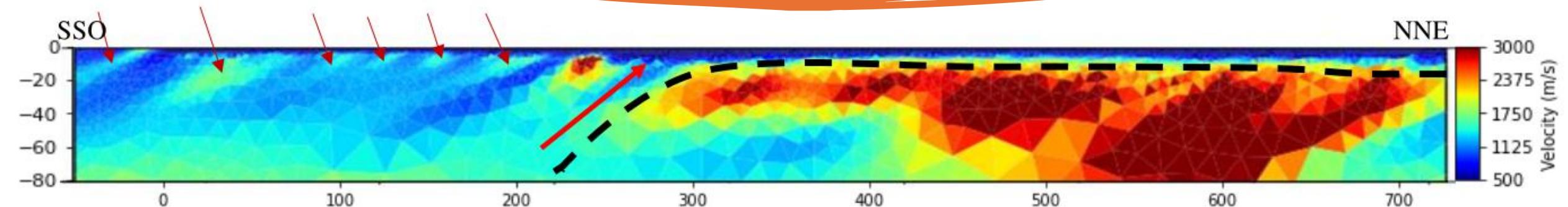


Introduction aux méthodes géophysiques

La géophysique au service de la géotechnique



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

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur
et de Mécanique des Roches





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 ?

Gravimétrie

Magnétisme

Méthodes Electriques

Méthodes Electromagnétiques

Méthodes Sismiques

Méthodes Radiométriques



Méthodes de potentiel

Propagation d'ondes

Radioactivité

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

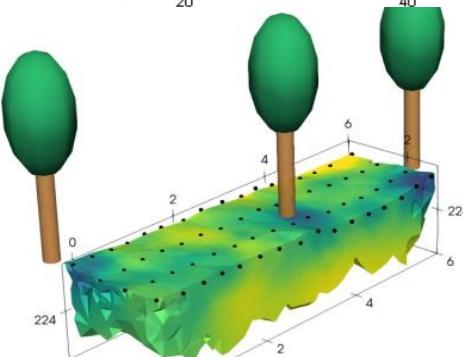
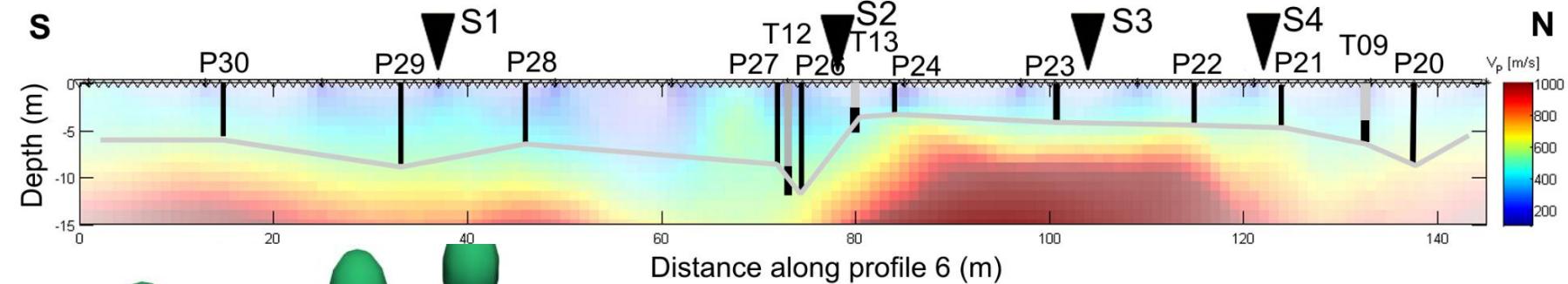
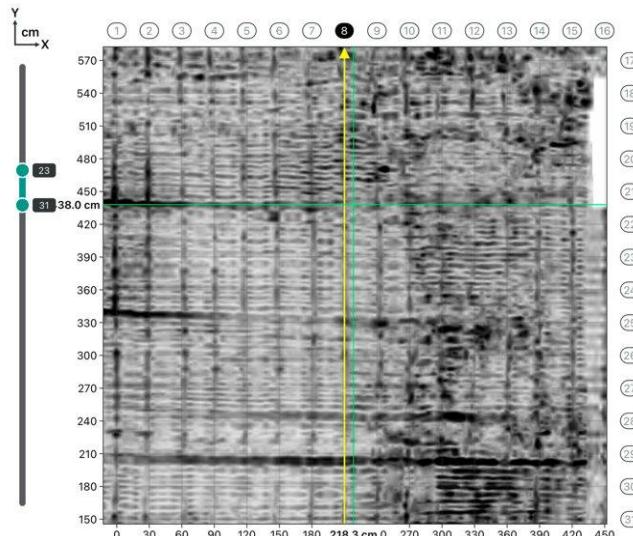
Mesures localisées,
échantillonnage direct

Support d'information plus petit
Extension spatiale limitée

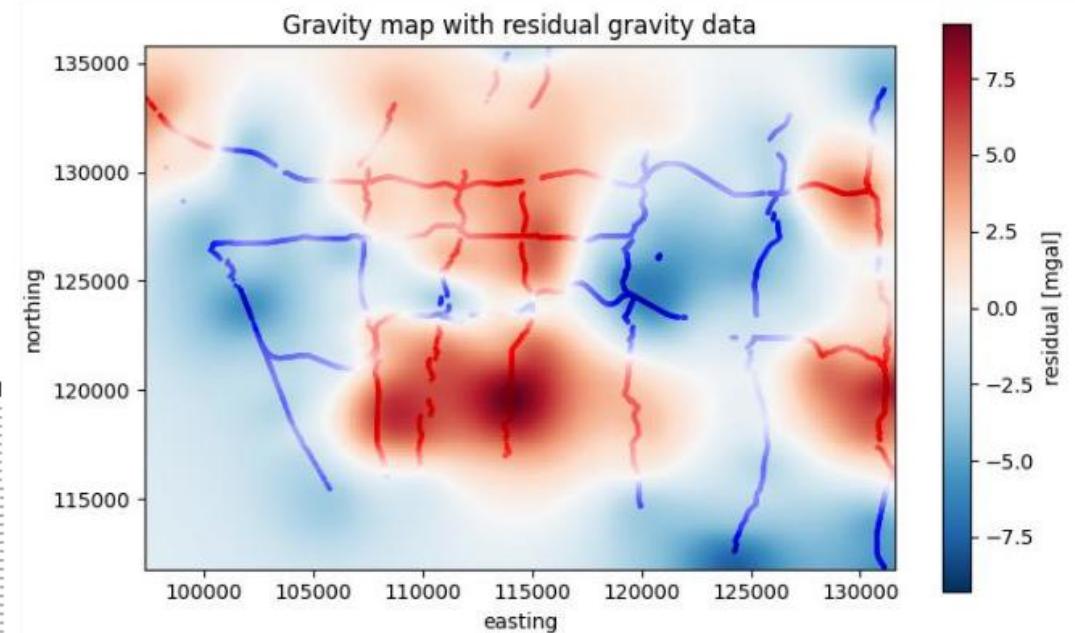
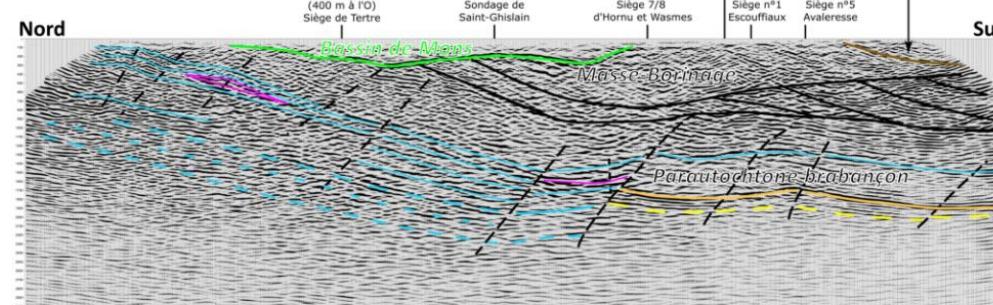
→ caractérisation géomécanique

dimensionnement, stabilité...

