

LE PROSPECTEUR DOIT-IL PRENDRE EN COMPTE LA POLARISATION ELECTRIQUE DANS LA GAMME DE FREQUENCE 10 KHZ – 100 KHZ ?

TABBAGH A.¹, SIMON F.-X.², VITALE Q.³

¹ Sorbonne-Université, UMR7619 Métis, Paris, France

² Inrap, UMR 6249 Chrono-Environnement, Dijon, France

³Éveha International, Université de Lyon, UMR5133-Archeorient, France

Dans la gamme [10 kHz – 100 kHz] il est possible de mesurer la conductivité/résistivité du sous-sol avec une profondeur d'investigation qui ne soit pas trop limitée par l'effet de peau, aussi bien pour les mesures par la méthode **électrostatique** où l'impédance des pôles ne peut être trop forte, que pour les mesures par induction (**EMI**) où le signal généré par les courants de Foucault doit être suffisamment fort.

Dans cette gamme interviennent la conductivité, σ , la permittivité relative qui rend compte de la polarisation électrique, $\epsilon_r(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega)$ et la susceptibilité magnétique $\kappa(\omega) = \kappa'(\omega) - i\kappa''(\omega)$.

Que montre la permittivité ?

La littérature, comme les expériences, montre que, les valeurs peuvent dépasser $\epsilon_r = 10000$, qu'une corrélation existe avec les valeurs de conductivité et que la granularité et la teneur en eau jouent des rôles importants. Néanmoins la variation avec la teneur en eau est différente de celle de la conductivité (Fig. 1).

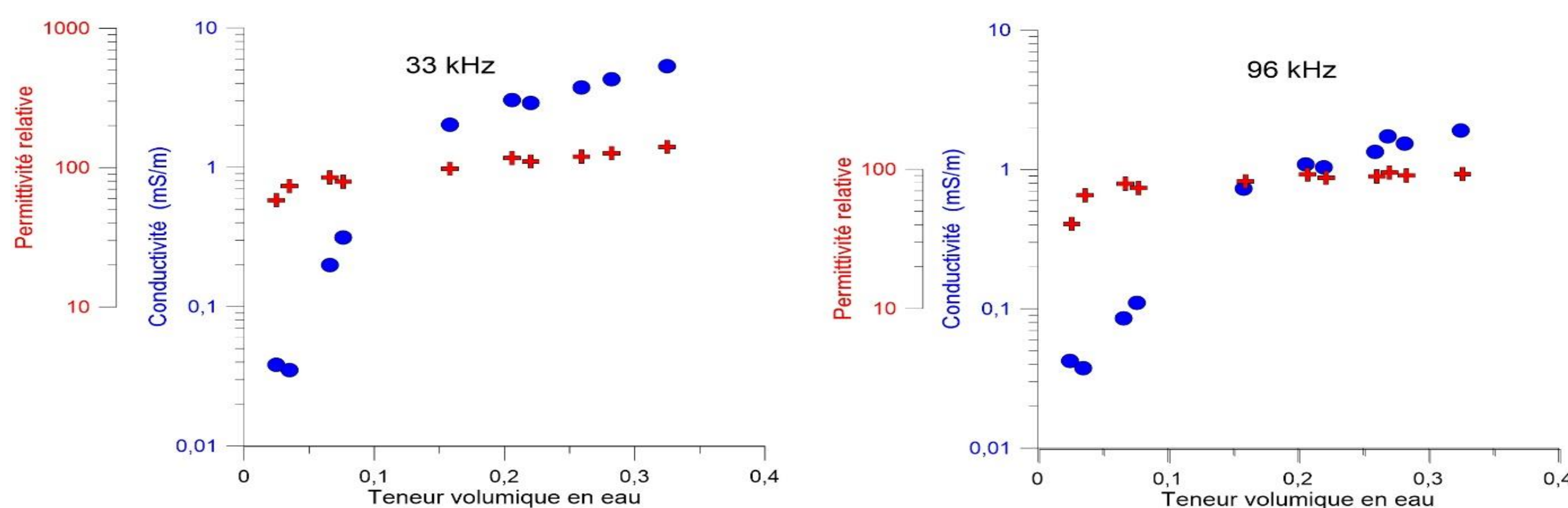


Fig. 1 : Variations de la conductivité et de la partie réelle de la permittivité relative avec la teneur volumique en eau pour un sol de limon aux fréquences de 33 kHz et 96 kHz.

