

Rapport de stage - Master G² - Géophysique/Géotechnique

Etude de la corona des arènes de Senlis

Responsable de stage
M. Olivier LOEFFLER
Docteur-Ingénieur géophysicien
INNOGEO

AYARI Alexandre
Sorbonne Université
Master I Géophysique/Géotechnique

Table des matières

Résumé	2
Remerciements	2
Introduction	3
Présentation du site	3
Localisation du site	3
Contexte géologique	4
Quaternaire et formations superficielles	5
La <i>Corona</i>	6
Mesures et interprétations	7
Notions fondamentales	7
Le champ magnétique terrestre	7
Propriété magnétique	8
Champ d'anomalie	9
Magnétomètre à saturation	9
Domaines d'application	10
Présentation du magnétomètre	10
Implémentation dans la zone	11
Conception de la prestation	11
Interprétation des cartes magnétiques	12
Terrain prospecté	12
Zone théorique de la <i>corona</i>	12
Grands axes et couloir des arènes	15
Discussion	18
Conclusion	19
Bibliographie	20
Table des illustrations	21
Annexes	22

Résumé

Les méthodes géophysiques non-destructives permettent d'obtenir une caractéristique précise du sous-sol de manière plus efficace et rentable que les sondages et ou échantillonnages traditionnels. La prospection magnétique est utilisée depuis des décennies pour l'archéologie et la détection d'objet enterré en raison de sa précision, sa rapidité de déploiement et d'exécution. Une étude magnétique consiste à réaliser des mesures relatives au champ magnétique terrestre. Elle est sensible aux contrastes de susceptibilité magnétique présente entre les matériaux.

Dans cette étude, nous appliquerons cette méthode géophysique à la détection du mur périphérique Est des arènes de Senlis. Située au Sud-Ouest de la ville de Senlis, les arènes de Senlis furent achevées au milieu du Ier Siècle ap.J-C sous occupation romaine. Pillées puis abandonnées, ce n'est qu'en 1865 qu'elles seront remises au goût du jour. L'étude portera également sur les axes N-S et E-W des arènes dans le but de mettre en évidence des vestiges archéologiques. La prospection magnétique a été interprétée à l'aide du logiciel d'inversion Magneto 3.0 (Sensys) et permet de mettre en évidence de fort contraste entre les secteurs d'étude. D'une part, les zones susceptibles de contenir la *corona* ne permettent pas d'observer de manière claire et distinguée le mur périphérique, cependant, elles ont le mérite d'orienter de future prospection notamment électrique, dans la zone. D'autre part, on note la présence potentielle d'objet à l'entrée du *Vestibule Est* ainsi que du remaniement effectué dans l'*arena*.

Mots-clés : Géophysique, susceptibilité magnétique, champ magnétique terrestre, magnétomètre, archéologie, arènes, Senlis, antique

Remerciements

Je tiens à remercier mon responsable de stage Oliver Loeffler, pour sa grande aide et sa gentillesse. Il m'a permis d'acquérir des connaissances inestimables ainsi que de consolider mes bases théoriques et pratiques lors des acquisitions. Je tiens également à remercier la société INNOGEO qui, de bonne volonté, a veillé à la bonne tenue de ce stage. Ce stage a été une excellente expérience personnelle et professionnelle.

Je remercie également Quentin Waltersperger, ingénieur en géophysique, qui m'a appris énormément lors de nos campagnes d'acquisition avec patience, pédagogie et bienveillance.

Et finalement, je tiens à remercier la Société d'Histoire et d'Archéologie de Senlis, et tout particulièrement M. Jean-Marc Popineau, vice-président ainsi que M.Arnaud Martinec qui ont rendu cette prospection réalisable

Introduction

Une partie de mon stage a été consacrée à l'étude des arènes de Senlis, une intervention effectuée le 1-2 Juillet 2020. Situées au sud-ouest de la ville de Senlis, l'étude a pour but de mettre en évidence la présence éventuelle de la *corona*, le mur périphérique des arènes, et de vestiges archéologiques. L'objectif de cette étude est de déterminer la présence, la répartition, ainsi que la profondeur estimée des anomalies à présenter sous forme de carte magnétique à l'aide du logiciel d'inversion MAGNETO 3.0 et du logiciel de cartographie SURFER. Les méthodes géophysiques non destructives présentent un intérêt tout particulier au domaine de l'archéologie, sous le nom d'archéo-géophysique, cette branche de la géophysique est utilisée depuis des décennies tant elle permet de concilier précision, rapidité de déploiement et d'exécution, elle a permis d'aider les archéologues dans leurs recherches sur le terrain

Une étude magnétique consiste à réaliser des mesures relatives au champ magnétique terrestre. Elle rend compte des contrastes de propriétés magnétique liés à l'aimantation de l'anomalie.

Dans la première partie de ce rapport la zone d'étude sera présentée, sa localisation, les caractéristiques géologiques de la région de Senlis, et un descriptif des arènes de Senlis ainsi que son histoire. Dans une seconde partie, la méthode magnétique sera abordée en détail, avec une présentation du matériel utilisé, le protocole d'acquisition mis en place et quelques notions fondamentales à l'interprétation des cartes magnétiques seront présentées. Puis en troisième partie, nous nous appuyerons sur les cartes magnétiques et leur interprétation pour discuter de la qualité et la pertinence des mesures magnétiques effectuées.

Présentation du site

Localisation du site

La zone d'étude, se situe dans les arènes de Senlis actuellement classée comme Monument Historique depuis 1975 sur le territoire communal de Senlis dans l'Oise (**fig.4**). Elles sont situées en périphérie ouest de la ville et sont limitées par la RN324 au nord, la place des Arènes à l'est, la fontaine des arènes au Sud et l'allée des Arènes à l'ouest. Les arènes se limitent à une superficie de 5500 m² ¹ au nord-est des arènes avec une altitude comprise entre 60 et 67 m NGF d'après la carte IGN. Aux alentours, les arènes se situent dans une zone pavillonnaire, on retrouve à environ 300m au sud la rivière La Nonette, un affluent de l'Oise. Des photos du site permettent d'observer l'*arena* qui constitue le centre des arènes, puis l'entrée à l'*arena* ainsi que du couloir menant aux arènes (**fig.1,2,3**).

Témoin de la civilisation romaine antique, les arènes ont été probablement édifiées au milieu du Ier siècle ap.J-C dans la cité du nom de Augustomagus, sous l'époque Augustéenne, le premier empereur romain. Avec une taille approximative de 90 m par 83 m pour l'axe de la couronne, celle-ci est de forme ellipsoïdale de type semi-creusé, avec une hauteur de 7m et sans doute de 14m à l'origine, ce qui place les arènes de Senlis parmi les petits amphithéâtres de l'époque romaine. Pillées, puis abandonnées, les arènes serviront de carrière de calcaire pour finir comme dépotoir aux habitants de Senlis, et finalement devenir une butte totalement oubliée par les habitants. C'est en 1865 où Félix Verneis, fondateur du comité archéologique de Senlis remet au jour les Arènes de Senlis, curieux du passé de sa ville, Félix Verneis entreprend des fouilles au « Fontaine des Raines », une déformation du toponyme « d'Araine » lui-même héritant du latin Arenarum. C'est sur la base d'un sondage fructueux que la société archéologique de Senlis fit l'acquisition du terrain. ²



Figure 1 - Aperçu de l'arena depuis la summea cavea nord



Figure 2 - Aperçu de l'entrée de l'arena



Figure 3 - Aperçu du couloir des arènes

Contexte géologique

La zone d'étude se situe exclusivement sur la carte géologique de Senlis (**fig.5**) (carte géologique au 1/50 000 du BRGM n°128). La majeure partie de la géologie de Senlis repose sur une succession de trois faciès de calcaire datant du Lutétien [47,8 MA-41,3 MA], recouvert de limon. Proche de l'Aunette et de la Nonette, les affluents de l'Oise, on retrouve d'importantes épaisseurs (10 m) d'alluvions modernes de type tourbes datant du Néolithique. Etant donné la géologie de la région, les calcaires grossiers du Lutétien ont servi d'exploitations souterraines de pierre à bâtir et augmentent le risque de la ville de Senlis aux glissements et affaissements de terrain. C'est ce substrat même, composé de calcaire à miliolites ainsi que d'une carrière de calcaire lutétien à Ditrupa qui a servi à fournir les arènes en matériaux de construction comme en témoigne la carrière souterraine sous la place des Arènes. L'ensemble des formations présentes sur la carte géologique sont répertoriées ci-dessous d'après la notice explicative de la feuille Senlis du BRGM ³.

