



*Thlaspi caerulescens*



Plantes **hyperaccumulatrices** (Thlaspi, Alyssum, moutarde) et/ou à forte biomasse

Capables de tolérer et d'accumuler les ETM



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Hyperaccumulateurs ou hyper-accumulatrices

Plantes capable d'extraire des volumes importants de polluants.

= concentrer le ou les polluants selon un % minimum variant selon le polluant concerné

(Ex. : plus de 1 mg/g de MS pour Ni, Cu, Co, Cr ou Pb; ou plus de 10 mg/g pour Zn ou Mn)

## Caractéristiques communes aux hyperaccumulateurs :

- pousse rapide ;
- végétaux résistants,
- faciles à planter et maintenir ;
- grande capacité pour l'évapotranspiration
- capacité de transformer les contaminants concernés en des produits non-toxiques ou moins toxiques.
- hypertolérance, ou phytotolérance : résultat de **l'évolution adaptative** des plantes à des environnements hostiles au cours de multiple générations.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Hyperaccumulateurs ou hyper-accumulatrices

Plantes les plus utilisées = peupliers (rapidité de croissance, grande adaptation climatique, capacité à absorber de grandes quantités d'eau, donc traitement de grandes quantités de polluants dissous, limitation de la propagation de la contamination).

En 1999, Reeves et al. listent 320 espèces accumulatrices provenant de 43 familles.

Actuellement, nombre + élevé (environ 300 hyperaccumulateurs de Ni ( Cuba (climat subtropical) et Nouvelle-Calédonie (climat tropical))

## Espèces fonction des éléments :

Zn : Brassicacées, Caryophyllacées, Lamiacées et Violacées.

Pb et Cd : surtout Brassicacées.

Cu et Co : peu nombreuses, Lamiacées, Astéracées, Cypéracées, Scrofulariacées, Amarantacées.

Ni : hyper accumulé par les trois quarts des espèces connues (Brassicacées, Scrophulariacées, Euphorbiacées, Saxifragacées et Sapotacées).



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Potentiels de bioaccumulation des différentes plantes

**Table 1.5** Normal composition of trace elements in a plant (Market 1994)

Trace element	$\mu\text{g g}^{-1}$
Aluminium	80
Cadmium	0.05
Chromium	1.5
Cobalt	0.2
Copper	10
Gold	0.001
Iron	150
Lead	1
Manganese	200
Mercury	0.1
Molybdenum	0.5
Nickel	1.5
Silver	0.2
Zinc	50



Berkheya coddii



Nocea caeruleascens



Minuartia verna

**Table 1.6** Definitions of hyperaccumulators (lowest metal concentration in leaves), numbers of taxa and families which are hyperaccumulators, and examples of hyperaccumulators (Baker et al., 1998; Reeves and Baker 1998)

Metal	Concentration in leaves $\text{mg}(\text{g DW})^{-1}$	Number of		Example of species
		Taxa	Families	
Cd	> 0.1	1	1	<i>Thlaspi Caerulescens</i>
Pb	> 1	14	6	<i>Minuartia verna</i>
Co	> 1	28	11	<i>Aeollanthus biformifolius</i>
Cu	> 1	37	15	<i>Aeollanthus biformifolius</i>
Ni	> 1	317	37	<i>Berkheya coddii</i>
Mn	> 10	9	5	<i>Macadamia neurophylla</i>
Zn	> 10	11	5	<i>Thlaspi Caerulescens</i>

# Hyperaccumulatrice de Cd/Zn

*Nocca caerulescens*



INRAE

Valérie Sappin-Didier



BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO

# Hyperaccumulateur de Ni

## *Sebertia acuminata*



[Ni] = 20 %

[Ni] = 1.2 %



# Distribution du Ni dans la plante

## *Sebertia acuminata*

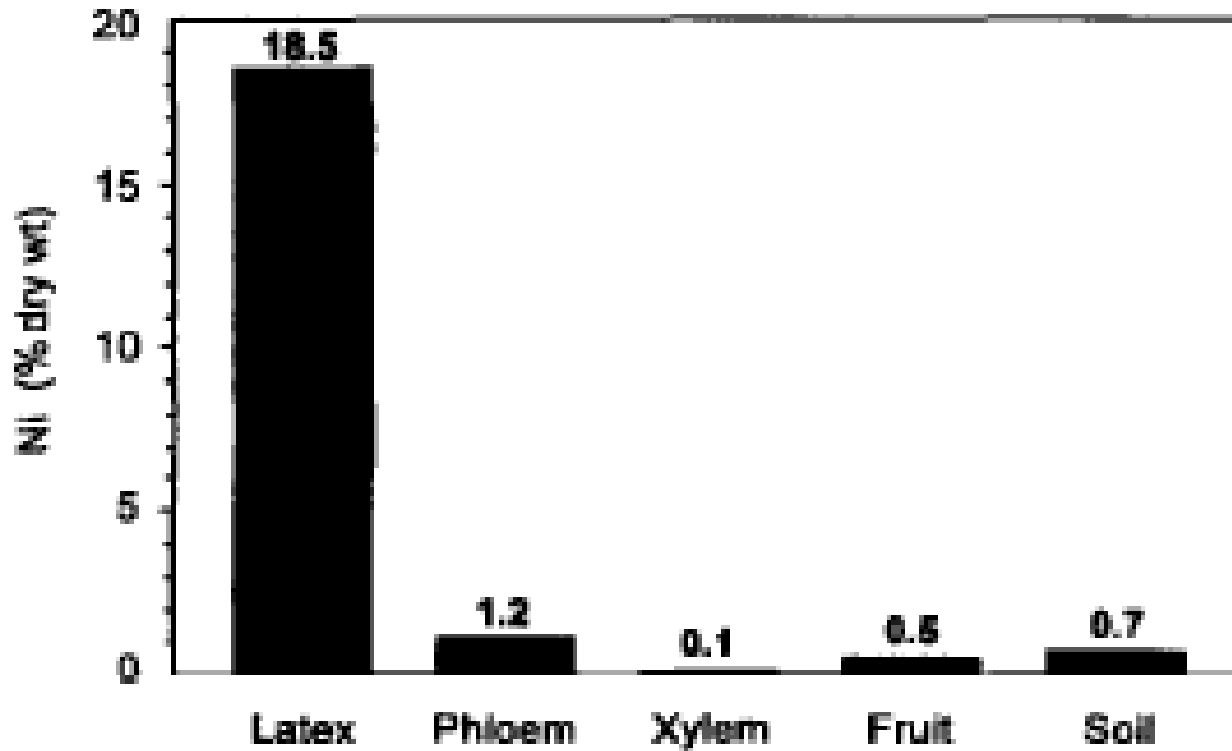


Fig. 2. Nickel content in latex and different parts of *Sebertia acuminata* compared with the nickel content of the respective soil.

# Hyperaccumulateur de Ni



Alyssum murale



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Hyperaccumulatrice de plomb



INRAE

Valérie Sappin-Didier



BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO



# Hyperaccumulateur d' Arsenic :

## *Pteris vittata* (fougère)



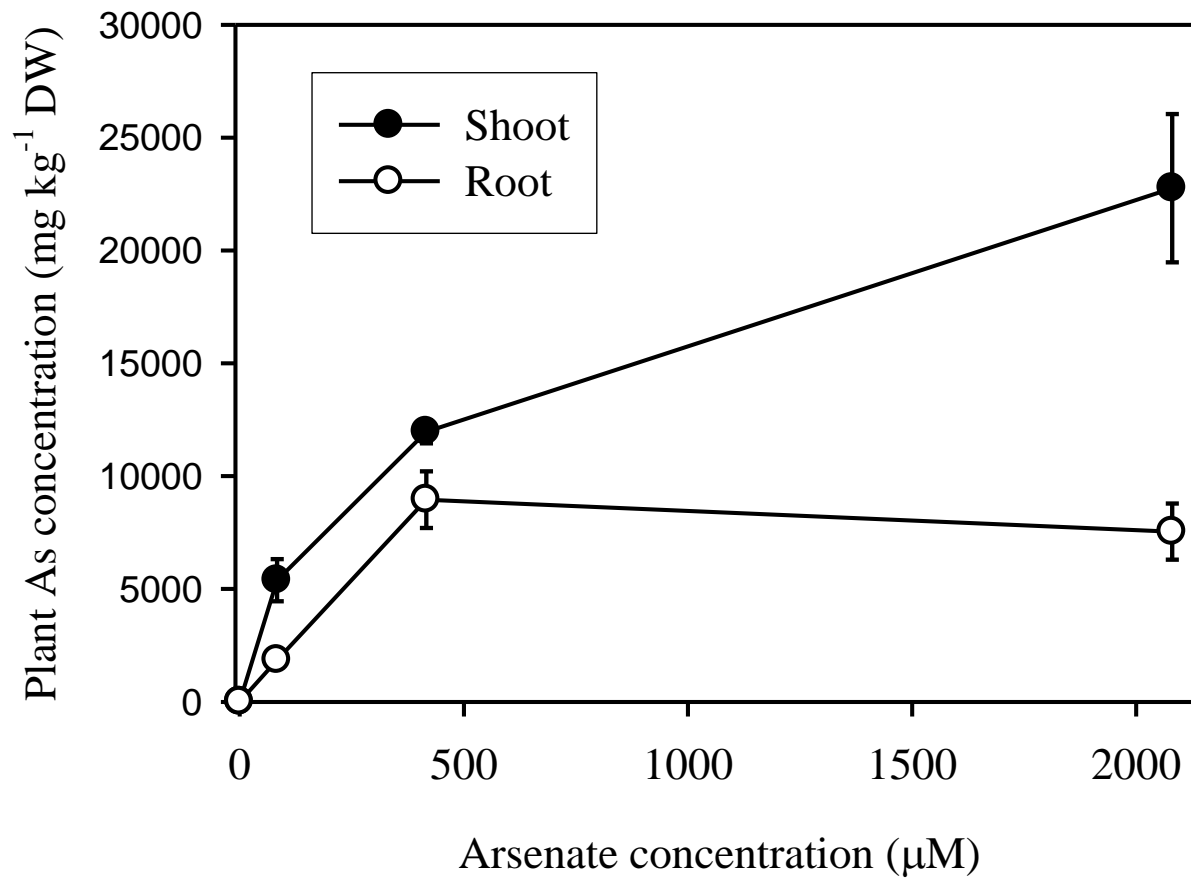
INRAE

Valérie Sappin-Didier

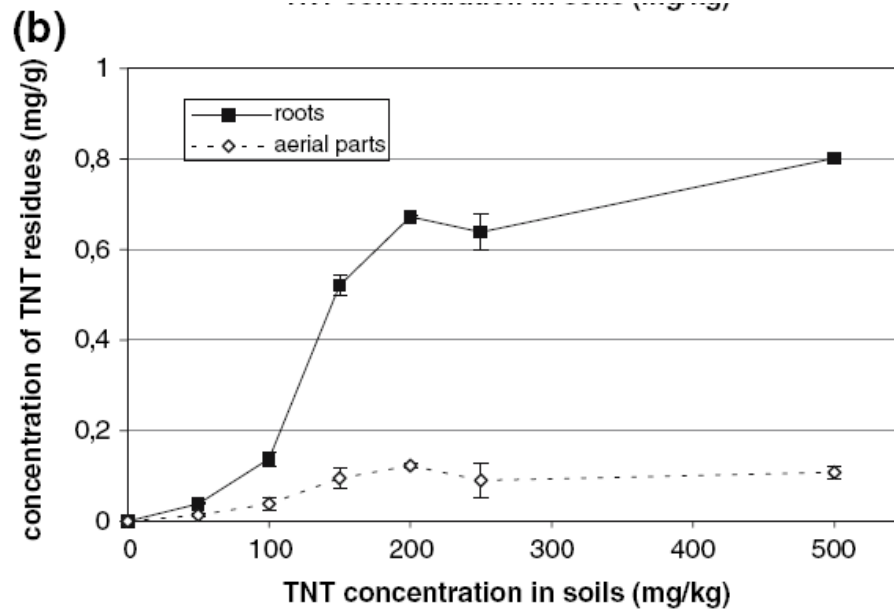


BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO

# Hyperaccumulation Arsenic par *Pteris vittata*



# Phytoextraction des polluants organiques (explosifs TNT)



Vila et al. 2007 et 2008

# Phytoextraction

*Nocca caerulescens*

Zn/Cd hyperaccumulateur



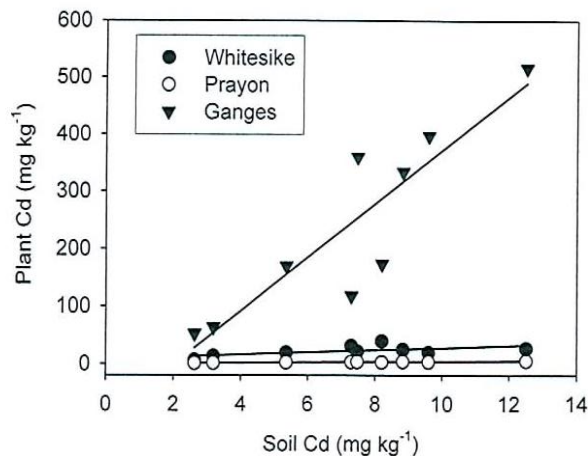
# Phytoextraction



*Thlaspi caerulescens* (Alpine Pennygrass)  
(specific Cd-accumulation potential up to 3000 mg kg<sup>-1</sup>)

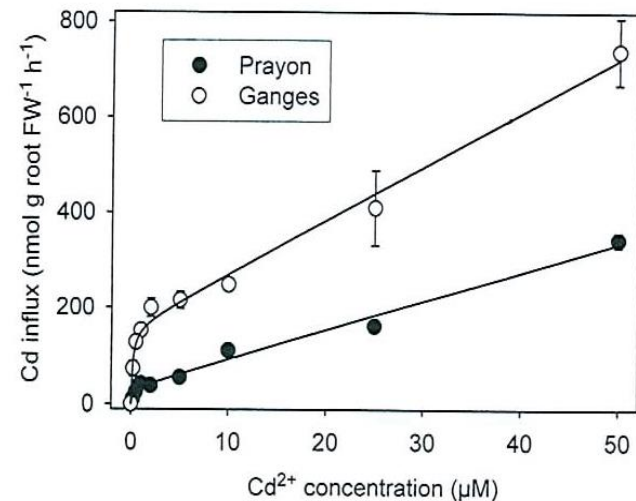
## Hypt de l'hyperaccumulation:

- caractères génétiques
- rôle de défense contre pathogènes, herbivores
- système très efficace dans absorption métal et ou translocation (transporteur ZIP, ZRT, IRT protéines : Fe, Zn, Cd par ex; canaux Ca pour Cd)



**Figure 3** Cadmium concentrations in three different ecotypes of *T. caerulescens* grown on different plots of a long-term sewage sludge experiment at Woburn, England.

McGrath et al., 2001



**Figure 4** Concentration-dependent <sup>109</sup>Cd uptake kinetics in two contrasting populations of *T. caerulescens*.

McGrath et al., 2002

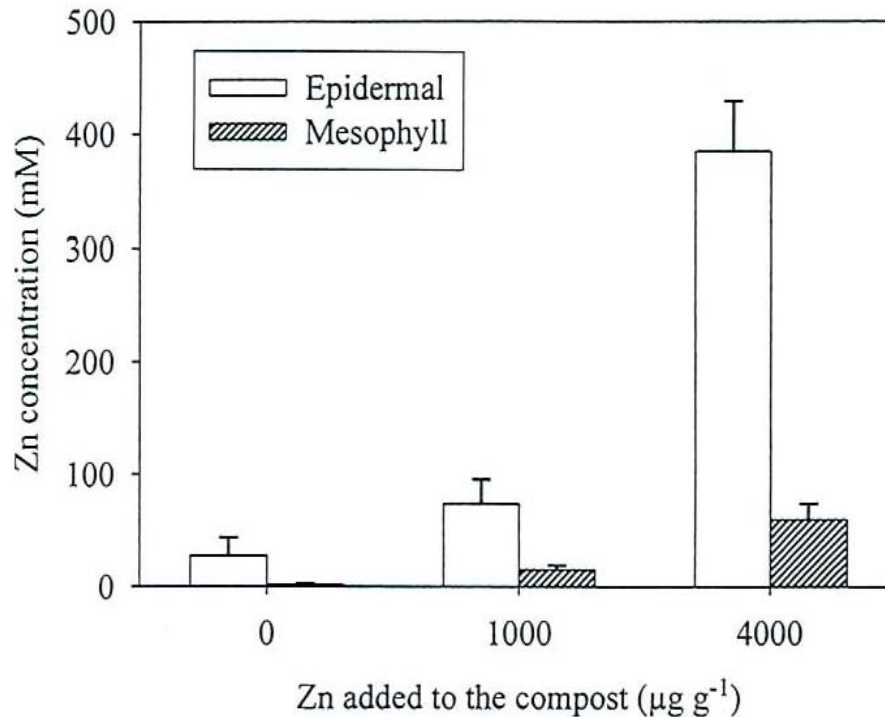


INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Phytoextraction



**Figure 6** EDXMA line-scan of a cross section of a *T. caerulescens* leaf showing preferential accumulation of Zn in the epidermal cells (top panel) and concentration of Zn in the single-cell saps extracted from epidermal and mesophyll cells of leaves of *T. caerulescens* (bottom panel). (Adapted from Küpper *et al.*, 1999, with permission from the American Society of Plant Physiologists).

