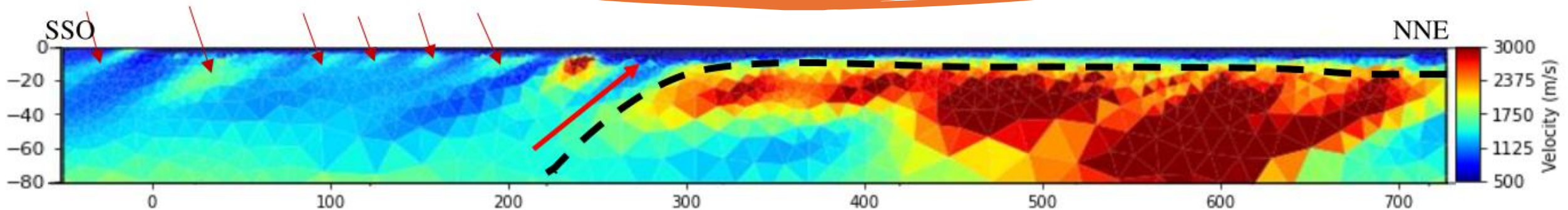


Introduction aux méthodes géophysiques

La géophysique au service de la géotechnique



Prof. Olivier KAUFMANN, Université de Mons
Prof. Frédéric NGUYEN, Université de Liège





Géophysique Appliquée ?

Propriétés physiques et Processus

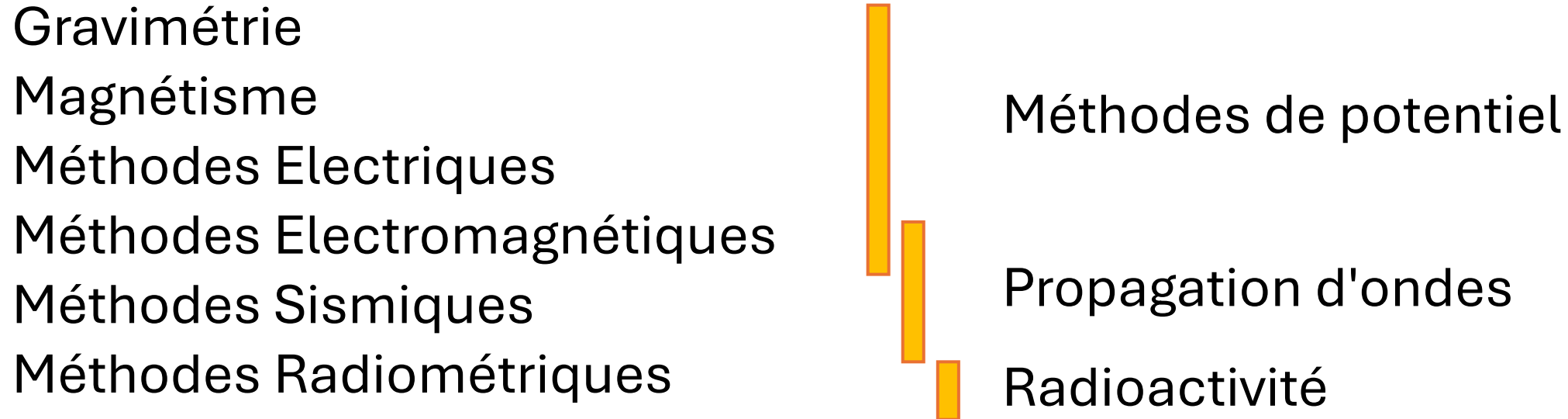
Techniques et Méthodes

Mesure de grandeurs physiques

Informations sur la structure
et la composition du sous-sol

**Développer les connaissances et la compréhension des
conditions de sous-sol en vue d'applications pratiques**

Quelles Méthodes ?



Actives vs Passives

Reconnaissance et suivi temporel

Géophysique vs Géotechnique ?

Méthodes non invasives

Mesures de réponses d'ensemble
de la subsurface

Support d'information plus grand
Grande extension spatiale

→ cartographie, section, modèles
détection, continuité, structures...

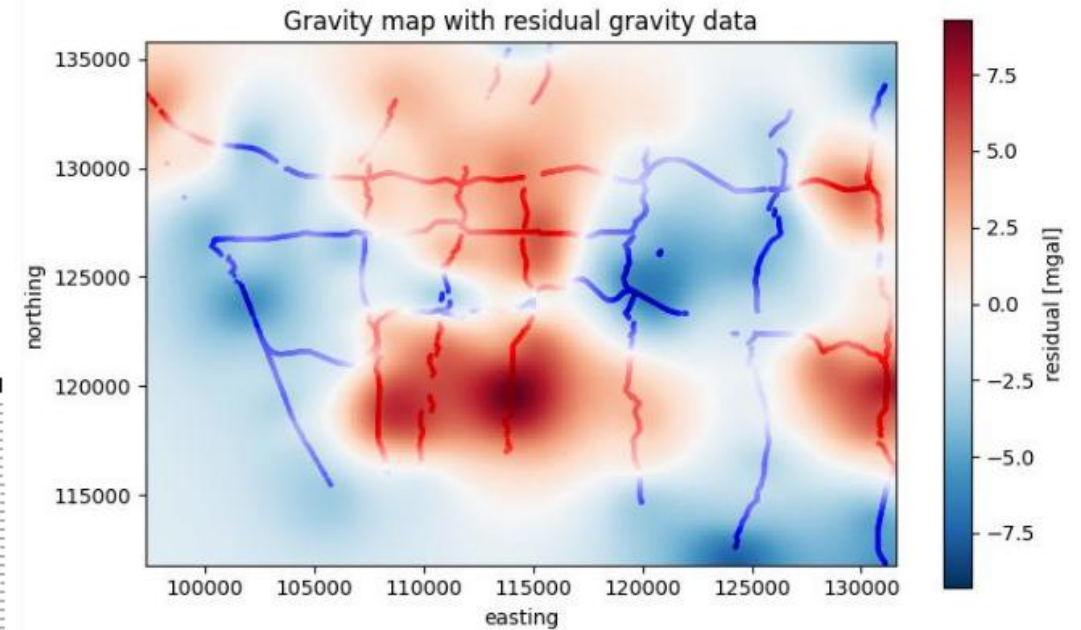
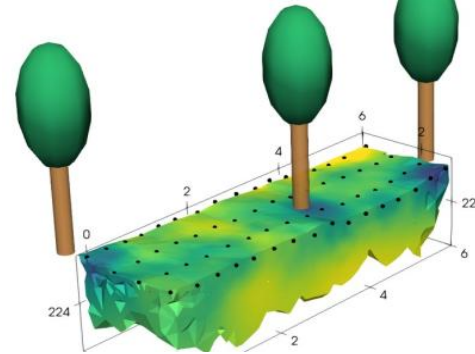
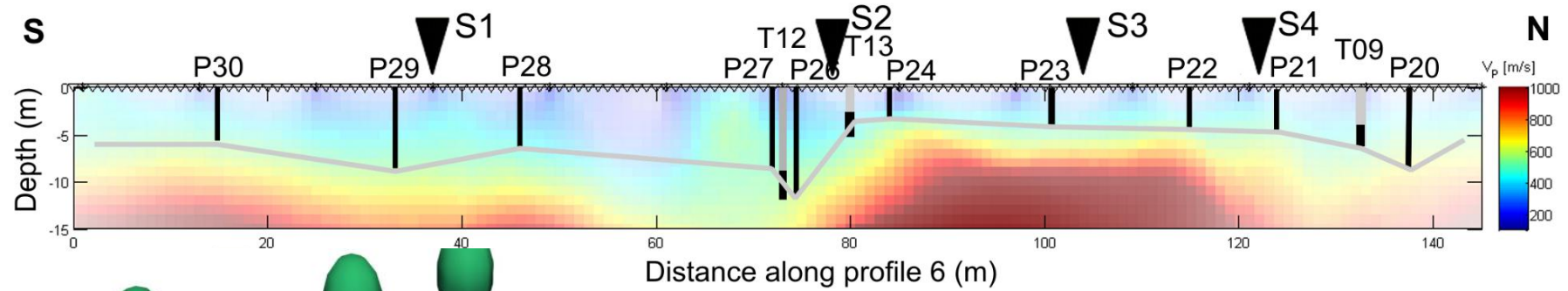
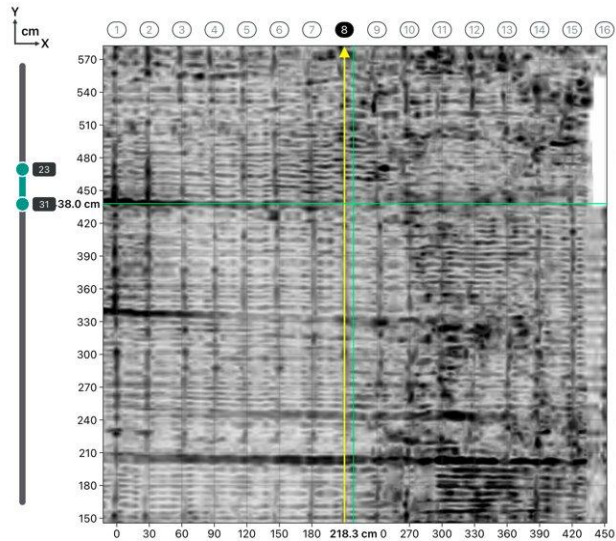
Méthodes invasives