Quaternaire et formations superficielles

Fz **Alluvions modernes, Tourbes.** Les fonds de vallée sont constitués de sables éocènes, plus spécialement, plus spécialement cuisins, de colluvions remaniées dans les alluvions et de tourbe. L'épaisseur de la tourbe peut atteindre 10m à Senlis.

E5d **Lutétien supérieur, Calcaires à Milioles.** La partie supérieure est calcaire à Milioles tendre, jaune crème, en plaquettes avec des traces d'Algues. On y retrouve un banc calcaire peu épais (0,20 m), très dur, appelé *liais de Senlis*.

La partie moyenne est un calcaire zoogène riche en *Miliolidae*.

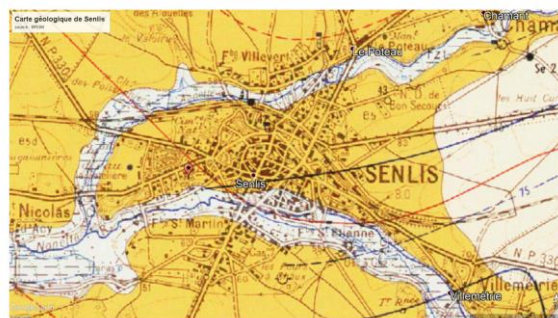
La base est un calcaire fin à Milioles, épais de 0,40 m avec des moulages de *Campanile giganteum*



Source : Google Earth, 2020



Figure 4 - Localisation du site, la zone est indiquée par un waypoint



Source : BRGM (Carte géologique n°128 au 1/50 000)



Figure 5 - Carte géologique de la zone d'étude, la zone est indiquée par un waypoint

La Corona

La *corona* ou couronne, est le mur périphérique des arènes (**fig.6**), il constitue la partie supérieure du *cavea* où repose le *Moenianum*. Le *cavea* est l'ensemble des parties des arènes susceptibles d'accueillir des gradins destinés aux spectateurs, le *Moenianum* est la partie supérieure du *cavea*, on suppose la présence d'échafaudages en bois ou en terre cuite permettant de faire atteindre la capacité des arènes à 11 250 spectateurs (environ) tout en étant accessible pour les habitants les moins fortunés². On pénètre dans l'*arena* par les deux grands *vomitoires* (Est et Ouest) qui correspondent à un passage en pente douce, l'*arena* correspond au centre des arènes, il était autrefois constitué d'une piste sablée sur laquelle se déroulaient les spectacles². La *corona* était composée de pierre calcaire de très gros appareil. C'est au XVIII^e siècle que la fosse formée par l'*arena* est comblée à l'aide de déblais issus de la partie est de la *corona*. Il subsiste des restes du mur à la sortie du vestibule Est¹.

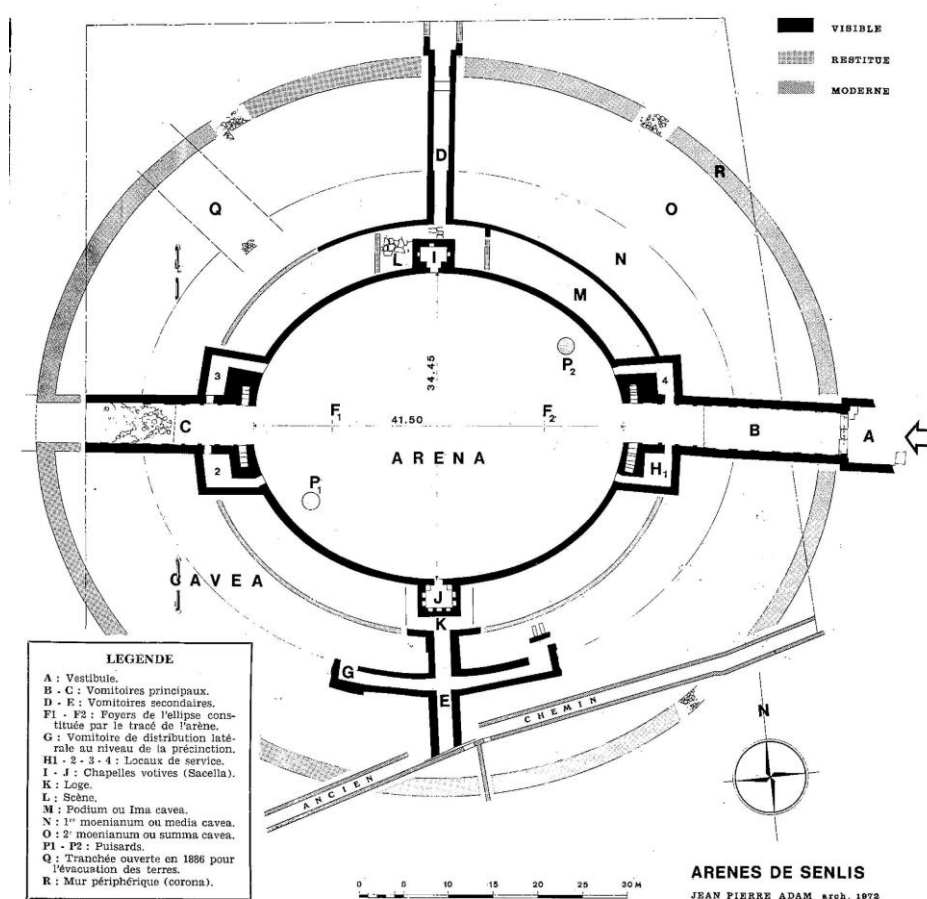


Figure 6 - Les Arènes de Senlis par Jean Pierre Adam (ADAM Jean-Pierre, *Les arènes de Senlis : description sommaire*, Société d'Histoire et d'Archéologie de Senlis, Senlis, 1973, 8 p), la zone d'étude se concentre sur la partie Nord-Est des arènes. Le tracé théorique de la *corona* est observable par la mention « R »

Mesures et interprétations

Notions fondamentales

Le champ magnétique terrestre

L'induction magnétique, mesurée à la surface de la Terre, notée \vec{B} (eq.1), est une grandeur mesurée en Tesla (T) et qui correspond à la résultante de toutes les sources magnétiques terrestre. Il s'agit d'un phénomène physique conduisant à l'apparition d'une force électromotrice pour un conducteur électrique soumis à un flux de champ magnétique.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \text{ (Eq.1)}$$

Avec \vec{B} l'induction magnétique ($V.s$), \vec{H} la densité de flux ($A.m^{-1}$) et μ la perméabilité absolue du milieu ($\Omega.s.m^{-1}$).

Le champ magnétique induit par le noyau terrestre est responsable de 80% du champ magnétique total mesuré à la surface de la Terre, et qui permet d'approximer le champ magnétique terrestre à un dipôle vertical où le champ varie entre 30 000 et 60 000 nT. Il est alors possible de représenter le champ magnétique dans un référentiel terrestre (fig.7) avec des modèles de référence tel que *Le champ géomagnétique international de référence (IGRF)* mis à jour tous les cinq ans par la communauté scientifique. La description du champ magnétique dans un référentiel terrestre permet de mettre en évidence des éléments caractéristiques, d'une part on retrouve trois axes permettant de définir le repère local : Oy l'Est géographique, Oz la verticale et Ox le Nord géographique.

