



GEOMINES

RAPPORT TECHNIQUE

Diagnostic de pollution pyrotechnique

Ref : G292_25_A_AMVS_Maubeuge_RT_V0

Rédacteur :	Adlane DJAOUT - Ingénieur géophysique UXO 06.26.98.73.65 adjaout@geomines.fr
Diffusion :	Agglomération Maubeuge Val de Sambre Mme Jennifer PISCOT 03.27.53.01.00 jennifer.piscot@amvs.fr
Opération :	Diagnostic de pollution pyrotechnique
Département :	Nord
Commune :	Maubeuge (59)
Site :	Aérodrome de Salmagne
Chef de projet :	Solenne SCHNEIDER – Cheffe de projet UXO 06.17.85.23.09 sschneider@geomines.fr

Suivi des versions		
Version	Date	Objet de la version
0	20/06/2025	Création du document

Nos certifications:

					
N°2021/93349.2	Certification Travaux Hyperbares N°230327-C3094	Entreprise labellisée QUALIPYRO	Entreprise membre de l'UXO	Entreprise membre du Syndicat national des entrepreneurs de travaux immergés	Partenaire de la défense

RÉSUMÉ

L'entreprise Geomines a été sollicitée par la société AMVS, afin de réaliser un diagnostic de pollution pyrotechnique sur une surface contractuelle d'environ 830 000 m² (83 Ha) situés dans la commune de Maubeuge (59).

La méthodologie utilisée pour cette prospection est la suivante :

- un diagnostic magnétométrique a été réalisé sur la totalité de l'emprise à l'aide du système gradiométrique 8 sondes Sensys MXPDA ;
- les zones perturbées et les anomalies ferromagnétiques ont été identifiées à la suite de ce diagnostic.

Ainsi la zone d'investigation a été prospectée du lundi 05 mai au vendredi 23 mai 2025 pour le diagnostic pyrotechnique.

L'emprise réellement diagnostiquée à l'aide des outils géophysiques représente une surface de 803 468 m² (surface interprétable et zones perturbées).

À la suite de l'interprétation du diagnostic, la zone comporte une surface perturbée de 104 479 m² soit 13 % de la surface détectée ce qui rend cette zone ininterprétable.

Onze mille sept cent soixante-quatorze (11 774) anomalies ferromagnétiques ont été détectées et retenue comme présentant un risque pyrotechnique potentiel en plus des zones perturbées et des zones non diagnostiquées.

Ce rapport détaille les opérations de prospection, de traitement et d'interprétation, ainsi que les recommandations pour l'utilisation future du site.

SOMMAIRE

1. CADRE RÉGLEMENTAIRE	6
2. OBJECTIFS DU DIAGNOSTIC	6
3. CONTEXTE GÉNÉRAL DU SITE	7
3.1. LOCALISATION	7
3.2. CONTEXTE HISTORIQUE	7
3.2.1. <i>Première Guerre Mondiale : 1914 - 1918</i>	7
3.2.2. <i>Seconde Guerre Mondiale : 1939 - 1945</i>	8
3.2.3. <i>Risque munitionnaire retenu</i>	8
4. MOYENS MIS EN OEUVRE	9
4.1. MOYENS HUMAINS	9
4.2. SYSTÈME DE POSITIONNEMENT	9
4.3. METHODE MAGNETOMETRIQUE	10
4.3.1. <i>Principe de fonctionnement</i>	10
4.3.2. <i>Moyen géophysique : magnétomètre fluxgate 8 sondes</i>	11
4.3.3. <i>Traitement des données</i>	11
5. DESCRIPTION DU CHANTIER	12
5.1. CONDITIONS D'INVESTIGATION	12
5.2. ÉLÉMENTS PERTURBATEURS DE SURFACE	13
6. DIAGNOSTIC MAGNETOMETRIQUE	14
6.1. CARTOGRAPHIE MAGNÉTOMÉTRIQUE	14
6.2. EMPRISES DU DIAGNOSTIC	15
6.2.1. <i>Zones diagnostiquées</i>	15
6.2.2. <i>Zones non diagnostiquées</i>	15
6.2.3. <i>Zones perturbées</i>	17
6.2.4. <i>Zones d'alignements</i>	17
6.2.5. <i>Synthèse</i>	18
6.3. ANOMALIES DETECTÉES	19
6.4. CATÉGORIES DE MUNITIONS RECHERCHÉES	19
7. RECOMMANDATIONS	21
7.1. EMPRISES PRÉSENTANT UN RISQUE PYROTECHNIQUE POTENTIEL	21
7.2. AUTRES PRESTATIONS PROPOSÉES PAR GEOMINES	21
ANNEXES	22
ANNEXE A. TRAITEMENT DES DONNÉES MAGNETOMETRIQUES	23
ANNEXE B. CLEF DE LECTURE DES DONNÉES MAGNETIQUES	27
ANNEXE C. CARTOGRAPHIE DU GRADIENT VERTICALE	32

ANNEXE D.	CARTOGRAPHIE DU GRADIENT RESIDUEL	33
ANNEXE E.	CARTOGRAPHIE DU SIGNAL ANALYTIQUE	34

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Localisation du site d'étude.....	7
Figure 2 : Positionnement des principaux combats par rapport à l'emprise (Source : DEKRA)	7
Figure 3 : Photographie de 1940 montrant La casemate d'EpINETTE après les bombardements allemands (Source : M. DEPRET).....	8
Figure 4 : Aimantation induite d'un objet et anomalie dipolaire en résultant (source : ADEME/IFSTTAR/AGAP QUALITE 2016).....	10
Figure 5 : Mise en œuvre du magnétomètre 8 sondes tracté par un quad (Source : Geomines)	11
Figure 6 : Photographies de la zone ou des zones à diagnostiquer (Source : Geomines)	12
Figure 7 : Cartographie localisant les éléments perturbateurs de surface (Source : Geomines)	13
Figure 8 : Photographies de certains objets métalliques de surface pouvant perturber les données (Source : Geomines)	13
Figure 9 : Cartographie du gradient vertical résiduel et échelle de couleur (Source : Geomines)	14
Figure 10 : Emprise du diagnostic (Source : Geomines).....	15
Figure 11 : Cartographie localisant les zones non diagnostiquées (Source : Geomines).....	16
Figure 12 : Photographies présentant les zones non diagnostiquées (Source : Geomines) .	16
Figure 13 : Cartographie localisant les zones perturbées (Source : Geomines).....	17
Figure 14 : Cartographie localisant les zones d'alignement (Source : Geomines).....	18
Figure 15 : Cartographie localisant les anomalies magnétiques potentiellement pyrotechniques retenues (Source : Geomines)	20

1. CADRE RÉGLEMENTAIRE

Afin de tenir compte des règles de prévention et de sécurité inhérentes à une opération de sécurisation pyrotechnique, le présent rapport fera référence aux dispositions contenues dans les textes suivants :

- le Code du travail, et notamment les articles L 4121-1 à L 4121-5, qui fixent les obligations de l'employeur en termes de prévention ;
- le Code de la Sécurité intérieure, et notamment les articles R.733-1 à R.733-13 ;
- le décret 2014-1253 du 27 octobre 2014 relatif aux dispositions des livres III, VI et VII de la partie réglementaire du code de la sécurité intérieure, modifiant notamment les articles R.733-1 et R.733-2 relatifs aux compétences respectives des services placés sous l'autorité du ministre chargé de la sécurité civile et du ministre de la Défense en matière de recherche, de neutralisation, d'enlèvement et de destruction des munitions et des explosifs.