Mesures localisées,
échantillonnage direct

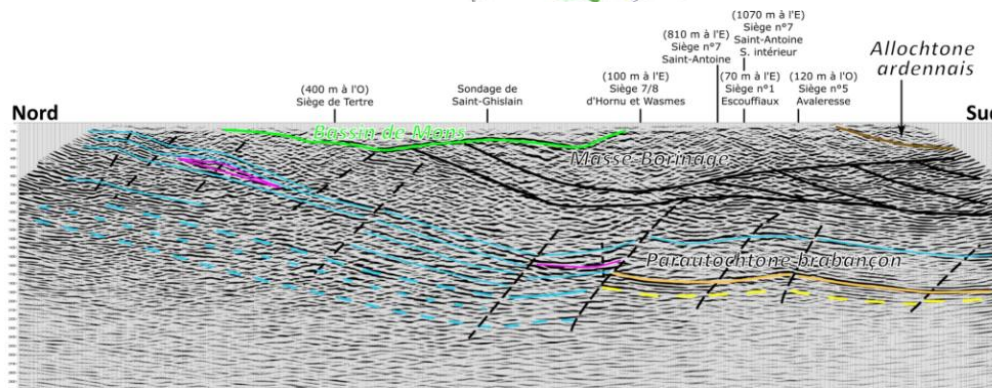
Support d'information plus petit
Extension spatiale limitée

→ caractérisation géomécanique
dimensionnement, stabilité...

Quelles Echelles ?



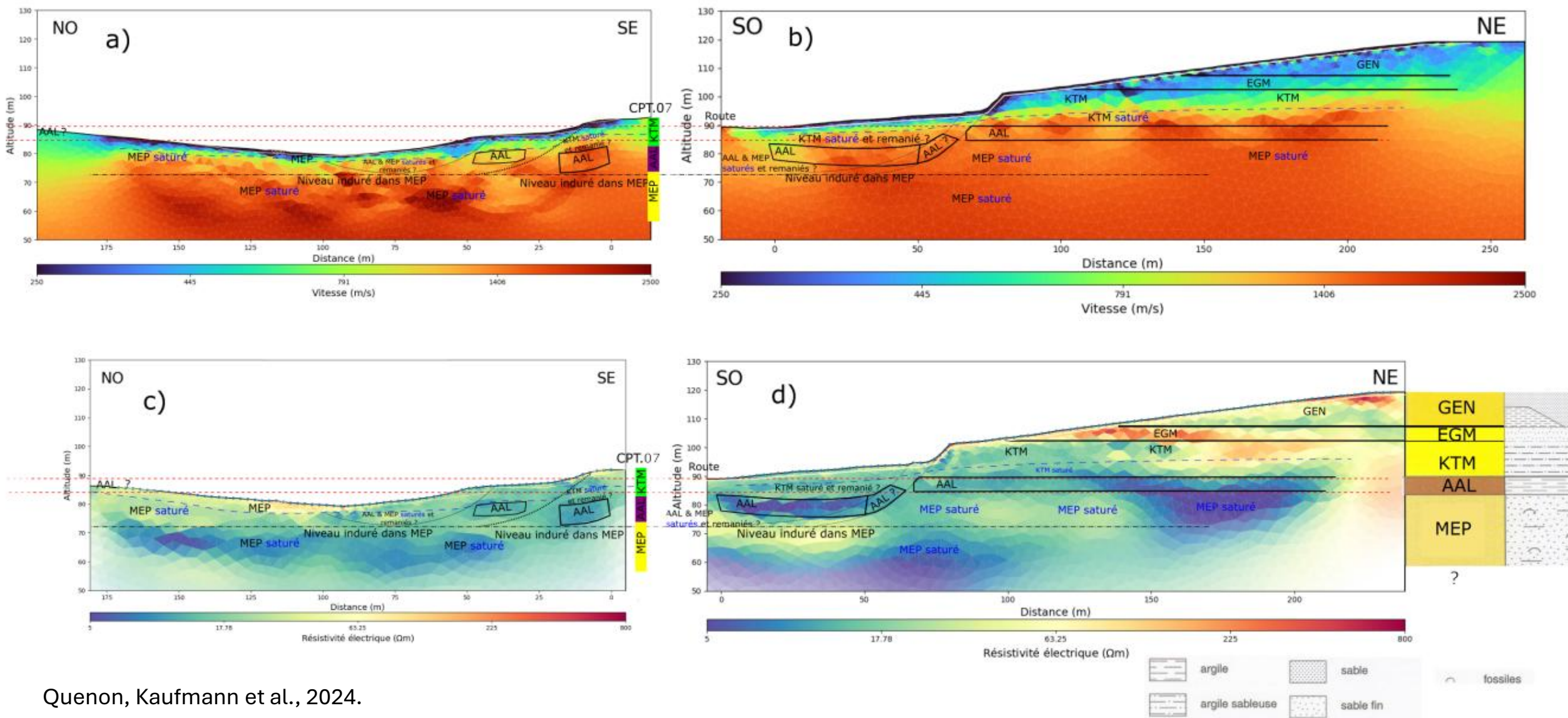
x, y :
m à 100 km
dm à 5 km



Pour répondre à quelles questions?