# Phytoextraction

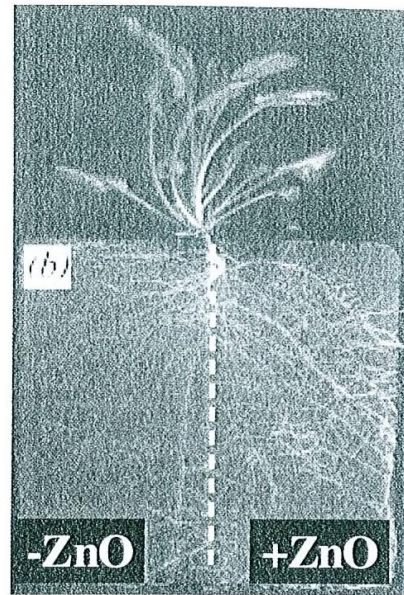


Croissance de l'hyperaccumulateur de cadmium et de zinc *Thlaspi caerulescens* sur un sol agricole non pollué (gauche) et sur un sol industriel pollué par des métaux (droite).

Schwartz, 1998

# Phytoextraction

211



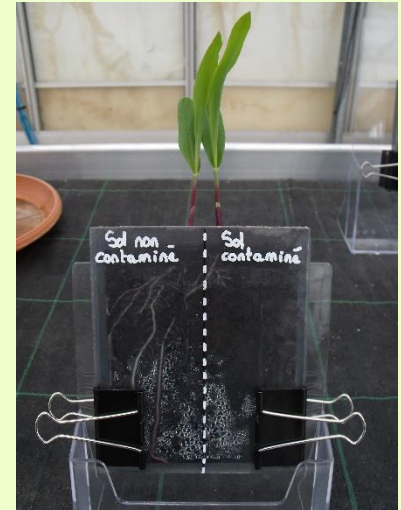
McGrath et al., 2001

age

25

75

contaminated soil with (+) or without (-) ZnO added at 500 mg Zn  
f S. N. Whiting).



- Cu

+ Cu

Plante non accumulatrice (blé)

Sappin-Didier et al, 2015

Réponse positive de *Thlaspi caerulescens* à sol pollué.

Réponse contraire pour *Thlaspi arvense* (non hyperaccumulateur).



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Phytoextraction

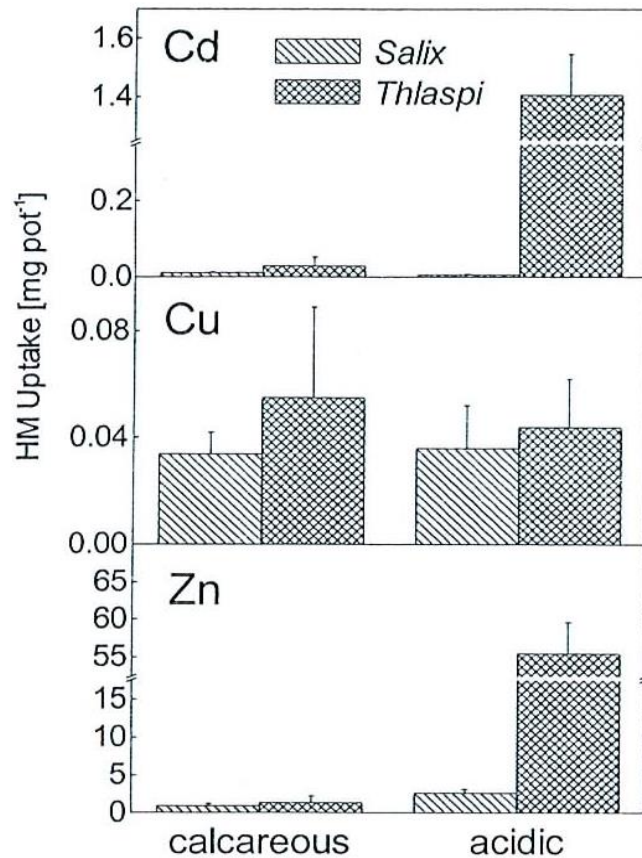


Fig. 1. Uptake of heavy metals (HM) by *Salix viminalis* and *Thlaspi caerulescens* from the calcareous (Soil 1) and acidic (Soil 2) soils.

Hammer and Keller, 2002

Effet sol :

↳ spéciation différente du métal

Effet espèce

↳ capacité d'accumulation différente

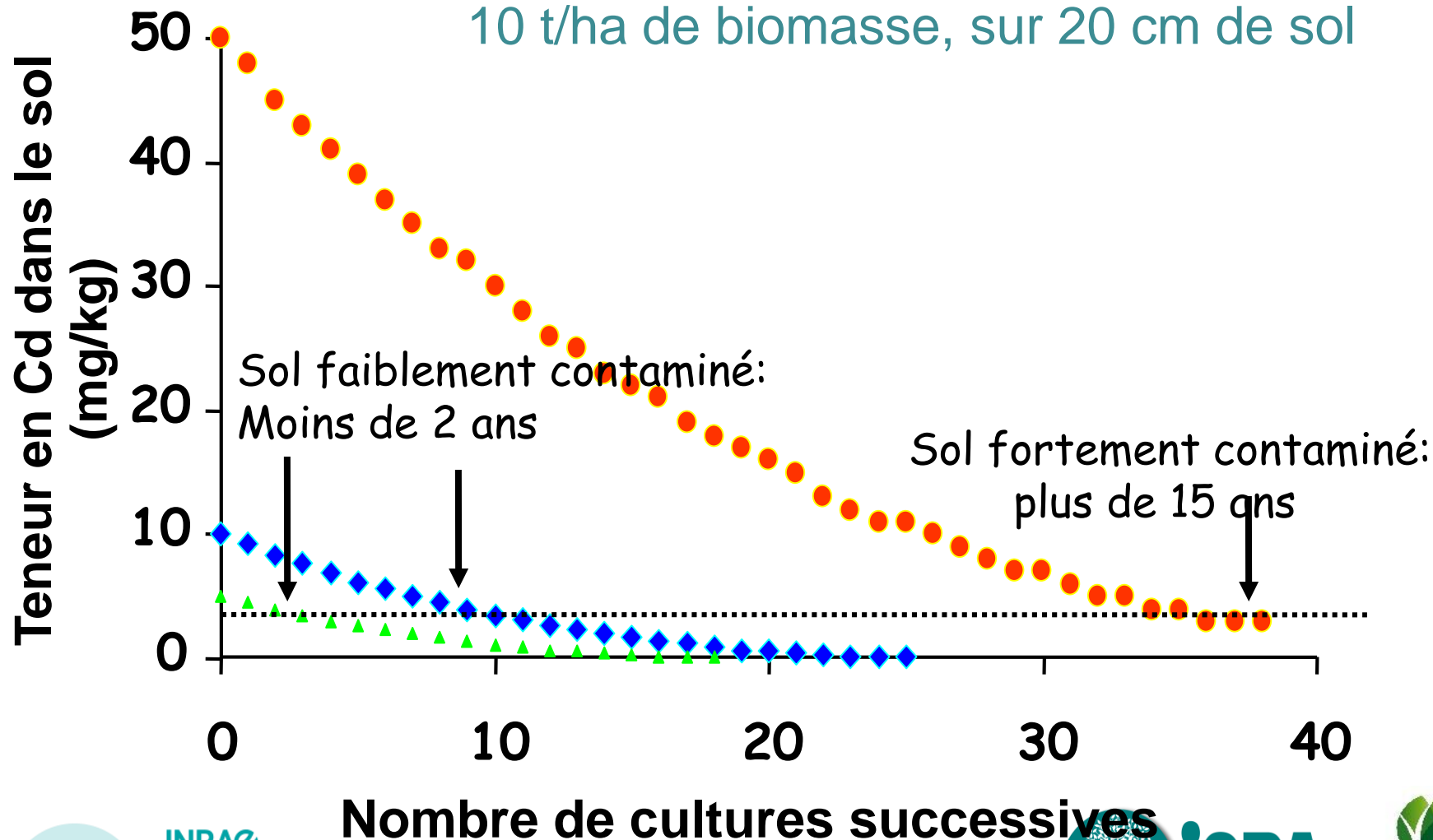
Effet Métal

↳ Accumulation différente en fonction métal

# Phytoextraction de Cd : faisabilité

*Noccea caerulescens* (S. France)

10 t/ha de biomasse, sur 20 cm de sol



# Phytoextraction : à améliorer

## Amélioration la technique :

- Problème principal : peu d'espèces ayant à la fois une biomasse élevée et la capacité d'accumuler les métaux à des teneurs importantes.

↳ transfert de gènes bactériens ou végétaux.

Technologie permettant d'apporter le caractère hyper accumulateur aux espèces végétales à biomasse élevée et d'accroître la tolérance des plantes aux concentrations toxiques en polluants

- Dans certains cas, disponibilité des éléments du sol trop faible : remédiation impossible à courte échelle.

↳ stimuler le prélèvement des métaux par les plantes en agissant sur la biodisponibilité = fertilisation, diminution du pH, injection de chélates dans le sol ou une combinaison de ces méthodes



INRAE

Valérie Sappin-Didier



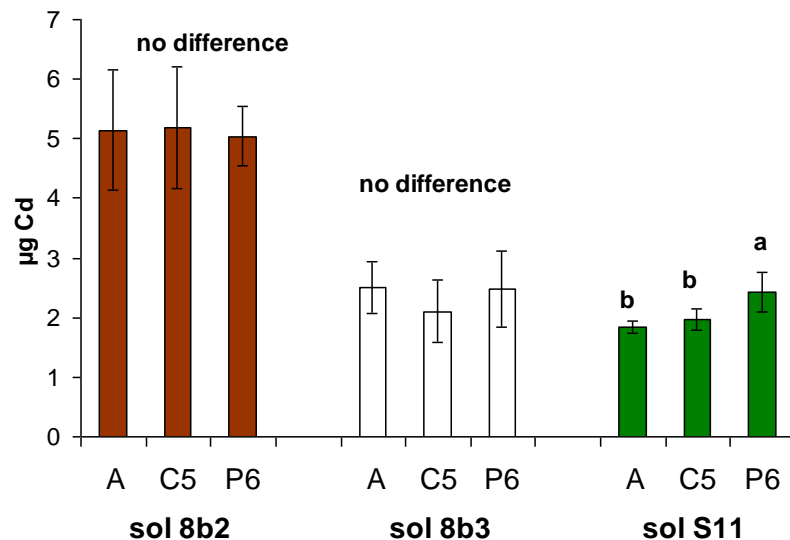
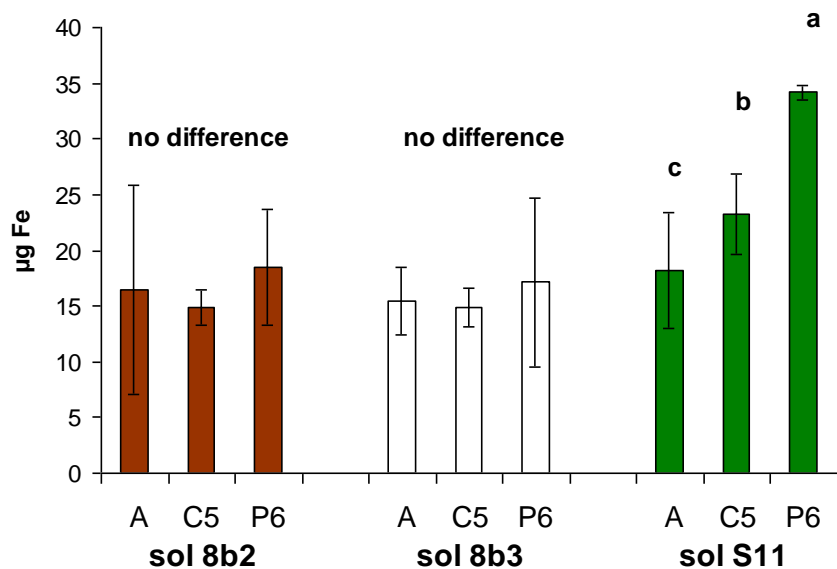
# Manipulations génétiques

1 tabac témoin A

2 tabacs transgéniques surexprimant la ferritine (protéine de stockage Fe) dans le cytoplasme C5 ou le chloroplaste P6

3 sols pollués :

sols	pH	matière organique g/kg sol	CEC cmol/kg sol	Cd mg/kg sol	Zn mg/kg sol
8b2	5,8	23,6	8,6	2,39	339
8b3	6,5	21,7	7,9	2,56	404
S11	7,0	21,1	11,1	2,20	328



INRAE

Valérie Sappin-Didier



Sappin-Didier et al., 2005



BORDEAUX SCIENCES AGRO

# Augmenter la phytoextraction

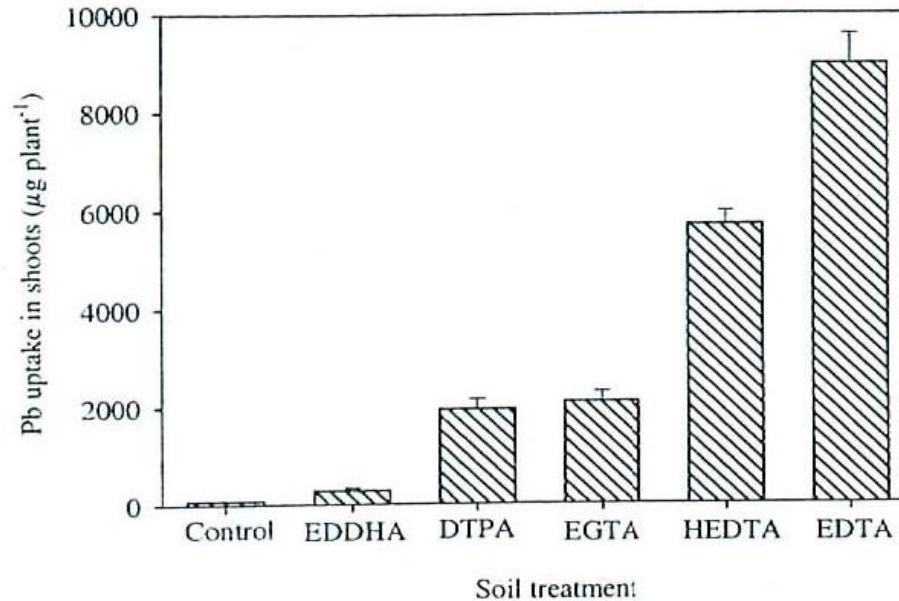


Figure 3. The effect of addition of five different chelates at ( $0.5 \text{ g kg}^{-1}$  soil) to a contaminated soil on Pb uptake ( $\mu\text{g plant}^{-1}$ ) by pea plants (data from Huang et al., 1997).

McGrath et al., 2001

Augmenter la mobilité du contaminant pour augmenter son prélèvement

# Augmenter la phytoextraction

## Chelators

### Natural

Phytochelatines

Metallothioneins

**Natural Low Molecular Weight Organic Acids**

(NLMWOA: citric acid, tartaric acid, oxalic acid )

**Humic and fulvic acids**

### Synthetic

**EDTA : Ethylenediaminetetraacetic acid**

EGTA : Ethyleneglycoltetraacetic acid

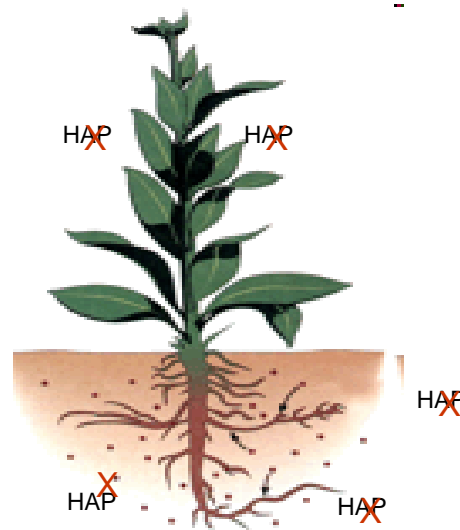
NTA : Nitrilotriacetic acid

DTPA : Diethylenetriaminepentaacetic acid

Increase of metal tolerance of plants

Increase bioavailability  
of heavy metals in soil

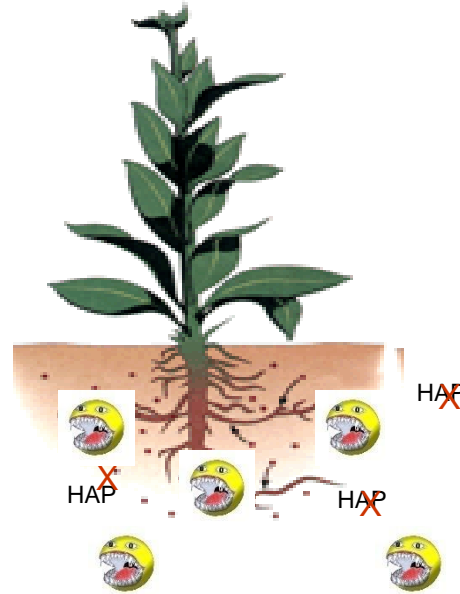
# Phytoremédiation : Phytodégradation ou Phytotransformation



Utilisation de plantes produisant des enzymes (déhalogénase, oxygénase, ...) qui catalysent la dégradation des substances absorbées ou adsorbées;

Substances alors transformées en substances moins toxiques ou non-toxiques par la métabolisation des contaminants dans les tissus des plantes ou par les organismes de la rhizosphère (dans ce cas rhizodégradation)

# Phytoremédiation : Phytostimulation



Localisée essentiellement dans la rhizosphère, c'est la stimulation par les plantes des activités microbiennes favorables à la dégradation des polluants organiques.

Phénomène constaté chez tous les hyperaccumulateurs.