Quelles Echelles ?



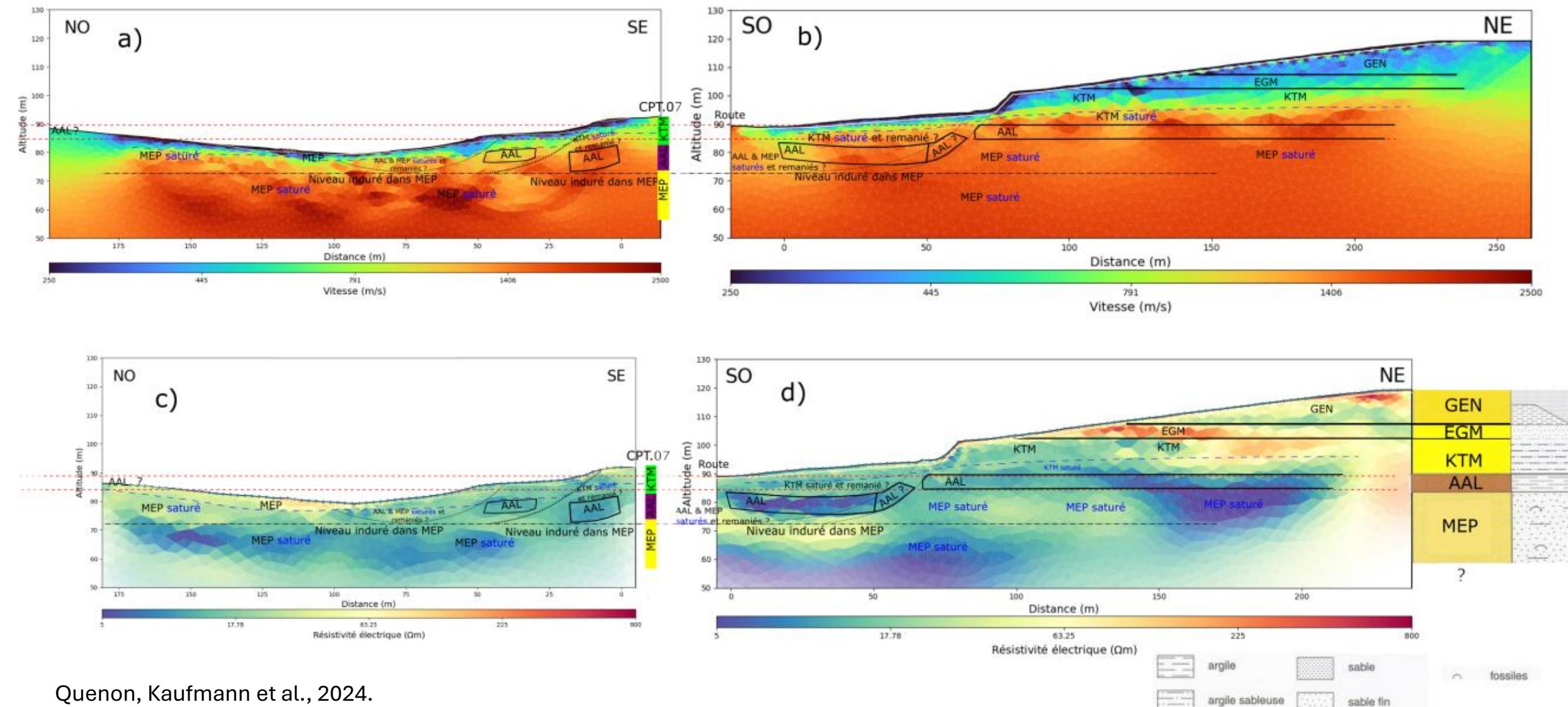
$x, y :$
m à 100 km
dm à 5 km



Pour répondre à quelles questions?

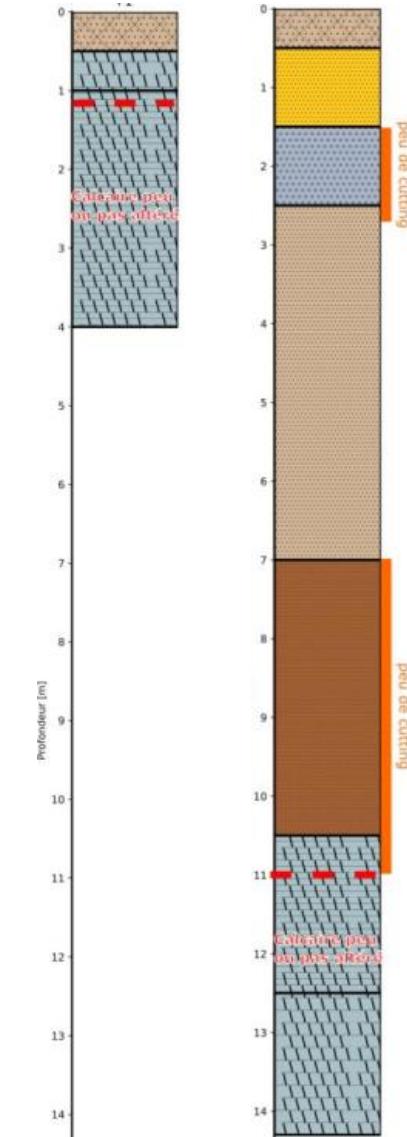
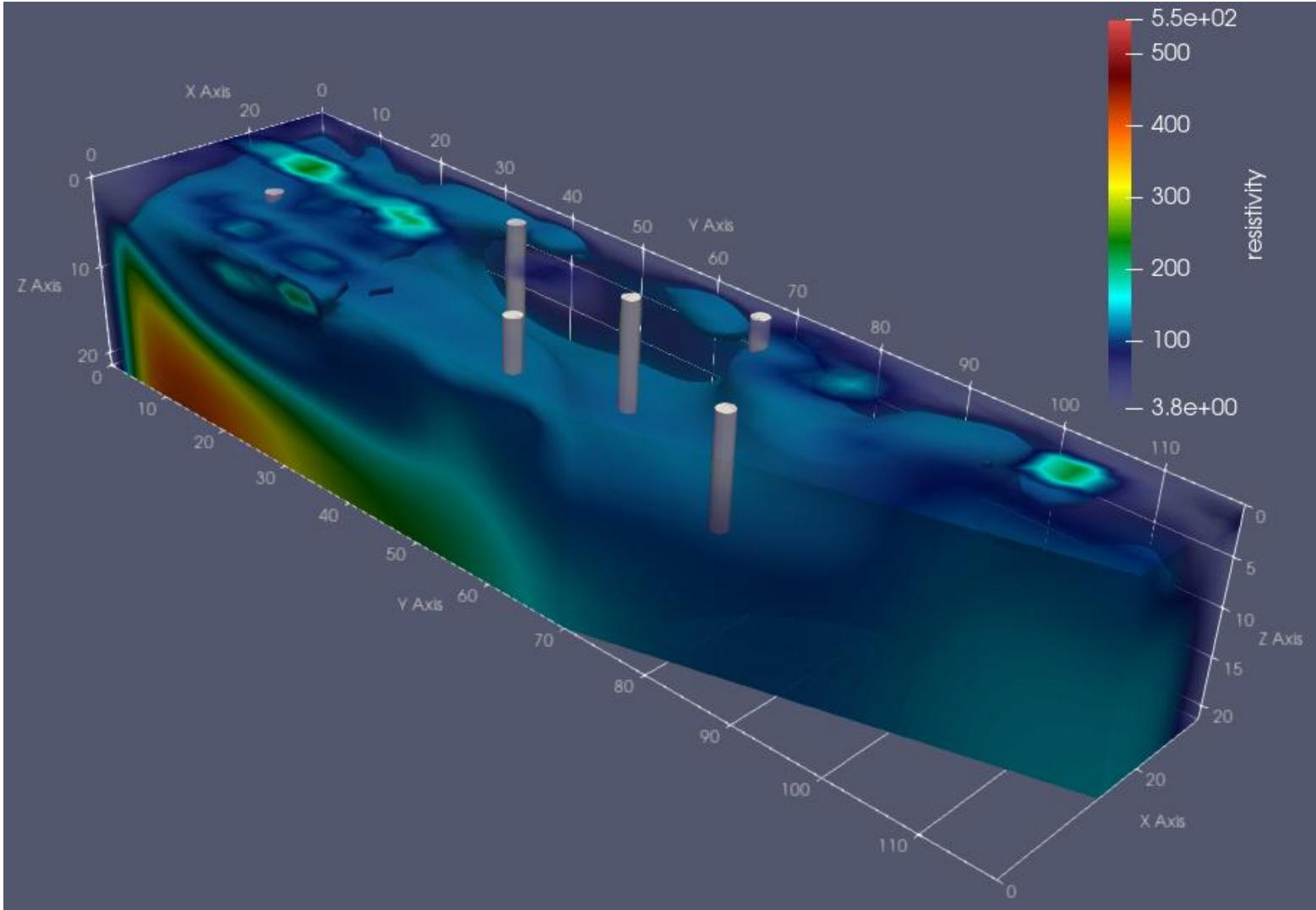
- **Terrassement & fondations (bâtiments, linéaires...)**
Profondeur et qualité du rocher, profondeur de la nappe phréatique, cavités...
- **Stabilité des talus et pentes, ouvrages de soutènement**
Nappe(s), surfaces de glissement, structure de glissements de terrain...
- **Ouvrages fluviaux, digues 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.

