ASSOCIATION
DES FIRMES DE
GÉNIE-CONSEIL
QUÉBEC

FORUM 2025

GÉOENVIRONNEMENT

Tendances · Problématiques · Solutions

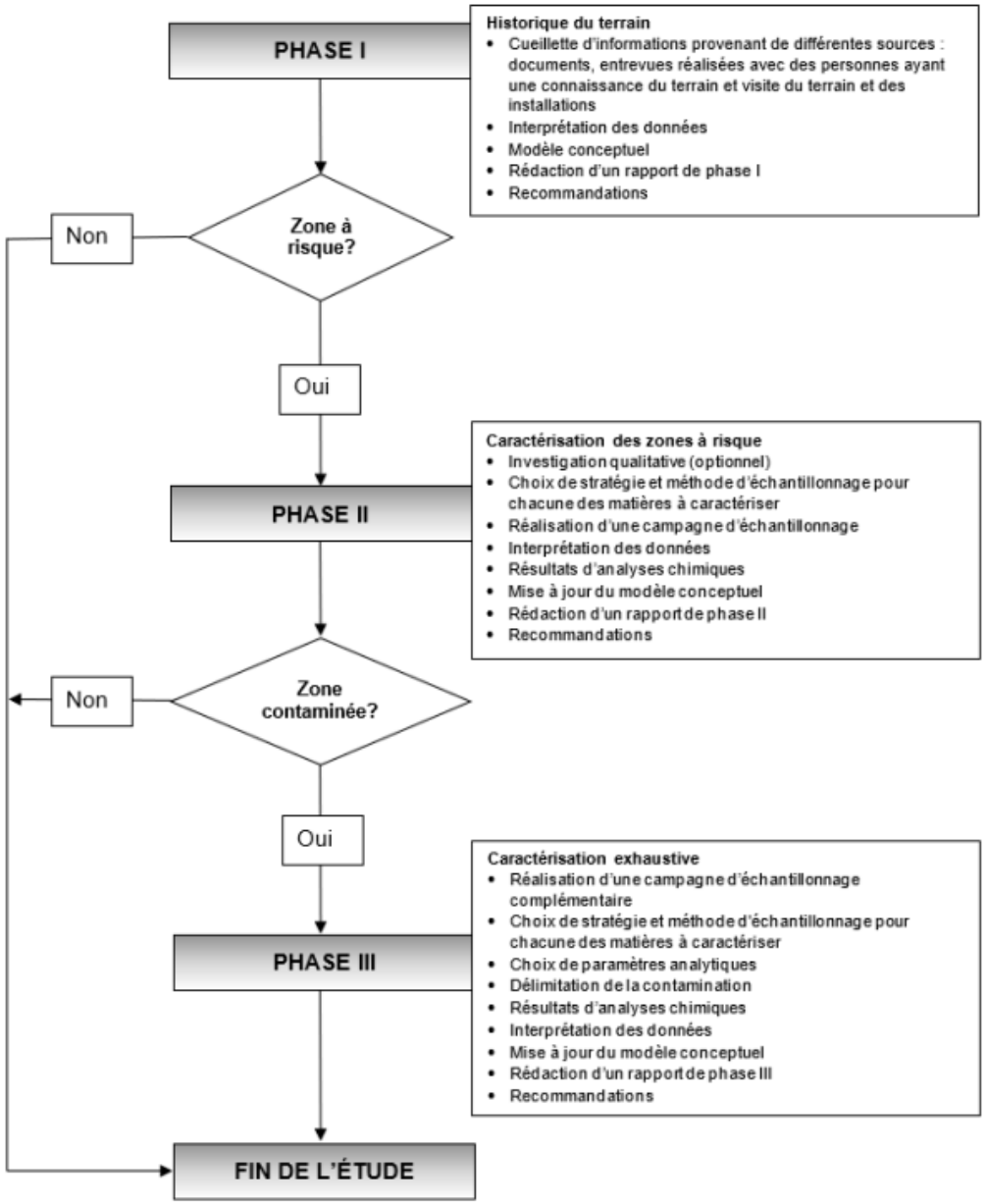
Plan de la présentation

- **Introduction**
- Constats
- Enjeux
- Pistes de solutions
- Description de méthodes et exemples types
- Conclusion

Introduction

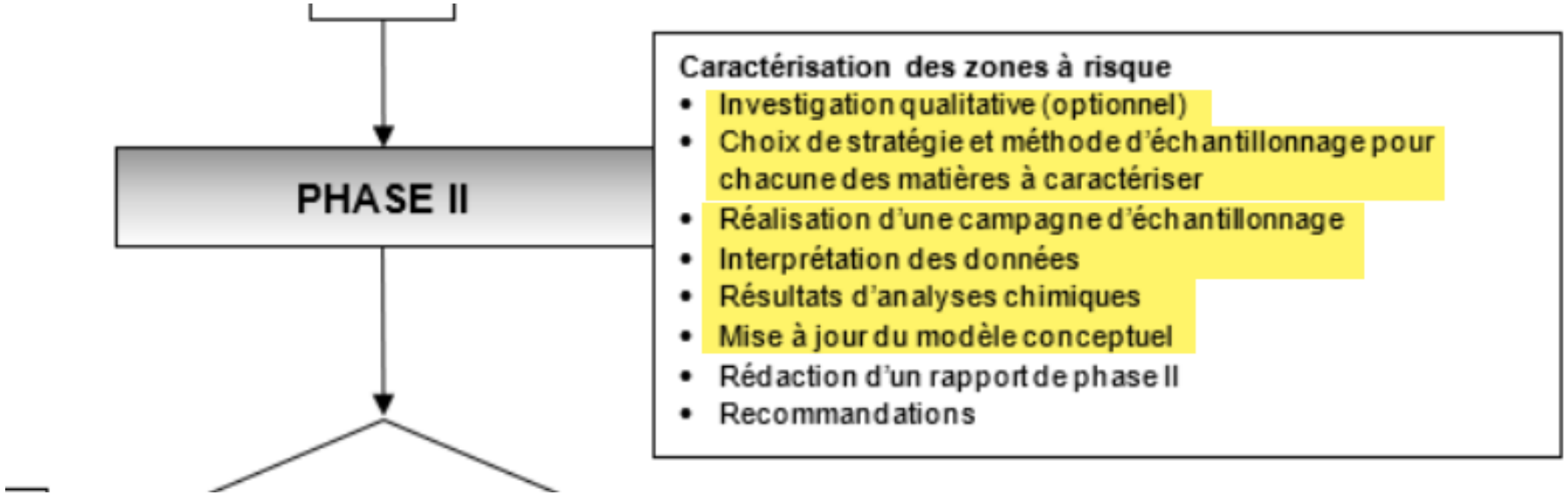
- Les terrains contaminés sont une préoccupation au Québec
- Nécessité de travaux de caractérisation :
  - Obligation légale, déversement, transaction immobilière, protection de l'environnement, réalisation de travaux d'infrastructures, etc.
- Objectifs de la caractérisation
- Types de données variables :
  - Chimiques
  - Géologiques
  - Hydrogéologiques

