

Adresse postale

Pôle Industriel de Malambas
3 rue de la Darse
57280 HAUCONCOURT

T/ + 33 3 87 51 93 36
F/ + 33 3 87 51 93 40
Cardem-pyro@cardem.fr

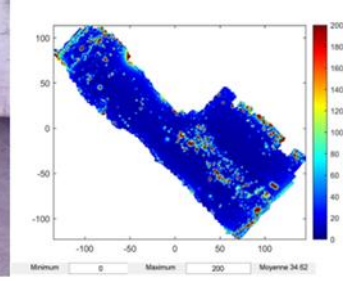
HAISNES (62)

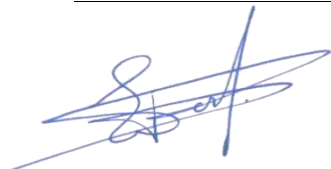
+

RAPPORT DE DIAGNOSTIC MAGNETIQUE

Maitre d'ouvrage :	Entreprise Contractante :





Date	Mercredi 6 août 2025		
Version	Rap V 1.01	Création document	06/08/25
Réalisation Diagnostic	Acquisition des mesures Théo NUNS theo.nuns@cardem.fr		<u>Opérateur géophysicien</u>
	Traitement et interprétation des données Nathan MALABRY nathan.malabry@cardem.fr		<u>Opérateur géophysicien</u>
	Contrôle traitement et interprétation. LE MAIRE Pauline pauline.le-maire@cardem.fr		<u>Docteur en Géophysique Ingénieur R&D</u>
Rédacteur	Sébastien NUNS sebastien.nuns@cardem.fr		<u>Conducteur de travaux</u> 
Correcteur	Eric FIXARI eric.fixari@cardem.fr		<u>Chef de Centre CARDEM-Pyro</u> 



Sommaire

1. PREAMBULE	4
2. CADRE REGLEMENTAIRE	5
3. PRESENTATION CHANTIER.....	7
3.1 Situation géographique.....	7
3.2 Nature des prestations	8
3.3 Moyens mis en place.	8
4. ETUDE SIMPLIFIEE DU RISQUE PYROTECHNIQUE	9
4.1 Guerre de 1870.....	9
4.2 Première guerre mondiale.....	10
5. COMPREHENSION DIAGNOSTIC MAGNETIQUE.....	13
5.1 Objets de la recherche	13
5.2 Réalisation diagnostic magnétique.....	14
5.3 Petit rappel sur le décryptage des cartographies magnétiques :.....	17
6. ENVIRONNEMENT MAGNETIQUE.....	21
7. RESULTATS DU DIAGNOSTIC MAGNETIQUE	23
7.1 Représentation des profils de mesure effectués sur le terrain	23
7.2 Cartographies de l'intensité de l'anomalie magnétique (TMI).	24
7.3 Représentations de l'intensité du signal analytique à différente échelle.	25
7.4 Représentations signal en gradiométrie verticale à différente échelle.....	29
8. ANALYSE DIAGNOSTIC MAGNETIQUE	31
9. CONCLUSION DIAGNOSTIC MAGNETIQUE.....	32



1. Préambule

Dans le cadre d’une étude pyrotechnique à HAINES (62), GINGER a demandé la réalisation d'un diagnostic magnétique.

Ce diagnostic permet d'identifier la pollution magnétique du terrain par une méthode non intrusive et d'orienter la conclusion vis-à-vis de l'historique du terrain en ce qui concerne la potentielle pollution pyrotechnique.

Ce diagnostic est réalisé dans le cadre du code du travail article 4121 et du CCAG Travaux (cité dans le tableau chapitre 2) ainsi que du passé historique du secteur démontrant un risque de pollution pyrotechnique.

Photographie de la zone.



Informations Marché - CCTP	
Profondeur d’investigation	Suivant les limites des appareils

Les travaux ont été réalisés :

Acquisition des mesures	Traitement et interprétation des données	Rédaction du rapport
365 Juillet 2025 Lun. Mar. Mer. Jeu. Ven. Sam. Dim. 27 1 2 3 4 5 6 28 7 8 9 10 11 12 13 29 14 15 16 17 18 19 20 30 21 22 23 24 25 26 27 31 28 29 30 31	365 Août 2025 Lun. Mar. Mer. Jeu. Ven. Sam. Dim. 31 1 2 3 32 4 5 6 7 8 9 10 33 11 12 13 14 15 16 17 34 18 19 20 21 22 23 24 35 25 26 27 28 29 30 31	365 Août 2025 Lun. Mar. Mer. Jeu. Ven. Sam. Dim. 31 1 2 3 32 4 5 6 7 8 9 10 33 11 12 13 14 15 16 17 34 18 19 20 21 22 23 24 35 25 26 27 28 29 30 31

365

Août 2025

Lun. Mar. Mer. Jeu. Ven. Sam. Dim.

31

1

2

3

32

4

5

6

7

8

9

10

33

11

12

13

14

15

16

17

34

18

19

20

21

22

23

24

35

25

26

27

28

29

30

31

365

Août 2025

Lun. Mar. Mer. Jeu. Ven. Sam. Dim.

31

1

2

3

32

4

5

6

7

8

9

10

33

11

12

13

14

15

16

17

34

18

19

20

21

22

23

24

35

25

26

27

28

29

30

31



2. Cadre réglementaire

Pour les travaux de réalisation de recherche d'engins de guerre sur un terrain civil, plusieurs exigences réglementaires sont en application et d'autres peuvent être prises en référence. Mais il est important de rappeler qu'une société de droit privée doit se conformer aux directives du code du travail et à la préfecture Service de déminage qui est le seul service compétent en matière d'engins de guerre. La société de droit privée ne peut en aucun cas ouvrir un chantier dit de "Dépollution Pyrotechnique " puisque celui-ci doit être ouvert par le service compétent de l'état.

La société doit uniquement réaliser la détection et la mise au jour des anomalies afin d'effectuer une première identification.

Concernant ce chantier de réalisation d'un diagnostic magnétique aucunes prescriptions particulières, puisque les travaux s'exécutent sans aucune intrusion dans le sol.

Rappel de la réglementation pour les chantiers qui doivent être dénommés de "sécurisation pyrotechnique" ou de matérialisation d'anomalies magnétiques.

Dénomination Textes réglementaires	Objet	Description
Décret n° 2014-1253 du 27 octobre 2014. Code sécurité intérieure – Chapitre III Article R 733-1 à 733-13	Décret relatif aux dispositions des livres III, VI et VII de la partie réglementaire du code de la sécurité intérieure (Décrets en Conseil d'Etat et décrets simples) DEMINAGE	Article R733-1 Création DÉCRET n°2014-1253 du 27 octobre 2014 - art. Sur l'ensemble du territoire national, la recherche, la neutralisation, l'enlèvement et la destruction des munitions, mines, pièges, engins et explosifs sont, sous réserve des dispositions des articles R. 733-2 à R. 733-13, de la compétence : 1° De services spécialisés relevant du ministre chargé de la sécurité civile, sur les terrains civils et, en cas de découverte d'objets pyrotechniques isolés, sur les terrains placés sous la responsabilité du ministère de la défense ; 2° Des services et formations spécialisés relevant du ministre de la Défense, sur les terrains placés sous sa responsabilité et dans les eaux territoriales et sur le rivage de la mer, à l'exclusion des emprises des ports non militaires.
CCAG Travaux 2021	Article 32 Engins de Guerre	Engins explosifs de guerre ou matériaux dangereux 32.1. Si les documents particuliers du marché indiquent que le lieu des travaux peut contenir des engins de guerre non explosés ou des matériaux pollués ou polluants, notamment des matériaux amiantés ou contenant du plomb, ou qu'il existe pour certains matériaux découverts une suspicion de toxicité ou de dangerosité, le titulaire applique les mesures spéciales de prospection et de sécurité édictées par l'autorité compétente. En tout état de cause, si un engin de guerre est découvert ou repéré, le titulaire doit : a) Suspendre le travail dans le voisinage et y interdire toute circulation au moyen de clôtures, panneaux de signalisations, balises, etc. ; b) Informer immédiatement le maître d'œuvre, le maître d'ouvrage et l'autorité chargée de faire procéder à l'enlèvement des engins non explosés ; c) Ne reprendre les travaux qu'après en avoir reçu l'autorisation par ordre de service.
Ensemble du Code du travail. Code du travail Article L 4121-1 à L 4121-5	Dernière Version du 1 octobre 2017 Titre II : Principes généraux de prévention • Chapitre Ier : Obligations de l'employeur. (Articles L4121-1 à L4121-5) • Chapitre II : Obligations des travailleurs. (Articles L4122-1 à L4122-2)	Description ci-dessous
Code du travail Article R4534-39	Découverte fortuite d'engins de guerre	Conduite à tenir en cas de découverte d'engins de guerre sur un chantier
Note interne de la DGT 2021-04-02	Mise en place de circuits d'expertise	En attente de clarification réglementaire par la DGT et les Syndicats

Conformément aux dispositions de l'article L.4121-2 du code du travail, il faut retenir (extrait retour DIRECCTE -55 de septembre 2014) :

L'employeur met en œuvre les mesures prévues par l'article L.4121-1 sur le fondement des principes généraux de prévention suivants :

- 1 – Éviter les risques.
- 2 – Évaluer les risques qui ne peuvent pas être évités.
- 3 – Combattre les risques à la source.



- 4 – Adapter le travail de l’homme, en particulier en ce qui concerne la conception des postes de travail ainsi que le choix des équipements de travail et des méthodes de travail et de production, en vue notamment de limiter le travail monotone et le travail cadencé et de réduire les effets de ceux-ci sur la santé.
- 5 – Tenir compte de l’état d’évolution de la santé
- 6 – Remplacer ce qui est dangereux par ce qui n’est pas dangereux ou par ce qui est moins dangereux
- 7 – Planifier la prévention en y intégrant, dans un ensemble cohérent, la technique, l’organisation du travail, les conditions de travail, les relations sociales et l’influence des facteurs ambiants, notamment les risques liés au harcèlement moral et au harcèlement sexuel, tels qu’ils sont définis aux L1152-1 et L1153-1
- 8 – Prendre des mesures de protections collectives en leur donnant la priorité sur les mesures de protection individuelles.
- 9 – Donner les instructions appropriées aux travailleurs

Toutefois et compte tenu que la réglementation en matière de réalisation de recherche de pollution pyrotechnique sur un terrain civil, ne contient aucun texte réglementaire, il est possible de reprendre des informations pour l’orientation de certains points de l’analyse de risques.

TEXTES PERMETTANT L’EVALUATION DES CAPACITES DE L’ENTREPRISE		
Dénomination Textes techniques	Objet	Description
Lettre de l’IPE N° 29 de juillet 2012	Commentaires sur l’application de la réglementation de sécurité du travail dans le domaine de la dépollution pyrotechnique	Article 1er : Champ d’application Ce décret s’applique, réglementairement, aux seuls chantiers de dépollution pyrotechnique de terrains appartenant au ministère de la défense ou à des terrains en préalable à leur mise à disposition du ministère de la défense.
Note technique d’IPE/DGT du 18 septembre 2013	Note relative aux chantiers de dépollution pyrotechnique effectués sur les terrains civils.	Note caduque en 2016
TEXTES PERMETTANT L’EVALUATION DES CAPACITES DE L’ENTREPRISE		
Dénomination Textes réglementaires	Objet	Description
Décret 2005 – 1325 modifié par le décret 1260-2010	Relatif aux règles de sécurité applicables lors des travaux de dépollution pyrotechniques	
Arrêté du 12 septembre 2011	Fixe les règles de détermination des distances d’isolement relatives aux chantiers de dépollution pyrotechnique	Distances d’isolement à l’intérieur d’un chantier de dépollution et par rapport aux installations avoisinantes
Arrêté du 23 janvier 2006	Fixe le niveau de connaissances requises pour les personnes exerçant les fonctions de chargé de sécurité, de responsable de chantier et pour le personnel exécutant les travaux de dépollution	Tableau récapitulatif des connaissances requises au niveau de la technique et du management

La note IPE/DGT du 18 septembre 2013 (non-mise à jour), apporte néanmoins quelques points sur la réglementation relative aux chantiers de dépollution pyrotechnique effectués sur les terrains civils. Elle indique notamment que pour un terrain civil, en cas de pollution pyrotechnique avérée, l’article L.4121-3 du code du travail s’impose à l’employeur. Pour ce faire, cette note précise qu’afin d’évaluer les risques auxquels sont soumis les travailleurs, l’employeur peut mettre en œuvre les principes énoncés dans le décret n°2005-1325 et rédiger une analyse de sécurité.