2. OBJECTIFS DU DIAGNOSTIC

L'expression munitions non explosées ou Restes et Explosifs de Guerre (REG) désignent le plus souvent des munitions équipées d'une charge explosive, qui ont été tirées mais qui n'ont pas explosé à l'impact. Il peut également s'agir de munitions stockées, perdues ou oubliées avant qu'elles n'aient pu être tirées. Ces munitions non explosées, avec ou sans détonateur posent un triple problème :

- risque d'explosion, par mise à feu spontanée, volontaire ou accidentelle ;
- risque de fuite de toxique suite à la corrosion ;
- problème écotoxique lié à la toxicité de tout ou partie des éléments qui composent ces munitions, formant ainsi une menace très sérieuse pour les écosystèmes, la sécurité civile et la santé (phosphore, gaz de combat, ...).

Les investigations géophysiques ont pour but la détection de l'ensemble des anomalies pouvant s'apparenter à des engins pyrotechniques de toutes tailles dans les premiers mètres du sol.

Les objectifs de ce diagnostic sont :

- l'identification des anomalies pouvant s'apparenter à des engins pyrotechniques ;
- la détermination, lorsque cela est possible, des caractéristiques physiques des anomalies identifiées, telles que leurs profondeurs d'enfouissement, leurs dimensions et leurs poids.

A l'issue du diagnostic, des recommandations seront fournies afin de traiter la problématique pyrotechnique associé au projet du client.

3. CONTEXTE GÉNÉRAL DU SITE

3.1. LOCALISATION

Le site d'intervention se situe sur la commune de Maubeuge (59), dans le département du Nord en région Hauts-de-France (Figure 1). L'emprise se trouve dans un aérodrome. La surface contractuelle prévue est de 830 000 m² (83 ha).



Figure 1 : Localisation du site d'étude

3.2. CONTEXTE HISTORIQUE

3.2.1. Première Guerre Mondiale : 1914 - 1918

Selon l'étude historique menée par DEKRA, durant la Première Guerre Mondiale, l'emprise faisant l'objet de l'étude se situe entre l'ouvrage de la Salmagne et celui de Fagne. Bien qu'aucun document d'époque ne mentionne explicitement la présence de positions défensives sur cette portion, il est fort probable que des tirs d'artillerie, français ou allemands, aient été dirigés vers cette zone, visant des troupes en progression ou en repli lors des offensives menées par l'un ou l'autre camp.

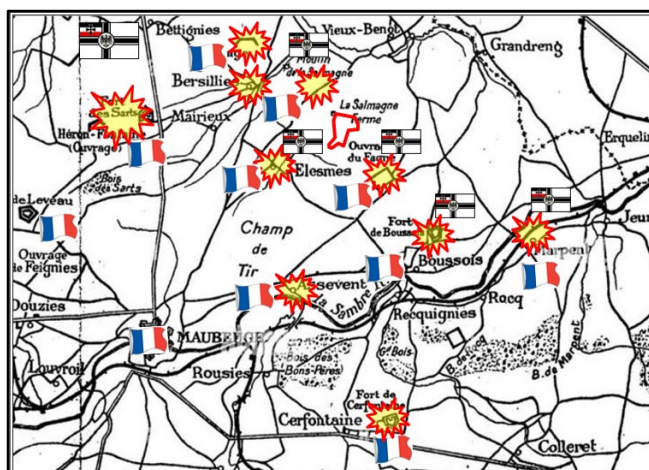
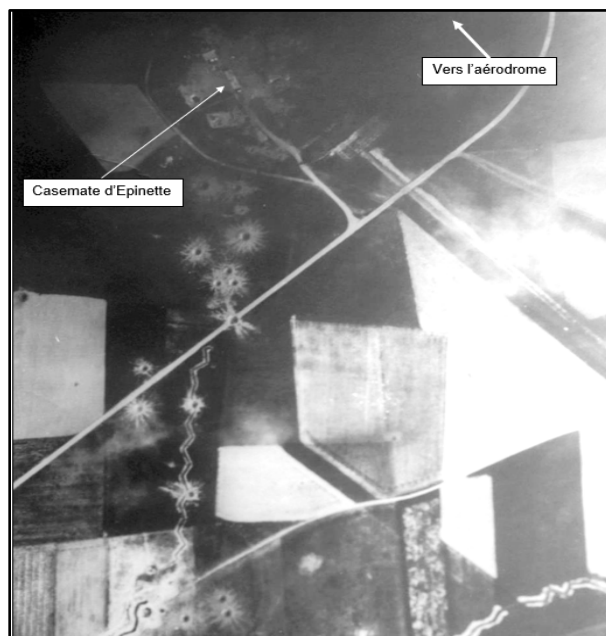


Figure 2 : Positionnement des principaux combats par rapport à l'emprise (Source : DEKRA)

3.2.2. Seconde Guerre Mondiale : 1939 - 1945

Lors de la bataille de France, l'aérodrome de Maubeuge-Elesmes, se trouve imbriqué entre les ouvrages d'infanterie de la Salmagne, Elesmes, Epinette, ceux-ci ont été touchés par l'artillerie comme par l'aviation, ces bombardements ont probablement touché l'emprise. D'autre part, l'aérodrome a été l'objet d'un bombardement aérien de la part des Allemands, aucun document ne faisant état des zones touchées. Il faut considérer que le site a subi une pollution pyrotechnique avérée.

Figure 3 : Photographie de 1940 montrant La casemate d'Epinette après les bombardements allemands (Source : M. DEPRET)



3.2.3. Risque munitionnaire retenu

Conformément aux conclusions de l'étude historique réalisée par DEKRA, la présence potentielle de munitions sur l'emprise étudiée concerne une large typologie de calibres, incluant aussi bien des petites munitions que des bombes d'aviation. Ces éléments sont synthétisés dans le tableau ci-après, présentant les conclusions partielles issues de l'analyse historique.

Tableau 1 : Tableau présentant les risques pyrotechniques (Source : Geomines)

Source de pollution pyrotechnique	Observations	Risque pyrotechnique retenu
Activité militaire	1 ^{ère} Guerre Mondiale : Néant	Fortuit
	2 ^{ème} Guerre Mondiale : Aérodrome militaire	Probable
Combats terrestres	1 ^{ère} Guerre Mondiale : Attaque française sur Vieux-Reng du 29 août 1914 et attaque allemande du 2 au 6 septembre 1914	Probable
	2 ^{ème} Guerre Mondiale : Combat ligne Maginot	Probable
Bombardements	1 ^{ère} Guerre Mondiale : Néant	Fortuit
	2 ^{ème} Guerre mondiale : Bombardement de mai 1940	Avéré
Production ou stockage de munitions	1 ^{ère} Guerre Mondiale : Néant	Fortuit
	2 ^{ème} Guerre Mondiale : Stockage français et allemand	Probable

4. MOYENS MIS EN OEUVRE

La mise en œuvre d'appareils géophysiques non-intrusifs permet de détecter d'éventuels engins pyrotechniques enfouis en fonction des conditions de surface et des profondeurs d'investigation souhaitées.

4.1. MOYENS HUMAINS

Les mesures géophysiques et les levés topographiques ont été réalisés du lundi 05 mai au vendredi 23 mai 2025 (semaines 19,20 et 21), par Frédéric DUCEZ, technicien géophysique UXO.

Le traitement et l'interprétation des données ainsi que la rédaction du rapport ont été réalisés par Adlane DJAOUT, ingénieur géophysique UXO et supervisés par Solenne SCHNEIDER, cheffe de projet géophysique UXO et Laurie DHULST, directrice du pôle géophysique UXO.

4.2. SYSTÈME DE POSITIONNEMENT

Les mesures sont géoréférencées par un DGPS (GPS différentiel) avec des corrections de positionnement temps-réel (RTK) par abonnement pour un positionnement centimétrique. Ces corrections sont reçues grâce à un abonnement auprès de fournisseurs de données possédant un réseau de stations terrestres tel qu'Orphéon, Teria, SAT info, etc.