Cheminement pour la caractérisation d'un terrain



Tiré du *Guide de caractérisation des terrains*, 2024, MELCCFP

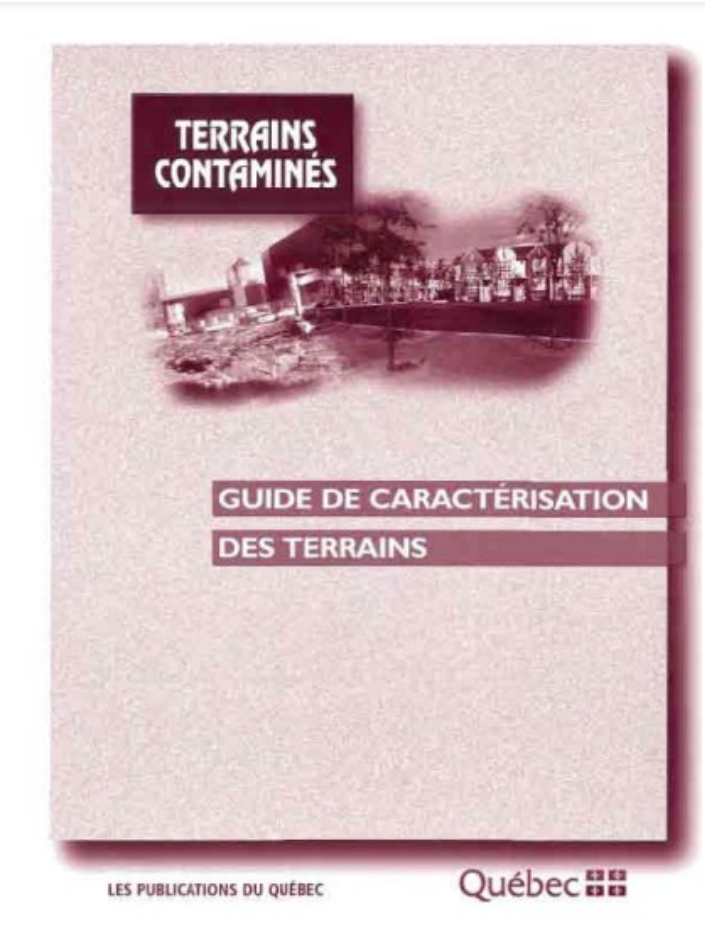
Rappel pour la phase II



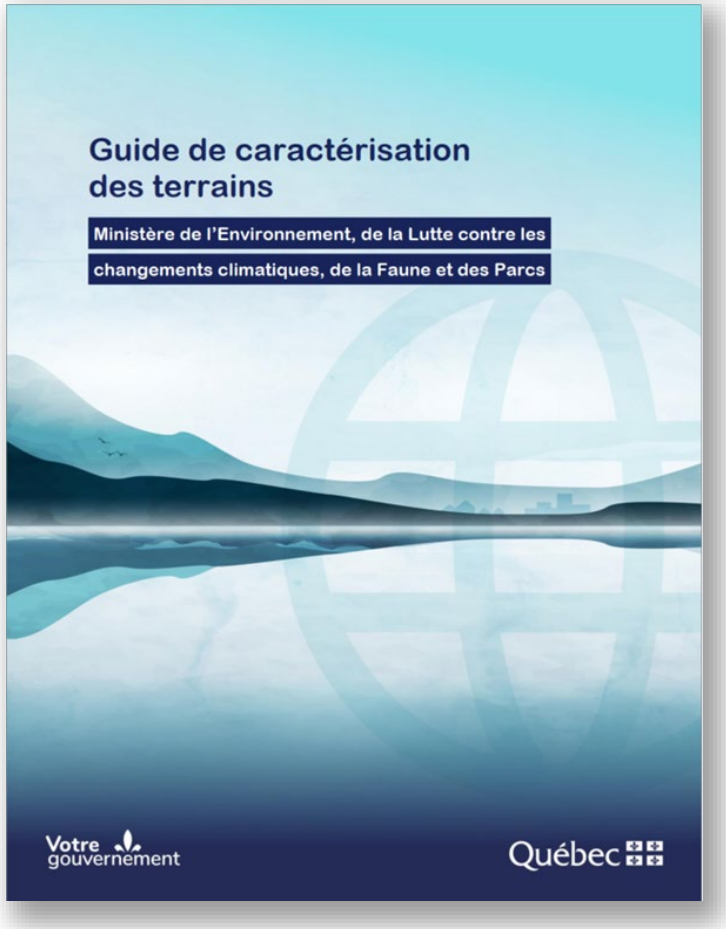
Tiré du *Guide de caractérisation des terrains*, 2024, MELCCFP

Guide de caractérisation

2003



2024



Avant d’aller plus loin…

- Qu'est-ce que l'innovation?
  - Recherche constante d'améliorations de l'existant. Elle se distingue de l'invention, qui vise à créer du nouveau.
  - Dans le domaine de l'ingénierie, l’innovation est le cœur de métier. Elle est la capacité qui permet de trouver des solutions à des problèmes complexes qui par leur complexité ne peuvent pas s’obtenir en appliquant des formules préétablies. Il s'agit de trouver des solutions, de mettre en œuvre de nouvelles idées.
  - Synonymes
    - au sens de nouveauté : changement, création, nouveau, transformation
    - au sens de découverte : découverte, invention

- Qu'est-ce que la nouveauté?
  - Elle désigne le caractère de ce qui est nouveau ou récent. Elle peut se manifester sous différentes formes :
  - **Chose nouvelle** : un objet, une idée, ou un produit qui viennent d’apparaître ou d’être créés.
  - **Originalité** : ce qui se distingue par son caractère inédit ou innovant.
  - **Attrait** : l’intérêt ou l’attrait que suscite quelque chose de nouveau.

Plan de la présentation

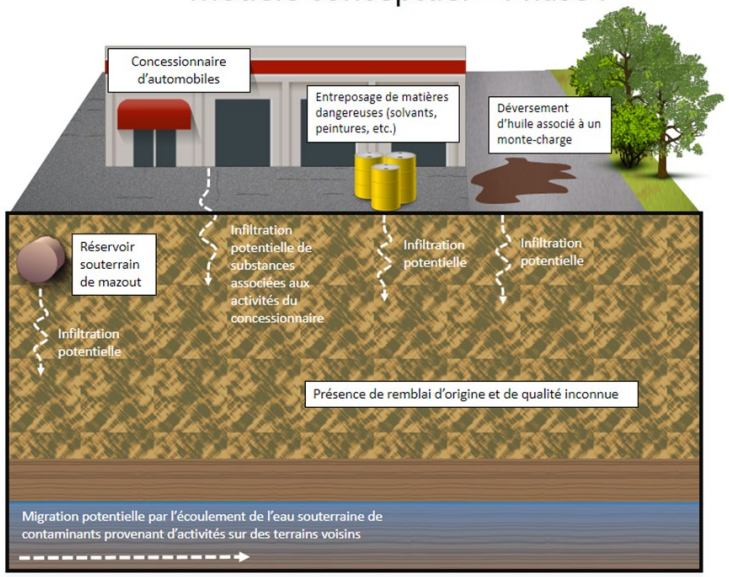
- Introduction
- **Constats**
- Enjeux
- Pistes de solutions
- Description de méthodes et exemples types
- Conclusion

Constat nº 1

Modèle conceptuel

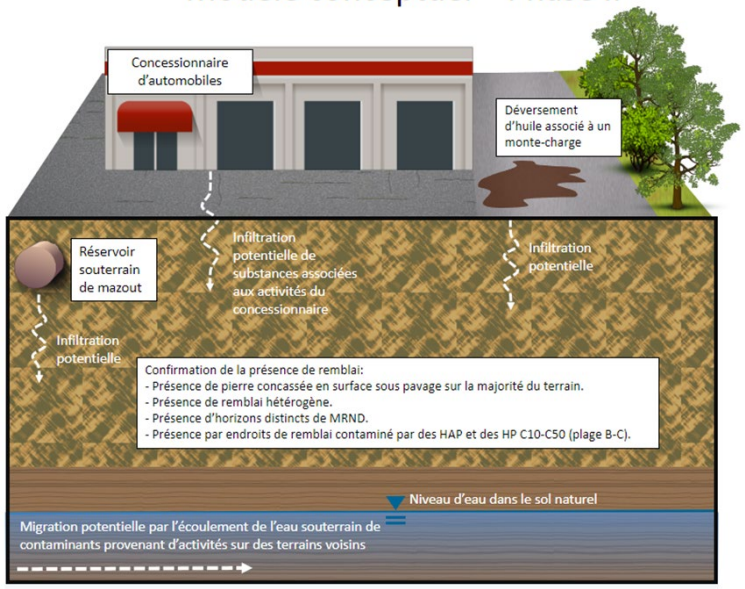
- Toutes les études de caractérisation doivent inclure un **modèle conceptuel** :
  - Il décrit et représente les **liens** entre les **sources de contamination**, les **mécanismes de transport**, les **matrices affectées** et les **récepteurs potentiels**
  - Il doit être **évolutif**. Mis en place dès la phase I et mis à jour en phase II/III
  - Il permet d'orienter les travaux de caractérisation phase II
- Le **modèle conceptuel** doit contenir :
  - Une illustration
  - Un tableau
  - Une description qualitative

Modèle conceptuel – Phase I



Note : Cette figure du modèle conceptuel est une représentation schématique présentée uniquement à titre indicatif

Modèle conceptuel – Phase II



Note : Cette figure du modèle conceptuel est une représentation schématique présentée uniquement à titre indicatif

Constat nº 2

Densité d'échantillonnage

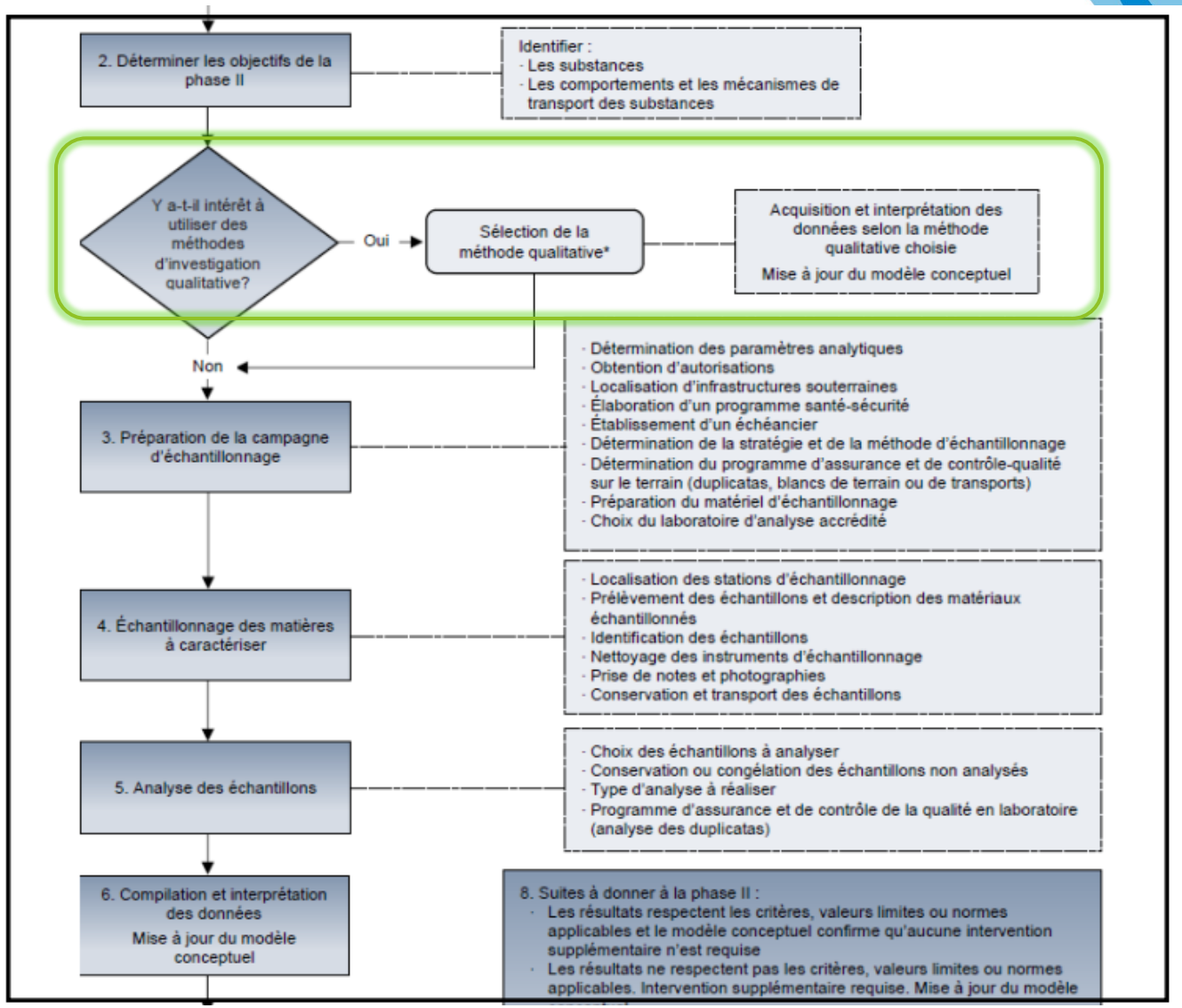
- Au moins une station d'échantillonnage par zone à risque (positionnée en aval hydraulique lorsque les conditions hydrogéologiques sont connues).
- NOUVEAU : pour les zones à risque > 625 m^2, il est requis de diviser la zone à risque en diverses zones d'une superficie maximale de 625 m^2 qui doit être subdivisée minimalement en **3 stations d'échantillonnage.**
- NOUVEAU : augmentation de la densité dans les cas où la zone à risque est constituée d'un **remblai hétérogène.**
- NOUVEAU : aucun sondage n'est nécessaire dans un secteur non à risque. Le degré de risque peut être variable, mais dès qu'il y a **un doute, la zone devrait être considérée comme une zone à risque.**
- L'approche d'échantillonnage ciblée est obligatoire dans toutes les zones à risque (le plus près possible de la source). L'échantillonnage aléatoire peut être utilisé pour compléter l'échantillonnage ciblé.