Mesure des propriétés

Avec la méthode électrostatique, la susceptibilité magnétique n'intervient pas. On mesure l'impédance complexe $Z = K \frac{\Delta V}{I} = p + iq$

dont on déduit :

$$(\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon'') = \frac{p}{p^2 + q^2} \text{ et } \epsilon' = -\frac{q}{p^2 + q^2} \frac{1}{\omega \epsilon_0} - l$$

Avec les appareils EMI, on dispose pour chaque fréquence et chaque disposition des bobines, de 2 données : la partie en phase $Ph(Hs/Hp)$ et celle en quadrature $Qu(Hs/Hp)$ du rapport du champ secondaire au champ primaire, alors que quatre paramètres doivent être déterminés : $(\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon'')$, ϵ' , κ' et κ'' . Les réponses dues à κ' et ϵ' sont linéaires et se superposent dans $Ph(Hs/Hp)$, mais peuvent être séparées en utilisant deux configurations de bobines différentes.

Beaucoup de mesures EMI ont été faites sans chercher à déterminer la permittivité, peut-on les réinterpréter ?

(1) Exemple du site de Pyrgi (Toscane, Italie)

Les données ont été acquises en HCP seulement, avec une altitude de l'appareil de 0,9 m et sans aucun étalonnage avec le CMD explorer à trois réceptrices écartées de 1,48, 2,82 et 4,49 m de l'émettrice à la fréquence de 10 kHz. L'appareil affiche pour chaque point une ECa à partir de laquelle on doit revenir à la réponse en quadrature. Puis, on doit à partir du calcul complet de la réponse d'un sol homogène, obtenir la conductivité apparente. On soustrait ensuite de la composante en phase la réponse en phase due à cette conductivité.

