

# Pollution diffuse des sols: quels risques et quelles gestions?

Nantes, le 18 mars 2016



# 1<sup>ère</sup> partie:

## Caractériser la pollution et sa dynamique: une étape cruciale

# De la caractérisation à la remédiation

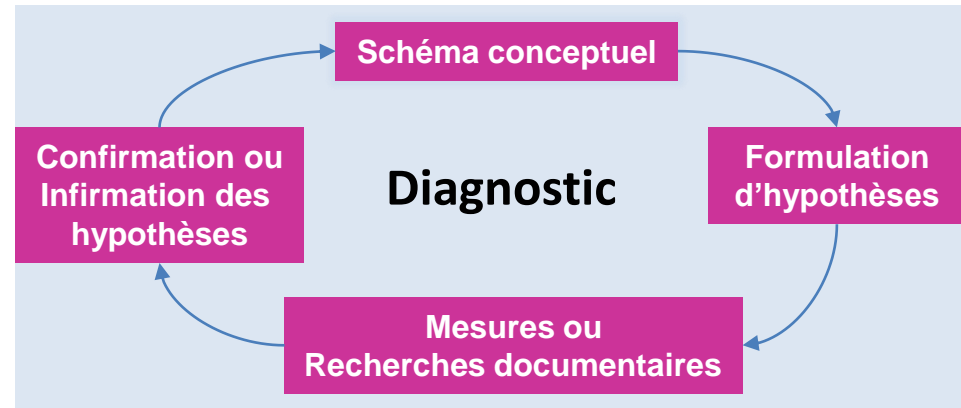
Cécile LE GUERN, Ingénieure de recherche  
Bureau de Recherches Géologiques et Minières  
(BRGM)

## De la caractérisation à la remédiation

- 1- Importance de la caractérisation
- 2- Conditions d'une caractérisation pertinente et utile
- 3- Outils de caractérisation sur site
- 4- Conclusions

# 1. Importance de la caractérisation

- Questions préliminaires
  - Caractériser,
  - pour quoi faire, quoi, où, comment, quels moyens ?
  
- pour connaître précisément
  - l'extension spatiale d'une contamination
  - les voies de transfert et d'exposition
  - les milieux d'exposition
  - les cibles à protéger



*Démarche itérative de plus en plus détaillée*


**Investigations de terrain**  
**Privilégier la mesure**

### Diagnostic

- Préciser et compléter les informations documentaires (niveaux de concentration, localisation des zones polluées et non polluées)
- Cartographier les zones en fonction des niveaux de pollution
- S'assurer de l'état des milieux

### Surveillance

- Suivre l'évolution dans le temps et l'espace

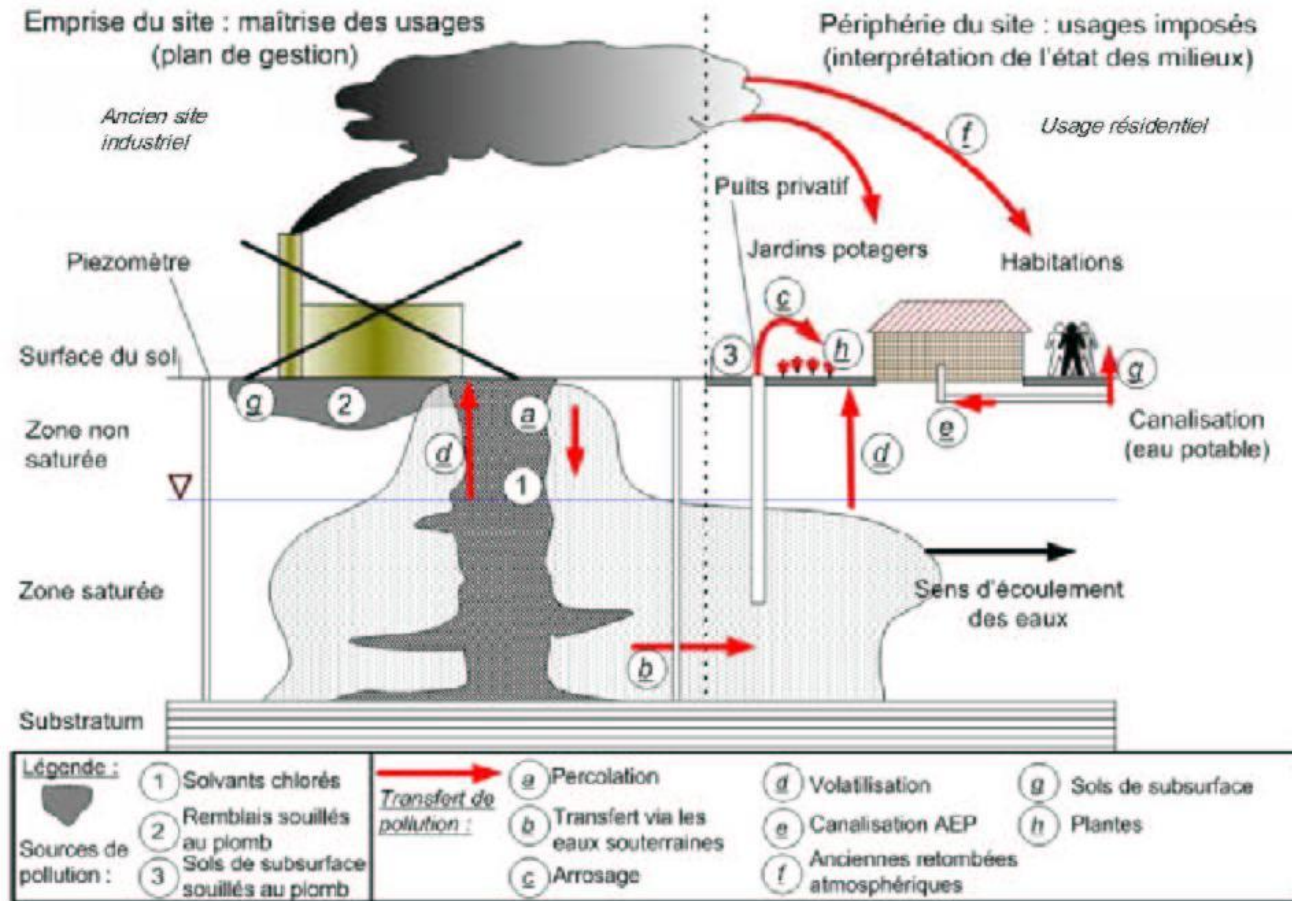
### Gestion

- Contrôler l'atteinte des objectifs de réhabilitation fixés
- Contrôler la qualité des terres à excaver (pour en assurer une filière d'évacuation ou de valorisation adaptée)