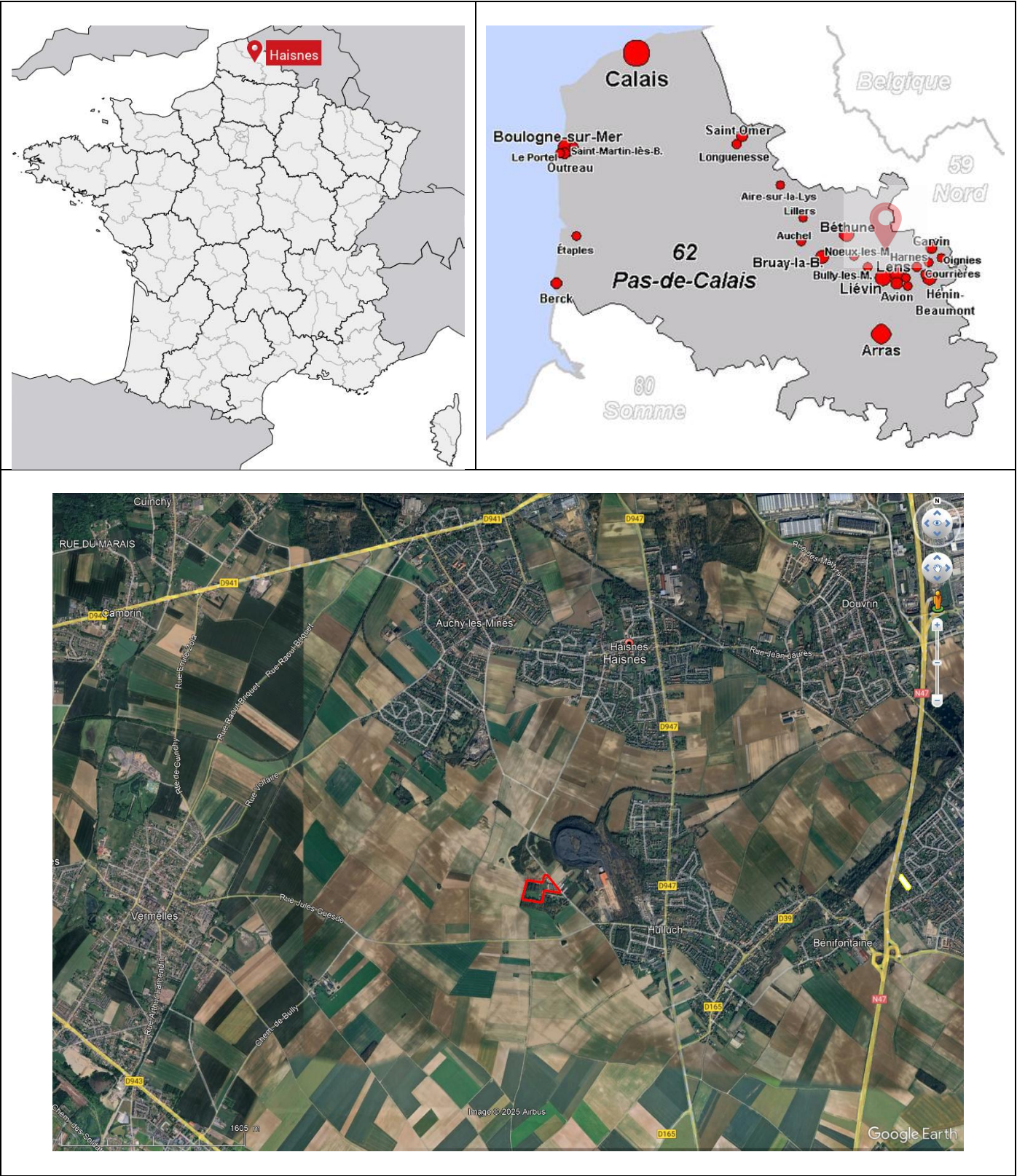
Il est à noter que la note IPE/DGT préconisant de fonder une analyse de risque et/ou de sécurité sur les prescriptions du décret 2005-1325, les écarts pouvant être constatés sur un chantier doivent être analysés pour en mesurer les conséquences en matière de sécurité.



3. Présentation chantier

3.1 Situation géographique

Le projet se trouve sur la commune de Haisnes située dans le département du Pas-de-Calais en région Hauts-de-France.



3.2 Nature des prestations

L'exécution du diagnostic s'est déroulée comme suit :

Phase 1 : Préparation

-  Préparation administrative du chantier

Phase 2 : Travaux

-  Reconnaissance visuelle du terrain
-  Implantation de la zone de mesures
-  Acquisition des mesures magnétiques
-  Traitement des données magnétiques
-  Rédaction du rapport

3.3 Moyens mis en place.

Toutes les prestations de diagnostic ont été exécutées par des personnels de CARDEM.

Effectif moyen du chantier		2			
Taches	Qualification	Nb	Matériel	Nb	Remarques
RESPONSABLE DE CHANTIER		Présence constante sur le chantier			Personnel habilité suivi suivant l'arrêté du 26 janvier 2006
Réalisation documents administratifs					
Rédaction des documents	Responsable CARDEM-Pyro Ingénieur Géophysicien Responsable de chantier				
Réalisation diagnostic magnétique					
Examen visuel et préparation zone de mesure	Opérateur	1	Fourgons	1	Personnel habilité suivi suivant l'arrêté du 26 janvier 2006.
Réalisation diagnostic	Responsable de chantier	1	Fourgons	1	
↳ Détection de la zone	Opérateur	1	Détecteur multi sondes	1	
↳ Analyses des données magnétiques	Géophysicien	1	GPS Spectra Promark800 Logiciel d'interprétation	1	

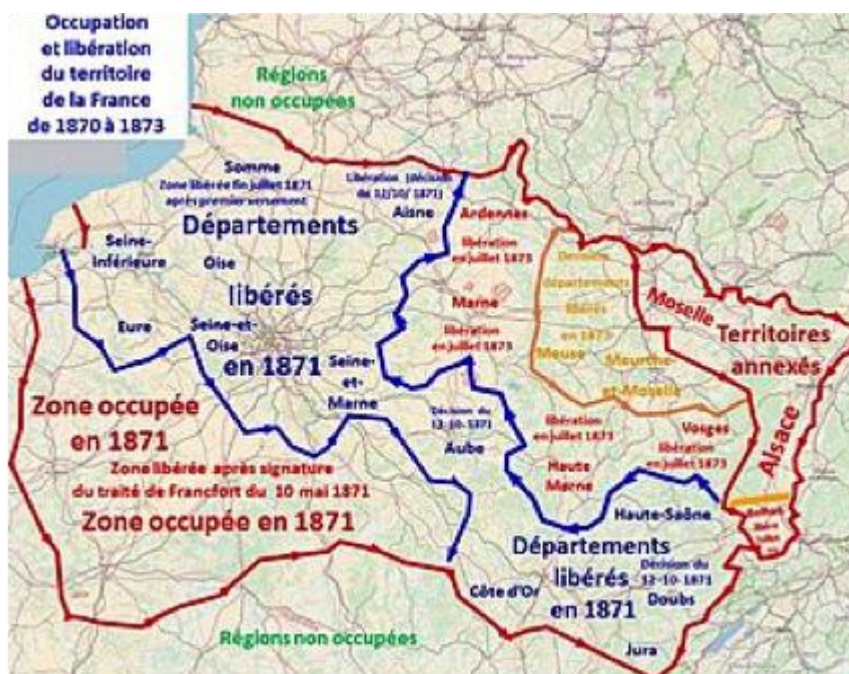


4. Etude simplifiée du risque pyrotechnique

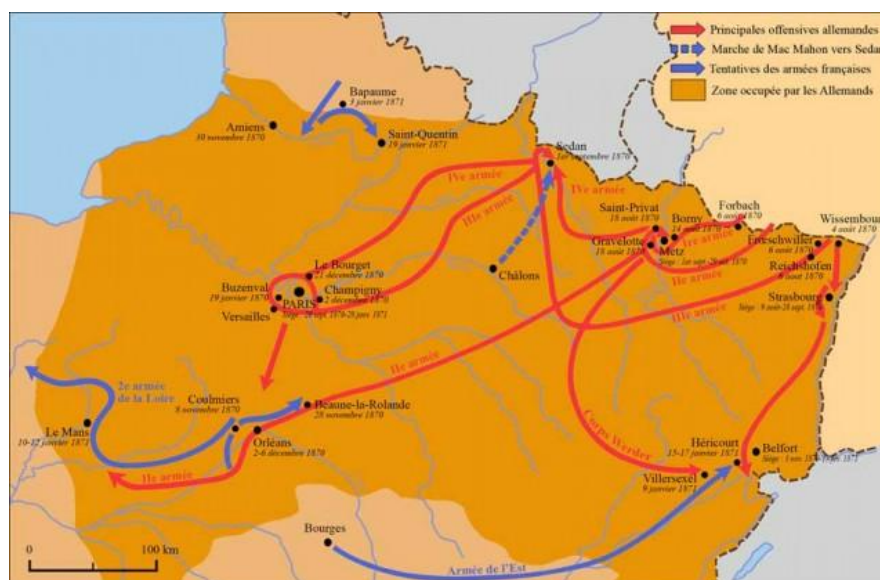
Afin d'orienter la conclusion du diagnostic vers son orientation pyrotechnique, un résumé historique a été réalisé.

4.1 Guerre de 1870

La commune est impactée par les combats de 1870.



<https://www.varaville.fr/histoire-et-patrimoine/les-grands-moments-historiques/la-querre-de-1870/>



<https://www.napoleon.org/histoire-des-2-empires/cartes/carte-des-operations-militaires-de-la-querre-de-1870-1871/>



4.2 Première guerre mondiale

La bataille d'Hulluch est une bataille qui se déroula du 27 au 29 avril 1916, opposant la 16^e division irlandaise du 19^e corps de l'armée britannique aux troupes allemandes.