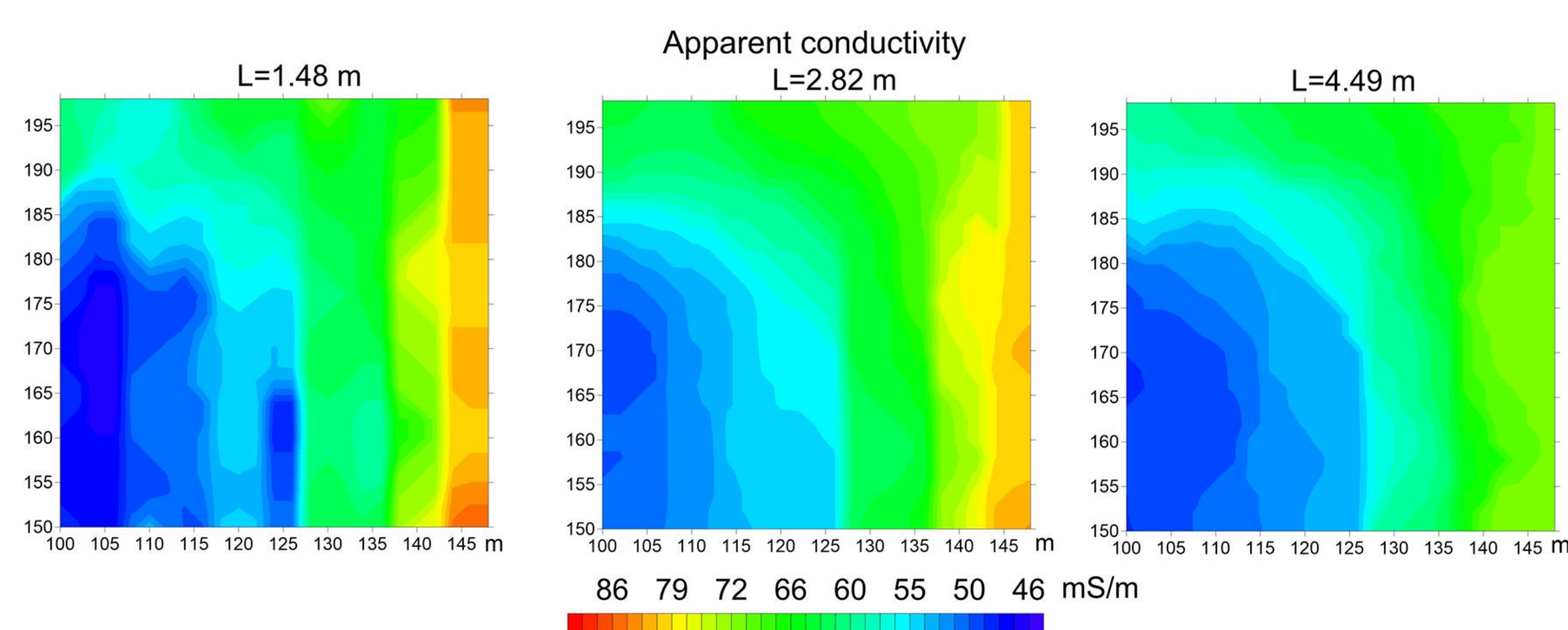


Fig. 2 : Conductivité apparente de la zone 15c aux trois écartements. Les valeurs corrigées sont un peu plus faibles que les ECa données par le constructeur.

Comme le montre le tableau 1, les mesures en phase présentent des offsets très importants, mais qui n'affectent pas les variations.

	Ph(Hs/Hp) 1 ^{er} Sextile	Ph(Hs/Hp) Médiane	Ph(Hs/Hp) Dernier sextile	écart correspondant à l'inter-sextile $\Delta\epsilon_r$ $\Delta\kappa'$ (10^{-5} SI)	
1.48 m	-1661 ppm	-1635 ppm	-1620 ppm	2751	44,2
2.82 m	-3367 ppm	-3326 ppm	-3286 ppm	1155	-225
4.49 m	-5211 ppm	-5109 ppm	-4973 ppm	1261	-111

Tableau 1 : Variations de la composante en phase résultante. On observe de très forts offsets mais des $\Delta\epsilon_r$ vraisemblables et des $\Delta\kappa'$ invraisemblables pour 2,82 et 4,49 m.

