GLQ3205
Géophysique appliquée 2

Méthodes Électriques: Polarisation provoquée

Ahmed Mhenni
ahmed.mhenni@polymtl.ca

Été 2025

Plan du cours

1. Les causes de la polarisation
2. Modélisation de l’effet PP
3. Mesures de l’effet PP
4. Études de cas

Les causes de la polarisation provoquée

Polarisation spontanée et mesures DC

Le potentiel spontané est causé par:

- Les potentiels électrocinétiques
- Les potentiels électrochimiques
- Les potentiels de minéralisation
- Le potentiel bioélectrique
- Les potentiels telluriques

Il peut atteindre 100 mV facilement et est variable dans l'espace.

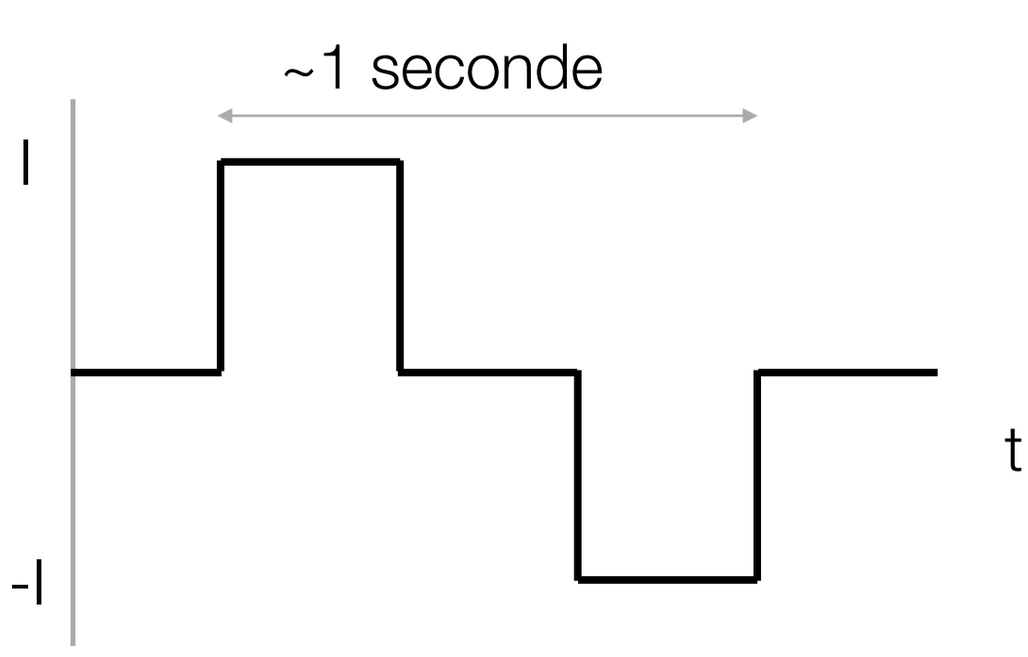
Erreur variable sur les tensions mesurées!

$$\rho_a = K \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$$

Erreurs variables sur les résistivités apparentes!

Polarisation spontanée et mesures DC

Pour corriger les erreurs dues à la PS, on n'utilise pas un vrai signal DC mais un signal carré de polarisation alternée:



Erreur variable sur les tensions mesurées!

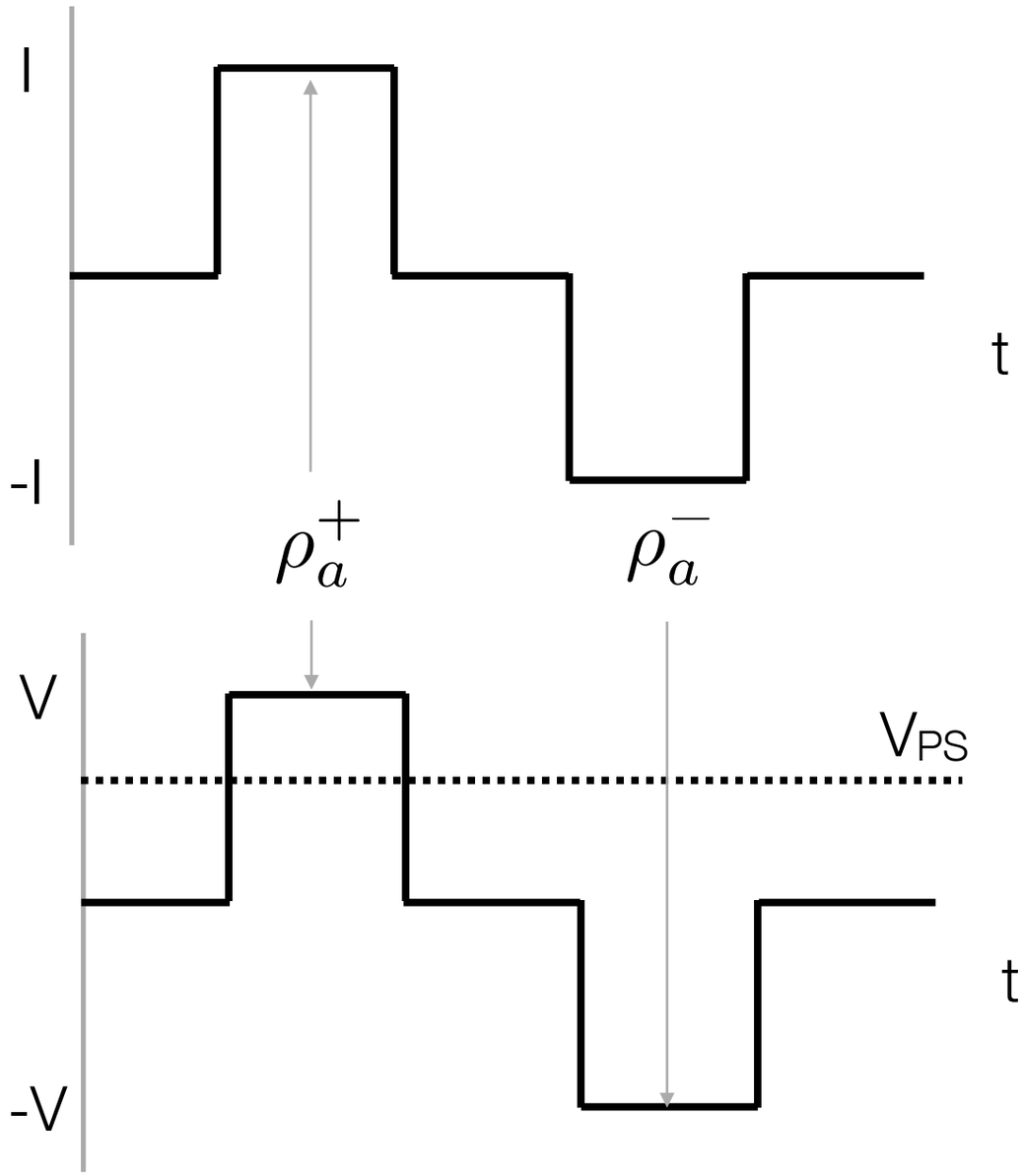
$$\rho_a = K \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$$

Erreurs variables sur les résistivités apparentes!

Polarisation spontanée et mesures DC

Pour corriger les erreurs dues à la PS, on n'utilise pas un vrai signal DC mais un signal carré de polarisation alternée:

$$
\begin{aligned}
\rho_a &= \frac{\rho_a^+ + \rho_a^-}{2} \\
&= \frac{K(\Delta V + V_{PS})}{2I} + \frac{K(-\Delta V + V_{PS})}{-2I} \\
&= \frac{K\Delta V}{I} + \frac{K(V_{PS})}{2I} - \frac{K(V_{PS})}{2I} \\
&= \frac{K\Delta V}{I}
\end{aligned}
$$



Polarisation spontanée et mesures DC

Pour corriger les erreurs dues à la PS, on n'utilise pas un vrai signal DC mais un signal carré de polarisés alternée:

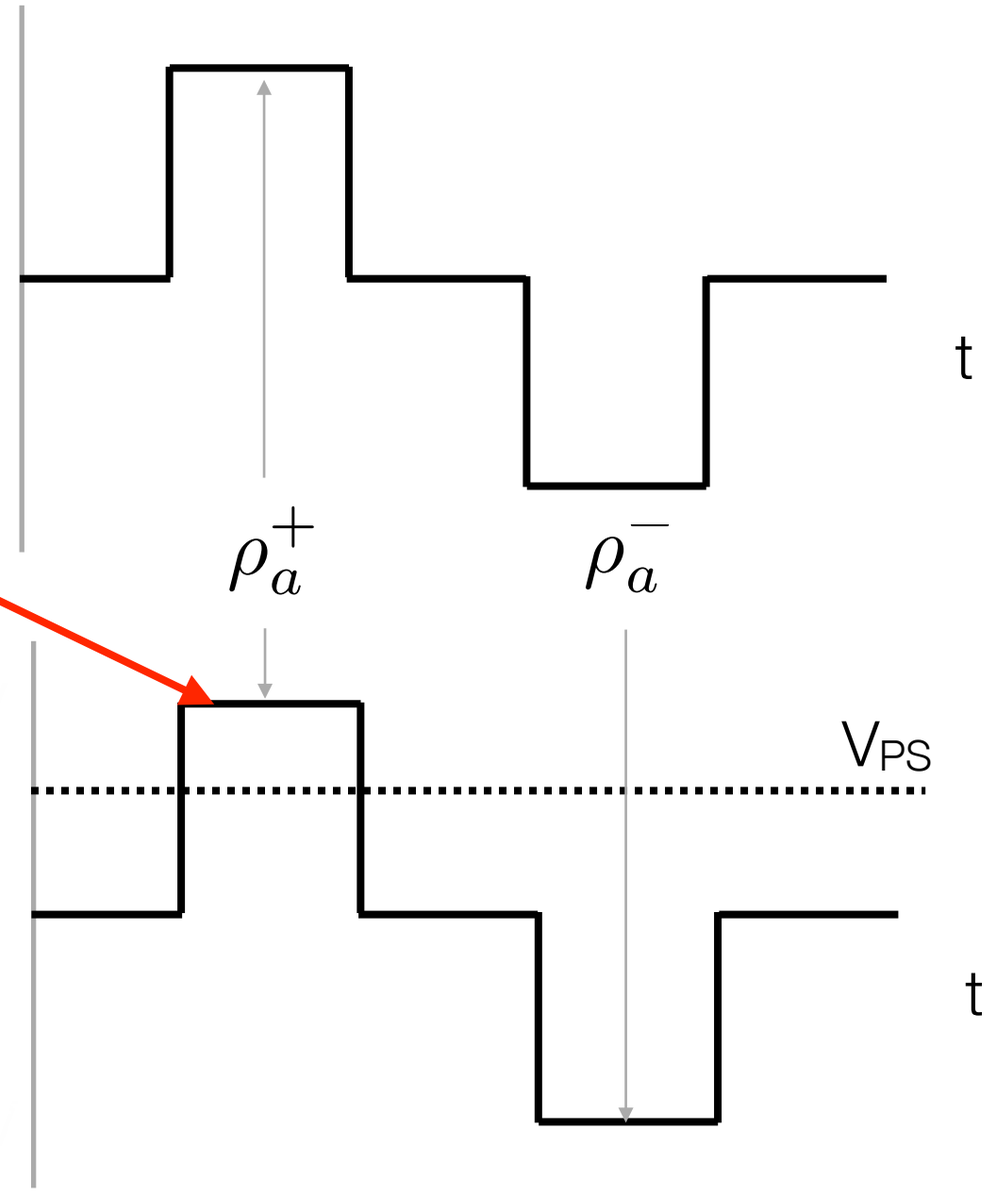
$$\rho_a = \frac{\rho_a^+ + \rho_a^-}{2}$$

$$= \frac{K(\Delta V + V_{PS})}{2I} + \frac{K(-\Delta V + V_{PS})}{-2I}$$

$$= \frac{K\Delta V}{I} + \frac{K(V_{PS})}{2I} - \frac{K(V_{PS})}{2I}$$

$$= \frac{K\Delta V}{I}$$

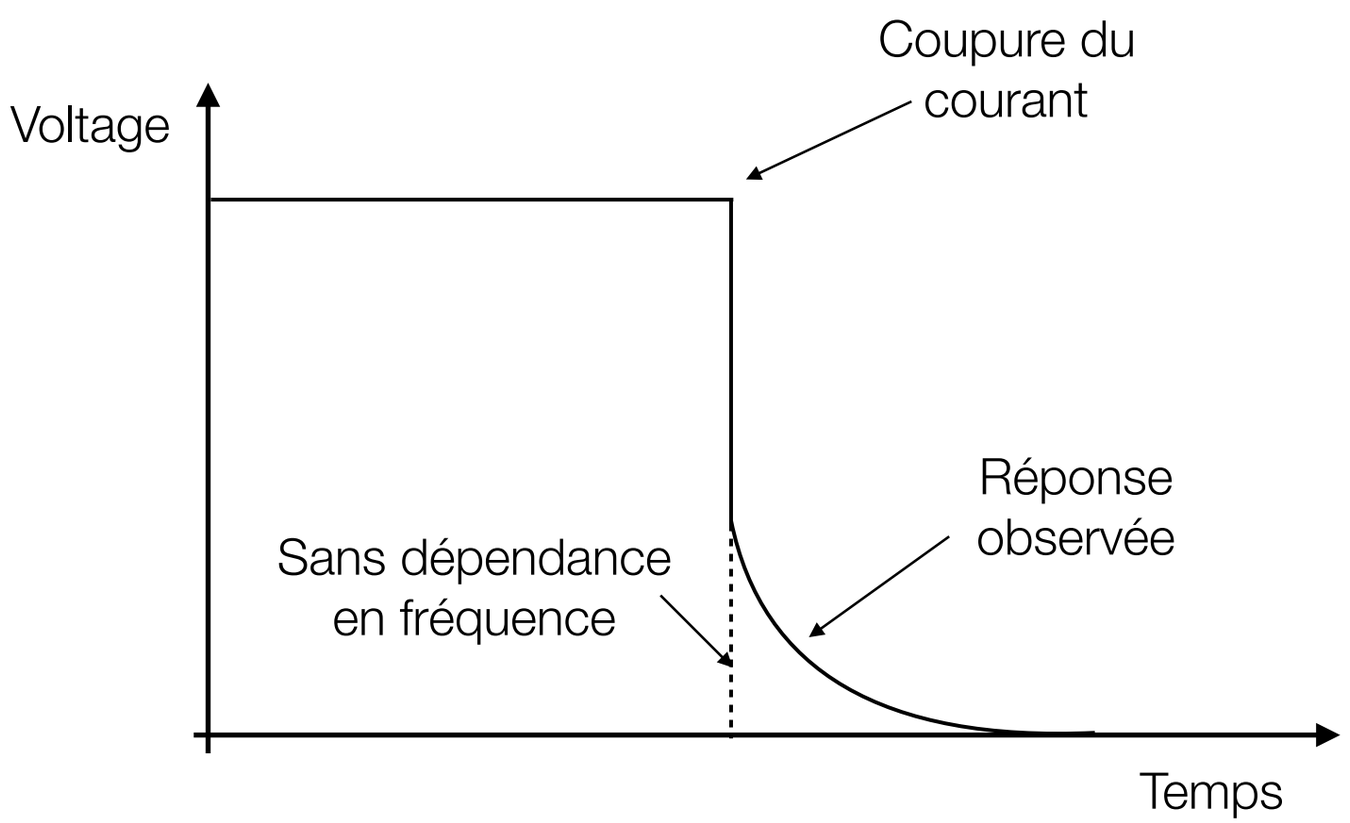
Problème! Ce le signal carré du volage n'est pas ce qui est observé en pratique



Polarisation provoquée

Les méthodes DC supposent que la résistivité électrique est réelle et ne dépend pas de la fréquence du courant. **Ceci est faux!**

La dépendance en fréquence de la résistivité induit un délai entre l'injection d'un courant et la variation temporel du voltage dans le sol.

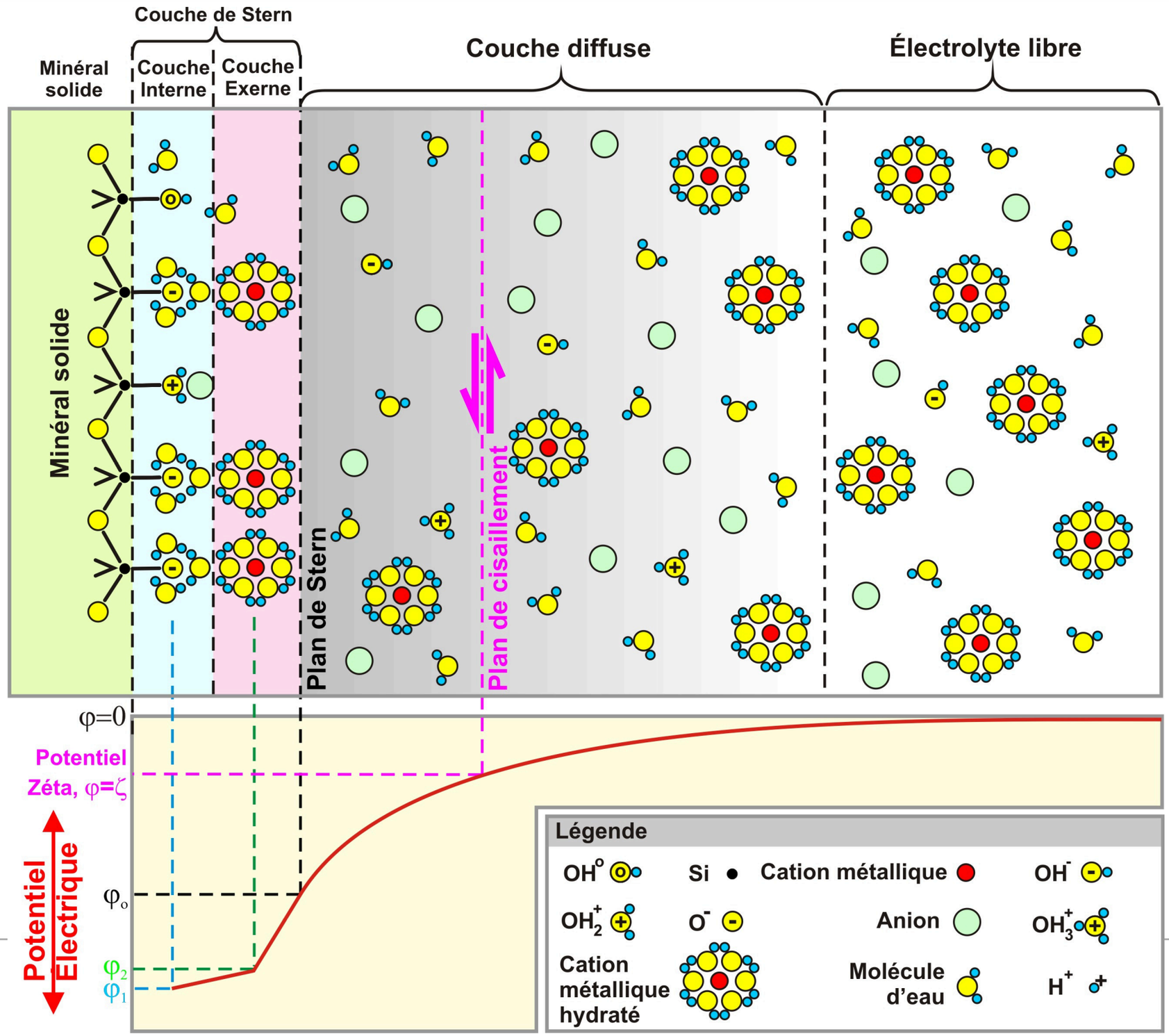


Mécanismes physiques de la PP

- Les deux principaux mécanismes physiques de la PP sont:
  - La polarisation d'électrode
  - La polarisation de membrane

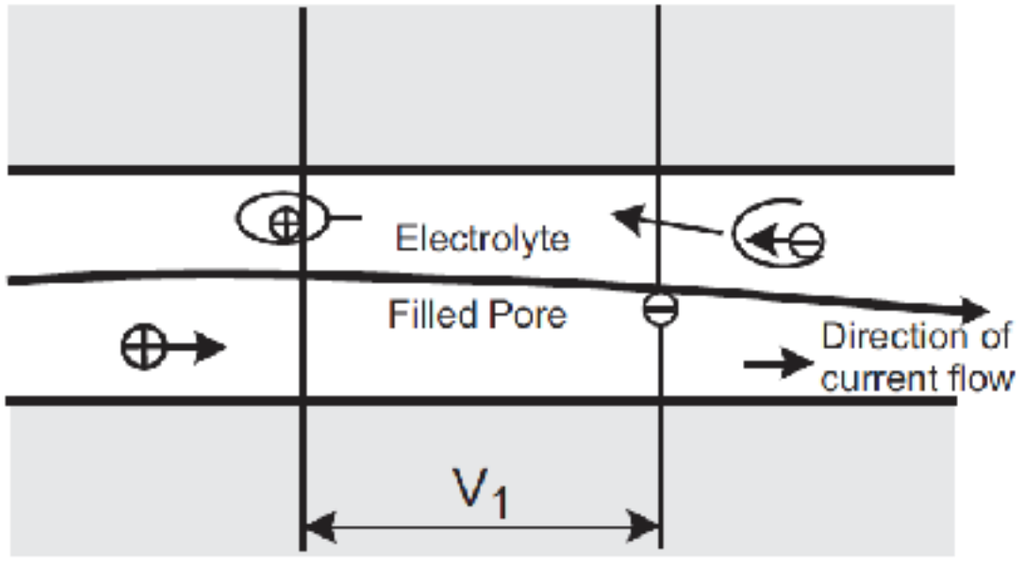
- Ces modèles se basent sur la **conduction ionique**
- Comme en PS, ce ne sont que des modèles schématiques, pour lesquels il est difficile de faire des prédictions quantitatives.
- Ces modèles n'expliquent pas non plus tous les phénomènes observés!