## 2. Conditions d'une caractérisation pertinente et utile



## Approche au cas par cas



- Sanitaire

- Etablissements sensibles

- Ingestion sols, inhalation poussières
    - Inhalation gaz



#### **Prélèvements**

*Sols surface : 0-5 cm*



*Gaz du sol*

- Culture sol

- Ingestion sols, inhalation poussières
    - Transfert vers plantes



*Sols surface : 0-20 cm  
(profondeur racinaire)*



*Plantes*

- Eaux souterraines (AEP)

- De la surface vers la profondeur :  
sources, transfert



*Sols, sous-sol (ZNS) : qq m*



*Eaux souterraines*

- Gestion des terres excavées (aménagement)

- Profondeur d'excavation ?

- Etude historique et documentaire

- Sources de pollutions potentielles ou avérées
- Types de contaminants historiques et actuels
  - Liés aux activités anthropiques sur place ou à proximité
  - Liées aux matériaux de remblaiement
- + retour d'expérience

Quel comportement des contaminants ?  
**Mobilité ?**  
 Quelle toxicité ?

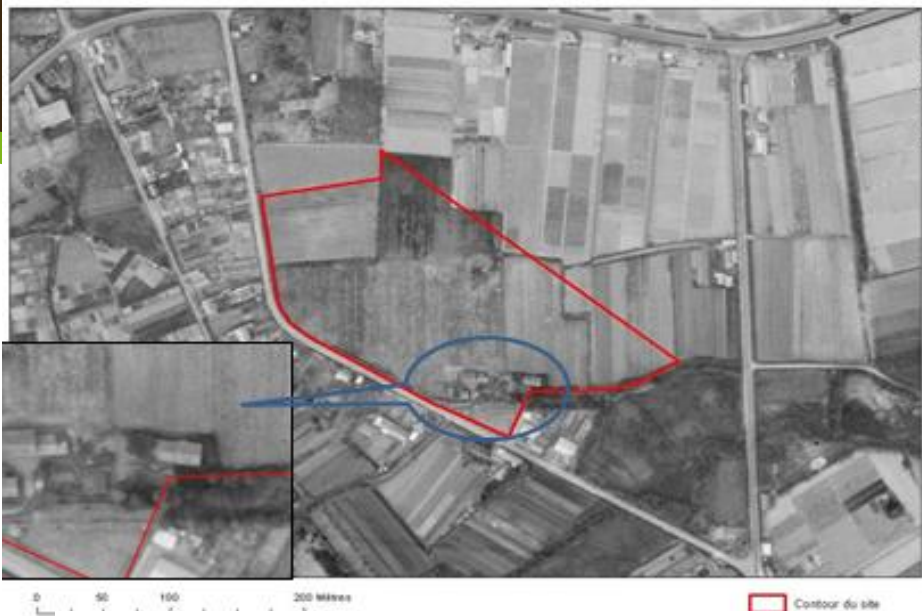
- Contexte environnemental

- Fond géochimique
  - Référentiels ?
  - Teneurs usuelles locales ?
- Anomalies naturelles ?

### Milieux impactés ?

**Sols**  
 Eaux souterraines  
 Eaux superficielles  
 Air  
 Végétaux

Les Chaupières, 1959



Les Chaupières, 1983



Les Chaupières, 1999



Les Chaupières, 1986



- En référence au schéma conceptuel
- Définir une stratégie d'échantillonnage en fonction des objectifs
  - Nombre
  - Profondeur
  - Répartition
- Hétérogénéité
- Echantillon de référence (ex. fond géochimique)

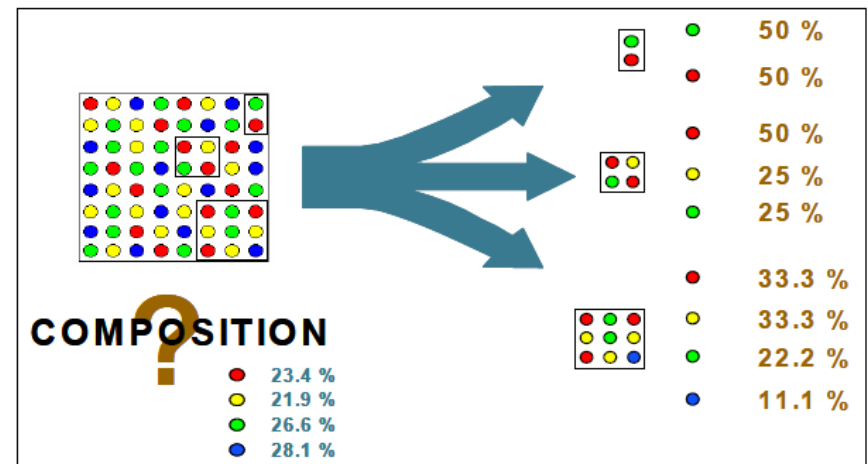
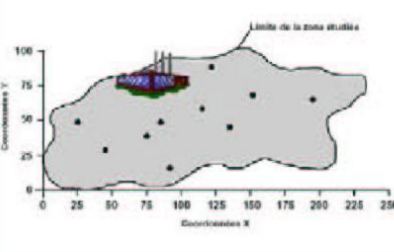