# Phytoremédiation : Phytofiltration ou rhizofiltration

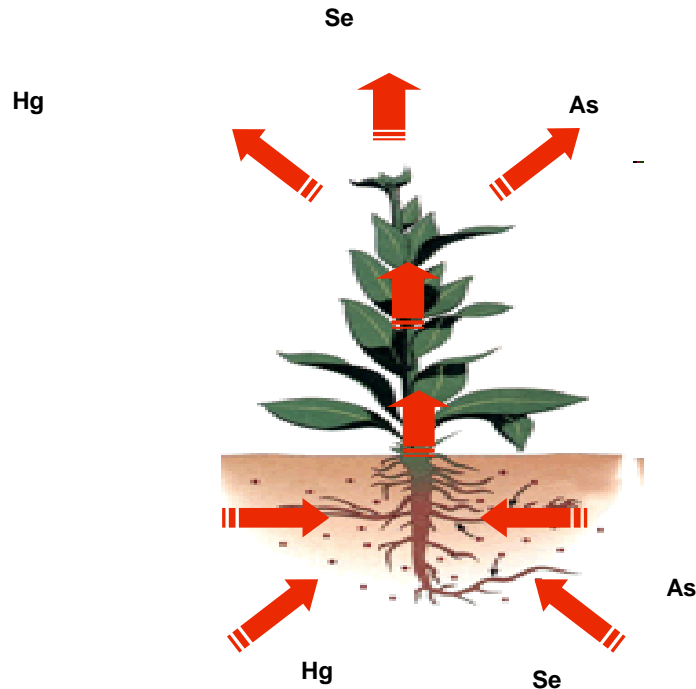
Utilisée pour la dépollution et la restauration des eaux de surface et souterraines.

Les contaminants sont absorbés ou adsorbés par les racines des plantes en milieu humide.

Peux être associée avec autre technique de décontamination : Lavage du sol, puis phytofiltration ou rhizofiltration de la solution extraite contenant les contaminants



# Phytoremédiation : Phytovolatilisation (1)

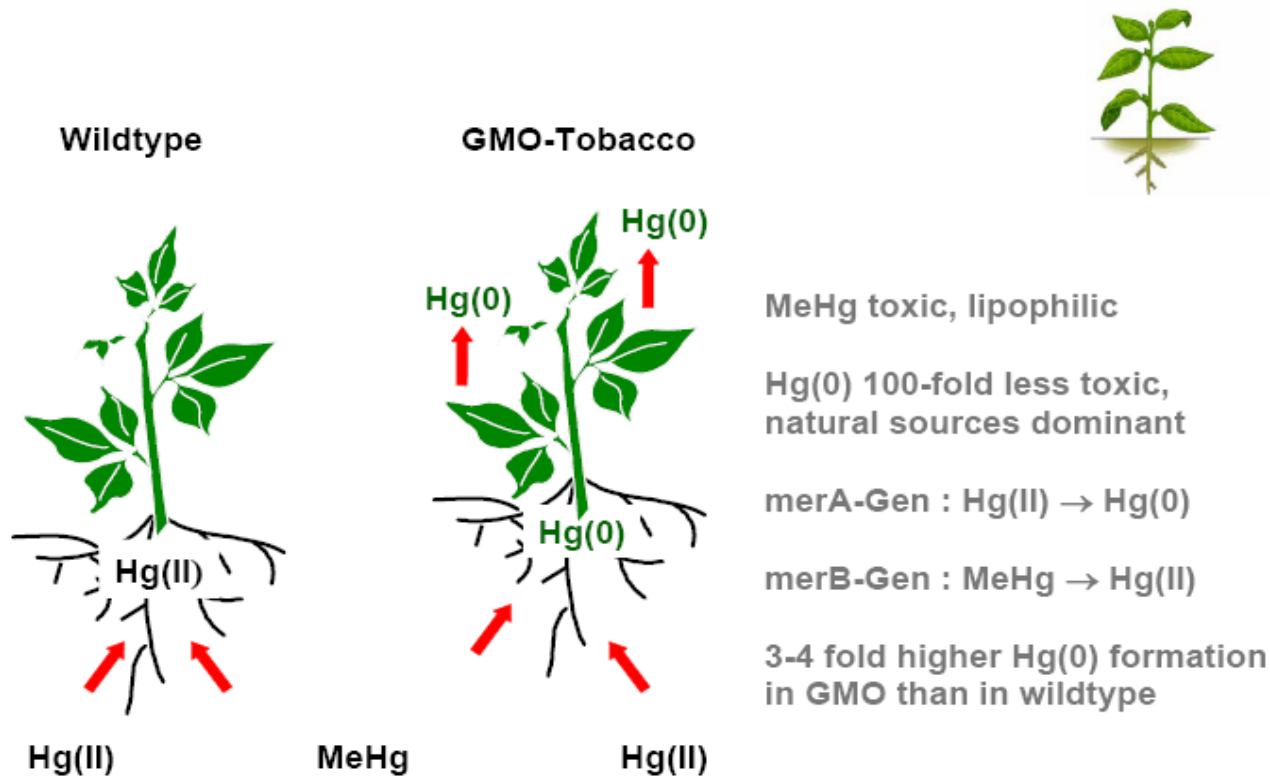


contaminants organiques et autres produits toxiques sous forme méthyliées (ETM volatile ex : Hg)

Phytovolatilisation : pas toujours satisfaisante, car si elle décontamine les sols elle libère aussi des substances toxiques dans l'atmosphère.

Dans d'autres cas plus satisfaisants, les polluants sont dégradés en composants moins - ou non-toxiques avant d'être libérés.

# Phytovolatilisation (2)



MeHg toxic, lipophilic

Hg(0) 100-fold less toxic,  
natural sources dominant

merA-Gen :  $\text{Hg(II)} \rightarrow \text{Hg(0)}$

merB-Gen :  $\text{MeHg} \rightarrow \text{Hg(II)}$

3-4 fold higher Hg(0) formation  
in GMO than in wildtype

Phytovolatilisation of mercury from soils by **GMO-tobacco** (Schäffer et al., 2006)

# Phytoremédiation : Phytostabilisation

## Phytostabilisation :

Diminuer la mobilité des contaminants.

- Utilisation de plante diminuant les écoulements de surface et de sub-surface, en limitant l'érosion et en réduisant les écoulements souterrains vers la nappe = **Contrôle hydraulique**, ou *phytohydorégulation*
  - Immobiliser les composés polluants en les liant chimiquement dans le sol pour diminuer leur biodisponibilité = **Immobilisation *in situ*** (cf après).
  - Utiliser des plantes tolérantes et peu sensible
- ↳ Obj :
- diminuer dispersion des contaminants
  - réinstaurer un couvert végétal (sols fortement pollués)
  - diminuer les concentrations dans végétaux (sols agricoles) (*Obtention de légumes dont le [métal] < valeurs de la réglementation n° 1881/2006 de la Commission Européenne*)



INRAE

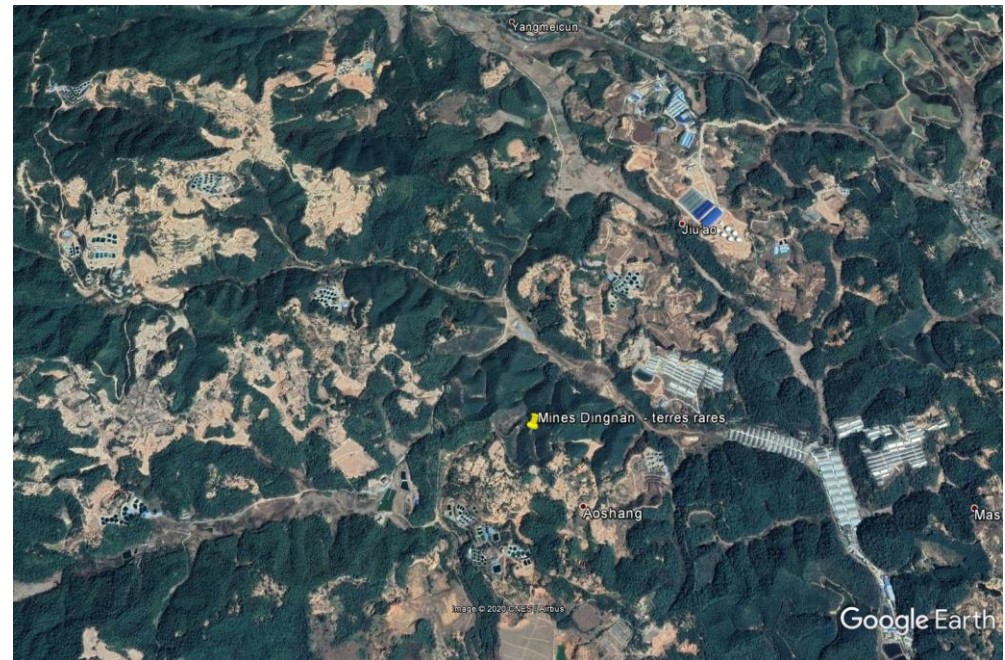
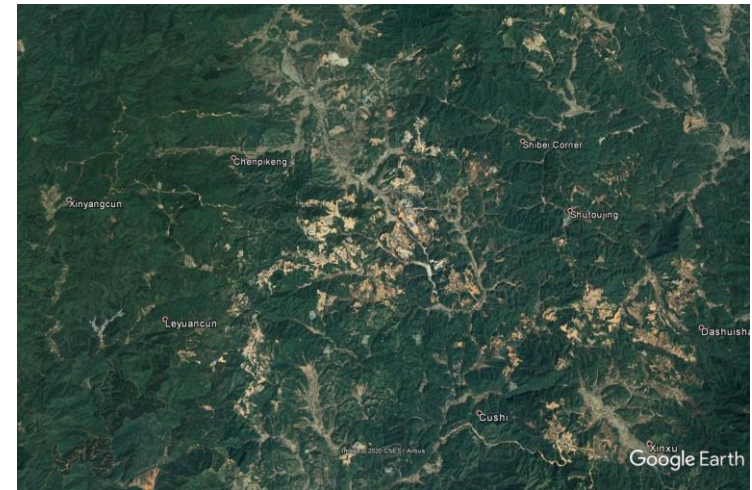
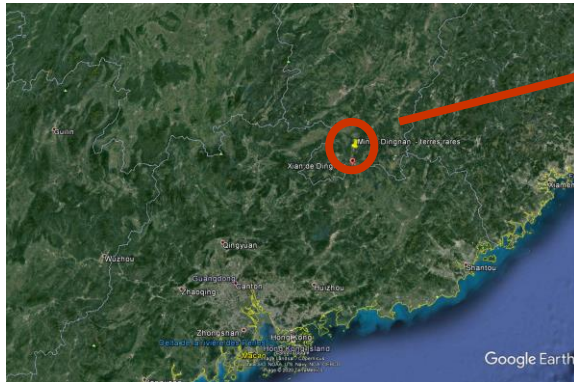
Valérie Sappin-Didier



# Phytoremédiation : Phytostabilisation

## Mine tailings of the Dingnan county, Chine

Ganzhou est connu comme le "royaume des terres rares", qui représente plus de 30 % des dépôts d'éléments de terres rares en Chine.



Terres rares dans les argiles du sol,

Extraction des terres rares par du sulfate d'ammonium : échange d'ion



INRAE

Valérie Sappin-Didier



Interactions Sol Plante Atmosphère

BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO

# Phytoremédiation : Phytostabilisation



**Mine tailings of the Dingnan county, Chine**



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Phytoremédiation : Phytorestauration (1)

## Phytorestauration

Restauration complète du sol pollué vers état proche du fonctionnement d'un sol naturel (Bradshaw 1997).

Utilisation de plantes indigènes de la région où sont effectués les travaux de phytorestauration.

But : atteindre la réhabilitation entière de l'écosystème naturel originel, du sol aux communautés végétales.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Phytorestauration (2)

Cette pratique soulève la question du niveau de décontamination nécessaire et suffisant =

→ Différence entre :

décontaminer un sol pour atteindre un niveau légalement satisfaisant pour qu'il soit à nouveau exploitable

et

restaurer totalement un espace pour qu'il revienne à des conditions pré-contamination.



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Phytomanagement (1)

## Evolution de la phytoremédiation : ⇒ Phytomanagement

: coupler des phytotechnologies pour réduire les sources de contamination et/ou les voies d'exposition des cibles biologiques =

- avec production de biomasse valorisée par usages non-alimentaires
- avec restauration écologique de service écosystémiques\*.

= redonner un usage aux zones marginales

3 types de couverts végétal ont un potentiel pour le phytomanagement : des graminées pérennes à fort développement,  
des ligneux,  
des cultures annuelles.

\* *bénéfices que les humains retirent des écosystèmes sans avoir à agir pour les obtenir.*



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Phytomanagement (2)

Pas de schéma standard : cas particulier pour chaque site pollués.

Contrairement aux travaux précédents, on ne cherche pas à éliminer la pollution.

Exemple:

- éliminer l'érosion, sans jouer sur la labilité des polluants,
- éviter l'accumulation dans les graines, permettant d'utiliser ensuite les graines,
- diminuer la labilité des polluants, ...



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Phytomanagement (3)

L'efficacité est évaluée sur différents services écosystémiques :

- Stabilité du couvert végétal,
- Approvisionnement en biomasse valorisables (*secteur énergétique, fibres et écomatériaux, panneaux de particules, huiles, huiles essentielles, etc.*)
- Restauration de paramètres écologiques (*habitat pour communautés microbiennes et animales, filtration de l'eau, séquestration du C, grands cycles biogéochimiques*).

Autres paramètres connexes testés :

- Résistance aux stress abiotiques et biotiques, influences des conditions climatiques, ....

Facteur limitant souvent rencontré : disponibilité de l'eau.

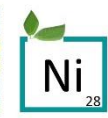


INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Phytoremédiation : Phytomining



## Projet Agromine

La filière de recyclage des métaux par les plantes hyperaccumulatrices



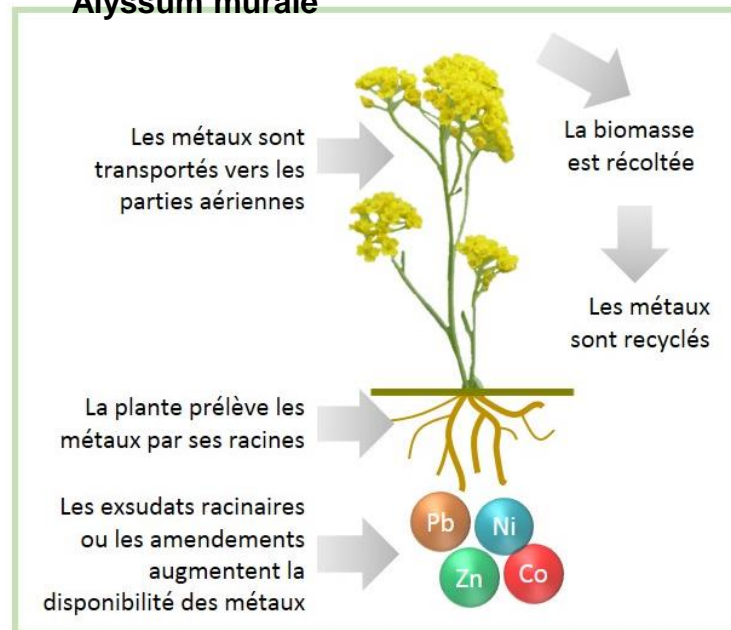
Projet en Albanie

Sur sols origine ultramafique, riche en Ni

Problème de toxicité, terre peu fertile

Espèces pouvant être récoltées annuellement, avec une quantité importante de biomasse

### Alyssum murale



Coordinateur du projet :  
Pr. Marie-Odile Simonnot

LRGP (Laboratoire Réactions et Génie des Procédés) – Université de Lorraine / CNRS

LSE (Laboratoire Sol et Environnement) – Université de Lorraine / INRA

CRPG (Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques) – CNRS

LIEC (Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux) – Université de Lorraine / CNRS

