

Application d'une stratégie d'analyse des données géophysiques ERT à un suivi temporel d'infiltration

Marine AUDEBERT

Plan

1. Introduction

2. Présentation de MICS

3. Application de MICS à un jeu de données

4. Conclusions

Plan

1. Introduction

2. Présentation de MICS

3. Application de MICS à un jeu de données

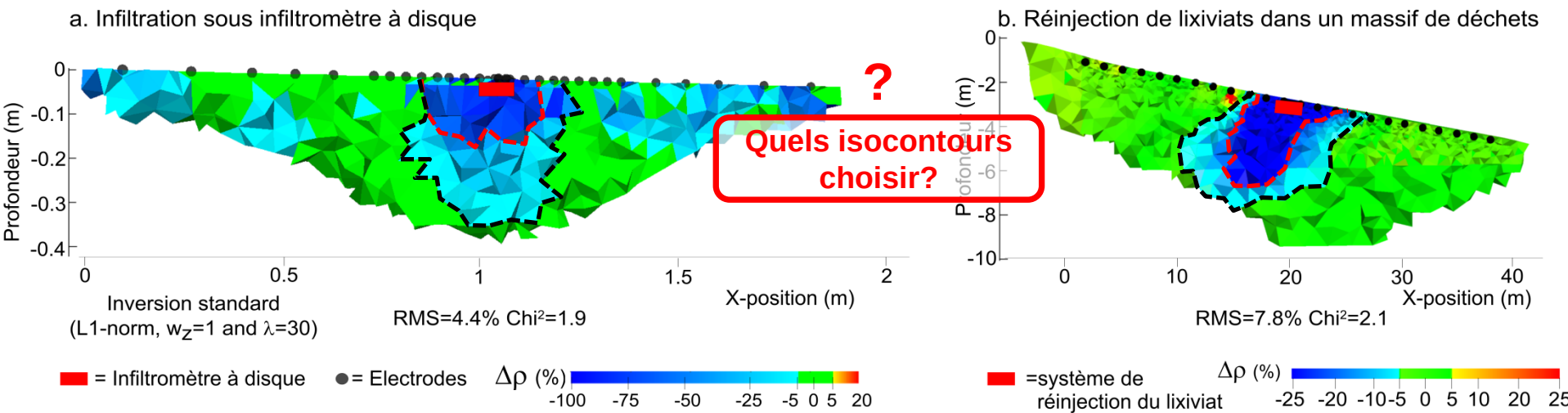
4. Conclusions

Introduction

La Tomographie de Résistivité Electrique (ERT) :

Fréquemment utilisée pour le suivi temporel d'infiltration ($\nearrow \theta = \searrow \rho$)

- Infiltration de polluants (*Vaudelet et al., 2011*)
- Hydrologie: recharge des aquifères (*Daily et al., 1992; Descloîtres et al., 2008*)
- Agronomie (*Michot et al., 2003; Beff et al., 2013*)
- Injection de lixiviats dans les massifs de déchets (*Guérin, 2004; Moreau, 2003*)



Dans la littérature, **lois pétrophysiques** pour remonter à θ

Objectifs :

- S'affranchir des lois pétrophysiques
- Améliorer la délimitation de la zone d'infiltration

Limites :

2 difficultés liées à l'inversion :

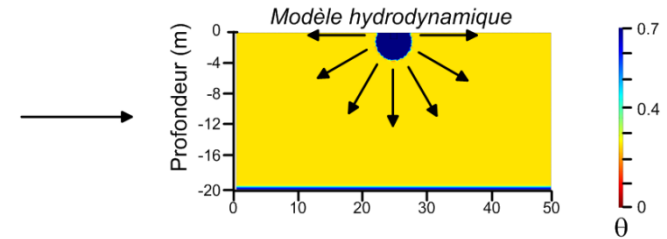
- Le choix des paramètres d'inversion
- La méthode de régularisation qui lisse les résultats

Solution proposée :

- MICS (« Multiple Inversions and Clustering Strategy »)

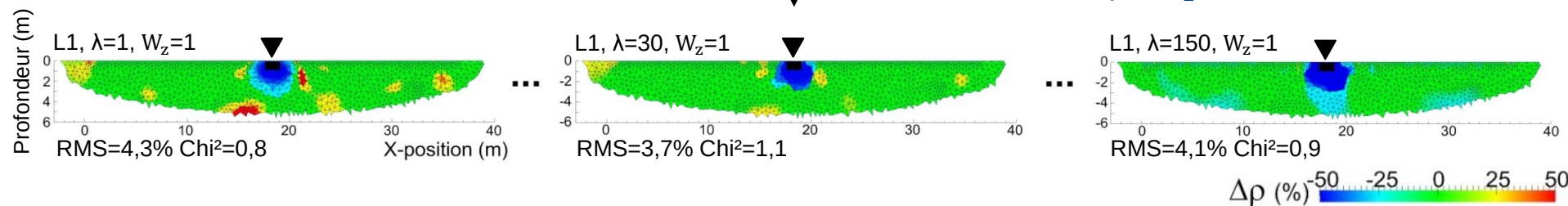
Présentation de MICS (« Multiple Inversions and Clustering strategy »)

Un jeu de données de ρ_a



1. Multiples inversions

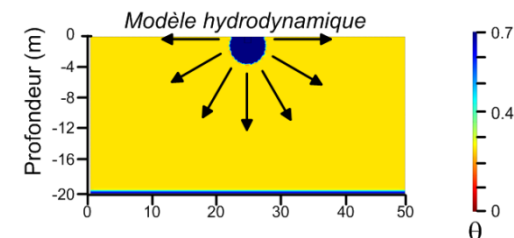
Norme d'inversion, paramètre de régularisation λ ,
facteur d'anisotropie W_z



Autant de résultats que de jeux de paramètres...

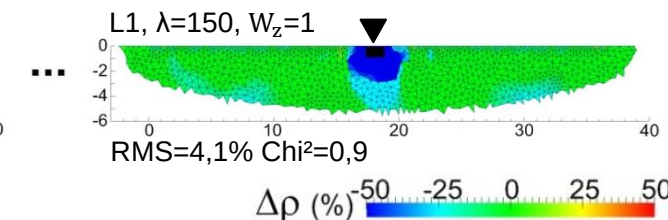
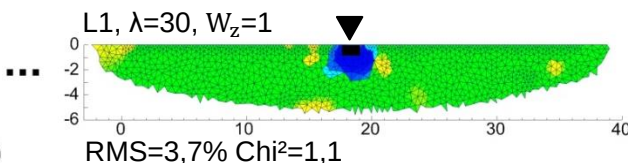
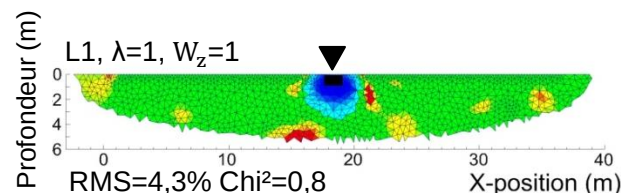
Présentation de MICS (« Multiple Inversions and Clustering strategy »)

Un jeu de données de ρ_a



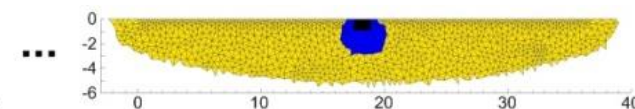
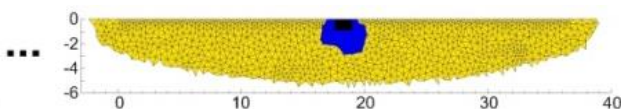
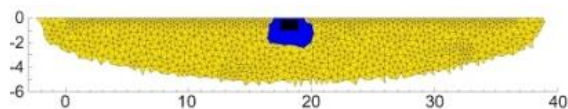
1. Multiples inversions

Norme d'inversion, paramètre de régularisation λ , facteur d'anisotropie W_z



2. Stratégie de classification

a. Algorithme des k-moyennes à chaque résultat

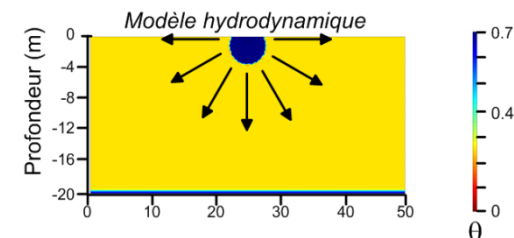


■ = 0 ■ = 1

■ = Système de réinjection du lixiviat

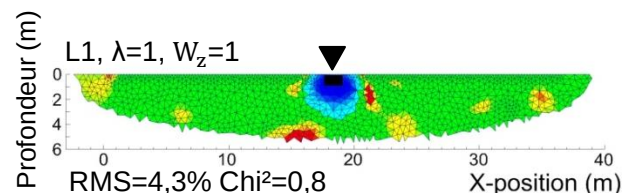
Présentation de MICS (« Multiple Inversions and Clustering strategy »)

Un jeu de données de ρ_a

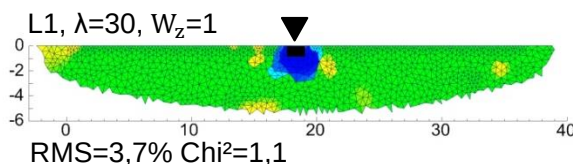


1. Multiples inversions

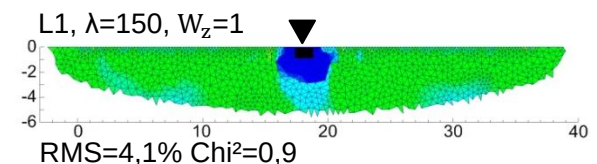
Norme d'inversion, paramètre de régularisation λ , facteur d'anisotropie W_z



...



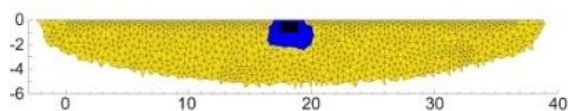
...



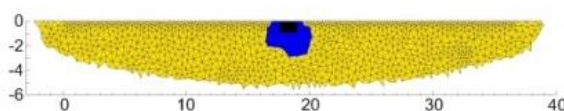
$\Delta\rho$ (%) -50 -25 0 25 50

2. Stratégie de classification

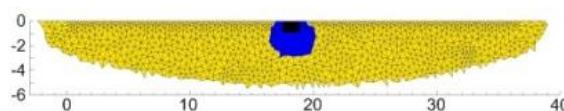
a. Algorithme des k-moyennes à chaque résultat



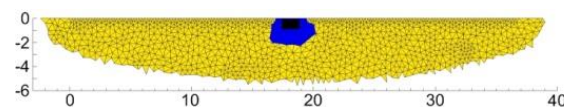
...



...



b. Approche de regroupement



Validation numérique de MICS

Tests numériques (*Audebert et al.*, 2014) **pour :**

- Différentes formes d'infiltration
- Différentes gammes de paramètres d'inversion

Tests numériques (*Audebert et al.*, 2014) **pour déterminer les limites de MICS :**

- Le front d'infiltration ne doit pas être trop diffus
- Le contraste de résistivité doit être supérieur à 40%
- Les limites de l'ERT (infiltration dans la zone de forte sensibilité)

Infiltration sous infiltromètre à disque

Objectifs :

Appliquer MICS à des jeux de données de terrain (incertitudes de mesure, bruit)

Dispositif expérimental :

Fosse expérimentale 2*2*1.2m

Sol sablo limoneux (faible teneur en argile)

Suivi de l'infiltration : 9h

Infiltromètre :

- 20 cm de diamètre
- -0.1 m de succion
- environ 8L infiltrés

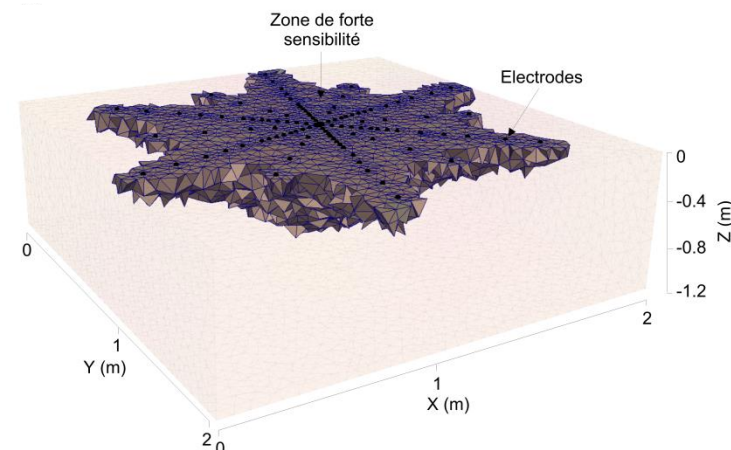
Dispositif ERT :

108 électrodes « en étoile »

Séquence de 1841 quadripôles (pôle-dipôle et reverse) de 4 min 48 s

51 profils ERT (toutes les 12min)

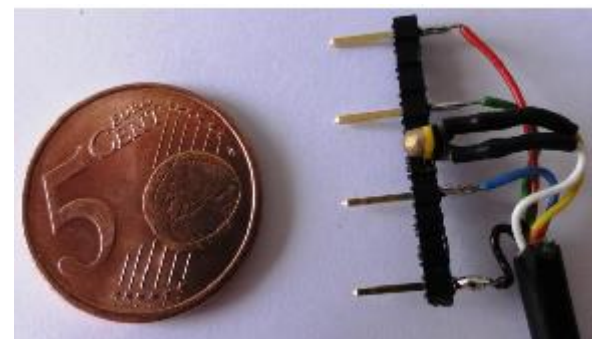
Syscal Pro avec un Switch Pro
(Iris Instrument)



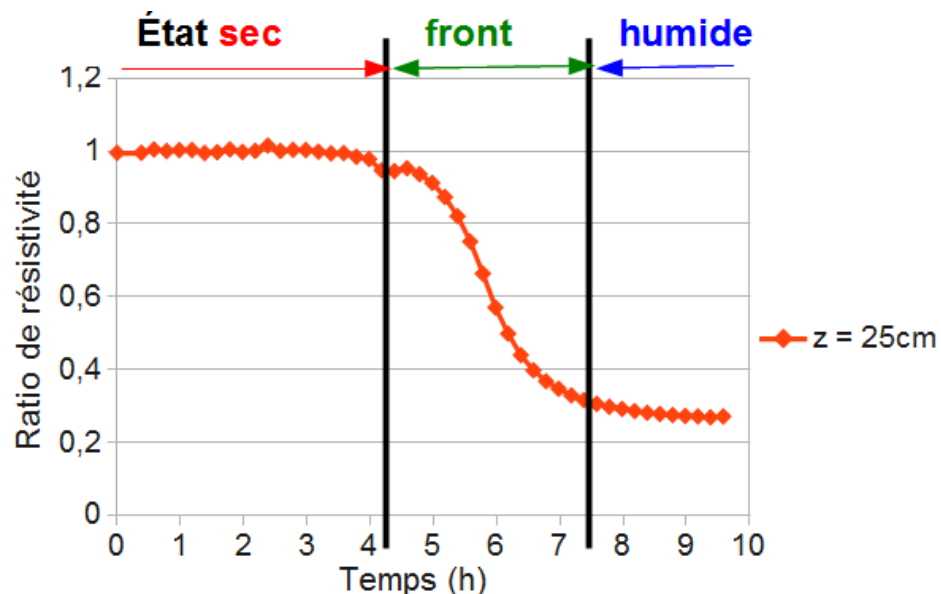
Infiltration sous infiltromètre à disque

Capteurs:

- 17 capteurs ponctuels de résistivité
- Mesures incluses dans la séquence du résistivimètre (en début et fin)
- Ratio de résistivité



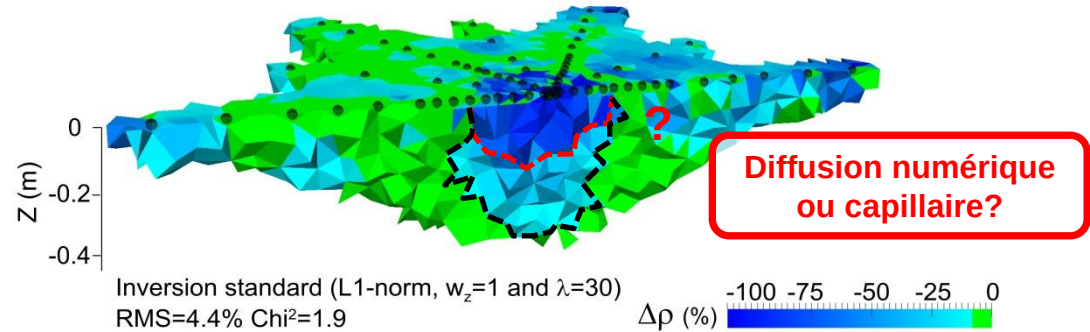
3 états sont définis pour confronter les résultats avec ceux de MICS :



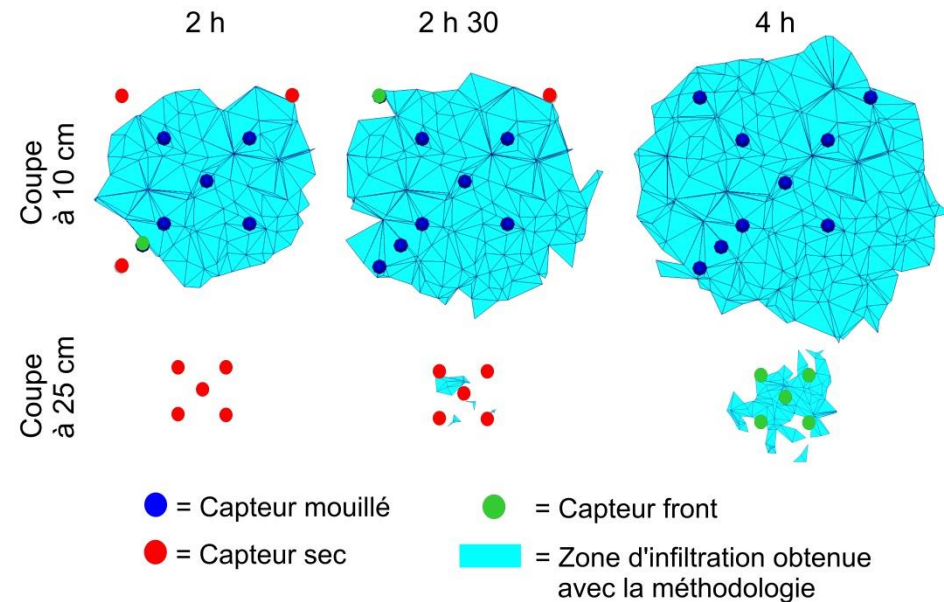
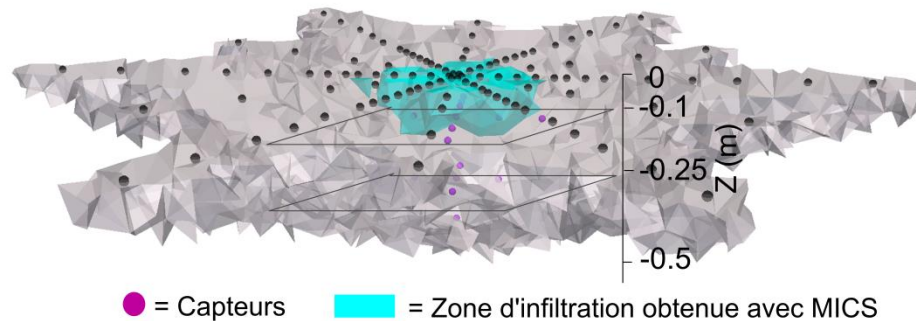
- État « **sec** » = diminution de $\rho < 5\%$
- État « **front** » = diminution de ρ comprise entre 5 et 95%
- État « **humide** » = diminution de $\rho > 95\%$

Résultats

Inversion standard :
(L1-norm, $\lambda=30$, $W_z=1$)

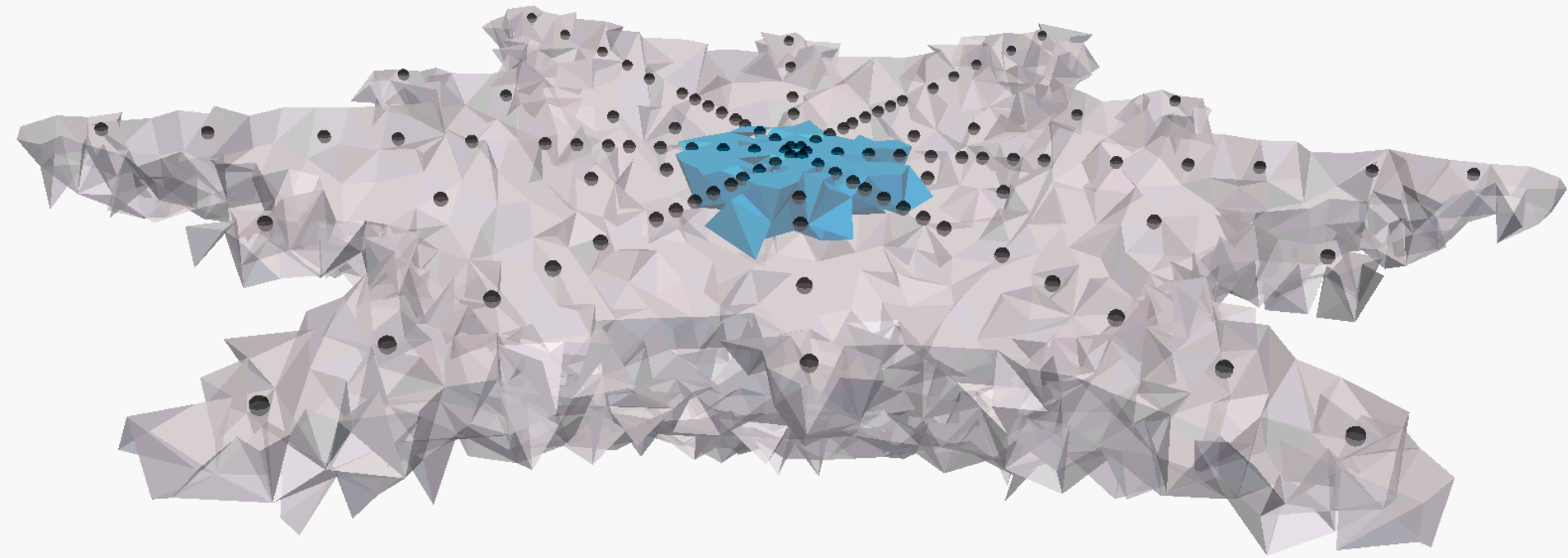


MICS :



➡ Délimitation précise de la zone d'infiltration en accord avec les capteurs

MICS permet d'éviter le choix subjectif des paramètres d'inversion 12



■ = zone de forte sensibilité

■ = zone d'infiltration

Conclusions et perspectives

MICS améliore la délimitation de la zone d'infiltration en évitant :

- Le choix subjectif d'un jeu de paramètres d'inversion
- Le choix d'un isocontour de variation de ρ

Nombreuses perspectives de recherche :

- Utilisation du contour pour contraindre le modèle hydrodynamique et estimer les paramètres hydrodynamiques
- Application de MICS à d'autres domaines (Agronomie, sols pollués, formations géologiques...)

