

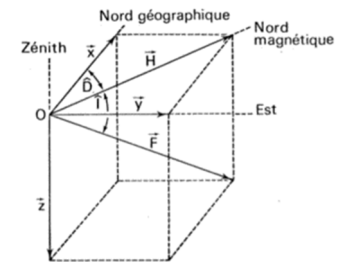
## Principe de la méthode

La magnétométrie fluxgate permet de mesurer la ou les composante(s) vectorielle(s) du champ magnétique terrestre. Suivant les dispositifs et les applications, une ou plusieurs composantes peuvent être mesurées (composante verticale au minimum). L'unité est le nT/m.

Cette méthode est non destructive et est dite « passive » car elle n'émet aucune onde et mesure les variations du champ magnétique engendré par un objet métallique ferreux (fer pur ou alliages contenant du fer) enfoui.

Les résultats obtenus permettent d'établir :

- une cartographie 2D (X, Y) de l'emprise pour les dispositifs mis en œuvre depuis la surface
- une coupe profondeur pour les mesures mises en œuvre en forage (borehole).



Le champ magnétique terrestre est défini par le vecteur  $F$   
 Les composantes du champ magnétique sont définies par son inclinaison  $I$  (angle que fait le champ magnétique terrestre avec l'horizontale), sa déclinaison  $D$  (angle entre les méridiens géographique et magnétique), sa composante verticale  $Z$  (verticale du point de mesure) et ses composantes horizontales  $X$  (direction sud-nord) et  $Y$  (direction ouest-est)

## Applications

- Type de problème traité :

L'analyse des signatures magnétiques générées par des objets métalliques enfouis permet de caractériser l'objet (taille, masse, volume, profondeur, ...) et de déterminer sa position (X, Y).

- Domaines d'emploi usuels :

- environnement et génie civil : localisation ponctuelle ou massive d'objets métalliques ferreux (cuves, fûts, pipes, UXO, zone d'enfouissement de déchets, ...).
- archéologie : recherche d'objets ferromagnétiques, localisation d'anciens vestiges.

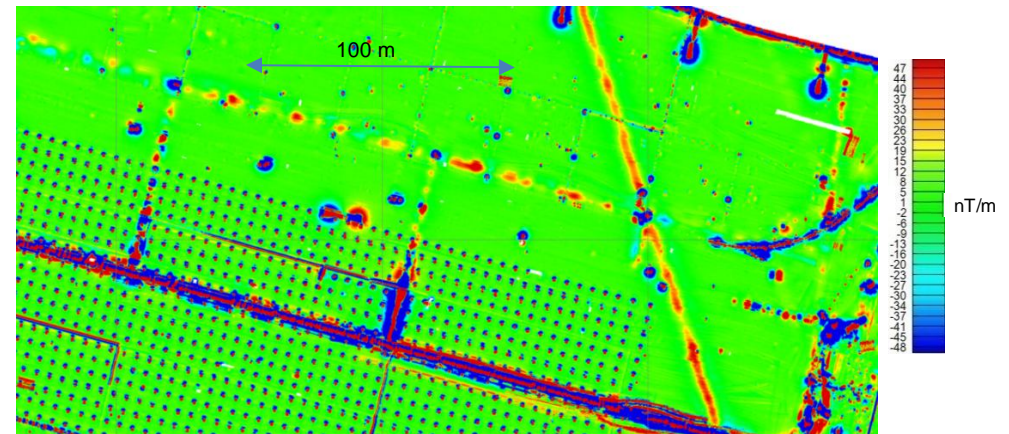
- Capacité de détection : Elle dépend :

- de l'espacement entre les 2 bobines disposées dans la sonde ;
- de la géométrie, l'aimantation et la profondeur de l'anomalie à détecter ;
- de la quantité d'objets ferromagnétiques présents dans le sol ;
- etc.

- Résolution :

La résolution dépend de l'espacement entre les capteurs, de la fréquence d'échantillonnage (généralement 10 Hz et plus) le long des profils et de la densité d'objets métalliques enfouis.

La résolution spatiale et la précision des mesures sont de l'ordre du cm (en X et Y) si les dispositifs sont couplés avec un positionnement D-GPS ou des tachéomètres.



Cartographie obtenue avec un multidétecteur 8 sondes 120 LW Ebinger/ MonX Sensys diagnostic pyrotechnique

## Limitations/Contraintes/Interdits

Les propriétés du magnétisme induisent une pluralité de signatures pour un même objet.

La détection est très difficile, voire impossible, si les cibles recherchées sont à proximité, ou à l'aplomb :

- d'éléments métalliques de surface (zone de déchets...);
- de remblais (mâchefer, déchets métalliques) ;
- de superstructures et infrastructures métalliques (clôture, dalle de béton armé, ferrailage, canalisation, ligne haute tension...);
- de terrains fortement minéralisés.

L'opérateur doit se séparer de tous éléments pouvant créer des perturbations magnétiques lors de la détection : portable, ceinture, ... Le terrain doit être suffisamment dégagé (débranchement et nettoyage de surface) pour permettre le passage de l'opérateur et de l'appareil de détection.



Exemple d'emprises ne se prêtant pas à la mise en œuvre de la magnétométrie fluxgate

## Moyens nécessaires à l'acquisition

- Equipements :

Les dispositifs sont composés de sondes magnétométriques fluxgate, de câbles de connexion, d'un enregistreur de données (numérisation, visualisation, stockage des données) ou d'une unité de contrôle pour les systèmes monosonde, d'une alimentation 12 V, d'un châssis amagnétique pour le montage en multidétecteur.

Pour des mesures très précises (cm), l'emploi d'un GPS différentiel ou d'un tachéomètre est obligatoire.

Les sondes numériques ne nécessitent pas d'étalonnage. Les sondes analogiques doivent être calibrées chez les constructeurs très régulièrement.

- Véhicule :

Le matériel peut être transporté par un transport léger (utilitaire). Pour les grandes superficies dégagées, les dispositifs peuvent être tractés par un moyen motorisé (quad, SSV (Side by Side Vehicule), 4x4).

Cependant il est nécessaire de prévoir une longueur de timon suffisante permettant de s'affranchir des effets de saturation induits par le véhicule (4 m pour un quad et 6 m pour un 4x4).

Les mesures aéroportées ne sont pas adaptées pour toute les problématiques.

- Personnel et compétences :

1 opérateur qualifié pour la mise en œuvre, 1 géophysicien qualifié pour l'interprétation, 1 aide non qualifié pour aider au montage des dispositifs, à la préparation du terrain et au marquage du terrain si nécessaire.



Exemple des différents types de dispositifs fluxgate : 4 sondes VALLON géoréférencées (en haut à gauche), monosonde Foerster (en haut à droite), dispositif 8 sondes géoréférencées EBINGER/SENSYS tractées par un véhicule (en bas)

## Mise en œuvre sur le terrain

- Travaux préparatoires :

- déclarations administratives, autorisations de travaux dans les propriétés, évacuation des zones de stationnement (à la charge du client) ;
- élagage et débroussaillage nécessaires dans un environnement végétal dense ;
- enlèvement des éléments métalliques ferreux visibles en surface ;
- levé topographique précis des limites de l'emprise et des singularités du site pouvant influencer sur la qualité et la compréhension des mesures et de l'interprétation ;
- positionnement d'au moins 3 repères topographiques (clous d'arpentage, ...).

- Dispositif de mesures :

L'espacement entre les sondes et les profils dépendent du type d'objet recherché (ponctuel massif ou linéaire).

- Carroyage de la zone :

Pour une meilleure couverture de l'emprise, les profils seront implantés parallèlement et régulièrement.

- Montage du détecteur :

Le délai de montage peut varier de quelques minutes pour le détecteur monosonde, à plus d'1/2 journée pour le montage d'un multidétecteur tractable par un véhicule.

- Compensation du détecteur :

Les sondes sont compensées à l'aplomb d'une emprise ne présentant pas d'anomalies dues à des cibles métalliques enfouies. En fonction du matériel, cette compensation est automatique ou manuelle. Les compensations se font au même endroit à chaque redémarrage de l'appareil.



Exemple de montage d'un cadre 8 sondes

- Mise en œuvre du dispositif :  
Une vitesse régulière doit être maintenue (surtout pour les dispositifs non géoréférencés), le long des profils matérialisés au préalable. La mise en place de repères visuels (cônes, topofils, corde, ...) garantit un passage précis et conforme au découpage prévu, et permet d'éviter les zones non investiguées.
- Sécurité :  
Une reconnaissance visuelle préalable est effectuée en amont de toute intervention afin de matérialiser et sécuriser les éventuelles zones de danger.  
En fonction de la concomitance de l'intervention avec d'autres intervenants et des risques inhérents à l'emprise diagnostiquée, un PPSPS, ou un plan de prévention ou une Etude de Sécurité peuvent être rédigés en amont.  
La mise en œuvre de ces dispositifs peut être effectuée avec les EPI traditionnels obligatoires (casque, gilet orange, veste manches longues, pantalon, lunettes de protection et protections auditives si besoin) à l'exception des chaussures de sécurité qui doivent être amagnétique pour toute traction manuelle.
- Contrôle qualité des mesures :  
Les données sont transférées de l'enregistreur régulièrement.  
Les données acquises sont superposées au fond de plan géoréférencé afin de vérifier le taux de couverture et le bon positionnement des mesures.
- Production :
  - la cadence d'acquisition dépend de la difficulté de déplacement sur le terrain (pentes, obstacles, état du terrain) et de l'importance de l'équipe déployée.
  - sur une zone facile d'accès, et selon les dispositifs employés, les cadences peuvent aller de 0.5 à plusieurs hectares par jour.



*Montage 4 sondes géoréférencées portées manuellement*

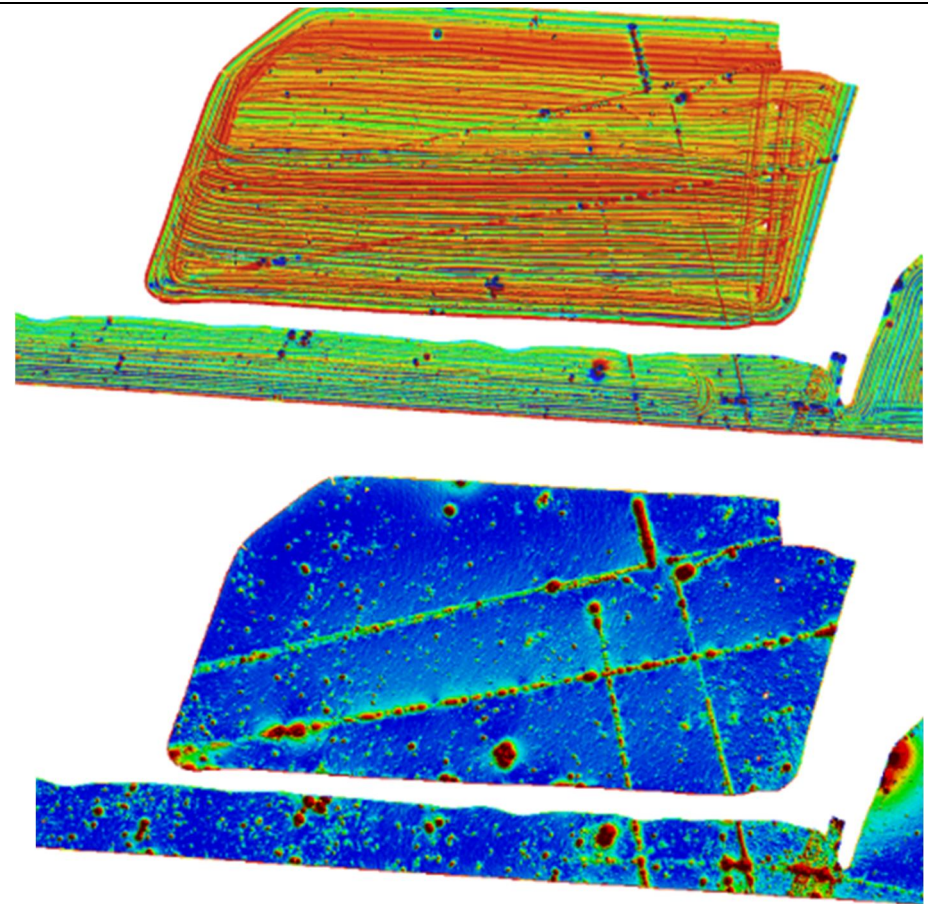
### Traitement et interprétation des données

1. Réalisation d'une compensation post acquisition, si nécessaire ;
2. Filtrage des données (filtres non linéaire, lissage, ...) ;
3. Corrections des dérives de positionnement ;
4. Assemblage de la cartographie magnétométrique géoréférencée de l'emprise ;
5. Interprétation des données :
  - inversion des dipôles ;
  - calcul du signal analytique et résolution de la droite d'Euler ;

*Notes : ces 2 méthodologies sont les plus courantes pour les entreprises. Cette liste n'est pas exhaustive. D'autres méthodes d'interprétation sont possibles.*

6. Pointage des cibles les plus suspectes selon les paramètres calculés par les méthodes d'interprétation (masse, taille, volume, aimantation, ...) ;
7. Report sur les documents cartographique des obstacles de surface relevés sur le terrain, ainsi que de tous les éléments identifiables (réseaux, fondations...) ;
8. Identification des surfaces remarquables pouvant masquer la signature d'objets plus profonds.

Production : 1/2 j de traitement pour 1 j d'acquisition, hors écriture du rapport et cartographie.



*Exemple des différentes étapes de traitement des données : Résultat brut (en haut) et signal analytique (en bas)*

## Résultats et livrables

### • Rapport d'étude :

Le rapport d'étude comporte plusieurs sections. Un document AGAP spécifiant le plan d'un rapport-type peut être consulté sur le site web ([www.agapqualite.org](http://www.agapqualite.org)).

- Section Générale : traite des généralités de l'étude, entre autres : localisation, contexte géologique local, objectifs, mode opératoire, équipement, méthodologie d'interprétation, etc. ;
- Section Spécifique : traite du paramétrage des équipements, de l'équipe du projet, de la localisation et de la topographie détaillées, des observations de terrain et de la qualité des mesures ;
- Section Synthèse : suivant les objectifs de l'étude, des attentes du client et des termes du contrat, une interprétation avancée pourra être menée. Des conclusions et des recommandations (sur des mesures et des travaux complémentaires éventuellement) sont nécessaires ;
- Le rapport comporte un volume texte et un volume cartographique, sur papier et/ou en format électronique. Le rendu cartographique est proposé au format CAD et/ou SIG. Les données de terrain et les relevés topographiques sont fournis au format ASCII.

Les interprétations seront présentées par les cartographies suivantes :

- cartographie du zonage de l'emprise ;
- cartographies des profils réalisés ;
- cartographies des résultats magnétométriques bruts ;
- cartographies des résultats magnétométriques traités ;
- cartographie des éléments remarquables (zones saturées, réseaux, ...) ;
- cartographies des signatures magnétiques retenues ;
- tableau des anomalies retenues : coordonnées X, Y, et paramètres estimés. Les paramètres estimés sont variables selon les suites logicielles utilisées et comprennent : la profondeur et/ou la masse et/ou l'aimantation, ...



Exemple de cartographie des résultats interprétés

## Dialogue donneur d'ordre / prestataire

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

- cahier des charges détaillé avec objectifs clairs et des précisions sur la nature du projet ;
- plans et documents relatifs à l'ouvrage, à la zone à prospecter ;
- informations concernant les accès et la sécurité du site, et les autorisations administratives.

Documents relatifs à d'éventuelles investigations antérieures

### • A la charge du prestataire :

- proposition explicite : Justification de la méthode proposée, adaptation à l'objectif, description des avantages et limitations, facteurs d'influence et/ou non maîtrisables, précision des mesures et résultats finaux réalistes ;
- rapport d'étude de qualité professionnelle : Rappel des objectifs, méthodologies appliquées, discussion des résultats, conclusions et recommandations pratiques.

## Pour aller plus loin...

- 2002, Millon R., *les cahiers de l'AGAP - Magnétisme et prospection magnétique*
- 1995, Blakely R.J. - *Potential Theory in gravity and magnetic applications*
- 2003, Milsom, J., 2003, *Field Geophysics - Third Edition, WILEY, 235 p (p.51-70)*
- 1986, Parasnis, D.S., 1986, *Principles of Applied Geophysics - Fourth Edition, Chapman and Hall, 393 p (p.28-55)*

## Liens

[www.abemfrance.eu](http://www.abemfrance.eu), [www.bartington.com](http://www.bartington.com), [www.ebinger.org](http://www.ebinger.org), [www.foerstergroup.fr](http://www.foerstergroup.fr), [www.geometrics.com](http://www.geometrics.com), [www.vallon.us](http://www.vallon.us)