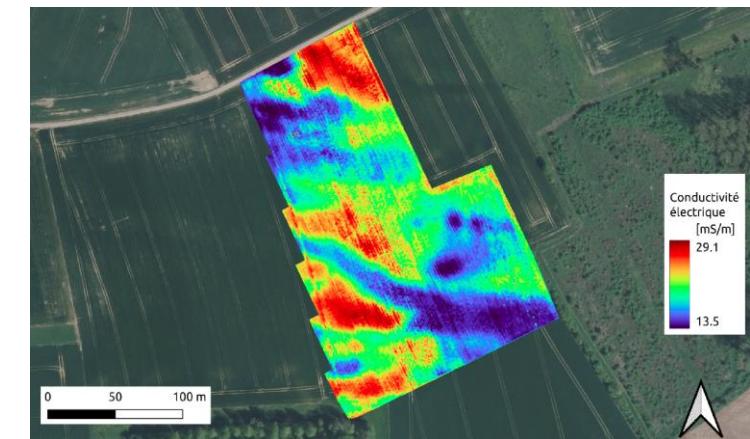
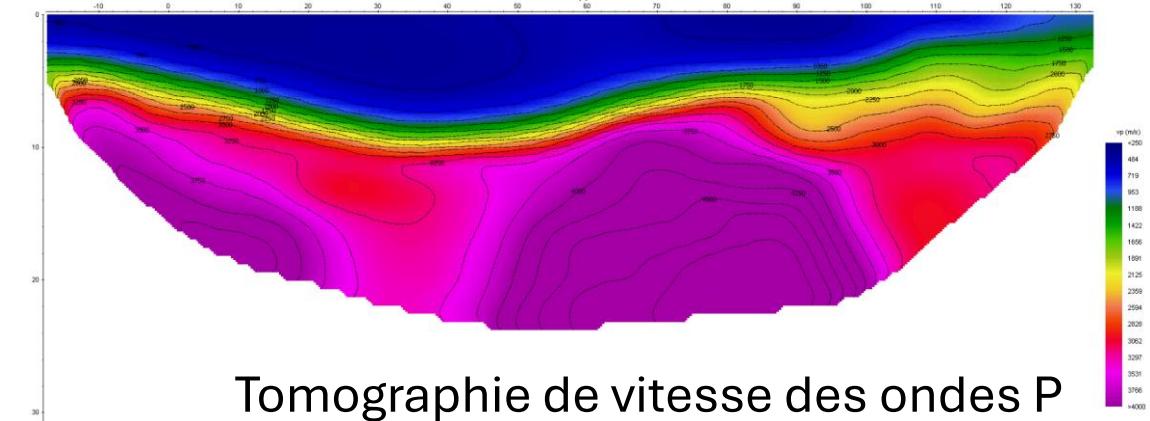
Exemple : Fondation sur pieux forés



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...

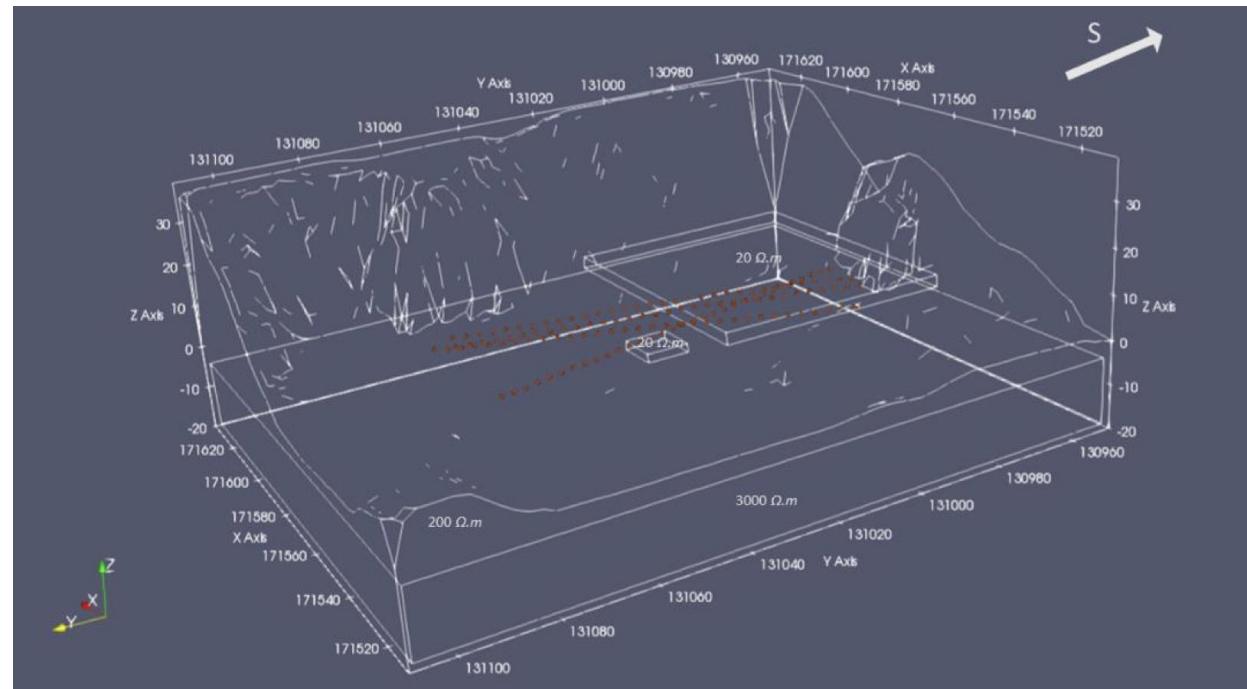
Design et préparation : modélisation préalable

- **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)



