

Journée technique du CFMS  
**Érosion et ouvrages géotechniques**  
CNAM, Paris, 9 décembre 2009

# Reconnaissance et surveillance géophysiques d'ouvrages en terre : exemples de recherche

Sérgio Palma Lopes, LCPC



1. Auscultation géophysique
2. Recherches thématiques
3. Essais de monitoring
4. Conclusion



- aperçu de quelques recherches au LCPC (et partenaires) en lien avec l'auscultation des ouvrages en terre
  - passées, présentes, futures
- .... et dont certaines pour/avec ERINOH



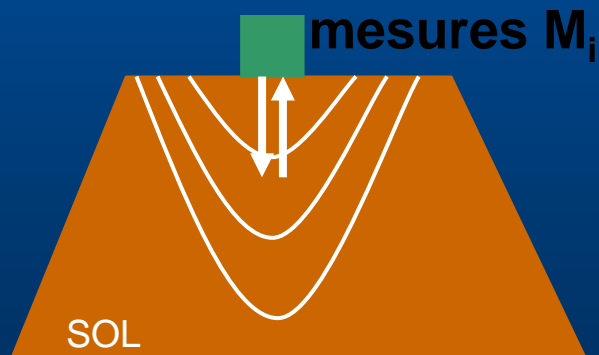


## Acquisition



**non intrusives, indirectes, intégrantes**

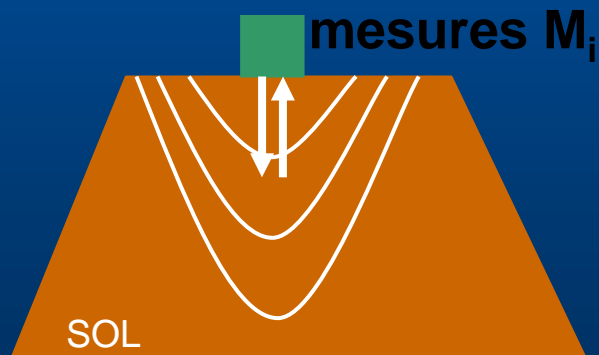
modélisation réponses :  
sensibilité, biais



## Acquisition



modélisation réponses :  
sensibilité, biais



## Imagerie

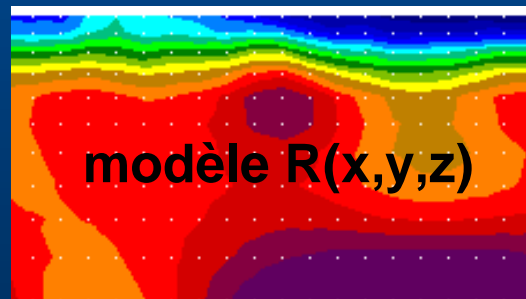
$$\mathbf{d} = \mathbf{g}(\mathbf{m})$$

$$\begin{cases} \delta \mathbf{d}_i = \mathbf{d}^{mes} - \mathbf{g}(\mathbf{m}) \\ \delta \mathbf{m} = (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0) \end{cases} \quad \mathbf{G}_{ij}^{pq} = \left( \frac{\partial d_p}{\partial m_{ij}} \right)$$

$$(\delta \mathbf{d}_i - \mathbf{G}_i \delta \mathbf{m})' \mathbf{W}_d (\delta \mathbf{d}_i - \mathbf{G}_i \delta \mathbf{m}) + \lambda (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)' \mathbf{W}_m (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)$$

$$\delta \mathbf{m}^{est} = (\mathbf{m}_0 - \mathbf{m}) + [\mathbf{G}'_i \mathbf{W}_d \mathbf{G}_i + \lambda \mathbf{W}_m]^{-1} \mathbf{G}'_i \mathbf{W}_d [\mathbf{d}^{mes} - \mathbf{d}^{pre} - \mathbf{G}_i (\mathbf{m}_0 - \mathbf{m})]$$

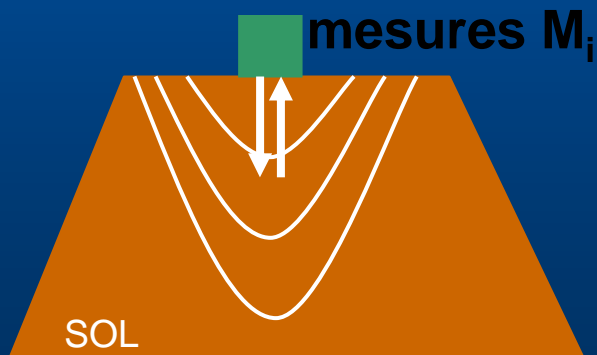
algorithmes +  
critères d'évaluation



## Acquisition



modélisation réponses :  
sensibilité, biais



## Imagerie

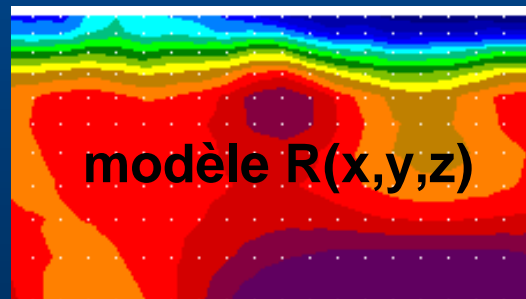
$$\mathbf{d} = g(\mathbf{m})$$

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{d}_i &= \mathbf{d}^{mes} - g(\mathbf{m}) \\ \delta \mathbf{m} &= (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0) \end{aligned} \quad \mathbf{G}_{ij}^{pq} = \left( \frac{\partial d_p}{\partial m_{ij}} \right)$$

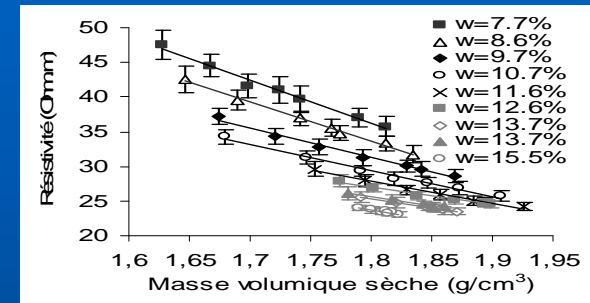
$$(\delta \mathbf{d}_i - \mathbf{G}_i \delta \mathbf{m})' \mathbf{W}_d (\delta \mathbf{d}_i - \mathbf{G}_i \delta \mathbf{m}) + \lambda (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)' \mathbf{W}_m (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)$$

$$\delta \mathbf{m}^{est} = (\mathbf{m}_0 - \mathbf{m}) + [\mathbf{G}' \mathbf{W}_d \mathbf{G} + \lambda \mathbf{W}_m]^{-1} \mathbf{G}' \mathbf{W}_d [\mathbf{d}^{mes} - \mathbf{d}^{pre} - \mathbf{G}(\mathbf{m}_0 - \mathbf{m})]$$