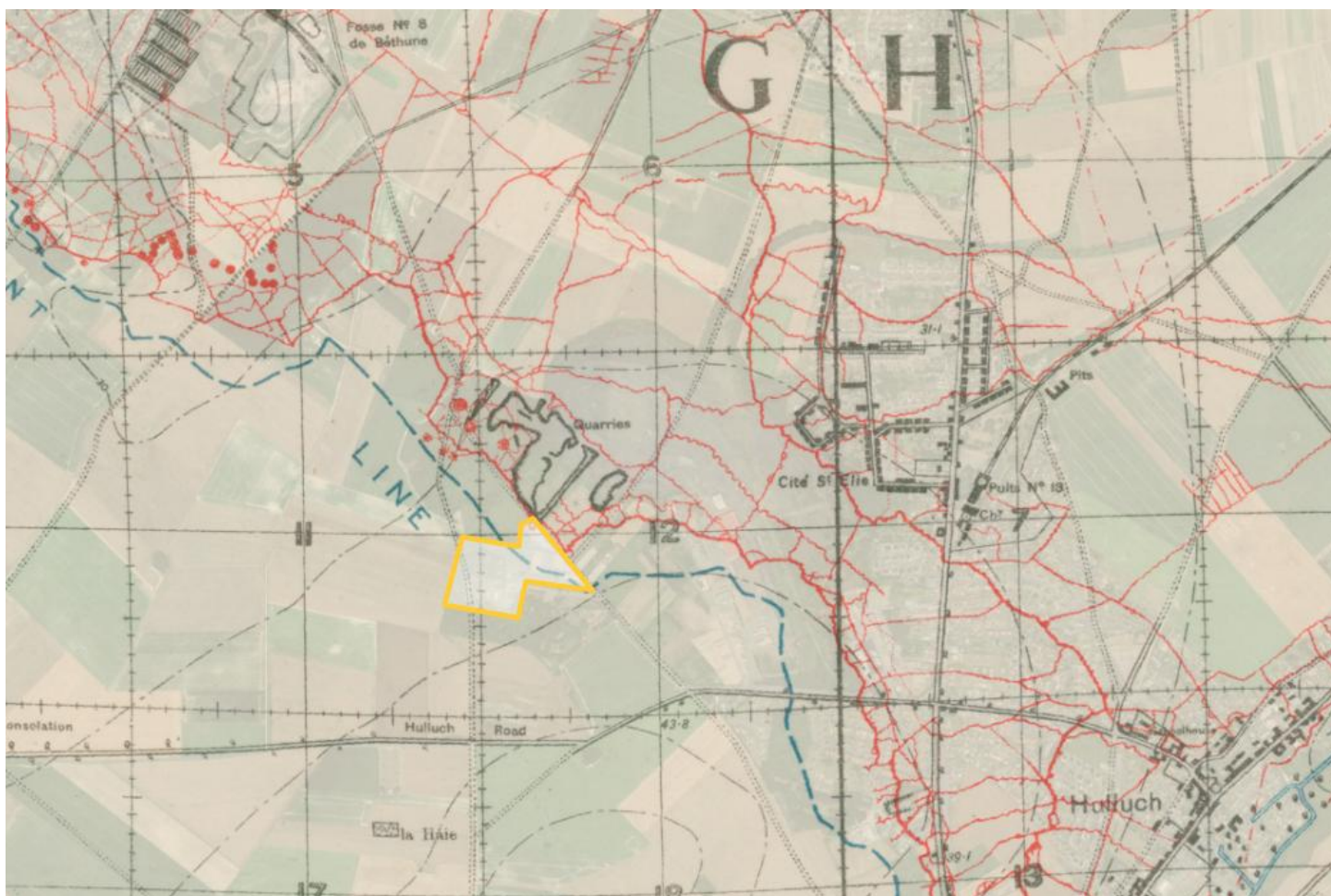
Le Royal Inniskilling Fusiliers subit, dans la nuit du 27 avril, une importante attaque au gaz près du village de Hulluch, tenu par les Allemands, à deux kilomètres au nord-est de Loos-en-Gohelle.

D'autres unités de la 16^e division, comprenant les Royal Irish Rifles, Royal Munster Fusiliers et Royal Dublin Fusiliers sont appelés pour parer l'attaque allemande.

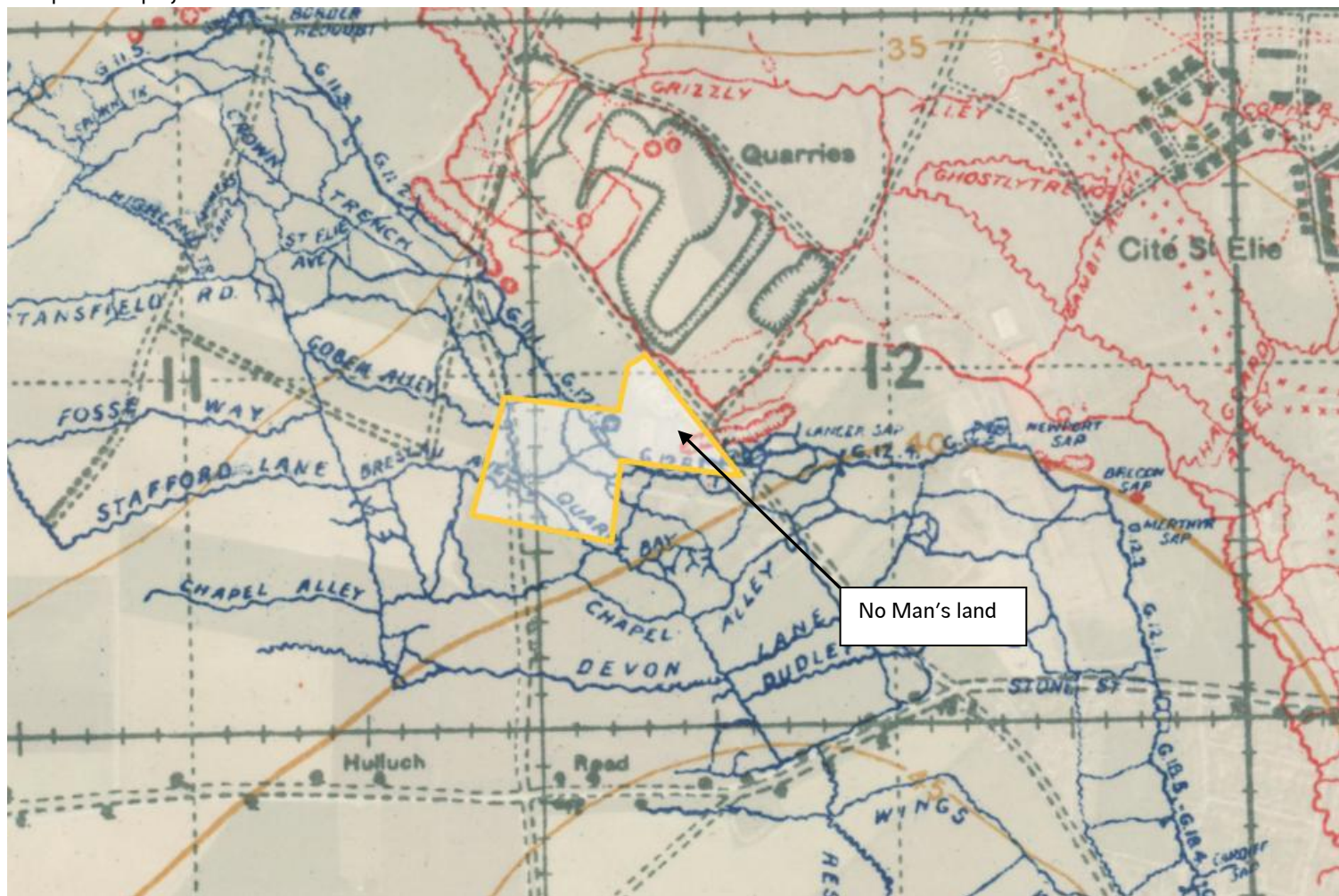
Le 29 avril, les Allemands envoient à nouveau des gaz, mais cette fois-ci le vent souffle en rabattant ceux-ci sur leurs tranchées, paralysant un grand nombre d'entre eux.

La bataille d'Hulluch est une des batailles de la Première Guerre mondiale où l'on a utilisé le plus les obus à gaz.

Voici un plan des tranchées du 12 juin 1916.



Voici une carte des tranchées du 15 novembre 1917.
Une partie du projet se trouve sur le No Man's Land.



Voici une carte des tranchées du 13 septembre 1918.
Les tranchées allemandes ont été reprises par les alliés.



Voici une photographie d'un éclat d'obus identifié sur le chantier.

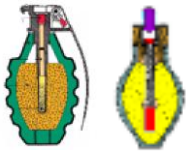
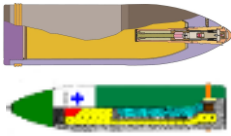
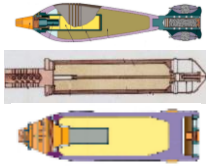
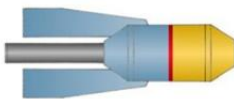
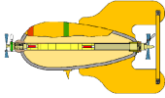


5. Compréhension diagnostic magnétique

5.1 Objets de la recherche

La méthode magnétique ne peut pas identifier formellement depuis la surface, si un objet enfoui est une munition ou pas. Cependant, parmi toutes les méthodes géophysiques existantes, elle est l'une des plus adaptées.

Voici un petit panel des familles de munitions qu'il est possible de retrouver sur les chantiers suivant les périodes de conflit.

Schéma d'une grenade I ^{re} et II ^e guerre	Schéma d'un obus d'artillerie I ^{re} et II ^e guerre	Schéma d'un obus de mortier I ^{re} et II ^e guerre	Schéma d'une bombe de tranchée I ^{re} guerre
			
			
Schéma d'une bombe d'aviation I ^{re} guerre	Schéma d'une gaine et d'une fusée d'obus I ^{re} et II ^e guerre	Schéma d'une mine II ^e guerre	Schéma d'une bombe d'aviation I ^{re} et II ^e guerre
			
			

Les photographies proviennent d'internet lors d'interventions du service de déminage, qui est la seule entité habilitée à déplacer les munitions.

Une munition historique est constituée de différents éléments :

-  Une enveloppe généralement en acier ou fonte-acierée
-  D'un système de mise de feu (fusé ou allumeur) généralement en laiton, cuivre ou différents alliages
-  D'un chargement explosif, chargement chimique ou incendiaire ou d'un chargement type Shrapnel (bille de plomb avec disque de poussé en acier)
-  D'un empennage (bombe, mortier) généralement en tôle

Tous ces éléments sont constitués d'au moins une partie ferromagnétique. Les éléments de munitions peuvent être trouvés assemblés ou séparément dans le sol.

Certains éléments, même de petite taille peuvent encore contenir de l'explosif.

Pour les terrains impactés par le conflit de 1870, seuls des munitions types grenade et obus sont susceptibles d'être retrouvées.

Pour les terrains impactés par les conflits de 14/18 et 39/45, tous les types de munitions sont susceptibles d'être retrouvés. Les munitions de chaque famille ont été fabriquées sous différents formats. Ainsi certains obus sont plus gros que des bombes et inversement.

Les schémas et photos ci-dessous sont à titre d'exemple. Les engins de guerre se déclinent sous des formes et des tailles différentes qu'ils soient complets ou partiels.

Ces éléments ferromagnétiques, suivant leurs grosseurs et leurs pourcentages d'acier, les rendent plus ou moins détectables lors de mesures magnétiques en surface. Il faut donc s'orienter vers la méthode magnétique afin d'identifier les variations de propriétés magnétiques du sous-sol (l'aimantation) lié à la présence d'objets enfouis dans le sol (on ne parlera pas de munitions).



5.2 Réalisation diagnostic magnétique

Le diagnostic se divise en trois phases : l'acquisition, le traitement et l'interprétation.

5.2.1 L'acquisition

Matériels utilisés

Le matériel est adapté à l'objectif défini à partir de l'étude historique (choix du support, espacement et hauteur des capteurs).

Appareil mesures 	 Les capteurs employés sont des capteurs de type fluxgate (Bartington, MAG-03MC). Leurs avantages sont leurs faibles poids 100g, la fréquence d'acquisition peut être élevée et le vecteur champ magnétique est mesuré (pas uniquement sa norme).
	 Une électronique permettant l'enregistrement synchronisé de huit capteurs magnétiques et des données d'une antenne GNSS est utilisée. Un ordinateur est intégré afin de visualiser en temps réels les données.
	 Lunette HMD : permet de voir les données en temps réels et optimiser l'acquisition des données.
GPS 	 L'électronique (système d'acquisition) est reliée à une antenne de géolocalisation par satellite : le ProMark800 de la marque Spectra. Contrairement à la plupart des antennes GNSS (<i>global navigation satellite system</i>) du marché, le ProMark800 n'utilise pas seulement les satellites du système GPS (32 satellites mis en place par les Etats-Unis) mais aussi ceux du système GLONASS (23 satellites mis en place par la Russie) et du système GALILEO (4 satellites pour le moment, en cours de mise en place par l'Europe). La multitude des satellites utilisés (59 en tout), permet à l'antenne de calculer une position même dans de mauvaises conditions (présence d'obstacles comme des arbres ou des bâtiments obstruant l'accès à une partie de la constellation de satellites). https://spectrageospatial.com/category/produit/carnets-de-terrain/?lang=fr
CORRECTION GNSS 	TERIA est un service de géolocalisation par satellites de précision. Le positionnement GNSS permet de se positionner avec une précision métrique au niveau global. Notre service vient corriger ces signaux pour permettre au récepteur GNSS de fournir un positionnement de précision centimétrique en quelques secondes en utilisant les techniques RTK et N-RTK. Pour cela nous nous appuyons sur des standards tel que le protocole NTRIP pour l'échange des données et le format RTCM pour la diffusion des corrections. https://www.reseau-teria.com/ http://reseau-orpheon.fr/
NOTA : Les appareils de détection ne constituent aucun danger potentiel vis-à-vis des munitions recherchées. En effet, ces appareils magnétométriques, à système passif, n'exercent aucune influence sur des munitions dont les technologies ne relèvent aucune présence de capteurs électroniques.	