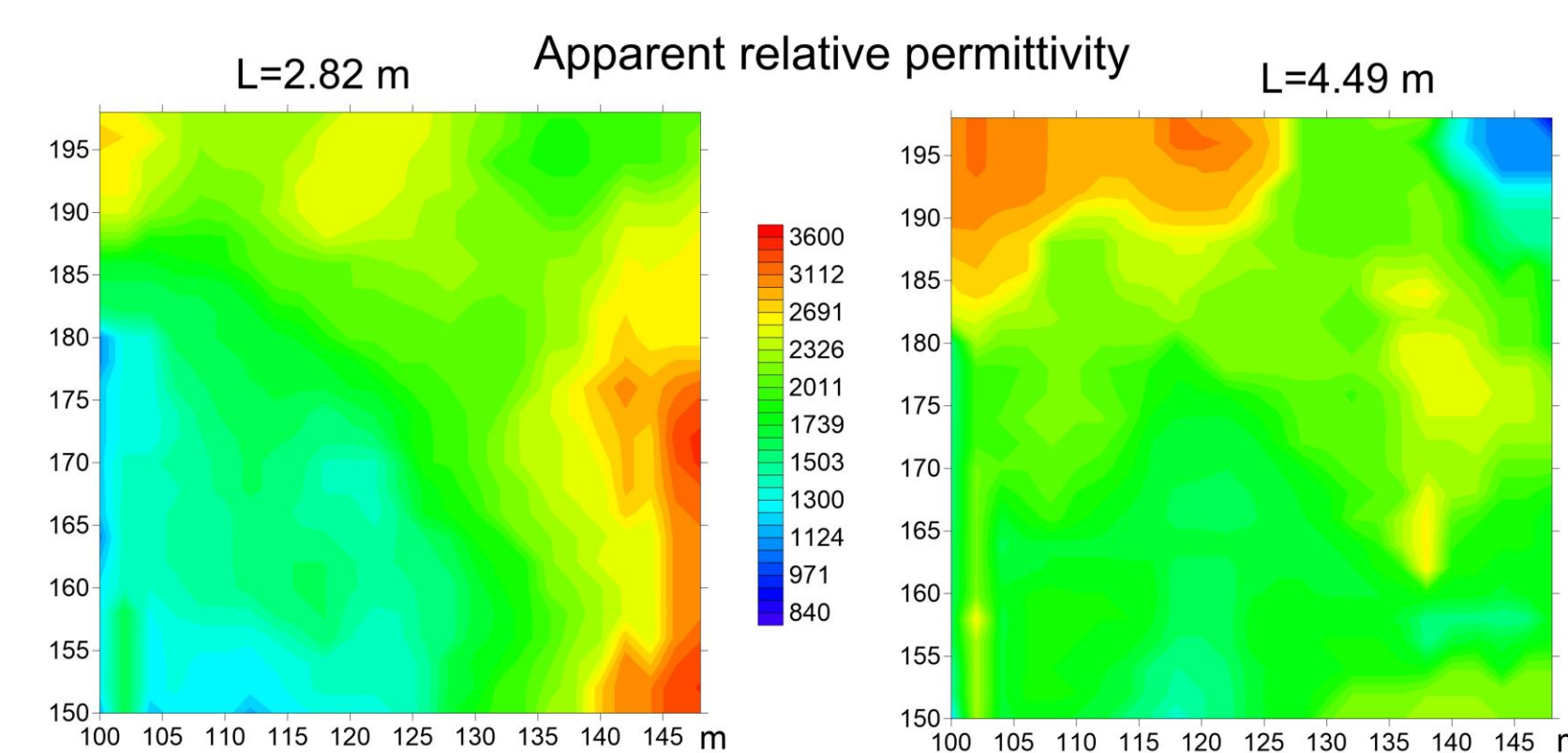


Fig. 3 : Permittivité relative apparente où les offsets ont été corrigés (arbitrairement mais esthétiquement) en imposant que la médiane vaille 1,6 fois l'inter-sextile.

(2) Exemple du site de Bourbourg (Nord, France)

Le GEM-2 permet un choix de fréquence dans la gamme [10 kHz – 100 kHz]. Il mesure la différence des champs secondaires entre deux réceptrices montées en opposition et situées à 1,66 m et 1,035 m de l'émettrice, de telle sorte que l'effet du champ primaire soit annulé.

Ici l'appareil a été utilisé sans étalonnage, tiré sur une luge à l'altitude de 0,2 m. Les offsets en quadrature sont importants, mais il est possible, en imposant que les conductivités aux différentes fréquences soient très proches, de les définir. La figure 4 montre deux cartes de conductivité ainsi obtenues.

	Ph(Hs/Hp) 1 ^{er} Sextile	Ph(Hs/hp) Médiane	Ph(Hs/Hp) Dernier sextile	Ecart correspondant A l'inter-sextile $\Delta\epsilon_r$ $\Delta\kappa'$ (10^{-5} SI)	
5010 Hz	89,8 ppm	160,0 ppm	231,5 ppm	33295	22,3
10350 Hz	-122,0 ppm	-58,0 ppm	16,4 ppm	8190	21,8
21390 Hz	-575,2 ppm	-502,5 ppm	-368,6 ppm	2858	32,5
44250 Hz	-842,5 ppm	-723,0 ppm	-441,8 ppm	1291	63,0
91470 Hz	3928 ppm	4257 ppm	4757 ppm	622,1	130,4

Tableau 2 : Variations de la composante brute en phase. Aux deux fréquences les plus basses les écarts en κ' sont cohérents et montrent un milieu peu magnétique, ce n'est plus le cas aux trois autres fréquences où la permittivité domine la réponse. Pour les deux plus hautes fréquences, on peut négliger l'effet de la susceptibilité magnétique.