Dans le cas de cette étude, nous avons utilisé un GNSS REACH RS3 de chez EMLID avec corrections RTK Premium.

La mise en œuvre du GPS a été, notamment, utilisé ici pour :

- géoréférencer les mesures magnétométriques en temps réel ;
- relever les sources ferromagnétiques ou les éléments remarquables (obstacles, objets métalliques, végétation dense, ...) présents sur le terrain ;

Le système de projection utilisé est présenté ci-dessous :

Tableau 2 : Tableau descriptif du système de coordonnées utilisé (Source : Geomines)

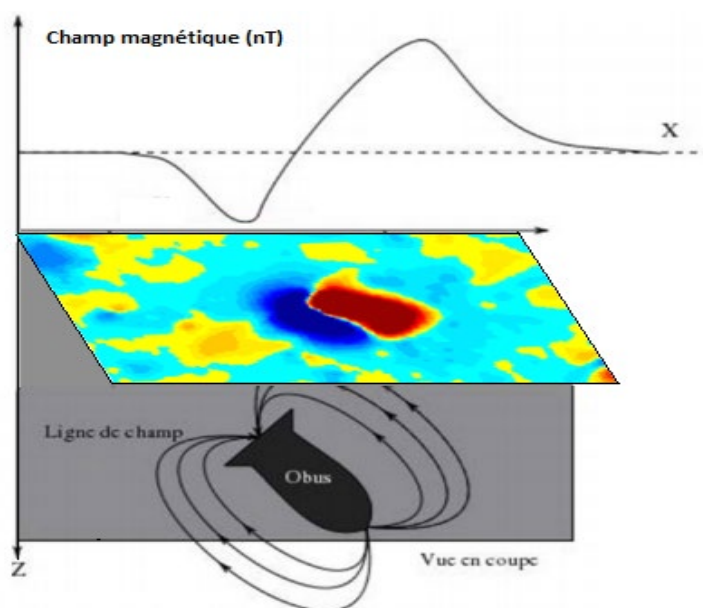
Groupe de système de coordonnées	Lambert Conique Conforme
Projection	CC50
Système géodésique	RGF93
Ellipsoïde	IAG GRS80
EPSG	3950

4.3. METHODE MAGNETOMETRIQUE

4.3.1. Principe de fonctionnement

Les méthodes de magnétométrie sont dites « passives », car elles n'émettent aucune onde et sont basées sur la mesure du champ magnétique terrestre et des perturbations provoquées par la présence d'objets ferromagnétiques dans le sol.

Figure 4 : Aimantation induite d'un objet et anomalie dipolaire en résultant (source : ADEME/IFSTTAR/AGAP QUALITE 2016)



Ces perturbations sont liées à l'aimantation induite des objets (Figure 4) : il s'agit de la réaction des éléments aux champs magnétiques environnants. L'objet génère alors des lignes de champ propres et devient assimilable à un dipôle magnétique (avec un pôle nord et un pôle sud local) générant une anomalie dipolaire. C'est le cas des objets ferreux d'origine anthropique et des roches riches en minéraux ferromagnétiques (comme la magnétite).

La majorité des munitions historiques sont constituées d'une enveloppe métallique permettant de les localiser grâce à cette méthode.

- le magnétomètre est très sensible à l'environnement urbain. La détection est difficile, voire impossible dans les zones saturées magnétiquement, soit à proximité ou à l'aplomb d'éléments métalliques, tels que les lignes électriques, les clôtures, les voitures, le chemin de fer, les dalles de béton armé, le mâchefer, les déchets métalliques, etc ;
- le magnétomètre est adapté à la détection en profondeur pourvu que l'environnement de surface soit magnétiquement calme ;
- la méthode ne permet pas de distinguer les objets métalliques inertes (fûts, plaques d'égout, déchets métalliques, barbelés, carcasses de voitures enfouies, aimants, etc.) des objets pyrotechniques ;
- un signal magnétique unitaire peut faire référence à un amas d'anomalies ou masquer d'autres anomalies pyrotechniques plus profondes ;
- la méthode ne permet pas la détection des éléments non ferromagnétiques, par exemple en aluminium.

4.3.2. Moyen géophysique : magnétomètre fluxgate 8 sondes

Afin de répondre au mieux aux attentes du projet, la totalité de l'emprise accessible a été détectée avec le système géoréférencé gradiométrique SENSYS 8 sondes MXV3 tracté par quad (Figure 5).



Figure 5 : Mise en œuvre du magnétomètre 8 sondes tracté par un quad (Source : Geomines)

Chaque sonde est composée de deux capteurs fluxgate, séparé de 50 cm l'un au-dessus de l'autre et espacés latéralement de 50 cm. La gamme de mesure est de $\pm 10\,000$ nT, la sensibilité est de 0,1 nT et la fréquence d'acquisition est de 100 Hz. Elle permet la détection des éléments ferromagnétiques de façon rapide et précise sur l'emprise. Cependant, ils sont sensibles aux pollutions de surface et superficielles.

Les données magnétométriques sont enregistrées selon des profils régulièrement espacés de 4,5 m les uns des autres. Le chariot porte sonde est équipé d'un système de géolocalisation permettant de relever la position de chacune des sondes avec une précision centimétrique.

4.3.3. Traitement des données

Les données magnétiques ont été traitées et analysées à l'aide du logiciel de traitement Oasis Montaj de Geosoft Seequent grâce au module UXO land (voir Annexe A). Les étapes principales du traitement des données, tels que détaillées en Annexe A, sont les suivantes :

- extraction et fusion des données du magnétomètre et des données de positionnement ;
- traitement et correction des données magnétométriques ;
- interpolation et production de cartes magnétiques de gradient vertical, de gradient résiduel et de signal analytique ;
- liste des positions des anomalies magnétiques et calcul des classes de masses et des profondeurs d'enfouissement.

5. DESCRIPTION DU CHANTIER

5.1. CONDITIONS D'INVESTIGATION

Le diagnostic de pollution pyrotechnique localisé au l'aérodrome de Salmagne à Maubeuge (59) s'est déroulé en semaine 19, 20 et 21.

Malgré les contraintes dû à l'activité de l'aérodrome, l'organisation et les moyens mis en œuvre ont permis de travailler dans de bonnes conditions pour l'investigation sur site.

Les conditions météorologiques étaient bonnes et n'ont donc pas eu d'incidences sur la conduite du levé magnétométrique.

Une grande majorité de la parcelle a été fauchée afin de permettre la réalisation des mesures dans de bonnes conditions, aussi bien pour notre opérateur que pour notre matériel.

Les photographies présentées ci-dessous en Figure 6, illustrent les conditions d'investigations dans lesquelles le diagnostic de pollution pyrotechnique a été réalisé.



Figure 6 : Photographies de la zone ou des zones à diagnostiquer (Source : Geomines)

6. DIAGNOSTIC MAGNETOMETRIQUE

6.1. CARTOGRAPHIE MAGNÉTOMÉTRIQUE

Cette investigation nous permet d'obtenir la cartographie ci-dessous après différents traitements (Voir Annexe A) sur laquelle est basée l'interprétation.



Figure 9 : Cartographie du gradient vertical résiduel et échelle de couleur (Source : Geomines)

Les cartographies des différents traitements se trouvent en Annexes C, D et E.

6.2. EMPRISES DU DIAGNOSTIC

6.2.1. Zones diagnostiquées

La surface totale diagnostiquée est de 803 468 m² (80 ha) (Figure 10).