On se rappelle de la double couche d'Helmoltz

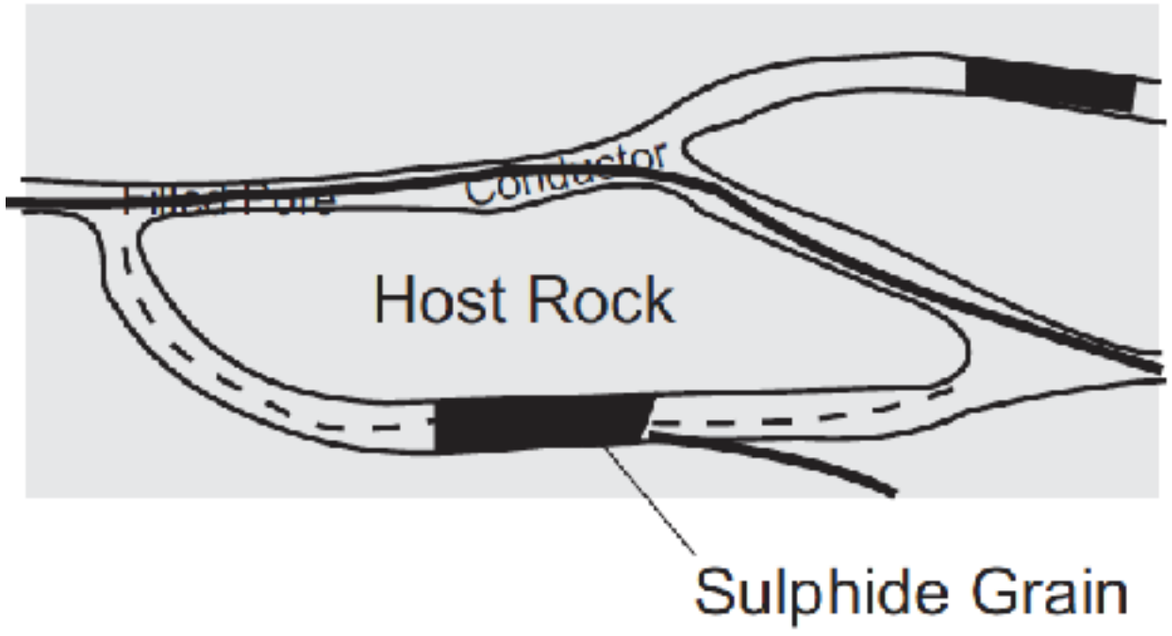


Polarisation d'électrode

Un courant électrique implique le **déplacement des ions** dans les pores

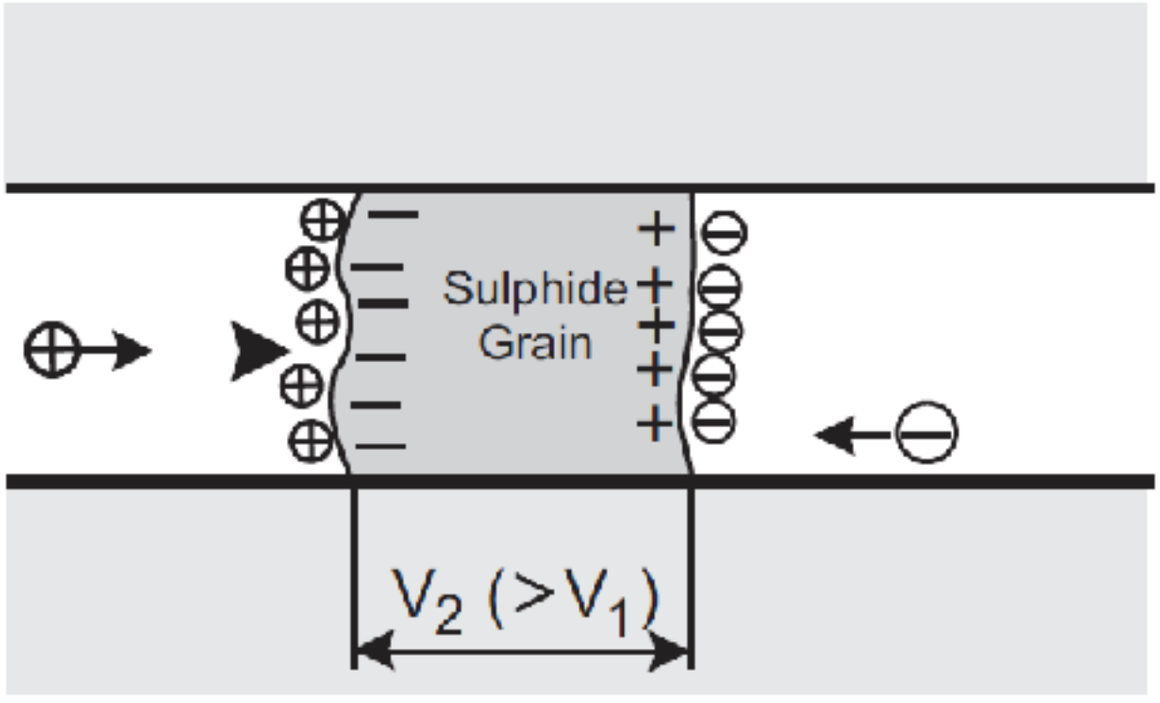


Certains pores peuvent être bouchés par des **particules conductrices**



Polarisation d'électrode

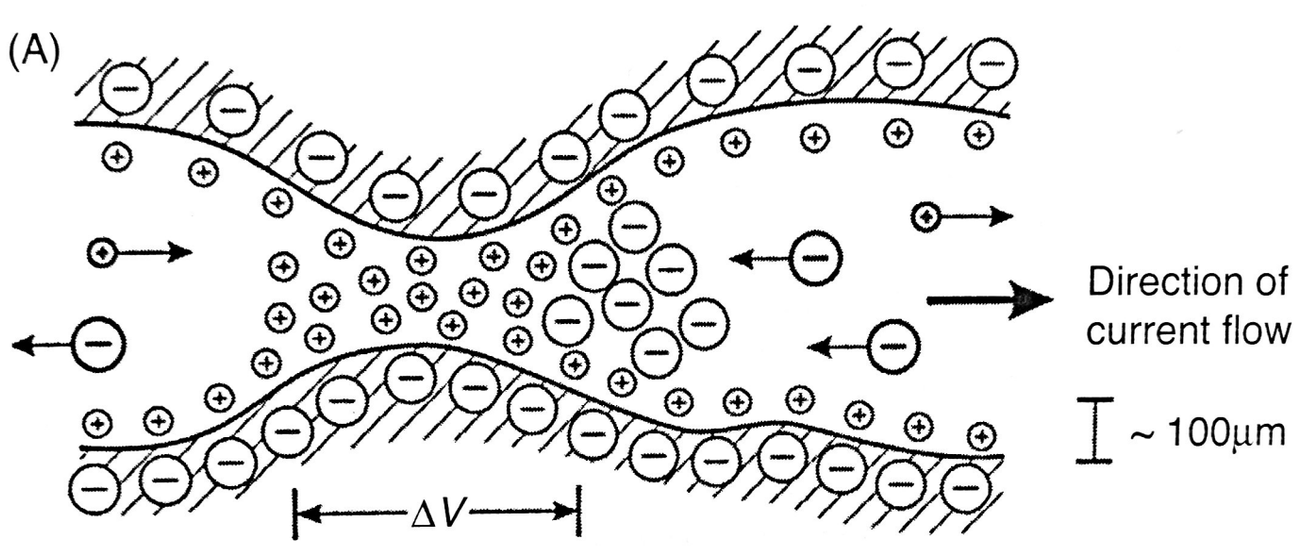
Les charges s'accumulent de part et d'autres du grain, ce qui établit un **nouvel équilibre des charges dans la double couche**.



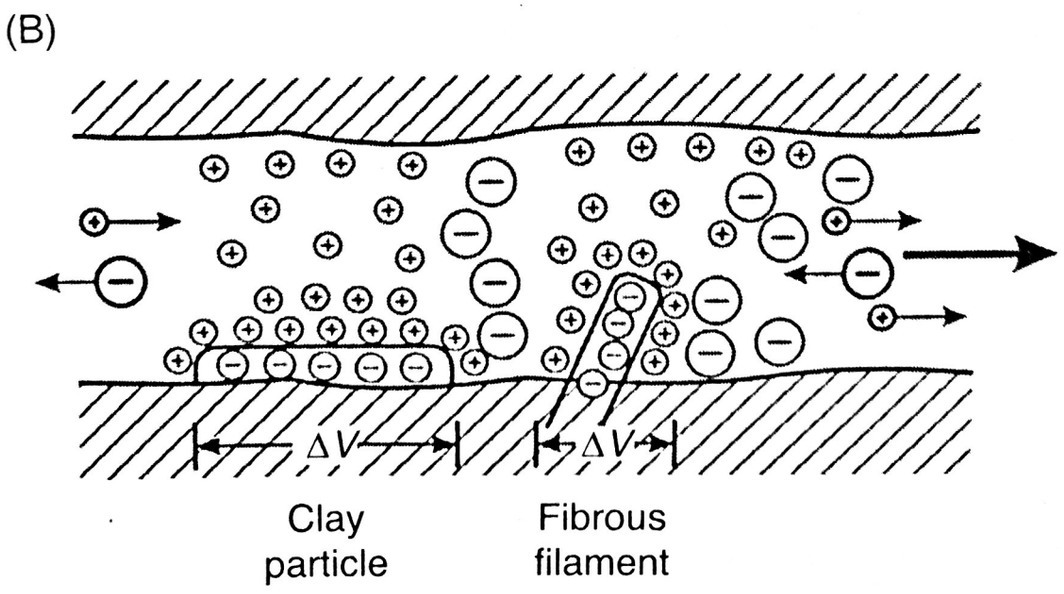
À la coupure du courant, l'équilibre est rompu, et doit être rétabli. **La diffusion des ions prend un certain temps** lors du retour à l'équilibre, ce qui produit une décroissance graduelle du potentiel.

Potentiel de membrane

1. **Constriction des pores**: Les ions négatifs peuvent être bloqués lorsque les pores deviennent trop petits



2. **Présences d'argiles**: Des particules d'argile, souvent chargées négativement attirent des charge positives et peuvent bloquer le transport des ions négatifs



Modélisation de la polarisation provoquée

Réinterprétation de la loi d'Ohm

Comment prendre en compte ces mécanismes physiques dans les équations de Maxwell ?

Il faut modifier comment on interprète la loi d'Ohm:

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E}$$

On considère maintenant la conductivité comme complexe:

$$\boldsymbol{J} = \left[\sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega)\right] \boldsymbol{E}$$

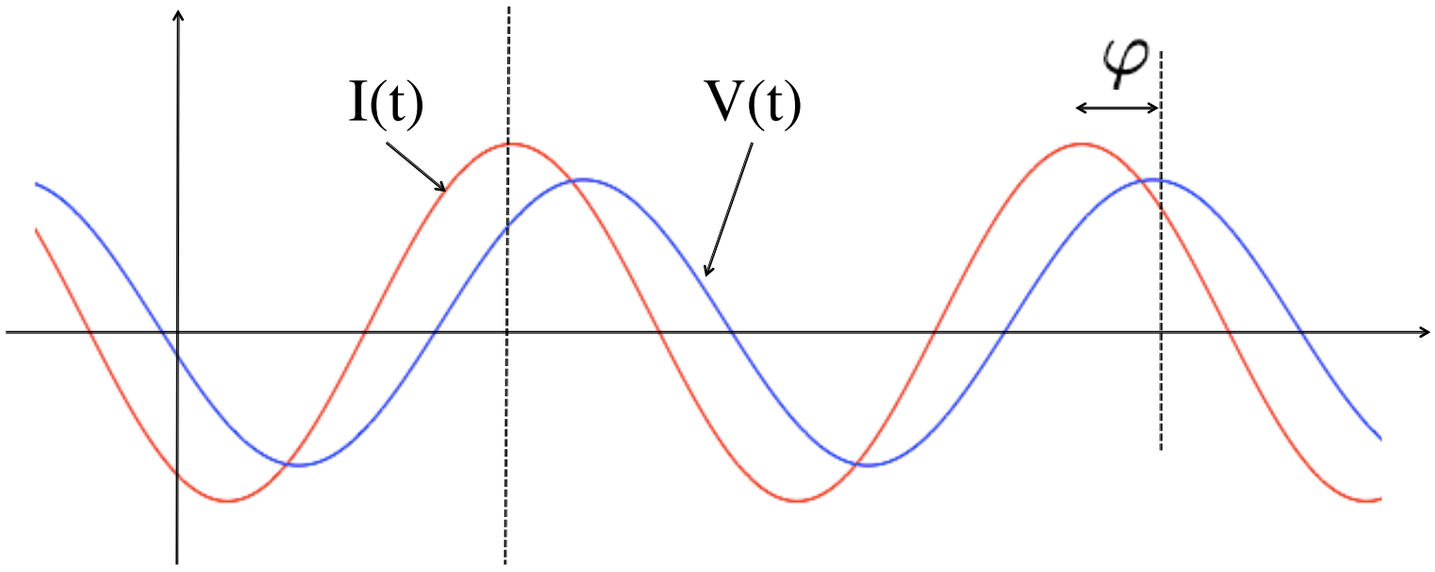
Les parties réelles et imaginaires dépendent de la fréquence.

Réinterprétation de la loi d'Ohm

Comment prendre en compte ces mécanismes physiques dans les équations de Maxwell ?

$$\boldsymbol{J} = [\sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega)]\,\boldsymbol{E} \quad \Longleftrightarrow \quad \boldsymbol{J} = \sigma_0 e^{i\tan^{-1}(\sigma''/\sigma')}\boldsymbol{E}$$

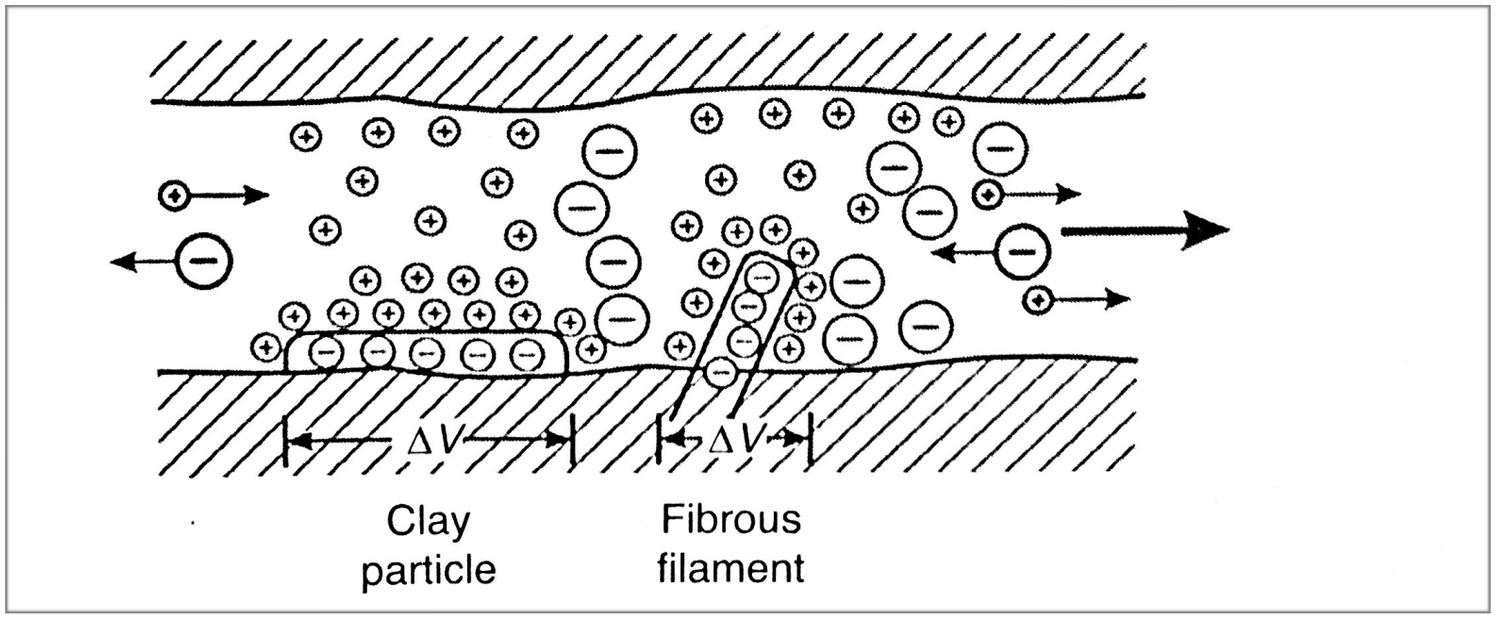
Chaque fréquence est donc déphasé, selon la rapport des conductivités réelles et imaginaires.



Réinterprétation de la loi d'Ohm

De façon simplifiée, on peut considérer deux mécanismes de conduction, la conduction électrolytique et la conduction de surface. La conductivité complexe est alors donnée par:

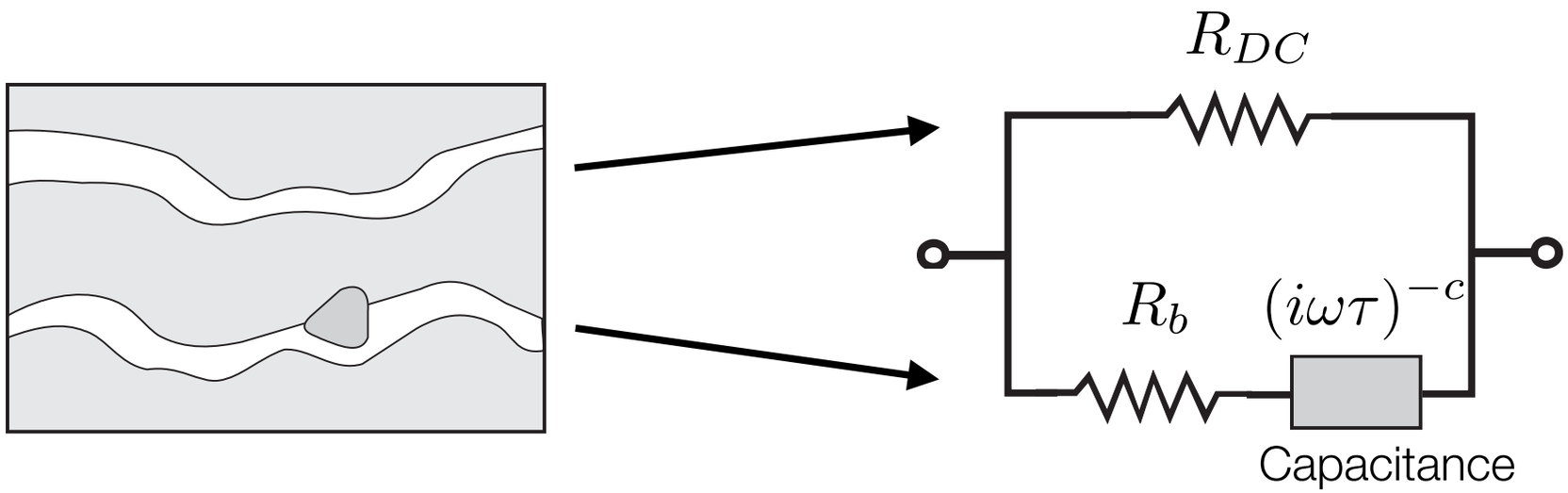
$$\sigma^* = \left[\sigma_{el} + \sigma'_{surf}(\omega)\right] + i\sigma''_{surf}(\omega)$$



Circuits équivalents: modèle Cole-Cole

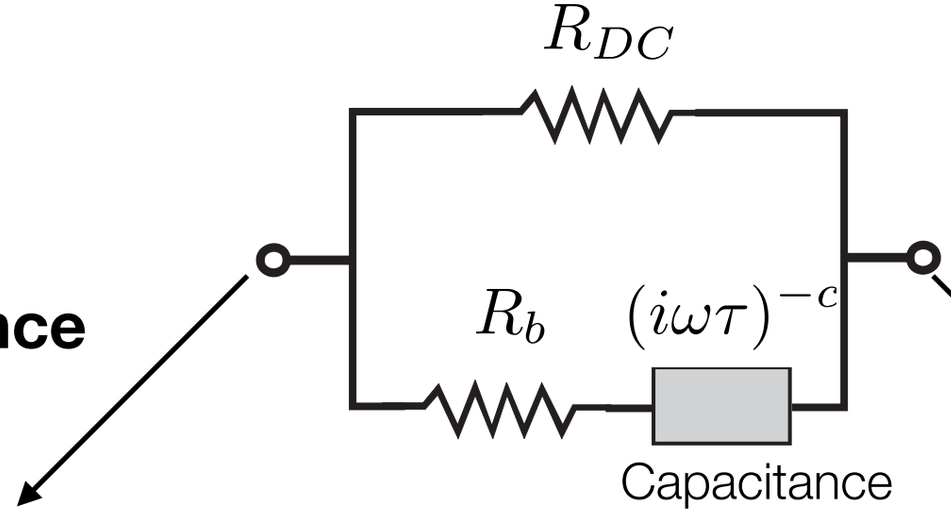
Certains **modèles physiques** tentent d'établir les variations de la conductivité complexe en fréquence sur la base de propriétés physiques. **Difficile, voire impossible d'utilisation pratique !**

On utilise plutôt des **modèles empiriques** basés sur **des circuits équivalents**.



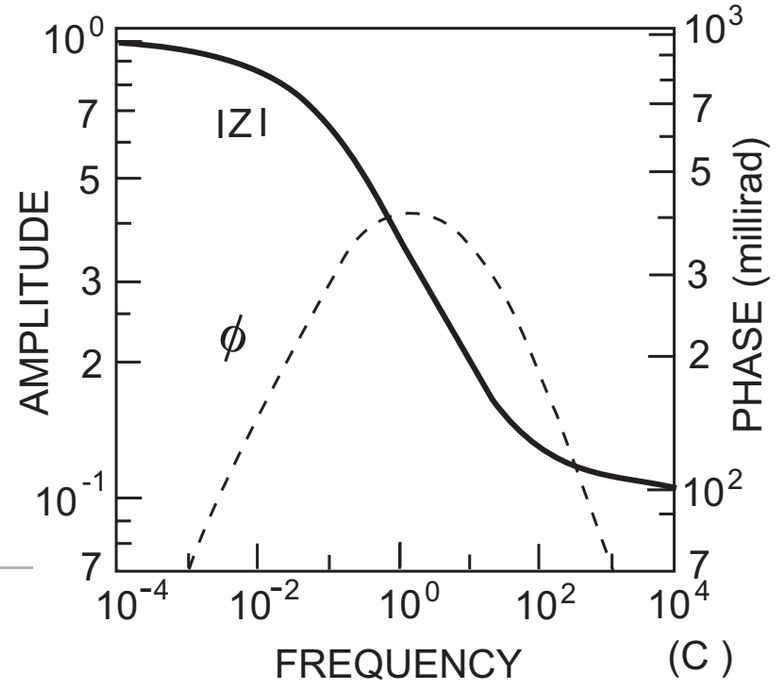
Modèle de Cole-Cole

Circuits équivalents: modèle Cole-Cole



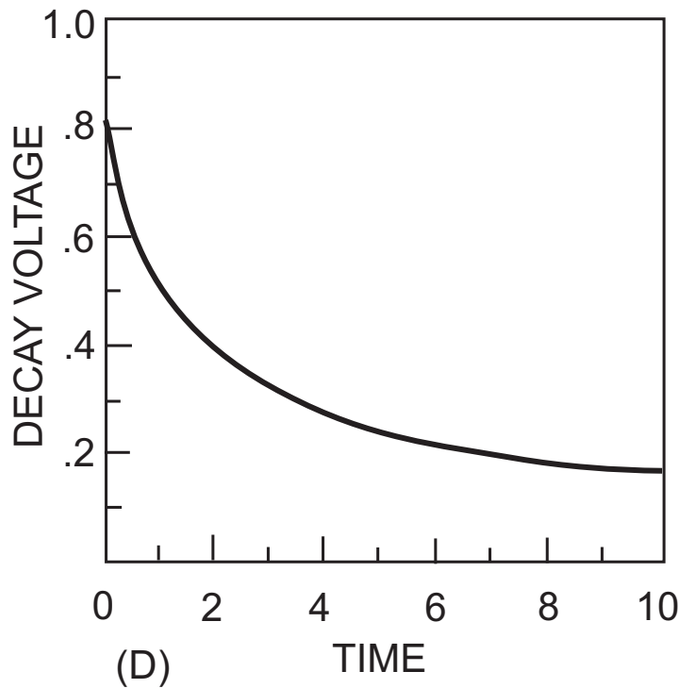
Réponse en fréquence

$$\rho^* = \rho_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]$$



Réponse en temps

$$\rho^* = \rho_0 \left[\delta(t) - m \left(\delta(t) - \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \right) \right]$$



Circuits équivalents: modèle Cole-Cole

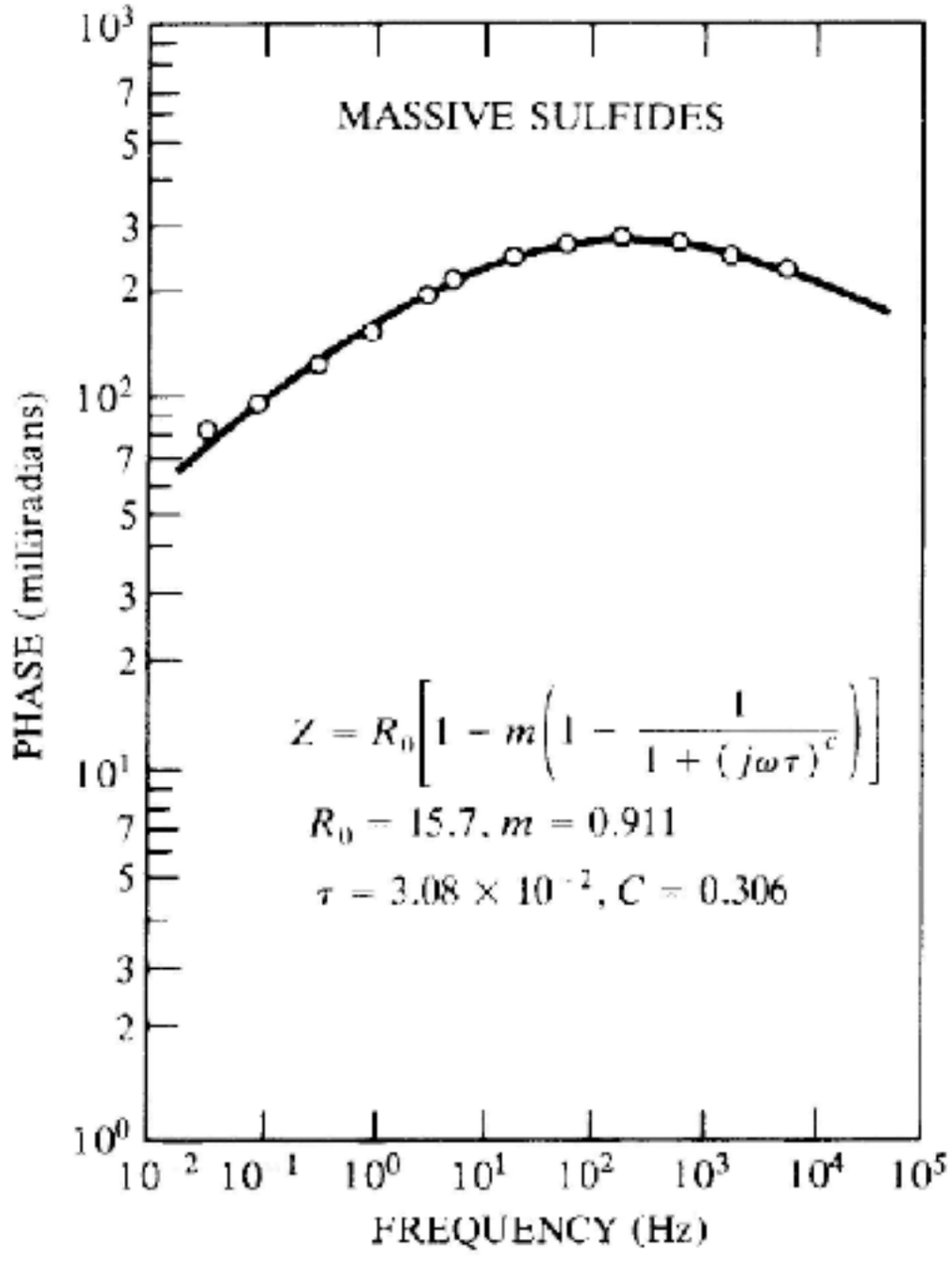
Les circuits équivalents permettent de réduire le nombre de paramètres nécessaires afin de caractériser la décroissance du potentiel dans le temps.

