
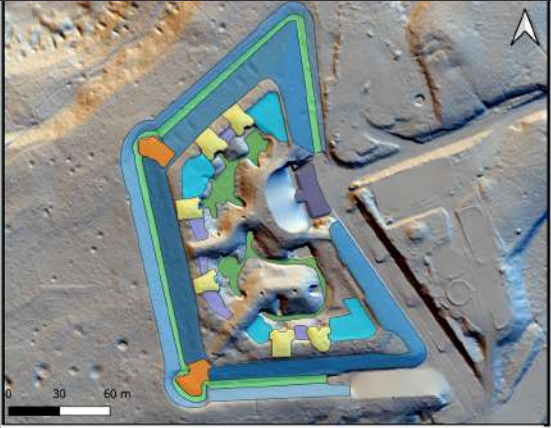


APPORT DU LIDAR EN ARCHÉOGÉOMORPHOLOGIE DES CONFLITS DE GUERRE : EXEMPLE DU FORT DE CHENAY



INTRODUCTION

L'étude des conflits de guerre et de leurs impacts sur le paysage constitue un domaine de recherche crucial, offrant des perspectives uniques pour comprendre les évènements historiques et leur répercussions géomorphologiques. L'archéogéomorphologie utilise donc le LiDAR pour explorer les “**polémoformes**”, terme employé pour désigner les formes de relief et les modelés nés de la guerre (Amat, 1987) (tranchées, trous d'obus, abris), enfouis sous le manteau végétal ou les structures modernes.



L'archéogéomorphologie, c'est quoi?





Concept évoqué pour la première fois par l'archéologue américaine Wandsnider en 1992.

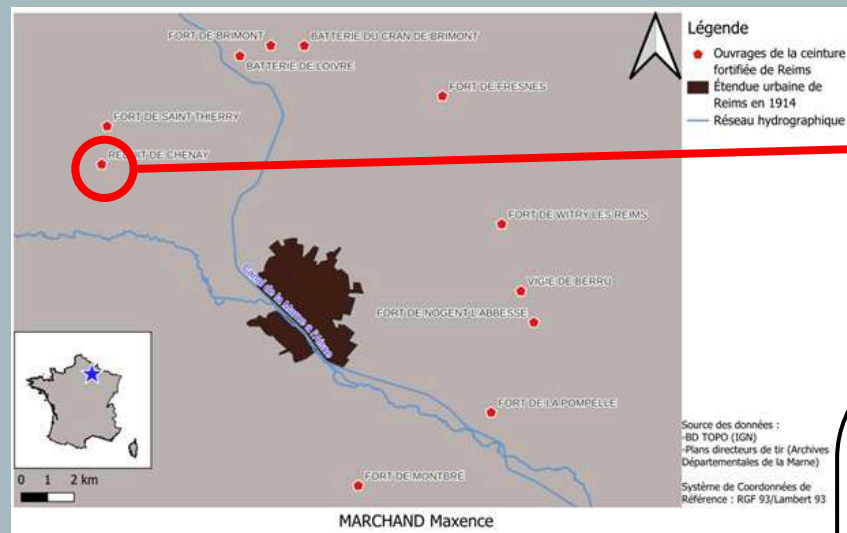


Etude géomorphologique des vestiges archéologiques, sans recourir aux techniques des archéologues.



On parle d'archéogéomorphologie de la guerre, quand elle est appliquée aux vestiges de guerre.

Fortifications Séré de Rivières : fort de Chenay



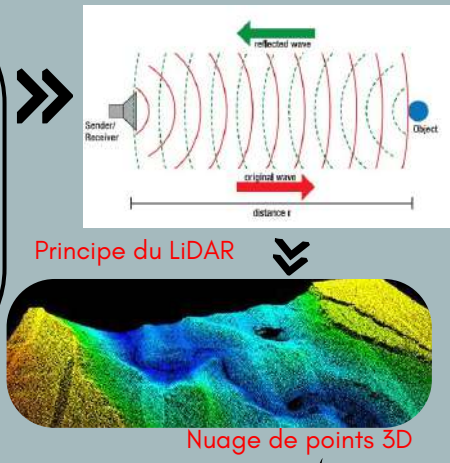
Le fort de Chenay a été construit entre les années **1879** et **1880** sous le commandement du **Général Séré de Rivières**. Il s'inscrit dans la ceinture de forts autour de Reims, du second rideau Séré de Rivières, avec les forts de Montbré, de la Pompelle, de Nogent, de Witry, de Fresnes, de Saint-Thierry, la vigile de Berru et sa batterie (voir carte). Situé un peu plus au Nord à 2 km du fort de Saint-Thierry, cet ouvrage lui servait de bâtiment de renfort.

1. Acquisition des données par LiDAR

Light Detection And Ranging

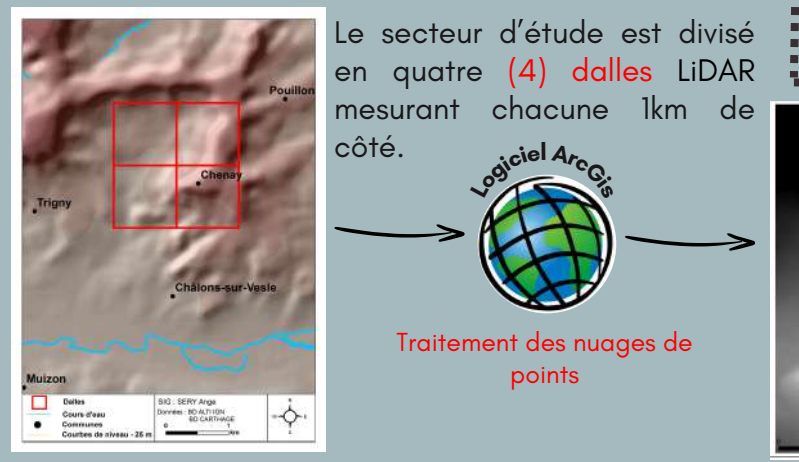
Méthode de **téledétection** utilisant la **télémétrie** (détermination de la distance à un objet) avec un faisceau de lumière.

le produit = **nuage de points** en 3D

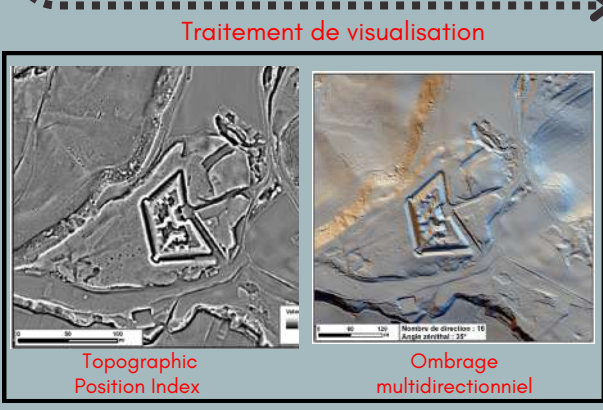


Sur notre secteur d'étude, environ **134 millions** de points ont été captés par le LiDAR. Parmi ces points, **59,21 %** ont été classés “**sols**”, **39,89 %** classés en “**végétation moyenne**” et **0,62 %** en “**construction**”.

2. Modélisation des données



MNT du secteur du fort de Chenay. les surfaces en **noir, gris** sont des zones en basse altitude et les surfaces en blanc sont des zones en hautes altitude.



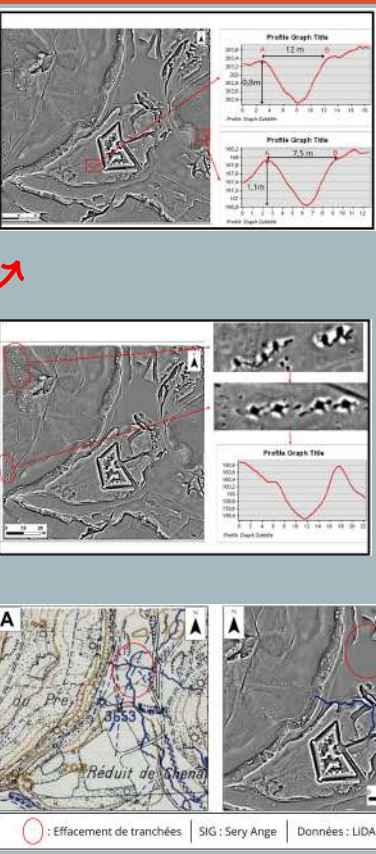
3. Résultats : digitalisation des polémoformes



Au total **228 cratères d'obus** ont été cartographiés. Ce sont principalement des cratères d'obus singuliers de classe D1 dont le **diamètre est compris entre 1,17 m et 15,38 m** environ pour une **profondeur comprise entre 0,17 et 6,58 m** environ

Au total **41 abris** ont été cartographiés. Parmi ces abris, nous avons pu identifier **9 abris** pouvant **correspondre à des batteries d'artilleries allemandes**.

Grâce au LiDAR, des **1673 m de tranchées** ont été cartographiées. Le **plan directeur de tir des GCTA**, nous a permis de confirmer que ces formes linéaires correspondent bien à des **tranchées allemandes**.



4. Valorisation du fort de Chenay



Ce fort, de dimensions réduites n'a pas subi de dégâts majeurs et reste aujourd'hui un bel exemple d'architecture militaire du XIXe siècle. Rénové en 2002, celui-ci accueille de centaine de touristes chaque année.

