

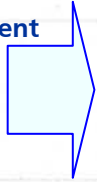
Evaluation rapide de la pollution métallique d'un sol en vue de son élimination : retours d'expérience de l'usage de la fluorescence X sur des chantiers

- Dans quel contexte utiliser la fluorescence X ?
- Quelques bases techniques
- L'évaluation de la qualité des sols : 2 stratégies distinctes
- La préparation des échantillons
- Le calage des mesures in situ, une étape majeure
- Le suivi de travaux d'excavation des terres
- Synthèse & perspectives



Dans quel contexte utiliser la fluorescence X ?

historiquement



Détection du plomb dans l'habitat

Prospection minière

Composition d'alliages (industrie / récupérateurs de métaux)

Sols pollués



Besoin de connaître rapidement le niveau de concentration en éléments métalliques dans un solide

✓ Investigations sur sites pollués par des éléments traces métalliques

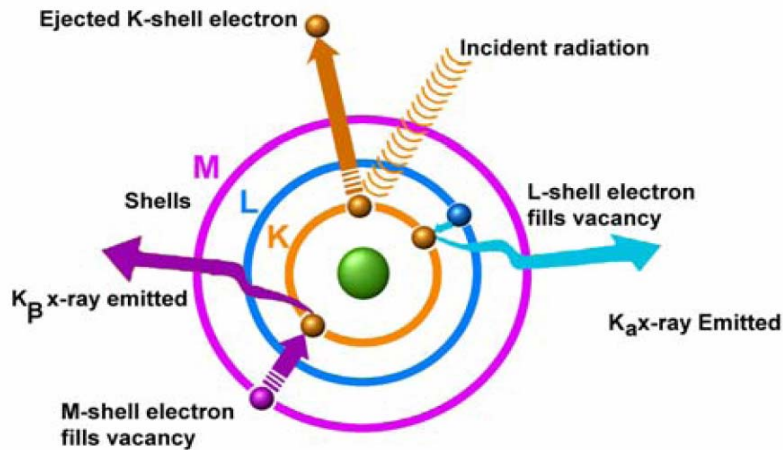
- identifier / cerner les anomalies de concentration
- optimiser un plan d'échantillonnage / d'analyses

✓ Aide à la décision pour l'orientation de terres excavées (suivi en temps réel)

... pour une précision potentiellement similaire à celle du laboratoire



Quelques bases techniques

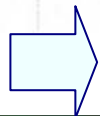


les rayons X sont des photons produits par les électrons des atomes

Lorsque l'on bombarde de la matière avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X ; c'est la fluorescence X (ray. X secondaire) :

- 1) le rayon transmet de l'énergie à un électron*
- 2) l'électron est éjecté*
- 3) afin de maintenir l'équilibre, un électron descend d'une orbite*
- 4) en émettant de l'énergie : la fluorescence*
- 5) le rayonnement II permet de déduire la nature de l'élément*
- 6) l'intensité de la réponse permet de déduire la concentration*

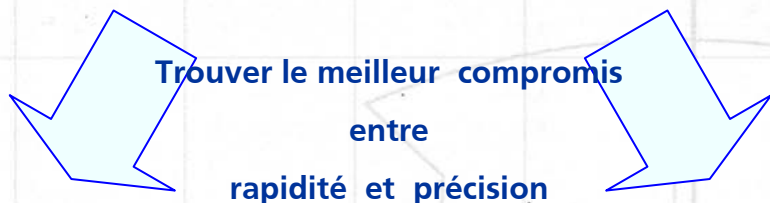
- . Les éléments « légers » répondent mal / pas du tout
- . Les molécules d'eau génèrent une diffraction des rayons
- . La fenêtre de mesure représente quelques mm² et une profondeur maximale de 1 mm environ
- . Les rayons sont absorbés rapidement par les éléments métalliques, « très peu » par la matière organique ou les vides



Influence théorique majeure de la proportion de vides ... porosité / granulométrie



L'évaluation de la qualité des sols ... 2 stratégies



Mesure directe sur le sol

2' / mesure
> 100 points / jour

La variabilité est compensée par la multiplication des points de mesure



Nécessité de disposer d'un outil de synthèse cartographique → SIG

Préparation simple (tamisage) / pastille

10' / mesure
~ 30 points / jour

La préparation nous rapproche des conditions de laboratoire



(tamisage, broyage → classe granulométrique)

réduction de l'effet pépite

... avec une précision (en théorie) similaire à celle du laboratoire ; à relativiser compte tenu des interférences nombreuses ...

