



La géophysique: un outil pour mieux caractériser et suivre les sites contaminés

Dr. David Caterina

Formation Fedexsol / Assainissement

20 septembre 2018

Plan de la présentation

Introduction à la
géophysique

Géophysique sur
sites contaminés

Applications

Message à retenir

Compréhension
du contexte
(hydro)géologique

Contaminations
solvants chlorés

Contaminations
hydrocarbures

Plan de la présentation

Introduction à la
géophysique

Géophysique sur
sites contaminés

Applications

Message à retenir

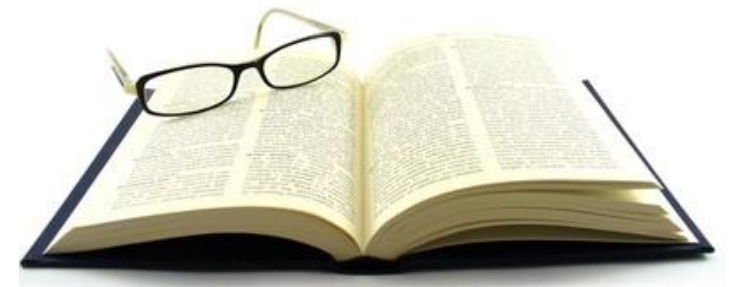
Compréhension
du contexte
(hydro)géologique

Contaminations
solvants chlorés

Contaminations
hydrocarbures

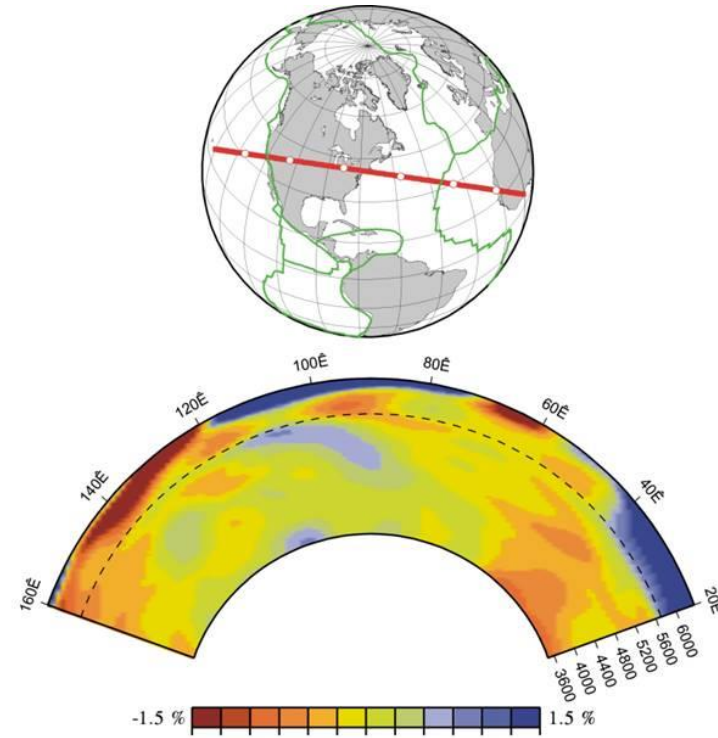
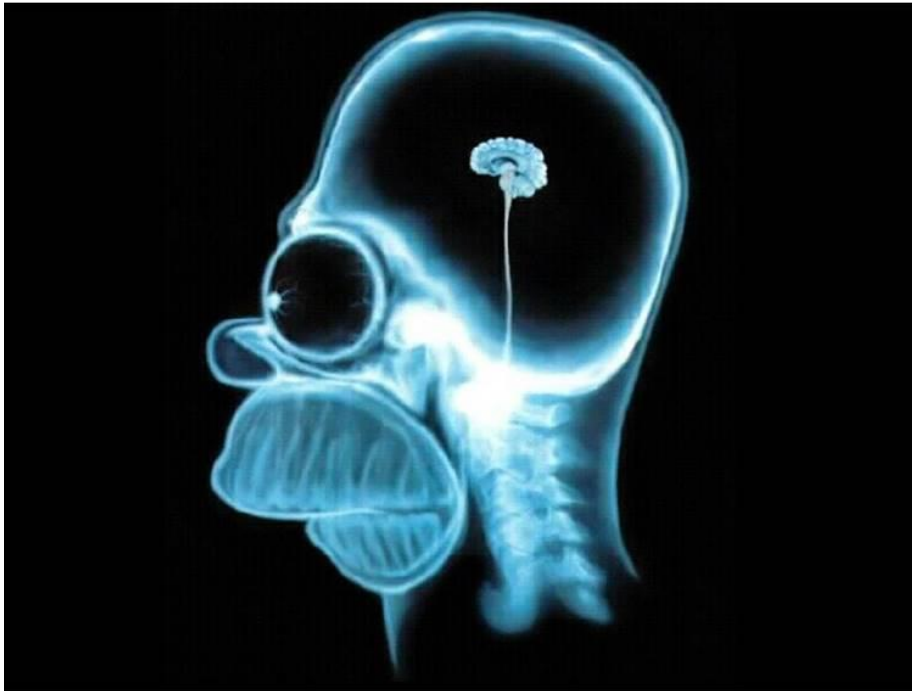
Introduction à la géophysique: définition

- “La **caractérisation** de la géologie, de la structure géologique, des eaux souterraines, de la contamination et des artefacts humains sous la surface de la Terre, basée sur la **cartographie latérale et verticale** des variations des **propriétés physiques** mesurées de **manière non-invasive**” (EEGS 2018)



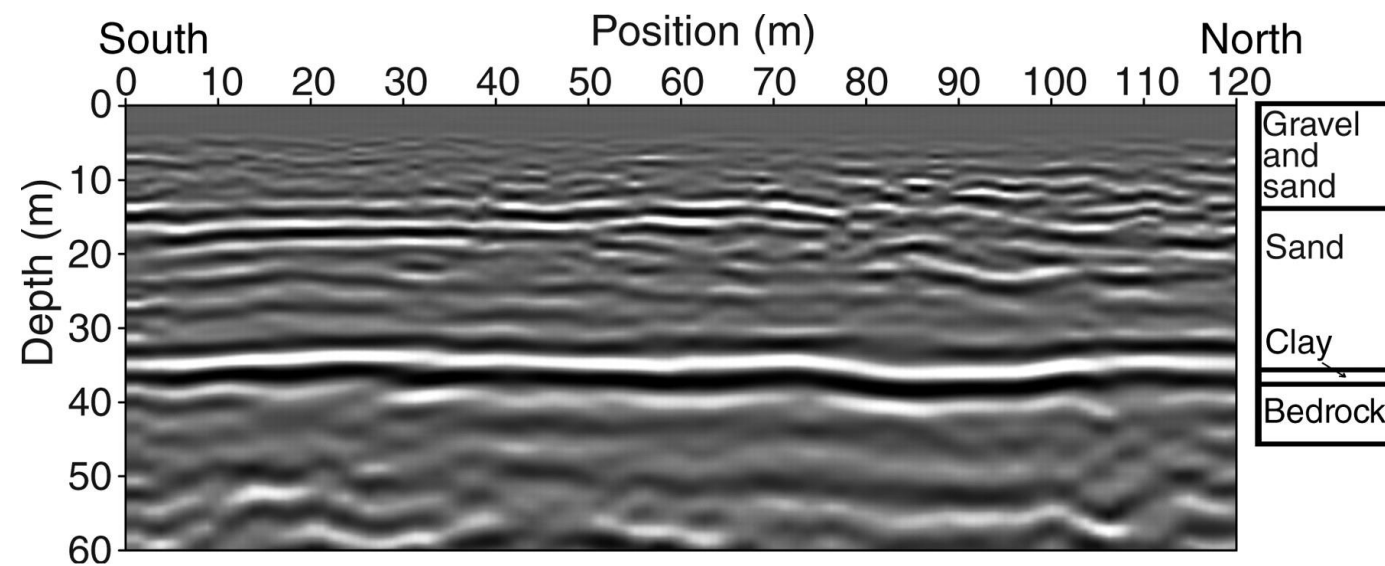
© Marko Plevnjak

Tomographie... et tomographie



Van Heijst, Ritsema, and Woodhouse [1999]

Echographie et échographie



Introduction à la géophysique: Objectifs

Cartographie des variations spatiales:

- Lithologie/type de déchets/densité
- Contenu en eau
- Fluide poral ou matières dissoutes totales
- Propriétés mécaniques

Suivi des changements:

- Masse de contaminant
- Injection d'amendement/traceur
- Compaction/densité/porosité

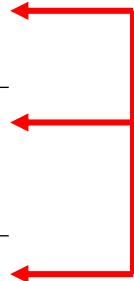
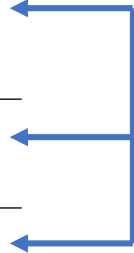
Traduire les variations géophysiques en propriétés d'intérêt

Différentes méthodes...



Différentes cibles

Method
Seismics (refraction, surface waves, reflection, ambient noise)
DC electrical resistivity
Induced polarization (IP)
Spontaneous potential (SP)
Ground Penetrating Radar (GPR)
Electromagnetic (EM)
Magnetic
Gravimetry
Borehole logging (caliper, gamma, sonic, flowmeter, TV)



Une combinaison de différentes méthodes permet une meilleure caractérisation

Avantages et inconvénients

- Pas ou peu invasive
- Relativement faibles couts
- Large couverture spatiale
- Permet de voir à travers
- Information indirecte
- Résolution diminue avec la profondeur
- Sujette à des erreurs de modélisation

Plus puissante lorsqu'utilisée avec d'autres données



Plan de la présentation

Introduction à la
géophysique

Géophysique sur
sites contaminés

Applications

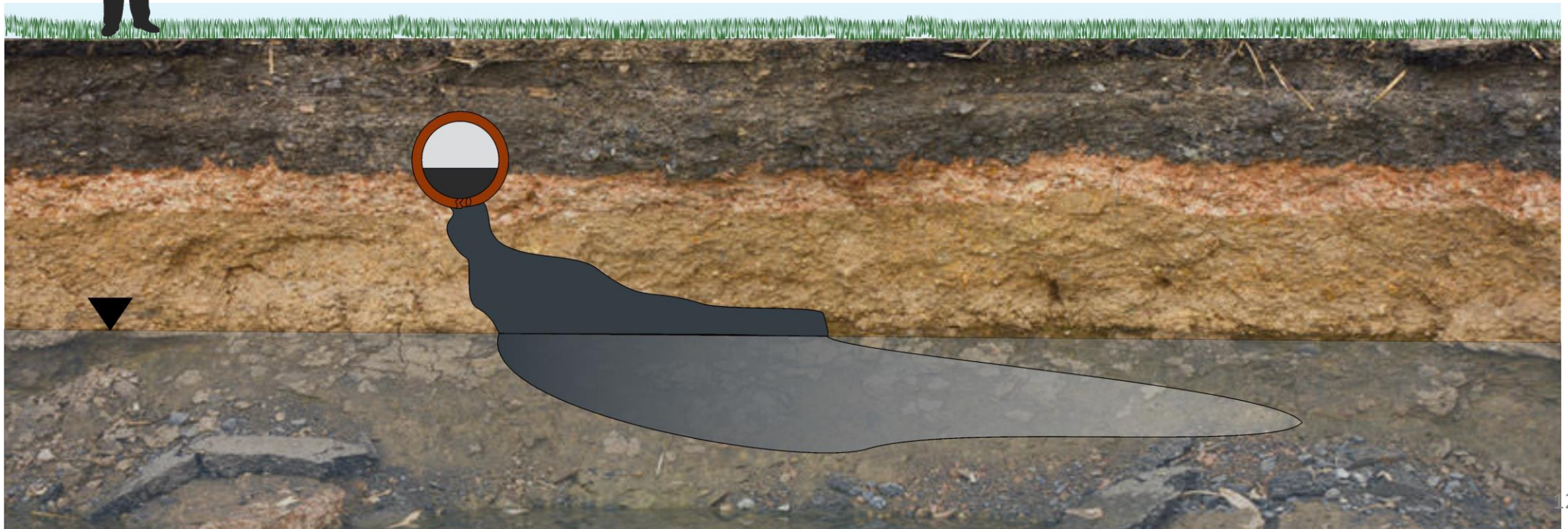
Message à retenir

Compréhension
du contexte
(hydro)géologique

Contaminations
solvants chlorés

Contaminations
hydrocarbures

Géophysique sur sites contaminés?



Approche classique



Fournit des informations précises

MAIS

Une bonne caractérisation spatiale peut s'avérer couteuse et créer des nouveaux chemins d'écoulement pour le polluant

Analogie médicale



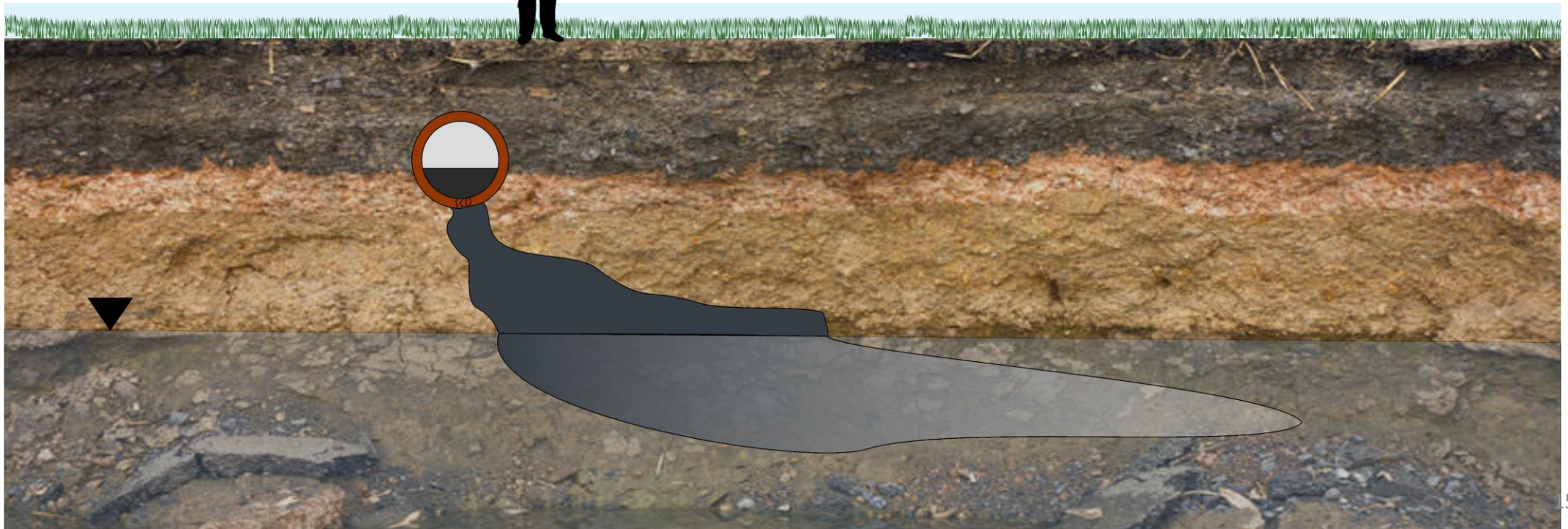
DOC SAID HE COULD GIVE YOU A CAT SCAN
BUT HE WANTS TO TRY IT THIS WAY FIRST!

Si géophysique...

???



- Quels sont les objectifs?
- Quelle(s) méthode(s)?
- Dimensionnement, accessibilité du terrain, logistique?

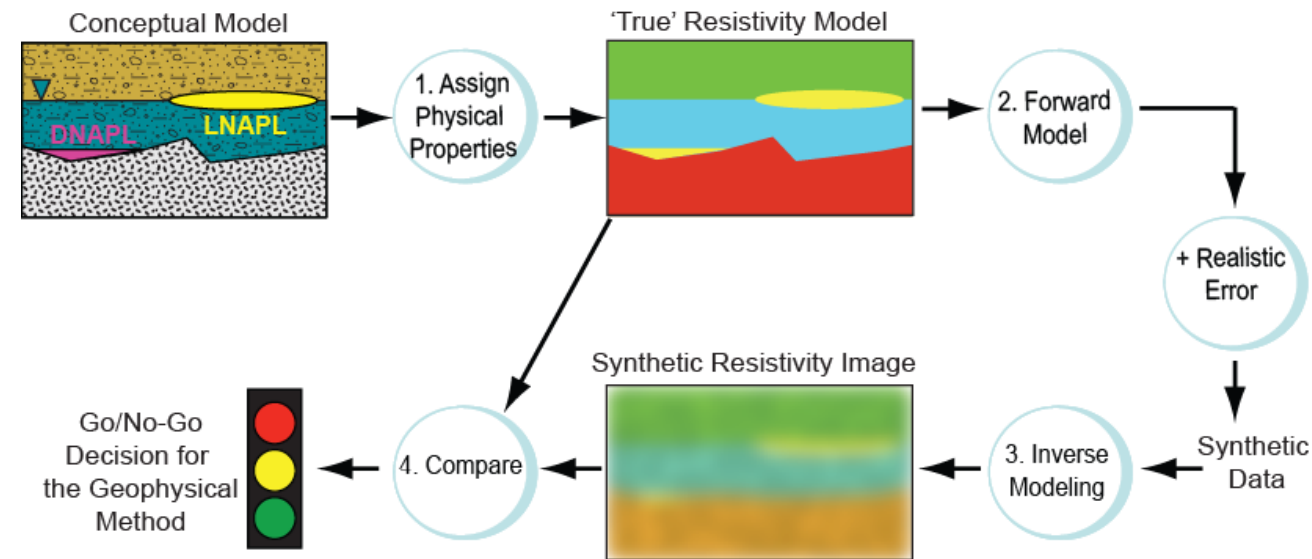


Etape nécessaire: conception préliminaire, faisabilité et évaluation

Basées sur:

- Relation géophysique-géologie supposée
- Arrangement géologique/contaminant
- Source de bruit sur le site

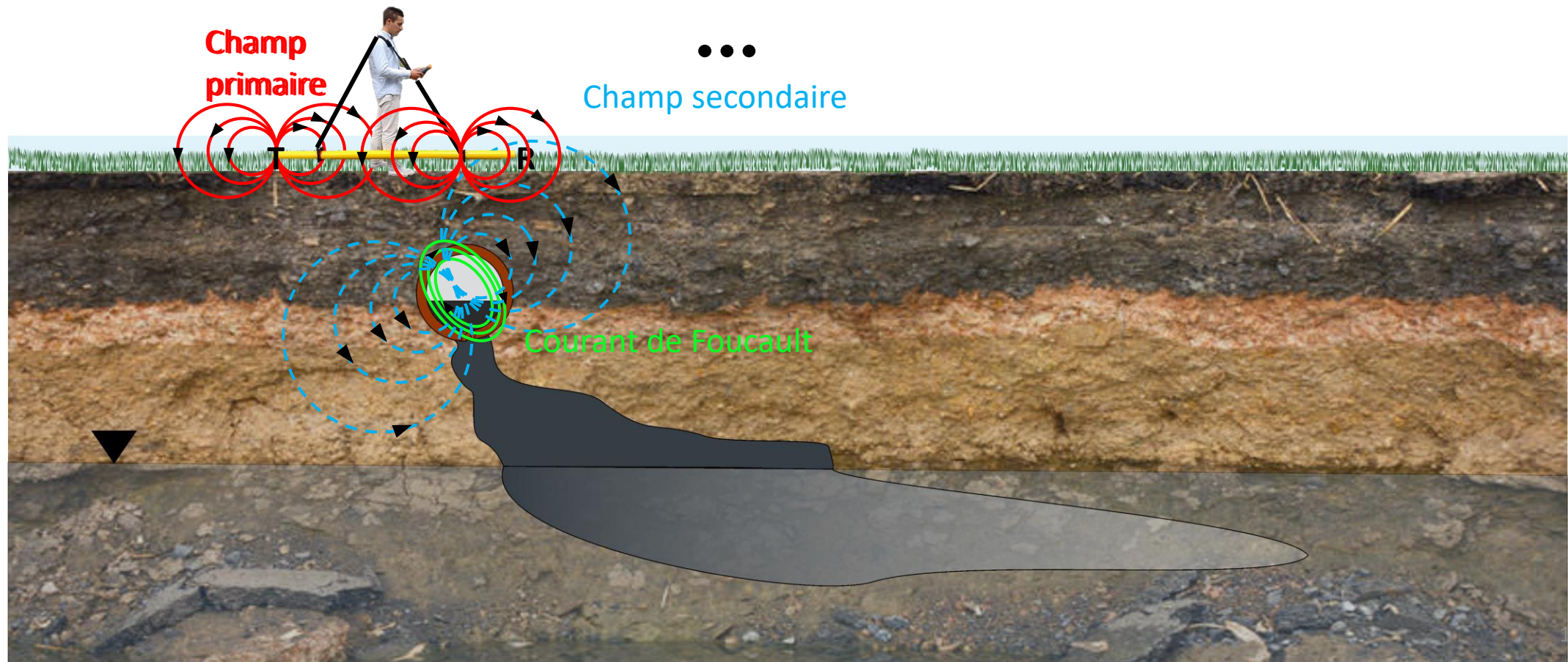
Permet de tester différentes conditions et configurations



Avec l'aimable autorisation du Prof. Lee Slater

Exemple:

Combinaison de la méthode d'induction électromagnétique (EMI) et tomographie de résistivité électrique (ERT)



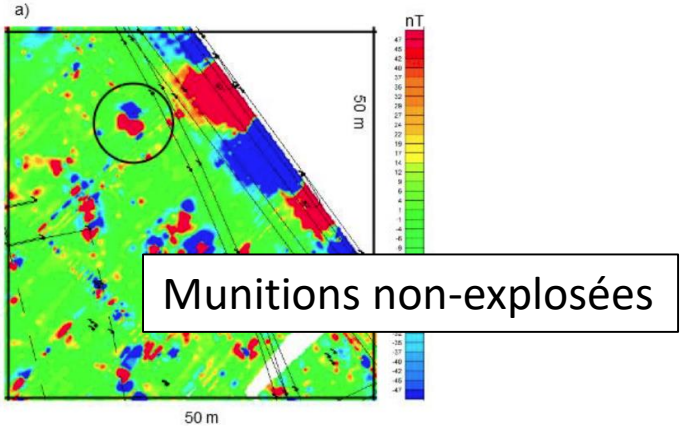
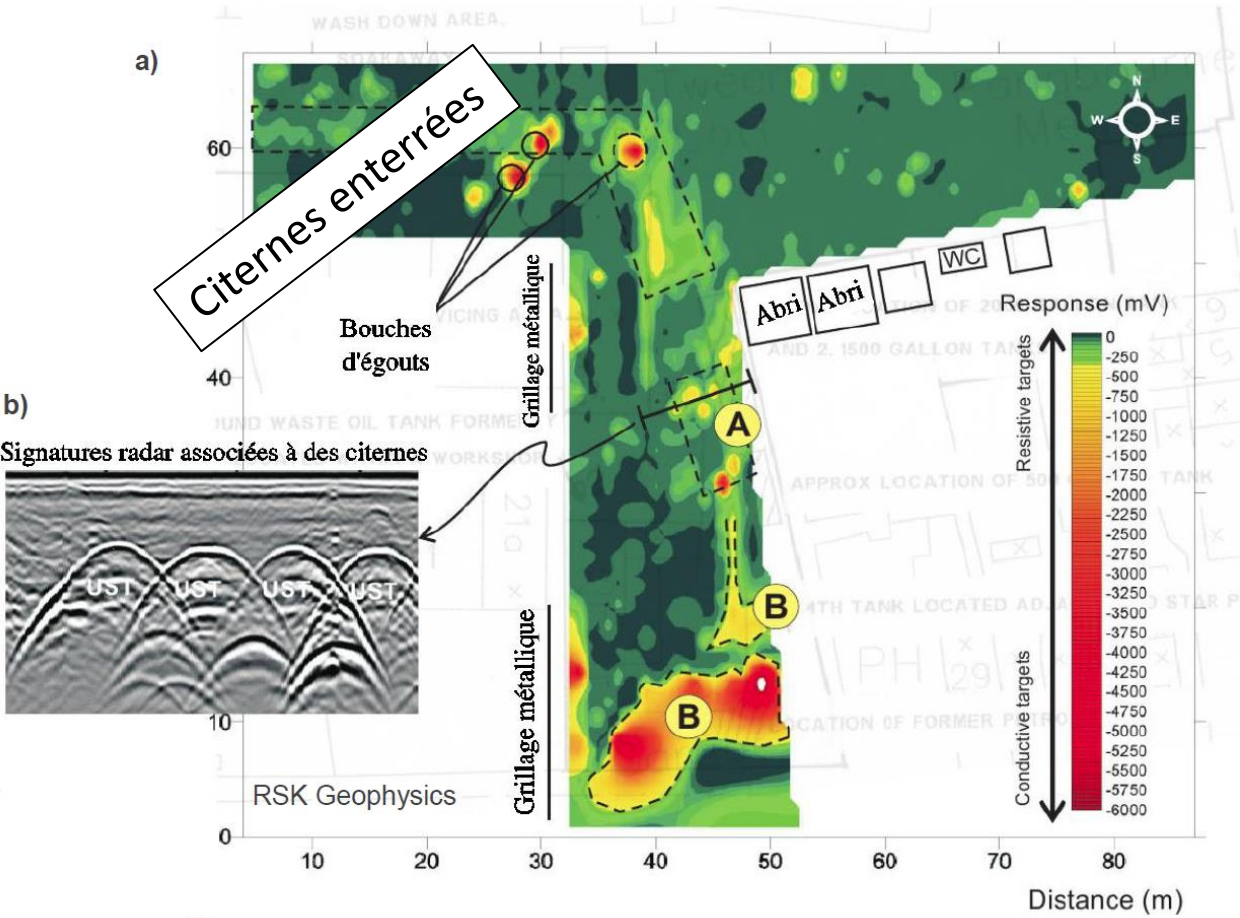
Détection d'objets



Echelle des valeurs de mesures "en phase" (%)

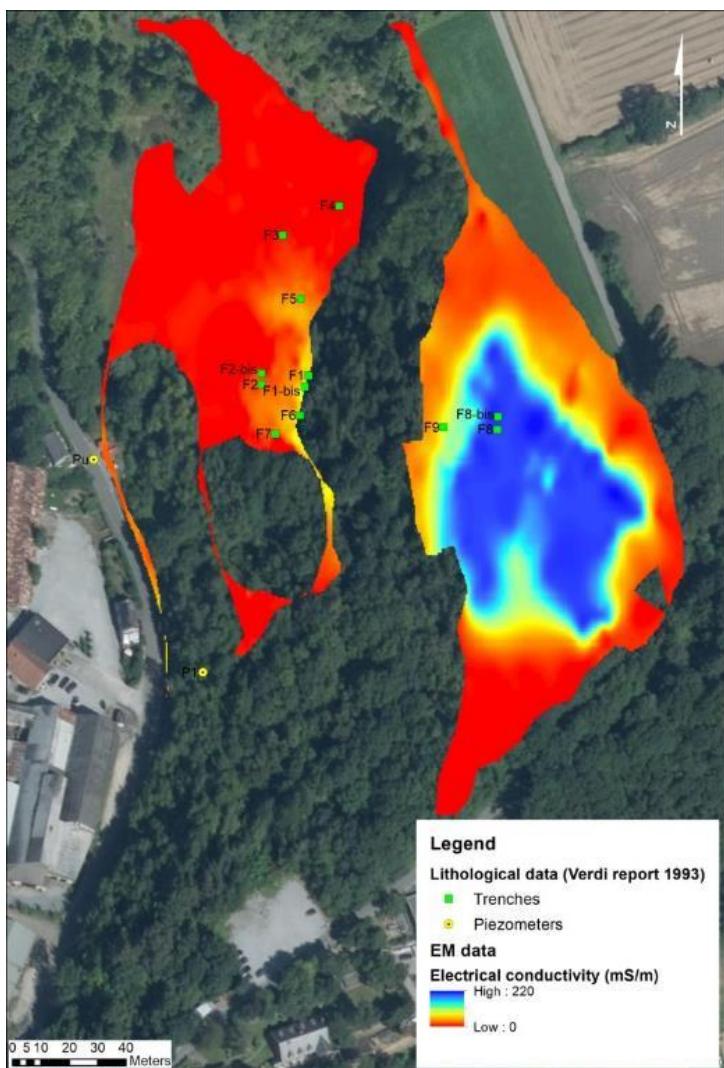


Ademe, 2017



Mais pas que... (attention ce slide contient un message promotionnel)