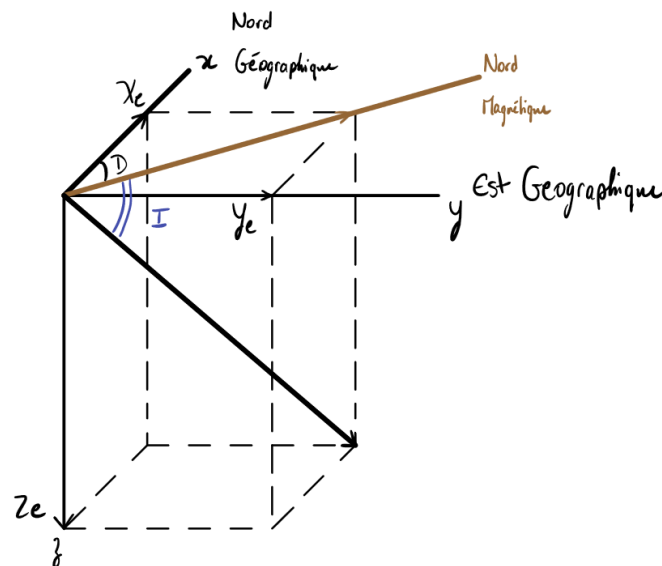


Figure 7 - Représentation du champ magnétique dans un référentiel terrestre, trois éléments caractéristiques définissent le champ, la déclinaison D, l'inclinaison I le Nord magnétique

Trois éléments caractéristiques permettent de décrire le champ magnétique de référence :

- Le Nord Magnétique, la composante horizontale du champ magnétique terrestre.
- D : la déclinaison du champ, il s'agit de l'angle entre OX et le Nord magnétique.
D est positive si la dérivation est orientée vers l'Est et inversement vers l'Ouest.
- I : L'inclinaison du champ, il s'agit de l'angle entre le Nord Magnétique et $\vec{F_e}$, le champ de référence
Par convention, dans l'hémisphère Nord, I est positif car $\vec{F_e}$ est en direction du bas, I est nul à l'équateur magnétique, il vaut 90° au Nord magnétique et $64,5^\circ$ à Paris.

Propriété magnétique

On classe et distingue les matériaux en fonction de leurs propriétés magnétiques qui sont caractérisées par leurs susceptibilités magnétiques. Il existe deux types d'aimantation, d'une part, l'aimantation induite qui est proportionnelle au champ terrestre et qui disparaît lorsqu'on supprime le champ magnétique, et l'aimantation rémanente qui permet quant à elle de mémoriser une aimantation parallèle au champ inducteur lors de la formation du matériau. Ces deux types d'aimantation deviennent à leur tour des sources de champs magnétiques en se superposant au champ principal et génèrent ainsi des anomalies mesurées en surface. On distingue trois types de comportements :

- Le *diamagnétisme* : le corps prend une très faible aimantation en sens inverse du champ appliqué. La plupart des corps solides, notamment la **calcite**, constituant principal d'un calcaire, il en est de même pour les corps liquides et gazeux.
- Le *paramagnétisme* : le corps acquiert une aimantation positive grâce à la présence d'atomes ou d'ions de fer. L'aimantation est faible et est proportionnelle au champ appliqué.
- Le *ferromagnétisme* : il s'agit du mécanisme fondamental de certains matériaux est responsable du phénomène bien connu des aimants. Cette aimantation est beaucoup plus forte que dans les deux cas précédents. Lorsqu'on chauffe ces corps, ils perdent leur aimantation au-dessus d'une température qu'on appelle Température de Curie et qui varie selon le corps. On retrouve principalement le fer, les aciers, ainsi que les oxydes de fer qui peuvent se retrouver dans nos sols.

Lorsqu'une roche ou un matériau artificiel archéologique acquiert une aimantation, celle-ci est parallèle avec le champ magnétique ambiant au moment de leur formation, ce qui permet de définir plusieurs types d'aimantation rémanente, on peut distinguer l'aimantation thermorémanente qui est assez présente dans le cadre d'une prospection magnétique en archéologie ⁷.

- L'aimantation thermorémanente (ATR) : Il s'agit d'une aimantation forte et stable, lorsqu'un matériau est chauffé à une température supérieure aux points de Curie (entre 585°C à 770°C) et refroidi à une température ambiante, celle-ci acquiert une aimantation parallèle et proportionnelle au champ existant, on retrouve par exemple les **briques et poteries** qui en portent ⁸.

Champ d'anomalie

Sur Terre, le champ magnétique principal est lié à l'effet dynamo provoqué par la rotation du noyau externe liquide autour de la graine solide, mais un champ magnétique secondaire peut être produit par différentes sources plus localisées et s'ajouter au signal principal, ce sont ses anomalies locales que nous essayons de déterminer. Le champ d'anomalie magnétique (**eq.2**) est défini comme la différence entre le champ magnétique terrestre mesurée \vec{B} et le champ de référence \vec{F}_e permettant de définir l'anomalie du champ total F

$$F = B - F_e \text{ (Eq.2)}$$

Cependant, les limitations liées à l'instrumentation ne permettent pas de caractériser la modification de l'aimantation rémanente et/ou induite du terrain, il s'agit de mesurer l'intensité du champ sur le terrain et de le soustraire à la valeur du champ de référence au même point de mesure. Elle peut par ailleurs être positive ou bien négative.

Magnétomètre à saturation

Un magnétomètre à saturation (ou sonde fluxgate) se base sur le principe de la saturation du flux magnétique dans les matériaux magnétiques, en présence d'un circuit électrique, la variation du flux magnétique Φ autour d'un nombre de spire N est responsable d'une force électromotrice e (**eq.3**). Tout ceci dans le but de mesurer la direction et l'amplitude du champ magnétique B ⁴.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$
$$\Phi = \oint B \cdot dS \text{ (Eq.3)}$$

Le système correspond à un anneau assez épais d'élément ferromagnétique entouré d'un bobinage parcouru par un courant alternatif suffisant pour saturer le matériau magnétique. Ce courant génère un champ magnétique qui va s'ajouter au champ externe à mesurer. Une partie du champ généré provoque une variation du flux magnétique et engendre une tension induite dans un deuxième bobinage, qui servira comme élément de détection. Il est donc possible par cette méthode de retrouver le champ externe à mesurer.

Domaines d'application

Le magnétomètre à saturation permet de mesurer le champ magnétique terrestre et de mettre en évidence des objets métalliques ferreux enterrés par l'apparition de contrastes de susceptibilité magnétique dans le sous-sol, avec comme domaine d'application notable :

- L'environnement et le génie civil : la détection d'objet métallique ponctuel ou massif (cuve, de fût métallique, munitions...)
- L'archéologie : détection de vestiges ou d'objet ferromagnétique

L'un des inconvénients de cette méthode est son utilisation dans les milieux proches des lignes à haute tension et dans les milieux urbains ou industriels, où les objets métalliques d'origine anthropique provoquent des saturations magnétiques importantes. La capacité de détection est largement variable même si elle reste dans l'ordre de quelques mètres au maximum. Celle-ci dépend entre autres de l'espace des deux bobines disposées dans la sonde fluxgate, de la géométrie et de la profondeur de l'anomalie, de la quantité d'objet ferromagnétique présent autour de la zone et pouvant potentiellement provoquer des saturations dans la zone ⁵.

Présentation du magnétomètre

Le magnétomètre utilisé est un système MXPDA (**fig.9**) fourni par GEOREVA, il s'agit d'un système sur chariot poussé permettant de mettre en parallèles cinq magnétomètres à saturation (ou fluxgate) de type FGM650/3 de la marque Sensys. Chaque sonde correspond en un agencement de deux magnétomètres à axe unique alignés verticalement à une distance précise de 650 mm, tout ceci dans le but de réduire au maximum les variations du champ magnétique terrestre et des perturbations locales. Ces magnétomètres permettent en outre d'obtenir une gamme de mesure de l'ordre de +/- 8.000 nT, ainsi qu'une résolution de 0.1 nT ⁶.

Le chariot modulable, offre la possibilité de changer l'espacement des capteurs entre les valeurs fixes de 25 cm ou 50 cm et permet d'avoir une largeur de détection comprise entre 1 à 2 m.