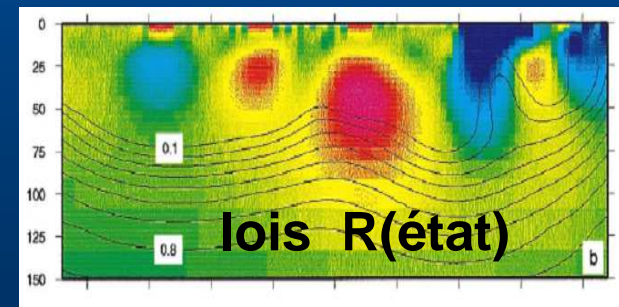
algorithmes +  
critères d'évaluation



## Lois « sols »



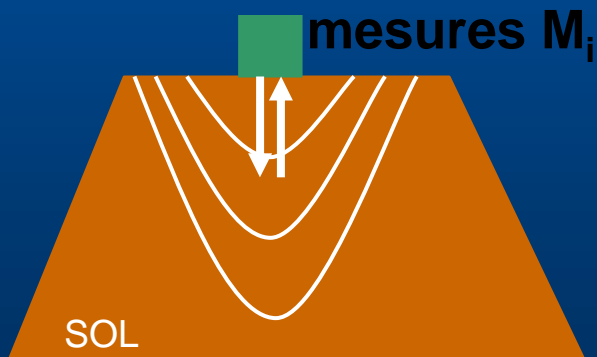
étalonnages  
empiriques / théoriques



## Acquisition



modélisation réponses :  
sensibilité, biais



## Imagerie

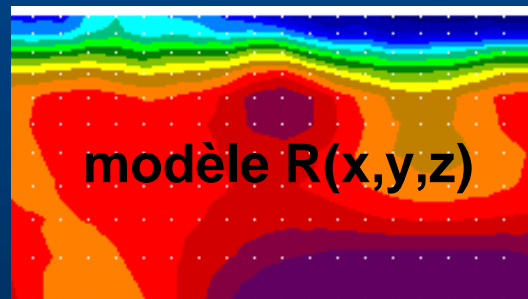
$$\mathbf{d} = \mathbf{g}(\mathbf{m})$$

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{d}_i &= \mathbf{d}^{mes} - \mathbf{g}(\mathbf{m}_0) \\ \delta \mathbf{m} &= (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0) \end{aligned} \quad \mathbf{G}_i^{pq} = \begin{pmatrix} \frac{\partial d_p}{\partial m_q} \end{pmatrix}$$

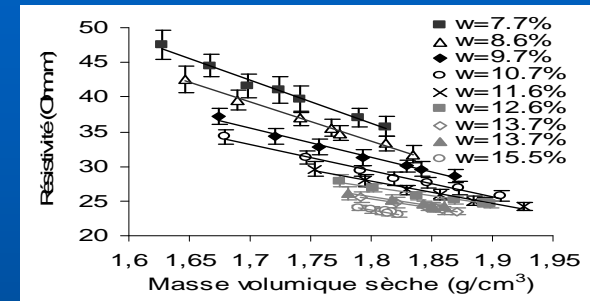
$$(\delta \mathbf{d}_i - \mathbf{G}_i \delta \mathbf{m})' \mathbf{W}_d (\delta \mathbf{d}_i - \mathbf{G}_i \delta \mathbf{m}) + \lambda (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)' \mathbf{W}_m (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)$$

$$\delta \mathbf{m}^{est} = (\mathbf{m}_0 - \mathbf{m}) + [\mathbf{G}_i' \mathbf{W}_d \mathbf{G}_i + \lambda \mathbf{I}_m]^{-1} \mathbf{G}_i' \mathbf{W}_d [\mathbf{d}^{mes} - \mathbf{d}^{pre} - \mathbf{G}_i (\mathbf{m}_0 - \mathbf{m})]$$

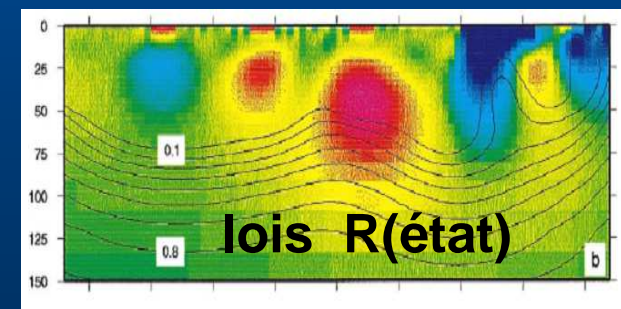
algorithmes +  
critères d'évaluation



## Lois « sols »



étalonnages  
empiriques / théoriques





### Imagerie 3D de résistivité - L.Marescot (2004), IG-Lausanne et LCPC

- algorithme d'imagerie 3D de résistivité sous CESAR-LCPC
- géométrie et configuration d'acquisition quelconques
- beaucoup de données
- « objets » du génie civil

INVS :

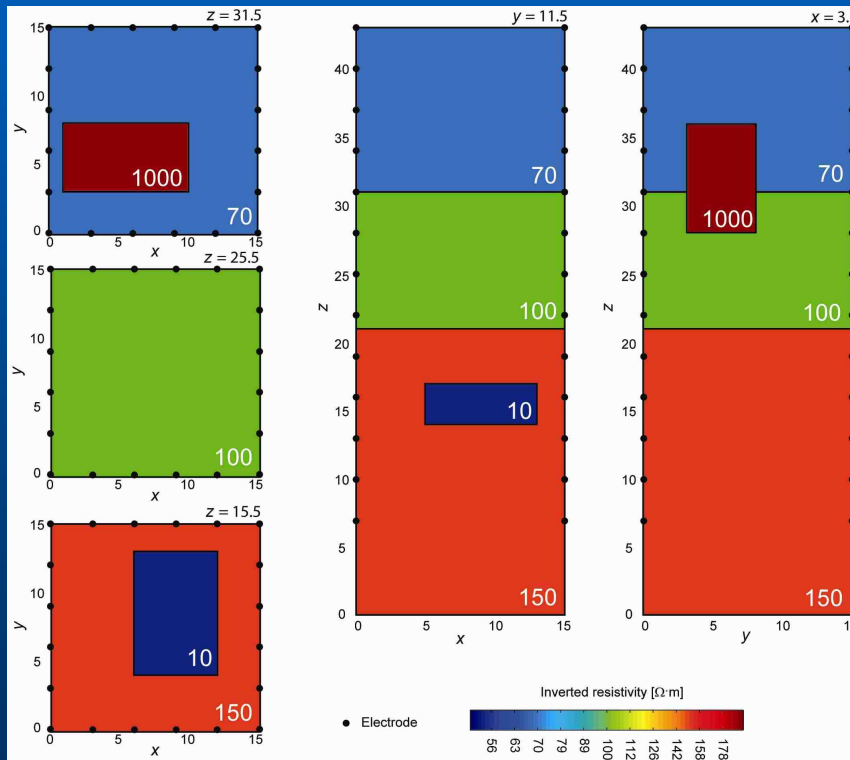
- ✓ éléments finis
- ✓ gradients conjugués
- ✓ état adjoint