- Détection et délimitation d'une couche de déchets industriels (chaux et cendres) dans une vieille décharge



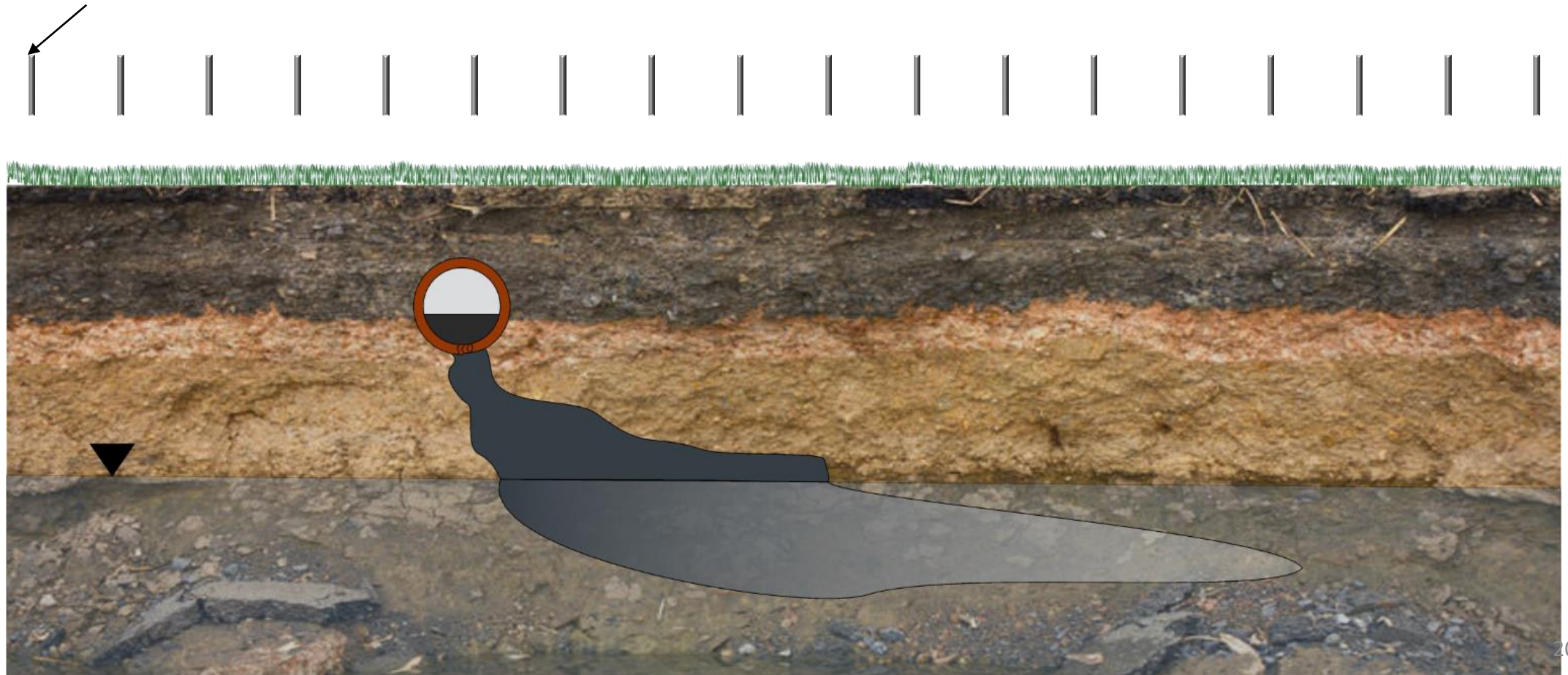
Interreg 
North-West Europe
RAWFILL
European Regional Development Fund

Co-funded by the Walloon region



Mise en place d'un profil ERT

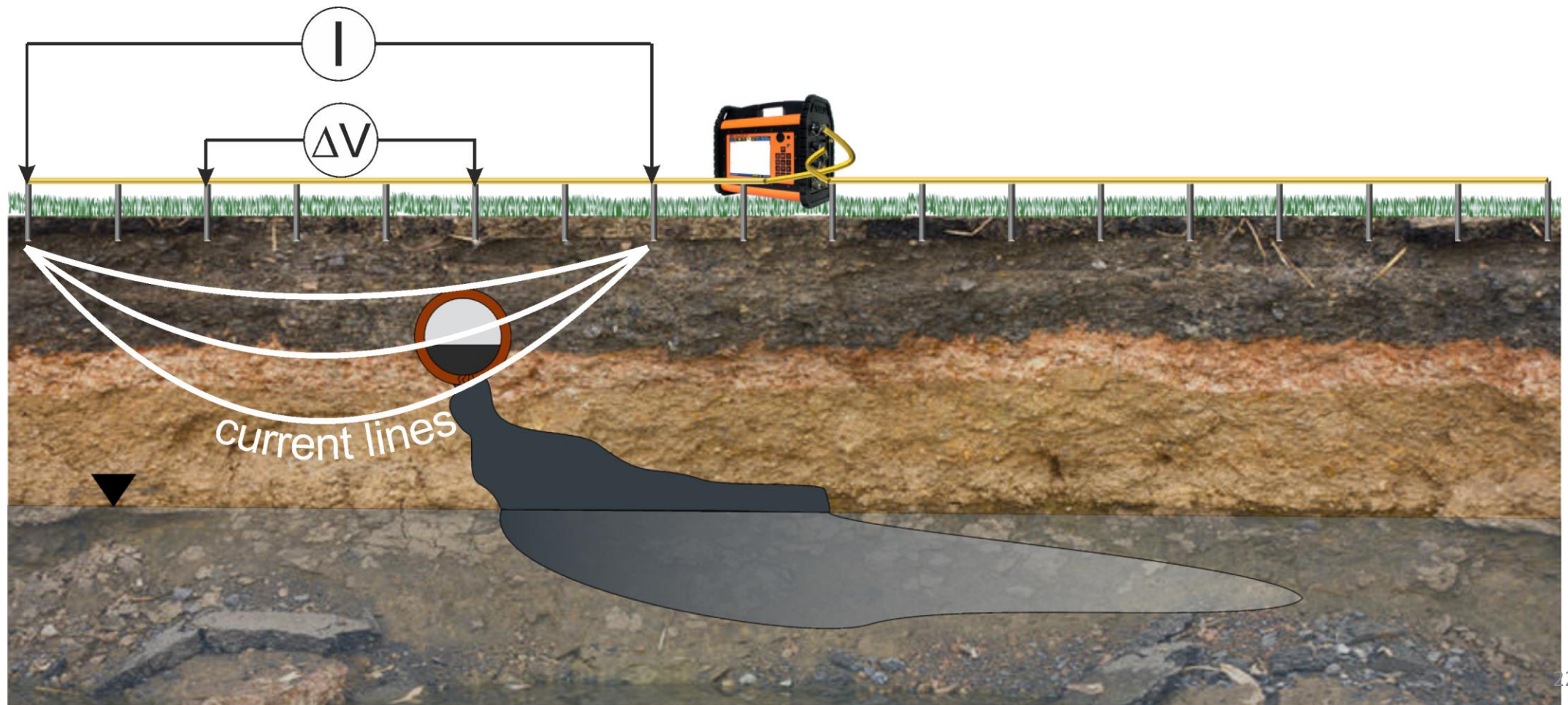
Electrodes en inox



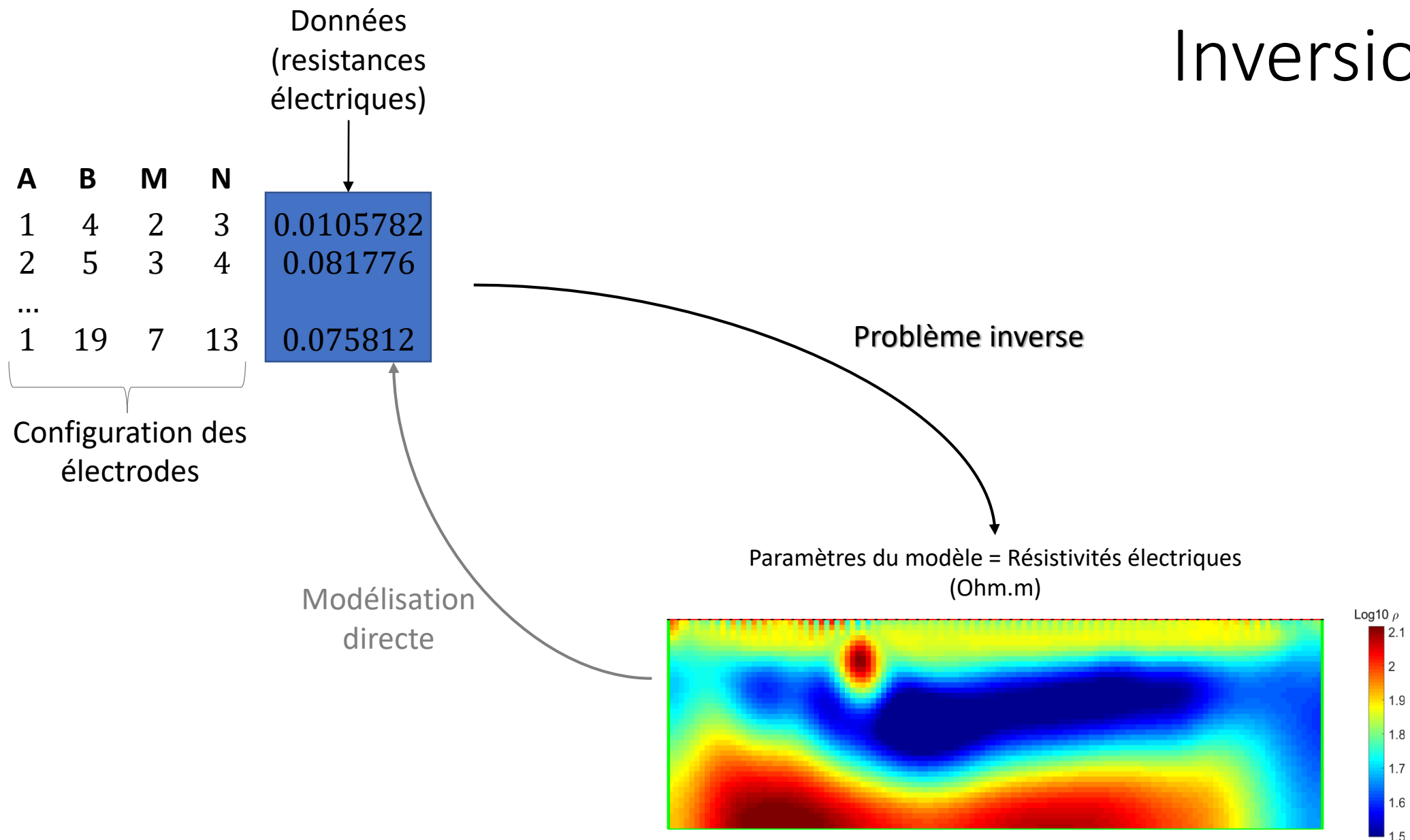
Mise en place d'un profil ERT



Acquisition ERT



Inversion

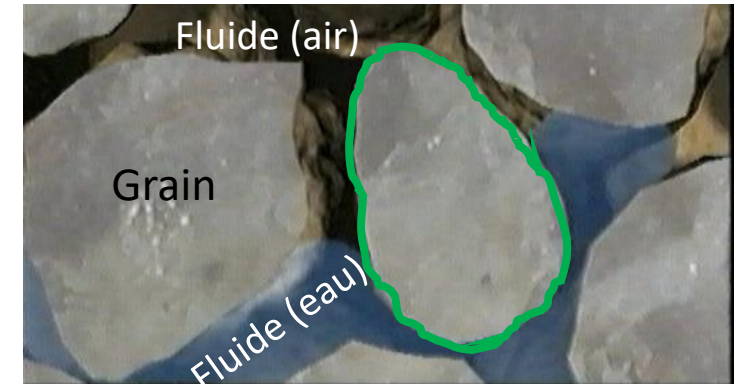


Pétrophysique

- Quels sont les principaux paramètres qui influencent la résistivité électrique (ρ_b) ou conductivités ($\sigma_b = 1/\rho_b$)?
 - Propriétés électriques du fluide poral, σ_f
 - Porosité, ϕ
 - Saturation, S_f
 - Présence de minéraux à grains fins (ex. argile), σ_{int} conduction électrique de surface

Loi d'Archie

$$\sigma_b = \frac{1}{\rho_b} = \frac{\phi^m}{a} \sigma_f S_f^n + \sigma_{int} = \frac{\sigma_f}{F} S_w^n + \sigma_{int}$$

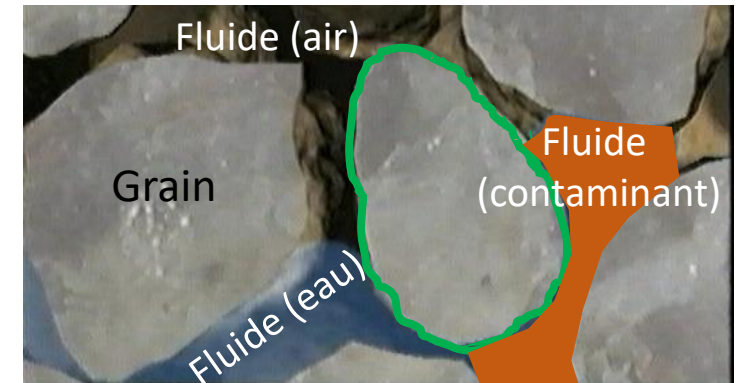


Pétrophysique

- Quels sont les principaux paramètres qui influencent la résistivité électrique (ρ_b) ou conductivités ($\sigma_b = 1/\rho_b$)?
 - Propriétés électriques du fluide poral, σ_f
 - Porosité, ϕ
 - Saturation, S_f
 - Présence de minéraux à grains fins (ex. argile), σ_{int} conduction électrique de surface

Loi d'Archie

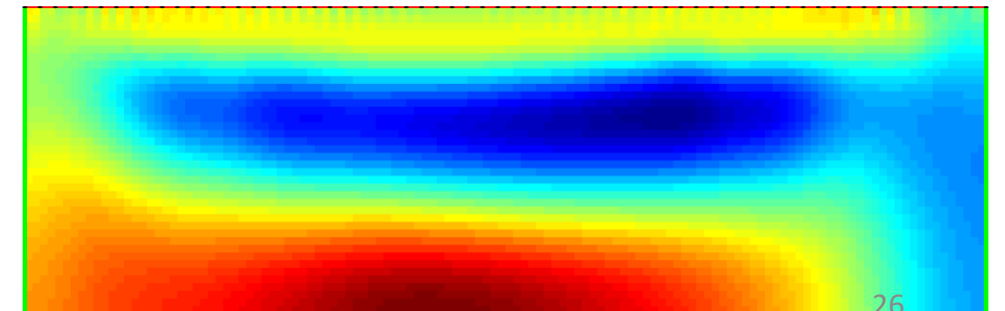
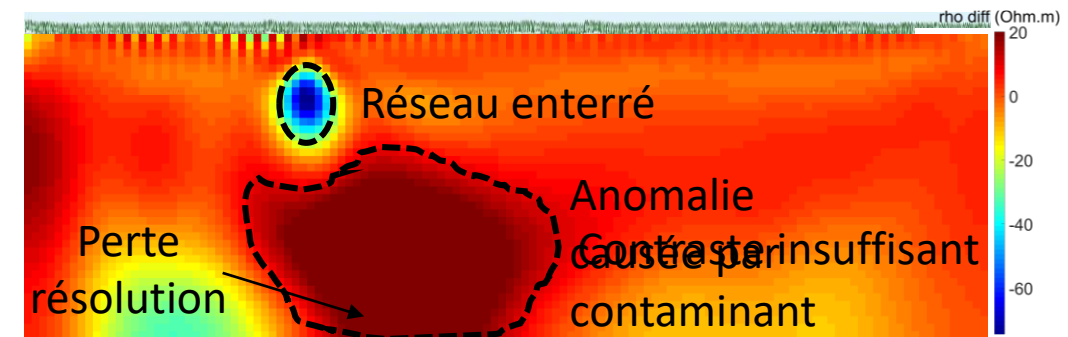
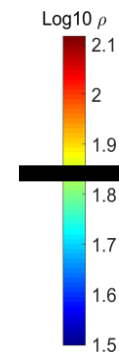
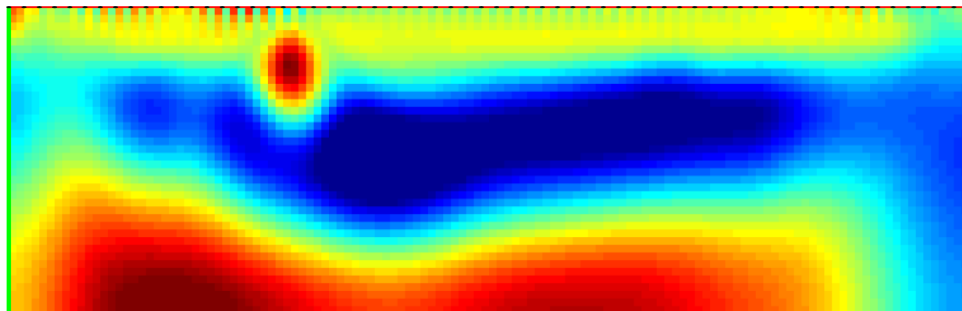
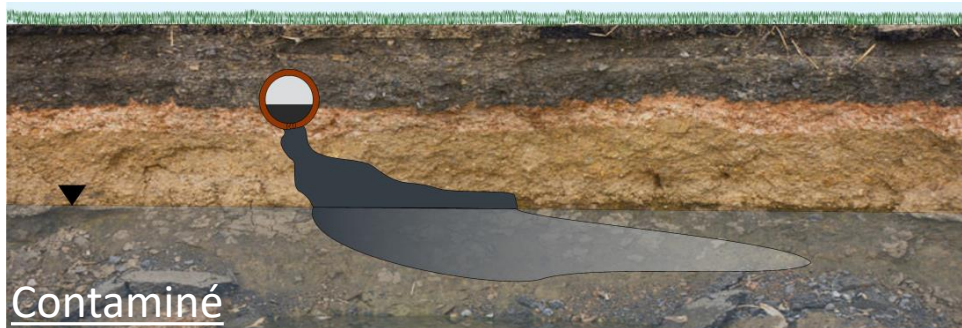
$$\sigma_b = \frac{1}{\rho_b} = \frac{\phi^m}{a} \sigma_f S_f^n + \sigma_{int} = \frac{\sigma_f}{F} S_w^n + \sigma_{int}$$



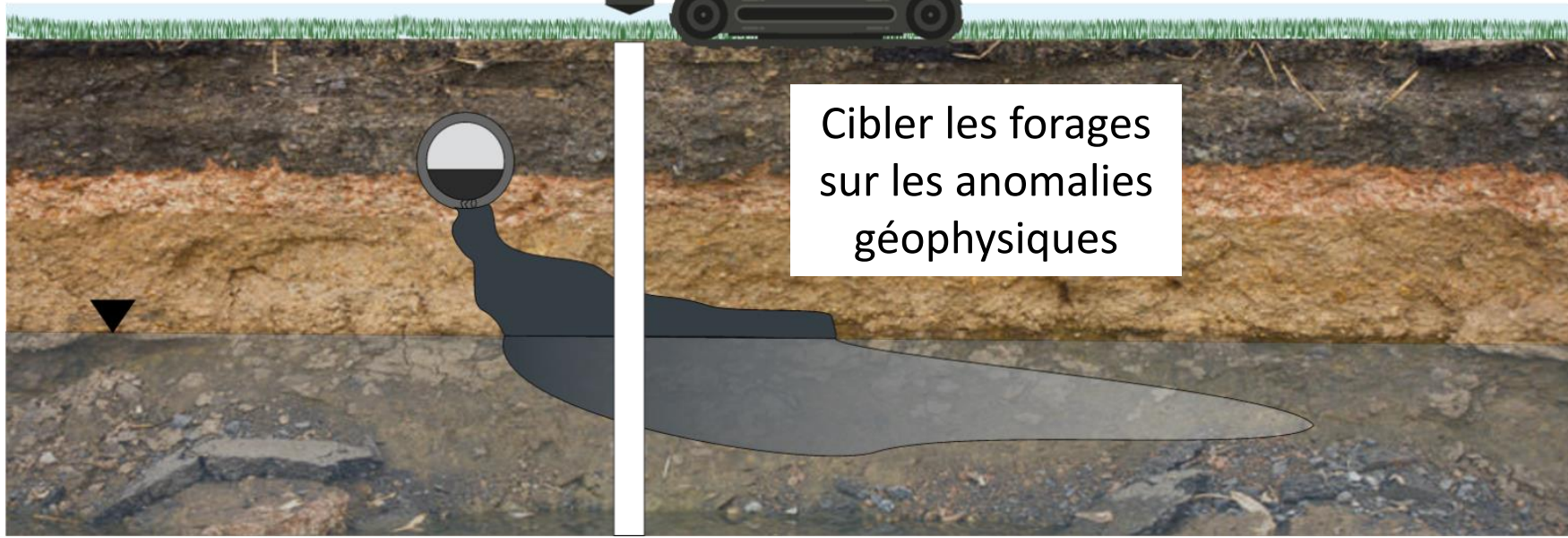
Si le contaminant déplace l'eau porale
et si $\sigma_{cont} \neq \sigma_{eau} \rightarrow$ impact sur σ_b

Interprétation

- Comment détecter la contamination?
 - Données géophysiques avant contamination (très rare)
 - Acquisition dans une zone proche et non-contaminée



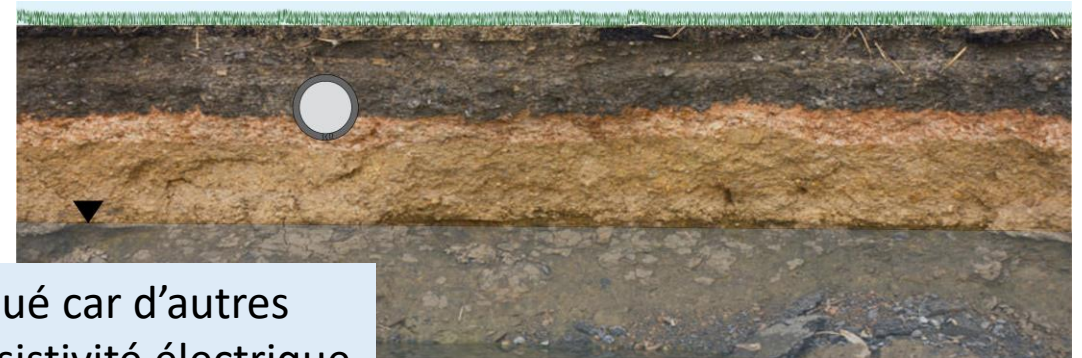
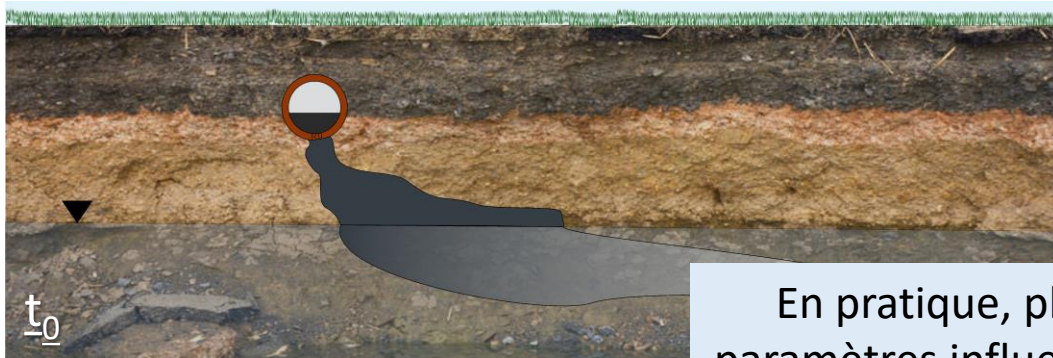
Géophysique en complément des forages



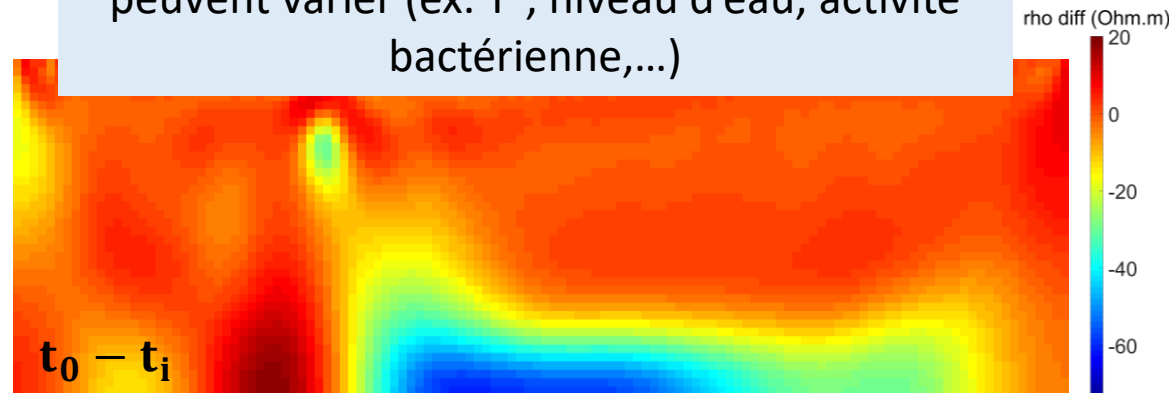
Cibler les forages
sur les anomalies
géophysiques

Possibilité de réaliser un suivi dans le temps

- Exemple: assainissement



En pratique, plus compliqué car d'autres paramètres influençant la résistivité électrique peuvent varier (ex. T° , niveau d'eau, activité bactérienne,...)