Facade du fort

Bibliographie

- Amat J.-P., 1987, Guerre et milieux naturels: les forêts meurtries de l'Est de la France, 70 ans après Verdun, L'Espace géographique, 16(3), p. 217-233. DOI : [10.3406/spgeo.1987.4253](https://doi.org/10.3406/spgeo.1987.4253)
- Ancelin P.-Y., 2020, Approche archéogéographique du Saint-Mont (Vosges), par croisement de données Lidar, documentaires et archéologiques. Université de Lorraine, 135 p.
- Devos A., Laratte S., Taborelli P. et Lesjean F., 2019, Un exemple de structure cellulaire de défense: la Butte de Brimont, apport des plans directeurs et du Lidar (France), Revue de géographie historique, (14-15). DOI : [10.4000/geohist.660](https://doi.org/10.4000/geohist.660)
- Hesse R., 2014, Geomorphological traces of conflict in high-resolution elevation models, Applied Geography, 46, p. 11-20. DOI : [10.1016/j.apgeog.2013.10.004](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.10.004)
- Jenness J., 2006, Topographic Position Index (TPI) v. 1.2. Repéré à Hesse R., 2014, Geomorphological traces of conflict in high-resolution elevation models, Applied Geography, 46, p. 11-20. DOI : [10.1016/j.apgeog.2013.10.004](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.10.004)
- Machado, 2018, Paysages de guerre et Lidar: de la caractérisation des polémoformes à la conservation des patrimoines naturel et culturel de la forêt domaniale de Verdun (Meuse, France) (Thèse de doctorat, Sorbonne Paris cité, Paris). Repéré : <https://theses.fr/2018USPCC033>
- Morin J., 1995, Un Vauban méconnu, le général Séré de Rivières, Revue Historique des Armées, 198(1), p. 24-32. DOI : [10.3406/rharm.1995.4424](https://doi.org/10.3406/rharm.1995.4424)

Webographie

- <https://www.chenay.fr/page/fort-chenay>

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE – UFR Lettres et Science Humaines

RAPPORT DE STAGE

Licence 3 Géographie et Aménagement

Laboratoire du Groupe d'Etude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels,
Anthropiques et Archéologiques

APPROCHE ARCHEOGEOMORPHOLOGIQUE (SIG, LIDAR) DES FORTIFICATIONS DE TYPE “SERRE DE RIVIERES” : EXEMPLE DU FORT DE CHENAY

Ange Evrard Marius SERY



M. Pierre-Yves ACELIN, Tuteur de stage, Doctorant au laboratoire GEGENAA

M. Nicolas BOLLLOT, Référent Universitaire, Maître de conférences à l'Université de Reims Champagne-Ardenne

Sommaire

Sommaire	1
Liste des figures	3
Liste des tableaux	5
Sigles et abréviations	6
Introduction	7
I. Contexte : Archéogéomorphologie des conflits de guerres	8
A. L'archéologie de la guerre.....	8
B. Les polémoformes, des vestiges archéologiques	8
C. L'archéogéomorphologie, une nouvelle approche pour cartographier les vestiges de guerre 9	
II. LIDAR : Light Detection and Ranging	10
A. Généralités techniques	10
B. Le produit d'une acquisition LiDAR : le nuage de points	11
C. L'utilisation du LiDAR dans le monde.....	12
III. Fortifications Séré de Rivières : cas du fort de Chenay	12
A. Présentation du secteur d'étude	12
B. Matériel et Méthodes	14
1. Obtention d'un Model Numérique de Terrain (MNT).....	14
2. Traitement du MNT	16
3. Elaboration d'un protocole de digitalisation.....	20
4. Caractérisation des formes.....	23
IV. Résultats	26
A. Formes ponctuelles	26
1. Cratères d'obus.....	26
2. Abris.....	27
B. Forme linéaire	29
1. Tranchées	29
C. Inventaire global.....	30
Conclusion	31

Bibliographie.....	32
Liste de annexes.....	35
Annexes	36
Table des matières	37

Liste des figures

Figure 1 : chantier archéologique près d'Ypres (Belgique). À gauche, une vue globale du chantier archéologique. À droite, les restes d'une tranchée ou d'une sape équipée de caillebotis et de claies en bois. Source : De Machado, 2018, p.51	9
Figure 2 : Classement de l'archéogéomorphologie. Source : De Machado, 2018, P 53.	10
Figure 3 : Processus de fonctionnement LiDAR. Source : Ancelin, 2020, P45.	10
Figure 4 : Schéma explicatif du fonctionnement du LiDAR aéroporté. Source : Ancelin, 2020, P.46.	11
Figure 5 : Application du LiDAR aux recherches archéologiques dans le monde. Source : Cohen et al, 2020.....	12
Figure 6 : Ceinture fortifiée de Reims : forts et ouvrages, inscrit dans les réseaux de défense de la Grande Guerre en Champagne en mai 1918. Conception : Marchand Maxence, 2024.	13
Figure 7 : Interprétation de l'image LiDAR du fort de Chenay. Conception : Sery Ange, 2024.	13
Figure 8 : Emprise spatiale des 4 dalles issus du LiDAR HD. Les dalles englobent des espaces de 1km ² (500mx500m). Conception : Sery Ange, 2024.	14
Figure 9 : Décompression des nuages de points de format « .laz » en format « .las ».	15
Figure 10 : MNT de notre secteur d'étude. Conception : Sery Ange, 2024.....	15
Figure 11 : Nombre de points par code de classification. Presque tous les échos ont été classés en sol et en végétation (99,10%). Près de la moitié (79 283 474) de points a été classé en point sol et exploités pour créer le MNT. Source : Sery Ange, 2024.	16
Figure 12 : Visualisation "ombrage" du fort de Chenay selon différents azimuts (a- 270°, b- 315°, c- 180°, d- 90°) un degré zénithal de 45° et un étirement d'histogramme linéaire « Percent clip » à 2%. La manière dont on perçoit un secteur spécifique peut changer considérablement selon l'orientation choisie. Lorsque des polémo-paysages sont parallèles à la direction de l'illumination artificielle, l'absence d'ombrage empêche de mieux les détecter. (SIG : Sery Ange, 2024).....	17
Figure 13 : Visualisation "ombrage multidirectionnel" du fort de Chenay selon différents azimuts de 35°, 16 directions différentes de l'illumination artificielle. Avec ce traitement de visualisation, nous arrivons à mieux détecter les polémoformes de notre secteur d'étude.	18
Figure 14 : Visualisation "pente" du fort de Chenay. SIG : Sery Ange, 2020.....	19
Figure 15 : Visualisation "Topographic Position Index " du fort de Chenay selon un voisinage de type « cercle, rayon : 15 pixels). Ce traitement de visualisation nous a permis d'identifier plusieurs	

polémoformes (abri, trous d'obus), qui n'était pas détectable avec les autres traitements. SIG : Sery Ange, 2024.....	20
Figure 16 : Organisation du protocole de digitalisation. Source : Ancelin, 2020, P.76.....	20
Figure 17 : Protocole de digitalisation des polémoformes correspondant à des trous d'obus. La vue en plan est une combinaison de technique de visualisation TPI et pente (50% de transparence).....	21
Figure 18 : Protocole de digitalisation des polémoformes correspondant à des abris. La vue en plan correspond à des techniques de visualisation (A, B, E : TPI ; C : SVF ; D : pente).	22
Figure 19 : Protocole de digitalisation des polémoformes correspondant à des tranchées. La vue en plan correspond à une technique de visualisation : l'ombrage multidirectionnel.....	23
Figure 20 : Extrait de la feuille « Epinal N-O » de la carte d'Etat Major (1817-1866) où est cartographié la Commune et montrant la situation du fort de Chenay.	24
Figure 21 : Extrait du plan directeur de tirs des GCTA du fort de Chenay au 1/20 000 ^e	24
Figure 22 : Visualisation du plan directeur de tir après géoréférencement avec le SCAN 25 sur Arcmap.	25
Figure 23 : Inventaire cartographique des cratères d'obus du secteur fort de Chenay.....	26
Figure 24 : Informations morphométrique (diamètre, profondeur) de deux cratères d'obus. Le profil topographique montre la forme des trous d'obus (forme en « U ») mais avec des diamètres et profondeurs différents.	27
Figure 25 : Inventaire cartographique des abris de guerre du secteur fort de Chenay.....	27
Figure 26 : Abris pouvant correspondre à des batteries d'artilleries allemandes. Ces abris sont tous orientés vers la ligne de front française.	28
Figure 27 : Excavation allemand pour bunker (fondation).....	28
Figure 28 : Inventaire cartographique des tranchées allemandes du secteur fort de Chenay.	29
Figure 29 : Documents cartographiques anciens (plan directeur de tir des GCTA [A]) comparé au LiDAR (TPI) sur lequel apparaît des tranchées [B]. Le plan directeur de tir atteste l'existence de tranchées allemandes dans un zone pas loin du fort en 1918 alors que LiDAR témoigne de l'absence de tranchées dans cette même zone (champs).	29
Figure 30 : Inventaire cartographique global du secteur du fort de Chenay.	30

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des points du nuage de points selon le format .las. Source : ASPRS. .	11
Tableau 2 : Paramètre standards conseillés pour le traitement et la visualisation de l'ombrage (d'après Kokalj et Hesse, 2017). Source : Ancelin, 2020, P61.	17
Tableau 3 : Paramètres standards conseillés pour le traitement et la visualisation de l'ombrage multidirectionnel (d'après Kokalj et Hesse, 2017). Source : Ancelin, 2020, P.62.	18
Tableau 4 : Paramètres standards conseillés pour la visualisation de l'indice de pente (d'après Kokalj et Hesse, 2017). Source : Ancelin, 2020, P.65.....	19
Tableau 5 : Paramètres standards conseillés pour le traitement et la visualisation de l'indice d'ouverture topographique TPI) (d'après Kokalj et Hesse, 2017). Source : Ancelin, 2020, P.65) ..	19
Tableau 6 : Caractéristiques du plan directeur de tir des GCTA géoréférencé et paramètres utilisés pour son géoréférencement.....	25

Sigles et abréviations

EQM : Erreur Quadratique Moyenne

GCTA : Groupe de Canevas de Tirs des Armées

LiDAR : Light Detection and Ranging

LiTV : LiDAR Visualization Toolbox

MNT : Modèle Numérique de Terrain

RTV : Relief Visualization Toolbox

SIG : Système d'Information Géographique

SVF : Sky View Factor

TPI : Topographic Position Index

Introduction

L'étude des conflits de guerre et de leurs impacts sur le paysage constitue un domaine de recherche crucial, offrant des perspectives uniques pour comprendre les événements historiques et leur répercussions géomorphologiques. Dans cette optique, l'archéogéomorphologie émerge comme une discipline essentielle, combinant les approches géomorphologiques (description morphologique), archéologiques (essai d'interprétation) et à l'histoire (conflits de guerre) (De Machado et *al.*, 2016, P.4).

Dans le cadre de ce stage, nous explorons l'apport novateur du *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*) en archéogéomorphologie des conflits de guerre, en nous focalisant sur les « polémoformes », terme employé pour désigner les formes de relief et les modelés nés de la guerre (Amat, 1987, 2001), associés au fort de Chenay.