Figure 10 : Emprise du diagnostic (Source : Geomines)

6.2.2. Zones non diagnostiquées

Certaines zones n'ont pas pu être diagnostiquées de par l'impossibilité d'y accéder (présence d'obstacles, de végétation, de bâtiments, etc.). Ces zones sont cartographiées sur la figure ci-dessous (Figure 11) et quelques photographies de ces dernières sont présentées en Figure 12.



Figure 11 : Cartographie localisant les zones non diagnostiquées (Source : Geomines)



Figure 12 : Photographies présentant les zones non diagnostiquées (Source : Geomines)

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des zones (Source : Geomines)

Zones	Superficie (m²)	Pourcentage (%)
Emprise du projet	830 000	100
Zones Non Diagnostiquées Surfaces n'ayant pu être diagnostiquées du fait de la présence d'obstacles	48 048	5,8

6.2.3. Zones perturbées

Les zones magnétiquement perturbées prennent en compte les zones saturées et les zones aveugles (voir Annexe B). Elles couvrent ici une partie de la superficie diagnostiquée soit 84 979 m² de zones saturées et 19 500 m² de zones aveugles (Figure 13). Les zones perturbées peuvent être dues à la présence de grillages, de panneaux ou d'autres sources ferromagnétiques se trouvant sur ou aux abords de l'emprise.

Également, la présence de sentiers d'origine anthropique semble présenter des signatures magnétiques au droit de leur passage. Pour cette raison, il est difficile de statuer quant à la présence d'objets pyrotechniques à l'aplomb de ces derniers. Il faudra donc être vigilant à l'approche de ces zones.



Figure 13 : Cartographie localisant les zones perturbées (Source : Geomines)

6.2.4. Zones d'alignements

Des zones d'alignement ont été identifiées, regroupant des zones d'alignement saturées (avec un signal magnétique élevé) et des alignements d'anomalies régulièrement espacées (Figure 14). Ces zones correspondent potentiellement à des réseaux enterrés ou structures linéaires et agissent comme un masque. Il sera donc nécessaire d'être vigilants aux abords de ces alignements.



Figure 14 : Cartographie localisant les zones d'alignement (Source : Geomines)

6.2.5. Synthèse

Le tableau ci-dessous (Tableau 4) synthétise les résultats de manière quantitative des différents types de surfaces du diagnostic de pollution pyrotechnique.

Tableau 4 : Tableau de synthèse des différents types de zones (Source : Geomines)

Zones	Superficie (m ²)	Pourcentage (%)
Zones Diagnostiquées :	803 468	100
Dont Zones Saturées <i>Possédant de nombreuses anomalies dont la quantité ne peut être estimée et dont l'isolement ne peut être effectuée</i>	84 979	10,6
Dont Zones Aveugles <i>Possédant de nombreuses anomalies métalliques d'origines anthropiques et pouvant parfois être d'origine géologique</i>	19 500	2,4
Dont Zones dites Exploitable <i>Surface diagnostiquée dépourvue de Zones Perturbées et/ou Saturées permettant ainsi l'interprétation des mesures et le pointage des anomalies.</i>	698 989	87

Il est important de rappeler que les surfaces perturbées (saturées et aveugles), indépendamment de leur nature, constituent des zones d'ombres à la détection d'engins plus profonds. A l'aplomb de ces surfaces, il n'est pas possible de statuer quant à l'absence ou la présence de munitions.

6.3. ANOMALIES DETECTEES

La méthode magnétométrique a permis d'isoler un total de 11 774 anomalies magnétiques en dehors des surfaces perturbées.

6.4. CATÉGORIES DE MUNITIONS RECHERCHÉES

Le présent rapport de diagnostic pyrotechnique est destiné à identifier les anomalies magnétiques susceptibles de s'apparenter à un engin pyrotechnique. Les anomalies seront retenues suivant l'historique du site et classées par famille de la manière suivante :

- **Famille A** : anomalies pouvant correspondre à un objet métallique inerte de grande taille ou à une bombe d'aviation de 100 lb et plus ou à une munition d'artillerie lourde type obus de 155mm ;
- **Famille B** : anomalies pouvant correspondre à un objet métallique inerte de taille moyenne ou une bombe d'aviation de 20 lb ou une munition d'artillerie moyenne, type obus de 75 mm jusqu'à 105 mm ;
- **Famille C** : anomalies pouvant correspondre à un objet métallique inerte de petite taille ou à de petites munitions d'artillerie de type DCA ou grenade ;
- **Famille O** : anomalies susceptibles de s'apparenter à des objets ferreux volumineux non pyrotechniques, proches de la surface et pouvant masquer des anomalies pyrotechniques plus profondes.

Il est important de noter que même partielle, une munition peut présenter un risque pyrotechnique. Les anomalies retenues sont réparties par famille dans le tableau ci-dessous (Tableau 5) et visualisable en Figure 15.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des anomalies potentiellement pyrotechniques par famille (Source : Geomines)

Répartition	Nombre d'anomalies
Famille A <i>anomalies pouvant correspondre à un objet métallique inerte de grande taille ou à une bombe d'aviation de 100 lb et plus ou à une munition d'artillerie lourde, type obus de 155mm</i>	66
Famille B <i>anomalies pouvant correspondre à un objet métallique inerte de taille moyenne ou une bombe d'aviation de la 20 lb ou une munition d'artillerie moyenne, type obus de 75 mm jusqu'à 105 mm</i>	871
Famille C <i>anomalies pouvant correspondre à un objet métallique inerte de petite taille ou à de petites munitions d'artillerie de type DCA ou grenade</i>	10 307
Famille O <i>anomalies susceptibles de s'apparenter à des objets ferreux volumineux non pyrotechniques, proches de la surface et pouvant masquer des anomalies pyrotechniques plus profondes</i>	530
Total	11774



Figure 15 : Cartographie localisant les anomalies magnétiques potentiellement pyrotechniques retenues (Source : Geomines)

La liste des cibles magnétiques retenues est présentée dans le document Excel correspondant (cf. « G292_25_A_AMVS_Maubeuge_Cibles retenues.xlsx »).

7. RECOMMANDATIONS

Les recommandations décrites ci-dessous, permettent à AMVS d'intégrer le risque pyrotechnique dans ses modes opératoires et de minimiser le risque engendré par une découverte fortuite.

7.1. EMPRISES PRÉSENTANT UN RISQUE PYROTECHNIQUE POTENTIEL

Il est recommandé, dans cette situation, de procéder aux prestations présentées ci-dessous, permettant de garantir la sécurité de tiers avant et/ou pendant la réalisation des travaux intrusifs sur le site du projet. Ces prestations consistent en :

- **la mise au jour des anomalies retenues** : permet de sécuriser l'emprise en avance de phase par l'ouverture des anomalies retenues réalisé par des opérateurs qualifiés en dépollution pyrotechnique. Un contrôle magnétométrique des fonds de fouilles sera effectué afin de garantir l'absence de pollution pyrotechnique plus profonde. Une évaluation des risques (EdR) devra être rédigée avant tout travaux intrusifs ;
- **la détection en systématique des surfaces perturbées** : permet de sécuriser l'emprise en avance de phase par le curage mécanique des surfaces perturbées réalisé par des opérateurs qualifiés en dépollution pyrotechnique. Un contrôle magnétométrique des fonds de fouilles sera effectué afin de garantir l'absence de pollution pyrotechnique plus profonde. Une évaluation des risques (EdR) devra être rédigée avant tout travaux intrusifs ;
- **l'assistance aux terrassements** : mise à disposition d'un opérateur qualifié en dépollution pyrotechnique en pied de pelle, fournie par le client, pour l'assistance des travaux d'excavation. Cela implique la réduction des cadences de terrassement mais assure la sécurité des travailleurs du chantier. Une évaluation des risques (EdR) devra être rédigée avant tout travaux intrusifs ;