Plan de la présentation

Introduction à la
géophysique

Géophysique sur
sites contaminés

Applications

Message à retenir

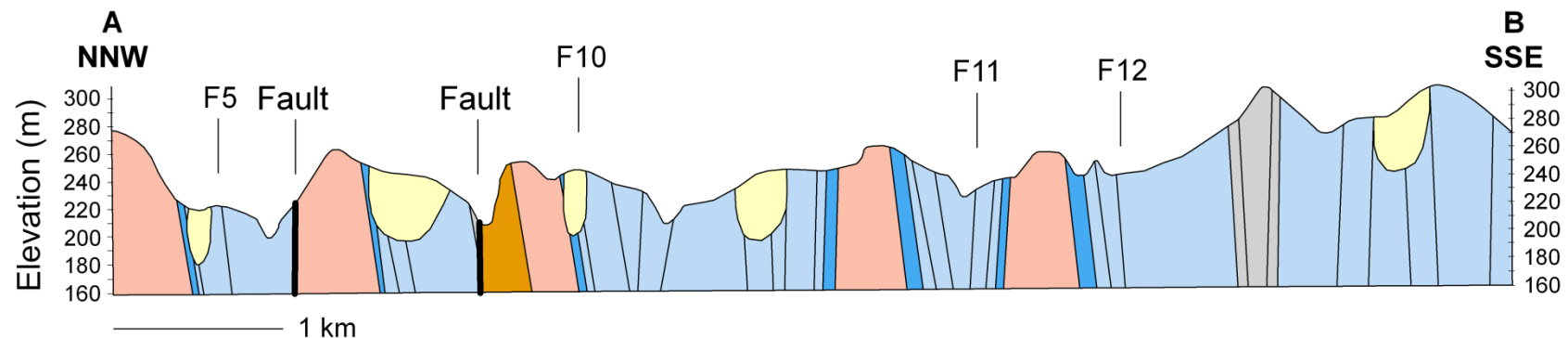
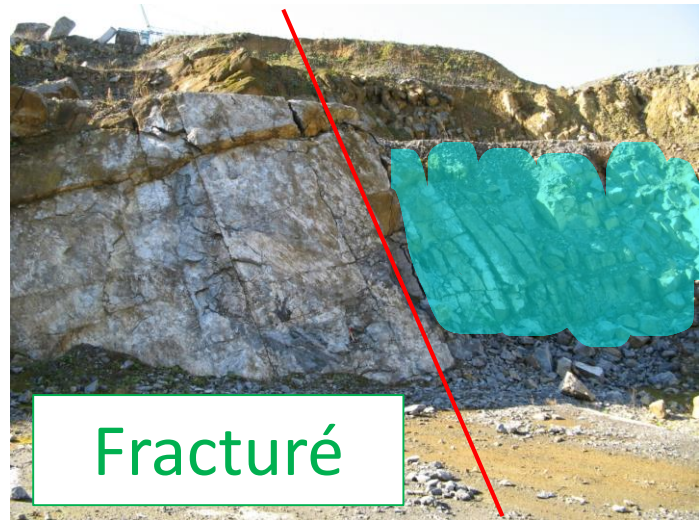
Compréhension
du contexte
(hydro)géologique

Contaminations
solvants chlorés

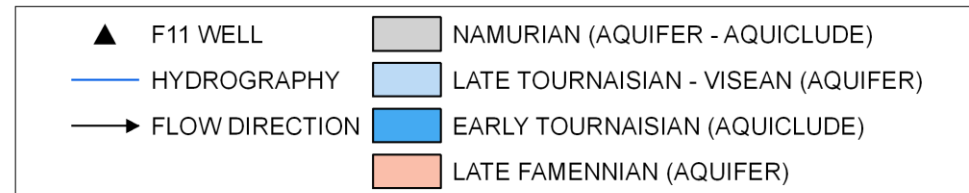
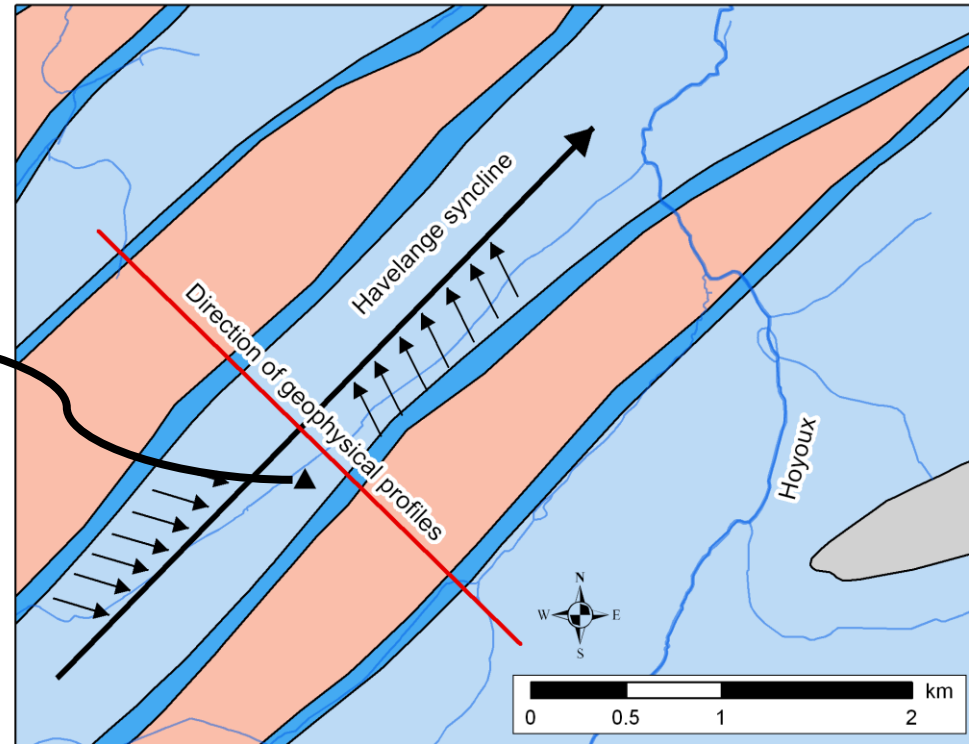
Contaminations
hydrocarbures

Compréhension du contexte (hydro)géologique

- Comprendre les flux dans des systèmes hétérogènes (en présence de chemins d'écoulement préférentiel)

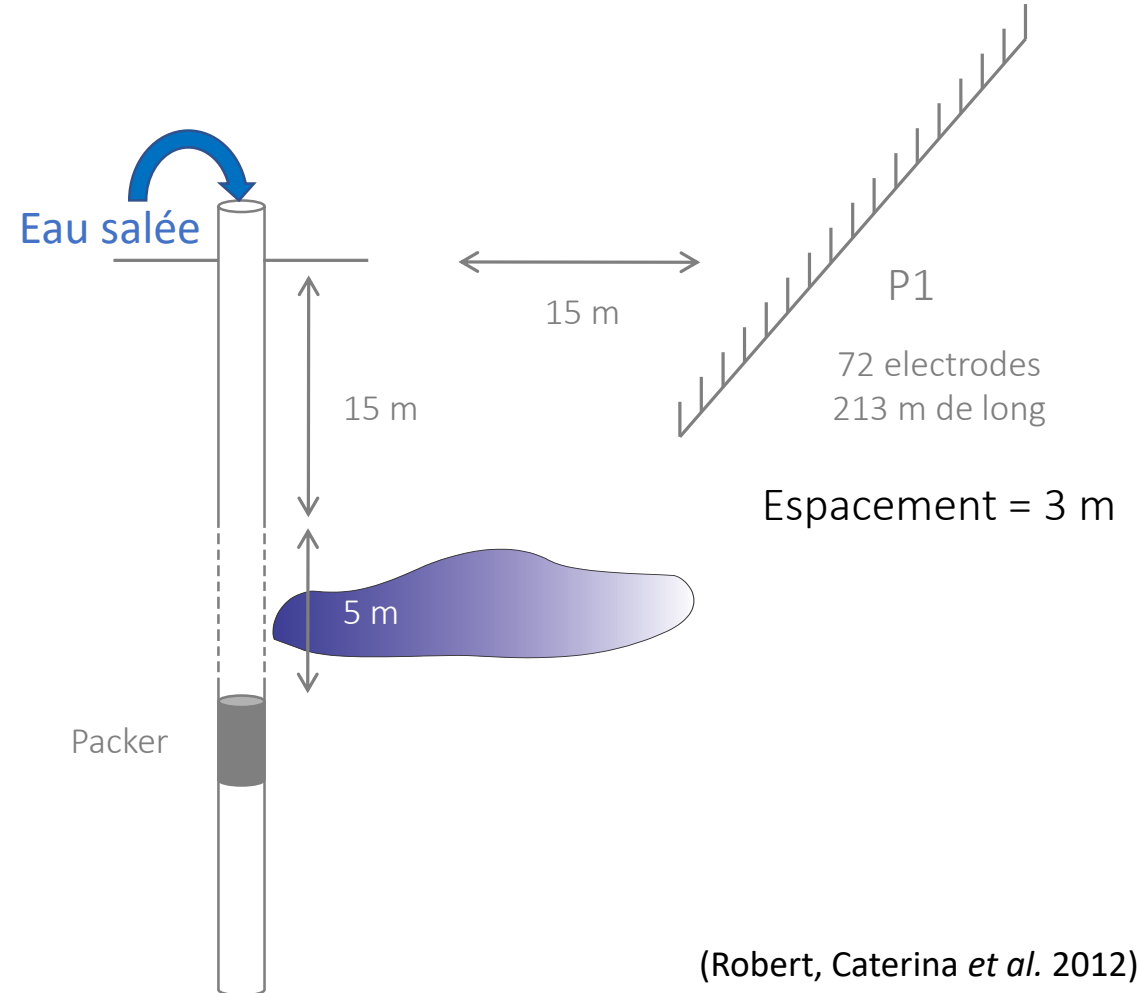


Compréhension du contexte (hydro)géologique



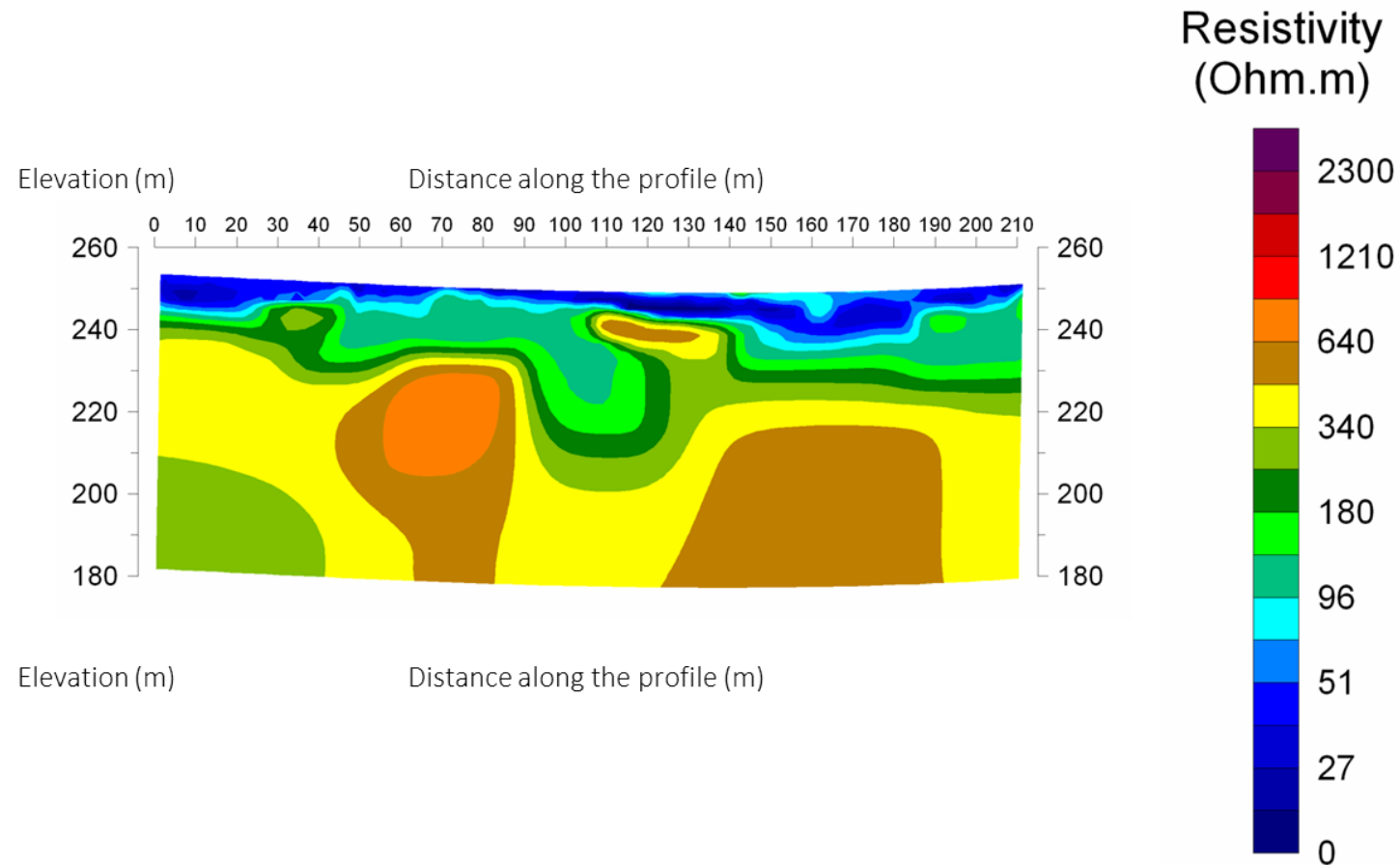
Conception du test

- Problème
 - Essai de traçage salin en milieu fracturé (calcaires)
- Objectifs
 - Trouver la trajectoire préférentielle des eaux souterraines et évaluer les paramètres de transport
- Données disponibles
 - Log EM39 haute résolution (20 cm)

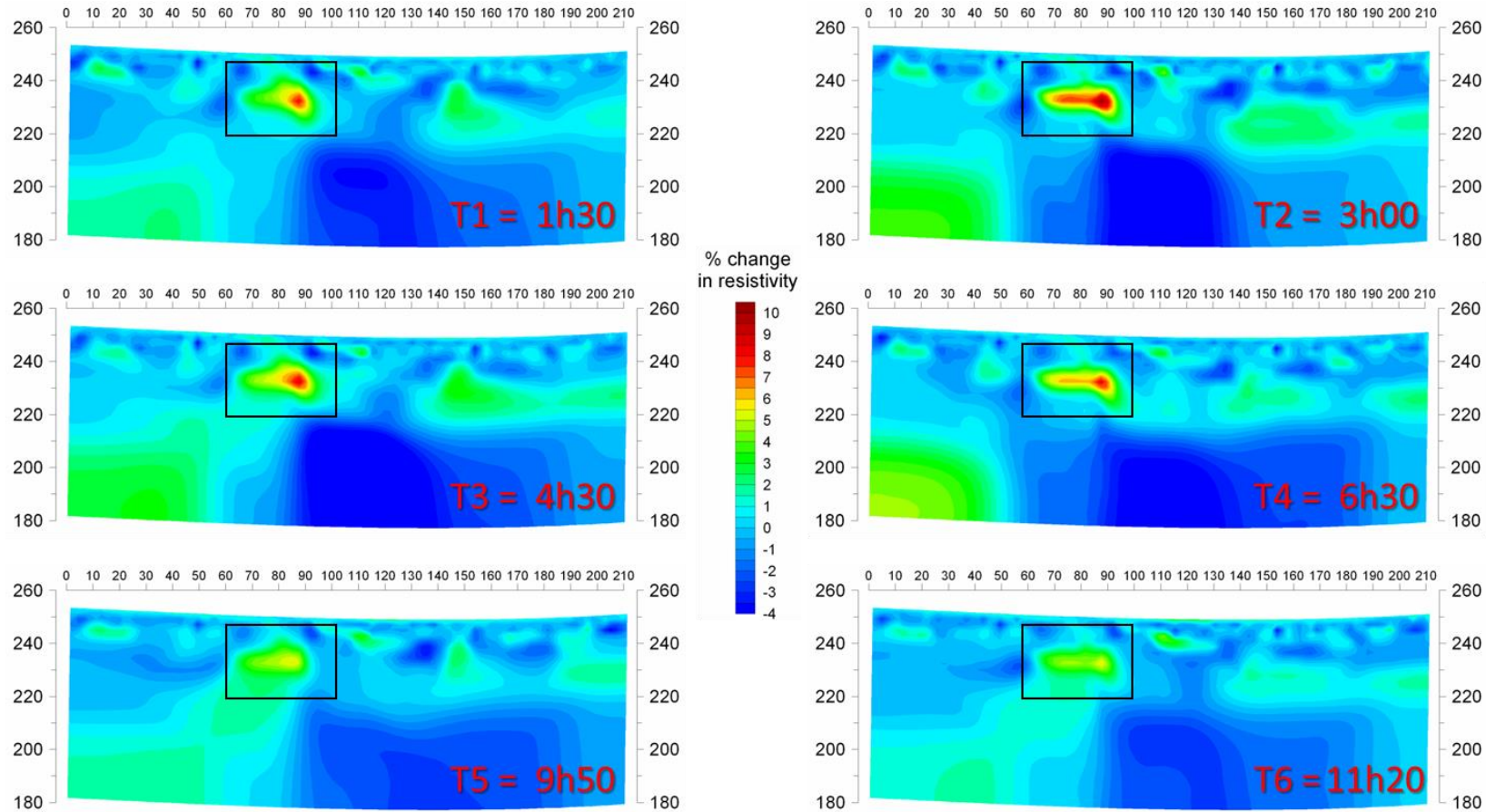


(Robert, Caterina *et al.* 2012)

Image background (avant injection)



Arrivée du traceur



Plan de la présentation

Introduction à la
géophysique

Géophysique sur
sites contaminés

Applications

Message à retenir

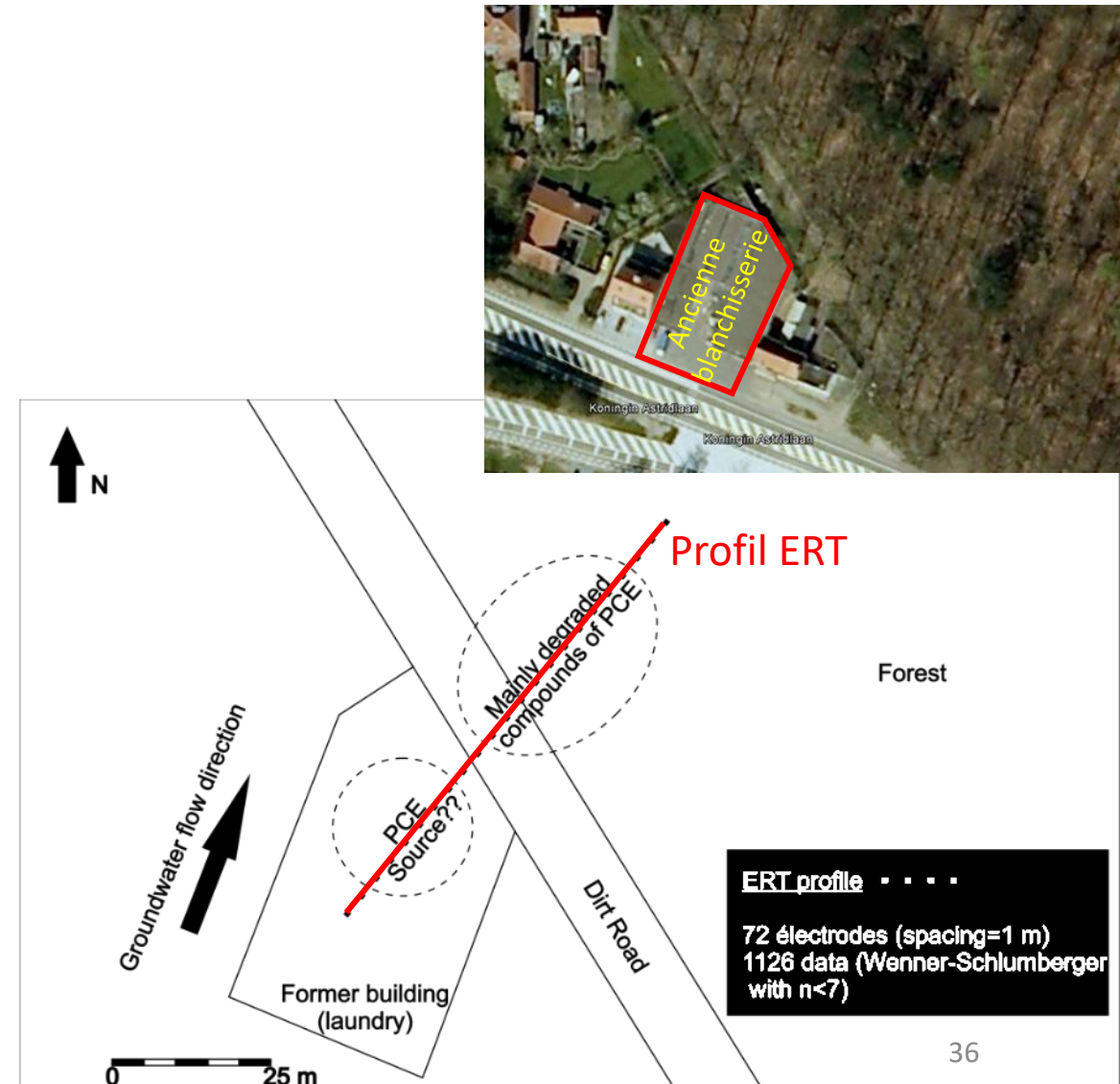
Compréhension
du contexte
(hydro)géologique

Contaminations
solvants chlorés

Contaminations
hydrocarbures

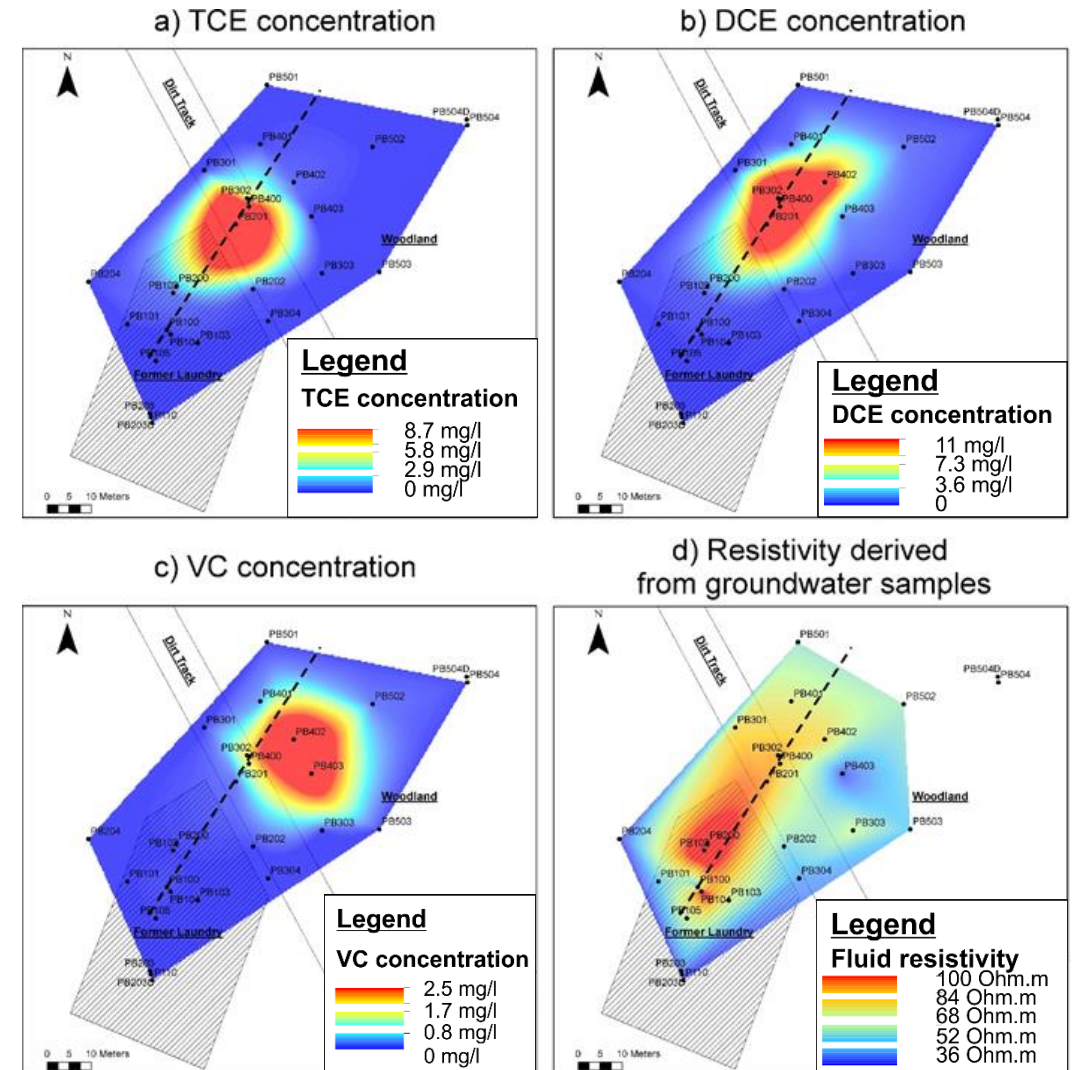
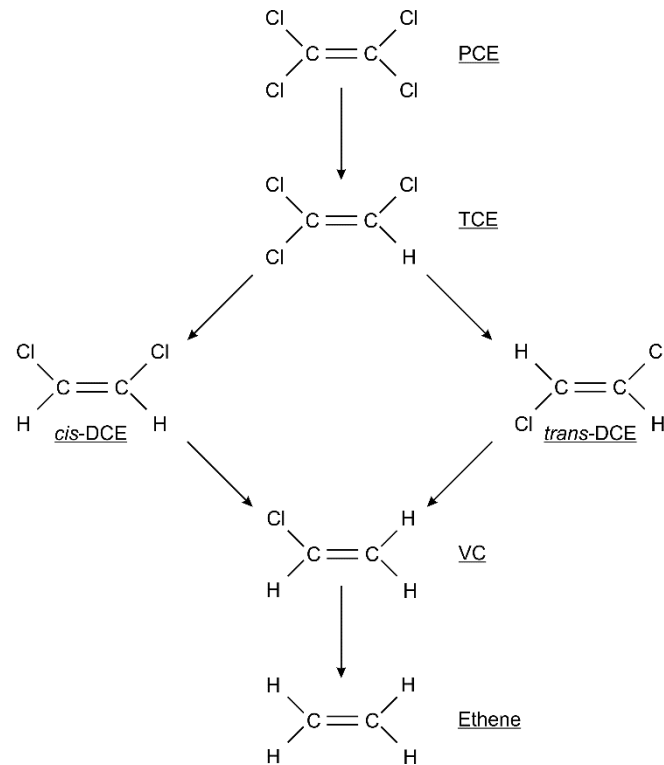
Solvants chlorés – 1^{er} site

- Contexte
 - Contamination en solvants chlorés
- Objectifs de l'étude géophysique
 - Détecter la source et cartographier l'extension de la pollution
- Données disponibles
 - Forages
 - Concentrations en COV
 - Piézométrie