Merci pour votre attention



Multiples inversions

Λ :

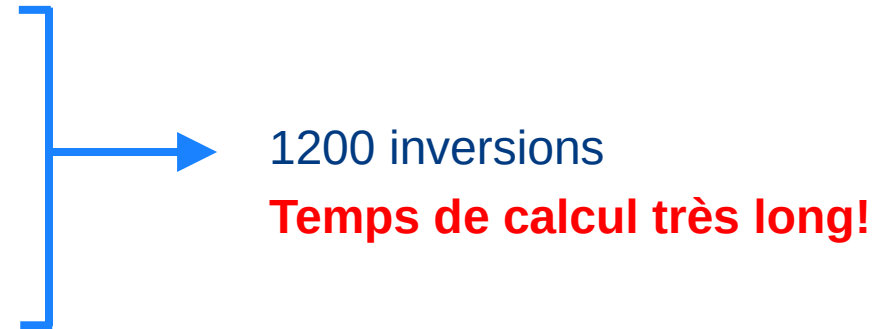
1 $\rightarrow$ 200 (par pas de 1)

Facteur d'anisotropie W_z :

0.5, 1 et 1.5

Norme d'inversion :

L1 ou L2



Tests numériques [Audebert et al., 2014] :

Réduction du nombre de paramètres :

- L1
- $W_z=1$
- Distribution logarithmique de 32 λ



Comment interpréter tous ces résultats?

Algorithme des K-moyennes

Objectifs :

Diviser le profil en deux régions:

- **La zone d'infiltration**
- **Le milieu environnant** qui n'est pas impacté par l'infiltration

L'algorithme :

Nombre de clusters: $K=2$

1) 2 centroïdes $C1$ et $C2$ sont choisis sur le profil

2) Chaque cellule est associée à $C1$ ou $C2$ (fonction de la distance euclidienne)

3) Des nouveaux centroïdes $C1$ et $C2$ sont calculés

4) Tant que la différence entre anciens et nouveaux centroïdes $> \epsilon$

Valorisations

Articles publiés :

1. « Influence of the geomembrane on time-lapse ERT measurements for leachate injection monitoring », *Waste Management*, **Audebert et al.** 2014a
2. « Time-lapse ERT interpretation methodology for leachate injection monitoring based on multiple inversions and clustering strategy (MICS) », *Journal of Applied Geophysics*, **Audebert et al.** 2014b

Articles à soumettre :

3. « Understanding leachate flow in municipal solid waste landfills by combining time-lapse ERT and subsurface flow modelling – Part I. : Analysis of infiltration shape on two different waste deposit cells », *Waste Management*, **Audebert et al.** 2015
4. « Understanding leachate flow in municipal solid waste landfills by combining time-lapse ERT and subsurface flow modelling – Part II. : Constraint methodology of hydrodynamic models » , *Waste Management*, **Audebert et al.** 2015

Conférences

GELMON 2013, Vienne, du 4 au 6 décembre 2013

Poster :

« 3D time-lapse ERT monitoring on a small Municipal Solid Waste Landfill Cell »

GEOFCAN 2014, Orsay, 13 et 14 Novembre 2014

Oral :

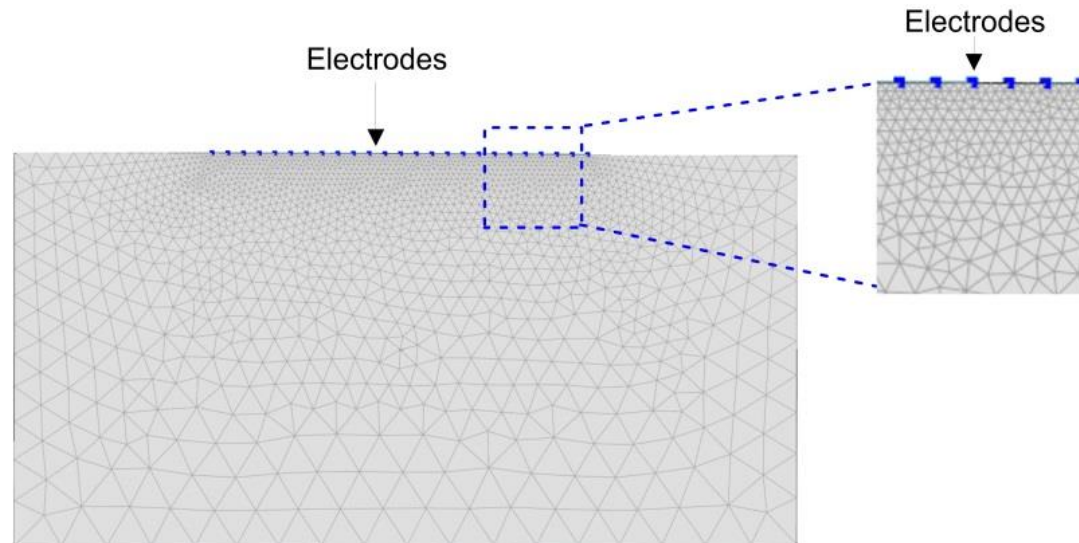
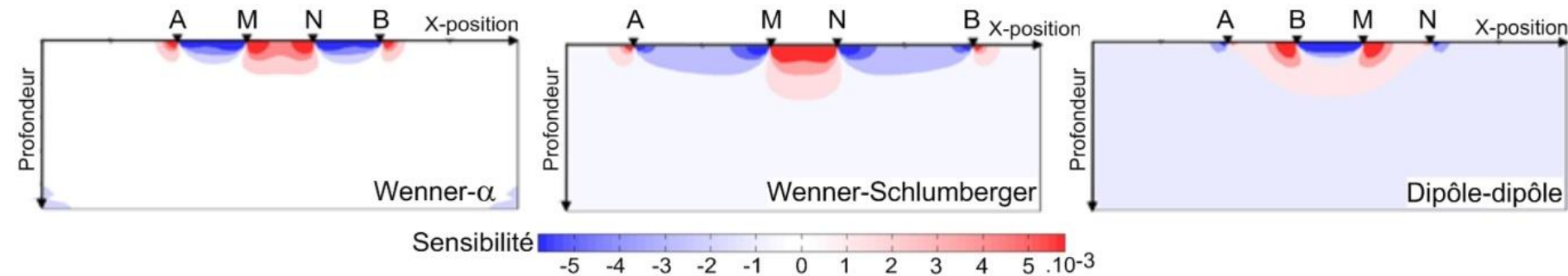
« Application d'une méthodologie d'interprétation des données ERT pour le suivi temporel d'infiltration »

GFHN 2014, Angers, 25 et 26 Novembre 2014

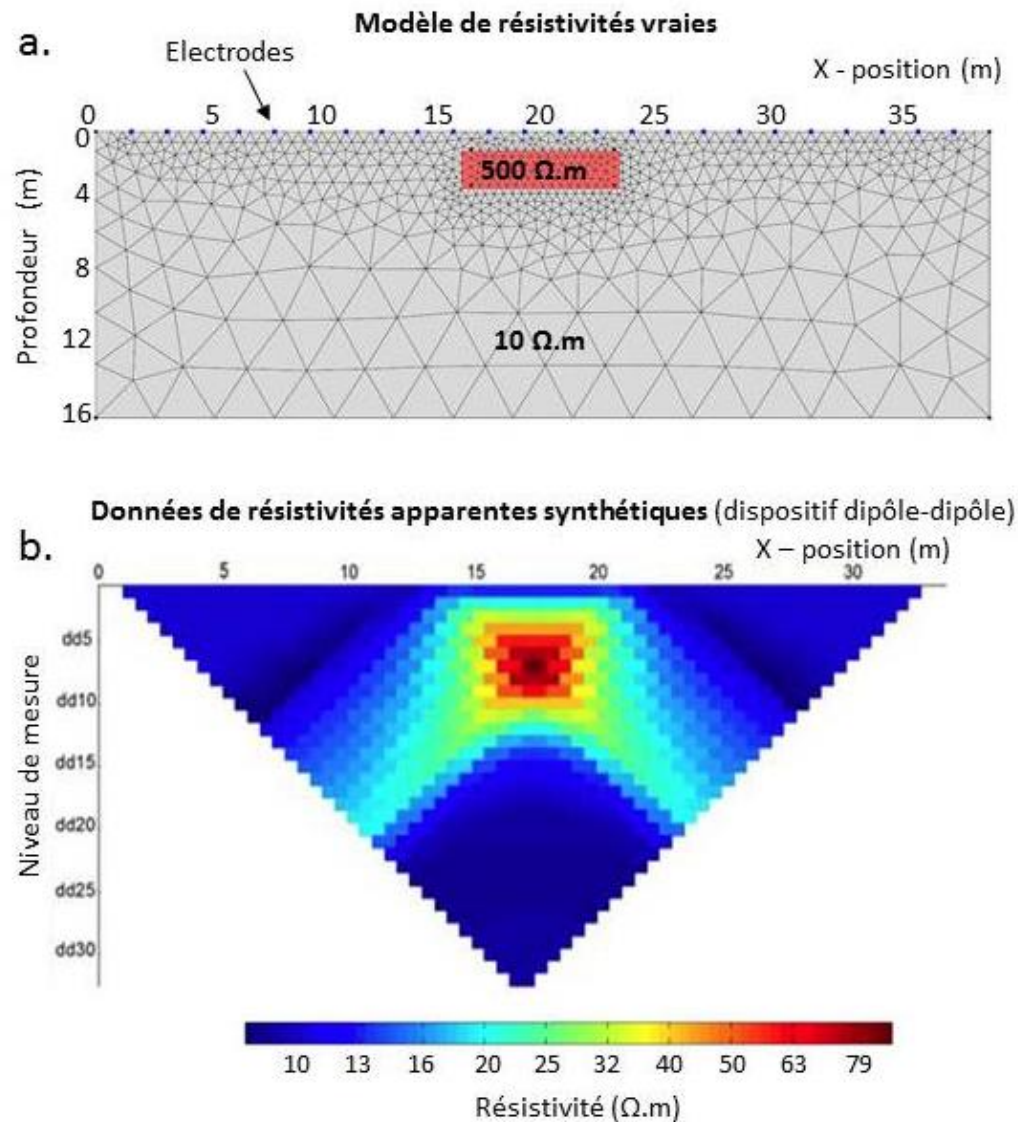
Oral :

« Application d'une méthodologie d'interprétation des données ERT pour le suivi temporel d'infiltration »

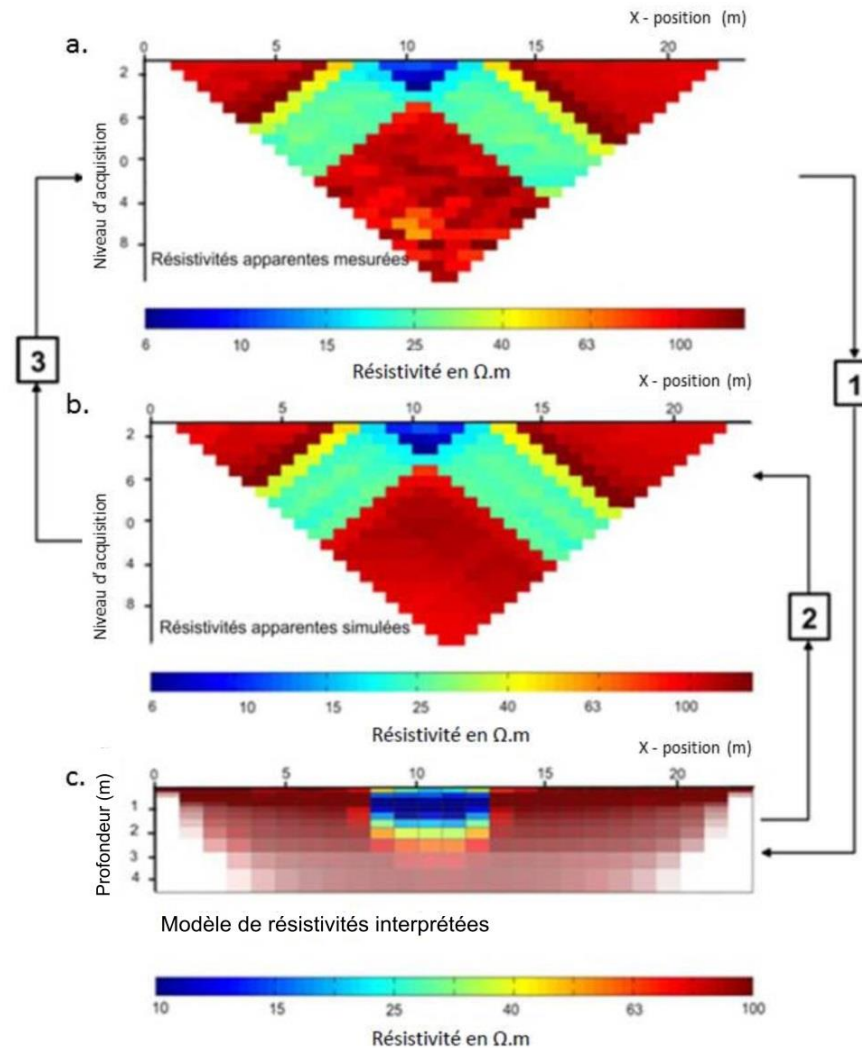
Etat de l'art



Etat de l'art

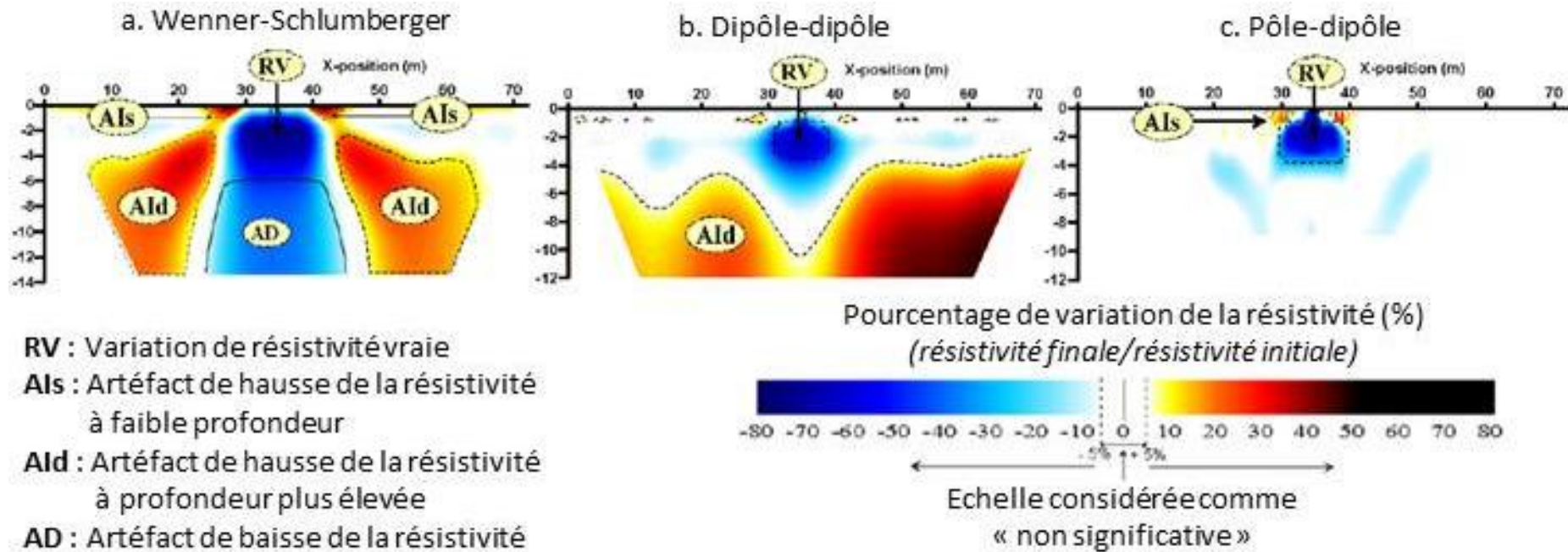


Etat de l'art



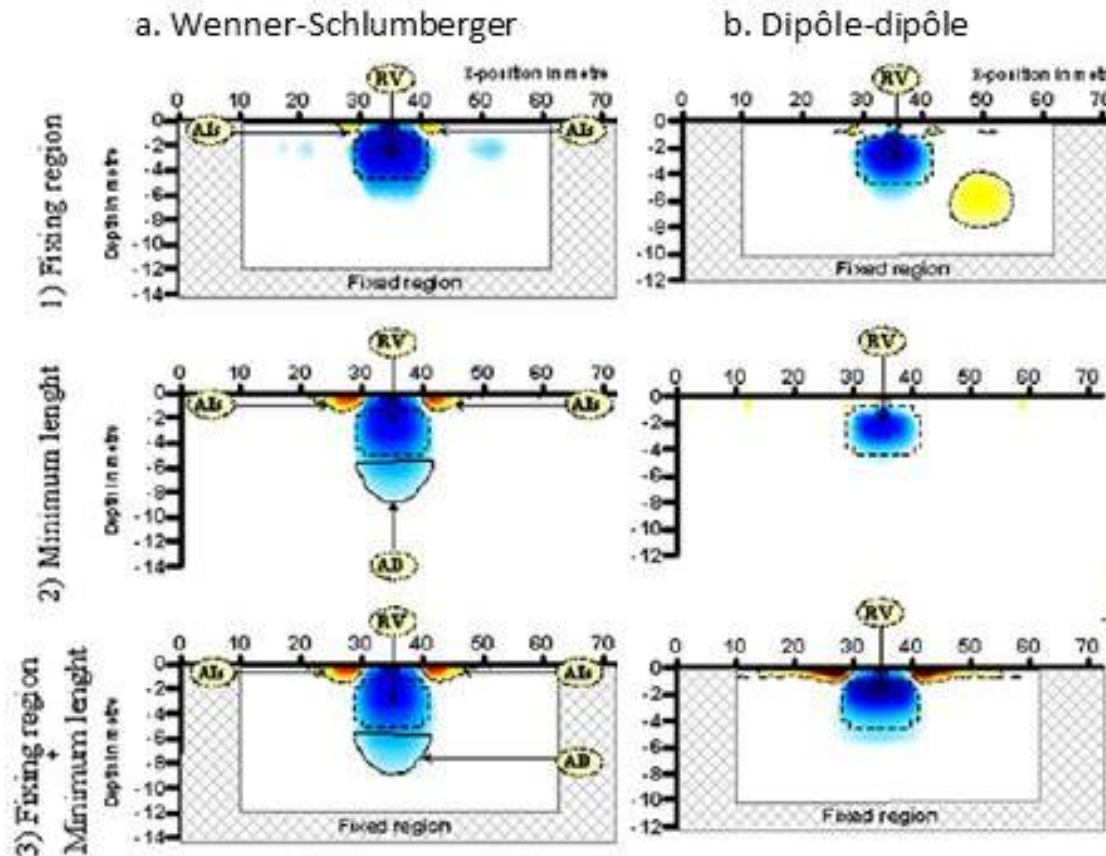
- 1 Calcul du modèle de résistivités
- 2 Calcul du modèle de résistivités apparentes simulées
- 3 Comparaison du modèle de résistivités apparentes mesurées sur le terrain et simulées

Etat de l'art



(Clément, 2010)

Etat de l'art



RV : Variation de résistivité vraie
 AIs : Artéfact de hausse de la résistivité
 à faible profondeur
 AId : Artéfact de hausse de la résistivité
 à profondeur plus élevée
 AD : Artéfact de baisse de la résistivité

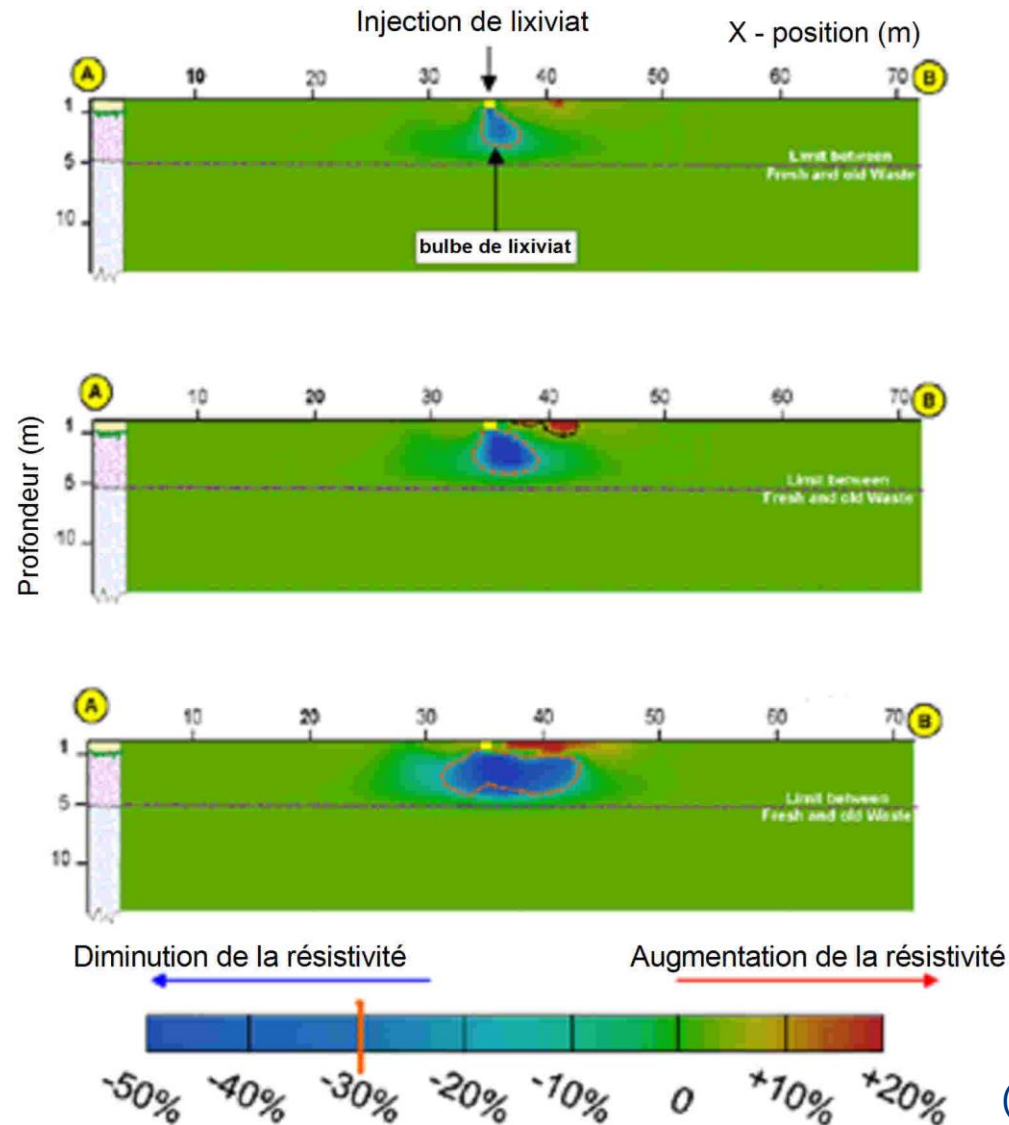
Pourcentage de variation de la résistivité (%)
 (résistivité finale/résistivité initiale)