Design et préparation : modélisation préalable

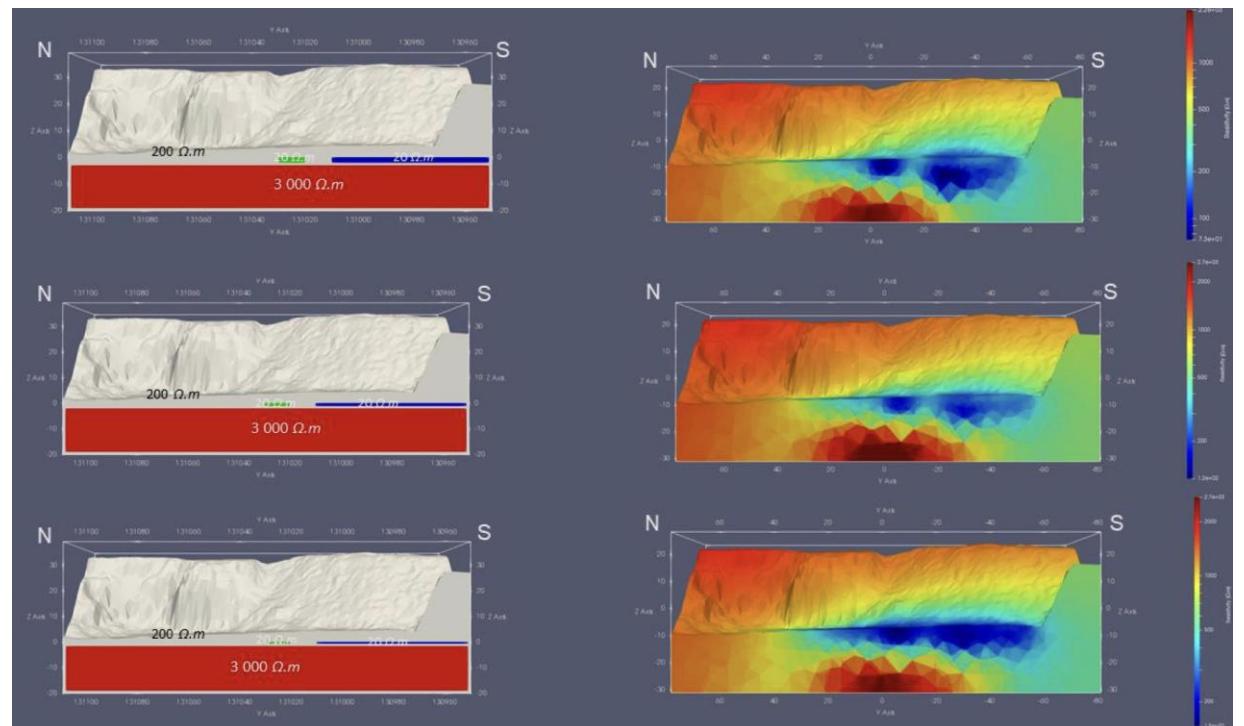
- **Modèle conceptuel**

Etape souvent négligée

Permet de tester une série d'hypothèses

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

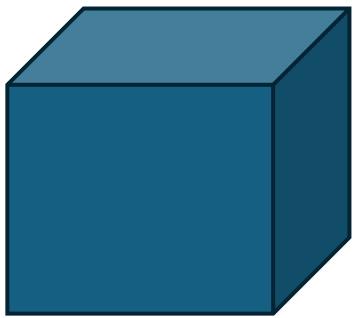
Permet d'aller jusqu'à l'imagerie (jumeau numérique)



Debouny, 2019

Design et préparation : les hypothèses sous-jacentes

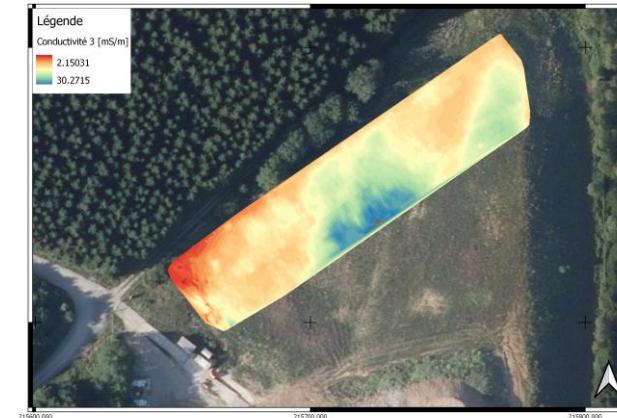
- En géophysique, il est courant de modéliser le sous-sol selon cinq grandes représentations



Demi-espace homogène



Ex: conductivimètre



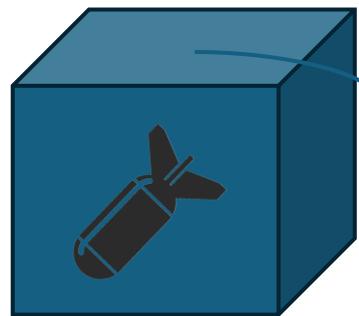
Ex: carte de conductivité **apparente**

Design et préparation : les hypothèses sous-jacentes

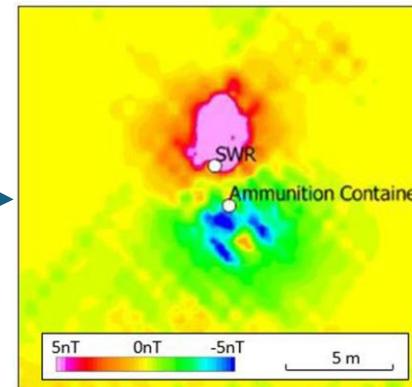
- En géophysique, il est courant de modéliser le sous-sol selon cinq grandes représentations



= dipole



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>

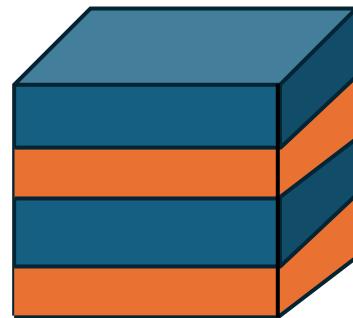
The content of this slide may be subject to copyright: please see the slide notes for details.

Design et préparation : les hypothèses sous-jacentes

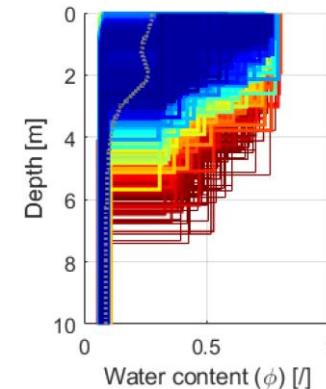
- En géophysique, il est courant de modéliser le sous-sol selon cinq grandes représentations



Ellen, 2018



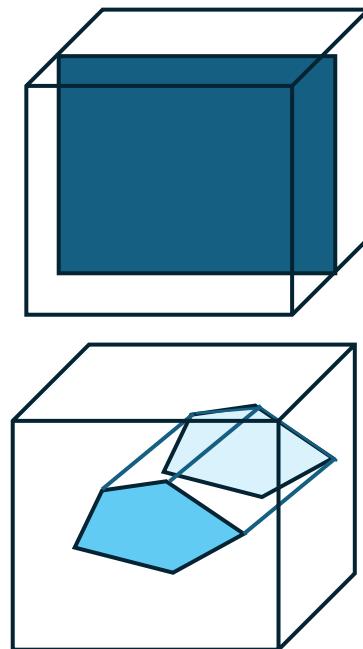
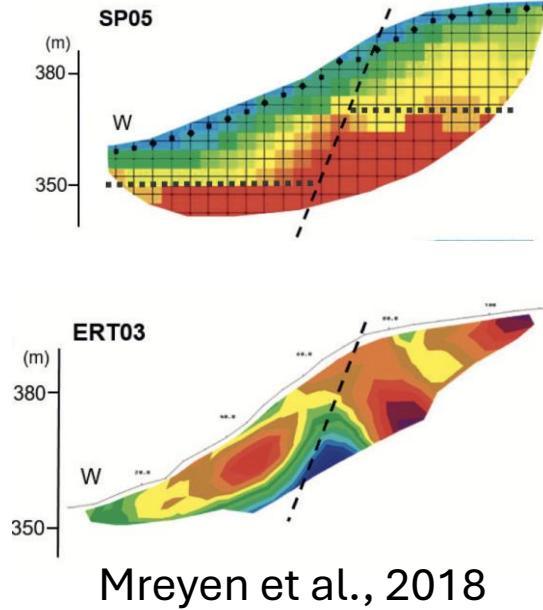
Modèle 1D



