Principe de la méthode

- Dans un terrain homogène ou stratifié horizontalement, les flux de courant sont horizontaux et le champ électromagnétique est uniforme. On peut assimiler les surfaces d'onde à leur plan tangent. Dans les corps conducteurs, les ondes électromagnétiques induisent des courants électriques qui engendrent eux-mêmes des champs secondaires, en quadrature avec les champs primaires. Les champs résultants sont polarisés elliptiquement et modifiés au voisinage des conducteurs.
- Les méthodes électromagnétiques de type Slingram sont basées sur la mesure de la perturbation d'ondes électromagnétiques dans le sol. Ces méthodes fonctionnent de la manière suivante :
  - un champ magnétique « primaire » Hp est émis par une boucle d'émission par circulation d'un courant électrique alternatif dans cette dernière ;
  - dès son émission, le champ primaire engendre dans le sol, par effet d'induction, des courants électriques pouvant être modifiés par les hétérogénéités du sous-sol ;
  - ces courants induits créent à leur tout un champ magnétique « secondaire » Hs, de fréquence identique au champ primaire.
- La somme des champs est ensuite mesurée par la bobine réceptrice. Le champ primaire étant connu, il est possible de déduire la conductivité électrique apparente du sous-sol. Sous certaines conditions, on peut admettre que le rapport entre les deux champs est le suivant :

$$\frac{Hs}{Hp} = \frac{i\,\omega\,\mu o\,\sigma\,s^2}{4}$$

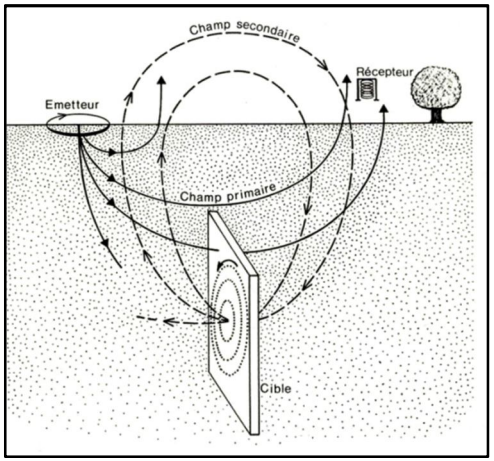
$\omega = 2\,\pi\,f$
f = fréquence en Hertz
μo = perméabilité du vide en Henry/m
σ = conductivité en mhos/m
s = espacement des bobines en mètres
$i = \sqrt{-1}$

$$\rho a = \frac{4}{\omega\,\mu o\,s^2}\,\frac{(Hs)}{(Hp)}$$

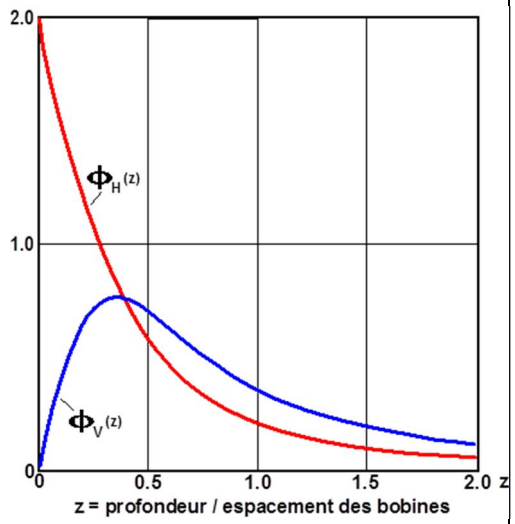
- Certains appareils mesurent en plus de la conductivité, la composante en phase avec le champ primaire qui donne une information sur la susceptibilité magnétique. La phase est sensible aux objets métalliques et donc très utile pour juger de la qualité des mesures, ou mettre en évidence des structures enterrées.
-

Profondeur d'investigation

- La profondeur d'investigation dépend de la distance entre les bobines et de leur arrangement ; les bobines peuvent être maintenues verticales, le dipôle étant alors horizontal, ou posées à plat sur le sol, avec dipôle vertical.
- Dans le cas d'un milieu homogène semi-infini, le champ magnétique secondaire peut être calculé pour toute tranche de terrain ; on obtient ainsi les courbes de la figure ci-contre qui donnent, pour les deux dipôles, les réponses relatives d'une couche mince située à différentes profondeurs.
- Il apparaît clairement que, pour le dipôle horizontal, les couches superficielles influencent considérablement les mesures, alors que, pour le dipôle vertical, les couches prépondérantes sont situées à Z = 0,4. Toutefois, les terrains localisés à une profondeur supérieure à Z = 1,5 interviennent encore de façon notable.
  Ce qui explique que les mesures en dipôles horizontal et vertical, ayant théoriquement une même profondeur d'investigation, sont rarement similaires.