Echelle considérée comme
 « non significative »

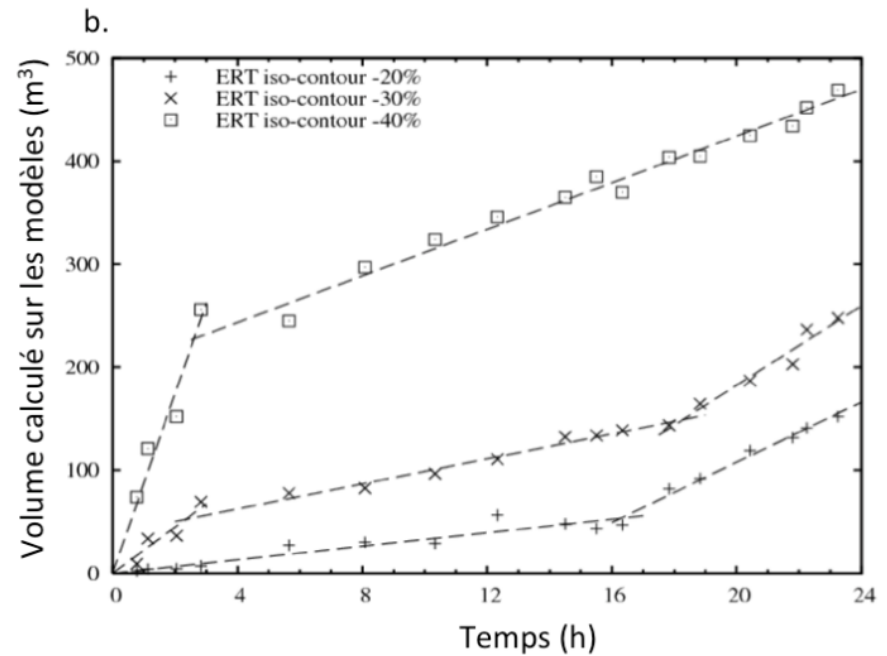
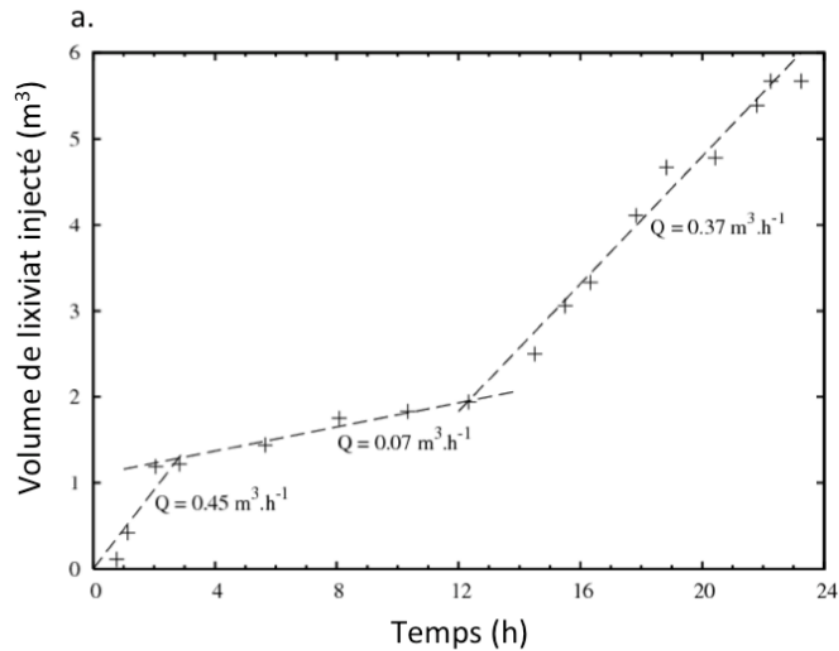
(Clément, 2010)

Etat de l'art



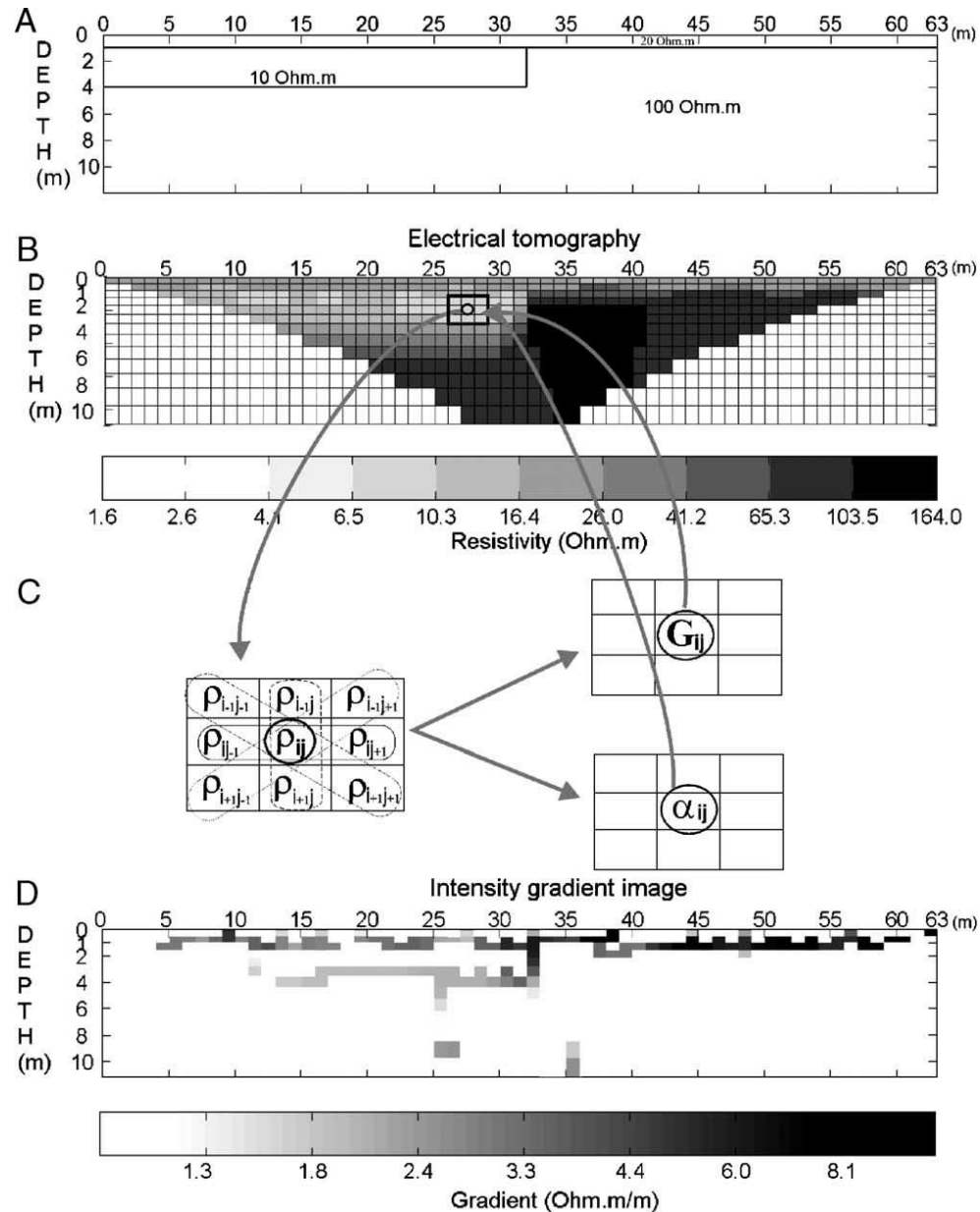
(Clément, 2011)

Etat de l'art

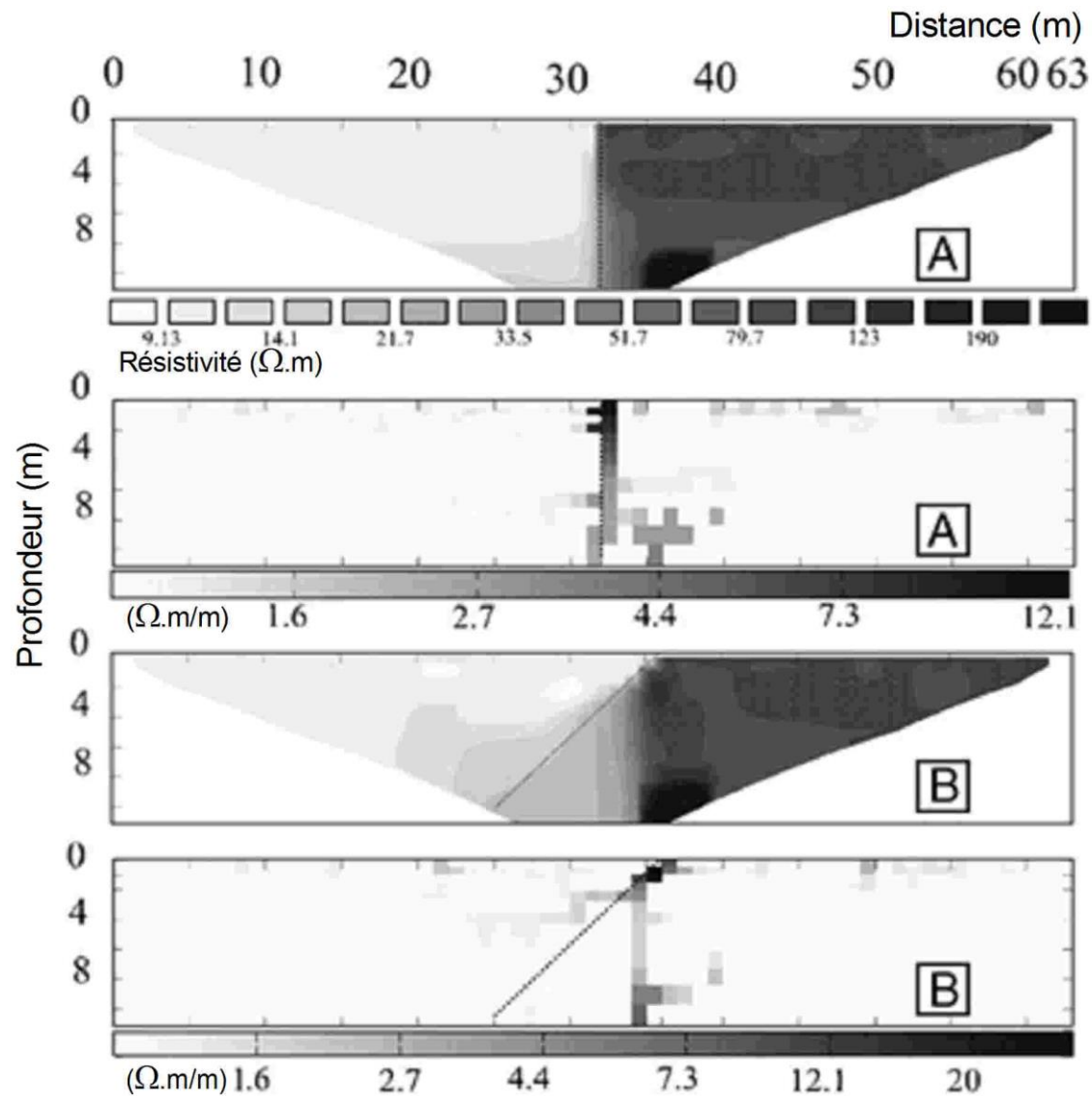


(Clément, 2011)

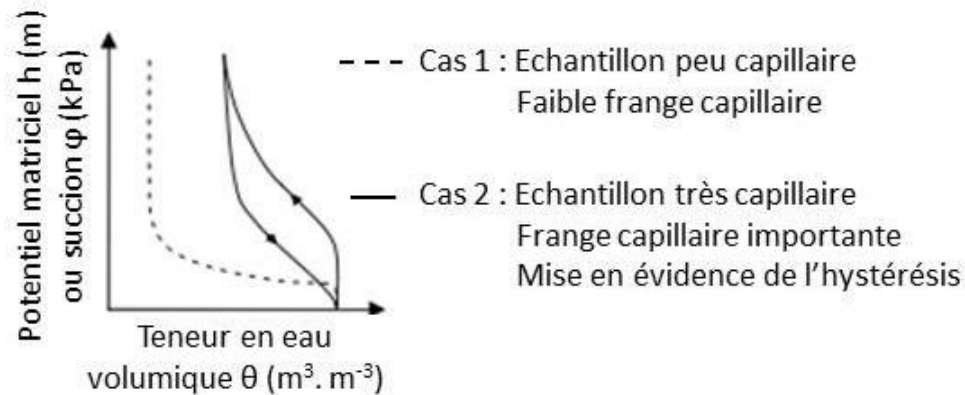
Etat de l'art



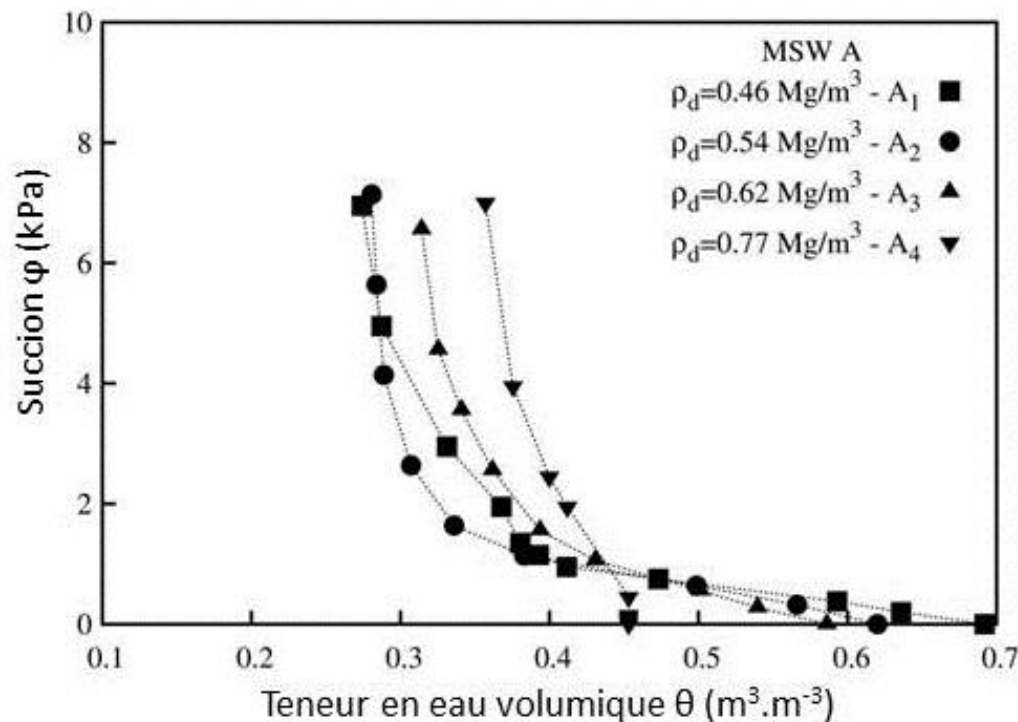
Etat de l'art



Etat de l'art

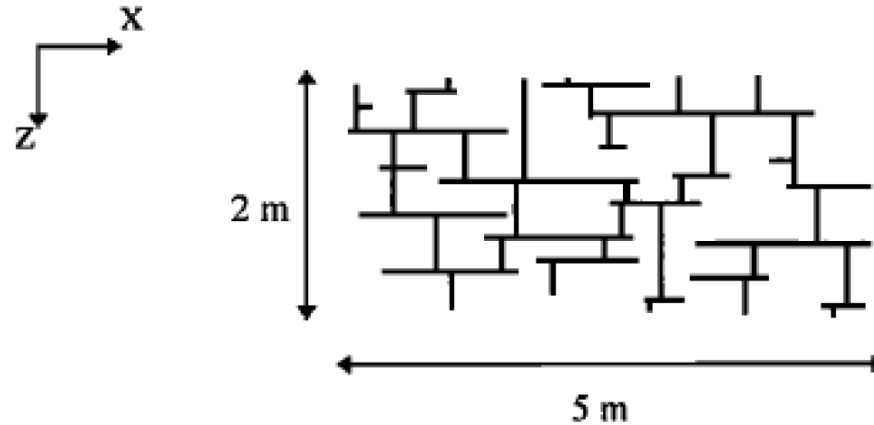


(Stoltz, 2009)

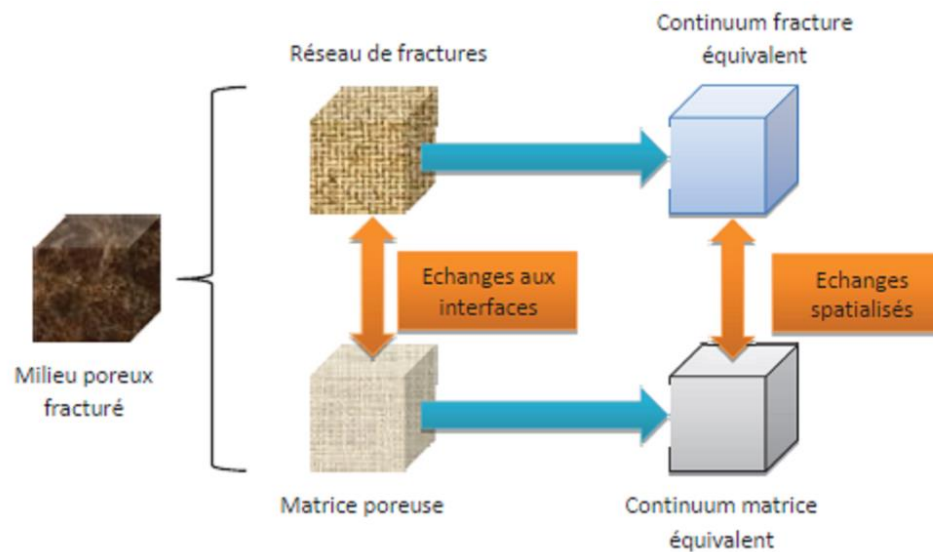


(Stoltz, 2012)

Etat de l'art

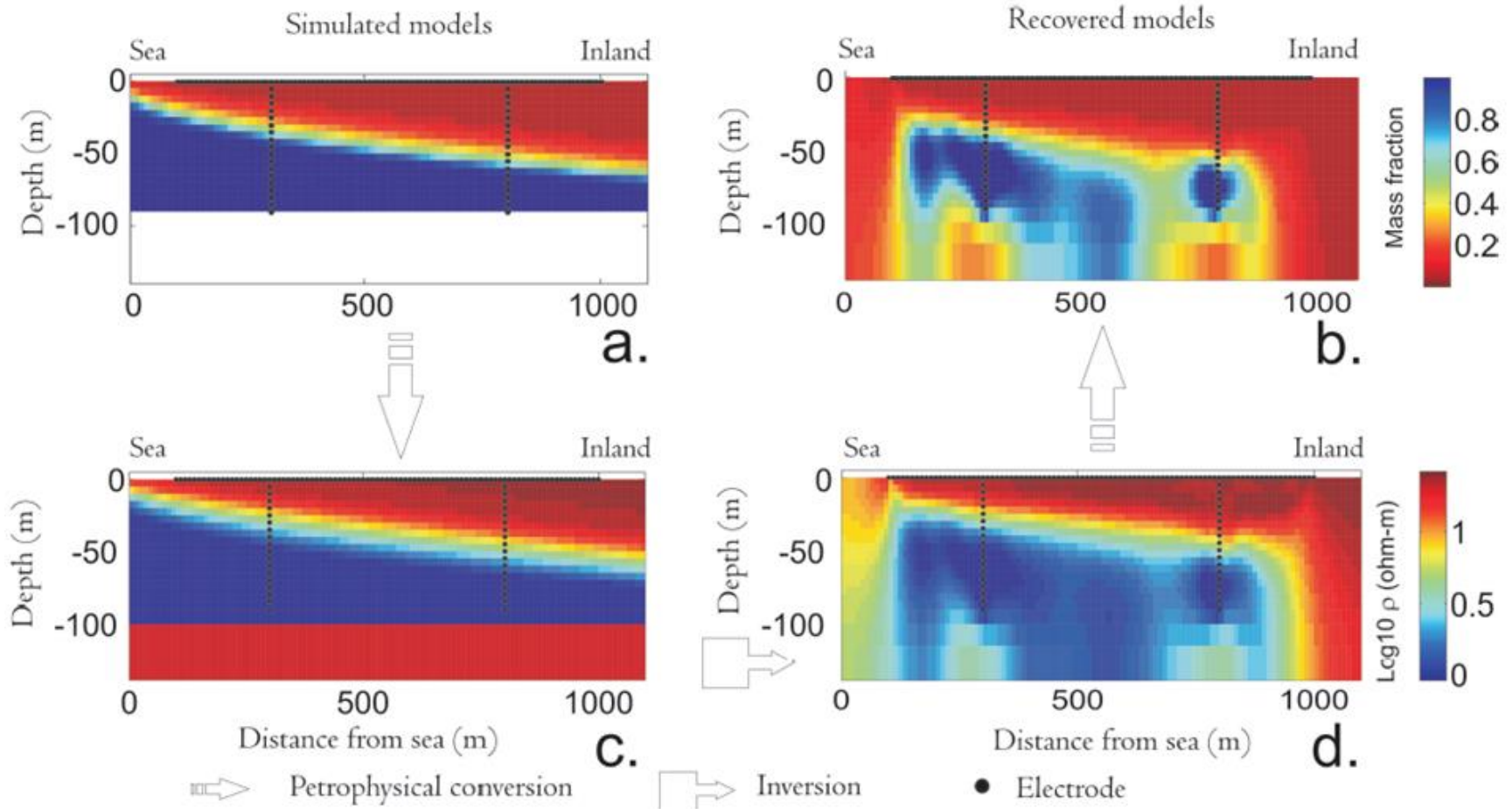


(Bendz, 1998)



(Trottier, 2014)