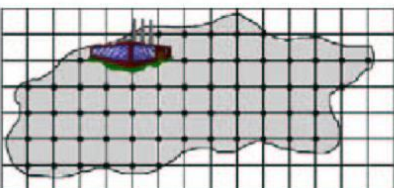
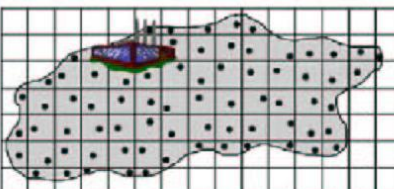
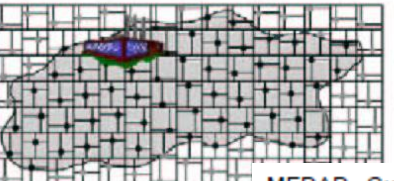
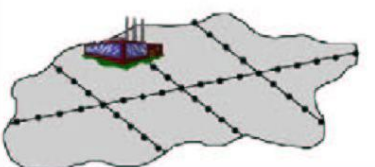
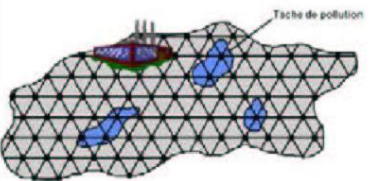


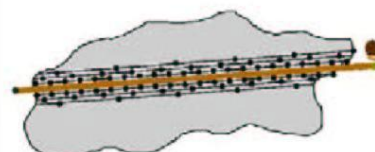
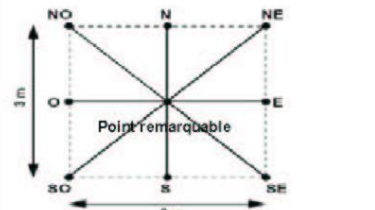


Figure 23 : Hétérogénéité et erreur d'échantillonnage

MEDAD, Guide méthodologique – Diagnostics du Site – 08/02/07  
[http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=doc&id\\_article=19938](http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=doc&id_article=19938)

<p><b>Echantillonnage aléatoire</b></p> <p>Une telle approche est particulièrement appropriée pour effectuer des vérifications (prélèvements en nombre limité) ou dans tous les cas où les informations sur l'état du site, en terme de pollution, sont inexistantes ou insuffisantes pour une utilisation rationnelle (grand nombre de prélèvements)</p>	
<p><b>Echantillonnage aléatoire stratifié</b></p> <p>Dérivée de la précédente, cette stratégie s'en distingue par un découpage des zones étudiées en secteurs (ou strates) plus homogènes, qui seront échantillonnés aléatoirement, indépendamment les uns des autres</p>	
<p><b>Echantillonnage systématique</b></p> <p>Parfaitement adapté à l'échantillonnage de sites de superficie élevée. Souvent utilisé pour déterminer la distribution d'un polluant. Différentes variantes peuvent être utilisées :</p>	
<p><b>Echantillonnage systématique aléatoire</b></p> <p>Cette approche est utile pour évaluer la concentration moyenne en polluant à l'intérieur de chaque maille et déterminer celles qui nécessitent un complément d'investigation.</p>	
<p><b>Echantillonnage systématique semi aléatoire</b></p> <p>Dérivée de la précédente par un découpage ordonné à l'intérieur des mailles.</p>	

<p><b>Echantillonnage par profils</b></p> <p>A pour avantage de limiter le nombre d'échantillons prélevés, et apparaît bien adaptée pour démontrer l'extension d'une pollution.</p>	
<p><b>Echantillonnage de recherche spécifique</b></p> <p>Ce type d'approche est utilisé pour identifier ou détecter une zone présentant des concentrations anormales. La maille est proportionnelle à la taille minimale des taches de pollution suspectées (nécessite d'avoir une idée sur la valeur de la surface des taches de pollution)</p>	
<p><b>Echantillonnage ciblé</b></p> <p>Cette démarche ne peut pas être utilisée à des fins statistiques. Applicable pour déterminer les polluants présents dans une source déjà localisée.</p>	
<p><b>Utilisation de grilles</b></p> <p>Lorsque la source de pollution est ponctuelle et bien localisée, il peut être intéressant de prélever les échantillons à partir d'une grille circulaire</p>	
<p>Si la source de pollution n'est pas ponctuelle mais linéaire, l'échantillonnage peut avantageusement se faire à partir de prélèvements régulièrement répartis le long d'une ou plusieurs lignes parallèles</p>	
<p><b>Echantillonnage à neuf points</b></p> <p>Utile pour focaliser autour de points anomaux mis en évidence lors d'une approche de type aléatoire. Une étoile à huit branches est définie à partir du point remarquable.</p>	

- Fond pédo-géochimique
  - Milieu proche naturel
    - Sols développés sur même formation géologique
    - Contexte anthropique (activités impactantes actuelles et passées)
  - Milieu urbain
    - Compliqué
    - Eviter les sols apportés trop récemment
    - Espaces verts « anciens »
    - Quid remblais ?