Le modèle Cole-Cole nécessite 4 paramètres:

- ρ_0 : La résistivité DC
- m: La chargeabilité du milieu. C'est le principal paramètre utilisé en PP
- τ : La constante de temps qui caractérise la courbe de décroissance
- c: Modifie la réponse en fréquence. Se situe entre 0.25 et 0.35 habituellement

Circuits équivalents: modèle Cole-Cole

Le modèle Cole-Cole représente bien le comportement de plusieurs roches et minéraux.



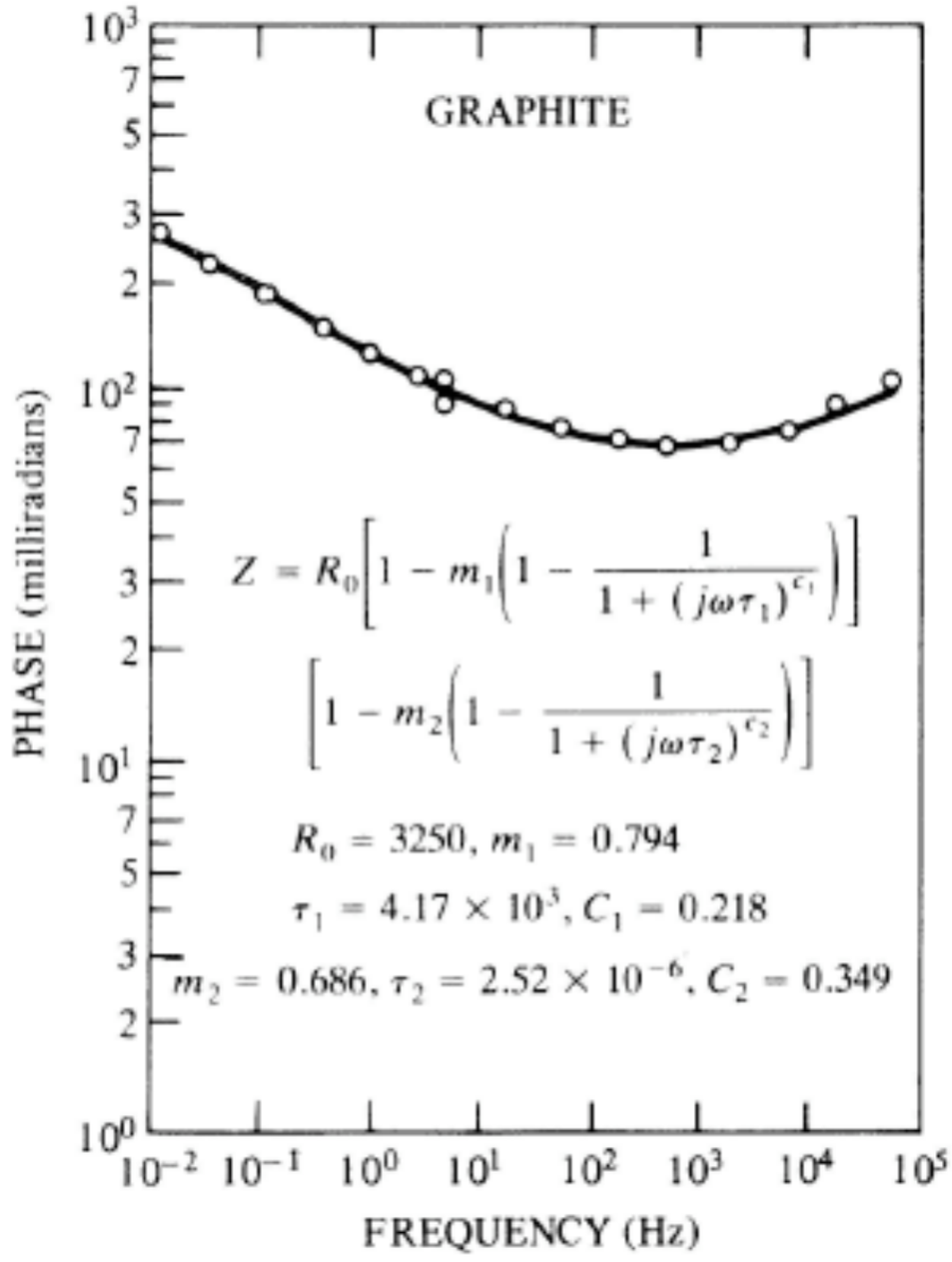
(Pelton, 1978)

Circuits équivalents: modèle Cole-Cole

Le modèle Cole-Cole représente bien le comportement de plusieurs roches et minéraux.

Cependant, certaines réponses nécessitent plusieurs mécanismes de Cole-Cole pour expliquer les données.

Ceci peut-être causé par la présence de polarisation d'électrodes et polarisation de membrane.



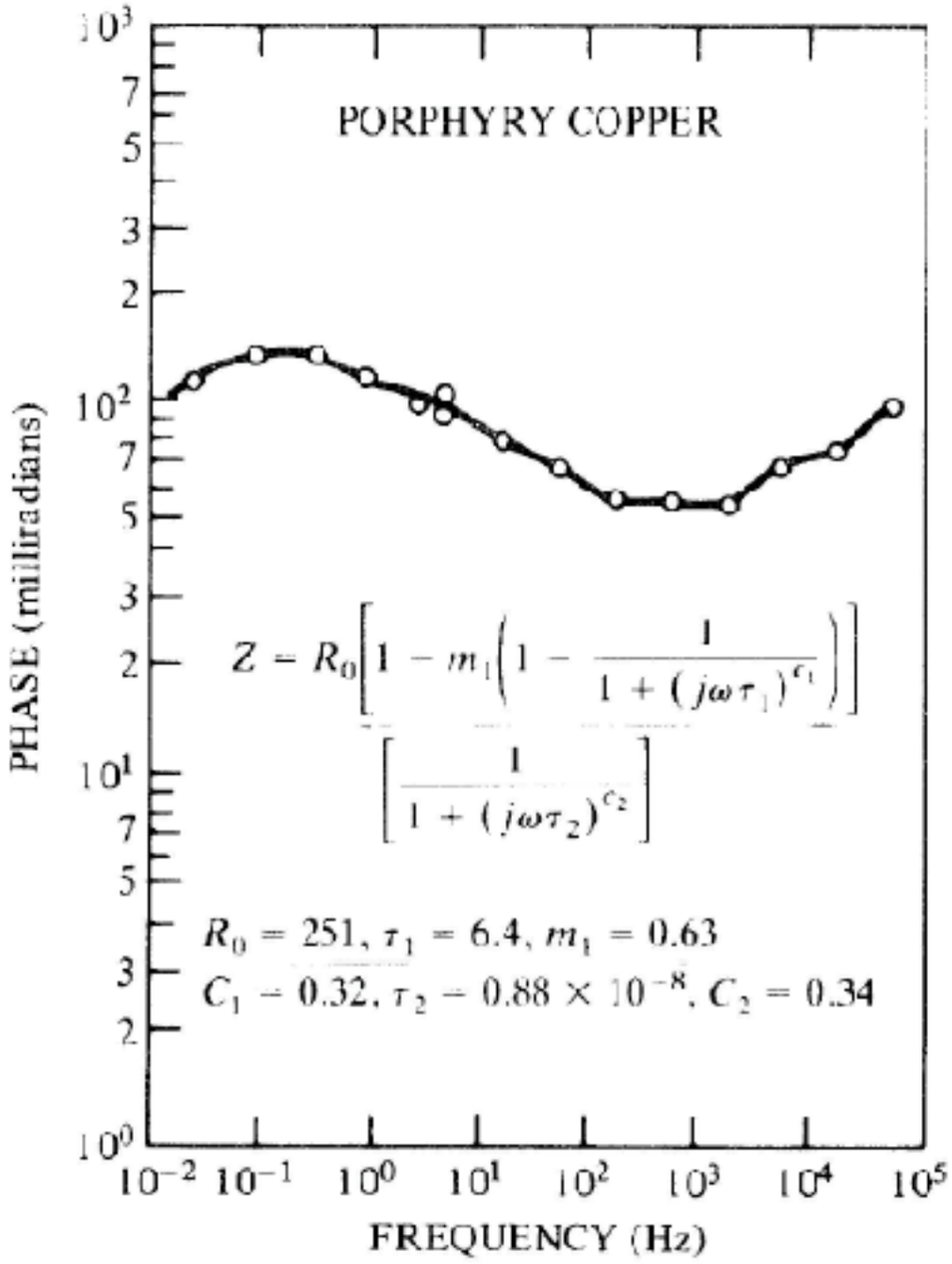
(Pelton, 1978)

Circuits équivalents: modèle Cole-Cole

Le modèle Cole-Cole représente bien le comportement de plusieurs roches et minéraux.

Cependant, certains réponses nécessitent plusieurs mécanismes de Cole-Cole pour expliquer les données.

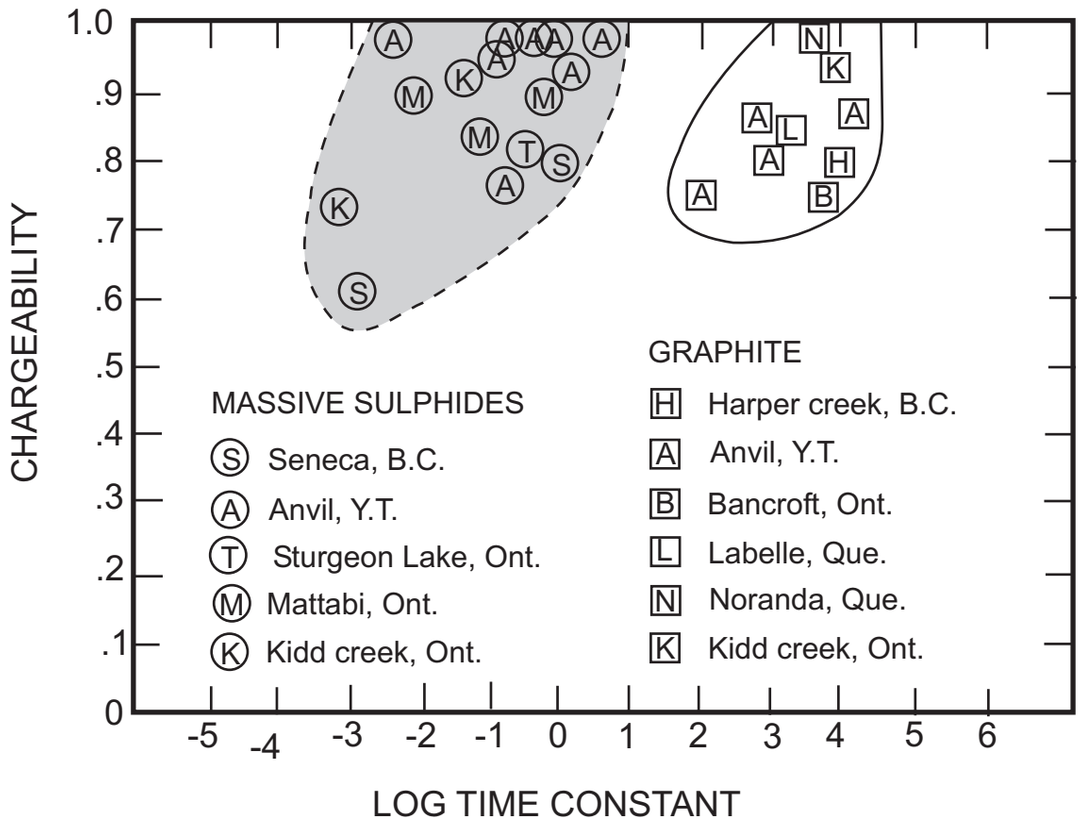
Ceci peut-être causé par la présence de polarisation d’électrodes et polarisation de membrane.

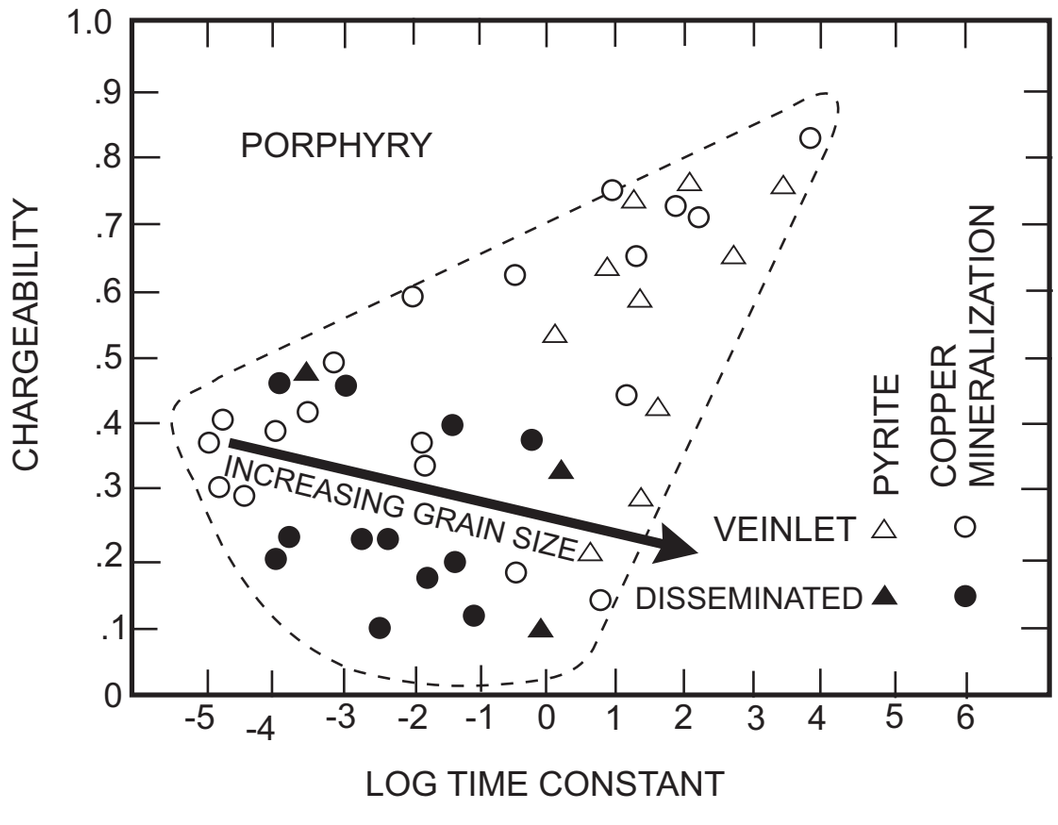


(Pelton, 1978)

Circuits équivalents

Même si les paramètres du modèles Cole-Cole ne sont pas physiques, ils sont tout de même bien corrélés à des propriétés géologiques intéressantes.

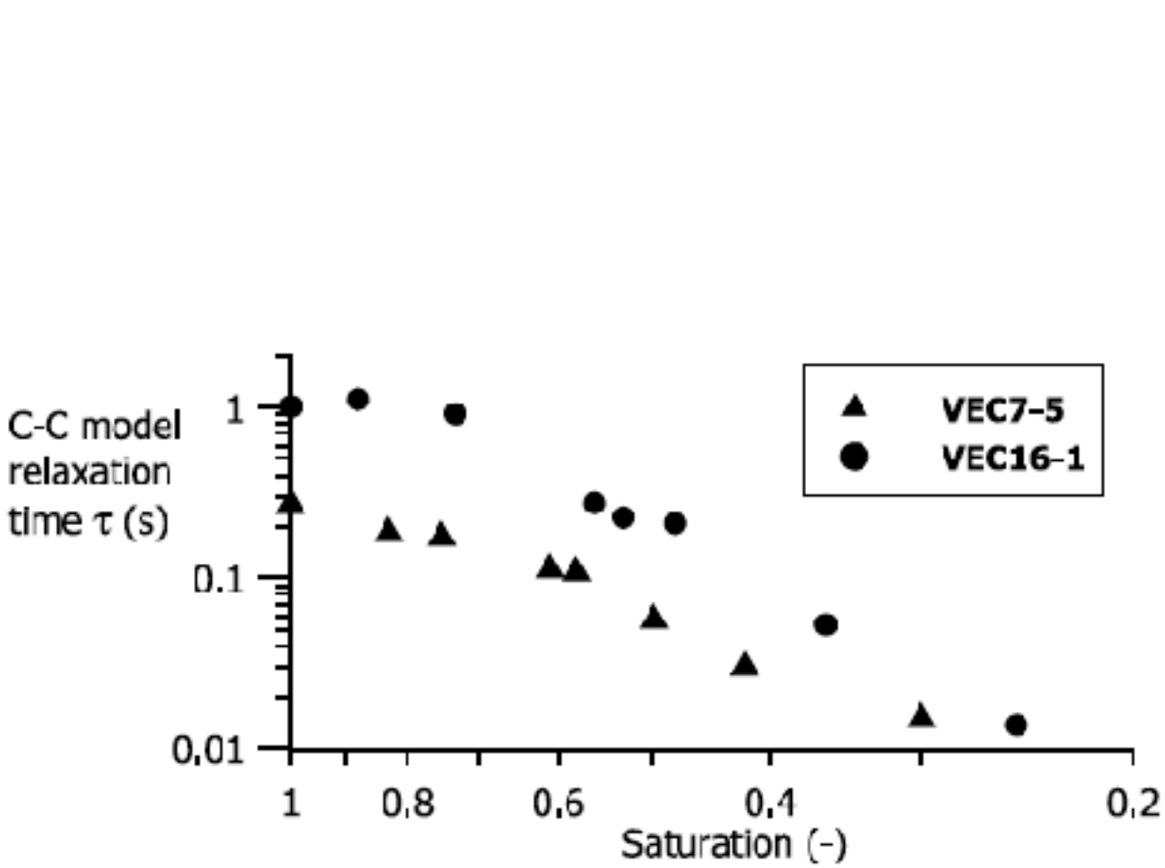


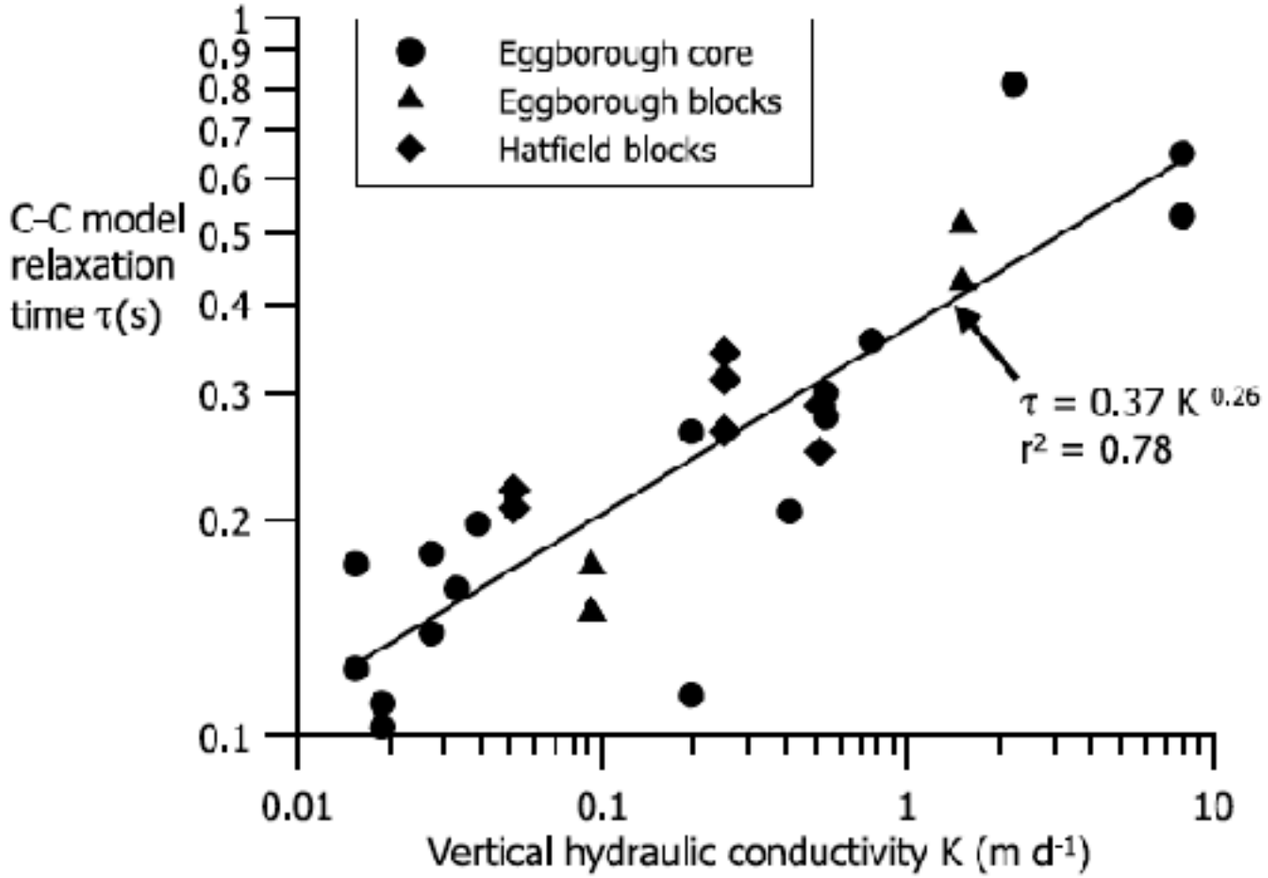


(Pelton, 1978)

Circuits équivalents

Même si les paramètres du modèles Cole-Cole ne sont pas physiques, ils sont tout de même bien corrélés à des propriétés géologiques intéressantes.