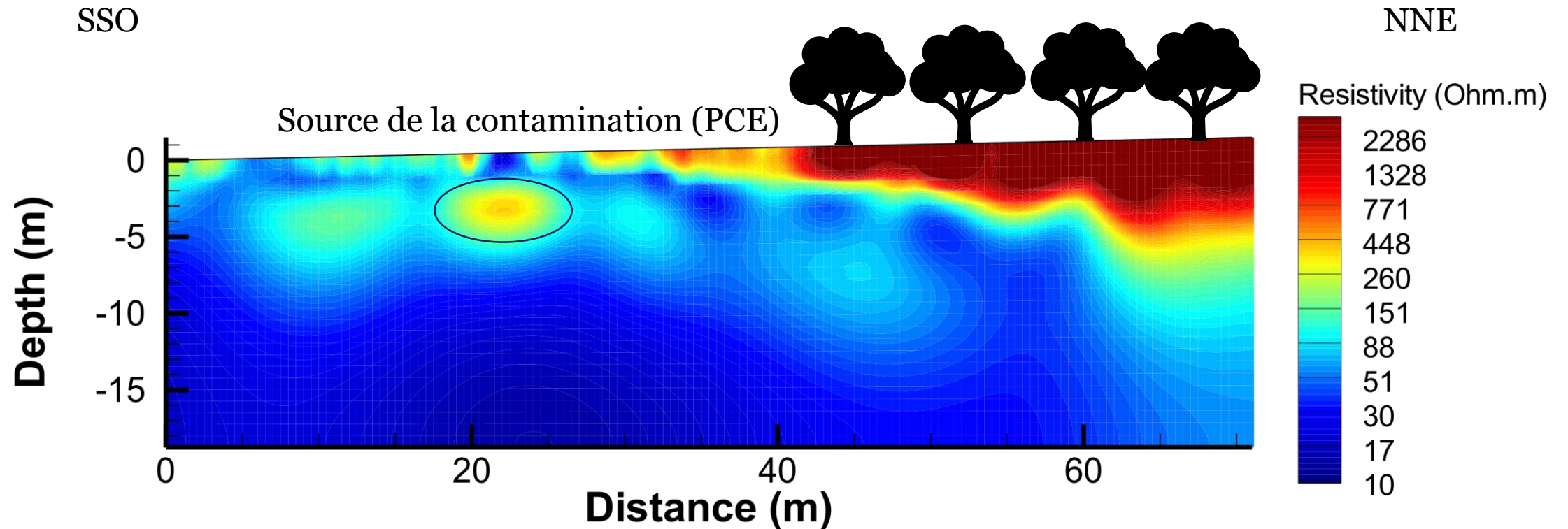
Cartographie de la contamination

- Atténuation naturelle observée



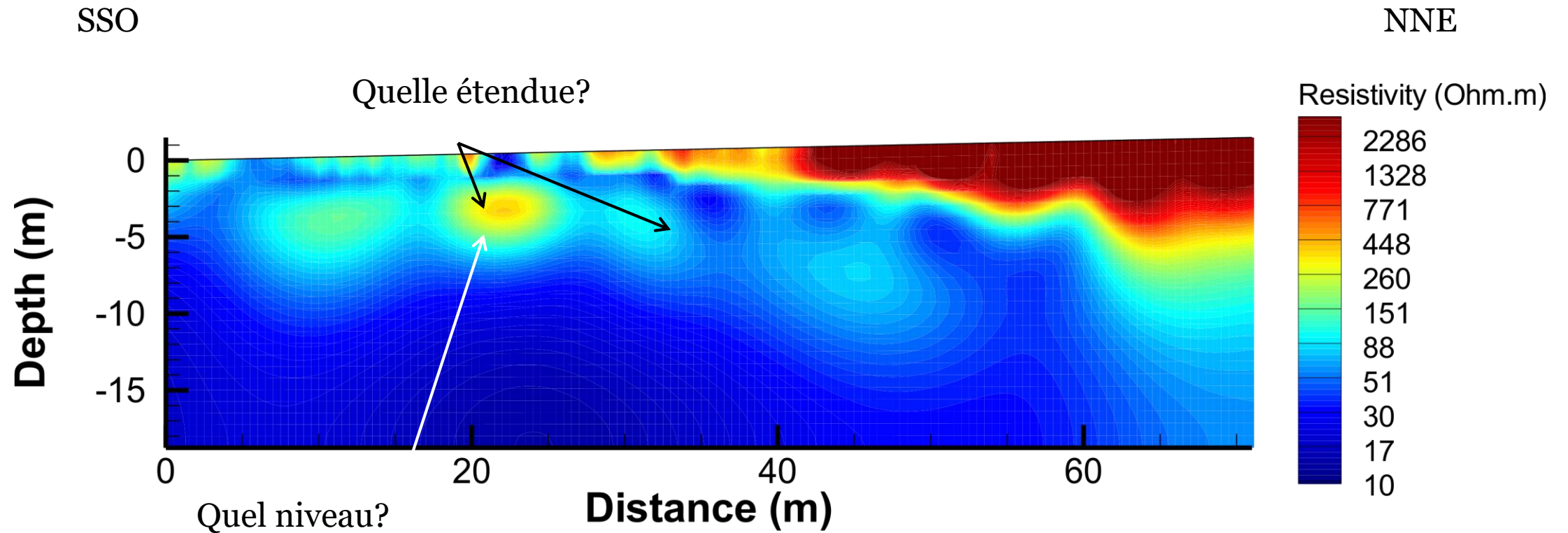
Résultats ERT

- Intérêt principal de la géophysique = imagerie



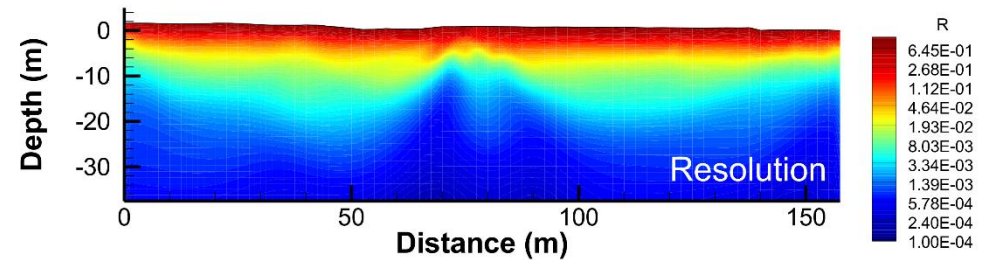
Résultats ERT

- Fiabilité?

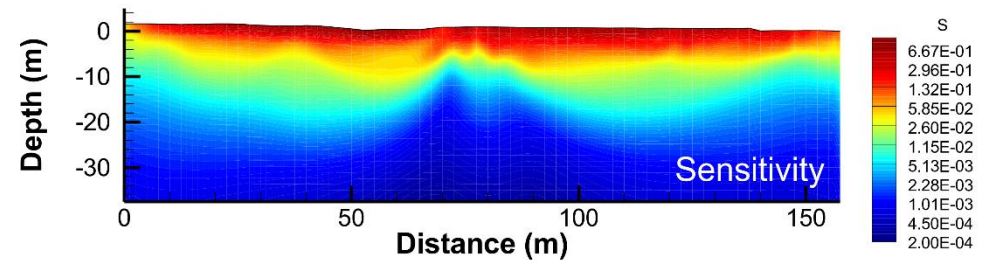


Parmi les outils disponibles

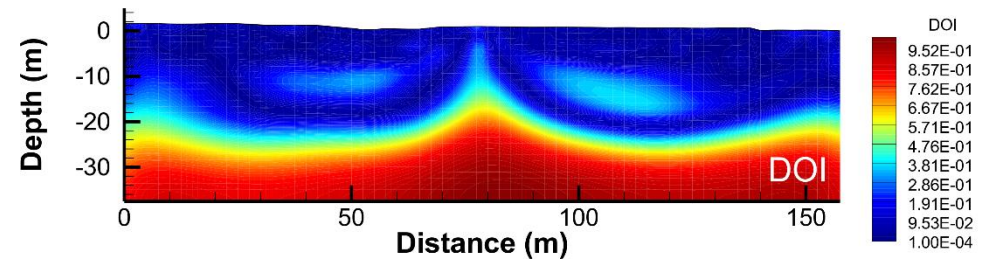
Matrice de résolution: R



Matrice de sensibilité: S



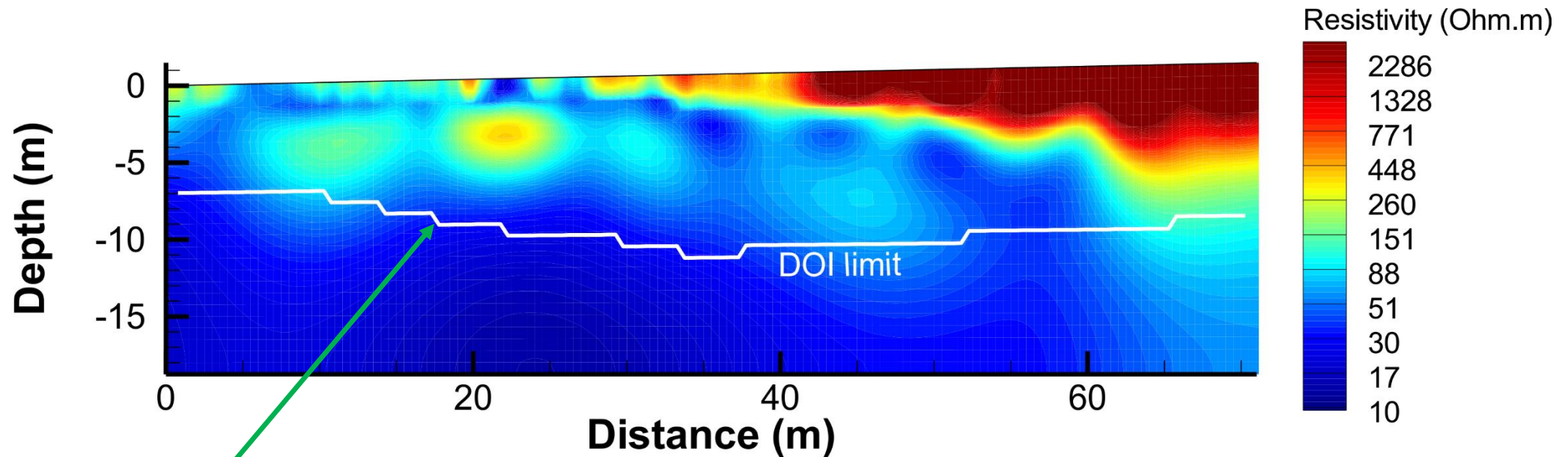
Profondeur d'investigation: DOI



Estimation qualitative de la profondeur d'investigation

SSO

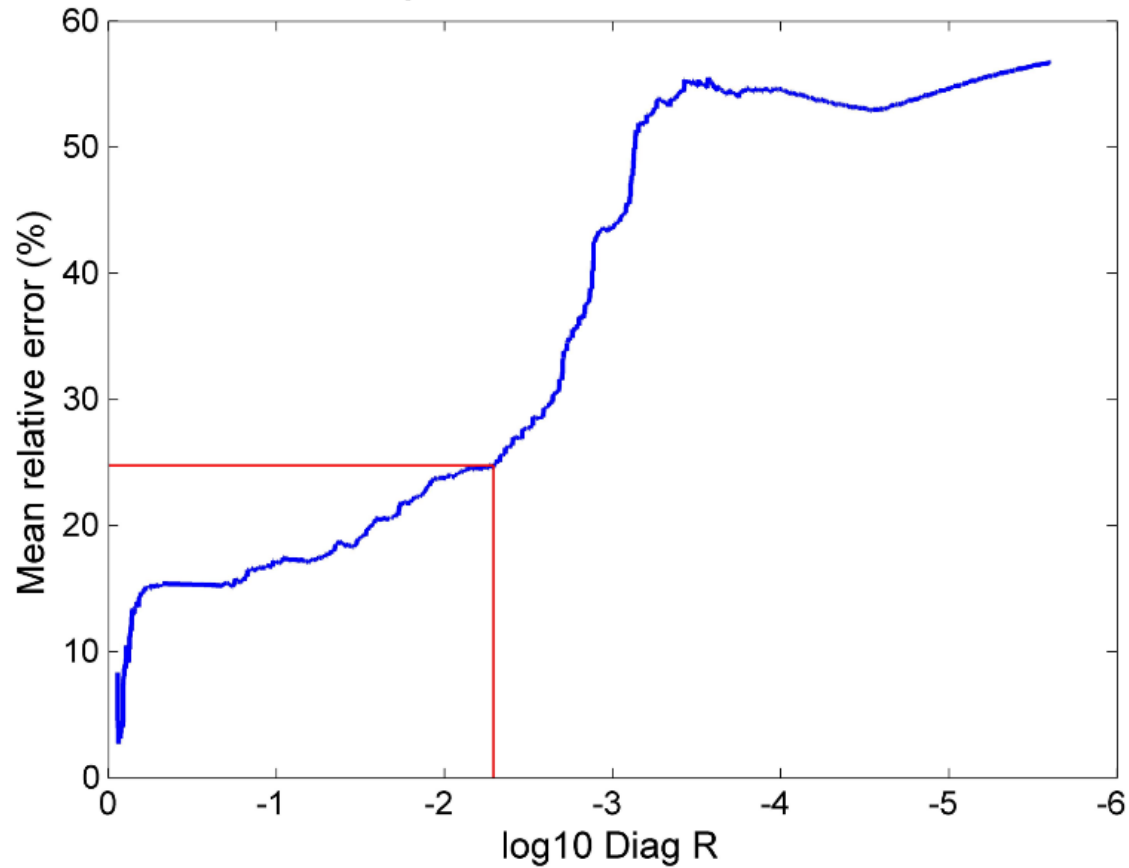
NNE



En dessous de cette ligne, le modèle ne dépend plus suffisamment des données

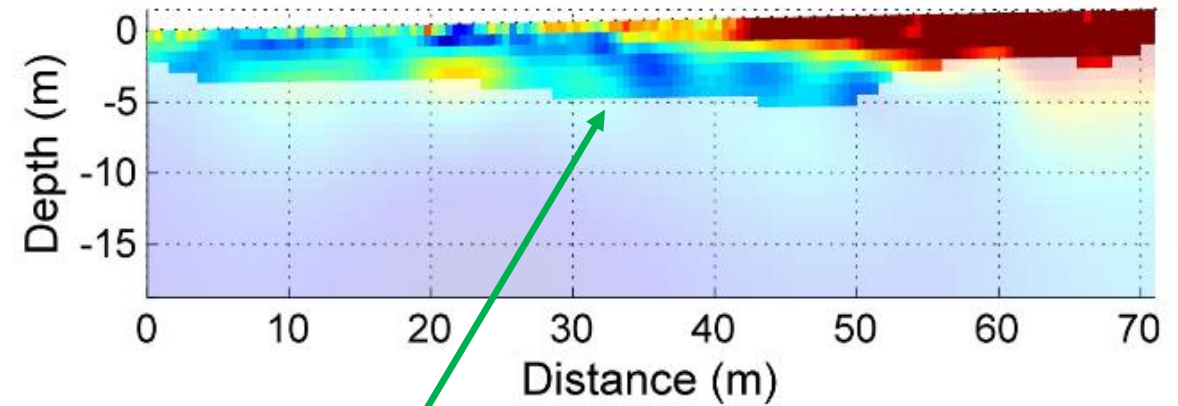
Estimation quantitative

e) Threshold definition



Application d'une valeur
seuil sur la résolution

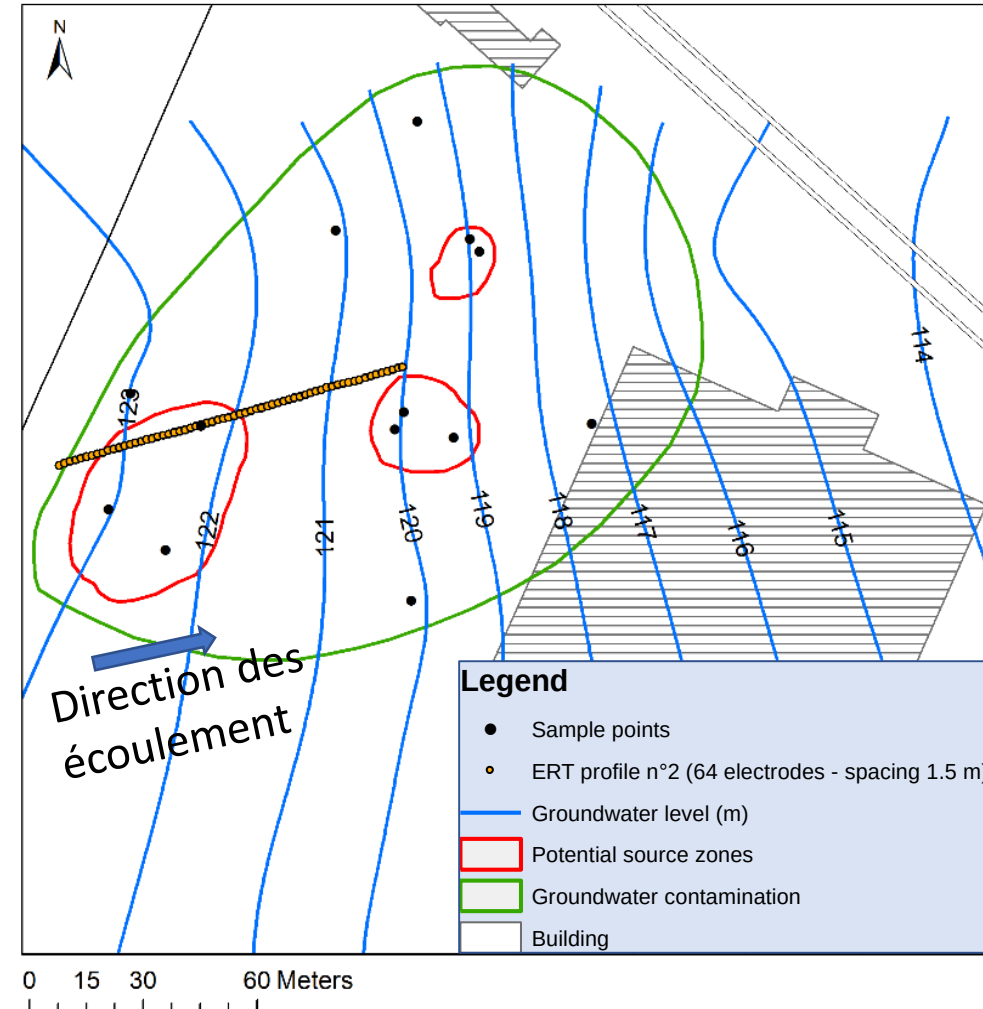
f) Validated real inverted model



Zone résolue avec une erreur inférieure à 25%

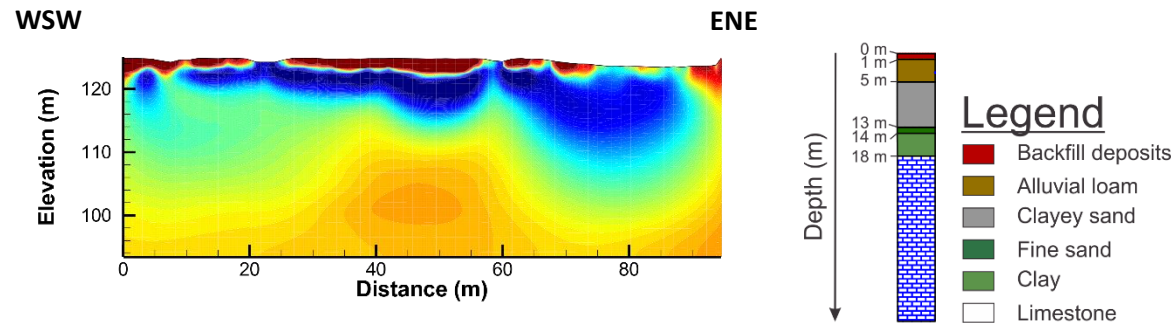
Solvants chlorés – 2^{ème} site

Zone source (solvants chlorés - TCE)

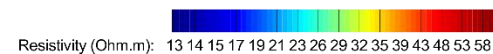


Résultats ERT

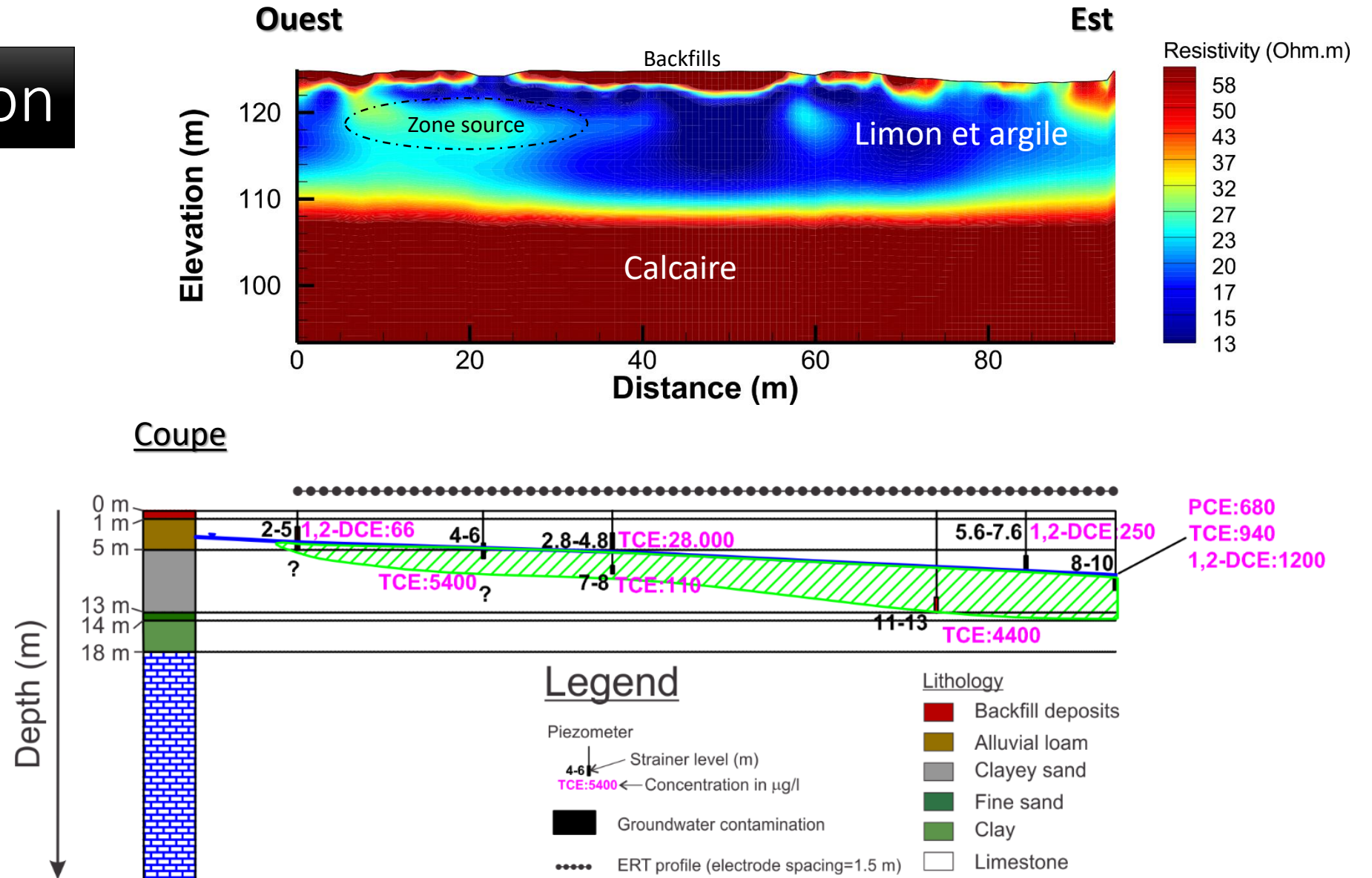
Inversion standard



Amélioration possible?



