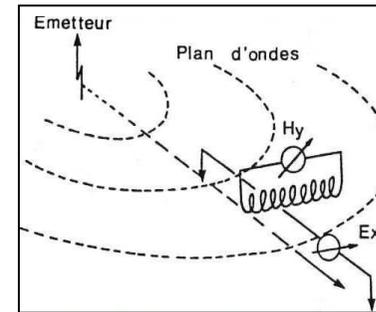
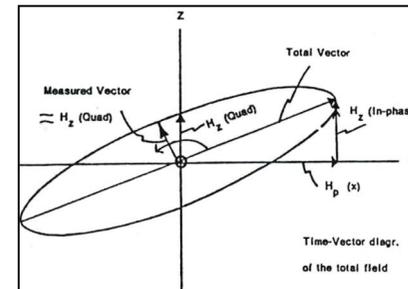


## Principe de la méthode

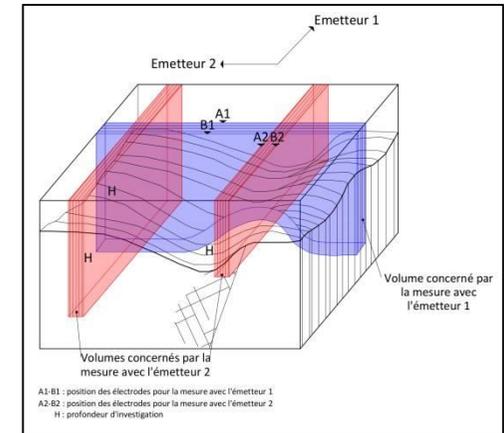
- La prospection électromagnétique VLF (VeryLowFrequency) est basée sur la mesure de la perturbation dans le sol d'ondes électromagnétiques de très basses fréquences (15 à 25 kHz) émises par des émetteurs lointains et puissants (GBZ 19.6 kHz, GQD 22.1 kHz, Angleterre, HWU 21.7 kHz, FTA 20.9 kHz, France, DHO38 23.4 kHz, Allemagne, etc.), utilisés à des fins militaires. Les stations doivent être suffisamment éloignées du point de mesure pour que les surfaces d'ondes soient assimilées à leur plan tangent et que les effets de source soient négligeables.
- Ces ondes sont constituées de deux champs, magnétique et électrique, perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation de cette onde. Le champ magnétique ( $H_y$ ) est tangentiel, le champ électrique ( $E_x$ ) est radial au plan d'onde (Geonics Limited, 1979).
- Les résistivimètres VLF mesurent la composante électrique de l'onde et les composantes magnétiques horizontale et verticales (en phase et en quadrature) du champ magnétique, ils donnent également la mesure de l'angle de phase entre les composantes magnétique et électrique du champ.
- L'appareil donne directement la valeur de la résistivité apparente.
- Pour une mesure correcte, il convient donc de travailler avec des stations suffisamment éloignées du point de mesure pour que les surfaces d'ondes soient assimilées à leur plan tangent et que les effets de source soient négligeables
- Cette méthode est directionnelle, les mesures se font dans l'axe de l'émetteur. Chaque mesure de résistivité concerne un parallépipède rectangle vertical dont la largeur est la distance entre les deux électrodes et la longueur est infinie, son orientation est perpendiculaire à la direction de l'émetteur.
- La profondeur d'investigation varie suivant la fréquence de l'onde mais aussi suivant la résistivité des terrains. Cette profondeur est d'autant plus élevée que la fréquence est faible et la résistivité forte. La profondeur d'investigation simplifiée admise pour ce matériel est :  $P = 3.6 \sqrt{\rho a}$ . Elle peut varier d'une dizaine à une centaine de mètres suivant la résistivité du terrain.



Propagation des ondes électromagnétiques (Grissemann et Reitmayr)



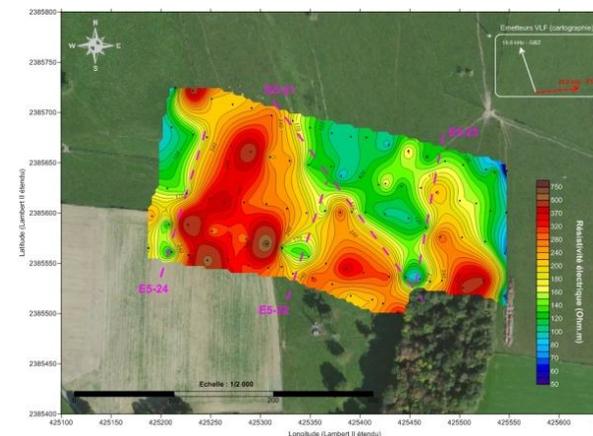
Ellipse de polarisation du champ magnétique au droit d'un conducteur (Geonics)



Représentation de l'effet directionnel des mesures (Calligée)

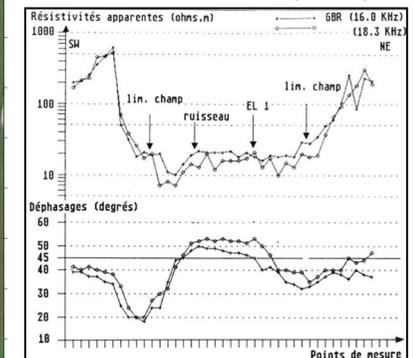
## Applications

- Cette méthode met bien en évidence les conducteurs électriques, les applications principales concernent la recherche minière qui utilise principalement les propriétés magnétiques des ondes VLF. En France, cette technique a été utilisée par la COGEMA afin de localiser les contacts tectoniques entre les granites et l'engraissement, lieux des minéralisations uranifères.
- Depuis plusieurs décennies (fin des années 70) et surtout dans l'Ouest de la France, elle a été utilisée pour mettre en évidence des fractures dans le socle dans le cadre de recherches en eau souterraine.
- En plus des structures faillées, cette méthode révèle les terrains anisotropes. Les valeurs de résistivités apparentes sont différentes suivant que l'on utilise un émetteur dans le sens de la schistosité ou perpendiculaire à celle-ci.
- En traitant les données de déphasage, cette méthode peut être utilisée pour la reconnaissance de bassins sédimentaires d'effondrement, application géologique ou recherche en eau.
- Aujourd'hui, en raison des difficultés à avoir des émetteurs actifs et bien orientés, cette méthode est un peu délaissée, alors qu'elle apporte des résultats très intéressants pour peu que toutes les données soient exploitées.



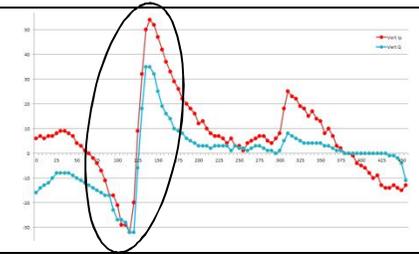
Cartographie de résistivités apparentes (Calligée)

## Profil de résistivités et de déphasages (Calligée)



## Limitations / Contraintes / Interdits

- La profondeur d'investigation est réduite en contexte d'altérite argileuse (une trentaine de mètres pour une résistivité de 100 ohms.m).
- Certains émetteurs ne fonctionnent pas régulièrement, ce qui implique de revenir parfois plusieurs fois sur le site pour les prises de mesure.
- Il n'y a pas toujours un émetteur parallèle ou perpendiculaire à la structure recherchée.
- Les méthodes électromagnétiques sont sensibles aux interférences électriques, comme les lignes électriques HT, les clôtures à mailles carrées, les bâtiments métalliques, etc.).



Influence d'une ligne HTA sur les mesures magnétiques (Calligée)

## Moyens nécessaires à l'acquisition

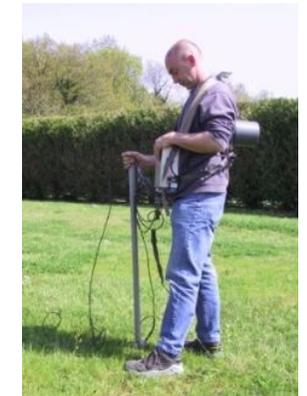
- Equipements : pour les mesures en mode magnétique, le boîtier d'acquisition (définition du programme d'acquisition, localisation des émetteurs, visualisation, enregistrement des données) relié à une antenne croisée, la batterie chargée, le câble de connexion entre le boîtier et l'antenne, la liste des émetteurs existants, pour les mesures en mode électrique, on rajoute le module d'électrodes à planter ou capacitives, et le câble entre le boîtier et les électrodes (tous les câbles sont en double, par précaution).
- Positionnement : matériel pour le repérage des profils, jalons, décamètre, topofil, GPS pour calage des points singuliers, etc.
- Véhicules : un véhicule de transport léger (camionnette, break), de préférence tout-terrains/tout-chemins, permettant d'accéder au site pour le personnel et l'équipement. Les mesures se font ensuite à pied.
- Personnel et compétences : un opérateur qualifié pour la prise de mesure en mode magnétique, un opérateur qualifié et un ou deux aides pour la prise de mesure en mode électrique. Un géophysicien qualifié pour l'interprétation.
- Parmi les matériels les plus utilisés en France, on peut citer l'EM 16/EM 16R de Geonics (ancien), l'IGS 2/VLF-4 de Scintrex, et le T-VLF d'Iris Instruments. Ce sont des matériels sensiblement équivalents. Pour pallier le manque d'émetteurs, Geonics commercialise le TX27, émetteur d'onde VLF constitué d'une antenne de 1 km de long. Scintrex a développé l'Envi VLF qui possède 3 électrodes permettant une prise de mesure avec plusieurs émetteurs en même temps. Le Wadi d'Abem ne mesure que les composantes magnétiques des ondes VLF. Il faut noter que ces deux derniers matériels ne sont plus commercialisés.



Résistivimètre T-VLF construit par Iris Instruments (Iris Instrument)



Localisation de quelques émetteurs VLF (Lionel Loudet)



Résistivimètre de type IGS-2/VLF-4 construit par Scintrex (Calligée)

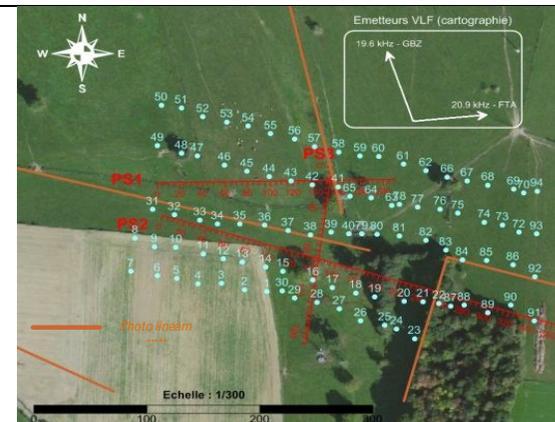
## Mise en œuvre sur le terrain

### Travaux préparatoires

- Demande des autorisations pour pénétrer sur les propriétés privées.
- Localisation des profils de mesures à l'aide de jalons, topofil, GPS, etc., pour réaliser le cheminement prévu en travers des structures et pour un report précis des points.
- Débroussaillage et layonnage éventuel.
- Identification et localisation des émetteurs disponibles.
- Pour les chantiers longs, il faut prévoir plusieurs points d'étalonnage pour vérifier la dérive du matériel.

### Mesures

- La prise de mesure est simple puisque les valeurs de résistivités, de déphasage et des champs magnétiques sont directement données par l'appareil. Il faut toutefois s'assurer de la direction des émetteurs et de la qualité du signal. Les électrodes doivent être alignées dans la direction de l'émetteur.



Implantation des points de mesures maille 20 x 40 m pour les résistivités (en bleu) et 5 m pour les pseudo-sections (en rouge) réalisées après la réalisation des cartes de résistivités (Calligée)

- En mode magnétique, le cheminement se fait suivant des profils perpendiculaires à la structure recherchée, l'émetteur se trouvant dans l'axe de celle-ci.
- En mode électrique, l'émetteur sera perpendiculaire à la structure recherchée, avec les électrodes alignées dans l'axe de l'émetteur. Pour pallier les effets d'anisotropie (ou au contraire les mettre en évidence) et pour révéler toutes les anomalies existantes sur un terrain, on travaille avec deux émetteurs de directions perpendiculaires.
- La maille de mesure doit être adaptée au terrain et à la structure recherchée : grande maille pour « dégrossir », maille plus réduite pour l'implantation des forages.

#### Contrôle Qualité

- Vérifier à chaque point de mesure la qualité de l'émission et l'orientation de l'émetteur.
- Lors de la prise de mesure, le dernier enregistrement apparaît sur l'écran et permet de contrôler le suivi de l'acquisition.
- Les données sont enregistrées automatiquement par l'appareil et peuvent être vérifiées à tout moment. Il est prudent de transférer les données sur un ordinateur tous les soirs.
- Ne pas hésiter à refaire les mesures (ou faire des mesures intermédiaires en cas de doute).

#### Production

- Pour les mesures de résistivité avec deux émetteurs à la maille 20 m x 40 m, environ 90 points par jour, repérage, arrêt d'émetteur pour maintenance et transfert des données compris.
- Pour les mesures magnétiques à la maille 5 m : environ 300 points par jour.

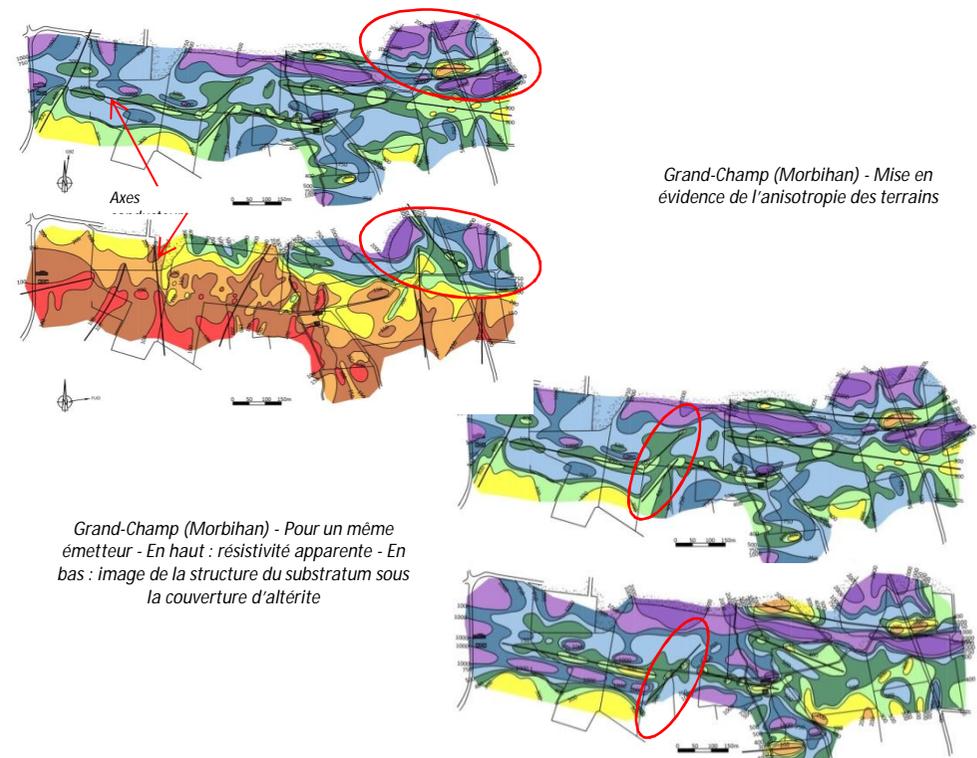


Prise de mesure en mode électrique (Calligée)

## Traitement et interprétation des données

### Interprétation des données électriques

- Les cartes de base résultantes de la prospection VLF sont les cartes de résistivités apparentes, elles mettent en évidence la répartition des résistivités sur l'ensemble des terrains prospectés.
- Dans la mesure du possible, éliminer les valeurs visiblement aberrantes, ou bien les identifier sur les cartes ou les profils.
- Des axes conducteurs, pouvant traduire la présence de zones fracturées, ou résistants, témoignant de filons, sont ainsi révélés. Ces axes sont en général perpendiculaires aux émetteurs.
- En plus de la visualisation de ces axes, cette méthode a l'avantage de mettre en évidence l'anisotropie des terrains. L'exemple ci-contre montre, en haut, les valeurs de résistivités pour un émetteur perpendiculaire à la schistosité, en bas, pour un émetteur subparallèle. Dans le quart NE se trouvent les Orthogneiss de Lanvaux, au sud, les Paragneiss et Micaschistes de Bains-sur-Oust.
- Cette restitution de données pourrait suffire pour implanter des forages de reconnaissance ; mais l'appareil donne également une valeur de déphasage qui permet de connaître la répartition des terrains en profondeur selon un modèle bicouche.
- Ch. Grissemann et G. Reitmayr (1978) ont proposé une méthode de calcul pour estimer l'épaisseur et la résistivité du substratum à partir de la résistivité apparente et du déphasage, en faisant une hypothèse sur la résistivité du premier terrain (issue des observations de terrain). Ces interprétations permettent donc d'avoir une image de la structure du substratum et d'implanter plus précisément les forages de reconnaissance.
- Si on applique ces calculs aux mesures réalisées précédemment, on peut voir l'organisation des terrains en profondeur (carte du substratum). Certains axes visibles en résistivités apparentes disparaissent, on peut penser à des altérations superficielles plus argilisées ; mais d'autres se réorganisent comme celles indiquées sur la carte.
- L'interprétation de ces données permet d'implanter plus précisément les forages de reconnaissance.

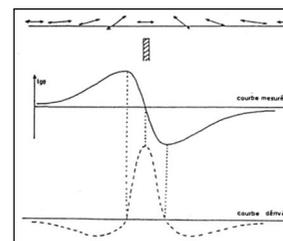


Grand-Champ (Morbihan) - Mise en évidence de l'anisotropie des terrains

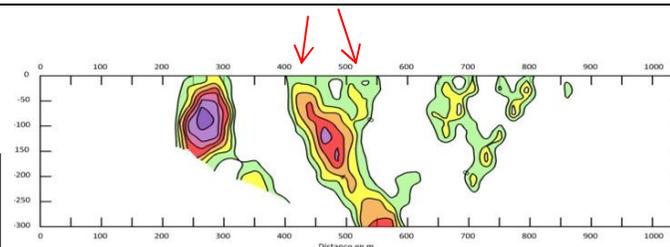
Grand-Champ (Morbihan) - Pour un même émetteur - En haut : résistivité apparente - En bas : image de la structure du substratum sous la couverture d'altérite

### Interprétation des données magnétiques

- Il est également possible de repérer les zones conductrices dans le socle sain à partir des variations des composantes verticales du champ magnétique. Le report de ces valeurs sur des graphiques ou des cartes permet de localiser les zones conductrices au niveau des points d'inflexion de la courbe.
- Pour plus de facilité, l'exploitation des données magnétiques se fait par dérivation et lissage. Ce traitement a pour but de gommer les anomalies de haute fréquence et de rendre plus lisible les profils ou les cartes, par transformation des points d'inflexion en maxima. (Geonics Limited, 1983).
- O. Martiré (1991) a élaboré une technique de calcul de la répartition de l'angle de phase en profondeur à partir des travaux de Fraser (1969) et de Karous-Hjelt (1983). Les résultats sont reportés soit sous forme de cartes, soit sous forme de coupes verticales du sous-sol. Ces dernières, appelées pseudosections, mettent en évidence le sens du pendage des corps conducteurs.
- Sur l'exemple, la pseudo section magnétique montre bien deux branches conductrices en surface et une seule en profondeur, comme sur les cartes de résistivités. Attention, à gauche l'anomalie est due à une clôture électrique.



Représentation des variations de l'angle d'inclinaison du champ magnétique

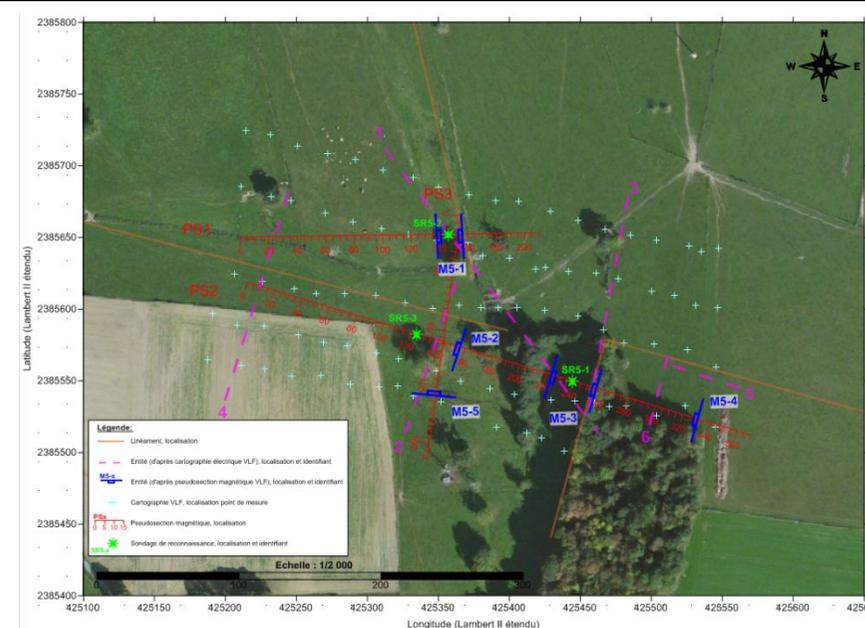


Grand-Champ (Morbihan) - Représentation de la pseudosection magnétique en travers des structures décrites plus haut

### Résultats et livrables

Le rapport d'étude comprend *a minima* :

- Le contexte géologique détaillé afin d'interpréter correctement les résultats de la prospection géophysique.
- Souvent, une analyse des photographies aériennes en stéréoscopie est réalisée en amont des mesures. Elle est parfois fournie par le donneur d'ordres (pour les recherches en eau souterraine). Elle permet de guider l'implantation des profils de mesure.
- Les conditions d'intervention sur site (perturbations électromagnétiques, débroussaillage, panne d'émetteurs, etc.).
- Une carte de localisation des points de mesure géo référencée.
- Les résultats bruts (cartes ou profils de résistivités apparentes, cartes ou profils de déphasage, cartes ou profils des champs magnétiques) suivant les émetteurs utilisés.
- L'interprétation qui peut en être faite : localisation des axes conducteurs/résistants, secteurs homogènes, anisotropie, etc.
- Le type d'interprétations réalisées : interprétation en modèle bicouche avec les hypothèses de premier terrain, interprétation des profils magnétiques, etc.).
- Les résultats interprétés avec les cartes ou profils résultants et commentaires sur la mise en évidence de structures nouvelles.
- Carte d'interprétation regroupant tous les résultats de la prospection géophysique et proposition d'implantation de forages de reconnaissance par exemple.
- Conclusion sur la faisabilité du projet du donneur d'ordre, hiérarchisation points de sondage et argumentation des choix.
- Localisation des points en coordonnées X, Y.



Synthèse des résultats d'une prospection VLF - Implantation des sondages de reconnaissance (Calligée)

### Dialogue donneur d'ordre / prestataire

#### A la charge du donneur d'ordre

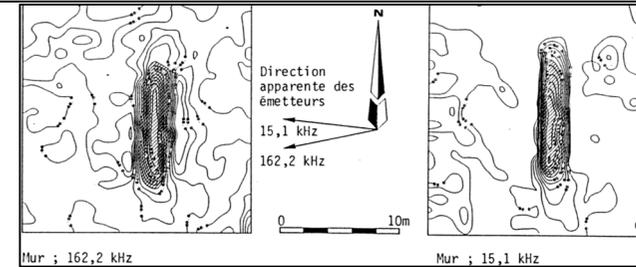
- Objectifs clairs de la prospection géophysique
- Localisation précise de la zone à prospector
- Informations concernant les accès et les autorisations à obtenir.

#### A la charge du prestataire

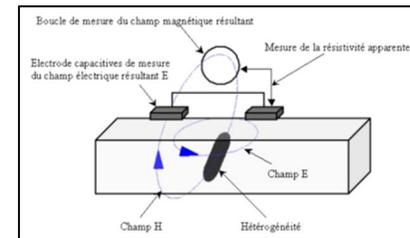
- Protocole détaillé compte tenu du contexte géologique, justification de la maille de mesure, enchaînement des mesures, contraintes liées au site, limites de la méthode.
- Rapport complet avec les différentes cartes de prospection et de synthèse

### Autre méthode utilisant les ondes VLF : la RMT (Radio Magnéto Tellurique)

- La RMT est une méthode de prospection inventée par B. Guineau et A. Dupis en 1973 et développée en 1976 par le CNRS et les Ponts et Chaussées pour les prospections en génie civil.
- Cette méthode utilise également les ondes VLF; mais aussi des ondes de fréquences plus élevées (GO 150 à 300 kHz) et OM (500 kHz à 1.6 MHz). La permutation d'une gamme d'ondes à une autre se faisant directement, il est aisé d'avoir plusieurs types de mesures à partir du même appareil.
- L'écartement très faible des électrodes intervient dans la mise en évidence de structures proches de la surface quel que soit la fréquence utilisée. L'exemple ci-contre montre la réponse d'un mur situé à 1 m de profondeur.
- La RMT est utilisée en génie civil (étude de tracé : routes, réseaux, etc.), en archéologie, en agronomie (pédologie, drainage) et en pollution.
- L'appareil a été conçu pour réaliser des mesures en continu grâce à l'utilisation de capteurs capacitifs pour la mesure du champ électrique. Les capteurs sont des tapis en caoutchouc contenant une plaque métallique. Le matériel est constitué d'une antenne portée par un chariot traînant les deux capteurs, d'un boîtier de mesures des champs E et H, d'enregistreurs graphique et/ou numérique. Une roue codeuse asservit la prise de mesure à la vitesse d'avancement de l'appareil.
- Les mesures doivent être faites dans la direction de l'émetteur utilisé, ce n'est pas toujours celle qui est la plus intéressante du point de vue géologique ou même pratique ; il existe depuis des appareils avec antenne et capteurs mobiles, asservie à l'orientation de l'émetteur.
- La qualité de l'état du sol influence la qualité des mesures (mauvais contact des capteurs capacitifs). La variabilité des mesures conduit à tripler la prise de mesure au même endroit.
- Avant la prise de mesure, il faut vérifier la qualité du signal et l'orientation des capteurs en fonction de la direction de l'émetteur. Il faut également effectuer quelques tests préalables pour calibrer l'échelle de mesure et affecter les gains correspondant à E et H pour obtenir les meilleurs contrastes.
- Les avantages sont une mise en oeuvre rapide et un grand rendement des mesures. La prise de mesure doit toutefois être suffisamment lente pour éviter un décalage trop important entre la position d'une structure et sa signature enregistrée. (à 3-4 km/h, le décalage est de l'ordre de 1 m).
- L'enregistrement séparé de E et H permet de recalibrer les profils, filtrer les variations suivant la nature des anomalies à mettre en évidence et à appliquer des traitements divers.
- Les rendus se présentent sous forme de profils ou de cartes de résistivités apparentes avec une précision dépendant des émetteurs choisis et de la maille de mesure. Comme pour toutes méthodes géophysiques, des étalonnages par sondages permettent de valider les modèles proposés.



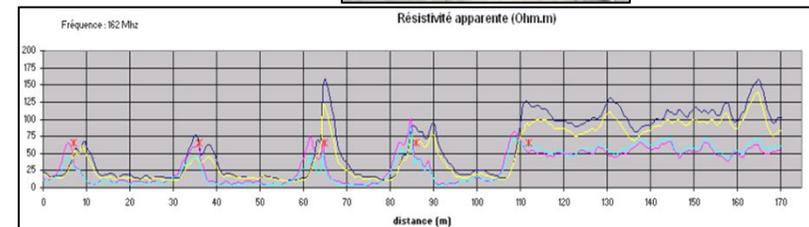
Cartographie des résistivités apparentes mesurées aux fréquences 15.1 et 162.2 kHz à l'aplomb d'un mur (F. Gauthier)



Principe de la Radio Magnéto Tellurique (Cérema)



Matériel en mesure et enregistreur (Cérema)



Profils de résistivités apparentes obtenus par RMT - Fréquence de 162 KHz (Cérema)

### Pour aller plus loin...

- **1969**, Fraser D. C., *Contouring of VLF-EM data*. Geophysics, vol. 34, n°6, 958-967.
- **1978**, Grisseman Ch. et Reitmayr G., *VLF magnetotellurics in ore exploration and structural geology*, 48th. SEG meeting in San Francisco.
- **1979**, Geonics Limited, *EM 16R operating manual*, Technical note. Canada, 34 p.
- **1983**, Geonics Limited, *Operating manual for EM16 VLF-EM*, Technical note. Canada, 78 p.
- **1983**, Karous M., Hjelt S. E., *Linear filtering of VLF dip-angle measurements*, Geophysical prospecting, n°31, 782-794.
- **1986**, Lagabrielle R., *Nouvelles applications de méthodes géophysiques à la reconnaissance en génie civil*, LCPC, Rapports des Laboratoires, 291 p.

- **1987**, Gauthier F., *Utilisation de la Radio Magnéto-Tellurique et de la prospection thermique pour la reconnaissance géophysique du proche sous-sol. Applications à l'étude et à l'aménagement des terres agricoles engorgées*, Thèse de doctorat, Paris 6.
- **1991**, Martiré O., *Apports du VLF en mode magnétique à la prospection hydrogéologique*, Mémoire de DESS, Université Pierre et Marie Curie - Calligée
- **1997**, Hollier-Larousse A., *Contribution à la valorisation d'une méthode géophysique électromagnétique utilisée en géophysique appliquée de subsurface : la radio-magnéto tellurique*, rapport pour le titre d'ingénieur, 217 p.
- **2015**, Borne V., *Prospections géophysiques adaptées au socle*, actes du colloque AIH « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles », La Roche-sur-Yon, 8p.

### Liens

- <https://sidstation.loudet.org/stations-list-fr.xhtml>, [www.georeva.eu](http://www.georeva.eu), [www.iris-instruments.com](http://www.iris-instruments.com)