L'utilisation du *LiDAR*, en tant que technologie de télédétection laser, s'avère être un outil particulièrement puissant pour sonder ces vestiges de guerre enfouis sous le manteau végétal ou les structures modernes. Le choix du fort de Chenay comme cas d'étude spécifique s'inscrit dans une démarche à la fois scientifique et historique. Situé dans un contexte historique riche en témoignages de conflits passés, ce site offre un terrain propice à l'exploration des méthodes d'analyses archéogéomorphologiques.

Dans ce rapport, il sera question, par l'exploitation du LiDAR acquis sur le secteur d'étude, de mise en exergue des formes du relief anthropogéniques induites par les bombardements et par l'aménagement du front de bataille. L'objectif est d'établir un inventaire cartographique du secteur d'étude mettant en lumière les polémoformes (trous d'obus, tranchées, abris) de la Grande Guerre, menacées actuellement d'effacement (érosion, remblaiement, gestion sylvicole, etc.).

I. Contexte : Archéogéomorphologie des conflits de guerres

L'étude des vestiges des conflits de guerre à travers le LiDAR constitue un domaine de recherche essentiel pour comprendre les transformations du paysage induite par ces événements historiques. Cette partie examine les fondements théoriques de cette discipline émergente.

A. L'archéologie de la guerre

Dans les années 1980, les archéologues ont commencé à réaliser l'importance des champs de bataille pour mieux comprendre l'histoire des sociétés qui ont été perturbées ou disparu. Ces endroits, où des groupes d'individus se sont rassemblés et où de nombreuses sépultures ont été découvertes, contiennent de nombreux vestiges humains et matériels tels que des artefacts et des sculptures, fournissant ainsi des informations précieuses sur les modes de vie et les sociétés du passé (De Machado, 2018). De plus, ces sites présentent souvent des caractéristiques géographiques distinctes, facilitant leur étude et leur compréhension. Pour la bataille de Waterloo par exemple, les limites du champ de bataille sont définies par des caractéristiques géographiques telles que la Ferme de Hougoumont, la Ferme de la Haye Sainte, et la butte du Lion (Bousmar, 2015), qui sont toujours présentes sur le terrain et servent de repères pour délimiter le site de la bataille. Des vestiges ou des cartes anciennes permettent de reconstruire la topographie du champ de bataille et d'identifier les éléments clés qui ont influencé le déroulement de la bataille (**Voir annexe 1**).

L'Américain Scott a été l'un des premiers à reconnaître la valeur archéologique des champs de bataille en étudiant le site de *Little Bighorn* dans la Montana, aux Etats-Unis. Ce site fut un théâtre d'affrontement entre Américain et Amérindiens le 25 juin 1876. Dans son étude initiale importante (Scott *et al.*, 1989), il considère « *les champs de bataille comme des laboratoires d'observations du comportement humain* », offrant une « *opportunité unique d'étudier les matérialités produites par les conflits humains* ».

L'étude de guerre à travers l'archéologie permet de mieux comprendre les dynamiques sociales, économiques et environnementales qui ont façonné les sociétés humaines au fil du temps. Par exemple, les recherches de Birger *et al* (2016) sur les cratères de mine dans le saillant d'Ypres mettent en évidence de milliers de photographies aériennes contemporaines utilisées pour détecter et comprendre le paysage historique des cratères de mine le long de l'ancien front occidental en Belgique.

B. Les polémoformes, des vestiges archéologiques

Les polémoformes, terme employé pour désigner les formes de relief et modelés induites par les conflits passés (Amat, 1987, 2001). En effet, d'après l'article L510-1 du code du patrimoine, « *constituent des éléments du patrimoine archéologique tous les vestiges et autres traces de l'existence de l'humanité, dont la sauvegarde et l'étude [...] permettent de retracer le*

développement de l'histoire de l'humanité et de sa relation avec l'environnement naturel » (Légifrance, 2016). A partir du moment où elles constituent les témoins d'une occupation humaine passée, les polémoformes constituent des vestiges de guerre (De Machado, 2018). Dans le cadre des conflits de guerre, ces vestiges comprennent principalement des formes de relief telles que des tranchées, des abris, et des cratères d'obus, offrant la possibilité de comprendre le mode de vie des soldats et leurs manières d'interagir avec le milieu naturel.



Figure 1 : chantier archéologique près d'Ypres (Belgique). À gauche, une vue globale du chantier archéologique. À droite, les restes d'une tranchée ou d'une sape équipée de caillebotis et de claies en bois. Source : De Machado, 2018, p.51

C. L'archéogéomorphologie, une nouvelle approche pour cartographier les vestiges de guerre

L'archéogéomorphologie est un concept évoqué pour la première fois par l'archéologue américaine Wandsnider en 1992 pour désigner l'ensemble des études qui examinent les vestiges archéologiques du point de vue de la géomorphologie, sans recourir aux techniques des archéologues. Quand elle est appliquée aux vestiges de guerre, on parle alors d'archéogéomorphologie de la guerre (Hesse, 2014 ; Gheyle *et al.*, 2018). En France et dans pas mal de pays, la plupart des études archéogéomorphologiques sont souvent classées dans le domaine de la géoarchéologie, bien qu'il y ait une distinction claire entre ces deux disciplines. Réaliser à travers les fouilles sur le terrain, une étude archéologique vise à reconstituer le paléo-environnement, c'est-à-dire l'état des paysages anciens, afin d'analyser l'implantation d'un site archéologique et ses interactions avec son environnement historique (De Machado, 2018). Tandis que l'étude archéogéomorphologie constitue une simple mise en valeur du relief à caractère archéologique grâce aux SIG et à la télédétection. « *« Ainsi, le positionnement des tranchées de la Première Guerre mondiale ou la localisation des campements de la Seconde Guerre mondiale sont des questions d'archéogéomorphologie, notamment parce que ces sites archéologiques peuvent être interprétés sans nécessairement être fouillés ».* » (De Machado, 2018).

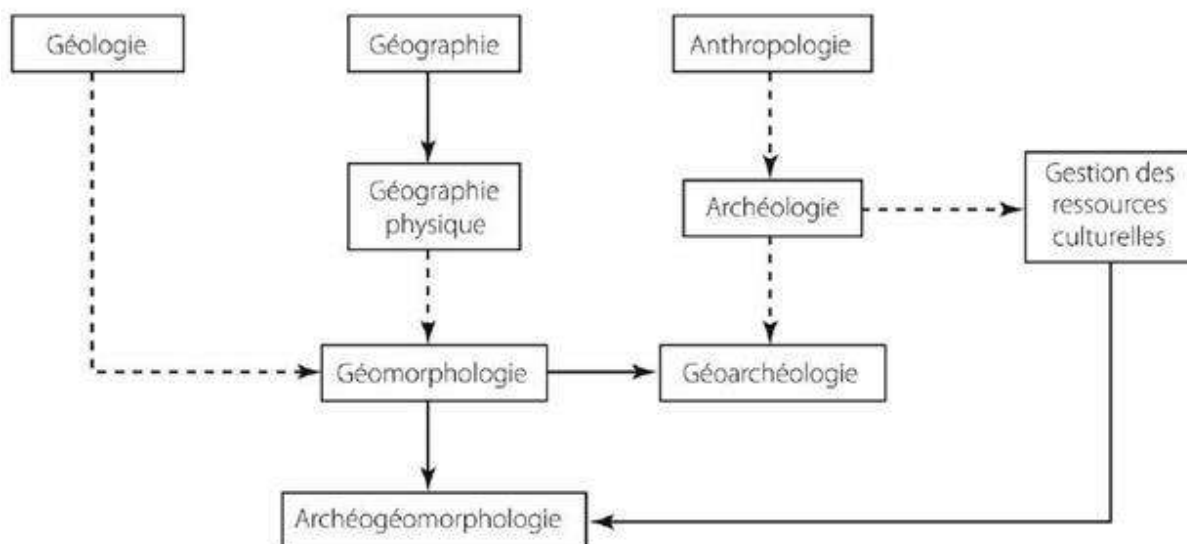


Figure 2 : Classement de l'archéogéomorphologie. Source : De Machado, 2018, P 53.

II. LIDAR : Light Detection and Ranging

A. Généralités techniques

Le LiDAR, acronyme de l'expression anglaise "*Light Detection and Ranging*", est un dispositif de télédétection utilisant des lasers. Le principe du fonctionnement du LiDAR, réside dans le fait qu'il émet un rayonnement artificiel (émetteur), réfléchi par le sol ou l'atmosphère, et la réception de son écho (récepteur) (**fig.3**). Cela, lui permet de se ranger parmi les capteurs actifs,

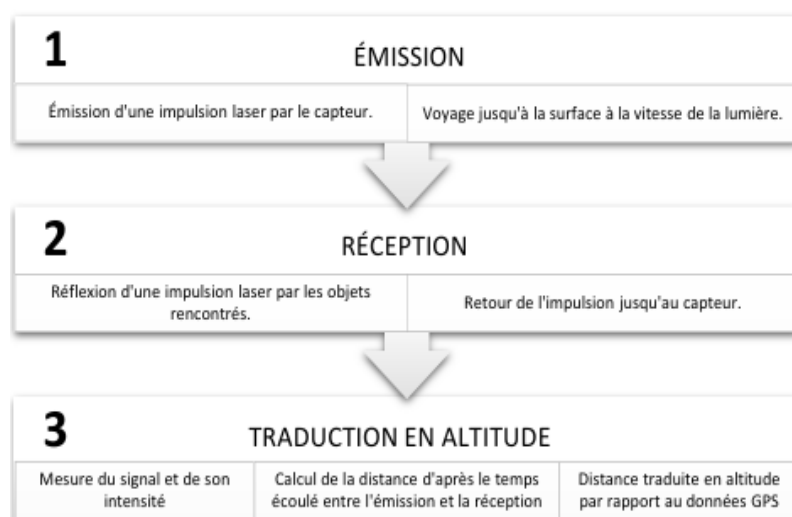


Figure 3 : Processus de fonctionnement LiDAR. Source : Ancelin, 2020, P45.

contrairement aux capteurs passifs qui mesurent la rayonnement émis par une source naturelle (Sahar Ben Hmida, 2018). Cette méthode permet au LiDAR de fonctionner indépendamment de l'éclairage des surfaces et de la luminosité, ce qui lui permet de réaliser des mesures dans des endroits clos sans

nécessiter une source de lumière externe. De plus, en mesurant le temps mis par la lumière pour voyager de l'avion au point de rebond, nous pouvons déterminer la distance entre les deux (**fig.4**). Le système envoie et reçoit des centaines de milliers d'impulsions laser par seconde tout en se déplaçant pour couvrir efficacement la zone d'étude.