Interprétation

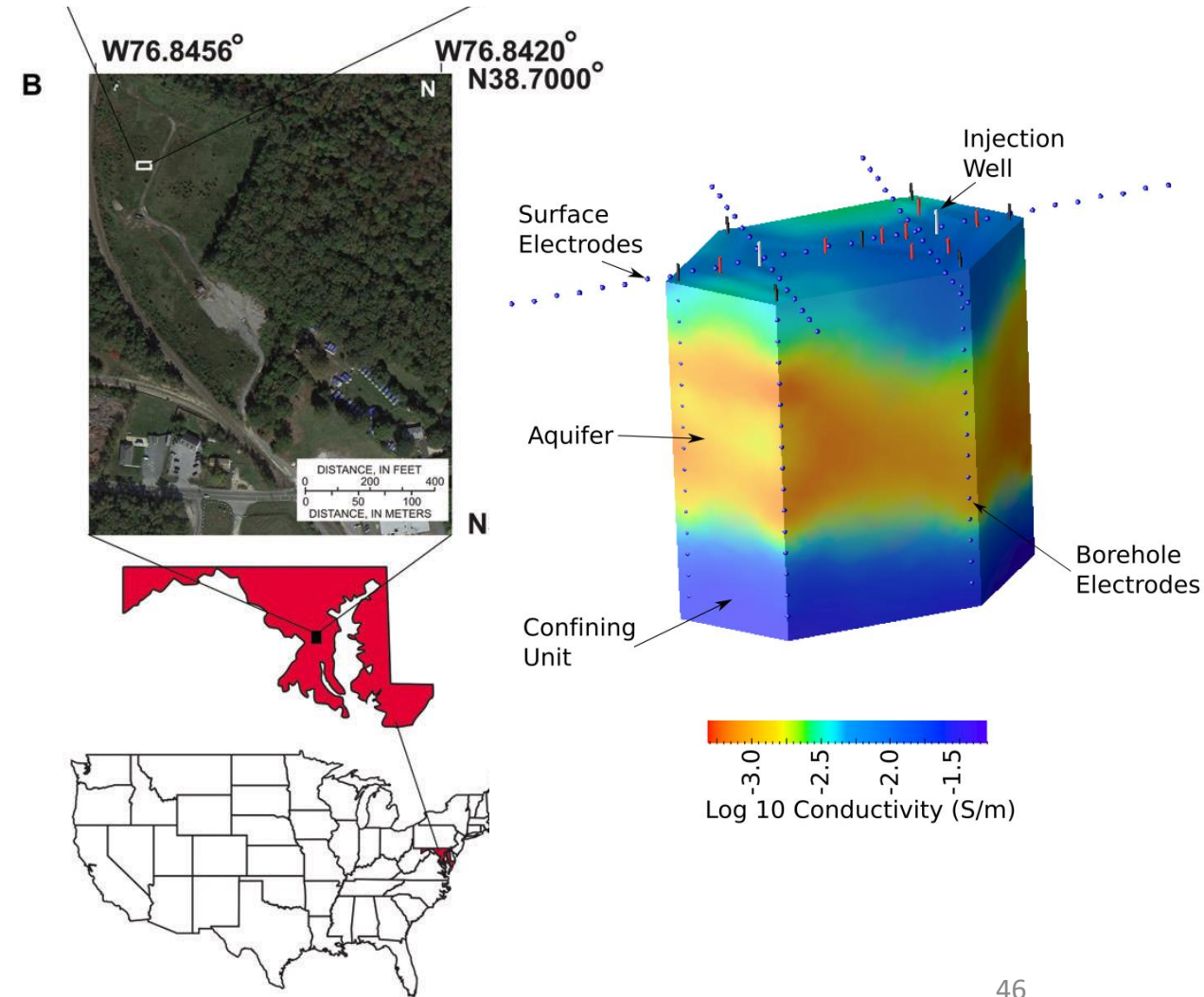


Solvants chlorés - 3^{ème} site

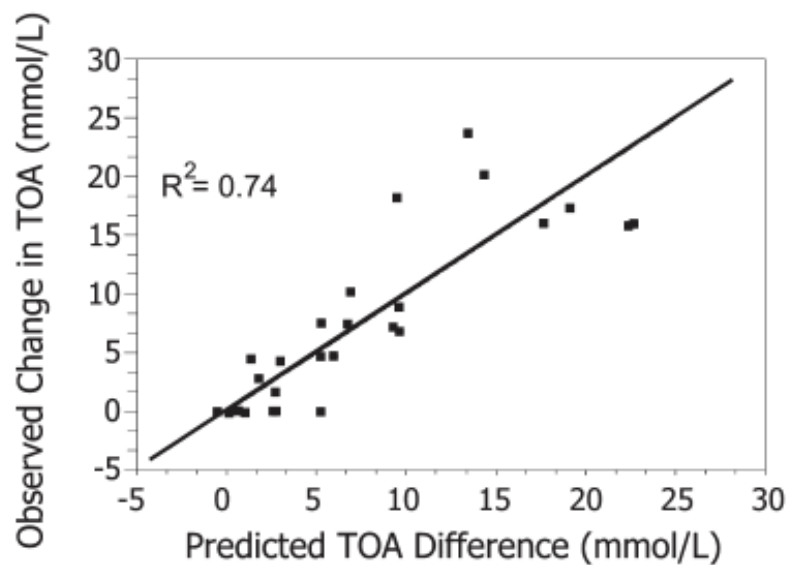
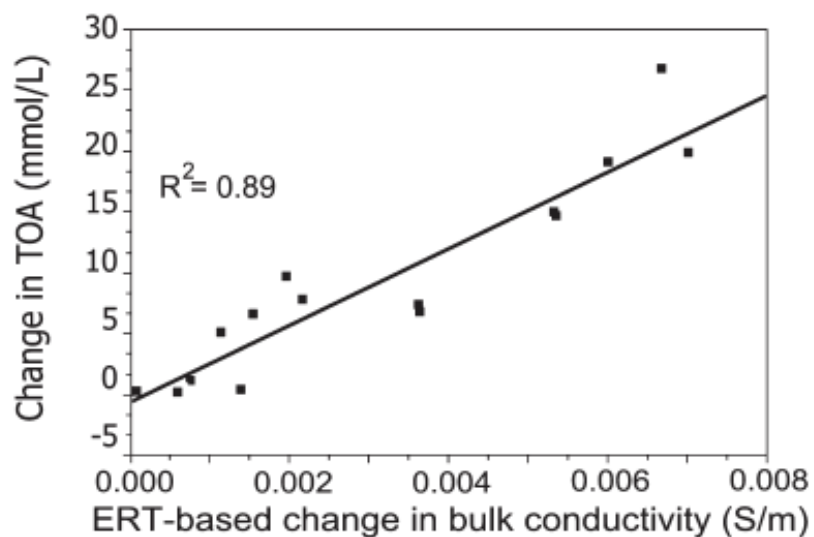
Suivi géophysique: amendement

- Contamination des eaux souterraines par le trichloréthylène (TCE)
- Aquifère supérieur (principalement des sables et du gravier) limité par une formation de limon et d'argile relativement imperméable allant de 7.5 à 10.5 m sous la surface du sol.
- La nappe phréatique du site se situe entre environ 1 et 4.5 m au-dessous du niveau du sol
- Biostimulation des eaux souterraines via un substrat de carbone et de microorganismes ont été injectés dans la zone contaminée pour accélérer la biodégradation naturelle
- Les injections de substrat ont été espacées sur une grille rectiligne de 20 m et ce sont faits sur l'épaisseur de l'aquifère supérieur (1 000 points d'injection - USACE 2012).

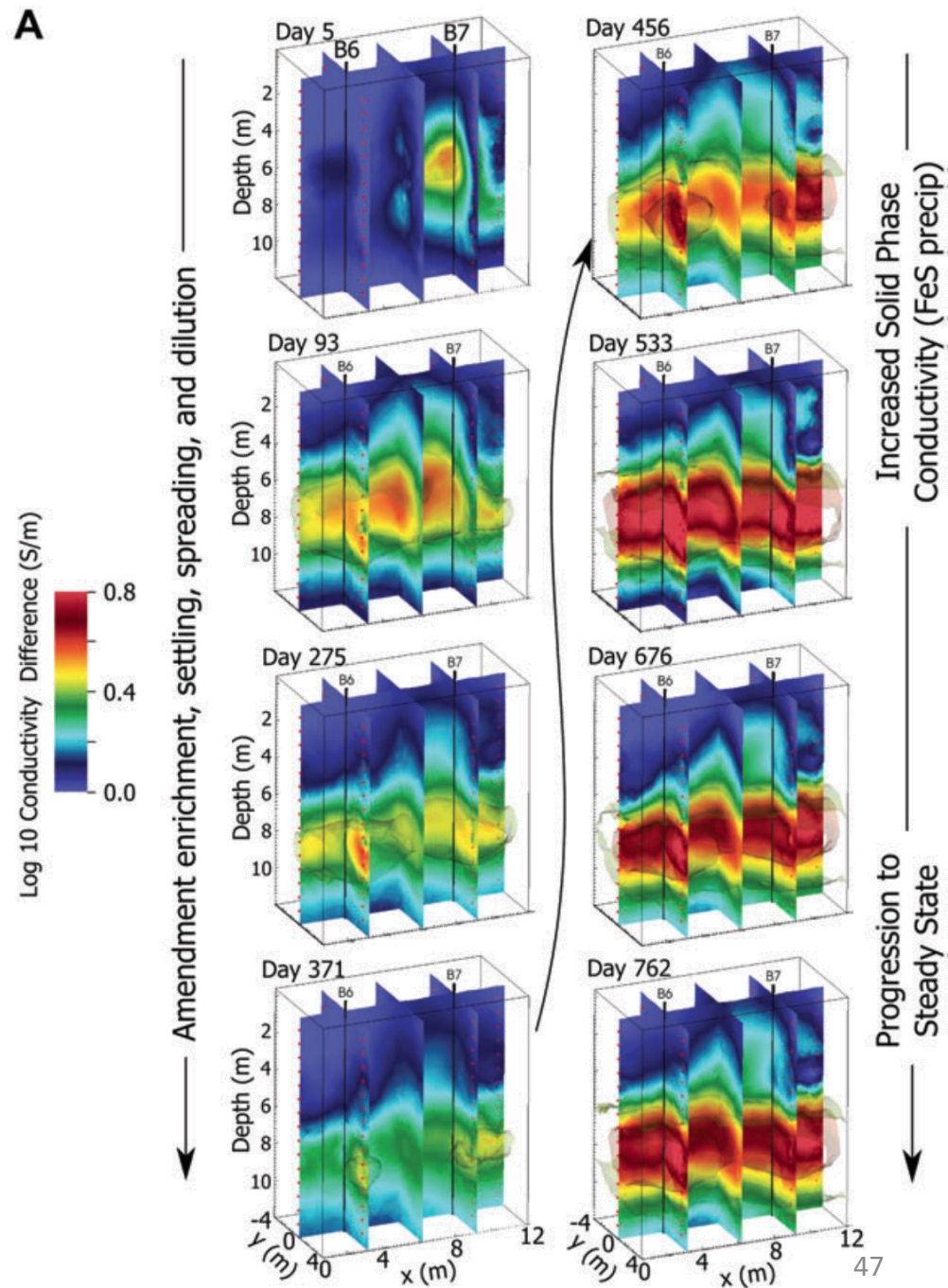
Avec l'aimable autorisation du Prof. Lee Slater
Johnson et al., 2015



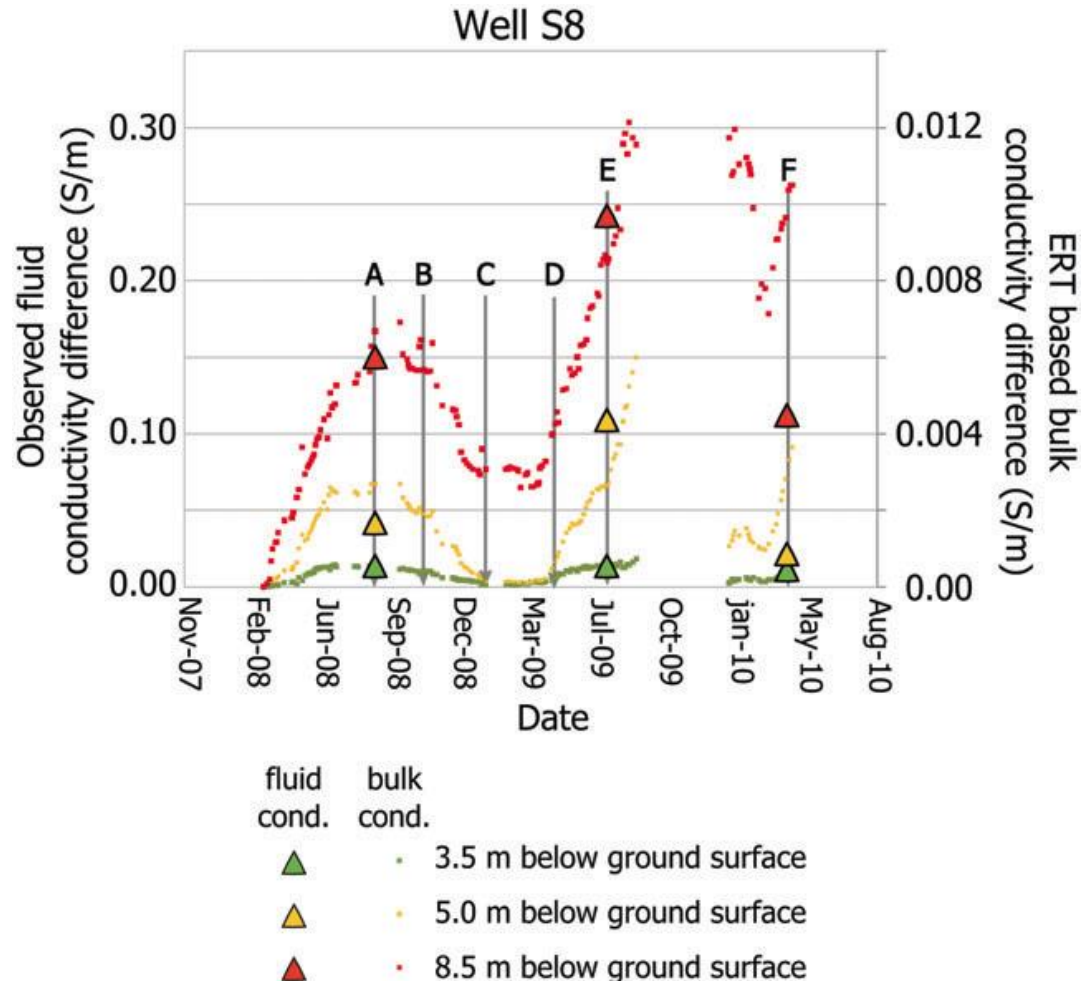
Monitoring



A



Monitoring



Result Summary

- A Large increase in sodium in deeper sampling ports. Mid and lower ports display modest increase in iron, large increase in sulfate, slight increase in organic acids and pH. Fermentation beginning slowly.
- B Low methane. Slight increase in iron and manganese. Slow fermentation (HGL 2009a).
- C Similar to October sampling event. Low methane. Slow fermentation.
- D Substantial development of reducing conditions since January. High methane production. Low oxygen reduction potential and dissolved oxygen (HGL 2009b).
- E Significant decrease in sodium since Aug. 2008. Large increase in iron and organic acids. Large decrease in sulfide and pH.
- F Significant decrease in fluid conductivity at low and middle ports since Aug. 2009. Black particulate observed in several lower ports. (Fluid conductivity sampled only.)

Plan de la présentation

Introduction à la
géophysique

Géophysique sur
sites contaminés

Applications

Message à retenir

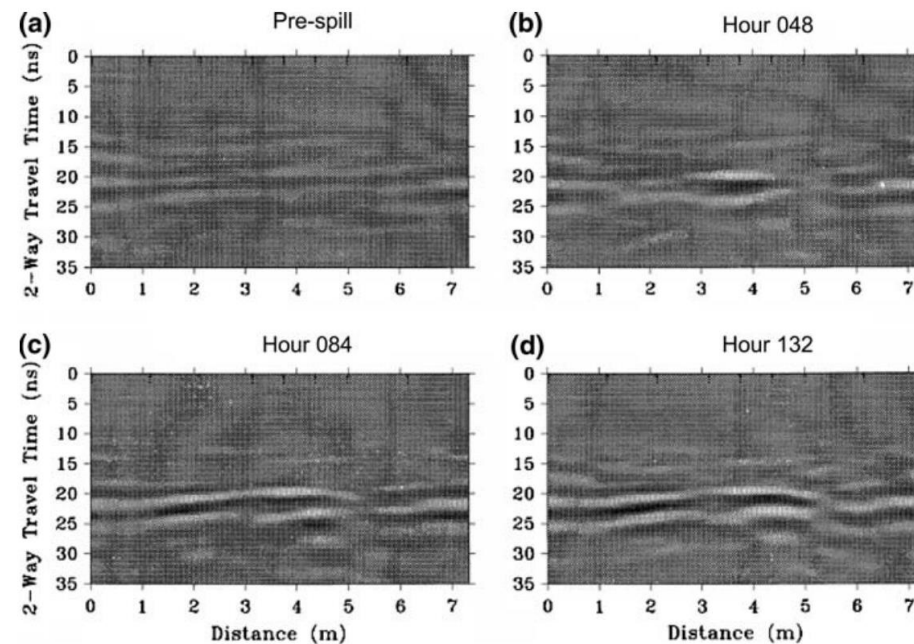
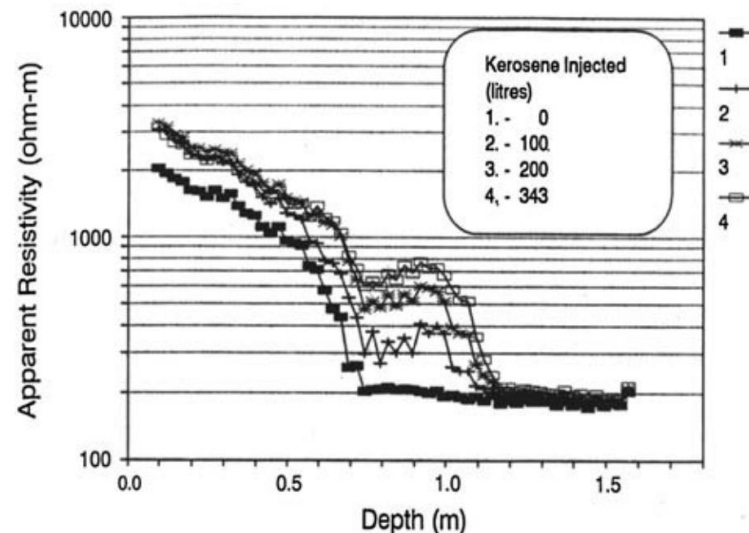
Compréhension
du contexte
(hydro)géologique

Contaminations
solvants chlorés

Contaminations
hydrocarbures

Contamination par des hydrocarbures

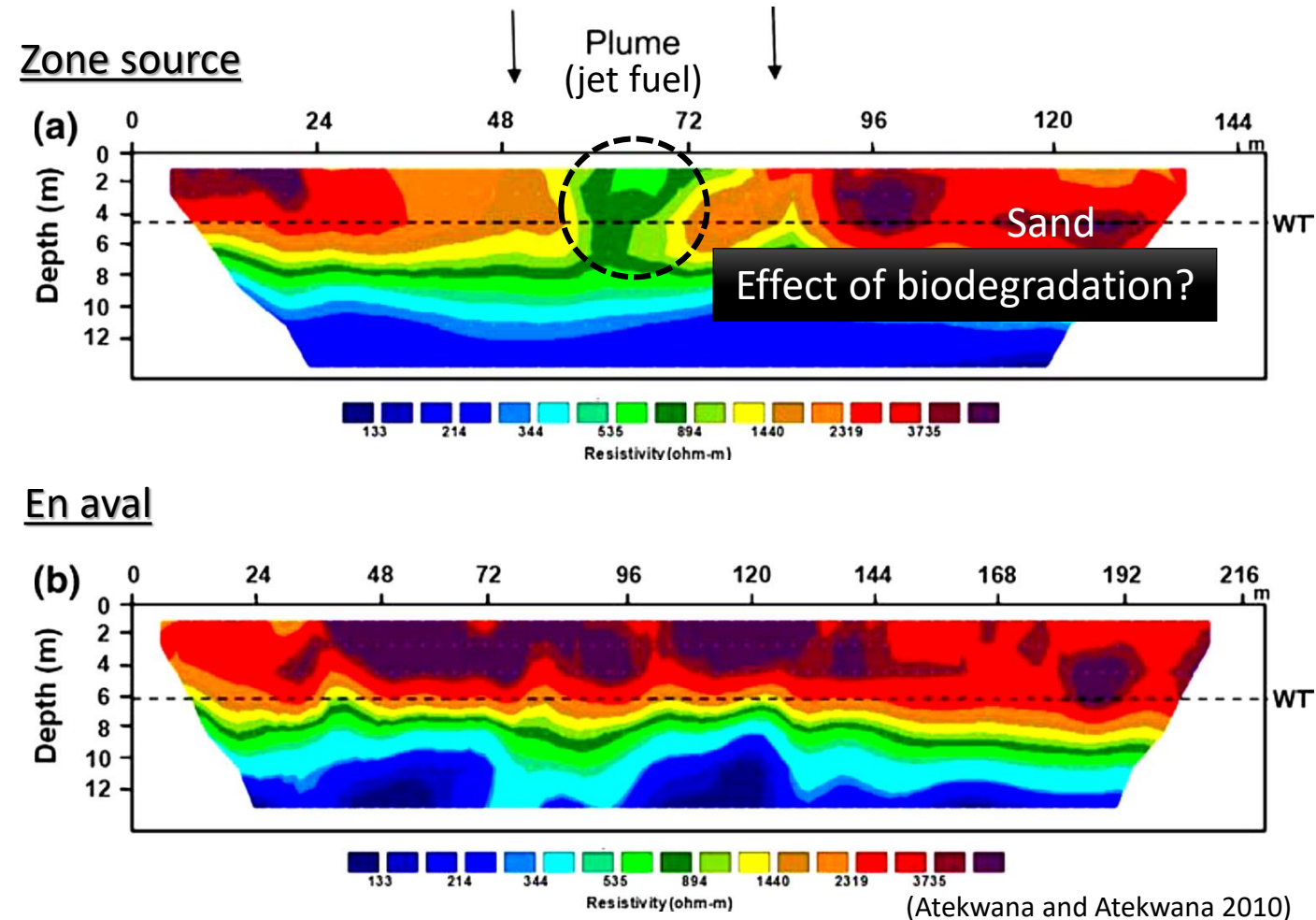
- Déversement récent: le modèle de couche isolante suppose une résistivité électrique plus élevée et une permittivité relative plus faible



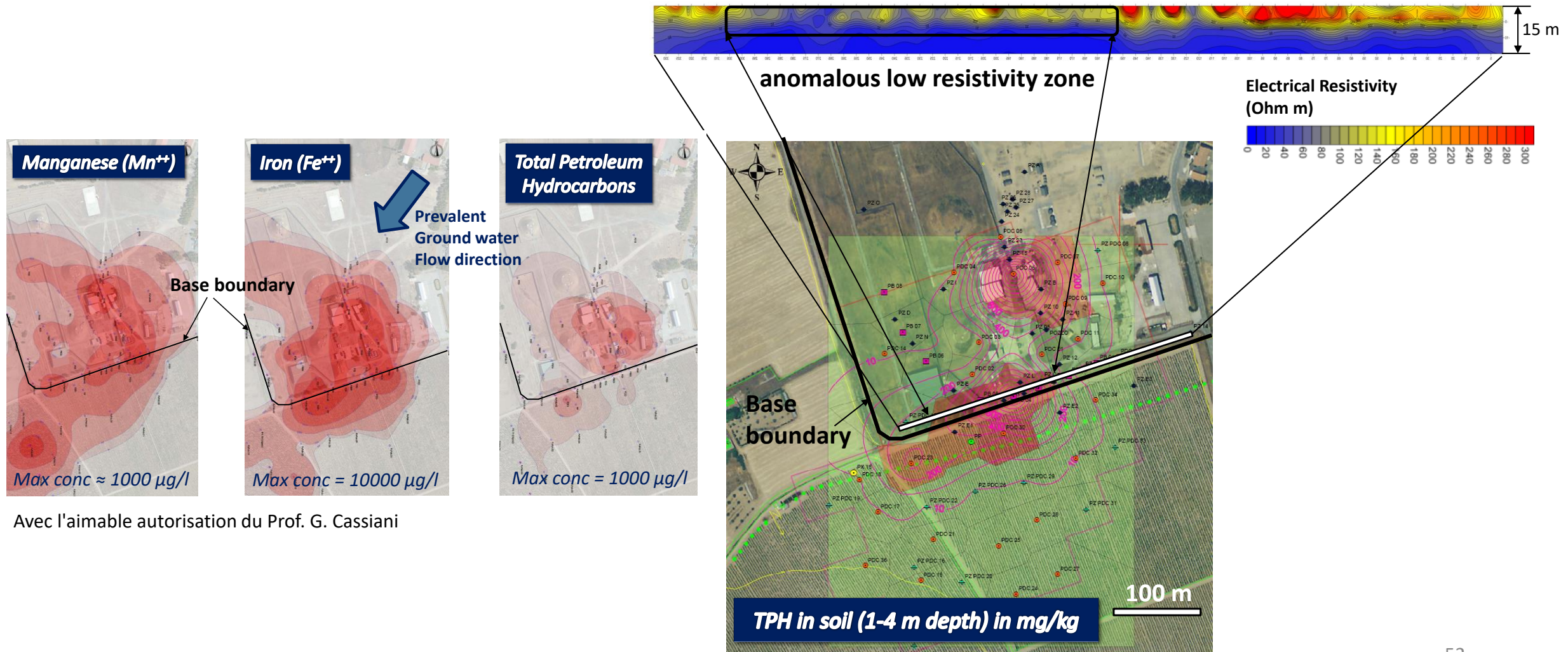
King and Olhoeft, 1989; Schneider and Greenhouse, 1992; Daniels et al., 1992; Endres and Redman, 1993; de Ryck et al., 1993; Redman et al., 1994; Monier-Williams, 1995; Grumman and Daniels, 1995; Endres and Greenhouse, 1996; Campbell et al., 1996 ...

Contamination par des hydrocarbures

- Les déversements plus anciens peuvent subir un processus d'altération et de biodégradation qui peut entraîner une augmentation de la conductivité électrique



Cas 1: Contamination en kérosène

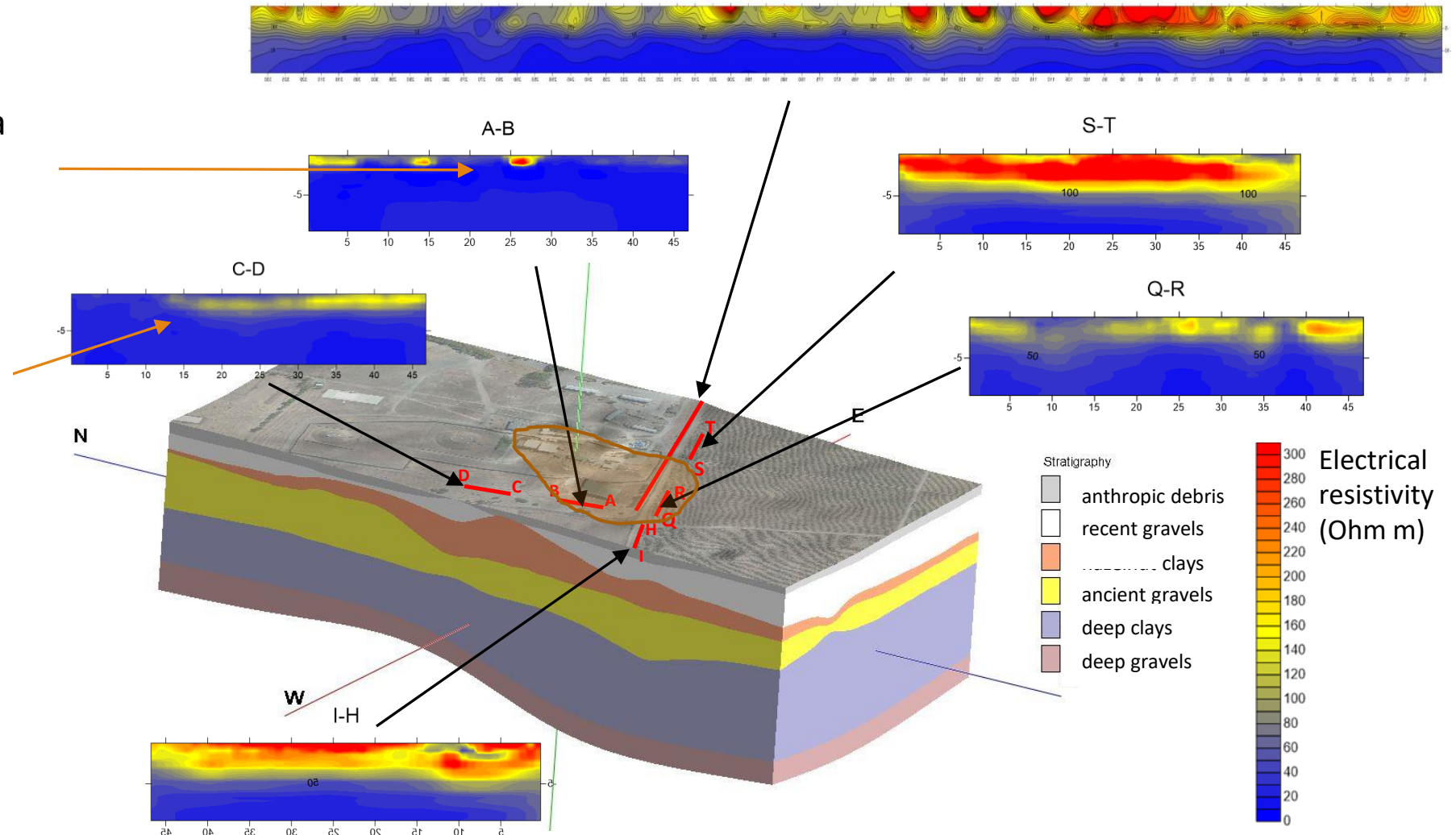


Avec l'aimable autorisation du Prof. G. Cassiani

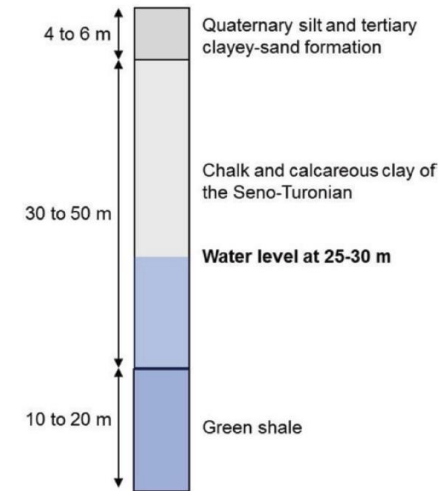
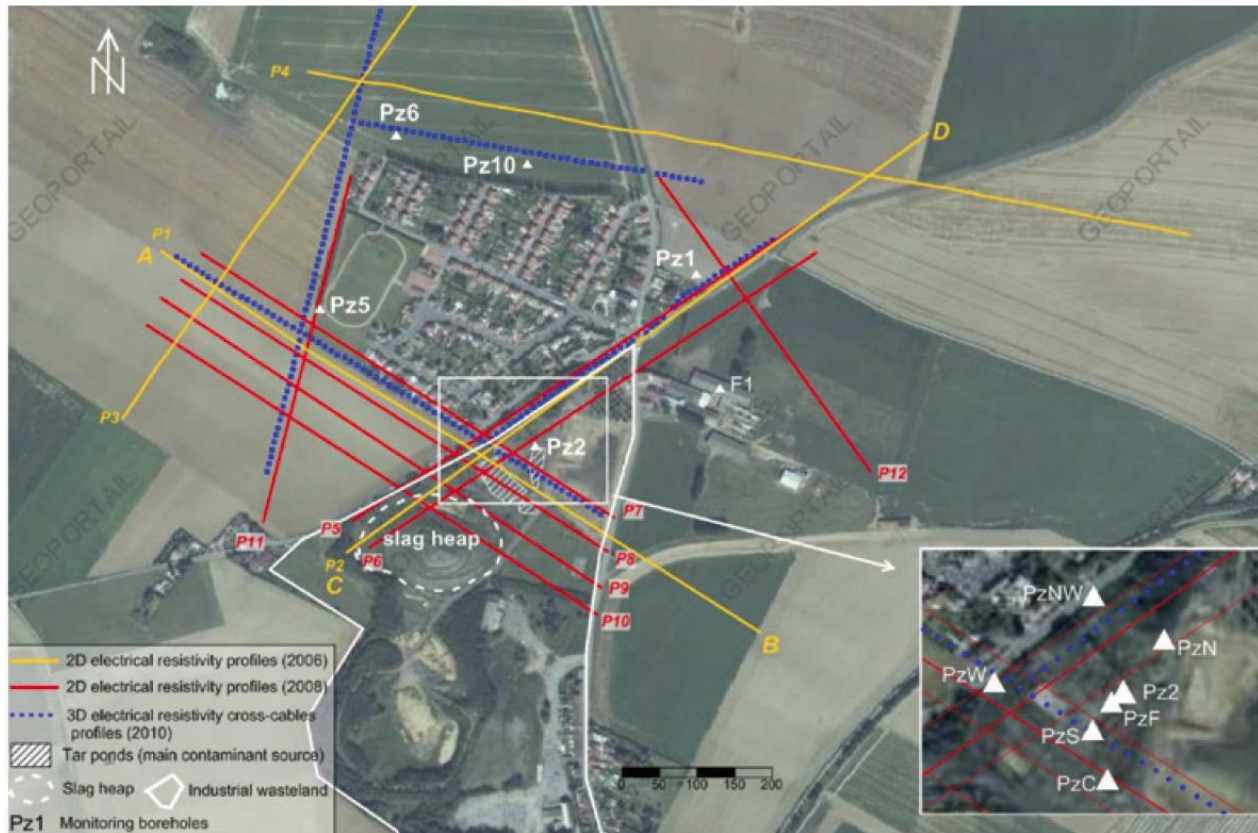
Mais...