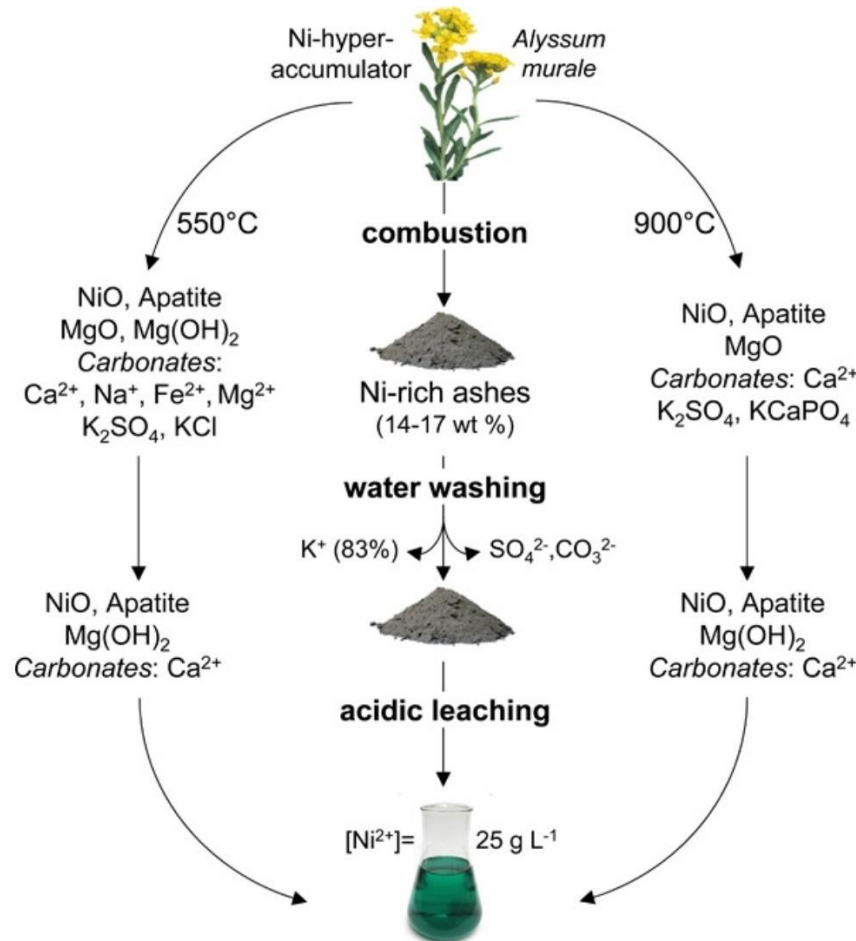
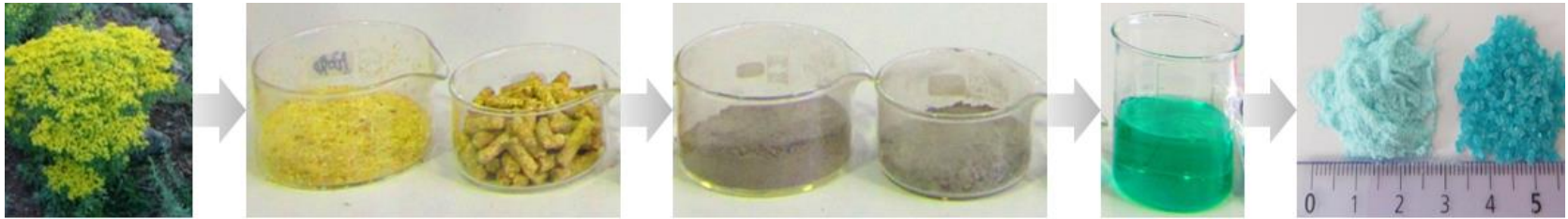
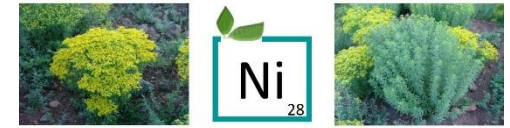


INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Phytoremédiation : Phytomining



Houzelot et al, 2017



INI

Valérie Sappin-Didier



# Phytoremédiation : Phytomining

**Documentaire de 50 min diffusé sur ARTE le 21 janvier 2017 :  
Sols contaminés: des plantes à la rescousse**

**<http://www.dailymotion.com/video/x59qvel>**



INRAE

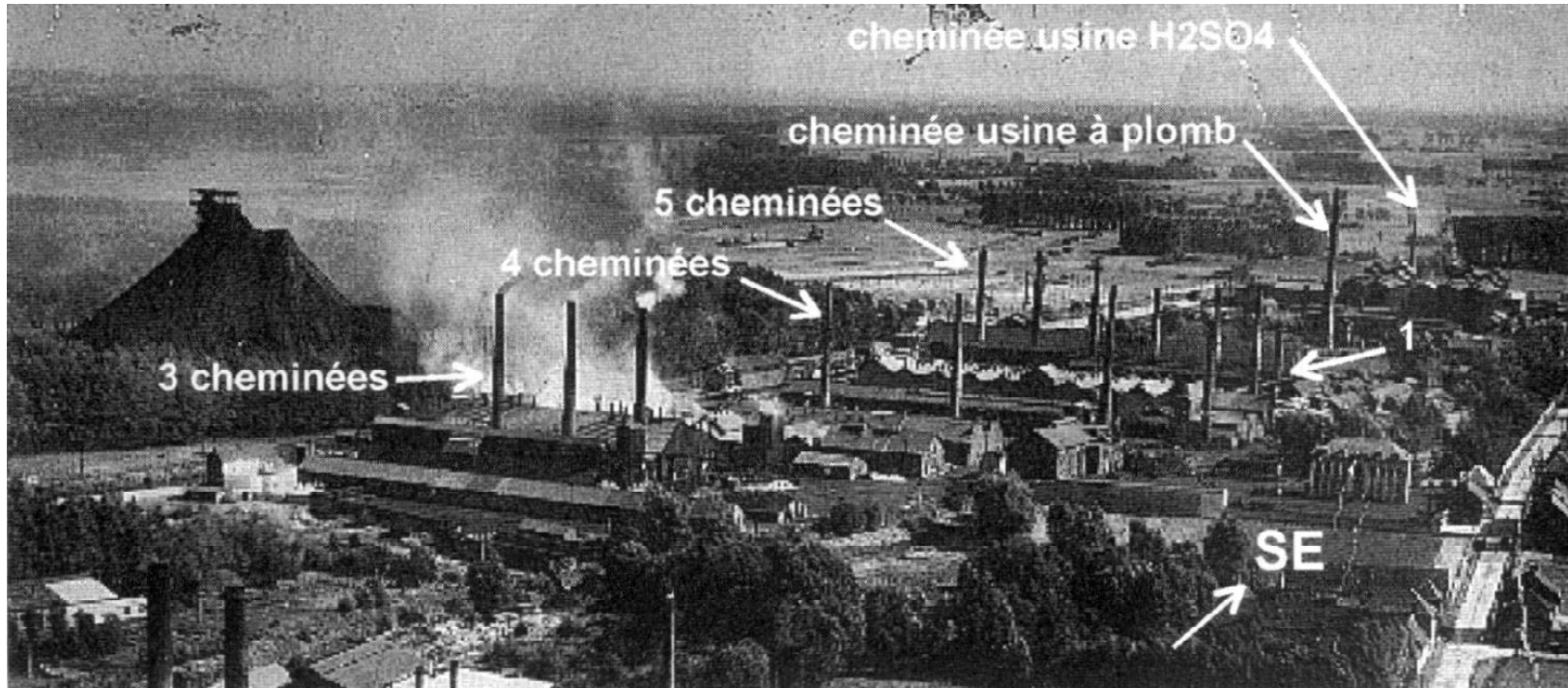
Valérie Sappin-Didier



# Exemple d'adaptation des plantes à un milieu pollué

## Site Mortagne du Nord

Historique : vue du site en 1950



Usine de fonderie de Zn (1901-1962), usine chimique (1926-1968) pour le grillage de la blende ( $ZnS$ ) et production  $H_2SO_4$ , usine de Pb.

# Exemple d'adaptation des plantes à un milieu pollué

## Historique :

Réhabilitation de la friche dans les années 80 :

- sur le site : décapage couche de surface, apport couche de 20 cm de sol propre
- sur le crassier : élimination des déchets, apport de sol propre, construction d'un collège



INRAE

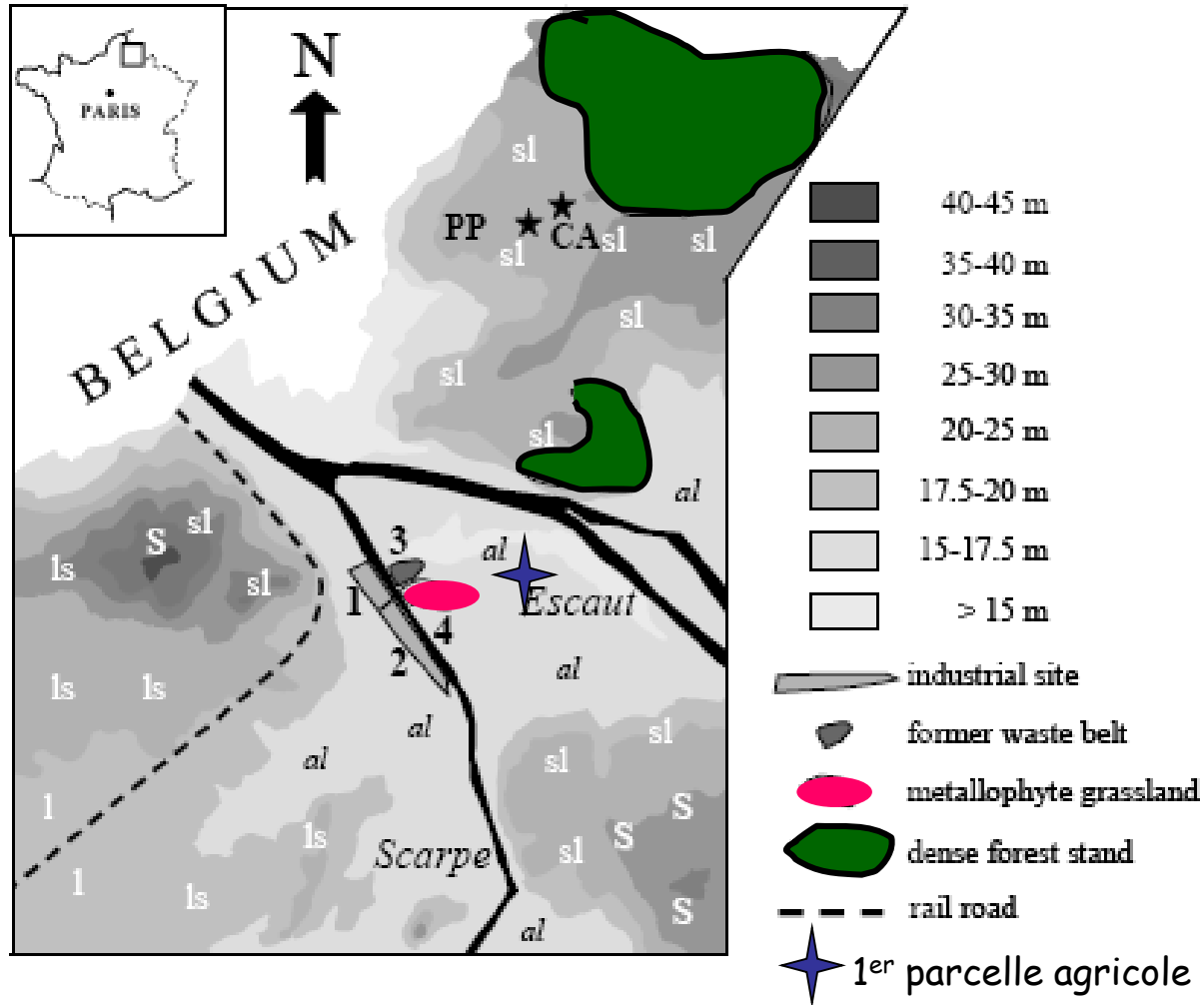
Valérie Sappin-Didier



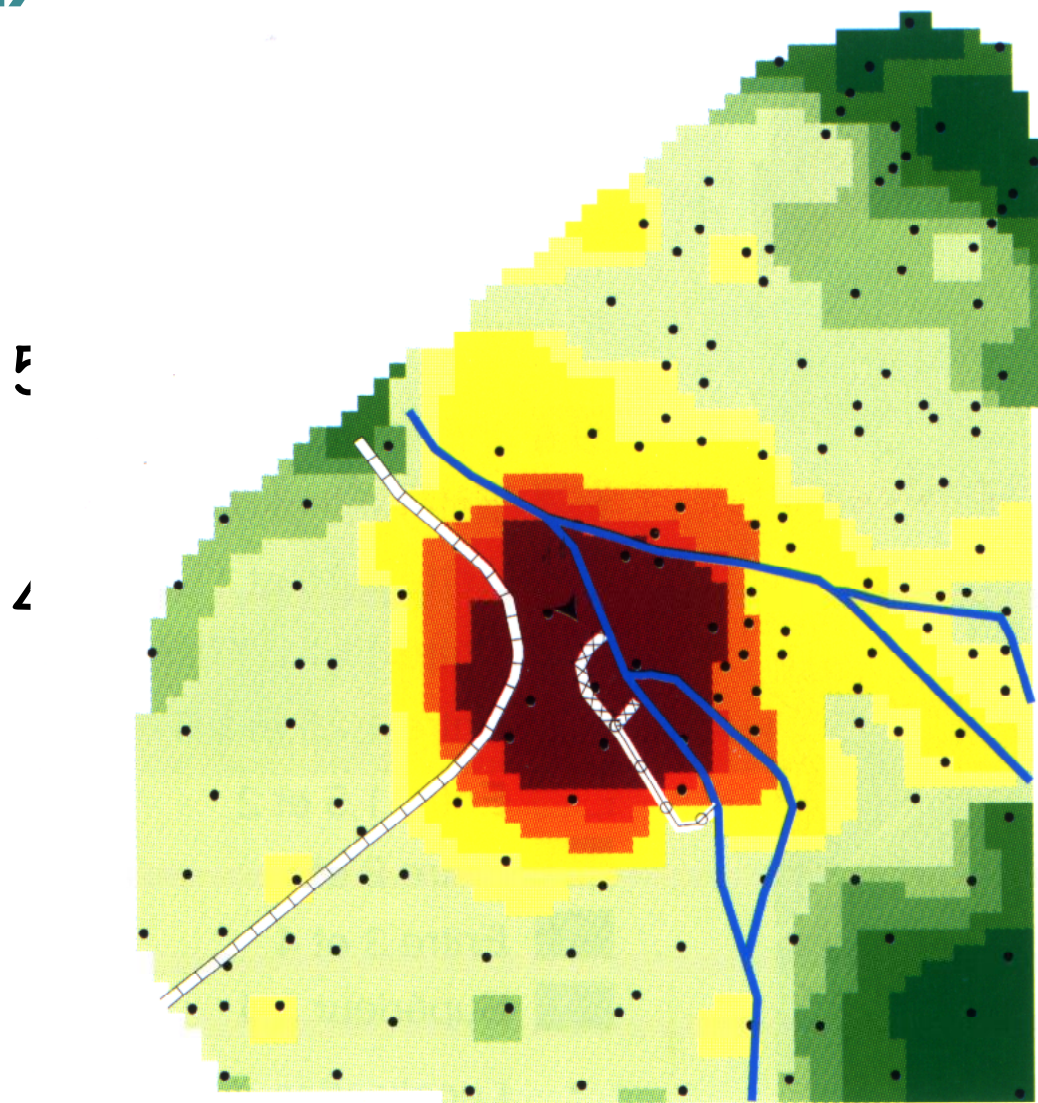


# Exemple d'adaptation des plantes à un milieu pollué

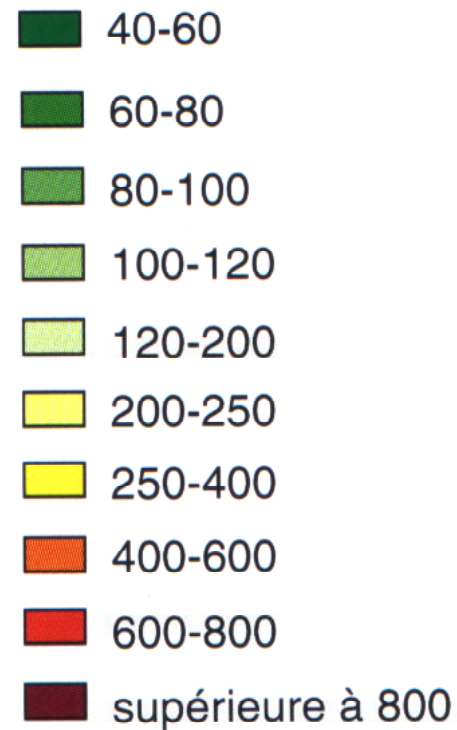
## Site d'étude



# Exemple d'adaptation des plantes à un milieu pollué



Teneurs en zinc (ppm)