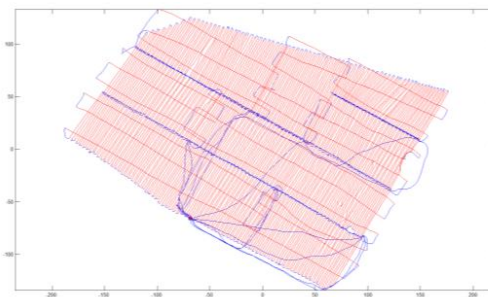


Afin de faciliter l'acquisition et la vérification du bon déroulement de la mesure, une application Matlab a été élaborée avec l'IPGS permettant la visualisation des données en temps réel dans une lunette HMD (Head-Mounted Display).

Procédures

Lors de mesures sur le terrain, les étapes sont toujours les mêmes quel que soit le support d'acquisition, elles sont au nombre de trois :

- **Les étalonnages** ; Les capteurs ne sont pas absolus, ils nécessitent donc une correction. De plus, l'utilisation d'un capteur vectoriel apporte la possibilité de compenser l'effet magnétique du support (Munsch et al., 2007). Par compensation, on entend la correction des effets liés à la présence d'objets aimantés perturbant les mesures telles que la visserie, les prises des câbles, les batteries... Les étalonnages sont faits en début et en fin d'acquisition. Il faut faire attention que la zone choisie pour l'étalonnage soit dépourvue d'anomalie magnétique.
- **Les profils** ; L'étape de réalisation des profils est relativement simple. L'opérateur marche le long de lignes espacées de n mètres. Le facteur n est lié au nombre de capteurs présents sur la perche, s'il y en a 4 espacés de 50 cm $n=2$ m, s'il y en a 8 $n=4$ m. Pour suivre les profils, l'opérateur utilise la lunette HMD, qui lui montre la localisation des profils théoriques et la route qu'il suit.
- **Les traverses** ; Les traverses sont des enregistrements perpendiculaires aux profils, dont l'espacement est de trois à cinq fois supérieur à celui des profils. Elles sont acquises pour étudier des différences de l'intensité du champ magnétique aux points de croisement.

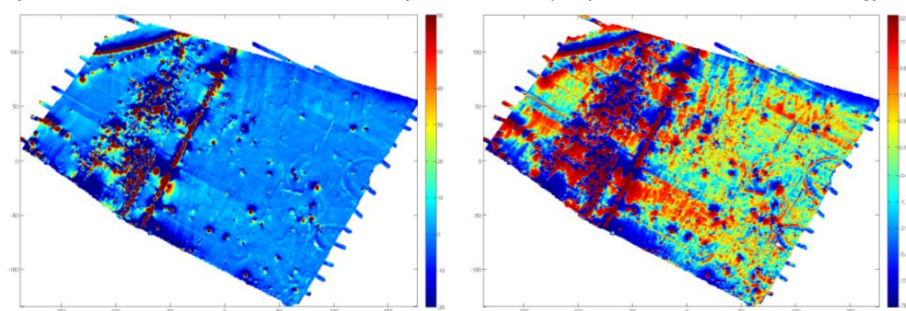


Localisation des données acquises sur un terrain. La surface couverte était de 54 641 m², soit une distance parcourue de 36 km. Les lignes rouges correspondent aux données conservées pour calculer une carte.

Il est également possible d'enregistrer les variations temporelles du champ magnétique, afin de soustraire au signal de mesure, la partie liée aux variations temporelles de l'intensité du champ magnétique.

5.2.2 Le traitement

Une fois les données acquises, elles ne sont pas tout de suite interprétables, il faut effectuer certaines corrections que l'on peut diviser en quatre étapes : la localisation des données magnétiques, l'étalonnage et la compensation, autres corrections (exemple : correction temporelle) et on termine par le calcul de la grille. Les traitements sont effectués à l'aide du logiciel *Applimag* utilisé en collaboration avec l'IPGS (Institut de Physique du Globe de Strasbourg).



Ces deux cartes représentent l'intensité de l'anomalie magnétique. La carte de gauche est en représentation classique. La carte de droite est en équi-population, c'est-à-dire que chaque couleur de la palette occupe sur l'image la même surface. Cette représentation permet de donner plus de poids aux anomalies de faible amplitude. L'axe des abscisses s'étend de -200 m à 200 m et l'axe des ordonnées de -150 m à 130 m. L'unité de l'échelle de couleur s'exprime en nT (10^{-9} Tesla).



5.2.3 L'interprétation

Une fois la carte de l'intensité de l'anomalie magnétique obtenue, vient la phase d'interprétation de cette carte. Quelles sont les propriétés (localisation, géométrie et aimantation) des sources à l'origine des anomalies magnétiques mesurées ? Dans le cas de chantiers à objectif pyrotechnique la stratégie abordée est l'utilisation de l'opérateur de signal analytique (Nabighian, 1972 ; Roest et al., 1992) (ou gradient total) défini par l'équation :

$$SA_{vec} = \sqrt{\left(\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z}\right)^2}$$

Avec T l'intensité de l'anomalie magnétique, $\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial x}$ la dérivée dans la direction nord-sud, $\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial y}$ la dérivée dans la direction est-ouest et $\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z}$ la dérivée verticale.

Pour effectuer cette transformation, nous passons dans le domaine spectral afin de calculer les trois dérivées spatiales. L'avantage est de localiser les maxima du signal analytique à l'aplomb des sources (Salem et al. 2002 ; Nodot, 2014).

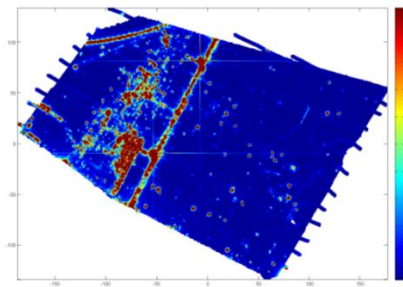


Figure 3 : Carte du signal analytique. Cette carte est seuillée à 50 nT/m.

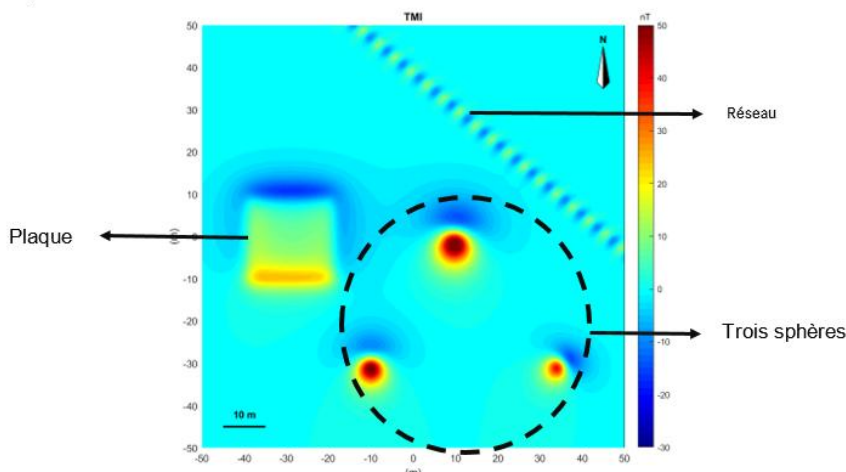
La dernière phase consiste à l'inversion des données afin d'obtenir les informations sur la localisation et sur l'aimantation des sources présentes dans le sous-sol. L'inversion consiste à calculer les quatre paramètres permettant de minimiser l'écart entre le signal analytique obtenu pour une source dipolaire et celui résultant des données. Les quatre paramètres sont la localisation (3) et l'intensité du vecteur aimantation (1).

Pour quantifier et localiser chaque anomalie, un opérateur effectue de façon manuelle ce que l'on appelle un pointé. Sur la carte de signal analytique, il pointe un maximum et dans un rayon a priori fixé (3 m, par défaut) les données de la grille sont utilisées pour l'inversion. Le modèle utilisé est une sphère dont l'aimantation et le champ magnétique sont verticaux (Nodot, 2014, Munsch et al., 2007). Les quatre paramètres obtenus sont la localisation (3) et l'intensité du moment magnétique (1). Par intensité du moment magnétique, on entend l'intensité de l'aimantation multipliée par le volume de la sphère.



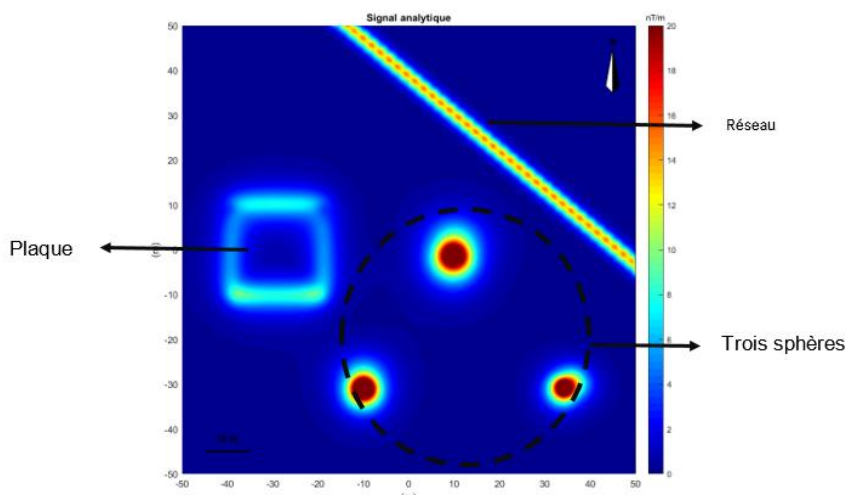
5.3 Petit rappel sur le décryptage des cartographies magnétiques :

L'image suivante montre une carte de l'intensité de l'anomalie pour un modèle constitué de cinq sources : une plaque, trois sphères et un réseau.



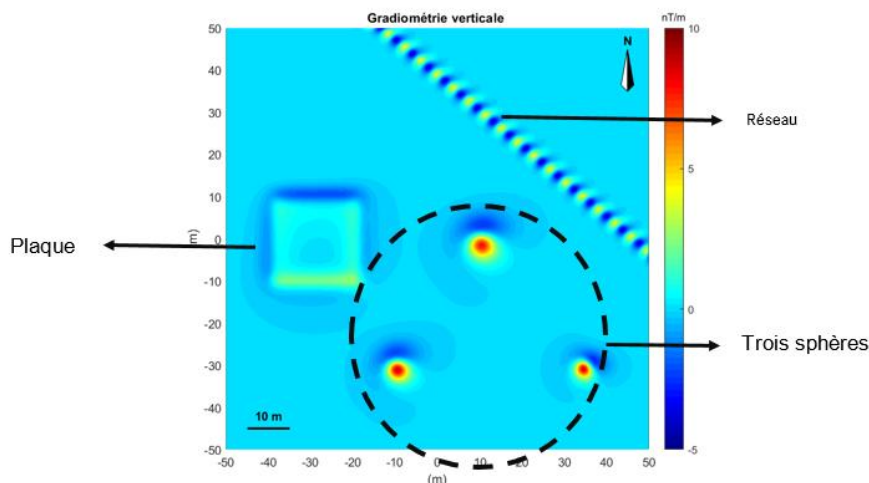
Carte de l'intensité de l'anomalie magnétique pour trois sphères, une plaque et un réseau.

Une anomalie magnétique va être constituée d'une partie positive et d'une partie négative. L'objet à l'origine de l'anomalie va se trouver entre les deux lobes. Sur les trois sphères, on constate un changement d'orientation entre les parties négatives (en bleue) et les parties positives (en rouge), ceci est liée à des propriétés magnétiques différentes (notion d'aimantation induite et rémanente).