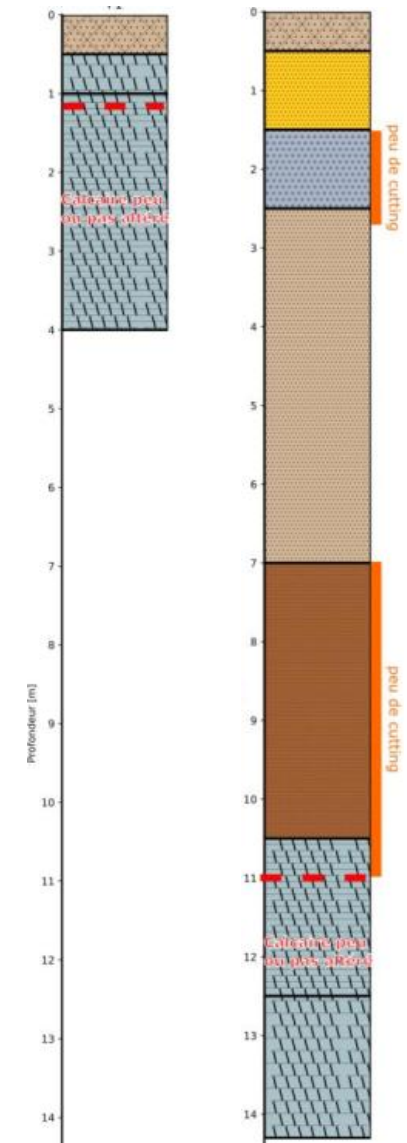
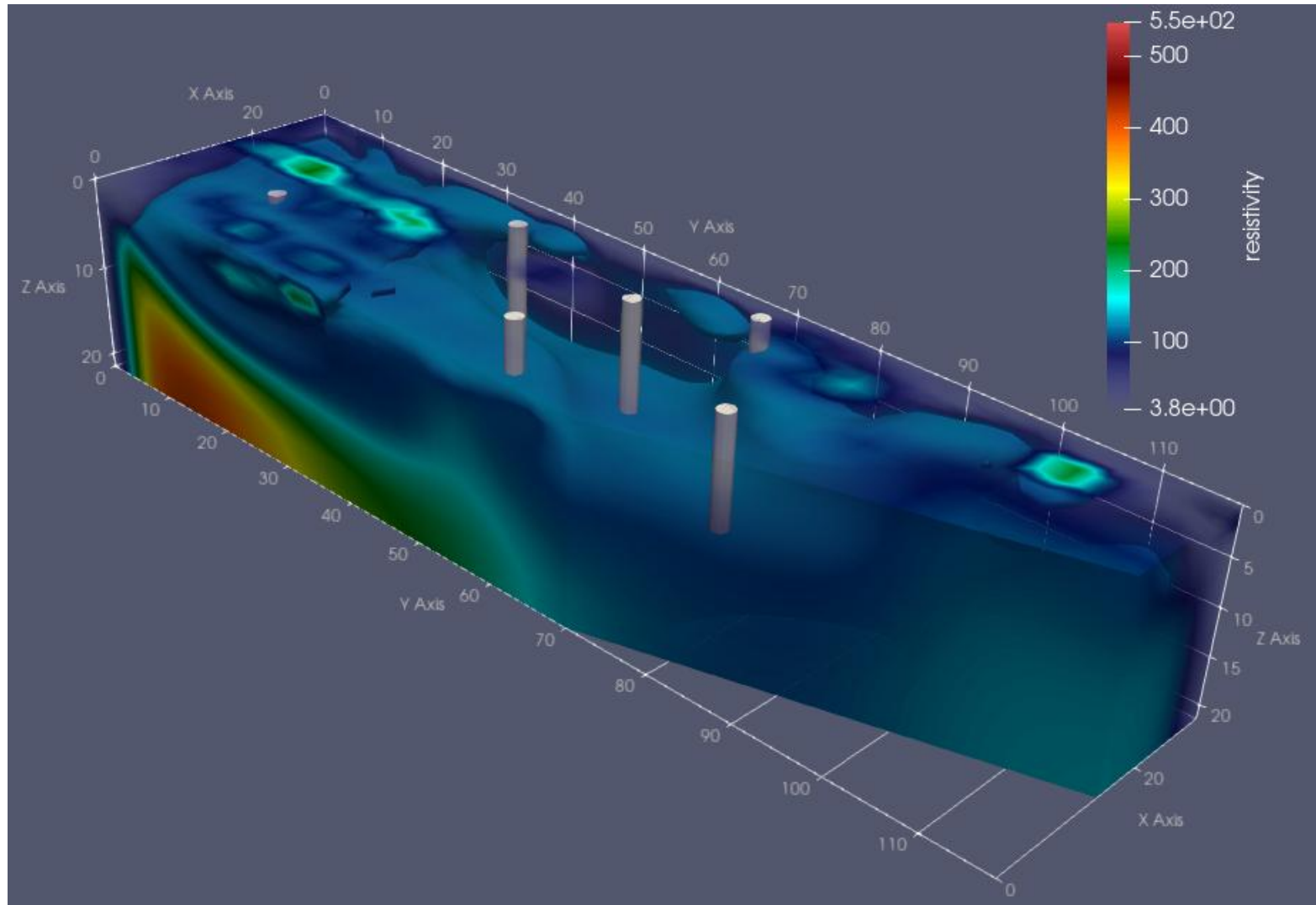
- **Terrassement & fondations (bâtiments, linéaires...)**
Profondeur et qualité du rocher, profondeur de la nappe phréatique, cavités...
- **Stabilité des talus et pentes, ouvrages de soutènement**
Nappe(s), surfaces de glissement, structure de glissements de terrain...
- **Ouvrages fluviaux, digues et barrages en terre**
Structure du corps de digue, flux d'eau...
- **Evaluation des géo-risques (risque sismique, effondrements karstiques...)**
Rigidité des terrains superficiels, altérations et karstification...
- **Reconnaissance environnementale (sites pollués, CET, friches industrielles...)**
Structures enterrées, sources de pollution, voies de migration, extension...
- ...

Exemple : Glissement de terrain



Quenon, Kaufmann et al., 2024.

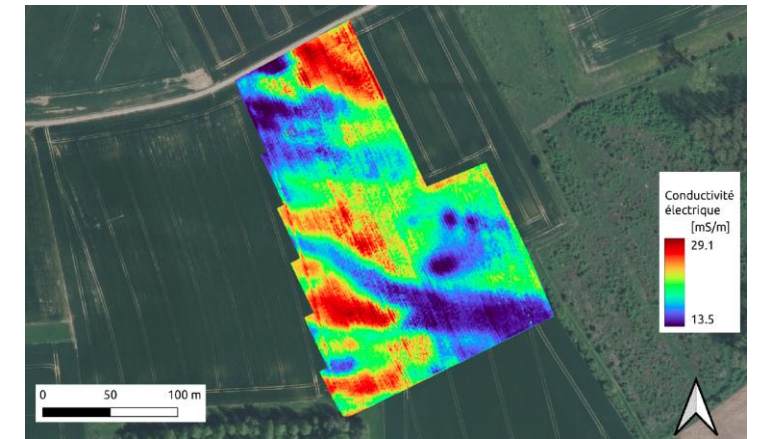
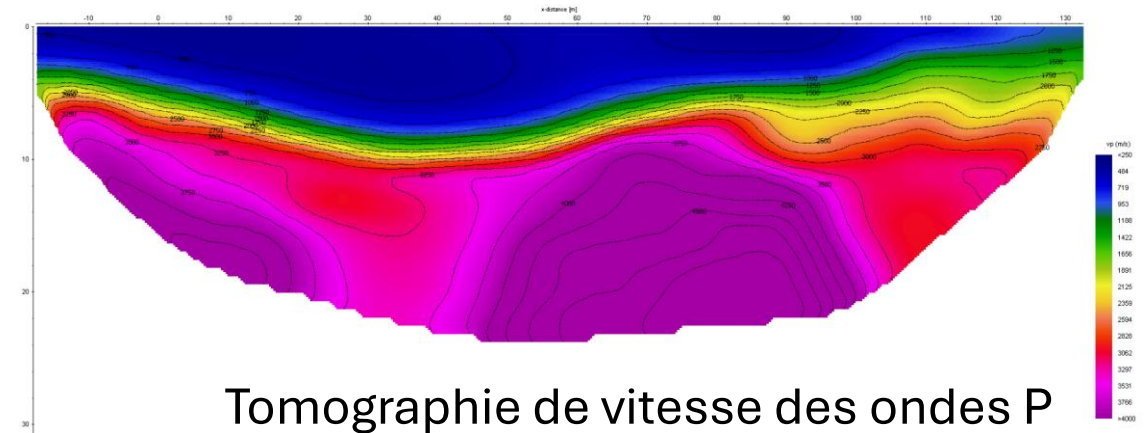
Exemple : Fondation sur pieux forés



Kaufmann, Martin, 2022. inédit.

Potentiel et limitations...

- Non-invasif
 - Couverture spatiale élevée
 - Temps d'acquisition réduits
 - Limitation des instruments
 - Bruits environnementaux
 - Grandeurs physiques mesurées souvent indirectement liées aux propriétés d'intérêt
 - Ambiguïté des signatures
 - Non-unicité des modèles qui expliquent les mesures
 - Résolution variable, incertitudes sur les paramètres
- Interprétation bien informée
(contexte, méthodes, modèles, objectifs)



Organiser une reconnaissance géophysique ?