Superficie de la zone à risque (m^2)	Nb minimal de stations d'échantillonnage	Nb minimal de stations dans le cas d'un remblai hétérogène
<100	1	>1*
100 à 300	2	>2*
301 à 625	3	>3*

* indice d'hétérogénéité de contamination ou de composition : couleur, odeur, stratigraphie, matière résiduelle, etc.

Tiré du *Guide de caractérisation des terrains*, 2024, MELCCFP

Constat nº 3



Tiré du *Guide de caractérisation des terrains*, 2024, MELCCFP

Plan de la présentation

- Introduction
- Constats
- **Enjeux**
- Pistes de solutions
- Description de méthodes et exemples types
- Conclusion

Enjeux

1. Enjeux de coûts
2. Augmentation des délais d'exécution et d'atteinte des objectifs pour différents projets
3. Pression auprès des laboratoires
4. Responsabilité professionnelle
5. Représentativité spatiale
6. Formation des professionnels

Plan de la présentation

- Introduction
- Constats
- Enjeux
- **Pistes de solutions**
- Description de méthodes et exemples types
- Conclusion

Pistes de solutions

- Complémenter les méthodes traditionnelles à partir de méthodes complémentaires :
  - **Appareils de mesure in situ**
  - **Géophysiques (en forage ou de surface)**
  - Télédétection et échantillonnage à distance

- Complémenter l'analyse et l'interprétation des données
  - **Géostatistiques**
  - Modélisation
  - Application de l'intelligence artificielle

Plan de la présentation

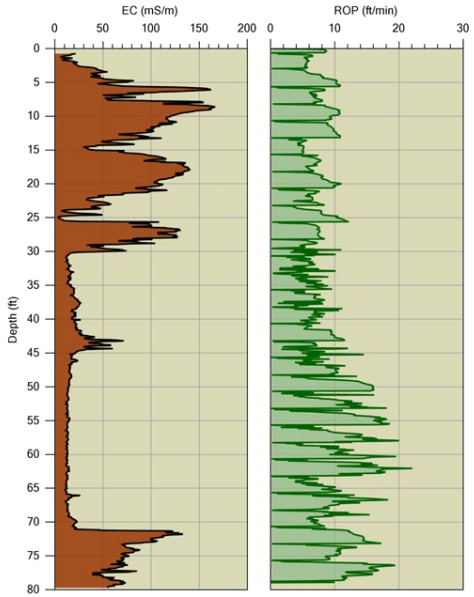
- Introduction
- Constats
- Enjeux
- Pistes de solutions
- **Description de méthodes et exemples types**
- Conclusion

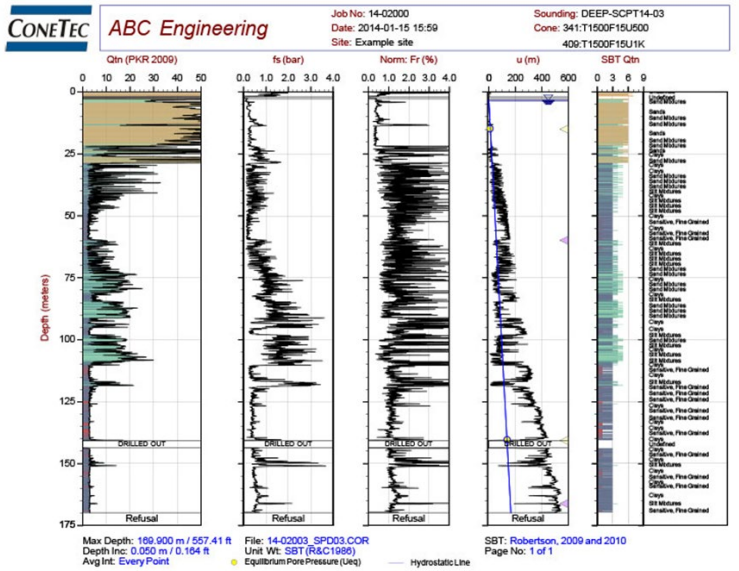
Mesures sur site avec appareils – les plus connues

- PID (détection par photoionisation)
  - *COV totaux (ppm)*
- XRF
  - *Métaux (ppm)*
- Détecteur à ionisation de flamme (FID – *Flame-Ionization Detector*)
  - *COV totaux (ppb)*
- Chromatographe mobile en phase gazeuse (GC-Mobile)
  - *COV (ppb)*

Mesures in situ – Technique de poussée directe ou piézocône (CPT)

- Sonde à interface membranaire (MIP – *Membrane Interface Probe*)
  - *COV*
- Pression hydrostatique (HPT – *Hydraulic Profiling Tool*)
  - *Stratigraphie, propriétés hydrauliques*
- Profil d'image optique (OIP – *Optical Image profiler*)
  - *Liquides immiscibles, HAP et conductivité électrique*
- Sonde de fluorescence induite par laser (LIF – *Laser Induced Fluorescence*)
  - *Phases libres, BTEX et HAP*



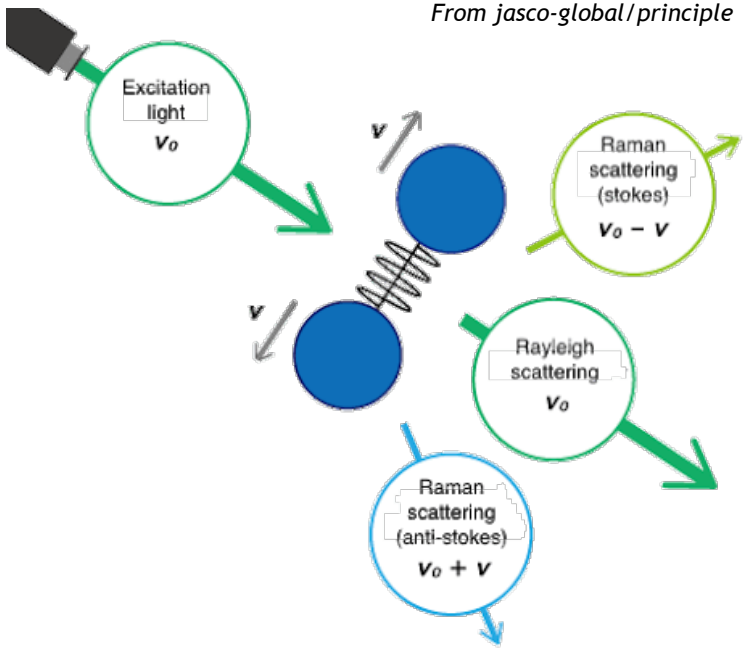


Mesures sur site avec appareils – apport de la spectroscopie sur phase solide

- Physique associée aux vibrations moléculaires
- L'étude de la dispersion de l'énergie peut être associée aux propriétés des sols
- Miniaturisation des outils appliqués dans les laboratoires d'analyses chimiques et ouvre le champ des possibles pour la caractérisation haute résolution

  (analyses rapides, sans produits chimiques)

From jasco-global/principle



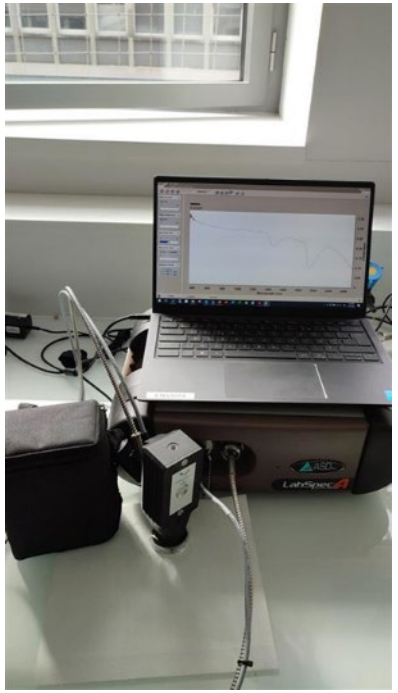
Mesure in situ – LUCIOL (*Laser Induced Fluorescence*)