Faible résistivité de la
contamination (due à la
biodégradation)

Faible résistivité due à
des origines
lithologiques (argile)

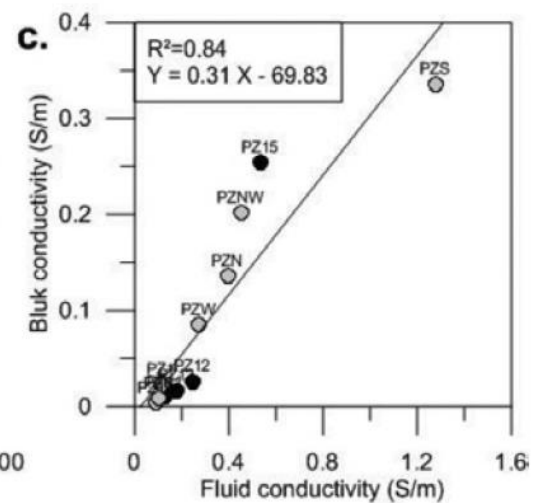
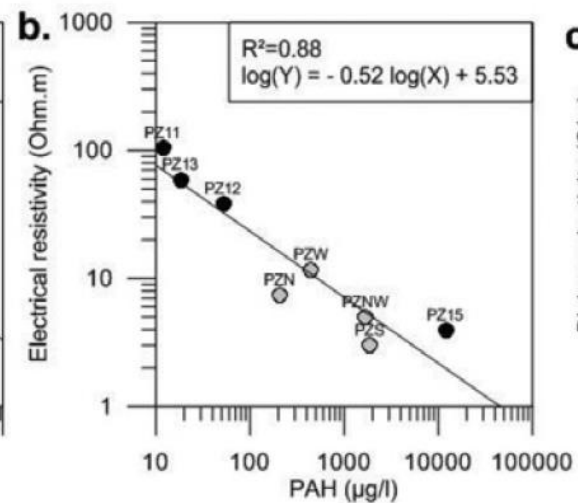
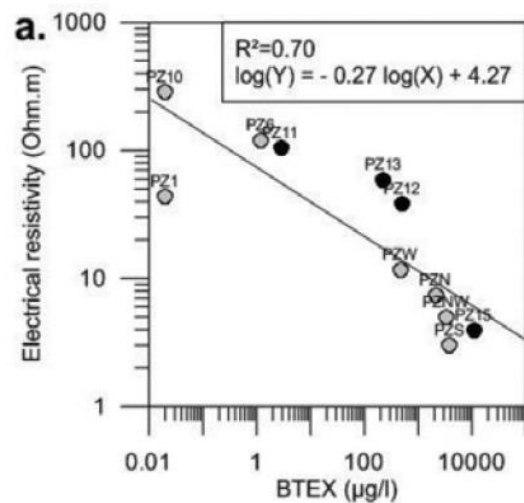
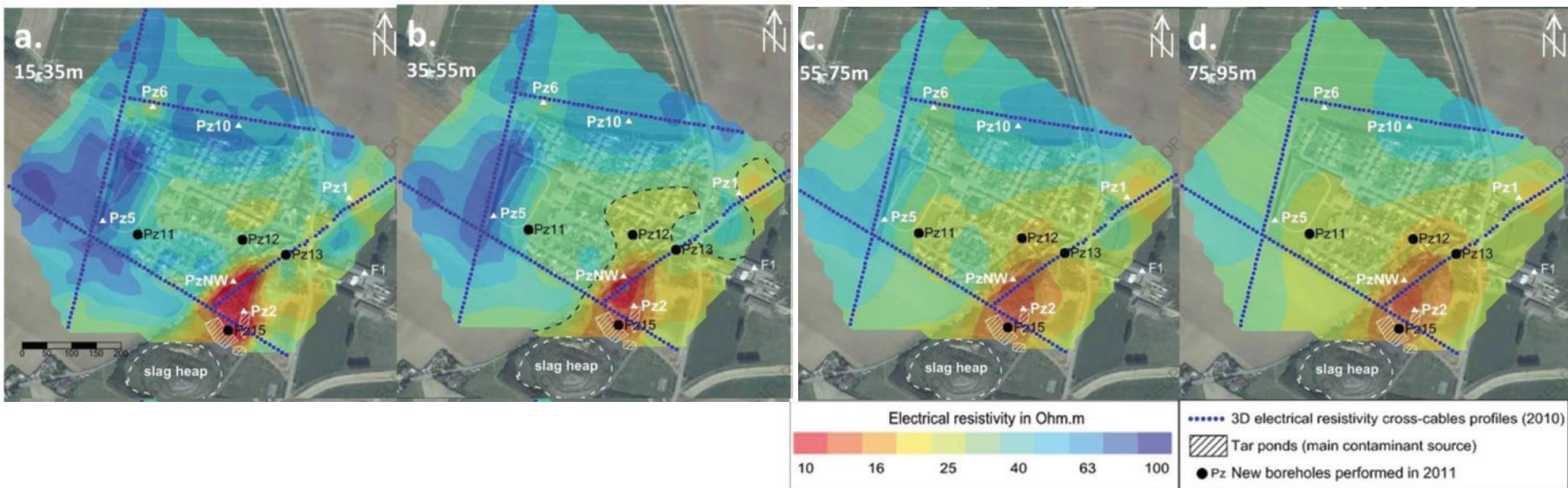


Cas 2: Contamination par des goudrons acides



Selected geochemical analyses performed with piezometers in June 2009. PzF3 is located at around 500 m upstream from the coal tar and Pz4 at around 1 km downstream.

	BTEX (µg/l)	PAH15 (µg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	S ²⁻ x100 (mg/l)	C ⁺ (mg/l)	NO ³⁻ (mg/l)	NH ⁴⁺ (mg/l)
PzF3	ND	0,06	77,4	9,5	56,8	63,2	2,47
PzS	2793	3845	2110	2350,8	1760	7,1	1452
PzN	1905	266	512	18,9	1420	4,7	661
PzW	109	265	435	18,8	602	2,8	352
PzNW	3914	4963	1520	377,4	1090	ND	830
Pz1	ND	0,08	47,1	9,6	81,6	22,6	ND
Pz5	ND	0,06	44,6	18,9	78,3	31,9	
Pz6	ND	0,14	54,5	9,7	148	156	5,62
Pz10	ND	0,08	64,5	19,5	115	102	
Pz4	ND	0,07	37,6	9,9	30,7	27,8	ND

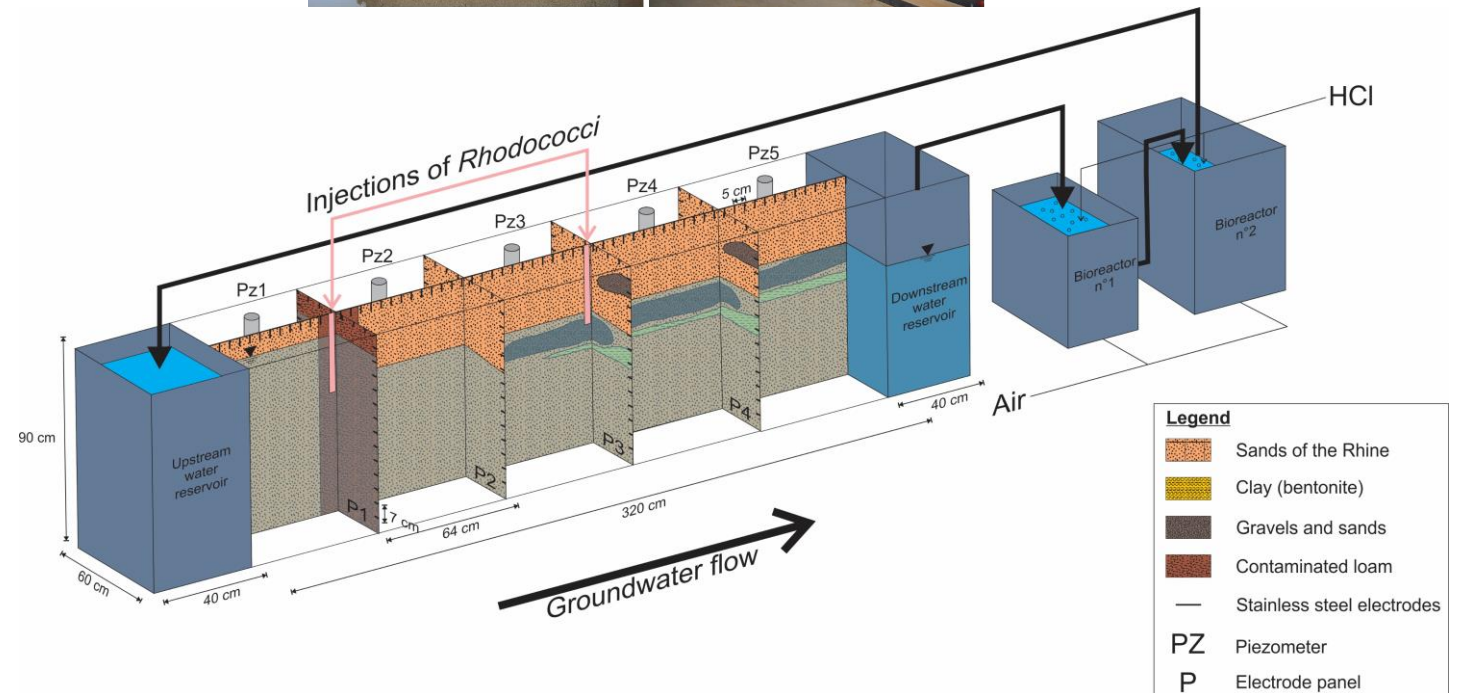
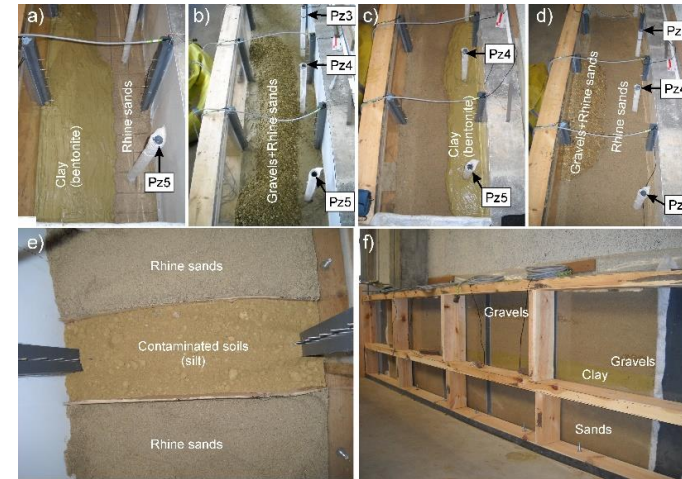


Cas 3: Suivi de biodégradation en cuve

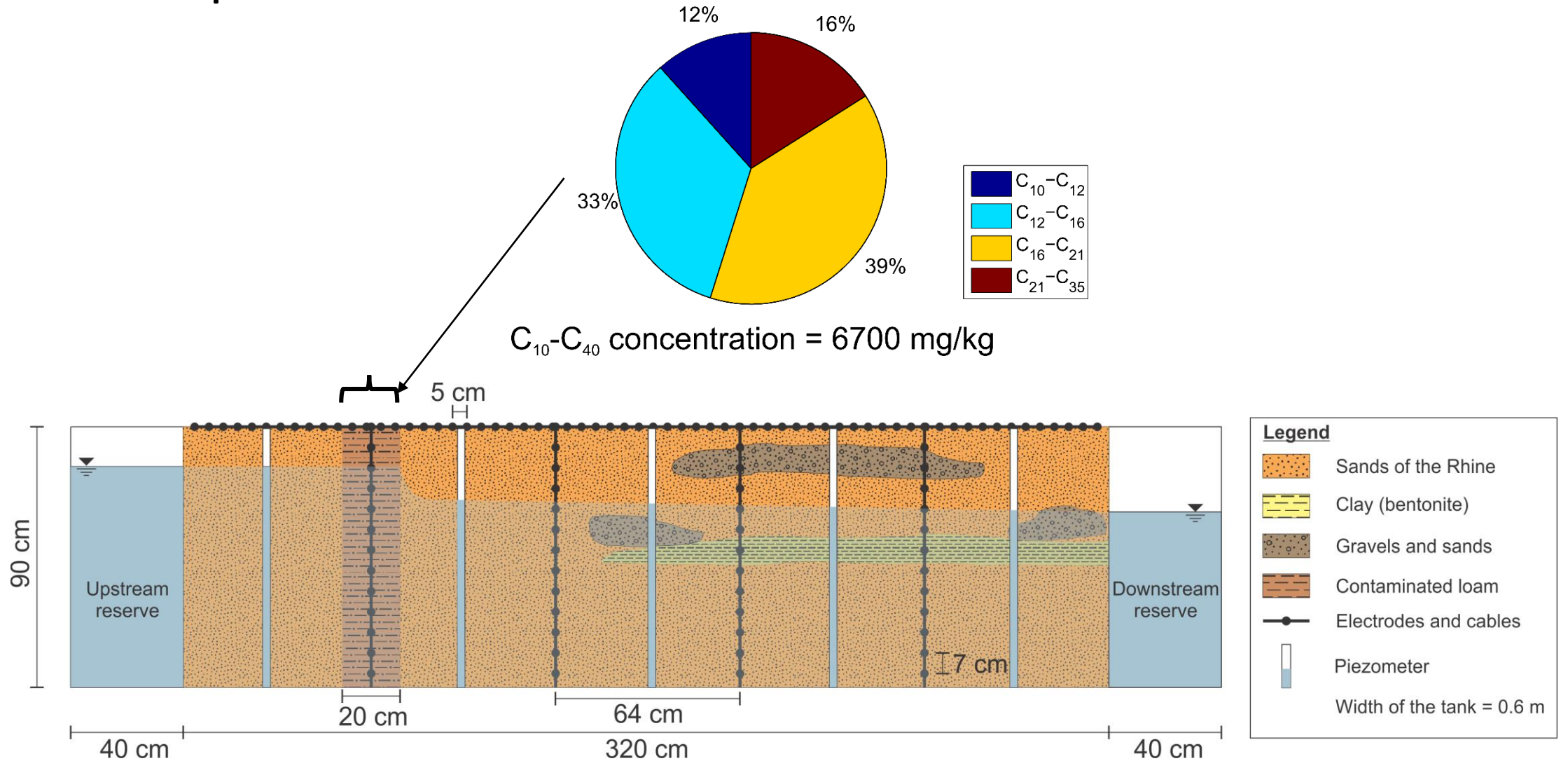
- Pourquoi une expérience à l'échelle d'une cuve?
 - Les colonnes offrent un bon contrôle sur les paramètres de l'expérience MAIS rarement représentatives des conditions de terrain et ne permettent pas d'étudier le filtre de déformation dû à l'inversion
 - Cuve à dimensions métriques se rapproche des conditions de terrain (hétérogénéité, effets 3D, surface libre ...) mais toujours avec contrôle des paramètres
 - Collaboration avec CWBI et Sanifox

Description de la cuve

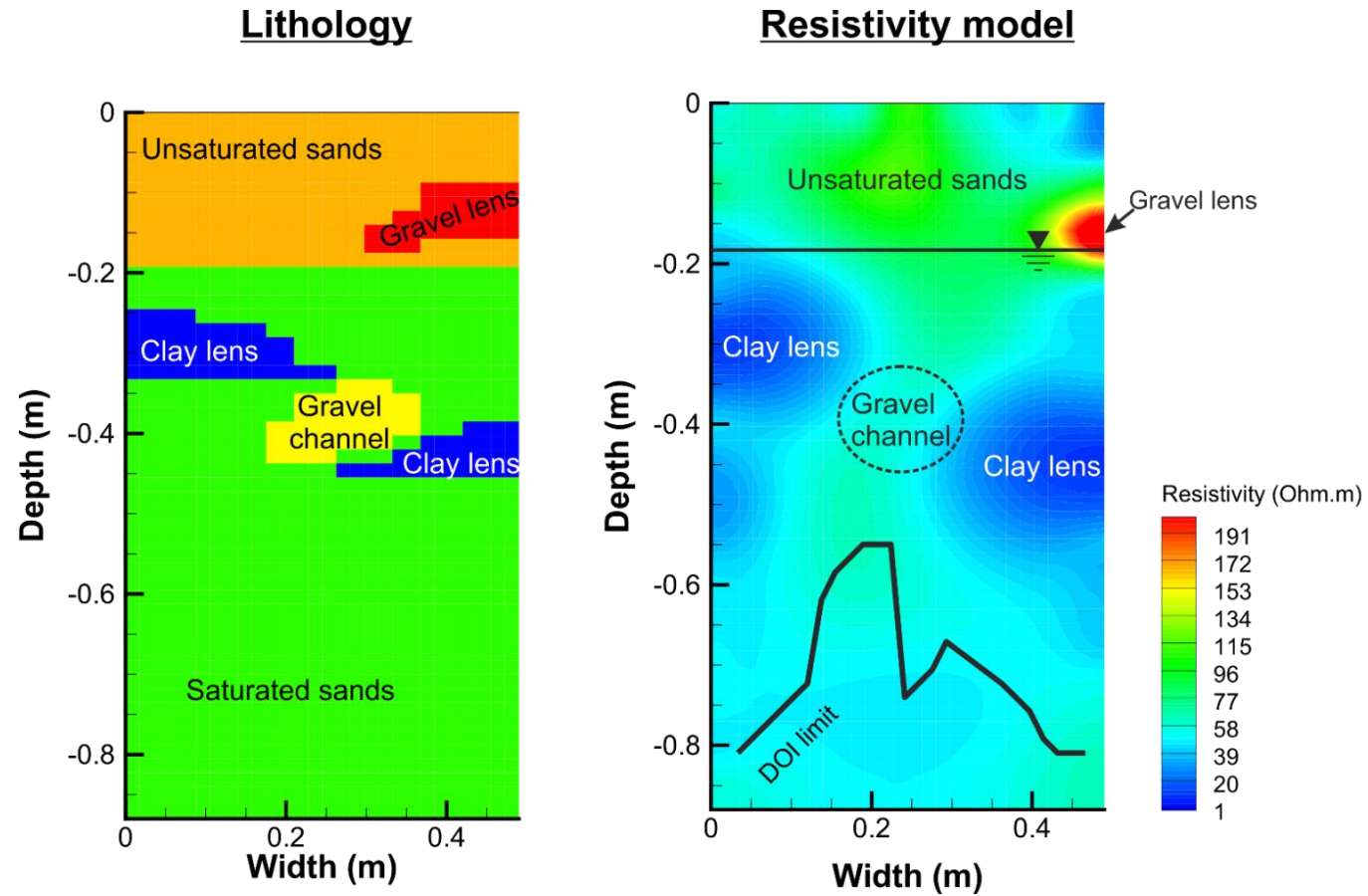
- Matériaux de remplissage
 - Sable du Rhin
 - Gravier
 - Argile
 - Terre polluée (limons argileux)
- Equipement électrique
 - 4 panneaux verticaux d'électrode
 - 1 profil de surface



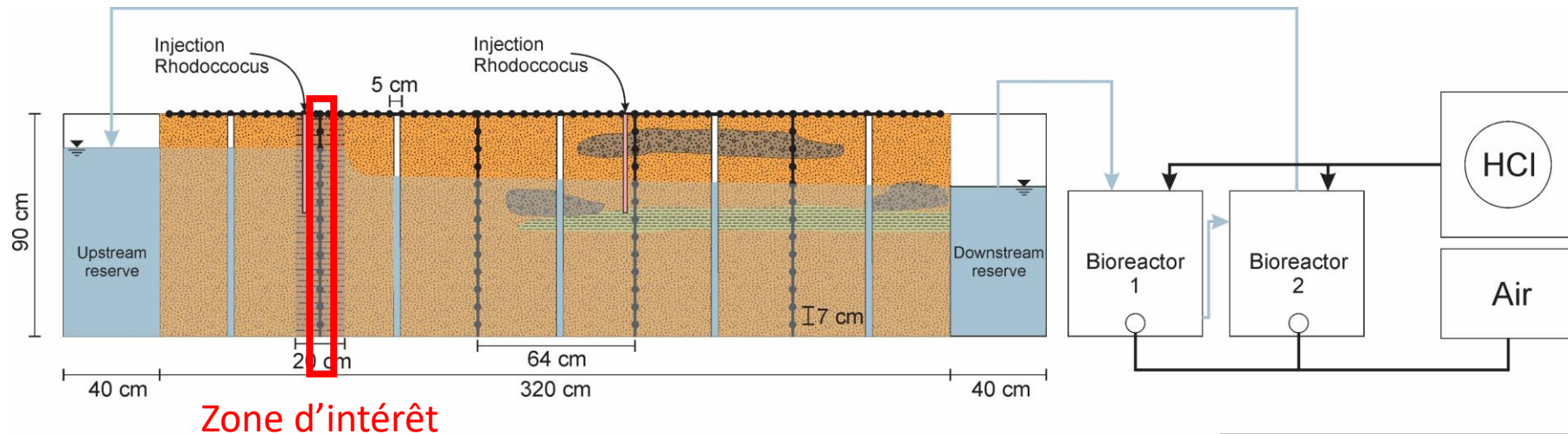
Description de la cuve



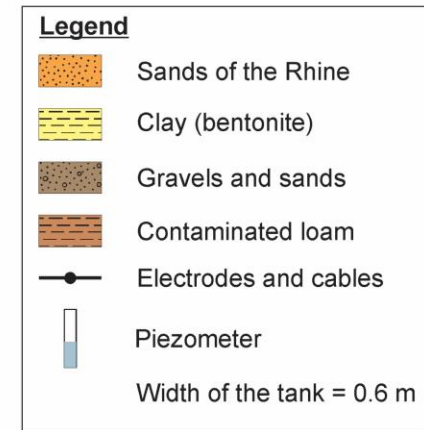
Validation du dispositif: Panneau n°3



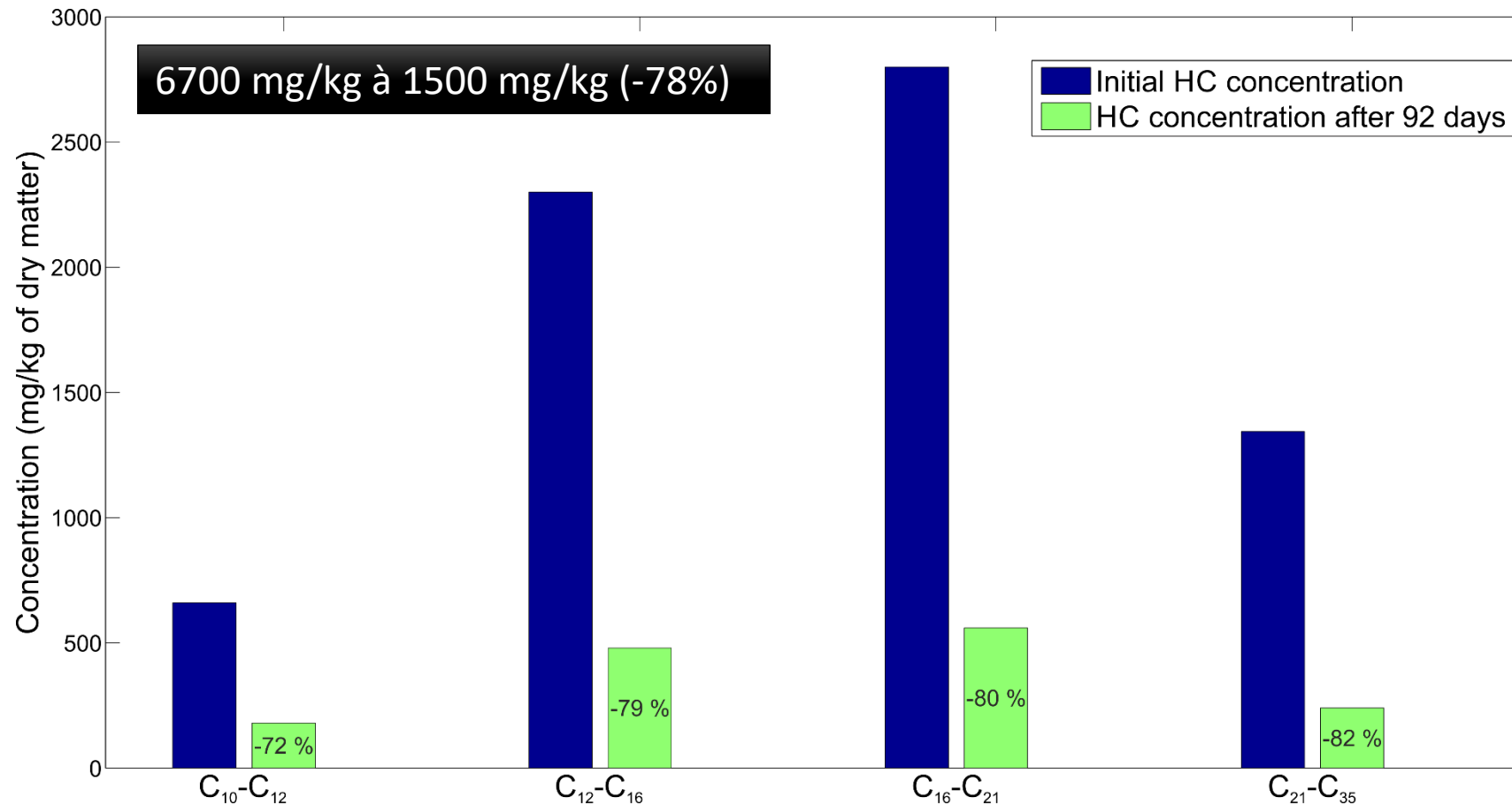
Bioaugmentation: 10/06/2013 -16/10/2013



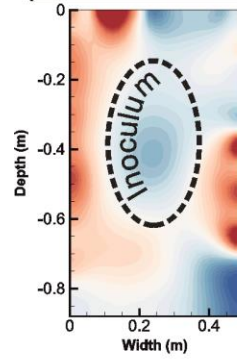
- Inoculation de *Rhodococcus erythropolis* T902.1
- Suivi microbiologique réalisé par CWBI
- Flux moyen = 13.6 L/jour



