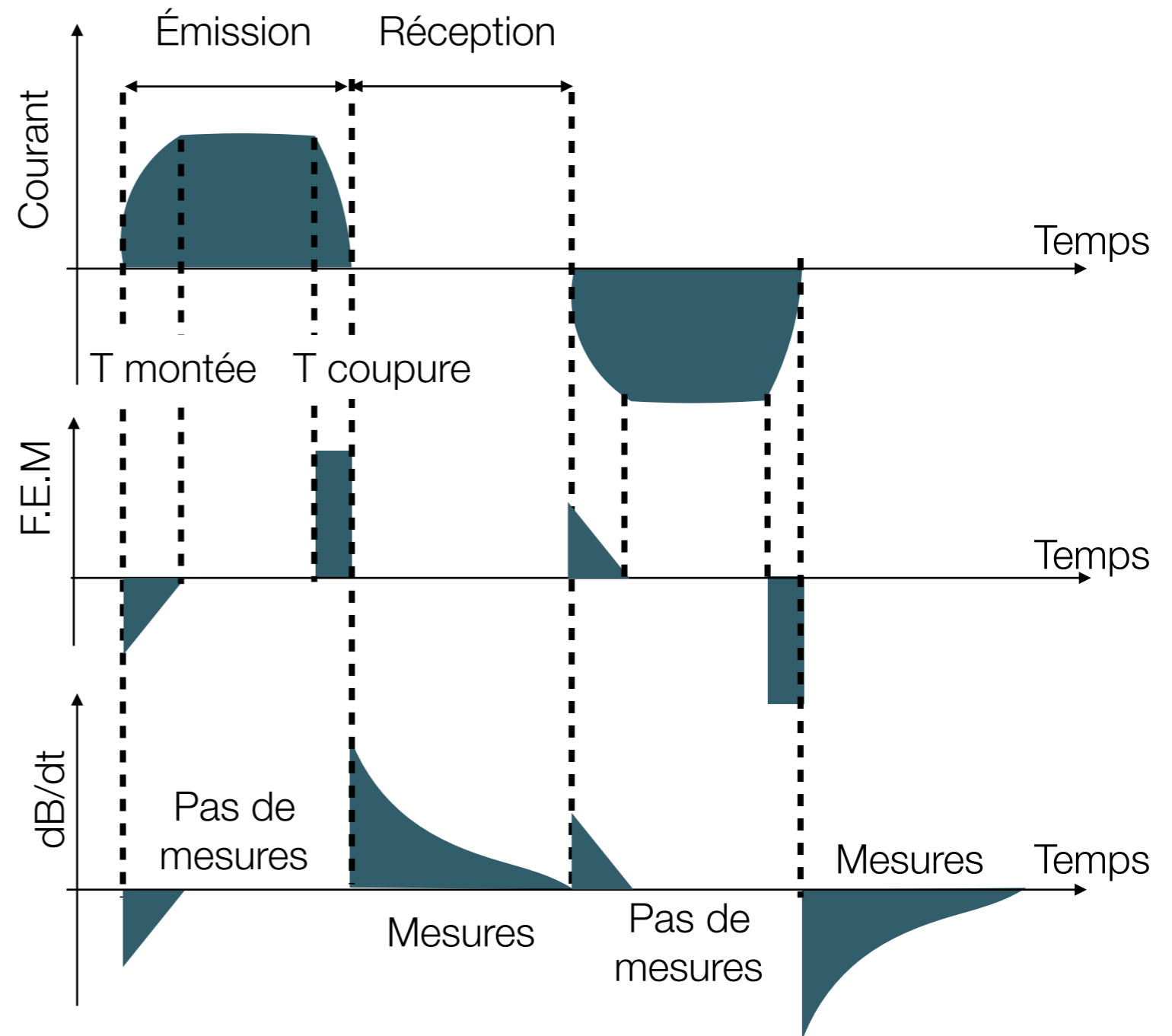


Mise en oeuvre

Mesures TDEM

Principes de base TEM

1. On injecte un courant électrique dans une boucle pendant un certain temps.
2. On coupe le courant pendant une période dite « temps mort ».
3. Les champs secondaires sont lus pendant la période temps mort, en l'absence du champ primaire.
4. À chaque point de mesure, plusieurs lectures du champ à différents canaux de temps.



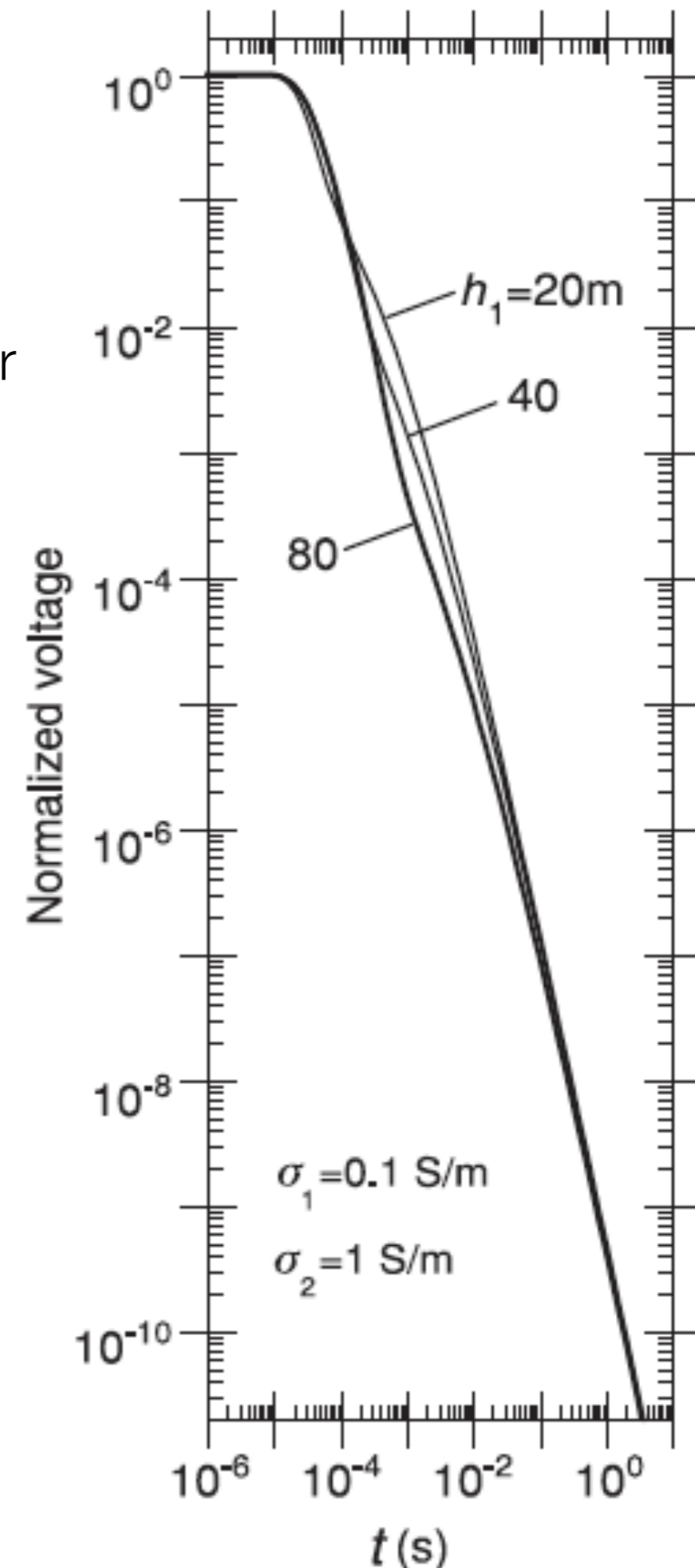
Temps de coupure

Le temps requis pour couper le courant au transmetteur est un paramètre important.

- Les mesures au récepteur ne débutent qu'après la coupure complète
- Le temps de coupure croît avec la grandeur de la boucle.
- Pour des mesures en faible profondeur, des faibles temps de coupure sont nécessaires.


Loop Size	Turnoff Time
10 x 10 meter loop	1.2 μ s
20 x 20 meter loop	1.5
40 x 40 meter loop	3.0
100 x 100 meter loop	6.0


Temps de coupure pour le NanoTEM




Type de courant utilisé

Courant du MEGATEM

 270 Hz 0.6 ms

 150 Hz 1.0 ms

 90 Hz 2.0 ms

 30 Hz 4.0 ms

 15 Hz 6.0 ms

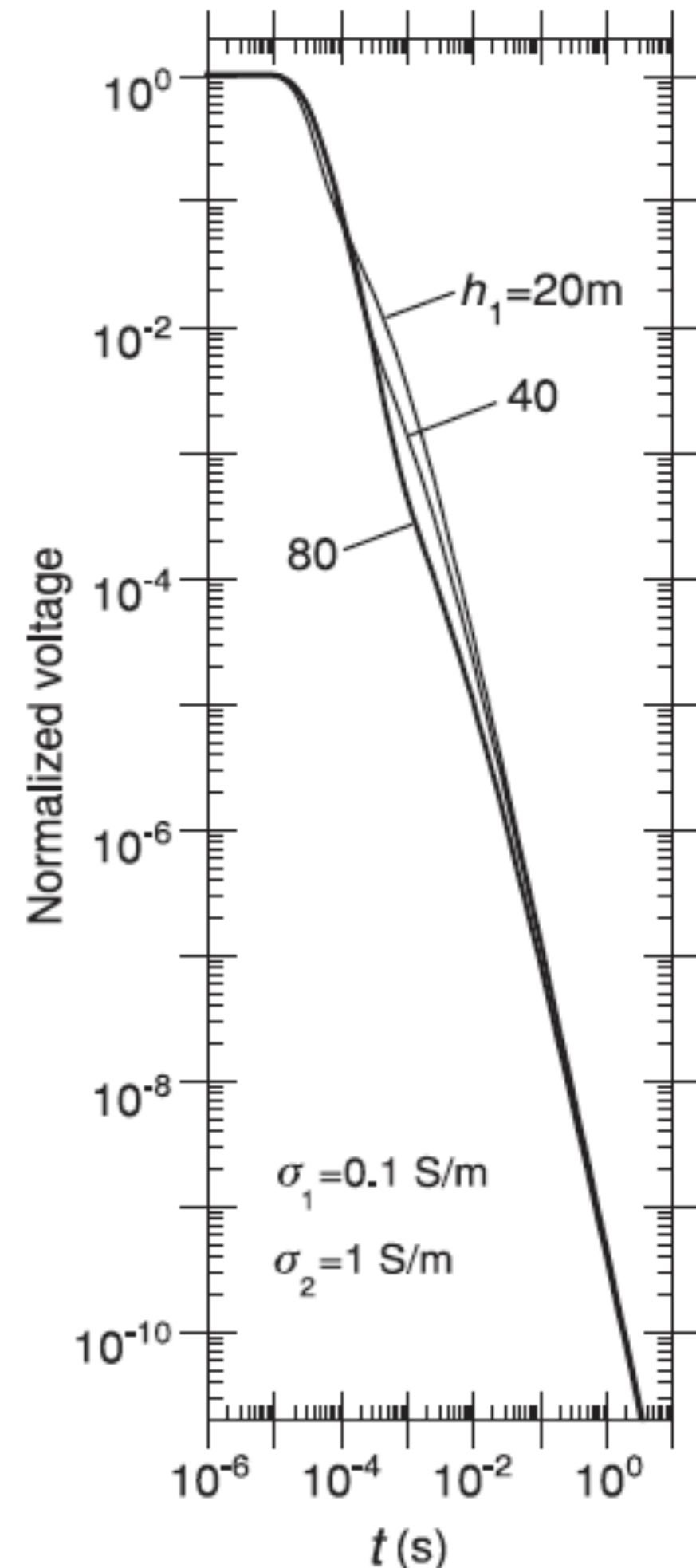
En pratique, la forme du courant au transmetteur n'a pas la forme d'un pic, mais d'un signal plutôt continu.

La durée du signal affecte la profondeur de pénétration du levé TDEM.

La forme affecte aussi le temps de coupure, ce qui influence la profondeur la plus faible pouvant être mesurée.

Profondeur d'investigation

- La profondeur d'investigation dépend du temps d'écoute.
- L'amplitude du signal décroît cependant avec le temps.
- Le bruit deviendra important en bas d'un certain niveau de signal.
- Pour augmenter la profondeur de pénétration, il faut donc augmenter le rapport signal sur bruit.
- Ceci peut être fait en augmentant la puissance du champ magnétique émis.



Moment dipolaire en TDEM

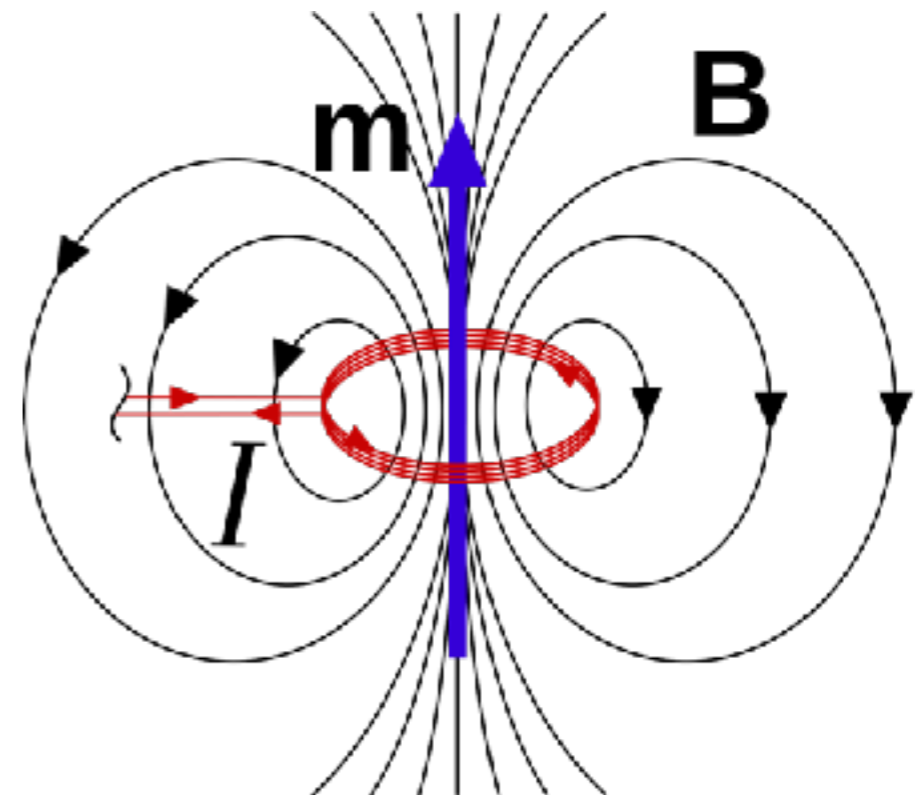
Le champ en z créé par un dipôle

$$H_z = \frac{m}{4\pi r^3} \left[\frac{3(x^2 + y^2)}{r^2} - 2 \right]$$

avec m le **moment dipolaire** ou magnétique:

$$m = NIS \ [A \cdot m^2]$$

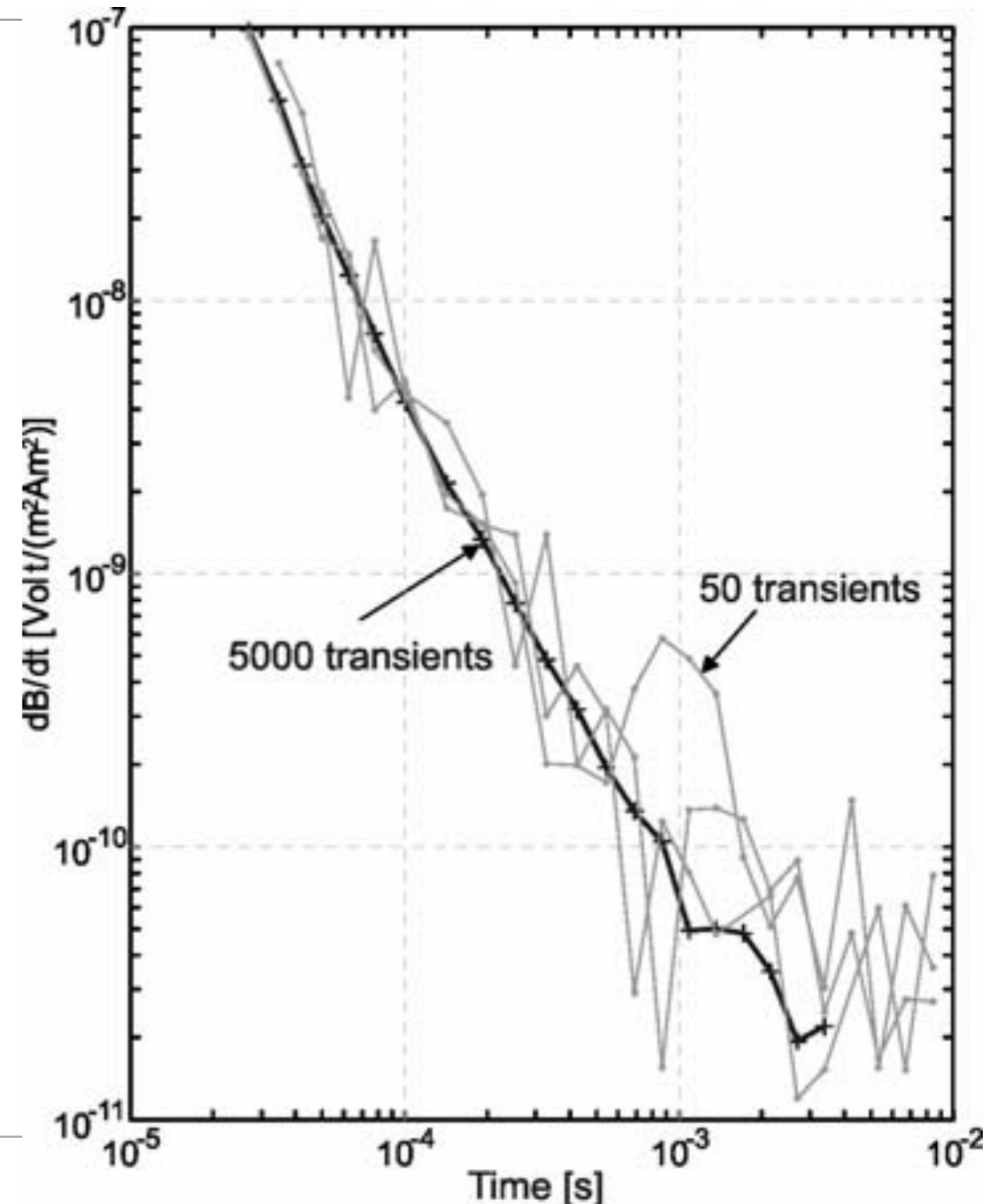
où N et S sont le nombre de tours et la surface de la boucle et I est le courant.