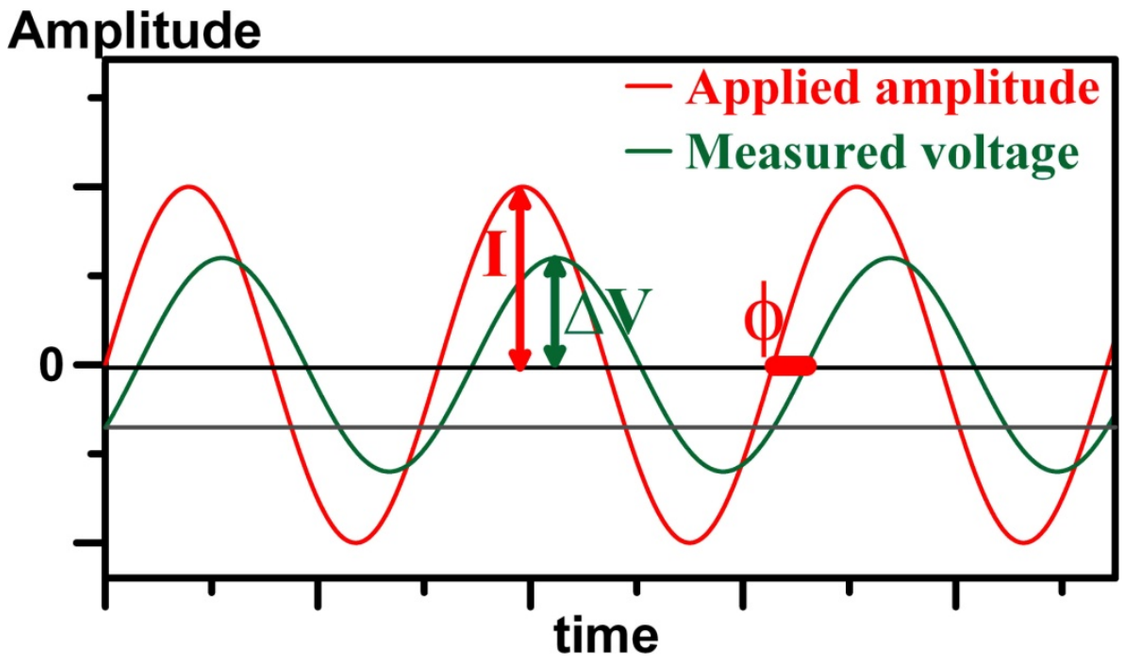
(Binley et. al, 2005)

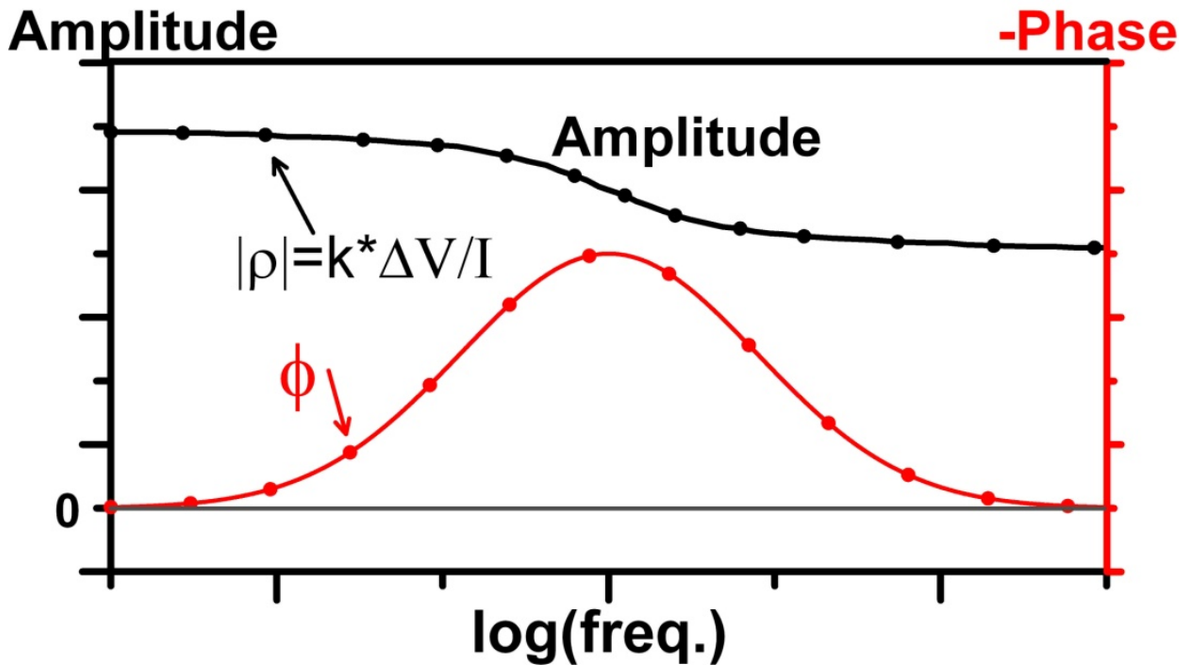
Mesures de la polarisation provoquée

La PP spectrale

En PP spectrale, on mesure la **phase et l'amplitude** de V et I à **différentes fréquences**.

$$\boldsymbol{J} = [\sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega)]\,\boldsymbol{E} \quad \Longleftrightarrow \quad \boldsymbol{J} = \sigma_0 e^{i\tan^{-1}(\sigma''/\sigma')}\boldsymbol{E}$$

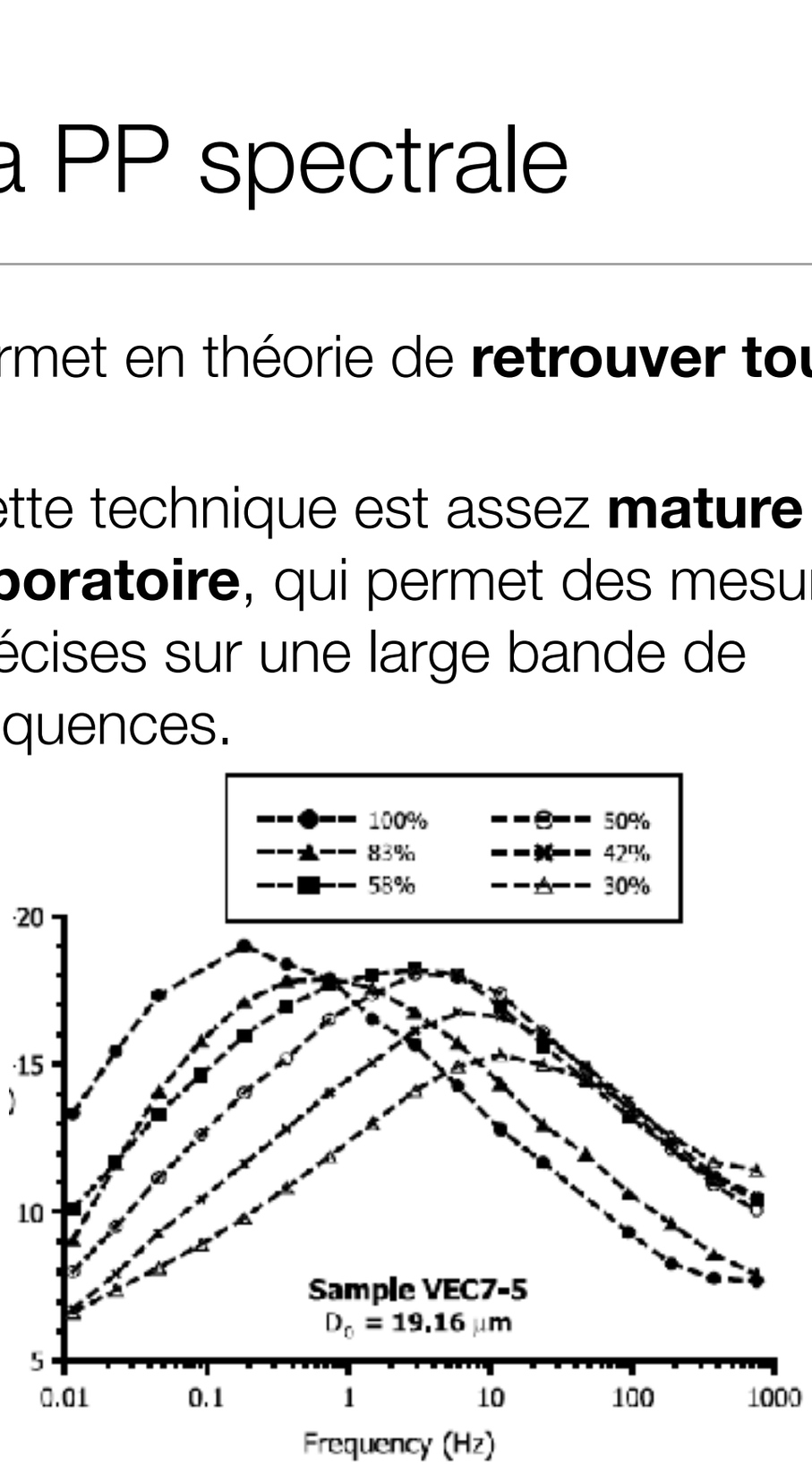




La PP spectrale

Permet en théorie de **retrouver tous les paramètres** du modèle Cole-Cole.

Cette technique est assez **mature en laboratoire**, qui permet des mesures précises sur une large bande de fréquences.



Cependant, il est **difficile sur le terrain** d’effectuer des mesures sur une large bande de fréquence.

(Binley et. al, 2005)

La PP dans le domaine du temps

La plupart des mesures en PP sont effectuées dans le domaine temporel.

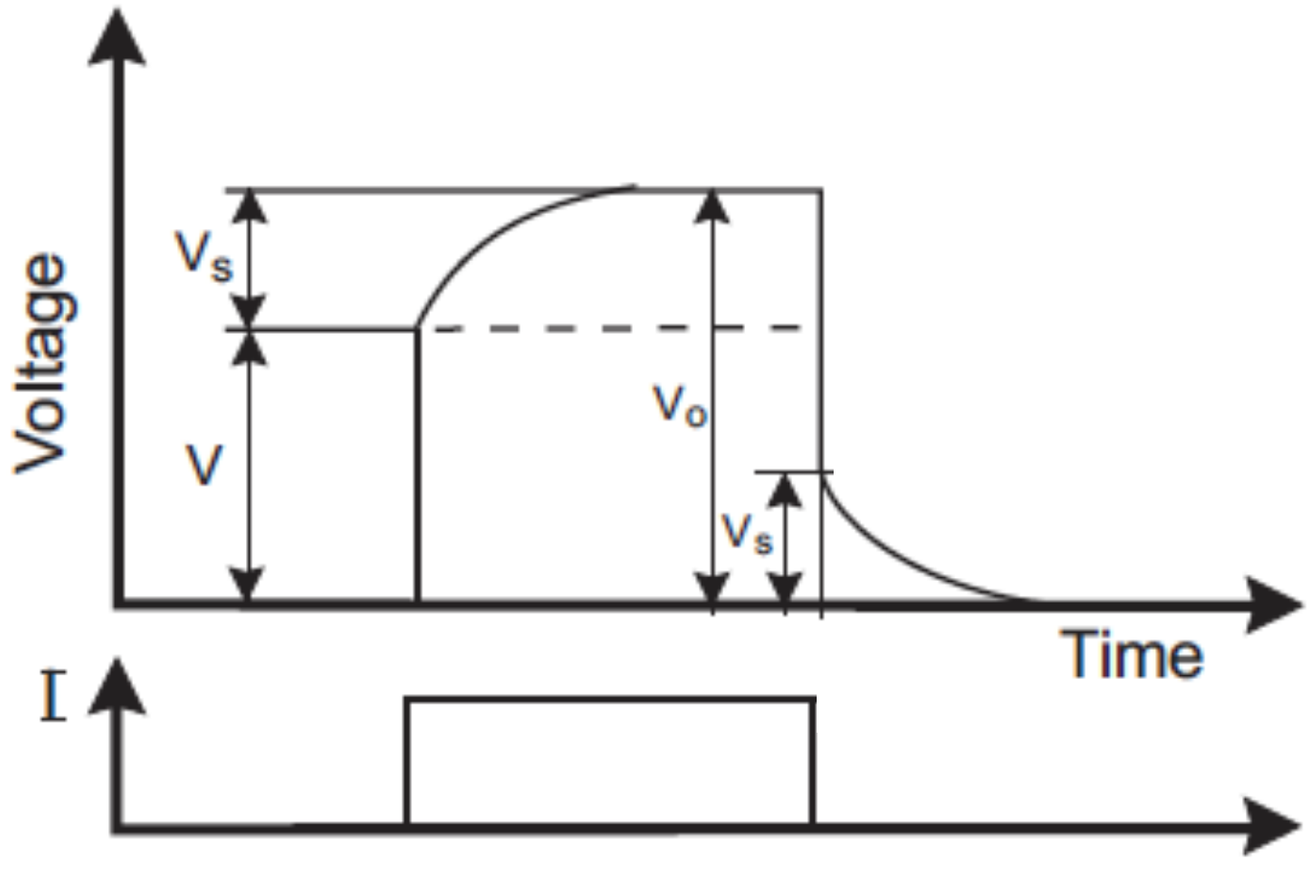
La **chargeabilité** est le paramètre recherché:

$$m = \frac{V_s}{V_0} = \frac{V_0 - V}{V_0}$$

Les unités sont le **mV/V** ou le **%**.

En pratique, ce paramètre est impossible à mesurer.

La forme de la courbe de décharge est ignorée dans le domaine du temps!



La PP dans le domaine du temps

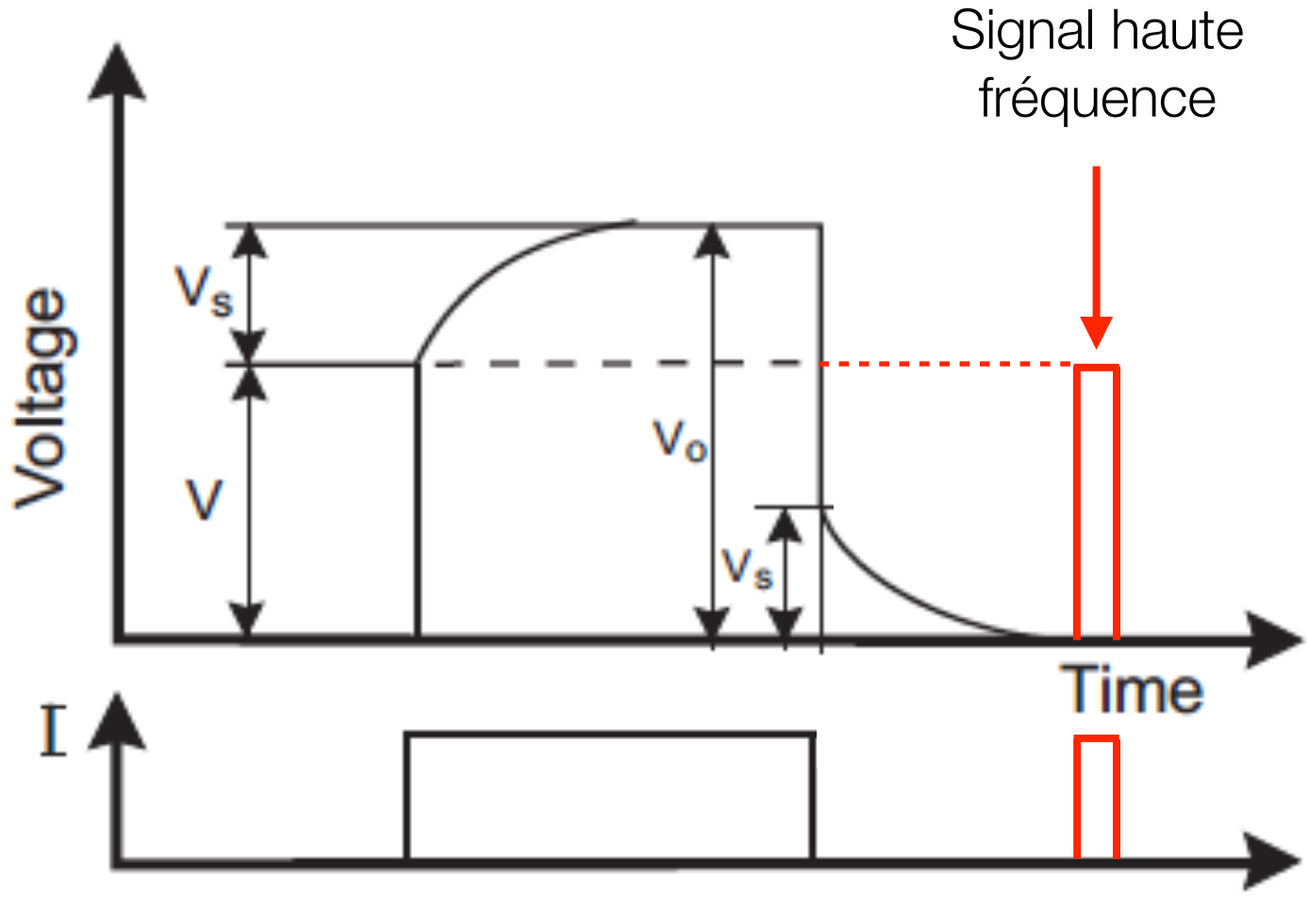
Différentes définitions équivalentes de la chargeabilité existent.

Selon les potentiels:

$$m = \frac{V_s}{V_0} = \frac{V_0 - V}{V_0}$$

Selon les résistivité:

$$m = \frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{DC}}$$



La PP dans le domaine du temps

Différentes définitions équivalentes de la chargeabilité existent.

Selon les potentiels:

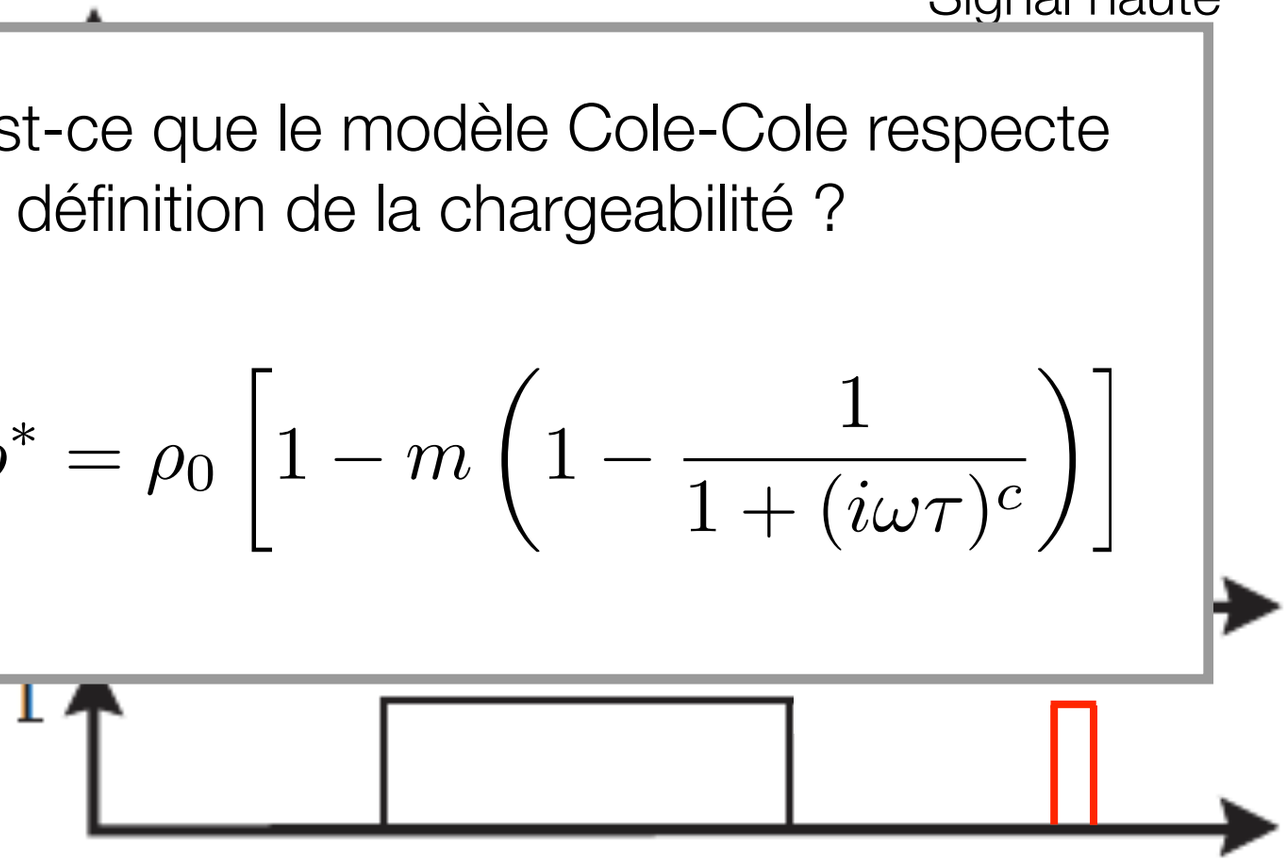
$$m = \frac{V_s}{V_0} = \frac{V_0 - V}{V_0}$$

Selon les résistivité:

$$m = \frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{DC}}$$

Est-ce que le modèle Cole-Cole respecte la définition de la chargeabilité ?

$$\rho^* = \rho_0 \left[1 - m\left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c}\right)\right]$$



La PP dans le domaine du temps

La plupart des mesures en PP sont effectuées dans le domaine temporel.

En pratique, la **chargeabilité apparente** est mesurée:

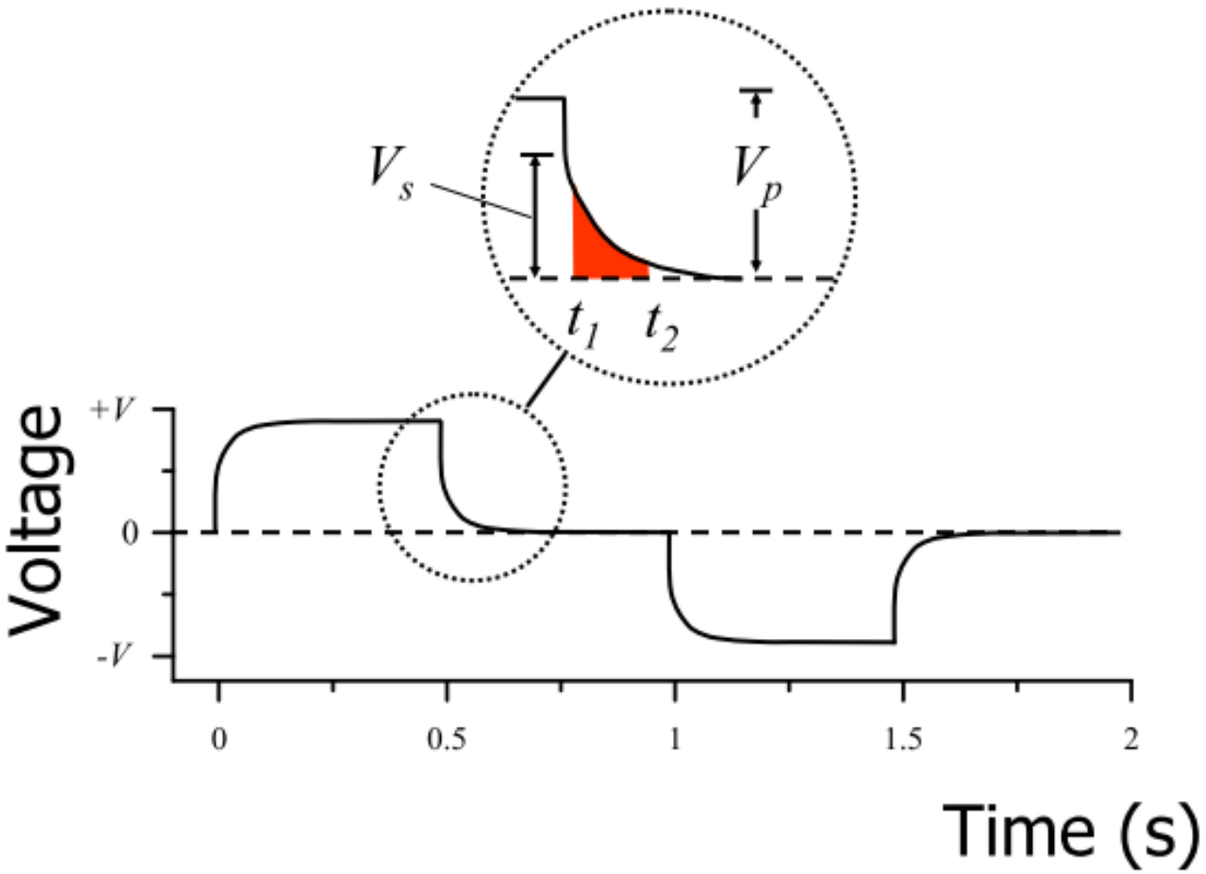
$$m_a = \frac{1}{V_0} \int_{t_1}^{t_2} V(t)dt$$

Les unités sont les **ms**.

Autre définition possible:

$$m_a = \frac{1}{t_2 - t_1} \frac{1}{V_0} \int_{t_1}^{t_2} V(t)dt$$

Les unités sont alors en **mV/V** ou **%**.



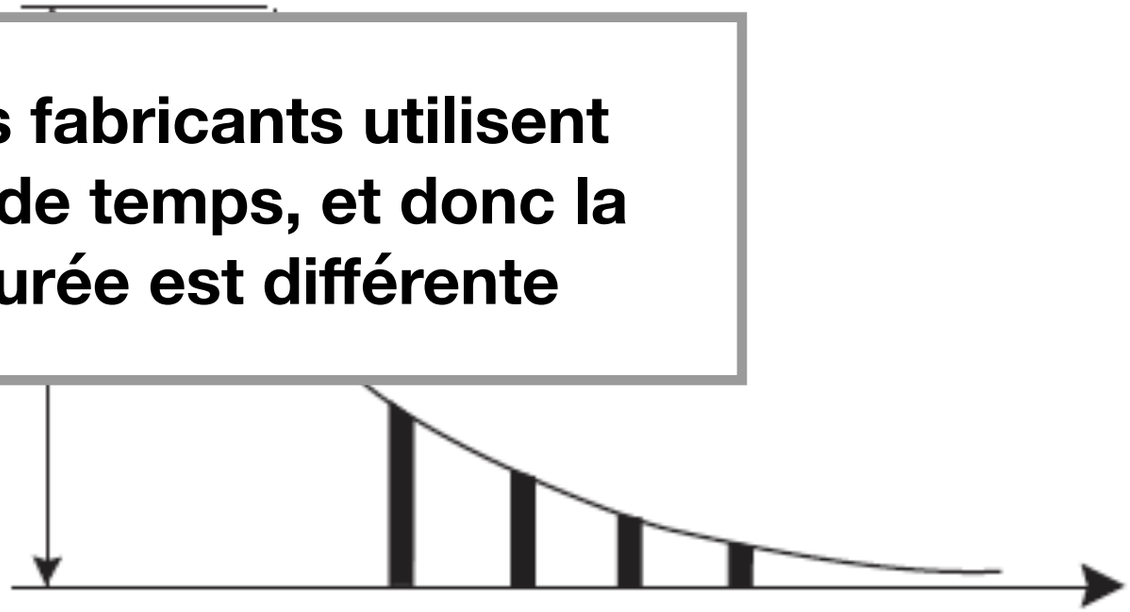
Différentes définitions de chargeabilité

La plupart des mesures en PP sont effectuées dans le domaine temporel.