L'acquisition est effectuée en mode FIELD à l'aide d'un PDA de terrain (assistant de terrain) connecté par réseau Bluetooth et qui permet de voir en temps réel la valeur pour chaque magnétomètre. Sans antenne ni balise GPS, il est obligatoire d'implémenter la zone d'étude à l'aide d'un tachéomètre. Chaque capteur est échantillonné à 20 Hz pour une acquisition jusqu'à 5 km/h, ce qui permet d'obtenir un point de mesure tous les 20 cm en moyenne. L'acquisition doit être effectuée par trace, le plus droit possible, et en respectant les écartements préconisés de 0,5 -1 m entre chaque trace, en outre et dans la mesure du possible, les traces doivent être parallèles entre elles. L'acquisition d'une trace doit commencer exactement au début de la zone d'étude et stopper manuellement à la fin de chaque trace permettant ainsi la sauvegarde trace par trace.

Le traitement des données est lui assuré par le logiciel de traitement MAGNETO 3.0 (Sensys). Les **anomalies magnétiques** présentant des valeurs positives et négatives sont dues à des éléments métalliques dans le sol, non verticaux. Les **anomalies positives** de fortes intensités peuvent s'apparenter à des fossés/fosses mais aussi à des structures chauffées, telles que les argiles cuites sans pouvoir distinguer avec certitude l'origine. Les **anomalies magnétiques négatives** peuvent être assimilées à la présence d'un mur enterré.



Figure 8 - Chariot modulable MXPDA à cinq sondes avec un écartement de 0,25cm



Figure 9 - Sonde fluxgate FGM650/3 de la marque Sensys

Implémentation dans la zone

Dans le but d'implémenter la zone d'étude, il est nécessaire de délimiter la zone à l'aide d'un théodolite LEICA TS12, de son PDA LEICA CS10 et d'un prisme LEICA permettant une précision millimétrique. La mise en station s'effectue par l'implantation au préalable de deux points suivant une orientation connue (Nord 00) et une distance connue (10m) et qui permettra à la station de se localiser dans l'espace, l'erreur maximale tolérée étant de 5 cm. Un maillage régulier de 1,0 à 0,50 m à l'aide d'un odomètre permet de séparer les traces en largeur tout le long de la bordure de la zone, ce qui permettra d'obtenir un point du début et de la fin de chaque trace ainsi que de leur altitude respective. Chaque trace est mesurée en longueur permettant ainsi d'avoir cette donnée en entrée avant chaque mesure.

Conception de la prestation

Les mesures envisagées devront permettre de localiser le mur extérieur des arènes (*corona*) pour le compte de la société d'histoire et d'archéologie de Senlis (SHAS). Les mesures ont été effectuées le 1-2 Juillet 2020 sur une superficie de 1130,8 m². Cette prestation correspond à l'étude de la partie Nord-Est des Arènes, du centre de l'arène et de l'entrée des arènes.

Interprétation des cartes magnétiques

Terrain prospecté

L'interprétation des résultats a été effectuée à l'aide du logiciel de cartographie Surfer. Le plan de l'architecte Jean Pierre Adam ² (**fig.10**) est superposé aux résultats où y figure le tracé théorique du mur périphérique (*corona*) des arènes, ce qui facilitera la lecture des cartes magnétiques. Nous interpréterons d'une part les zones 1 & 2 qui correspondent aux zones du tracé théorique de la *corona*, puis des axes Est-Ouest et Nord-Sud de l'arène, du couloir des arènes, et finalement de l'entrée des arènes. L'ensemble des trois zones prospectées reposent sur le même terrain homogène qui se compose de terre arable. L'*arena* possède une pelouse tondue, on retrouve une légère végétation le long de l'entrée des arènes ainsi que dans la zone 1, ce qui n'est pas le cas de la zone 2 qui possède elle une importante végétation. Nous pouvons noter la présence d'installations récentes qui peuvent altérer la qualité des mesures géophysiques, notamment de grillages en zone 1.



Figure 10 - Délimitation des zones d'étude, Les zones 1 & 2 se concentrent sur l'étude de la *corona* tandis que les zones 3 & 4 correspondent à la recherche de vestiges archéologiques

Zone théorique de la *corona*

D'un point de vue général (**fig.11**), la carte magnétique montre un contraste peu prononcé dans la zone 1. Les anomalies peinent à se détacher de manière homogène. L'extrémité Est de la zone 1 est entachée par un grillage de nature anthropique qui provoque de fortes anomalies négatives. Quelques anomalies positives sont perceptibles, elles sont composées de matériaux plus magnétiques que le terrain environnant. Ces anomalies positives, sont généralement ovoïdes et orientées selon la même direction et peuvent aussi bien traduire la présence de structures chauffées que de fosses remplies de matériaux différent des alentours.

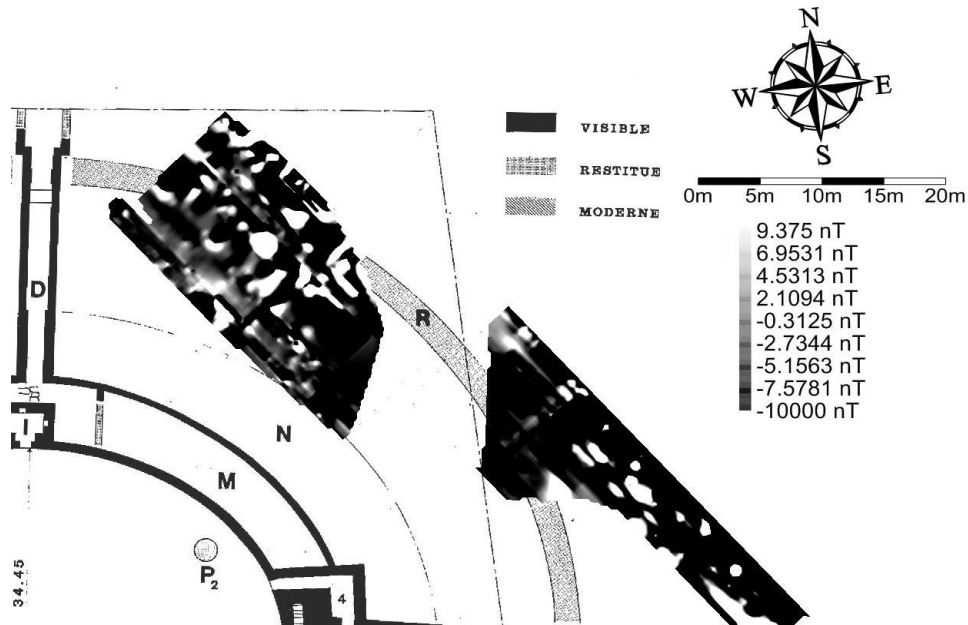


Figure 11 - Carte magnétique obtenue sur les zones 1 & 2 pour un écartement de 0,25 cm, la zone théorique de la corona est observable par la mention R. On peut y observer la présence d'anomalies positives de formes ovoïdes qui suivent la même direction. Une grille de nature anthropique perturbe les mesures dans la zone 1. La zone 2 met en évidence une zone chaotique le long du tracé de la corona, il est difficilement possible d'interpréter la zone.