Etat de l'art

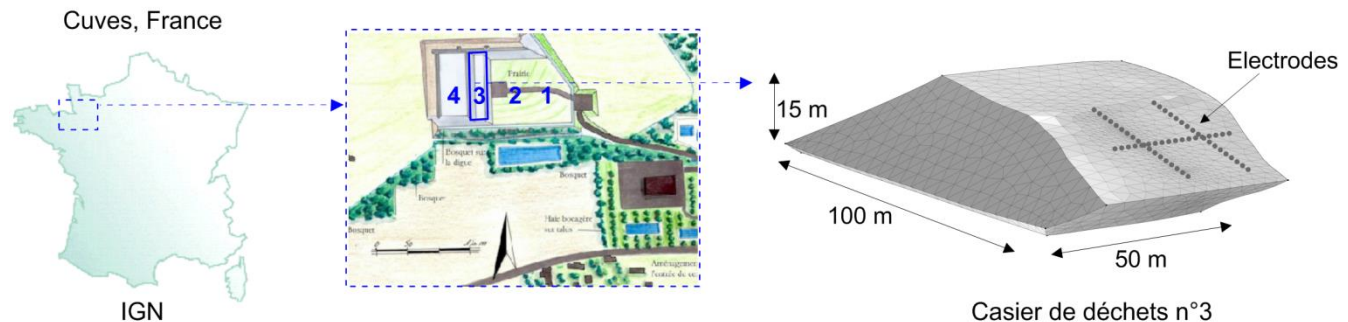


Influence de la géomembrane PEHD

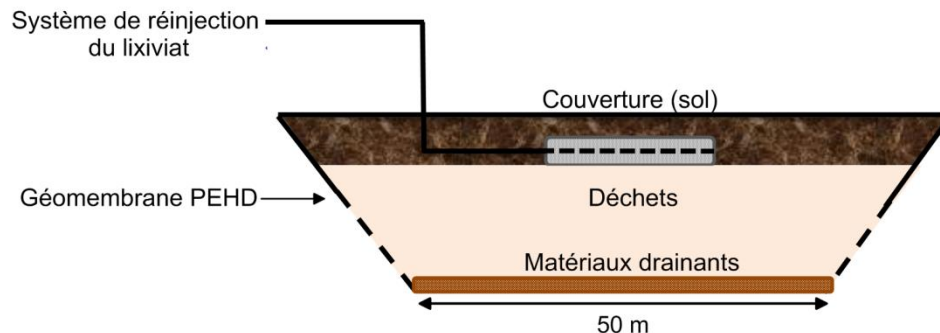
2 objectifs :

1. Déterminer **la distance** entre la **géomembrane** infiniment résistante et **la ligne d'électrodes** pour que les mesures de ρ_a ne soient pas impactées
2. Proposer une solution si cette distance n'est pas respectée, comme sur le site de la SAS « **Les Champs Jouault** » :

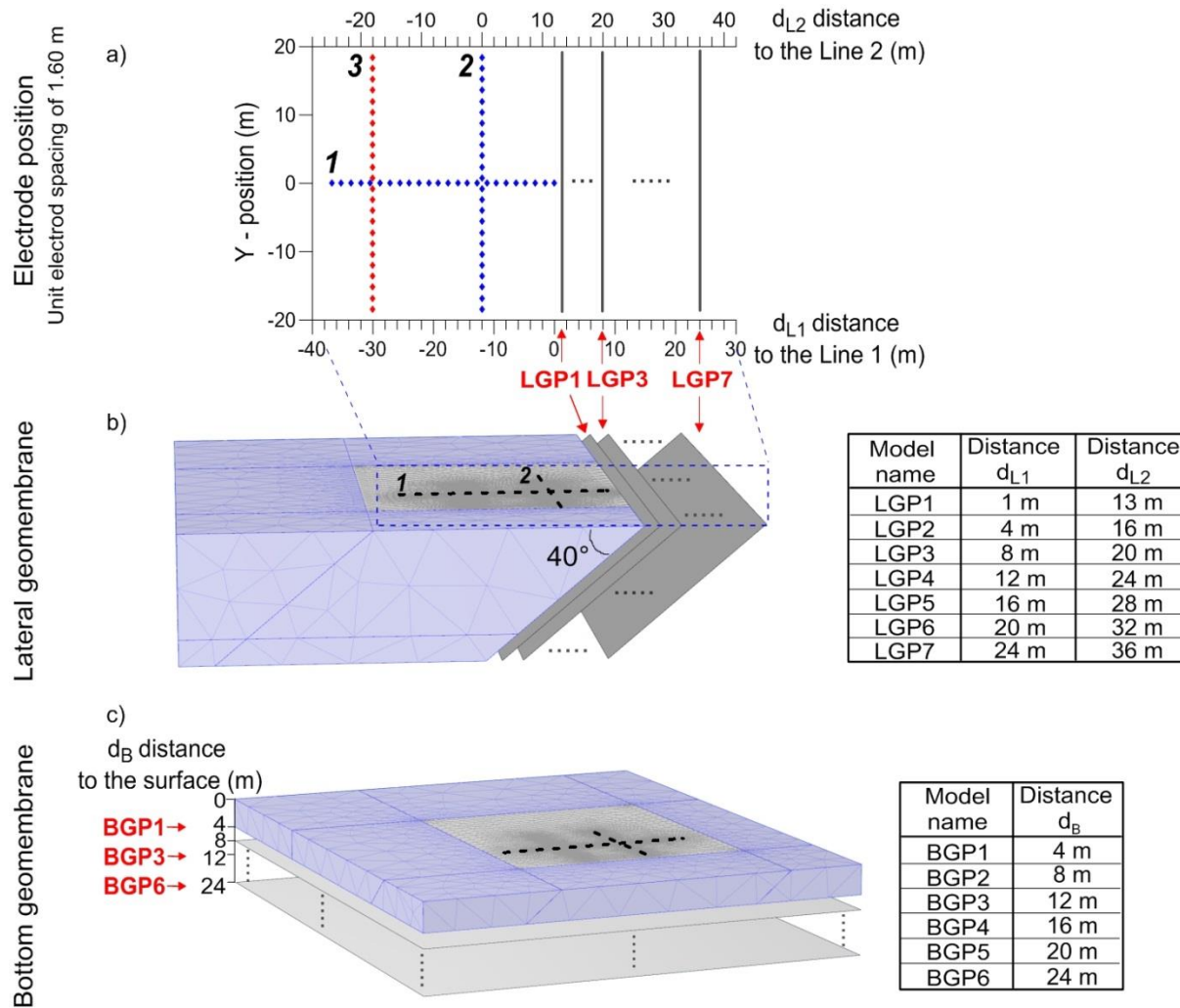
a) Situation et géométrie du massif de déchets



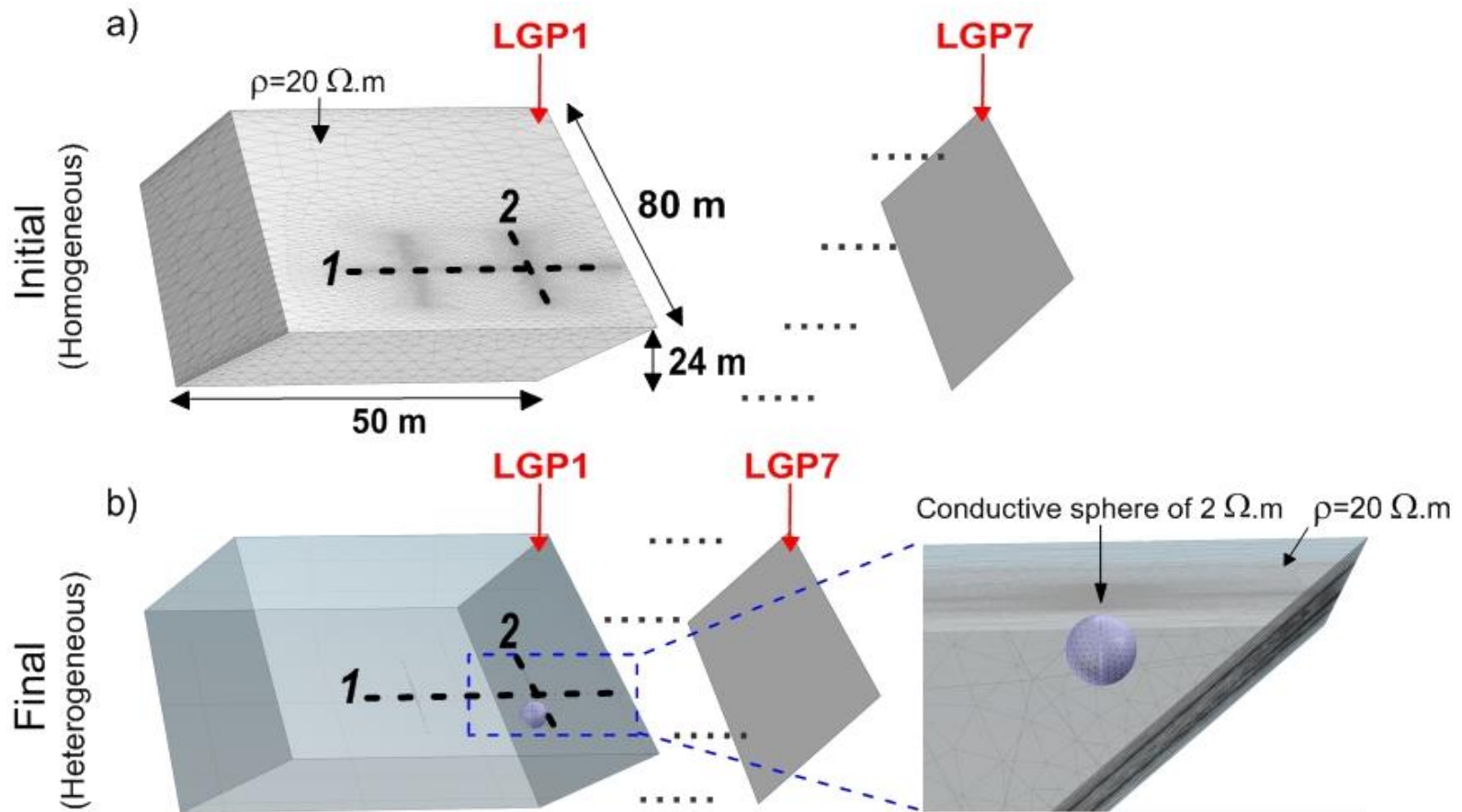
b) Structure du massif de déchets



Influence de la géomembrane PEHD

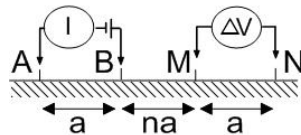


Influence de la géomembrane PEHD

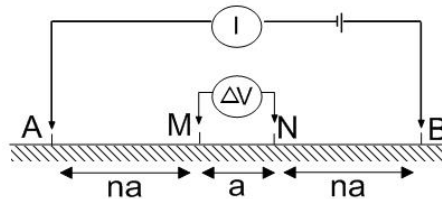


Influence de la géomembrane PEHD

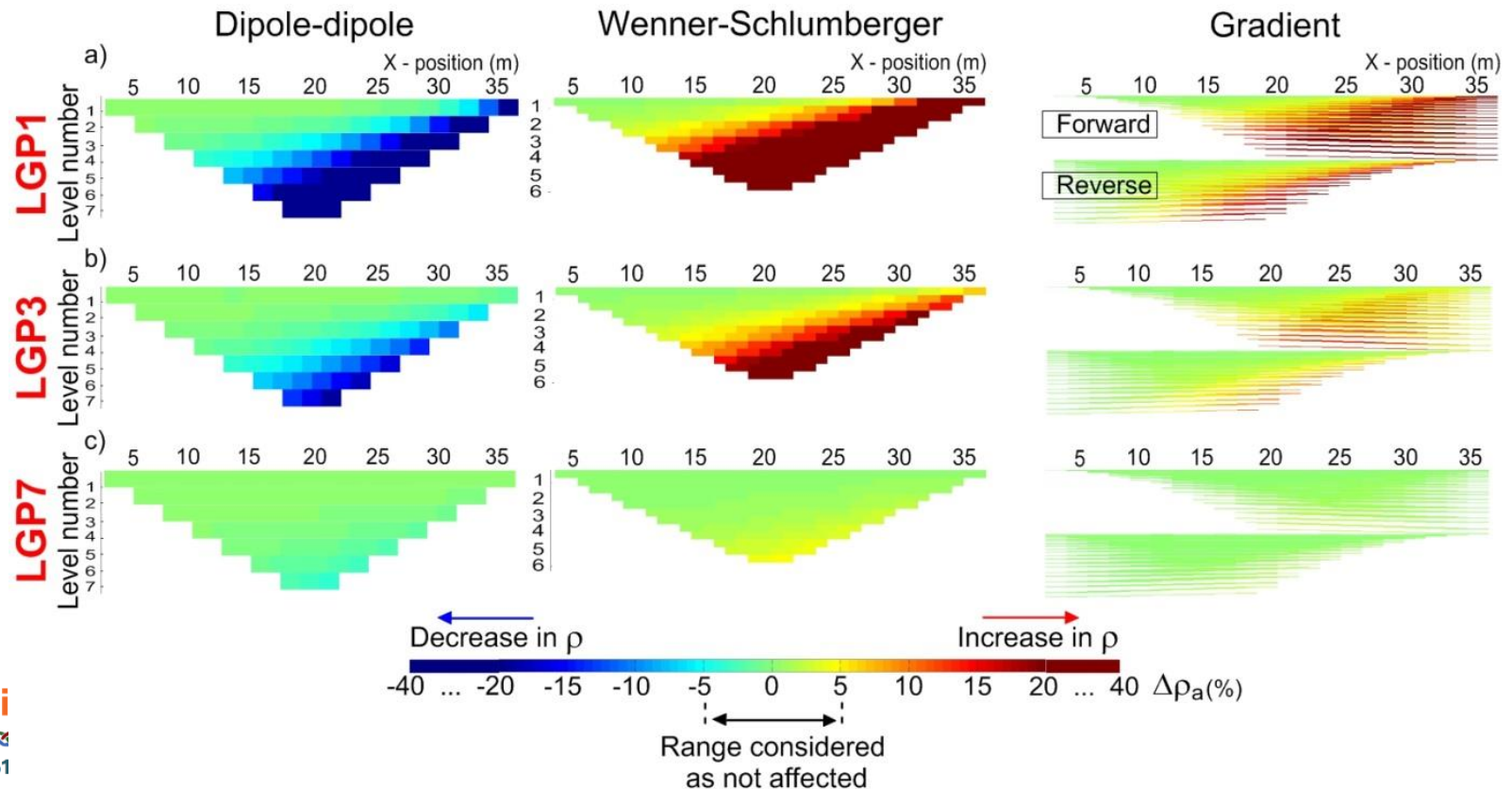
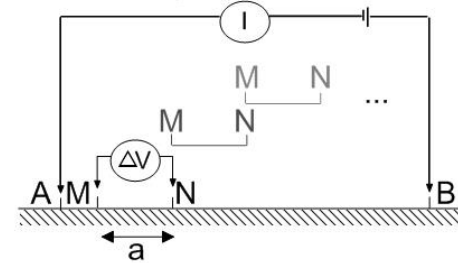
a) Dipole-dipole



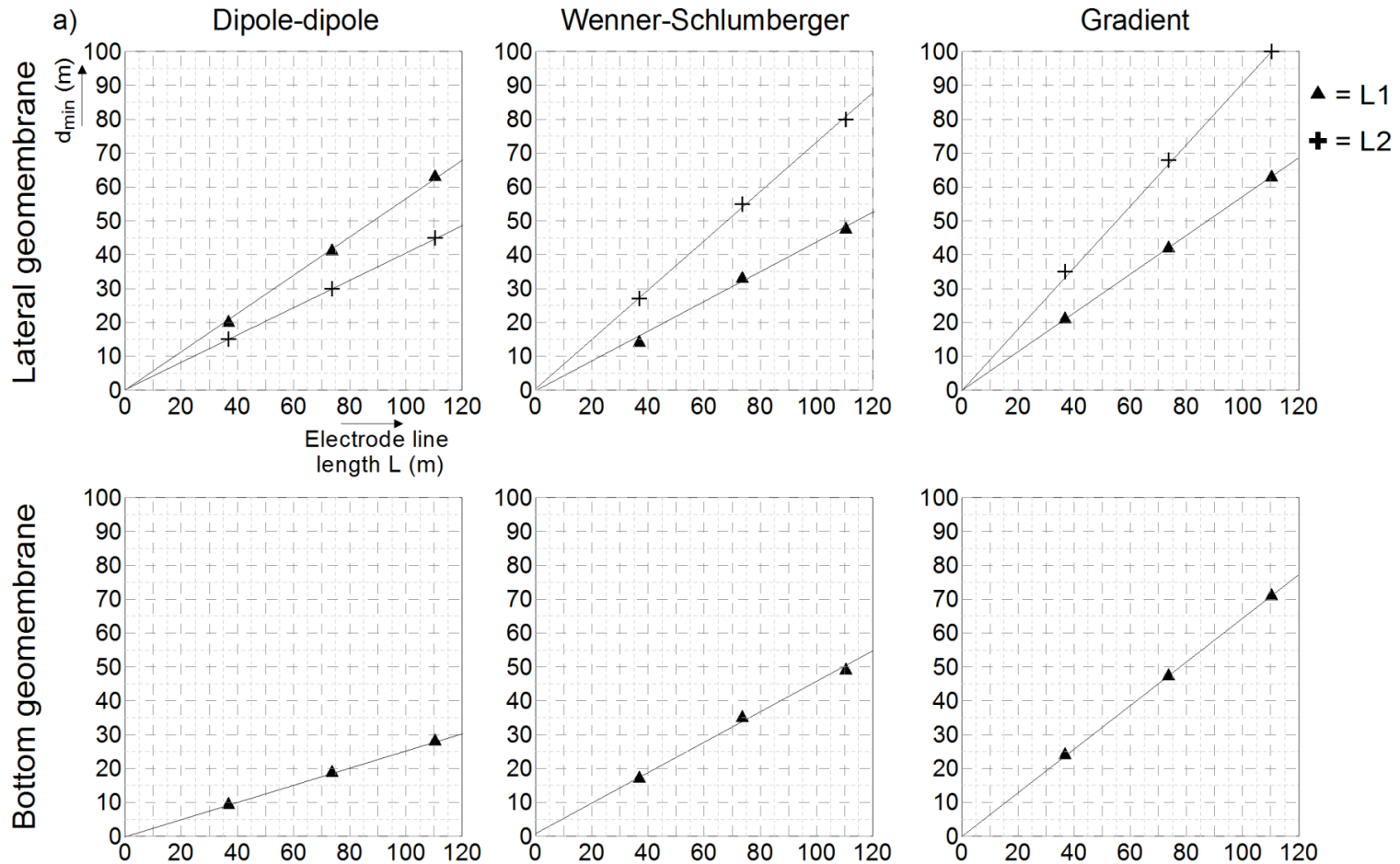
b) Wenner-Schlumberger



c) Gradient



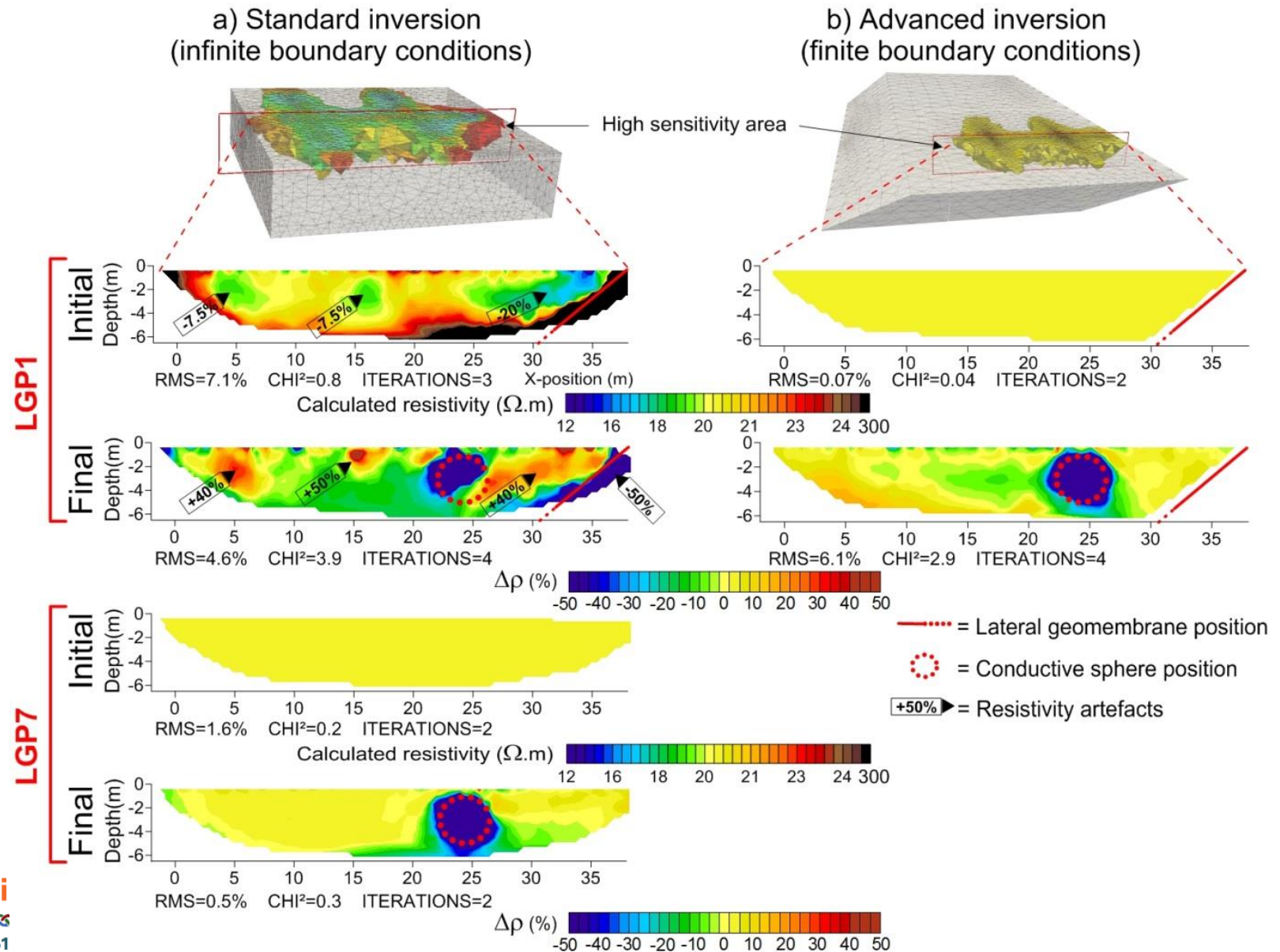
Influence de la géomembrane PEHD



b)

Waste cell side		Dipole-dipole	Wenner-Schlumberger	Gradient
Lateral	L1	$d_{\min} = 0.55L$	$d_{\min} = 0.40L$	$d_{\min} = 0.64L$
	L2	$d_{\min} = 0.38L$	$d_{\min} = 0.72L$	$d_{\min} = 0.95L$
Bottom		$d_{\min} = 0.26L$	$d_{\min} = 0.45L$	$d_{\min} = 0.58L$

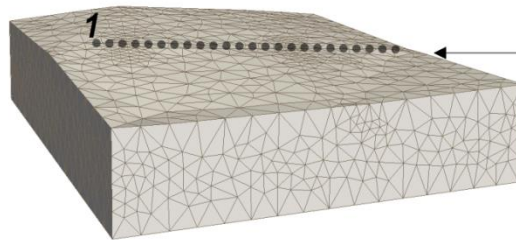
Influence de la géomembrane PEHD



Influence de la géomembrane PEHD

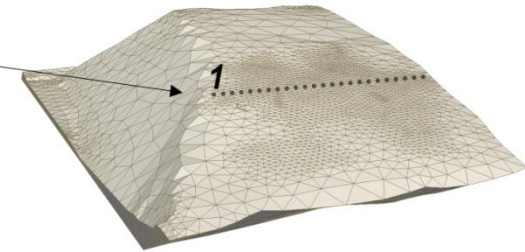
Maillage
d'inversion

a) Inversion standard
(Conditions aux limites infinies)