- **Quand l'envisager?**
Si possible dès les phases initiales du projet
- **Dans quel(s) but(s)?**
Objectifs à préciser le mieux possible
- **Avec quels moyens et dans quels délais?**
A définir au regard des objectifs, du ratio coût/information attendu et de la nature du projet

Design et préparation

- **Cerner le contexte**
informations *a priori*, modèle conceptuel, clés d'interprétation
- **Formuler la question du point de vue de l'application visée**
exploration, délimitation, détection, caractérisation, suivi...
→ dialogue géotechnicien et géophysicien
- **Choisir la (les) méthode(s), identifier les objectifs et les cibles**
capacités et des limitations des méthodes, rapport coût/information
- **Définir la stratégie de mise en oeuvre et le protocole d'acquisition**
expérience passée, contraintes de terrain, modélisation préalable, test in-situ...

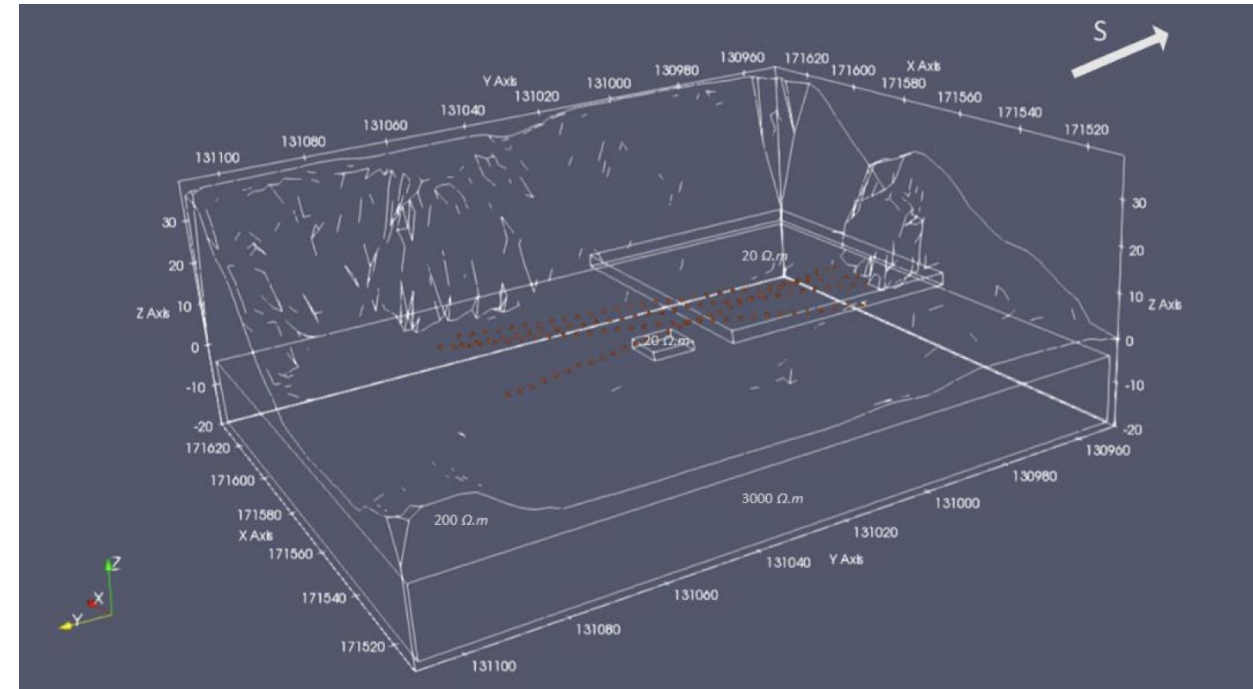
Design et preparation : modélisation préalable

- **Modèle conceptuel**

Permet de tester une série d'hypothèses

Affiner le design (nombre de capteurs, espacements...)

Permet d'aller jusqu'à l'imagerie (jumeau numérique)



Debouny, 2019

Design et preparation : modélisation préalable

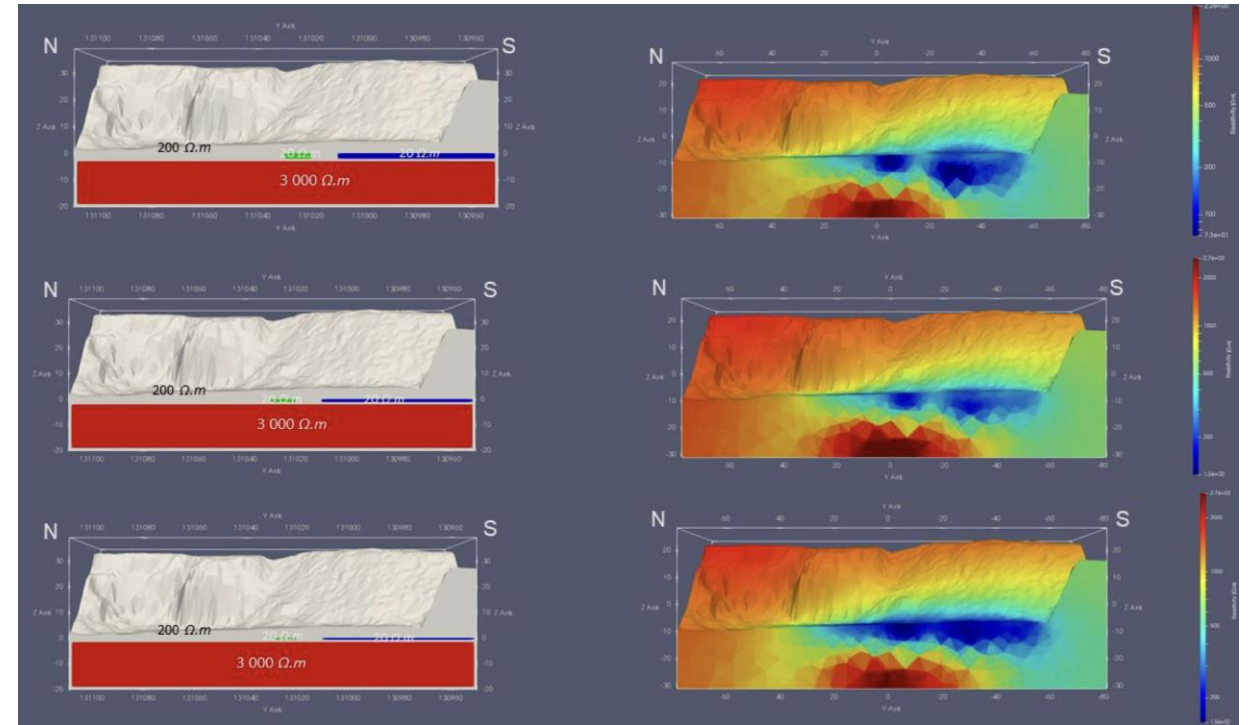
- **Modèle conceptuel**

Etape souvent négligée

Permet de tester une série d'hypothèses

Affiner le design (nombre de capteurs, espacements...)

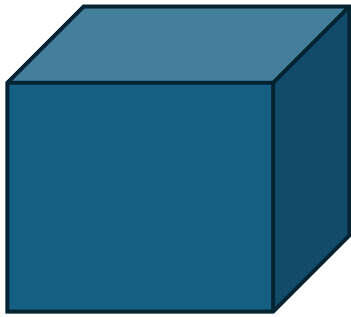
Permet d'aller jusqu'à l'imagerie (jumeau numérique)



Debouny, 2019

Design et preparation : les hypotheses sous-jacentes

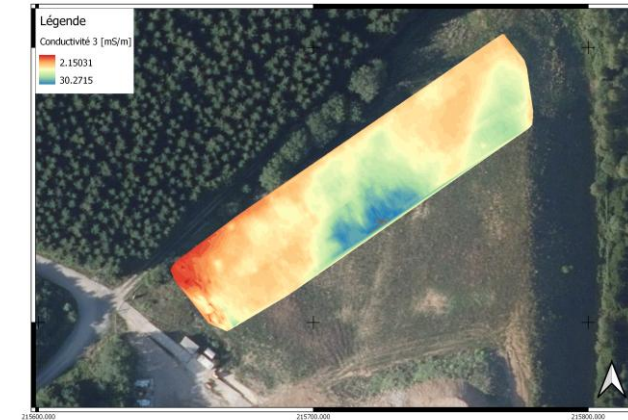
- En géophysique, il est courant de modéliser le sous-sol selon cinq grandes représentations