Diminution du bruit

Pour diminuer le bruit et donc augmenter la profondeur de pénétration:

- Augmenter le moment magnétique
 - Augmenter le nombre de tour;
 - Augmenter l'ampérage: dangereux et saturation au sol. Saturation en aéroporté;
 - Augmenter la taille de la boucle: problème d'accès au sol, problème de poids et de stabilité en aéroporté;
- Sommer plusieurs cycles de mesure



Systeme au sol vs aéroporté



Les systèmes au sol

- Permet d'augmenter le moment magnétique en augmentant la taille des boucles
- Somme de cycles illimitée
- Le nombre de tours est contraint par la difficulté de mise en place et le poids



Les systèmes aéroportés

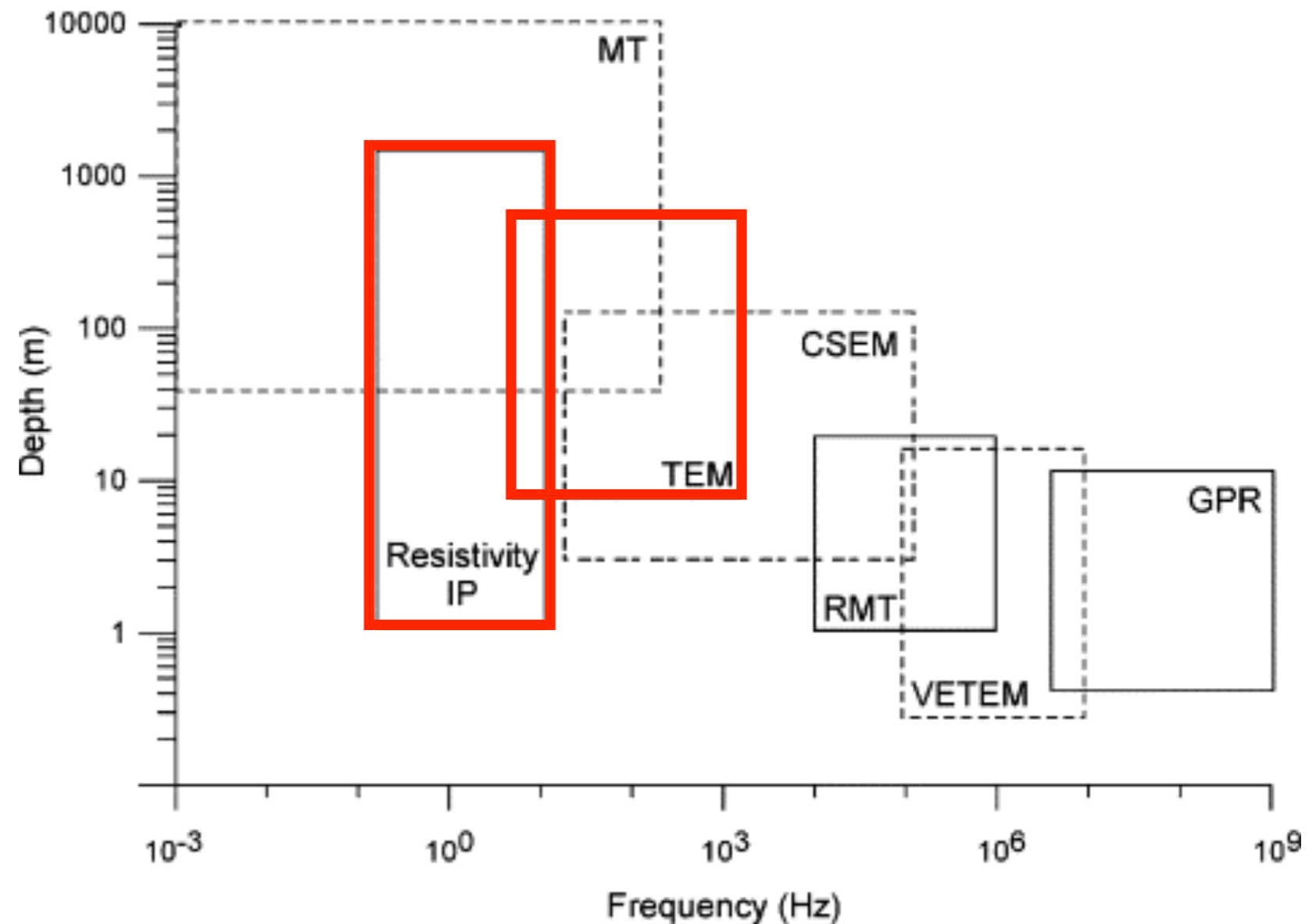
- On augmente le moment magnétique surtout avec le nombre de tours
- Permet d'utiliser de plus gros courants
- La taille de la boucle est contrainte par l'aérodynamique

Source de bruit: Polarisation provoquée

Les mesures PP et TDEM utilisent des fréquences similaires.

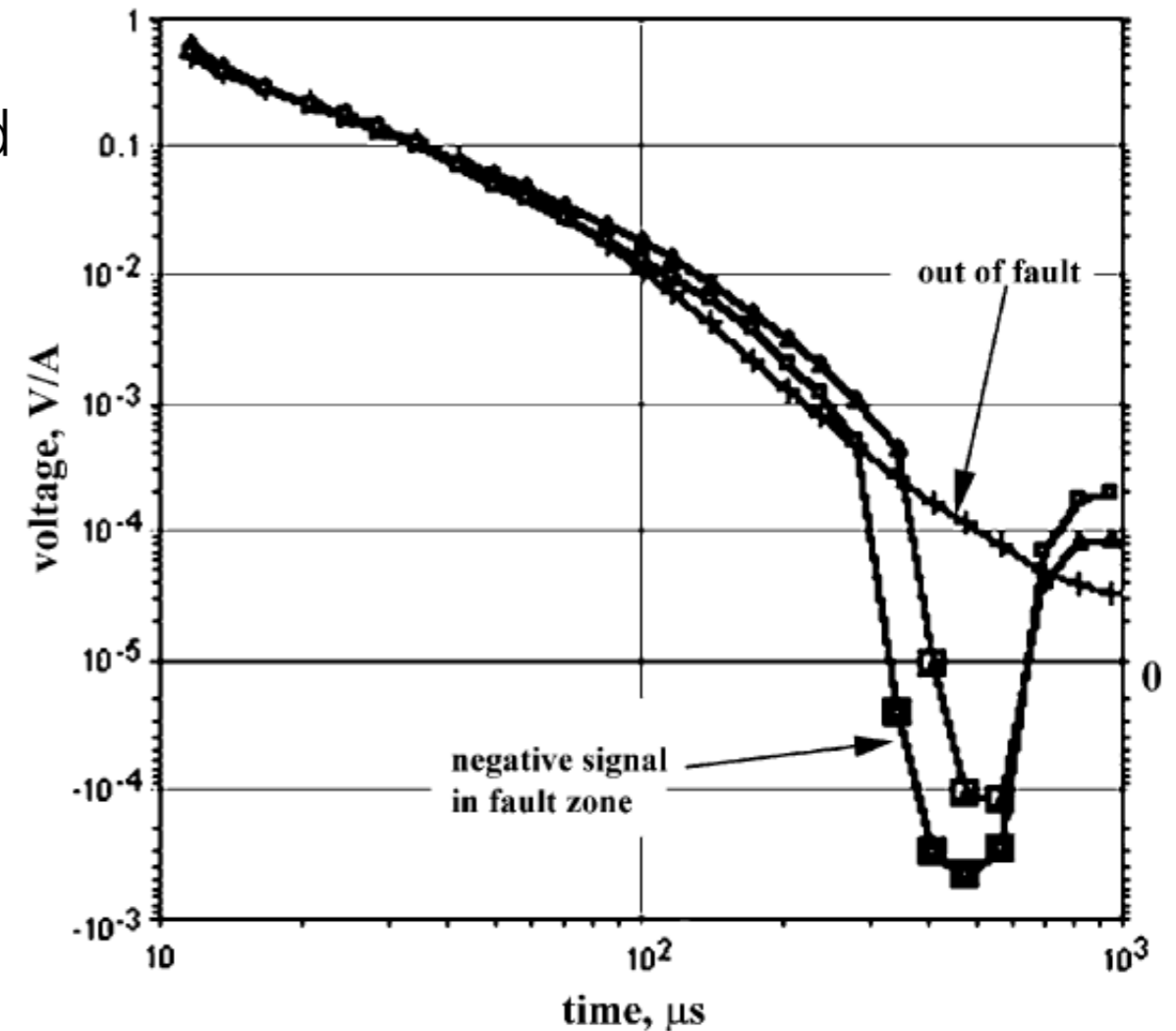
Les effets du couplage inductif EM étaient considérés comme un bruit en PP

Les effets PP sont de même considérés comme un bruit en TEM.



Source de bruit: Polarisation provoquée

- L'effet PP est la plupart du temps considéré comme un bruit en TDEM
- Difficile à identifier sauf si la polarisation tend à inverser le signe du signal mesuré;
- La PP est importante lorsque:
 - Présence d'une couche conductrice de surface (<20-40 Ohm.m) reposant sur une couche résistante (>300-500 Ohm.m)
 - Glaciers et pergélisol
 - Pollution industrielle incluant hydrocarbures
 - Altération des cristaux et roches

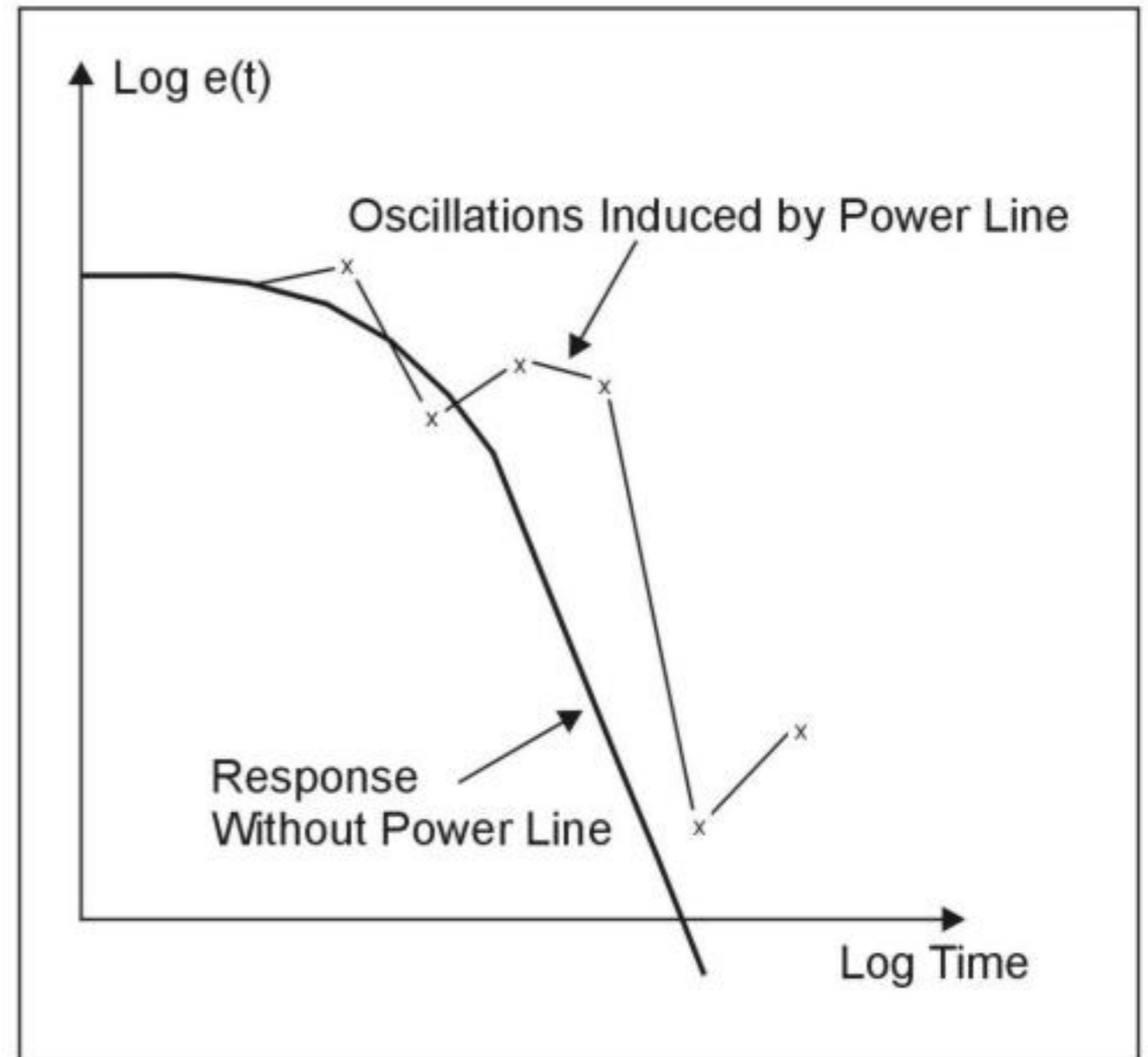


Bruits: Lignes électriques

Les lignes électriques sont une source de bruit majeure pour les levés TDEM. Deux phénomènes causent ce bruit:

- Le champ magnétique provenant des lignes haute tension
- L'induction dans les câbles produit un signal reproductible, qui vient cacher la décroissance désirée.

Peu de solutions existent, autres que de s'éloigner des lignes haute tension.



Configurations des boucles

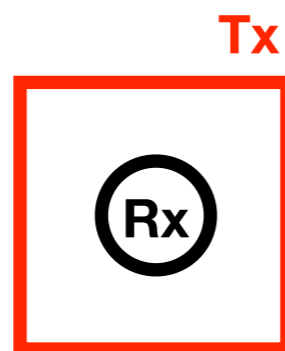


Les systèmes au sol

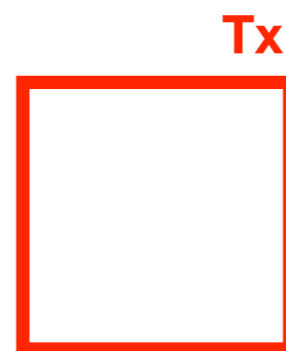


Les systèmes aéroportés

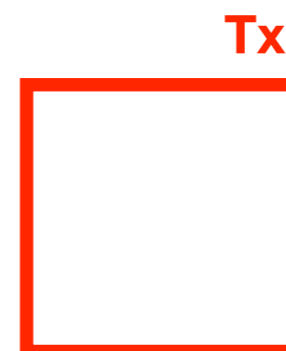
Boucle
centrale



Boucle
décalée



Boucle
coïncidente



Exemple de système au sol



PROTEM RECEIVER



TEM47 TRANSMITTER

Specifications

MEASURED QUANTITIES	Rate of decay of magnetic field along 3 axes, in nV/m ²
CHANNELS	1 channel used sequentially for 3 components; optional 3 channels for 3-component simultaneous operation
TIME GATES	20 gates covering 2 time decades, or 30 gates covering 3 time decades
DYNAMIC RANGE	24 bits (144 dB) at a single gain
BASE FREQUENCY	0.3, 0.75, 3, 7.5, 30, 75 and 285 Hz, or 0.25, 0.625, 2.5, 6.25, 25, 62.5 and 237.5 Hz
INTEGRATION TIME	0.5, 2, 4, 8, 15, 30, 60 or 120 s

Specifications

CURRENT WAVEFORM	Bipolar rectangular current with 50 % duty cycle
BASE FREQUENCY	30, 75, or 285 Hz (powerline frequency 60 Hz) 25, 62.5 or 237.5 Hz (powerline frequency 50 Hz)
TURN-OFF TIME	2.5 μ s at 3 A into 40 x 40 m loop. Faster into smaller loop
TRANSMITTER LOOP	1 x 1 to 100 x 100 m single turn loop, or 5 x 5 m 8-turn loop
OUTPUT VOLTAGE	TEM47: 0 to 9 V, continuously adjustable, with internal 12 V battery TEM47 HP: 12 to 48 V with external batteries
OUTPUT CURRENT	TEM47: up to 3.5 A with internal 12 V battery TEM47 HP: up to 8 A with external batteries

Mesures au sol, boucles décalées

Exemple de mesures au sol avec une boucle décalée.

Relativement petite boucle ici pour une petite profondeur d'investigation



Quelques systèmes aéroportés



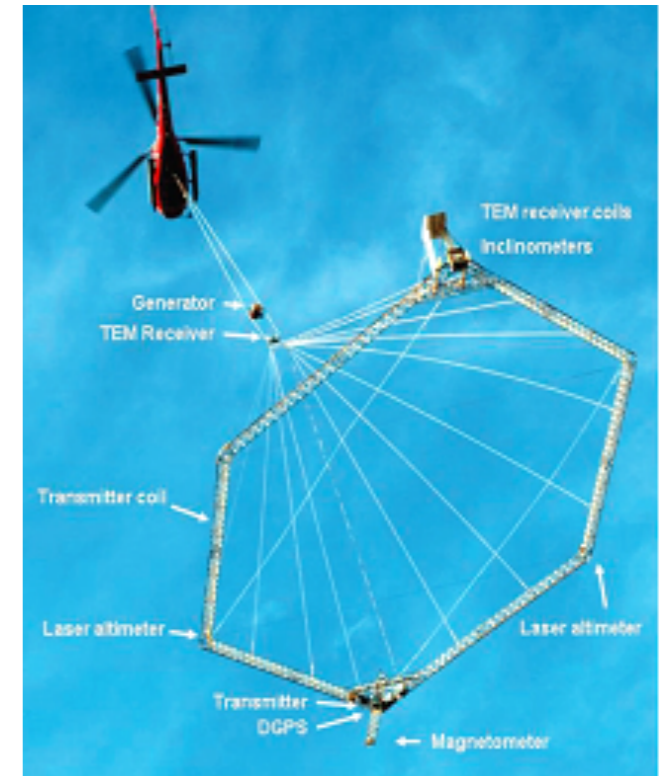
Megatem

Moment : 2,000,000 A.m²



VTEM

Moment: 40,000 Am²



SkyTEM

Moment: 5000 ou
1,700,000 Am²

À titre comparatif, le ProTEM a un moment maximal de 80 000 A.m², mais un moment souvent plus faible est utilisé en pratique.