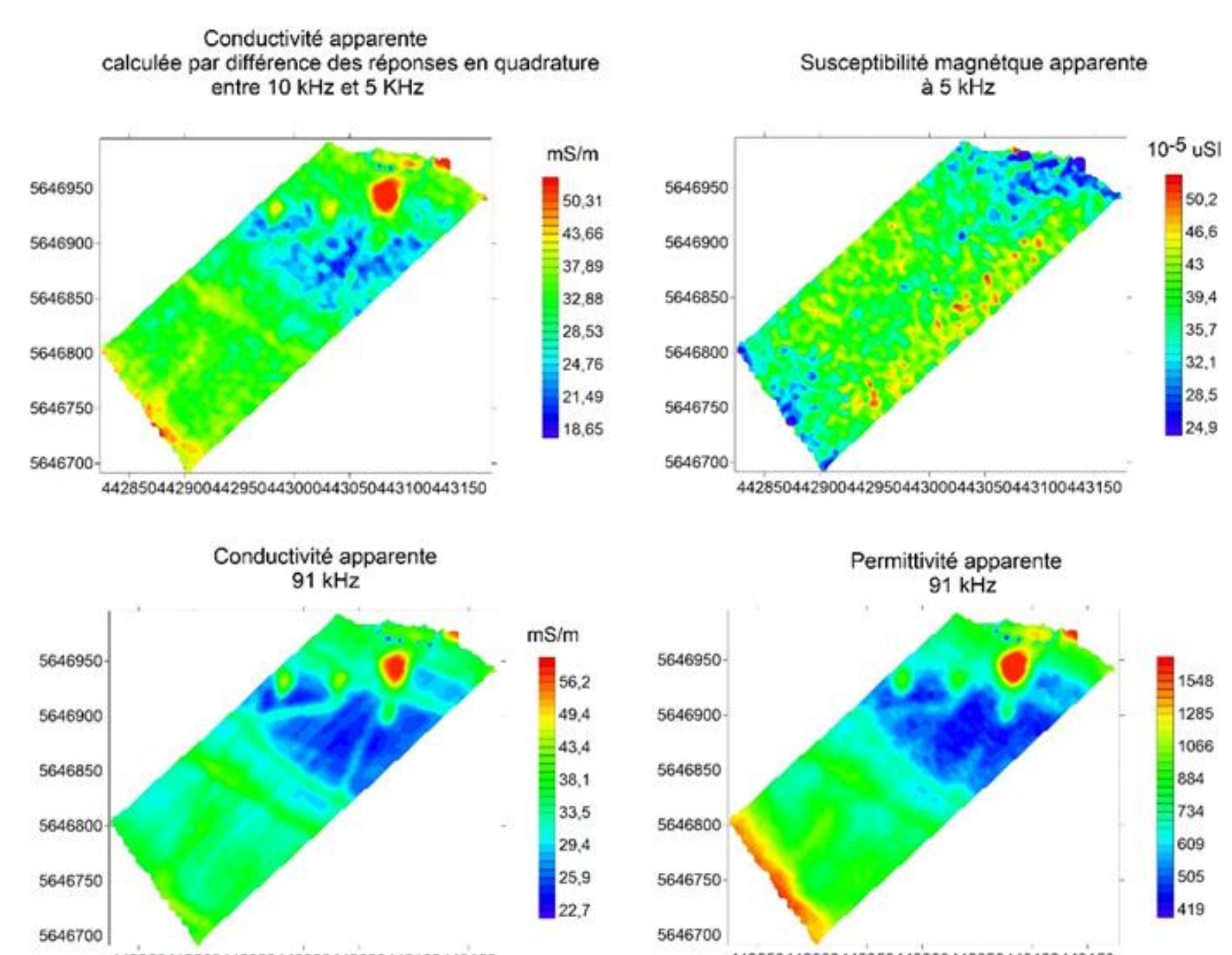


Fig. 4 : La conductivité à 91 kHz est très proche de celle obtenue par la différence de réponse en quadrature entre 10 et 5 kHz. La réponse en phase à 5 kHz permet de cartographier la susceptibilité magnétique, celle à 91 kHz la permittivité.

Conclusion

Quoiqu'il soit toujours souhaitable d'étalonner les appareils EMI pour déterminer précisément les offsets en phase comme en quadrature, il est néanmoins possible de cartographier les variations des trois propriétés. Beaucoup de mesures faites sans exploiter la réponse en phase peuvent être réinterprétées.