Demi-espace homogène



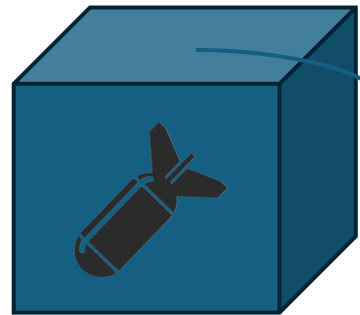
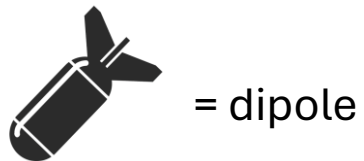
Ex: conductivimètre



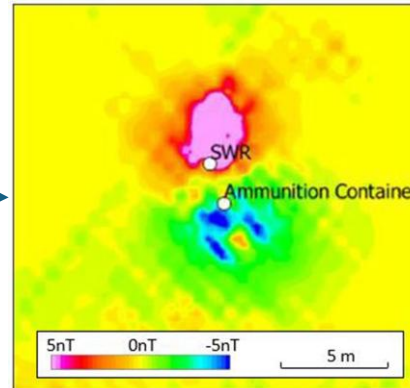
Ex: carte de conductivité **apparente**

Design et preparation : les hypotheses sous-jacentes

- En géophysique, il est courant de modéliser le sous-sol selon cinq grandes représentations



Objet enterré



Réponse magnétique et objets trouvés pour l'UXO avec le plus faible ajustement UXO ; câble métallique en acier (SWR) trouvé enterré à 30 cm et une boîte de munitions trouvée enterrée à 40 cm.

Geophys J Int, Volume 237, Issue 1, April 2024, Pages 123–144, <https://doi.org/10.1093/gji/ggad490>

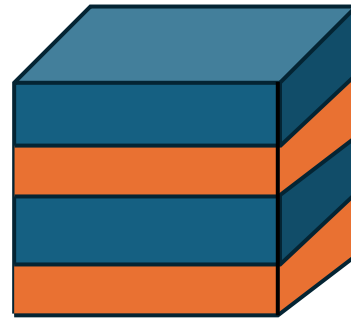
The content of this slide may be subject to copyright: please see the slide notes for details.

Design et preparation : les hypotheses sous-jacentes

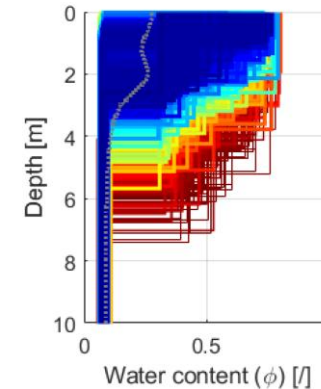
- En géophysique, il est courant de modéliser le sous-sol selon cinq grandes représentations



Ellen, 2018



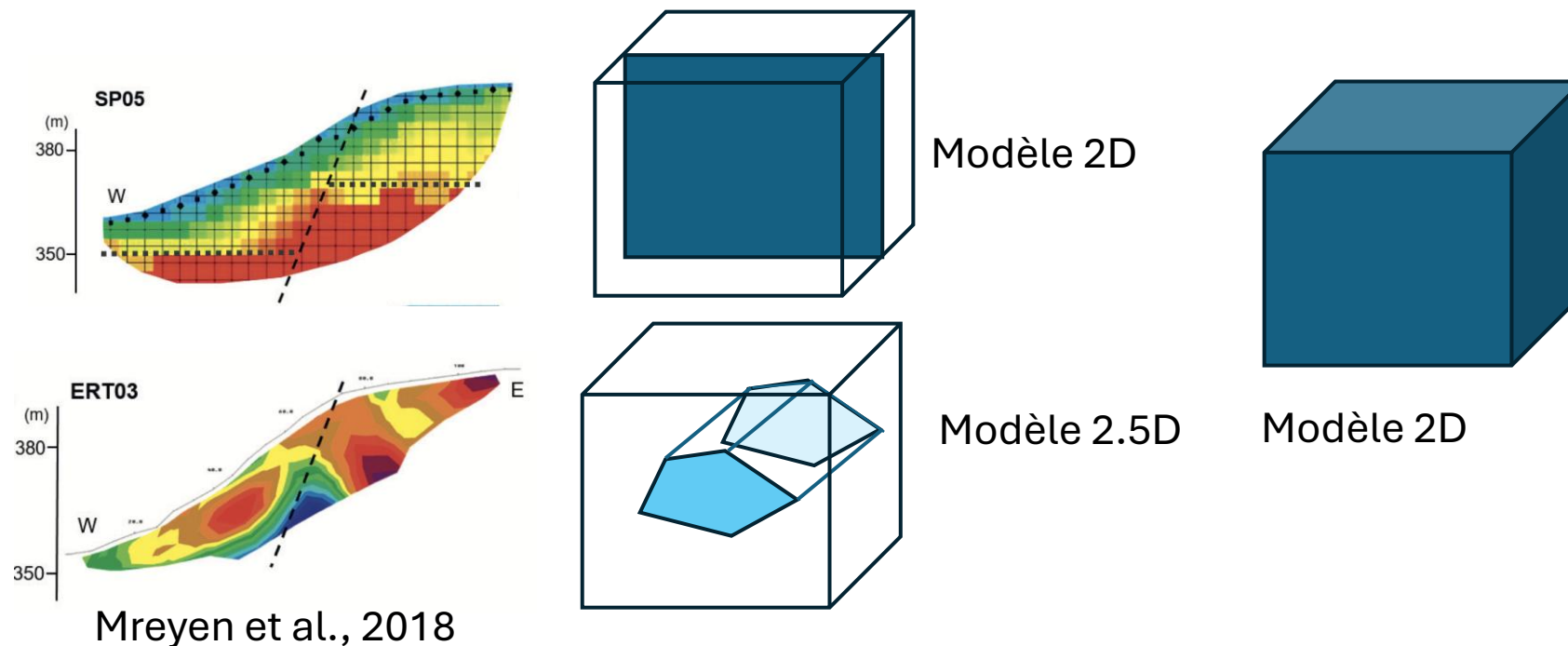
Modèle 1D



Michel et al., 2020

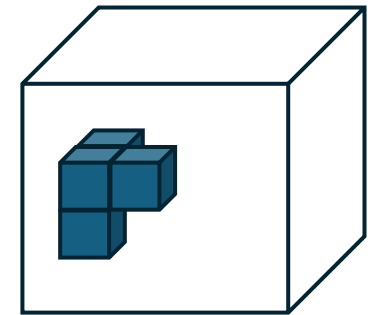
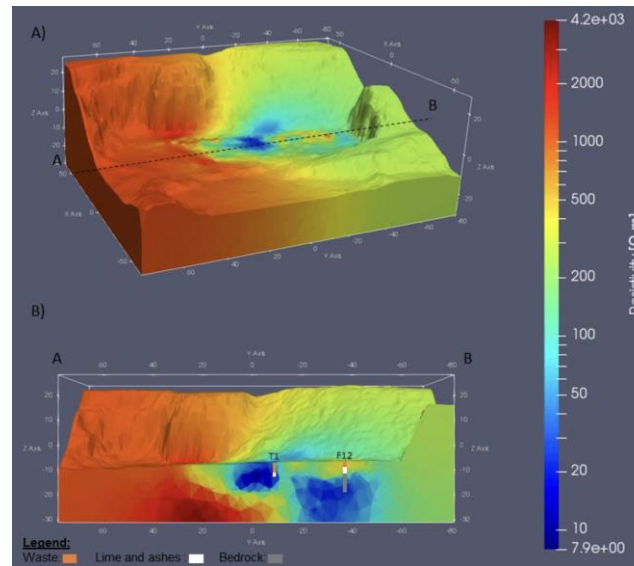
Design et preparation : les hypotheses sous-jacentes

- En géophysique, il est courant de modéliser le sous-sol selon cinq grandes représentations