- Localisation des points de mesures



INRAE

Valérie Sappin-Didier

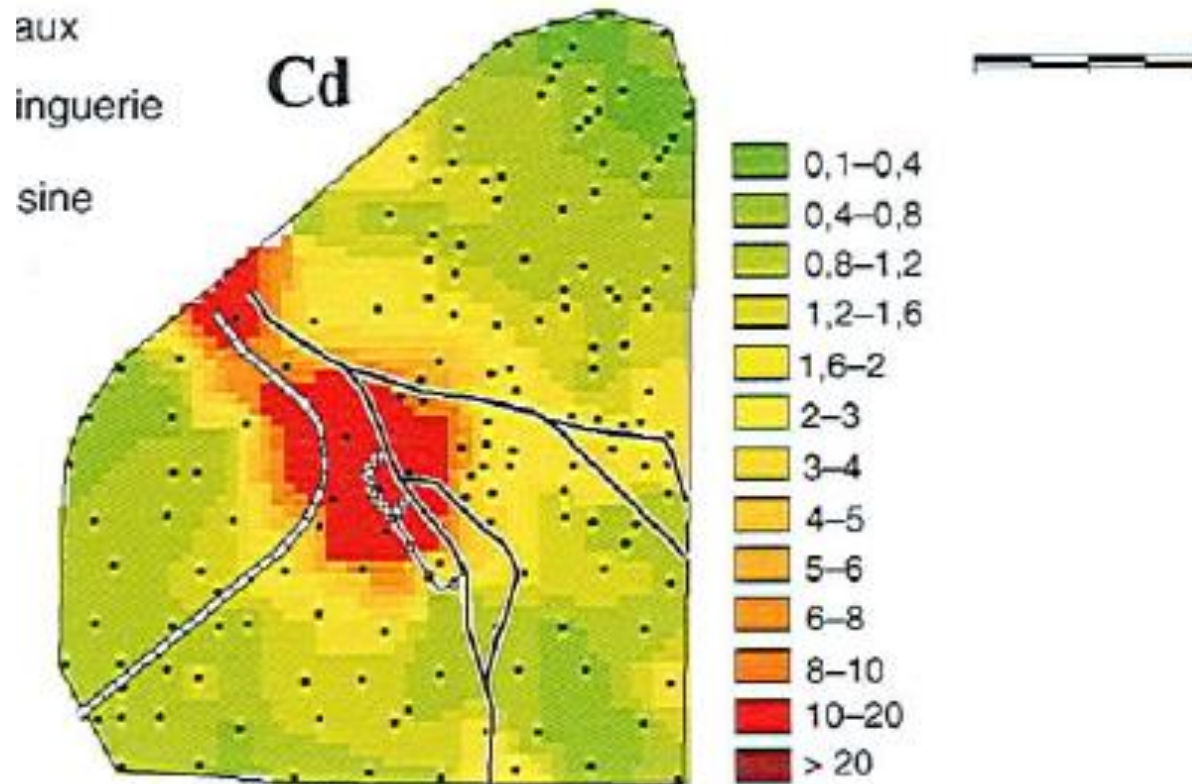


BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO

# Exemple d'adaptation des plantes à un milieu pollué

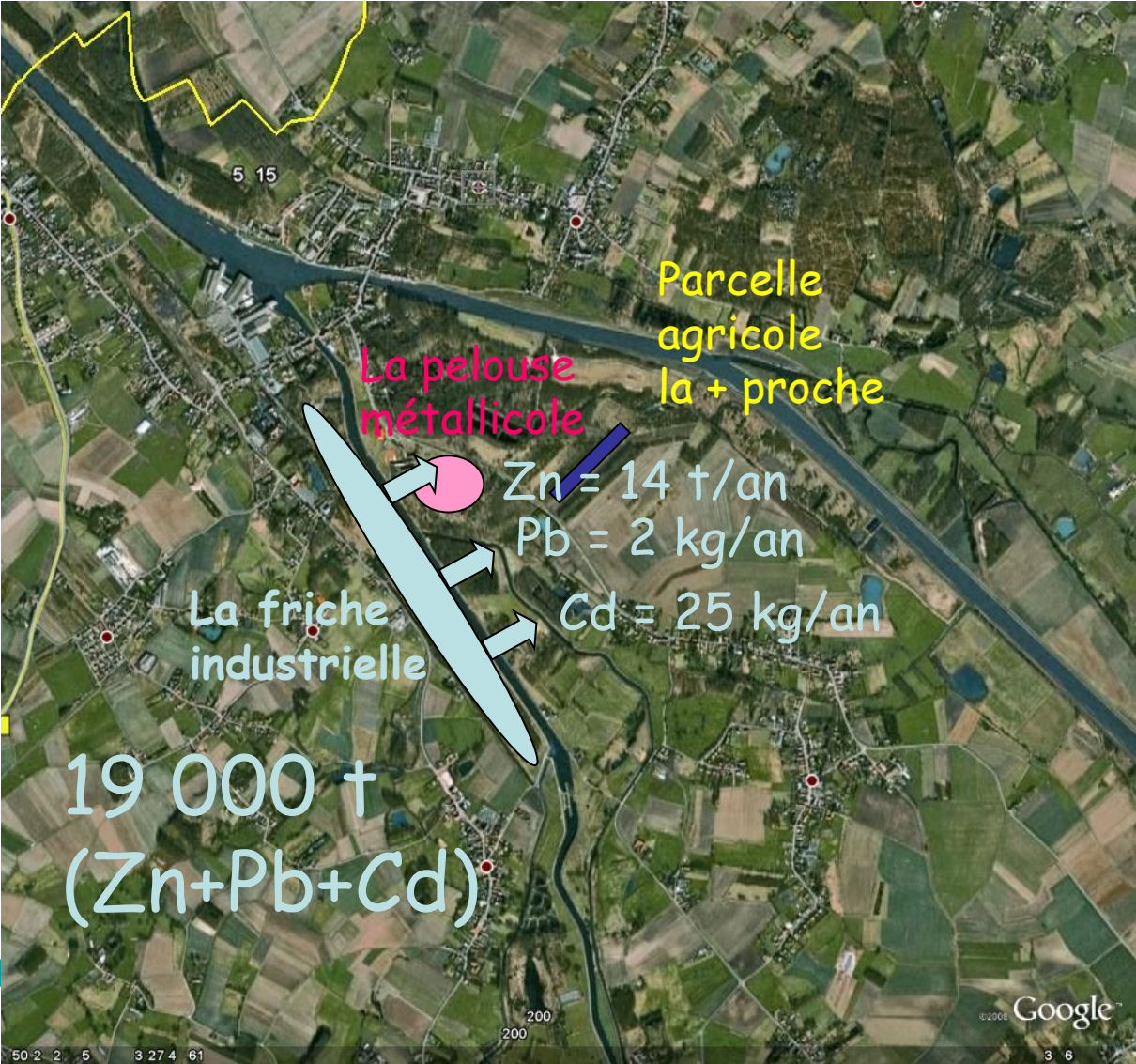
Contamination par une industrie métallurgique :

## Carte de distribution de Cd



# Exemple d'adaptation des plantes à un milieu pollué

## Abords de la friche industrielles



INI

Valérie Sappin-Didier



BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO

# Exemple d'adaptation des plantes à un milieu pollué

## Pelouse métallicole



# Exemple d'adaptation des plantes à un milieu pollué

## Pelouse métallicole

Arabidopsis halleri



# Exemple d'adaptation des plantes à un milieu pollué

## Pelouse métallicole

*Armeria maritima*  
ssp *halleri*



# Exemple d'adaptation des plantes à un milieu pollué

## Pelouse métallicole

Agrostis tenuis



RÖDVEN. AGROSTIS TENUIS SIBTH.



*Armeria maritima* ssp *halleri* :  
Stratégie d'exclusion du Zn, Cd, Pb,  
et du Cu par immobilisation dans les  
racines.

*Cardaminopsis halleri* :  
Stratégie d'hyperaccumulation  
du Zn et du Cd.

*Agrostis tenuis* :  
Stratégie d'exclusion par  
immobilisation du Zn, Cd, Pb  
et Cu dans les racines

Feuilles vertes

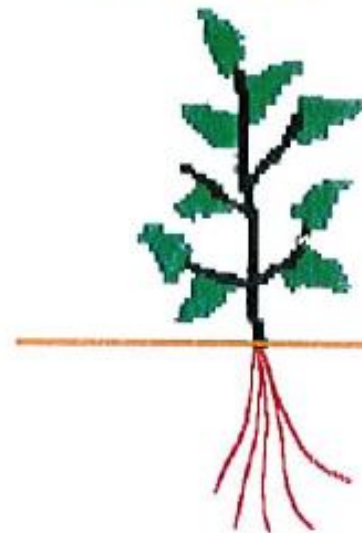
Zn : 1280 mg kg<sup>-1</sup>  
Cd : 7.2 mg kg<sup>-1</sup>  
Pb : 20 mg kg<sup>-1</sup>  
Cu : 7.7 mg kg<sup>-1</sup>

Zn : 21500 mg kg<sup>-1</sup>  
Cd : 281 mg kg<sup>-1</sup>  
Pb : 138 mg kg<sup>-1</sup>  
Cu : 16 mg kg<sup>-1</sup>

Zn : 1363 mg kg<sup>-1</sup>  
Cd : 12.3 mg kg<sup>-1</sup>  
Pb : 67 mg kg<sup>-1</sup>  
Cu : 17 mg kg<sup>-1</sup>

Feuilles brunes

Zn : 5000 mg kg<sup>-1</sup>  
Cd : 25 mg kg<sup>-1</sup>  
Pb : 162 mg kg<sup>-1</sup>  
Cu : 22 mg kg<sup>-1</sup>

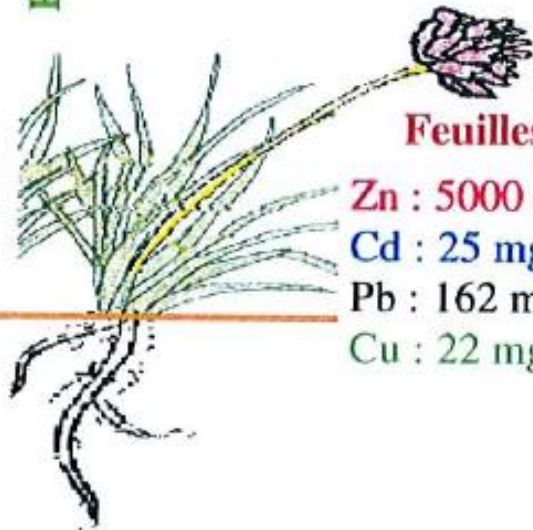


Racines

Zn : 6900 mg kg<sup>-1</sup>  
Cd : 49 mg kg<sup>-1</sup>  
Pb : 1760 mg kg<sup>-1</sup>  
Cu : 141 mg kg<sup>-1</sup>

Zn : 7150 mg kg<sup>-1</sup>  
Cd : 37 mg kg<sup>-1</sup>  
Pb : 430 mg kg<sup>-1</sup>  
Cu : 14.6 mg kg<sup>-1</sup>

Zn : 2320 mg kg<sup>-1</sup>  
Cd : 37 mg kg<sup>-1</sup>  
Pb : 471 mg kg<sup>-1</sup>  
Cu : 65 mg kg<sup>-1</sup>



# Phytoremédiation : Avantages et limites

## Avantages :

- Coût bien moindre que celui de procédés traditionnels in situ et ex situ ;
- Les plantes peuvent être facilement surveillées ;
- Récupération et réutilisation de métaux de valeur (des entreprises se spécialisent dans le « phytomining ») ;
- Méthode la moins destructrice car elle utilise des organismes naturels et préserve l'état naturel de l'environnement (contrairement aux procédés *ex situ* ou physicochimiques il n'y a pas d'impacts sur la fertilité des sols) ;
- Exploitation des végétaux produits.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Phytoremédiation : Avantages et limites

## Limites :

- Limitée à la surface et la profondeur occupées par les racines ;
- Croissance lente et biomasse faible demandant investissement en temps important ou/et adjonction de chélateurs ou autres substances (pour les ETM) ;
- Impossibilité d'empêcher l'écoulement des contaminants dans la nappe phréatique
- Le niveau et le type de contamination influence la phytotoxicité = croissance ou survie des plantes peut être réduite ;
- bioaccumulation possible de contaminants passant dans la chaîne alimentaire, essentiel de ne pas consommer ces plantes



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# VI - Immobilisation *in situ*



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Exemples d'application : immobilisation *in situ*

- Obj : Diminuer le stock d'ETM disponible pour un organisme vivant (plante) dans le sol → solution du sol
- ↳ Prise en compte du fonctionnement pédo-géochimique du sol et de la réactivité des phases constituant le sol

↳ **Immobilisation *in situ***



INRAE

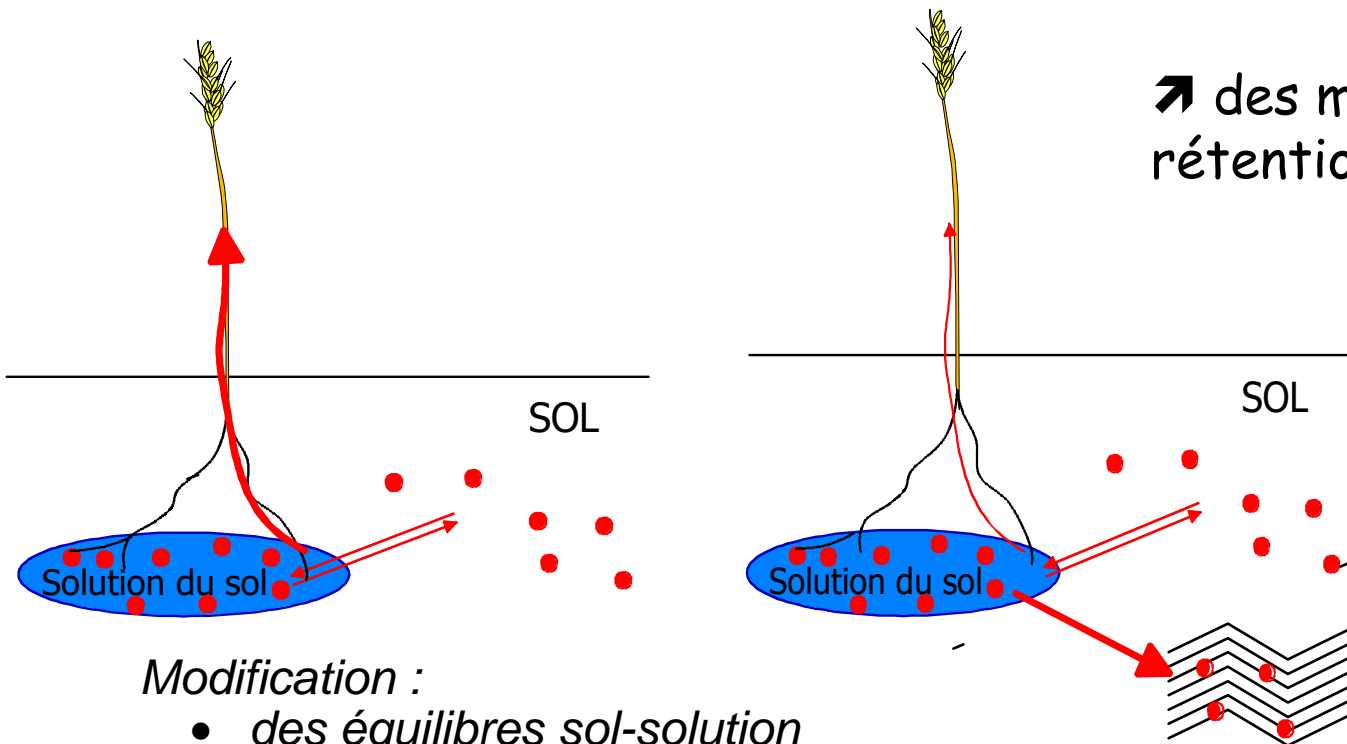
Valérie Sappin-Didier



# Exemples d'application : immobilisation *in situ*

Modification de la spéciation des ETM dans le sol

↳ Changement des propriétés physico-chimiques du sol ou apport de phases sorbantes



Modification :

- des équilibres sol-solution
- de la spéciation en solution

INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Immobilisation in situ : mécanismes de sorption

- **Adsorption** : Accumulation bidimensionnelle l'interface solide/solution
  - Adsorption spécifique : liaisons chimiques fortes et irréversibles entre ETM et MO ou Mx charge variable (complexe de sphère interne)
  - Adsorption non spécifique (échange ionique) : liaison faibles et réversibles de type électrostatique (complexe de sphère externe)
- **Précipitation** : croissance phase solide (réseau à 3 dimensions).
  - ETM précipitent : oxyde, hydroxyde, carbonate, sulfate, phosphate
  - Réaction fonction pH et de la qté. cation et anion en solution
- **Fixation ou diffusion** : des espèces aqueuses métalliques dans la phase solide.
  - Les ETM qui sont spécifiquement absorbés sur le minéral peuvent diffuser dans le réseau cristallin.

Seule la dissolution du minéral permet la libération de l'ETM

(Sposito, 1984; Bradl, 2004)



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Exemples d'application : immobilisation *in situ*

## Matériaux naturel ou synthétiques

- Oxyde ou hydroxyde de Fe et de Mn
- Matériaux ou minéraux phosphatés
- Chaux
- Aluminosilicate (zéolites, argile)
- Bio-solide
- Sous produit ( béringite, grenaille d'acier, cendres volantes ...)