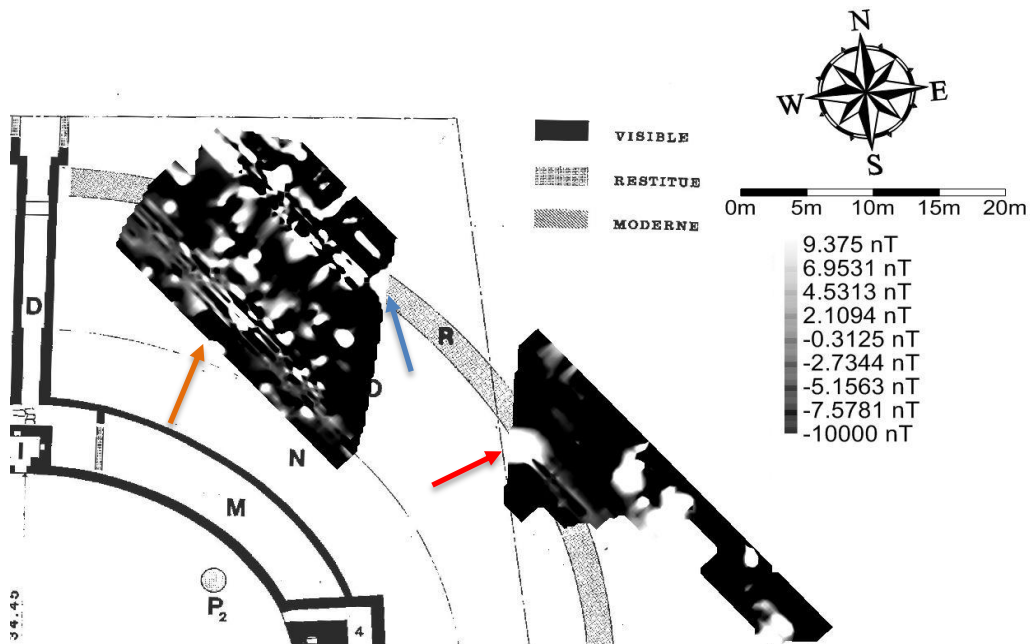
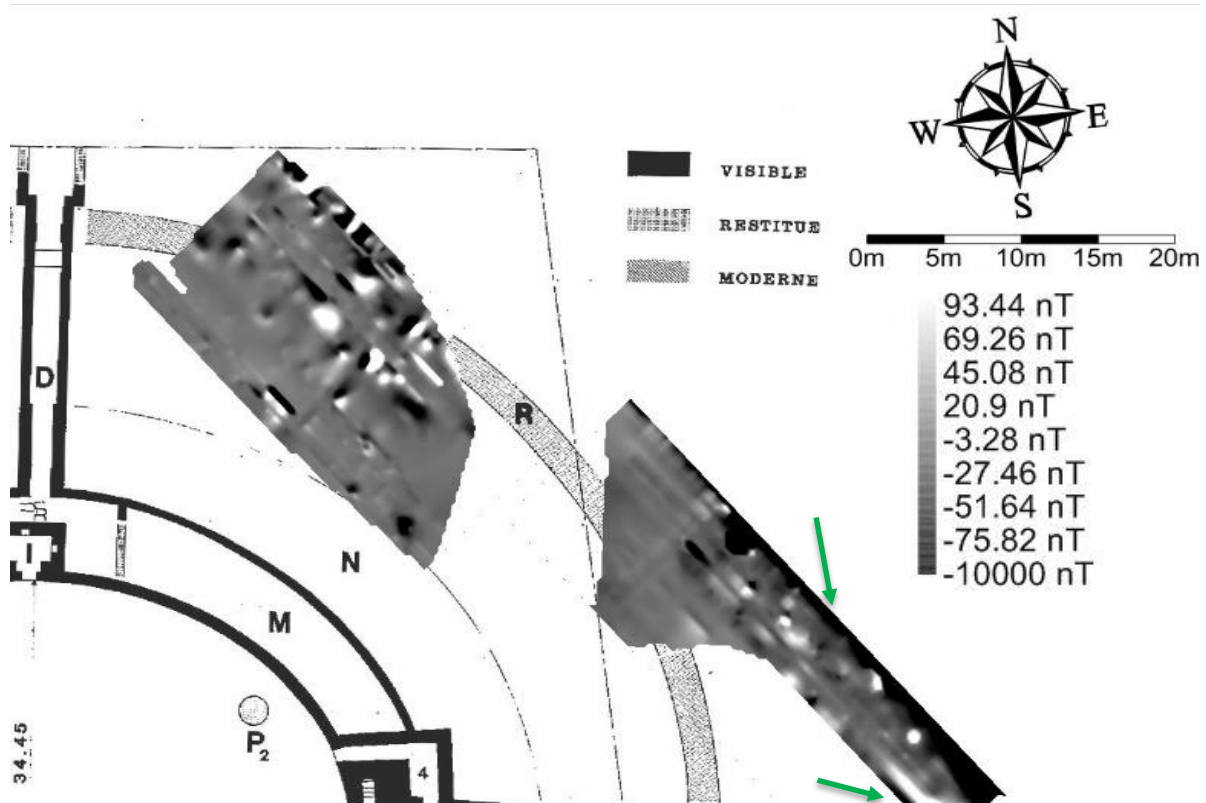


Figure 12 - Carte magnétique obtenue sur les zones 1 & 2 pour un écartement de 0,5 cm, la zone théorique de la corona est observable par la mention R. L'écartement de 0,5cm permet une meilleure interprétation de la zone. Le tracé de la corona en zone 1 n'est pas explicite mais on observe une faible variation négative qui se distingue du reste, elle est de plus accompagnée par une forte anomalie positive de forme circulaire (flèche rouge). La zone 2 est impactée par de fortes variations positives et négatives ce qui rend impossible d'observer les fines variations du mur enterré, elle présente néanmoins une anomalie positive similaire (flèche bleue) à la zone 1. L'anomalie négative (flèche orange) correspondrait à une profondeur théorique de 0,97m, il pourrait s'agir d'un objet enterré d'un diamètre de 71cm.

Malheureusement, l'identification et la délimitation de la *corona* dans la zone 1 n'est pas explicite, on observe une faible variation négative le long du tracé de la *corona* (fig.12), qui est suivie par une large anomalie positive, de forme circulaire (flèche rouge).

Le constat est différent dans la seconde zone, d'une part, on observe de larges variations dans les anomalies, la partie susceptible de contenir la *corona* est impactée par une succession de fortes anomalies autant positive que négative et qui rend les infimes variations impossibles à observer. Ces fortes variations ne sont à priori pas liées à un mur en bloc de calcaire car sa réponse serait uniquement négative. Il est intéressant de changer d'échelle de variation (fig.13) pour se rendre compte du phénomène, il est alors plus simple d'affirmer que des corps métalliques fortement magnétiques se trouvent présent sur le terrain comme en témoigne les dipôles magnétiques qui leur sont caractéristiques.



Une anomalie positive est à signaler en début de zone de *corona* (flèche bleue) et semble concorder à l'extrémité de l'anomalie positive perceptible en zone 1. Une seconde, à l'extrémité Ouest du terrain correspond au signal négatif le plus intense perçu. Les fortes anomalies ainsi que celles susceptibles d'être assimilées à des objets ont été traitées à l'aide du logiciel Magneto 3.0 qui permet d'obtenir les caractéristiques fondamentales d'une anomalie telle que sa profondeur approximative, son diamètre ainsi que son moment magnétique, en faisant des simplifications au niveau de leur géométrie pour faciliter le calcul. Elles sont présentées et numéroté en annexe (annexe 1 - 2, tableau 1 - 2).

Répartition spatiale et principales caractéristiques des anomalies

Quelques anomalies ont des formes presque circulaires et sont probablement dues à la présence de structures réelles et bien délimitées. La quasi-totalité des sources recensées sont estimées à une profondeur de 30 cm à 2,70 m, pour les sources les plus profondes, elles correspondent aux deux sources positives citées précédemment aux extrémités de la zone 1 et 2 pour des profondeurs de 0,78m et 2,72m. Une source en zone 2 retient notre attention (flèche orange), l'anomalie négative à l'extrémité Ouest est située à une profondeur théorique de 0,97m, il pourrait s'agir d'un objet enterré d'un diamètre de 71cm, le plus large observé. Pour le reste, les sources magnétiques sont relativement proches de la surface, aucune organisation particulière ne semble apparaître, avec des intensités très faibles, elles peuvent être induite par des produits d'érosion, ou bien correspondre à couche superficielle bien marquée.

Grands axes et couloir des arènes

La prospection magnétique a été étendue aux grands axes de l'arène dans le but de détecter des vestiges archéologiques. La carte magnétique (**Fig.14**) permet de mettre en évidence une grande quantité d'anomalie le long de l'axe Est-Ouest. Sur l'axe Nord-Sud, on trouve au centre un dipôle magnétique de taille identique, les valeurs issues de l'inversion ne permettront pas de conclure quant à l'origine de la source. De part et d'autre des extrémités du profil, on trouve l'influence de portes métalliques d'origine anthropique des *chapelles votives*.