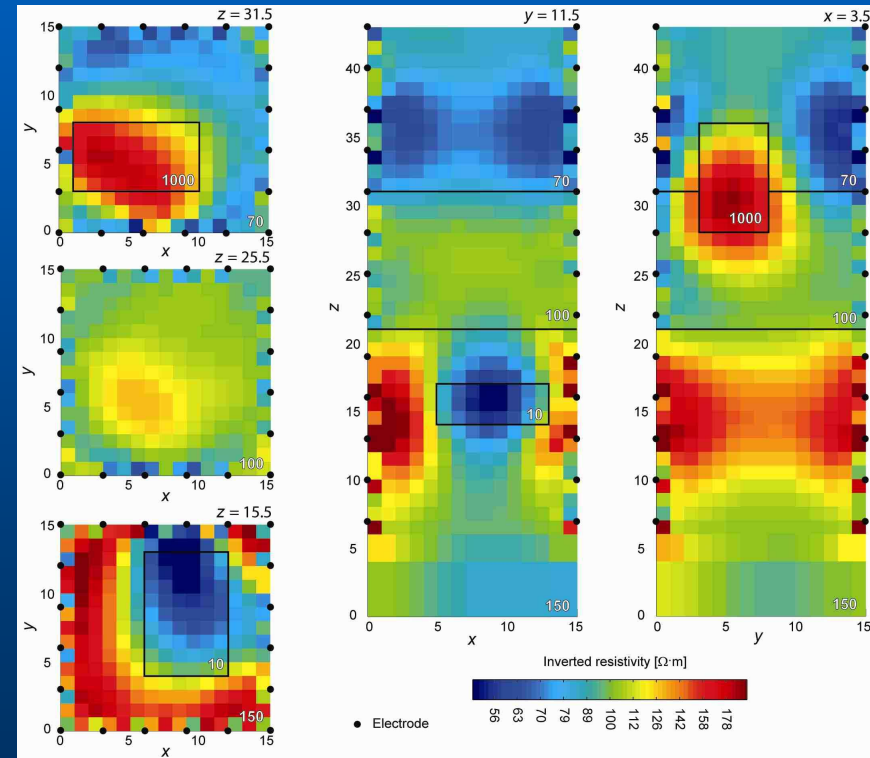


## Imagerie 3D de résistivité - L.Marescot (2004), IG-Lausanne et LCPC

Simulation d'une tomographie de pilier :



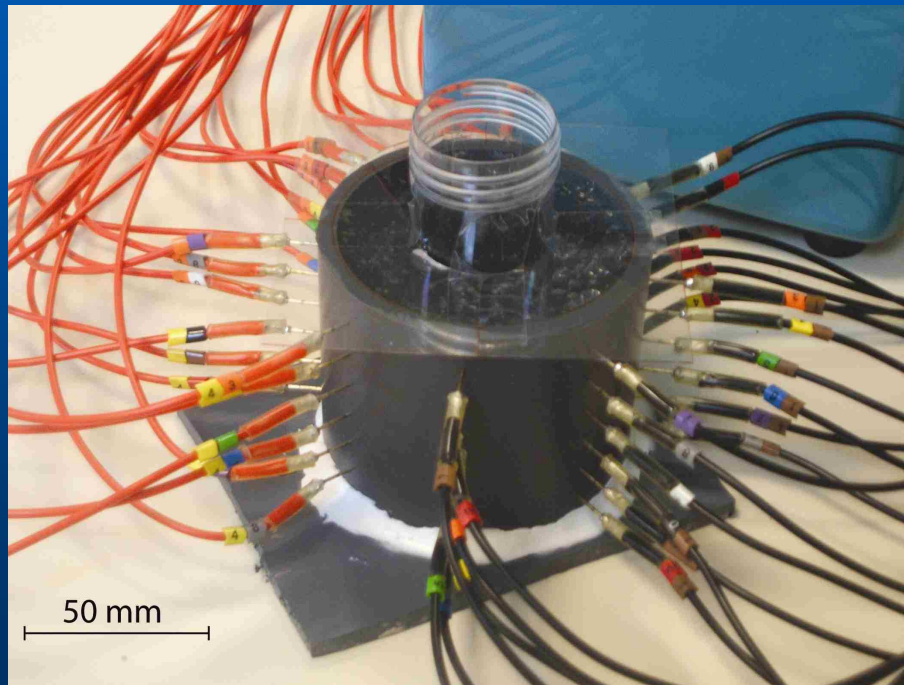
modèle 3D



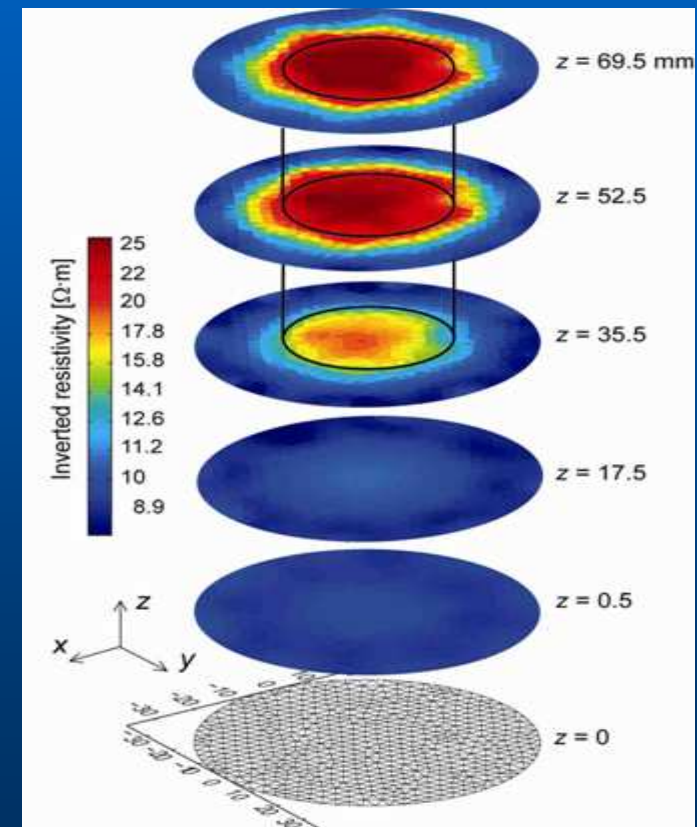
reconstruction

Imagerie 3D de résistivité - L.Marescot (2004), IG-Lausanne et LCPC

Caractérisation d'échantillons au laboratoire :



tomographie d'échantillon



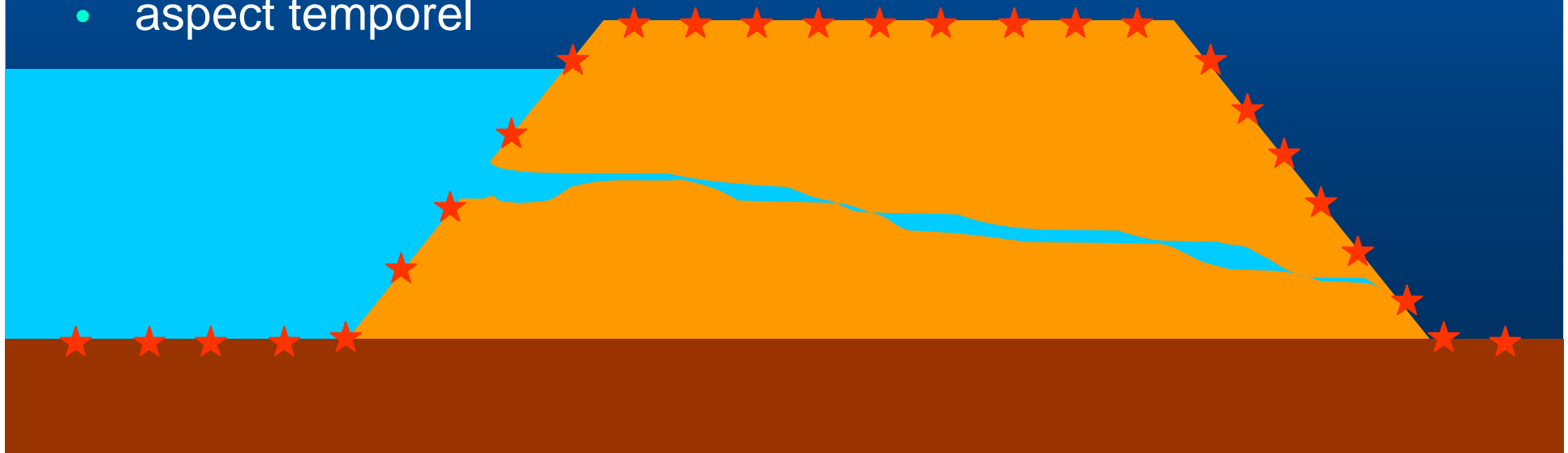
reconstruction



Imagerie 3D de résistivité - L.Marescot (2004), IG-Lausanne et LCPC

Perspectives : reconnaissance et surveillance  
d'ouvrages hydrauliques en terre

- géométrie plus « ouverte »
- moins de mesures
- focalisation sur certaines zones
- aspect temporel