GA + fertilizants



# Exemples d'application : immobilisation *in situ*

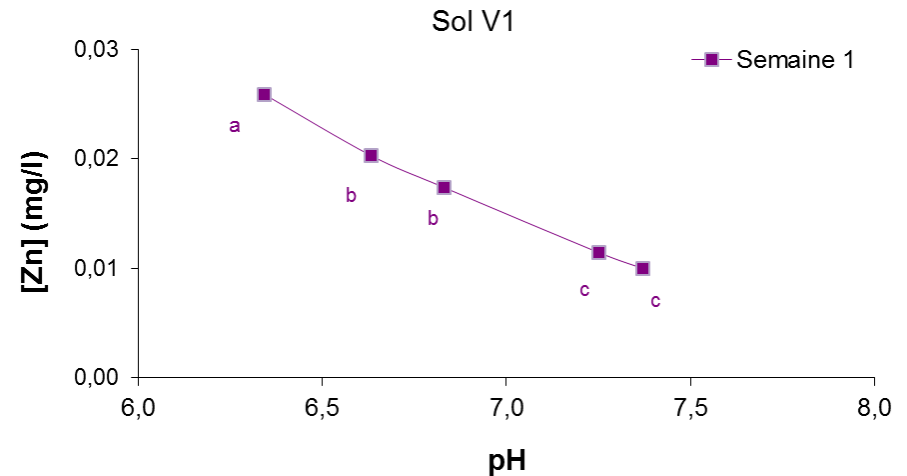
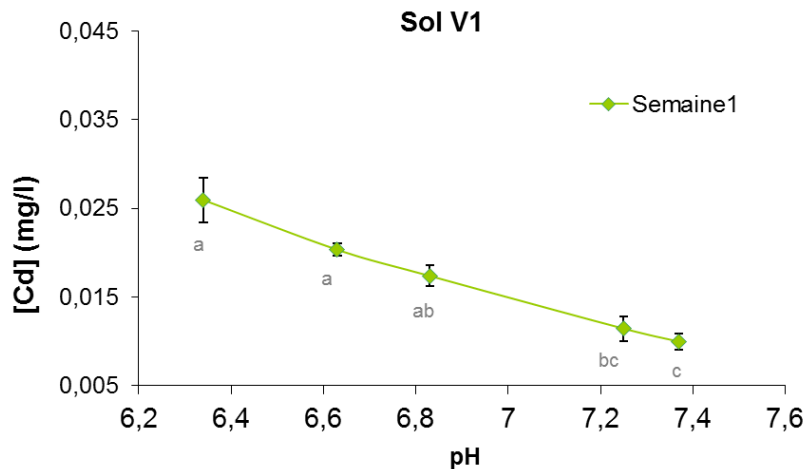
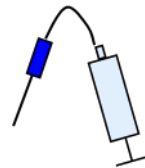
Etude sur un site industriel fortement contaminé (Viviez) : Denaix et al, 2006, Sappin-didier et al, 2009

Apport de chaux dans sols de jardins potagers : forte toxicité

- Suivi de la disponibilité de Cd et Zn : Solution de sol



Bougie poreuse : solution du sol



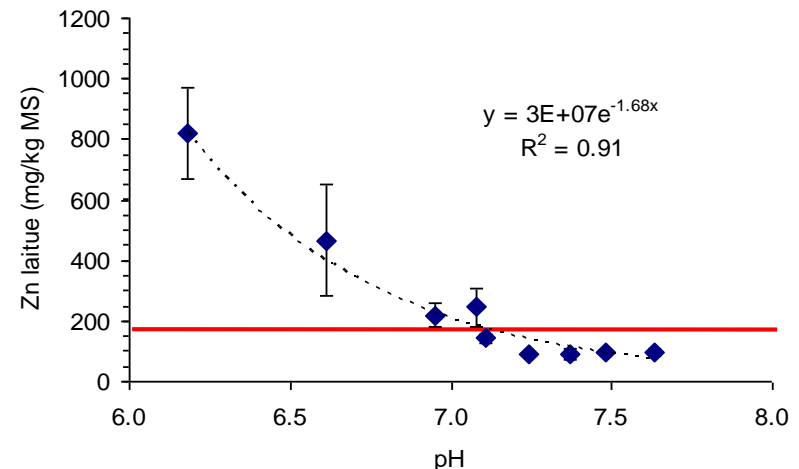
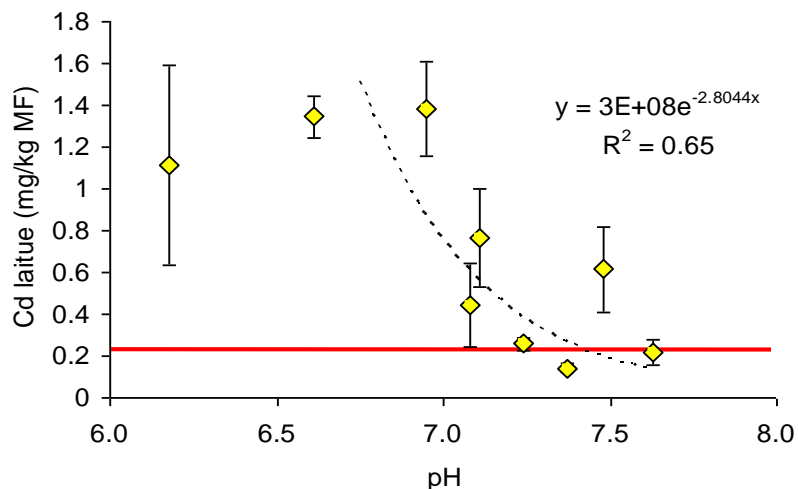
# Exemples d'application : immobilisation *in situ*

Etude sur un site industriel fortement contaminé (Viviez) : Denaix et al, 2006, Sappin-didier et al, 2009

Apport de chaux dans sols de jardins potagers : forte toxicité

→ Végétaux cultivés dans des jardins environnants ont des teneurs en ET > aux valeurs réglementées par le législation Communautaire Européenne (CE 466/2001)

## Apport de chaux dans sols de jardins potagers



Conclusion : ↘ concentration des ET dans les végétaux quand pH ↗

INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Exemples d'application : immobilisation *in situ*

Etude sur un site industriel fortement contaminé (Viviez) : Denaix et al, 2006, Sappin-didier et al, 2009

Apport de chaux dans sols de jardins potagers : forte toxicité



# Exemples d'application : immobilisation *in situ*

Obj : Réduction des risques de phytotoxicité : ex. site contaminé par As

*Holcus lanatus*



**Non traité**



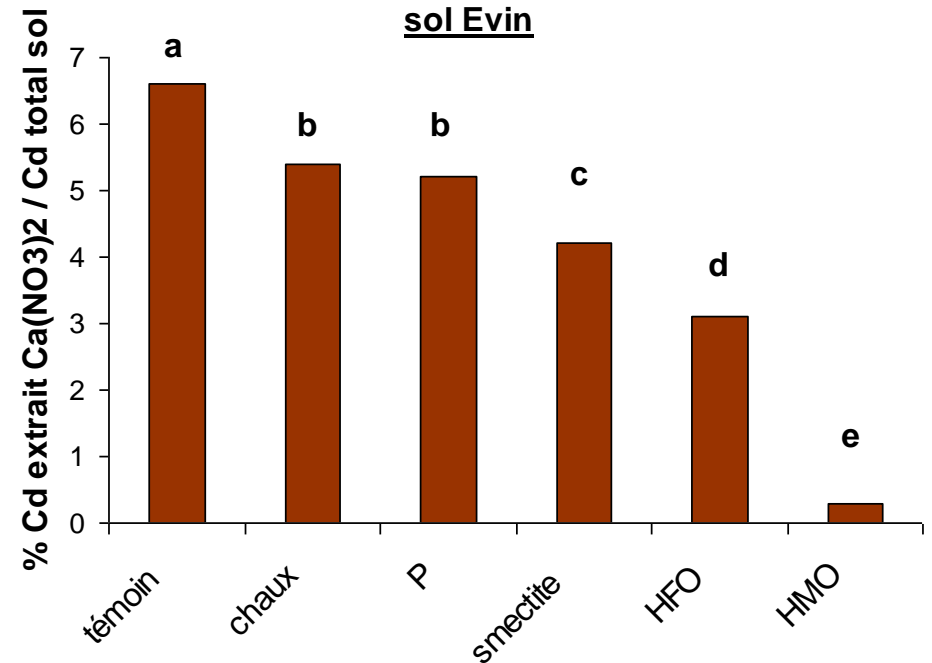
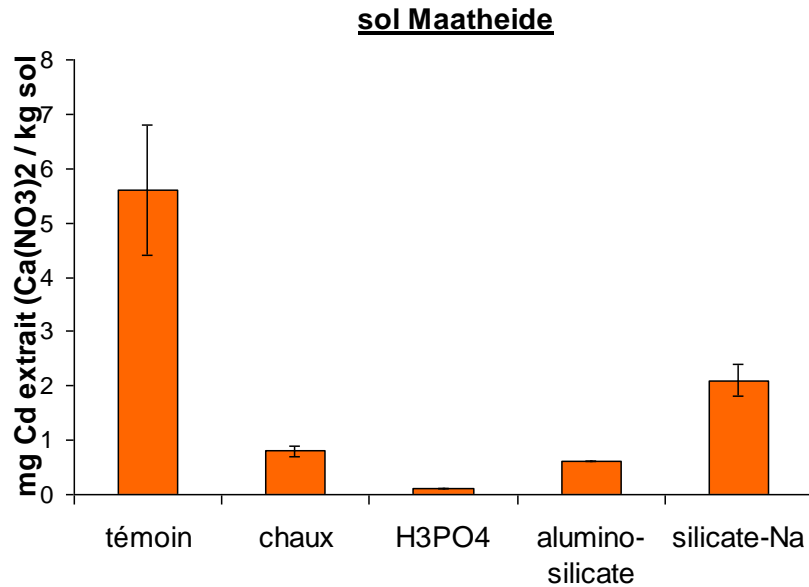
**Grenaille d'acier + compost**

Lixiviation



*Pinus pinaster*

# Exemples d'application : immobilisation *in situ*



Précipitation : chaux, matériaux phosphatés

Adsorption non spécifique : argile

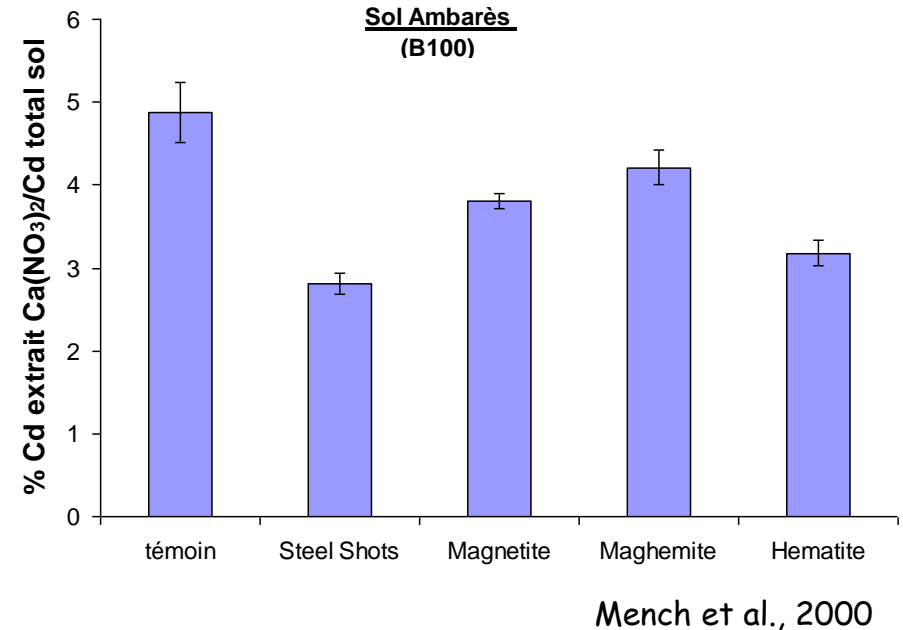
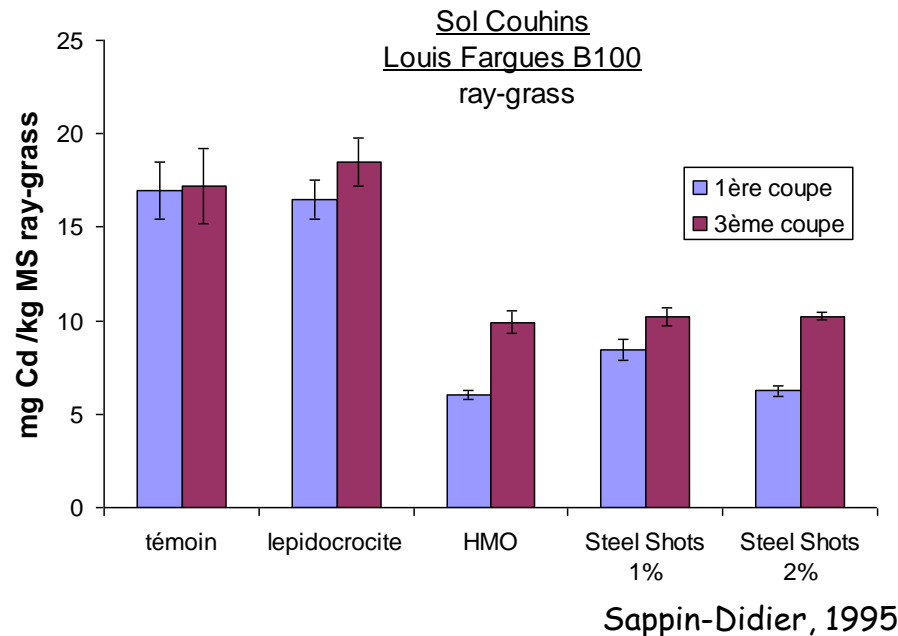
Adsorption non spécifique : HFO, HMO

Diffusion : matériaux phosphaté, argile ?

Combinaison de plusieurs mécanismes ?

# Exemples d'application : immobilisation *in situ*

Ex : Oxyde et hydroxyde Fe et Mn



Mécanismes impliqués : adsorption spécifique

plus ou moins réversible

altération des mx en présence de plante ?

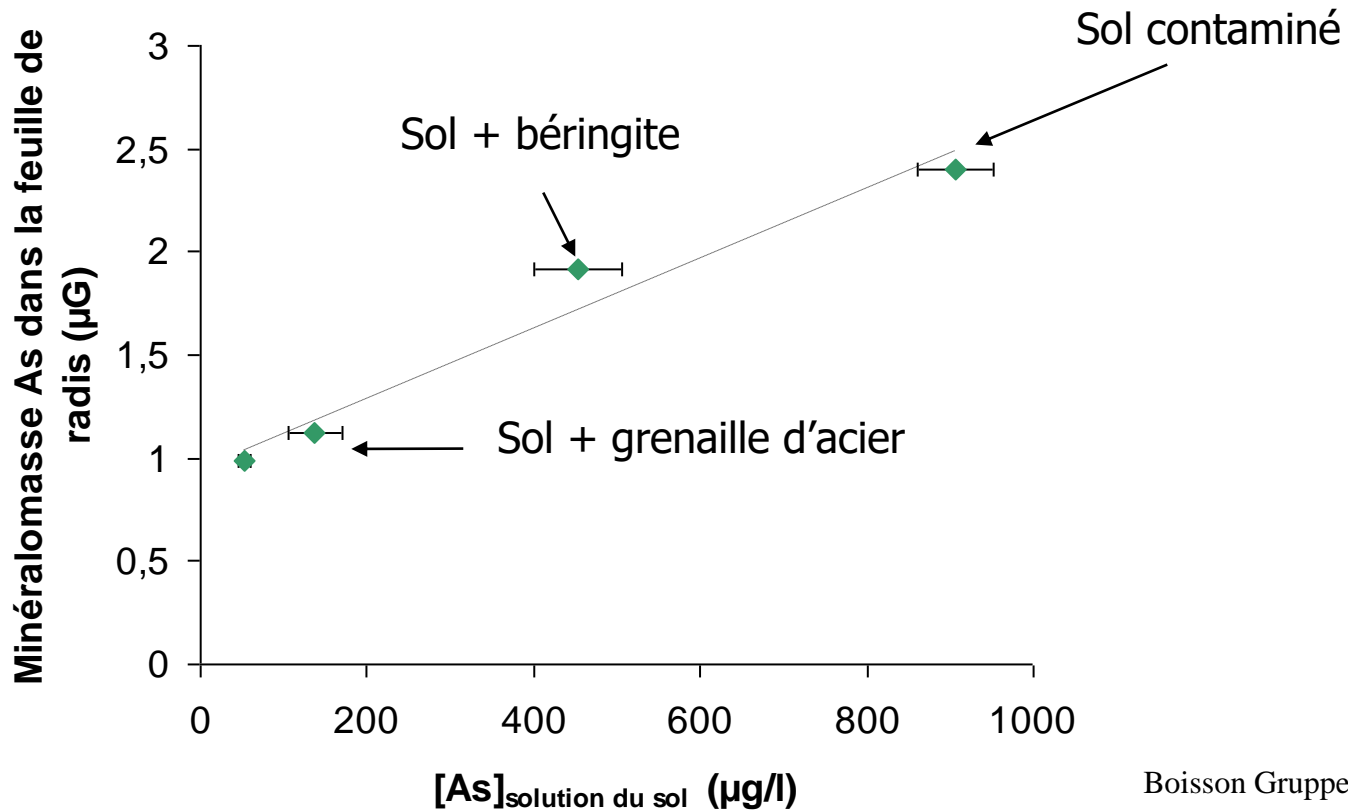


INRAE

Valérie Sappin-Didier

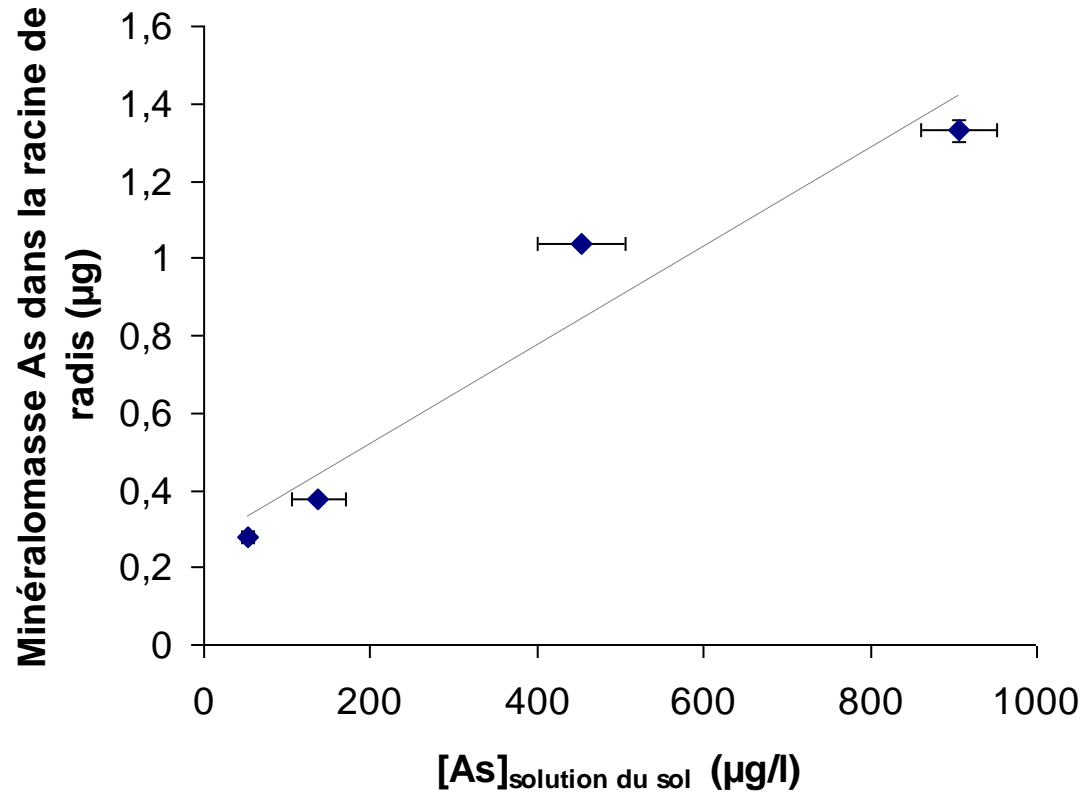


# Relation solution du sol/minéralomasse (As)



↘ concentration dans la solution du sol ↘ quantité dans les plantes

# Relation solution du sol/minéralomasse (As)



Boisson Gruppen (1999)