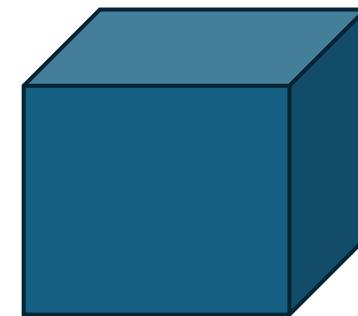
Michel et al., 2020

Design et préparation : les hypothèses sous-jacentes

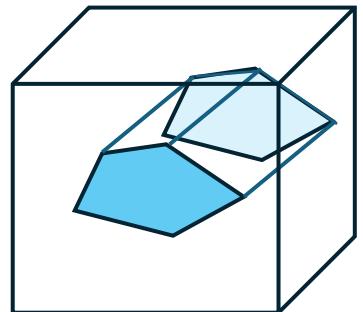
- En géophysique, il est courant de modéliser le sous-sol selon cinq grandes représentations



Modèle 2D



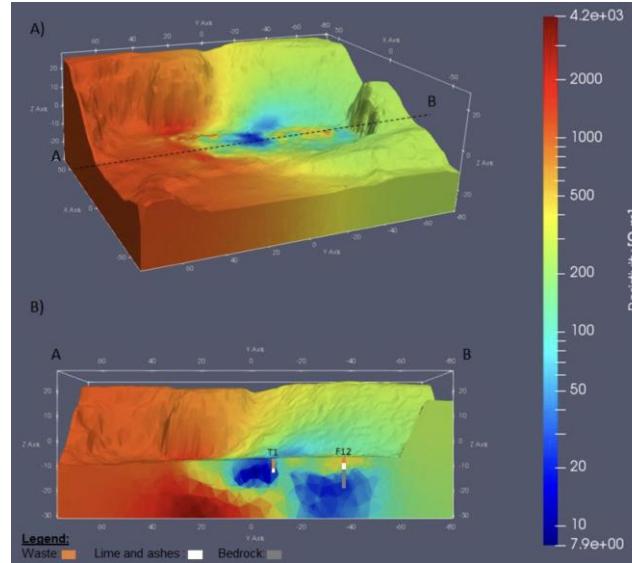
Modèle 2D



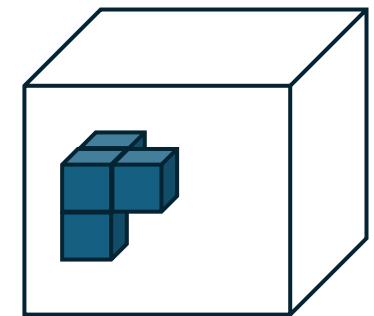
Modèle 2.5D

Design et préparation : les hypothèses sous-jacentes

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



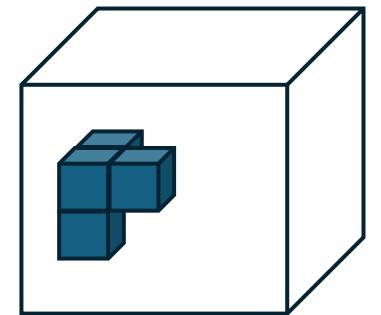
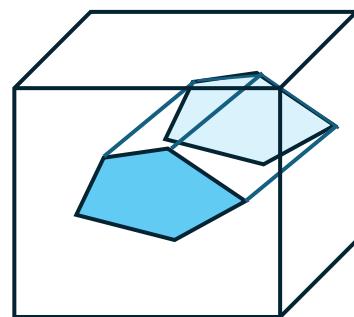
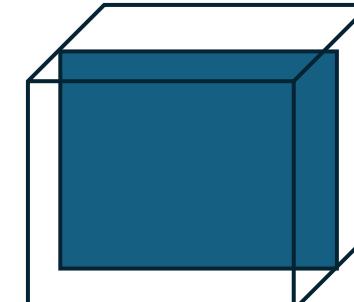
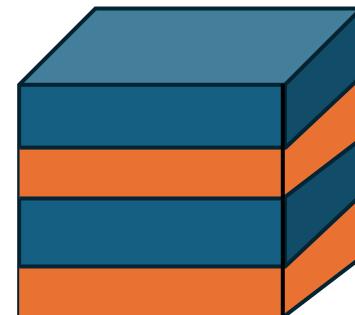
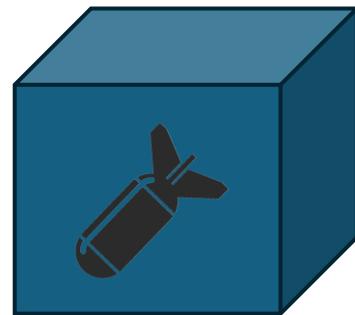
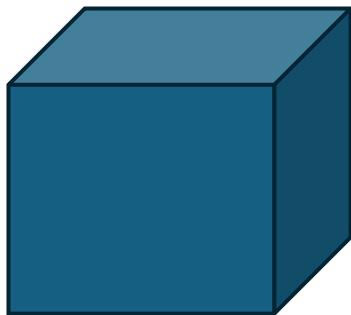
Debouny, 2019