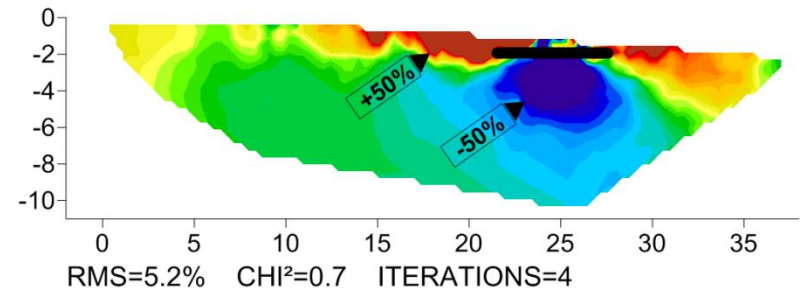
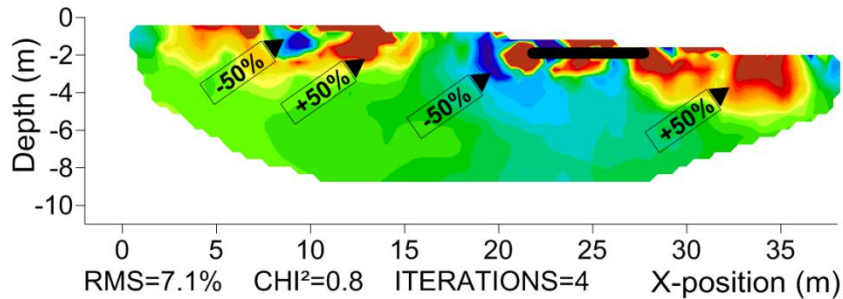


b) "Inversion avancée" avec délimitation de la géométrie
(Conditions aux limites finies)

Electrodes



Résultats de
l'inversion



— = Système de réinjection du lixiviat $\Delta\rho_2$ (%)

-50 -40 -30 -20 -10 0 10 20 30 40 50

MICS (« Multiples Inversions and Clustering Strategy »)

Rappel concernant la modélisation numérique ERT :

1

- **Construction d'un modèle synthétique de résistivités vraies**
à partir d'une modélisation hydrodynamique ($\theta \rightarrow \rho$ via Archie)

2

- **Calcul direct : simulation des résistivités apparentes**

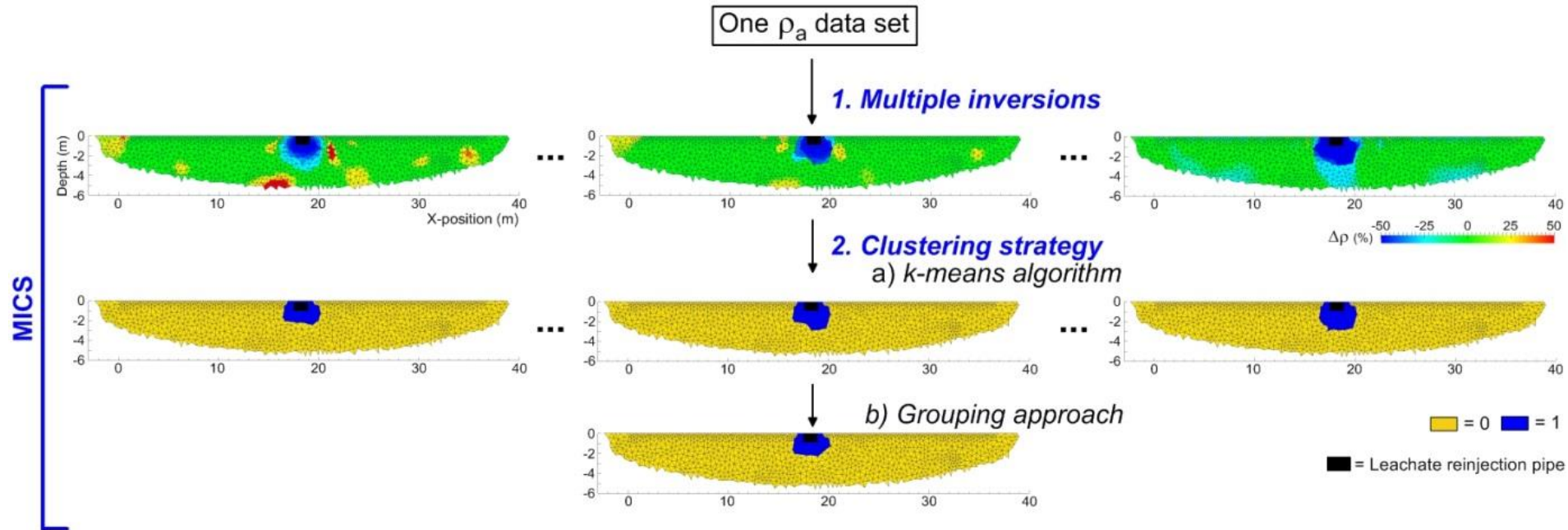
3

- **Inversion « time-lapse », simulation de la variation des résistivités interprétées**

4

- **Validation numérique**

MICS (« Multiples Inversions and Clustering Strategy »)



Multiples Inversions

Norme d'inversion :

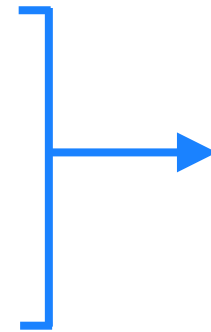
L1 ou L2

λ :

1 $\rightarrow$ 200 (par pas de 1)

Facteur d'anisotropie W_z :

0.5, 1 et 1.5



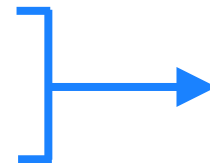
1200 inversions

Temps de calcul très long

Tests numériques (*Audebert et al., 2014*) :

Réduction du nombre de paramètres :

- L1
- Distribution logarithmique de 32 λ
- $W_z=1$



32 inversions

↓ **du temps de calcul**

Stratégie de classification

Clustering method: Kmeans algorithm

Objectifs:

Diviser le profil en deux régions:

- **La zone d'infiltration**
- **Le reste du profil** qui n'est pas impacté par le processus de réinjection

Clustering algorithm of Kmeans:

Nombre de clusters: $K=2$

- 1) 2 cellules « représentantes » sont choisies sur le profil (R1 and R2)
- 2) Chaque cellule sont associées à R1 ou R2 en fonction de la distance euclidienne (basée sur la différence de résistivité)
- 3) Des nouvelles cellules « représentantes » (R1 and R2) sont calculées
- 4) Tant que la différence entre anciens et nouveaux représentants $(R1 \text{ and } R2) > \epsilon$

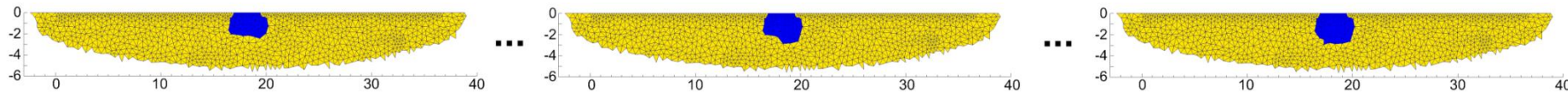
Stratégie de classification

Objectif :

Réduire le nombre de profils ERT à interpréter

Contexte :

On a autant de résultats de clustering que de jeux de paramètres d'inversion



Stratégie :

Si une cellule appartient à la zone bleue pour tous les résultats de Kmeans

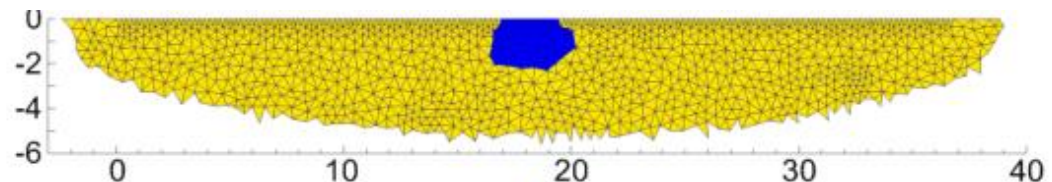
➡ On considère que la cellule appartient bien à la zone bleue

Sinon:

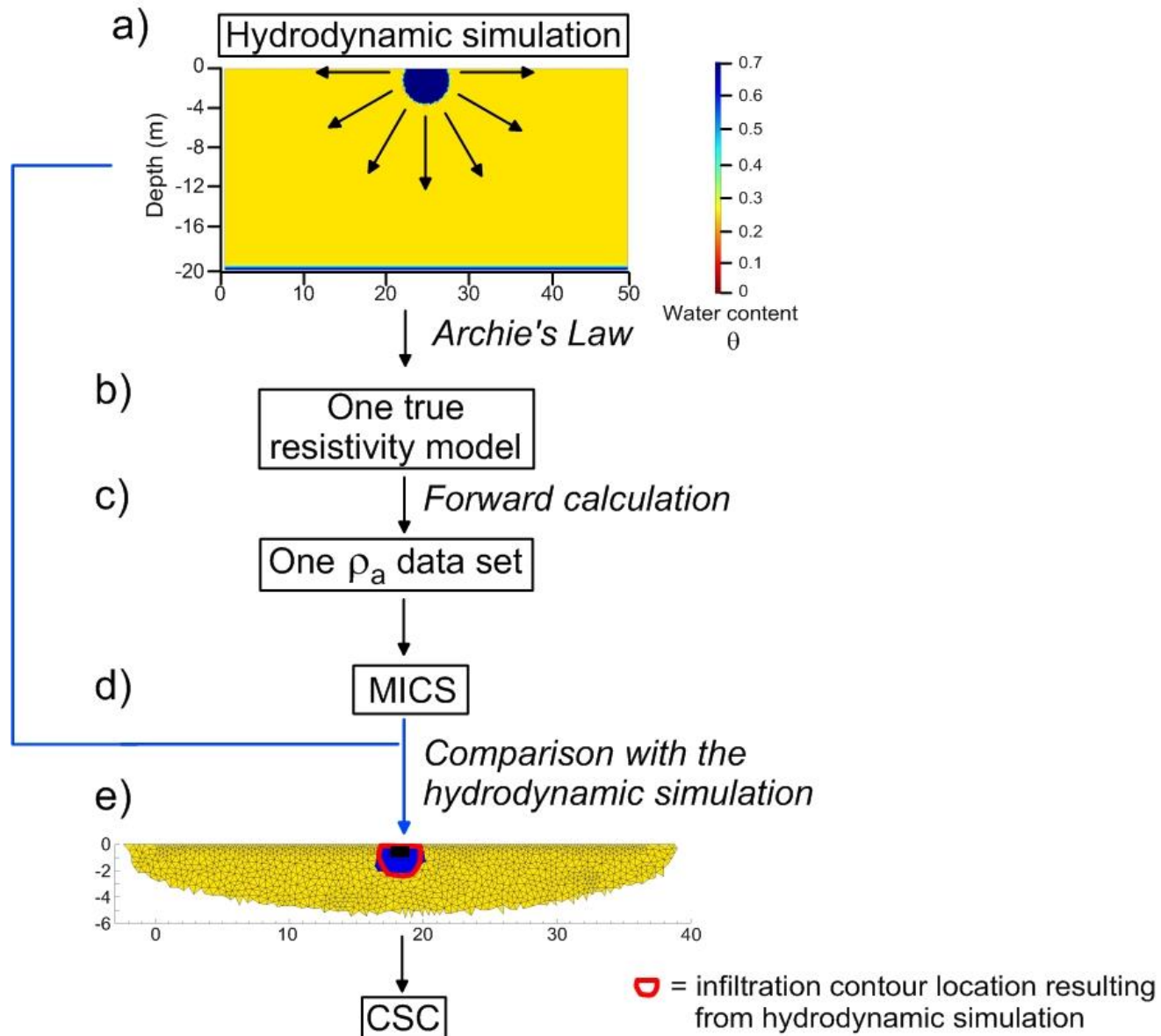
➡ La cellule appartient à la zone jaune

Résultats :

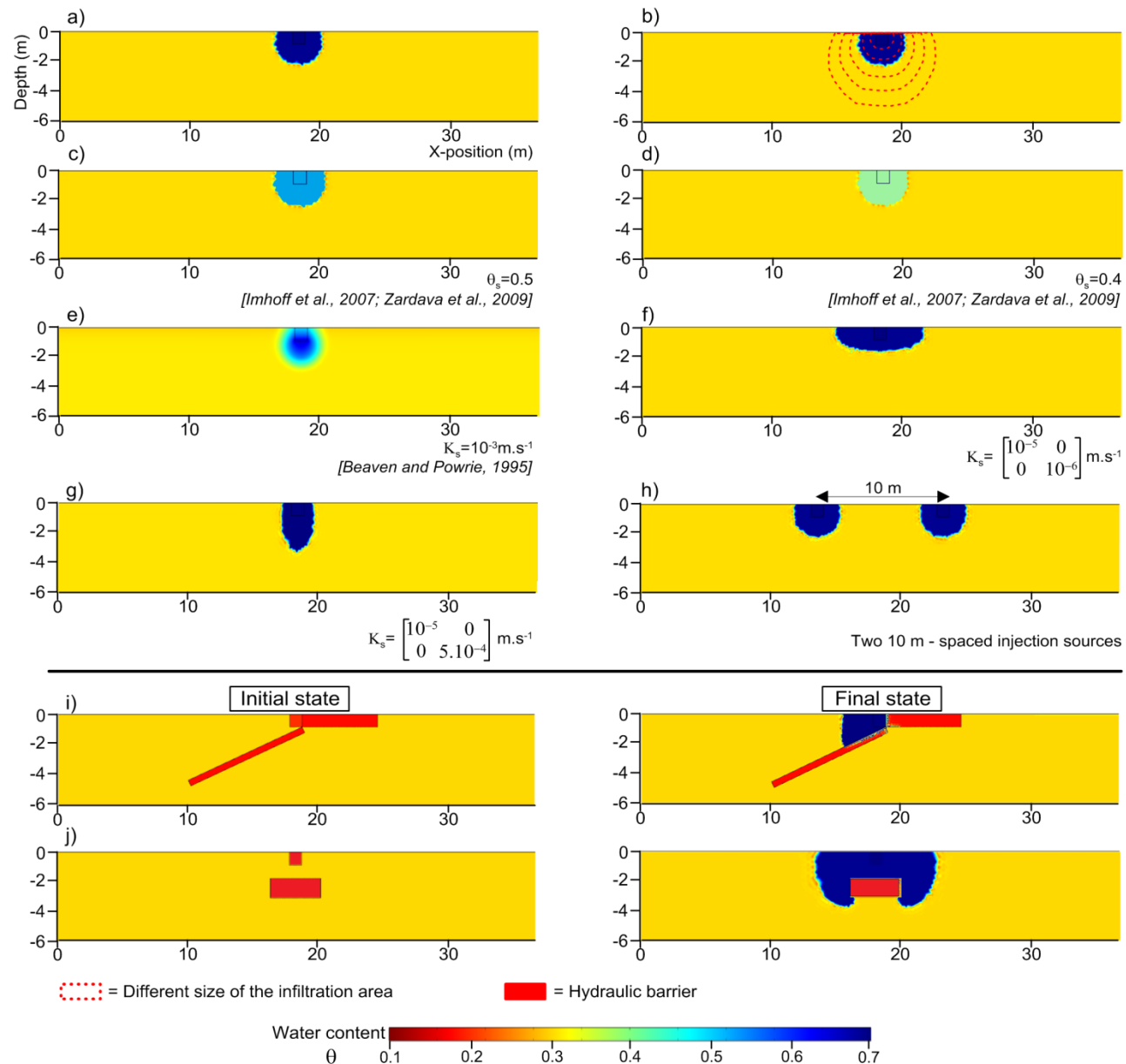
Un profil unique:



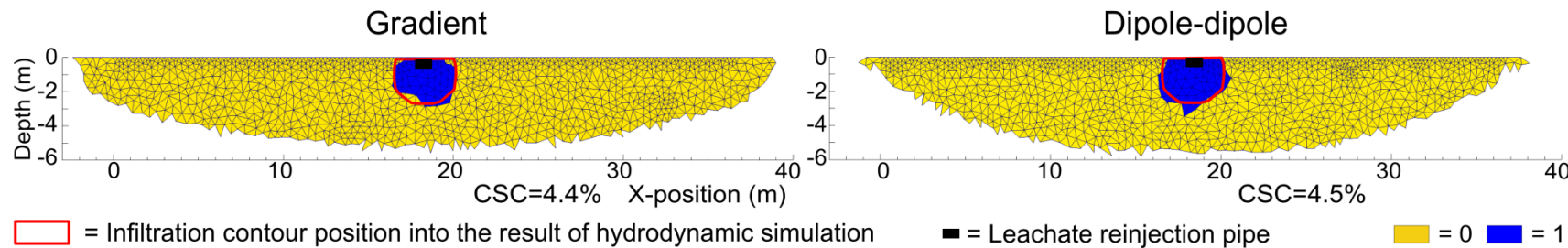
Validation numérique de MICS



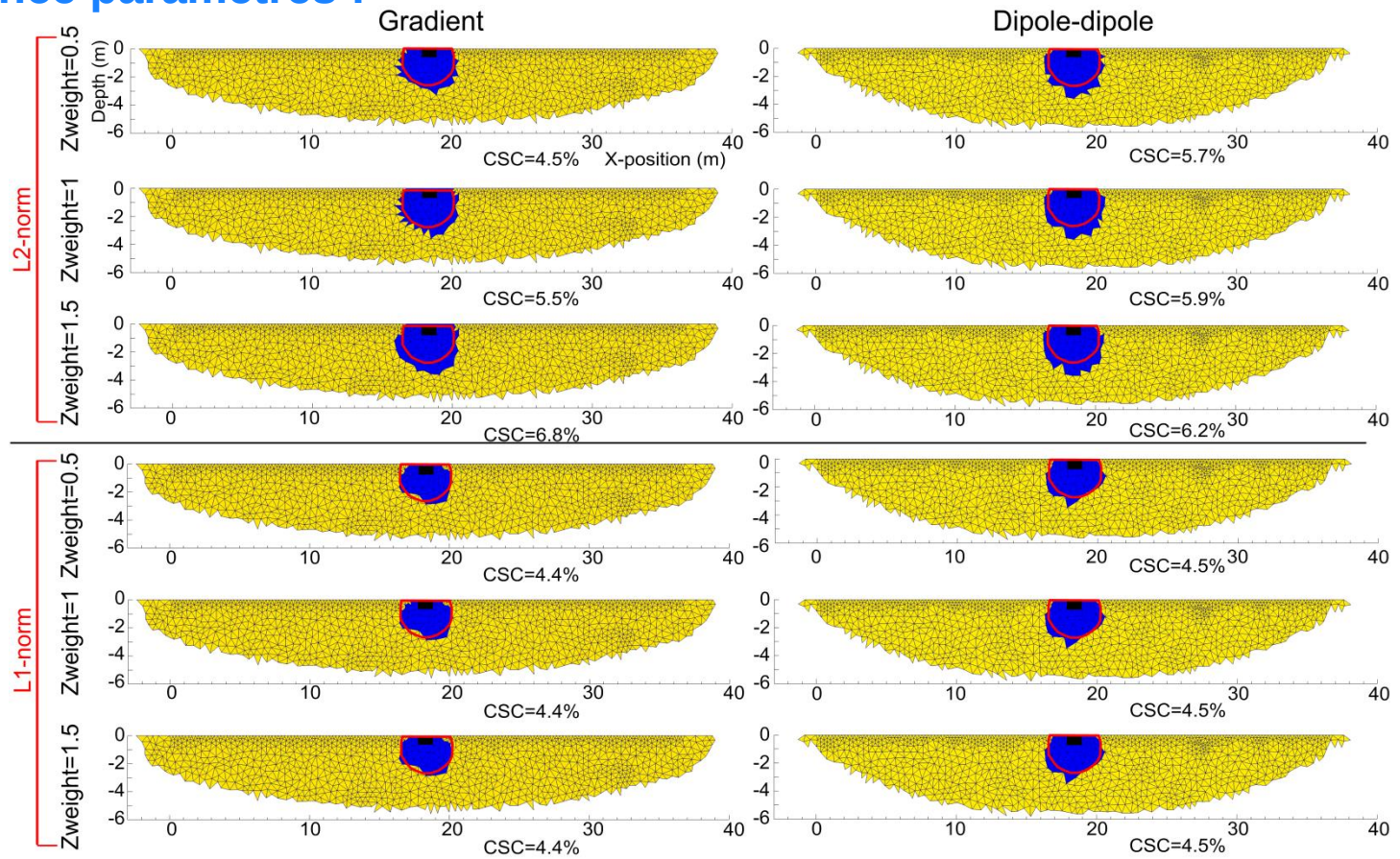
Validation numérique de MICS



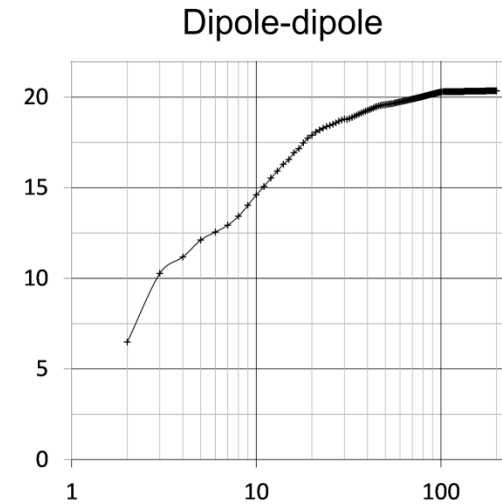
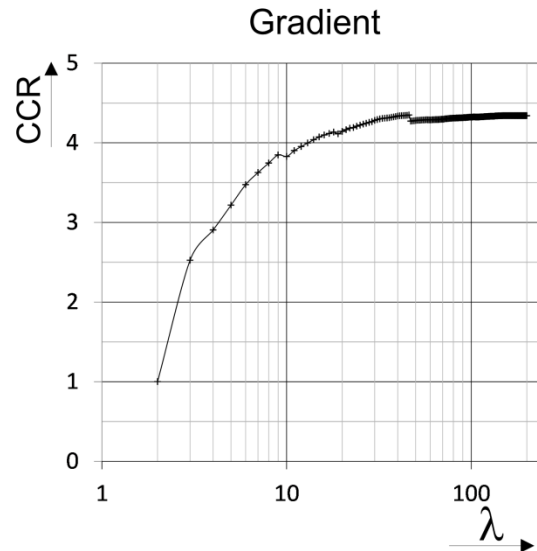
1200 inversions:



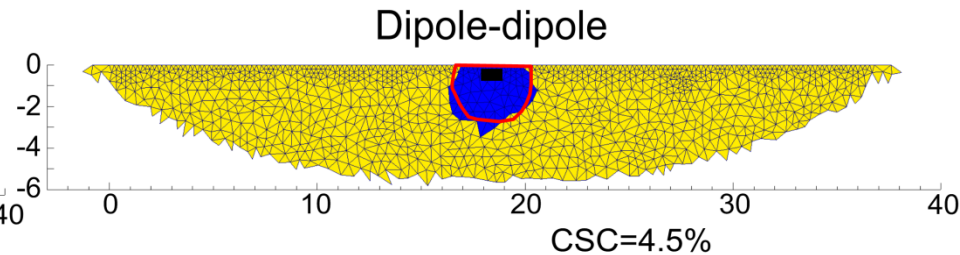
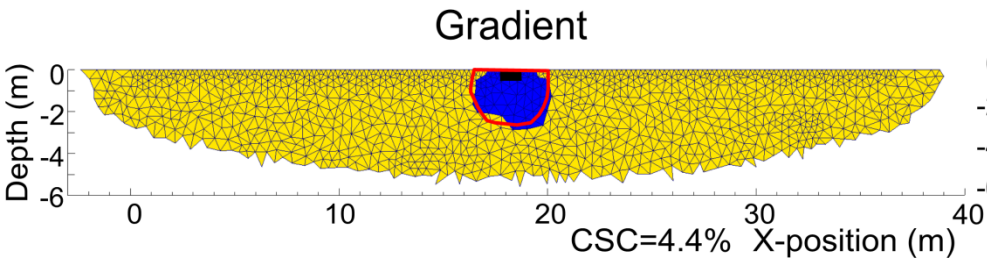
Influence paramètres :



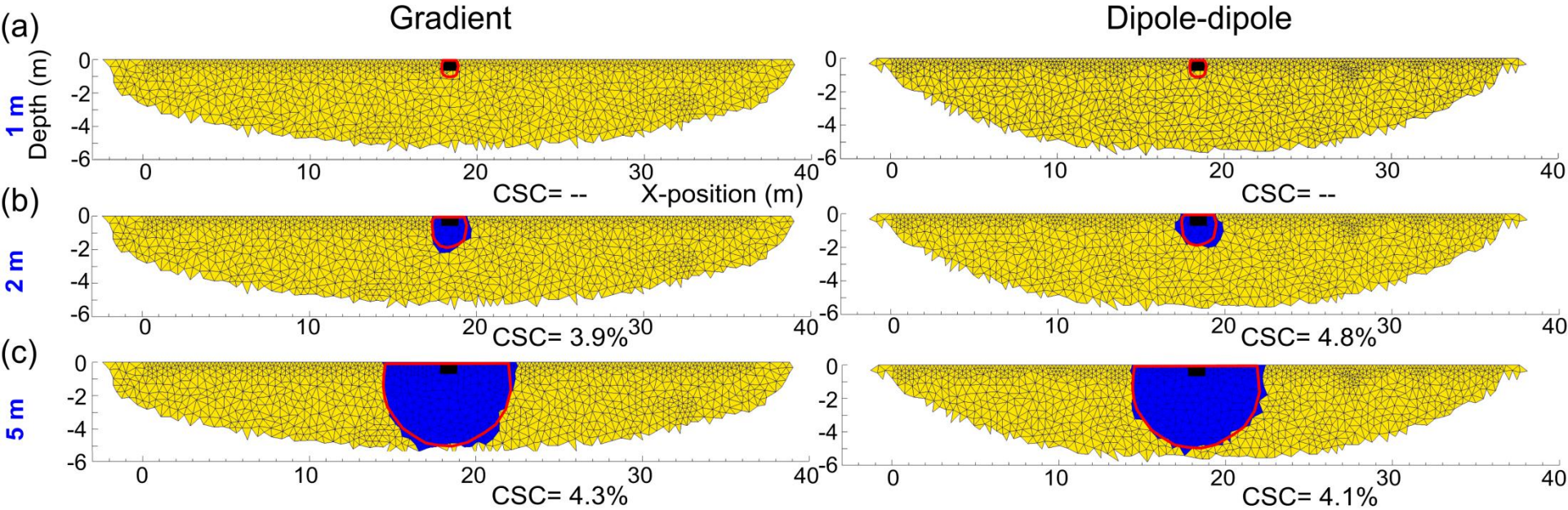
Réduction Lambda :



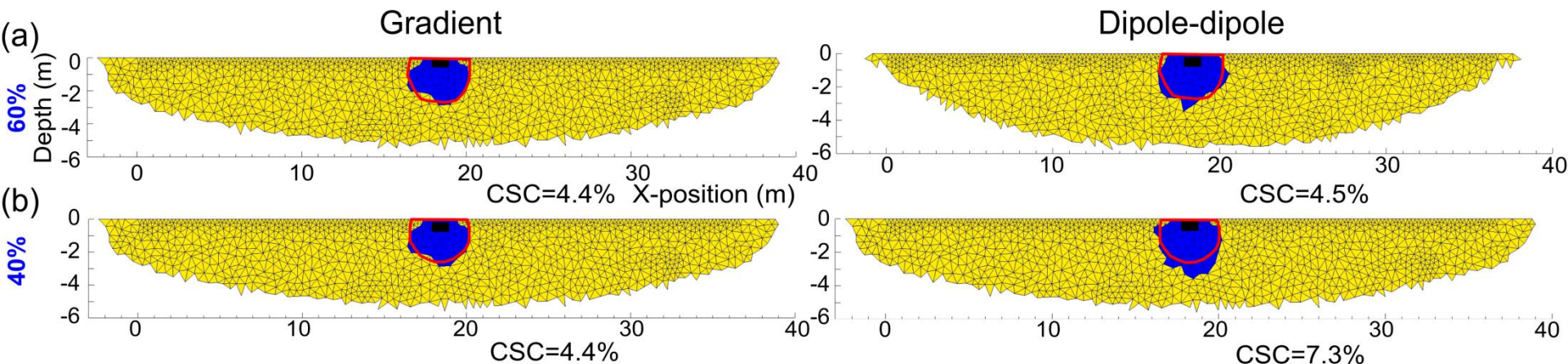
MICS avec le nombre réduit de paramètres :



Influence taille bulbe :

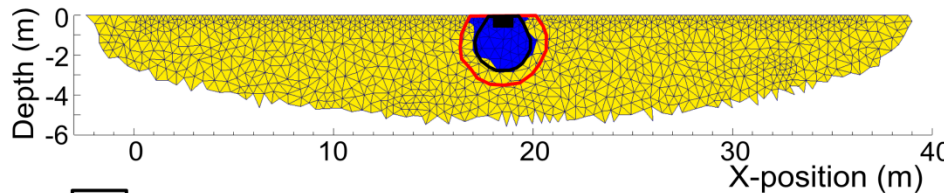


Influence contraste:

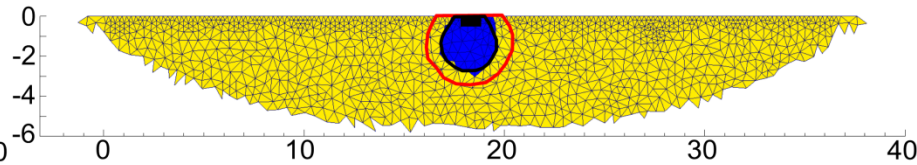


Influence front diffus:

Gradient



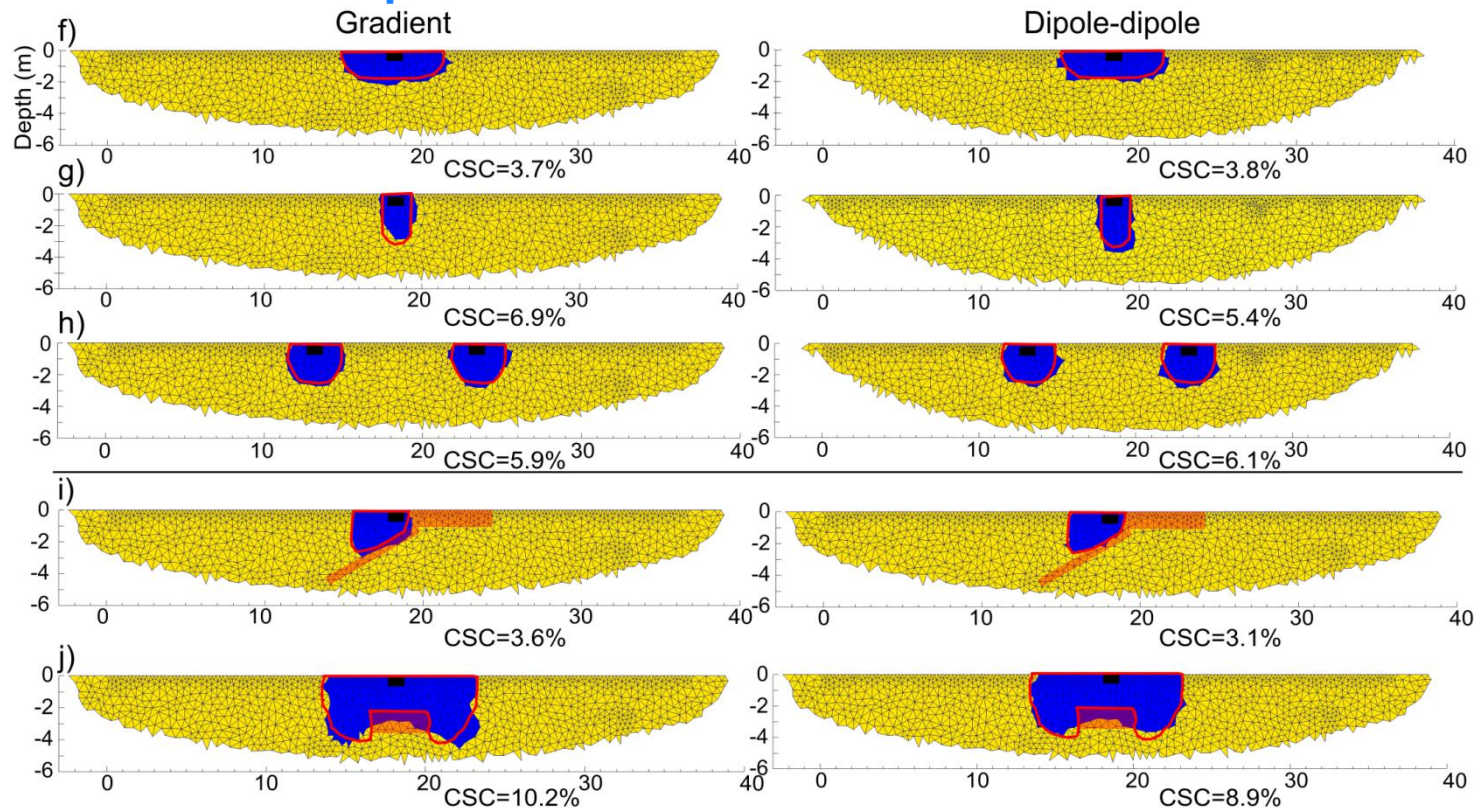
Dipole-dipole



= saturated zone ($\theta=0.7$)
 = unsaturated zone ($\theta=0$)

into the result of hydrodynamic simulation

Influence formes complexes:

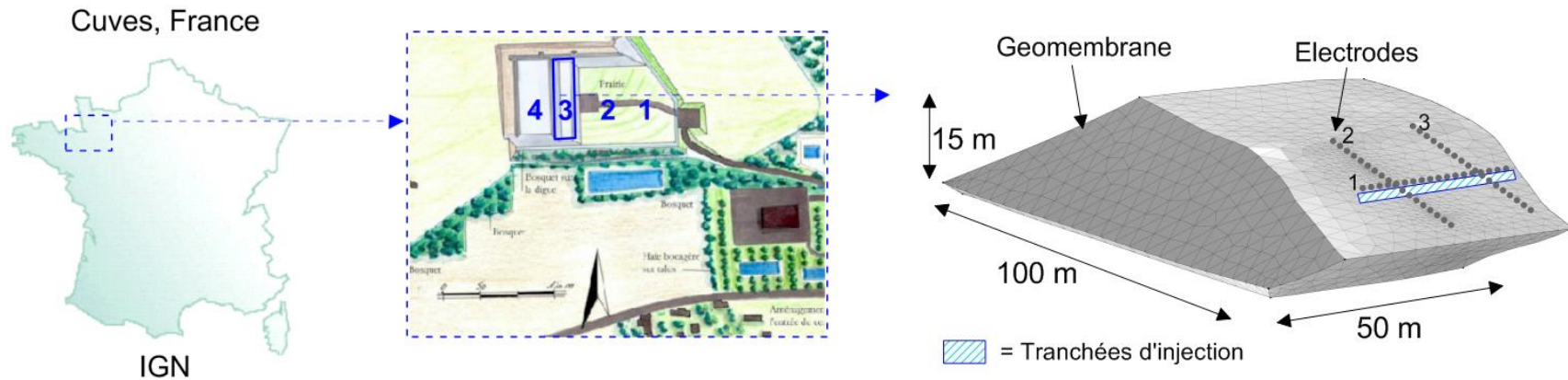


Hydraulic barriers position into the hydrodynamic scenarios in Fig.2

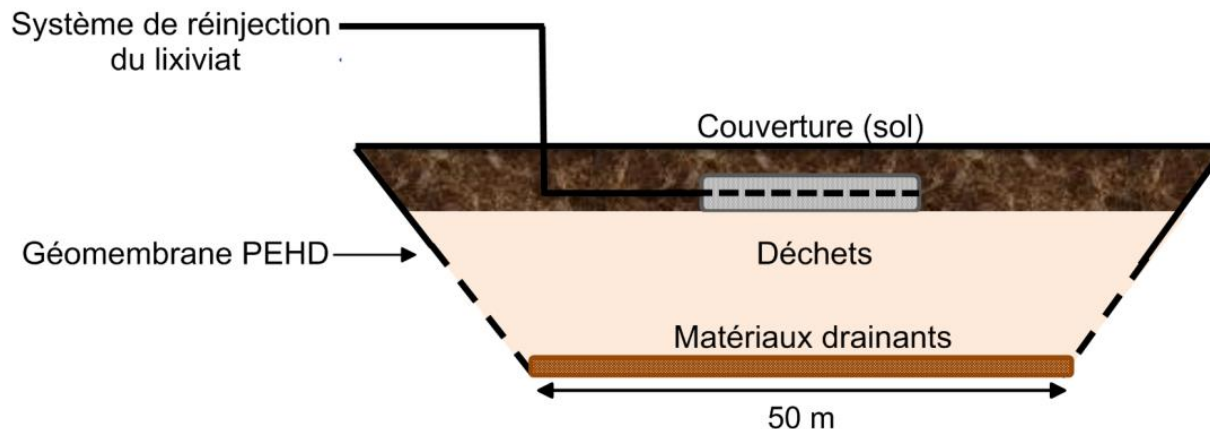
Application de MICS à un jeu de données de la SAS « Les Champs-Jouault »

Présentation du site d'étude :

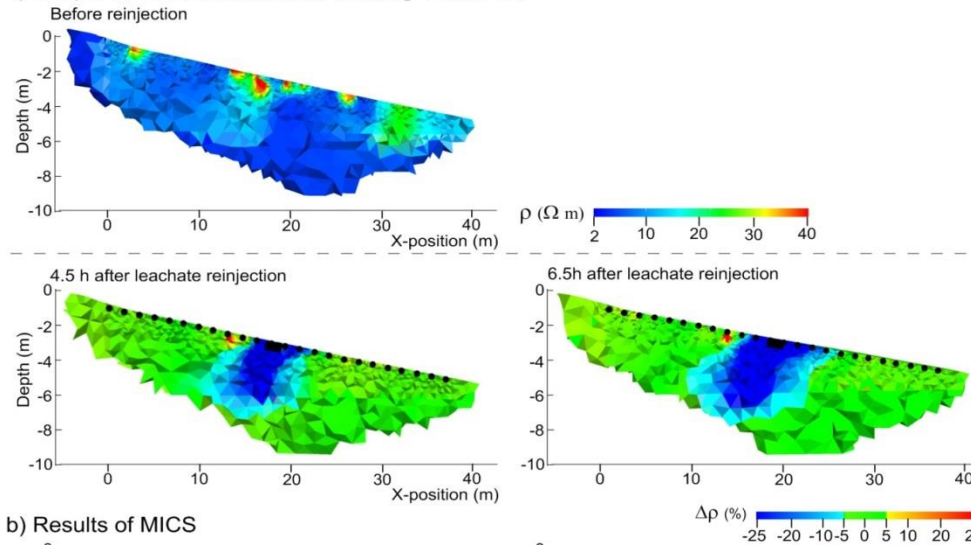
a) Situation et géométrie du massif de déchets



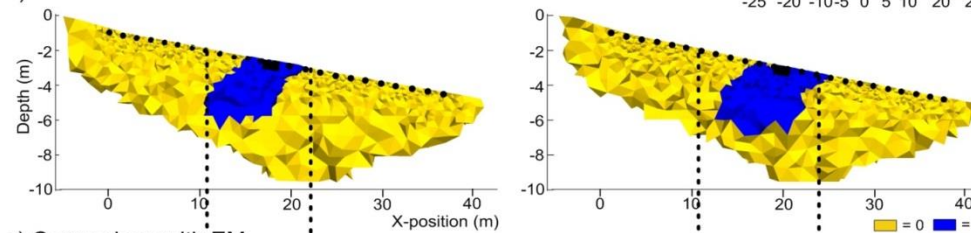
b) Structure du massif de déchets



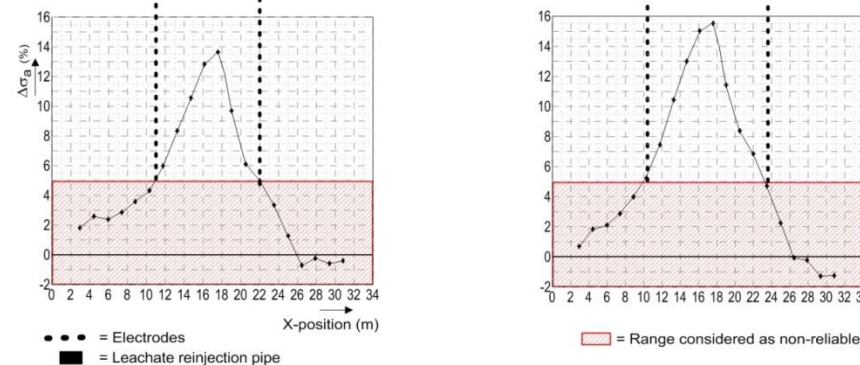
Application de MICS à un jeu de données de la SAS « Les Champs-Jouault »

a) Unique standard inversion (L1-norm, $w_e=1$ and $\lambda=30$)

b) Results of MICS

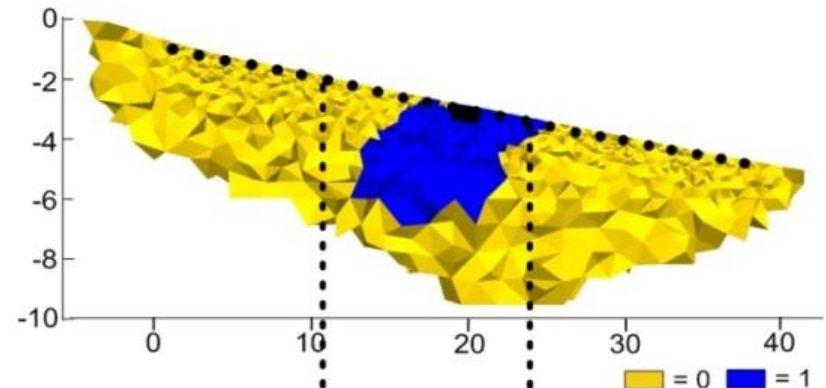
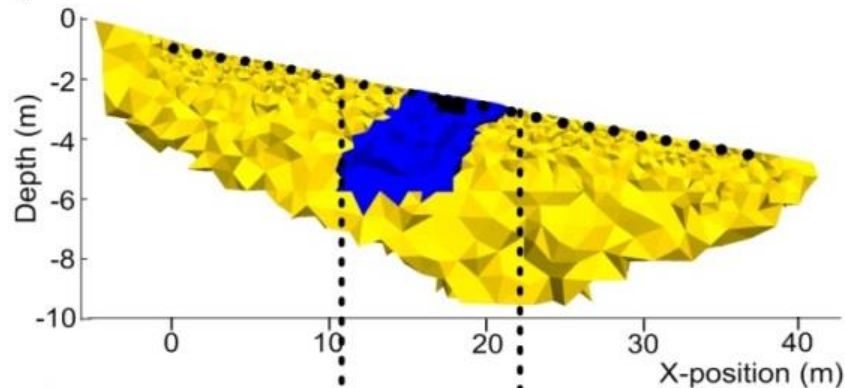


c) Comparison with EM

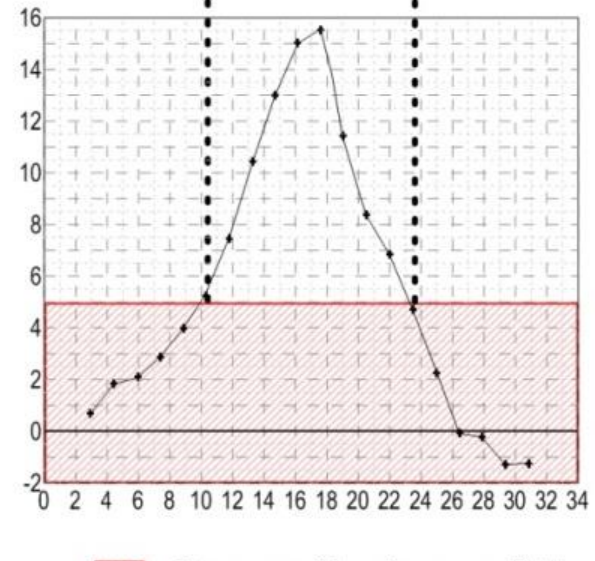
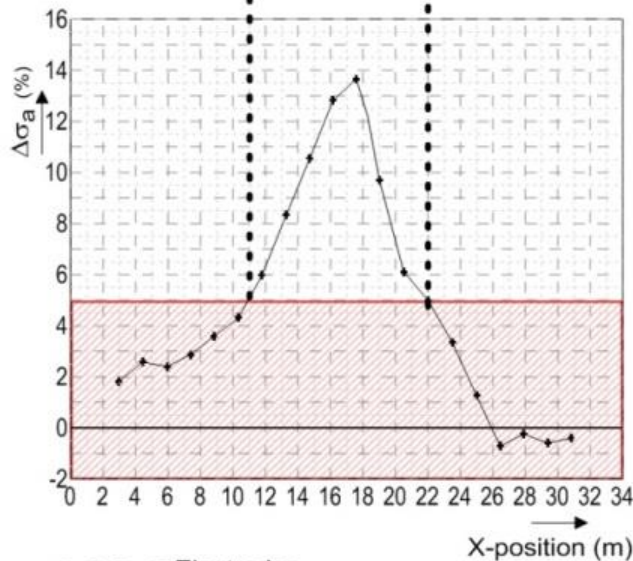