Design et preparation : les hypotheses sous-jacentes

- En géophysique, il est courant de modéliser le sous-sol selon cinq grandes représentations

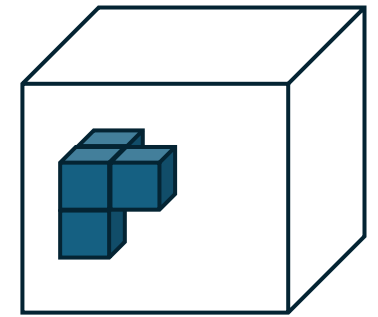
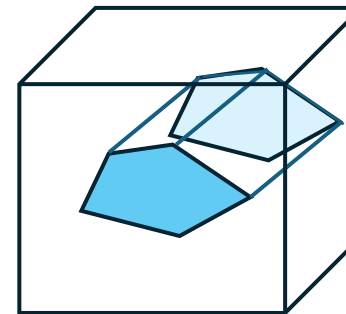
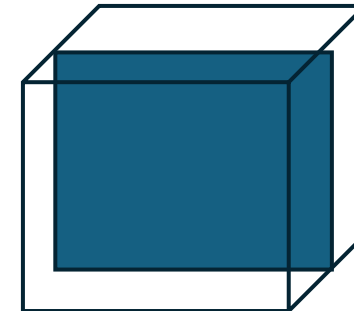
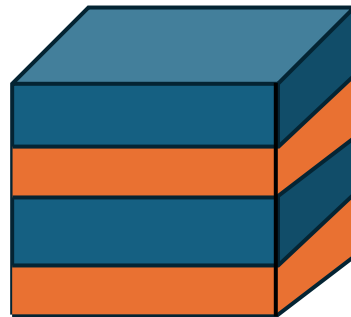
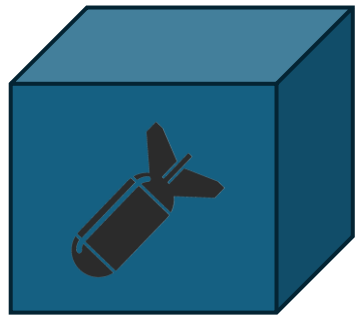
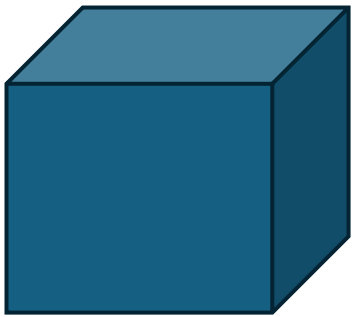


Modèle 3D

Debouny, 2019

Design et preparation : les hypotheses sous-jacentes

- En géophysique, il est **courant** de modéliser le sous-sol selon cinq grandes représentations



Design et preparation : modélisation préalable, les imponderables

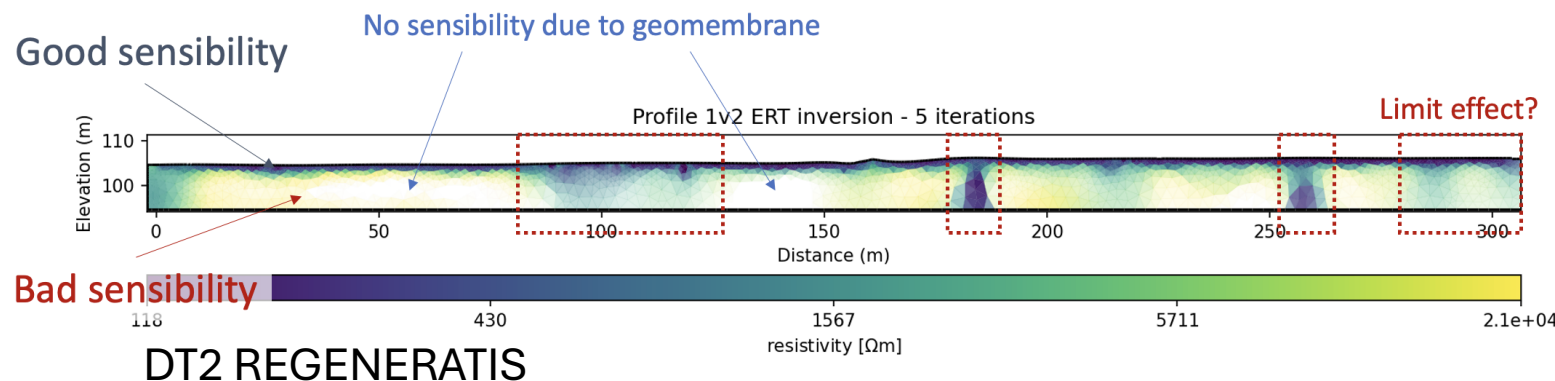
- **Bruit sur site**

Se poser la question de la robustesse

Test préalable

- **Structure non anticipée**

! Interprétation



<https://github.com/hadrienmichel/PROSPGEOP>

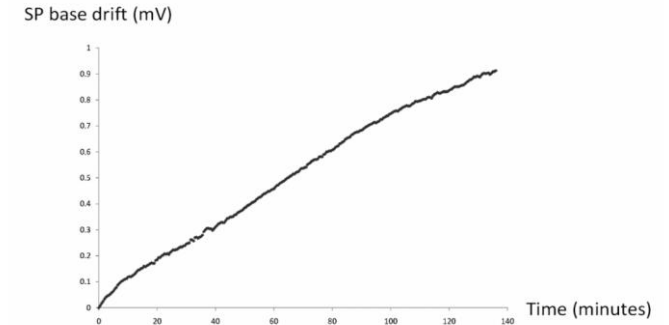
Approches de traitement des données : cartographie ou profil

- **Traitement “simple” et visualization**

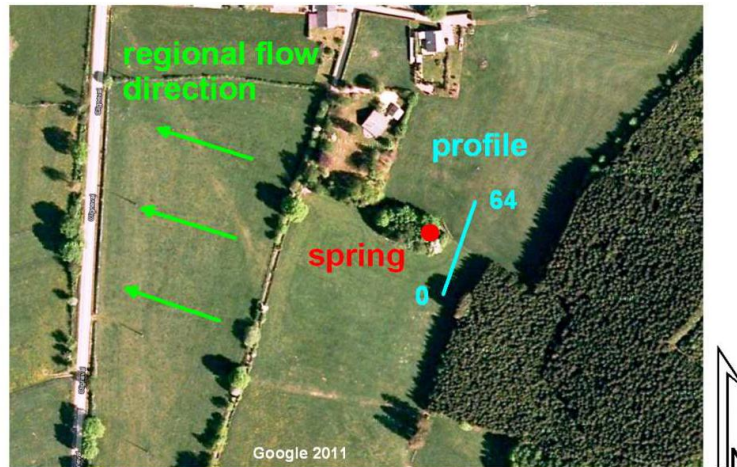
Enlever les outliers

Déterminer une tendance dans le temps et la corriger

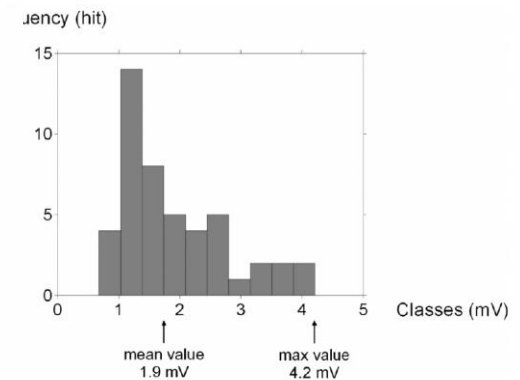
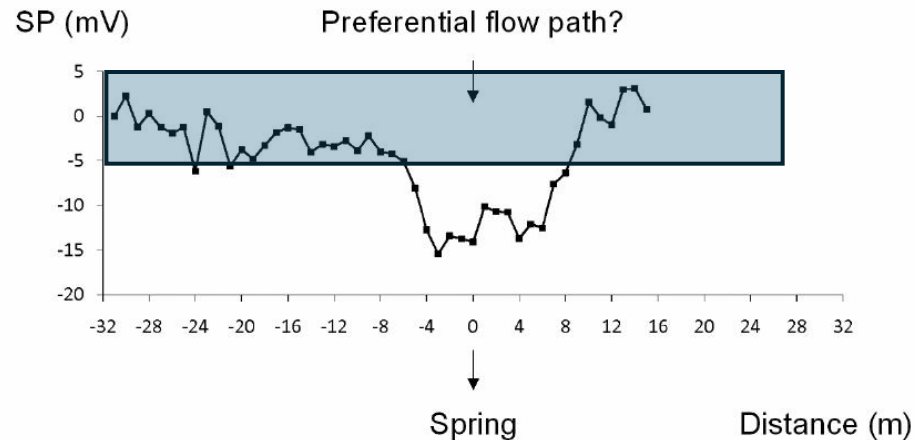
Estimer les incertitudes de mesure



...