Modèle 3D

Design et préparation : les hypothèses sous-jacentes

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



Design et préparation : modélisation préalable, les impondérables

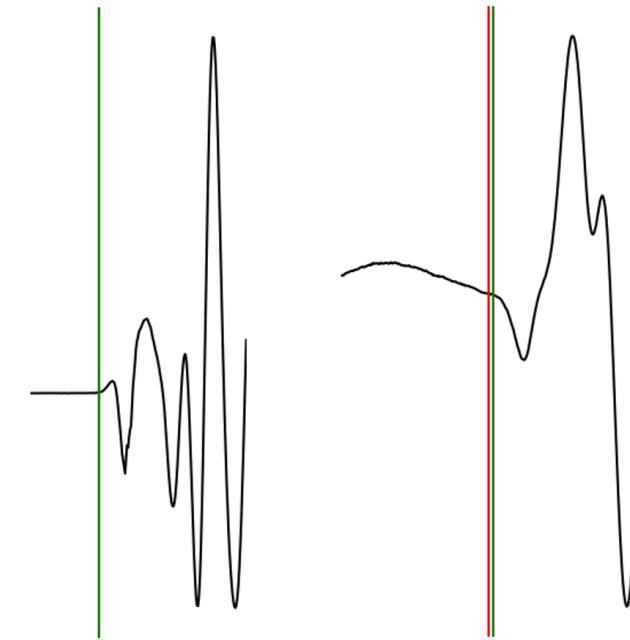
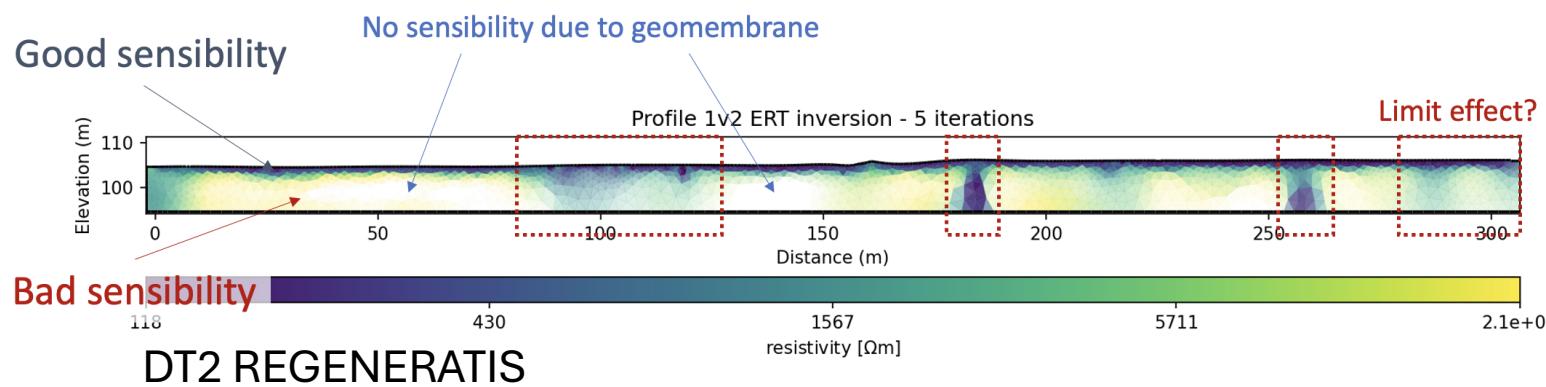
- **Bruit sur site**

Se poser la question de la robustesse

Test préalable

- **Structure non anticipée**

! Interprétation



ère arrivée distincte

Première arrivée difficile à distinguer

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

Approches de traitement des données : cartographie ou profil

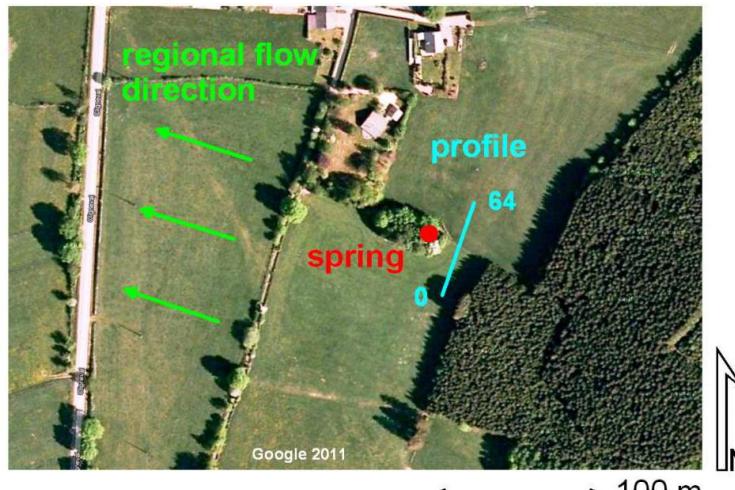
- **Traitement “simple” et visualization**

Enlever les outliers

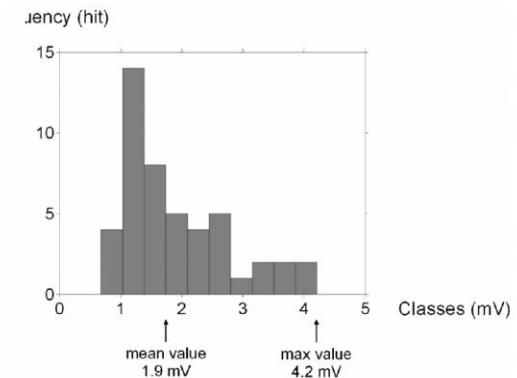
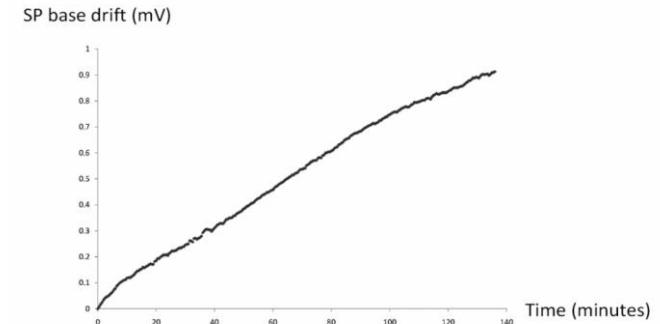
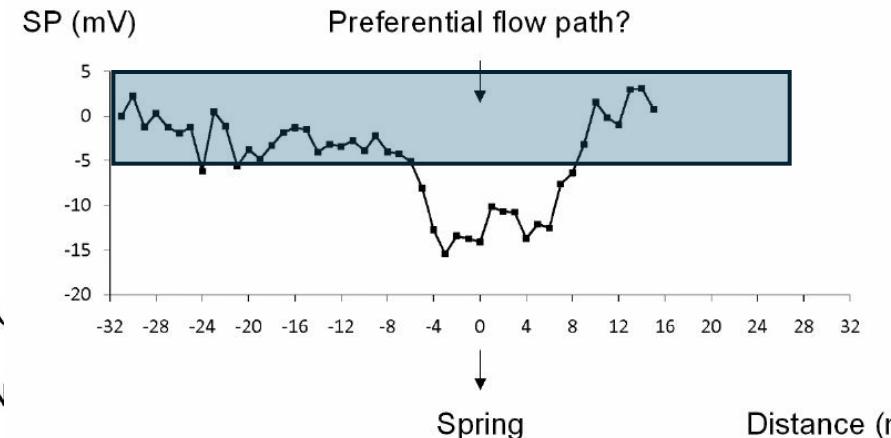
Déterminer une tendance dans le temps et la corriger

Estimer les incertitudes de mesure

...