↘ concentration dans la solution du sol ↘ quantité dans les plantes



INRAE

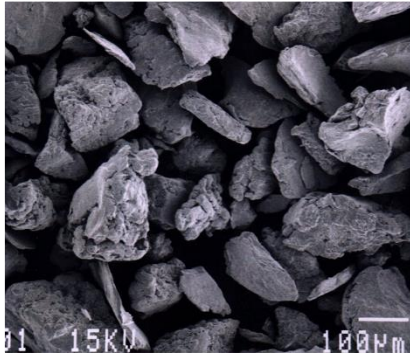
Valérie Sappin-Didier





# Exemples d'application : immobilisation *in situ*

## Cas d'un composé à base de fer

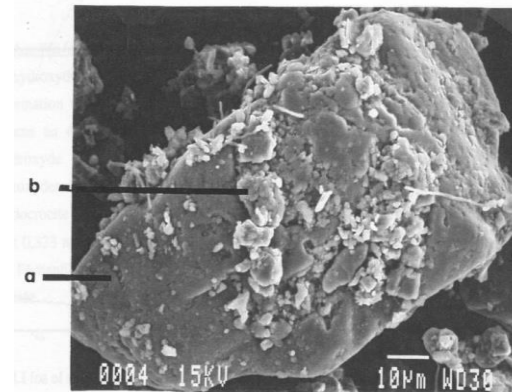


Grenaille d'acier

Sol  
→  
eau

Oxyde  
de fer

quartz



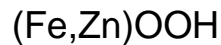
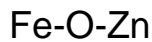
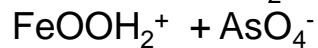
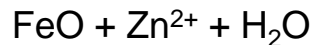
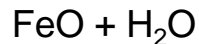
Dissolution de GA → synthèse d'oxyde et hydroxyde

- de Fe (maghémite, magnétite, lépidocrocite, ferrihydrite)
- de Mn (phylломanganate)

(Sappin-Didier, 1995)

(Manceau et al., 1997)

### Hypothèse de mécanismes



hydrolyse

adsorption spécifique (complexation)

co-précipitation

adsorption non spécifique (échange d'ion)

# Exemples d'application : immobilisation *in situ*

## Cas d'un apport de phosphate (apatite)

→ + Pb

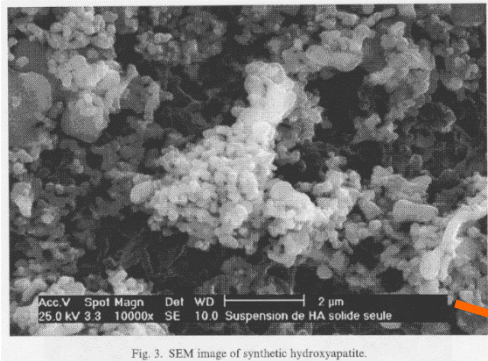


Fig. 3. SEM image of synthetic hydroxyapatite.

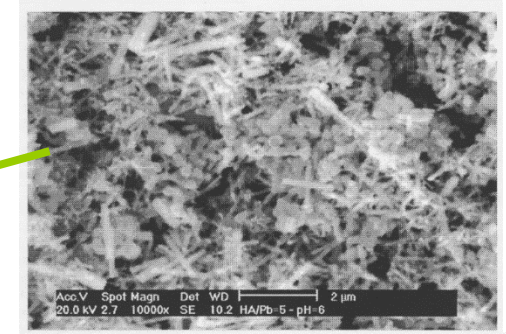
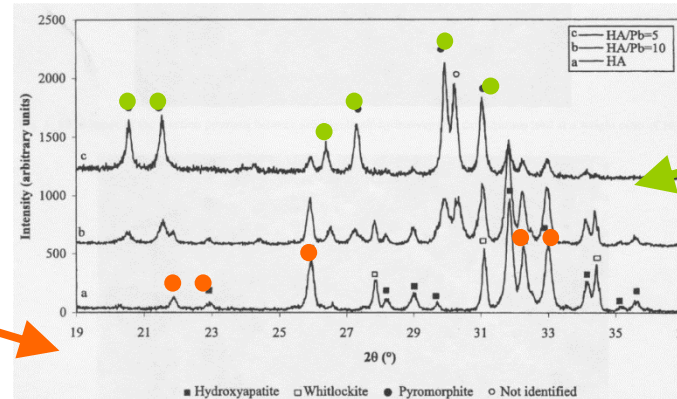
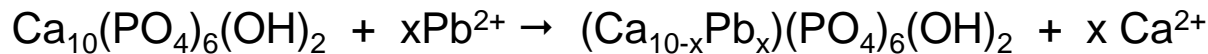


Fig. 4. SEM image of the reaction products between solid synthetic hydroxyapatite and aqueous lead at a weight ratio of 5/1.

Hydroxyapatite

Pyromorphite

### Mécanismes :



Dissolution de l'hydroxyapatite

Précipitation de la pyromorphite

Diffusion du Pb et substitution isomorphique avec Ca

# Problèmes agronomiques générés par l'immobilisation in situ

- Blocage de certains oligoéléments
- Effets sur la structure du sol
- Effet sur la capacité de rétention en eau du sol
- Nécessité de contrôle en plein champ et sur le long terme de ces effets



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Immobilisation *in situ* : récapitulatif

- Pas de protocole standard
- Informations sur le sol (prop. pédo-géochimiques...)
- Identifier le ou les ETM responsables du dysfonctionnement, spéciation de ETM sol
- Choix du (des) paramètre(s) à modifier
  - Fonction de l'ETM
  - Pollution polymétallique
- Ne pas modifier l'alimentation minérale
- Test en laboratoire (vase de végétation, extraction chimique, ...) : choix des cibles à tester (ex : efficacité en fonction des végétaux)



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# VII - Evaluation de l'efficacité d'une méthode de réhabilitation



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Evaluation de l'efficacité d'une méthode de réhabilitation

## Méthode biologique :

- culture condition contrôlée, biotest (test écotoxicologiques, métabolisme vgtx, structure et fonction des populations  $\mu$ bienne, ...)

(cours Magalie Beaudrimont (Terrestre), Jérôme Cachot (aquatique) en M1).

Pour une même méthode, résultats variables en fonction de l'espèce

↪ Besoin de renforcer les études en écotoxicologie sur les biotests : on s'oriente sur l'utilisation de plusieurs tests biologiques au lieu d'un test unique.

## Méthode chimique :

Extraction chimique de sol, mesure composition de la solution de sol, mesure DGT, cinétique d'échange ....

= Complémentarité des méthodes.

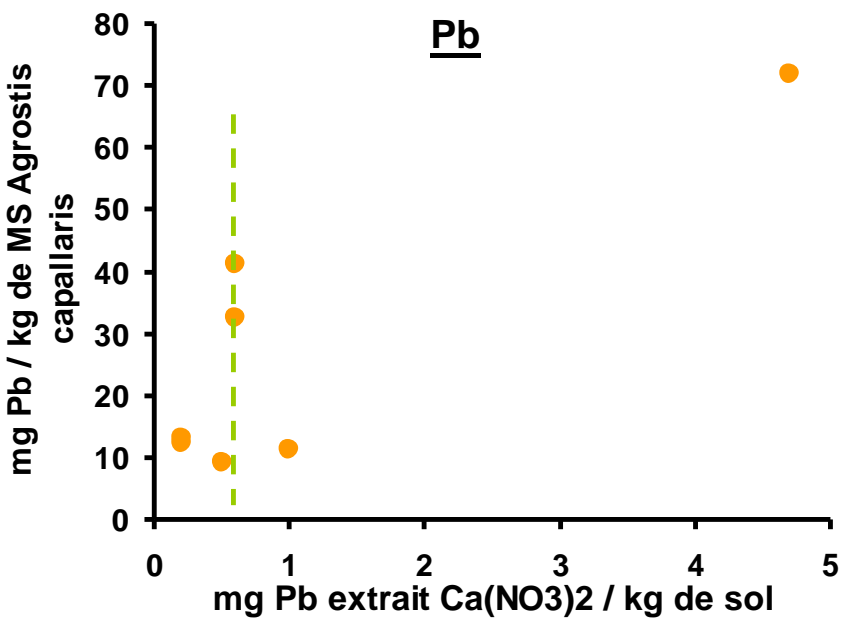
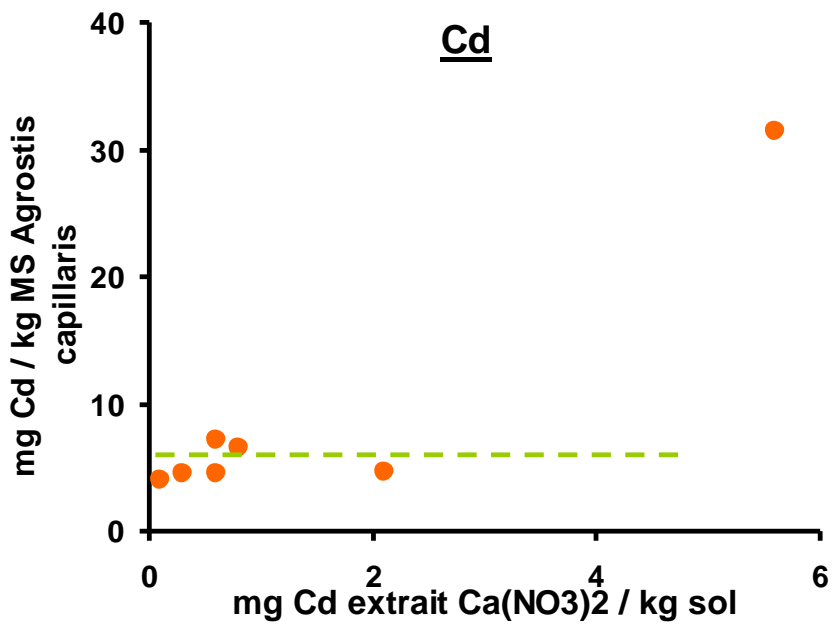


INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Evaluation de l'efficacité d'une méthode de réhabilitation



Action du végétal sur son milieu

Choix de la méthode d'évaluation de l'immobilisation : fonction de l'objectif



INRAE

Valérie Sappin-Didier



Geebelen et al., 2006



# Evaluation de l'efficacité d'une méthode de réhabilitation

- Extrapolation au champs (phytoextraction OK, Phytostabilisation : peu d'étude : beringite, grenaille d'acier, zéolite)
- Réalisation d'études expérimentales en plein champs équipée (avec suivi, case lysimétrique, ...)
- Efficacité à court, moyen et long terme ???
  - Stabilité des composés au cours du temps
  - Modification des conditions physico-chimiques
- Confinement : solution en attente .....
- Excavation puis traitement : OK, mais que faire des déchets ?
  - Stockage en volume plus réduit



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Exemple d'une étude sur site : Programme GIFSI

Corinne LEYVAL, LIMOS Nancy



- Milliers d'hectares de friches (plus de 6 000 ha en Lorraine)
- Multi-pollution organique (HAP) et métallique (ETM)
- Ancienne cokerie
- Les techniques de traitement (désorption thermique) réduisent mais n'éliminent pas complètement la pollution (ETM)
- 📖 La présence de plante (rhizosphère) augmente la dissipation des HAP dans la rhizosphère, mais peu d'études *in situ*
- Nécessité de prendre en compte l'ensemble des polluants présents, leur toxicité et leur biodisponibilité



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Exemple d'une étude sur site : Programme GIFSI

## Les dispositifs expérimentaux

- ▶ **Parcelles lysimétriques**  
reconstitution de sol
- ▶ **Friche non remaniée**  
atténuation naturelle
- ▶ **Colonnes lysimétriques**  
diagnostic et traitement de sols
- ▶ **Parcelles lysimétriques**  
phyto extraction et dégradation
- ▶ **Parcelle de démonstration**  
reconstitution de sol
- ▶ **Parcelles**  
phyto stabilisation et dégradation



INRAE



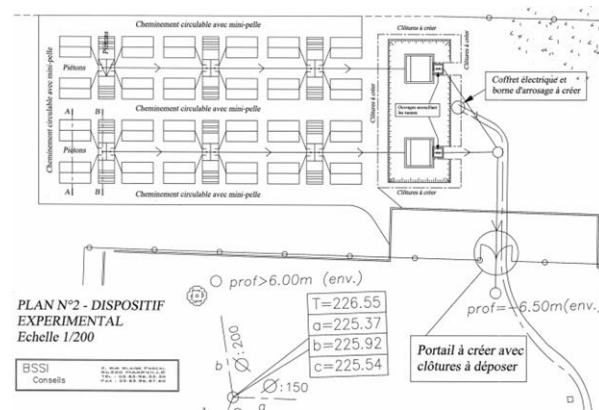
Valérie Sappin-Didier

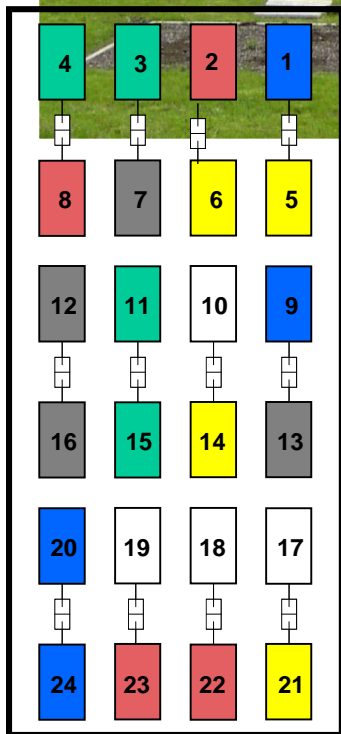




# Dispositif de parcelles lysimétriques

Ancienne cokerie de Homécourt





- TN Terre Nue
- VS Végétation spontanée
- Tc *Thlaspi caerulescens*
- Ms *Medicago sativa* (Luzerne)
- Ms  
m *Medicago sativa* mycorhizée
- TD *Medicago sativa*

Soil NM brut  
contamination ancienne en HAP

Soil NM TD  
ayant subi un traitement de thermo-désorption (500° C)



Associations racine-champignon mycorhizien forment une symbiose qui joue un rôle essentiel dans l'absorption des éléments minéraux dans les écosystèmes terrestres.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Exemple d'une étude sur site : Programme GIFSI

## Plantes et terre (2/an)

- croissance
- teneurs en métaux
- HAP, hydrocarbures aliphatiques, aromatiques, composés polaires
- diversité microbienne ( $^{16}\text{S}$ , gène de dégradation)
- écotoxicité
- colonisation végétale spontanée

## Solutions (épisodes pluvieux)

- pH, Eh,  $\text{O}_2$  dissout, conductivité, mat. en suspension
- HAP et autres composés organiques, métaux
- écotoxicité



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Exemple d'une étude sur site : Programme GIFSI

## Résultats écotoxicologie

### Sur les sols:

- **sur végétaux** (avoine et choux): faible toxicité (plus importante du sol traité par désorption thermique)
- **sur vers de terre**  
aucune mortalité des vers mais reproduction faiblement diminuée (46%) avec le sol NM, et un peu moins pour DT (33%).
- **sur la reproduction des collemboles** pas de toxicité avec les deux sols initiaux, mais tendance à une reproduction plus faible avec les modalités plantées (MS et MSm)

### Sur les percolats:

- pas de toxicité aigüe sur **Microtox** et sur les **daphnies** depuis avril 2006,
- pas de génotoxicité sur **Vicia faba** (avril et mai 2006)
  
- un effet mutagène avec certains percolats (test d'Ames), mais pas avec le test Umu sur *S.thyphimurium* (ISO), moins sensible
  
- mais **toxicité élevée sur les algues** pour l'ensemble des échantillons des parcelles NM pour tous les prélèvements, et qui tend à augmenter au cours du temps
- **toxicité élevée sur la reproduction des Cériodaphnies.**



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Exemple de l'évaluation biologique et chimique

## Immobilisation in situ : (Vangronsveld et al, 2002)

Site Lommel-Maatheide (sol sableux) (4 800 mg Zn/kg, 2 360 mg Pb/kg, 20 mg Cd/kg)

Amendements testés :  
SG = grenaille d'acier,  
SC = limaille d'acier,  
CA = cendres volantes (béringite)  
BE = bentonite (Argile, type smectite)

Différents mélange sol pollué + sol non pollué (0 à 100 %) + amendements

⇒ 3 mois de mise en équilibre

- ↳ Tests chimiques : Extractions séquentielles (Tessier et al., 1979)
- ↳ Tests biologiques : Bioessai associant paramètres morphologiques et biochimiques



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Exemple de l'évaluation biologique et chimique

## Tests biologiques :

### **FI : indice de phytotoxicité =**

test sur haricot et tomate : croissance, capacité enzymatique, profils des iso-enzymes

### **TOXI : indice de zootoxicité =**

test sur ver de terre *Lumbricus terrestris* (ISO, 1993) : mortalité, croissance

### **BIOI : index de disponibilité des métaux pour les bactéries =**

test écologie microbienne de bactéries résistantes aux métaux (présence de métaux biodisponible à l'induction spécifique et proportionnelle de production de lumière) (van der Lelie et al., 1999).