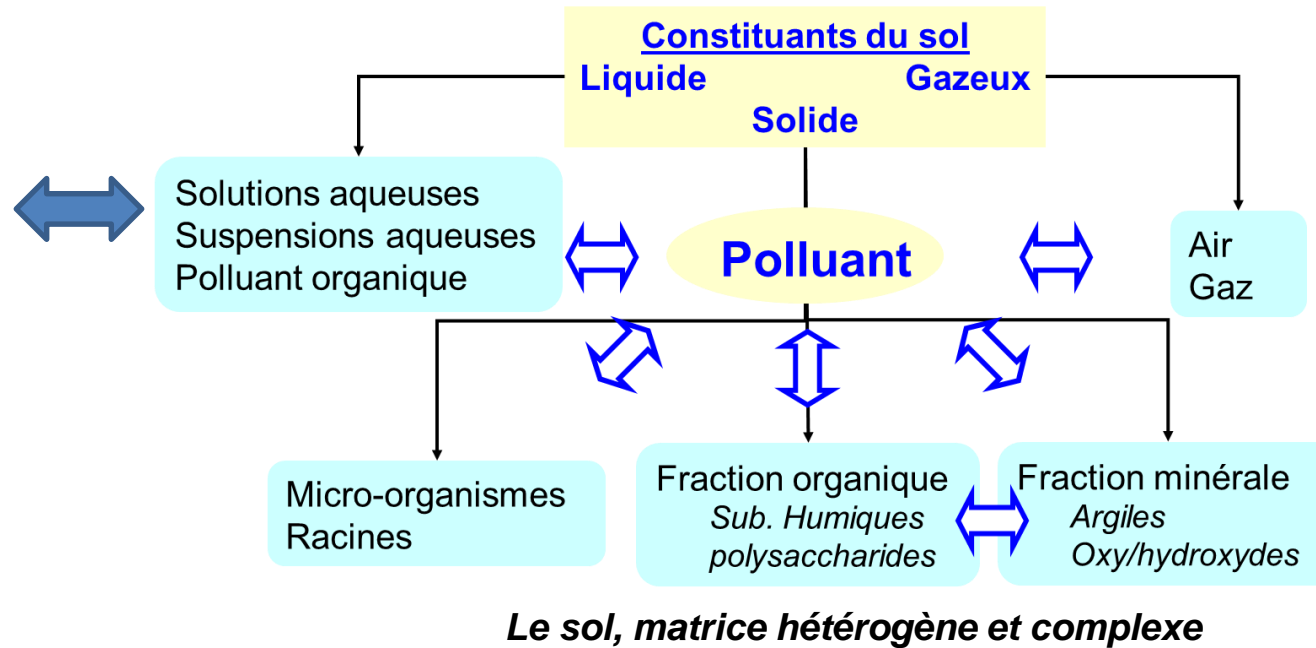
- **Choix fonction**
  - Objectifs
  - Connaissances sur le système étudié
  - Moyens (cf. enjeux économiques et sanitaires)

⇒ paramètres recherchés (contaminants, mais pas que...)
- **Complémentarité** : outils, compétences
  - In situ, sur site, laboratoire
  - Destructif, non destructif
  - Préparation échantillons, Transport, extraction éventuelle

⇒ approche ponctuelle, spatiale, temporelle



- **Nombreux**
  - In situ
  - Sur site
  - Au laboratoire
- **Des protocoles**
  - Normes
  - Règles de l'art
- **Des nouveautés issues de la R&D**

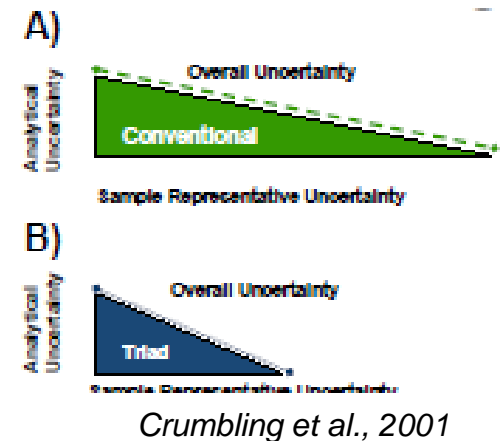


## 3- Outils de caractérisation sur site des contaminations de sols

- 3.1- Intérêts et limites des mesures sur site
- 3.2- Principaux outils de mesure
- 3.3- Focus sur la pXRF
- 3.4- Illustrations d'utilisation à partir d'exemples concrets
- 3.5- Conclusions et perspectives







Modifié d'après C. Le Guern, B. Lemière, V. Laperche,  
V. Guérin, B. Clozel, GFHN, 2015

- Flexibilité – Réactivité –  
Coopération avec le laboratoire
- Intérêts
  - Screening (forte densité de points de mesures possible)
  - Stratégie d'échantillonnage (adaptée, dynamique)
  - Baisse des incertitudes => crédibilité des décisions
  - Aide à la décision
- Limites
  - Semi-quantitatif
  - Calage avec laboratoire : sélection d'échantillons



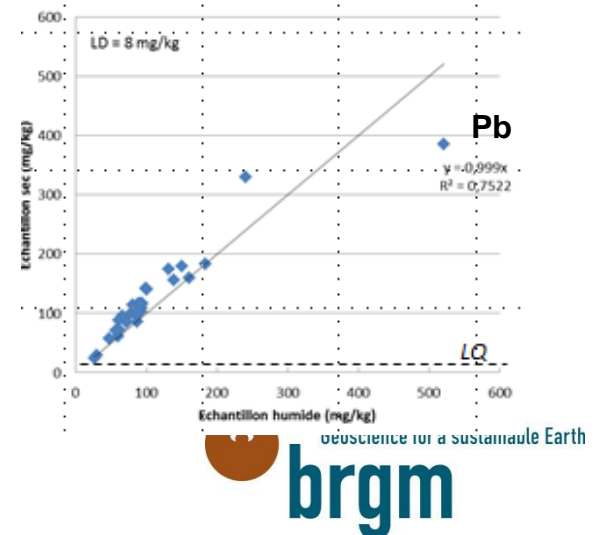
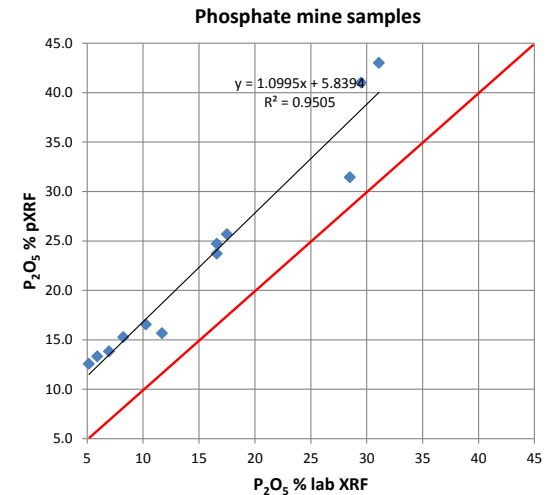
### Importance de l'échantillonnage