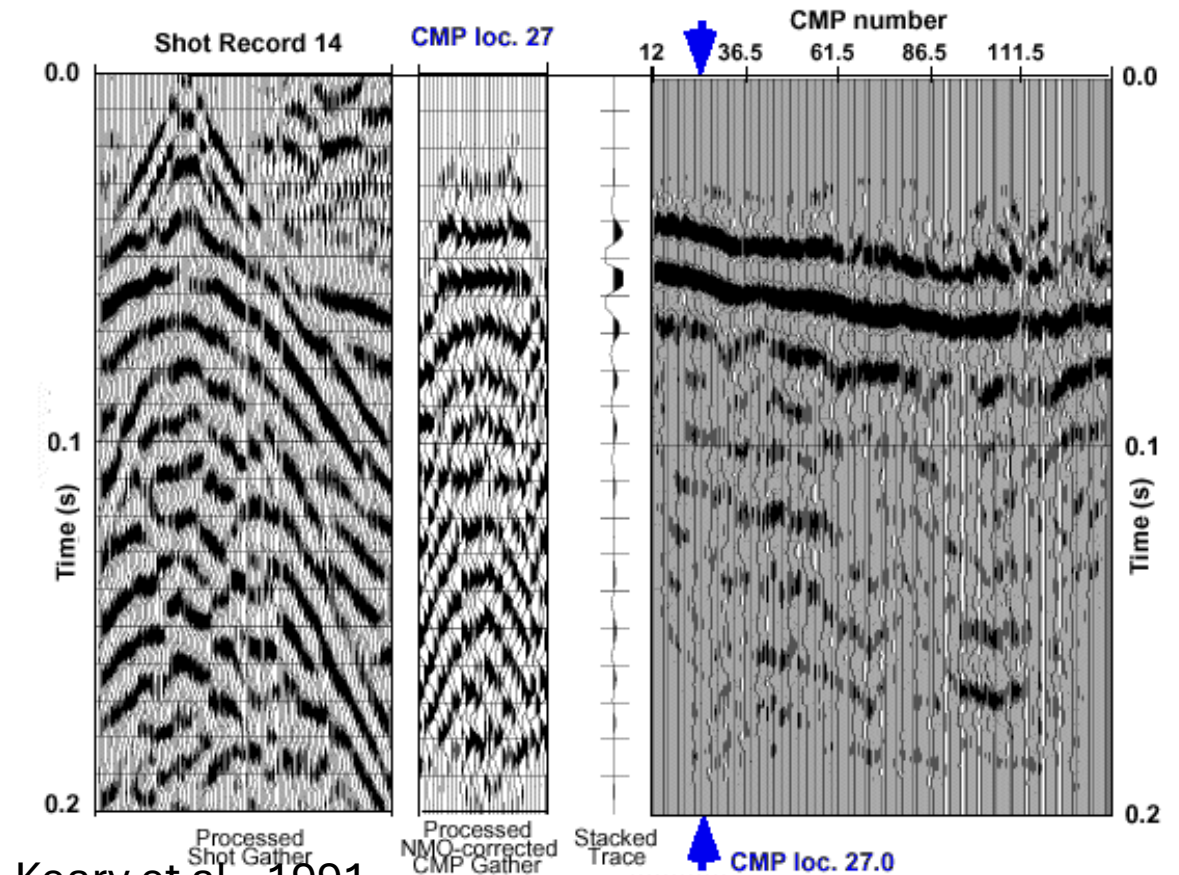
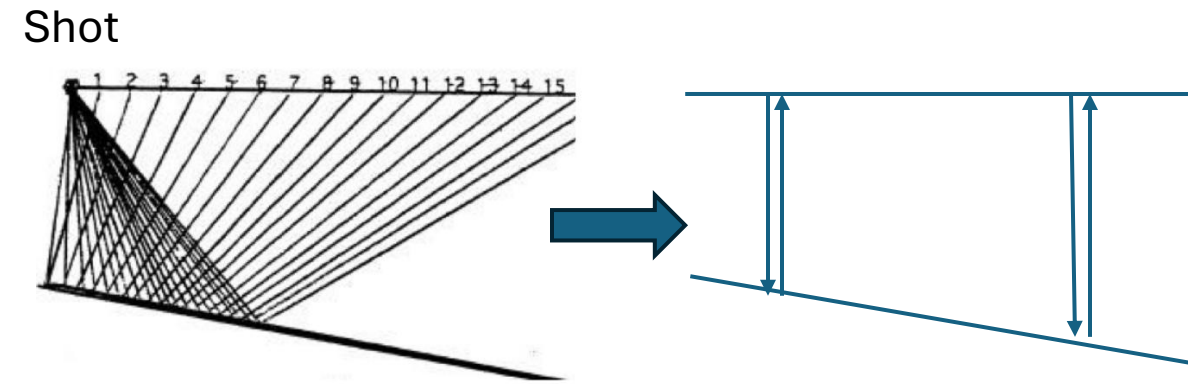
Robert, 2012



Approches de traitement des données : imagerie par réflexion

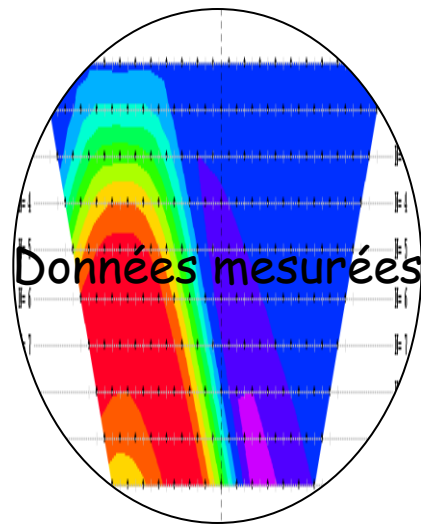
- **Succession de traitement**

dont l'objectif est d'obtenir une juxtaposition d'écho sismique comme si l'onde se propageait verticalement



Keary et al., 1991

Approches de traitement des données : problèmes inverses



Données = d

Problème inverse

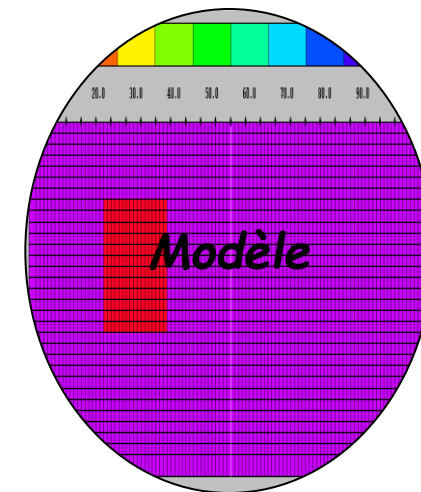


Image = m

Approches de traitement des données : problèmes inverses

- 1 Choisir un modèle de départ m_0 y compris la discrétisation du modèle
- 2 Calculer le Jacobien $J^k(m^k)$ à chaque itération k
- 3 Choisir une stratégie de régularisation \mathbf{L} et établir le choix du paramètre de régularisation $\lambda(k)$
- 4 Calculer la mise à jour du modèle $\Delta m^k(J^k, \lambda)$

$$\min ||g(\mathbf{m}) - \mathbf{d}||_2^2 + \lambda ||L\mathbf{m}||_2^2$$

$$\Delta m^k = (\mathbf{J}(\mathbf{m}^k)^T \mathbf{J}(\mathbf{m}^k) + \lambda^2 \mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{m}^k)^T \hat{\mathbf{d}}(\mathbf{m}^k)$$