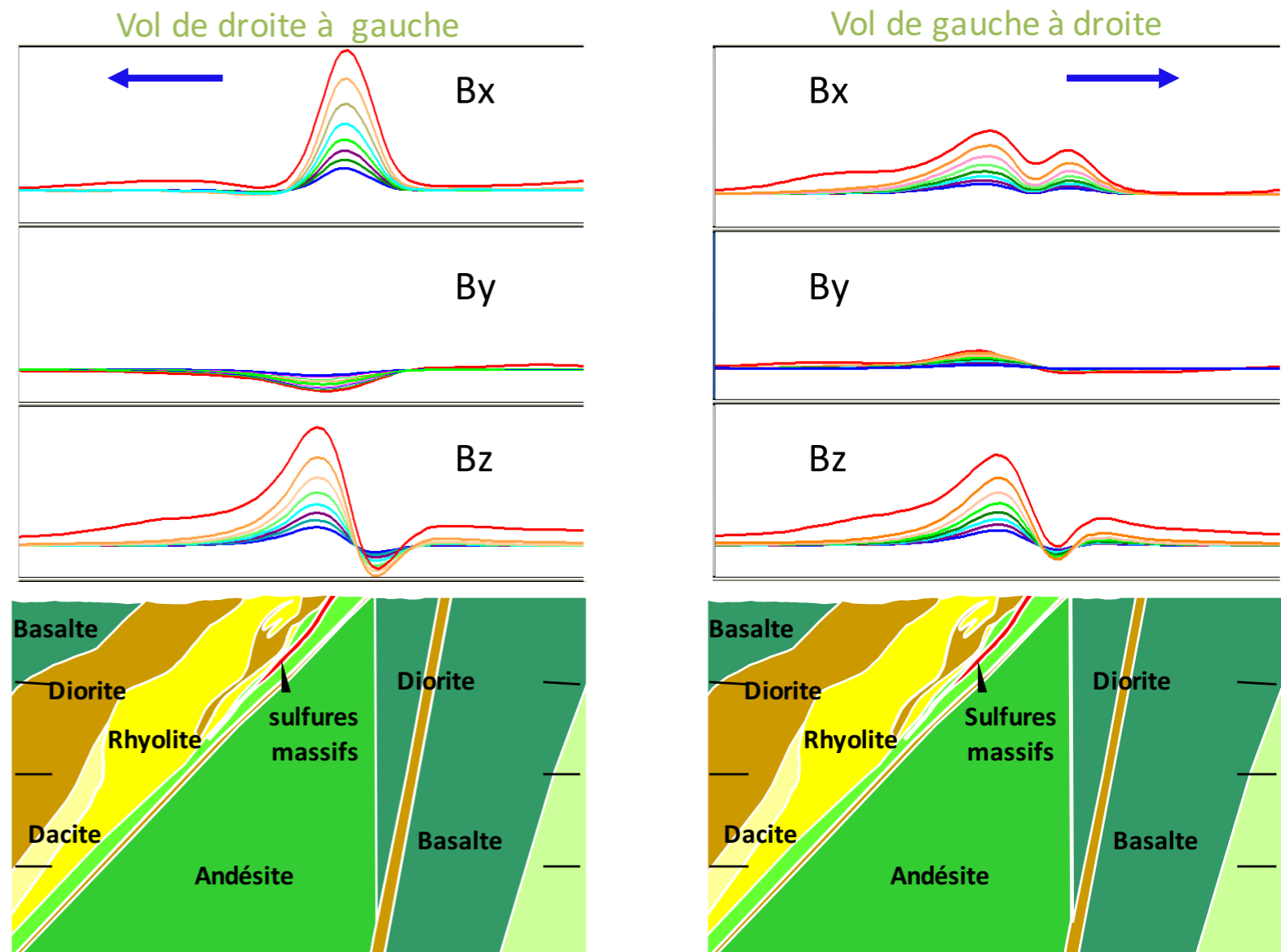
Présentation des données

Les données sont souvent présentées en superposant les courbes de différentes fenêtres de temps.

Ceci permet de détecter les anomalies conductrices.

Les différentes composantes du champ magnétique secondaire sont acquises afin de mieux distinguer l'orientation des anomalies

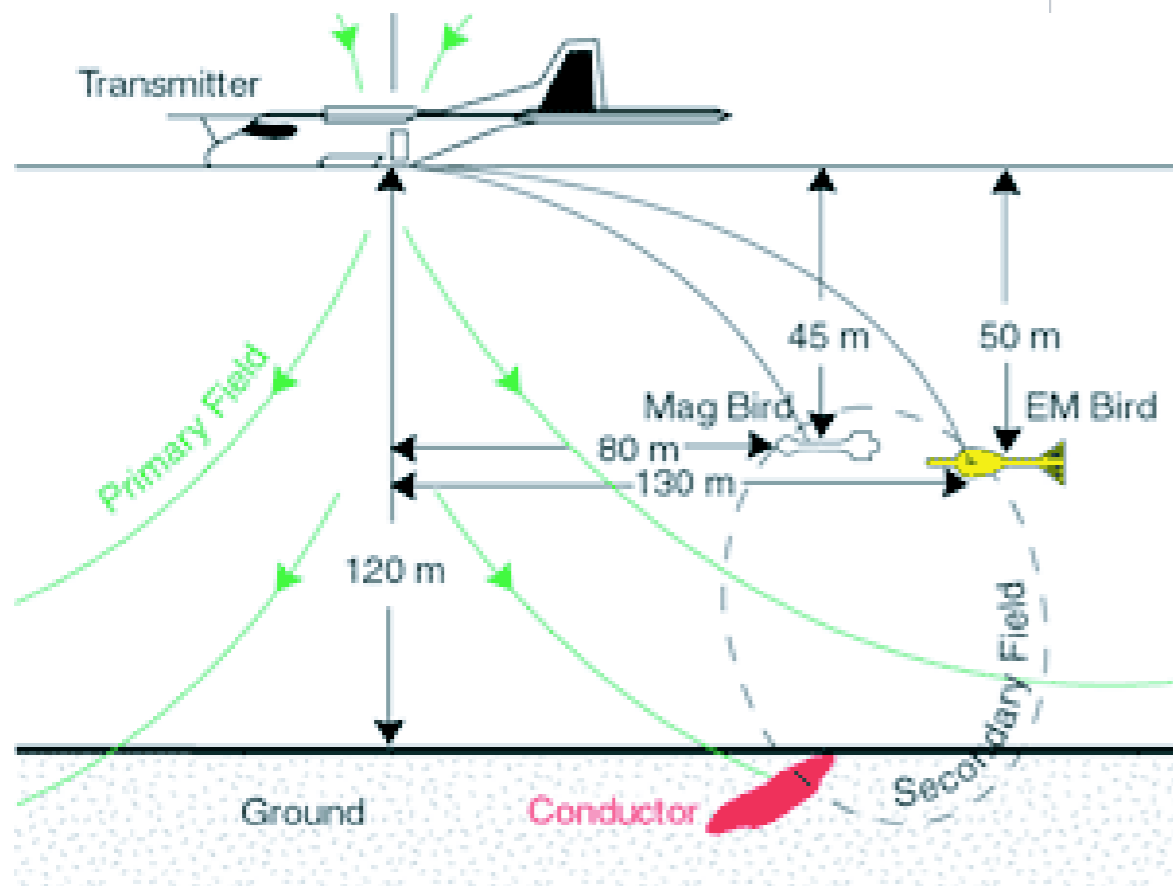
Levé Mégatem au-dessus d'un dépôt de sulfure massif



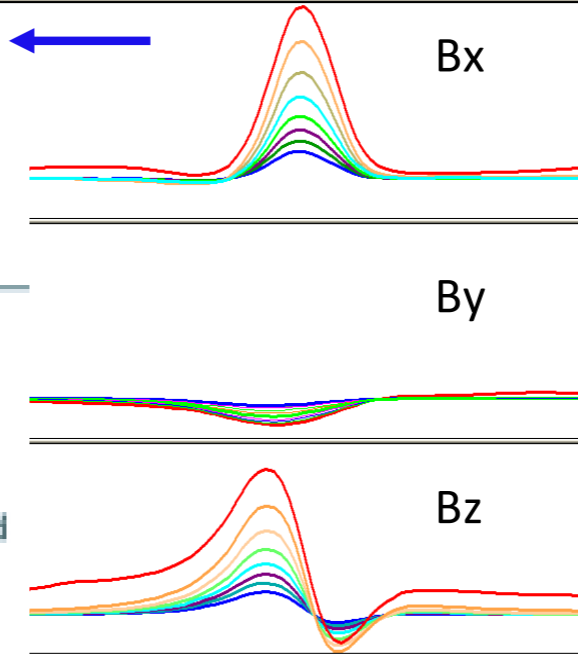
Présentation des données

Levé Mégatem au-dessus d'un dépôt de sulfure massif

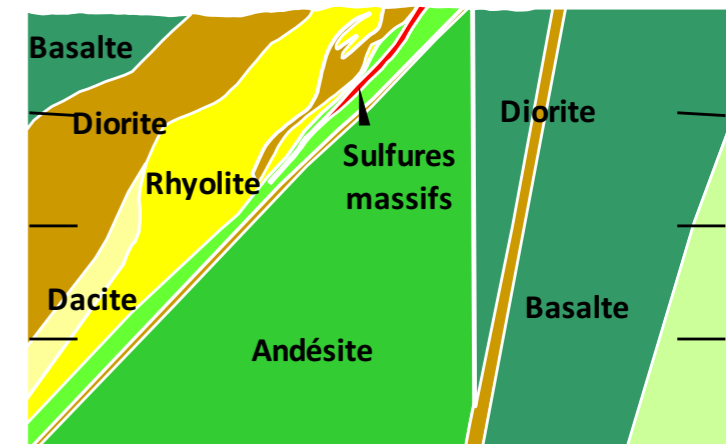
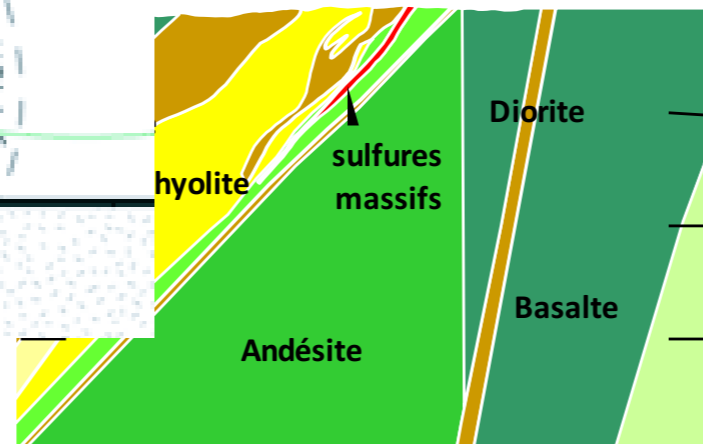
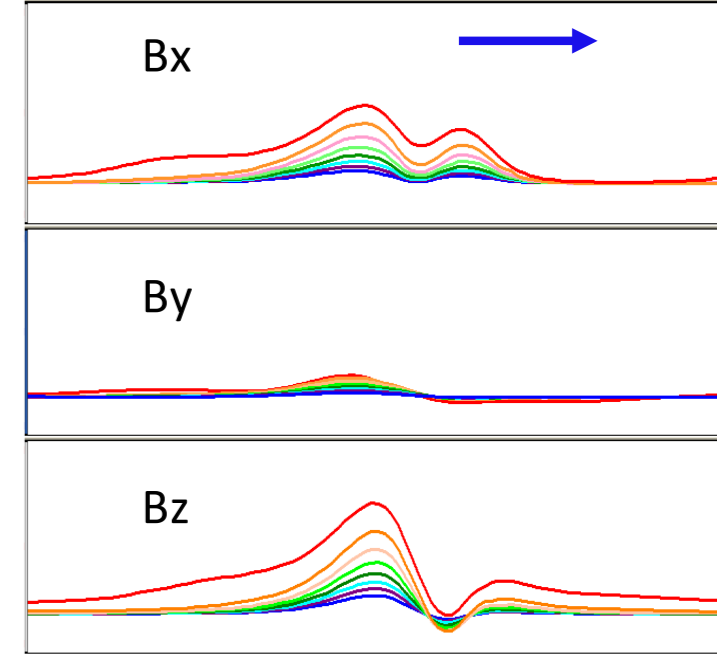
Pourquoi les mesures du Megatem dépendent de la direction du vol ?



Vol de droite à gauche



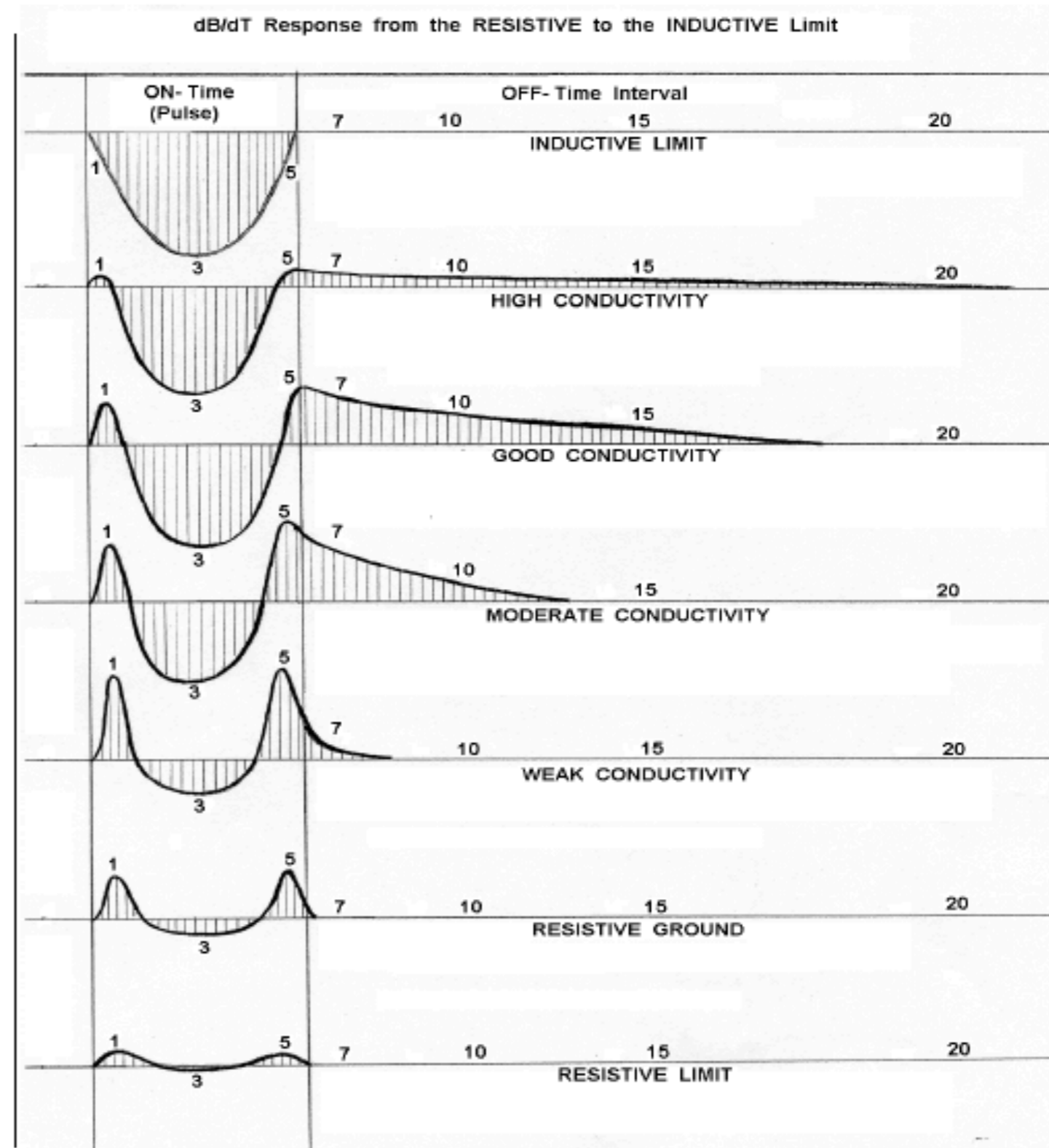
Vol de gauche à droite



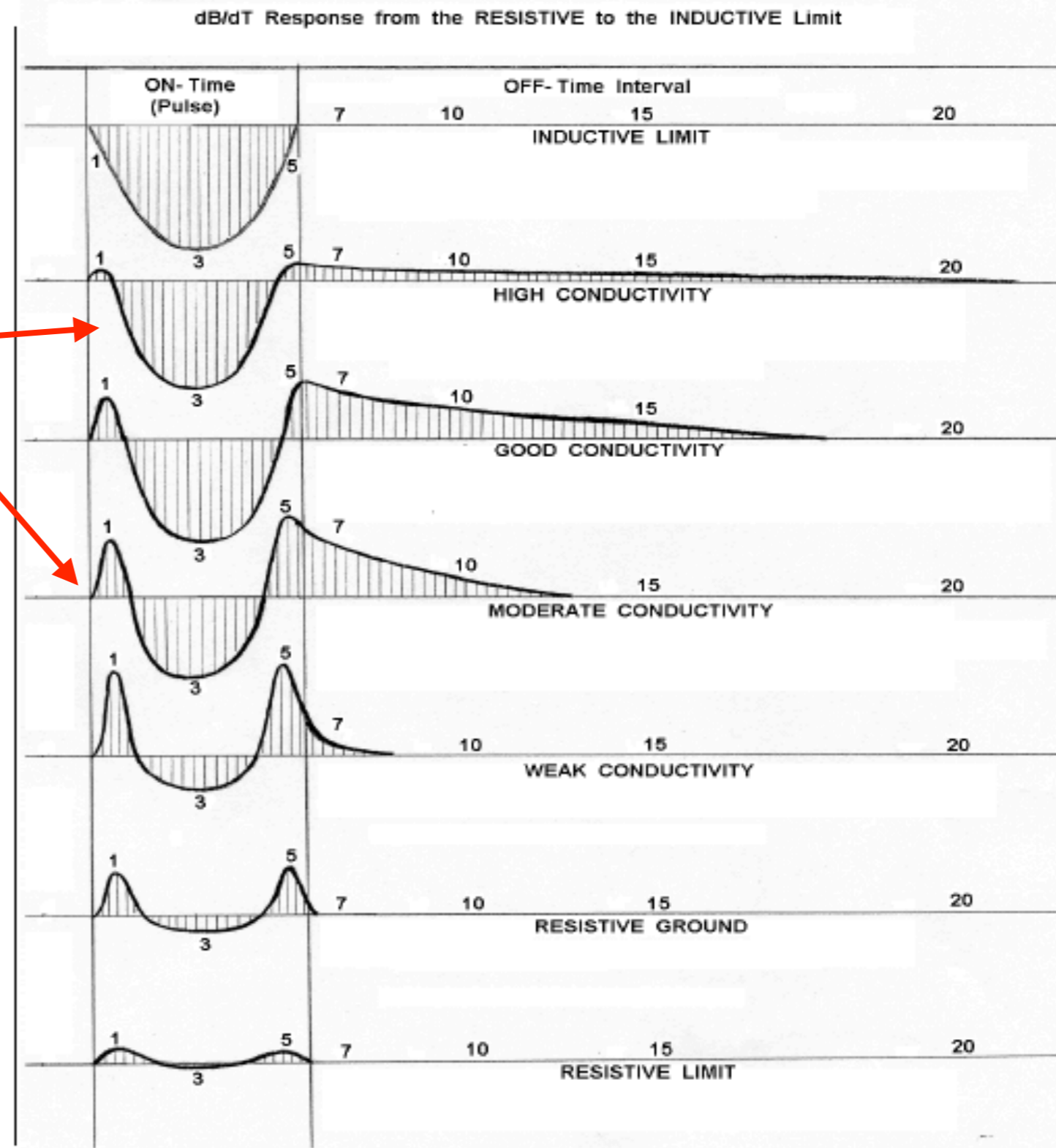
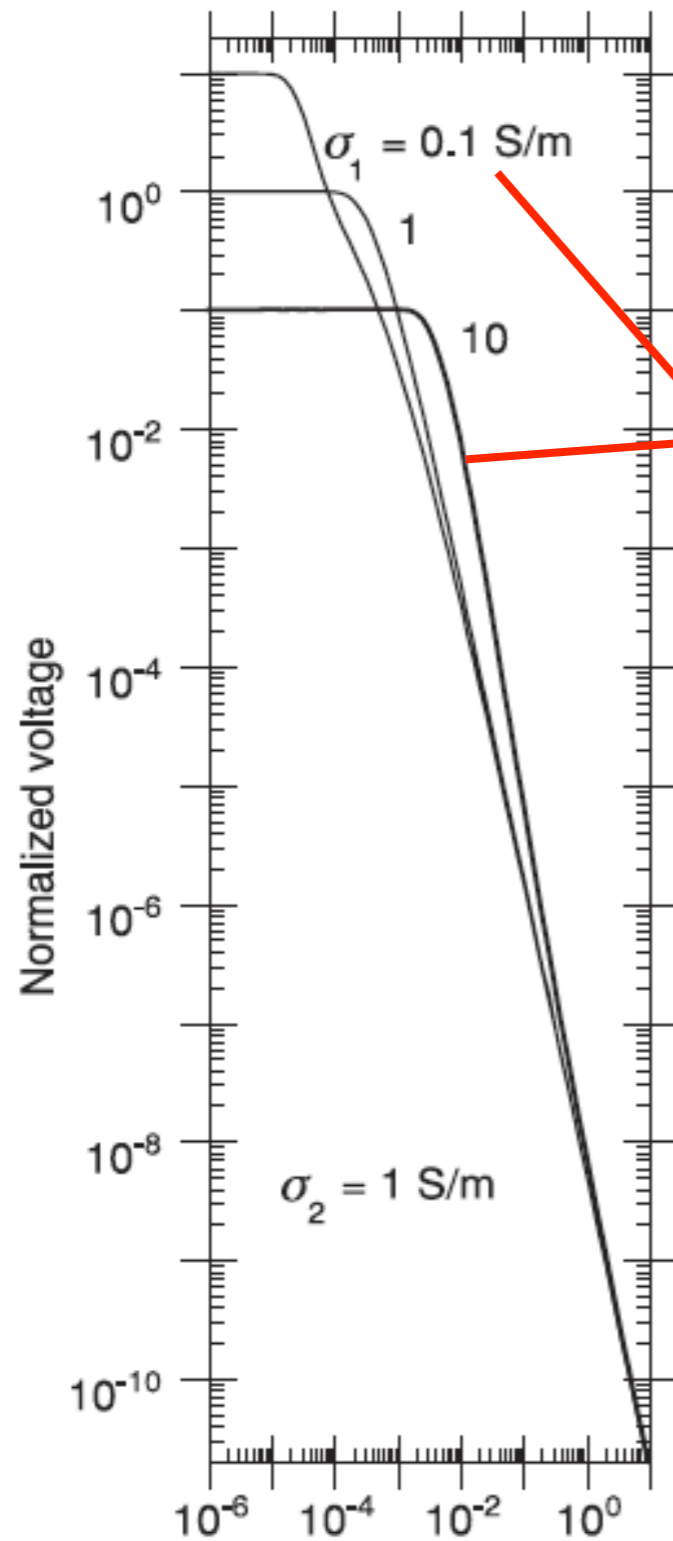
Interprétation de conducteurs