Préparation des échant^o
Calage des mesures



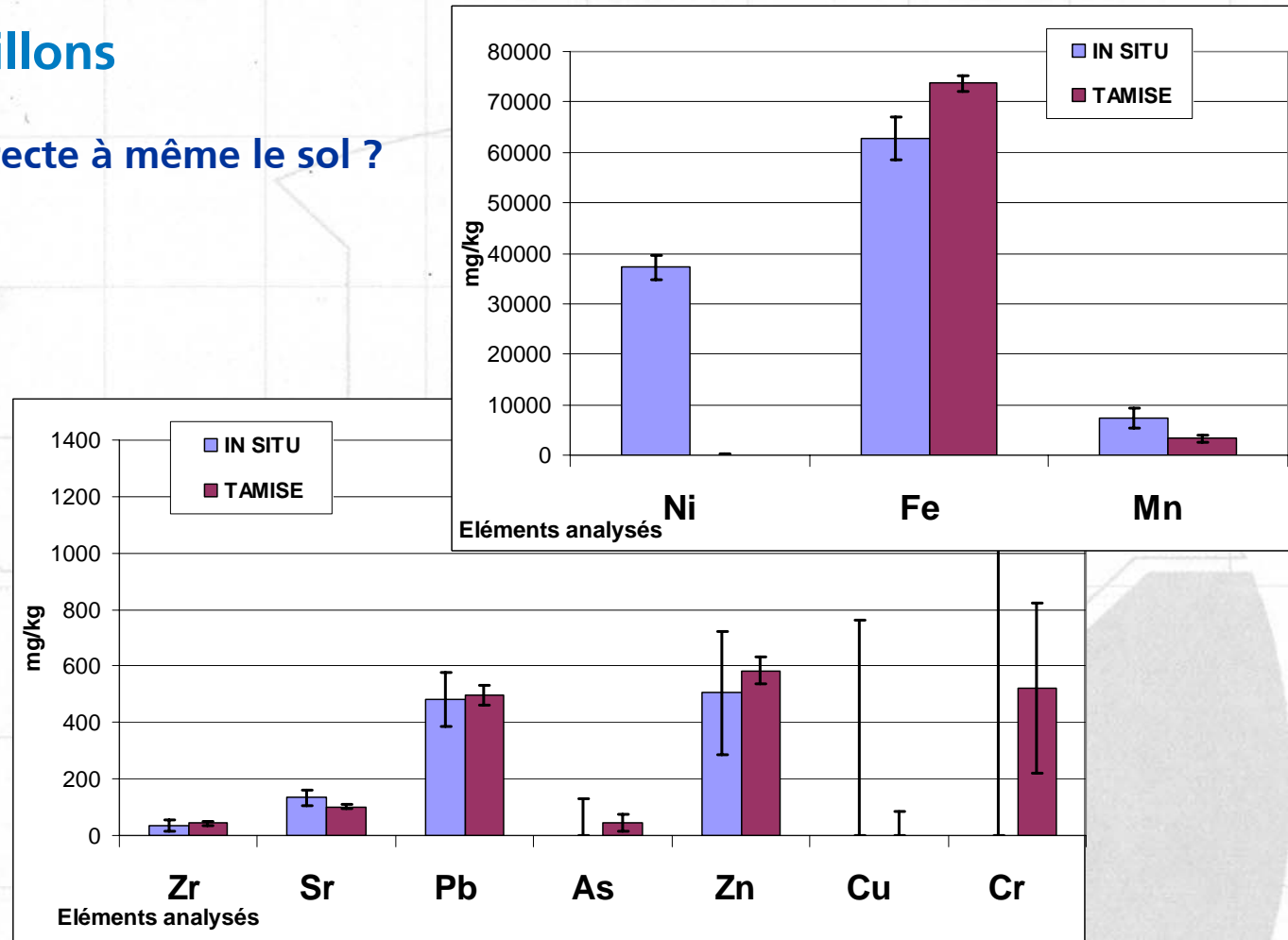
La préparation des échantillons

Exemple : tamisage ou mesure directe à même le sol ?

- . Réduction de l'incertitude de mesure
- . Mais des concentrations moy. qui restent voisines dans les 2 cas

→ Est ce que cela démontre l'inutilité d'une préparation ?

Dans notre cas : incapacité à identifier Cu (<s.d.) et Cr (interférence ?)

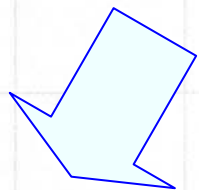


Tout dépend du contexte, de la nature des sols, de la réactivité souhaitée, ...