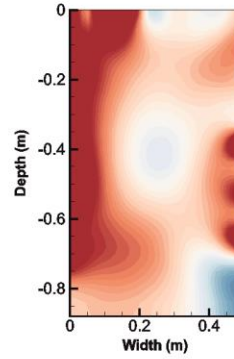
Effacité de *Rhodococcus erythropolis* T902.1 après 92 jours (à l'endroit d'inoculation)



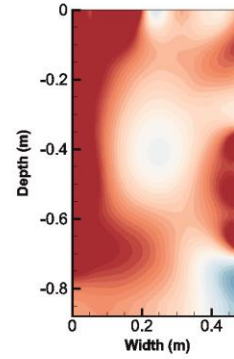
0 days
(after inoculation)



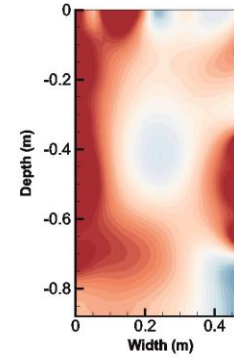
7 days



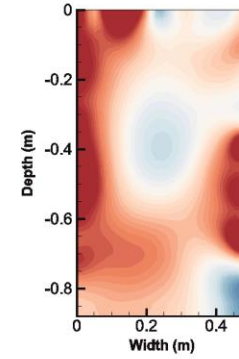
14 days



21 days

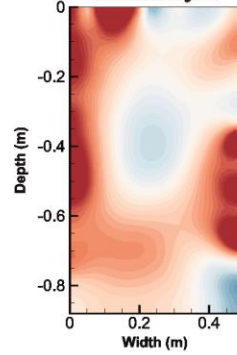


29 days

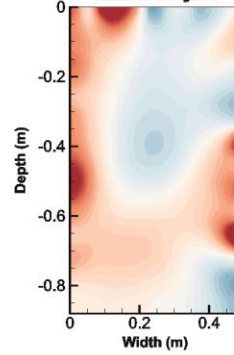


Evolution des
variations de
résistivité relative
(en %) par rapport à
l'image de fond

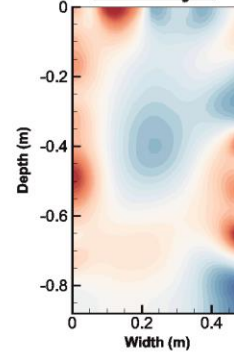
35 days



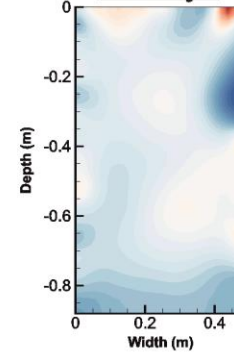
43 days



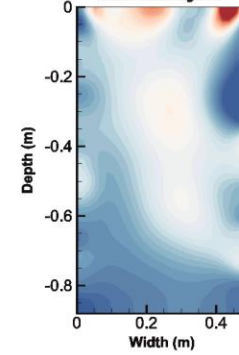
49 days



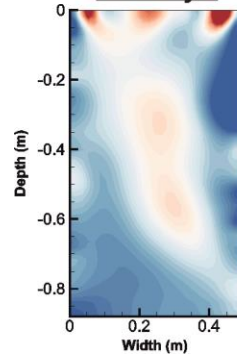
56 days



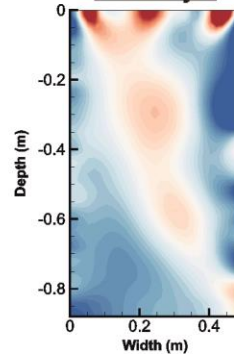
63 days



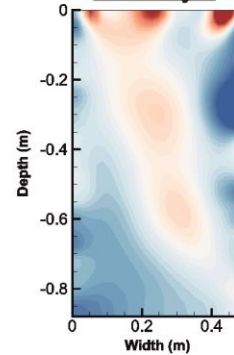
70 days



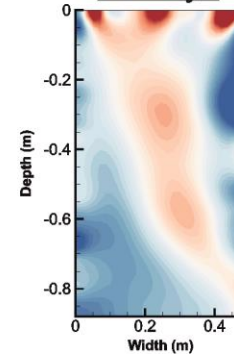
77 days



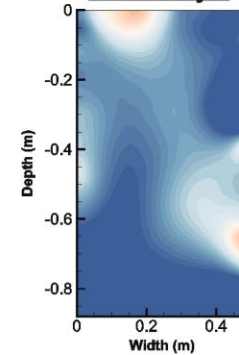
84 days



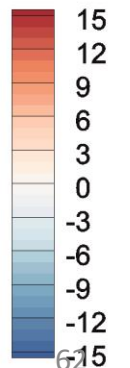
91 days



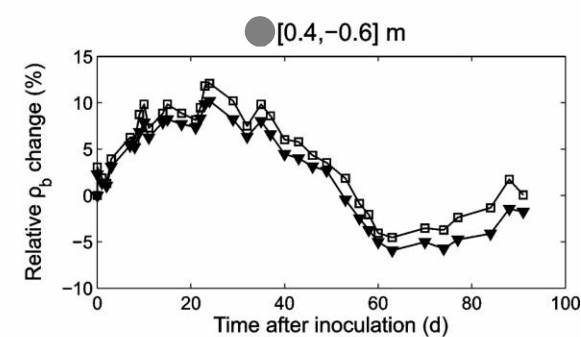
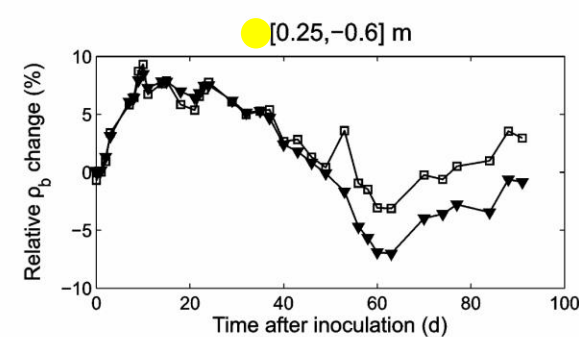
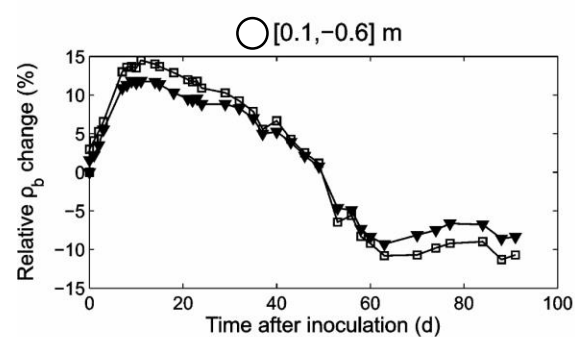
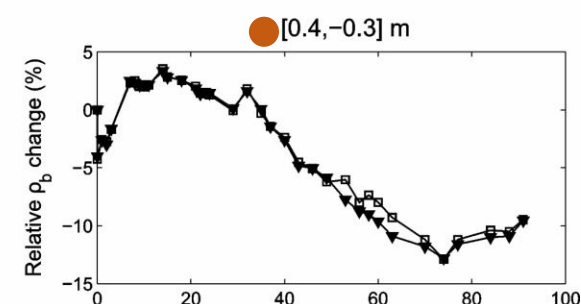
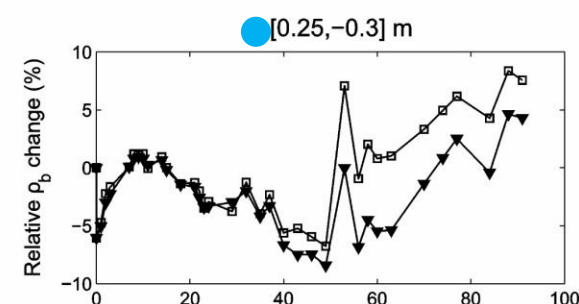
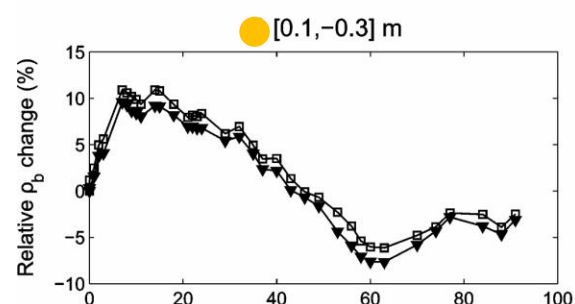
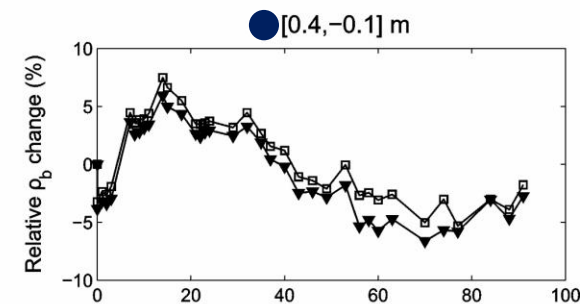
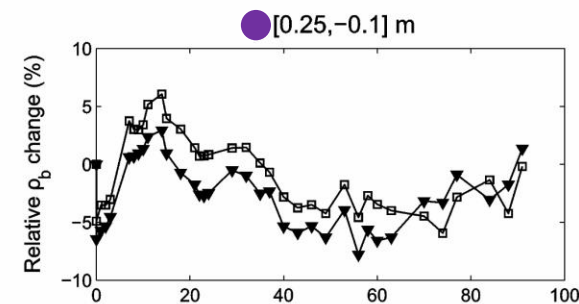
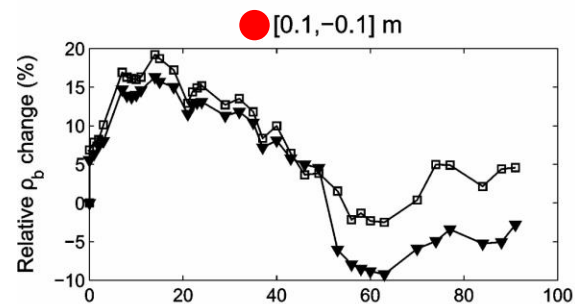
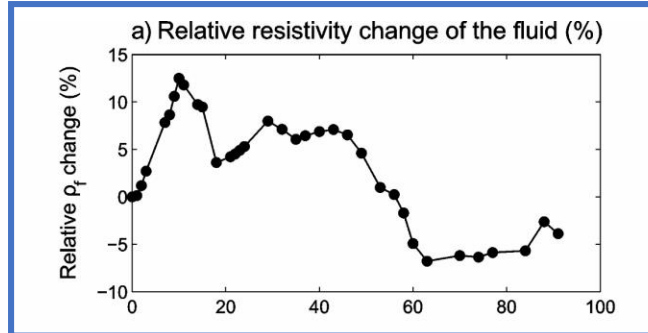
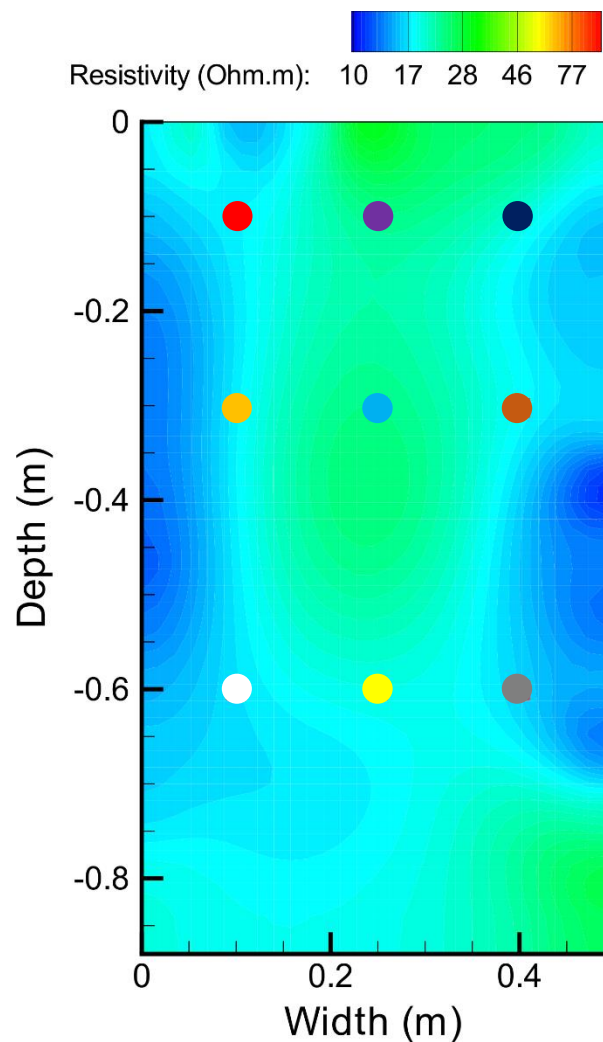
128 days



% Resistivity change

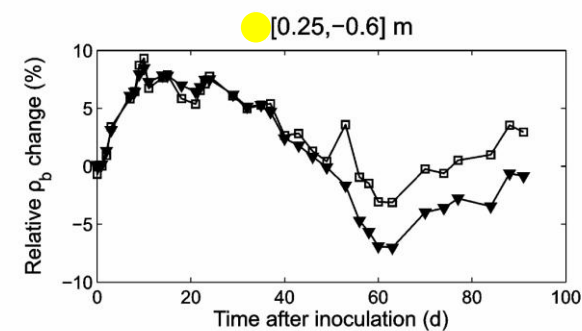
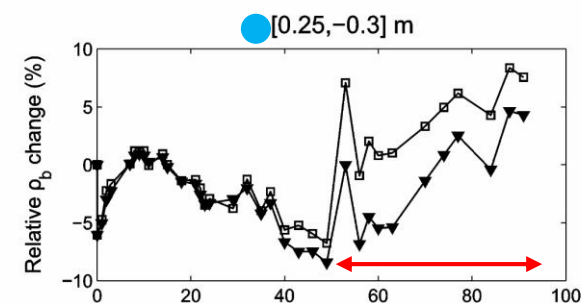
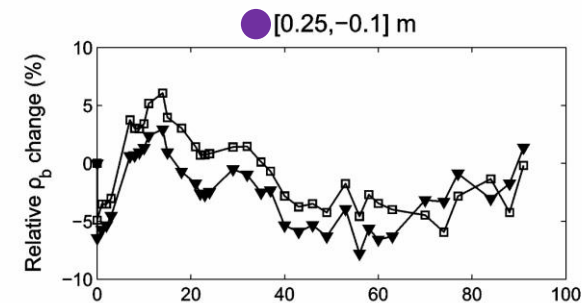
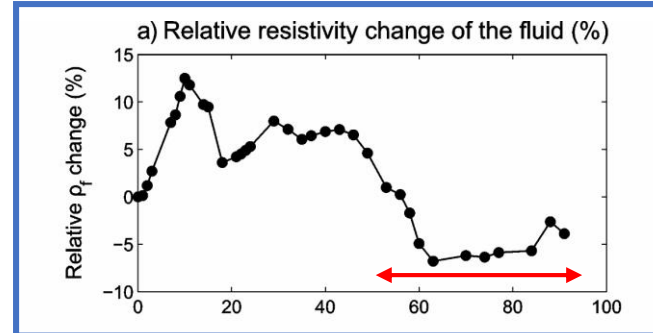
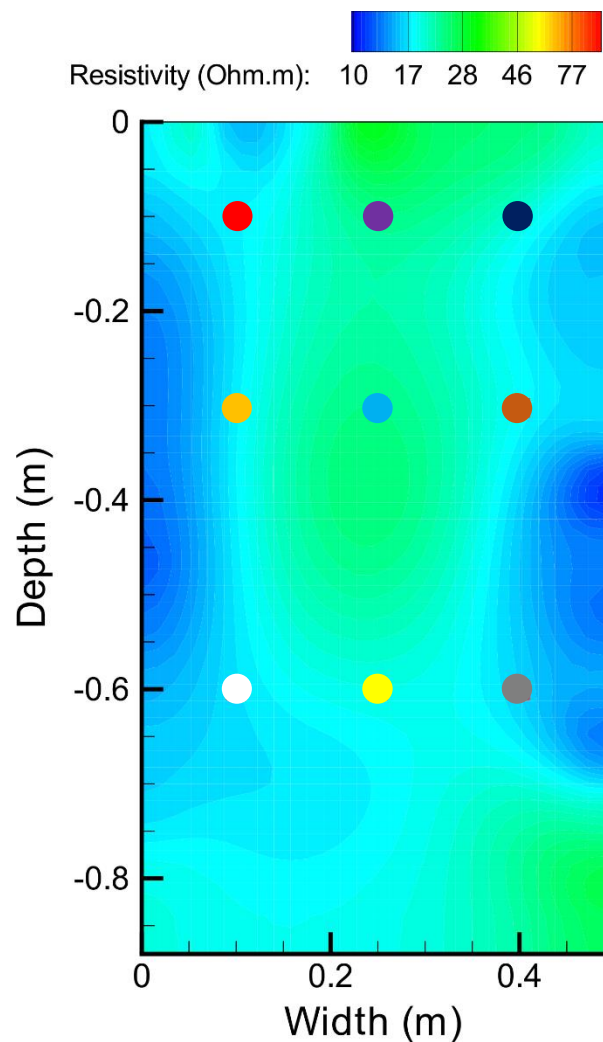


$\% \rho_f$ vs $\% \rho_b$



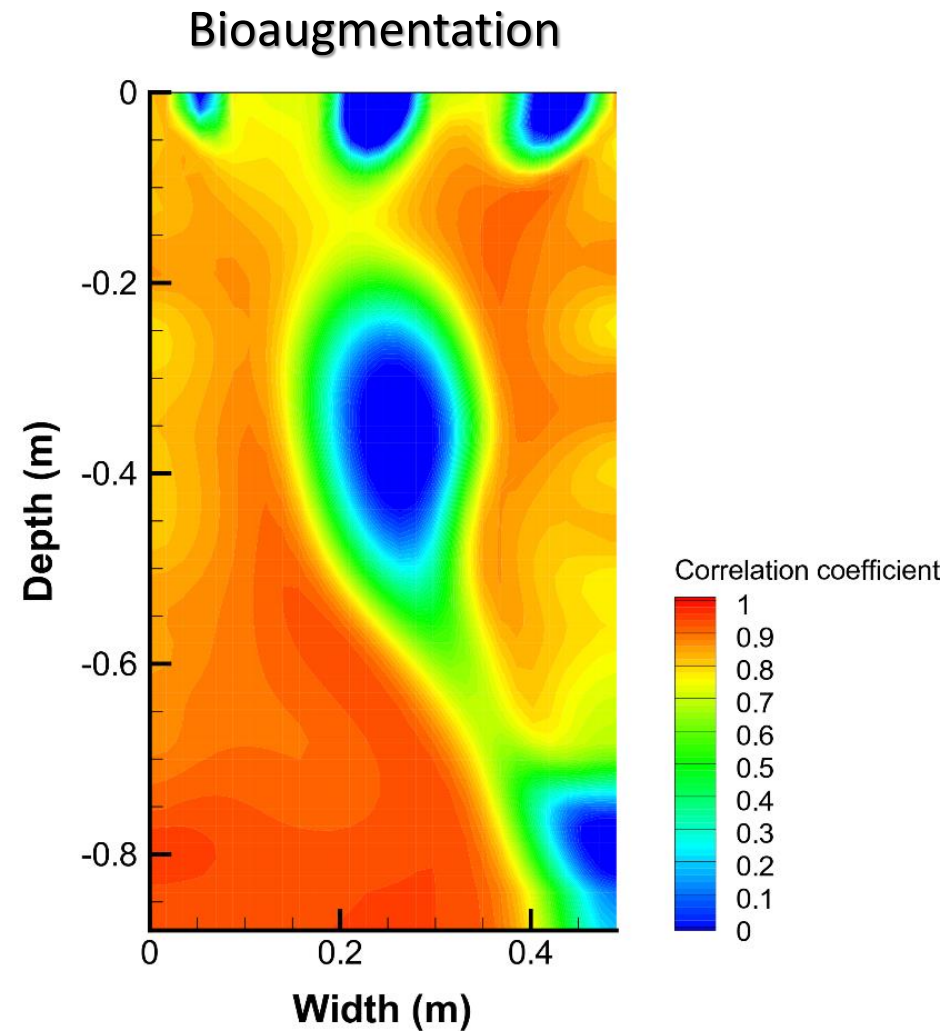
○ Error model n°1
● Error model n°2

$\% \rho_f$ vs $\% \rho_b$



Divergence entre
les changements
de propriétés
électriques du
fluide et du sol

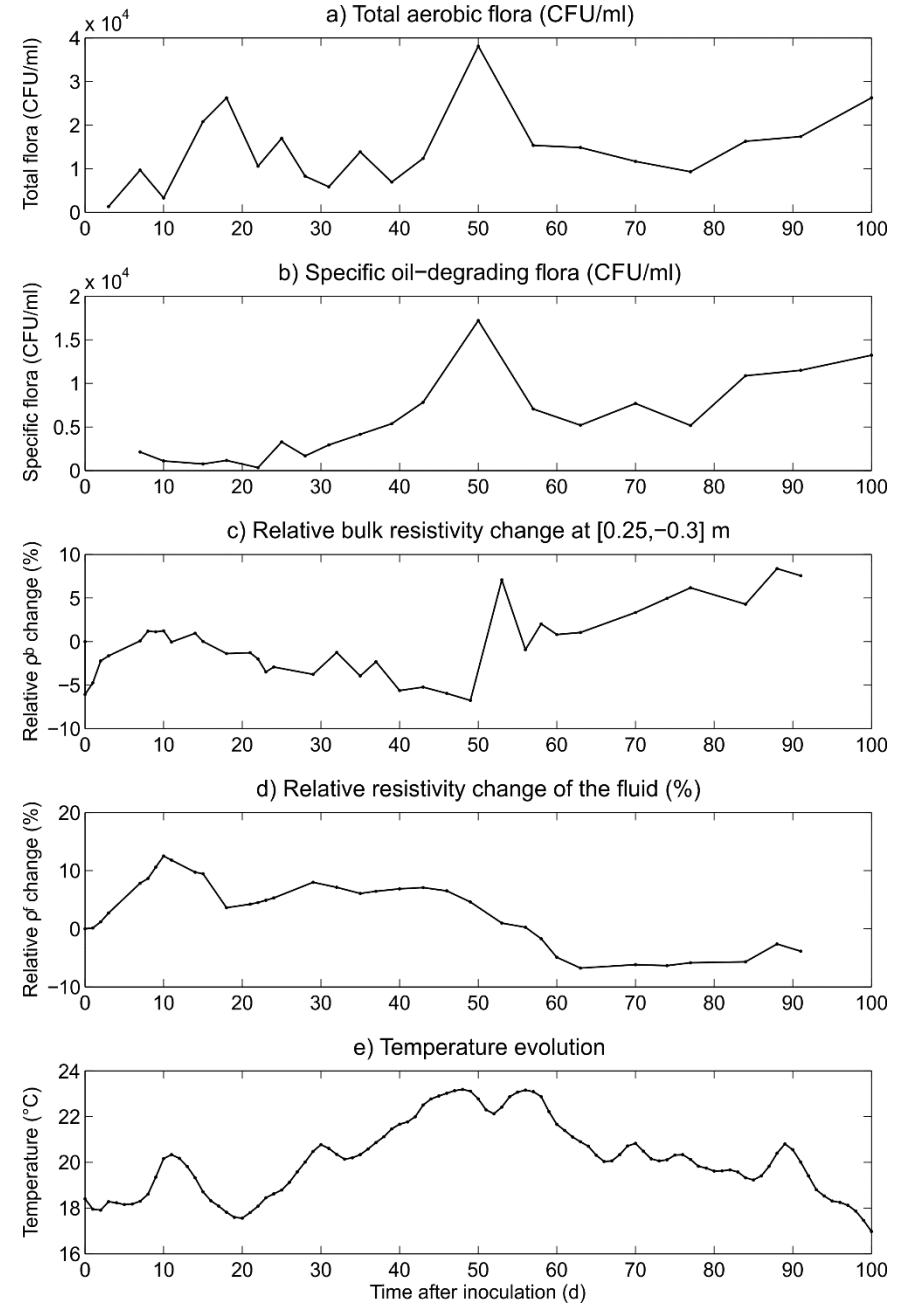
Corrélation entre les propriétés électriques du fluide et du sol