Principe de la distribution des courants (C. Meyer de Stadelhofen)



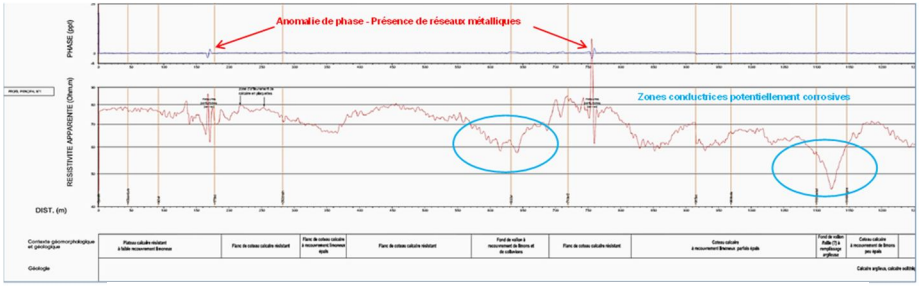
Comparaison des réponses d'une couche mince en dipôle horizontal et vertical (Geonics)

$$\Phi H(Z) = 2 - \frac{4\,z}{(4\,z^2+1)^{1/2}} \quad \text{et} \quad \Phi V(Z) = \frac{4\,z}{(4\,z^2+1)^{3/2}}$$

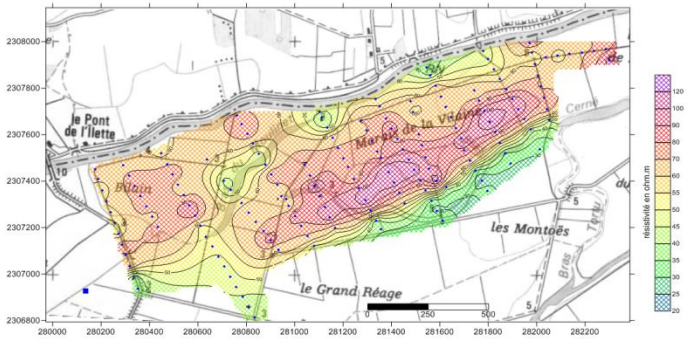
$$\text{avec} \quad Z = \frac{\text{profondeur}}{\text{espacement des bobines}}$$

Applications

- Ces matériels permettent de réaliser très rapidement des profils ou des cartographies de conductivité et/ou de phase.
- Du fait de la simplicité d'utilisation de ces matériels et les prises de mesures par enregistreur en continu et GPS, les applications sont nombreuses.
- Les mesures de résistivités/conductivités et de phase sont mises en œuvre :
  - en génie civil :
    - pour l'enfouissement de réseaux par profilage en continu ;
    - pour connaître la qualité du sous-sol : évaluation de la nature du recouvrement et de la profondeur du substratum ;
    - pour la cartographie de friches industrielles par la mise en évidence de structures anthropiques ;
    - pour cartographier des pollutions ;
  - en hydrogéologie :
    - mise en évidence de paléochenaux en domaine alluvial ;
    - recherche de fractures en terrain sédimentaire induré ;
    - mise en place de piézomètres ;
  - en recherche de matériaux :
    - cartographie de la variation des épaisseurs et de la qualité des matériaux ;
  - en archéologie.
- La résolution dépend de l'écartement des capteurs, de la vitesse d'acquisition pour les mesures en continu et du maillage pour la cartographie.



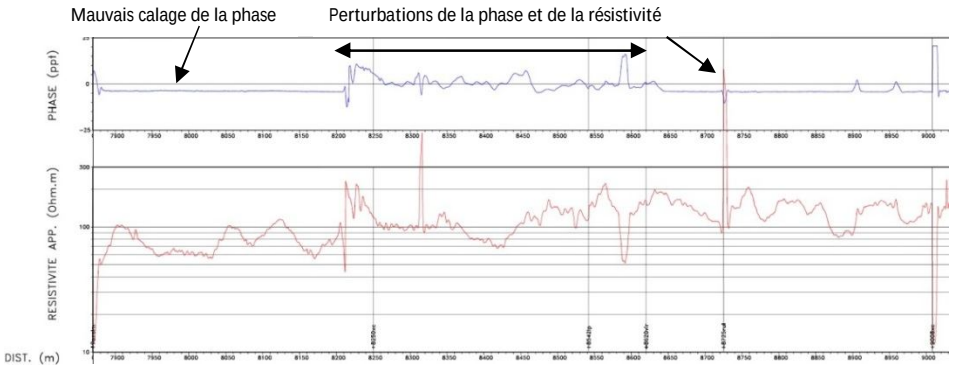
Courbe de résistivités EM 31 interprétées en fonction des observations géologiques (Calligée)



Recherche de paléochenaux dans des alluvions - Cartographie EM 34-3 dipôle horizontal 10 m (Calligée)

Limitations / Contraintes / Interdits

- Les méthodes électromagnétiques sont sensibles aux lignes électriques, clôtures, bâtiments métalliques, véhicules, etc. L'utilisation en milieu urbain dense n'est pas envisageable, les interprétations seront très difficiles, voire impossibles.
- La profondeur d'investigation dépend de la configuration du matériel (liée à la fréquence), mais également de la résistivité du terrain, notamment en milieu salé. Le choix du matériel doit donc être fait en fonction du contexte géologique, de ce que l'on cherche (anomalies anthropiques ou naturelles) et de la profondeur attendue.
- De même, la maille de mesure doit être adaptée à l'anomalie recherchée (blocs, cuves, etc.), sachant que la mise en évidence de telles structures à grande profondeur n'est pas possible.
- Pour l'EM 34-3, les bobines doivent être parfaitement alignées en dipôle horizontal et maintenues horizontales en dipôle vertical afin d'avoir des mesures correctes.
- Les mesures sont des mesures apparentes, elles intègrent l'ensemble des terrains au-dessus de la profondeur théorique d'investigation, il est donc nécessaire de connaître les terrains superficiels pour pouvoir interpréter les mesures en profondeur.



Effet de perturbations dues à des réseaux enterrés sur les mesures de résistivités apparentes en EM 31 (Calligée)

Moyens nécessaires à l'acquisition

- Equipements : les équipements très variés, depuis longtemps Geonics a décliné la série des EM :
  - EM 38 (profondeurs d'investigation théoriques de 0.375 m, 0.75 m, 0.75 m et 1.5 m, suivant l'agencement des bobines) ;
  - EM31 (profondeur d'investigation théorique de 3 et 6 m) ;
  - EM 34-3 et EM 34-3 XL, l'EM 34-3 XL possède une bobine d'injection beaucoup plus grande que l'EM 34-3, permettant des mesures dans un environnement un peu plus bruité. Les profondeurs d'investigation théoriques sont de 7.5 m, 15 m, 15 m, 30 m, 30 m et 60 m, avec les bobines séparées par des câbles de différentes longueurs.

  Mais depuis quelques années, d'autres constructeurs proposent des matériels à plusieurs configurations différentes permettant la prise de mesures simultanées de 3, 4 ou 6 fréquences (série des DUALEM, CMD).

  Iris Instruments a construit un matériel slingram avec plusieurs espacements inter bobines de 20 à 400 m. Cet appareil est libre de tout contact avec le sol et permet la réalisation de profils de manière très rapide, de l'ordre de 2 minutes pour 10 fréquences avec le dispositif 200 m. Le matériel est cependant très encombrant et lourd à mettre en œuvre. Le plus long et le plus contraignant reste le déplacement de tout le système en contexte de bocage (haies, clôtures, lignes électriques, etc.).
- Positionnement : le matériel classique pour le repérage des profils, jalons, décamètre, topofil, GPS pour le calage des points singuliers ou en prise de mesures directe, etc.
- Véhicules : un véhicule de transport léger (camionnette, break), de préférence tout-terrains/tout-chemins, permettant l'accès au site du personnel et de l'équipement. Les mesures se font ensuite à pied.
- Personnel et compétences : un opérateur qualifié et un aide éventuellement pour la prise de mesure avec les matériels légers, un opérateur qualifié et un ou plusieurs aides pour la prise de mesure avec les matériels à bobines séparées (notamment pour la sécurisation des passages de route, de haies, etc.). Un géophysicien qualifié pour l'interprétation.

EM 31 de Geonics (Calligée)

DUALEM 421 S (Géoréva)

Promis (Iris instruments)

Mise en œuvre sur le terrain

Travaux préparatoires

- Demande d'autorisations pour pénétrer sur les propriétés privées ;
- Repérage préalable du terrain à prospecter, implantation des profils par GPS, topofil, jalons, etc. pour un report précis ;
- Débroussaillage et layonnage éventuels ;
- Choix et matérialisation des points de mesure qui serviront à calculer la dérive du matériel pour les chantiers longs ;
- Montage du matériel, compensation et réglages dans un endroit exempt de perturbations (la calibration doit être faite en laboratoire). La compensation et les réglages doivent être refaits au même endroit à chaque reprise de chantier.

Mesures

- La prise de mesure est simple puisque les valeurs de conductivité (éventuellement de phase) sont directement données par l'appareil. Il faut quand même s'assurer du bon alignement et de l'horizontalité des bobines.

Mesures en dipôle horizontal (à gauche) et dipôle vertical (à droite) - EM 34-3 XL de Geonics (Calligée)

- Rajouter des commentaires qui pourront aider au report des mesures (déplacement éventuel d'un point en fonction de l'encombrement), ou à l'interprétation (affleurements, nature du sol, proximité de clôture, etc.).

<u>Contrôle qualité</u>

- Vérifier régulièrement des mesures. Pour les enregistreurs en continu, les données sont affichées en temps réel, pour les mesures directement lues sur l'appareil, les mesures sont reportées sur un carnet de terrain, il est facile de vérifier les mesures antérieures.
- Les données peuvent être enregistrées ou lues directement sur l'appareil, il est prudent de transférer les données régulièrement sur ordinateur et de faire une copie du carnet de terrain.
- Ne pas hésiter à refaire les mesures (ou faire des mesures intermédiaires en cas de doute ou pour préciser une variation).

<u>Production</u>

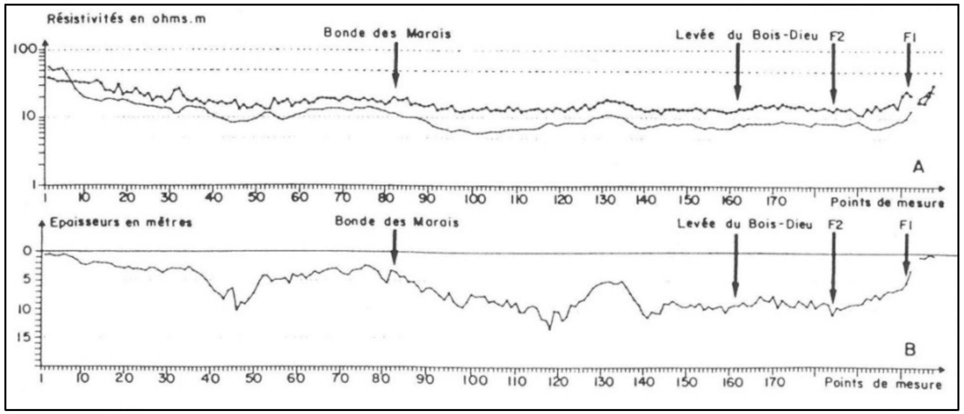
- Pour les mesures linéaires, avec un enregistreur en continu et un GPS, avec un matériel portable par une personne, on peut compter environ 10 à 15 km par jour suivant le contexte (en plein champ ou en chemin), prise de notes, report sur plan, transfert et vérification des données compris.
- Pour les cartographies, la production dépend du matériel, de la maille de mesure, des difficultés de terrain, etc. Pour l'EM 34-3, avec quatre profondeurs d'investigation, à la maille 20 x 20 m, environ 100 points par jour, à la maille 50 x 50 m, 60 points, prises de notes, report des données compris.
- Pour le Promis, les déplacements du matériel est le point limitant (encombrement du terrain, longueur du câble). Pour les espacements courts (jusqu'à 100 m), à la maille 20 m, on peut faire environ 50 points par jour (enregistrement de 10 fréquences).

mS/m	Conductivités	Conductivités	mS/m	-	WGS84	WGS84	Lambert II E	Lambert II E	Corrections	-	-	ıductivıS/r		-	-	Ωm	Résistivités	Résistivités	Ωm	-
VD 40m	HD 20m	VD 20m	HD 10m	VD 10m	X	Y	X	Y	HD 40m	VD 4(	H	VD 2(	HD	VD	HD 40m	VD 40m	HD 20m	VD 20m	HD 10m	VD 10m
15	21.5	21.7	16	23	-1.60654	47.48329	302959.9	2283415.83	-	-	-	-	-	-	43	67	47	46	63	4
17	21	20.2	16	20	-1.60722	47.48252	302904.42	2283332.91	-	-	-	-	-	-	42	59	48	50	63	5
7.5	16.1	14	15.1	19	-1.6079	47.48174	302848.89	2283248.87	-	-	-	-	-	-	73	133	62	71	66	5
14	16	15.5	14.4	19.1	-1.60858	47.48097	302793.41	2283165.95	-	-	-	-	-	-	71	71	63	65	69	5
11	15.7	14	16.2	16.1	-1.60926	47.4802	302737.93	2283083.02	-	-	-	-	-	-	77	91	64	71	62	6
	12.5	13	10.5	13.7	-1.60995	47.47943	302681.7	2283000.14	Clôture à moutons								80	77	95	7
	18.5		15.1	11	-1.61017	47.47875	302661.35	2282925.46	-	-	-	-	-	-	67		54		66	9
16.5	16.2	17	12.2	17.3	-1.61131	47.47789	302570.73	2282834.29	-	-	-	-	-	-	57	61	62	59	82	5
12	9.2	9.8	7.8	12.1	-1.61177	47.47737	302533.21	2282778.29	-	-	-	-	-	-	95	83	109	102	128	8
7.8	21	10	21	44	-1.60786	47.47538	302816.44	2282542.54	-	-	-	-	-	-	58	128	48	100	48	2
8	16.8	11	17	19.5	-1.60988	47.47624	302669.17	2282645.67	-	-	-	-	-	-	65	125	60	91	59	5
11.5	16.8	20.3	15.5	23.2	-1.61011	47.47633	302652.36	2282656.54	-	-	-	-	-	-	65	87	60	49	65	4
9	18.3	15.8	16.8	16	-1.61033	47.47643	302636.36	2282668.47	-	-	-	-	-	-	66	111	55	63	60	6
24.3	17.8	32	13.5	26.5	-1.61055	47.47653	302620.36	2282680.41	-	Ligne		GAZ	-	-						
195	80	165	48	95	-1.61078	47.47662	302603.54	2282691.27	-	Ligne		GAZ	-	-						
21	20	27	18	28	-1.611	47.47672	302587.54	2282703.21	-	Ligne		GAZ	-	-						
18	24	29	23	29.5	-1.61123	47.47681	302570.73	2282714.07	-	-	-	-	-	-	39	56	42	34	43	3
9.3	28.5	21	22.8	27.5	-1.61145	47.47691	302554.73	2282726.01	-	-	-	-	-	-	30	108	35	48	44	3
13.2	14.3	19	11.9	19.8	-1.61168	47.47701	302537.97	2282737.98	-	-	-	-	-	-	72	76	70	53	84	5
11.2	11.5	12.8	10.4	13	-1.6119	47.4771	302521.91	2282748.81	-	-	-	-	-	-	95	89	87	78	96	7
12	34	27	30	35	-1.60808	47.47547	302800.38	2282553.37	-	-	-	-	-	-	33	83	29	37	33	2
7.8	12	9.2	12	11.2	-1.61213	47.4772	302505.16	2282760.78	-	-	-	-	-	-	111	128	83	109	83	8
5.5	9	5.3	9	7.5	-1.61235	47.47729	302489.1	2282771.61	-	-	-	-	-	-	133	182	111	189	111	13
4	9.5	9.8	8.8	13	-1.61258	47.47739	302472.34	2282783.58	-	-	-	-	-	-	118	250	105	102	114	7
3.5	10.5	6.5	10	7	-1.6128	47.47748	302456.29	2282794.41	-	-	-	-	-	-	111	286	95	154	100	14
5	8.5	6.5	8	5.8	-1.61303	47.47758	302439.53	2282806.38	-	-	-	-	-	-	133	200	118	154	125	17
8	8.2	8.8	5.5	9	-1.61325	47.47767	302423.47	2282817.21	-	-	-	-	-	-	125	125	122	114	182	11
6	7.2	8	5	7.5	-1.61297	47.47798	302446.28	2282850.57	-	-	-	-	-	-	128	167	139	125	200	13
10.8	7.5	6	4.5	7.8	-1.61274	47.47788	302463.04	2282838.59	-	-	-	-	-	-	133	93	133	167	222	12
8.5	7	9	4.5	6.8	-1.61252	47.47779	302479.09	2282827.77	-	-	-	-	-	-	143	118	143	111	222	14
8	7	7.8	5.2	7	-1.61229	47.47769	302495.85	2282815.79	-	-	-	-	-	-	122	125	143	128	192	14
9	7.5	8.8	5.8	10	-1.61207	47.4776	302511.91	2282804.97	-	-	-	-	-	-	133	111	133	114	172	10
9	8.2	9.5	6.8	7.2	-1.61185	47.4775	302527.91	2282793.03	-	-	-	-	-	-	122	111	122	105	147	13
10.5	10	11.2	9	11.5	-1.61162	47.47741	302544.72	2282782.17	-	-	-	-	-	-	111	95	100	89	111	8
11.8	12.8	15.5	10.8	16	-1.6114	47.47731	302560.72	2282770.23	-	-	-	-	-	-	87	85	78	65	93	6
7.5	20	16	19	26.2	-1.61117	47.47721	302577.48	2282758.26	-	-	-	-	-	-	57	133	50	63	53	3
11.2	25.3	17.5	25	27.5	-1.61094	47.47712	302594.29	2282747.39		Ligne GAZ										
150	37	107	25.5	65	-1.61072	47.47702	302610.29	2282735.46		Ligne GAZ										
18.2	19.3	25.5	15.8	28.4	-1.6105	47.47693	302626.35	2282724.63		Ligne GAZ										
15	17.2	18	15	21	-1.61027	47.47683	302643.11	2282712.66	-	-	-	-	-	-	57	67	58	56	67	4
15	15	7.5	13.3	13.5	-1.61005	47.47674	302659.17	2282701.83	-	-	-	-	-	-	66	67	67	133	75	7
30	32	22	25	19.5	-1.60845	47.47572	302773.92	2282582.53	-	-	-	-	-	-	33	33	31	45	40	5
13.5	15	18.4	13	18.8	-1.60982	47.47664	302675.92	2282689.86	-	-	-	-	-	-	72	74	67	54	77	5
11.3	14.5	18	12.5	19.7	-1.6096	47.47654	302691.93	2282677.92	-	-	-	-	-	-	83	88	69	56	80	5
7.3	14	20	12	20	-1.60937	47.47645	302708.74	2282667.06	-	-	-	-	-	-	82	137	71	50	83	5
8	14.8	16	14	21.2	-1.60915	47.47635	302724.74	2282655.13	-	-	-	-	-	-	81	125	68	63	71	4

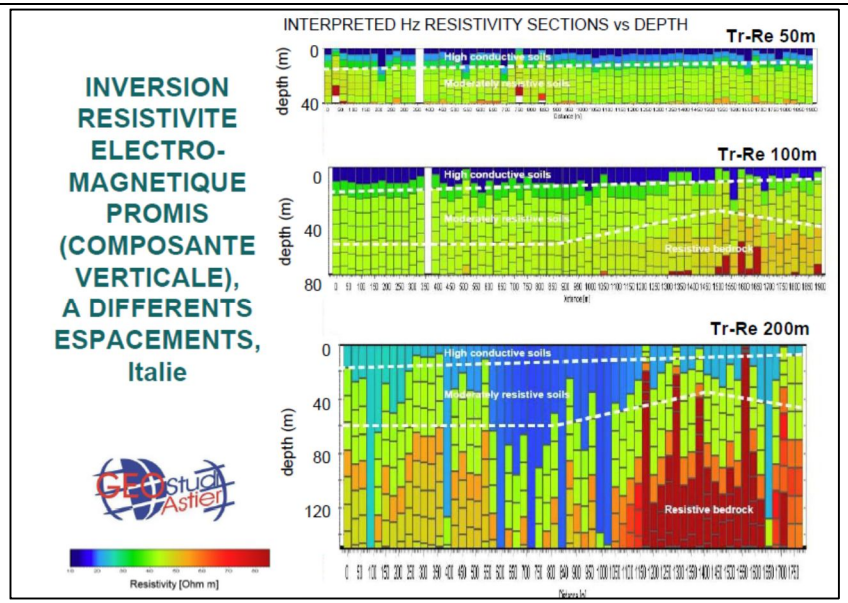
Tableau de mesures corrigé suite aux observations environnementales (Calligée)

Traitement et interprétation des données

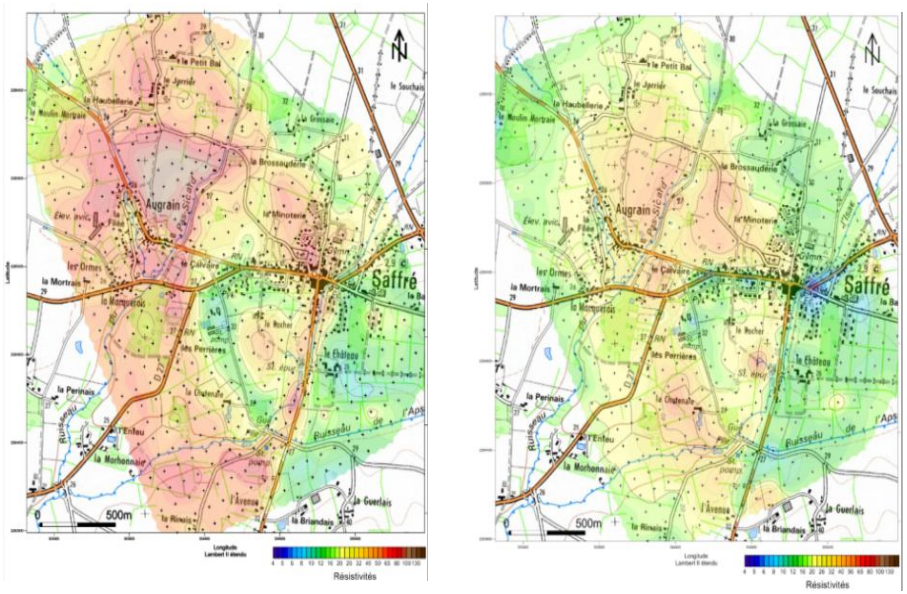
- Les résultats se présentent sous la forme d'une ou plusieurs mesures de conductivité ou de résistivité par point suivant les différents dispositifs disponibles. Il n'existe pas de logiciel spécifique d'inversion des données, nécessaire à l'obtention d'un modèle de terrain. L'inversion peut être réalisable en utilisant les logiciels d'interprétation de sondages électriques, mais reste délicate à mettre en œuvre et n'est pas satisfaisante (IX1D d'Interpex).
- La mesure de la résistivité à deux profondeurs différentes (bobines verticales et horizontales), permet parfois de faire des interprétations en modèle bicouche. Geonics propose des formules permettant de calculer les épaisseurs et la résistivité d'un deuxième terrain en faisant une hypothèse sur la résistivité du premier terrain. Il est toutefois nécessaire que les contrastes entre les terrains soient très importants pour avoir des résultats cohérents.
- La représentation des mesures reste souvent la réalisation de cartes ou de profils de conductivités/ résistivités apparentes.
- On peut toutefois avoir une bonne idée de l'organisation des terrains en profondeur en réalisant des cartes avec différentes configurations, avoir en tête les profondeurs d'investigations théoriques et connaître par ailleurs le contexte géologique.
- Des publications scientifiques donnent des pistes d'interprétation e à partir de tous les enregistrements du Promis : mesures des résistivités suivant 10 fréquences et des trois composantes du champ H



Profil EM 34 dans le Marais Poitevin - En haut données brutes, en bas profil interprété en profondeur (calcaire jurassique sous les argiles flandriennes) (Calligée)



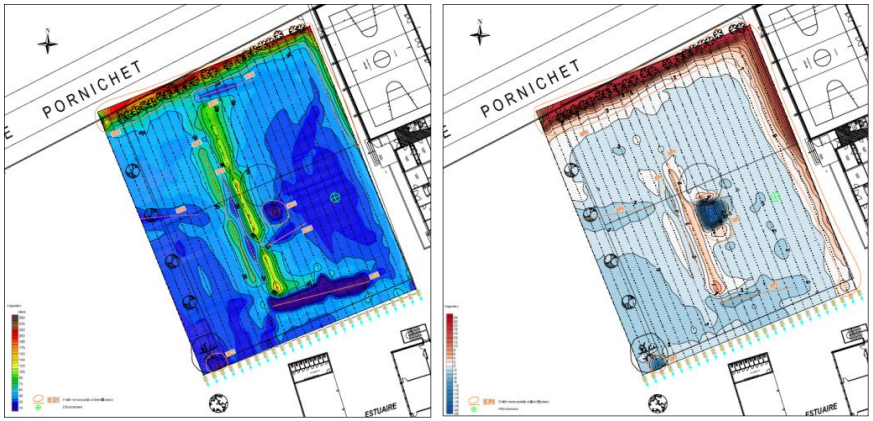
Restitution des données issues du Promis (Iris Instruments)



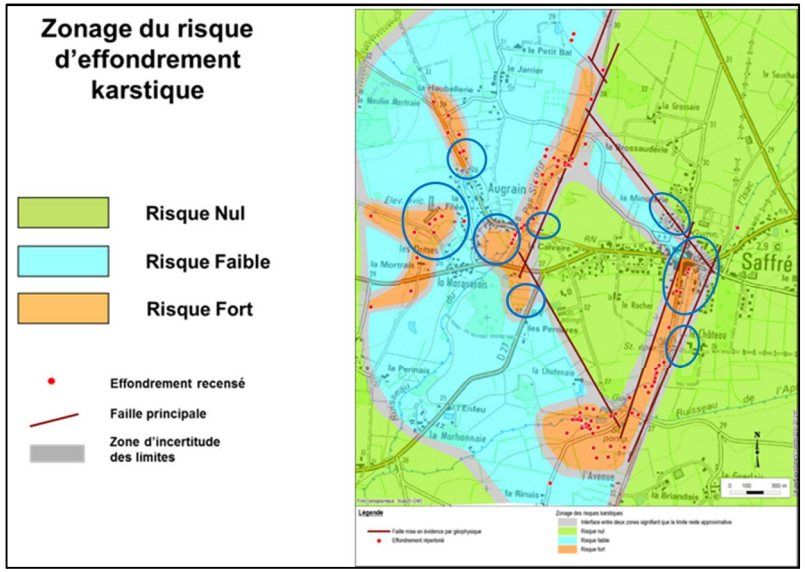
Cartographie EM 34-3 en dipôle horizontal 10 m à gauche et en dipôle vertical 40 m à gauche (Calligée)

Résultats et livrables

- Contexte géologique détaillé et/ou contexte environnemental et conditions d'intervention sur le site (encombrement, présence de perturbations électromagnétiques), afin d'interpréter correctement les résultats de la prospection géophysique.
- Carte de localisation des points de mesure géo référencés.
- Cartes ou profils de conductivité/résistivités, phase avec des commentaires à une échelle adaptée permettant une localisation précise des anomalies mises en évidence.



Mise en évidence d'un ancien réseau métallique et d'un ancien puits par EM 31.
A gauche, en conductivité, à droite en phase (Calligée)



Résultats de l'interprétation de la prospection géophysique EM 34-3 (Calligée)

- Interprétation des résultats des profils ou des cartes avec la signification des principales anomalies en se basant sur les données existantes : bibliographie, géologie, observations de terrain, etc.
- Carte d'interprétation regroupant tous les résultats de la prospection géophysique et proposition d'implantation de sondages de reconnaissance ou d'autres méthodes géophysiques, si besoin.
- Conclusion sur la cohérence des résultats avec la demande du donneur d'ordre.

Dialogue donneur d'ordre / prestataire

- A la charge du donneur d'ordre
  - Les objectifs doivent être clairement identifiés : objet à rechercher, profondeur potentielle, précision souhaitée, etc.
  - La localisation et l'accessibilité, prévoir éventuellement du débroussaillage.
  - Toutes les données pouvant aider à la compréhension du contexte : études antérieures déjà réalisées, historique, contexte géologique, etc.
  - Contraintes administratives : conditions spéciales pour intervenir sur le site, autorisation des propriétaires, etc.
- A la charge du prestataire
  - Justification du programme proposé. Rappel du but de l'étude et des contextes prépondérants dans le choix de la méthode et le déroulement du chantier, de façon à ce qu'il n'y ait pas d'ambiguïté sur la compréhension du besoin et les difficultés potentielles.
  - Programme proposé avec description de la ou des méthodes sans oublier leurs limites, le maillage, le nombre de mesures, l'organisation, les réunions de concertations, etc.
  - Offre financière correspondant au programme avec des prix au ml, à l'ha, au point, à la journée, suivant la méthodologie utilisée.
  - Remise d'un rapport de synthèse répondant aux critères de l'AGAP, avec rappel des objectifs, mise en œuvre sur le terrain, interprétation, réponse à la demande du client, recommandations, etc.

Pour aller plus loin…

- **1991**, Meyer de Stadelhofen, C., *Applications de la géophysique aux recherches d'eau.* Lavoisier, Technique & Documentation, Paris, 183 p.
- **1980**, McNeill, J. D., *Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers*, Technical Note TN-6, Geonics Limited, 15 p.
- **2012**, Schamper C., Rejiba F., Guérin R., *1D single-site and laterally constrained inversion of multifrequency and multicomponent ground based electromagnetic induction data. Application of near-surface clayey overburden.* Geophysics, vol.77, n°4, pp 19-35.

Liens

- www.georeva.eu, www.iris-instruments.com