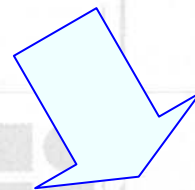
La préparation des échantillons

Quelques dispositions minimales, notamment en cas d'hétérogénéité fortes des sols



Mesure directe sur le sol :

- élimination des végétaux, débris et éléments grossiers de surface
- aplanir la surface de mesure
- temps de mesure suffisant pour optimiser l'incertitude et le seuil de détection
- multiplier les points de mesures pour contrôle



Préparation simple (tamisage) / pastille

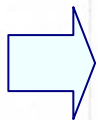
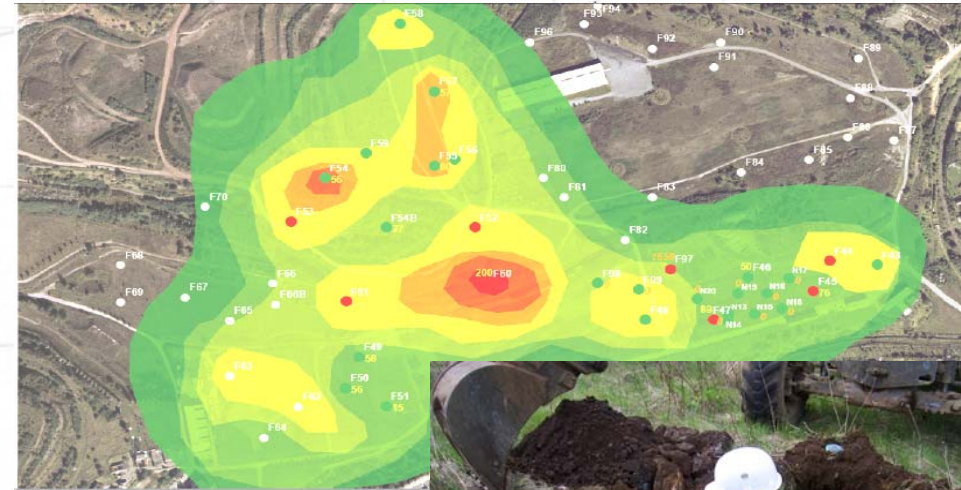
- homogénéisation des sols
- tamisage, voire un broyage
- séchage en cas d'humidité forte et selon la texture du matériaux
- pastillage



Restitution des résultats (diagnostic)

Exemple 1 : friche industrielle (réhabilitation de site)

- connaissance optimale de la qualité des sols que n'aurait pas permis (à coût équivalent) l'échantillonnage a destination du laboratoire
- utilisation du SIG pour la représentation graphique
- confirmation et infirmation des anomalies en laboratoire



Facilite l'évaluation des solutions de réhabilitation
(adéquation projet / contexte / pollution)

Permet d'être conclusif sur la quasi totalité de la zone d'étude

Liste standard d'éléments mesurables : As, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, Sr, Th, U, Zn, Zr



Restitution des résultats (diagnostic)

Exemple 2 :

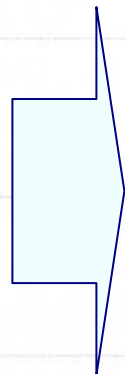
Site industriel de taille réduite (transaction)

- optimisation du programme d'analyse
- connaissance immédiate de la qualité des sols



. Restitution des résultats provisoires en fin d'investigations

. Un réel intérêt dans le cadre de diagnostic de cession avec une réponse immédiate pour des métaux (idem PID pour des composés organiques volatils)



- . Optimisation des coûts d'analyse
- . Réactivité optimale (obtention des résultats sur le site)
- . **Qualité technique de la prestation permettant de caractériser en temps réel les principales problématiques :**

- | | |
|--------------------------------|----------------|
| - Hydrocarbures | / observations |
| - Composés organiques volatils | / PID |
| - Éléments traces métalliques | / Fluo X |



Étape majeure : la calage des mesures in situ

Indispensable en phase diagnostic ou travaux ...