En pratique, la **chargeabilité apparente** est mesurée:

$$m_a =$$

Attention: Différents fabricants utilisent différentes fenêtres de temps, et donc la chargeabilité mesurée est différente



Les unités s

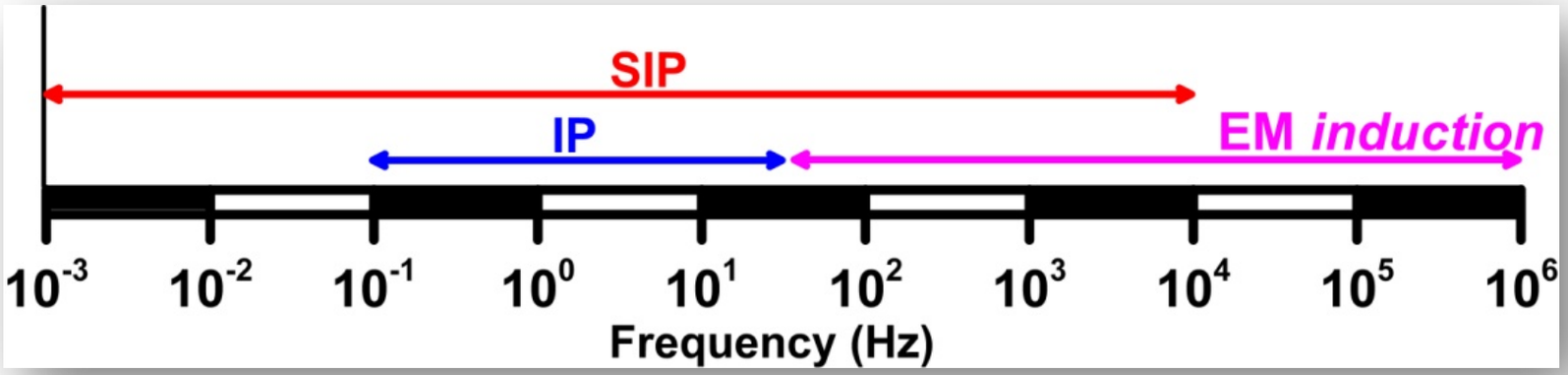
Autre définition possible:

$$m_a = \frac{1}{t_2 - t_1} \frac{1}{V_0} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt$$

Les unités sont alors en **mV/V** ou **%**.

Sources de bruit en PP

- Couplage électromagnétique culturel
- Potentiels naturels (PS)
- Couplage électromagnétique entre les dipôles d'injection et de mesure
- Couplage électromagnétique entre les câbles



Le couplage EM est de loin un des facteurs limitants des mesures PP

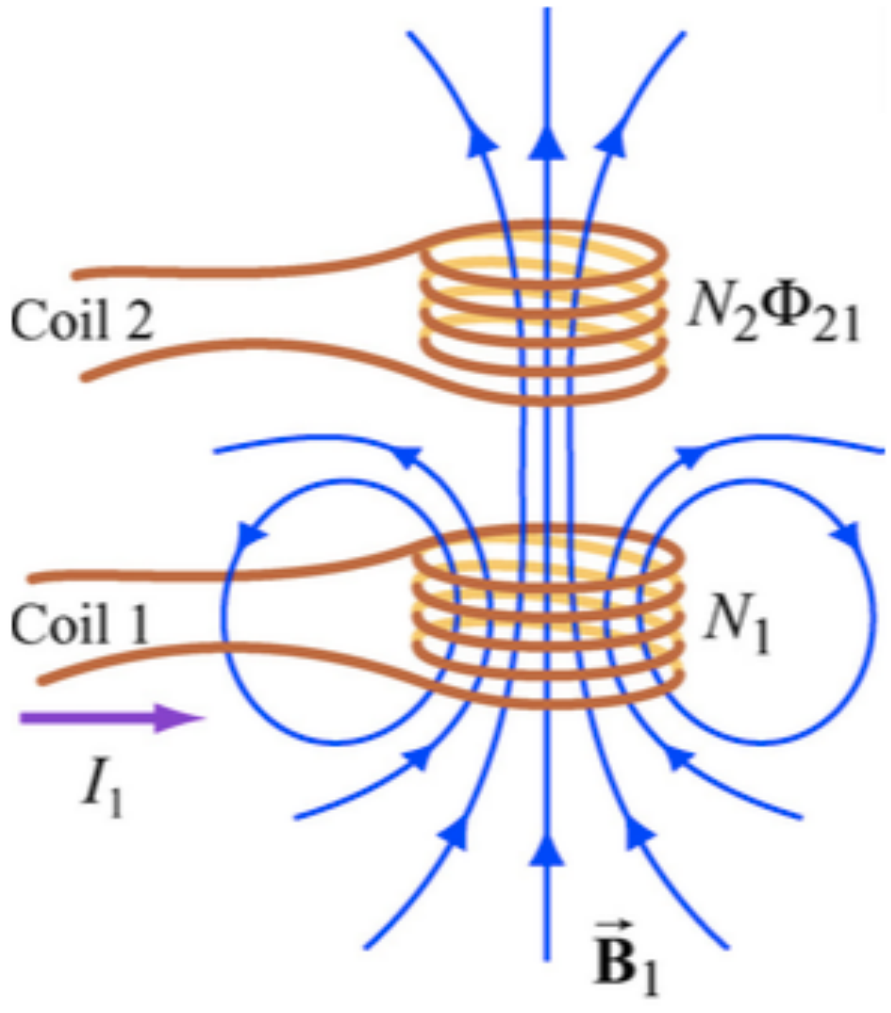
Couplage inductif: Rappel de la loi de Faraday

Une variation dans le temps d'un champ magnétique produit un champ électrique :

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

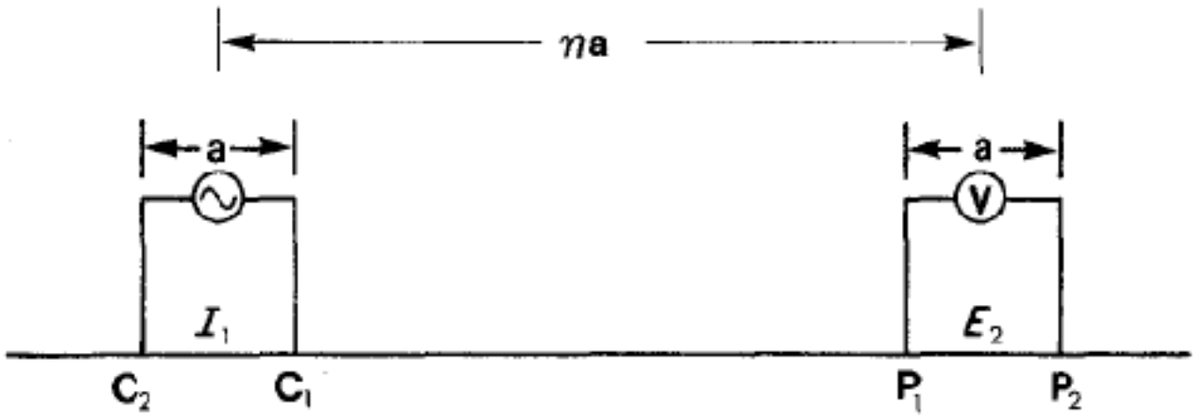
La tension produite par une boucle dans laquelle circule un courant dans une deuxième boucle :

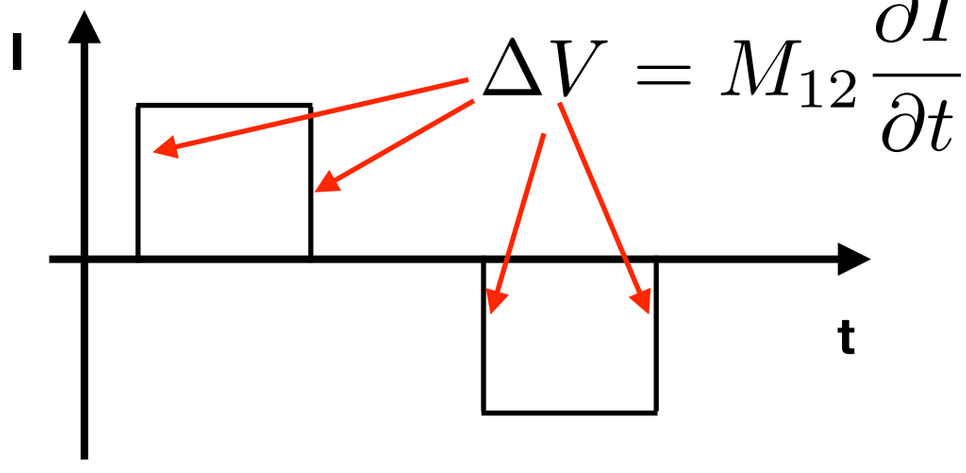
$$\Delta V = M_{12}\frac{\partial I}{\partial t}$$



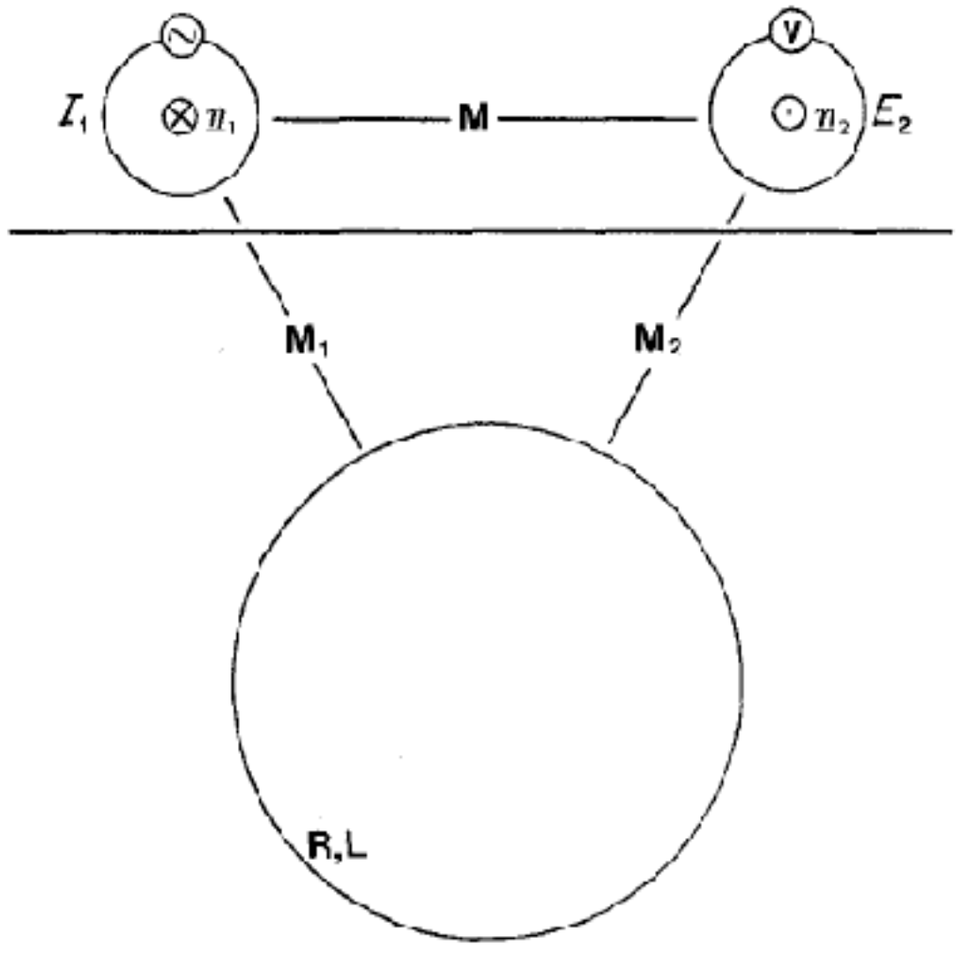
Couplage inductif: entre le sol et les dipôles

Les dipôles de courant et de tension on une inductance mutuelle entre eux, et avec le sol. Le courant variable au dipôle d'injection créera un tension parasite au dipôle de mesure.





$$\Delta V = M_{12}\frac{\partial I}{\partial t}$$



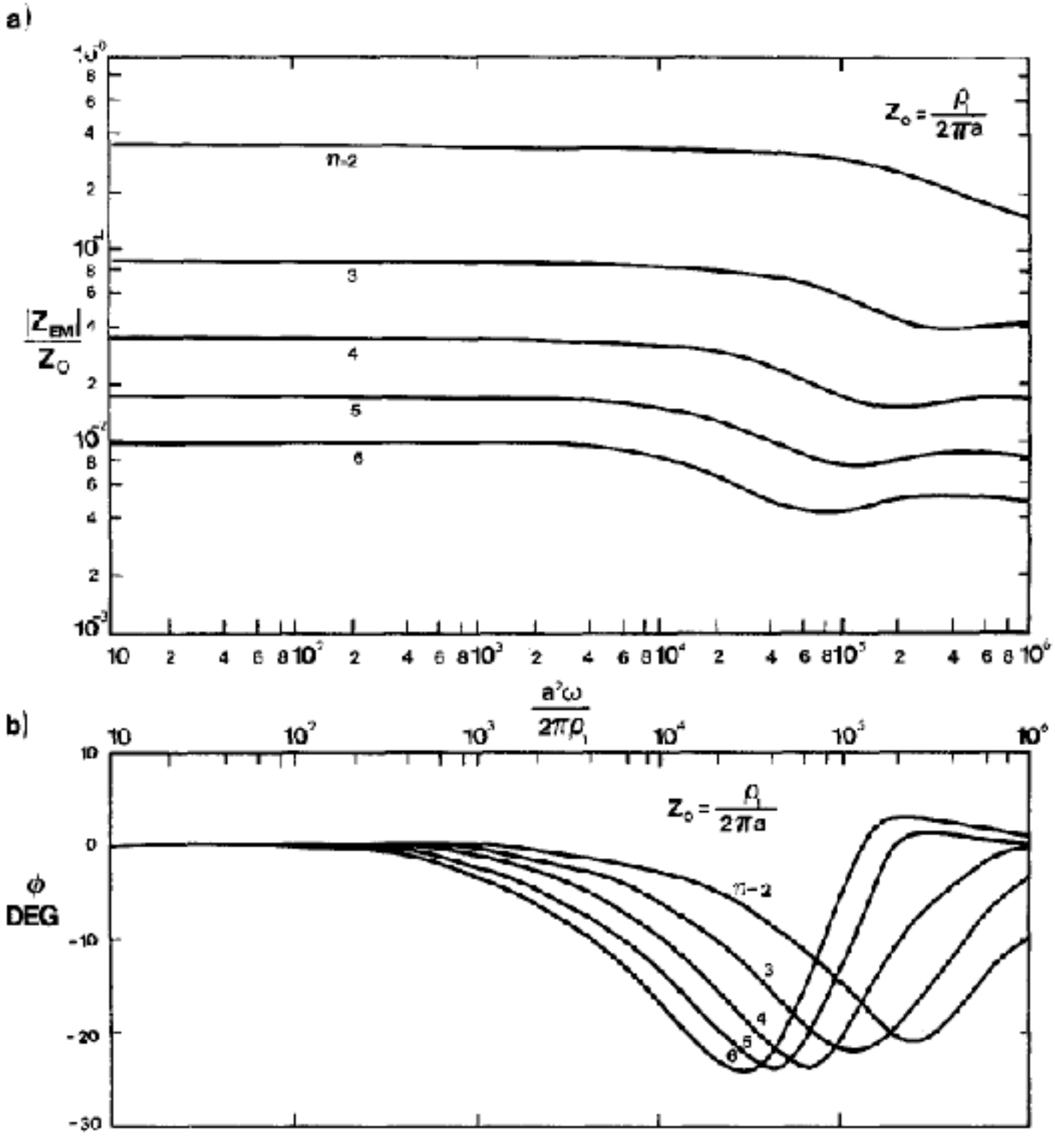
Couplage inductif: entre le sol et les dipôles

Pour un sol homogène:

$$\Delta V \propto \frac{af}{\rho}$$

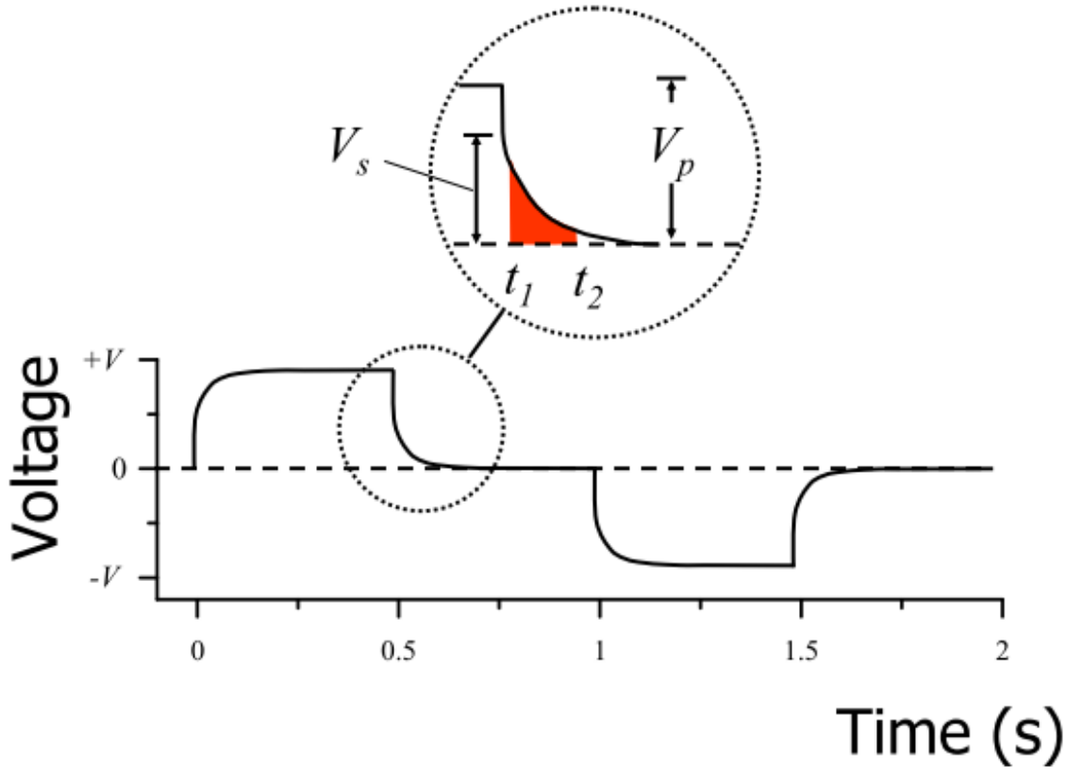
Le calcul est cependant très complexe pour un sol hétérogène. Il est donc difficile de corriger pour cet effet en pratique.

Les **mesures dans le temps** se font à basses fréquences, et donc sont **moins affectées par le couplage EM** que les mesures en fréquence, à haute fréquence.



En résumé

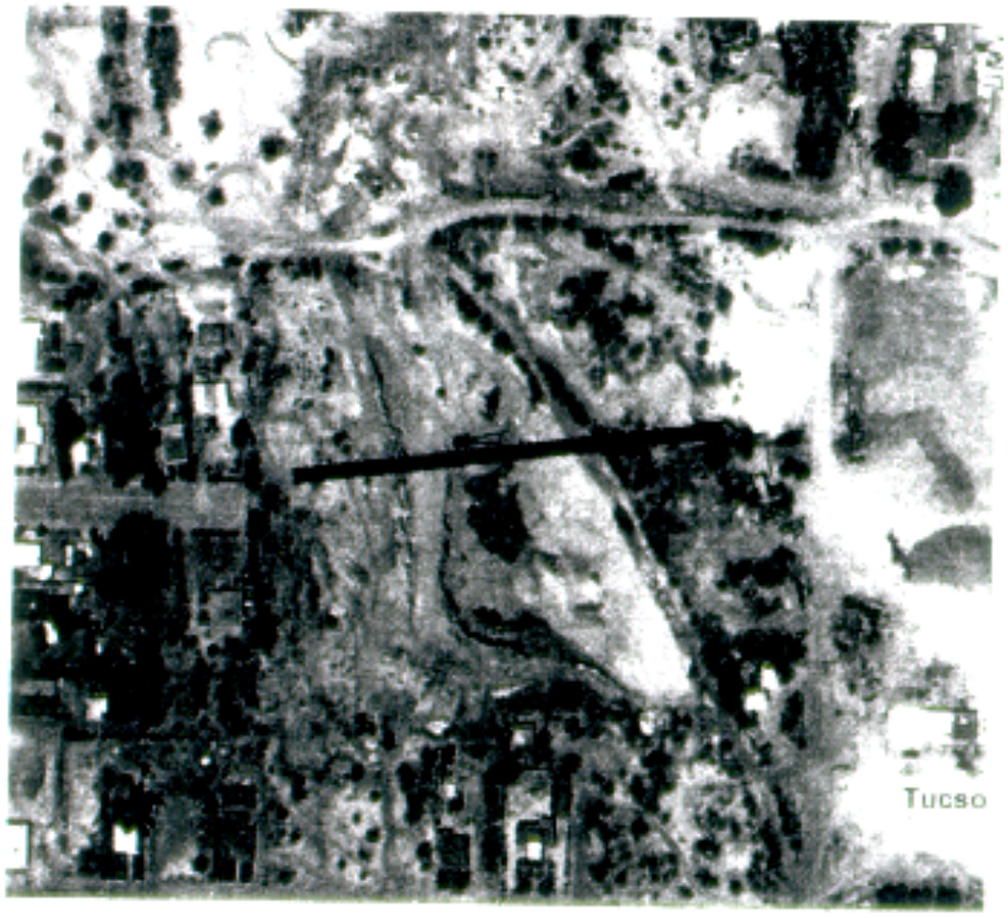
- La PP produit un décroissance dans le temps du potentiel
- Cette décroissance peut être modélisée par un circuit équivalent
- Le circuit équivalent de Cole-Cole contient 4 paramètres
- La PP spectrale mesure plusieurs fréquences afin de retrouver les 4 paramètres
- La PP dans le domaine temporel ne mesure que la résistivité et la chargeabilité
- La PP dans le temps est de loin la méthode la plus utilisée



Études de cas

Dépotoir de Rio Nuevo

Area photograph from 1953



Le problème, c’est que beaucoup de ces sites sont désormais en zones résidentielles.

Les sites d’enfouissements ont été établis en bordure de la ville dans des oroyos.