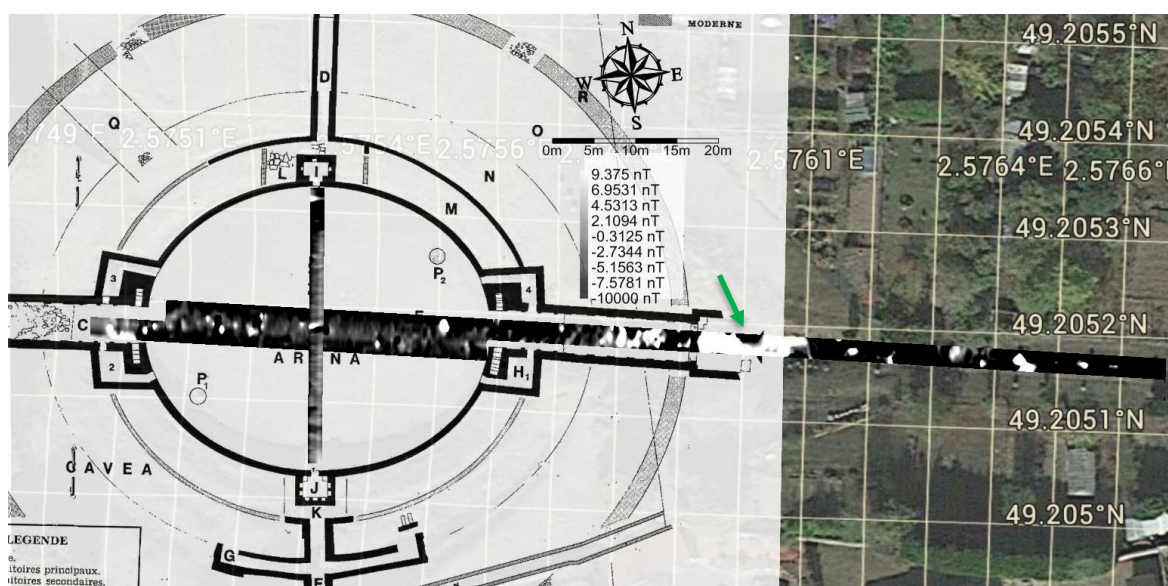


Figure 14 Carte magnétique des grands axes de l'arène réalisé avec un écartement de 0,5cm. Le long de l'axe E-W est jalonné par des anomalies positives de forme quasi circulaire, ainsi que d'une discontinuité entre le centre et le bord du profil. Ce qui peut correspondre à la présence du mur périphérique Est enterrée pour combler la fosse. Le *Vestibule Est* met en évidence des anomalies positives d'une forme quelconque. Une grille (flèche verte) vient par la suite entachée les mesures.

D'un point de vue général, l'axe E-W montre un contraste de valeur visible entre le centre et les bords du profil, ponctué par des signaux positifs de tailles et d'intensités variables, le tableau (**tabl.2, annexe**) reprend les valeurs caractéristiques obtenues par inversion. On trouve à proximité du *Vomitoire Ouest* une large anomalie positive, d'une forme quelconque et qui pourrait être impactée par le mur en calcaire affleurant la surface.

Une fois passée l'arène, l'altitude tend à augmenter jusqu'au niveau de base des lieux, les éléments suivants sont notables sur le site :

- Sur la pente, on observe d'importantes anomalies positives (**fig.15**), de forme ovoïde mais de tailles variables, une grille est présente par la suite (flèche verte)

- Par la suite une importante anomalie avec une forme presque circulaire est présente, elle peut être due à la présence d'une structure bien individualisée et délimitée. Etant donnée la gamme de variation différente que celle présente le long de *l'arena*, nous pouvons supposer qu'ils s'agissent d'objets différents.
- Finalement, on observe assez ponctuellement des anomalies positives de forme presque circulaire jusqu'au bout du profil, ainsi que des zones à valeur négative jusqu'à l'entrée de *l'arena*. Néanmoins, elles peuvent être assimilées à la présence de bloc de calcaire en surface qui interfèrent avec les mesures.



Figure 15 Carte magnétique du couloir des arènes réalisé avec un écartement de 0,5cm et une gamme de variation de [-100 nT,100 nT]. Cette gamme de variation permet d'observer d'importantes anomalies positives le long du *Vestibule Est*. Par la suite une importante anomalie positive de forme circulaire pourrait induire une structure bien individualisée et délimitée. Une grille est présente (flèche verte) et perturbe les mesures

On retrouve en bout de profil deux signaux positifs de forme ovoïde, les caractéristiques des principales anomalies (**annexe 3**) citées sont regroupées en annexe (**tableau 3**)

Deux profils (**fig.16**) permettent de compléter l'étude des arènes de Senlis, au premier abord, on retrouve des similarités avec les profils précédents :

- Deux larges anomalies négatives sont visibles sur le premier profil, ces anomalies n'ont pas de forme définie, nous pouvons donc exclure qu'elles soient la réponse d'une structure ou d'un objet enterré.
- Dans le second profil, une grande partie du profil est impactée par la présence d'un réseau de canalisation d'eau courante, ainsi que d'une plaque d'égout visible sur la partie ouest du profil.

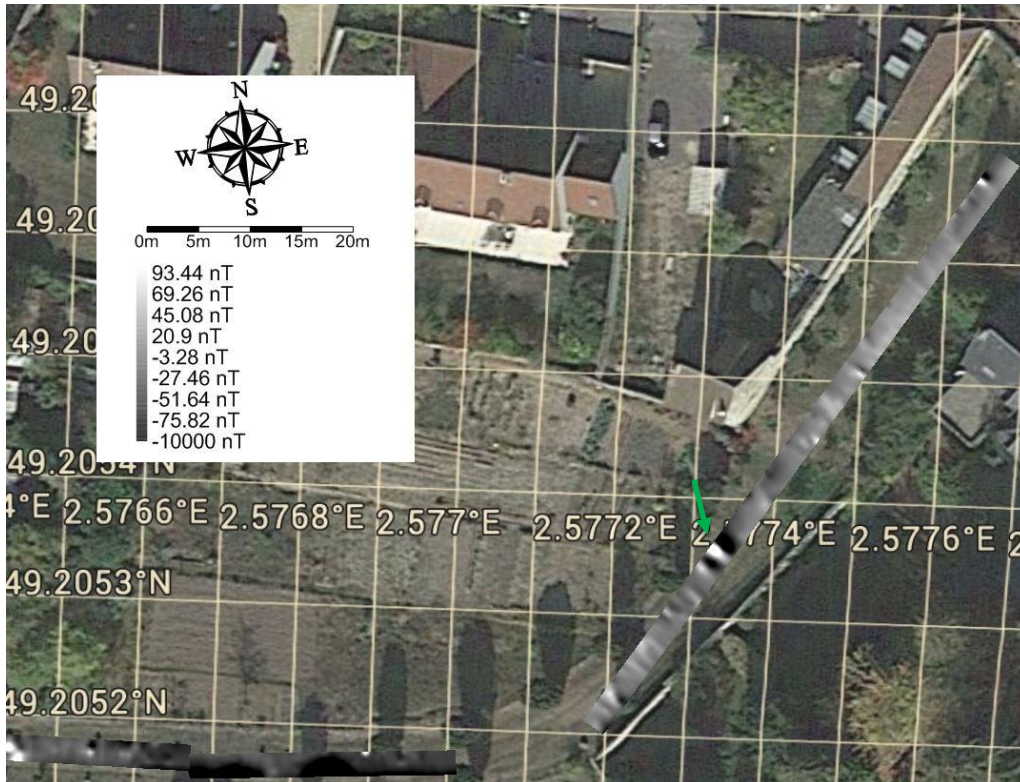


Figure 16 Carte magnétique de l'entrée des arènes réalisé avec un écartement de 0,5cm et une gamme de variation de [-100 nT,100 nT]. Une plaque d'égout visible (flèche verte) témoigne de la présence d'un réseau souterrain perturbant le signal tout le long du profil.

Répartition spatiale et principales caractéristiques des anomalies

Les anomalies présentes sur la partie de *l'arena* sont principalement superficielles, on observe deux groupes d'anomalies positives très rapprochés, avec des profondeurs comprises entre 0,36m à 0,96m. Ils partagent des diamètres similaires qui ne dépassent pas 1m, on observe quelques anomalies qui ont un diamètre similaire de 36 cm. L'anomalie positive à l'extrémité est de forme quasi circulaire avec un diamètre de 20 cm à 60 cm, malgré qu'elle soit proche de la surface, nous pouvons cependant penser qu'il s'agit bel et bien d'une structure enterrée.