Lorsqu'on affiche les différentes fenêtres d'un levé TDEM, les conducteurs apparaissent comme des anomalies de forte amplitude du signal. Pourquoi ?

- La décroissance du signal se fait de plus en plus rapidement plus la conductivité est faible.
- Aux temps longs, l'amplitude du signal par dessus un bon conducteur est donc plus élevée.



Interprétation de conducteurs



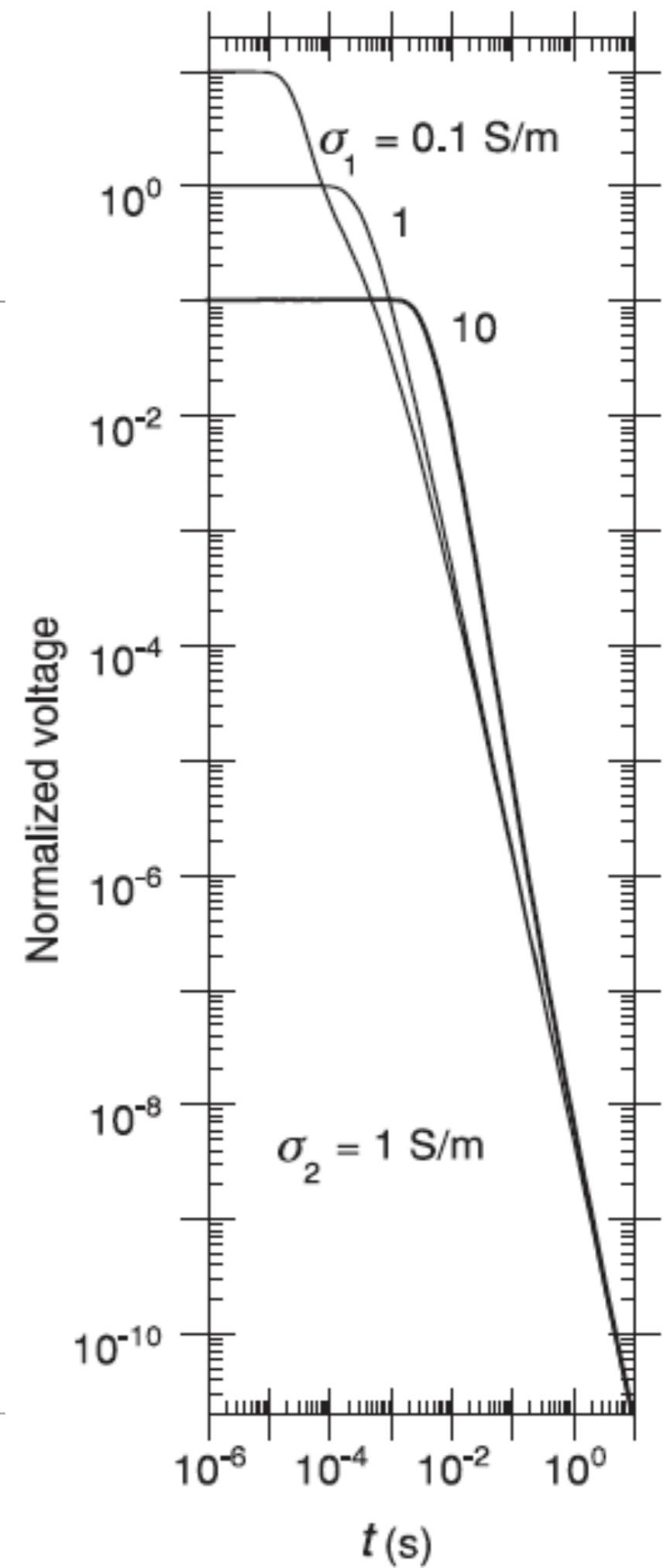
Interprétation de conducteurs

On utilise la constante de temps pour interpréter des conducteurs de forme simple:

$$\tau = K\sigma\mu A$$

où K est un facteur géométrique propre à la géométrie du conducteur et A est une constante propre à ses dimensions.

Type de conducteur	τ
Sphère de rayon a	$\sigma\mu a^2 / \pi^2$
Cylindre de rayon a	$1.71\sigma\mu a^2 / \pi^2$
Plaque mince de longueur l	$2t\sigma\mu l / \pi^2$
Prisme d'épaisseur t et de longueur L	$\sigma\mu Lt / 10$



Interprétation de conducteurs

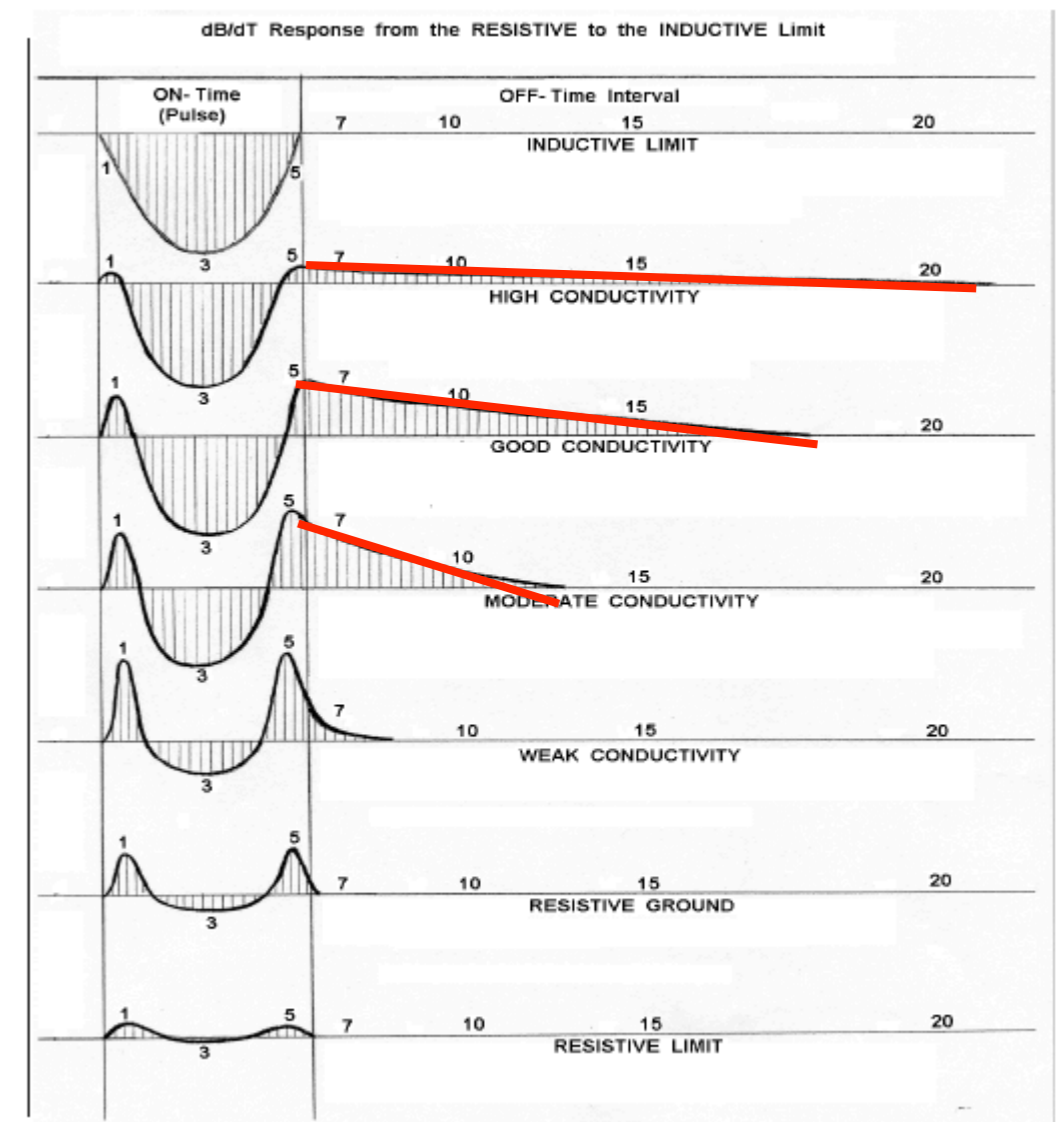
On peut directement mesurer la constante de temps par le graphique de la décroissance du voltage.

$$\tau = (t_2 - t_1) / \ln(A_1 - A_2)$$

Cette équation correspond à la pente du graphique semi-logarithmique du temps en fonction de l'amplitude

Cette constante de temps est cohérente avec l'expression aux temps longs:

$$V_{CI} \approx \frac{S_R I_T r^2}{20\sqrt{\pi}} \frac{\mu^{5/2} \sigma^{3/2}}{t^{5/2}}$$



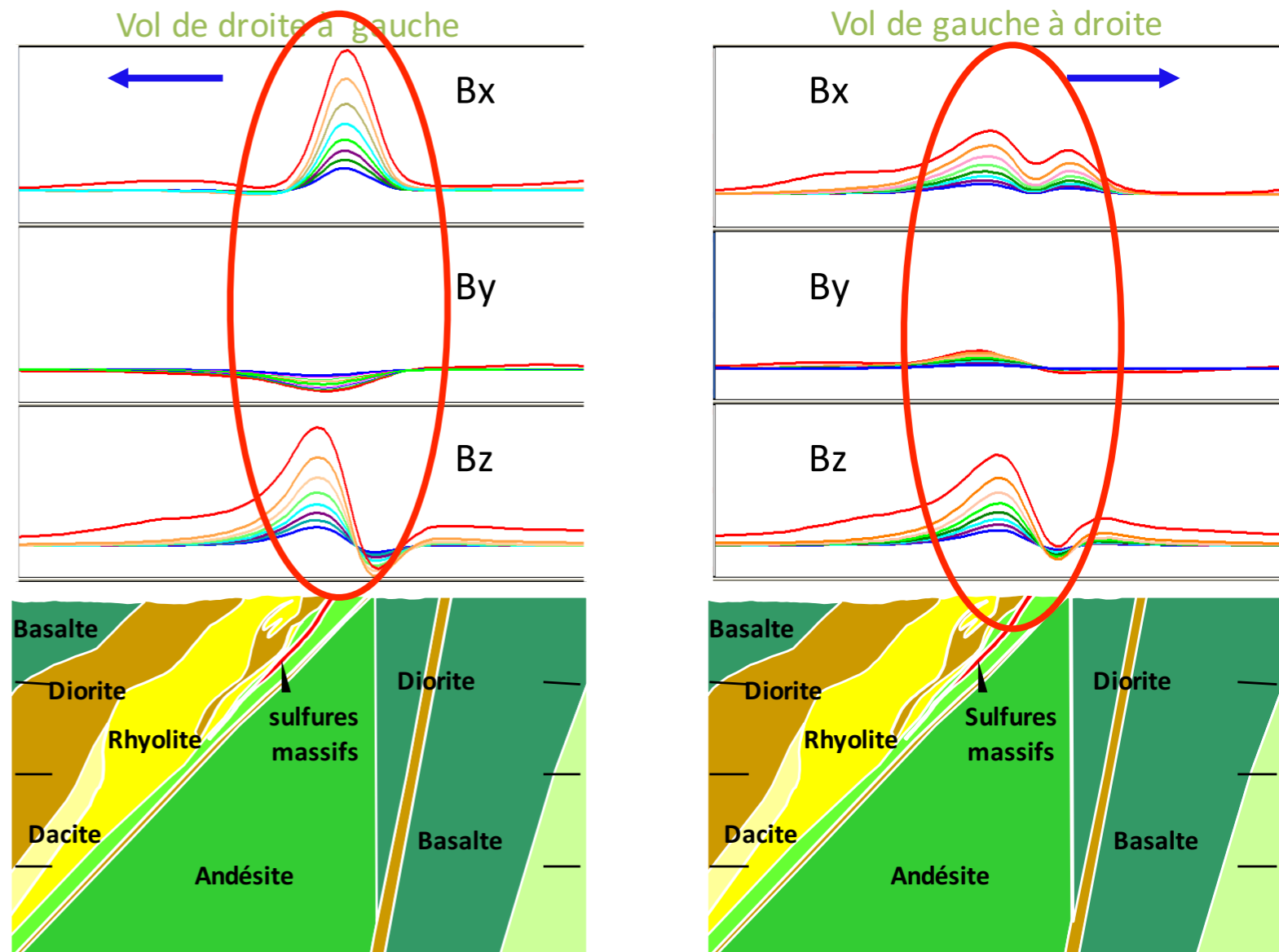
Attention! La pente est l'inverse de la constante de temps ici!

Interprétation de conducteurs

Les anomalies conductrices apparaissent donc comme des valeurs élevées sur l'ensemble des fenêtres.

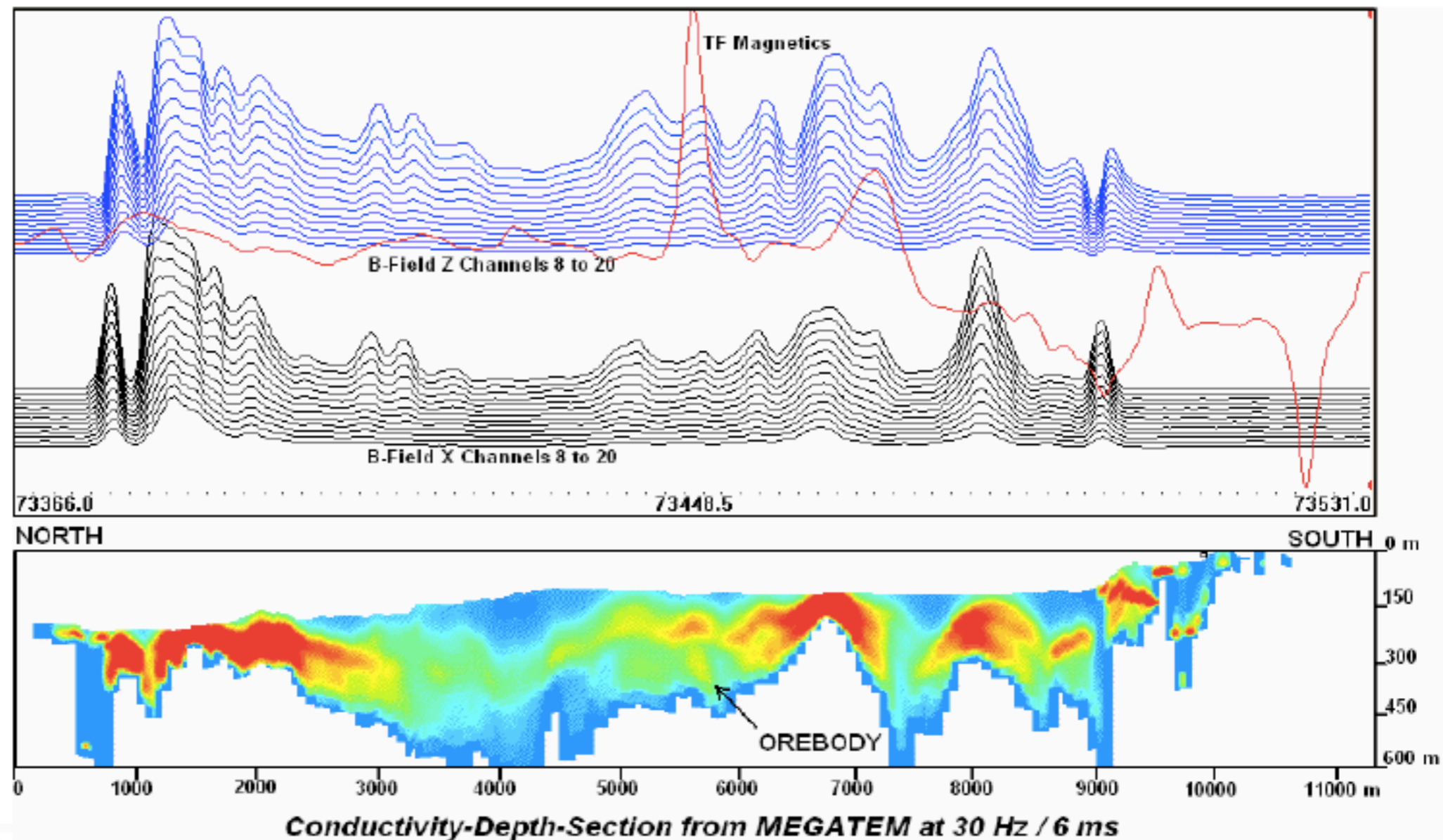
Dans cet exemple, le conducteur est une plaque mince de sulfures massifs, ayant un fort pendage, d'où l'asymétrie du pic du signal!