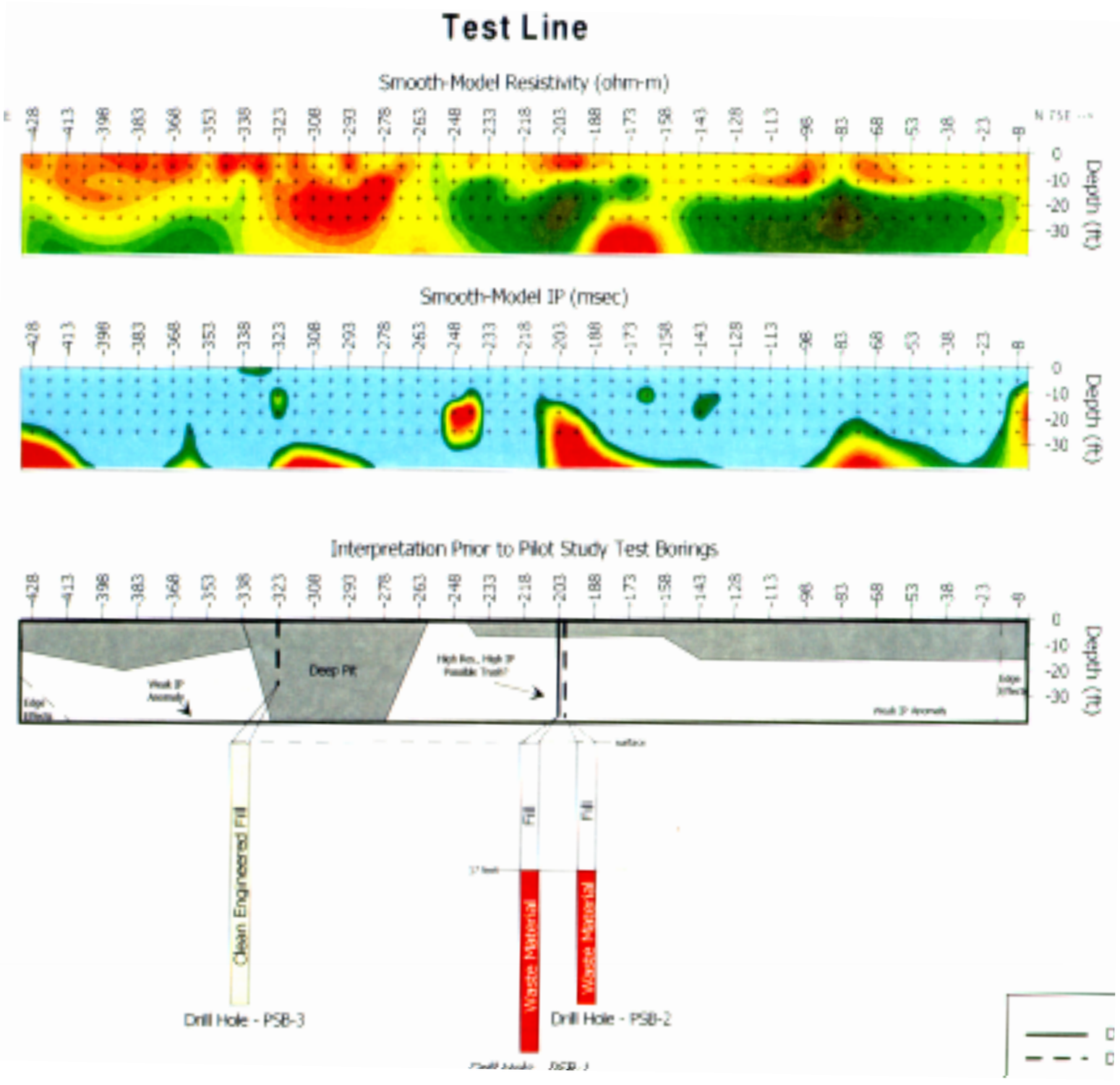
Area photograph from 1973

Cooper Aerial Survey Co. 1973

Dépotoir de Rio Nuevo

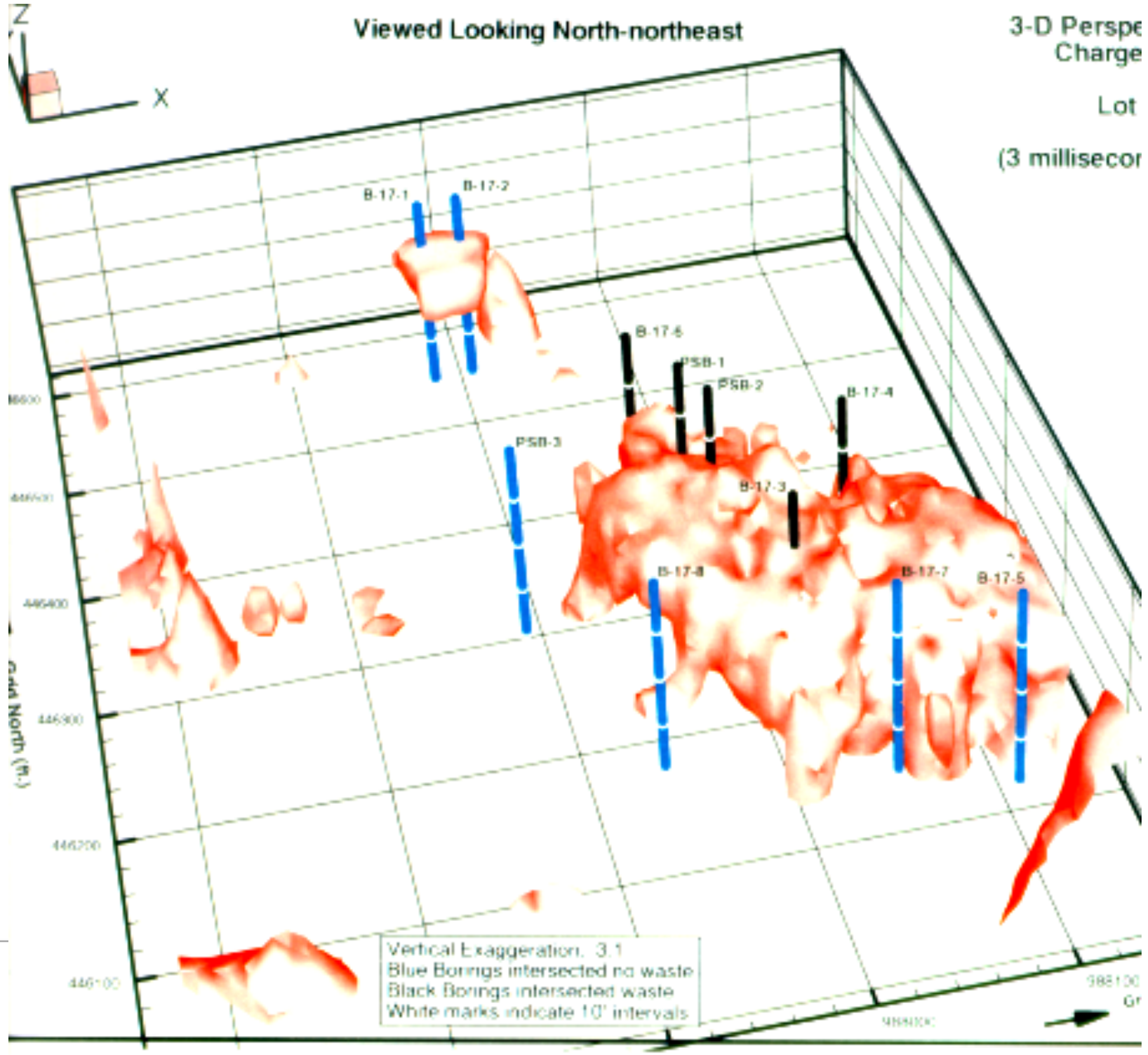
- Un test a été fait en 1998 pour déterminer l'applicabilité de la géophysique pour localiser les déchets enfouis.

- Des forages tests ont permis de vérifier la corrélation entre les anomalies PP et le contenu en déchets.



Dépotoir de Rio Nuevo

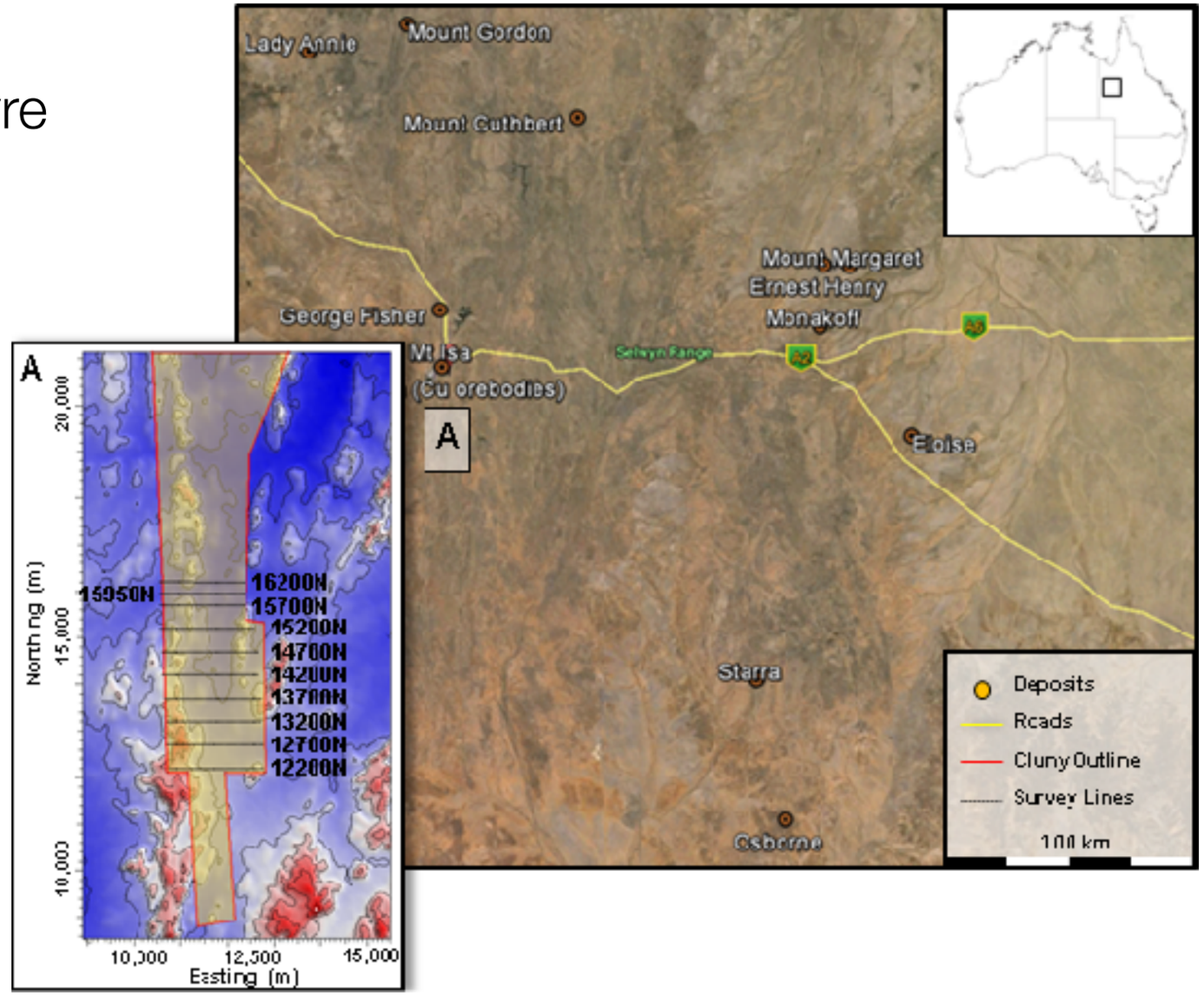
- Un levé 3D complet a été effectué.
- Détecte non seulement les déchets, mais aussi les poches remplies d’argile



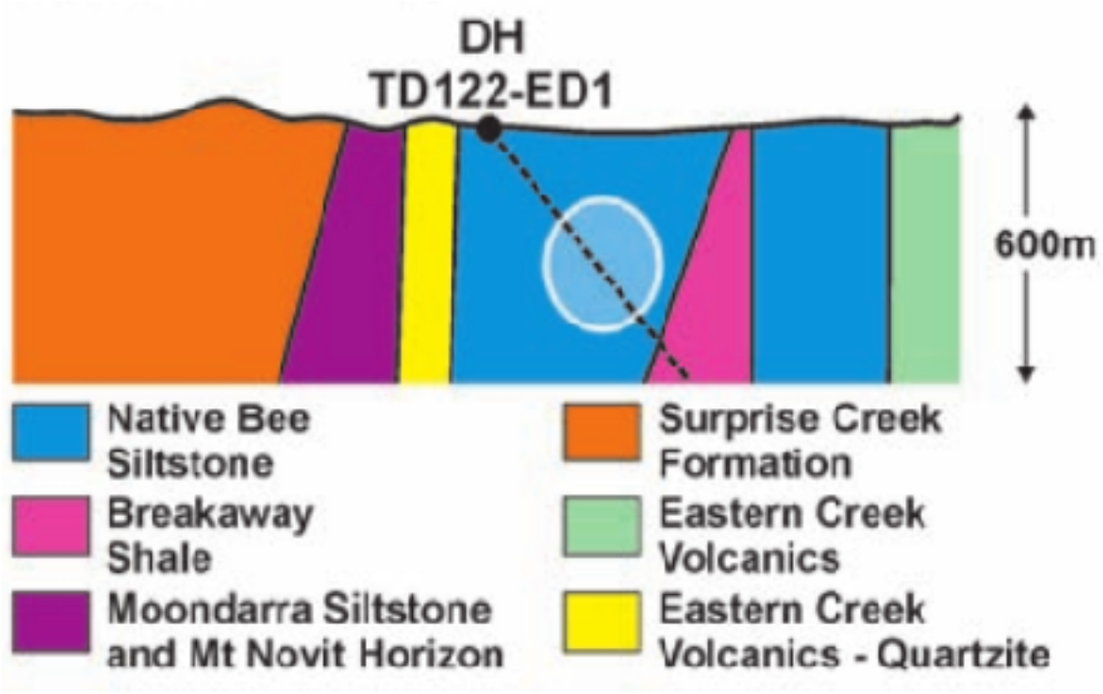
Problématique

La région du Mont Isa présentent de nombreux gisements contenant du plomb, du zinc, de l'argent, du cuivre et de l'or.

L'objectif est de détecter un minéralisation de Cuivre, souvent associée au Plomb/Zinc dans les siltstones du la formation du Native Bee.



Propriétés géophysiques

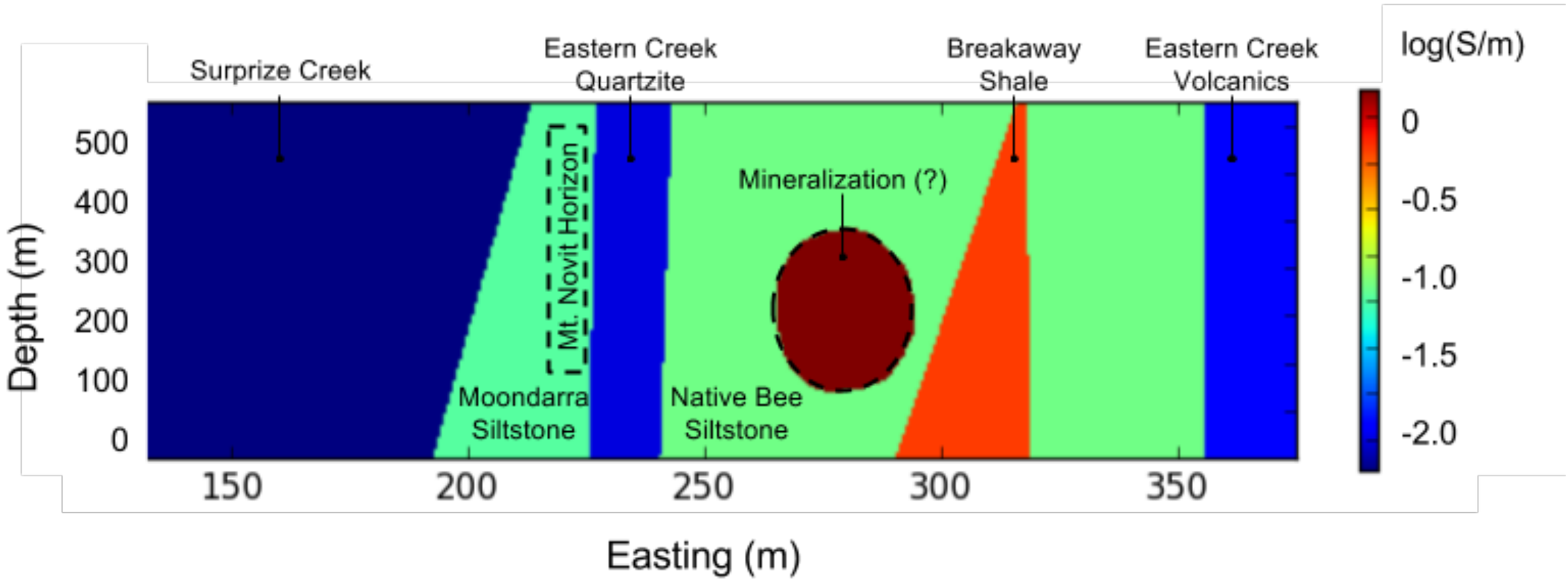


« Mt Novit Horizon consists of a sequence of mica schists, phyllites and metasiltstones containing gossanous material of coarse grained pyrite, pyrrhotite, and magnetite, with variable sphalerite, galena, marcasite, chalcopyrite »

Unité	**Résistivité ($\Omega \cdot m$)**	**Chargeabilité**
Native Bee Siltstone	Modérée (~10)	Faible
Moondarra Siltstone	Modérée (~10)	Faible
Breakaway Shale	Très faible (~0.1)	Faible à nulle
Mt Novit Horizon	Faible (~1)	Élevée
Surprise Creek Formation	Élevée (~1000)	Nulle
Eastern Creek Volcanics	Élevée (~1000)	Nulle

Méthodes géophysiques

Avant l'inversion, une expérience d'inversion est faite pour voir s'il est possible de détecter la zone minéralisée conductrice



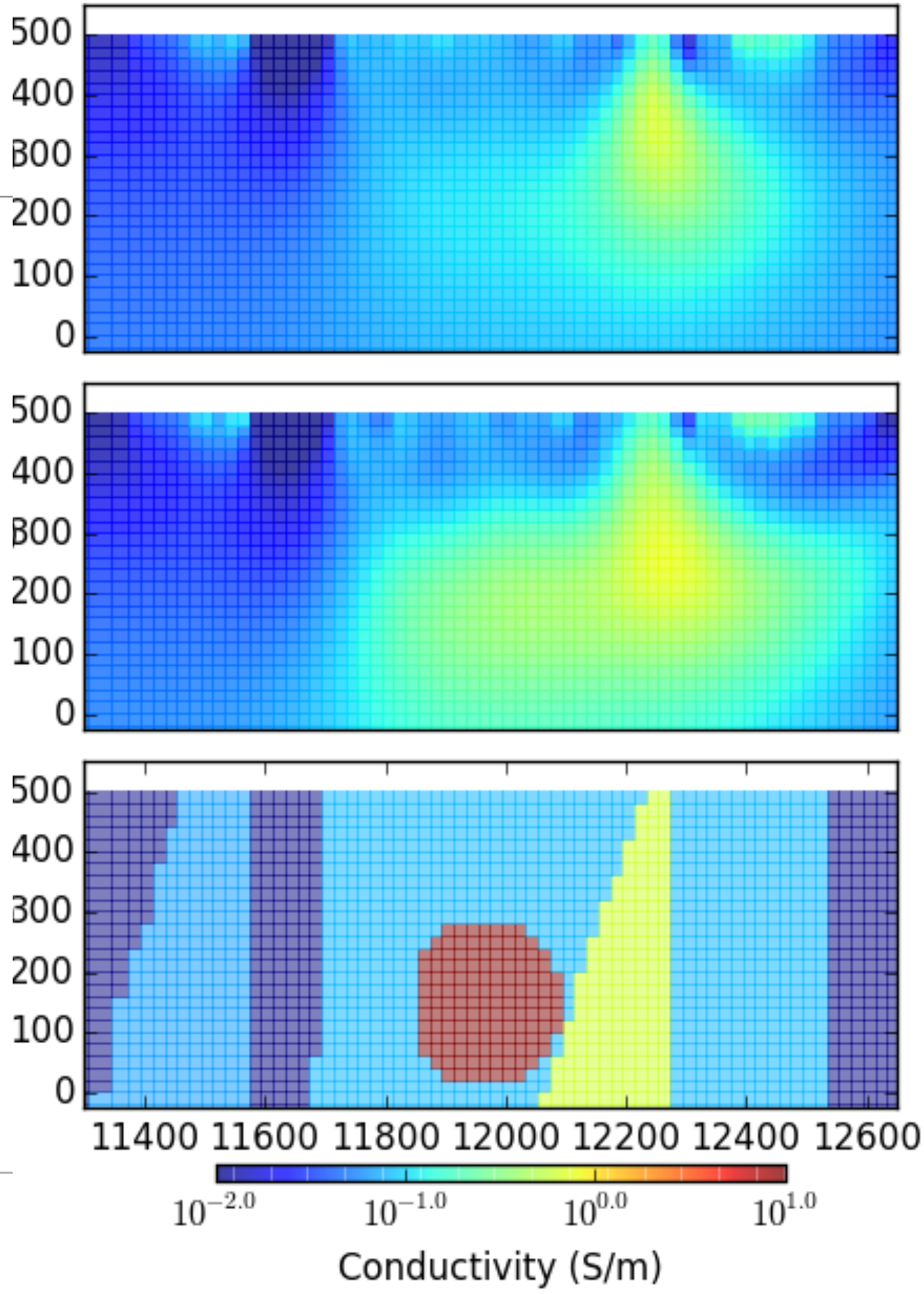
Méthodes géophysiques

- Le modèle du haut est le modèle inversé, sans la zone minéralisée conductrice

- Le modèle du milieu est le modèle inversé contenant la minéralisation conductrice.

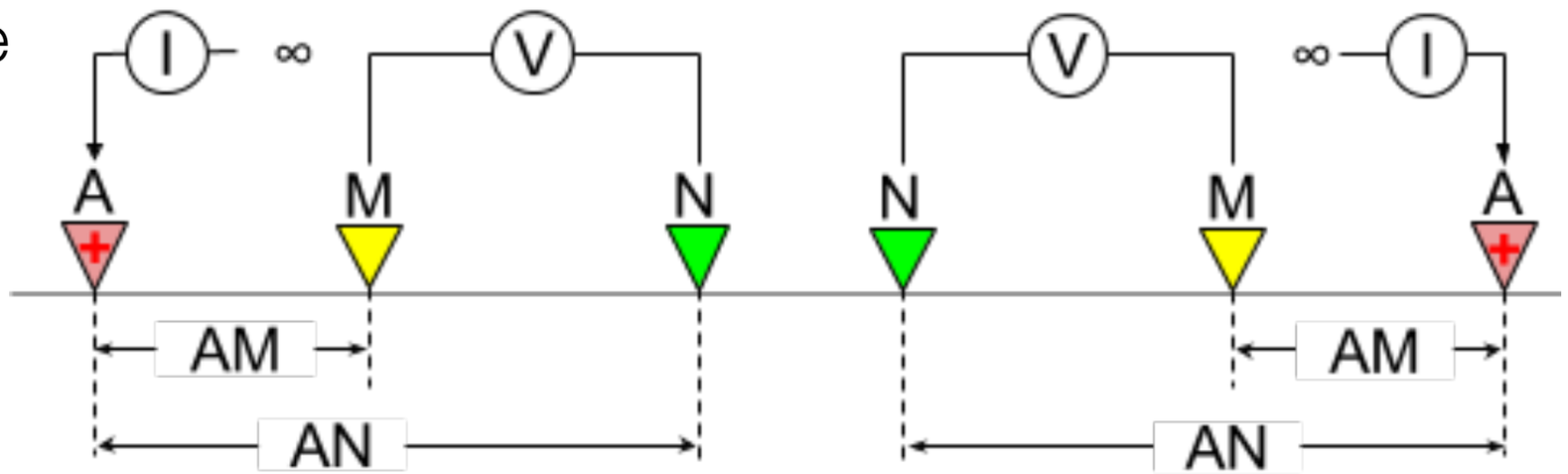
- On détecte la présence de la zone minéralisée mais on ne parvient pas à la différencier des shales conducteurs.