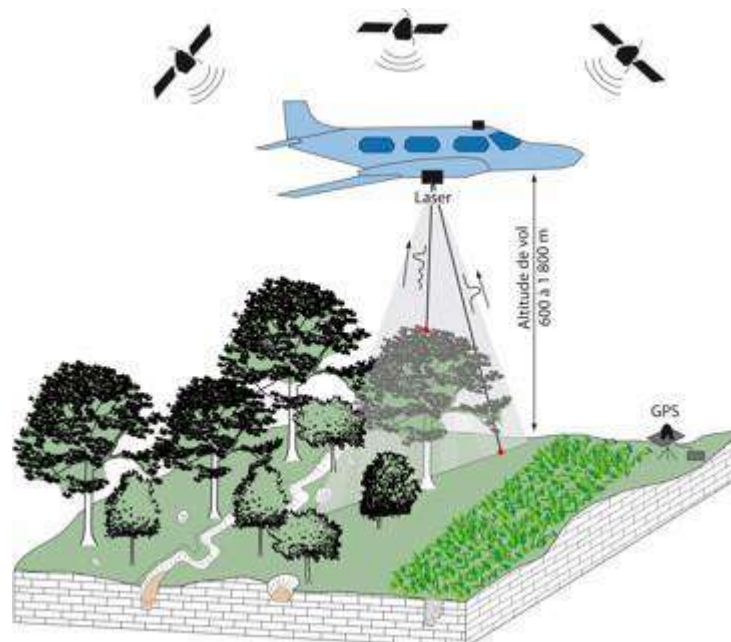


Figure 4 : Schéma explicatif du fonctionnement du LiDAR aéroporté. Source : Ancelin, 2020, P.46.

B. Le produit d'une acquisition LiDAR : le nuage de points

Le terme “*nuage de points*” désigne les données collectées par le LiDAR, regroupant tous les points acquis lors d'une acquisition LiDAR pour représenter la zone étudiée. En raison de la grande quantité de données générées, ce nuage est souvent divisé en tuiles pour en faciliter la manipulation.

Il existe plusieurs formats disponibles pour manipuler les données LiDAR, mais nous allons nous focaliser sur le format «*.las* » qui est le plus couramment utilisé et constitue le format que nous avons utilisé. Ce standard de gestion de données LiDAR a été créé par l'ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) et contient une multitude d'informations sur le nuage de points, telles que l'intensité, la classe, l'ordre de retour (premier, deuxième, etc.) et l'angle de réception de chaque point.

En ce qui concerne les points, ils sont repartis en 31 catégories distinctes qui englobent divers aspects, tels que les caractéristiques représentées par le point (végétation, voie ferrée, route, eau, etc.). Le tableau 1 montre les 7 premières classes de la classification.

Numéro de Classe	Signification
0	Créé, Jamais classifié
1	Non classifié
2	Sol
3	Basse végétation
4	Moyenne végétation
5	Haute végétation
6	Bâtiment

Tableau 1 : Classification des points du nuage de points selon le format *.las*. Source : ASPRS.

C. L'utilisation du LiDAR dans le monde

Le LiDAR est largement utilisé à travers le monde pour cartographier la topographie, ce qui ouvre la voie à de nombreuses applications telles que l'étude de l'évolution du littoral, l'analyse des effets des séismes sur la topographie locale et la localisation des sites archéologiques à travers le monde.

De nombreux pays choisissent le LiDAR comme outil de cartographie de leur territoire, mais le coût élevé de sa mise en place à l'échelle nationale entraîne une inégalité dans son application à l'échelle mondiale. En Amérique, les États-Unis possèdent une couverture d'une grande partie du territoire acquise par l'USGS (United States Geological Survey) et en libre accès. En Europe, c'est aussi le cas du Royaume-Uni possédant des données LiDAR de l'ensemble de son territoire. En France, le programme LiDAR HD prévoit la couverture complète du territoire métropolitain et d'outre-mer (hors Guyane) d'ici 2025 ([LiDAR HD | Géoservices \(ign.fr\)](#)).

COHEN et al. (2020) ont établi une carte représentant l'utilisation des données LiDAR dans les recherches archéologiques (**fig.5**).

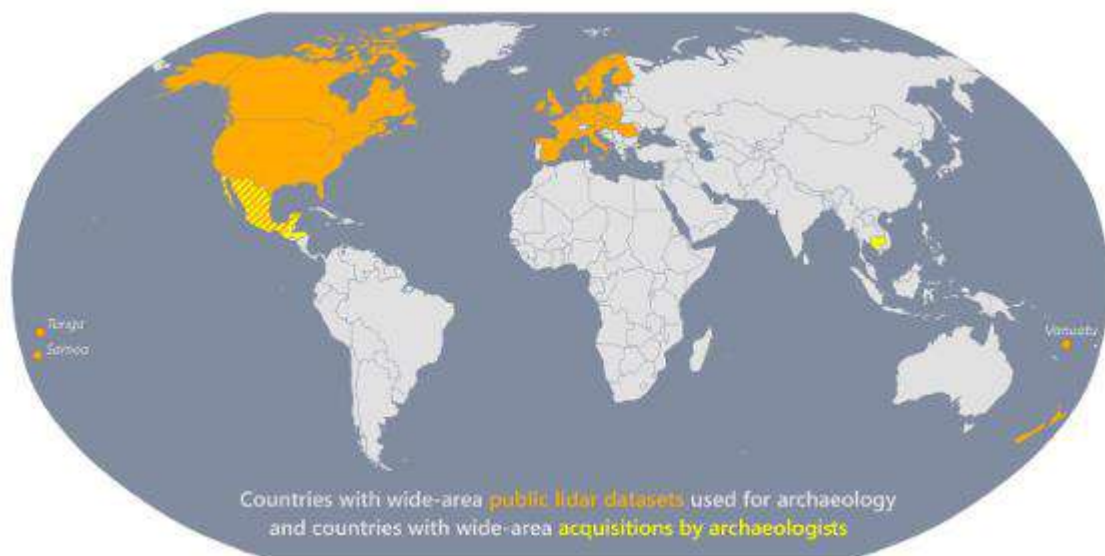


Figure 5 : Application du LiDAR aux recherches archéologiques dans le monde. Source : Cohen et al, 2020.

III. Fortifications Séré de Rivières : cas du fort de Chenay

A. Présentation du secteur d'étude

Les fortifications Séré de Rivières correspondent à des constructions sous formes de batteries polygonales, qui remontent aux années 1874-1886 et entourées de fossés défendus par des caponnières et parfois par des grilles (Morin, 1995).

Le fort ou Réduit de Chenay a été construit entre 1879 et 1880. Il s'inscrit dans la ceinture de forts autour de Reims, du second rideau Séré de Rivières, avec les forts de Montbré, de la Pompelle,

de Nogent, de Witry, de Fresnes, de Saint-Thierry, la vigile de Berru et sa batterie (Devos *et al.*, 2019 ; **fig. 6**).

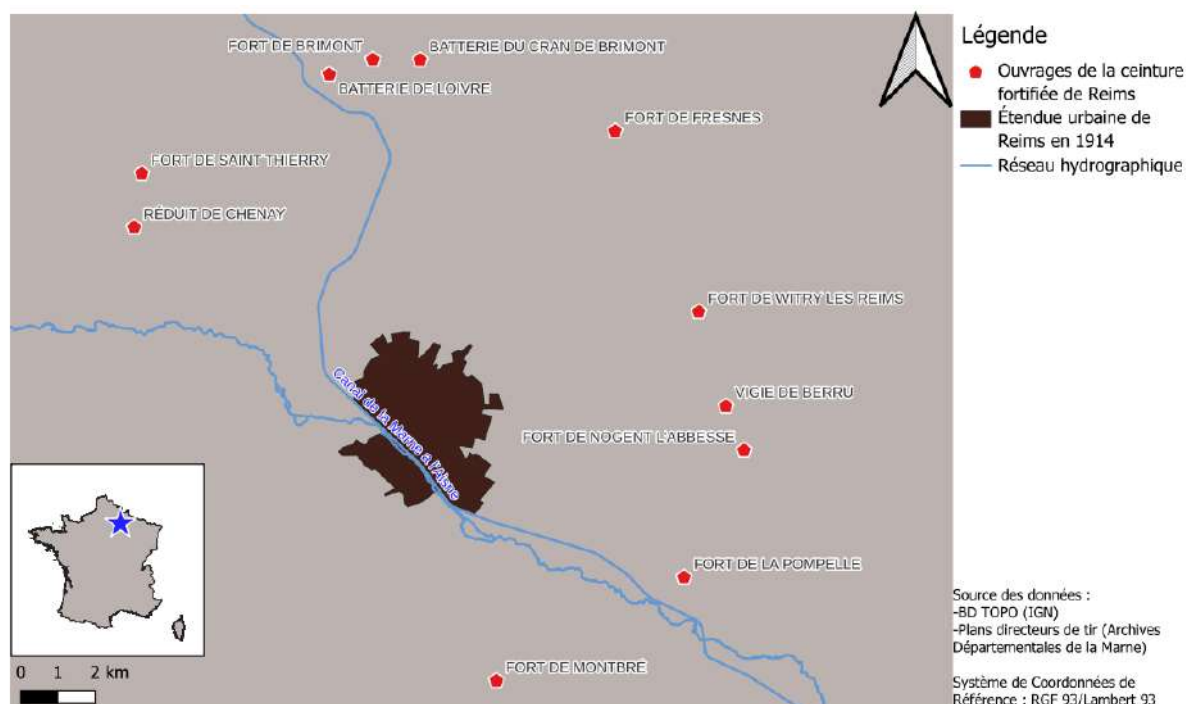


Figure 6 : Ceinture fortifiée de Reims : forts et ouvrages, inscrit dans les réseaux de défense de la Grande Guerre en Champagne en mai 1918. Conception : Marchand Maxence, 2024.