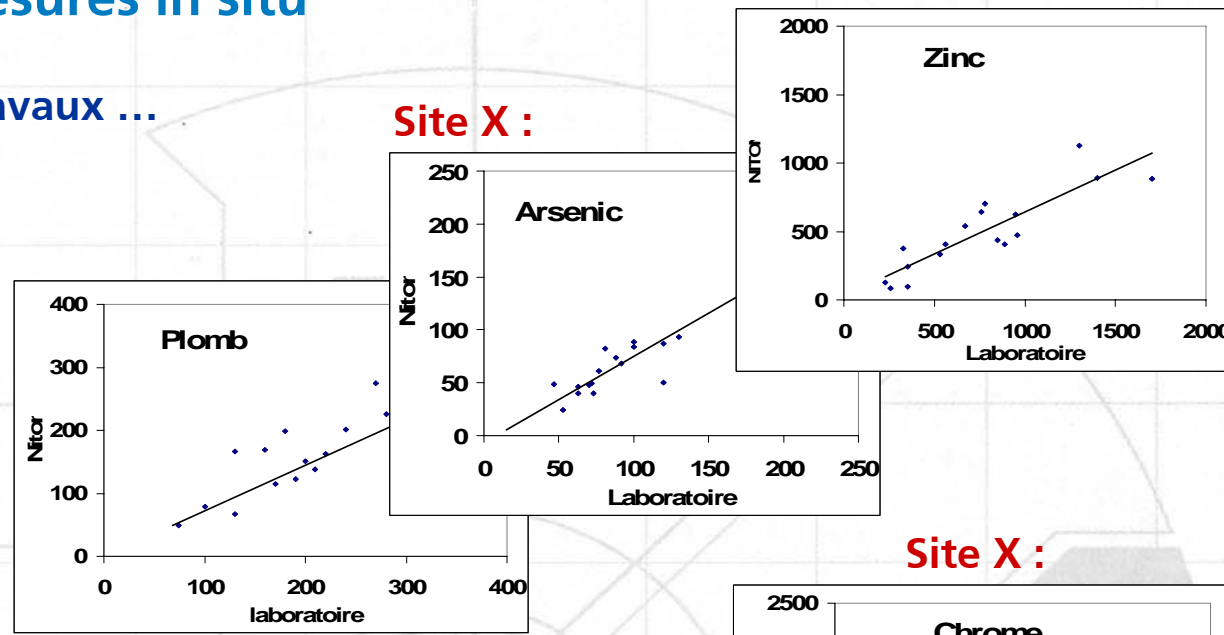
... car il n'existe pas de règles

Le cortège d'éléments, la granulométrie, l'humidité, ... ont des incidences sur les résultats

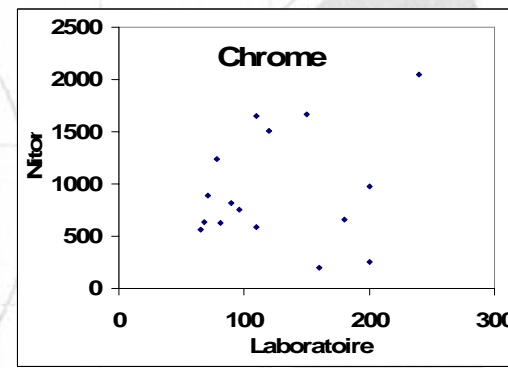
Dans ces exemples : la Fluo X Sous-estime les concentrations de 30% environ :

Des résultats peuvent être ininterprétables (cf. Cr, Ni) :

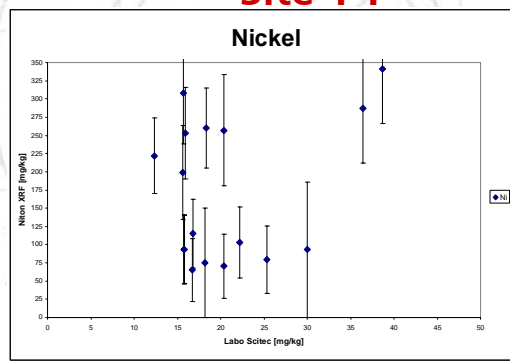
Site X :



Site X :



Site Y :



Le suivi de travaux d'excavation

Habituellement :

- 1) un diagnostic de pollution et des analyses spécifiques (brut + lixiviat) précèdent l'excavation des sols
- 2) « l'imprécision du diagnostic » rend incertaine l'évaluation des coûts d'élimination, du planning, ...
- 3) Des stocks tampons peuvent être réalisés le temps de réaliser les analyses en laboratoire
- 4) Le risque d'évacuer des terres « propres » vers des filières coûteuses (impact financier) ou inversement, des terres souillées vers des solutions inadaptées (responsabilité du producteur du déchet).