7.2. AUTRES PRESTATIONS PROPOSÉES PAR GEOMINES

Les prestations suivantes (non incluses dans le diagnostic) peuvent être proposées par Geomines afin de compléter le présent diagnostic de pollution pyrotechnique :

- **l'implantation de zones remarquables et/ou des anomalies** : intervention pour la réimplantation des zones blanches, la réimplantation des cibles retenues et/ou la réimplantation des zones perturbées ;
- **la sécurisation de forage/sondage** : permet de réaliser un accompagnement de sécurisation pyrotechnique en surface et à l'avancée, lors de la réalisation de pieux, piézomètres, piézairs, berlinoise, etc. avec la possibilité de prendre en charge les prestataires de forage ;

ANNEXES

ANNEXE A. TRAITEMENT MAGNETOMETRIQUES

DES

DONNÉES

a. TRANSFERT DES DONNÉES

Les données acquises sont récupérées et exploitées à l'aide des logiciels *DLM-GPS*, *Magneto* ou *MAGMAP* ce qui permet d'associer les données et les positions d'acquisition et ainsi d'obtenir des cartographies.

b. TRAITEMENT DES DONNÉES

Les données magnétiques sont traitées et analysées à l'aide du logiciel de traitement Oasis Montaj de Geosoft Seequent grâce au module UXO land.

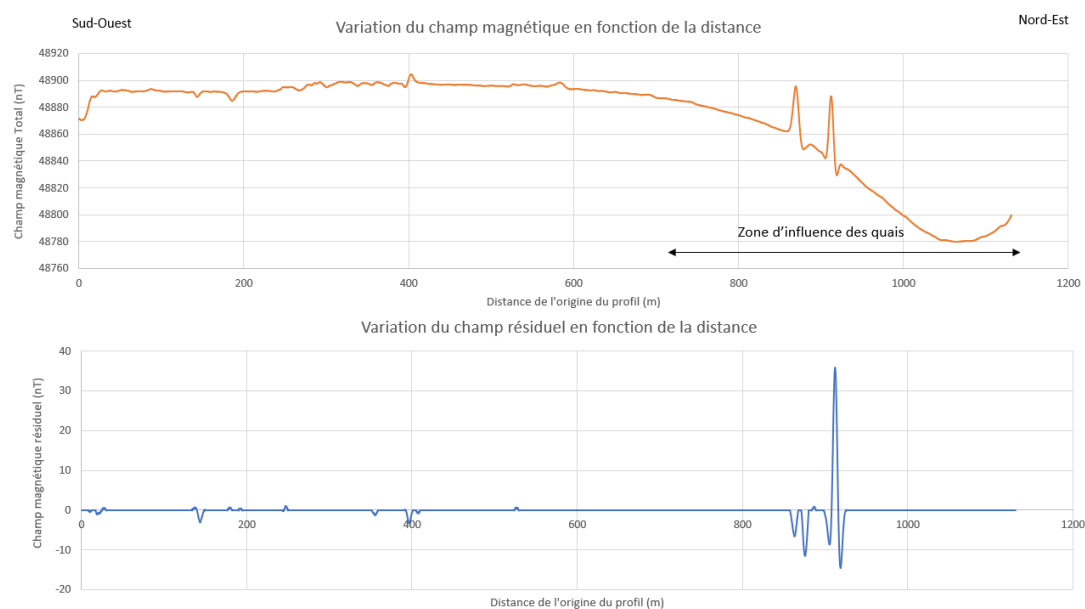
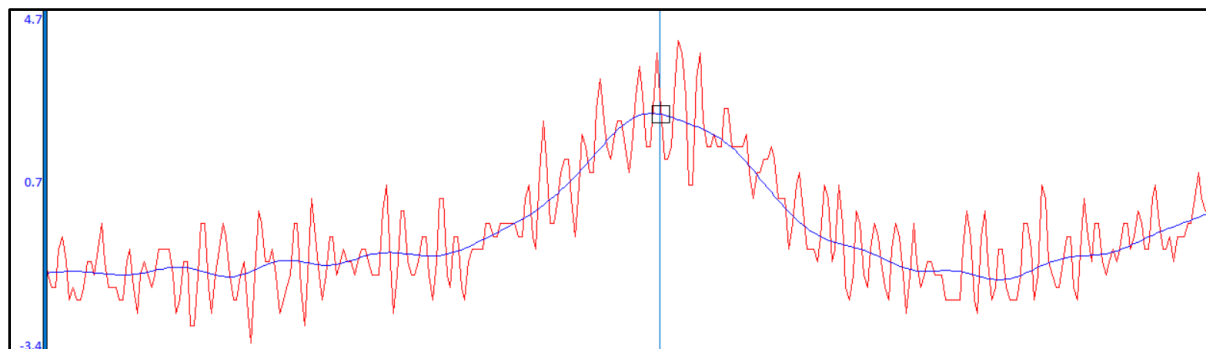
Avant toute chose un contrôle qualité des données est réalisé. Il permet de repérer et de corriger tout problème lié à :

- un problème matériel (ex : sonde défectueuse) ;
- un champ magnétique local particulier, nécessitant des corrections adaptées ;
- des hétérogénéités dans l'échantillonnage (densité, orientation).

Les données de positionnement sont vérifiées et corrigées si nécessaire. Les données magnétométriques sont également corrigées pour éliminer les valeurs aberrantes (« despiking ») si nécessaire.

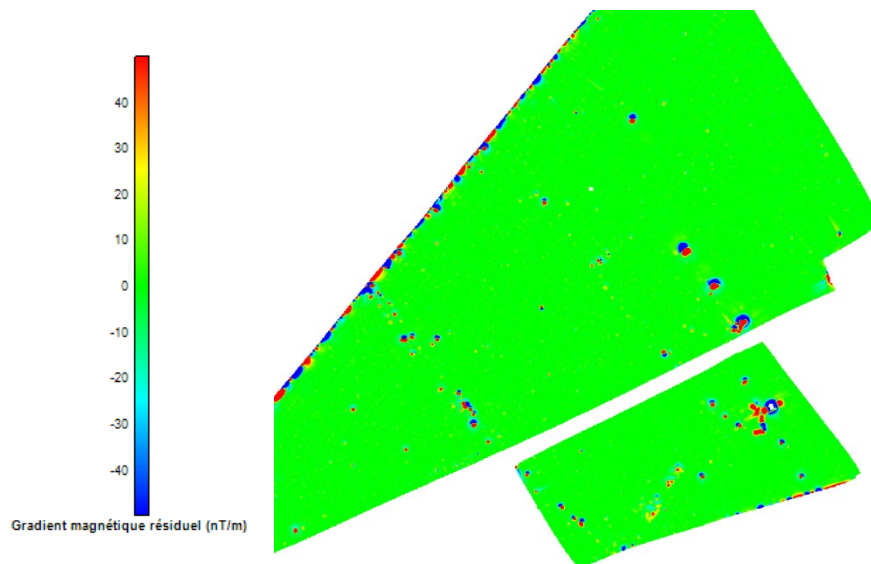
Les données sont ensuite interpolées dans une grille dont la taille des cellules peut varier entre 15 cm et 25 cm en fonction du jeu de données. Une carte du champ magnétique total ou du gradient magnétique c'est-à-dire la différence de valeurs entre le capteur haut et bas est d'abord réalisée pour évaluer les traitements à appliquer et permettre de mettre en évidence les anomalies dipolaires présentes ainsi que les zones perturbées.