Levé Mégatém au-dessus d'un dépôt de sulfure massif



Transformation conductivité-profondeur

Plusieurs méthodes existent pour assigner à la conductivité apparente en temps une profondeur, et donc obtenir une coupe en profondeur sans passer par l'inversion. Ces transformations permettent une visualisation rapide sur le terrain, mais ne remplacent pas l'inversion.

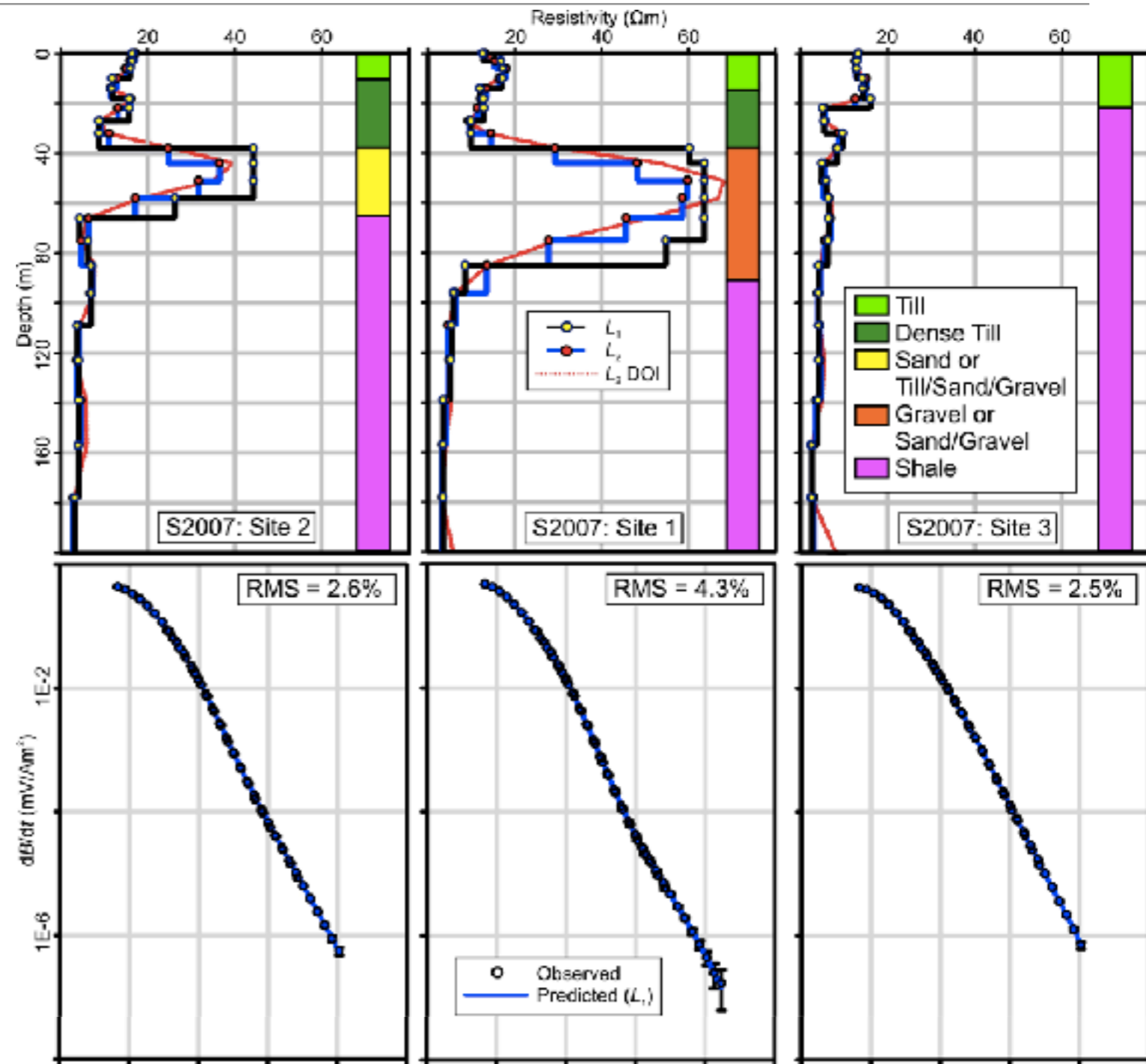


Inversion

Pour retrouver les variations en profondeur, on doit utiliser l'inversion !

Habituellement, l'inversion 1D est utilisée, c'est-à-dire que le sol est considéré comme un milieu tabulaire.

Plusieurs stations peuvent être inversées séparément et combinées pour produire des modèles 2D et 3D

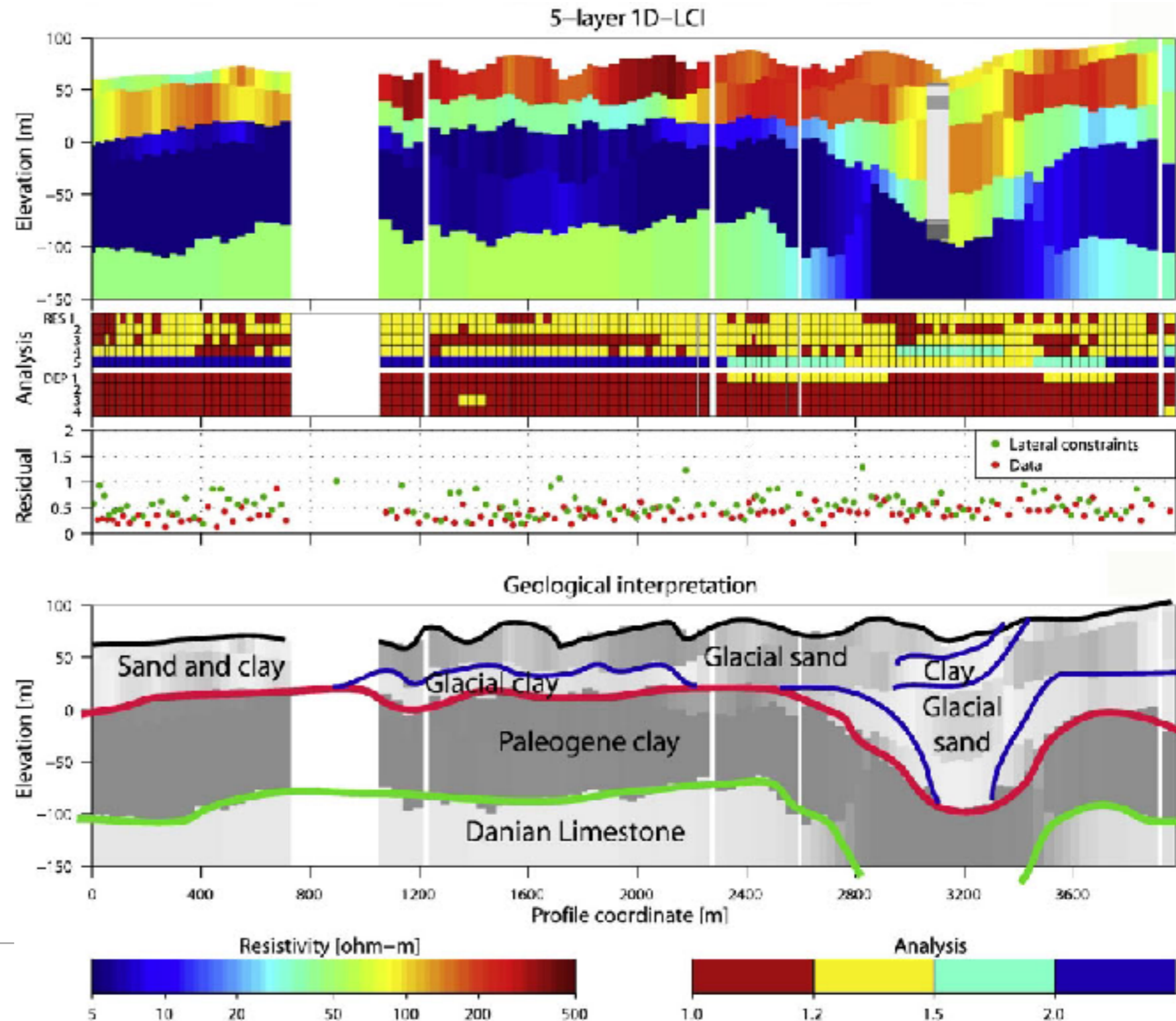


(Oldenborger & Brewer, 2014)

Inversion

Des levés 2D et 3D sont produits en inversant chacun des sondages en 1D et en ajoutant une régularisation de lissage en 2D et 3D.

Cette approximation fonctionne bien pour de faibles variations latérales de conductivité.



Inversion et modélisation

Lors de l'inversion et la modélisation de la réponse du système (par exemple pour déterminer la profondeur d'investigation), il faut savoir:

$$V_{HCP} \approx \frac{S_R S_T I_T}{20\pi^{3/2}} \frac{\mu^{5/2} \sigma^{3/2}}{t^{5/2}}$$

- taille des boucles,
- courant,
- plage de temps de mesure,
- position du récepteur et sa surface effective,
- niveau de bruit du système (environ 5–10V/m²).



Avantages/Inconvénients

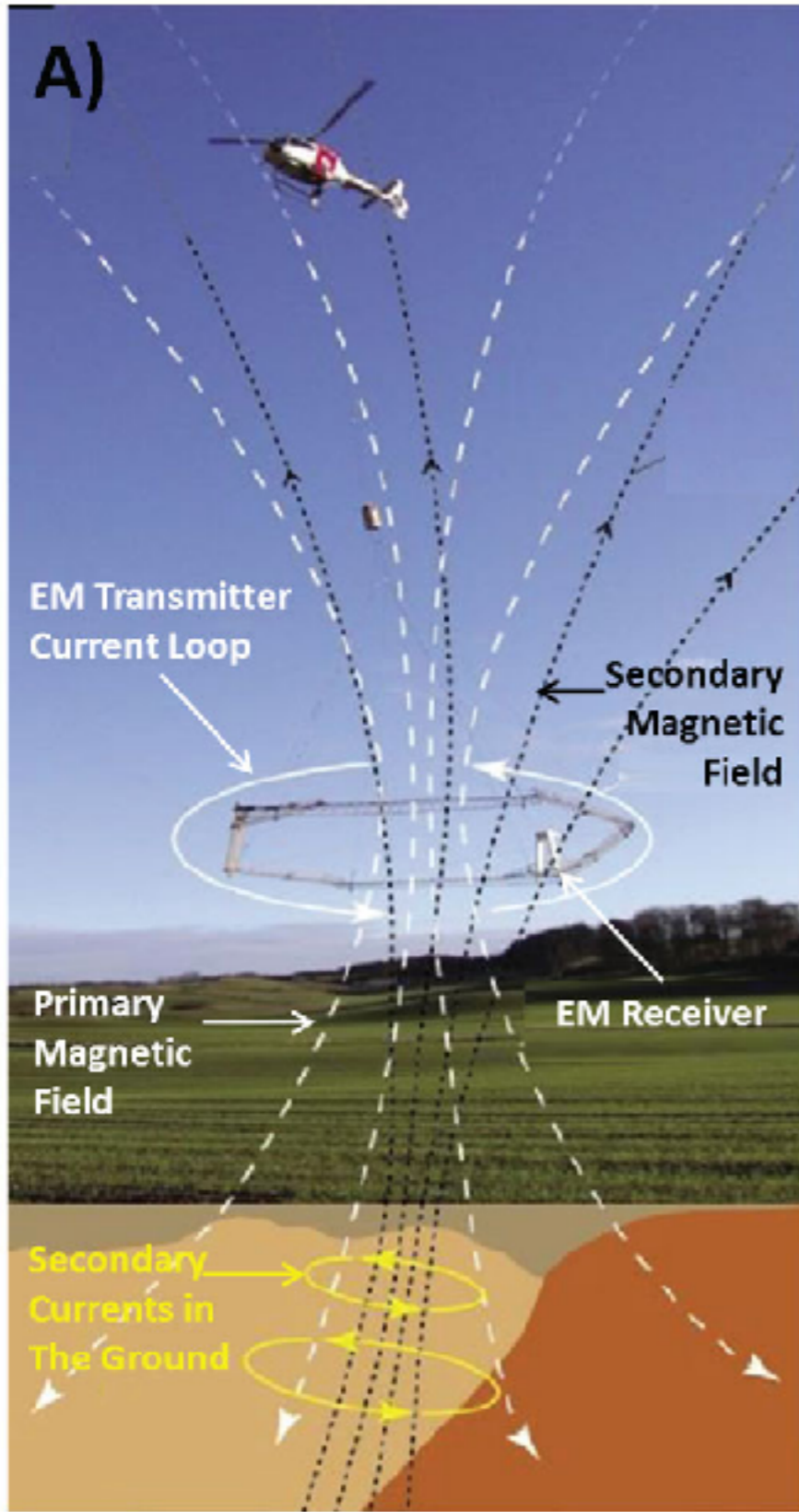
Avantages

- Rapidité d'opération
- Taille du dispositif de mesure :
 - de l'ordre de la taille de la profondeur d'exploration ;
 - Électrique DC : taille du dispositif ≈ 3 fois la profondeur d'exploration ;
- Information concentrée à la verticale ;
 - Résolution latérale (en utilisant des stations adjacentes) ;
 - Résolution des couches conductrices et réduction du domaine d'équivalence ;
- Pas de problème d'injection de courant.

Inconvénients

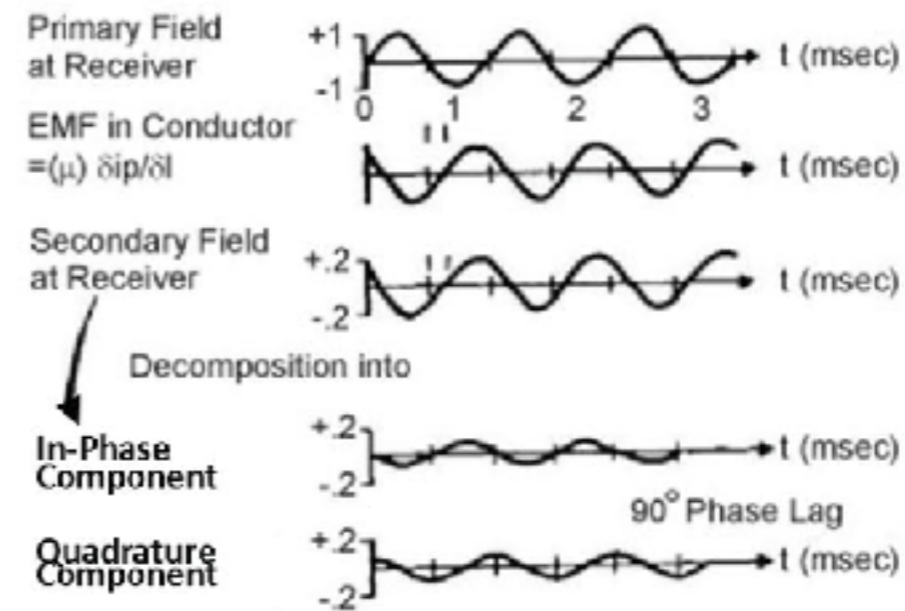
- Ne fonctionne pas bien en milieu résistant
- Peu de moyens d'interprétation des cibles 3D
- Sensible aux bruits (lignes à haute tension, décharges atmosphériques) ;
- Polarisation provoquée (terrains argileux)
 - affecte la réponse tardive ;
 - il faut déplacer le récepteur à quelque distance de la boucle.
- Équipement relativement coûteux (TEM47&PROTEM de Geonics : 70,000 \$Can).

Résumé FEM vs TDEM

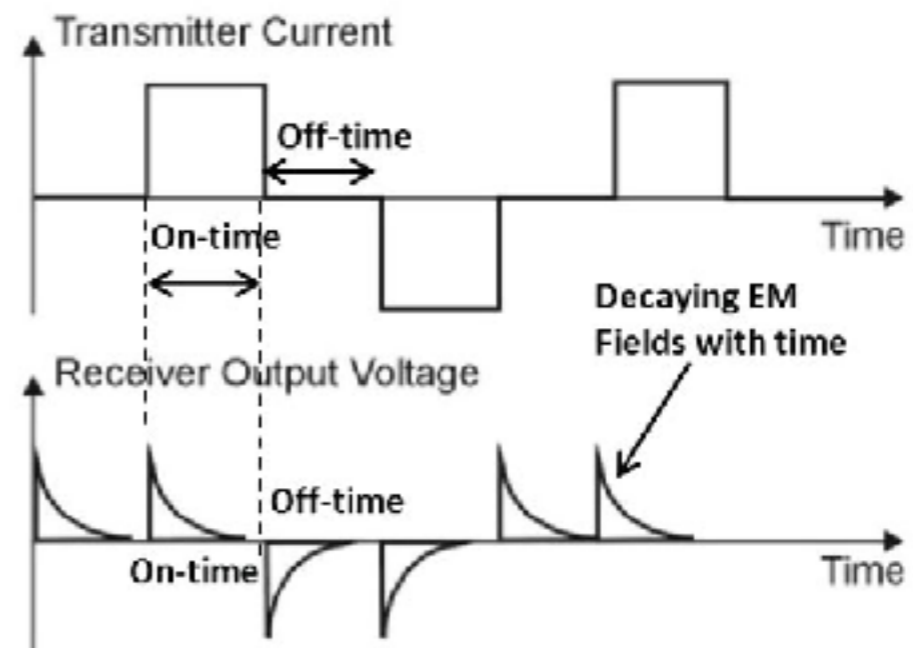


B) FREQUENCY-DOMAIN EM METHOD

$F = 100 \text{ Hz}$



C) TIME-DOMAIN EM METHOD

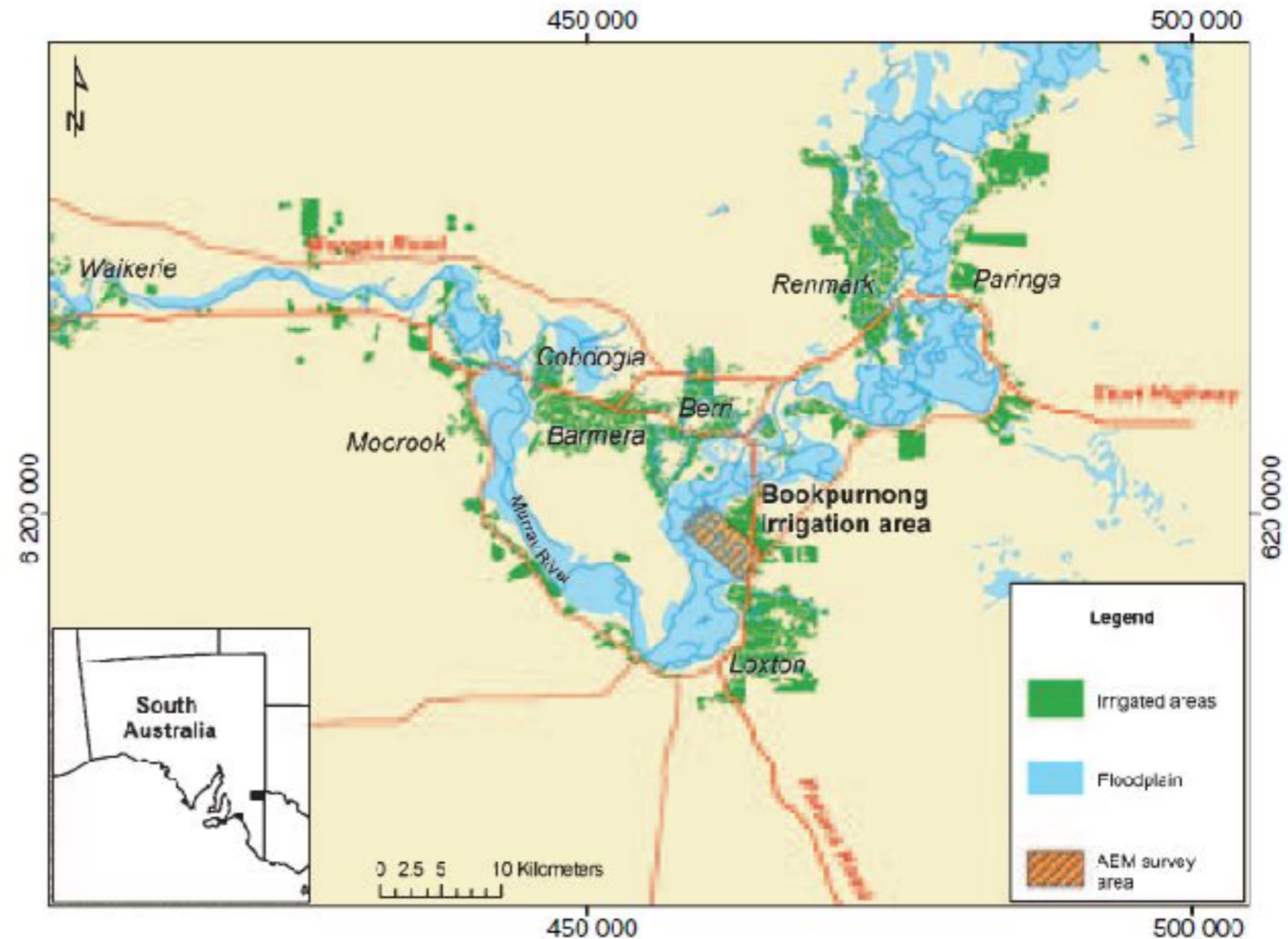


(Legault, 2015)