- Une propriété géophysique supplémentaire est nécessaire



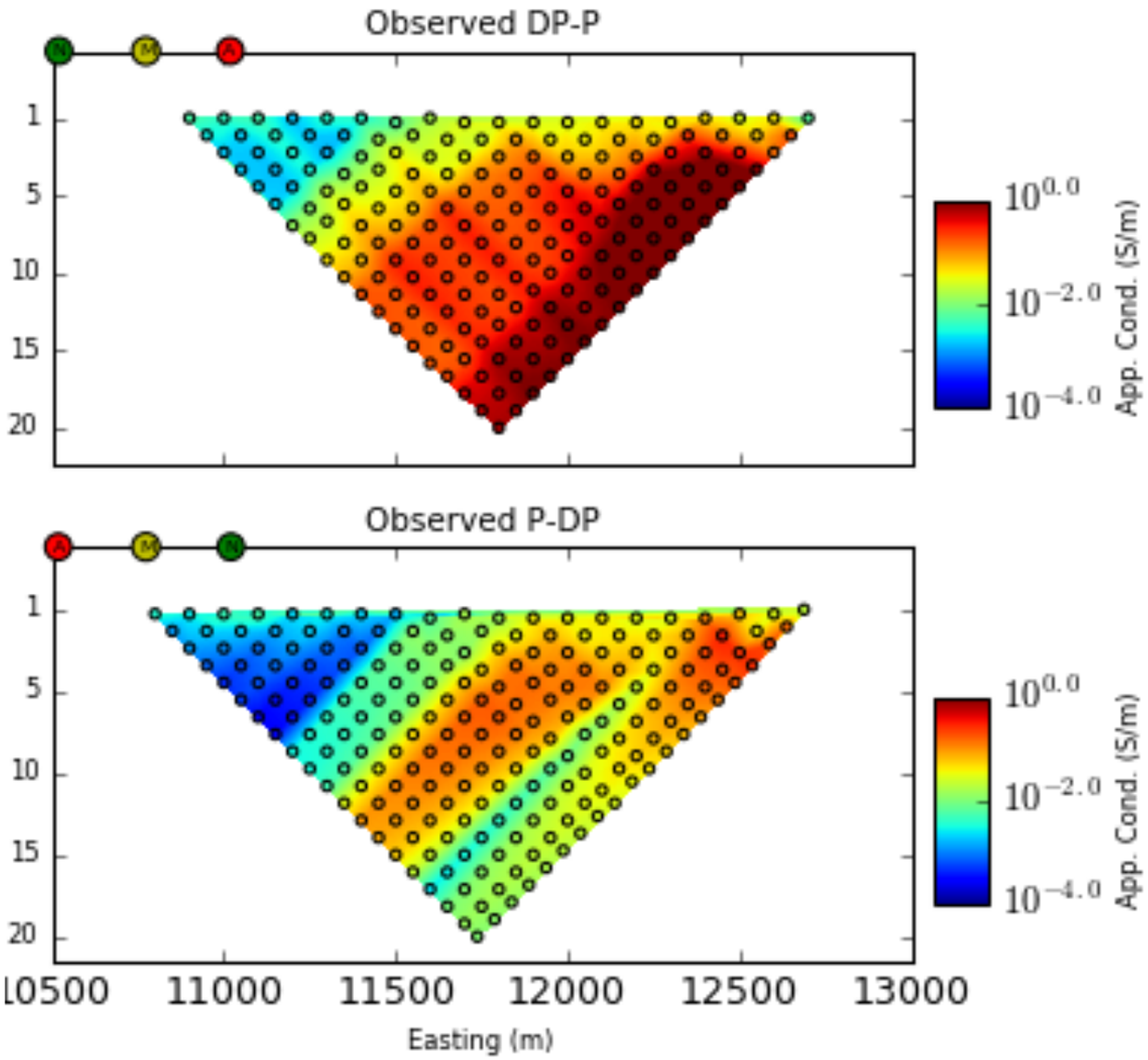
Acquisition des données

- Système MIMDAS à 100 électrodes, chaque électrode peut agir comme potentiel ou courant
- Superficie du site: 2km x 5 km
- 10 lignes 2D orientées Est-Ouest (perpendiculaire à direction des unités)
- 21 positions d'injection avec 20 lectures de potentiel par station
- Espacement des électrodes: 100 m
- Configuration: Pôle-dipôle