A ce moment, l'objectif est de réduire le bruit de fond qui perturbe le signal des anomalies, en appliquant différents filtres. Une attention particulière est portée à ne supprimer aucune anomalie pendant cette phase. La composante de grande longueur d'onde du signal est ainsi calculée grâce à l'application de plusieurs filtres non-linéaires successifs. Cette composante permet d'éliminer dans le cas du gradient magnétique une partie de la saturation liée aux infrastructures aériennes ou les variations liées à l'environnement géologique. Dans le cas de la mesure en champ total, cette composante permet de s'affranchir des variations temporelles du champ magnétique terrestre, tel que le champ magnétique global du noyau, les variations diurnes et régionales du champ, les variations dues aux activités solaires et éventuellement aux activités humaines. Une carte du gradient magnétique résiduel ou du champ magnétique résiduel est ensuite réalisée en déduisant cette composante de grande longueur d'onde du signal.



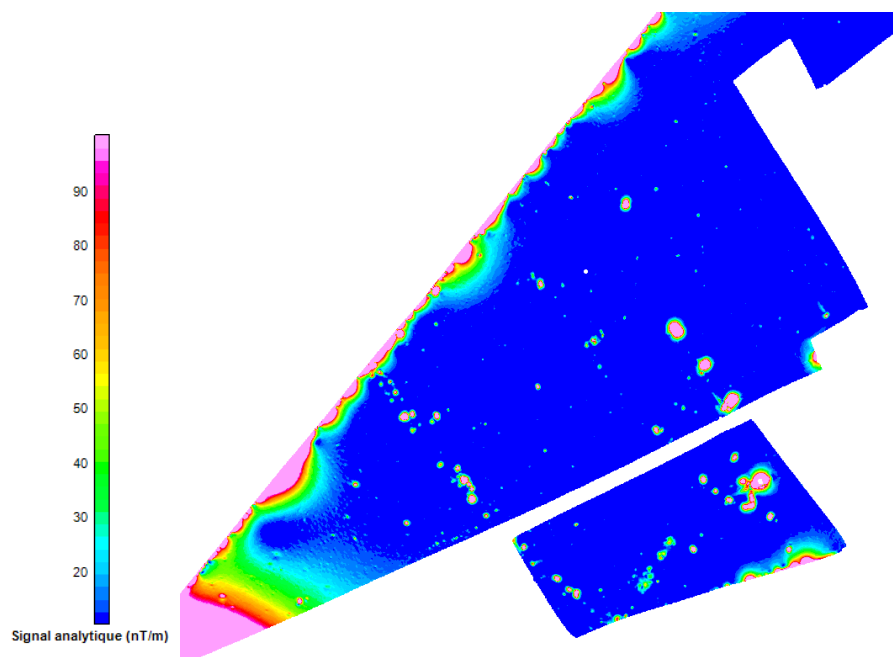
Annexe A_Figure a : Exemple de traitement du signal permettant de réduire le bruit de fond. En rouge ou orange, le signal brut et en bleu le signal résiduel traité (Source : Geomin)

Les cartographies sont affichées à une échelle d'intensité adaptée en nanoTesla et représentée par une plage d'intensité de couleurs. Le seuil d'analyse de la carte (sensibilité de l'affichage via le réglage de l'échelle de couleur) est très important pour valider l'interprétation. En diminuant progressivement le seuil d'analyse nous pouvons imager des anomalies de plus faible intensité.



*Annexe A_Figure b : Exemple de cartographie magnétique réalisée sur le logiciel Oasis Montaj
(Source : Geomines)*

Le signal est ensuite dérivé dans les deux directions horizontales (dérivée en x et en y) et dans la direction verticale. Après une Transformée de Fourier inverse, l'amplitude du signal analytique est calculée. Le signal analytique est une transformation du signal permettant de transformer la forme de l'anomalie dipolaire inclinée en une anomalie positive centrée sur le corps au moins en 2D. L'affichage obtenu est une cartographie présentant des « monopôles ». Cela permet d'identifier plus précisément les anomalies et leur localisation. Cela va également permettre de modéliser la source probable de ces anomalies.



*Annexe A_Figure c : Cartographie du signal analytique obtenu après interprétation selon la méthode d'Euler
(Source : Geomines)*

On cherche ensuite à déterminer les masses équivalentes exprimées en kilogramme et la profondeur d'enfouissement des anomalies identifiées. C'est la résolution du problème inverse qui consiste à localiser par modélisation les sources à l'origine des anomalies observées. Le signal analytique nous permet de calculer ces paramètres grâce à la méthode de la déconvolution de Euler sur le signal analytique. Cependant ces calculs sont basés sur des hypothèses de départ, qui ne sont pas connues, et entraîne des variations pouvant être importantes entre l'estimation et la réalité. En effet, le ratio longueur sur largeur, la corrosion, le type d'alliage, l'orientation de l'objet, la composition du sol encaissant sont autant de paramètres modifiant la réponse magnétique d'un objet.

Les masses calculées sont donc des valeurs théoriques d'une sphère de fer pur équivalente pouvant générer le type d'anomalie observée et résultant de la modélisation et non le volume réel de l'objet détecté.

Finalement, une liste d'anomalies est établie en prenant en compte les paramètres de mesure. Par exemple :

N° Anomalies	Coordonnée X (Système de coordonnée du projet)	Coordonnée Y (Système de coordonnée du projet)	SA (nT/m)	Profondeur (m)	Poids apparent (kg)	Famille
--------------	--	--	-----------	----------------	---------------------	---------

- N° Anomalies : numéro unique d'identification de l'anomalie dans le terrain ;
- Coordonnée X (Système de coordonnée du projet) : position de l'anomalie en abscisse ;
- Coordonnée Y (Système de coordonnée du projet) : position de l'anomalie en ordonnée ;
- SA (nT/m) : amplitude du signal analytique de l'anomalie magnétique ;
- Profondeur (m) : profondeur théorique d'enfouissement de l'objet ;
- Poids apparent (kg) : poids théorique (signature magnétique) de l'anomalie magnétique ;
- Famille : classification de l'anomalie selon son risque pyrotechnique potentiel.

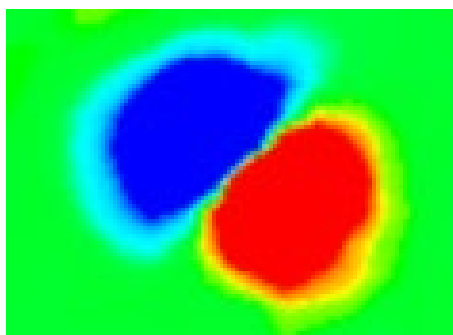
ANNEXE B. CLEF DE LECTURE DES DONNEES MAGNETIQUES

Les cartographies obtenues sont affichées avec une échelle adaptée, en nanoTesla. La plage d'intensité de cette échelle permet de localiser les variations engendrées par un engin pyrotechnique enfoui. Les tons verts indiquent des zones exemptes d'objets ferromagnétiques, tandis que les variations dans le rouge ou le bleu indiquent la présence d'objets ferromagnétiques enfouis et de surface (pyrotechniques ou non).

a. ANOMALIES ISOLÉES

➤ Anomalies retenues :

La signature magnétométrique d'un engin pyrotechnique isolé se présente généralement sous la forme d'un dipôle (Annexe B_Figure a). Cependant, selon l'orientation de l'objet, elle peut ne présenter qu'un seul pôle.



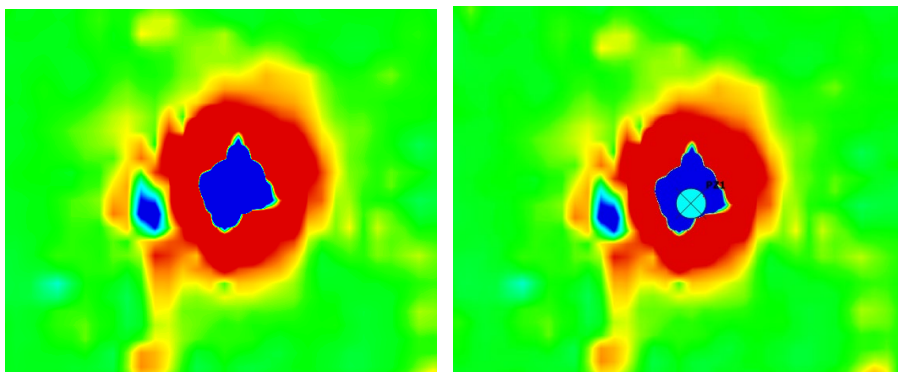
Annexe B_Figure a : Exemple de signature d'une anomalie isolée détectée par magnétométrie (Source : Geomines)

Ces signatures correspondent à des objets ferromagnétiques enfouis pyrotechniques ou non. La discrimination entre une munition et un objet métallique inerte est difficile et les paramètres estimés par les logiciels peuvent être différents de la réalité. De même, l'état des munitions ne pouvant être connu à l'avance, des fragments de munitions peuvent être retrouvés et ainsi classés dans une famille de munitions de taille plus petite.

➤ Anomalies de surface :

Lors du diagnostic, l'opérateur terrain a réalisé des levés topographiques des différents éléments de surfaces pouvant gêner les mesures comme par exemple des regards, des objets métalliques, etc...

Les regards ont un type de signature particulier (Annexe B_Figure b) et une forte intensité ce qui nous permet de ne pas les classer en objet pyrotechnique.

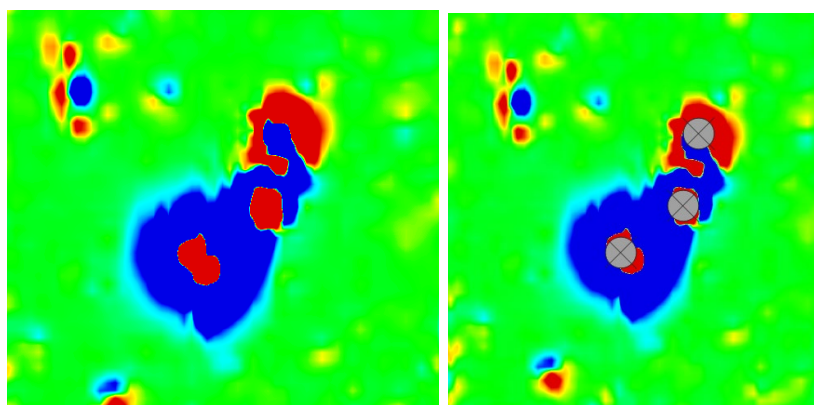


Annexe B Figure b : Exemple de signature d'une anomalie isolée non retenue comme objet pyrotechnique (à gauche) et représentation sur les cartographies (à droite) (Source : Geomines)

Cependant, nous ne pouvons pas affirmer l'absence d'une munition plus en profondeur et donc ces objets de surface ont été matérialisés au maximum sur la cartographie présentée en annexe. Il est important de faire attention à ces éléments.

➤ Anomalies de Famille O « Objets Ferreux » :

Une discrimination du signal est réalisée par l'ingénieur en charge du traitement permettant de repérer les anomalies non susceptibles d'être un engin pyrotechnique. Des anomalies isolées de très forte intensité, marquant de grosses sources ferreuses ne sont pas susceptibles d'être un engin pyrotechnique. Si elles se situent à un endroit où aucun objet de surface n'a été identifié, elles sont classées dans la famille O (Annexe B_Figure c). Cependant une attention particulière doit être portée à ces anomalies qui peuvent masquer des objets pyrotechniques à une plus grande profondeur et donc ces anomalies de forte intensité sont à vérifier.



Annexe B Figure c : Exemple de signature d'une anomalie de famille O (à gauche) et de représentation sur les cartographies (à droite) (Source : Geomines)

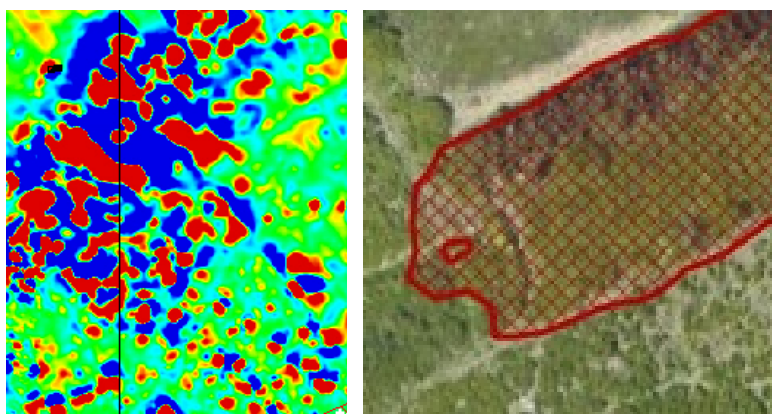
b. ZONES PERTURBÉES

Les zones magnétiquement perturbées prennent en compte les zones saturées et les zones aveugles. Sur ces surfaces polluées par l'accumulation de nombreux objets métalliques inertes, ou à forte saturation magnétique, il est difficile de discriminer les anomalies

magnétiques individuelles. En conséquence les zones perturbées sont exclues de la surface exploitable.

➤ Zone saturée (ZS) :

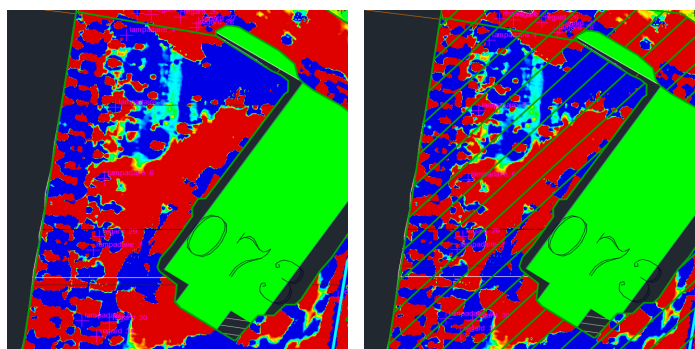
Les zones saturées (Annexe B_Figure d) sont liées à la présence d'objets métalliques enfouis (zones de remblais généralement) mais non associées à une structure connue ou visible en surface. Dans ces zones, il n'est pas possible de dissocier les signatures d'objets ponctuels en raison de la présence d'un nombre élevé d'anomalies magnétométriques au mètre carré. Tout risque pyrotechnique ne peut être exclu, y compris à l'aplomb de telles surfaces. Sur une zone saturée le but est d'enlever la saturation en décaissant par couches jusqu'à arriver à la couche saine.



Annexe B_Figure d : Exemple de signature de zone saturée (à gauche) et représentation sur les cartographies (à droite) (Source : Geomines)

➤ Zone aveugle (ZA) :

Certaines zones peuvent être considérées comme des zones aveugles (Annexe B_Figure e), c'est-à-dire liées à la présence de structures (éléments en surface ou enfouis si connu) générant un signal magnétique important pouvant masquer des anomalies de plus petite amplitude. Ces zones ont une explication (bâtiments, pylône électrique, véhicules stationnés, pied de clôture ...) mais représentent une zone d'ombre à la détection ce qui signifie que la présence d'engins pyrotechniques ne peut être complètement négligée.

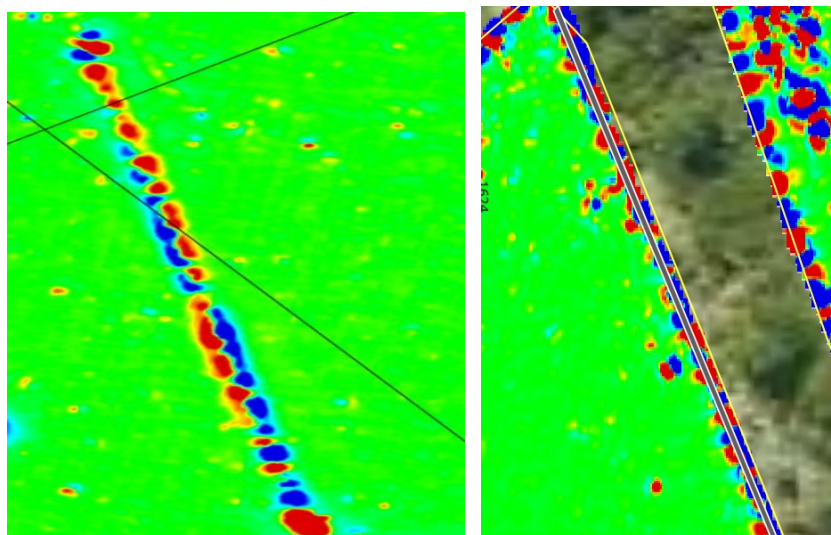


Annexe B_Figure e: Exemple de signature de zone aveugle (à gauche) et représentation sur les cartographies (à droite) (Source : Geomines)

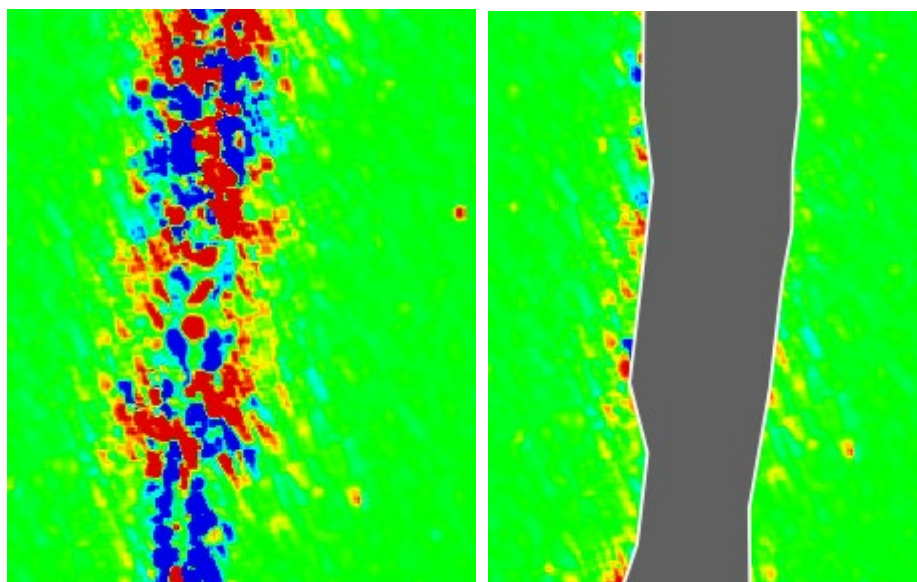
c. ALIGNEMENTS

Les alignements représentent une succession d'anomalies magnétométriques de manière très rectiligne. Ces alignements peuvent être soit une répétition régulière et fine d'anomalies (Annexe B_Figure f) soit une répétition grossière d'anomalies entraînant une saturation aux abords de cet alignement.

Les réseaux sont des structures majoritairement linéaires ce qui permet de les identifier assez facilement sur les cartographies magnétométriques. Cependant tous les alignements sur les cartographies ne sont pas des réseaux, ces perturbations peuvent aussi résulter de la présence de restes de clôtures et de tranchées. Il faut rester vigilant aux abords de ces linéaires car le risque pyrotechnique ne peut être totalement enlevé.



Annexe B Figure f : Exemple de signature d'alignement fin d'anomalies (à gauche) et représentation sur les cartographies (à droite) (Source : Geomines)



Annexe B Figure g : Exemple de signature d'alignement grossier d'anomalies (à gauche) et représentation sur les cartographies (à droite) (Source : Geomines)

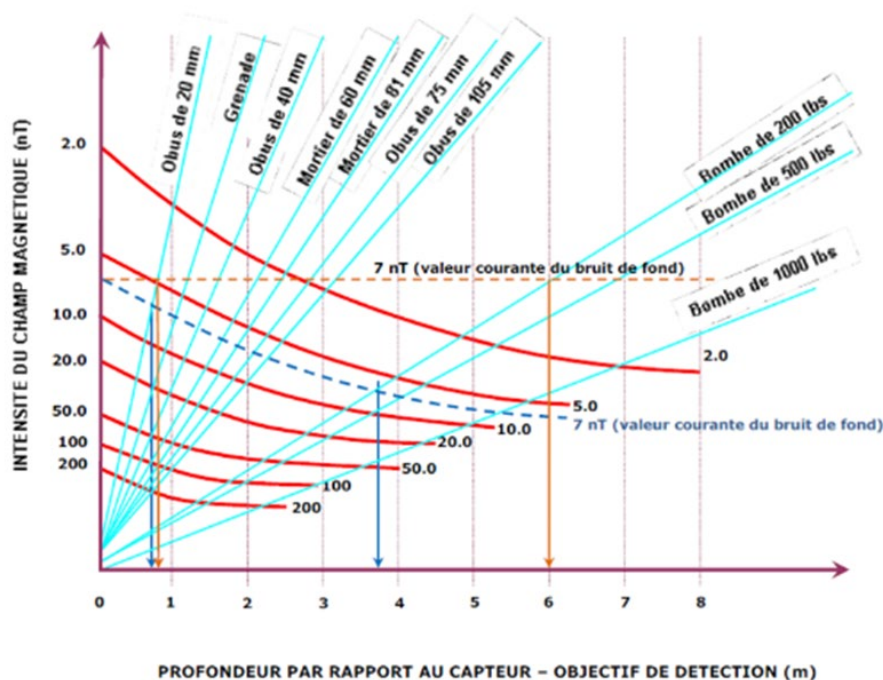
d. PROFONDEUR DE DÉTECTION

La réponse magnétométrique d'un objet dépend de la masse et la taille de l'objet, de la magnétisation de son métal constitutif, de son état d'oxydation, de la profondeur d'enfouissement, mais également de la nature du sous-sol.

Par conséquent la profondeur limite de détection est variable selon le type d'objet recherché et la nature du sous-sol. La limite maximale de détection lorsque tous les paramètres sont favorables est d'environ 3-4 m de profondeur.

Il est à noter également que le bruit de fond, lié aux appareils de mesures et à l'environnement magnétique du site varie et est la valeur en dessous de laquelle l'intensité perceptible du champ magnétique d'un objet enfoui ne peut être mesurée. Dans un environnement très peu perturbé, ce bruit de fond équivaut à environ 5 nT.

Dans le schéma ci-dessous, les courbes représentent la limite de détection en fonction de la profondeur (Annexe B_Figure h). Ainsi pour une grenade d'un poids de fer de 450 g, le champ magnétique induit d'une valeur de 5 nT est atteint de 1 à 1,2 m de distance entre les sondes et l'objet enfouis.



Annexe B Figure h : Performances des systèmes magnétométriques en champ total type césium (droites en pointillé et flèches orange) et gradiométriques type fluxgate (courbes rouges, courbe pointillé bleu et flèches bleues) dans un milieu sableux. (Source : Stanley, 2003)

ANNEXE C. CARTOGRAPHIE DU GRADIENT VERTICALE



ANNEXE D. CARTOGRAPHIE DU GRADIENT RESIDUEL



ANNEXE E. CARTOGRAPHIE DU SIGNAL ANALYTIQUE