Cet ouvrage servait plus précisément de bâtiment de renfort au fort de Saint-Thierry situé un peu plus au nord à environ 2km. Le réduit a été construite en pierre de taille et meulière, ses bâtiments sont à moitié enterrés avec enherbement des toits. Il pouvait accueillir jusqu'à 130 soldats. Ce fort de dimensions réduites n'a subi de dégâts majeurs et reste aujourd'hui un bel exemple d'architecture militaire du XIXe siècle. Etant mal orienté par rapport à la ligne de front car inscrit dans le réseau de défense allemand (Taborelli, 2018), de nombreux aménagement (traverses, caponnière simple, plateforme d'artillerie, fossés, escarpe et contrescarpe) ont été fait sur le fort pour pallier cette mauvaise orientation (**fig.7**).

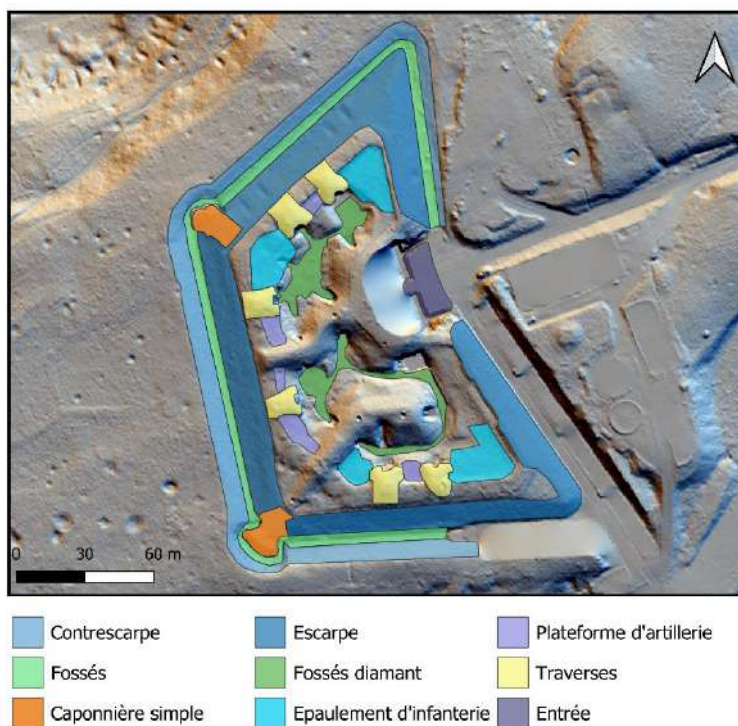


Figure 7 : Interprétation de l'image LiDAR du fort de Chenay. Conception : Sery Ange, 2024.

B. Matériel et Méthodes

1. Obtention d'un Model Numérique de Terrain (MNT)

1.1. Détermination du secteur d'étude

Le secteur d'étude est divisé en quatre (4) dalles lidar couvrant une superficie totale de 92 hectares (**fig.8**).

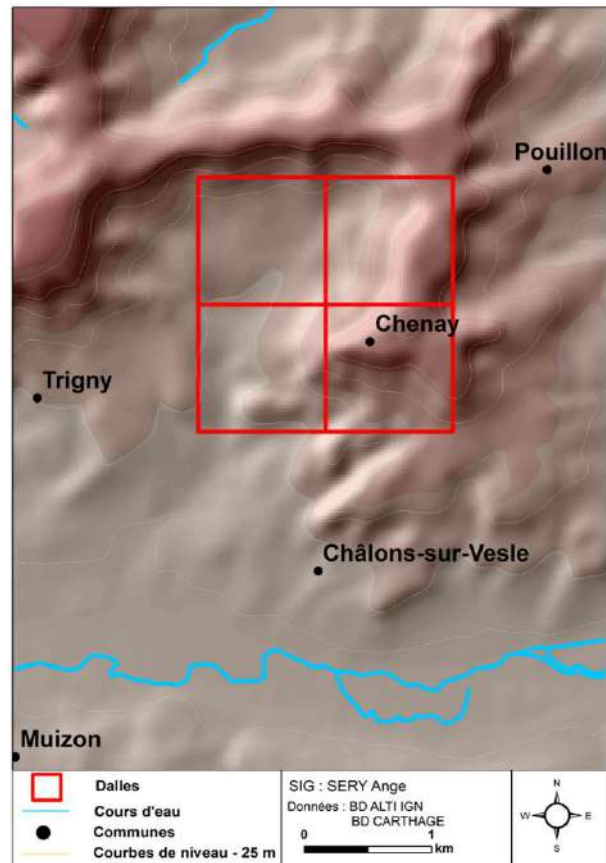


Figure 8 : Emprise spatiale des 4 dalles issues du LiDAR HD. Les dalles englobent des espaces de 1km² (500mx500m). Conception : Sery Ange, 2024.

1.2. Téléchargement de la donnée brute

Les données que nous avons téléchargées, sont sous la forme de nuage de points compressés (*.laz), classifiées, couvrant une zone d'un kilomètre carré.

Les données sont disponibles gratuitement depuis le portail Géoservices dédié en ligne, à l'adresse suivante : <https://geoservices.ign.fr/lidarhd>.

1.3. Décompression de la donnée brute

Une fois les données téléchargées, sous formes de nuage de points compressés (*.laz), il a fallu les décompresser. Pour ce faire, nous avons utilisé l'outil LAStools. Dans un premier temps, nous avons renseigné au logiciel « un premier chemin d'accès » [1], qui avait pour but d'indiquer l'endroit de stockage des points laz. Ensuite, nous avons renseigné un « deuxième chemin d'accès

» [2], qui avait aussi pour but d'indiquer l'endroit d'enregistrement des nuages de points décompressés (*.las) (**fig.9**).

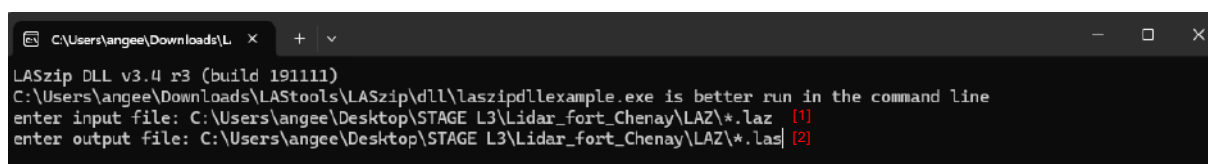


Figure 9 : Décompression des nuages de points de format « .laz » en format « .las ».

1.4. Création du MNT sur Arcmap

La création du MNT sur Arcmap s'est fait en plusieurs étapes. D'abord, nous avons connecté notre base de données au logiciel afin d'avoir accès à nos nuages de points décompressés (*.las). Ensuite, nous avons créé un jeu de donnée LAS (*.lasd), permettant de stocker en un seul fichier, l'ensemble de nos données lidar aéroportées. Le jeu de données LAS nous a permis en quelque sorte d'examiner nos nuages de points (*.las), dans leur format natif, rapidement et facilement, car il fournit des statistiques détaillées (**fig.11**) et la couverture de la zone des données lidars contenus dans les fichiers LAS. Enfin, grâce à la toolbox opensource Las Dataset to Raster sur ArcGIS, nous avons pu créer notre MNT avec une valeur d'échantillonnage de 50 cm (**fig.10**).

N.B. Avant de lancer la création du MNT grâce à la toolbox opensource Las Dataset to Raster, il faut définir au préalable les filtres de points sous l'onglet **Filtre** de la boîte de dialogue **Propriété de la couche** du jeu de données LAS. Les propriétés de filtrage sont très importantes, car elles déterminent les points des fichiers LAS à traiter. Dans notre cas, nous avons utilisé uniquement les points de type « Sol ».

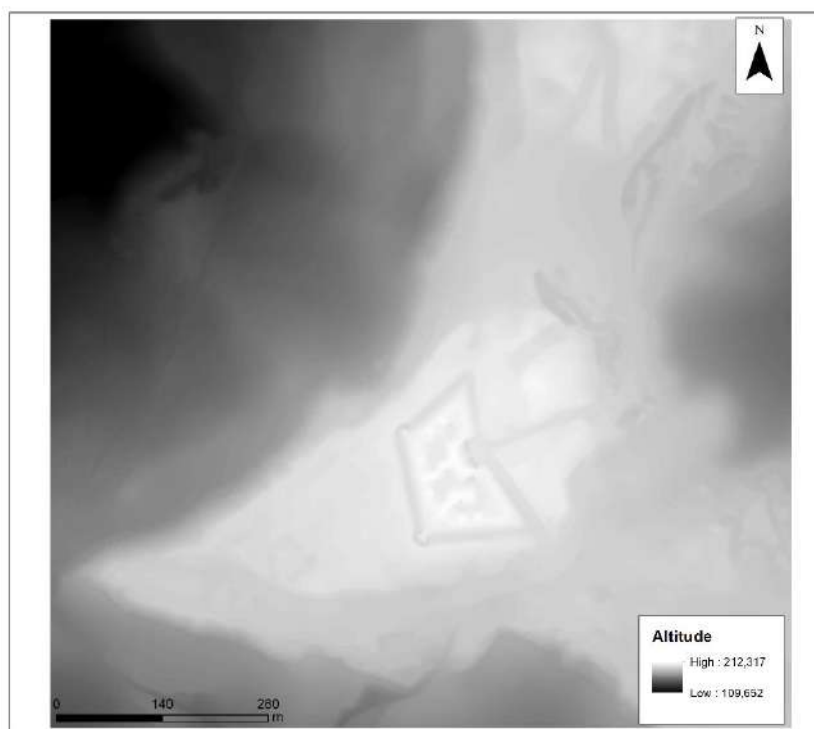


Figure 10 : MNT du secteur d'étude. Conception : Sery Ange, 2024.