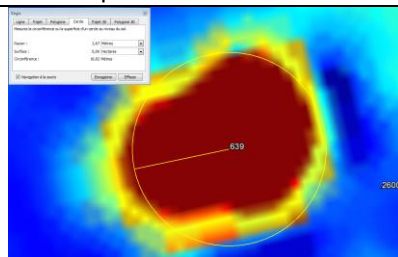
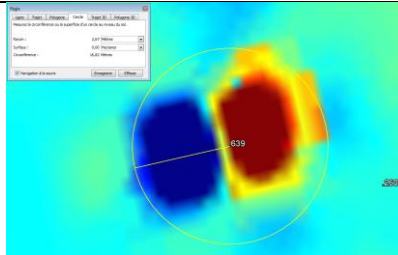
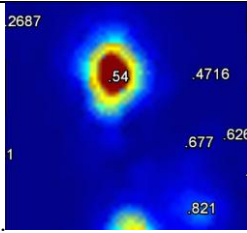
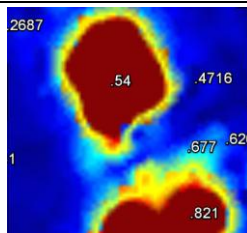
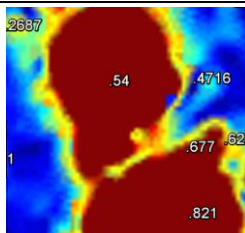
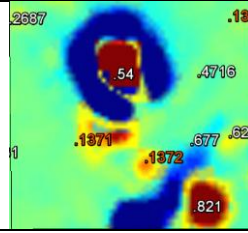
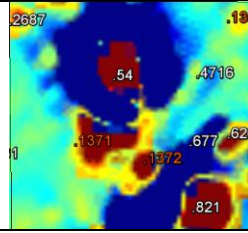
Carte de l'intensité du signal analytique pour trois sphères, une plaque et un réseau.

Pour aider à l'interprétation, il est possible d'effectuer d'autres transformées de carte. Par exemple, la carte suivante est une carte de gradiométrie verticale (espacement de 50 cm). Cette transformée permet de mieux caractériser les géométries des sources.



Carte de gradiométrie verticale pour trois sphères, une plaque et un réseau.



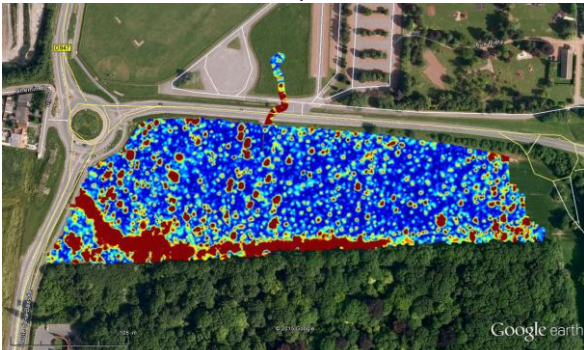
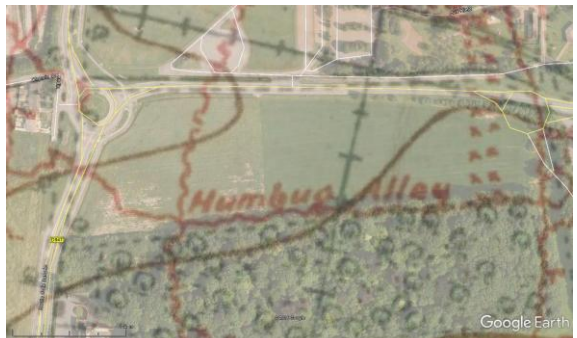
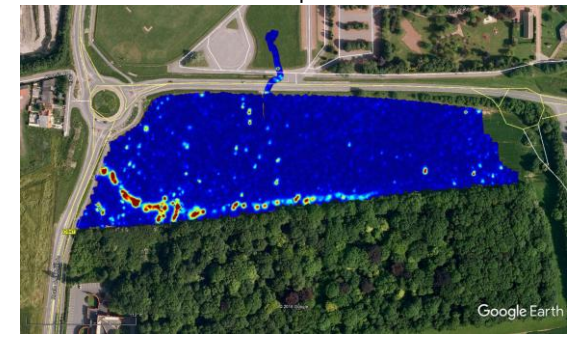
Par exemple voici les cartes de signal analytique et de gradiométrie pour une même anomalie		
Signal analytique seuillée à 10 Nanotesla par mètre.		
Le signal analytique permet de calculer par inversion les quatre paramètres de l'anomalie (la localisation et l'intensité du vecteur aimantation).		
Signal gradiométrie -5/+10 Nanotesla par mètre		
Par rapport à la carte de l'intensité de l'anomalie magnétique, la gradiométrie va permettre de mieux caractériser les objets.		
Ci-contre la même anomalie où seule la position GNSS (centimétrique) est prise en compte. La comparaison des trois représentations permet de se rendre compte que les limites physiques de l'anomalie ne se résument pas à sa seule coordonnée GNSS. Ici l'anomalie a un rayon de 2,67 mètres. Ce rayon n'est pas applicable à toutes les anomalies. De plus, la coordonnée GNSS ne se trouve pas forcément au centre exact de l'anomalie magnétique détectée.		
Pour comprendre les différents seuilles de résolution voici la même anomalie représenté en signal analytique à :		
200 nanotesla par mètre	20 nanotesla par mètre	5 nanotesla par mètre
		
Au fur et à mesure de la décroissance de résolution de l'échelle, l'anomalie n°54 prend visuellement plus de surface sur la carte.		
Voici la même anomalie représentée en signal gradiométrie à :		
-10/+10 nanotesla	-2/+2nanotesla	
		
Sur les cartes de gradiométrie de nouvelles anomalies sont visible (pointées en orange).		

Afin de visualiser plus précisément les cartographies présentées dans ce diagnostic, nous vous invitons à visionner celle-ci sur Google Earth à l'aide du fichier. Kml.

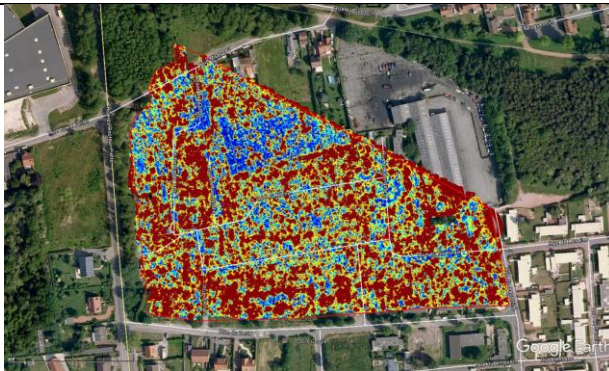
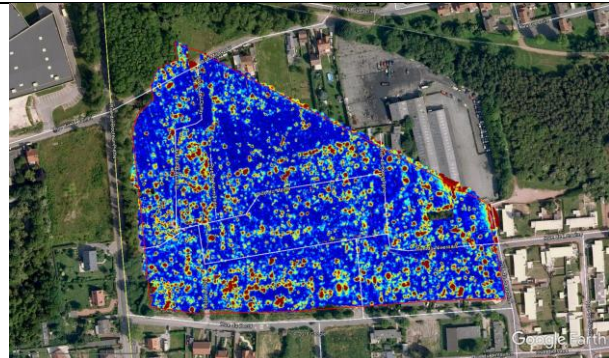


Voici des exemples de résultats de diagnostics magnétiques.

Premier exemple de diagnostic magnétique d'un terrain (champ de culture) sur une zone de combat première guerre mondiale (partie non man's land)

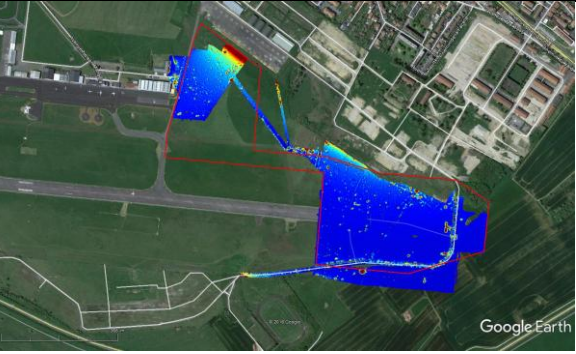
Etat du terrain 	Cartographie magnétique du signal analytique seuillée à 20 Nanotesla par mètre 
Carte de tranchée de 1917 	Cartographie magnétique du signal analytique seuillée à 200 Nanotesla par mètre 
Cet exemple permet de visualiser la pollution magnétique très importante (carte des anomalies à partir de 20 Nt/m) en incluant une tranchée	

Second exemple de diagnostic magnétique sur un terrain (zone urbaine après démolition) sur une zone de combat première guerre mondiale.

Etat du terrain avant démolition 	Cartographie magnétique du signal analytique seuillée à 50 Nanotesla par mètre 
Etat du terrain avant diagnostic 	Cartographie magnétique du signal analytique seuillée à 200 Nanotesla par mètre 

Cet exemple montre parfaitement un terrain pollué magnétiquement par l'opération de démolition et la présence de vestiges d'infrastructure diverses. Il est impossible de déceler une quelconque pollution potentielle pyrotechnique

Troisième exemple de diagnostic magnétique d'un terrain (ex-aérodrome) sur une zone de bombardement seconde guerre mondiale

Etat du terrain	Cartographie magnétique du signal analytique seuillée à 50 Nanotesla par mètre
	
Photo aérienne 1944	Cartographie magnétique du signal analytique seuillée à 200 Nanotesla par mètre
	

Cet exemple permet de visualiser une pollution magnétique sortie du conflit. Il est possible de visualiser toutes les anomalies magnétiques.



6. Environnement magnétique

Le terrain présente de nombreux éléments ferromagnétiques susceptibles de perturber les mesures magnétiques et également des obstacles empêchant la progression.

Voici les photographies d'une partie de ces éléments.





En raison de la présence de tous ces éléments, le présent diagnostic ne serait être exhaustif vis-à-vis de la pollution magnétique réellement présente dans le sous-sol.



7. Résultats du diagnostic magnétique

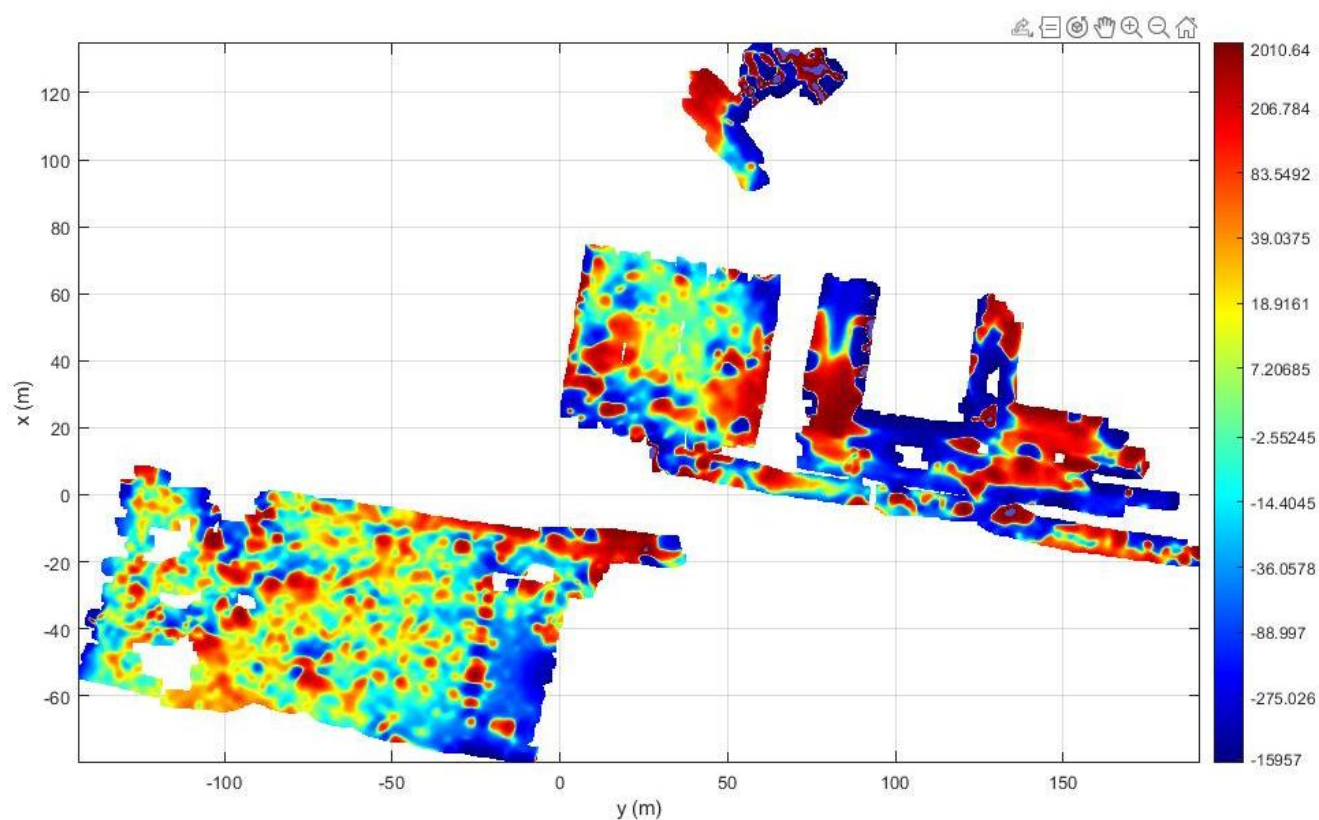
7.1 Représentation des profils de mesure effectués sur le terrain

Voici la localisation des profils de mesures réalisés par l'opérateur.