Étude de cas

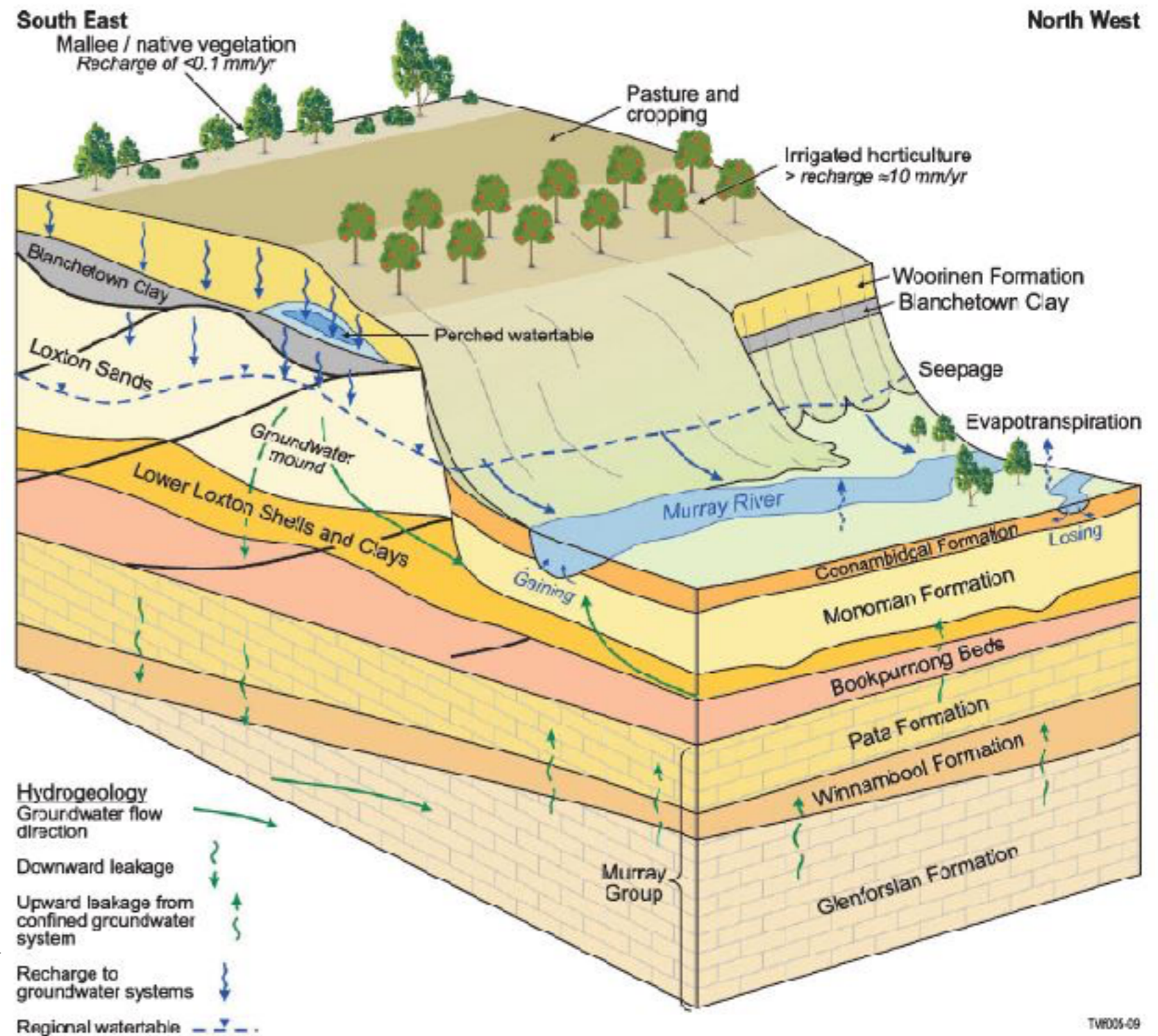
Problématique: Site de Bookpurnong

- L'irrigation et le contrôle de la rivière au site a substantiellement changé l'hydrologie des plaines inondables de la rivière
- Conséquence néfaste: Accumulation de sel dans la zone racinaire
- **Objectif:** évaluer l'efficacité des mesures correctives



Problématique: Modèle hydrologique

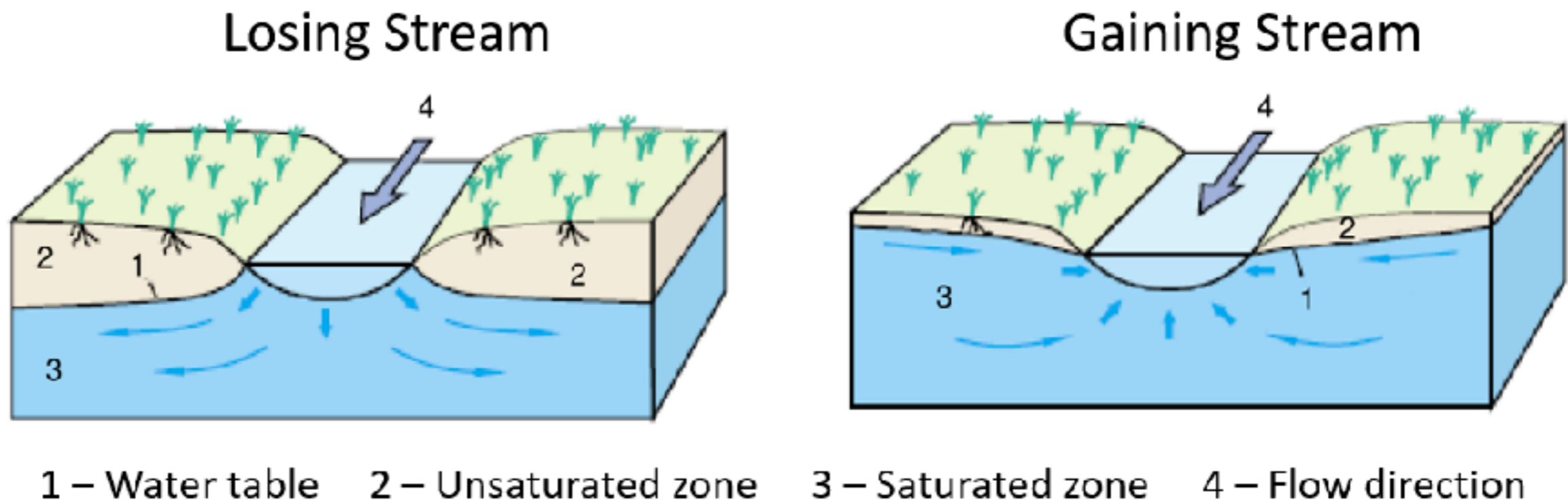
- L'eau s'écoule de la zone de recharge en hauteur vers la plaine inondable
- L'écoulement vers la plaine inondable apporte naturellement beaucoup de sel
- L'irrigation dans la zone de recharge affecte la dynamique du système



Problématique: Modèle hydrologique

Deux modes d'interaction entre la rivière et l'aquifère peuvent être départagés:

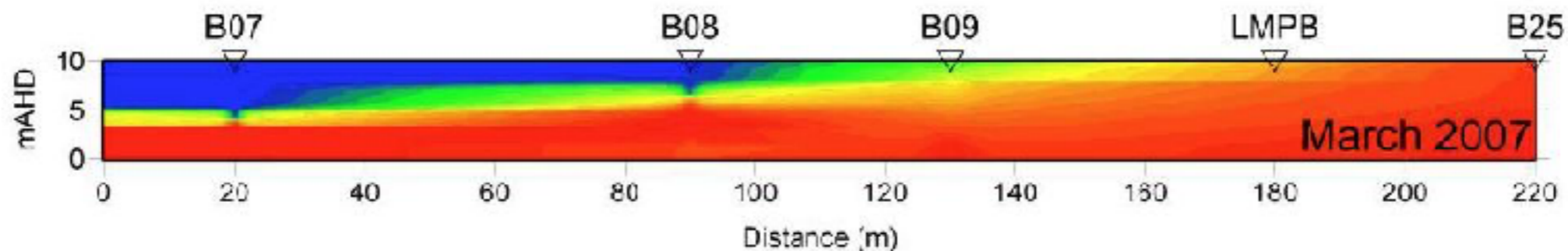
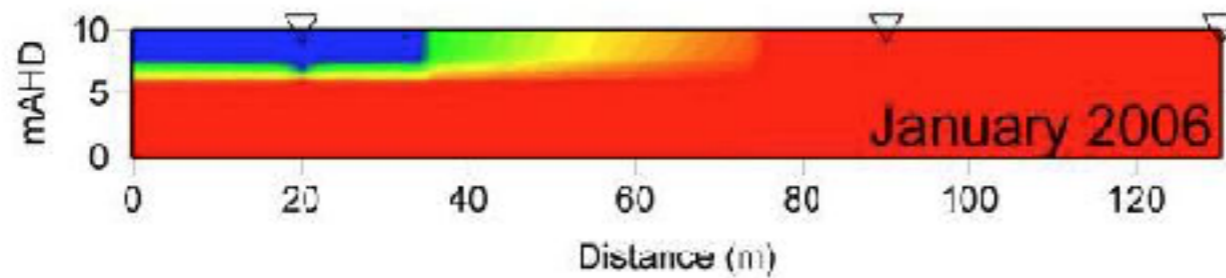
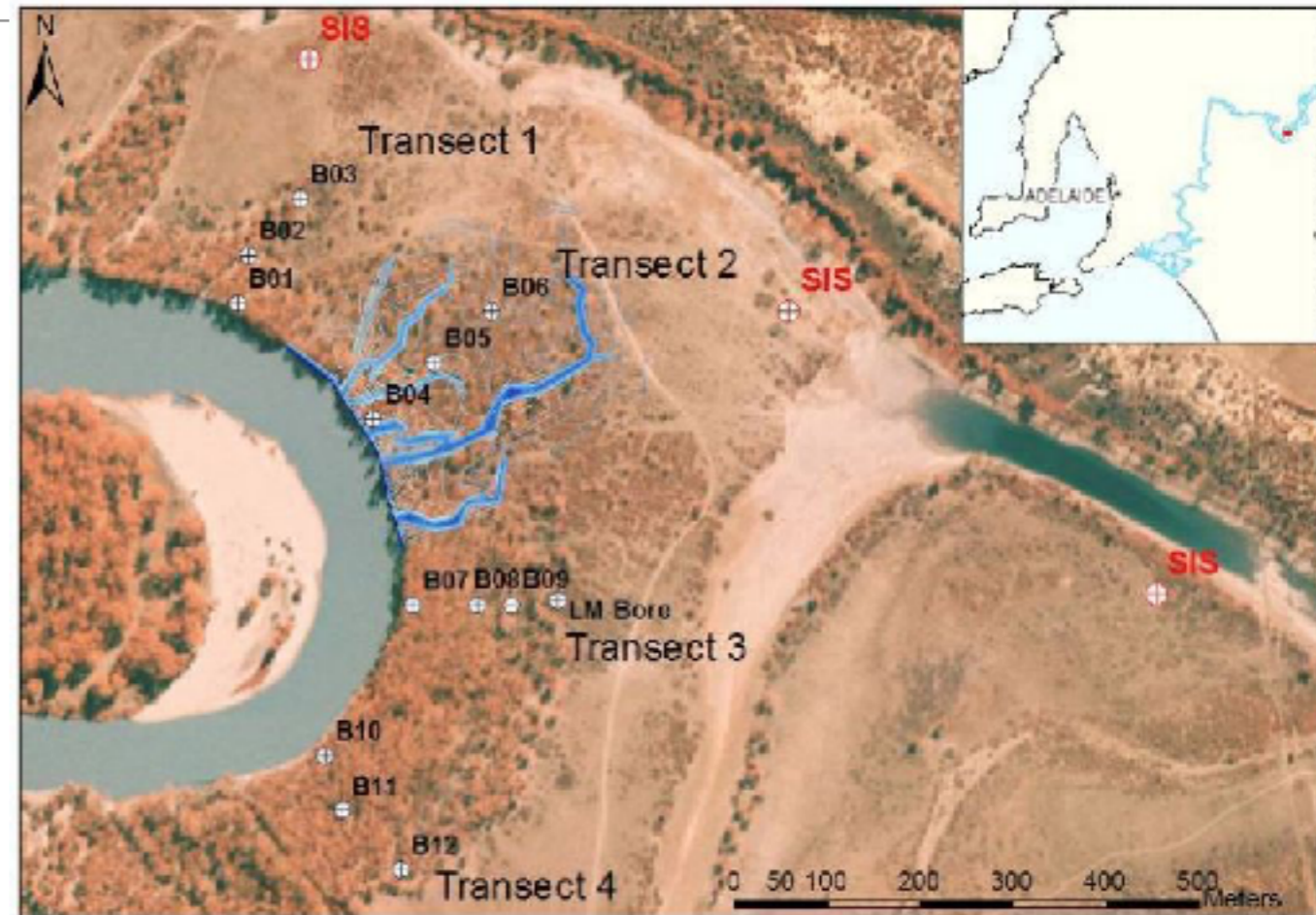
- La **nappe alimente la rivière**: la plaine inondable est alimentée en eau saumâtre
- La **rivière alimente la nappe**: la plaine inondable est alimentée en eau douce



Propriétés géophysiques

La **résistivité électrique** du sol est directement reliée à la **salinité de l'eau** interstitielle.

Il est donc possible d'étudier la dynamique d'écoulement en mesurant la résistivité du sol.

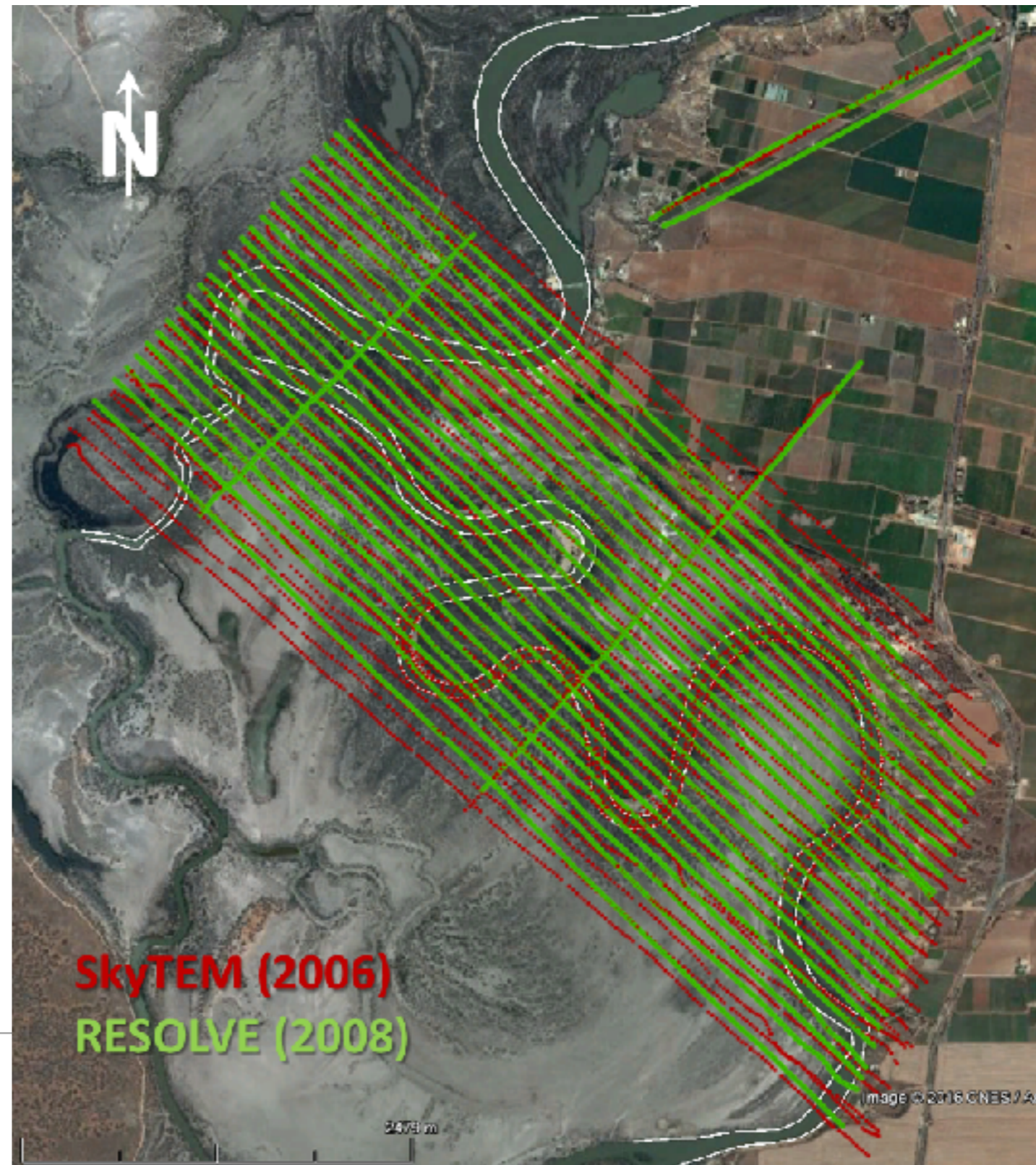


Méthodes géophysiques: TDEM et FEM

Deux systèmes ont été utilisés:

- FEM: Resolve de CGG
- TDEM: SkyTEM

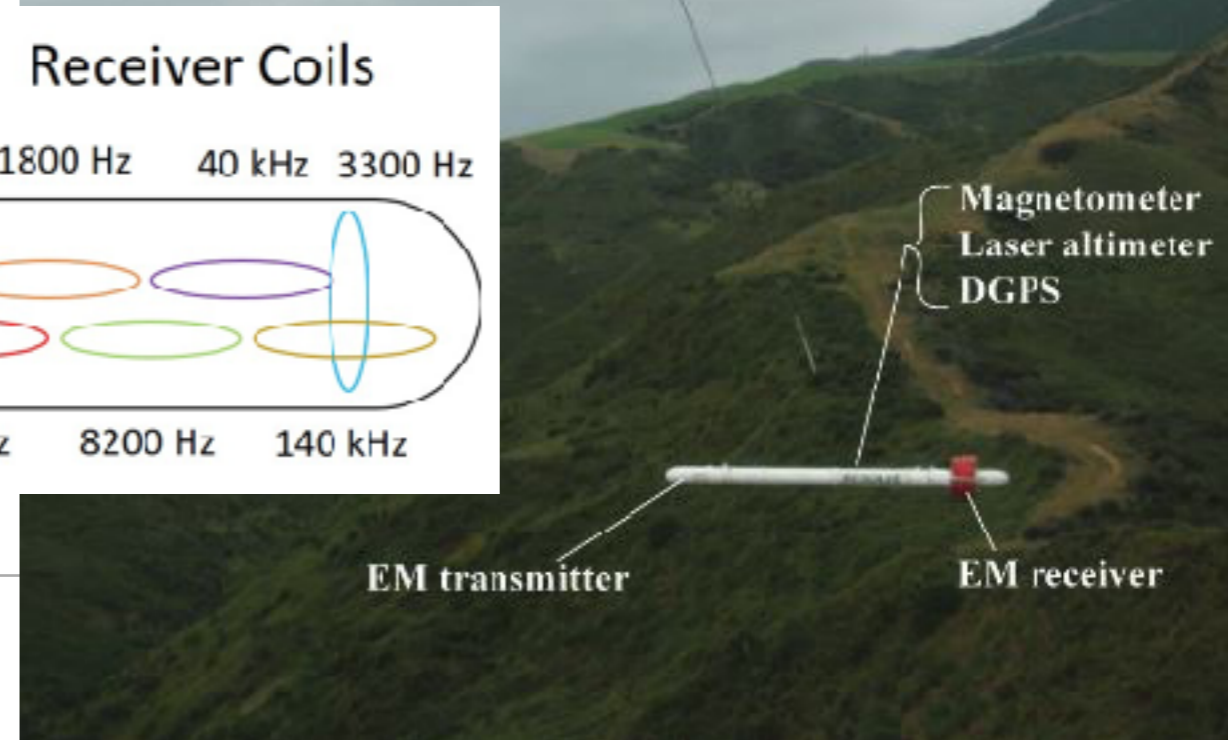
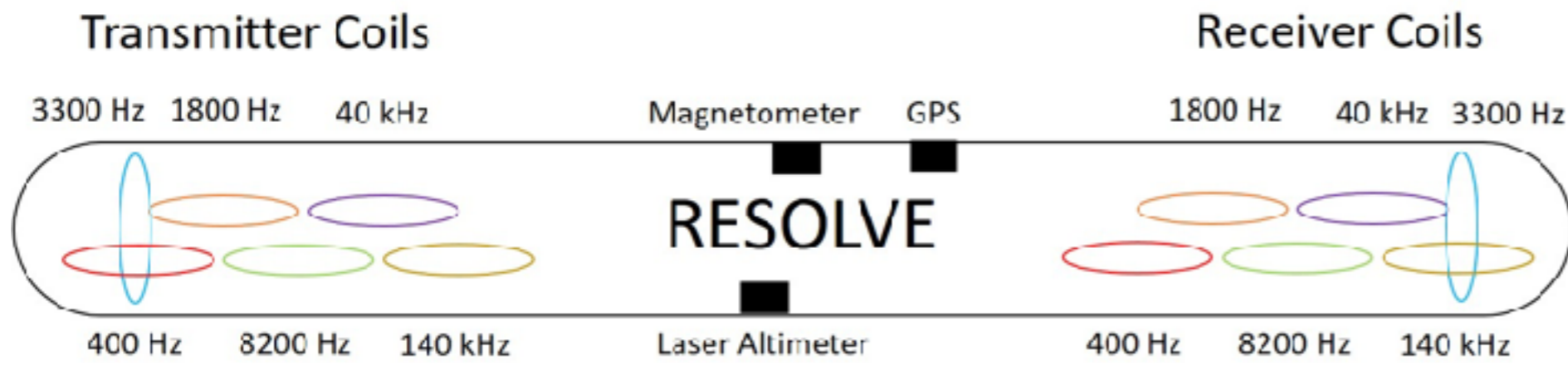
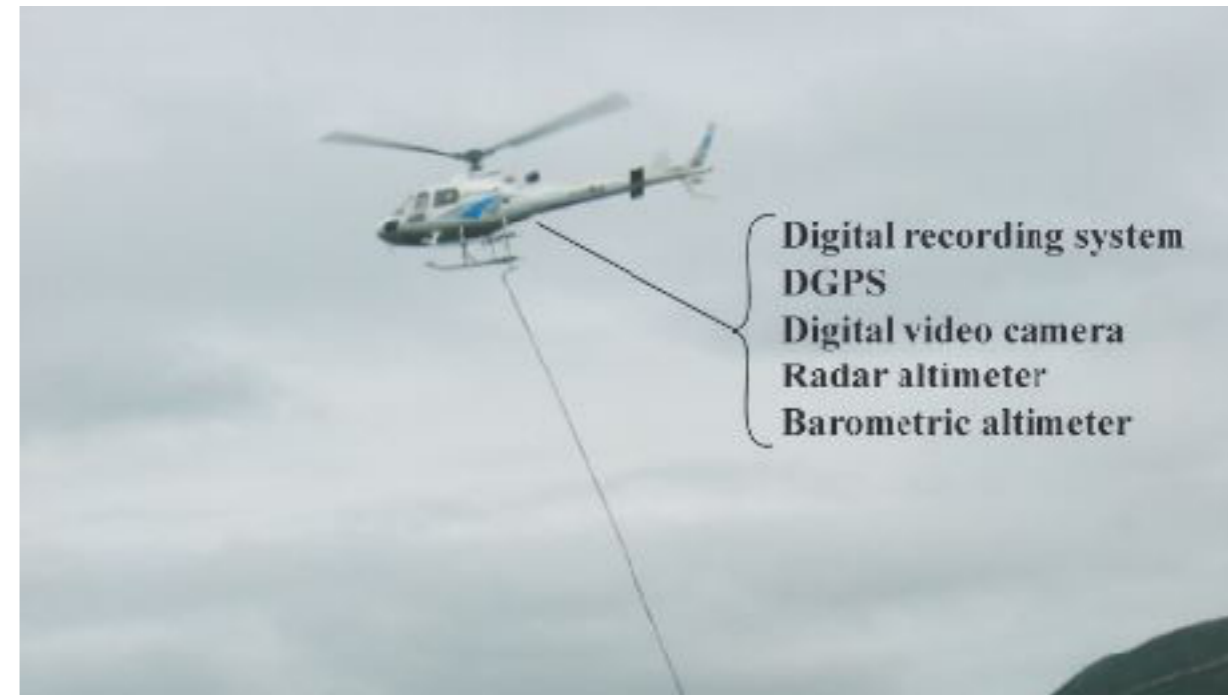
Plusieurs lignes parallèles sont acquises avec les deux systèmes, ce qui permettra de produire un modèle 3D de la résistivité à l'échelle du site d'études!



Acquisition des données: RESOLVE

Le système RESOLVE de CGG:

- 6 fréquences de 400 Hz à 140 kHz
- Deux orientations HCP et VCP
- Profondeur de peau entre 1 et 25 m au site d'études

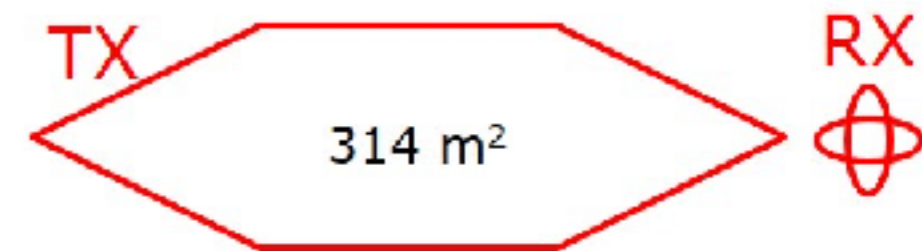
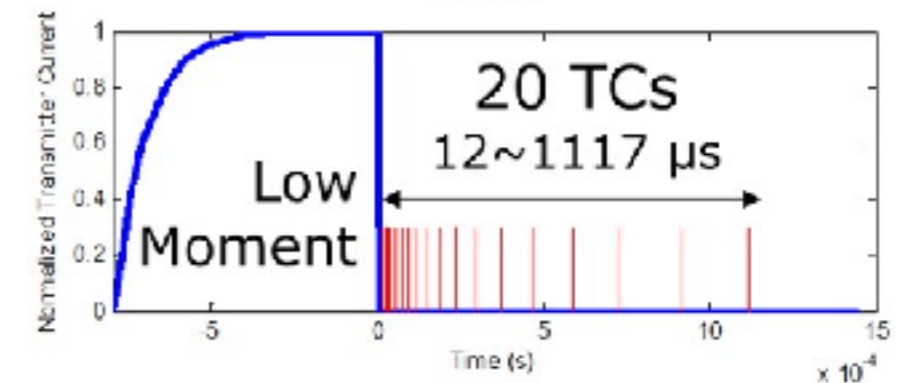
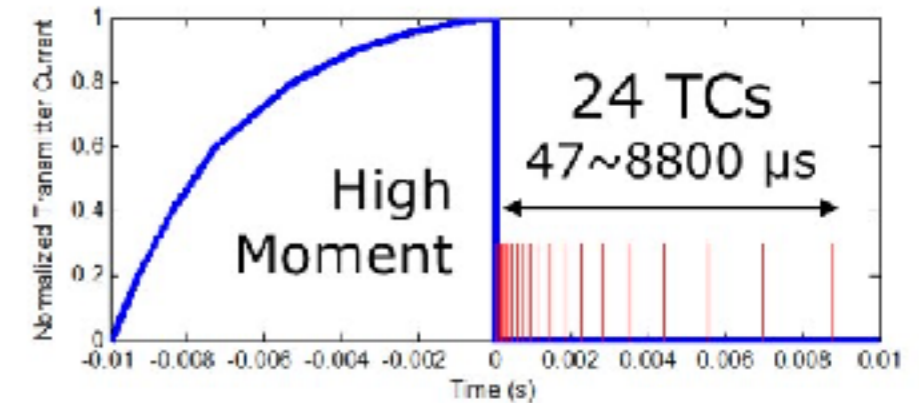


Acquisition des données: SkyTEM

Le SkyTEM possède deux signaux de transmetteur:

- Un signal de faible moment et de haute fréquence
- Un signal de fort moment et de basse fréquence

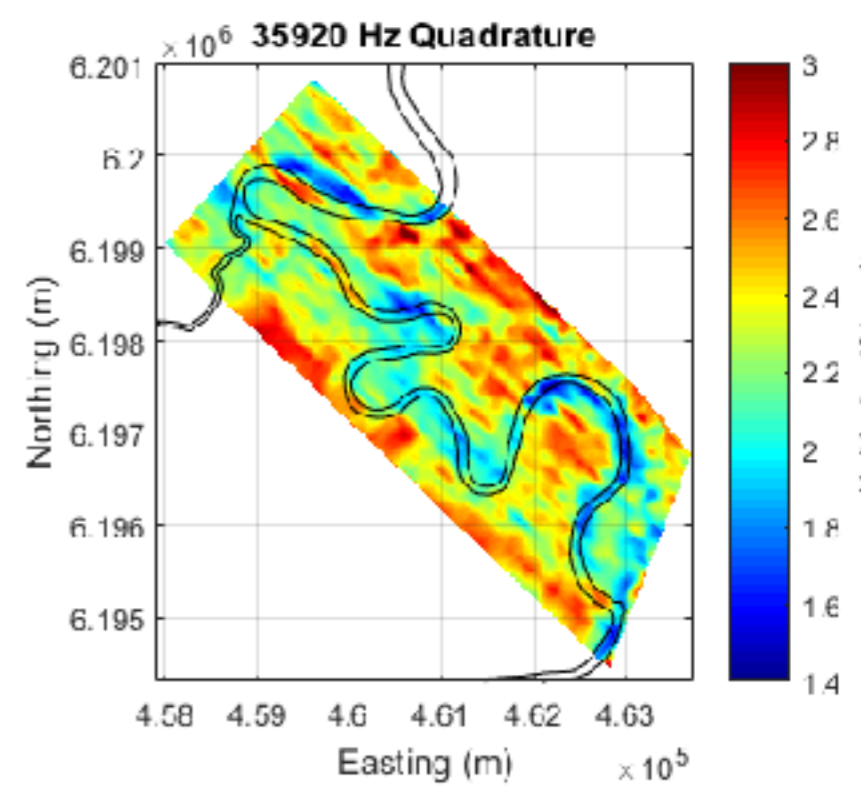
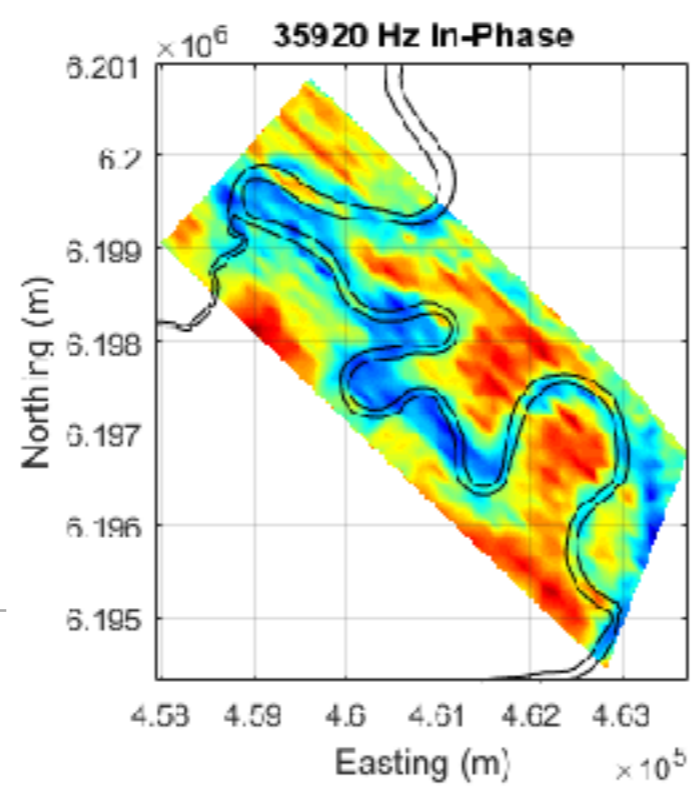
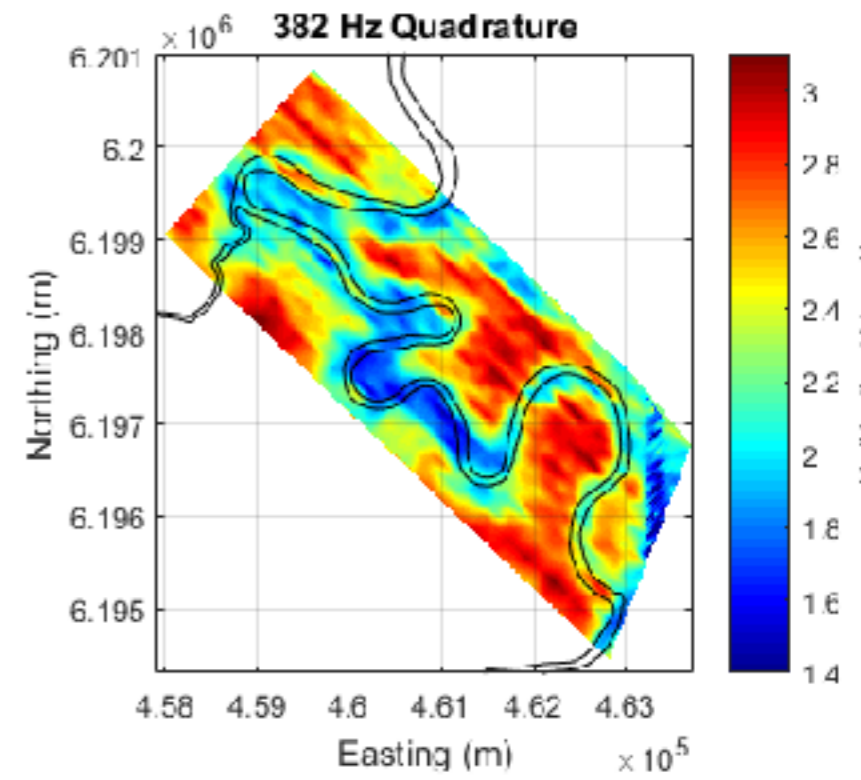
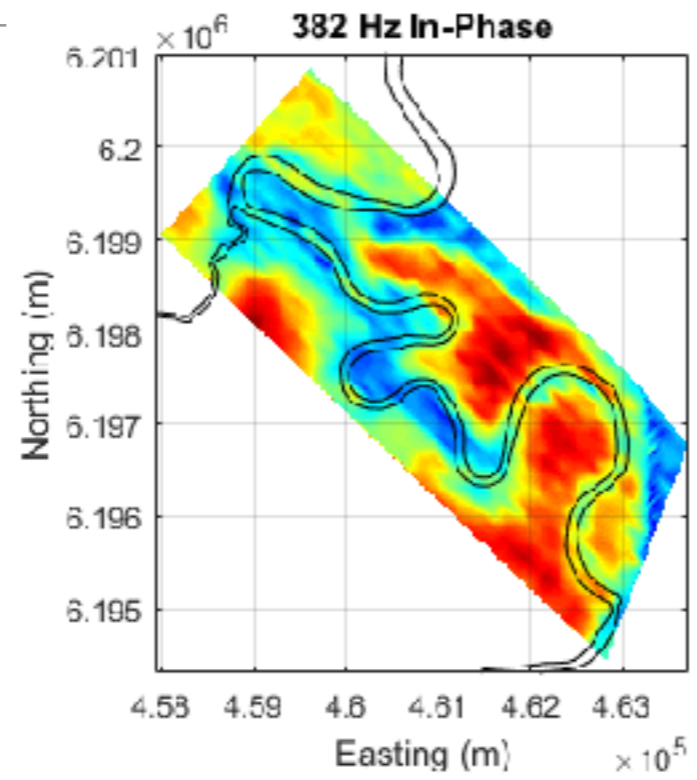
Ceci permet de mesurer précisément à la fois les temps courts et les temps longs.