NB : Erreur d'échantillonnage  
 >>>  
 Erreur analytique  
 (cf. hétérogénéité des milieux)

Technique couramment utilisée	Technique plus rarement utilisée	Technique émergente
<p><b>Fluorescence X (métaux)</b></p>  <p><b>Mallette Petroflag-test colorimétrique (HCT)</b></p>	<p>Mallette Secomam UV (HAP)</p> <p>Kit (PCB)</p> <p>Chromatographie en phase gazeuse (GC) couplée FID, PID ou MS (HCT, COV, HAP, PCB)</p>  <p>HAPSITE ER</p>  <p>TRIDION</p>	<p>LIBS (métaux légers)</p> <p><i>LIBS – photo IVEA</i></p>  <p>Spectromètre IR et Raman (organiques dont HCT, phases porteuses minérales dont FeOOH)</p> <p><i>μRaman - photo Rigaku</i></p>  <p>spectromètre FTIR portable : Exoscan 4100</p> <p>pXRD (diffraction)</p> <p>Première approche de la minéralogie</p> <p><i>pXRD photo Olympus</i></p> 



- Utilisations possibles
  - Outil de diagnostic
    - Approche semi-quantitative, comparaison relative
  - Outil d'analyse
    - Pour certains éléments, sous certaines conditions
    - Parler de « mesure » (sur site), et non d'analyse (labo)
  
- Conditions pour une mesure pertinente
  - Représentativité de l'échantillon prélevé
  - Qualité de la préparation de l'échantillon (proche laboratoire)
    - Homogénéisation
    - Faible humidité, ou humidité connue/équivalente
  - Importance de la vérification au laboratoire
  - De préférence sur matrice équivalente



### 3.3- Focus sur le pXRF : pertinence des mesures Préparation des échantillons : étape indispensable ?



1) échantillonnage



2) brassage, démottage,  
 homogénéisation, quartage



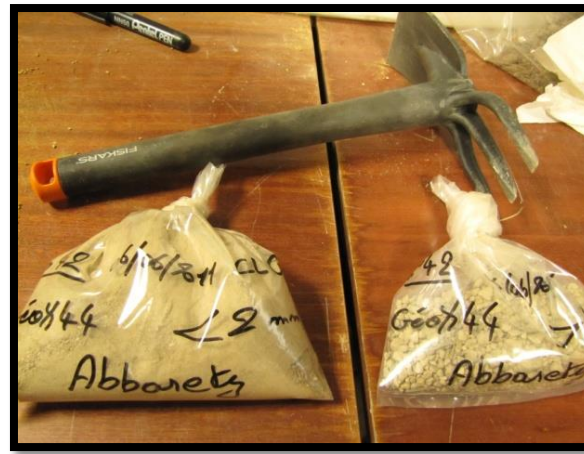
3) séchage



4) broyage



7) Analyse par fluorescence X  
 de la fraction fine

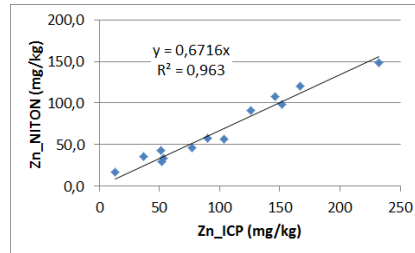
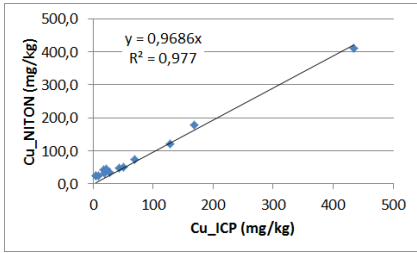
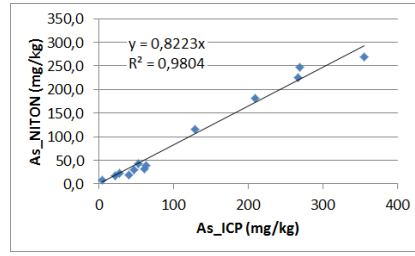
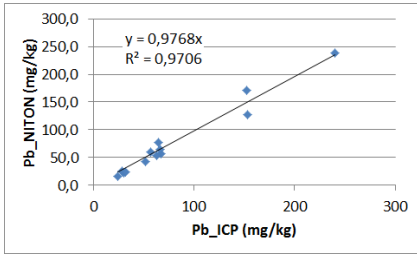