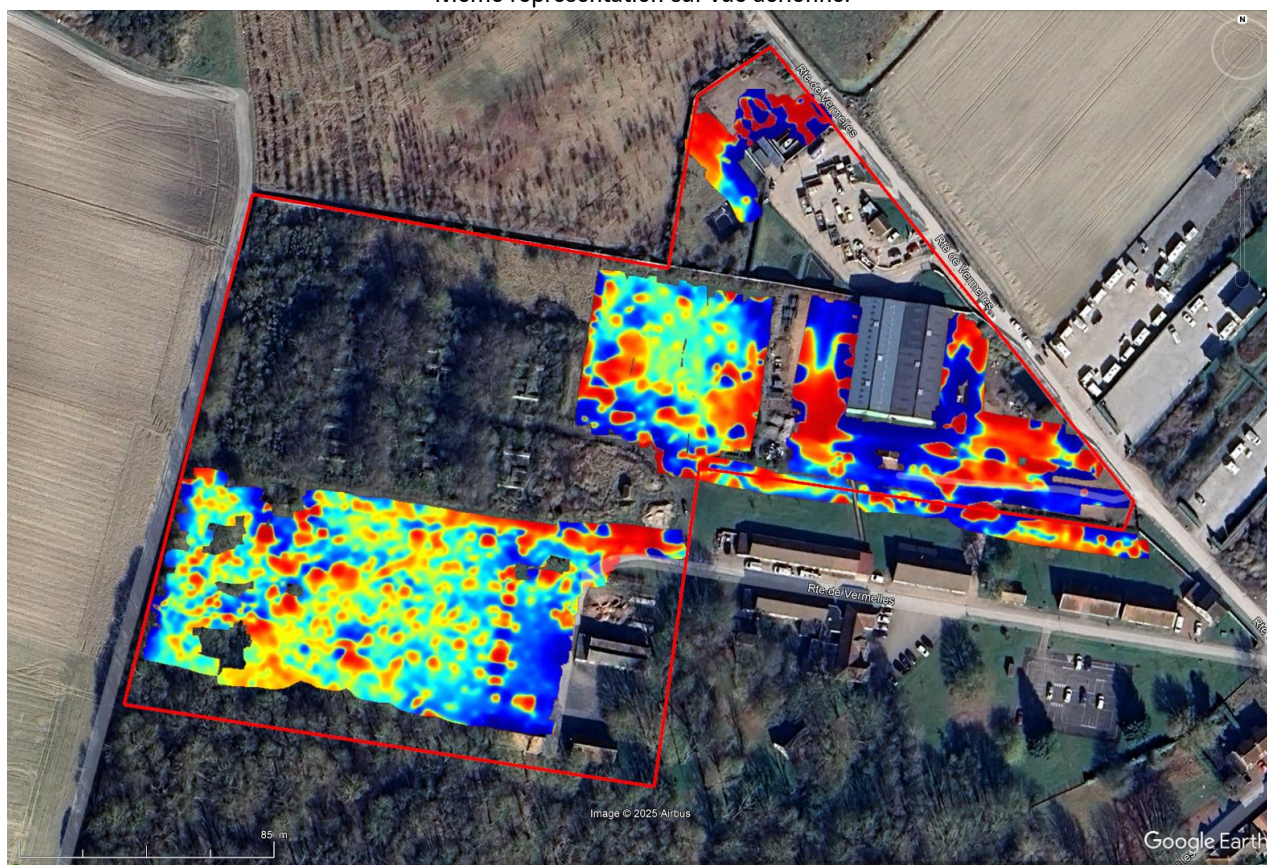


7.2 Cartographies de l'intensité de l'anomalie magnétique (TMI).

Représentation en équi-population, c'est-à-dire que chaque couleur de la palette occupe sur l'image la même surface.

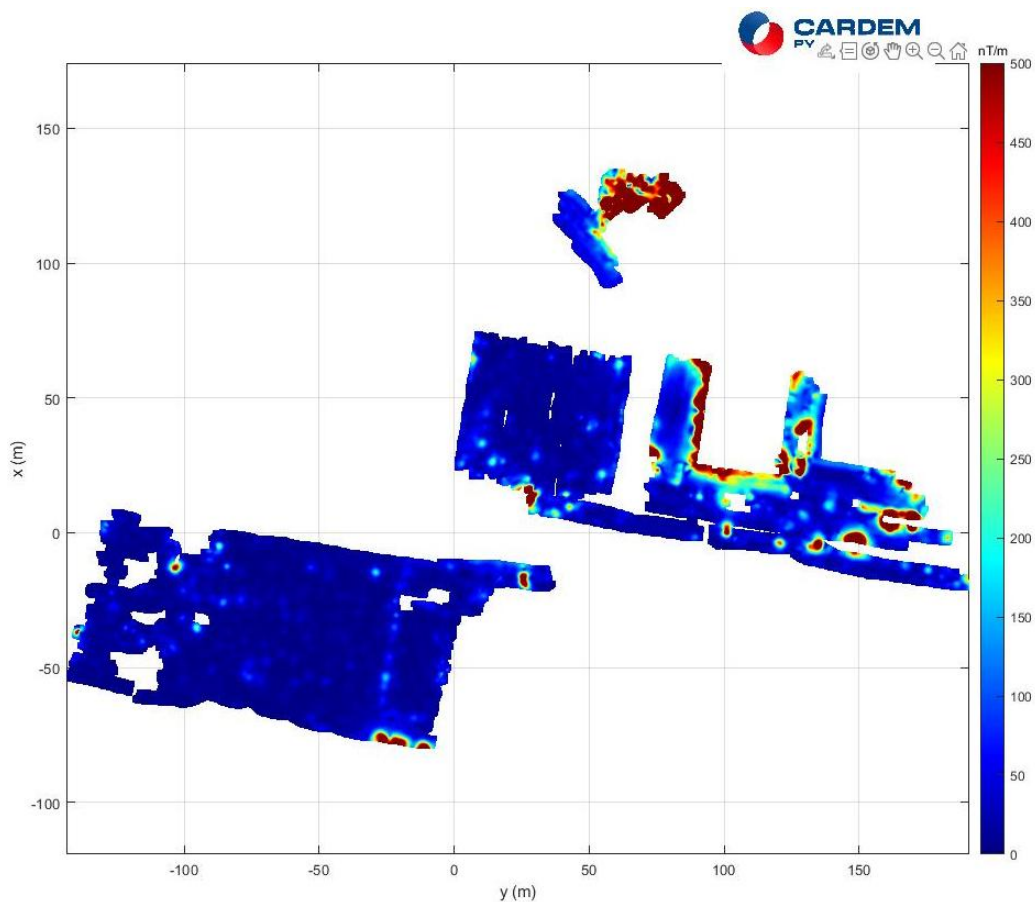


Même représentation sur vue aérienne.



7.3 Représentations de l'intensité du signal analytique à différente échelle.

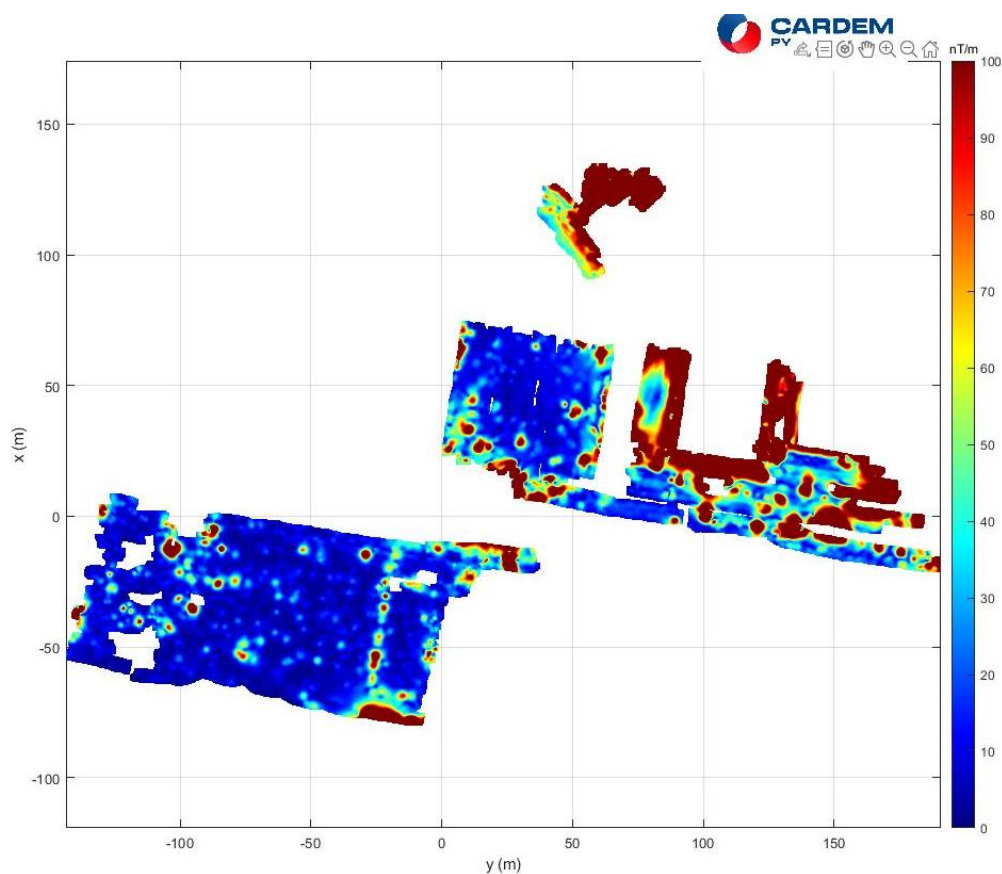
 Voici les cartographies magnétiques du signal analytique seuillée à 500 nanotesla par mètre.



Même représentation sur vue aérienne.