- Outil de quantification pour les familles des **HAP (légers/moyens/lourds) et les BTEX**
- Prototype LUCIOL développé par le laboratoire commun SpecSolE (ENVISOL-EDYTEM)
- Modèle de calibration spécifique à chaque site par des approches d'intelligence artificielle à développer à partir d'échantillons réels du site

luciol

Mesure in situ – MALVERN (proche infrarouge – VisNIR)

- Outil de quantification pour les familles des ***HAP*** **(légers/moyens/lourds) et les** ***Hydrocarbures aliphatiques***
- Études possibles pour déterminer *la lithologie du sol (granulométrie, humidité, minéralogie) et les polluants métalliques*
- Modèle de calibration site spécifique par des approches d'intelligence artificielle à développer à partir d'échantillons réels du site

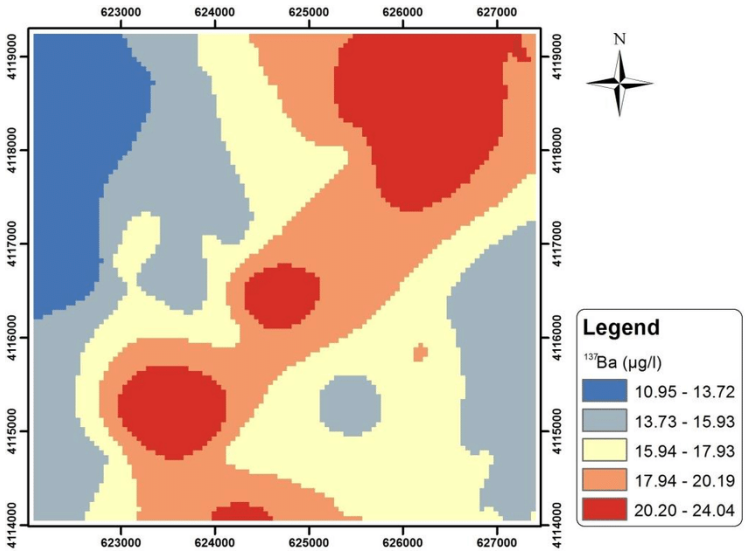


Mesure in situ – REMSCAN (Moyen Infrarouge – NIR)

- Outil commercial de quantification pour **les *HP (C_{10}-C_{50})***
- Études possibles pour déterminer *la minéralogie, d'autres contaminants organiques (HAP) et métalliques*
- Modèle de calibration « standard » par lithologie (1 modèle pour 1 lithologie). Précision équivalente d'un laboratoire

Géostatistiques

- Quantification des dépendances pour les résultats de concentrations
- Interpolation et évaluation des dépendances spatiales
- Modèle de quantification de contaminants
- Applications et programmes
- Couplage avec des méthodes in situ
- Algorithme et intelligence artificielle



Géostatistiques pour les sols contaminés

- Une technologie éprouvée depuis des années qui repose sur **l'existence d'une continuité spatiale de la contamination**

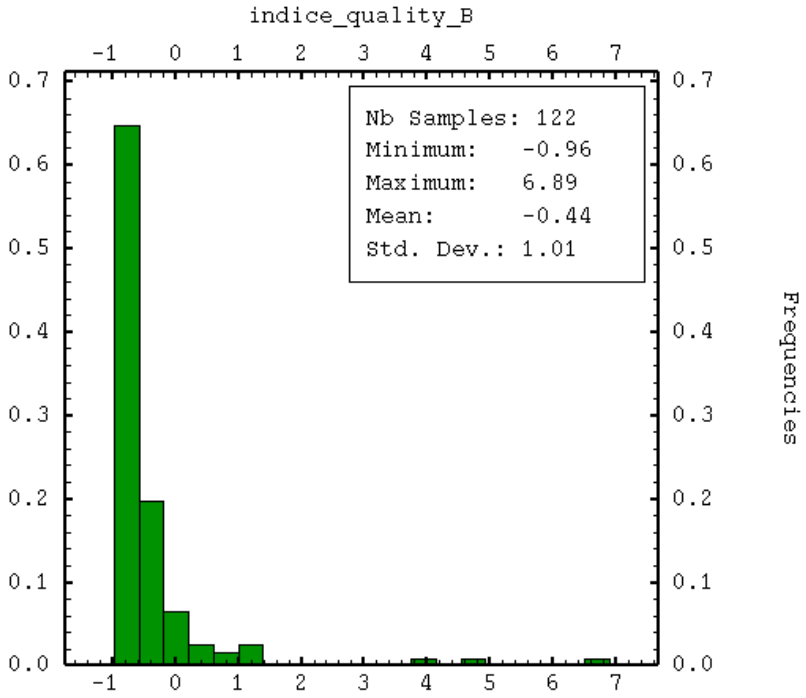
- Plusieurs cas appliqués : Montréal, Lac-Mégantic, Société ANGUS, etc. Projets collaboratifs et ENGAGE réalisés avec les universités (Polytechnique de Montréal, ÉTS, INRS)

- Les modélisations géostatistiques permettent de **mieux dimensionner financièrement les opérations de décontamination** en anticipant les survolumes ou les sous-volumes par rapport aux méthodes classiques (polygones)

Exemple 1 – Société Angus (2020)

- SOCIÉTÉ ANGUS - 2020
  - **Adresser la problématique des remblais hétérogènes**
  - **Travailler sur chaque classe de sols : BC, C-RESC**

- **Approche « floue » avec un indice qualité retenue**
  - Indice qualité des sols basé sur une équation linéaire :



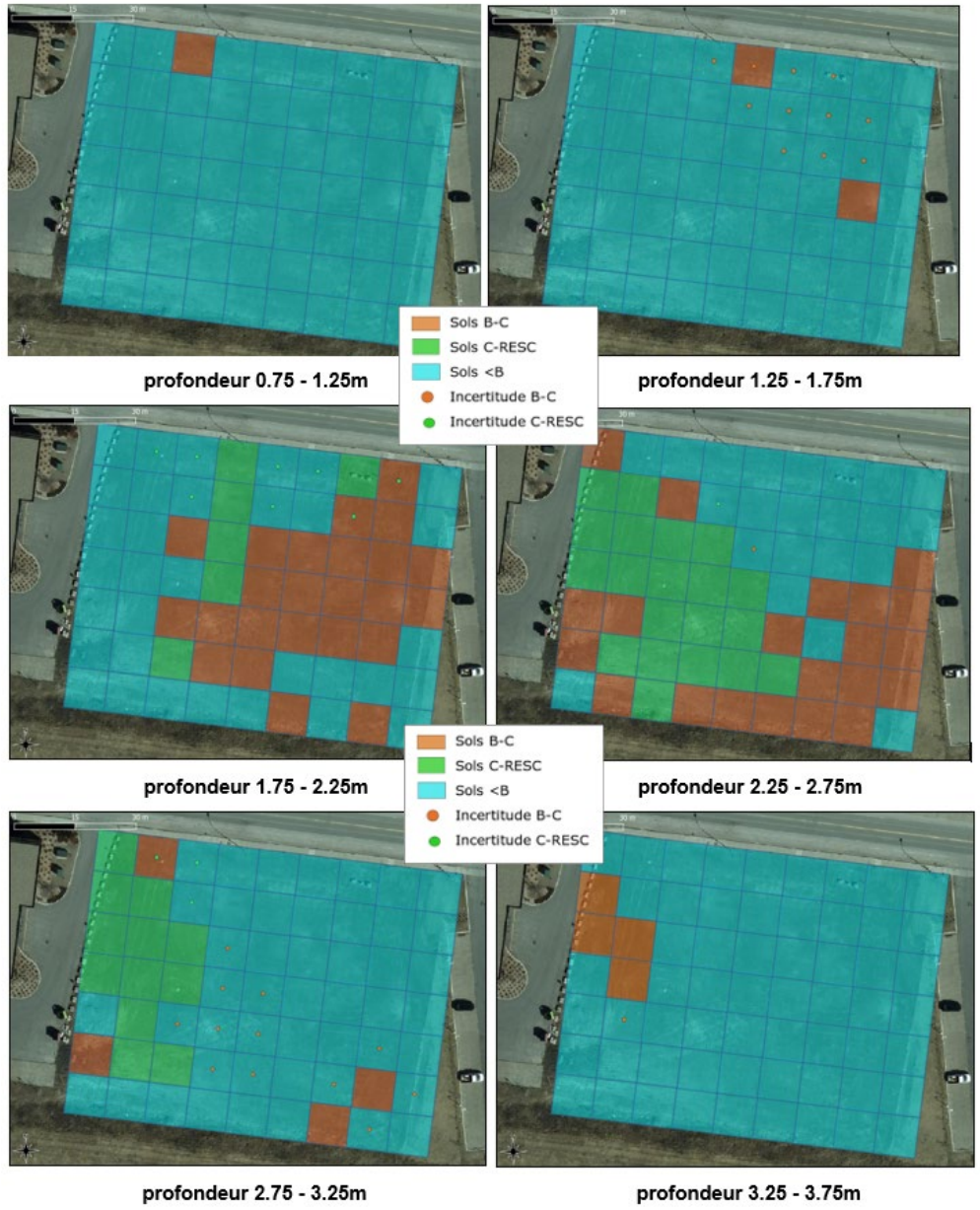
$$Indic_B = \sum_{liste\ des\ composés} \frac{concentration_{\ composé\ sélectionné} - Seuil\ B}{Seuil\ B}$$

Exemple 1 – Société Angus (suite)