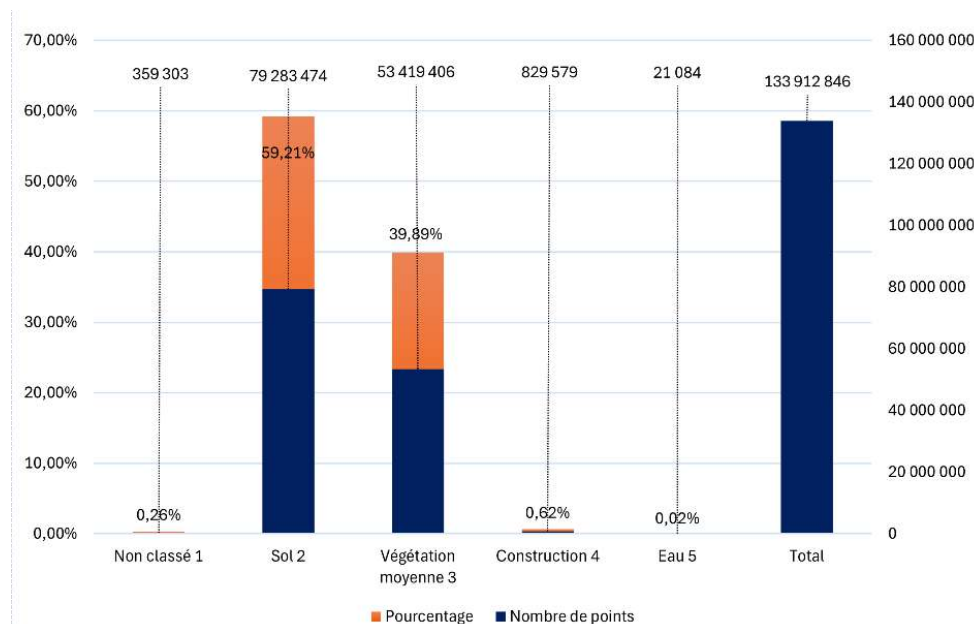


Figure 11 : Nombre de points par code de classification. Presque tous les échos ont été classés en sol et en végétation (99,10%). Près de la moitié (79 283 474) de points a été classé en point sol et exploités pour créer le MNT. Source : Sery Ange, 2024.

2. Traitement du MNT

Traditionnellement, les traitements de visualisation sont réalisés à l'aide de logiciels SIG comme QGIS et ARCGIS, qui offrent des outils de traitement. En plus de ces logiciels classiques, deux boîtes à outils ont été mises à disposition depuis 2015, simplifiant ainsi l'application d'une grande variété de visualisations (Kokalj et Hesse, 2017 ; Crutchley, 2018) : La LiDAR visualisation Toolbox (LiVT) et La Relief Visualization Toolbox (RVT). Dans le cadre du stage, les techniques de visualisation explorées sont issues d'Arcmap (en général pour les plus simples) et de la RVT.

2.1. Relief Visualization Toolbox (RVT)

La Relief Visualization Toolbox (<https://iaps.zrc-sazu.si/en/rvt>) créé par Ziga Kokalj de l'Institute of Anthropological and Spatial Studies (Scientific Research Centre of Slovenia) est disponible via l'application IDL Virtual Machine, ne nécessitant donc pas de logiciel externe pour son lancement. Seuls les paramètres essentiels sont inclus dans une série de traitements reconnus par la communauté scientifique pour la visualisation et la détection d'anomalies topographiques en archéologie. La conversion des rasters en GEOTIFF (via l'extension « convert ») permet une compatibilité avec de nombreux formats dans la RVT. De plus, cette boîte à outils est capable d'assembler des rasters (via l'extension « mosaïc ») et encourage la simplification des techniques en proposant un outil de fusion d'images (via l'extension « mixer ») (Ancelin, 2020).

Selon De Matos-Machado (2018), les traitements de visualisation se divisent principalement en deux approches : l'analyse de la lumière et l'approche topographique.

2.1.1. Par l'analyse de la lumière

• Ombrage

L'ombrage (analytical hill-shading) développé par Yoëli (1965) est une simulation d'une illumination de terrain par une source lumineuse artificielle reproduisant la lumière du soleil et générant un ombrage du relief (De Matos-Machado, 2028 ; Stular et al., 2012). La provenance de cette source lumineuse artificielle dépend de l'azimut (0 à 360°) et de l'angle zénithal (0 à 90°) choisis en amont. En fonction du type de relief (accidenté ou peu accidenté), des réglages par défaut (Kokalj et Hesse, 2017) (**tab.2**) ont été défini pour permettre une meilleure lisibilité des anomalies topographiques.

Paramètres du traitement	Général	Relief peu accidenté	Relief accidenté	Logiciel
Zénith (0 à 90°)	35°	5°	45°	Relief Visualization Toolbox
Azimut (0 à 360°)	0-360°	0-360°	0-360°	
Étirement d'histogramme	Étirement linéaire 2%	Étirement linéaire 2%	Étirement linéaire 2%	

Tableau 2 : Paramètre standards conseillés pour le traitement et la visualisation de l'ombrage (d'après Kokalj et Hesse, 2017). Source : Ancelin, 2020, P61.

Cependant, il existe deux limites à sa capacité d'interprétation (Devereux et al., 2008 ; Chevigny et al., 2018 ; Schindling et Gibbes, 2014) :

- La nécessité de produire plusieurs images avec des paramètres différents afin de visualiser toutes les caractéristiques du paysage car les vestiges parallèles à l'azimut ne se perçoivent pas (**fig.12**) ;
- La présence d'ombres portées cachant possiblement certaines anomalies, en particulier dans un relief accidenté et avec un ombrage rasant (Ancelin, 2020).

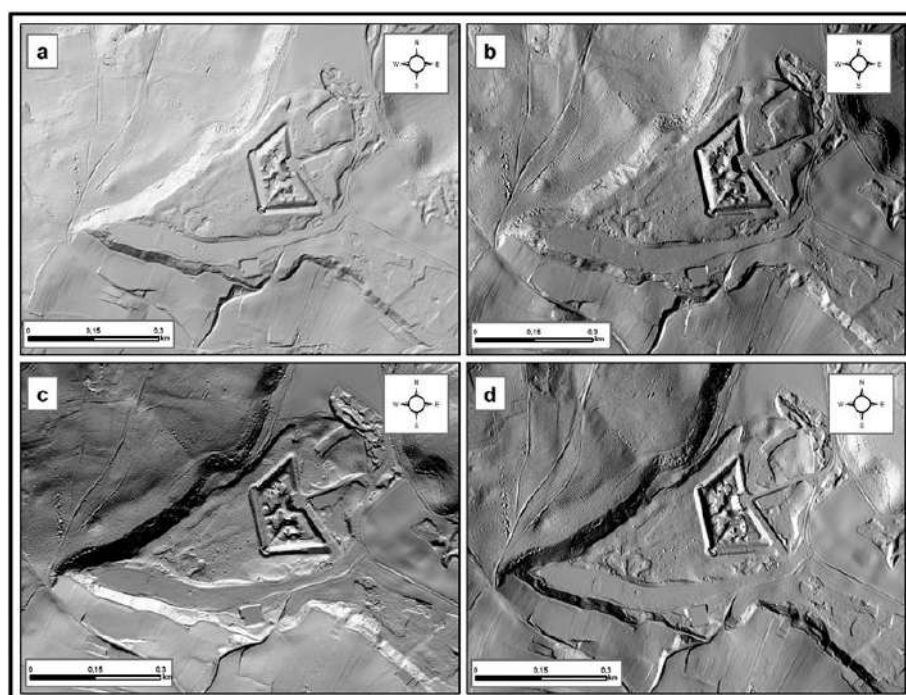


Figure 12 : Visualisation "ombrage" du fort de Chenay selon différents azimuts (a- 270°, b- 315°, c- 180°, d- 90°) un degré zénithal de 45° et un étirement d'histogramme linéaire « Percent clip » à 2%. La manière dont on perçoit un secteur spécifique peut changer considérablement selon l'orientation choisie. Lorsque des polémo-paysages sont parallèles à la direction de l'illumination artificielle, l'absence d'ombrage empêche de mieux les détecter. (SIG : Sery Ange, 2024).

- **Ombrage multidirectionnel**

Pour pallier les défauts de l'ombrage, des chercheurs se sont orientés vers d'autres alternatives tels que l'ombrage multidirectionnel (**fig.13**). L'**ombrage multidirectionnel** fait apparaître sur la même image l'illumination artificielle d'une surface depuis plusieurs azimuts (Ancelin, 2020, P.67). Plutôt que de paramétrer un azimut, cet indice requiert la mise en place d'un certain nombre de directions d'illumination réparties de manière égale sur un cercle complet de 360° (**tab.3**). Toutefois, il possède lui aussi des inconvénients comme l'apparition de possibles illusions d'optique faussant notre interprétation de la topographie (des objets creux peuvent paraître en surélévation ; Kokalj *et al.*, 2011 ; Hesse, 2014) et de redondance de l'information (Ancelin, 2020).

Paramètres du traitement	Général	Relief peu accidenté	Relief accidenté	Logiciel
Rayon (en mm)	10	10	10	Relief Visualization Toolbox
Nombre de directions (4-360)	16	16	16	
Etirement d'histogramme	Etirement linéaire 0,65 (min) - 1 (max)	Etirement linéaire 0,9 (min) - 1 (max)	Etirement linéaire 0,55 (min) - 1 (max)	

Tableau 3 : Paramètres standards conseillés pour le traitement et la visualisation de l'ombrage multidirectionnel (d'après Kokalj et Hesse, 2017). Source : Ancelin, 2020, P.62.

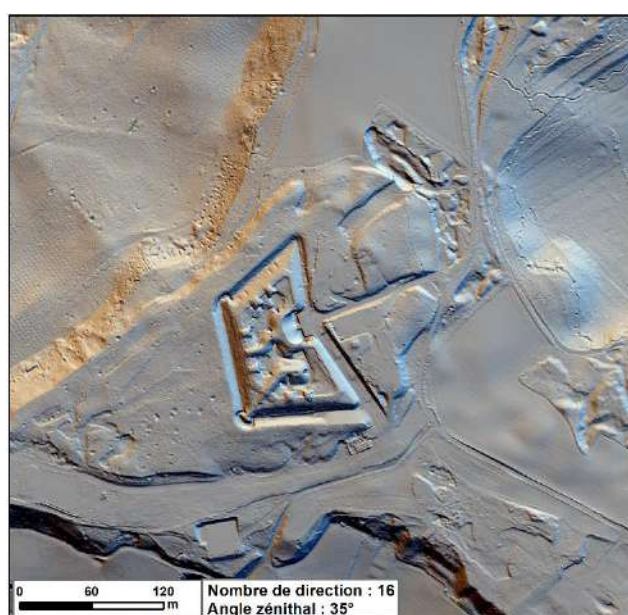


Figure 13 : Visualisation "ombrage multidirectionnel" du fort de Chenay selon différents azimuts de 35°, 16 directions différentes de l'illumination artificielle. Avec ce traitement de visualisation, nous arrivons à mieux détecter les polémoformes de notre secteur d'étude.