6) fractions fine et grossière  
 après tamisage

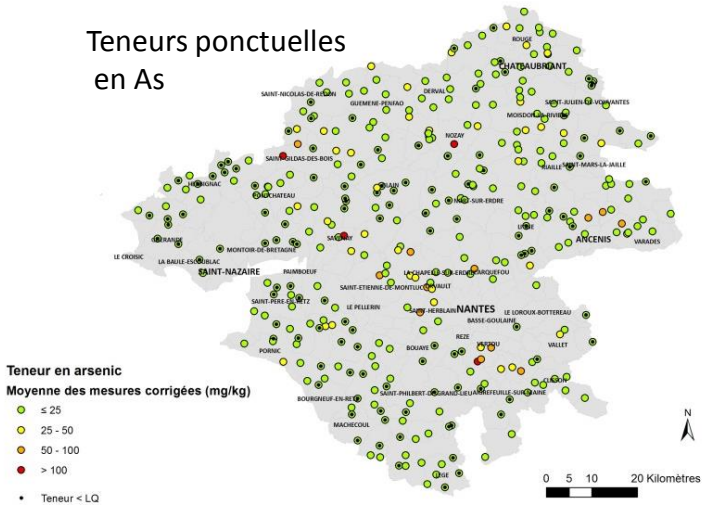


5) tamisage à 2 mm

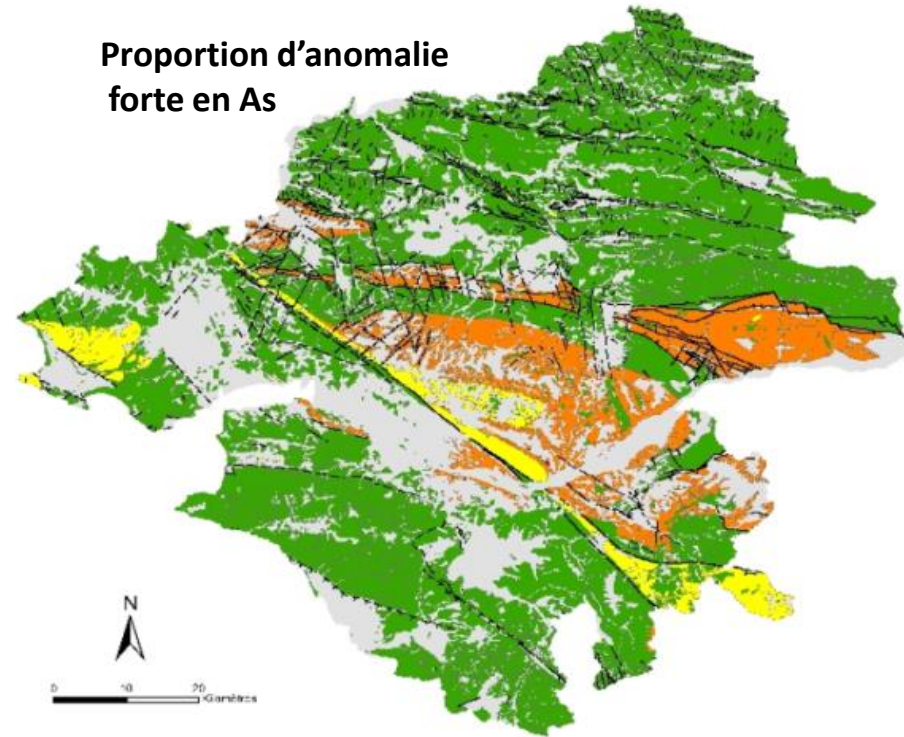




Teneurs ponctuelles  
 en As



Proportion d'anomalie  
 forte en As



*Le Guern et al., 2013*



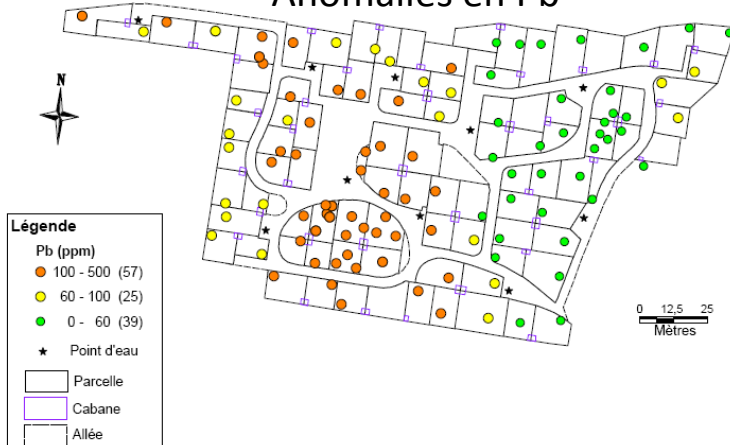
Geoscience for a sustainable Earth

**brgm**

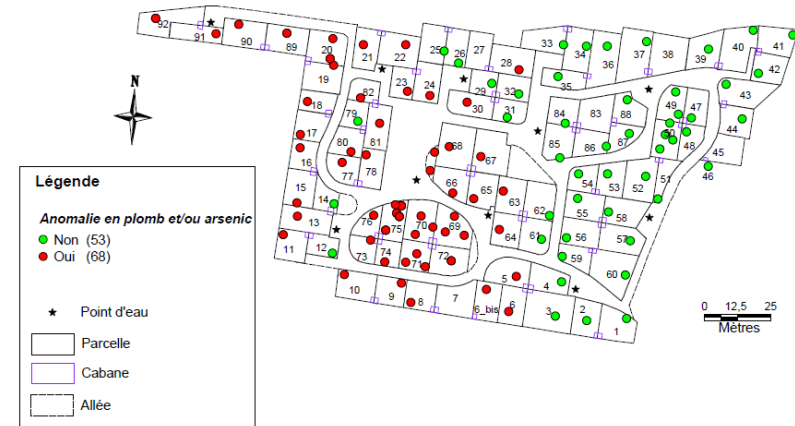
# 3.4- Exemple d'utilisation

## Aide à la décision : échelle d'un site

### Anomalies en Pb



### Anomalies en Pb et As



### Anomalies en As



### Evolution de l'arrêt



Mesures



Géolocalisation  
au DGPS

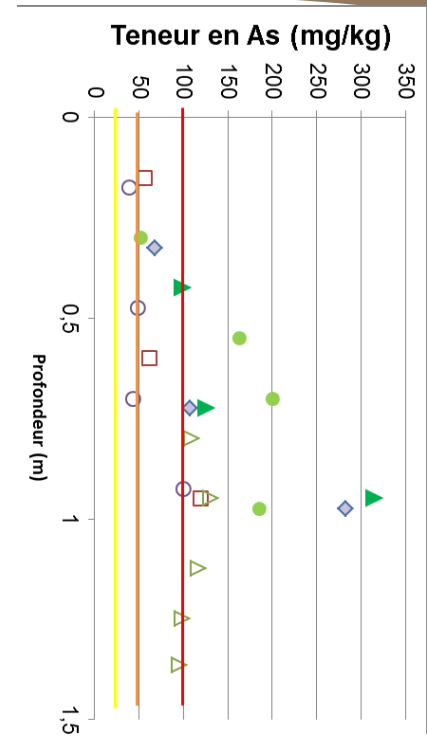
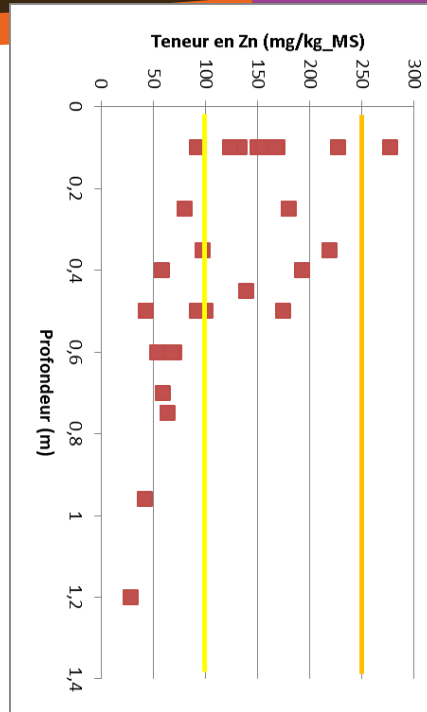
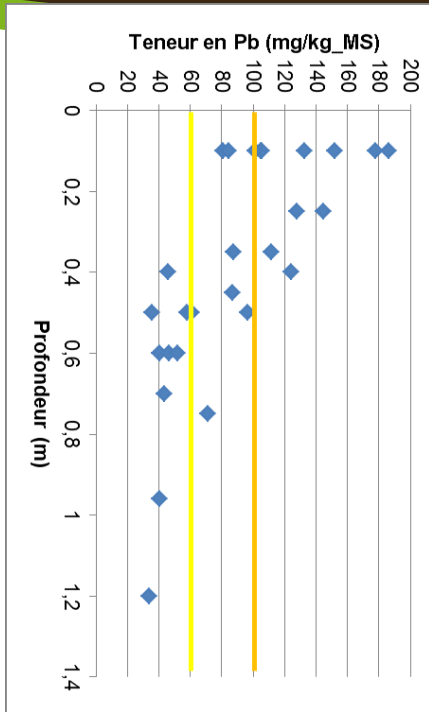


Sols de surface

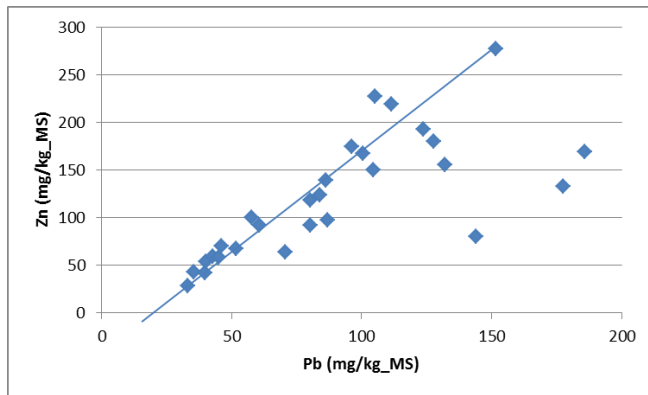


Profils de sol





anthropique vs naturel



pXRF : plusieurs modes de mesure  
 - sol / environnement  
 - matériau  
 - minerai

Importance des observations

- Complémentarité entre outils de terrain et laboratoire
- Outils à considérer :
  - Lorsque nécessaire
    - besoin de résultats immédiats
    - contraintes majeures de budget  
=> garder des ressources pour QA/QC et contrôle au laboratoire
  - Lorsque bénéfique
    - Recherche orientée
    - Adaptation des investigations
    - Sélection d'échantillons pour le laboratoire
    - Collections d'échantillons

# 4 – Conclusions

- **Points d'attention**

- Se poser les bonnes questions : approche au cas par cas
- Qualité d'échantillonnage
  - Représentativité vs hétérogénéité
  - Choix des paramètres
- Qualité de l'analyse/mesure
  - Conservation, Préparation échantillon
  - Calibration, extraction, suivi qualité (blancs à différentes étapes)