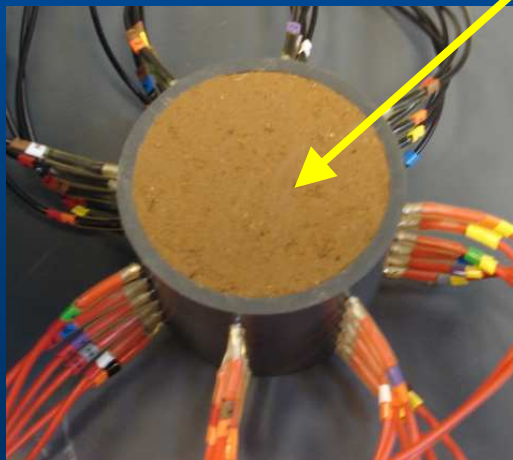
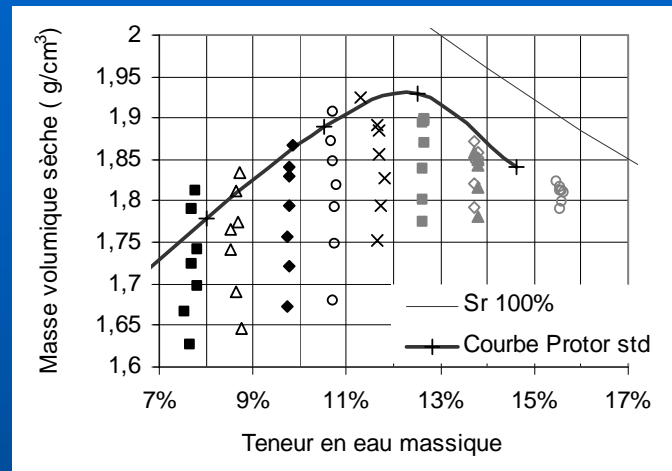


## 2. Recherches thématiques



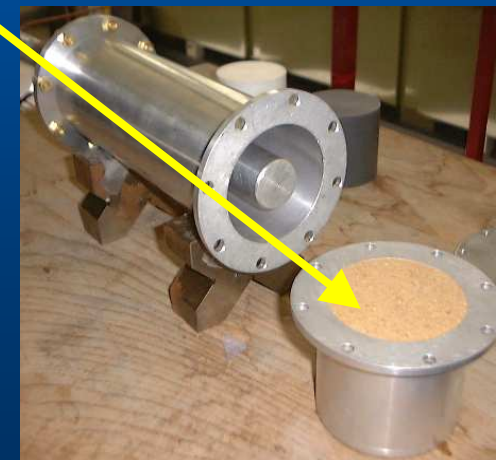
### Caractérisation EM de l'état hydrique d'un sol - YL.Beck, 2008, LCPC

sol limoneux compacté  
à différents états  
de densité et  
teneur en eau



cellule électrique

H=70mm  
D=75mm



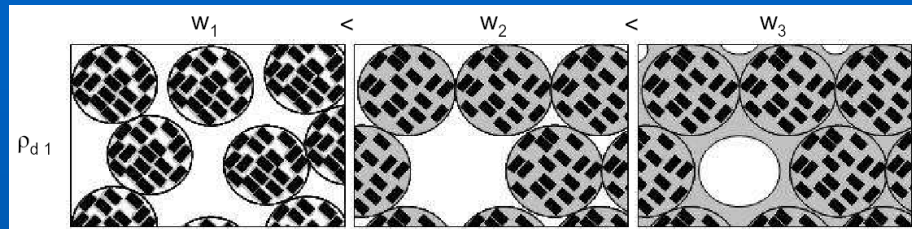
cellule électromagnétique

## 2. Recherches thématiques



### Caractérisation EM de l'état hydrique d'un sol - YL.Beck, 2008, LCPC

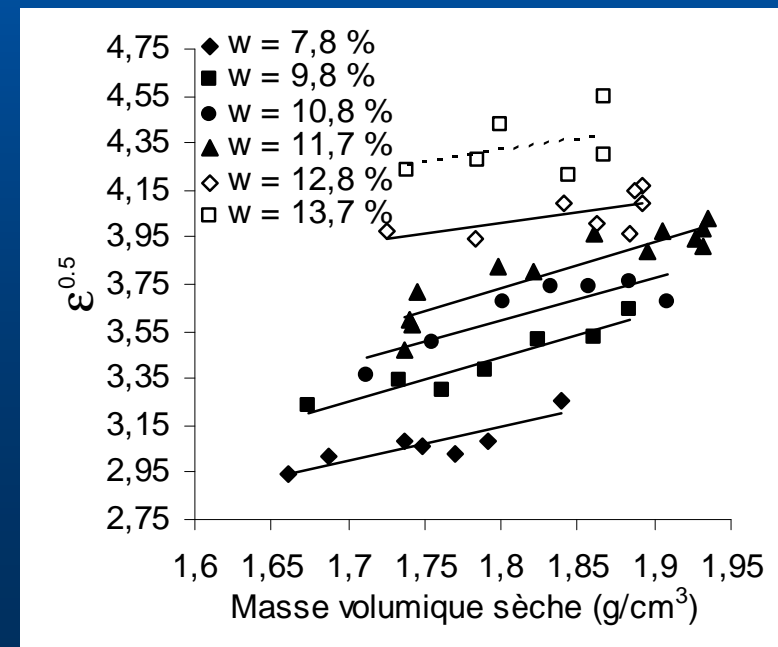
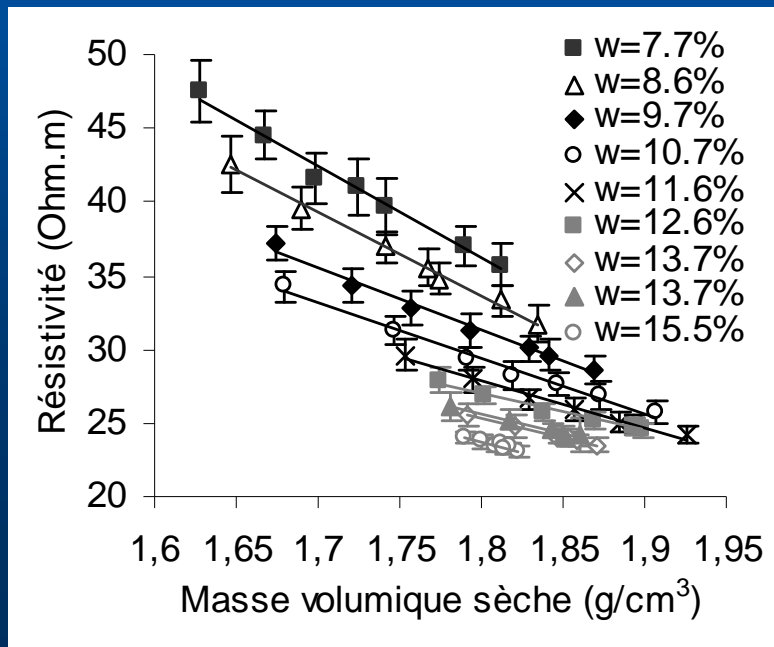
modèle microstructural  
d'un sol argileux  
(Ferber 2005)