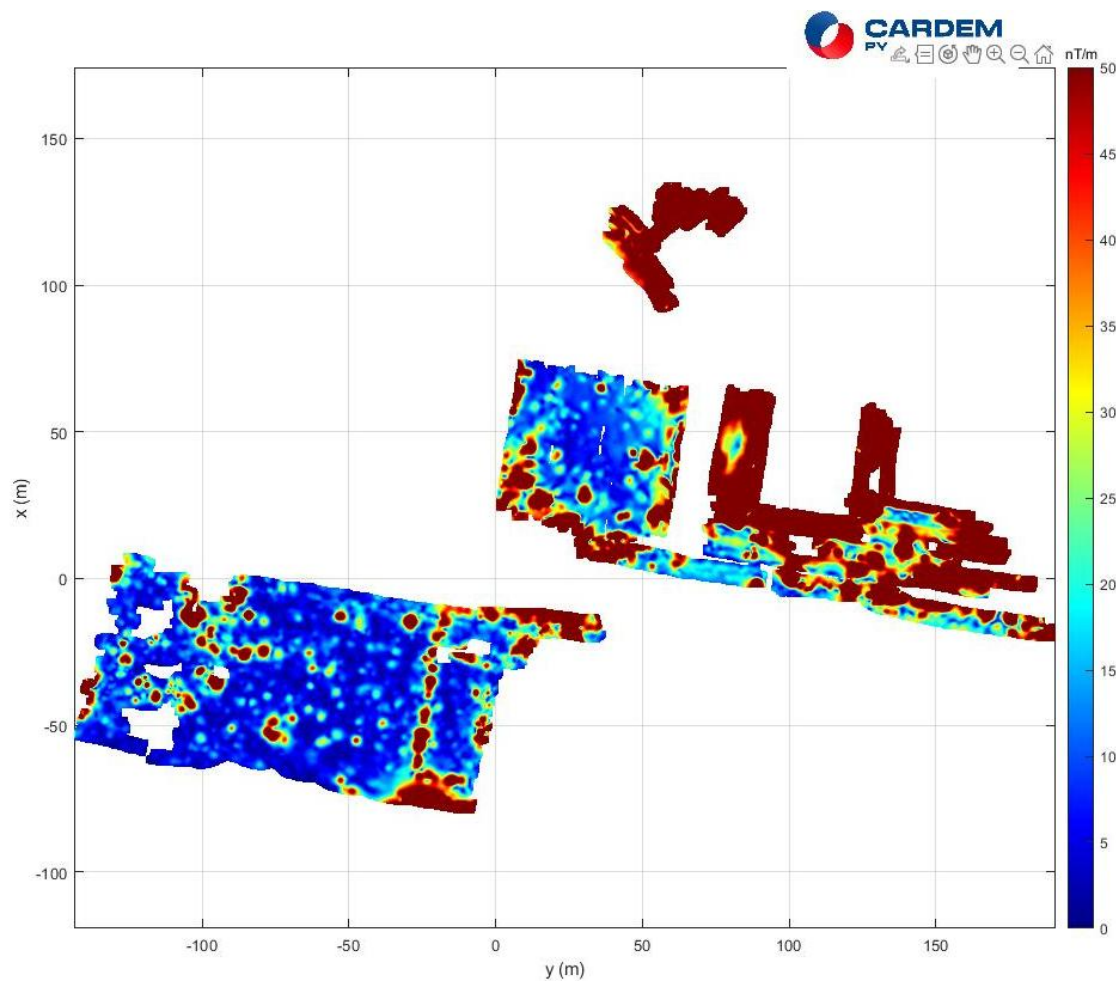
Voici les cartographies magnétiques du signal analytique seuillée à 100 nanotesla par mètre.



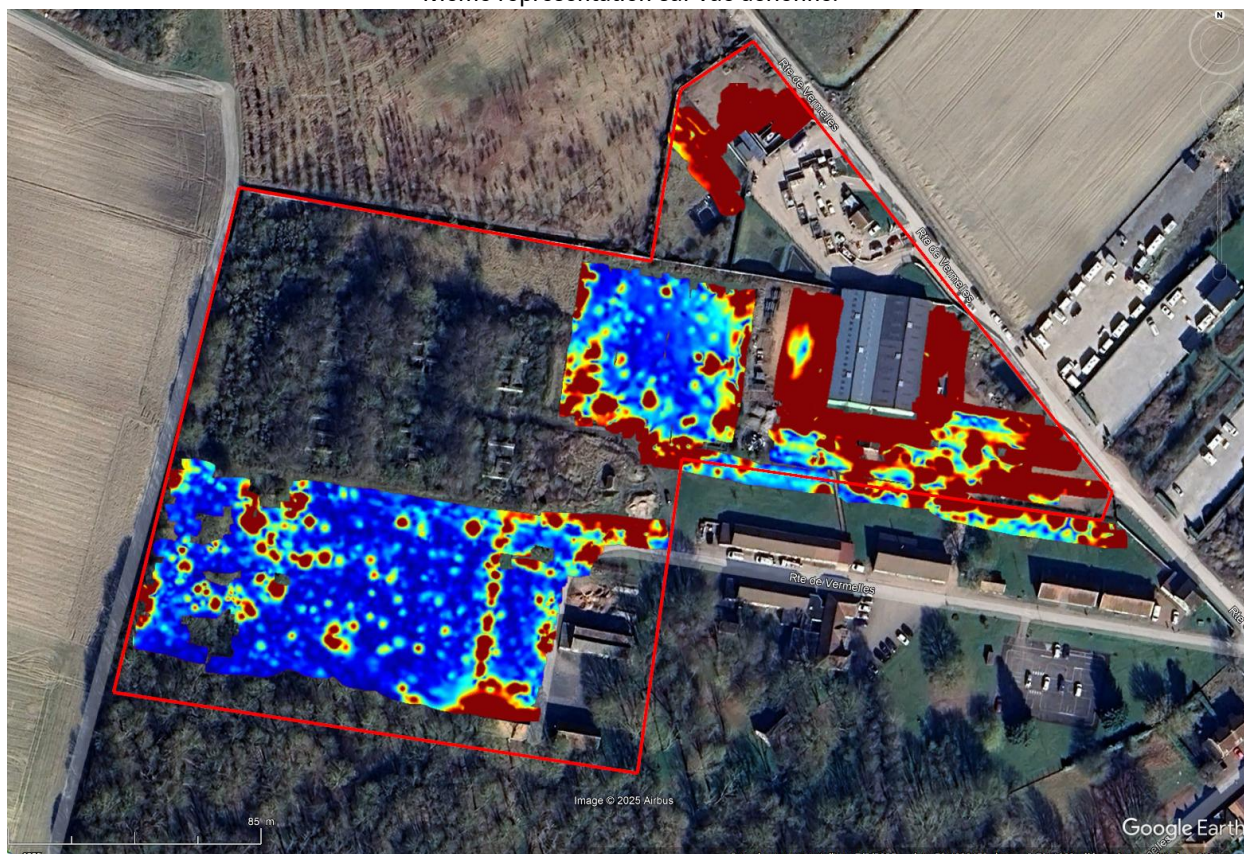
Même représentation sur vue aérienne.



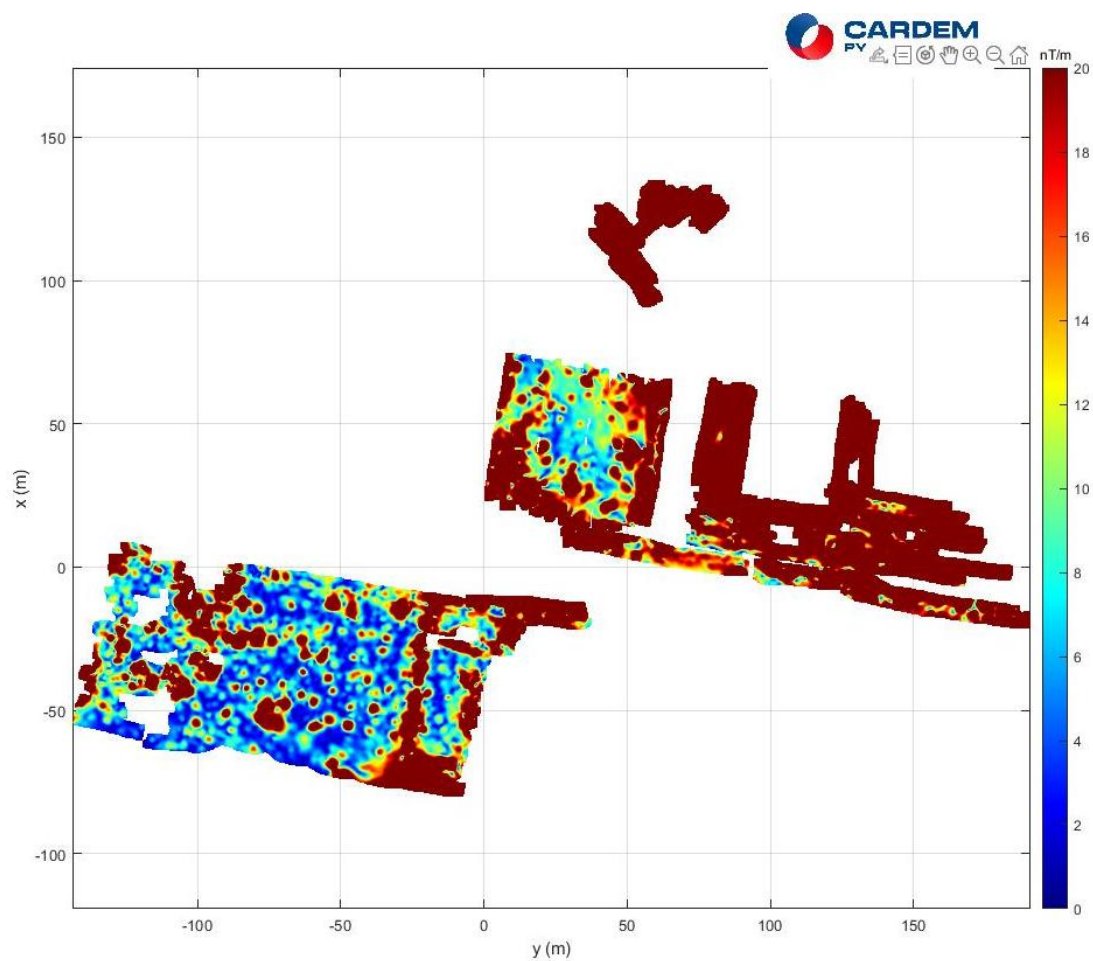
Voici les cartographies magnétiques du signal analytique seuillée à 50 nanotesla par mètre.



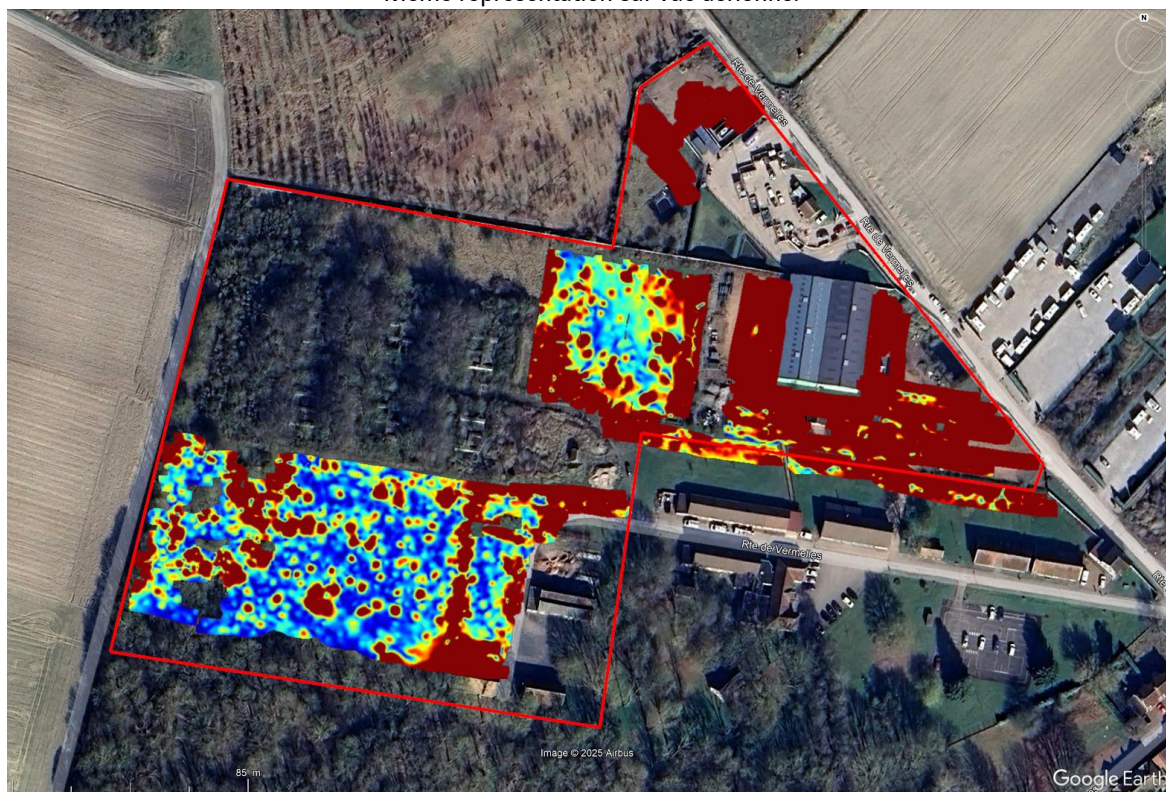
Même représentation sur vue aérienne.