Les anomalies situées à l'entrée de *l'arena* sont les signaux les plus intenses, ils témoignent de signaux à plus de 1 mètre de profondeur pour des diamètres variables de 37 cm et 85 cm. Seule l'anomalie la plus profonde a une forme presque circulaire, ce qui pourrait représenter une structure bien individualisée et délimitée. On retrouve plus loin sur le profil une anomalie ayant les mêmes attributs mais avec une intensité plus faible. Tout le long du profil, c'est finalement des anomalies de très proche surface qu'on observe, situé entre 10cm à 40cm. L'anomalie de forme ovoïde est quant à elle différente des précédentes, elle est située à une profondeur de 1,22 m pour un diamètre de 40 cm, elle partage donc des similarités avec les fortes anomalies situées à l'entrée de *l'arena*. Il est difficile d'entrevoir une organisation particulière dans ces anomalies, d'une part, nous avons une large dominance d'anomalies positives dans toute la zone, ces anomalies peuvent se scinder en trois catégories :

- Les anomalies de très proche surface, avec une profondeur inférieure à 0,5 m et qui sont majoritairement contenues dans *l'arena*, elles sont de plus d'intensité similaire ;
- Les anomalies dont la profondeur excède 1m et qui sont généralement présentes à l'entrée de *l'arena*, cependant, aucun lien est possible quant à leur intensité ;
- Finalement, les anomalies de faible profondeur et faible diamètre qui sont-elles présentées à l'extrémité Est du profil, le long du couloir.

Discussion

En premier lieu, il n'a pas été possible de mettre en évidence le mur de la *corona* de manière précise et évidente, malgré tout, la zone susceptible de contenir la structure présente deux variations positives importantes, il a été avancé que la partie Est du mur périphérique ait probablement servi de remblai pour combler le fossé de *l'arena*, il est donc peu évident de caractériser avec certitude la provenance de ces anomalies. Néanmoins, des anomalies positives de ce type peuvent correspondre à la présence de fosses/fossés¹⁰, ce qui pourrait soutenir l'hypothèse précédente. De plus, le contraste de susceptibilité magnétique qu'il existe entre le calcaire et la terre n'est pas assez important pour mettre en nette évidence le tracé du mur, la calcite, constituant principal des roches calcaires possède une faible susceptibilité magnétique estimée entre $0 - 50 \cdot 10^{-6}$ (SI)⁹. Il en va de même pour la terre arable qui est une matière formée par l'accumulation de matière organique, les principaux constituants de la terre arable sont l'eau et le carbone, tous deux diamagnétiques.

On retrouve dans la zone 2 une pléthore de dipôles magnétiques, une concentration largement supérieure comparée aux autres zones, ce qui rend impossible de déterminer avec certitude la présence de la *corona*, les dipôles magnétiques présentent de fortes intensités qui tendent néanmoins à suivre une direction entamée par l'anomalie en zone 1. Il est donc possible, que ces variations traduisent la présence d'objet ou de matériaux annexes au mur enterré mais aussi de fosses/fossés provoqués par le déblai du mur périphérique Est aux XVIIIe siècle.

L'arena met évidence une multitude d'anomalies d'intensités et de formes variables, cependant, comme cité précédemment, un remaniement a été effectué au début du XIX^e siècle, et une large quantité de déblais ont permis de remplir le fossé qui constituait *l'arena*, ce qui pourrait expliquer le contraste d'anomalie formant une discordance parmi le centre et le bord du profil et qui ponctué par de petites anomalies positives sur les deux profils de *l'arena*. On observe aussi la présence de deux dipôles magnétiques qui pourraient quant à eux correspondre à l'existence d'objets métalliques réels.

Différents facteurs viennent altérer la qualité de la prospection magnétique, d'une part, on trouve des perturbations d'origine anthropique, notamment en zone 1 qui viennent altérer les mesures sur une large zone ; la végétation, présente en zone 2 qui a rendu laborieux l'acquisition et qui pourrait être responsable d'anomalie superficielle présente en grande quantité dans la zone ; on trouve aussi la présence de blocs calcaires, tout le long du couloir de l'entrée de *l'arena* qui perturbent les mesures ; finalement, nous suspectons la présence de canalisation d'eau courante à l'entrée des arènes qui permettent la mise en culture de petites parcelles agricoles à proximité.

Conclusion

L'étude magnétique, qui s'est déroulée dans l'enceinte des arènes de Senlis, a permis de mettre en évidence la présence de plusieurs objets métalliques en proche surface, il a aussi été possible d'observer le remaniement effectué au sein de *l'arena*. Comme toute méthode géophysique, cette méthode présente ses limites et dans le cadre de l'étude de la *corona*, la prospection effectuée dans les secteurs susceptibles de contenir le mur périphérique n'a pas permis de mettre en évidence de façon claire la présence du mur enterré, ils ont néanmoins le mérite d'orienter de futures investigations, tel qu'une campagne de reconnaissance électrique complémentaire sur le tracé théorique de la corona qui pourrait constituer une perspective d'amélioration supplémentaire. Il a été avancé que le contraste de susceptibilité entre la structure et son encaissant se révèle finalement assez faible pour observer des variations perceptibles, de plus, de nombreuses anomalies non identifiées de fortes intensités ne permettent pas de distinguer le mur périphérique.

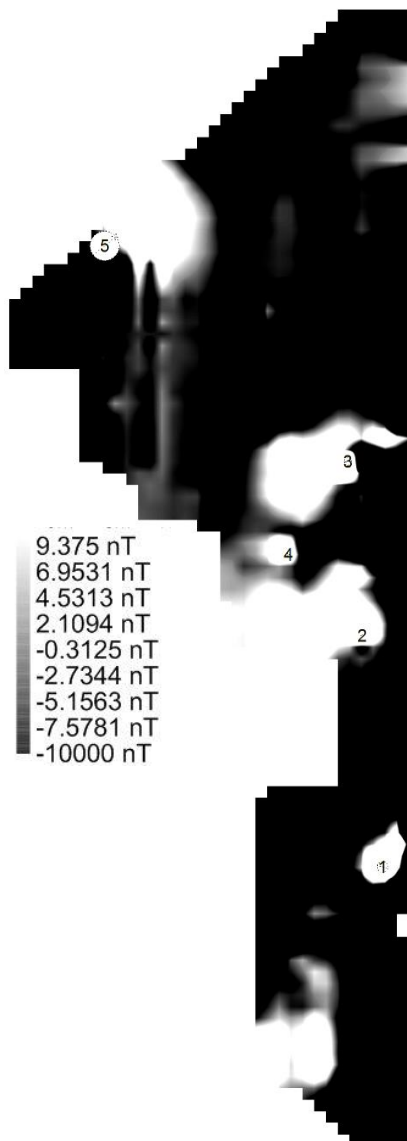
Bibliographie

- [1] : Jean-Marc Popineau, Popineau, *Réflexions sur l'édifice antique de spectacles « Les Arènes » de Senlis (Oise)*
- [2] : ADAM Jean-Pierre, *Les arènes de Senlis : description sommaire*, Société d'Histoire et d'Archéologie de Senlis, Senlis, 1973, 8 p
- [3] : A. BLONDEAU et al, *Notice explicative de la géologie de Senlis*, BRGM
- [4] : Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. *Applied Geophysics* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 1990, doi:10.1017/CBO9781139167932
- [5] : AGAP, Magnétomètre Fluxgate, 2016. Disponible sur : https://www.agapqualite.org/wp-content/uploads/2019/07/CBP-AGAP_MAG02_rev01_Magnetisme-Fluxgate_AT.pdf (consultée le 29/06/2020)
- [6] : SENSYS, FGM650 Gradiometer. Disponible sur : <https://sensysmagnetometer.com/products/sensors-recorder/gradiometer/fgm650-gradiometer/> (Consultée le 29/06/2020)
- [7] : Fassbinder, Jörg & Becker, Helmut. (2001). *Magnetic Prospecting in Archaeological sites*, Monuments and Sites, 2001, 102p
- [8] : Jacques Dubois et al, *Géophysique - 4e éd. : Cours, étude de cas et exercices corrigés*, Dunod, 2011, 272 p
- [9] : Aurele Parriaux, *Geology: Basics for Engineers*, Taylor & Francis Group, 2018, 560 p
- [10] : Dabas, Michel. *L'archéo-géophysique ou la détection et cartographie des sites archéologiques*, 2018, 117-124 p.