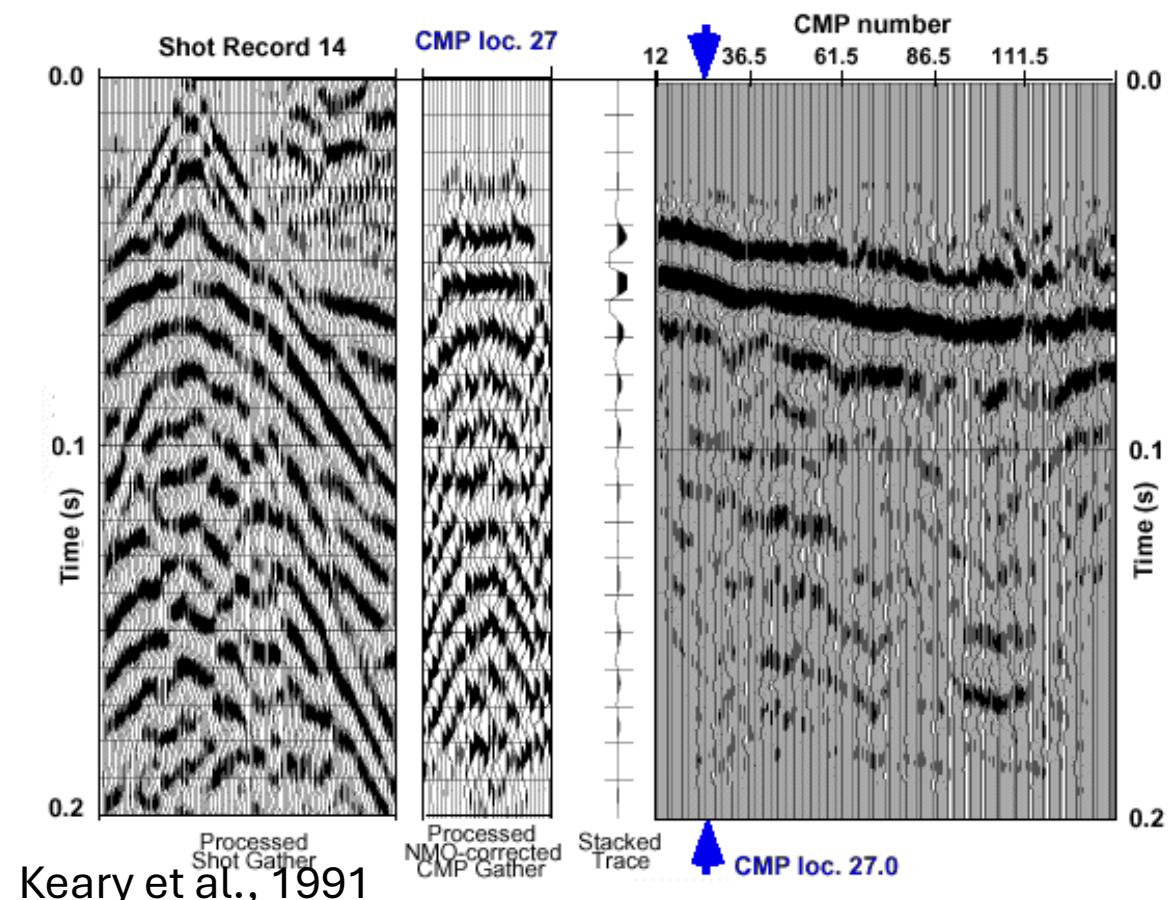
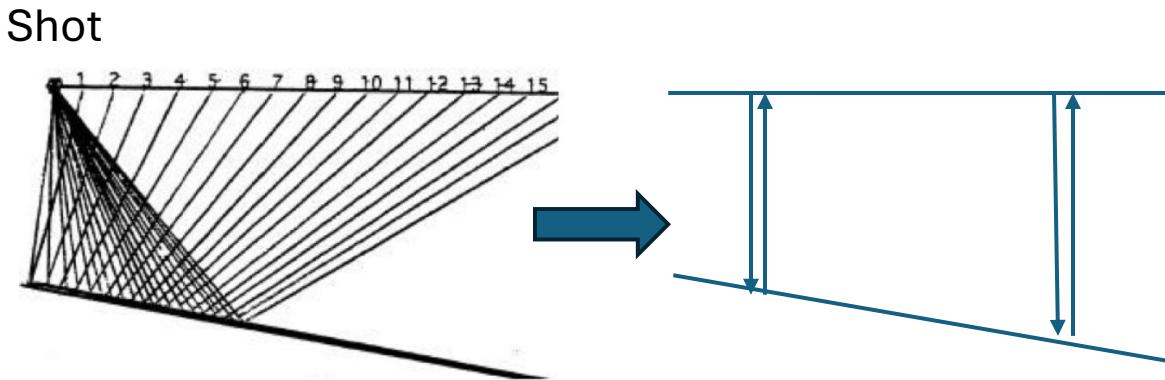
Robert, 2012



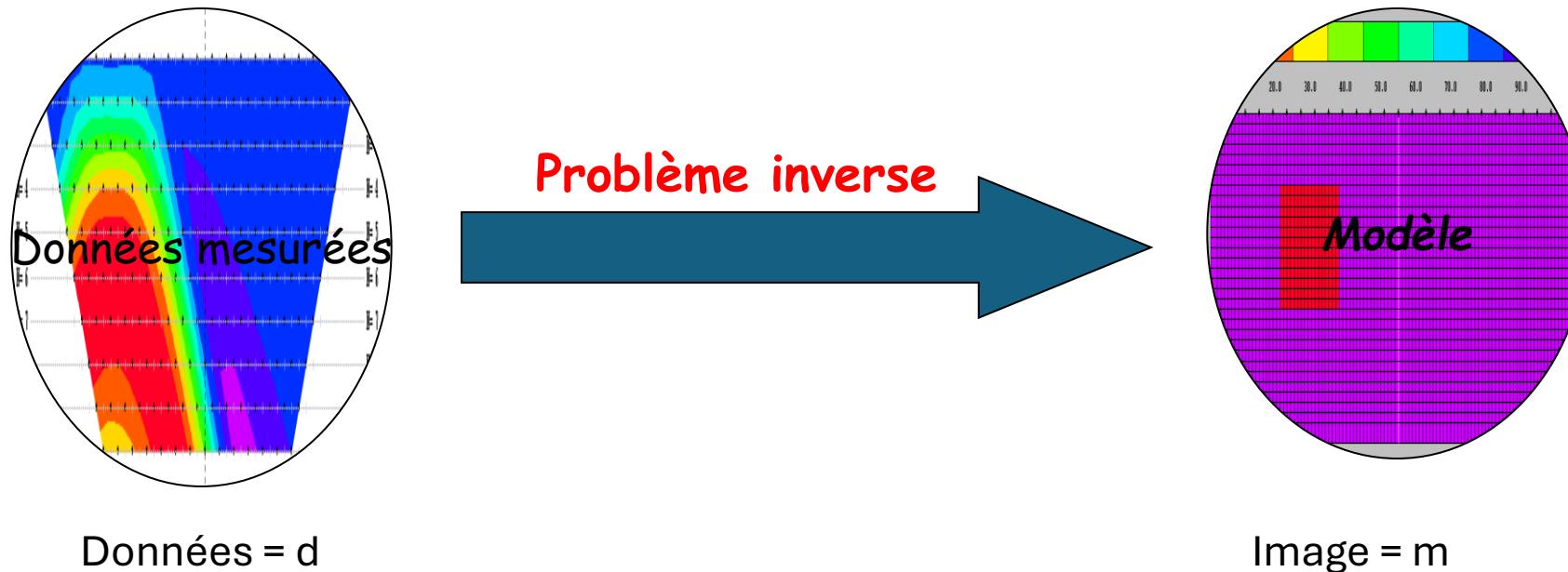
Approches de traitement des données : imagerie par réflexion