Application de MICS à un jeu de données de la SAS « Les Champs-Jouault »

b) Results of MICS



c) Comparison with EM



- • • = Electrodes
- = Leachate reinjection pipe

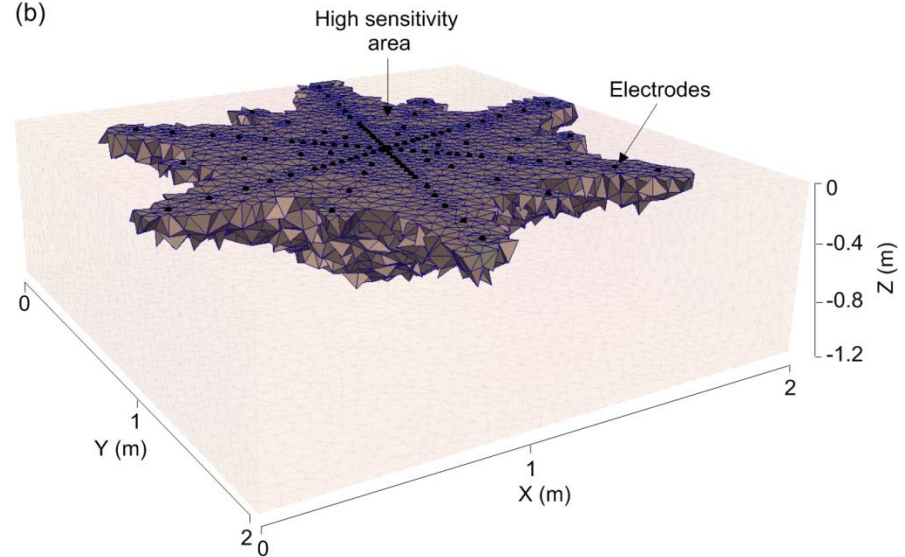
▨ = Range considered as non-reliable

MICS sur infiltration sous infiltromètre à disque :

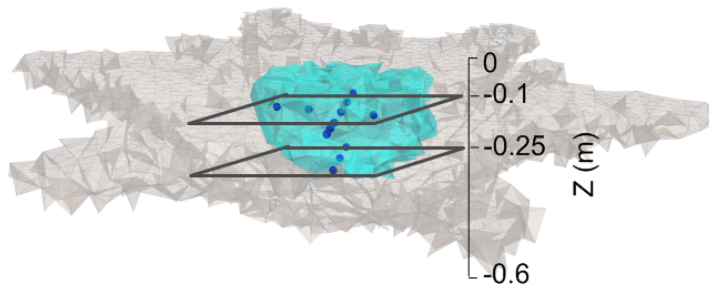
(a)



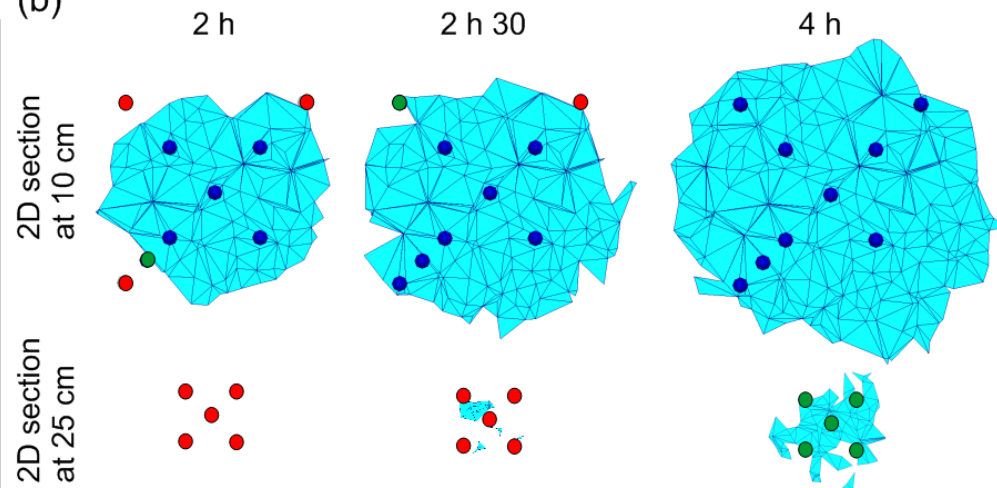
(b)



(a)



(b)



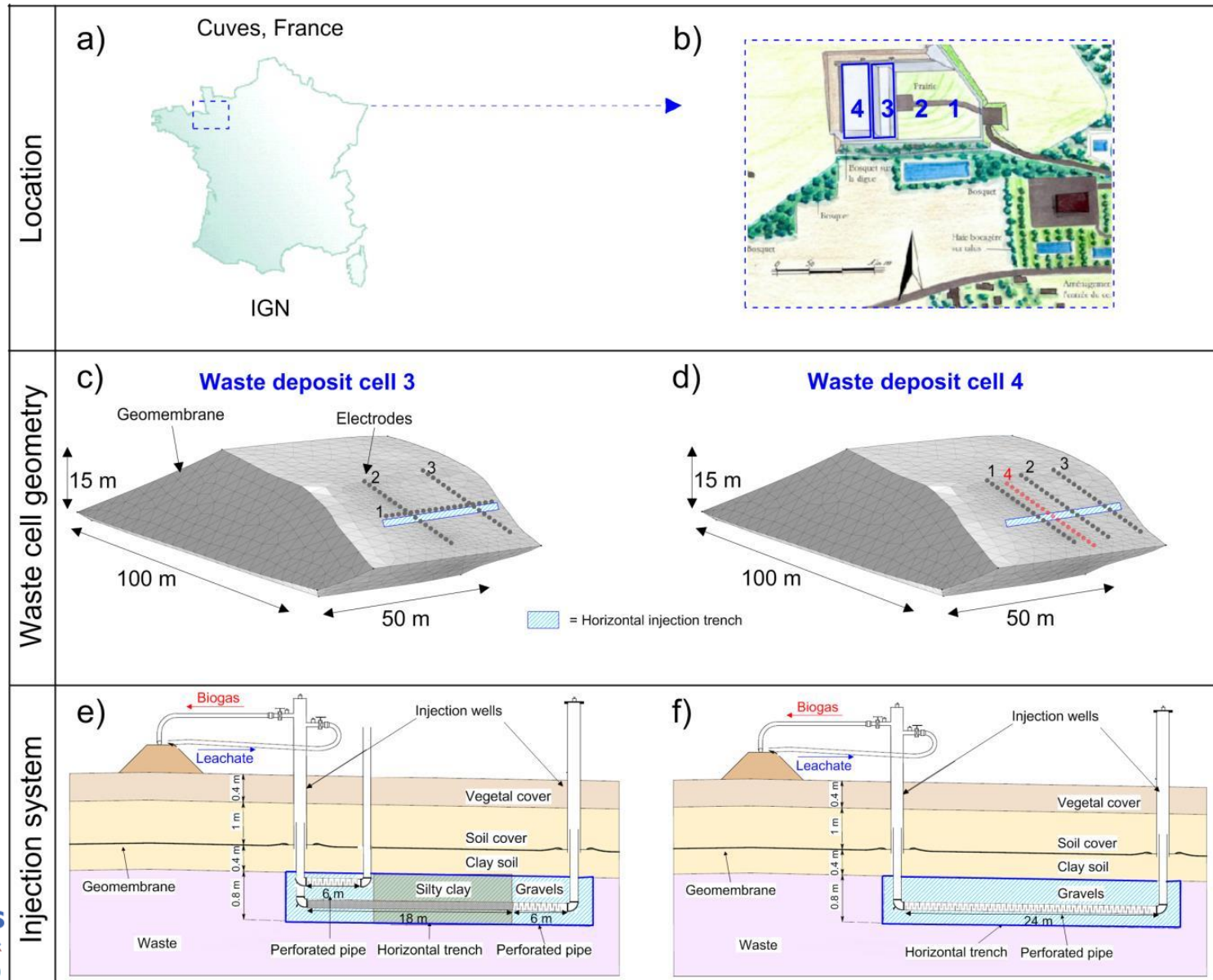
● = Wetted sensors

● = "Front" sensors

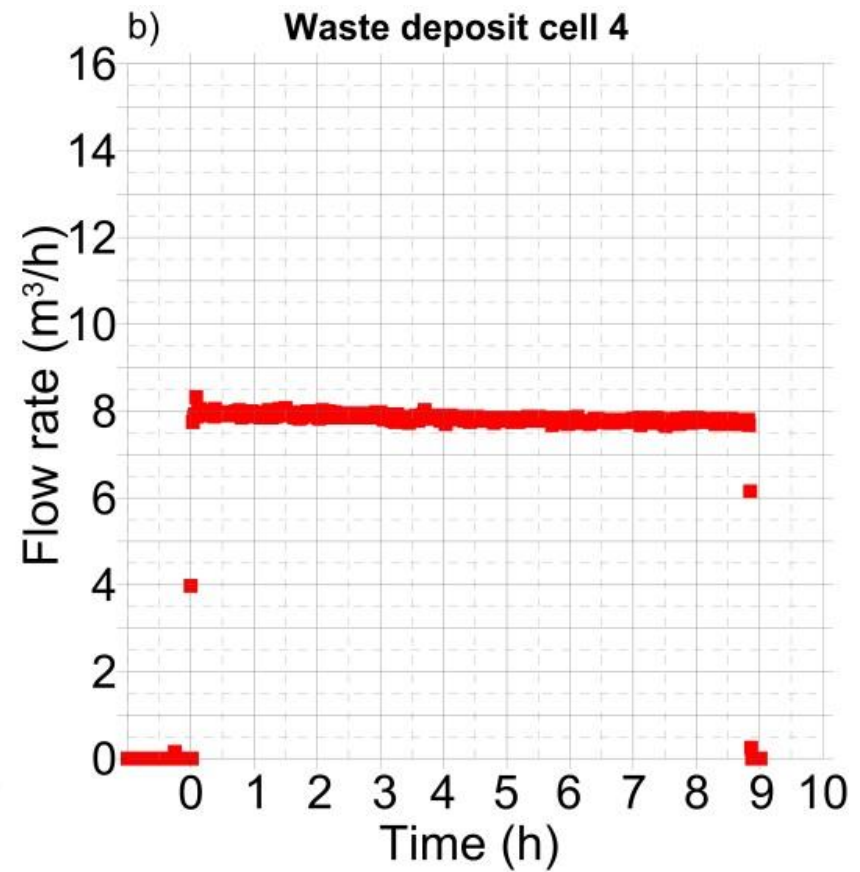
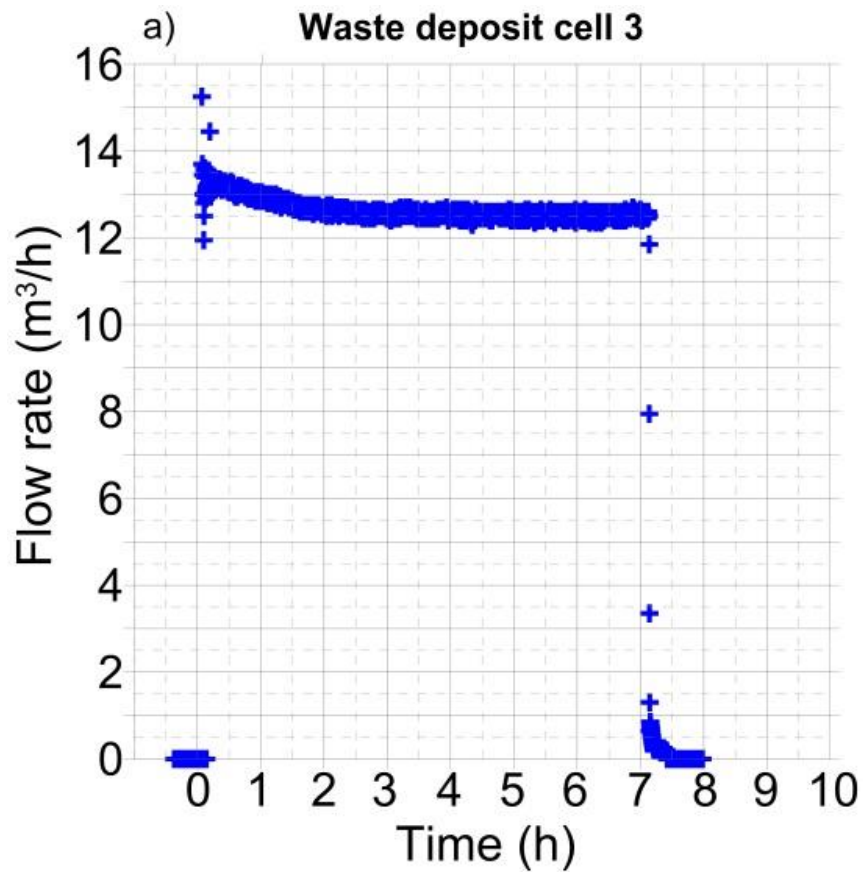
● = Dry sensors

■ = Infiltration area with MICS

Application de MICS aux suivis de réinjection casiers n°3 et 4



Application de MICS aux suivis de réinjection casiers n°3 et 4



Application de MICS aux suivis de réinjection casiers n°3 et 4

Casier de déchets n°3

Séquence de 3044 quadripôles :

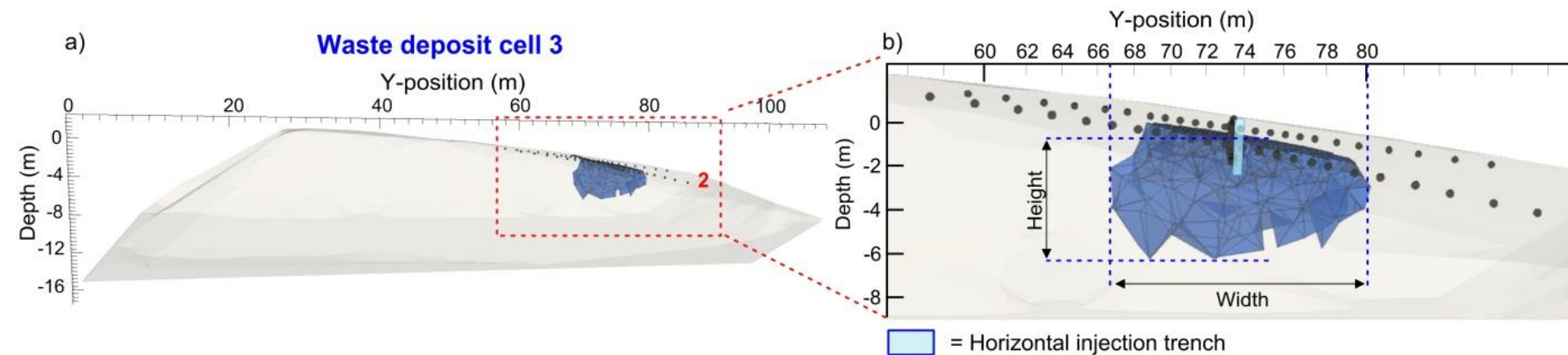
- dipôle-dipôle ;
- Wenner-Schlumberger ;
- gradient.

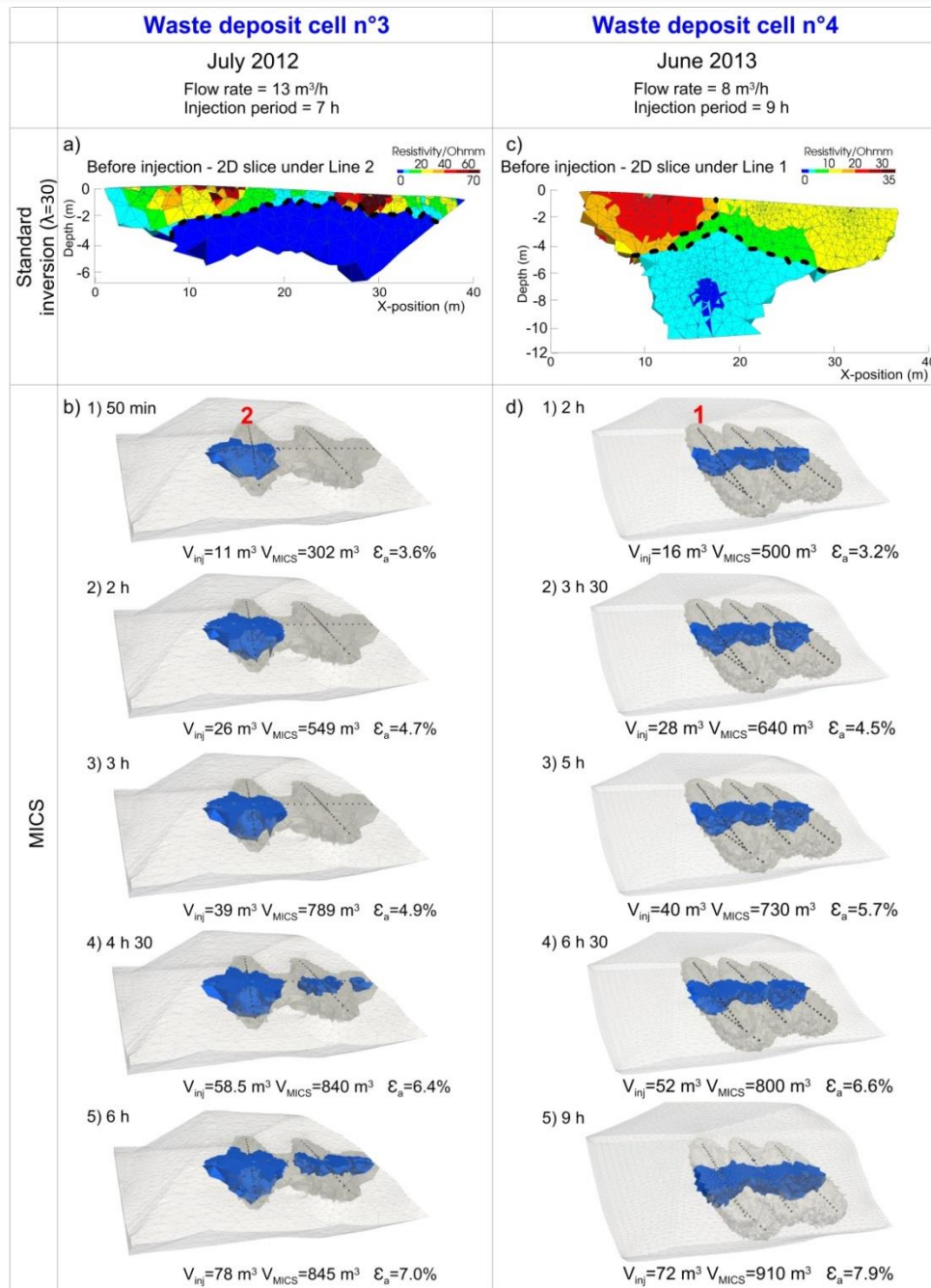
Casier de déchets n°4

Séquence de 4493 quadripôles :

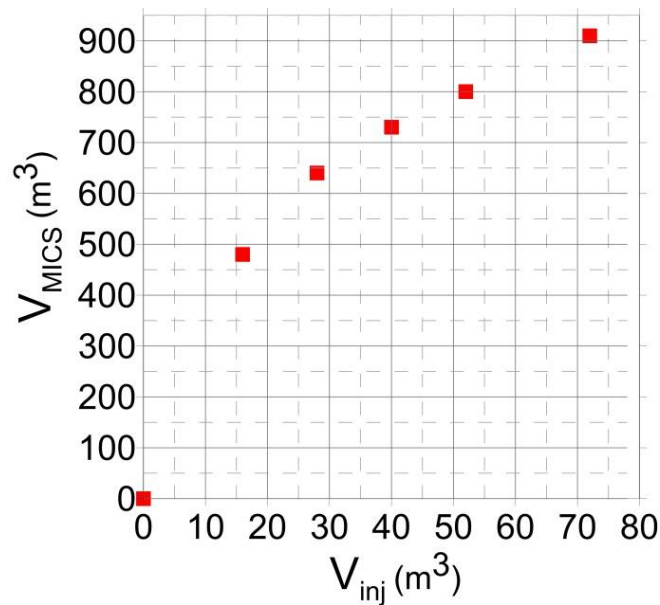
Ligne d'électrodes	a) Dipôle-dipôle	b) Gradient	c) Tripôle
Lignes 1, 2 ou 3 en surface			
Ligne 4 en profondeur			

Application de MICS aux suivis de réinjection casiers n°3 et 4

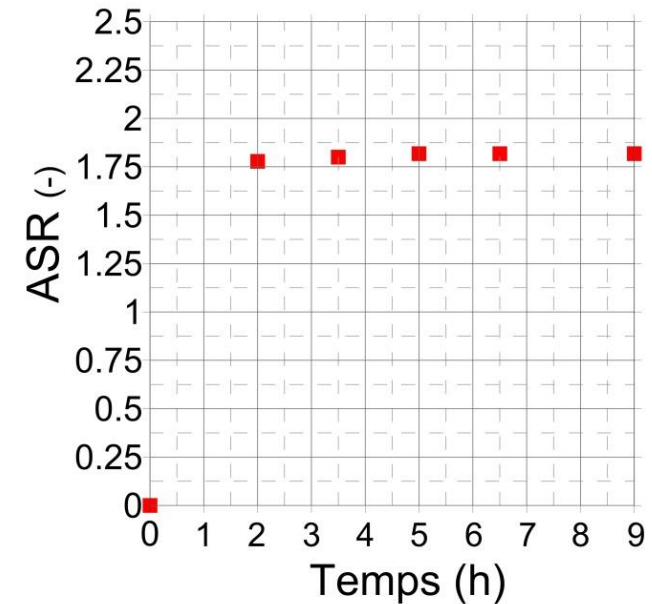




Etude du comportement hydrodynamique avec MICS



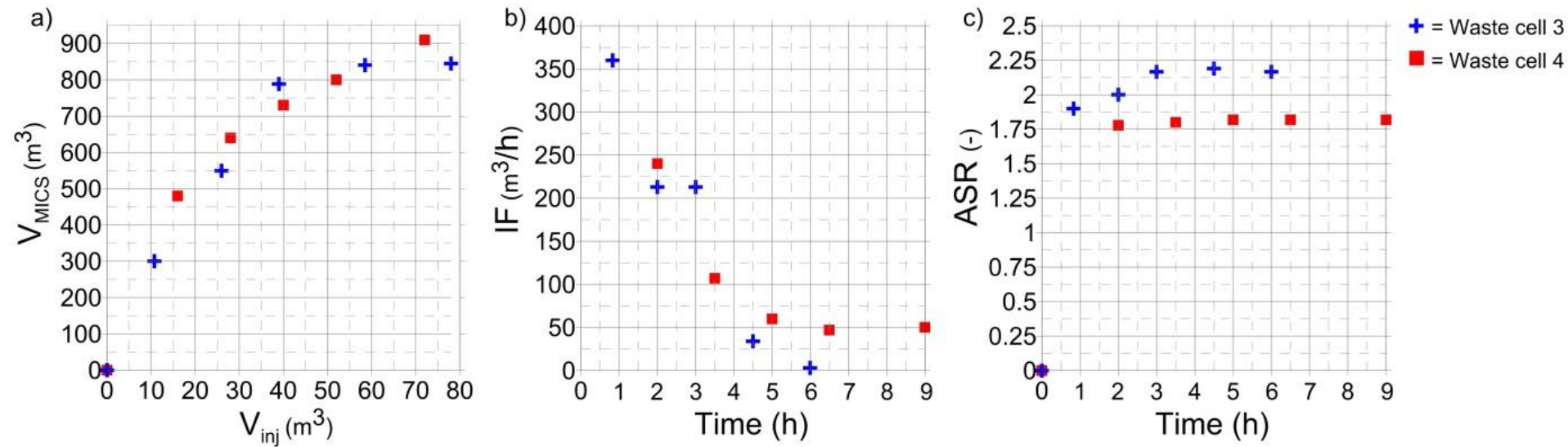
- Rapide augmentation de V_{MICS} avec $\sim 500 m^3$ de déchets humidifiés pour $16 m^3$ de lixiviat injecté
- Vitesse qui diminue avec le temps