- SOCIÉTÉ ANGUS - 2020
  - **L'indice qualité permet une vue « globale »**
  - **Permet une meilleure caractérisation de la continuité spatiale des remblais hétérogènes et l'utilisation de modélisations gaussiennes**
  - **Rapide, mais perte d'informations liées aux contaminants responsables des dépassements**
  - **Efficace pour un dimensionnement de l'incertitude**

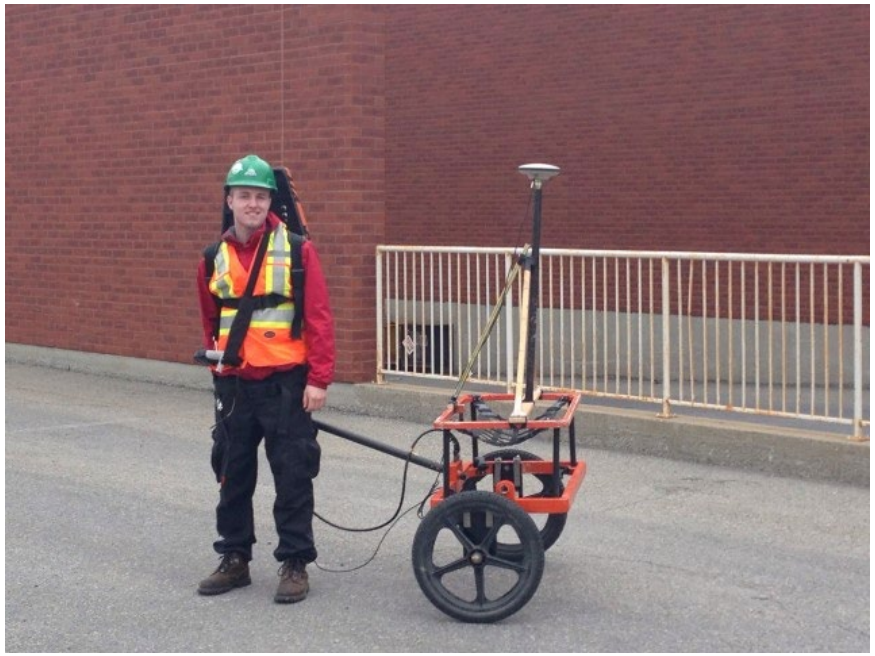
Le volume B-C modélisé est estimé à 2 700 m³ + incertitudes de 1 200 m³

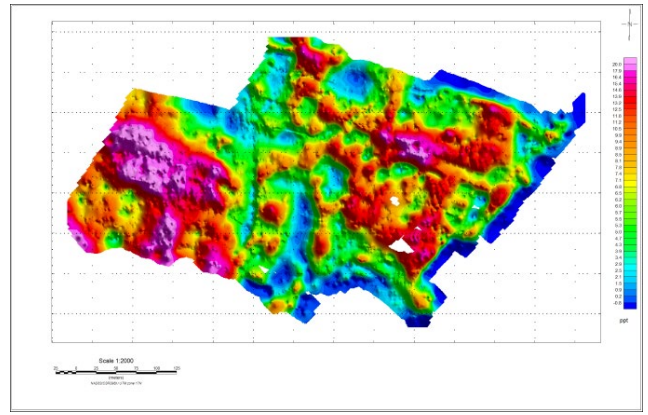
Le volume C-RESC modélisé est estimé à 1 900 m³ + incertitude de 600 m³



Géophysique – géoradar et électromagnétique

- Levés électromagnétiques (EM)
  - *Utilisés souvent comme reconnaissance primaire pour orienter des secteurs d'intervention (roc, zone de remblai, etc.)*
  - Contraste de conductivité électrique entre les matériaux
- Géoradar (EM haute fréquence)
  - *Stratigraphie, profondeur du roc, discontinuités (réservoirs enfouis, débris, etc.)*
  - Propagation des ondes électromagnétiques





Géophysique – sismique et électrique

- Sismique
  - *Stratigraphie, géologie et qualité du roc*
  - Onde P et S
  - Réflexion et réfraction
  - MASW
- Résistivité électrique
  - *Panaches et qualité d'eau souterraine*
  - Résistance des matériaux

Exemple 2 – Caractérisation haute résolution, géophysique et géostatistique

- Type d'activité : imprégnation aux créosotes de travers de bois
- Type de contamination : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
- Période de contamination : à partir de 1952

Zone d'études

Chantier du haut

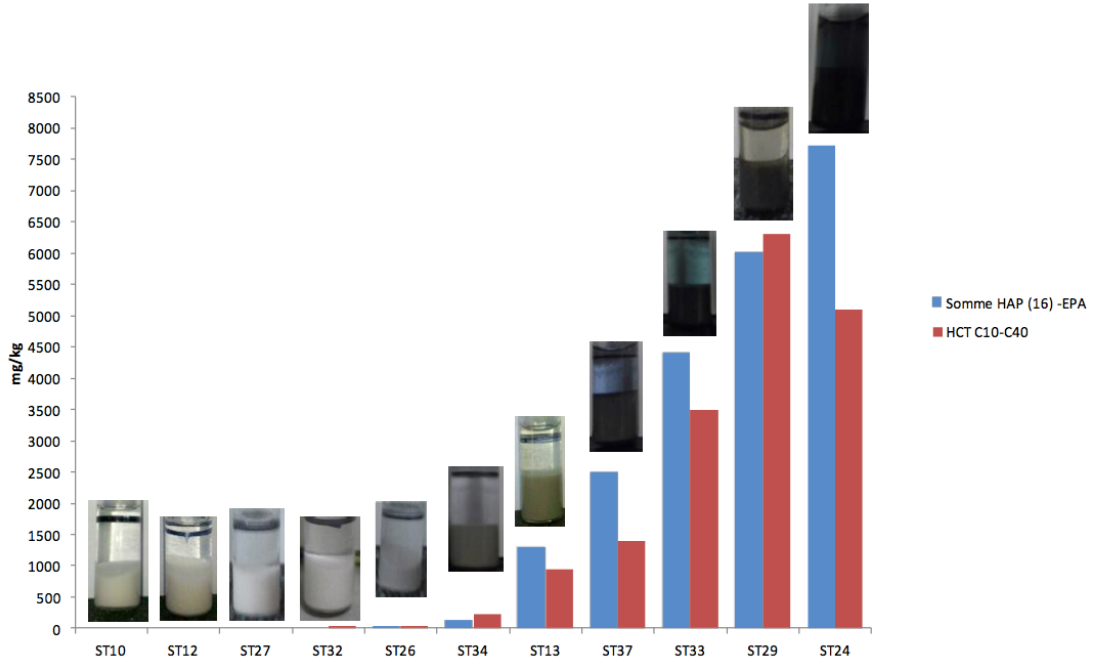
Emprise du site

Tirés de Fabien-Ouellet et al., (2015)
Collaboration avec l'université de Pau et Envisol

Exemple 2 – Mesures directes

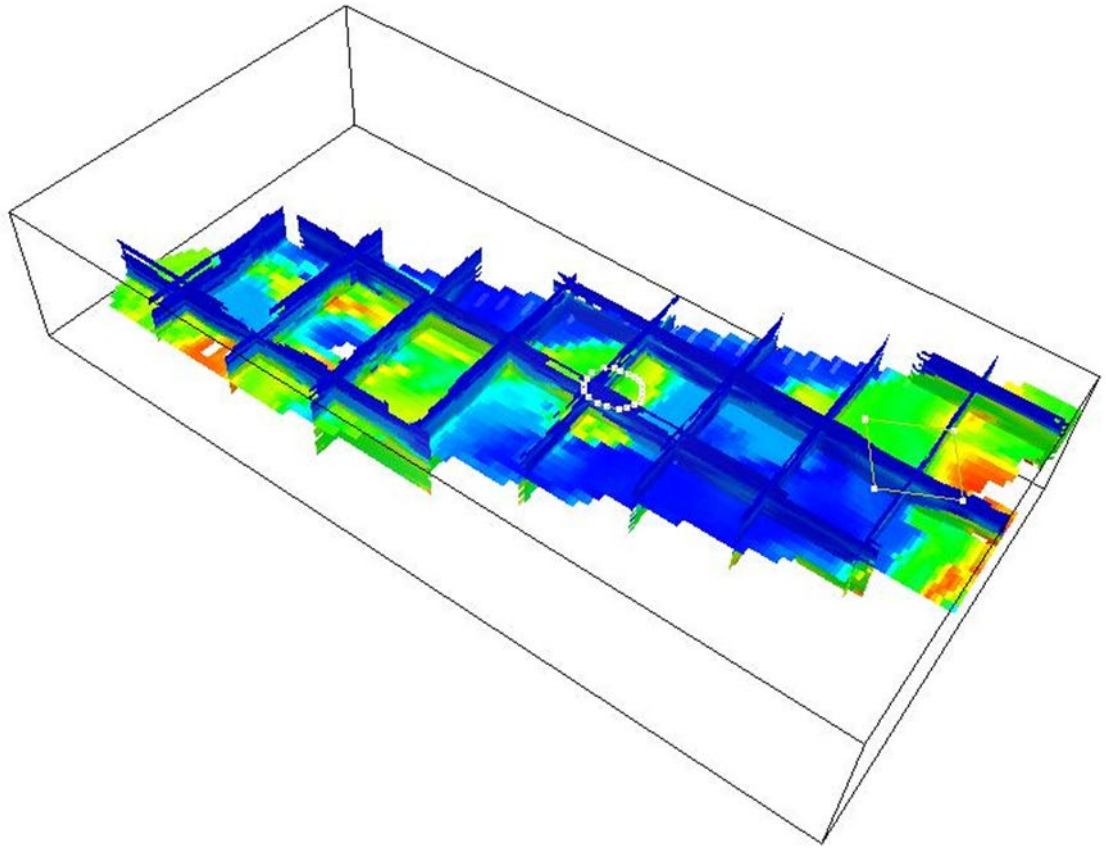
Échantillonnage et mesures en laboratoire