- **Succession de traitement**

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



Approches de traitement des données : problèmes inverses



Approches de traitement des données : problèmes inverses

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

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

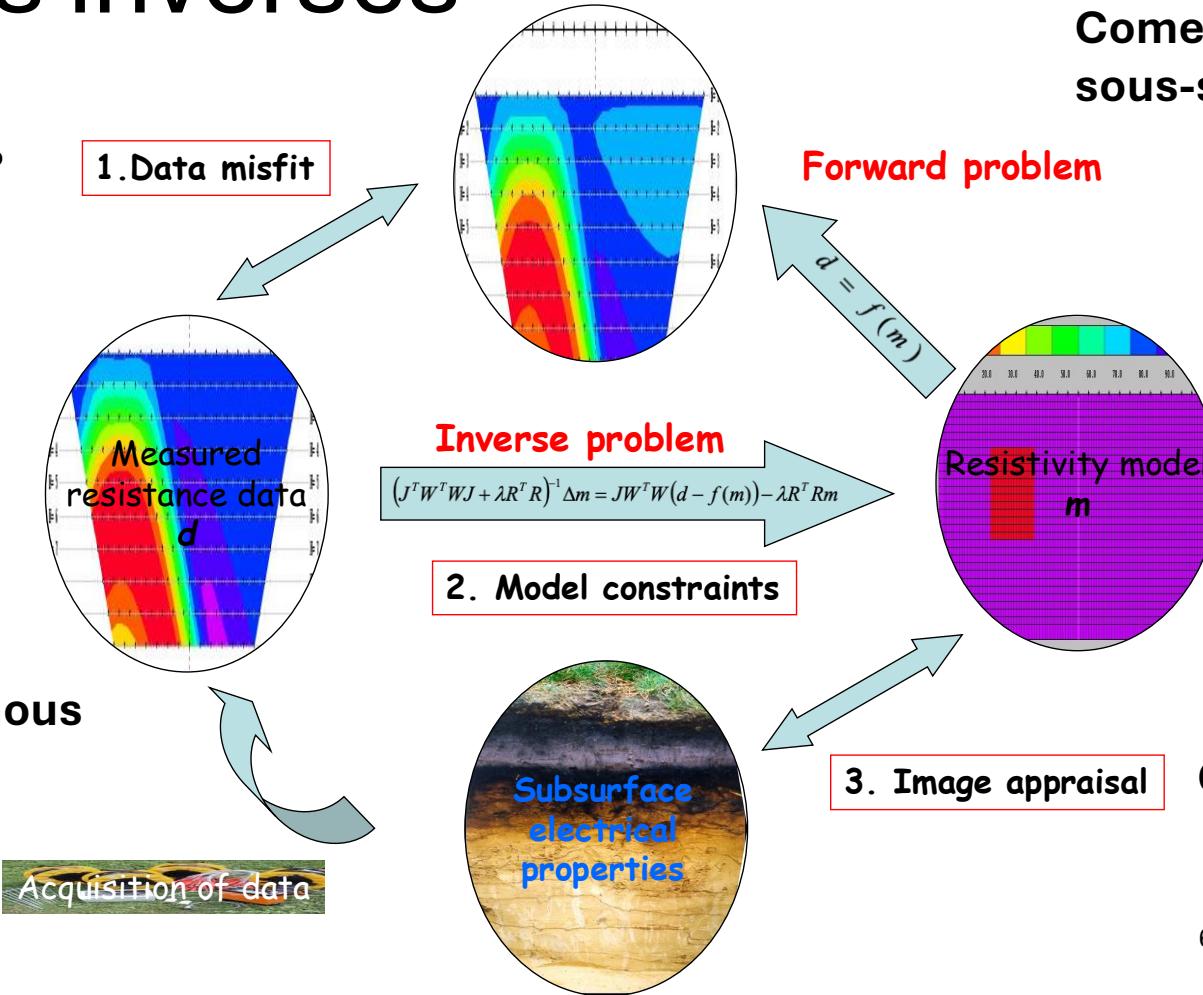
$$\Delta m^k = (\mathbf{J}(\mathbf{m}^k)^T \mathbf{J}(\mathbf{m}^k) + \lambda^2 \mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{m}^k)^T \hat{\mathbf{d}}(\mathbf{m}^k)$$

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

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

Approches de traitement des données : problèmes inverses

Reproduit-on les données ?



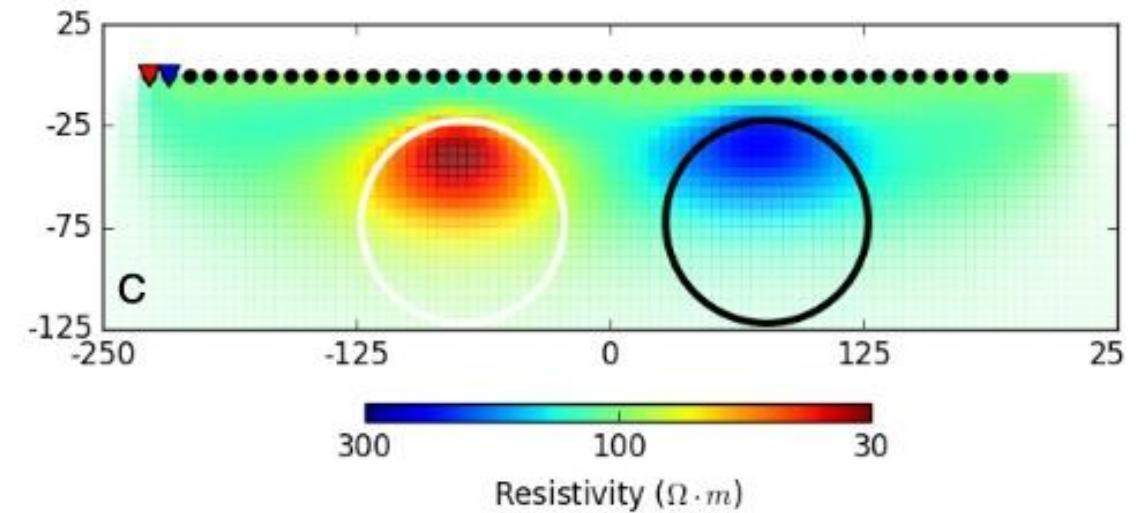
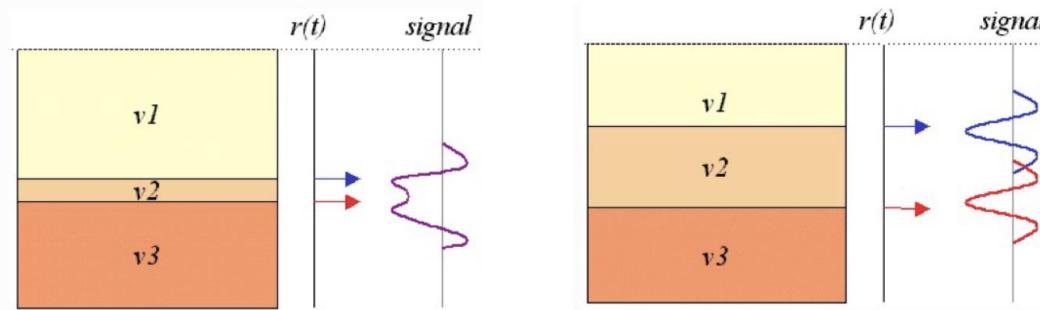
Comment avons nous représenté le sous-sol ?

Quelles informations avons-nous intégrées ?

Quelle résolution 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/sédiments ou pétrophysique

- Relier des propriétés d'intérêt aux propriétés géophysiques

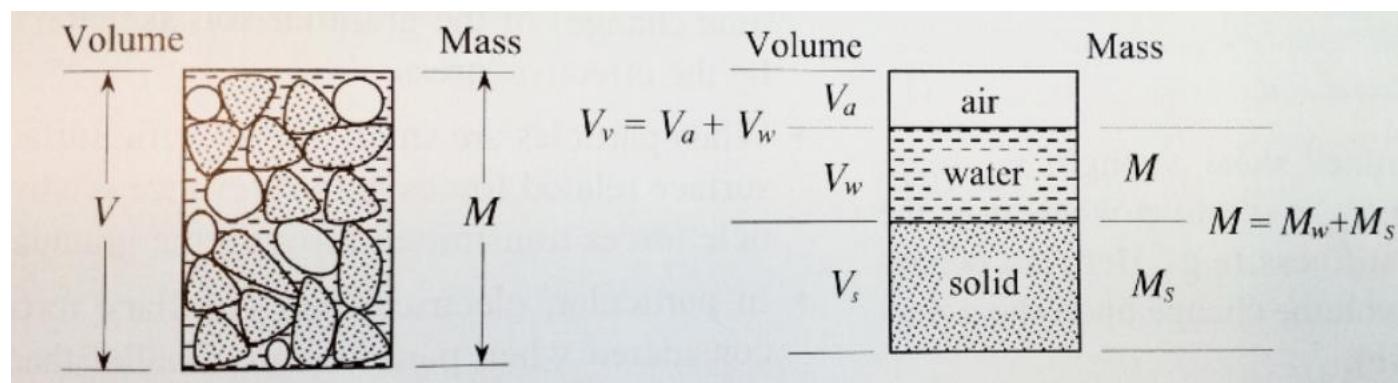
Densité d'un volume de roche

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