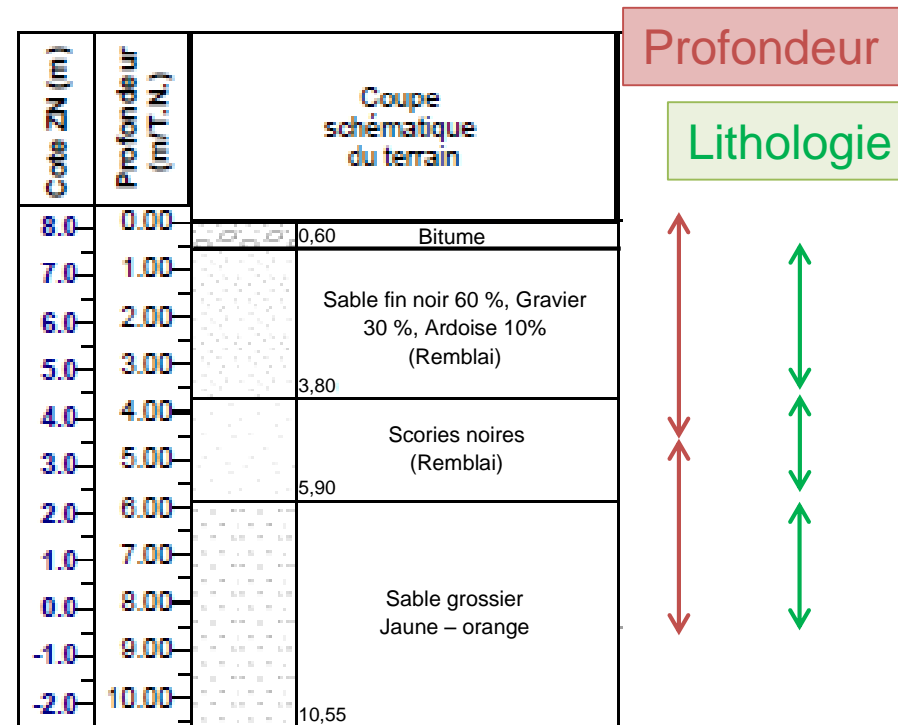
- **Incertitudes**

- Sources d'incertitude sur les endroits de prélèvements
- Interprétation des résultats  
(cf. exposé F. Marot)

- **Caractérisation pertinente et de qualité  
=> gestion optimale**
  - Risques => Compatibilité état milieu et usages
  - Actions de gestion adaptées (éventuelles)
    - Traitement (sur site, hors site), Excavations, Mesures de construction active ou passives, Confinement, Atténuation naturelle
    - Dimensionnement
- **Enjeux économiques et sanitaires**
  - Limiter les mauvaises surprises (retards, surcoûts, image)
  - Compromis entre enjeux et moyens/coûts
  - Coût caractérisation << coût dépollution



- Gestion terres excavées
  - Différence échantillonnage
  - Evacuation : 8€/t vs 80 €/t
  - 1 000 t => 72 000 € (72 k€)
  
- Notions de coûts (Dreal, 2012)
  - Premier diagnostic : 10-20 k€
    - *étude historique et documentaire*
    - *visite du site, quelques analyses*
  - Plan de gestion : 30-100 k€
    - *diagnostic approfondi, schéma conceptuel*
    - *étude sanitaire, bilan coûts/avantages...*
  - Travaux de dépollution : jsq > 500 k€



Merci pour votre attention !

Des questions ?

Contact : [c.leguern@brgm.fr](mailto:c.leguern@brgm.fr)

- **Outils de caractérisation sur site**

## Quelques références

West M. et al. (2015) Atomic spectrometry update – a review of advances in X-ray fluorescence spectrometry and their application. *J. Anal. At. Spectrom.*, 30, p. 1839

Ramsey M.H., & Boon, K.A. (2012) Can in situ geochemical measurements be more fit-for-purpose than those made ex situ? *Applied Geochemistry* 27, p. 969–976

Laperche V., Hubé D., Guérin V. et Aubert N. (2014) Outils de mesure sur site : quel besoin pour quelle utilisation. 3ème rencontre nationale de la recherche sur les sites et sols pollués : bilan et perspectives. 16 p.

El Haddad J. et al. (2014) Application of series of artificial neural methods to on site quantitative analysis of lead into real soil samples by LIBS, *Spectrochimica Acta, B: Atomic Spectrometry*

Lemière et al. (2014) The significance of pXRF measurements on wet materials, and their relation to analyses in the ASAP perspective application to dredged contaminated sediments from canals, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*.

Jean-Soro L., C. Le Guern, B. Bechet, T. Lebeau, M.F. Ringard (2014) Origin of trace elements in an urban garden in Nantes, France, *Journal of Soils and Sediments*, DOI 10.1007/s11368-014-0952-y.

C. Le Guern et al. (2015) Cartographie des teneurs en éléments traces dans les sols urbains – cas de 2 jardins à Saint-Sébastien-sur-Loire (Loire-Atlantique, France). Rapport BRGM/RP-65086-FR, 24 p. (accès différé)

Le Guern C. et al. (2013) METOTRASS : méthodologie optimisée pour l'évaluation des teneurs en éléments trace (As, Pb, Cu, Zn) dans les sols en domaine de socle – Rapport final BRGM RP-63998-FR.

- **Sites et sols pollués**

## Guides méthodologiques sites et sols pollués

- MEDAD, Guide méthodologique – Diagnostic du site – 08/02/2007
- MEDAD, Guide méthodologique – Schéma conceptuel – 08/02/2007
- MEDAD, Guide méthodologique – La démarche d'Interprétation de l'Etat des Milieux – 08/02/2007

Portail national sites et sols pollués

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Sites-et-sols-pollues.html>

## Phase

### • Solides

#### – *Particules solides libres*

scories métalliques, agglomérats

#### – *Liés à la matrice solide*

ad(b)sorption, substitution ionique,...

### • Liquides libres

#### – *NAPL (non miscibles dans l'eau)* = « huileuse »

#### – dissous dans l'eau

### • Gazeuses

## Type de contaminant diffus

- Pb, Zn, Cu, As, Cd..

- Hydrocarbures, HAP, COHV, ...

- As, Cd, Cr ...

- COHV, BTEX...

- Hg

- **Multi-élémentaire**

- Éléments lourds seulement (jusqu'au K)
- Pas de spéciation
- Limites de quantification
  - Elevées pour certains éléments (ex. 10 mg/kg pour Hg)
  - Fonction matrice
- Interférences (Pb-As, Fe-As)

- **Investigation**

- Faible profondeur, variable selon les éléments (1 à 0.05 mm)
- Surface limitée (< 1 cm<sup>2</sup>)

- **Facilité d'utilisation**

- Attention à la calibration
- Plusieurs types de matériaux analysables (sols, mais aussi matériaux, minerais)
- Hétérogénéité évaluable
  - shoot multiples

- Exigences

- Cooperations étroites
- Protocoles traçables
- Echantillons et données de qualité