$$\rho_e(\rho_d, w)$$

Comportement électromagnétique

$$\epsilon(\rho_d, w)$$





## 2. Recherches thématiques

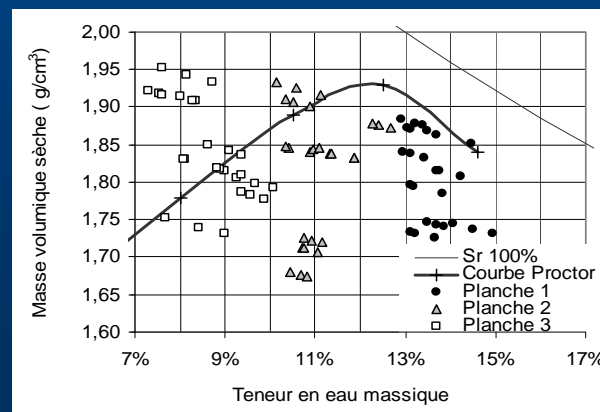


### Caractérisation EM de l'état hydrique d'un sol - YL.Beck, 2008, LCPC

compactage en conditions réelles



contrôles ponctuels des états



### Caractérisation EM de l'état hydrique d'un sol - YL.Beck, 2008, LCPC

caractérisation EM du sol compacté à différents états :



radar géologique



tomographie de  
résistivité



profilage EM38



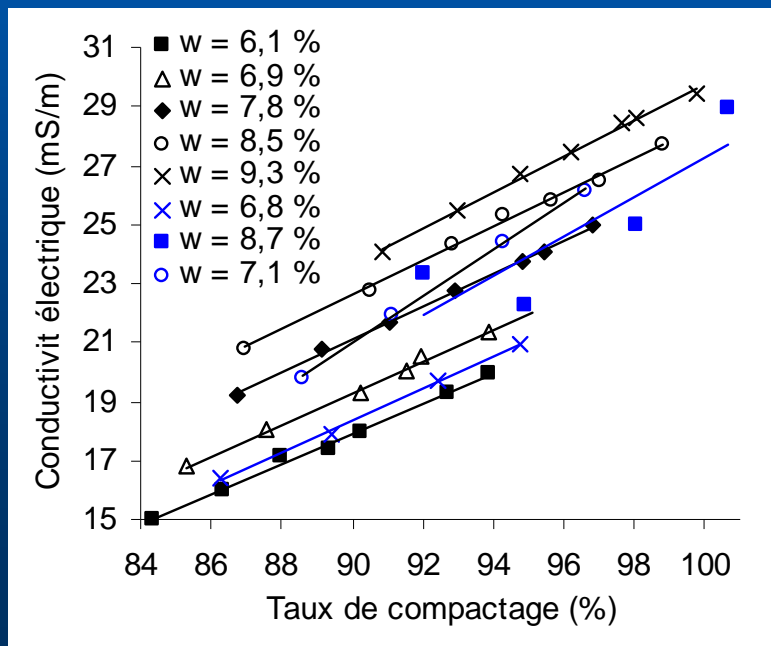
TDR



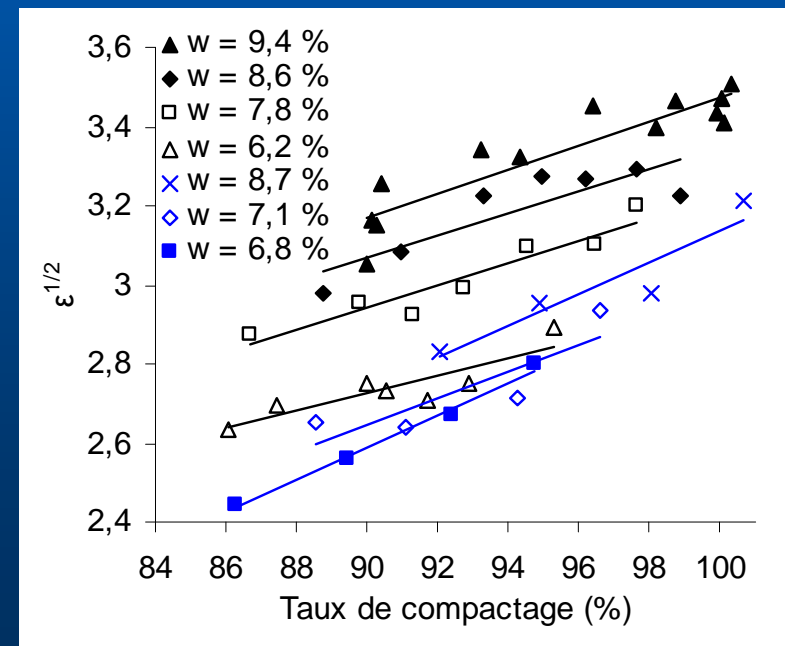
### Caractérisation EM de l'état hydrique d'un sol - YL.Beck, 2008, LCPC

comparaison échantillons / planches échelle 1  
avec corrections (T°, granulométrie, taux compactage)

$\rho_e(\rho_d, w)$



$\epsilon(\rho_d, w)$







### Caractérisation EM de l'état hydrique d'un sol - YL.Beck, 2008, LCPC

#### Perspectives :

- mieux relier géophysique et géotechnique (représentativité spatiale)
- autres types de sols (et sols traités à la chaux)
- érosion interne ?