Table des illustrations

Figure 1 APERÇU DE L'ARENA DEPUIS LA SUMMEA CAVEA NORD	4
Figure 2 Aperçu de l'entrée de l'arena	4
Figure 3 Aperçu du couloir des arènes	4
Figure 4 Localisation du site	5
Figure 5 Carte géologique de la zone d'étude	5
Figure 6 - Les Arènes de Senlis par Jean Pierre Adam (ADAM Jean-Pierre, <i>Les arènes de Senlis : description sommaire</i> , Société d'Histoire et d'Archéologie de Senlis, Senlis, 1973, 8 p).....	6
Figure 7 Représentation du champ magnétique dans un référentiel terrestre	7
Figure 8 Chariot modulable MXPDA à cinq sondes avec un écartement de 0,25cm.....	11
Figure 9 Sonde fluxgate FGM650/3 de la marque Sensys.....	11
Figure 10 Délimitation des zones d'étude	12
Figure 11 Carte magnétique obtenue sur les zones 1 & 2 pour un écartement de 0,25 cm	13
Figure 12 Carte magnétique obtenue sur les zones 1 & 2 pour un écartement de 0,5 cm	13
Figure 13 Carte magnétique obtenue sur les zones 1 & 2 pour un écartement de 0,5 cm et une gamme de variation de [-100 nT ;100 nT]	14
Figure 14 Carte magnétique des grands axes de l'arène réalisé avec un écartement de 0,5cm.....	15
Figure 15 Carte magnétique du couloir des arènes réalisé avec un écartement de 0,5cm et une gamme de variation de [-100 nT,100 nT]	16
Figure 16 Carte magnétique de l'entrée des arènes réalisé avec un écartement de 0,5cm et une gamme de variation de [-100 nT,100 nT]	17
Annexe 1 Zone 1.....	22
Tableau 1 Récapitulatif des principales anomalies rencontrées en zone 1, coordonnées en Lambert 93	22
Annexe 2 Zone 2.....	23
Tableau 2 Récapitulatif des principales anomalies rencontrées, coordonnées en Lambert 93	23
Annexe 3 Axe E-W de l'arena.....	24
Tableau 3 Récapitulatif des principales anomalies rencontrées, coordonnées en Lambert 93	24
Annexe 4 Carte magnétique de la zone d'étude	24
	21

Annexes

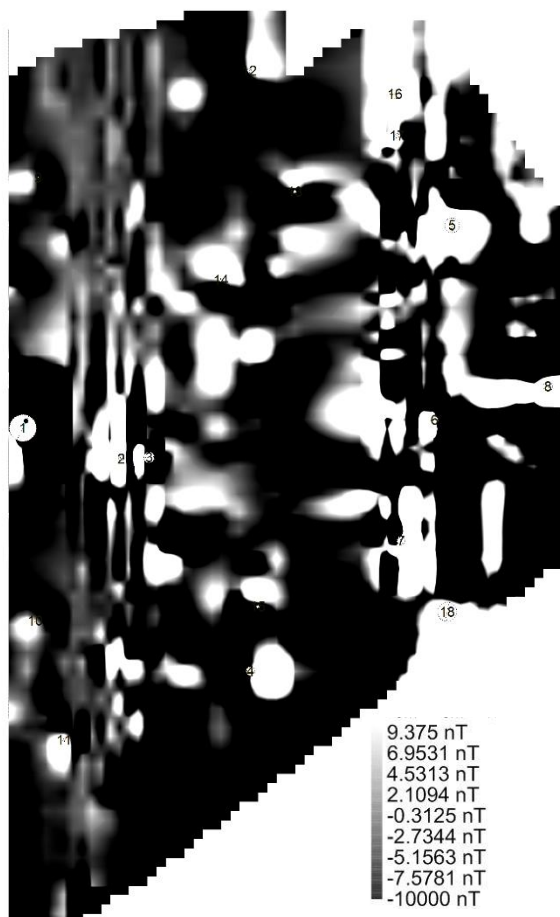


Annexe 1 Zone 1

No.	X [m]	Y [m]	Depth [m]	Dia. [m]
1	669104,76	6900698,80	0.87	0.30
2	669104,76	6900698,80	0.19	0.07
3	669097,14	6900704,50	0.47	0.21
4	669097,72	6900702,24	0.43	0.11
5	669088,34	6900704,87	2.72	0.79

(En rouge : Anomalies dipolaires)

Tableau 1 Récapitulatif des principales anomalies rencontrées en zone 1, coordonnées en Lambert 93

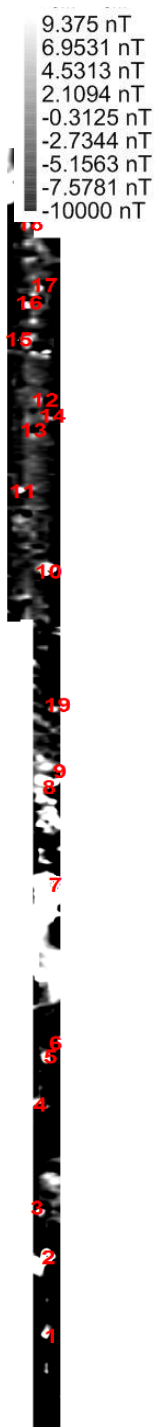


Annexe 2 Zone 2

No.	X [m]	Y [m]	Depth [m]	Dia. [m]
1	669068,01	6900712,39	0.97	0.71
2	669070,20	6900713,48	0.06	0.15
3	669070,63	6900713,88	0.30	0.30
4	669076,59	6900711,94	0.60	0.25
5	669072,40	6900724,46	0.82	0.42
6	669075,44	6900718,84	0.30	0.20
7	669076,95	6900716,36	0.37	0.23
8	669076,95	6900721,25	0.49	0.26
9	669063,51	6900716,62	0.29	0.08
10	669071,39	6900709,60	0.36	0.09
11	669074,18	6900708,16	0.27	0.10
12	669065,72	6900721,82	0.37	0.11
13	669068,70	6900720,38	0.26	0.11
14	669069,05	6900717,86	0.30	0.10
15	669075,40	6900713,19	0.30	0.11
16	669068,79	6900723,55	0.78	0.26
17	669069,71	6900722,78	0.37	0.14
18	669079,20	6900716,05	1.27	0.52

(En rouge : Anomalies dipolaires)

Tableau 2 Récapitulatif des principales anomalies rencontrées, coordonnées en Lambert 93



No.	X [m]	Y [m]	Depth [m]	Dia. [m]
1	669139,21	6900687,09	0.36	0.13
2	669131,90	6900687,55	1.22	0.40
3	669127,43	6900687,36	0.49	0.12
4	669117,90	6900687,73	0.13	0.07
5	669113,40	6900688,47	0.32	0.09
6	669111,95	6900689,57	0.43	0.15
7	669097,27	6900690,07	1.66	0.85
8	669088,59	6900690,06	1.34	0.37
9	669087,13	6900690,85	0.48	0.13
10	669068,87	6900691,32	0.60	0.21
11	669061,20	6900689,49	0.36	0.09
12	669052,80	6900691,35	0.36	0.08
13	669055,96	6900690,76	0.34	0.07
14	669054,37	6900691,14	0.31	0.06
15	669047,18	6900690,19	0.96	0.21
16	669044,01	6900691,14	0.64	0.17
17	669042,69	6900691,87	0.36	0.08
18	669036,86	6900691,43	0.36	0.08
19	669081,41	6900691,15	0.88	0.19

(En rouge : Anomalies dipolaires)

Tableau 3 Récapitulatif des principales anomalies rencontrées, coordonnées en Lambert 93

Annexe 3 Axe E-W de l'arena



Annexe 4 Carte magnétique de la zone d'étude