- 75 mesures en laboratoire
- 286 mesures de PID dans la zone du chantier du haut
- 57 mesures avec le kit colorimétrique FTK



Mesures colorimétriques FTK

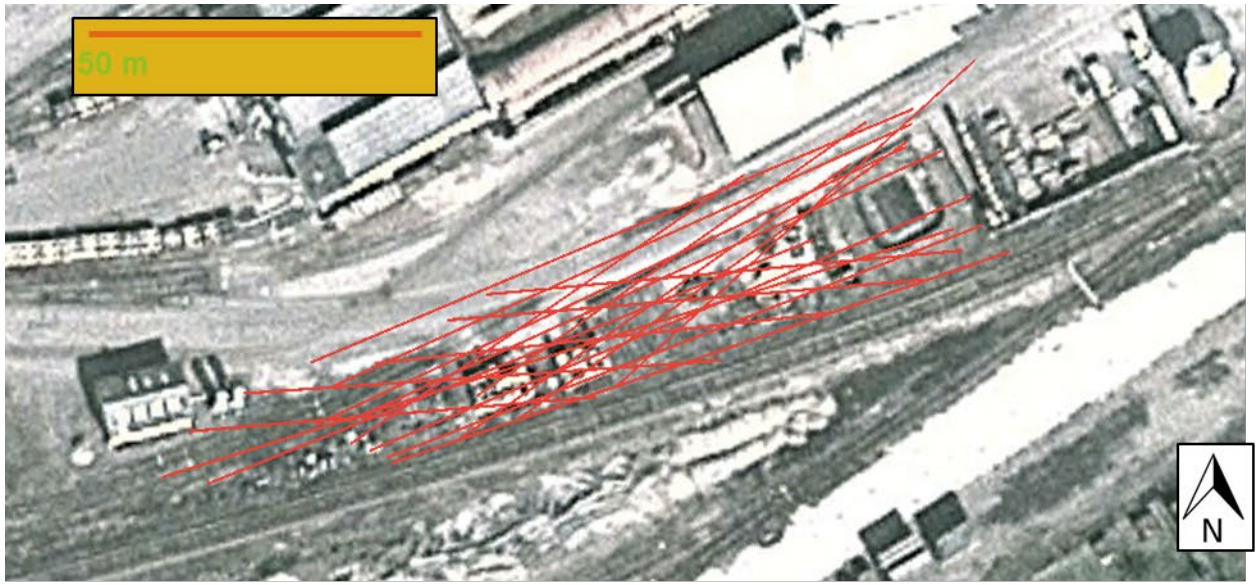
Exemple 2 – Krigeage des analyses des mesures in situ

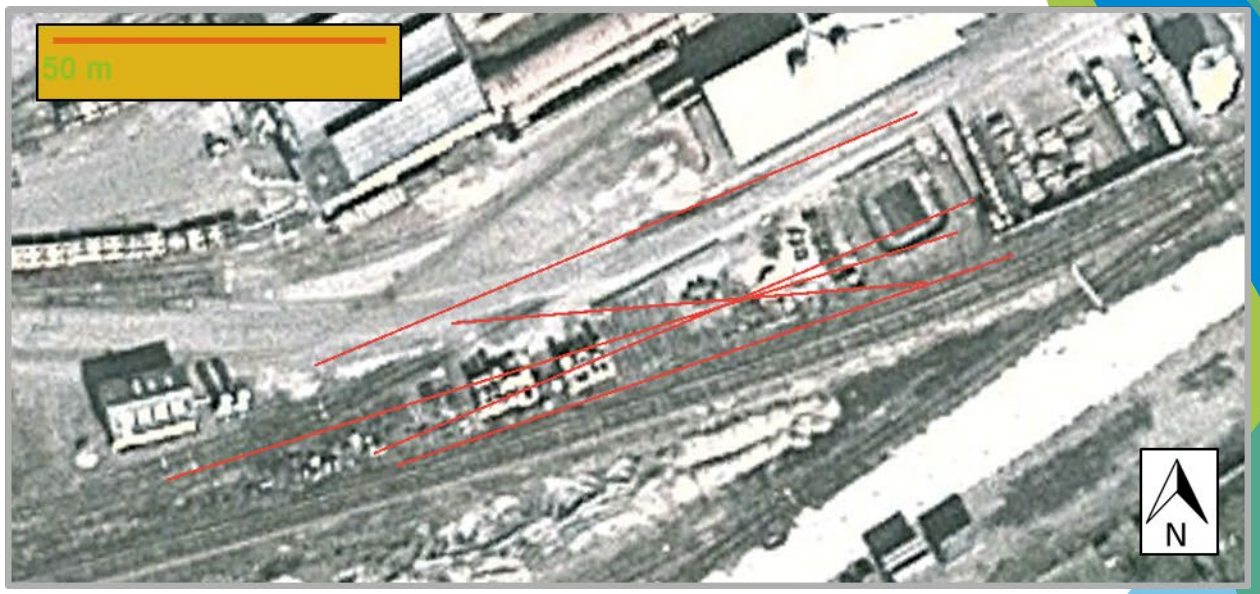


Exemple 2

- 19 lignes de résistivité électrique
- 48 dipôles par ligne
- Espacement aux 1,5 et 2 m
- Profondeur d'investigation entre 14 et 17 m

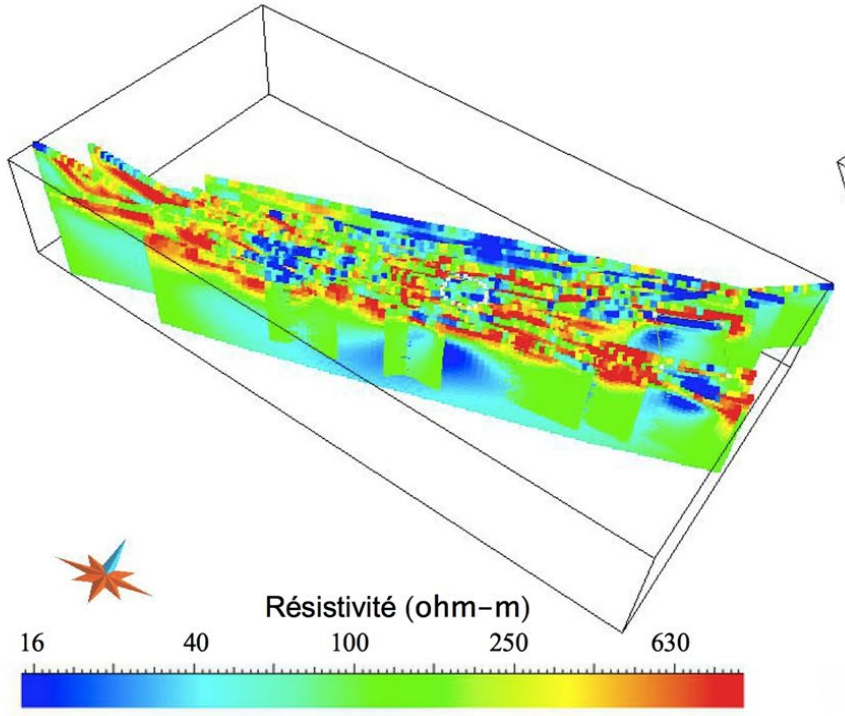
- 5 lignes de tomographie de sismique réfraction
- Espacement des géophones aux 2 m
- Espacement des sources aux 6 m
- Source : marteau

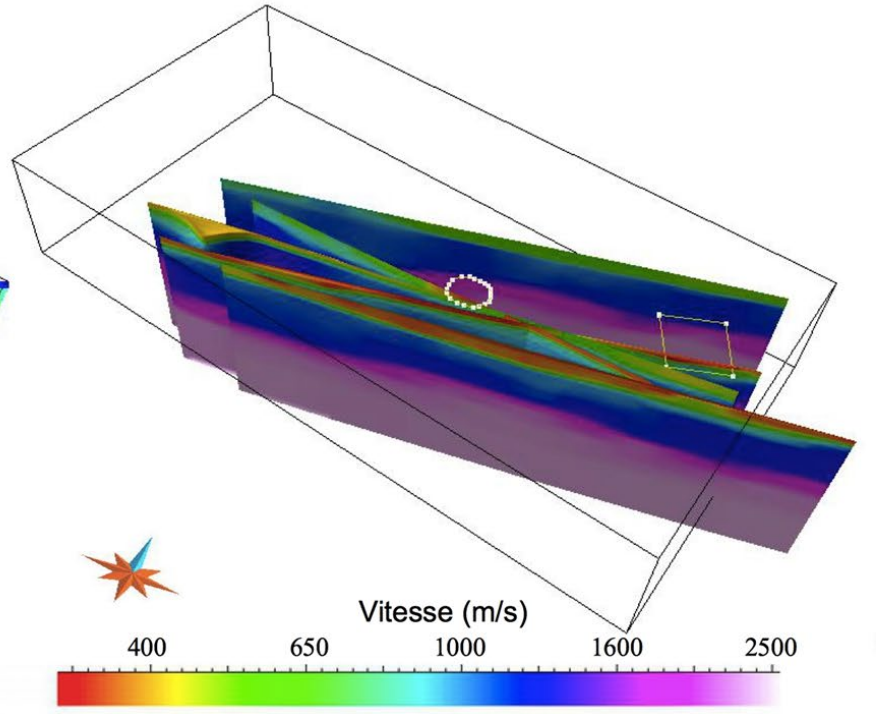




Exemple 2 – Résultats inversion ERT et sismique

Les 19 lignes de résistivité et les 5 lignes sismiques peuvent être interpolées pour construire un modèle 3D des propriétés physiques