## 2. Recherches thématiques



Auscultation E&EM d'ouvrages hydrauliques - Y.Fargier (en cours),

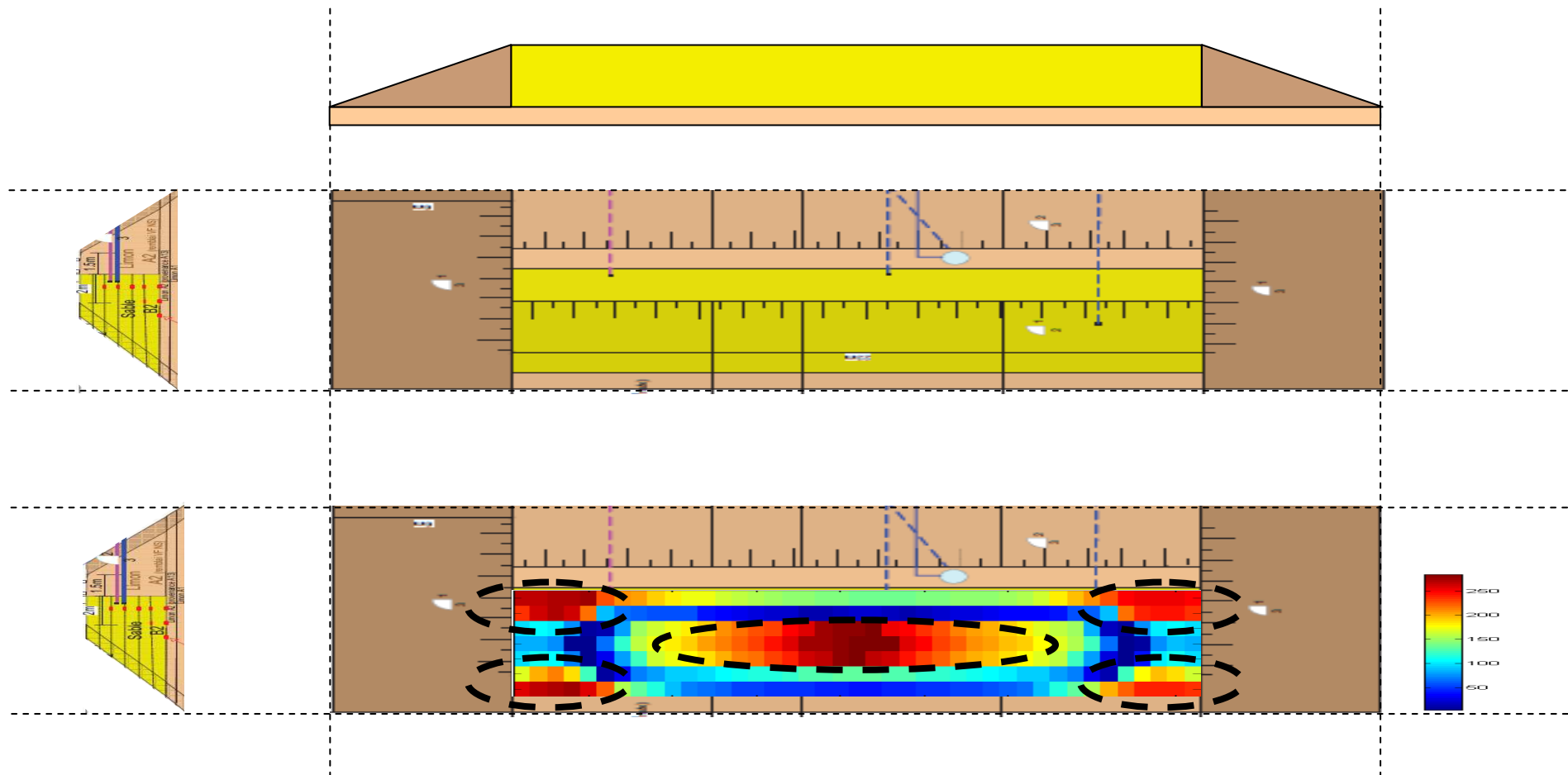
EDF, LCPC, LRPC-Rouen,



Méthodologie de reconnaissance et surveillance des ouvrages hydrauliques en terre par méthodes E&EM

- optimisation des configurations d'acquisition
- étude des paramètres d'influence (topographie, ...)
- détection phénomènes évolutifs (érosion interne ?)
- confrontation à l'expérimentation

optimisation des configurations d'acquisition d'imagerie 3D de résistivité

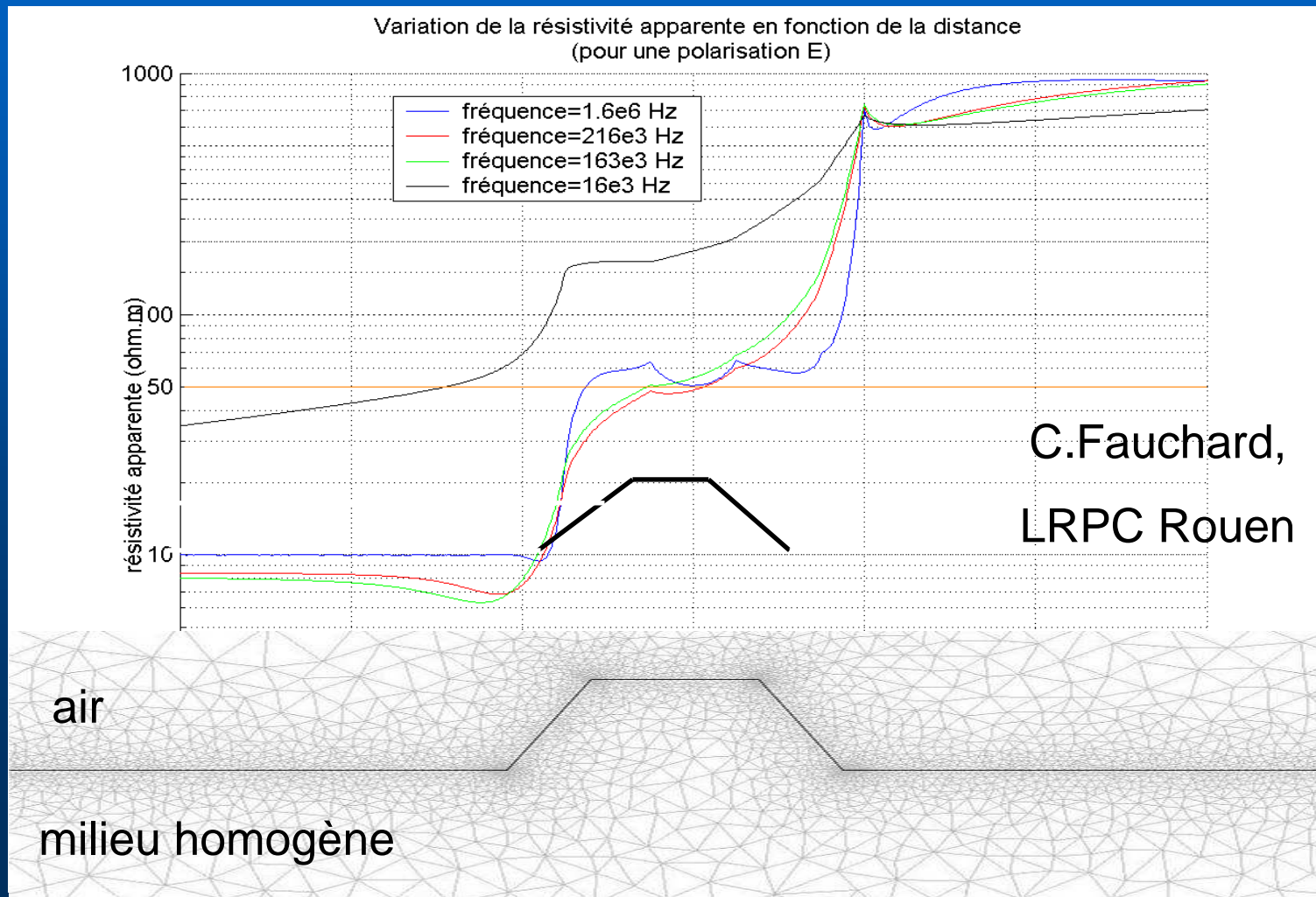




### Auscultation E&EM d'ouvrages hydrauliques - Y.Fargier, EDF, LCPC, LRPC-Rouen



### Influence de la topographie sur des profils RMT (EM type VLF)



### 3. Essais de monitoring

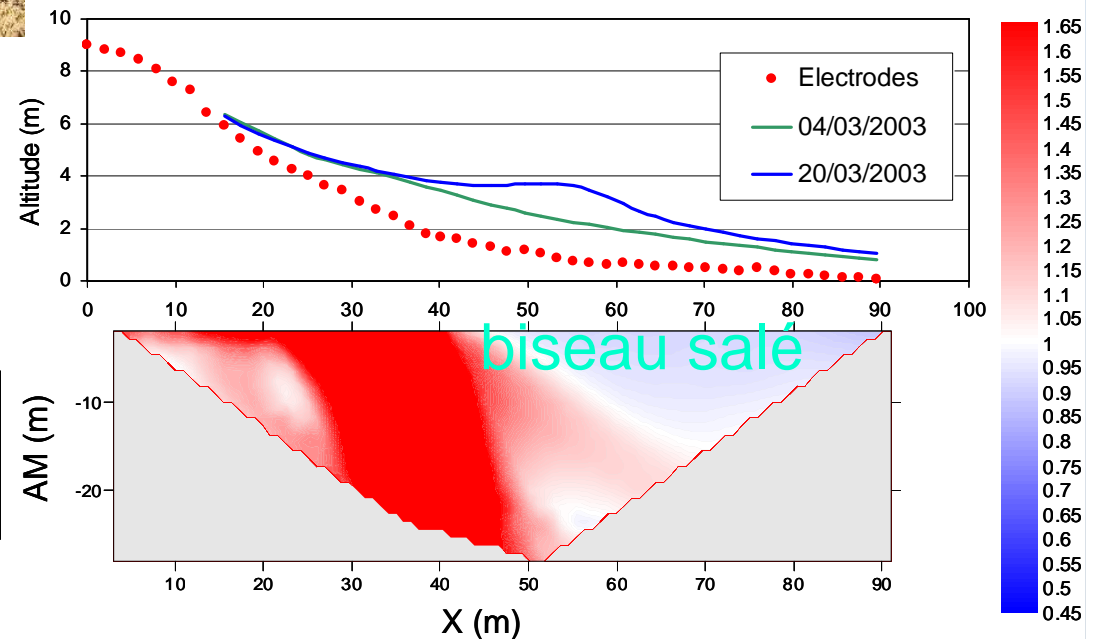


## Suivi de mouvements sédimentaires en zone inter-tidale

PN Environnement Côtier, BRGM, Géomarine, LCPC (1998-2002)



- études de sensibilité
- influences biseau salé, marées, houle, vent, nappe d'eau douce



rapport :  
20 mars à BM  
4 mars à BM



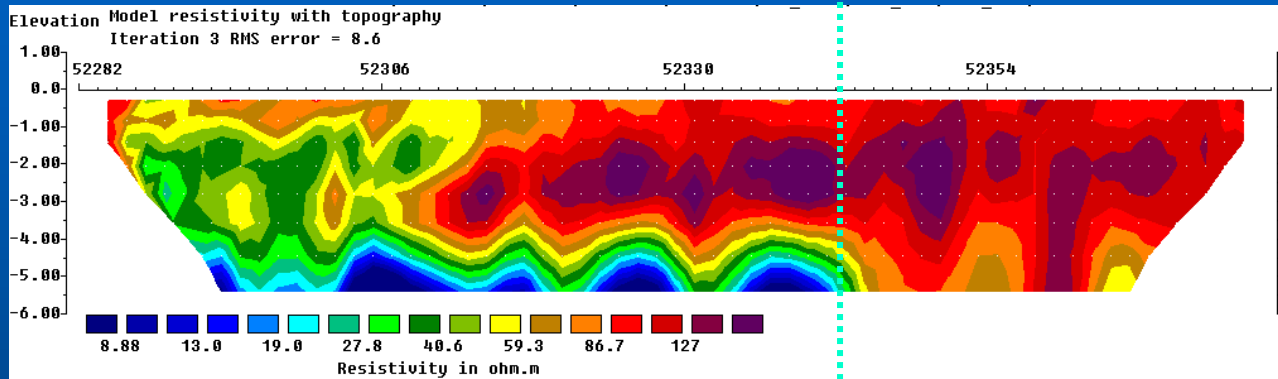
# 3. Essais de monitoring



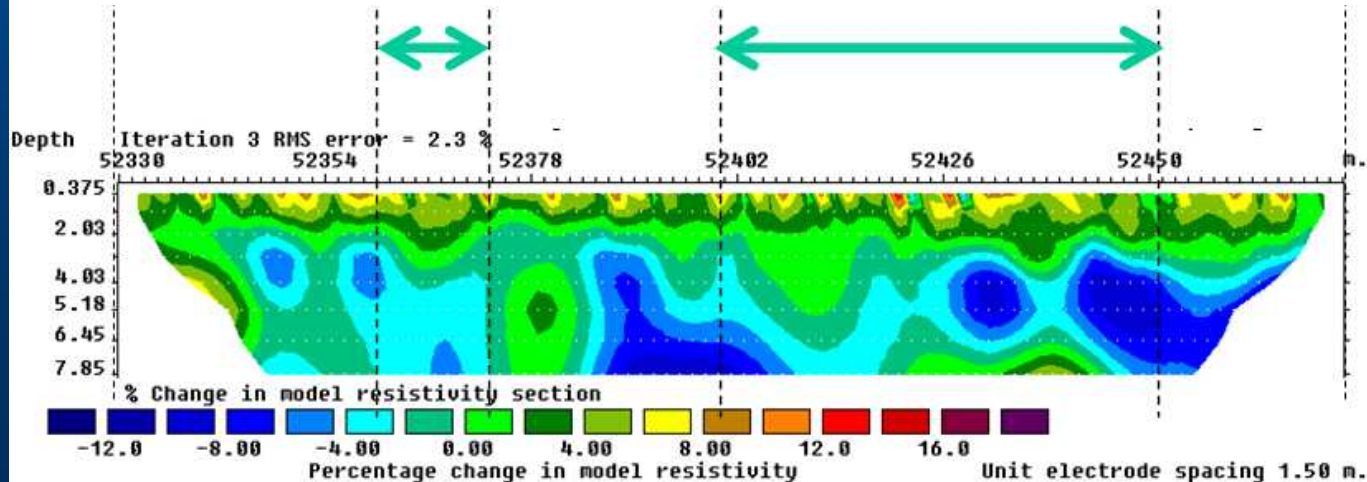
## digue de canal VNF à Sarreguemines



rideau de palplanches métalliques

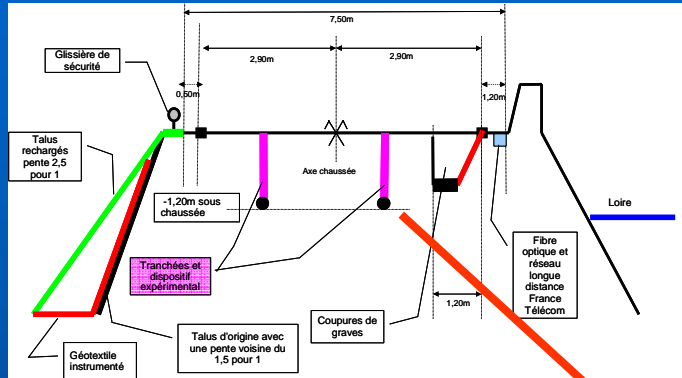


### variations relatives : détection de ré-infiltrations ?



ERINOH-ANR, VNF,  
LCPC, LRPC Nancy,  
EDF-R&D)

## Suivi levée val d'Authion



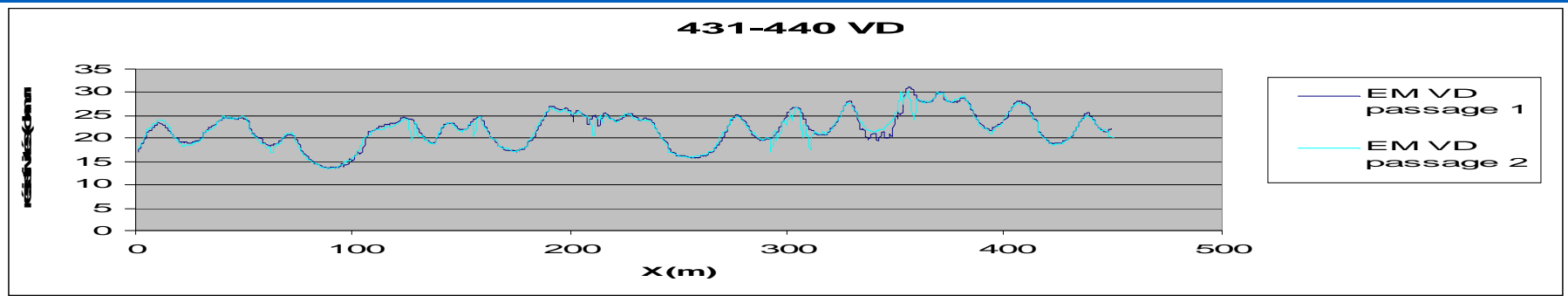
instrumentation sous chaussée :  
2 lignes parallèles de 48 électrodes  
(linéaire = 100 m)



# 3. Essais de monitoring

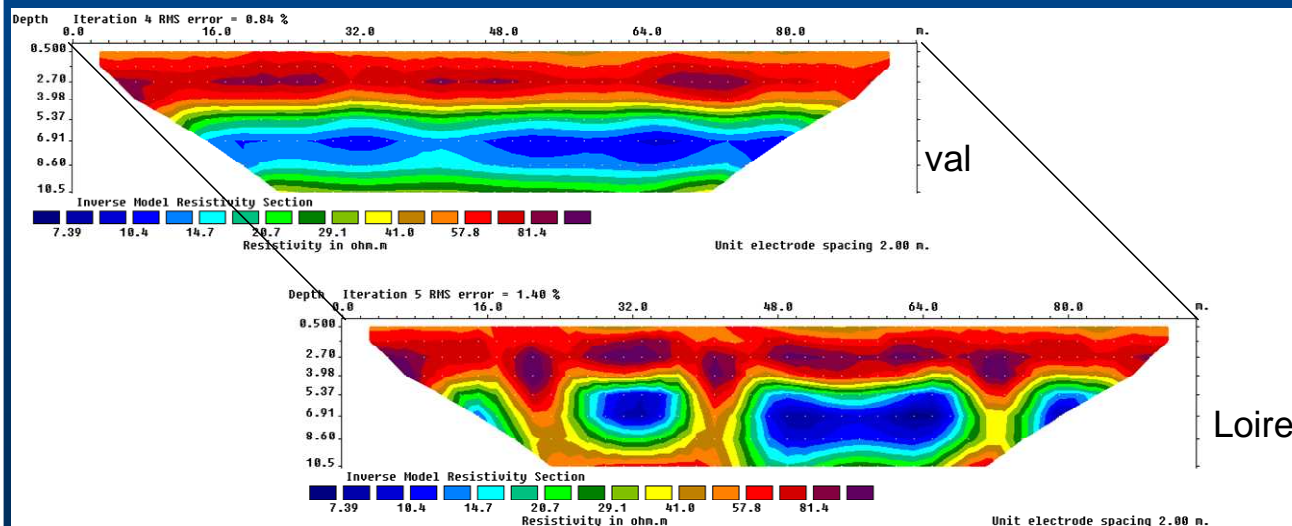


## Suivi levéé val d'Authion



suivi trimestriel par profilage EM de surface

évolutions temporelles  
2009-2010 ?



suivi mensuel  
par tomo résistivité



## Suivi d'injections dans une digue expérimentale

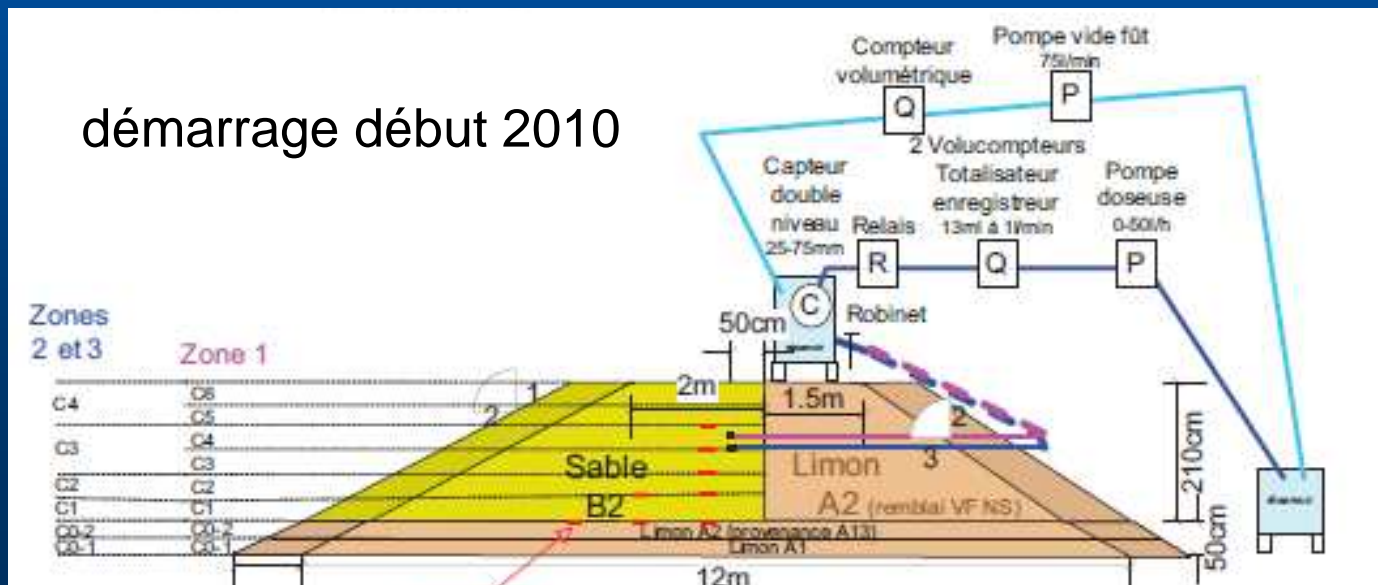


Thèse Y.Fargier, EDF, LCPC, LRPC-Rouen

CER-Rouen, Cemagref,  
LCPC, LRPC-Rouen,  
EDF-R&D, EDF-DTG,  
PN ERINOH, ...

- digue instrumentée (T°, humidité, résistivité, fibre optique...)
- suivi géophysique des infiltrations provoquées

démarrage début 2010



## 4. Conclusion



- Études de monitoring passées, en cours, à venir : améliorations attendues dans l'analyse 3D temporelle
- Recherches thématiques couplées (acquisition, imagerie, approches « sols »)
- Besoin cumul d'information : complémentarité avec autres techniques d'auscultation (ondes de surface, ...)
- Besoin rapprochement géophysique / sciences du sol (géotech, érosion...)



- Études de monitoring passées, en cours, à venir : améliorations attendues dans l'analyse 3D temporelle
- Recherches thématiques couplées (acquisition, imagerie, approches « sols »)
- Besoin cumul d'information : complémentarité avec autres techniques d'auscultation (ondes de surface, ...)
- Besoin rapprochement géophysique / sciences du sol (géotech, érosion...)

Merci pour votre attention