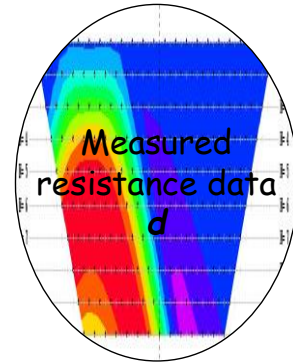
$$\text{avec } \hat{\mathbf{d}}(\mathbf{m}^k) = \mathbf{d} - \mathbf{g}(\mathbf{m}^k) + \mathbf{J}(\mathbf{m}^k)\mathbf{m}^k$$

- 5 Calculer le résidu sur les données pour $m^{k+1} = m^k + \Delta m^k$:
 $||d - g(m^{k+1})||_2$
- 6 Décider de l'arrêt ou de la poursuite de l'inversion itérative
- 7 Analyser le modèle obtenu et quantifier la résolution de l'image

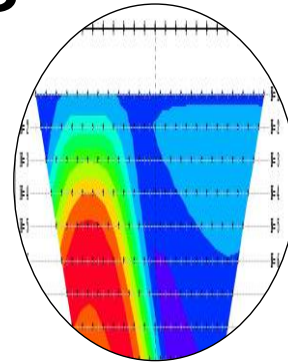
Approches de traitement des données : problèmes inverses

Reproduit-on les données ?

1. Data misfit



Acquisition of data



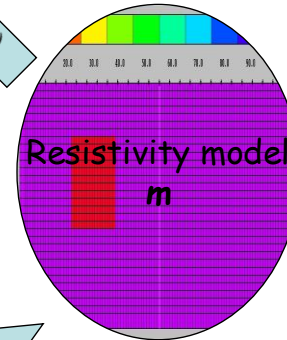
Forward problem

$$d = f(m)$$

Inverse problem

$$(J^T W^T W J + \lambda R^T R)^{-1} \Delta m = J W^T W (d - f(m)) - \lambda R^T R m$$

2. Model constraints



3. Image appraisal

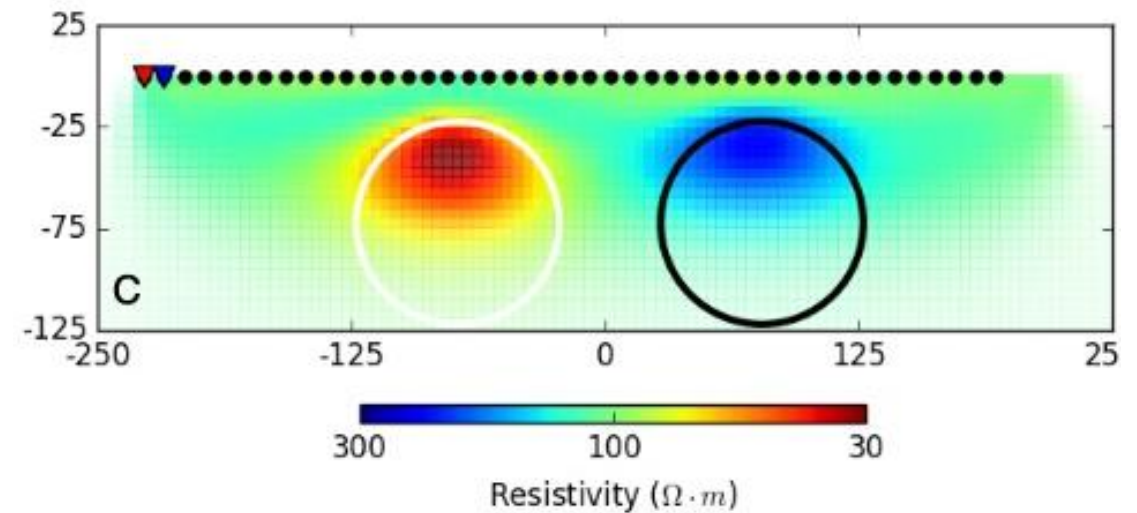
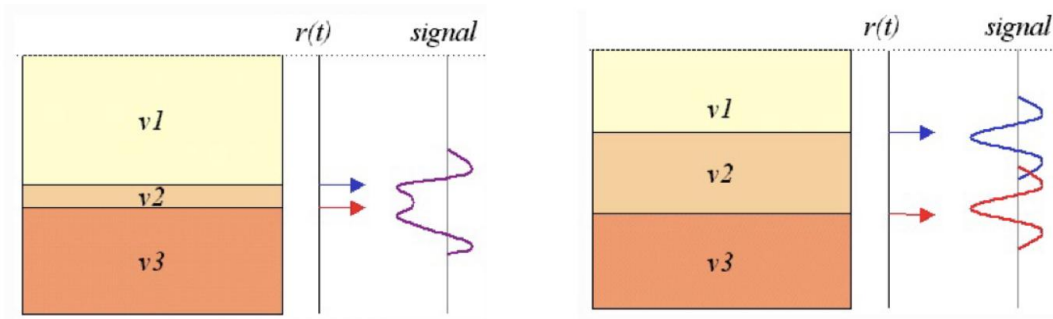


Comment avons nous représenté le sous-sol ?

Quelle resolution avons-nous ?

Interprétation: notion de résolution

- Imagerie par méthodes d'ondes : dépendant de la longueur d'ondes (entre autres)
- Imagerie par inversion de données : indicateur numérique



La transparence = la résolution

Interprétation: physique des roches/sediments ou pétrophysique

- Relier des propriétés d'intérêt aux propriétés géophysiques

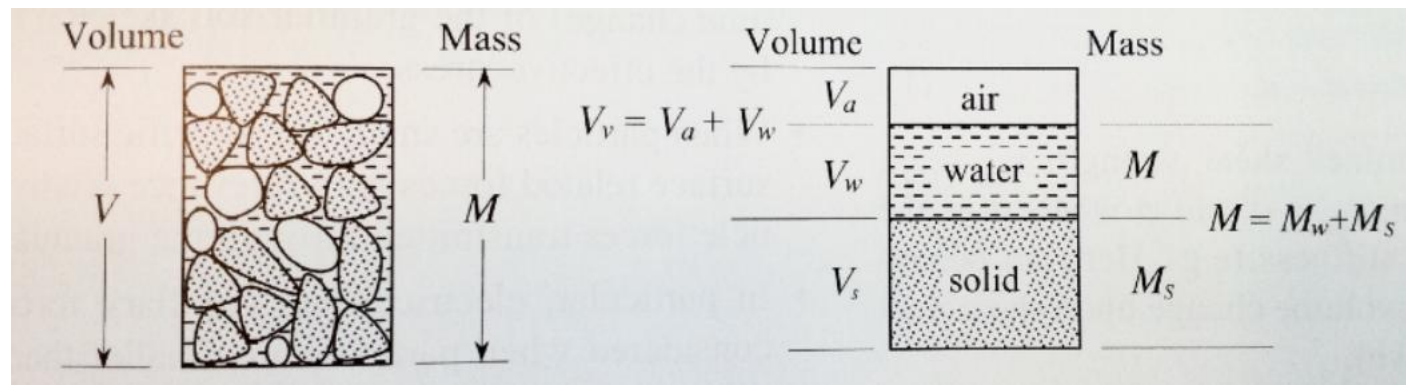
Densité d'un volume de roche

porosité

Densité de l'eau

$$\rho = (1 - \phi)\rho_m + \phi \times \rho_w$$

Densité moyennes des grains



Take home message et attentes

- Géophysique outil puissant pour imager le sous-sol
- Une image = un traitement avancé de données + modélisation
- Développements nécessaires pour rendre la géophysique plus “routinière” en géotechnique ?
- Envisager la géophysique dès les phases initiales d'un projet
- Le dialogue géophysicien/géotechnicien est essentiel
- Une interprétation bien informée est nécessaire