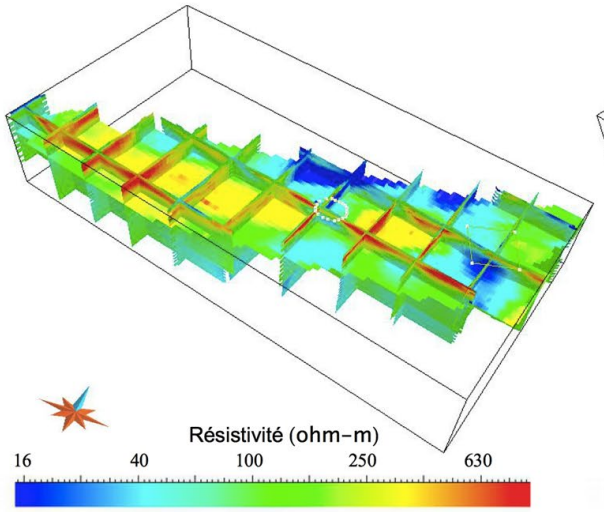


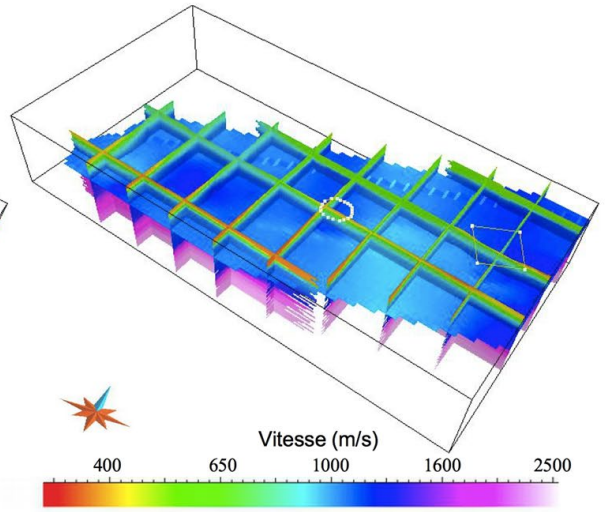


Exemple 2

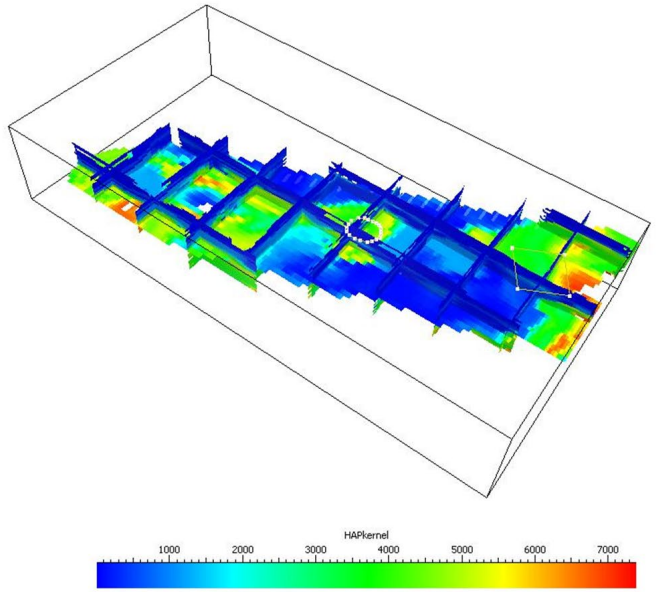
Interpolation des lignes en 3D

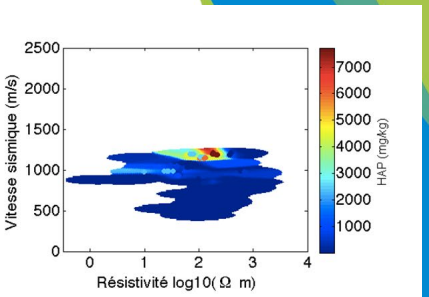
- 19 lignes de résistivité et les 5 lignes de sismiques peuvent être interpolées pour construire un modèle 3D des propriétés physiques





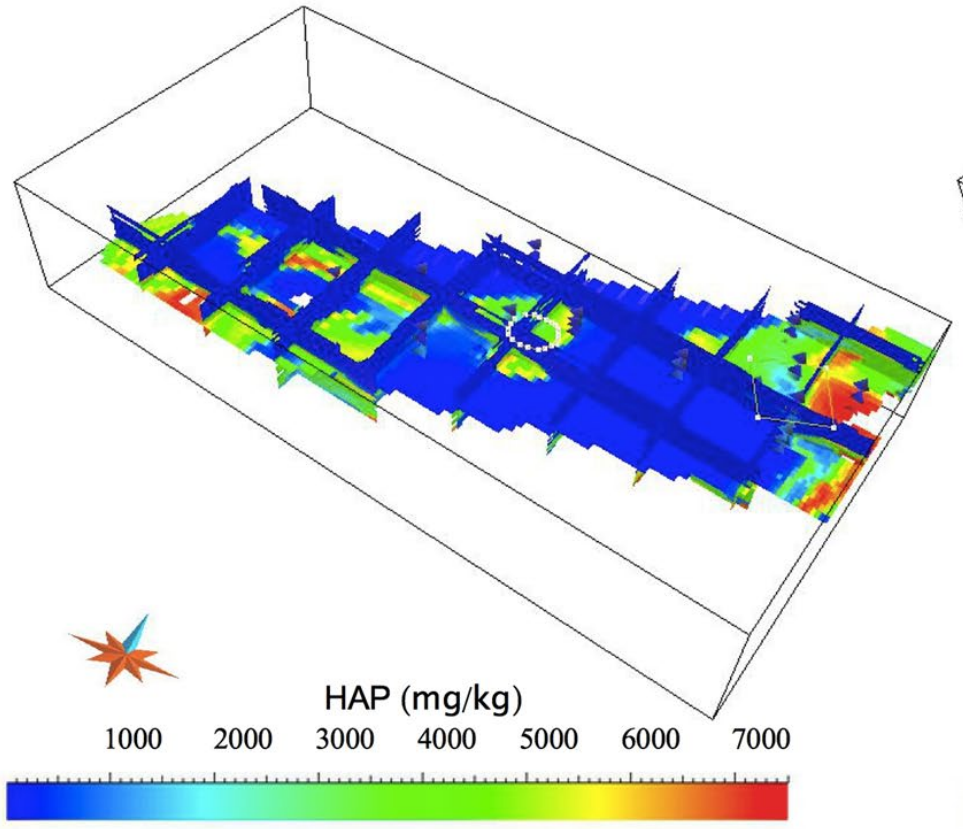
Variable secondaire intégrant ERT et sismique