2.1.2. Par l'analyse de la topographie

- **Pente**

La pente est un modèle dérivé très utilisé et intelligible par sa simplicité de calcul et d'utilisation (Bennett *et al.*, 2012 ; De Machado, 2018 ; **tab.4**). Cette méthode de visualisation permet de mieux

apprécier les formes de relief présentant des ruptures dans leur profil topographique. Elle a l'avantage de mieux valoriser le contour des objets que les autres méthodes présentées (De Machado, 2018) mais limitée car elle ne différencie pas les formes convexes et concaves (Kokalj et Hesse, 2017 ; Kokalj et Somrak, 2019).

Paramètres du traitement	Général	Relief peu accidenté	Relief accidenté	Logiciel
Etirement d'histogramme	Etirement linéaire 0 - 50°	Etirement linéaire 0 - 15°	Etirement linéaire 0 - 60°	ArcGIS Spatial Analyst

Tableau 4 : Paramètres standards conseillés pour la visualisation de l'indice de pente (d'après Kokalj et Hesse, 2017).
Source : Ancelin, 2020, P.65.

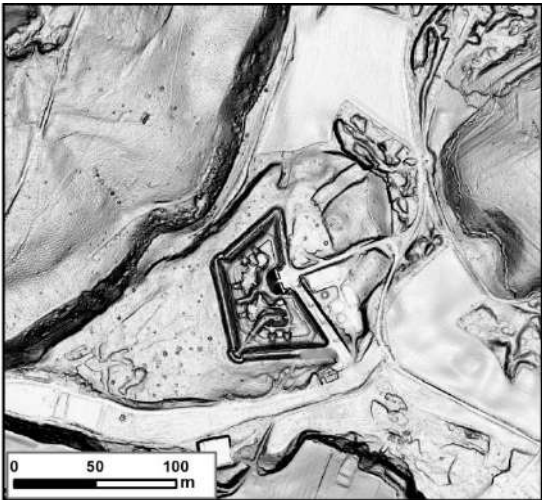


Figure 14 : Visualisation "pente" du fort de Chenay. SIG : Sery Ange, 2020.

- Topographic Position Index (TPI)**

Le Topographic Position Index (TPI) correspond à la différence entre la Valeur d'altitude d'une cellule et l'altitude moyenne du voisinage autour de cette cellule (Jenness, 2006). Le résultat est fortement influencé par l'échelle utilisée (**voir annexe 2**), qui est déterminée par la taille du voisinage (**tab.5**). Étant donné l'inefficacité de la plupart des techniques pour cartographier les grandes formes du relief telles que les vallées, les plateaux et les montagnes, le TPI s'avère précieux pour les mettre en évidence sur les cartes produites. Sur ces cartes, les valeurs négatives indiquent des altitudes inférieures à leur environnement, tandis que les valeurs positives correspondent à des altitudes supérieures (De Matos-Machado, 2018 ; Jenness, 2006).

Paramètres du traitement	Général	Relief peu accidenté	Relief accidenté	Logiciel
Type de voisinage	cercle	cercle	cercle	Topography Tool 10.3 (opensource - ArcGis)
Rayon (en pixels)	Microformes : 10 Macroformes : 50	Microformes : 10 Macroformes : 50	Microformes : 10 Macroformes : 50	
Etirement d'histogramme	Etirement linéaire 0-50°	Etirement linéaire 0-15°	Etirement linéaire 0-60°	

Tableau 5 : Paramètres standards conseillés pour le traitement et la visualisation de l'indice d'ouverture topographique (TPI) (d'après Kokalj et Hesse, 2017). Source : Ancelin, 2020, P.65)

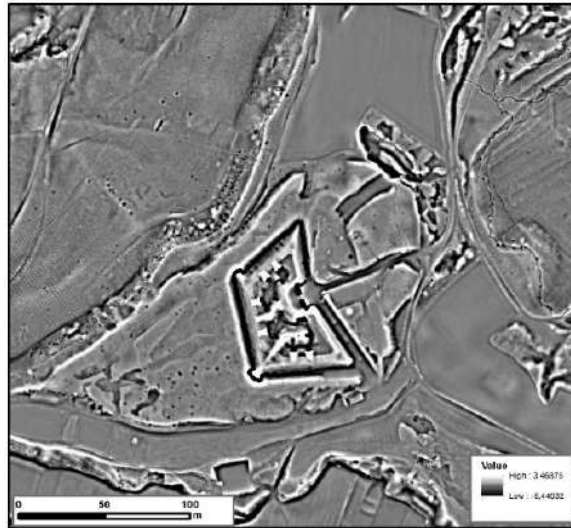


Figure 15 : Visualisation "Topographic Position Index " du fort de Chenay selon un voisinage de type « cercle, rayon : 15 pixels). Ce traitement de visualisation nous a permis d'identifier plusieurs polémoformes (abri, trous d'obus), qui n'était pas détectable avec les autres traitements. SIG : Sery Ange, 2024.

3. Elaboration d'un protocole de digitalisation

Afin de mettre en œuvre une approche rigoureuse dans la digitalisation des anomalies rencontrées sur notre secteur d'étude, il est impératif de développer un protocole méthodique et précis encadrant l'exploitation des données LiDAR. L'élaboration de ce protocole de digitalisation possède deux avantages méthodologiques impératifs (Ancelin, 2020, p 67) :

- La standardisation du processus de cartographie, essentielle pour permettre sa reproduction autonome.
- L'exposition claire des normes qui ont guidé le travail de cartographie, permettant sa critique et son évaluation par d'autres personnes.

TYPE DE STRUCTURE	DEFINITION MORPHOLOGIQUE	NORMES CARTOGRAPHIQUES
PROFIL TOPOGRAPHIQUE		VUE EN PLAN

Figure 16 : Organisation du protocole de digitalisation. Source : Ancelin, 2020, P.76.

Les polémoformes (vestiges de guerre) sont classés en fonction de leurs attributs morphologiques pour établir des normes de cartographie guidant la distinction des entités

numérisées. Les caractéristiques topographiques et morphologiques sont incluses dans le protocole pour améliorer leur identification, avec un exemple de profil et une représentation en plan pour mieux les visualiser (**fig.16**).

Le protocole concerne principalement les polémoformes tels que : les cratères d'obus, les abris et les tranchées.

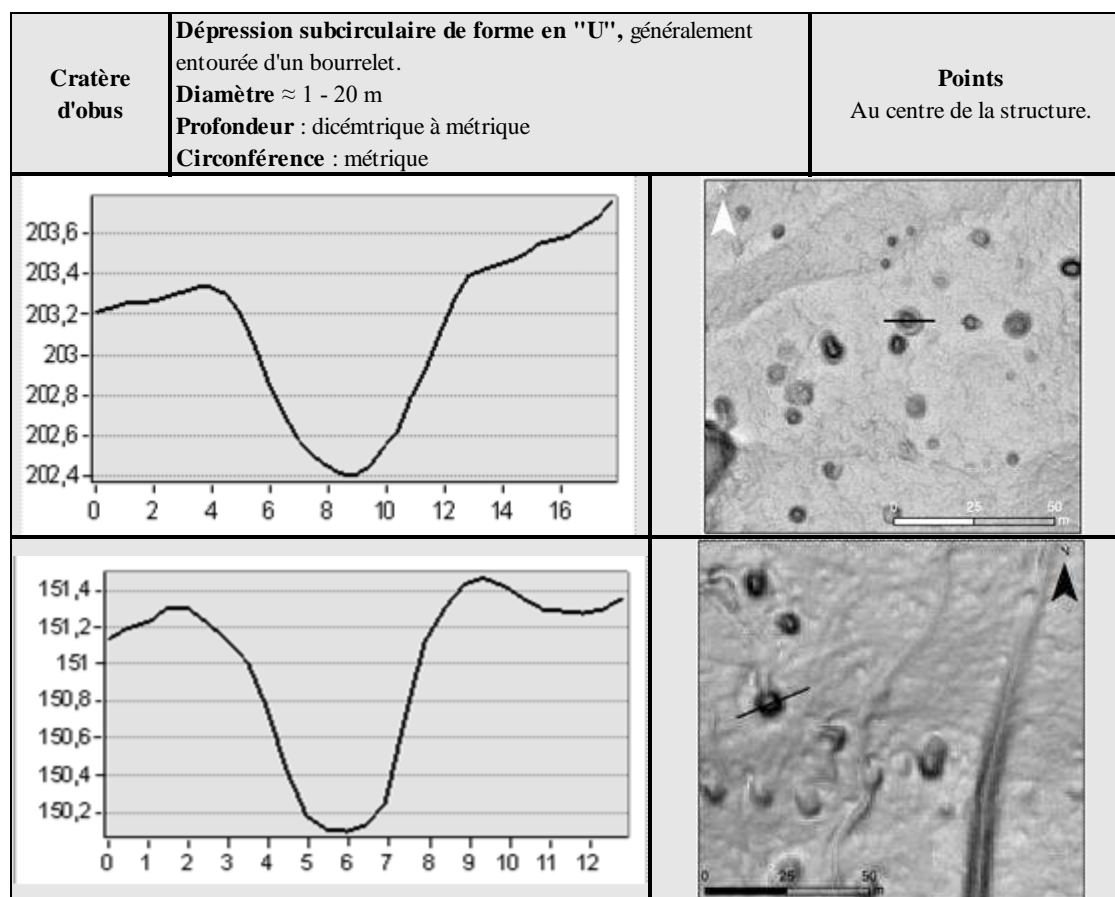


Figure 17 : Protocole de digitalisation des polémoformes correspondant à des trous d'obus. La vue en plan est une combinaison de technique de visualisation TPI et pente (50% de transparence).