 Voici les cartographies magnétiques du signal analytique seuillée à 20 nanotesla par mètre.

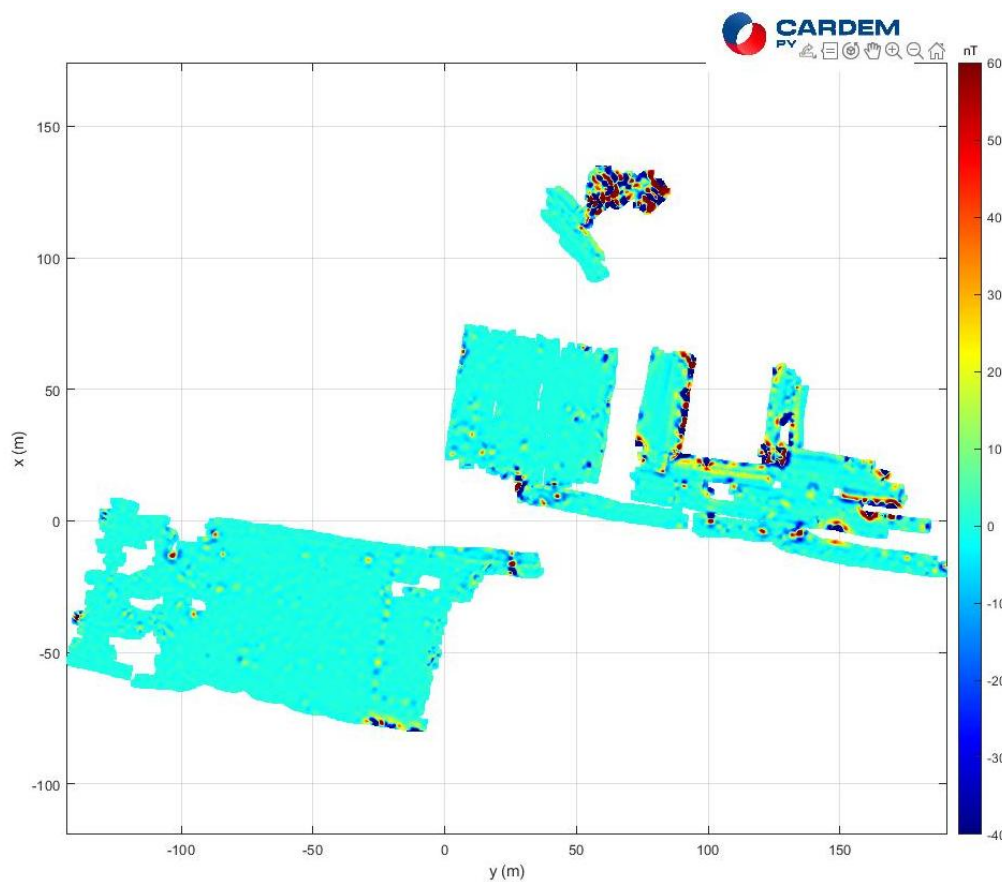


Même représentation sur vue aérienne.



7.4 Représentations signal en gradiométrie verticale à différente échelle.

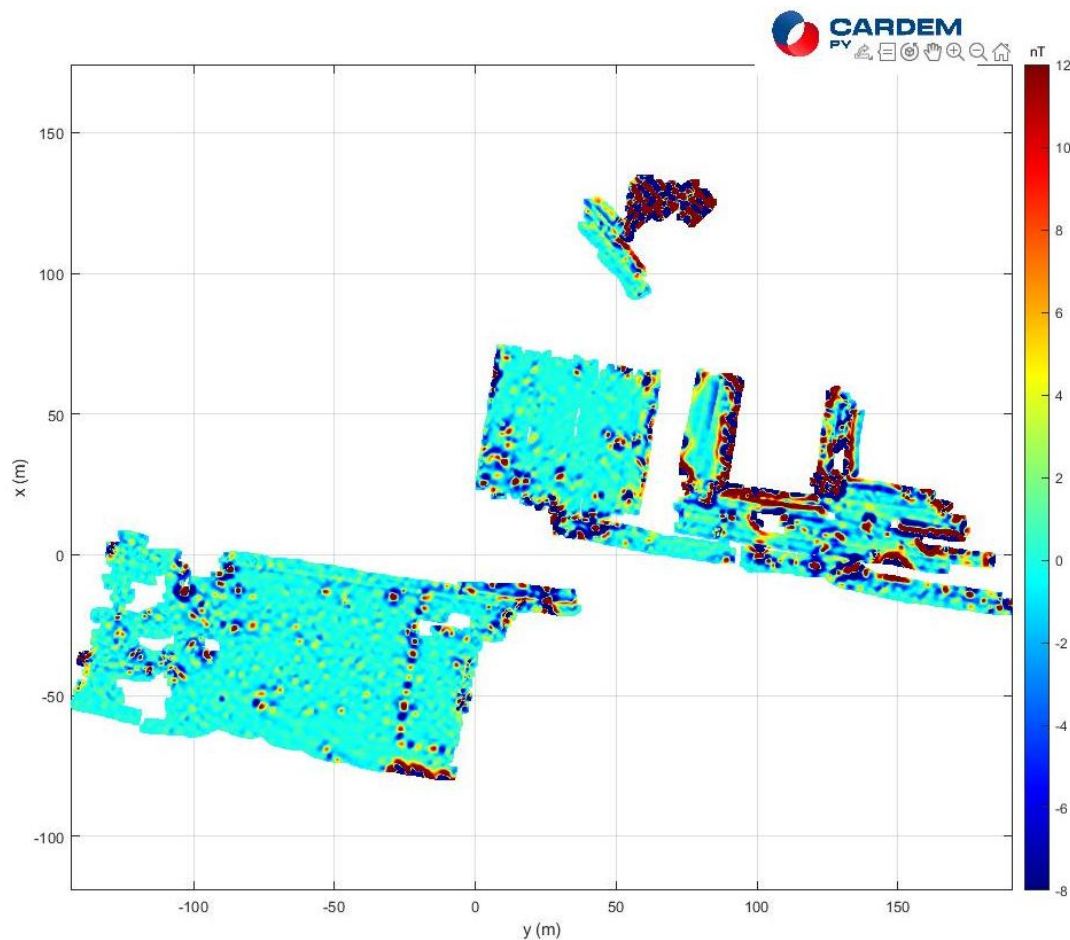
 Cartographie magnétique du signal gradiométrie verticale seuillée à -40/+60 nanotesla.



Même représentation sur vue aérienne.



 Cartographie magnétique du signal gradiométrie verticale seuillée à $-8/+12$ nanotesla.



Même représentation sur vue aérienne.



8. Analyse diagnostic magnétique

Le risque pyrotechnique étant identifié de la première guerre, il faut pouvoir détecter les plus petites anomalies magnétiques. De ce fait nous devons descendre la résolution des cartographies au plus bas possible.

Voici donc une carte du signal analytique seuillée à 10 puis à 5 nanotesla par mètre.



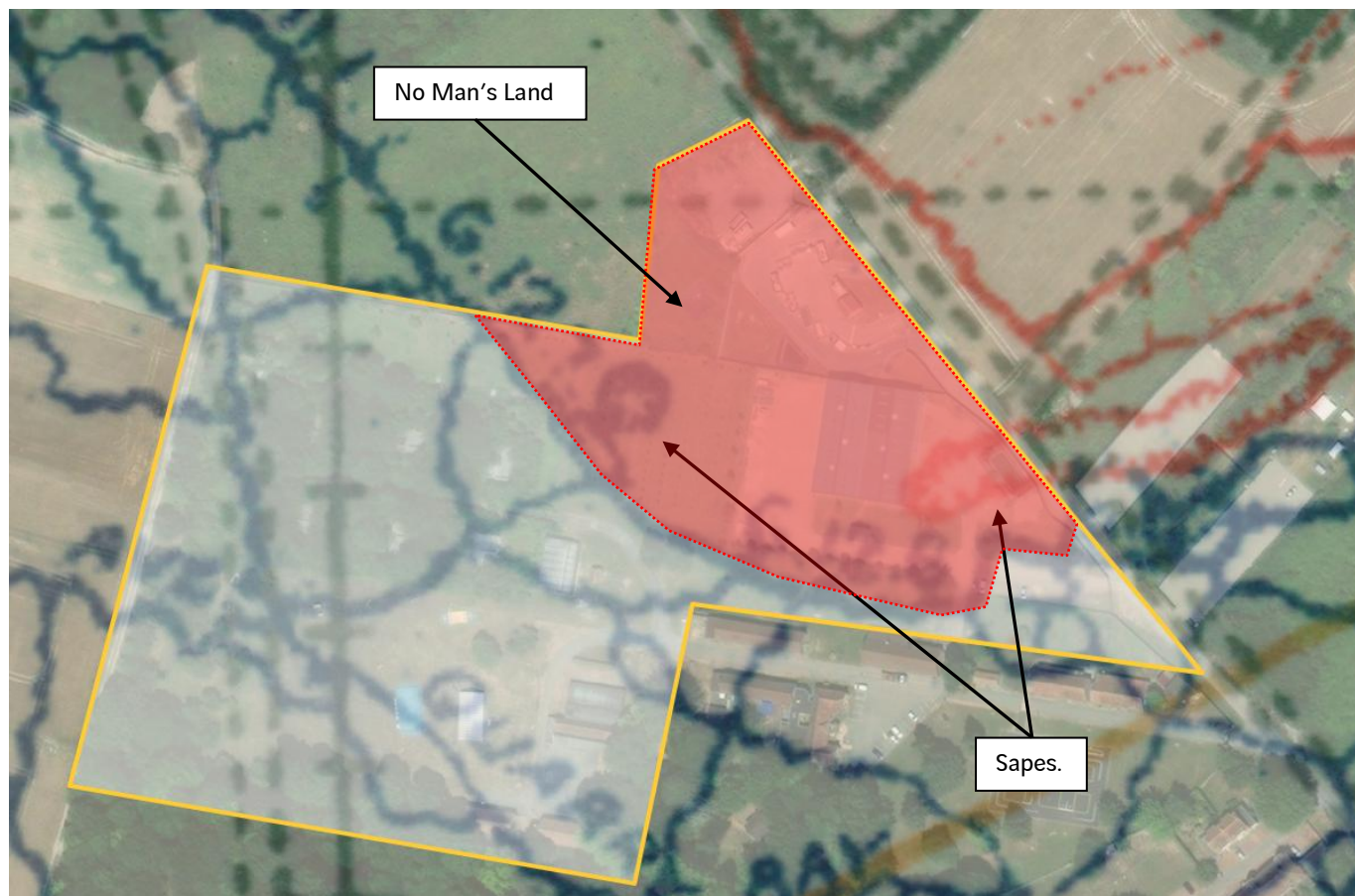
A ces seuils, les cartes sont complètement saturées magnétiquement et il est impossible de trouver et de pointer des anomalies isolées.



9. Conclusion diagnostic magnétique

Les recherches historiques menées mettent clairement en évidence que le sous-sol du projet est susceptible de contenir des vestiges du premier conflit.

Il faut également prendre en compte que toute la partie Est du terrain se trouve à l'aplomb du " No Man's Land". De plus, des "Sapes" sont visibles.



PRECONISATIONS

Au vu des résultats, du passé historique du terrain et prenant en compte la réglementation (code de sécurité intérieur), il est préconisé que chaque intrusion soit précédée d'une détection magnétique.

Dans l'éventualité de travaux de retrait des fondations, il est fortement préconisé de prévoir une assistance pyrotechnique.

Les travaux d'assistance doivent être réalisés par un technicien spécialisé en dépollution pyrotechnique, idéalement qualifié par un titre professionnel.

Une dépollution pyrotechnique du terrain est à envisager, avec tous autres travaux.

Le mode opératoire serait le suivant :

- ✓ Rédaction d'une analyse de sécurité avec transmission au service de déminage compétent,
- ✓ Mise en place d'équipes pyrotechnique qualifié par titre professionnel pour la sécurisation du projet :
 - Détection manuelle du terrain,
 - Mise au jour des anomalies,
 - Mise en sécurité en cas de mise au jour d'engins de guerre (suivant les consignes du déminage),
 - Contrôle de l'absence d'autres anomalies ou de munitions après retrait,
 - Remise en état du terrain.