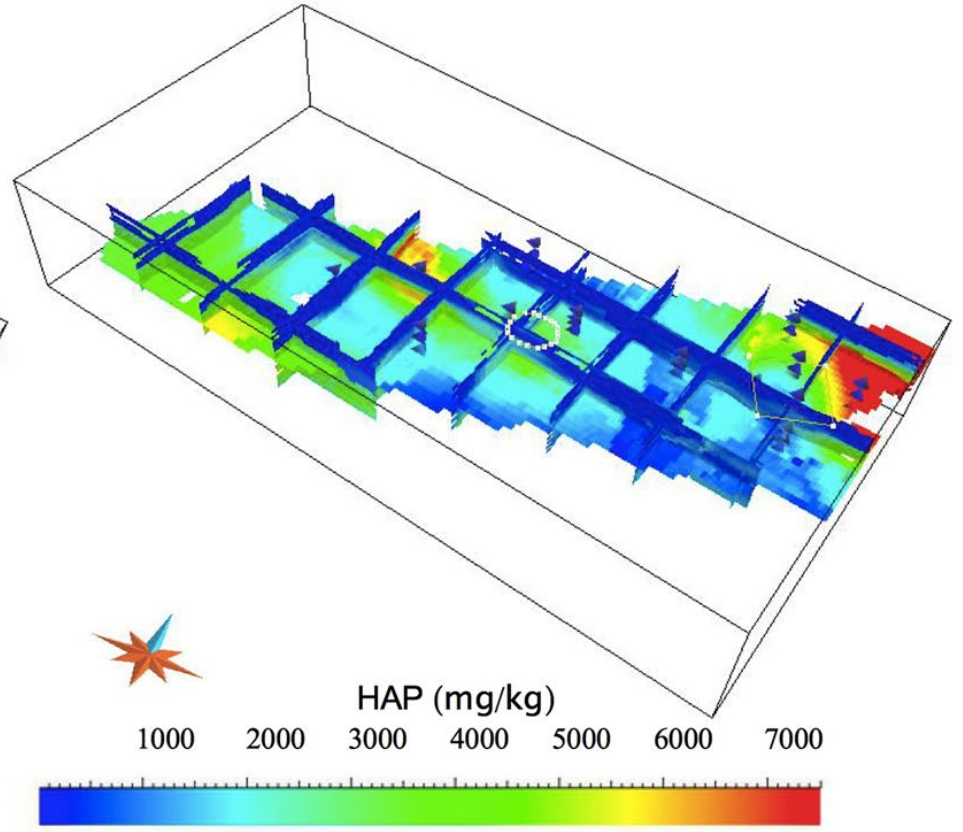


Exemple 2 – Krigeage

Co-krigeage avec géophysique



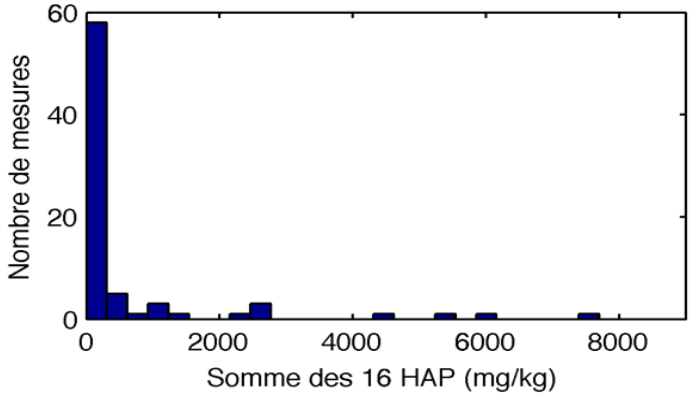
Krigeage ordinaire



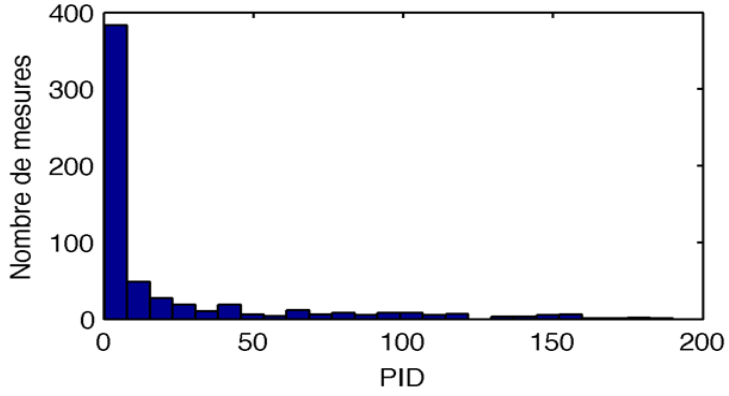
Exemple 2 – Histogrammes

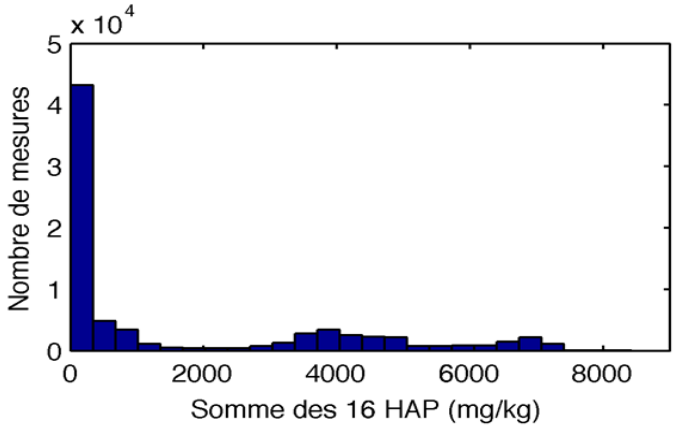
Le volume de sol dont la contamination est supérieure à 70 mg/kg est 36 % inférieur lorsque la géophysique est intégrée au krigeage, car elle respecte la distribution.

Données mesurées en HAP

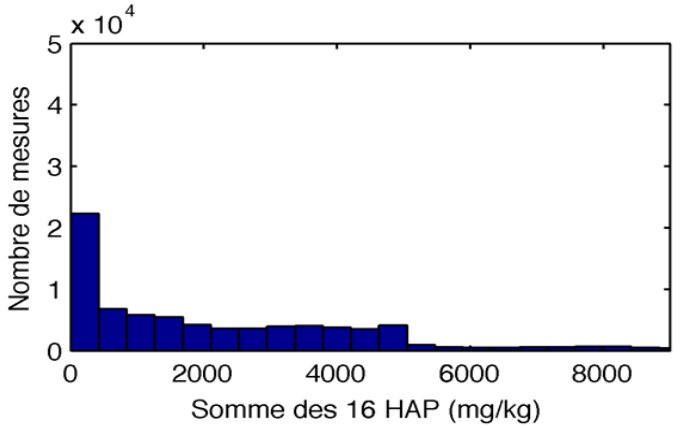


Données mesurées au PID





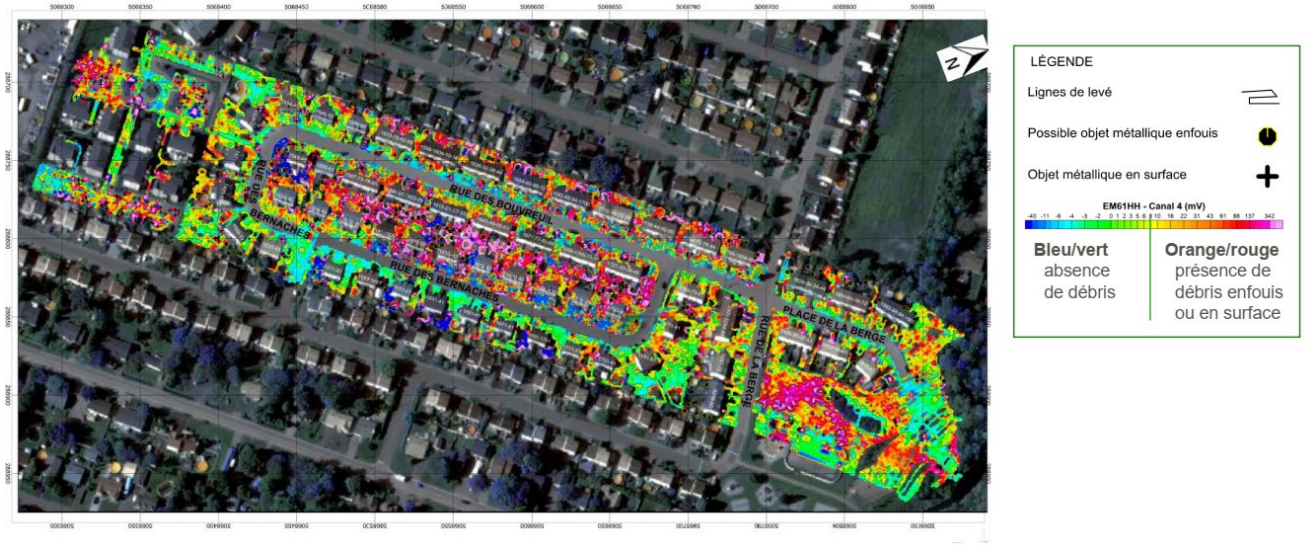
Données co-krigées



Données krigées

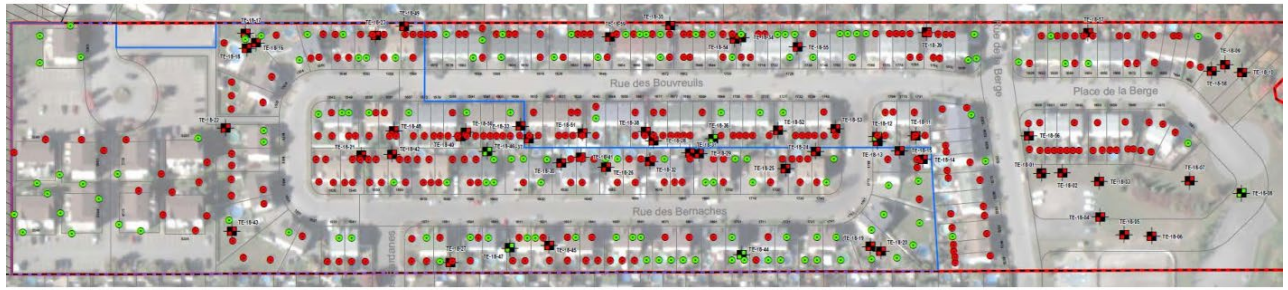
Exemple 3 – Gestion des débris au site de l'ancien terrain Brady

- Travaux de caractérisation conventionnelle combinée à des méthodes géophysiques
- 136 propriétés
- Site d'environ 75 000 m^2



Exemple 3 – Gestion des débris au site de l'ancien terrain Brady (suite)

- Sondages manuels des sols de surfaces
  - Objectif de vérifier la présence de matières résiduelles
  - Sondages manuels des sols de surfaces pour confirmer la présence de débris
- Caractérisation des sols et des eaux souterraines par Golder en 2017-2018
  - Levé géoradar en automne 2017
  - Levé électromagnétique en 2017-2018
  - 59 tranchées d'exploration pour effectuer des analyses chimiques
  - **Réduction considérable du nombre de sondages pour l'analyse**



SONDAGE MANUEL SANS PRÉSENCE DE DÉBRIS
SONDAGE MANUEL AVEC PRÉSENCE DE DÉBRIS
TRANCHÉE D'EXPLORATION SANS PRÉSENCE DE DÉBRIS
TRANCHÉE D'EXPLORATION AVEC PRÉSENCE DE DÉBRIS

RÉSULTATS

- Présence de débris

0 % DE DÉBRIS
<5 % DE DÉBRIS
DE 5 % À 20 % DE DÉBRIS
DE 20 % À 50 % DE DÉBRIS
>50 % DE DÉBRIS

Plan de la présentation

- Introduction
- Constats
- Enjeux
- Pistes de solutions
- Description de méthodes et exemples types
- **Conclusion**

Conclusion

- Constats:
  - Guide de caractérisation 2003 vs 2024
    - Modèle conceptuel
    - Densité d'échantillonnage
    - Mesures complémentaires/qualitatives/innovantes moins appliquées
- Enjeux
  - $$, délais, pression, représentativité, responsabilité
- Pistes solutions
  - Complémenter les méthodes traditionnelles d'investigations, l'analyse et l'interprétation des résultats
  - Diverses méthodes réduisant le degré d'incertitude quant à la présence d'un ou plusieurs contaminants, à la profondeur de contamination ou à la présence de matières résiduelles.
  - L'apport des méthodes complémentaires permettent de préciser le modèle conceptuel
- Mises en contexte et applications dans l'atelier de l'après-midi!

Merci!