La fluorescence X n'est pas la solution miracle, mais ... presque :

- Est une aide à la décision très précieuse lors du choix des filières d'élimination
- Apporte une « garantie » d'optimisation des coûts et des risques pour l'aménageur / le maître d'ouvrage

... Avec malgré tout la nécessité de caler les mesures in situ avec des analyses en laboratoire :

- valider les mesures in situ
- se rapprocher des analyses réglementaires (tests de lixiviation et analyses sur lixiviat)

Et de corriger les mesures d'après la granulométrie.



Exemple d'une ancienne zinguerie :

excavation et tri de 18'000 m³ de matériaux partiellement pollués



Cuvette de remblais excavée avec, en arrière plan, les tas des matériaux triés destinés à être évacués selon les filières adéquates.

Chargement d'un train avec des matériaux souillés (18 wagons, soit environ 1'000 tonnes) destinés au lavage par voie humide.



- ➔
- **Caractérisation des pollutions métalliques (alors qu'elles n'étaient accompagnées d'aucun indice visuel)**
 - **Réduction des volumes des matériaux à traiter et à évacuer en décharges spéciales**
 - **Réduction des coûts de traitement**
 - **Gestion rapide et adéquate des matériaux**



synthèse

Avantages de la fluorescence X :

- Utilisation «simple» et rapide sur le terrain;
- Guidage du plan d'échantillonnage
- Coût par analyse/échantillon faible;
- Echantillons nécessitant pas ou peu de prétraitement avant l'analyse;
- Analyse multi-éléments simultanée;
- Analyse d'échantillons *in situ*;
- Méthode d'analyse non-destructive;
- Permet d'augmenter l'efficacité du tri en définissant les zones polluées avec plus de précision (> points d'analyses);
- Réduction des coûts globaux d'analyse;
- Couplage possible et aisé avec SIG

Contraintes d'application :

- Des contextes parfois inadaptés : une forte hétérogénéité des matériaux implique de multiplier les mesures au risque de nuire à la rapidité de la prestation
- Des limites de détection variables et parfois trop élevées pour conclure
- Des temps de mesure élevés pour atteindre des seuils de détection conclusifs
- Des interférences fortes de la part du Fer
- Un criblage <2mm est parfois nécessaire pour garantir une reproductibilité de la mesure
- Des dérives importantes sont parfois notées pour Ni (interférences avec Fe



Perspectives

Techniquement, rien ne s'oppose à son utilisation systématique sur les chantiers (diag / travaux) ... si ce n'est le **prix de l'appareil** (30 K€ à 50 K€) et **quelques restrictions d'utilisation**.

Il est vraisemblable que son **utilisation** devienne à terme aussi (*encore plus*) **évidente** que celle du PID sur les chantiers car les indices de pollutions métalliques sont rarement perceptibles.

La pertinence de l'interprétation repose notamment sur le calage des mesures in situ à l'aide d'analyses en laboratoire.

La **mise à jour de la base de données**, de toutes les campagnes de terrains permet d'améliorer les interventions en permanence.

Des protocoles simples, adaptés à quelques configurations rencontrées régulièrement permettent d'optimiser la qualité de la prestation en distinguant les paramètres les plus sensibles.

- la préparation préalable permet de relativiser/pondérer l'influence de la granulométrie
- un séchage peut s'avérer nécessaire dans certains cas (pluie, boues, ...)
- certaines associations de métaux ne permettent pas d'interpréter les mesures



En France : CSD Azur

Merci de votre attention



• **Agence Rhône-Alpes et siège social**

75, rue Gerland 69007 Lyon
Tél : (00-33) 4.72.76.06.90
Fax : (00-33) 4.72.76.06.99
e-mail : contact@csdazur.fr
[Plan d'accès](#)

• **Agence Languedoc Roussillon**

ZAE La Garrigue
6 rue des chênes verts
34725 St André de Sangonis
Tél : (00-33) 4.67.67.90.32
Fax : (00-33) 4.67.57.21.94
e-mail : montpellier@csdazur.fr
[Plan d'accès](#)

• **Agence Ile de France**

Immeuble le Magellan
7 rue Montespan
91024 Evry Cedex
Tél : (00-33) 1.69.47.60.11
Fax : (00-33) 1.60.79.33.26
e-mail : paris@csdazur.fr
[Plan d'accès](#)

• **Agence Lorraine**

Grands Bureaux
ZI de Franchepré
54240 Joeuf
Tél : (00-33) 3.82.47.57.83
Fax : (00-33) 3.82.47.57.84
e-mail : lorraine@csdazur.fr
[Plan d'accès](#)

Christian Cornet

c.cornet@csdazur.fr