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Exemple de l'évaluation biologique et chimique

## Résultats du test **BIOI** : index de disponibilité des métaux pour les bactéries test écologie microbienne de bactéries résistantes aux métaux

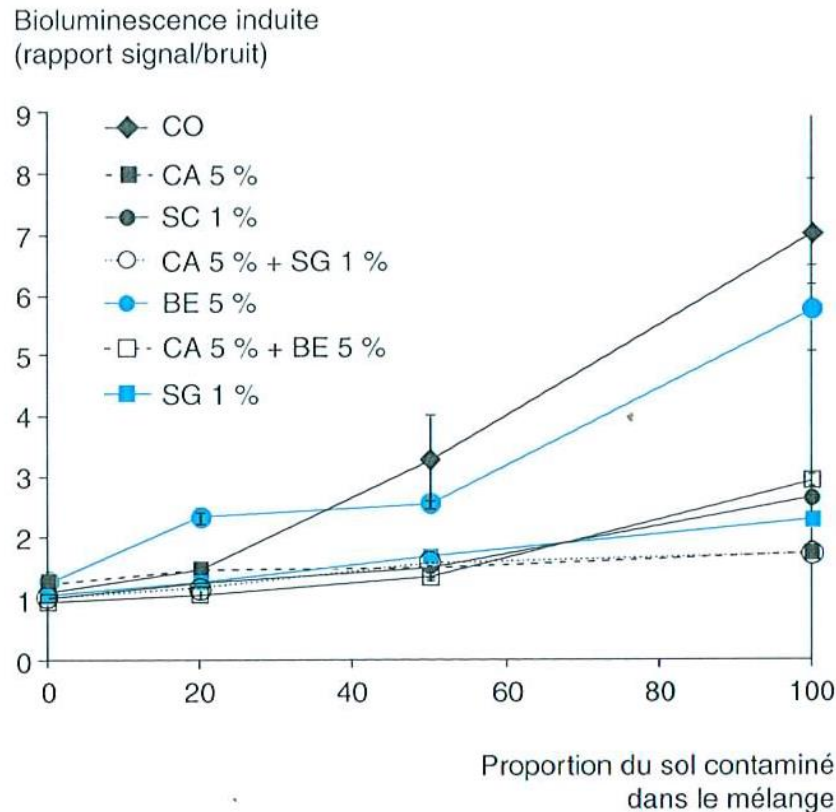


Figure 23.2. Bioluminescence (rapport signal/bruit) mesurée sur des échantillons de sols de Maatheide traités et non traités, six mois après l'application de différents amendements.

Vangronsveld et al, 2002



INRAE

Valérie Sappin-Didier

# Exemple de l'évaluation biologique et chimique

Tableau 23.2. Indices de toxicité, trois mois après l'ajout d'additifs à une série d'échantillons du sol de Maatheide, plus ou moins mélangés avec un autre sol similaire non contaminé.

	Traitement	CHEM EV.	Phyto	Vers terre	TOXI	Bactérie	BIOI
0 %	témoin	1	1	1	1	1	1
	CA 5 %	1	1	1	1	1	1
	SG 1 %	1	3	1	1	1	1
	SC 1 %	1	2	1	1	1	1
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	1	1	1	1
	BE 5 %	2	3	1	1	1	1
	CA 5 % + BE 5 %	1	2	1	1	1	1
20 %	témoin	1	2	3	1	1	1
	CA 5 %	1	2	1	1	1	1
	SG 1 %	1	3	3	1	1	1
	SC 1 %	1	3	2	1	1	1
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	1	1	1	1
	BE 5 %	2	3	1	1	2	2
	CA 5 % + BE 5 %	2	3	1	1	1	1
50 %	témoin	1	3	4	3	3	3
	CA 5 %	1	1	2	1	1	1
	SG 1 %	1	2	2	1	1	1
	SC 1 %	1	3	4	1	1	1
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	2	1	1	1
	BE 5 %	2	3	1	2	2	2
	CA 5 % + BE 5 %	2	3	2	1	1	1
100 %	témoin	2	4	4	4	4	4
	CA 5 %	1	2	2	1	1	1
	SG 1 %	1	3	4	2	2	2
	SC 1 %	2	3	4	2	2	2
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	2	1	1	1
	BE 5 %	2	3	3	3	3	3
	CA 5 % + BE 5 %	1	2	2	1	1	1

CHEM EV = évaluation chimique par extraction séquentielle ; FI = indice de phytotoxicité ; TOXI = indice de zootoxicité ; BIOI = index de disponibilité des métaux pour les bactéries.

## Test de la toxicité de l'amendement

SG (et SC) :

- toxicité chez le haricot due au Mn contenue dans SG et SC
- ↓ absorption Ca, Mg, P par les plantes

SG + CA :

- ↑ absorption Ca et Mg

BE :

- modification des propriétés physiques (compaction, diminution disponibilité élts majeurs)

# Exemple de l'évaluation biologique et chimique

Phyto      Vers terre      Bactérie

Tableau 23.2. Indices de toxicité, trois mois après l'ajout d'additifs à une série d'échantillons du sol de Maatheide, plus ou moins mélangés avec un autre sol similaire non contaminé.

	Traitement	CHEM EV.	FI	TOXI	BIOI
0 %	témoin	1	1	1	1
	CA 5 %	1	1	1	1
	SG 1 %	1	3	1	1
	SC 1 %	1	2	1	1
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	1	1
	BE 5 %	2	3	1	1
	CA 5 % + BE 5 %	1	2	1	1
20 %	témoin	1	2	3	1
	CA 5 %	1	2	1	1
	SG 1 %	1	3	3	1
	SC 1 %	1	3	2	1
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	1	1
	BE 5 %	2	3	1	2
	CA 5 % + BE 5 %	2	3	1	1
50 %	témoin	1	3	4	3
	CA 5 %	1	1	2	1
	SG 1 %	1	2	2	1
	SC 1 %	1	3	4	1
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	2	1
	BE 5 %	2	3	1	2
	CA 5 % + BE 5 %	2	3	2	1
100 %	témoin	2	4	4	4
	CA 5 %	1	2	2	1
	SG 1 %	1	3	4	2
	SC 1 %	2	3	4	2
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	2	1
	BE 5 %	2	3	3	3
	CA 5 % + BE 5 %	1	2	2	2

CHEM EV = évaluation chimique par extraction séquentielle ; FI = indice de phytotoxicité ; TOXI = indice de zootoxicité ; BIOI = index de disponibilité des métaux pour les bactéries.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Exemple de l'évaluation biologique et chimique

Phyto      Vers terre      Bactérie

Tableau 23.2. Indices de toxicité, trois mois après l'ajout d'additifs à une série d'échantillons du sol de Maatheide, plus ou moins mélangés avec un autre sol similaire non contaminé.

Vangronsveld et al, 2002

	Traitement	CHEM EV.	FI	TOXI	BIOI
0 %	témoin	1	1	1	1
	CA 5 %	1	1	1	1
	SG 1 %	1	3	1	1
	SC 1 %	1	2	1	1
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	1	1
	BE 5 %	2	3	1	1
	CA 5 % + BE 5 %	1	2	1	1
20 %	témoin	1	2	3	1
	CA 5 %	1	2	1	1
	SG 1 %	1	3	3	1
	SC 1 %	1	3	2	1
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	1	1
	BE 5 %	2	3	1	2
	CA 5 % + BE 5 %	2	3	1	1
50 %	témoin	1	3	4	3
	CA 5 %	1	1	2	1
	SG 1 %	1	2	2	1
	SC 1 %	1	3	4	1
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	2	1
	BE 5 %	2	3	1	2
	CA 5 % + BE 5 %	2	3	2	1
100 %	témoin	2	4	4	4
	CA 5 %	1	2	2	1
	SG 1 %	1	3	4	2
	SC 1 %	2	3	4	2
	CA 5 % + SG 1 %	1	1	2	1
	BE 5 %	2	3	3	3
	CA 5 % + BE 5 %	1	2	2	2

CHEM EV = évaluation chimique par extraction séquentielle ; FI = indice de phytotoxicité ; TOXI = indice de zootoxicité ; BIOI = index de disponibilité des métaux pour les bactéries.

Ex : diminution de la toxicité par l'apport de certains d'amendements. Mais résultats variables en fonction des tests.

Conclusion :

Complémentarité des tests chimiques et biologiques.

Tests biologiques fournissent des informations sur la biodisponibilité



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# VIII - Surveillance des sols

## Situation actuelle en Europe

### Conclusion



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# La surveillance de la qualité des eaux souterraines au 09/09/2019

la surveillance joue un rôle de détection ou de suivi selon que la pollution des eaux souterraines est avérée ou non. Depuis 2000, les sites recensés dans Basol doivent mettre en place une surveillance de la qualité des eaux souterraines ou disposer d'une justification technique d'absence de surveillance.

**Sur les 7116 sites inscrits dans Basol (2008 : 4033 sites),**

3757 disposent d'une surveillance,

1677 justifient l'absence de surveillance,

et 1682 sites ne disposent pas encore de surveillance.

Parmi les sites de l'inventaire, *3497 (49.14 %) ont un impact constaté, 634 (8.91 %) sont sans impact, le reste étant indéterminé.*



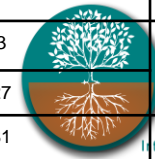
INRAE

Valérie Sappin-Didier



# La surveillance sites pollués au 09/09/2019

Région	Sites Basol	Sites Surveillés	Sites dont l'absence de surveillance est justifiée
ALSACE	1055	629	156
AQUITAINE	784	453	181
AUVERGNE	1297	736	330
BASSE-NORMANDIE	548	206	139
BOURGOGNE	297	197	55
BRETAGNE	90	60	6
CENTRE	431	194	105
CHAMPAGNE-ARDENNE	1055	629	156
CORSE	12	7	2
DOM	0	0	0
FRANCHE-COMTE	297	197	55
HAUTE-NORMANDIE	548	206	139
ILE-DE-FRANCE	604	285	237
LANGUEDOC-ROUSSILLON	313	169	92
LIMOUSIN	784	453	181
LORRAINE	1055	629	156
MAYOTTE	0	0	0
MIDI-PYRENEES	313	169	92
NORD-PAS-DE-CALAIS	963	531	227
PAYS DE LA LOIRE	341	109	63
PICARDIE	963	531	227
POITOU-CHARENTES	784	453	181



Missions de l'ADEME dans le cadre de la politique nationale sur les sites et sols pollués et sur les décharges non autorisées se développent autour de 4 axes principaux que sont :

- Opérations de mise en sécurité des sites pollués à responsable défaillant.

Ces opérations sont confiées par l'État à l'ADEME qui doit assumer la maîtrise d'ouvrage ainsi que le plus souvent la maîtrise d'œuvre générale de ces projets.

- Animation et soutien aux études et travaux de recherche et développement sur les enjeux environnementaux et sanitaires de ces pollutions.
- Conseil et participation aux besoins et aux échanges nationaux, européens et internationaux, en vue de développer les politiques et méthodes de gestion des sites pollués et de diffuser et promouvoir les connaissances et compétences acquises.
- Conseil et soutien aux acteurs et responsables de la réhabilitation des sites pollués visant à mettre à disposition de projets urbains performants des sites jusqu'alors inutilisables du fait de leur pollution (la reconversion de friches urbaines).





Ces actions interviennent sur un marché (France) en croissance et atteignait en 2012, 560 M€. Le marché répond à deux grands donneurs d'ordres, les industriels pour 40% et les acteurs de l'aménagement pour 60%.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Surveillance des sols

Depuis 1998, l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE) travaille à l'élaboration d'indicateurs communs aux pays de l'Union Européenne en matière de qualité des sols.

Ses travaux sont menés dans le cadre d'un projet de directive-cadre présenté par la Commission Européenne le 22 septembre 2006 et consultable en ligne :

[proposition COM\(2006\)232 final - COD 2006/0086 de directive du Parlement Européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE.](#)



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Surveillance des sols

L'AEE propose :

- définitions précises pour « pollution », « site pollués », « contamination » et « site contaminé ».
- une mise au point des étapes de gestion des sites contaminés ;
- des indicateurs ponctuels pour les pollutions localisées ;
- la mise en œuvre concrète de trois indicateurs annuels (gestion de sites contaminés, coûts de réhabilitation et localisation des pollutions identifiées), qui sont actualisés depuis 2004 ;
- un test géographique de ces indicateurs, permettant d'estimer l'état d'avancement des inventaires dans les pays européens et de comparer les situations.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Situation actuelle : inventaire de la pollution en Europe

Sources des pollutions : variation importante en fonction pays.

Proviennent principalement d'activités industrielles (mines, pétrochimie) ou commerciales (stations d'essence) et de traitement de déchets.

Polluants minéraux (ETM) : 37,3%

Produits pétroliers : 33,7%,

Hydrocarbures aromatiques : 19,3%

Phénols : 3,6%.

La plupart des pays concernés en Europe appliquent le principe pollueur-payeur, **mais** environ 35% des sommes provient de fonds publics.

Décontaminations décidées en fonction des risques encourus pour la santé et l'environnement, la protection des ressources en eau justifiant souvent des opérations de réhabilitation des sols pollués.



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Méthodes réellement utilisées en France

## Excavation (74 %)

### Traitement hors sites (54 %)

- Installation stockage de déchets *inertes* (26.5 %)
- Installation stockage de déchets *dangereux* (7.37 %)
- Installation stockage de déchets *non dangereux* (1.95 %)
- Installation traitements biologiques (13.26 %)
- Installation désorption thermique (1.9 %)
- Installation stabilisation physico-chimique (1.02 %)
- Installation lavage de terre (0.24 %)
- Incinérateur (0.54 %)
- Cimenterie (1.35 %)

### Traitement sur sites (20 %)

- stabilisation physico-chimique (11.3 %)
- traitements biologiques et ventilation forcée des sols (6.04 %)
- confinement (2.011 %)
- désorption thermique (0.11 %)
- lavage de terre (0.37 %)

## Traitement in situ (26 %)

- ventilation forcée des sols et traitements biologiques (19.7 %)
- oxydation chimique (3.54 %)
- confinement (2.36 %)
- stabilisation physico-chimique (0.24 %)
- lavage de terre (nd)
- phytoextraction (nd)
- phytostabilisation (nd)

Source chiffre : ADEME  
2012



# Situation actuelle : inventaire de la pollution en Europe

75 à 90 % des sols / sédiments contaminés sont excavés et stockés

7 à 16 % des sols / sédiments traités le sont par voie biologique

Les traitements in situ représentent une infime partie de ce %



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Estimation des coûts

## Costs of soil remediation measures

Remediation measure	Costs [\$ t <sup>-1</sup> ]	Additional measures
Thermal processes	75 - 425	recultivation, monitoring
Excavation and disposal	100 - 500	transport, land filling, monitoring
Chemical processes	100 - 500	recycling of used chemicals, monitoring
<b>Phytoremediation</b>	<b>5 - 40</b>	<b>biogas production and disposal of biomass wastes, monitoring</b>

US market for phytoremediation in 2005: 200,000,000 US-\$



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Métiers relatifs aux sites et sols pollués

Ils nécessitent des connaissances multidisciplinaires :

- géologie, hydrogéologie,
- physique, chimie,
- toxicologie et évaluation des risques sanitaires,
- génie des procédés de dépollution, génie civil,
- métrologie et modélisation.



INRAE

Valérie Sappin-Didier





# Conclusion

- Pas de solution miracle, avec un protocole bien défini
- Généralement pollution multiple : multi-métallique ou multi-polluants organiques  
Egalement pollution mixte : multi-métalliques + multi-polluants organiques
- Démarche : bonne connaissance du milieu à dépolluer
  - ↳ Approche multidisciplinaire:
    - caractérisation exhaustive des polluants
    - flux et transferts de polluants
    - biodisponibilité, toxicité
    - fonctions microbiennes
    - Définir les usages des sols, les attentes
    - ... modélisation
- Renforcer les recherches sur les techniques « douces », in situ, qui perturbent le moins l'écosystème



INRAE

Valérie Sappin-Didier



# Conclusion

- Pour qu'une technique de réhabilitation soit adoptée, il faut :
  - Une base théorique solide
  - Être testée en laboratoire
  - Être transférée avec succès à l'échelle du terrain
  - Acceptation réglementaire



INRAE

Valérie Sappin-Didier





INRAE

Valérie Sappin-Didier



BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO

# Schéma conceptuel

Caractériser le plus précisément possible les sources de pollution : origine, localisation, nature, composition, etc ...

Caractériser le plus précisément possible les enjeux, les usages qui sont fait des milieux eaux (de surface et souterraines), sols et végétaux.

Evaluer les voies de transferts des contaminants et estimer l'évolution probable des ces phénomènes

De déterminer si les usages constatés sont compatibles avec l'état des milieux.



INRAE

Valérie Sappin-Didier





INRAE

Valérie Sappin-Didier



BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO



INRAE

Valérie Sappin-Didier



BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO