

Carrières souterraines et karsts

Méthodes de détection



Photo: Kaufmann O.

JOHN DECEUSTER (UMONS): john.deceuster@umons.ac.be /
john.deceuster@cfe.be

TIM NZALI (CALCIS): t.nzali@calcis.eu

Plan

- ❑ Méthodes électriques

- ❑ Méthodes sismiques

- ❑ Méthodes gravimétriques

- ❑ Radar géologique

Méthodes électriques

❑ Signatures attendues:

❑ **Cavités vides et réseaux karstiques:** air non conducteur => très résistif
contraste < par rapport au socle calcaire (peu de chances de détection)
contraste >> dans les terrains de couverture

❑ **Cavités remplies:** sédiments et eau => ↘ résistivité
contraste >> par rapport au socle calcaire

❑ **Formes d'altérations karstiques:** ↗ de la microporosité => ↘ résistivité
contraste >> par rapport au socle calcaire

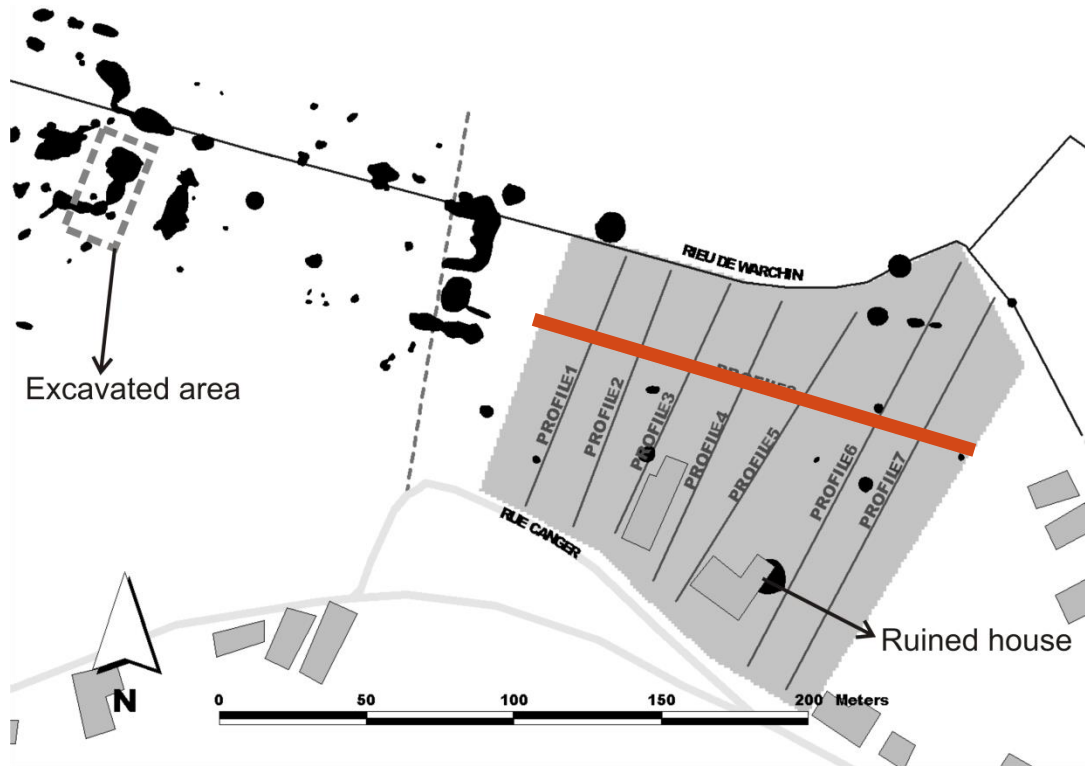
Cf. Chalikakis et al. (2011), Kaufmann & Deceuster (2014)

Méthodes électriques

□ Cas 1: Rue Canger à Gaurain-Ramecroix:

8 tomos 2D => modèle de résistivité 3D

46 CPT et 15 forages

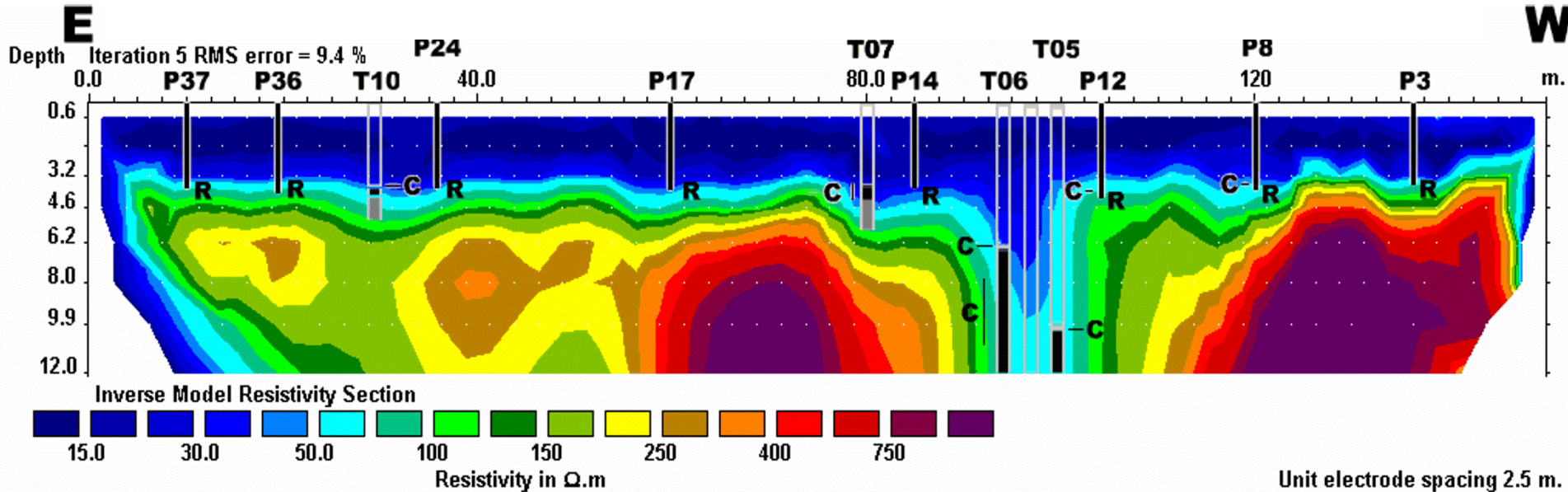


Cf. Kaufmann et al. (2012)

Méthodes électriques

□ Cas 1: Rue Canger à Gaurain-Ramecroix:

Profile 8



C = choc

R = profondeur de refus des CPT

Pxx = CPT

Txx = forage tarière et marteau fond de trou

En gris: calcaires sains

En noir: paléokarst (fantôme de roche)

Méthodes électriques

❑ Cas 1: Rue Canger à Gaurain-Ramecroix:

Combinaison des CPT et du modèle 3D ERT grâce à une approche statistique

(cf. Kaufmann et al., 2012)

➤ 3 couches :

Couverture

Socle

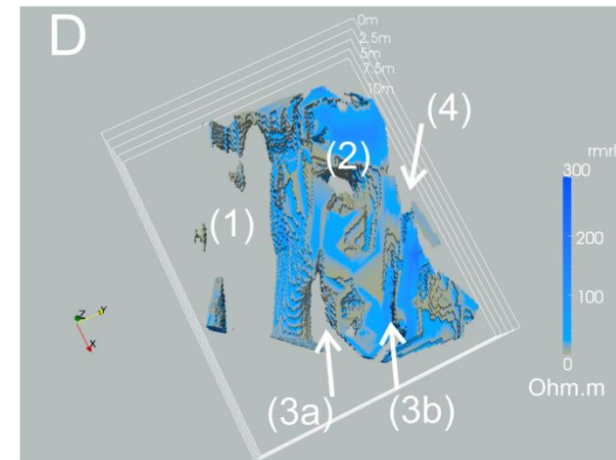
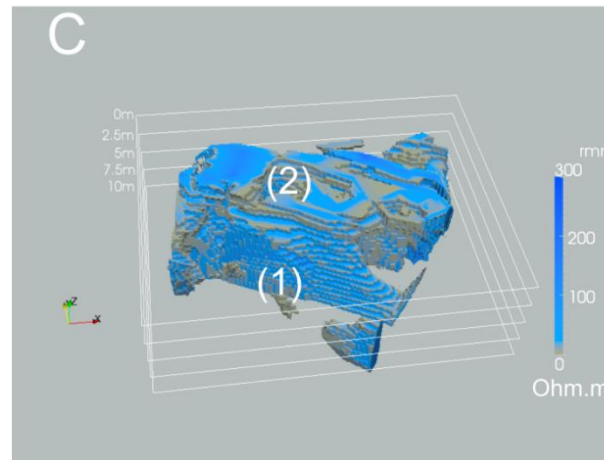
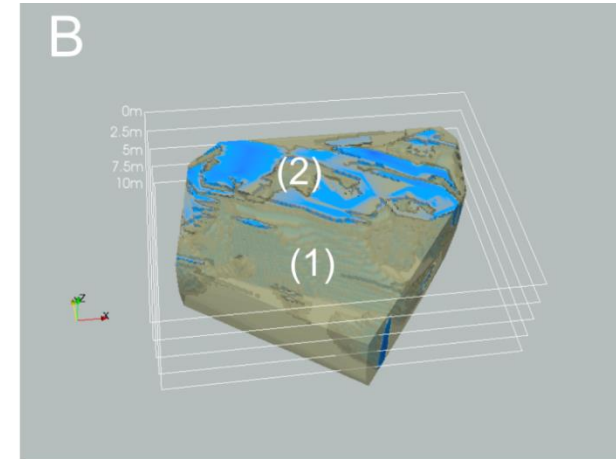
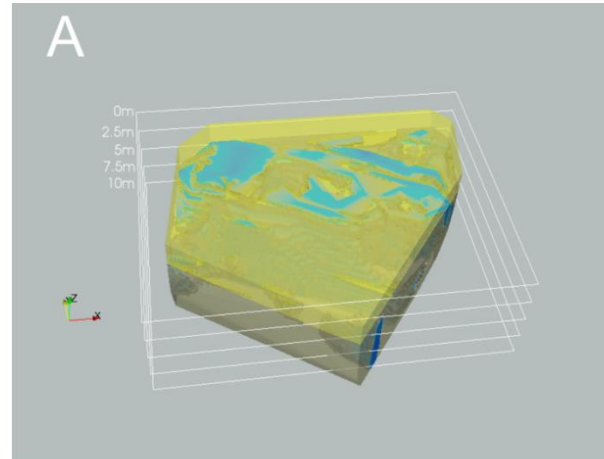
Zone altérée

➤ Valeur du modèle 3D

pour un problème de

géologie de

l'ingénieur?



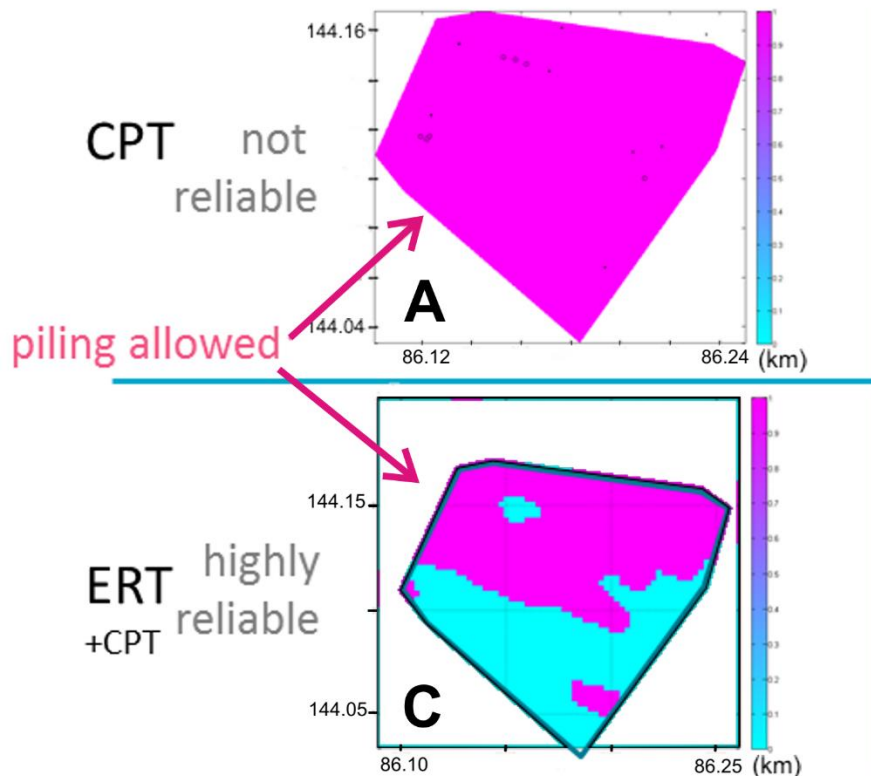
Méthodes électriques

□ **Cas 1: Rue Canger à Gaurain-Ramecroix:** Cf. Kaufmann & Deceuster (2014)

Hyp A: fondations profondes (profondeur du bedrock < 10m)

Hyp B: fonçage horizontal (≥ 2 m de bedrock altéré sous 3.5 m de profondeur)

Hyp. A

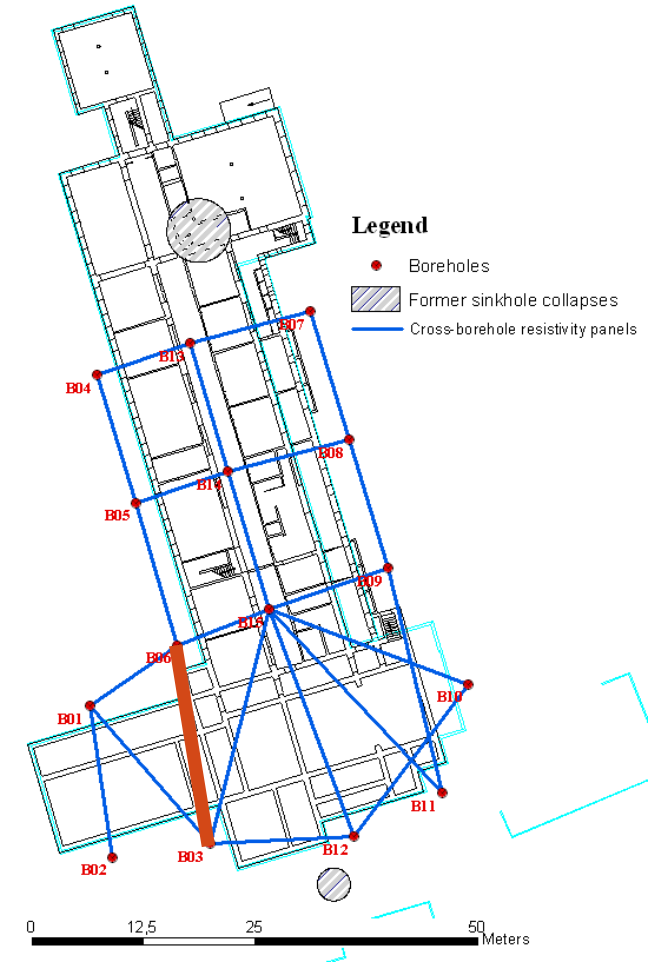


Méthodes électriques

□ Cas 2: IESPP à Tournai: imagerie sous bâtiments

12 forages autour du bâtiment et 3 dans la cave

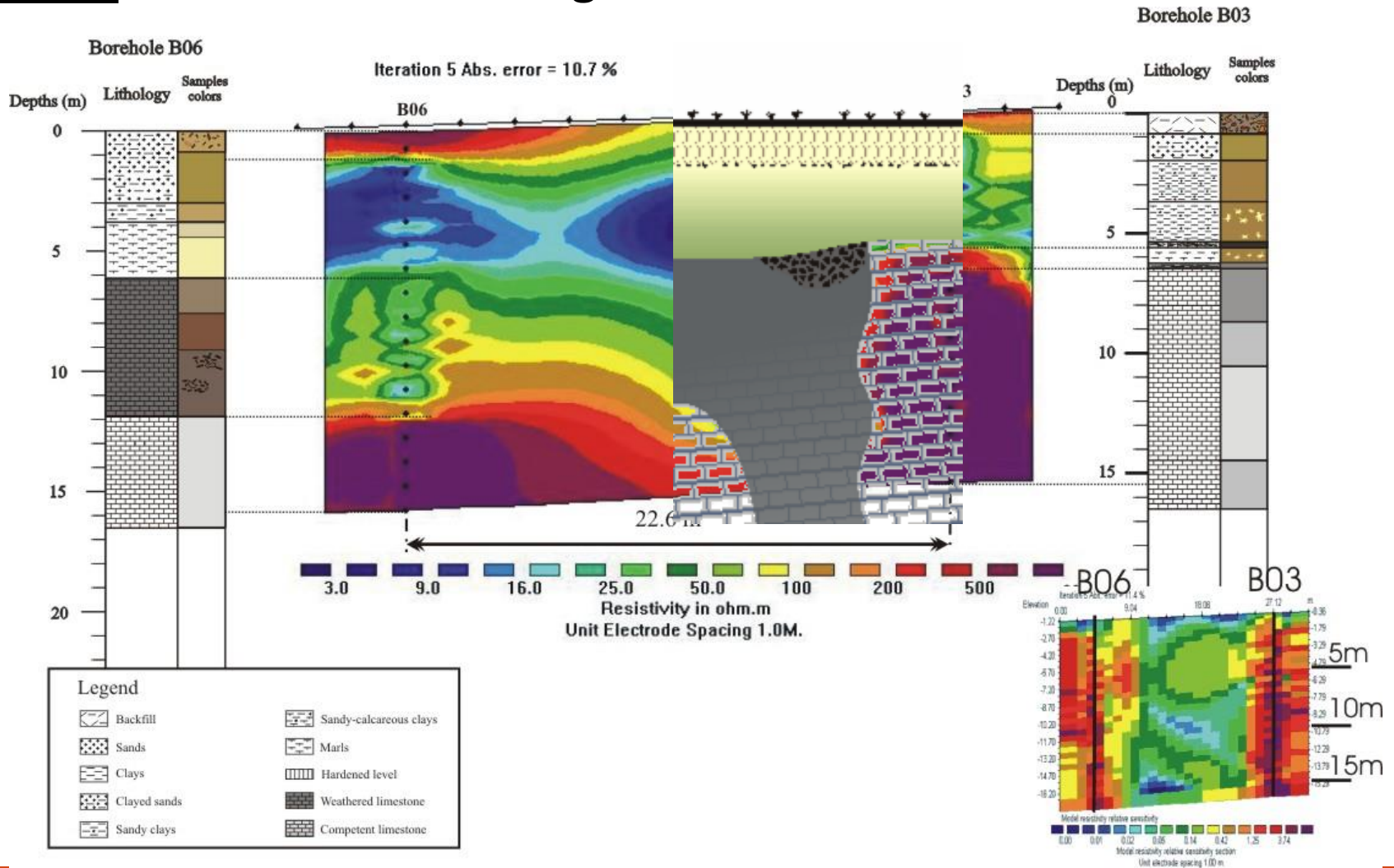
22 tomographies entre forages



Cf. Deceuster et al. (2006)

Méthodes électriques

□ Cas 2: IESPP à Tournai: imagerie sous bâtiments



Méthodes électriques

□ Cas 2: IESPP à Tournai: imagerie sous bâtiments

Profondeur du socle

4 zones basées sur trois gammes de

profondeur du socle:

< 9,5 m

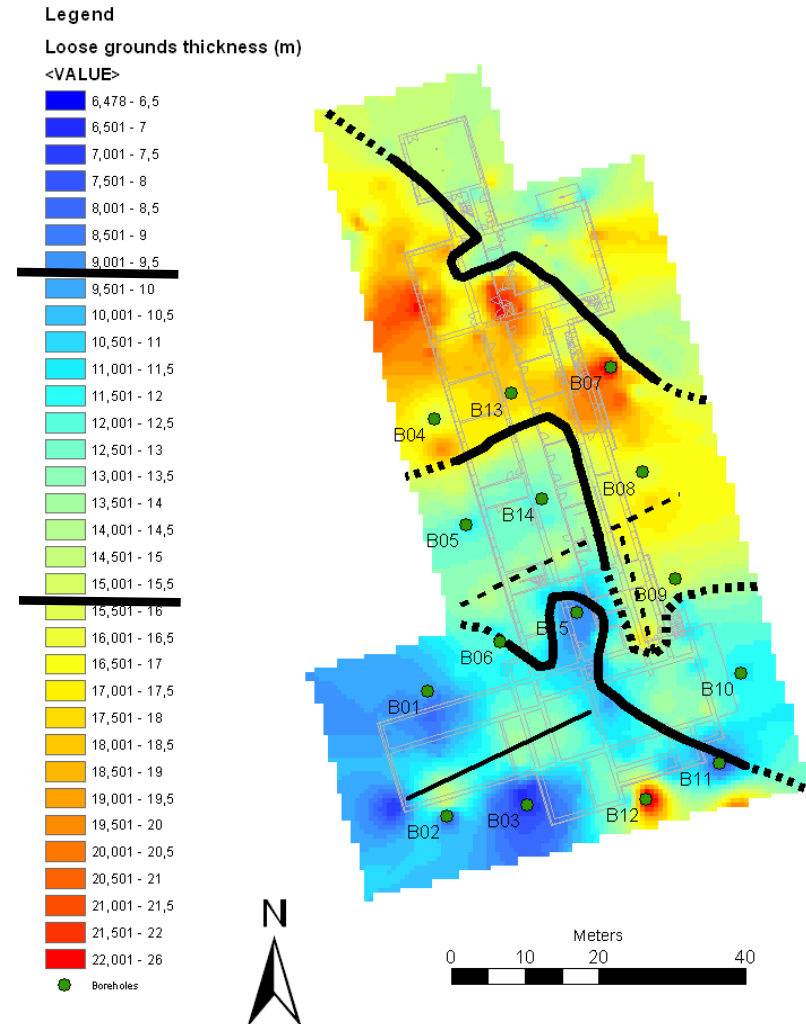
9,5 m => 15,5 m

>15,5 m

Remédiation:

Design des fondations sur micropieux

grâce à l'imagerie ERT



Méthodes électriques

□ Cas 3: Monitoring de la remontée de fontis

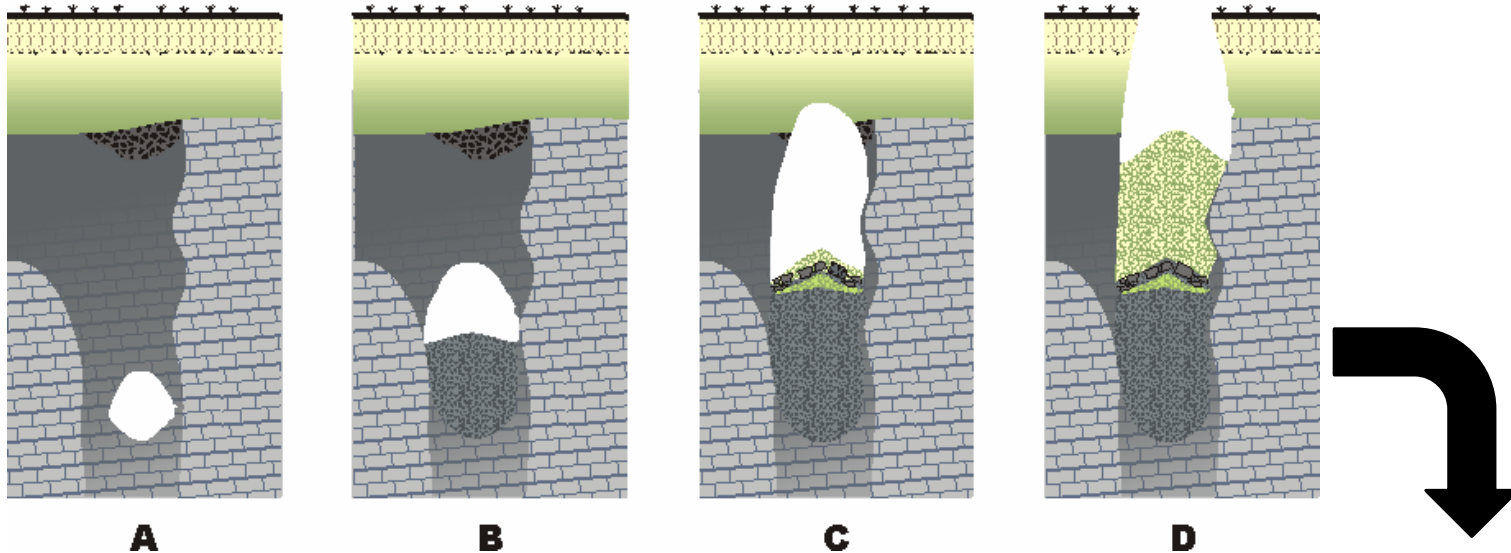


Schéma de fonctionnement d'un fontis en cours de remontée
(Kaufmann et al., 2012)



Méthodes électriques

□ Cas 3: Monitoring de la remontée de fontis

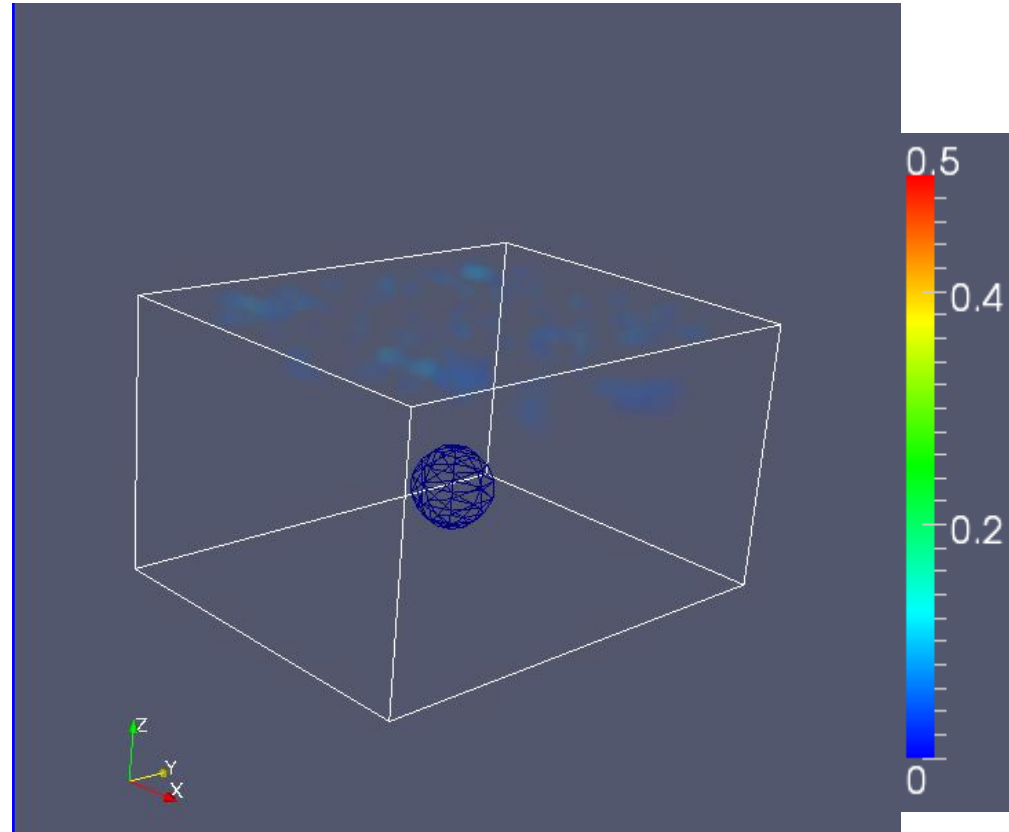
Etude en laboratoire dans une cuve

distance inter-électrodes: 14 cm

électrodes en surface: 48

grille 3D: 6 x 8

Sommet de la cible: 35 cm



Méthodes électriques

□ Cas 3: Monitoring de la remontée de fontis

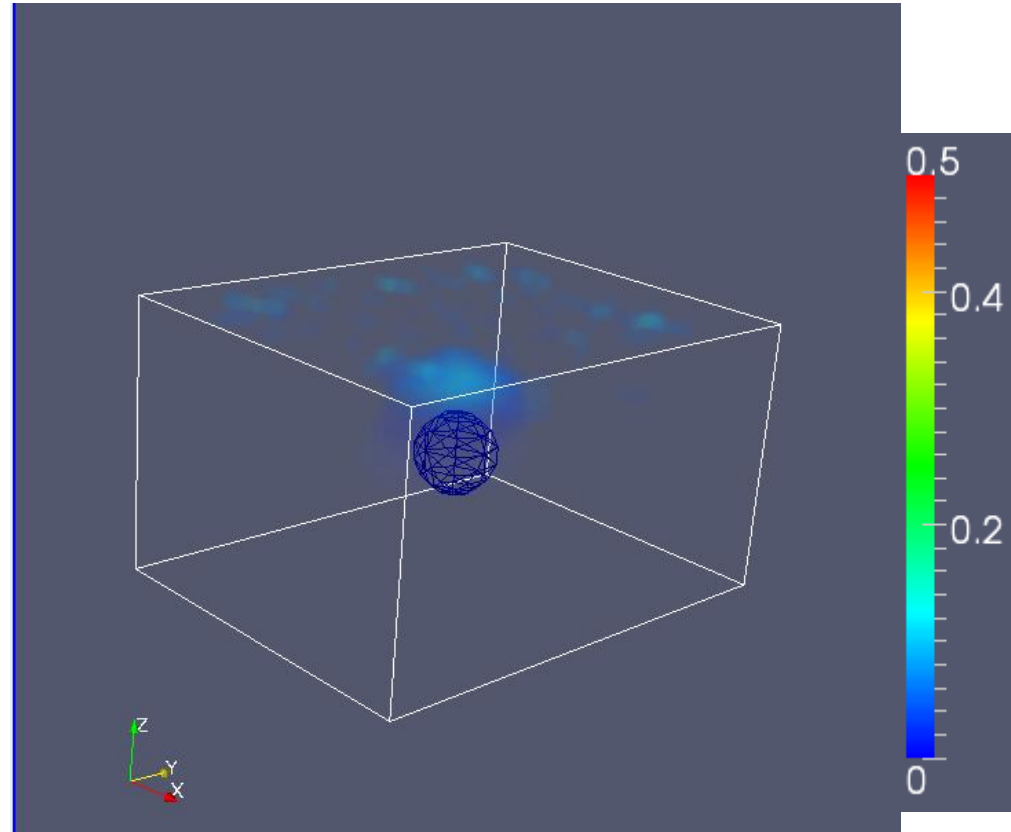
Etude en laboratoire dans une cuve

distance inter-électrodes: 14 cm

électrodes en surface: 48

grille 3D: 6 x 8

Sommet de la cible: 26 cm



Méthodes électriques

□ Cas 3: Monitoring de la remontée de fontis

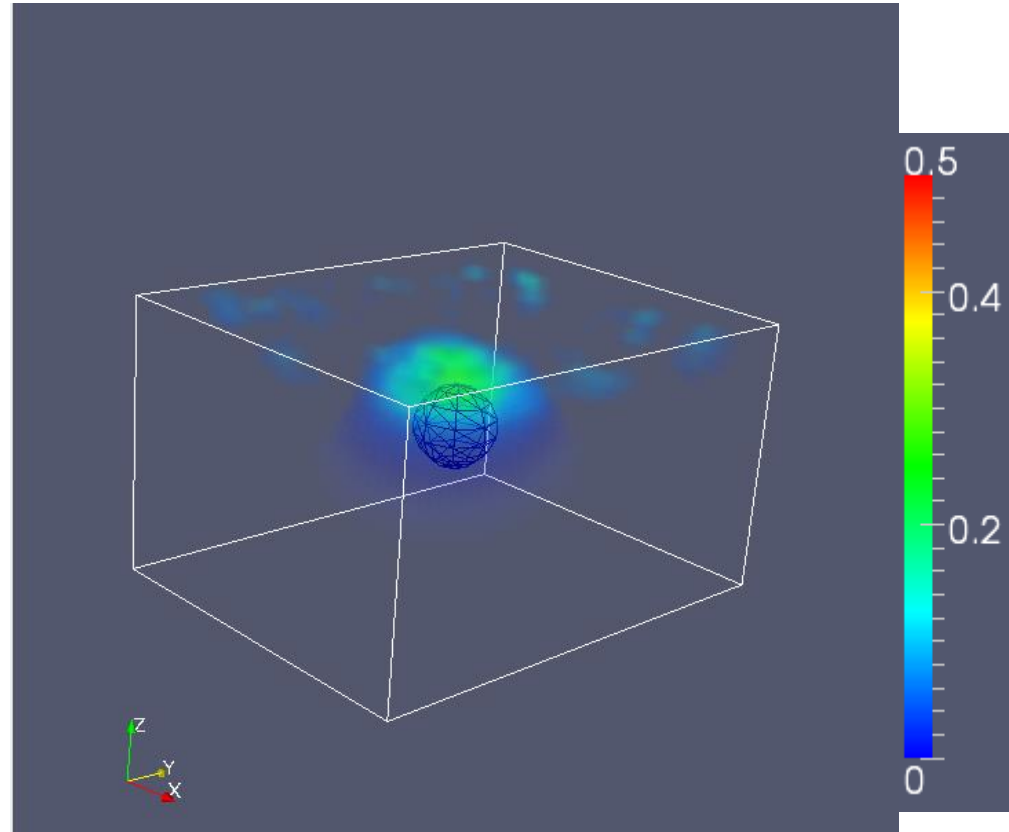
Etude en laboratoire dans une cuve

distance inter-électrodes: 14 cm

électrodes en surface: 48

grille 3D: 6 x 8

Sommet de la cible: 19 cm



Méthodes électriques

□ Cas 3: Monitoring de la remontée de fontis

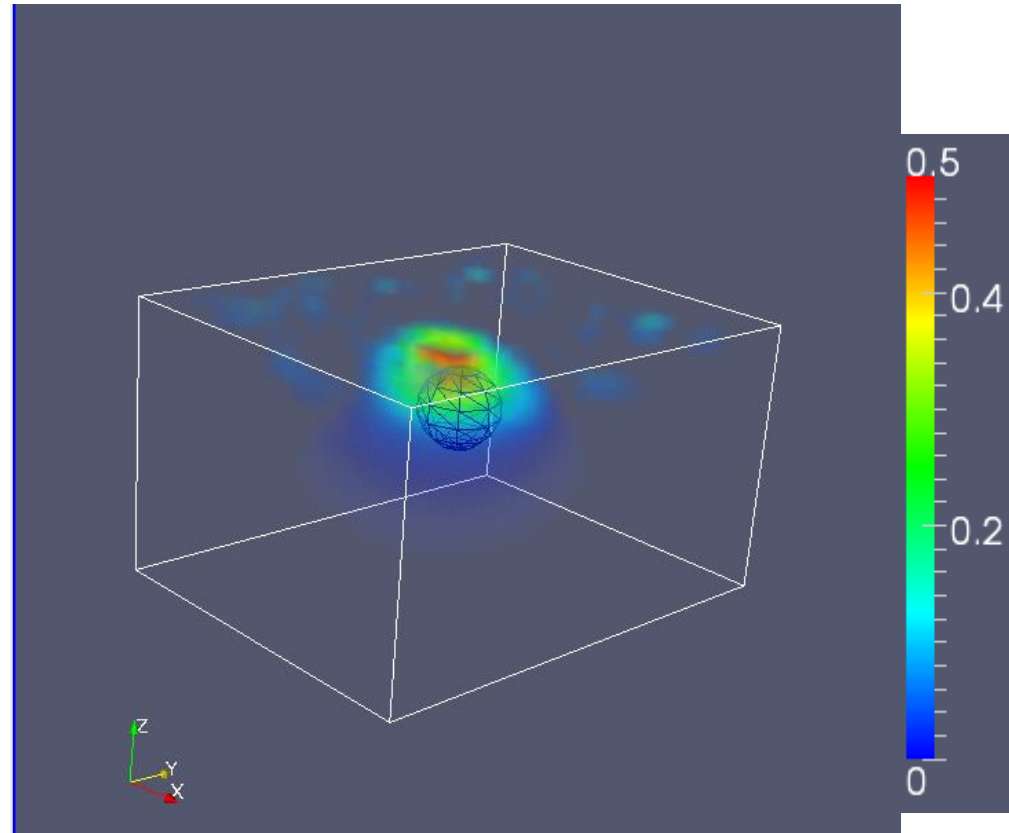
Etude en laboratoire dans une cuve

distance inter-électrodes: 14 cm

électrodes en surface: 48

grille 3D: 6 x 8

Sommet de la cible: 14 cm



Méthodes électriques

□ Cas 3: Monitoring de la remontée de fontis

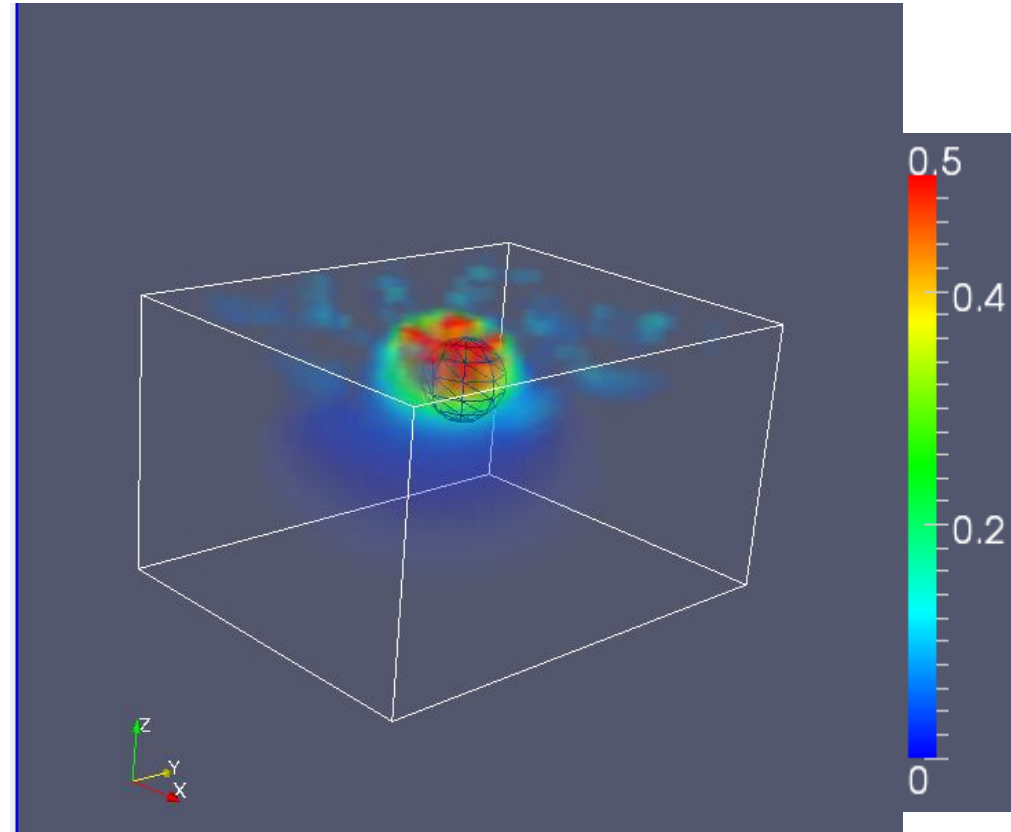
Etude en laboratoire dans une cuve

distance inter-électrodes: 14 cm

électrodes en surface: 48

grille 3D: 6 x 8

Sommet de la cible: 7 cm



Méthodes électriques

□ Cas 3: Monitoring de la remontée de fontis

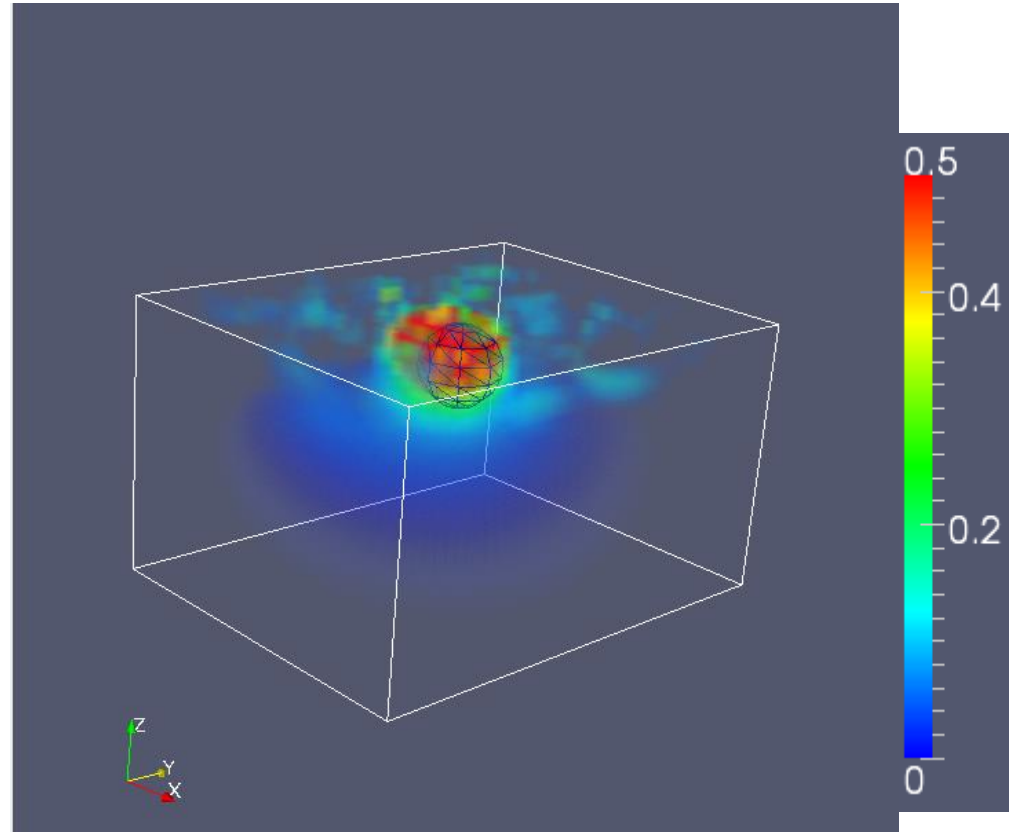
Etude en laboratoire dans une cuve

distance inter-électrodes: 14 cm

électrodes en surface: 48

grille 3D: 6 x 8

Sommet de la cible: 3.5 cm



Méthodes sismiques

□ Signatures attendues:

- **Cavités vides et réseaux karstiques:** densité du vide nulle $\Rightarrow V_p \searrow$, atténuation \nearrow et diffractions possibles

contraste \gg par rapport au socle calcaire (mais inversion de vitesse en réfraction)

contraste $<$ dans les terrains de couverture (peu de chances de détection)

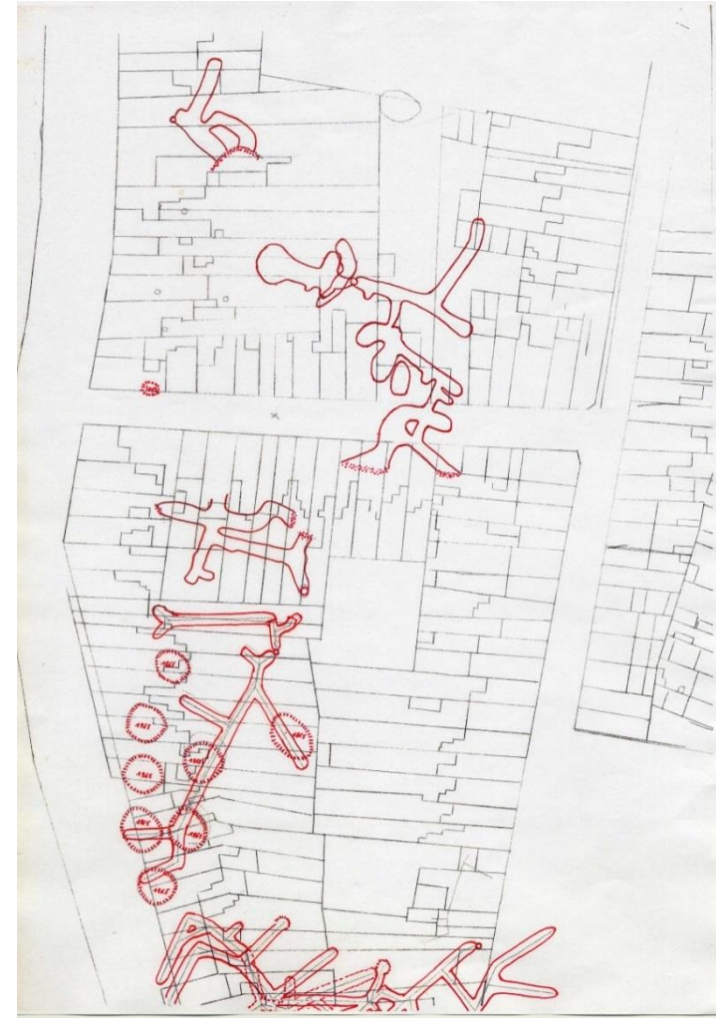
- **Cavités remplies et formes d'altérations karstiques :**

\searrow densité et $\searrow v \Rightarrow V_p \searrow$, $V_s \searrow$, atténuation \nearrow

contraste $>$ par rapport au socle calcaire

Méthodes sismiques

- ❑ **Cas 4: Carrières souterraines dans les craies à Jemappes**
 - ❑ Exploitations de craie/craie marneuse (vides, partiellement effondrées ou remblayées) plusieurs plans fragmentaires disponibles
 - ❑ profondeur attendue entre 8 à 20m
 - ❑ couverture de limons, sables tertiaires
 - ❑ milieu urbanisé



Méthodes sismiques

□ Cas 4: Carrières souterraines dans les craies à Jemappes

Acquisitions sismiques en onde de surface le long de 500 m de voirie

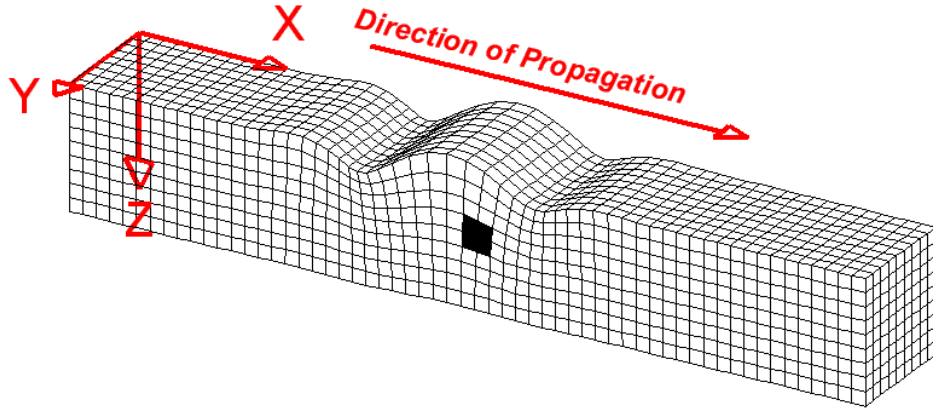


Schéma des ondes de Rayleigh

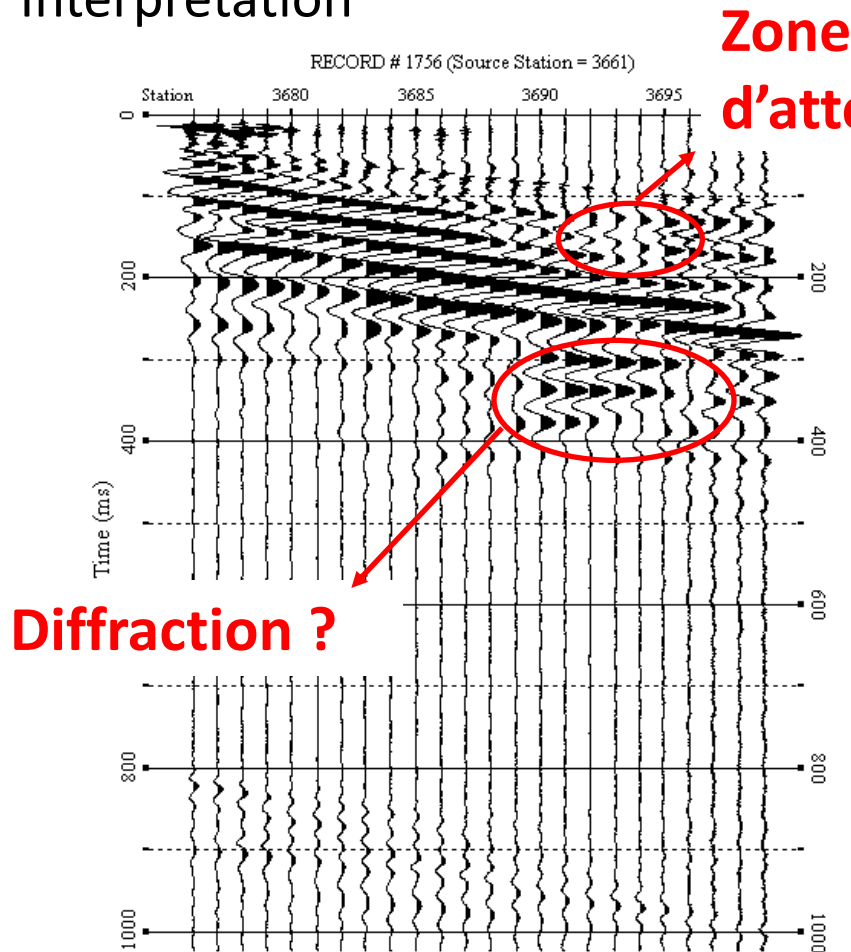


Acquisition sur site

Méthodes sismiques

□ Cas 4: Carrières souterraines dans les craies à Jemappes:

Interprétation



**Zone
d'atténuation**

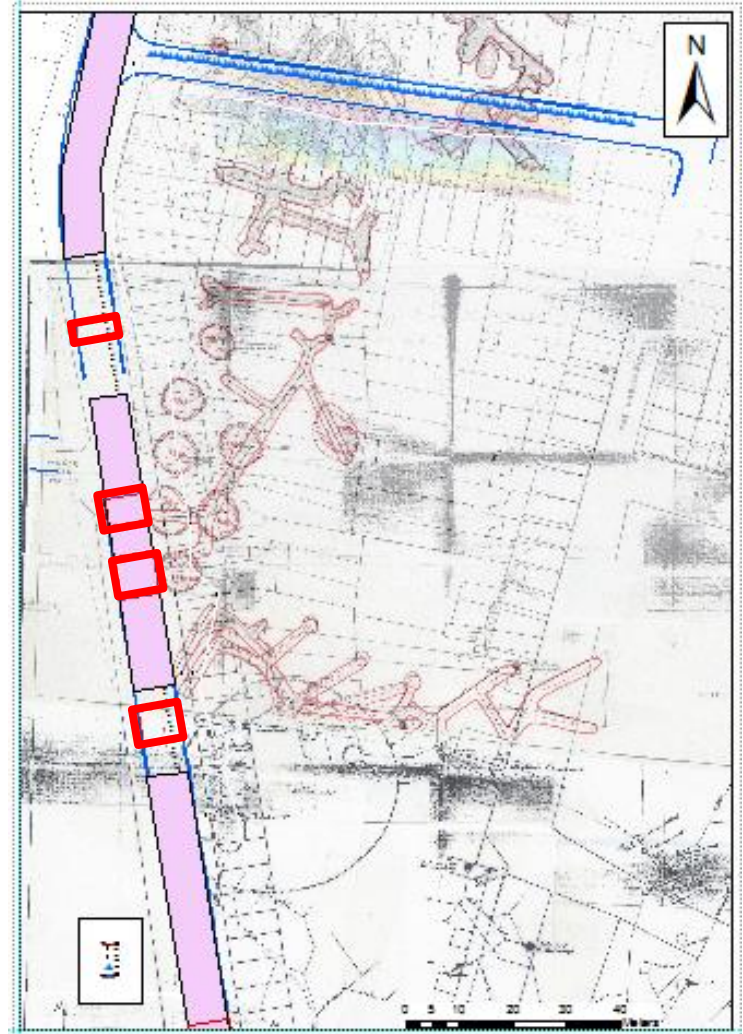
Position et largeur d'anomalie
estimée sur base d'atténuation
observées sur des tirs consécutifs

Profondeur approchée sur base de
l'analyse des courbes de dispersion

Méthodes sismiques

□ Cas 4: Carrières souterraines dans les craies à Jemappes:

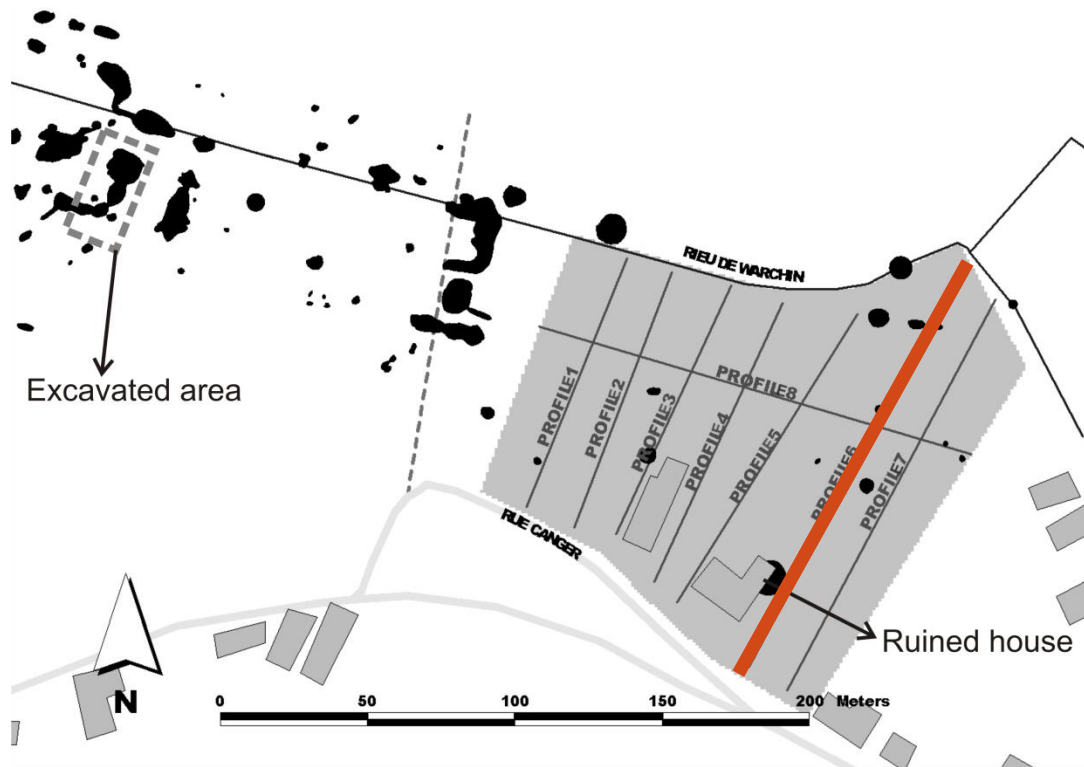
Report sur carte et localisation d'essais complémentaires (CPT)



Méthodes sismiques

□ Cas 1: Rue Canger à Gaurain-Ramecroix

Tomographie en sismique réfraction + sismique réflexion

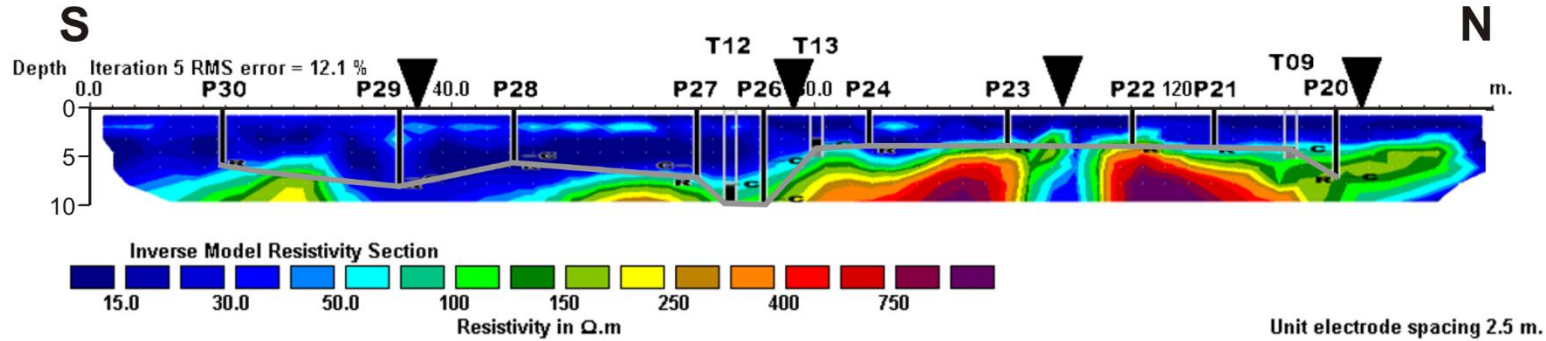


Cf. Kaufmann & Deceuster (2014)

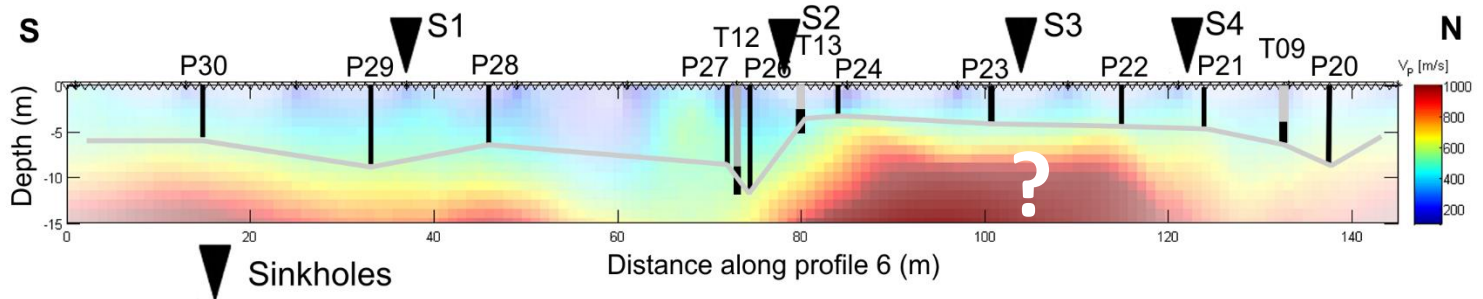
Méthodes sismiques

Cas 1: Rue Canger à Gaurain-Ramecroix

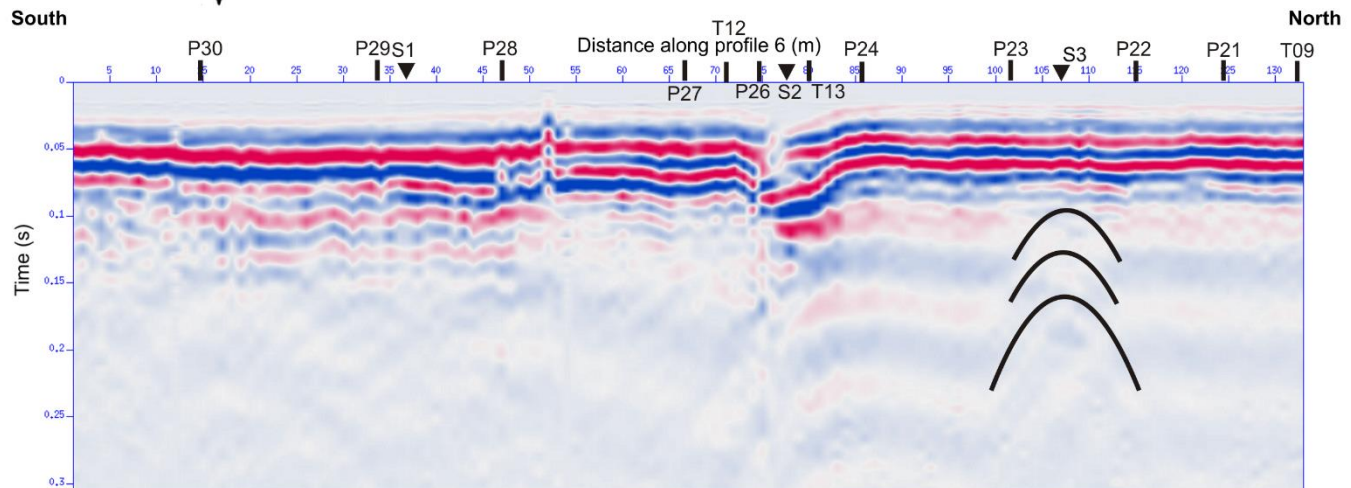
ERT



Sismique
réfraction



Sismique
réflexion



Références

- ❑ Chalikakis, K., Plagnes, V., Guérin, R., Valois, R. & Bosch, F.P., 2011. Contribution of geophysical methods for karst system exploration. An overview. *Hydrogeology Journal* 19, 1169-1180.
- ❑ Deceuster J., Delgranche J., Kaufmann O., 2006. 2-D cross-borehole resistivity tomographies below foundations as a tool to design proper remedial actions in covered karst. *Journal of Applied Geophysics* 60, 68-86.
- ❑ Kaufmann O., Deceuster J., Quinif Y., 2012. An electrical resistivity imaging-based strategy to enable site-scaled planning over covered palaeokarst features in the Tournaisis area (Belgium). *Engineering Geology* 133-134, 49-65.
- ❑ Kaufmann O., Deceuster J., 2014. Detection and mapping of ghost-rock features in the Tournaisis area through geophysical methods – An overview. *Geologica Belgica* 17(1), 17-26.

Plan

□ Introduction: méthodes géophysiques

□ Méthodes électrique

□ Méthodes électriques

□ Microgravimétrie

□ Méthode radar

Microgravimétrie

□ Principes

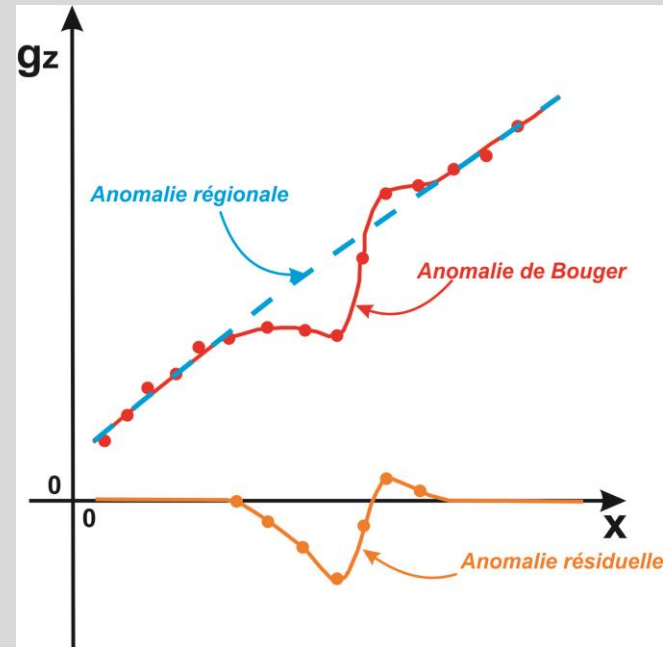
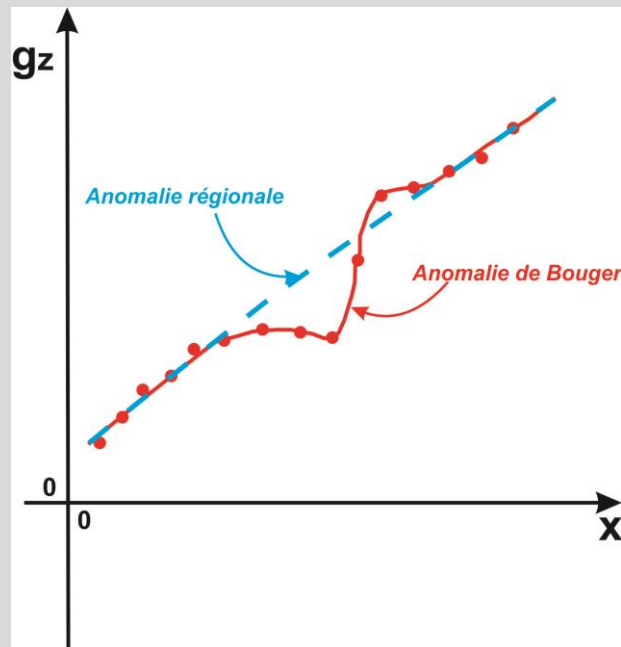
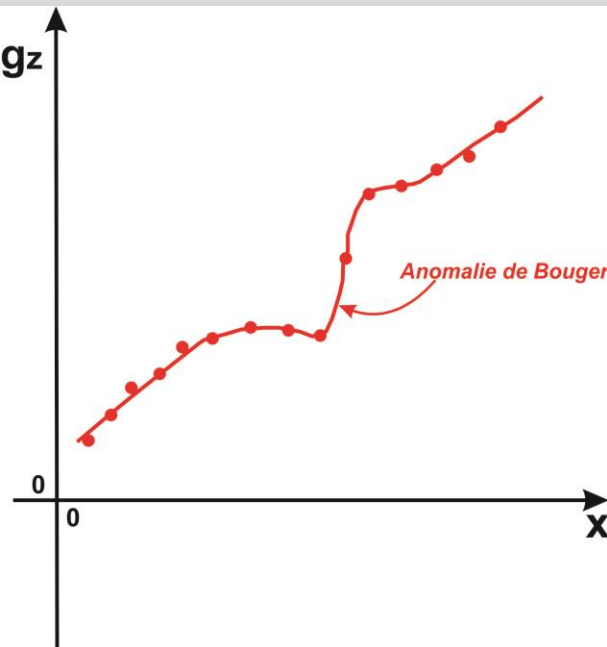


Corrections

- Dérive de l'instrument (marée et fatigue de l'instrument)
- Latitude
- Altitude
- Terrain

Microgravimétrie

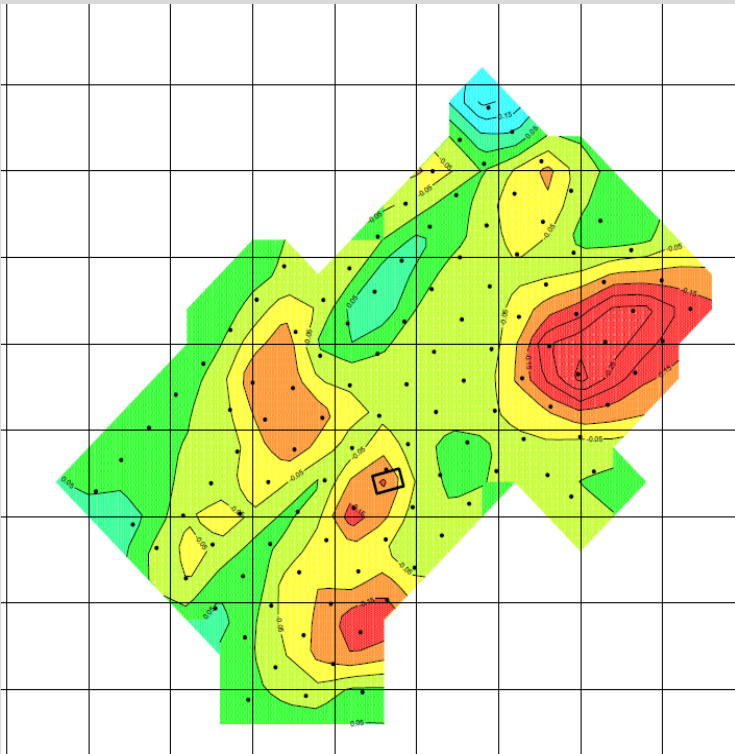
Principes



Anomalie de bouger – Anomalie régionale = Anomalie résiduelle

Microgravimétrie

□ Principes

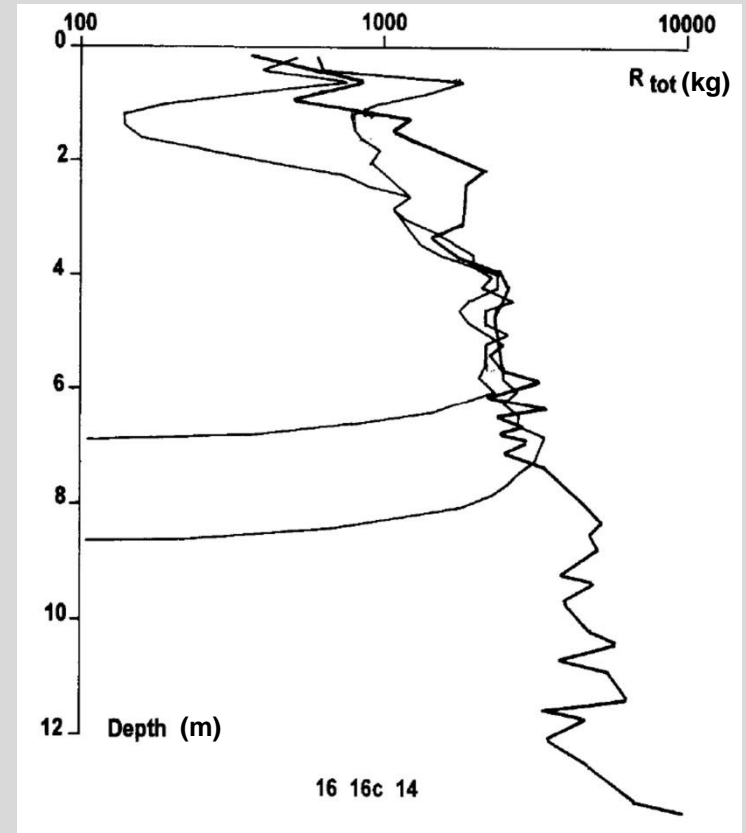
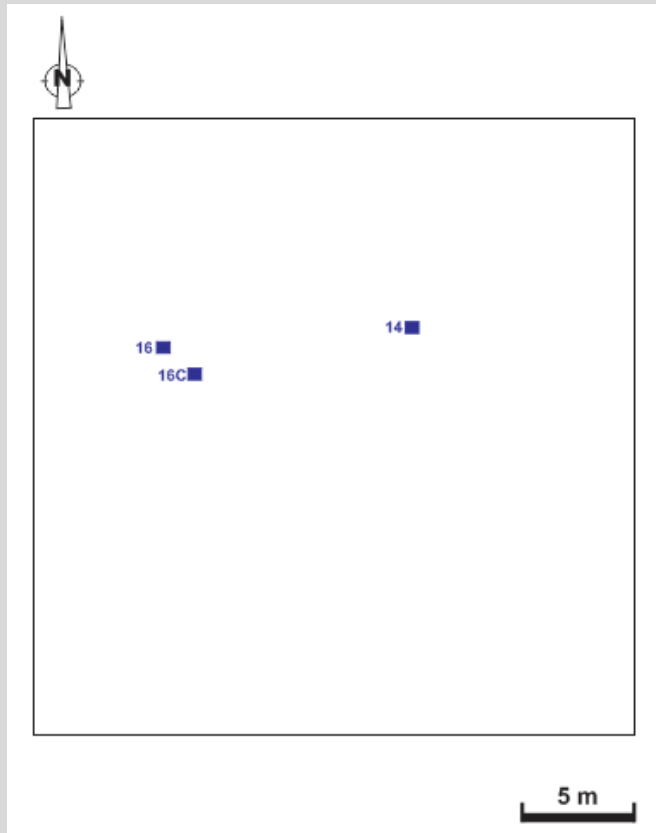


Inconvénient

- Mise en évidence des contrastes de densité → indéterminations sur ce qui induit l'anomalie

Microgravimétrie

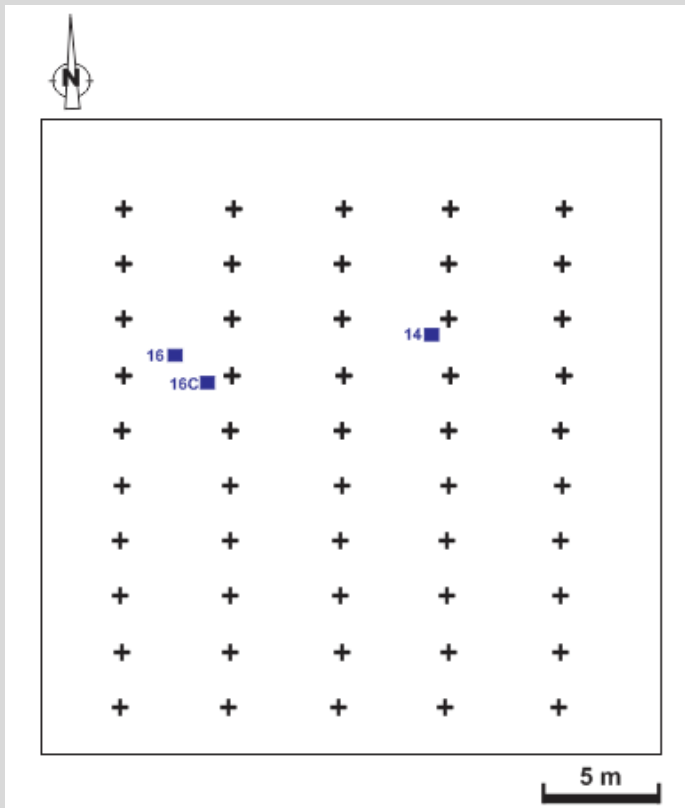
Application



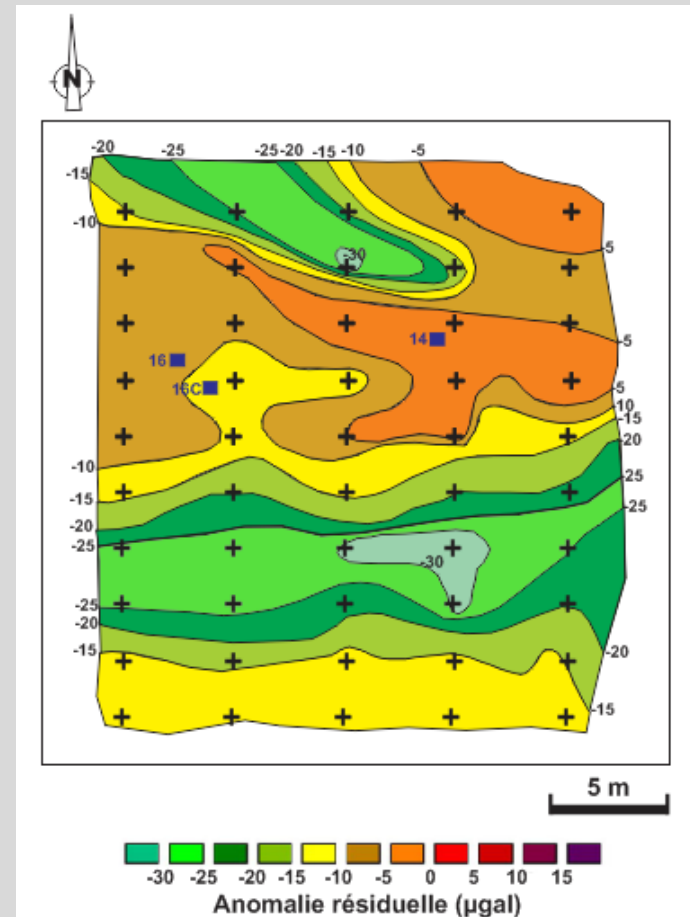
3 essais CPT dont 2 (16 et 16c) recoupent une cavité

Microgravimétrie

Application

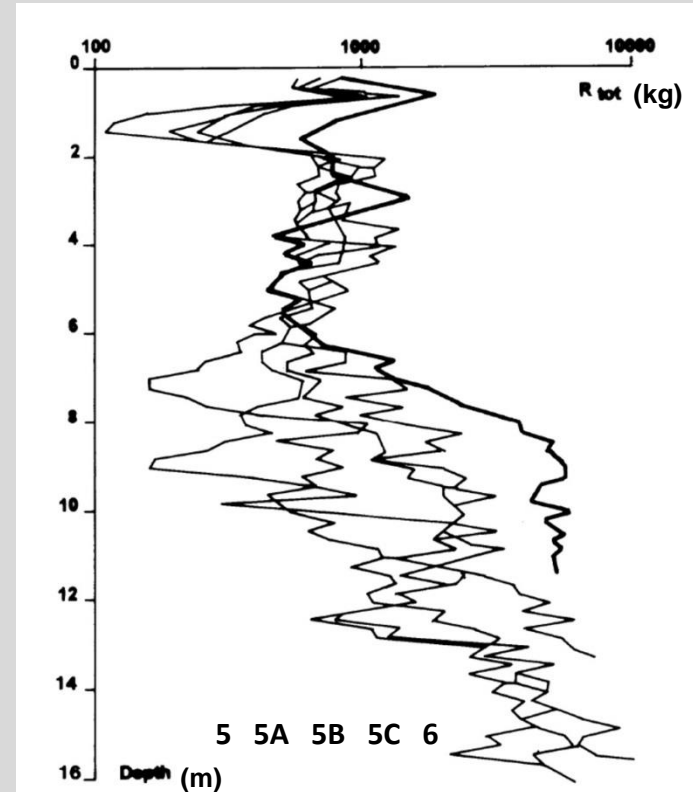
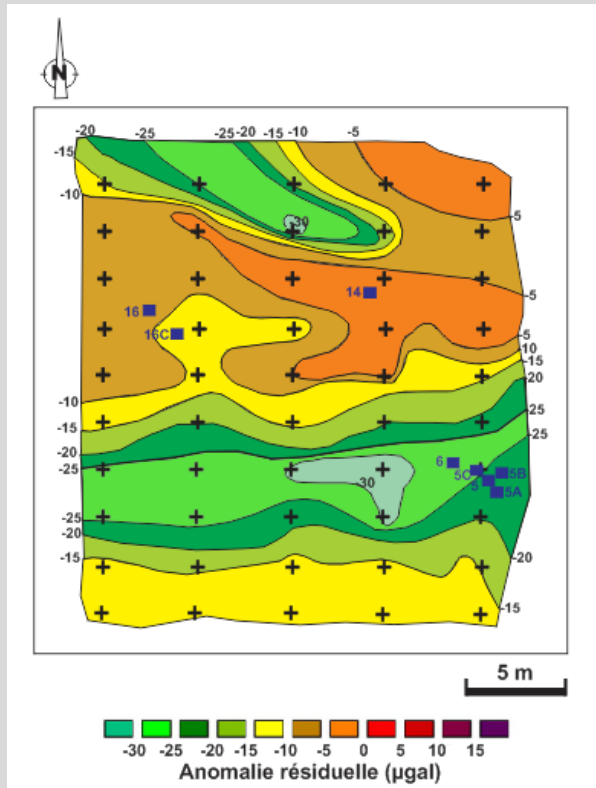


Points de mesures microgravimétriques



Microgravimétrie

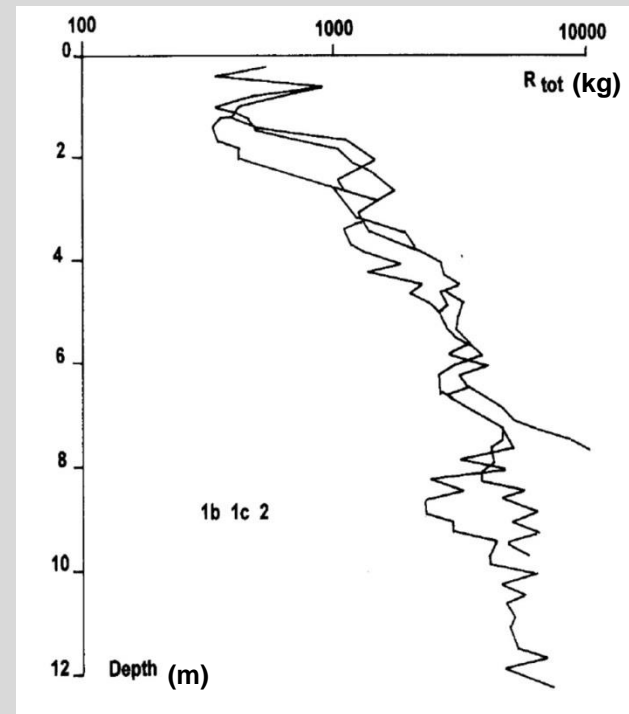
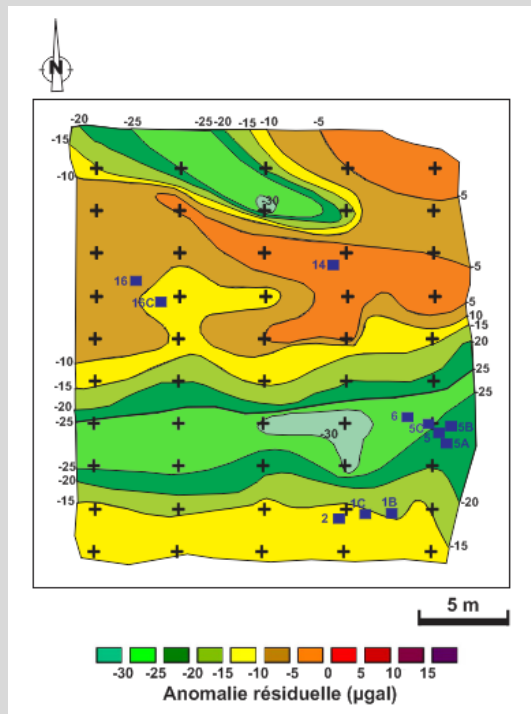
Application



2ème campagne de CPT sur anomalie microgravimétrique: aucune présence de cavité

Microgravimétrie

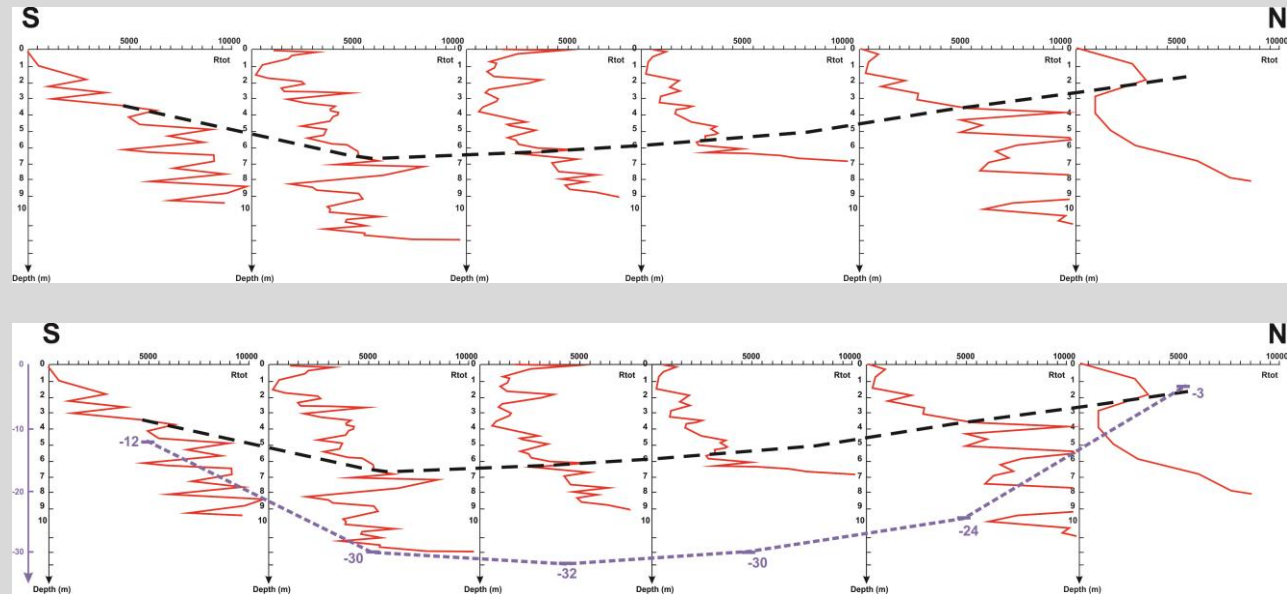
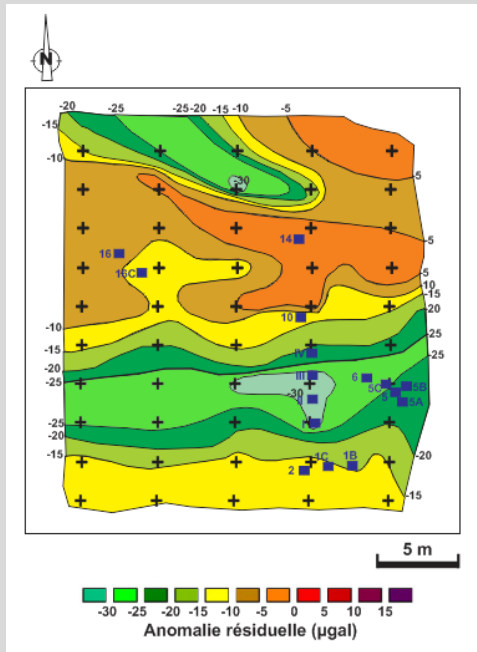
Application



3^{ème} campagne de CPT: confirmation de la géophysique (pas de cavité)

Microgravimétrie

Application

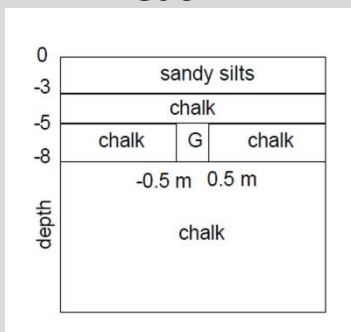


4^{ème} campagne de CPT: la forme de l'anomalie géophysique est semblable à celle du toit du bedrock sain:
L'anomalie géophysique est induite par l'épaisseur variable des matériaux meubles et altérés au dessus du bedrock

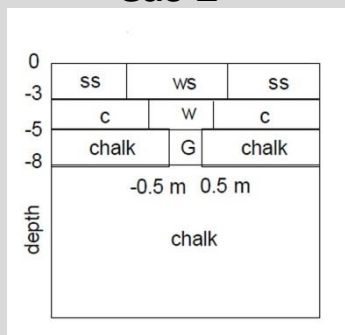
Microgravimétrie

Application

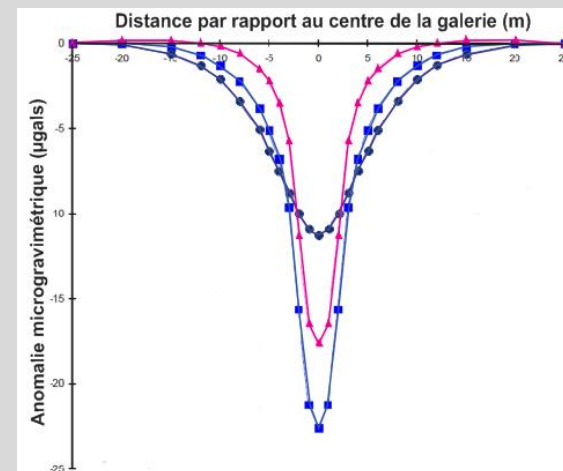
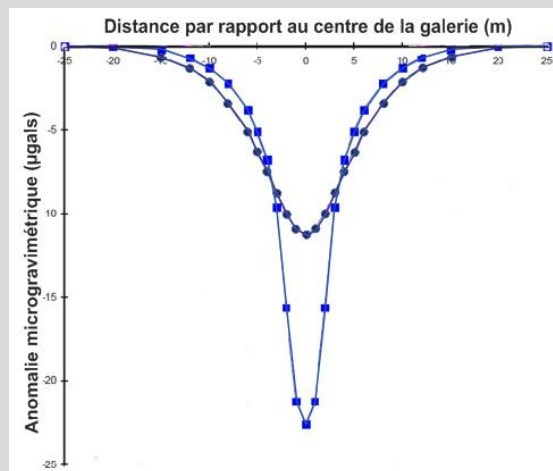
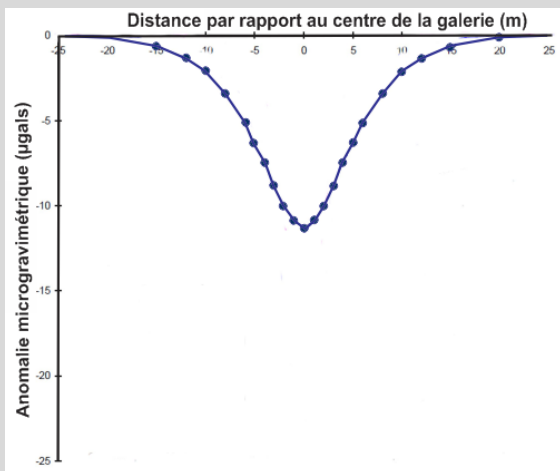
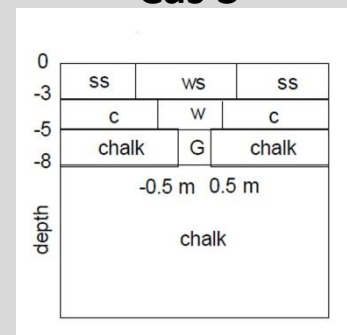
Cas 1



Cas 2



Cas 3



La modélisation confirme les résultats géophysiques

Plan

- Introduction: méthodes géophysiques

- Méthodes électrique

- Méthodes électriques

- Microgravimétrie

- Méthode radar

Méthode radar

□ Principes:

- Propagation et réflexion d'ondes électromagnétiques de hautes fréquences (20MHz – 2 GHz)
- Réflexion due au contraste de permittivité
- Haute résolution et faible pénétration pour les hautes fréquences

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

v: vitesse des ondes radar (m/μs)

c: vitesse de la lumière dans le vide (300m/μs)

ε_r: permittivité relative du matériau

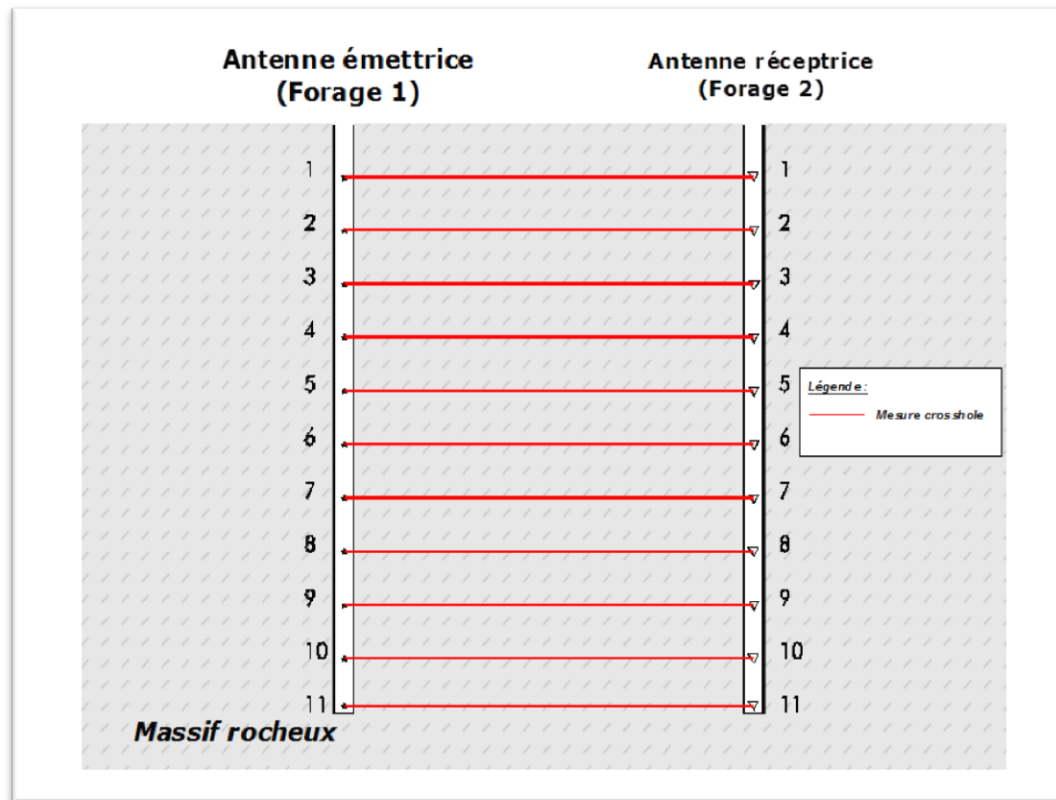
$$\alpha = 1640 \cdot \frac{1}{\rho_e \sqrt{\epsilon_r}}$$

- Deux modes de mise en œuvre: transmission et réflexion

Méthode radar

❑ Principe: mode transmission en forages (crosshole et tomographie)

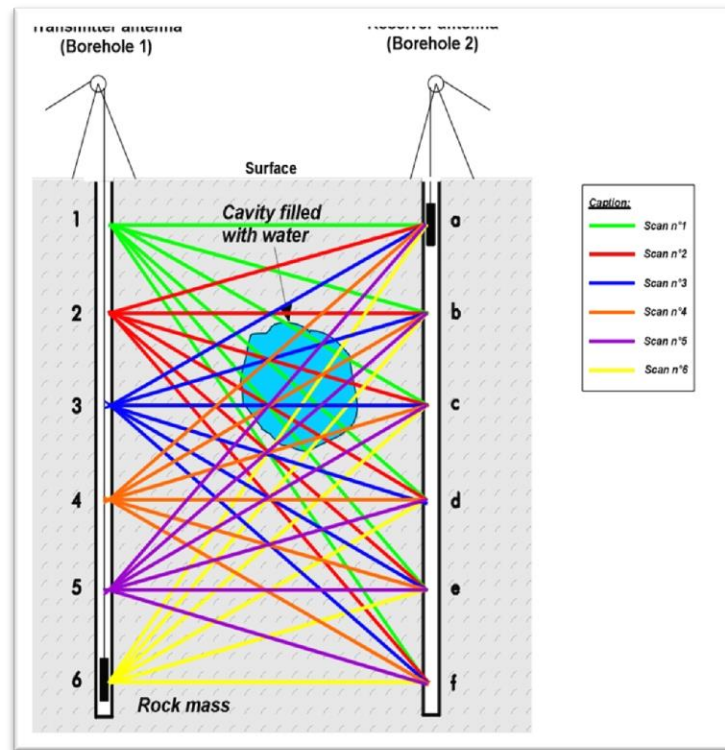
❑ Mode crosshole



Méthode radar

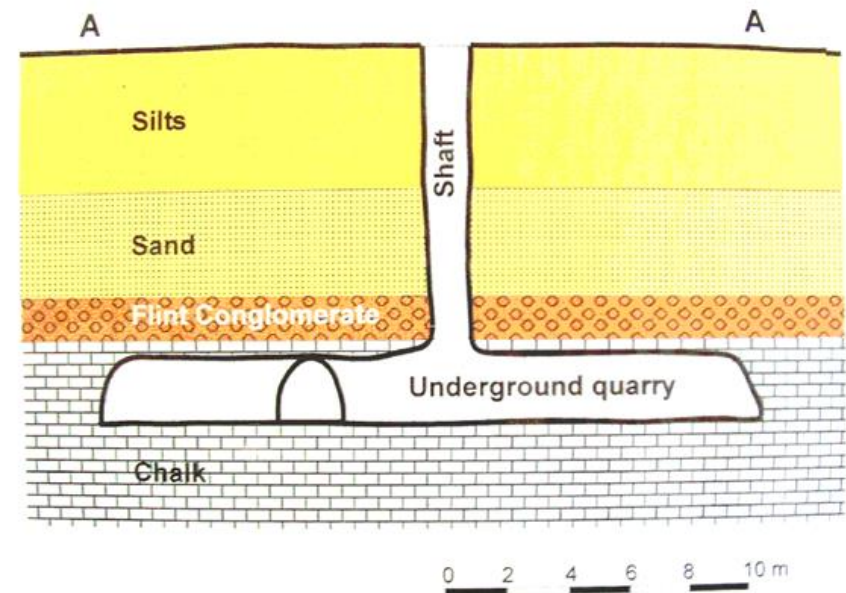
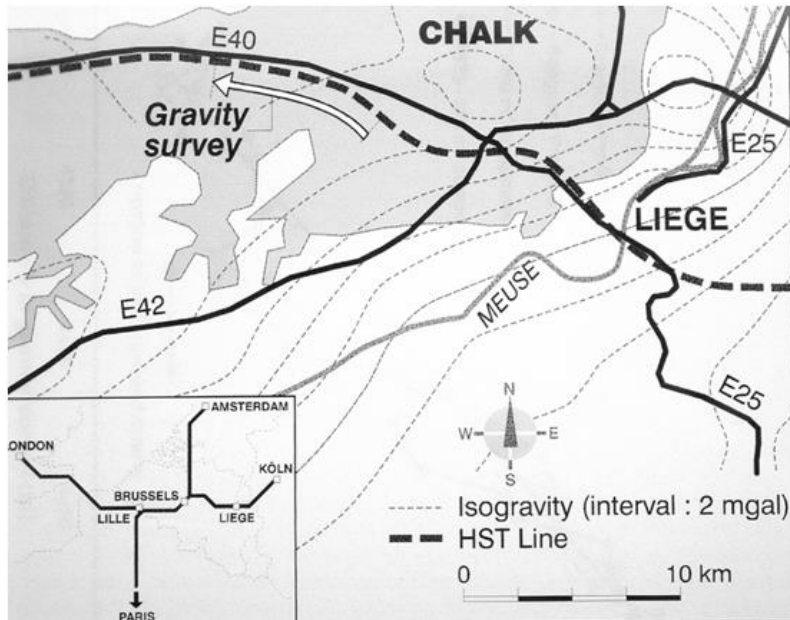
□ Principe: mode transmission (crosshole et tomographie)

□ Mode tomographique



Méthode radar

Application 1: Tracé TGV Bruxelles – Liège (Remicourt) (Courtesy of TUCRAIL)



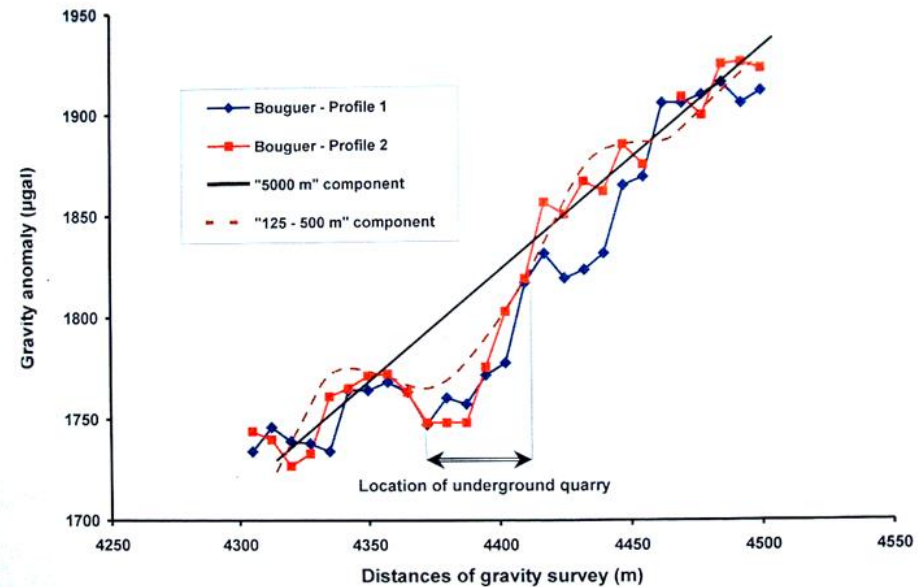
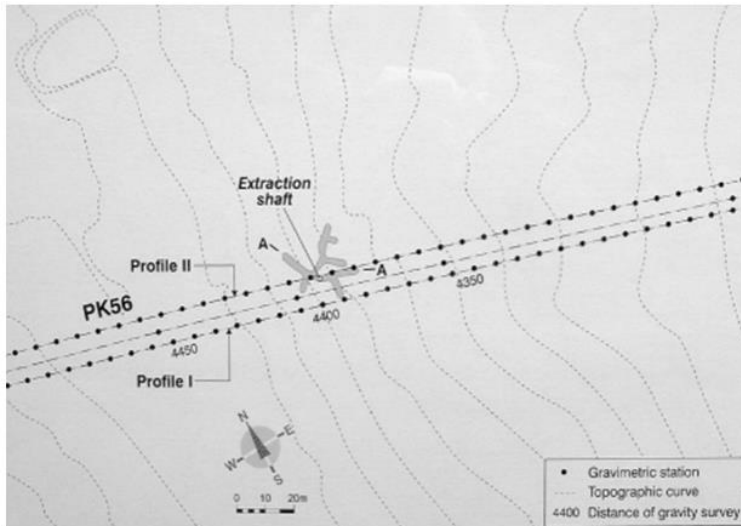
Méthode radar

Application 1: Tracé TGV Bruxelles – Liège (Remicourt)



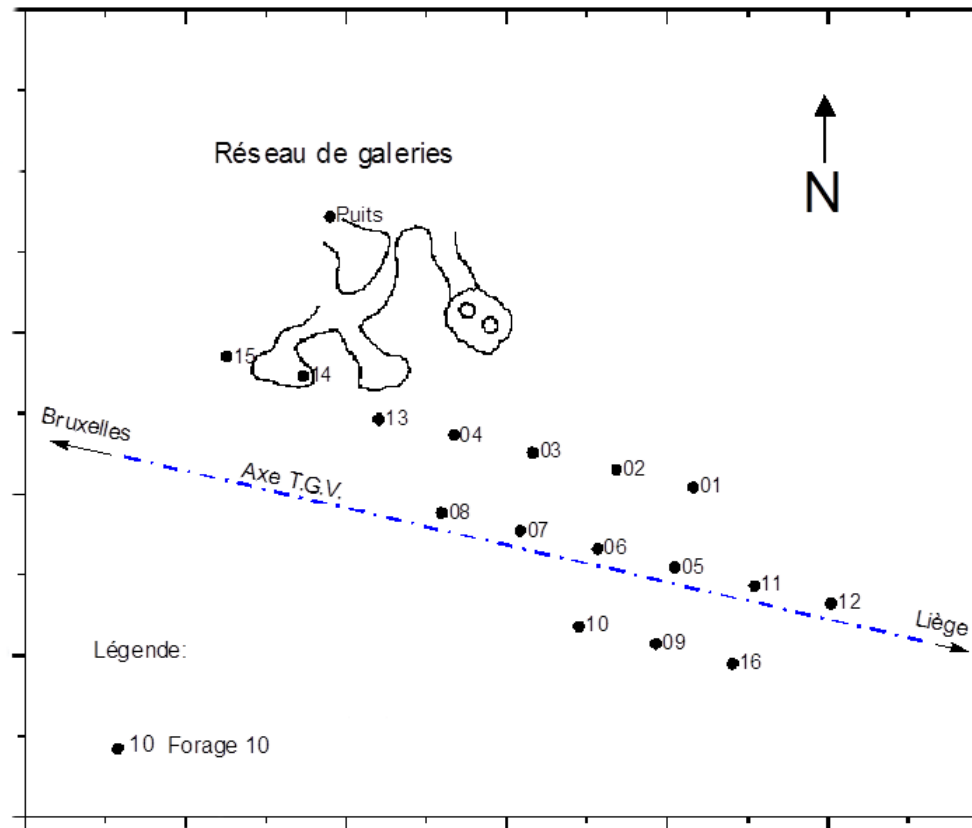
Méthode radar

Application 1: Tracé TGV Bruxelles – Liège (Remicourt)



Méthode radar

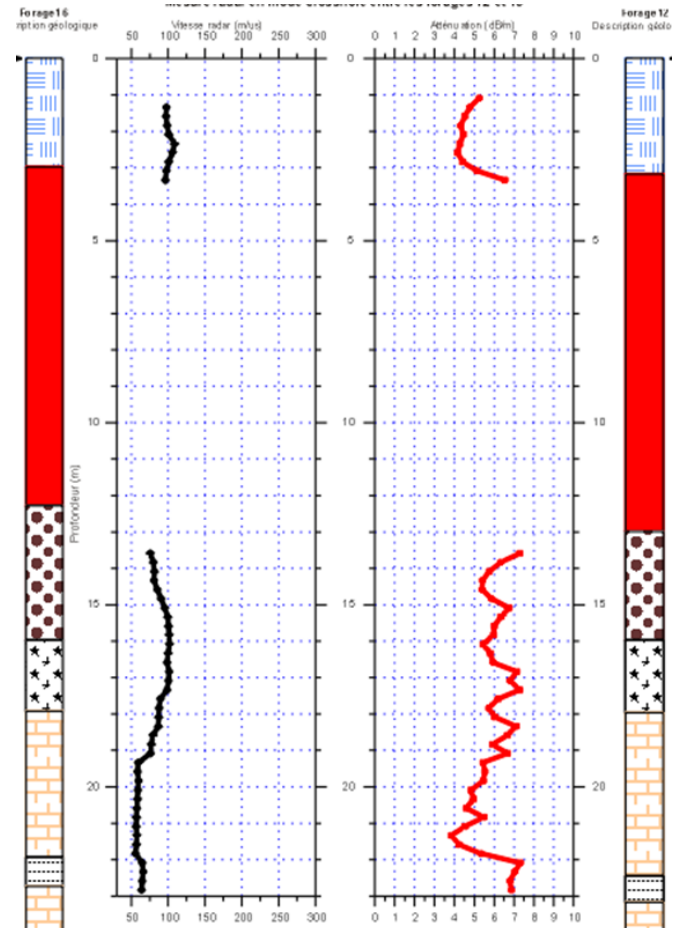
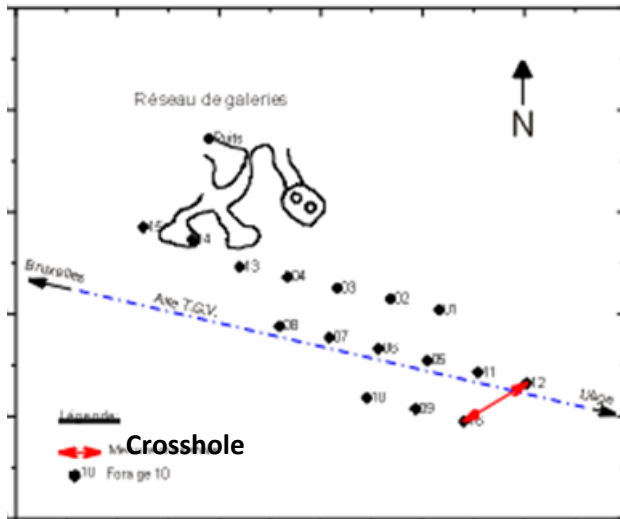
Application 1: Tracé TGV Bruxelles – Liège (Remicourt)



Implantation des forages

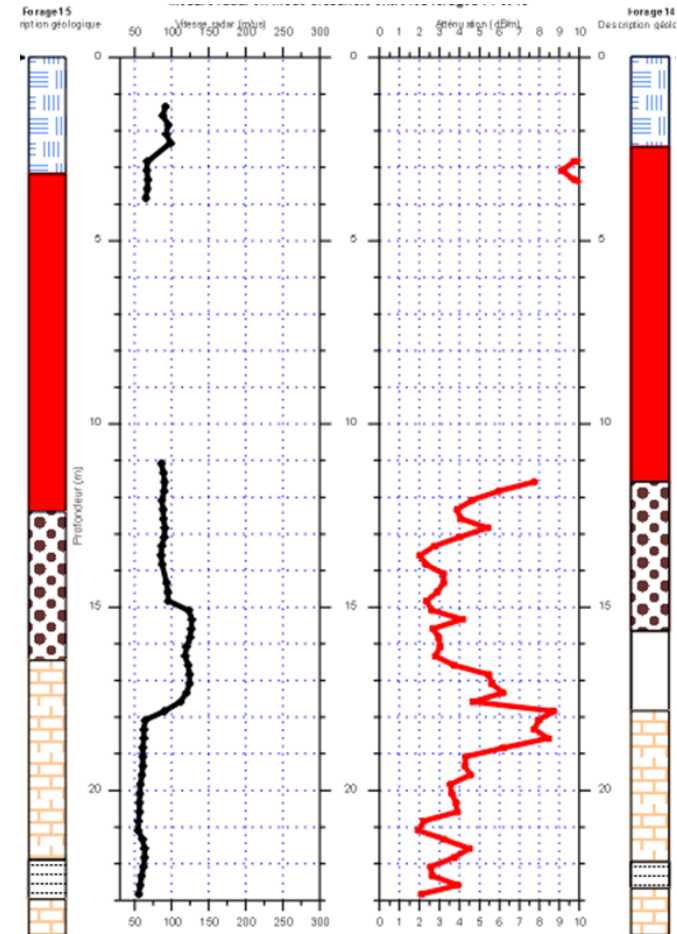
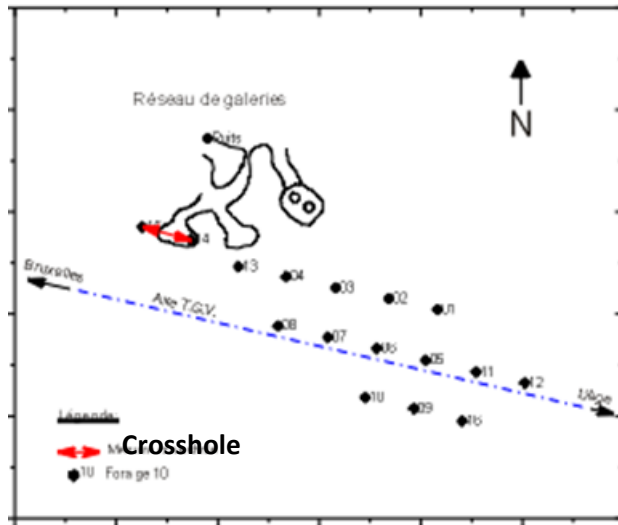
Méthode radar

Application: Tracé TGV Bruxelles – Liège (Remicourt)



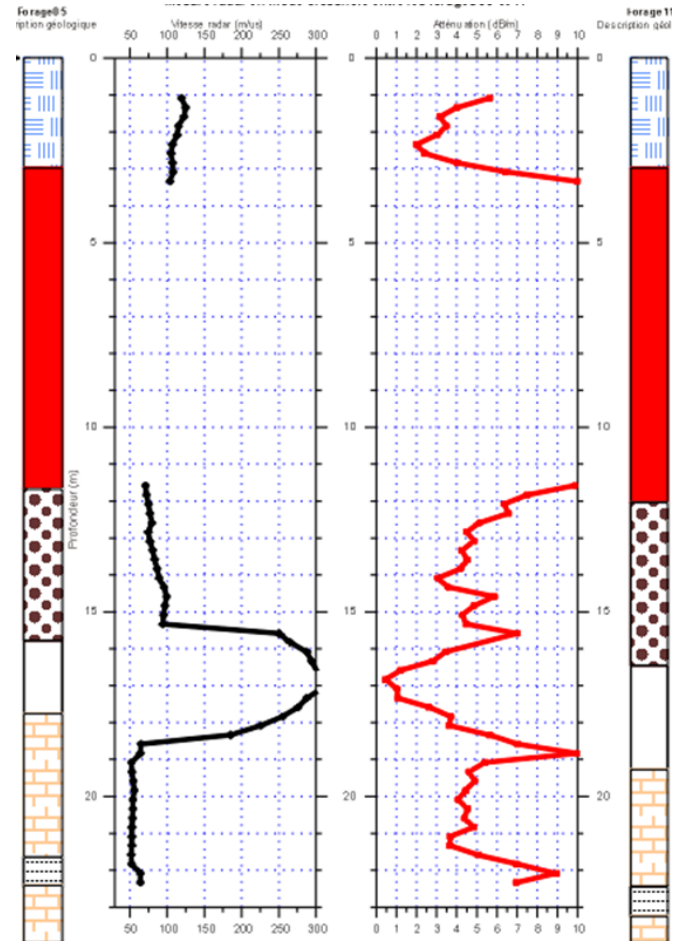
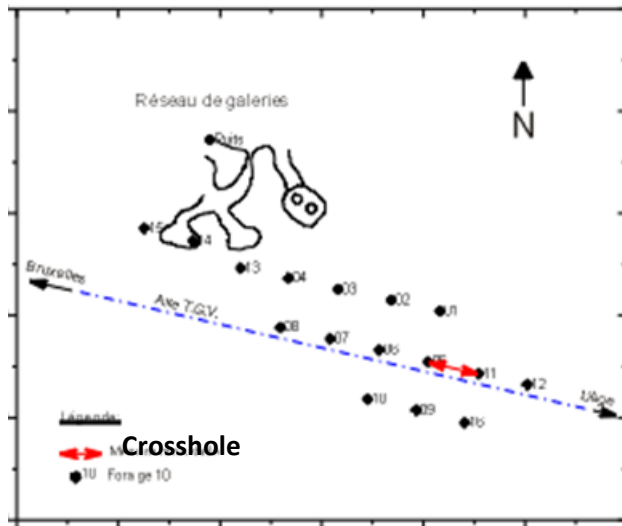
Méthode radar

Application 1: Tracé TGV Bruxelles – Liège (Remicourt)



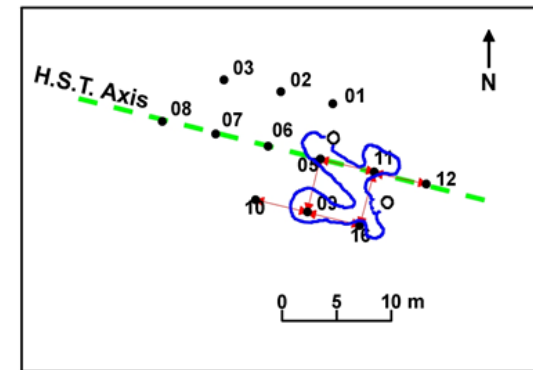
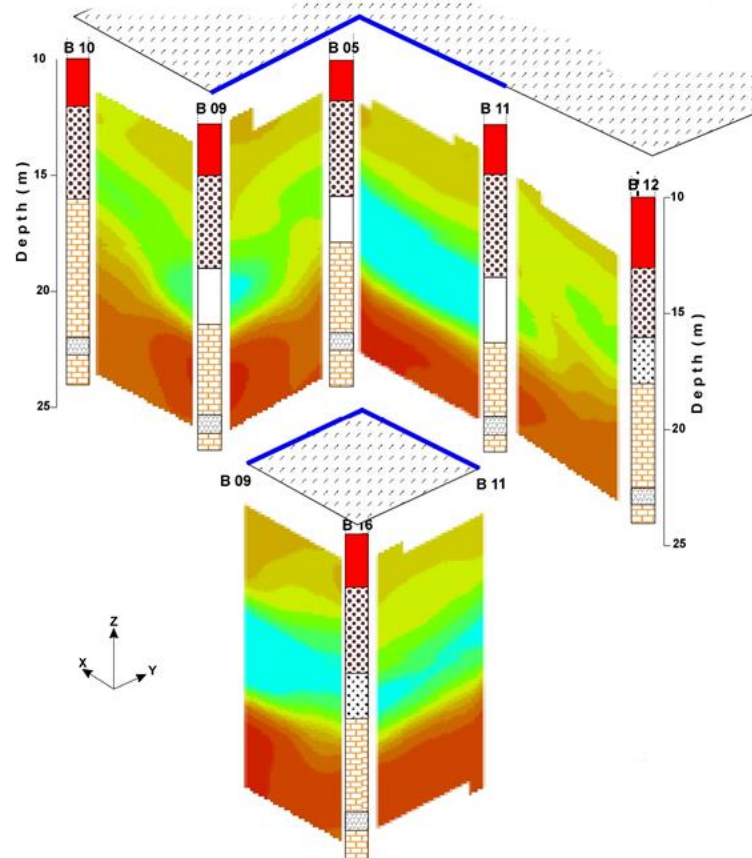
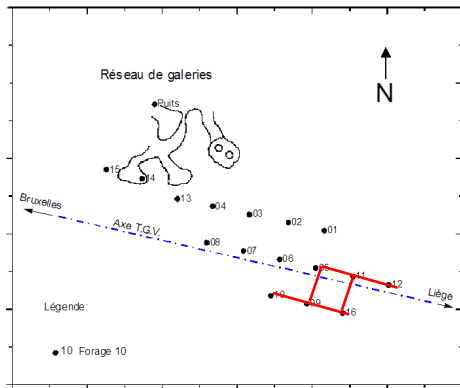
Méthode radar

Application 1: Tracé TGV Bruxelles – Liège (Remicourt)



Méthode radar

Application 1: Tracé TGV Bruxelles – Liège (Remicourt)



Méthode radar

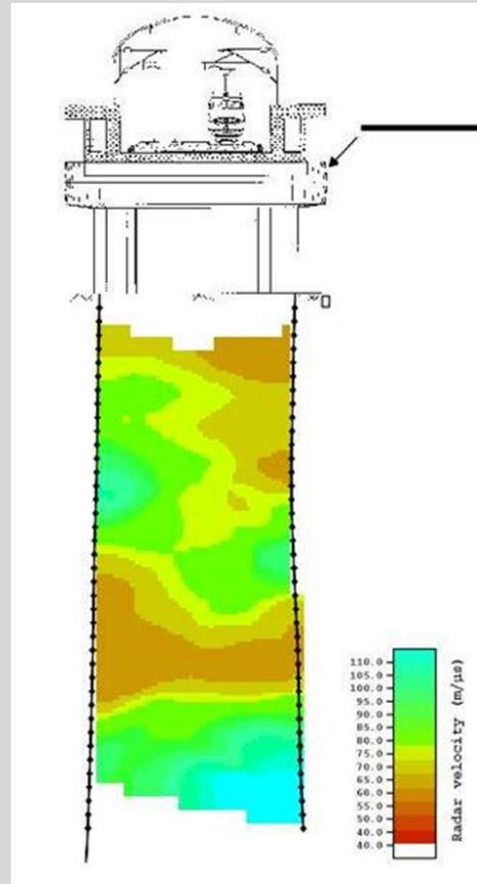
□ Application 2: Viaduc d'Arbre



- *2 km de long*
- *40 piles*
- *Problèmes de fondation liés au calcaire carbonifère très karstifié*
- *Investigation de toutes les piles par tomographie radar pour définir la profondeur des fondations*

Méthode radar

Application 2: Viaduc d'Arbre



Conclusions

- La sélection de la méthode géophysique pour l'investigation d'un site est d'une importance fondamentale
- La complémentarité des investigations géologiques, géotechniques et géophysiques: elles ont chacune des possibilités et des limitations
- L'intégration des données géologiques, géotechniques et géophysiques est nécessaire pour construire un model réaliste du sous-sol

Merci de votre attention