Anisotropie de forme de 1.75
Infiltration plus étendue latéralement
que verticalement (compaction)

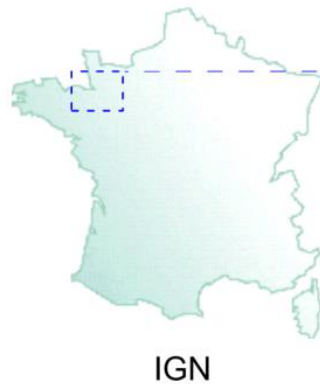
Application de MICS à un suivi de réinjection sur le casier n°3 :

Comportement hydrodynamique similaire



Développement de la méthode de contrainte

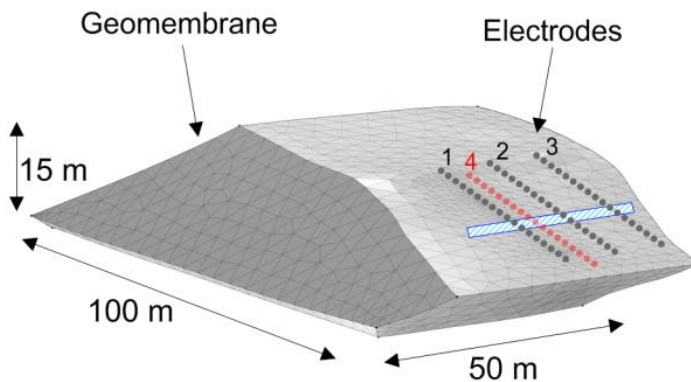
a) Location
Cuves, France



b) Waste deposit cells

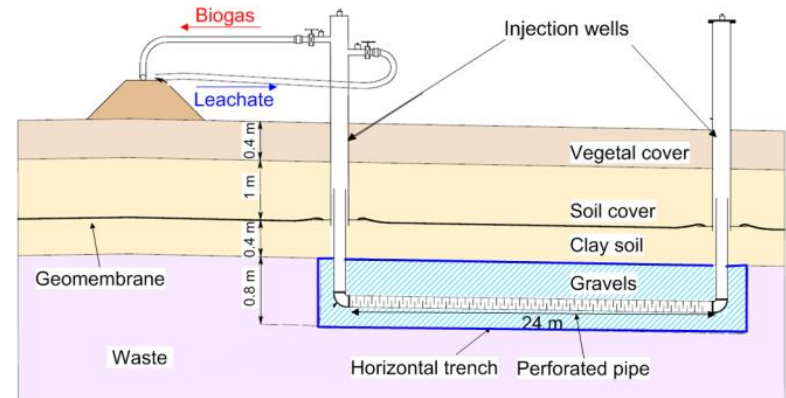


c) Waste cell 4 geometry



 = Horizontal injection trench

d) Injection system



a) Single continuum						
Initial conditions θ_i : [0.38 $\rightarrow$ 0.68]						
θ_r (m ³ .m ⁻³)	θ_s (m ³ .m ⁻³)	α (-)	n (-)	l (-)	K_s (m.s ⁻¹)	SF (-)
0.15	0.69	2	1.5	0.5	[10 ⁻⁷ $\rightarrow$ 10 ⁻³]	[1 $\rightarrow$ 16]

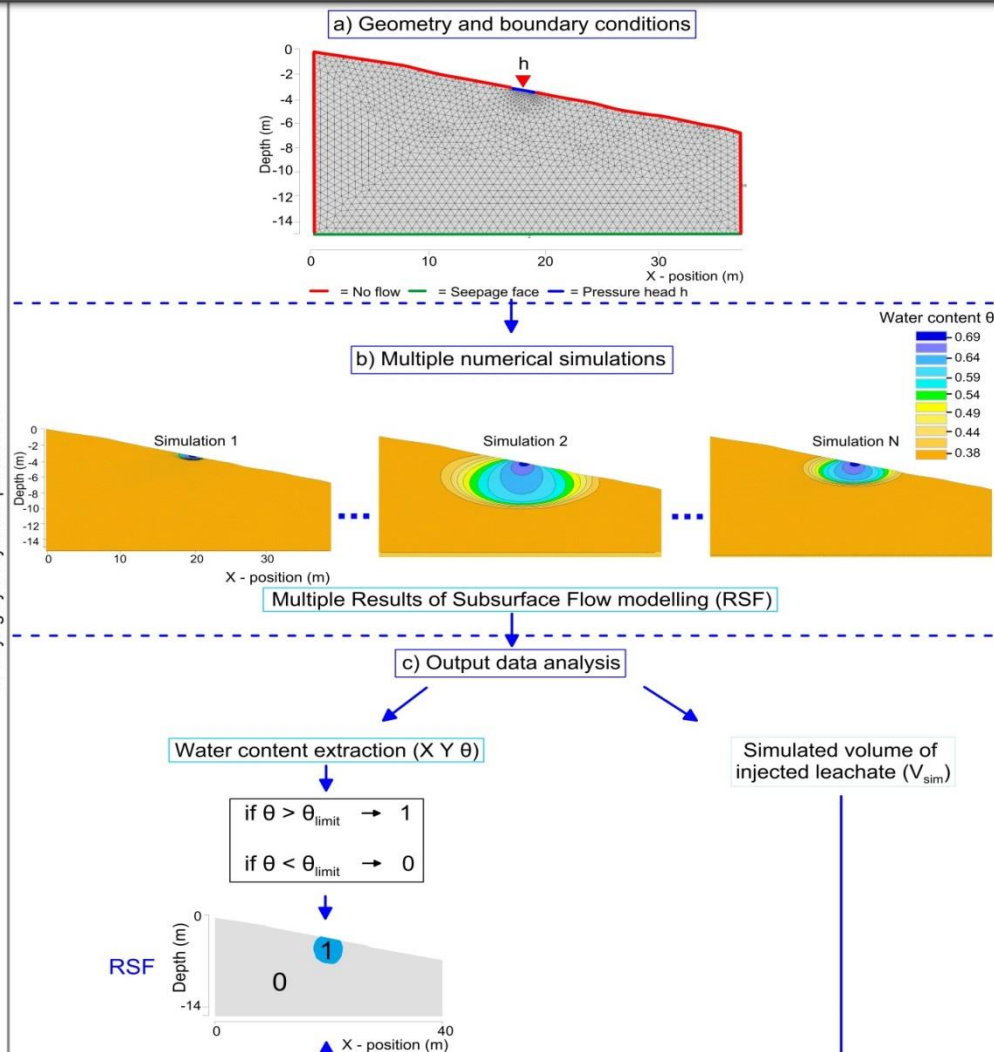
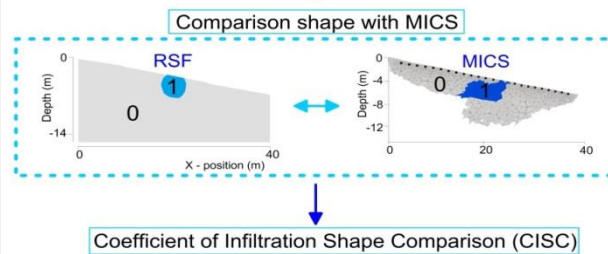
b) Dual continuum						
Initial conditions θ_i : 0.38						
Matrix						
θ_{rm} (m ³ .m ⁻³)	θ_{sm} (m ³ .m ⁻³)	α_m (-)	n_m (-)	l_m (-)	K_{sm} (m.s ⁻¹)	
$= \frac{\mathcal{E}_r}{1 - w}$	$= \frac{\mathcal{E} - w}{1 - w}$	2	1.5	0.5	[10 ⁻⁷ $\rightarrow$ 10 ⁻³]	
Fractures						
θ_{rf} (m ³ .m ⁻³)	θ_{sf} (m ³ .m ⁻³)	α_f (-)	n_f (-)	l_f (-)	K_{sf} (m.s ⁻¹)	w (-)
0	1	[1 $\rightarrow$ 100]	1.5	0.5	[10 ⁻⁵ $\rightarrow$ 10 ⁻¹]	[0.01 $\rightarrow$ 0.15]
Transfer				Anisotropy		
a (-)	β (-)	γ (-)	K_{sa} (m.s ⁻¹)	Matrix and fracture SF (-)		
0.1	3	0.4	[10 ⁻⁹ $\rightarrow$ 10 ⁻⁵]	10		

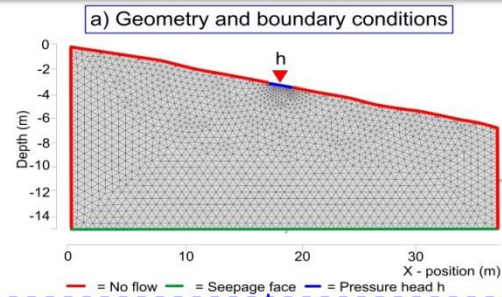
In **green**: Varying parametersIn **red**: Linked parameters

In black: Fixed parameters

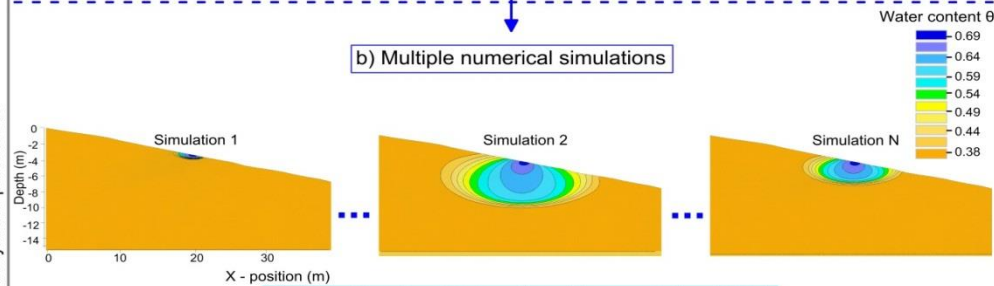
Residual porosity $\mathcal{E}_r=0.15$ Total porosity $\mathcal{E}=0.69$

Table 1 - Hydrodynamic parameter variation ranges for:
(a) the single continuum and (b) the dual continuum approaches.

1) Multiple Subsurface Flow Modelling
in varying hydrodynamic parameters2) Comparison with MICS and V_{real} 

1) Multiple Subsurface Flow Modelling
in varying hydrodynamic parameters

b) Multiple numerical simulations

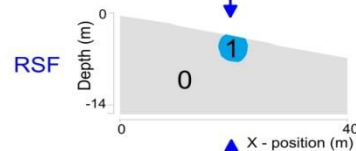


Multiple Results of Subsurface Flow modelling (RSF)

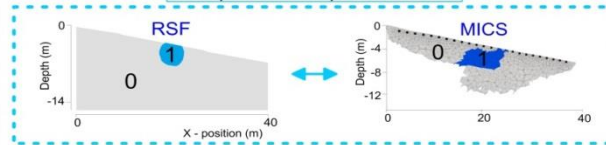
c) Output data analysis

Water content extraction (X Y θ)

if $\theta > \theta_{\text{limit}} \rightarrow 1$
if $\theta < \theta_{\text{limit}} \rightarrow 0$

Simulated volume of
injected leachate (V_{sim})2) Comparison with MICS and V_{real}

Comparison shape with MICS

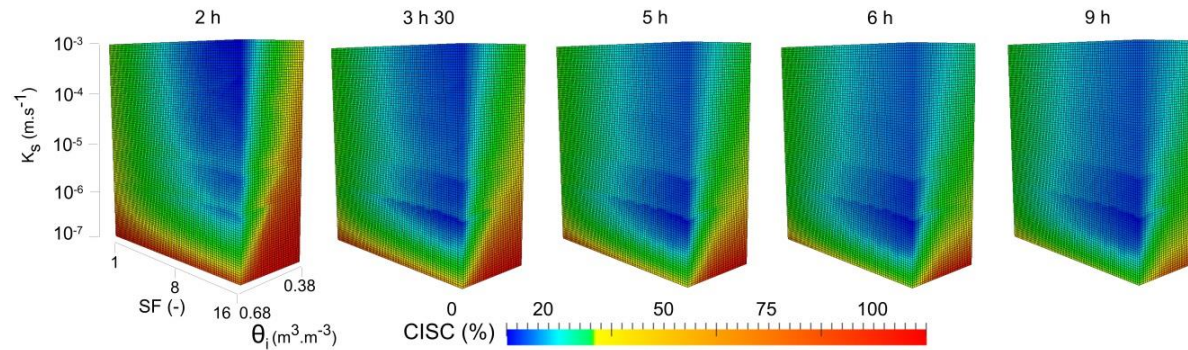


Coefficient of Infiltration Shape Comparison (CISC)

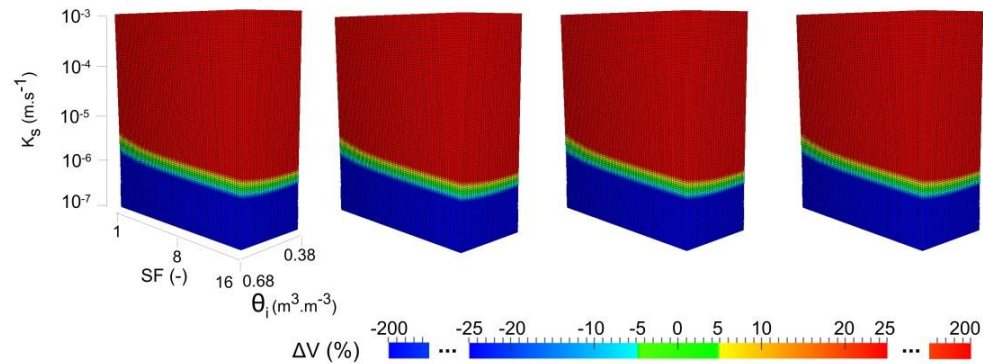
 ΔV

1) Results of the comparison:

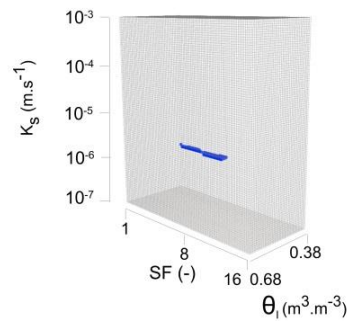
a) Infiltration shapes:



b) Volume of injected leachate:

**2) Set of hydrodynamic parameters satisfying
the two comparison criteria for the 5 time steps:**

CISC < 20%
 $-5\% < \Delta V < 5\%$



a) Single continuum						
Initial conditions θ_i : [0.64 $\rightarrow$ 0.68]						
θ_r (m ³ .m ⁻³)	θ_s (m ³ .m ⁻³)	α (-)	n (-)	l (-)	K_s (m.s ⁻¹)	SF (-)
0.15	0.69	2	1.5	0.5	6.10 ⁻⁶	[6 $\rightarrow$ 12]

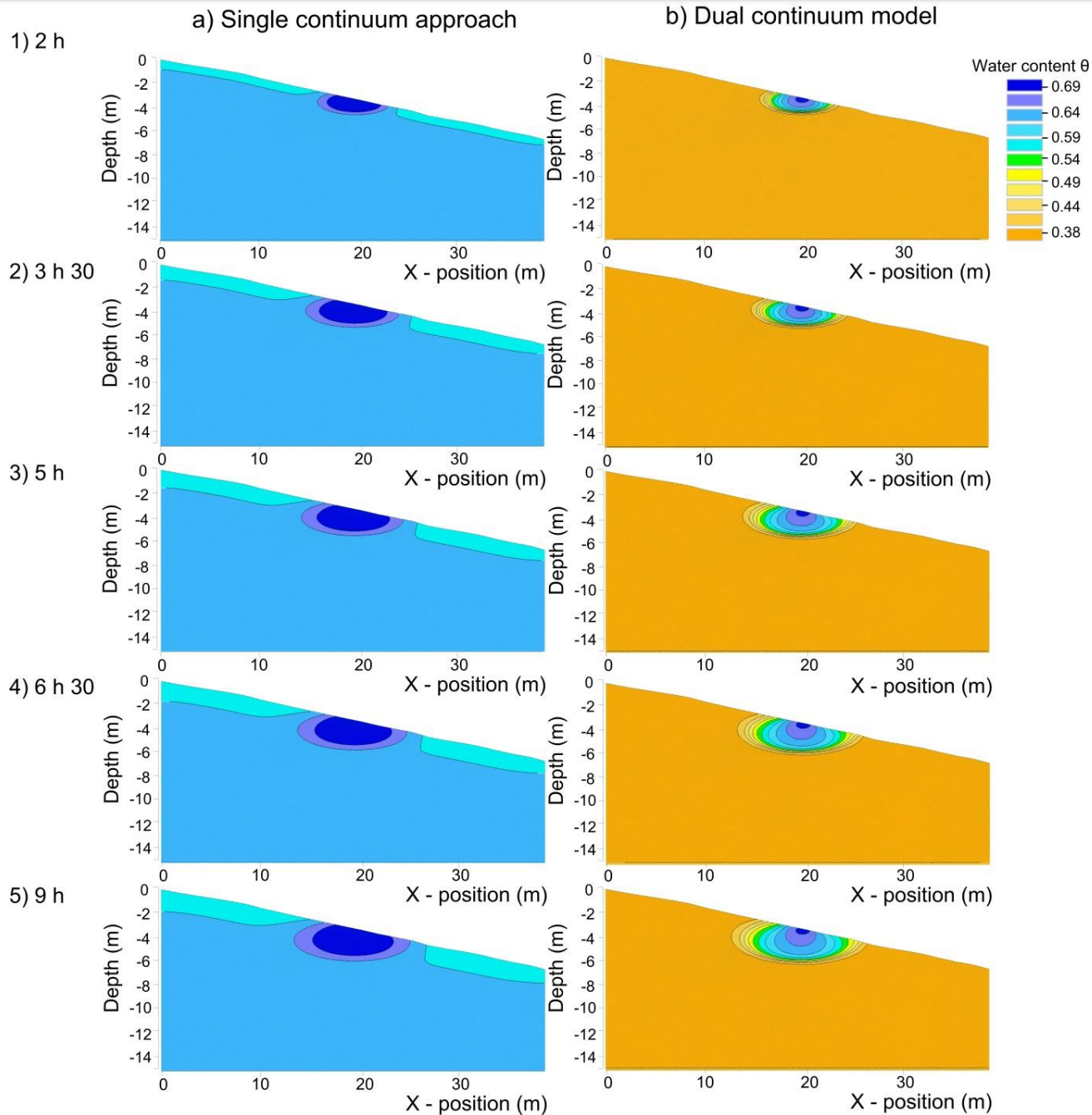
b) Dual continuum						
Initial conditions θ_i : 0.38						
Matrix						
θ_{rm} (m ³ .m ⁻³)	θ_{sm} (m ³ .m ⁻³)	α_m (-)	n_m (-)	l_m (-)	K_{sm} (m.s ⁻¹)	
$= \frac{\mathcal{E}_r}{1 - w}$	$= \frac{\mathcal{E} - w}{1 - w}$	2	1.5	0.5	5.10 ⁻⁵	
Fractures						
θ_{rf} (m ³ .m ⁻³)	θ_{sf} (m ³ .m ⁻³)	α_f (-)	n_f (-)	l_f (-)	K_{sf} (m.s ⁻¹)	w (-)
0	1	[10 $\rightarrow$ 100]	1.5	0.5	[10 ⁻³ $\rightarrow$ 10 ⁻²]	0.05 and 0.1
Transfer				Anisotropy		
a (-)	β (-)	γ (-)	K_{sa} (m.s ⁻¹)	Matrix and fracture SF (-)		
0.1	3	0.4	[10 ⁻⁸ $\rightarrow$ 10 ⁻⁶]	10		

In **green**: Varying parametersIn **red**: Linked parameters

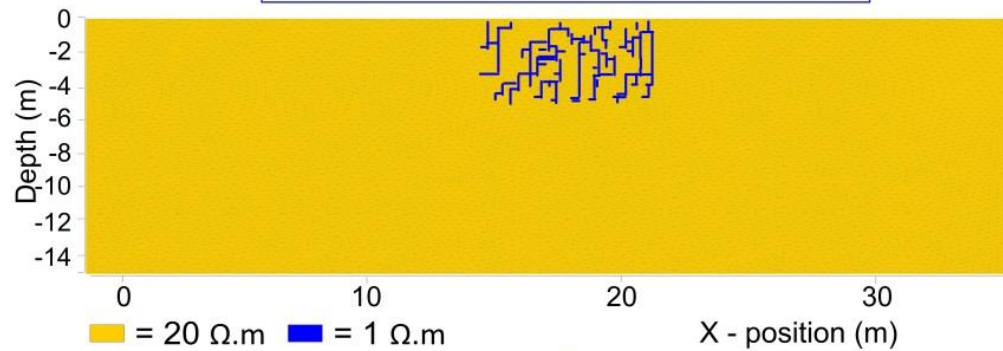
In black: Fixed parameters

Residual porosity $\mathcal{E}_r=0.15$ Total porosity $\mathcal{E}=0.69$

Table 2 - Assessment of hydrodynamic parameters by the constraint methodology for:
(a) the single continuum and (b) the dual continuum approaches.



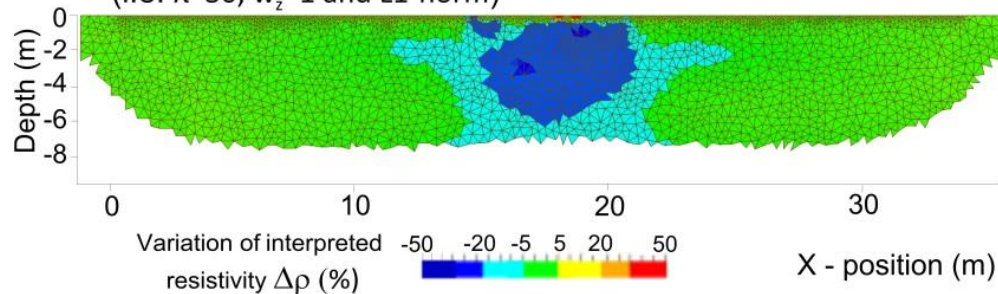
1) Design of the true resistivity model



2) Forward calculation

3) Inversion

a) Standard ERT inversion with one inversion parameter set
(i.e. $\lambda=30$, $w_z=1$ and L1-norm)



b) MICS inversion