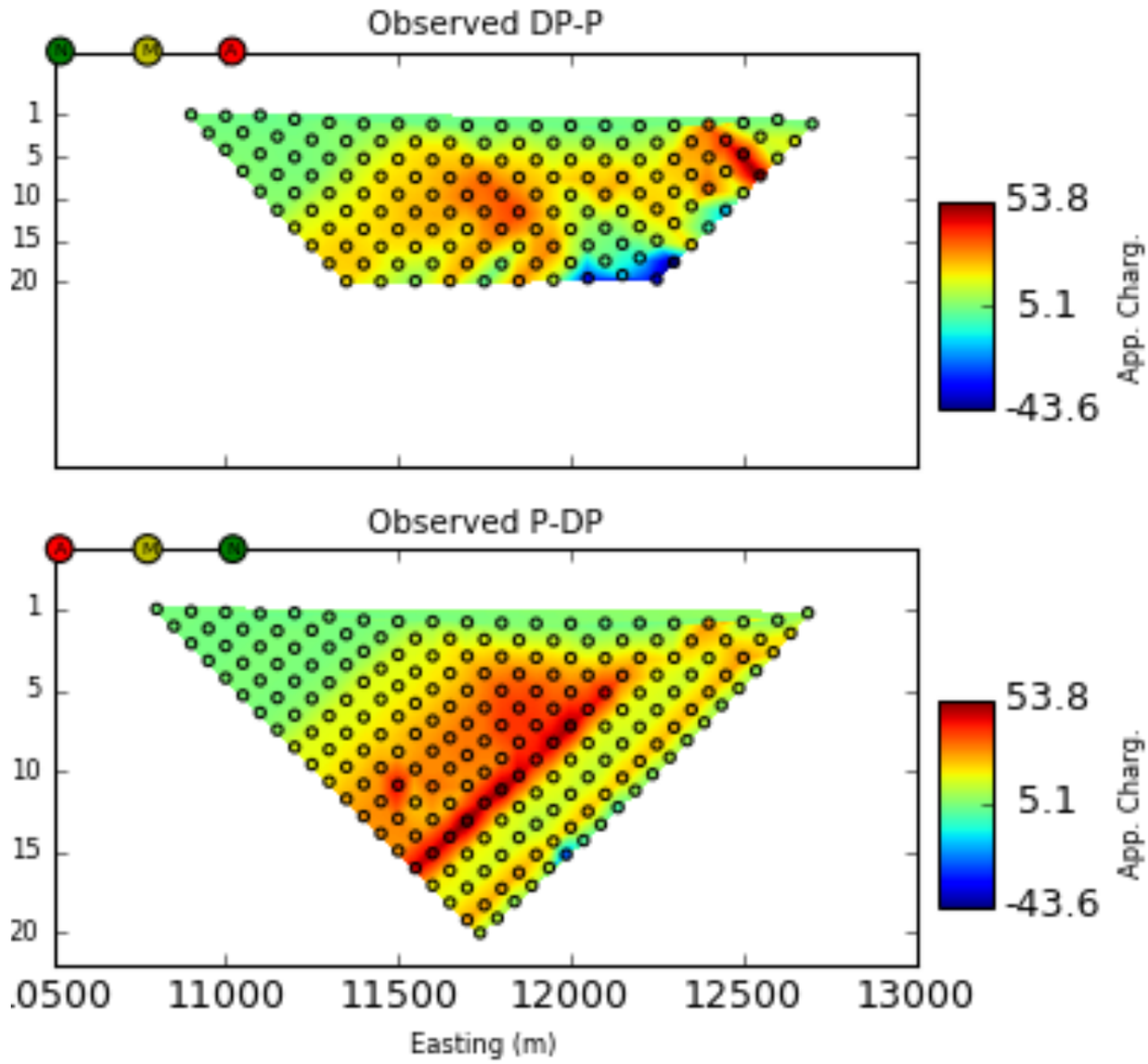


Traitement des données

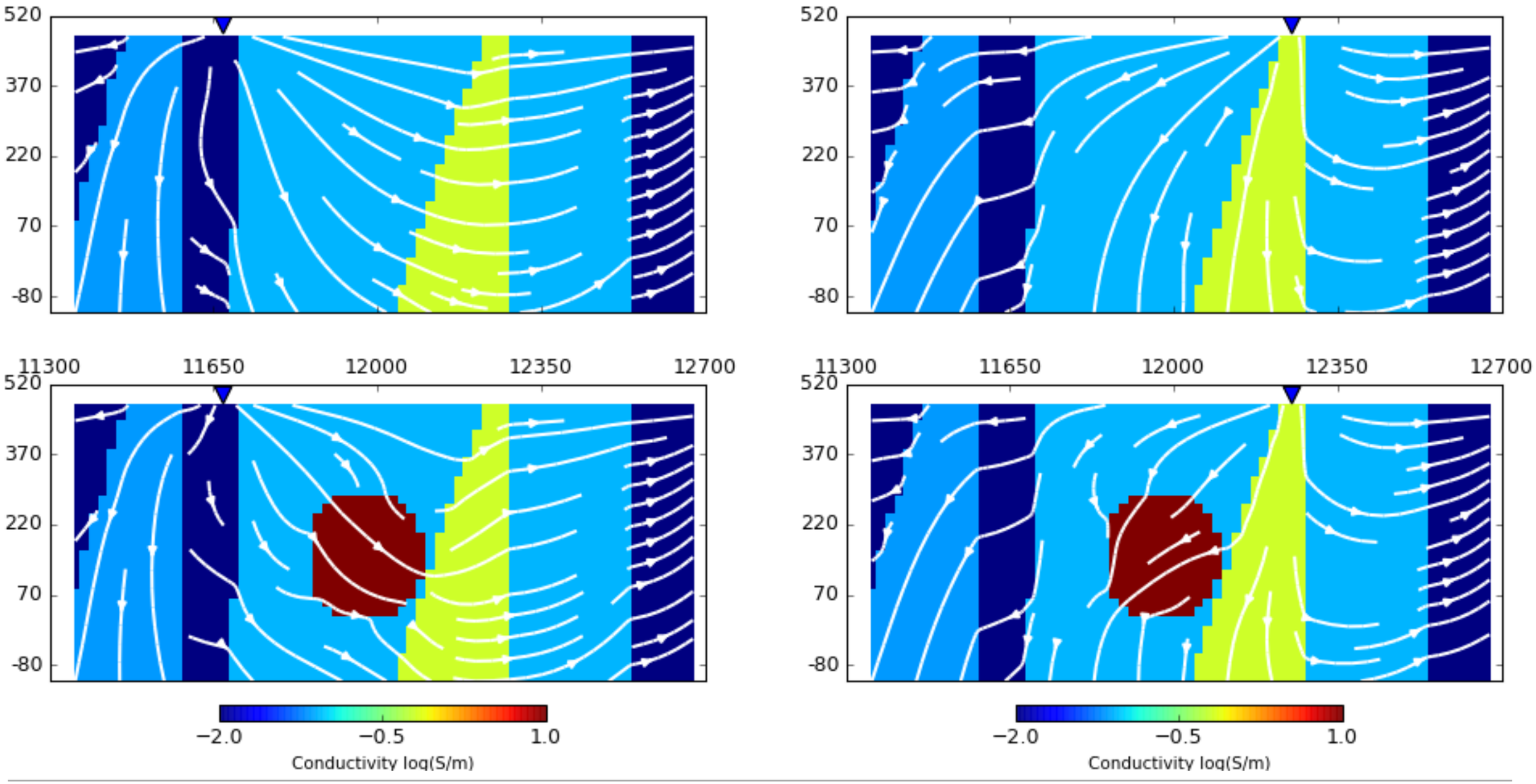
Pseudo-section de résistivité



Pseudo-section de chargeabilité

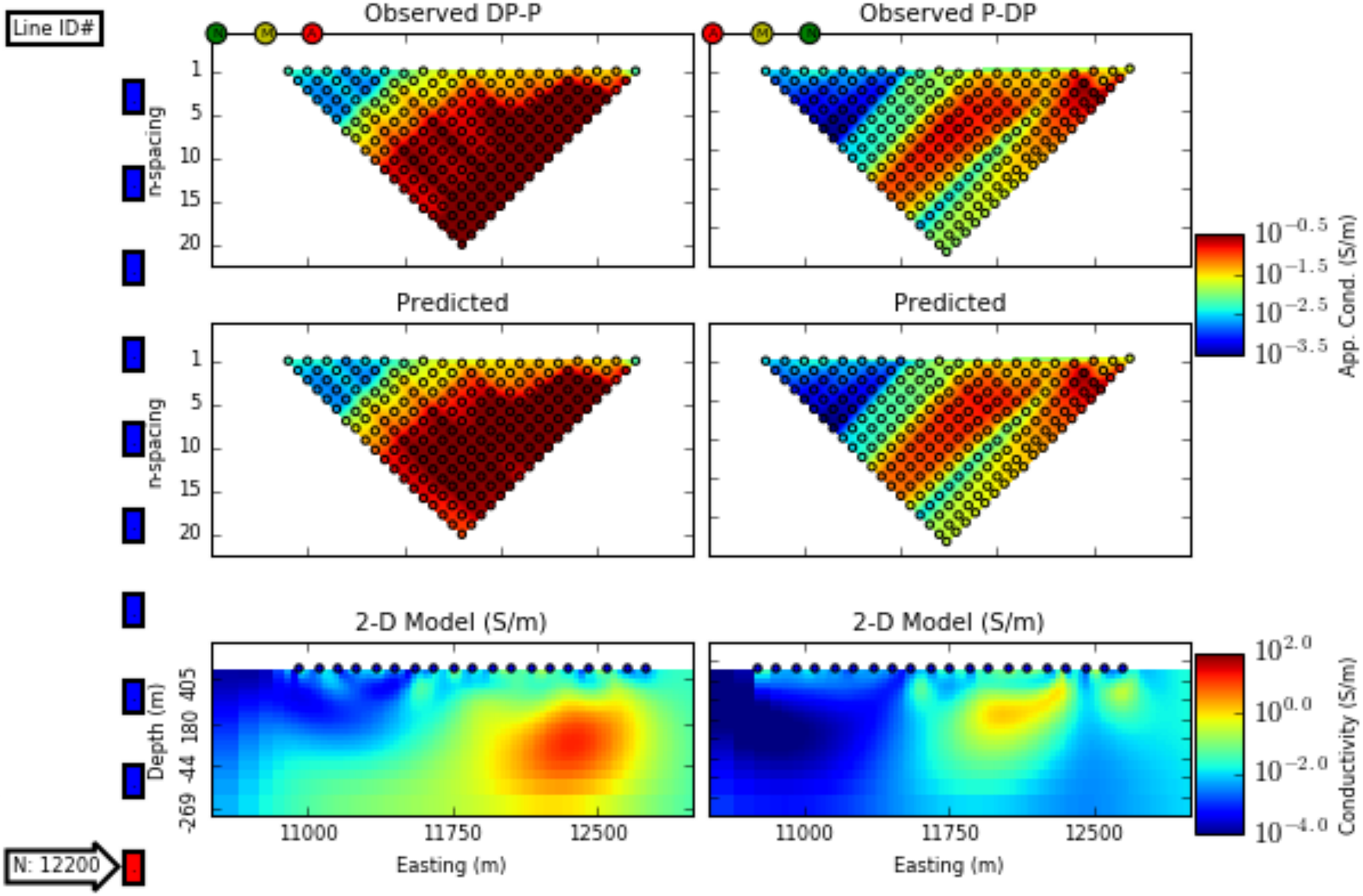


Traitement des données

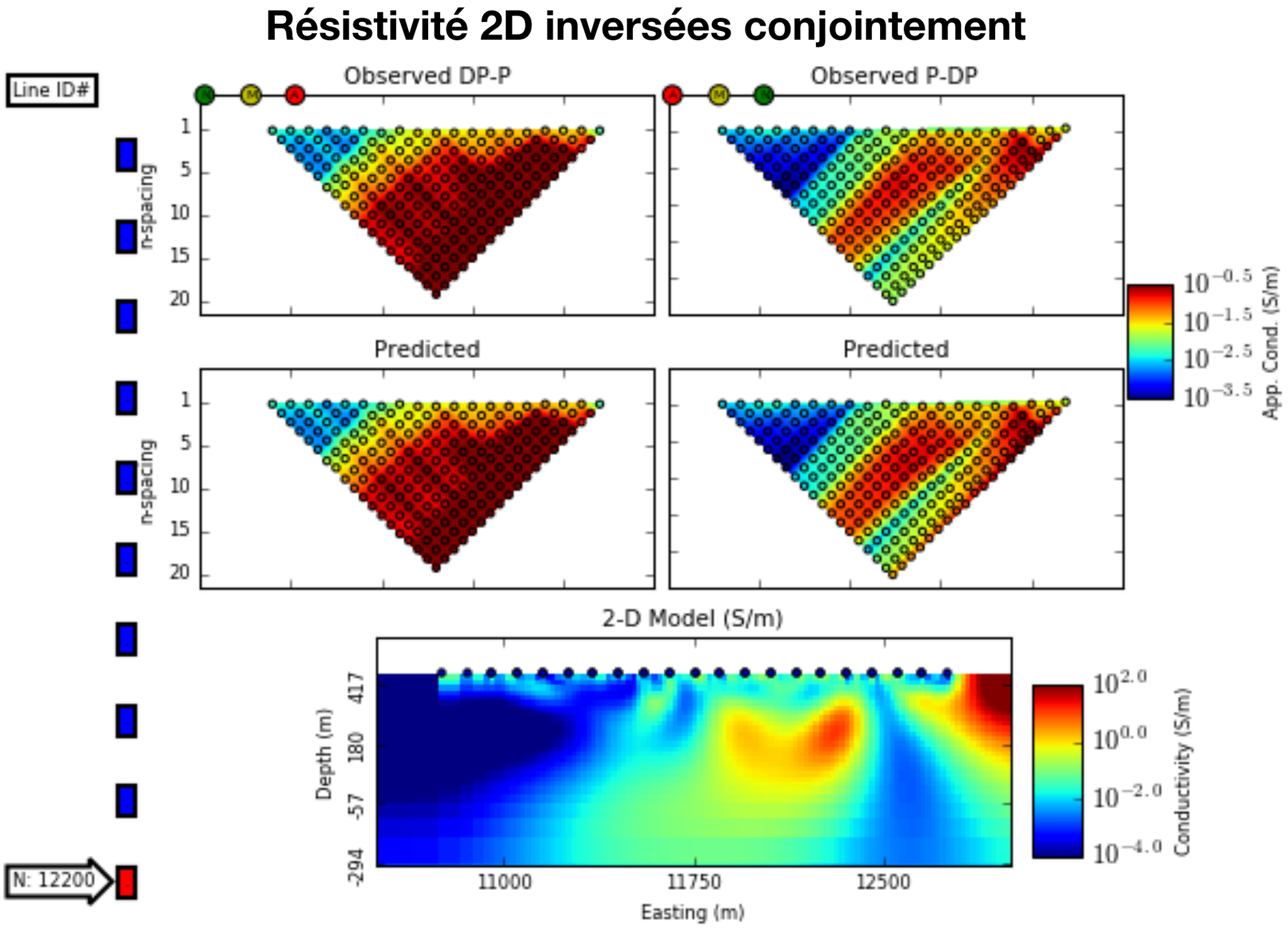


Traitement des données

Résistivité 2D inversée séparément pour chaque dispositif

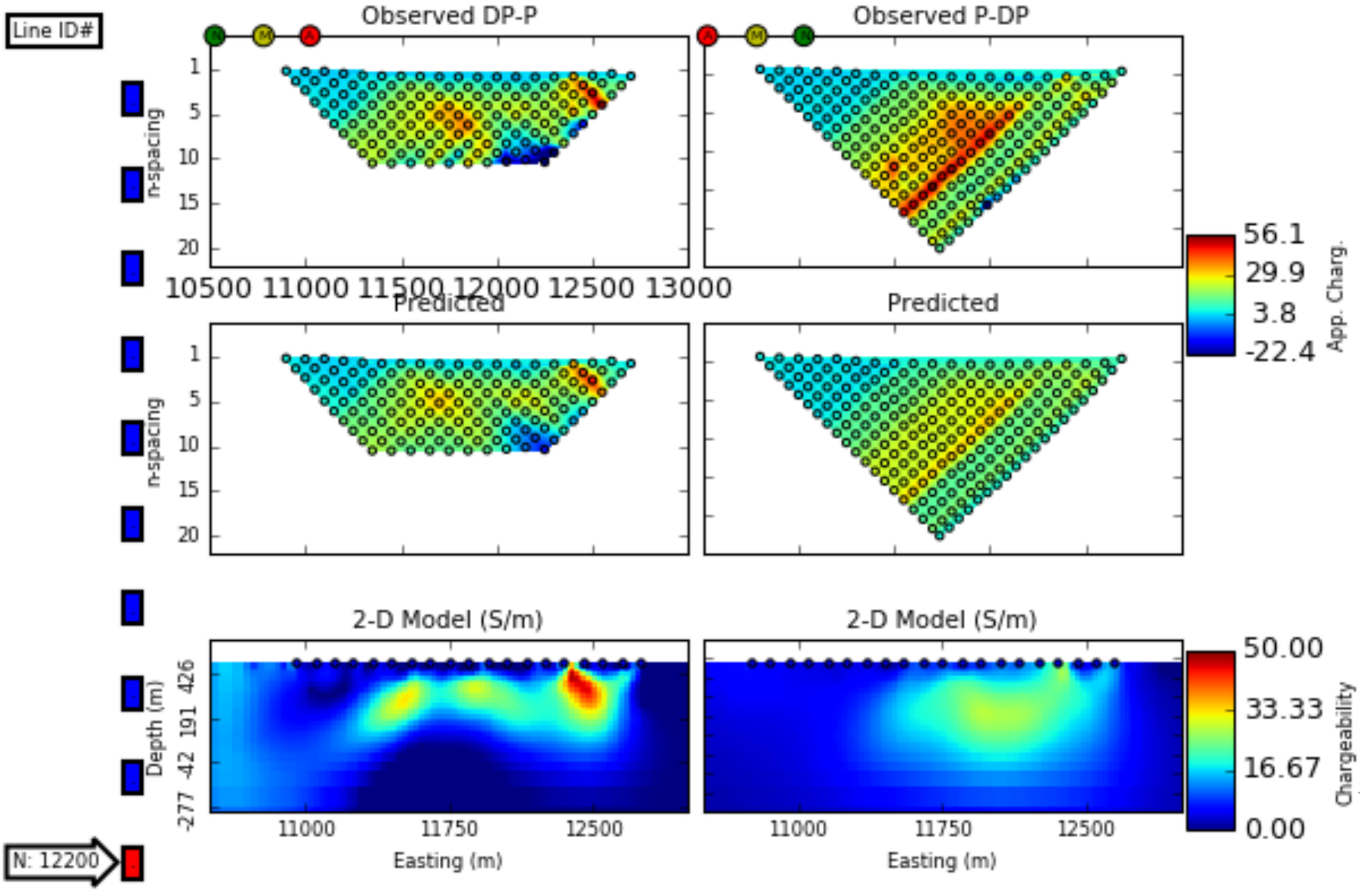


Traitement des données



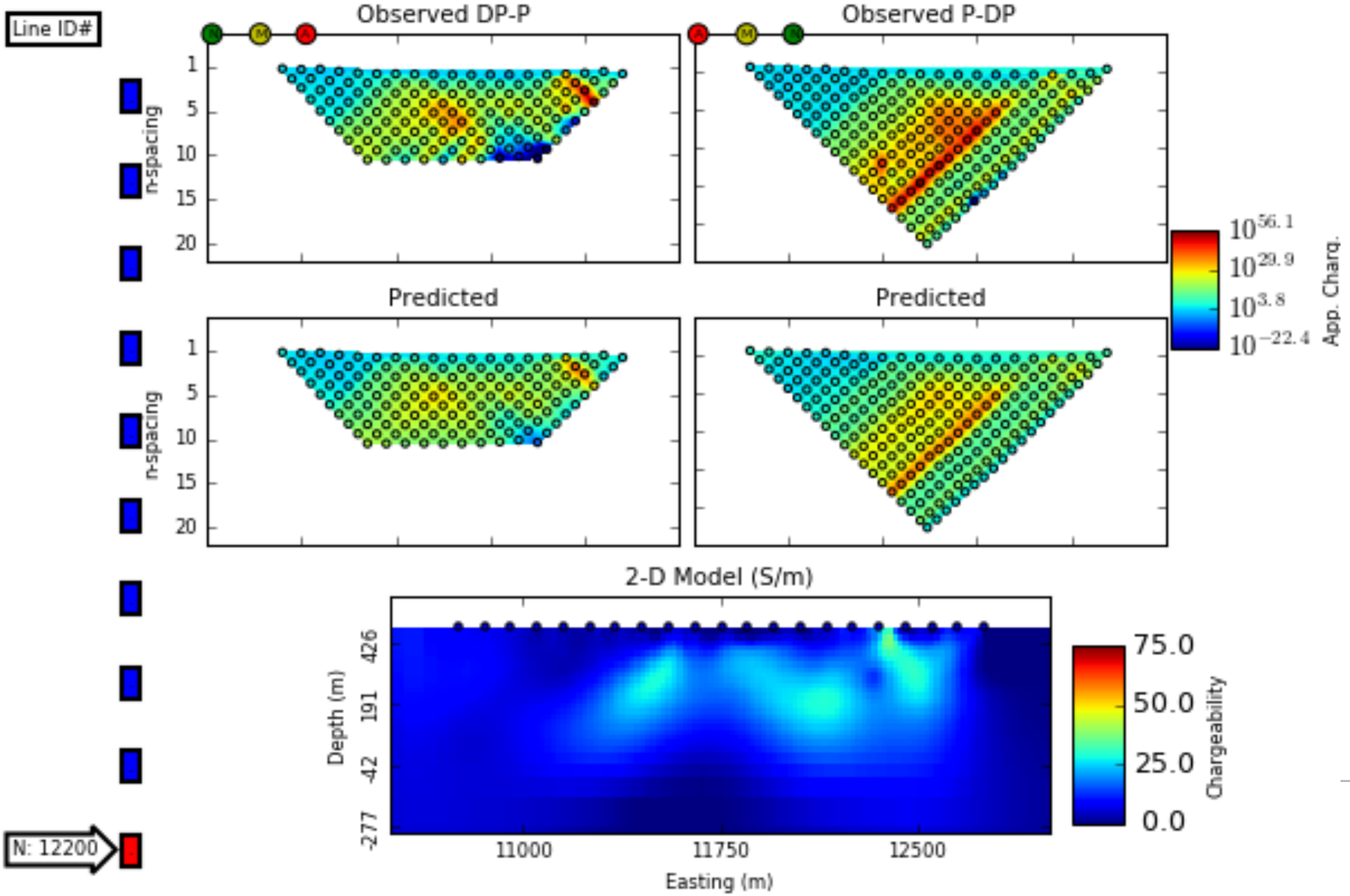
Traitement des données

Chargeabilité 2D inversée séparément



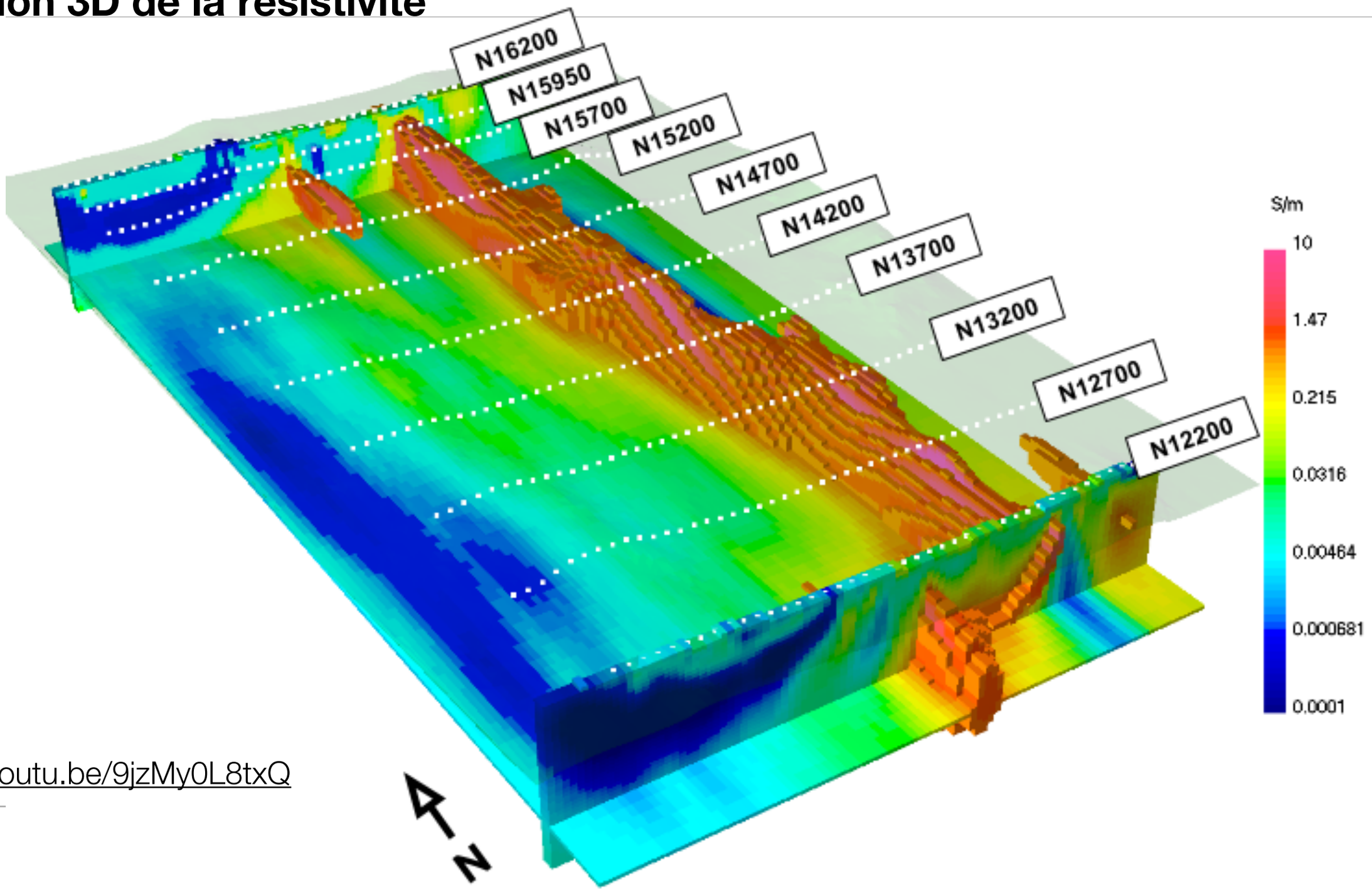
Traitement des données

Chargeabilité 2D inversée conjointement



Traitement des données

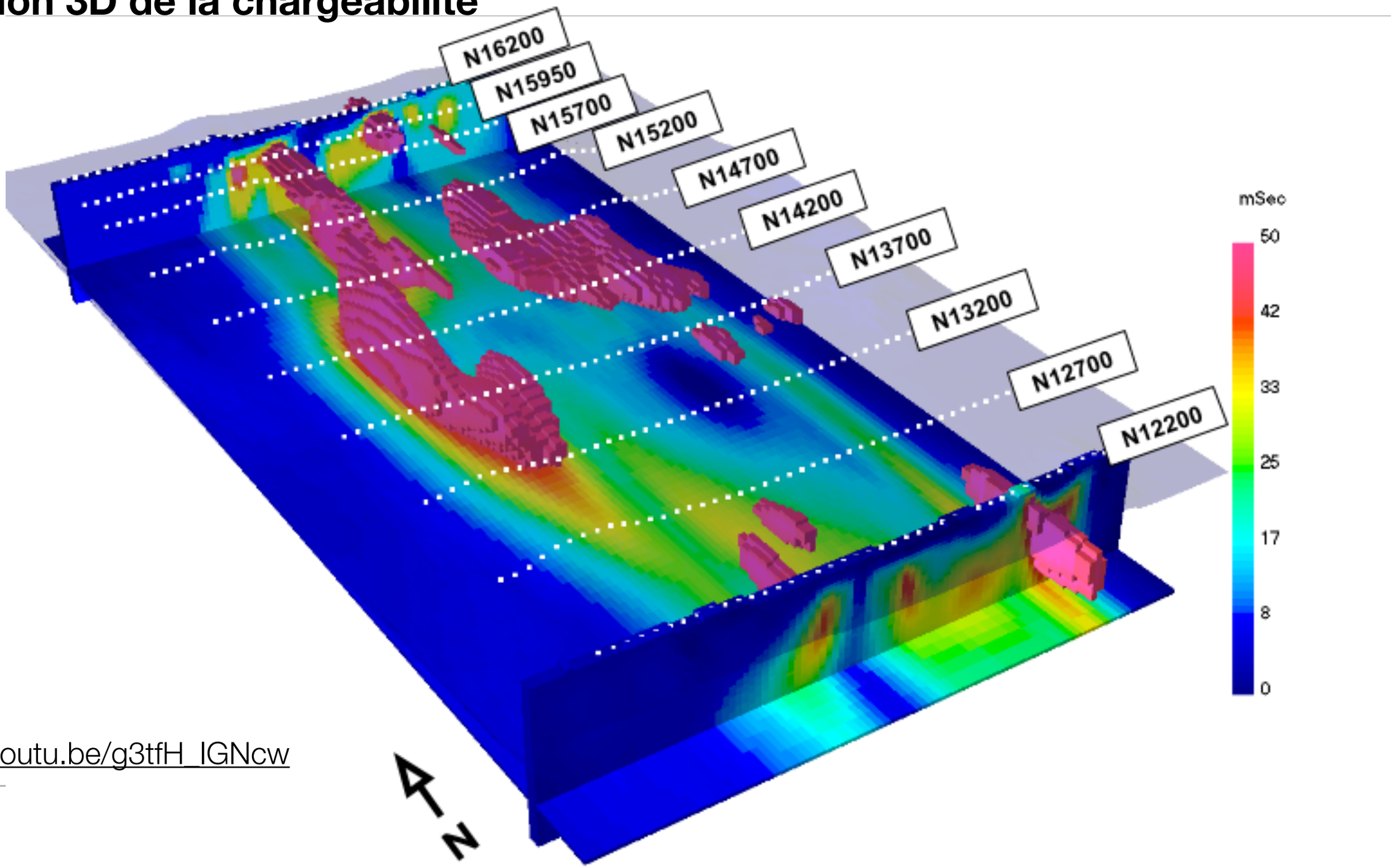
Inversion 3D de la résistivité



https://youtu.be/9jzMy0L8txQ

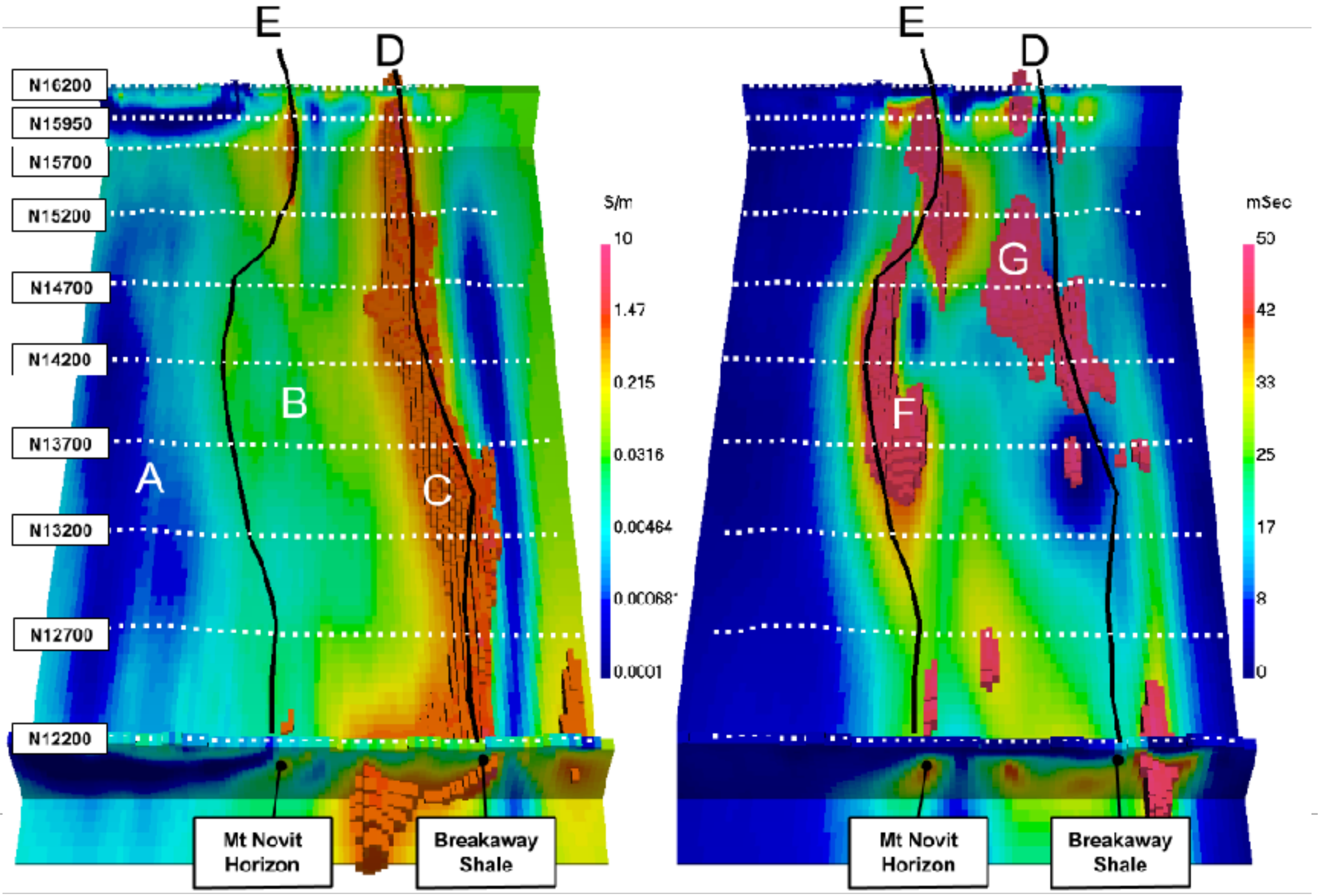
Traitement des données

Inversion 3D de la chargeabilité

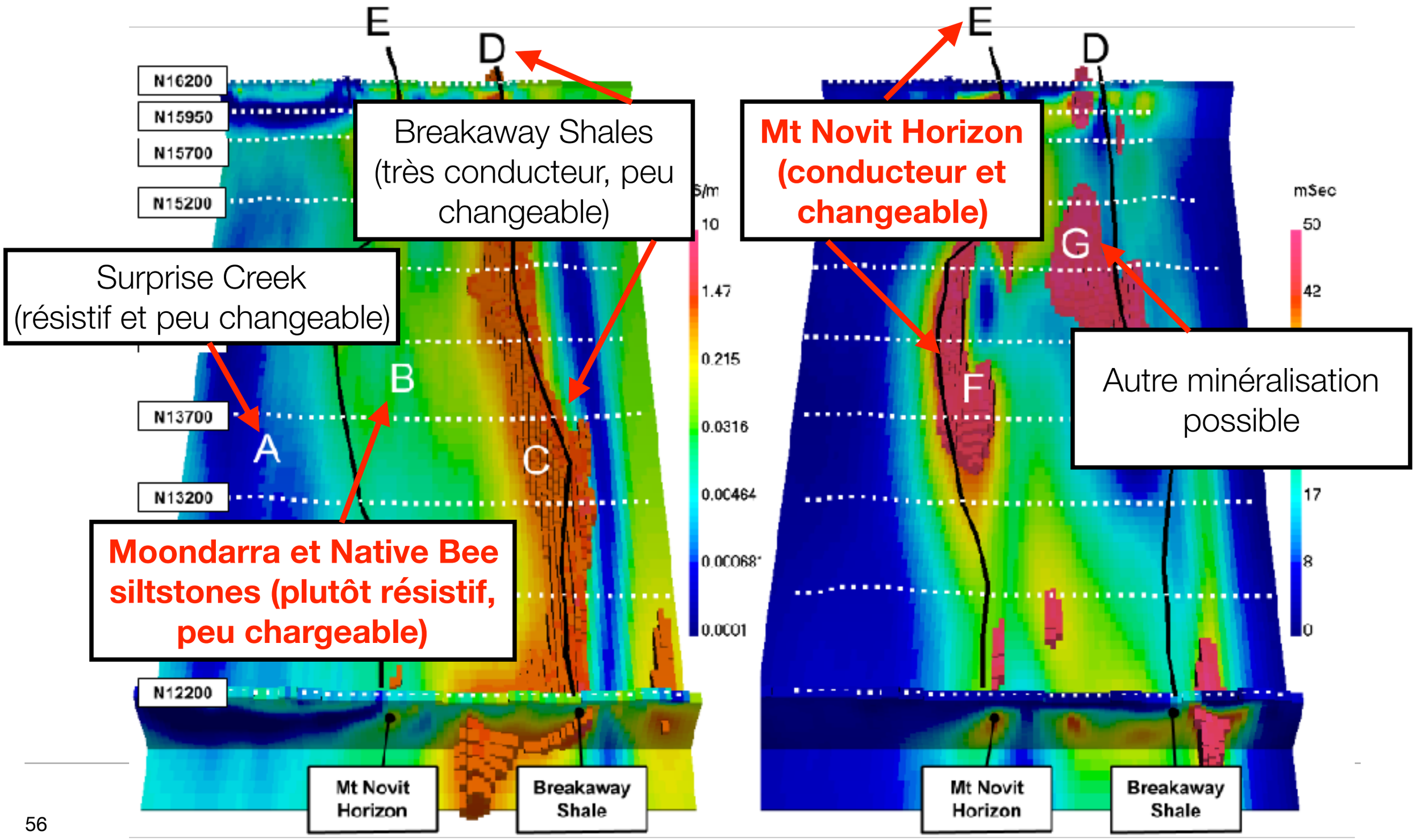


https://youtu.be/g3tfH_IGNcw

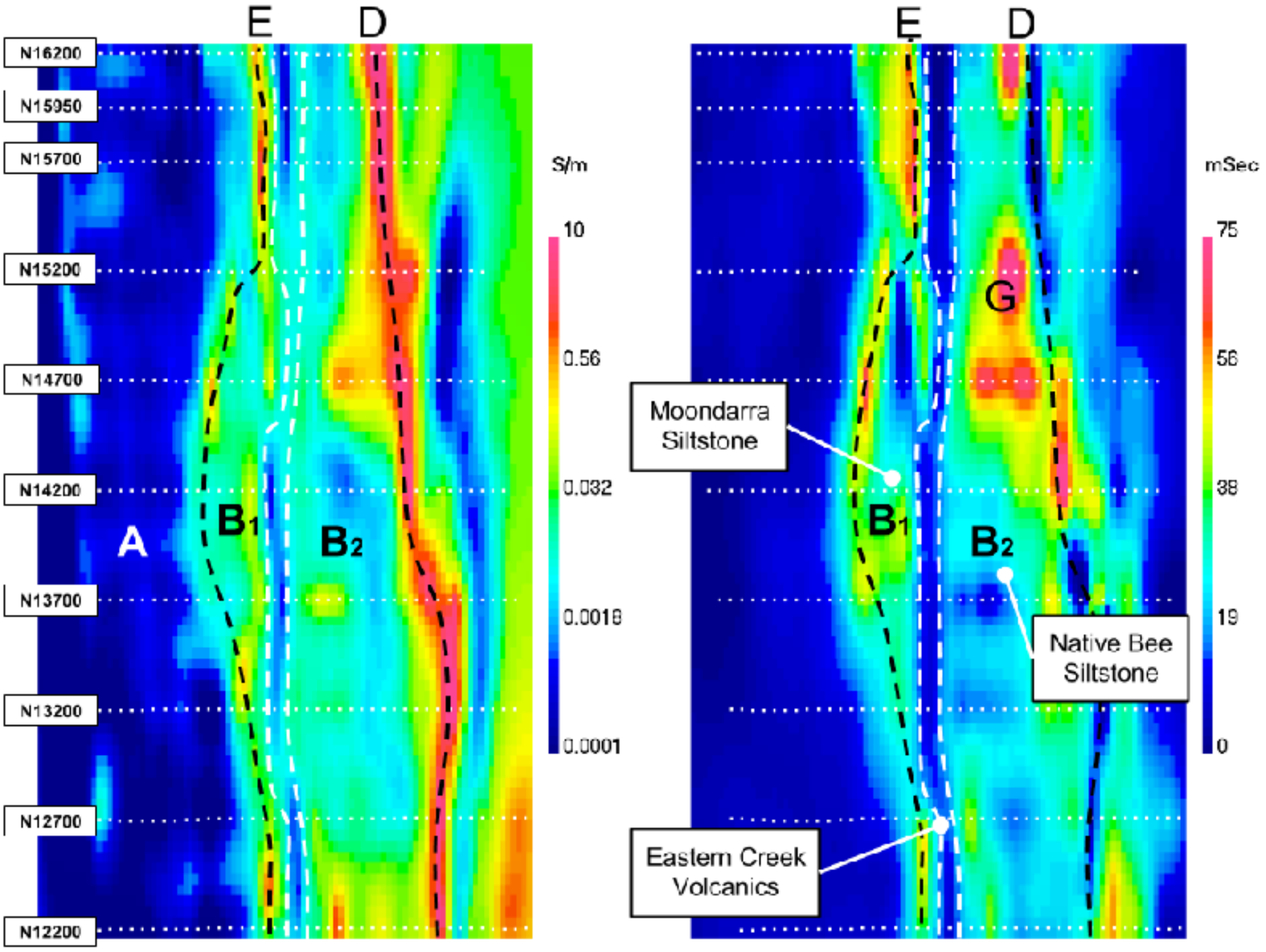
Interprétation



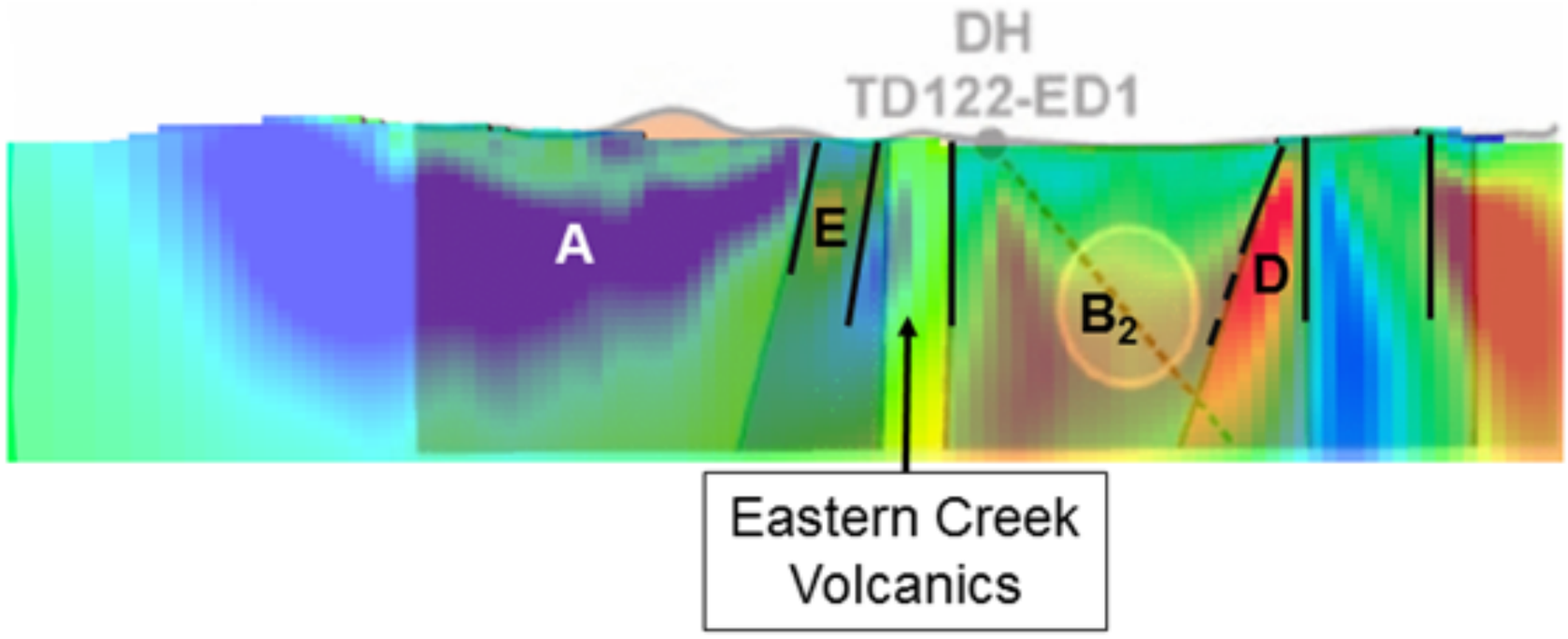
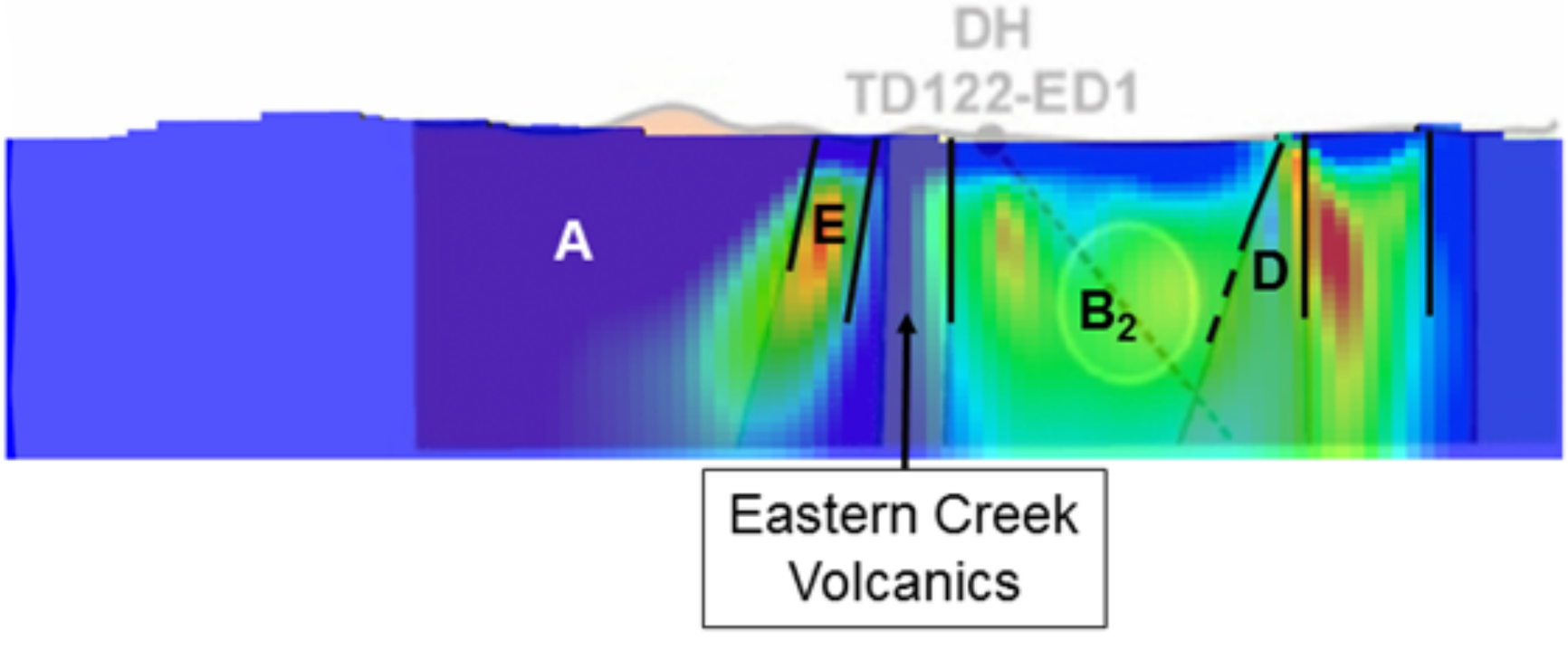
Interprétation



Interprétation



Synthèse

Les zones possibles de minéralisation sont identifiées comme:

- E: Horizon de Mt Novit
- B2: Native Bee Siltstone