Données brutes FEM

Données brutes mises en carte pour deux fréquences.

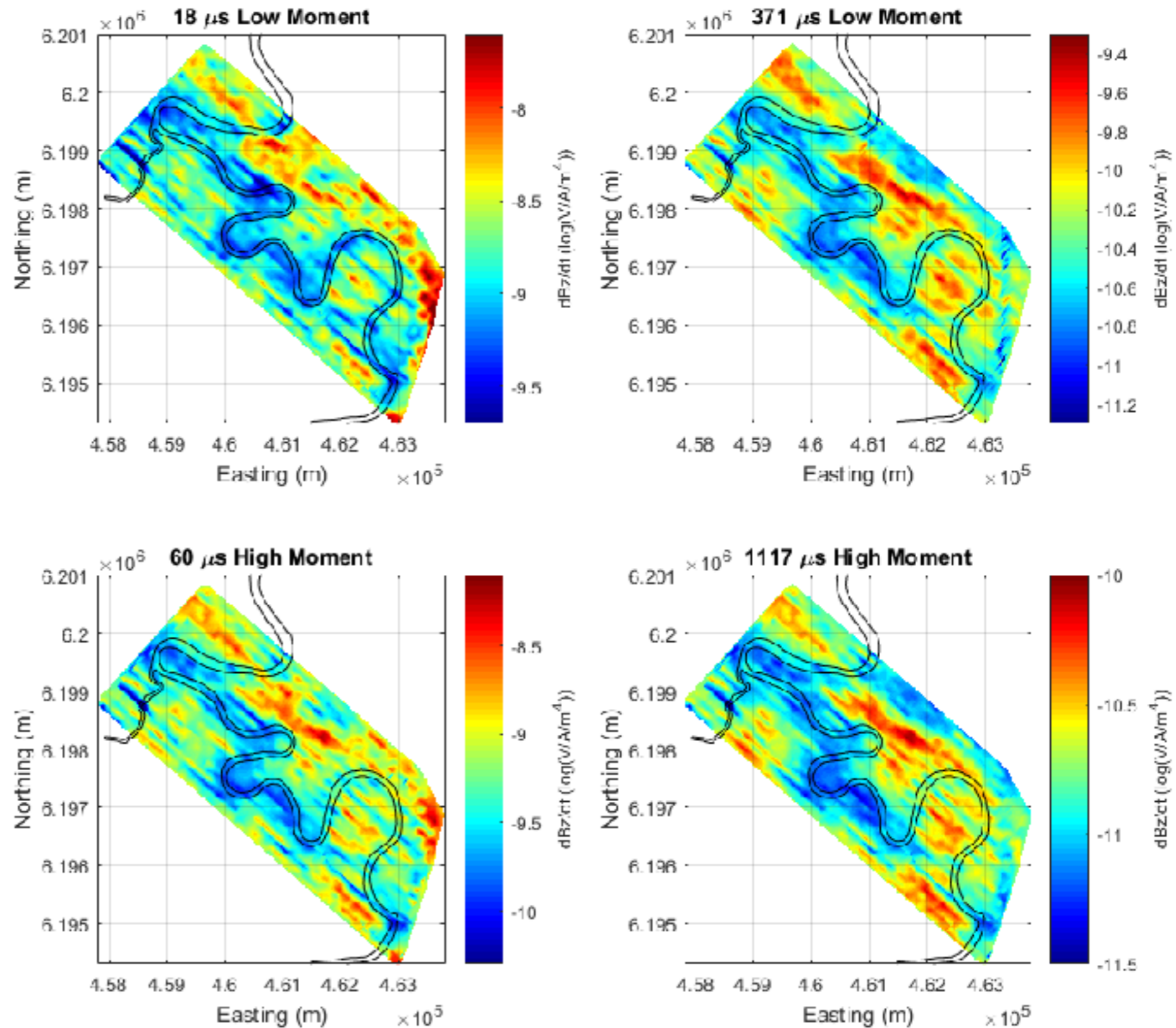
Les données de haute fréquence ont une meilleure résolution, mais sont aussi plus bruitées.



Données brutes TDEM

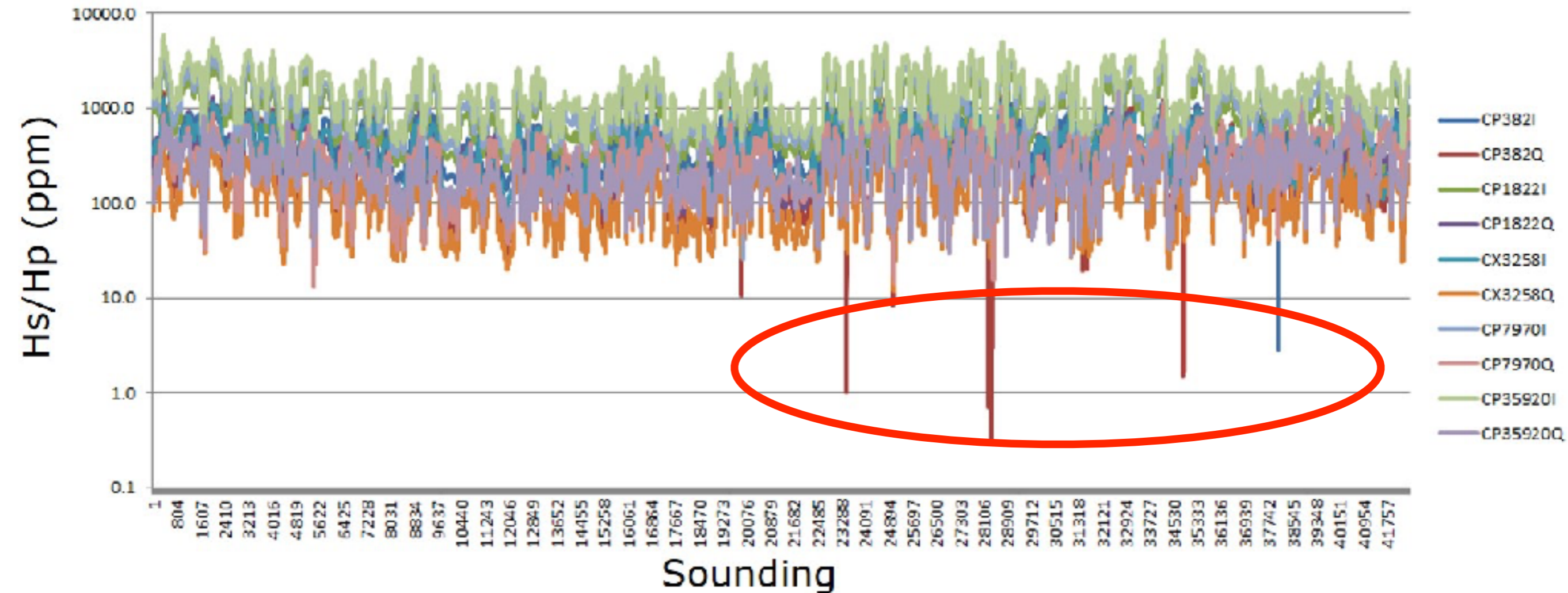
Cartes des dérivées du champ magnétique à différentes fenêtres d'écoute.

Des réponses de plus haute amplitude pour un temps donné indiquent une conductivité plus élevée.



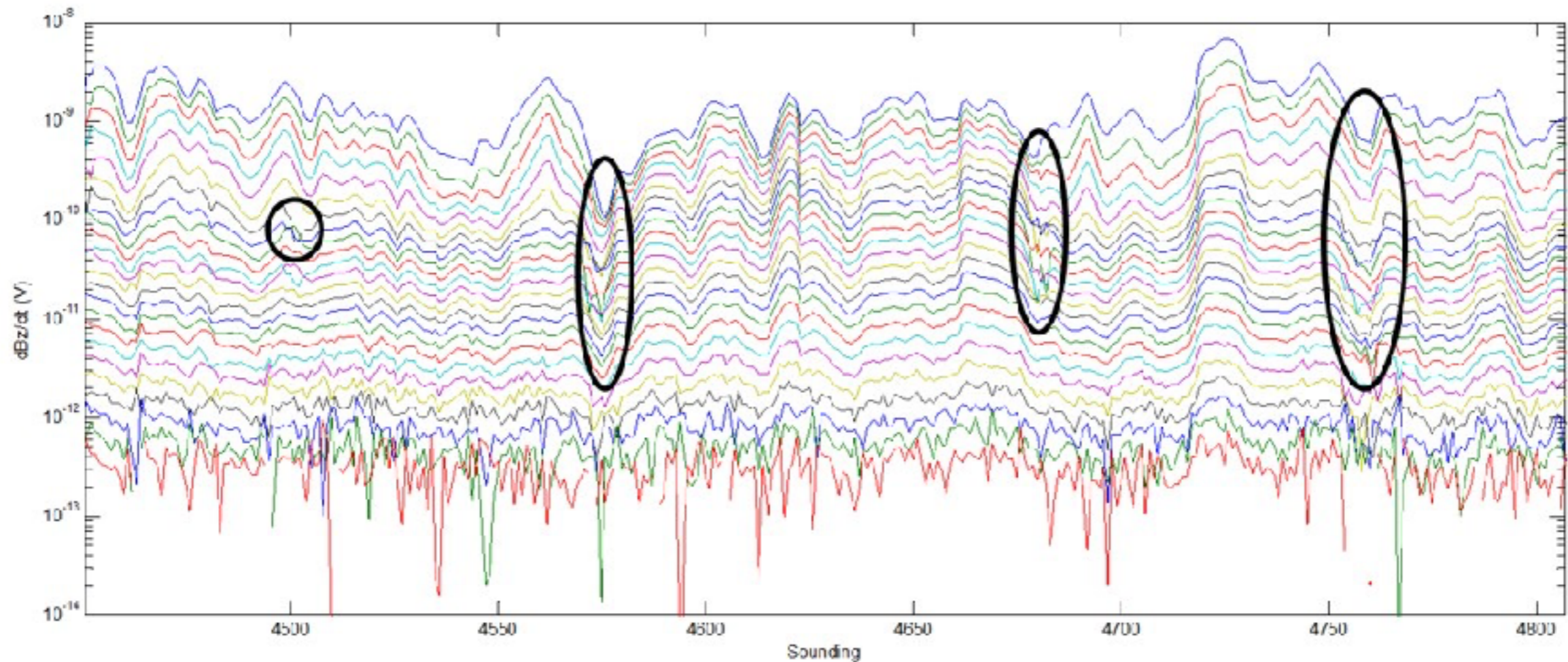
Traitement des données: FEM

Avant l'inversion, les données de trop faible qualité doivent être éliminées. Notamment les rapports Hs/Hp qui présentent une chute rapide sont éliminés.



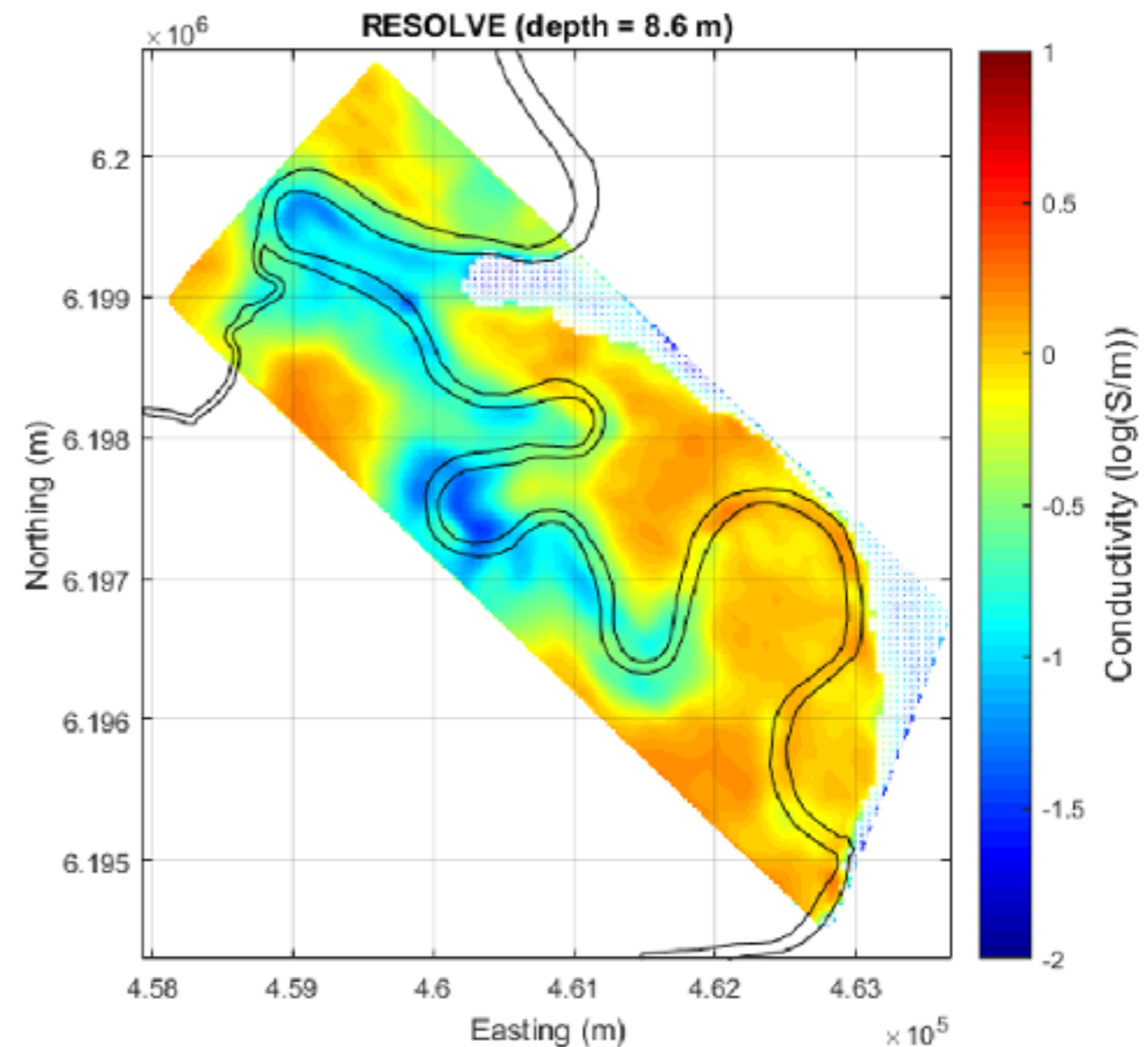
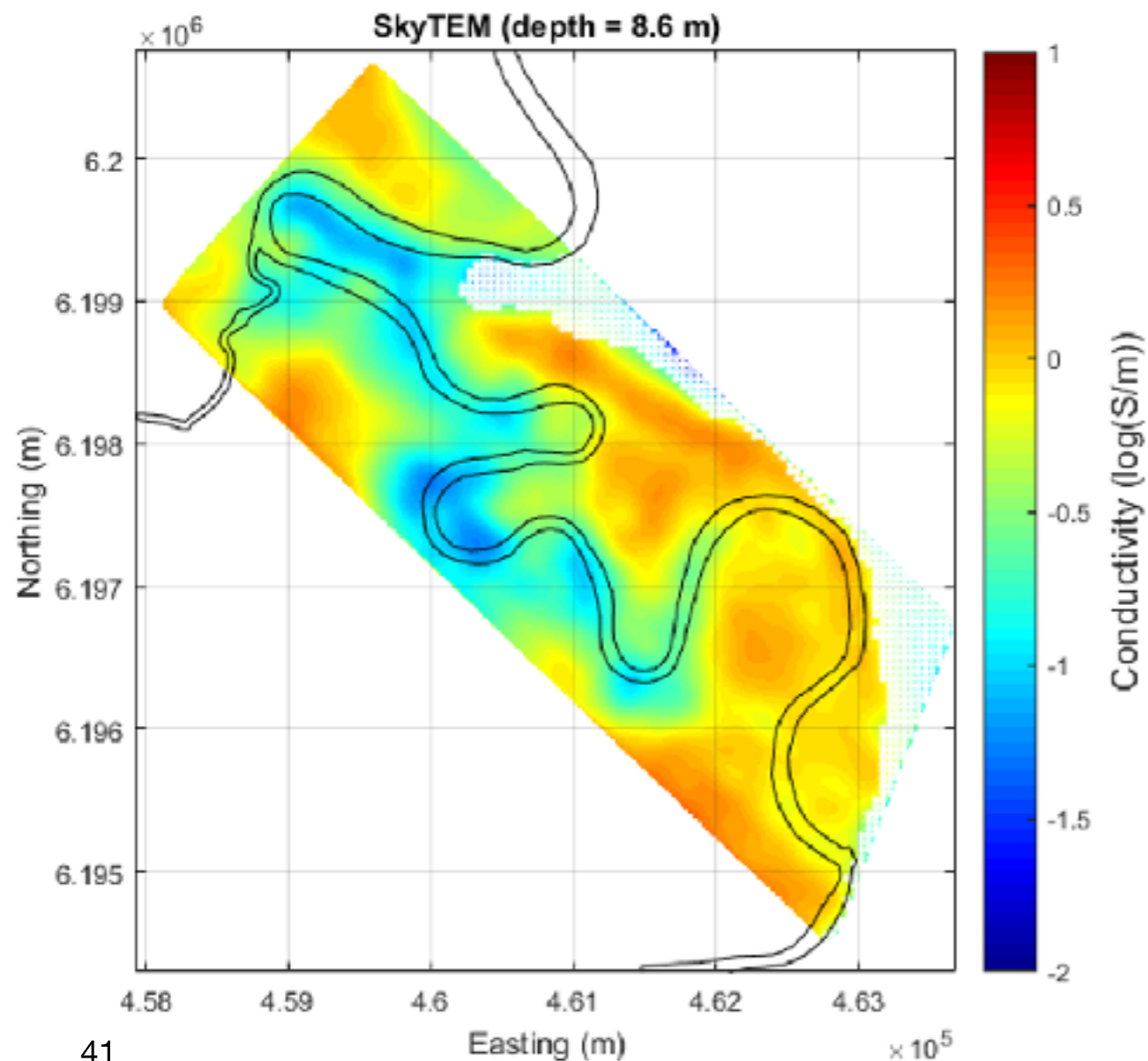
Traitement des données: TDEM

Pour le TDEM, les décroissances qui sont trop abruptes ou trop différentes des canaux adjacents sont enlevées.



Interprétation: Résultat des inversions

Les levés FEM et TDEM sont inversés en 1D et assemblés pour faire des modèles 3D. Des zones de forte conductivité sont associées à un contenu en sel élevé.



Synthèse hydrogéologique

Les modèles 3D de résistivité des deux méthodes sont comparables et permettent une interprétation hydrogéologique:

- Rivière qui alimente la nappe: La conductivité électrique est faible (zones en bleu)
- Nappe qui alimente la rivière: La conductivité électrique est élevée (zones en rouge)

Les mesures EM permettent donc de faire le suivi des mesures de remédiation en vue de contrôler de la salinisation de la plaine inondable.