- Pas de corrélation dans la zone centrale d'inoculation

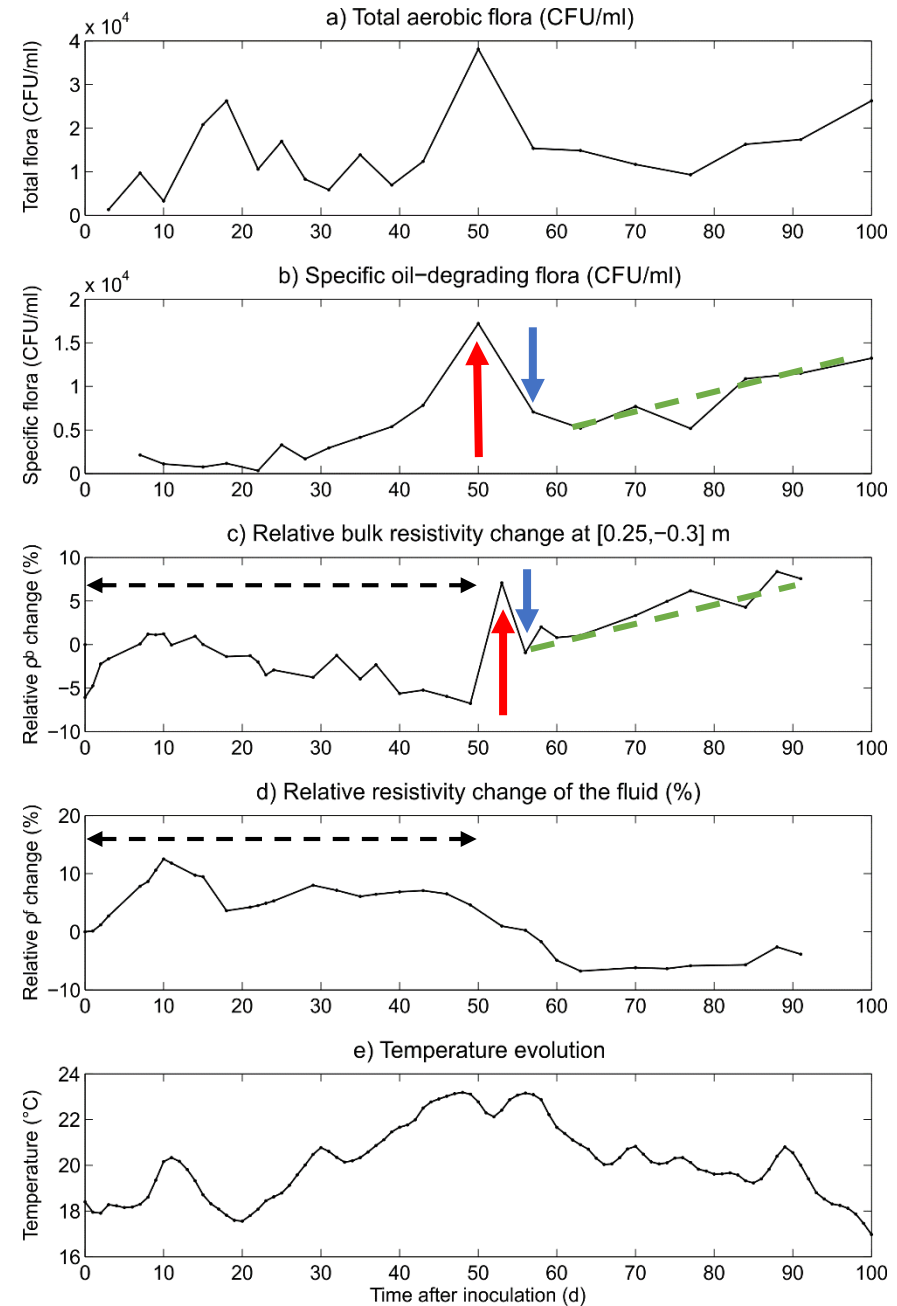
2 phases dans les changements de résistivité électrique:

- 0 à 50 jours: principalement influencé par les propriétés du fluide
- 50 à 91 jours: influence des microorganismes

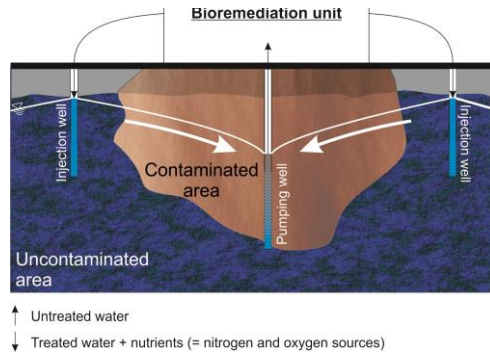


2 phases dans les changements de
résistivité électrique:

- 0 à 50 jours: principalement influencé
par les propriétés du fluide
- 50 à 91 jours: influence des
microorganismes

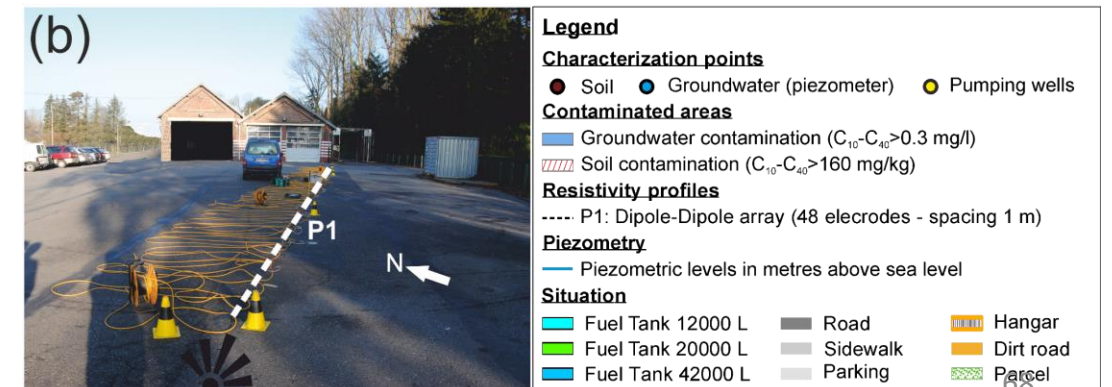
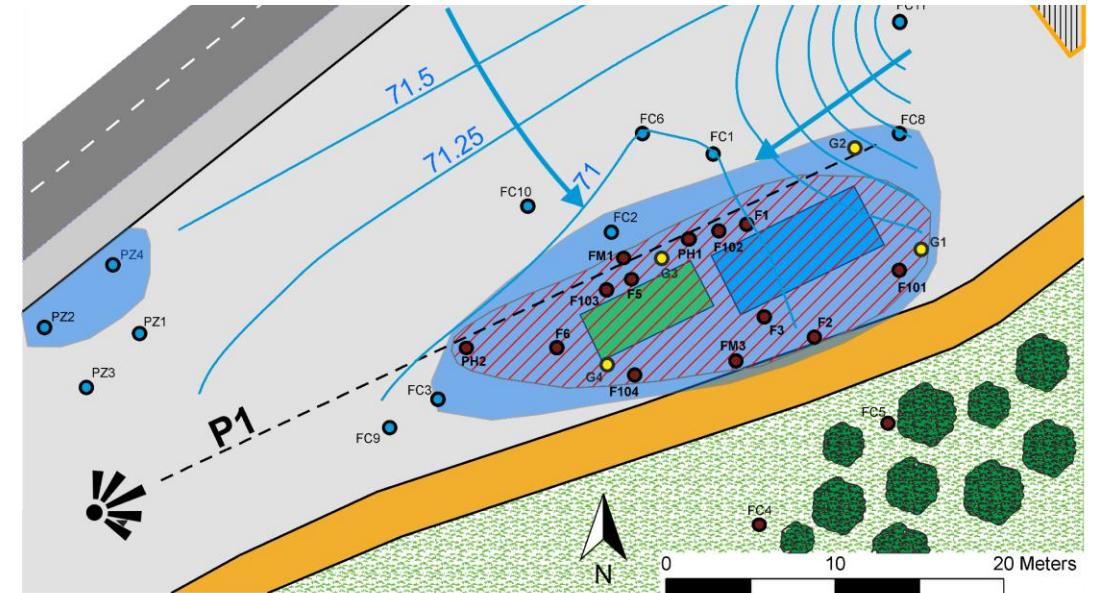


Cas 4 : Suivi atténuation naturelle après biostimulation sur site

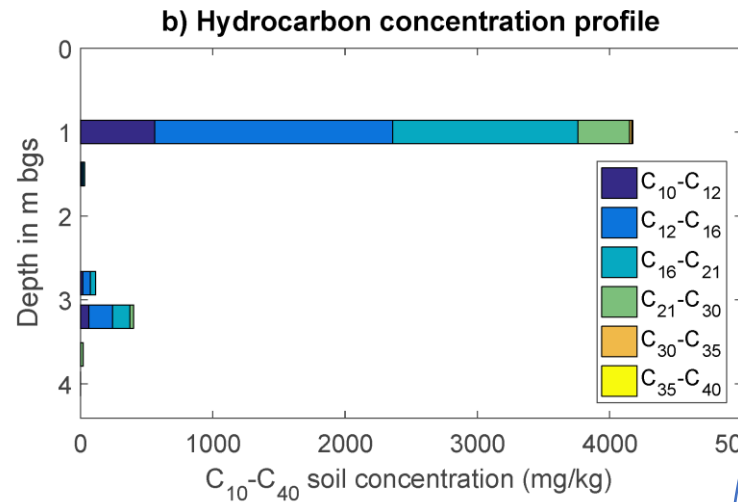
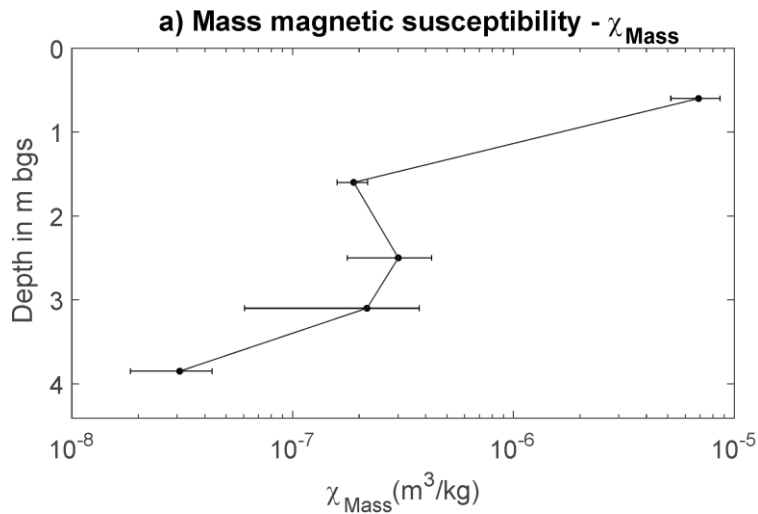


1. Pompage d'eau contaminée
2. Traitement biologique dans une unité de bioremédiation
3. Réinjection de l'eau traitée avec des nutriments (source d'azote) et des accepteurs d'électrons (O_2) en périphérie

➤ Débutée mi-2008, arrêtée mi-2011

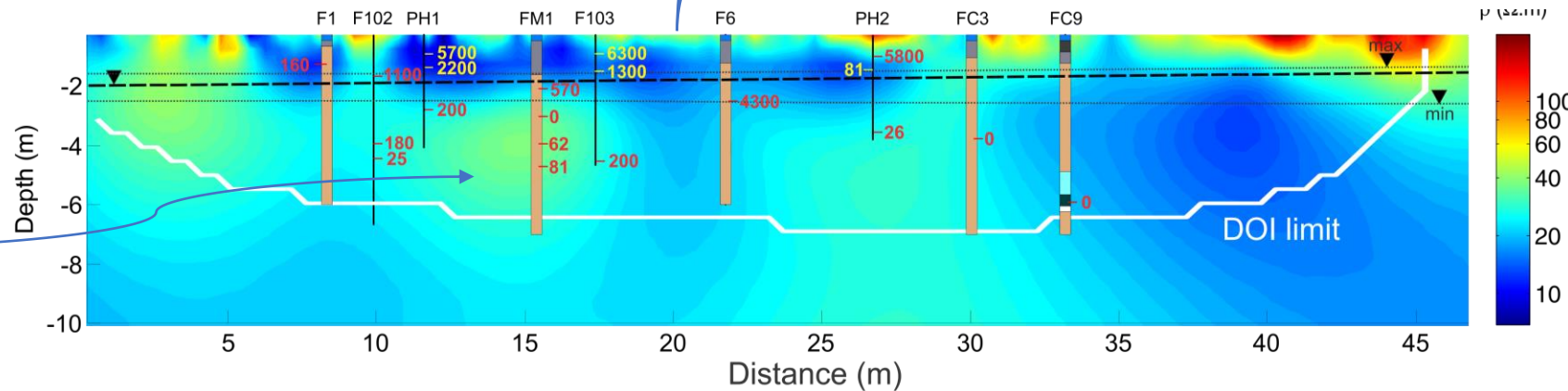


Situation de départ: Décembre 2010



Faible résistivité: libération d'acides carboniques, accumulation de biomasse et bioprécipitation possible de minéraux conducteurs

Anomalies résistives dans les sédiments argileux associés aux hydrocarbures piégés [?]



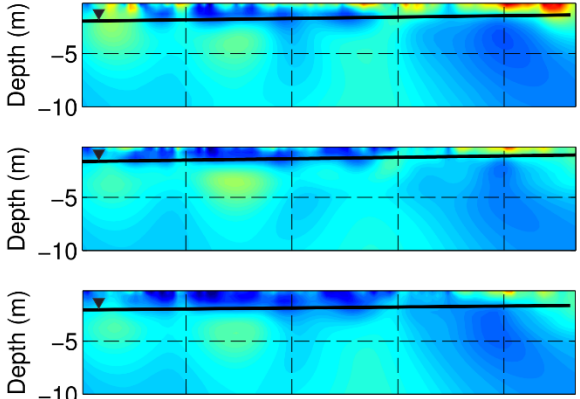
Lithology index

Asphalt	Brown clayey loam	Altered chalks
Ballast	Chalky-clay sediments	1300 C10-C40 concentration in soil (mg/kg of dry matter)
Backfill deposits	Peat	Groundwater level

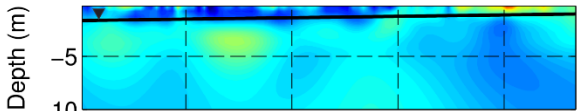
Modèle de résistivité

Biostimulation

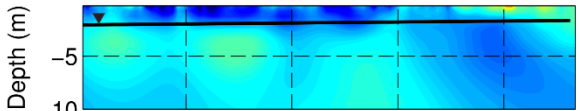
December 19, 2010



March 28, 2011

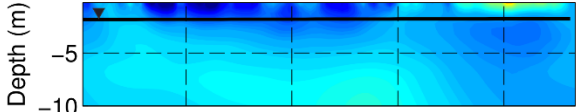


June 1, 2011

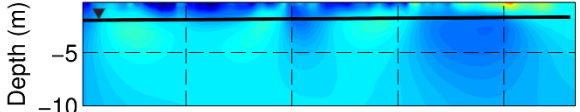


Atténuation naturelle

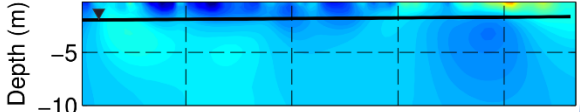
August 4, 2011



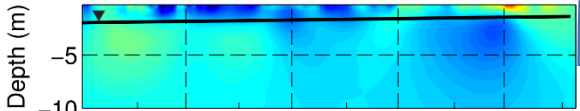
September 6, 2011



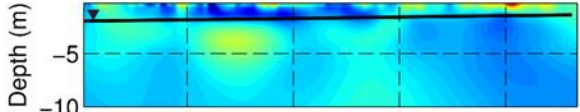
October 11, 2011



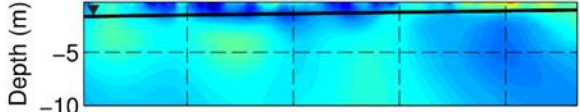
November 10, 2011



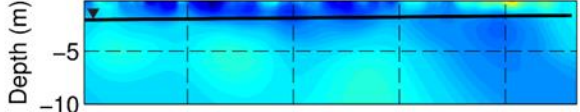
January 18, 2012



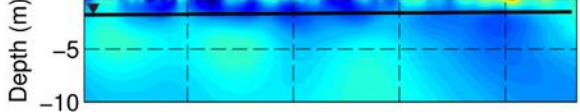
April 4, 2012



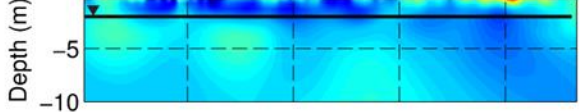
July 5, 2012



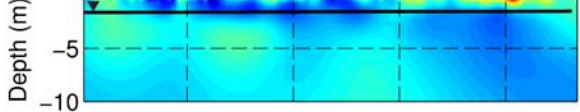
August 5, 2012



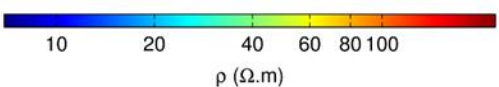
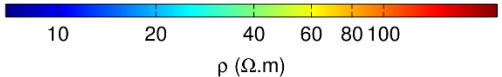
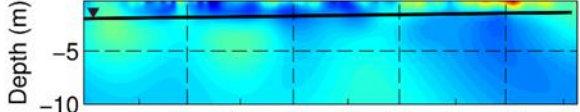
September 21, 2012



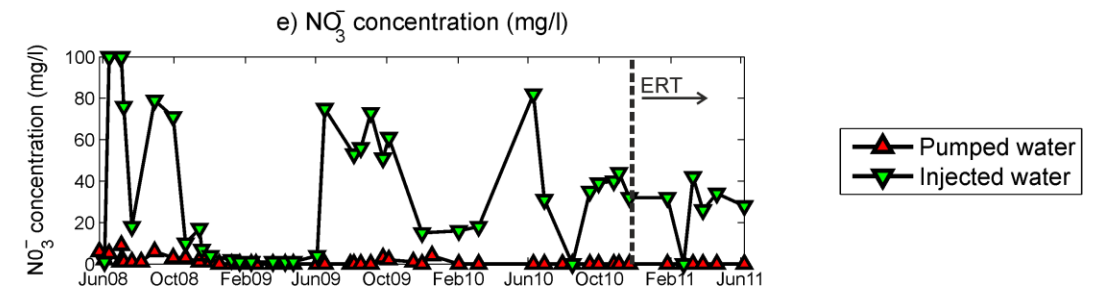
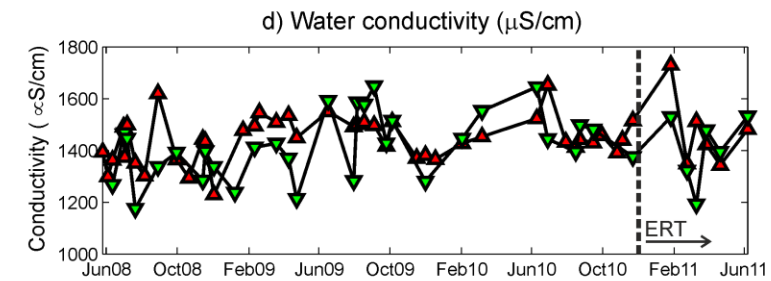
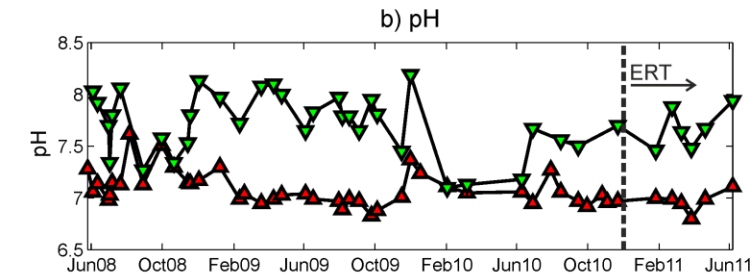
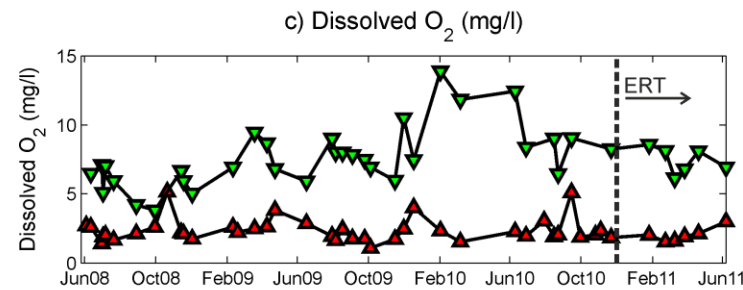
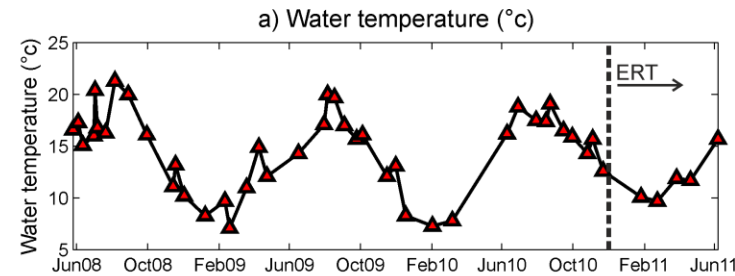
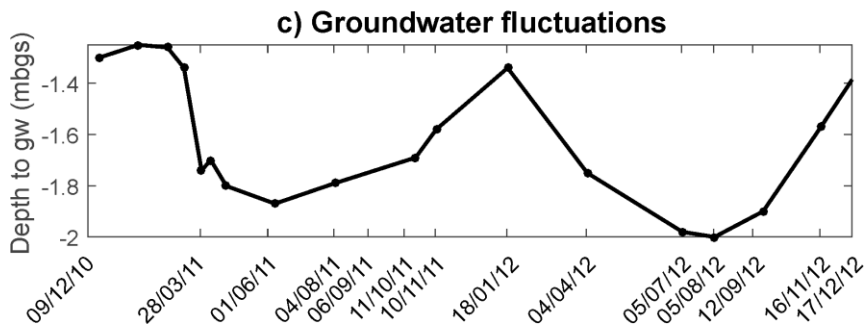
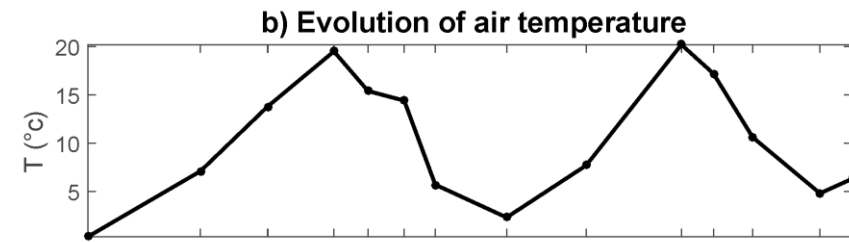
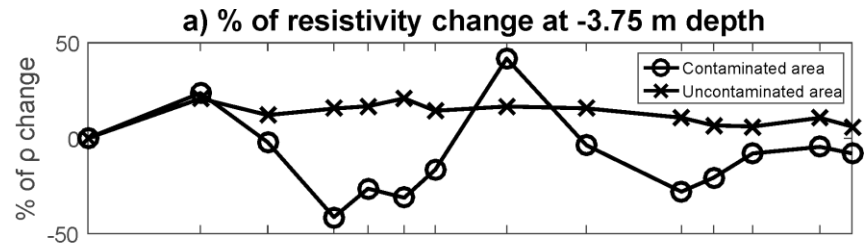
November 16, 2012



December 17, 2012

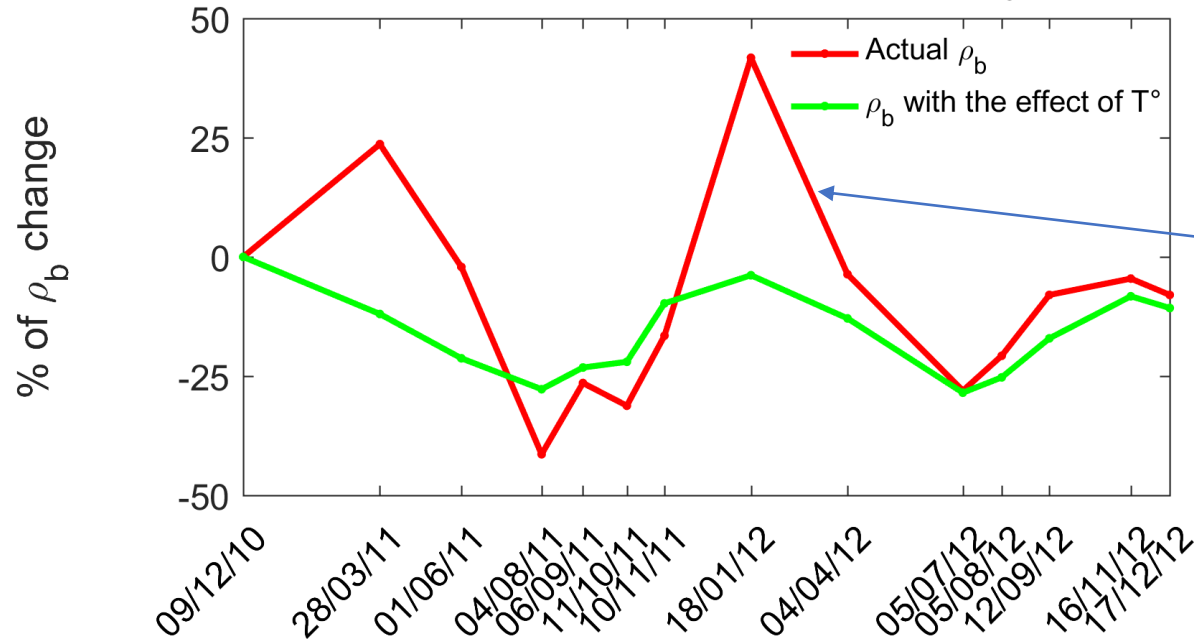


Zoom sur les changements de résistivité électrique



La température seule ne permet pas d'expliquer quantitativement les modifications observées de l'ERT

Actual vs expected (given T°) percentage of ρ_b change at 3.75 m



Hypothèse: réponse contrôlée par l'activité microbienne (libération de produits métaboliques tels que les acides carboniques et l'accumulation de biomasse parmi d'autres processus), qui à son tour est fortement influencée par les variations saisonnières.

Plan de la présentation

Introduction à la
géophysique

Géophysique sur
sites contaminés

Applications

Message à retenir

Compréhension
du contexte
(hydro)géologique

Contaminations
solvants chlorés

Contaminations
hydrocarbures

Message à retenir

- Pas une solution miracle (pas de réponse universelle), elle doit être complétée par des données complémentaires
- Faisabilité sur base de pré-modélisation devrait être la procédure standard
- Sur les sites pollués:
 - La géophysique peut aider à **définir le cadre hydrogéologique** et les structures contrôlant l'écoulement et le transport des eaux souterraines
 - La géophysique peut aider à **localiser des objets enfouis**
- La géophysique **ne peut pas visualiser directement la concentration** de contaminants: elle est sensible aux **indices de contamination** et à la **transformation associée (besoin de blanc ou « avant / après »)**
- La géophysique peut **suivre l'injection** d'amendement et suivre **l'assainissement ou l'atténuation naturelle**



Merci pour votre attention

Questions?