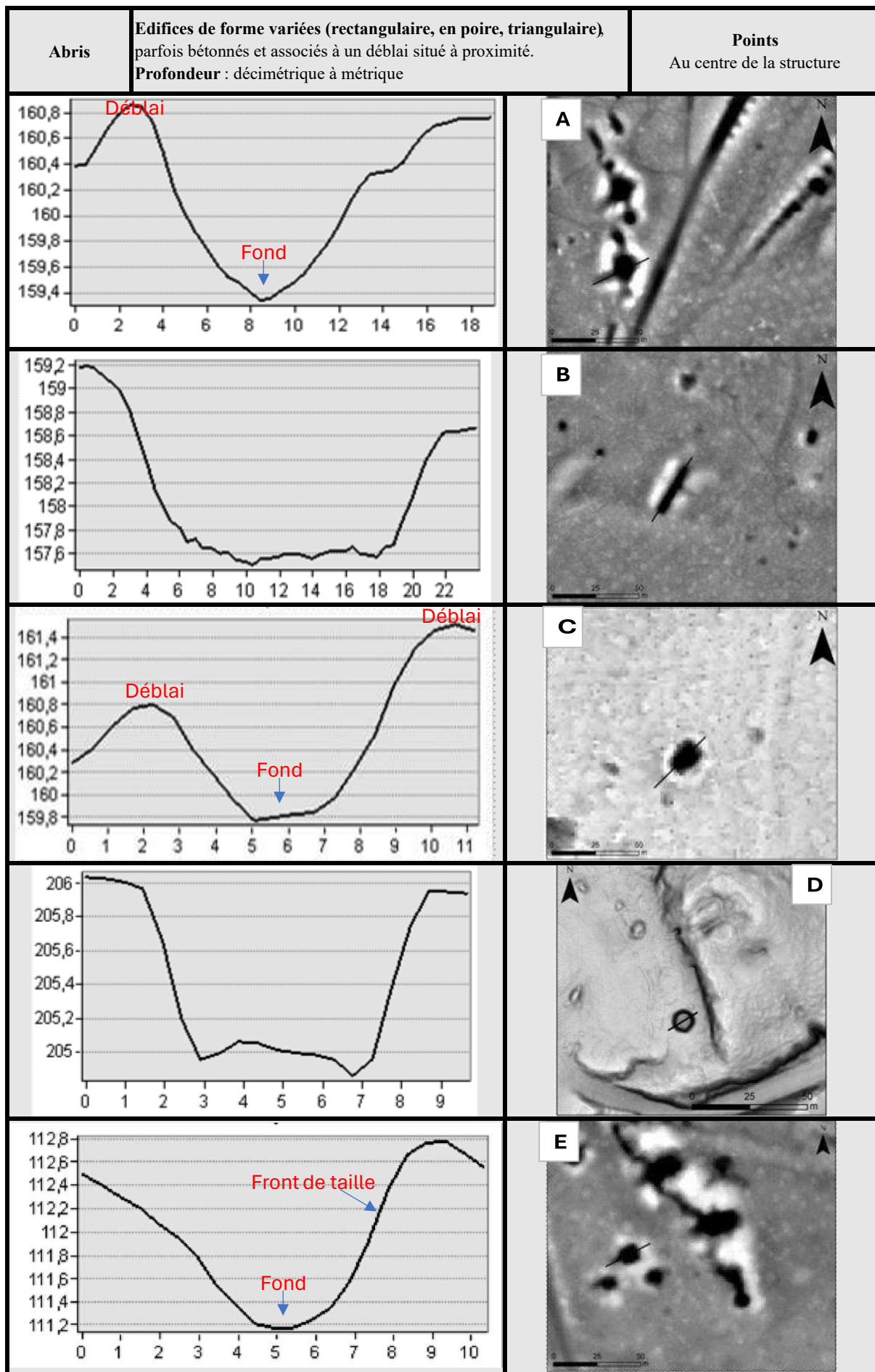


Figure 18 : Protocole de digitalisation des polémoformes correspondant à des abris. La vue en plan correspond à des techniques de visualisation (A, B, E : TPI ; C : SVF ; D : pente).

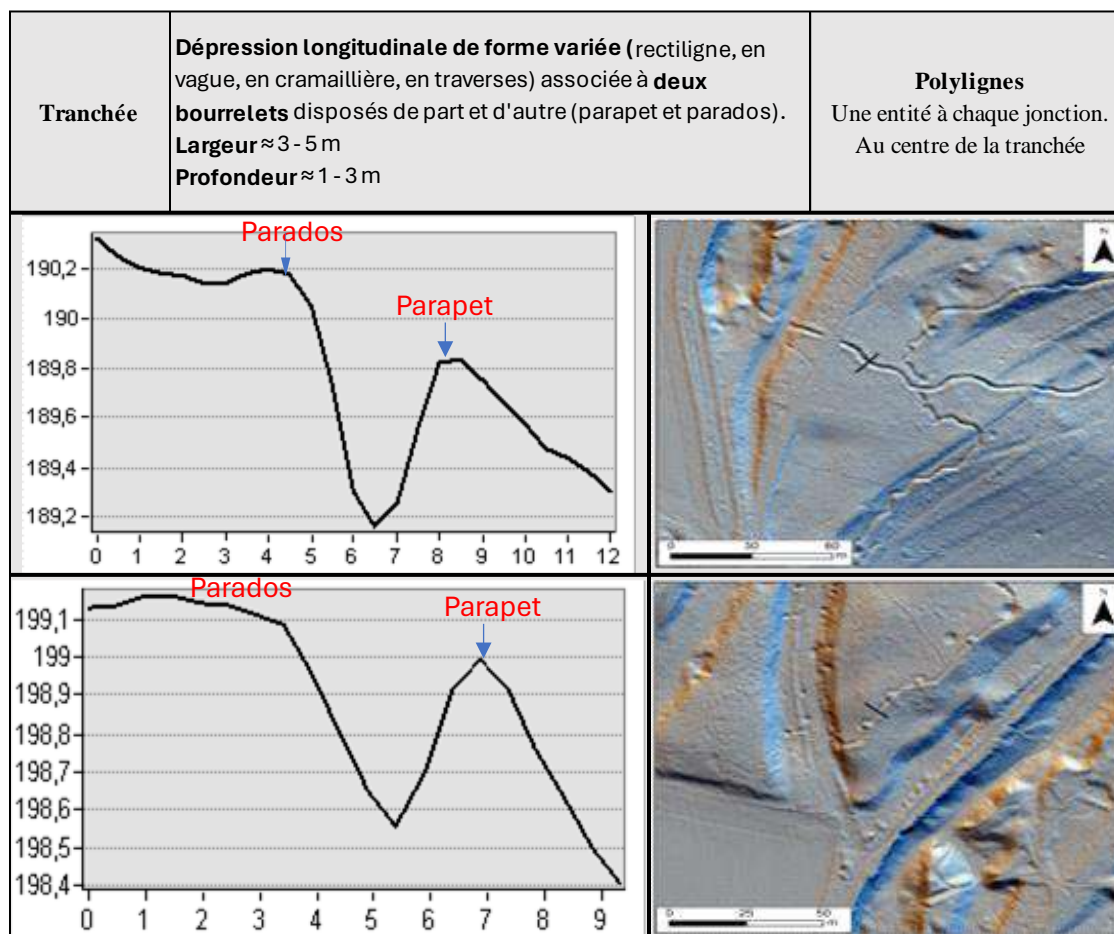


Figure 19 : Protocole de digitalisation des polémoformes correspondant à des tranchées. La vue en plan correspond à une technique de visualisation : l'ombrage multidirectionnel.

4. Caractérisation des formes

La caractérisation des formes est l'une des parties les plus importantes de notre sujet. Elle permet de mieux visualiser certaines formes qu'on n'avait peut-être pas eu la chance de voir à partir des traitements de visualisations. Cela constitue aussi une manière pour de valider notre protocole de digitalisation. Cette caractérisation se fait à partir de deux sources (Ancelin, 2020) : les sources cartographiques et documentaires, et les prospections pédestres.

4.1. Archives cartographiques et planimétriques

4.1.1. Sélection des documents

Les archives cartographiques et planimétriques, que l'on peut assimiler à des plans historiques (XVIII^e siècle), fournissent des données sur des divisions territoriales et l'utilisation des sols à différentes époques. Dans le cadre de notre stage, nous avons opté pour trois documents : la carte d'Etat-Major, le cadastre napoléonien et le plan directeurs de tir des GCTA. Mais compte tenu du temps, ayant été en notre défaveur, nous nous sommes focalisés sur le plan directeur de tir des GCTA à l'échelle 1/20 000^e. par ailleurs, nous allons faire une petite description de chaque plan.

- **Carte d'Etat-Major**

Elaborée entre 1817 et 1866, dans le but d'une refonte complète de la carte de Cassini couvrant tout le territoire français (**fig.20**). Initialement levée au 1/10 000^e, elle évoluera succinctement au 1/20 000^e par faute de moyens pour les zones urbaines et les frontières puis au 1/40 000^e pour le reste du pays. Cette carte offre une précision plus améliorée par rapport aux cartes antérieures (carte de Naudin et Carte de Cassini) en raison de sa conception pendant les grandes périodes de transformations majeures de la France (révolution industrielle, urbanisation intense, etc.).

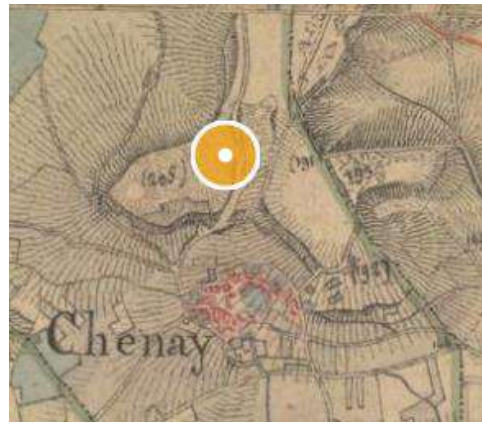


Figure 20 : Extrait de la feuille « Epinal N-O » de la carte d'Etat Major (1817-1866) où est cartographié la Commune et montrant la situation du fort de Chenay.

- **Le Cadastre napoléonien**

Instauré par la loi du 15 septembre 1807, mais révisé par la loi du 16 avril 1930, cette carte représente une initiative majeure de cartographie et d'administration fiscale initiée sous le règne de Napoléon Bonaparte. Son objectif principal était de créer un registre précis des propriétés foncières pour une imposition équitable, marquant ainsi le début de la modernisation administrative en France. Il offre une représentation détaillée des parcelles de terre ainsi que les bâtiments présents sur chaque propriété.

- **Le plan directeur de tir des GCTA au 1/20 000^e**

Plan réalisé par les Groupes de Canevas de Tirs des Armées (GCTA) entre les années 1914 et 1918. Appelé aussi **Canevas de tir**, il comporte un ensemble de points connus et fait apparaître des dispositifs défensifs (tranchées, boyaux, abris), offensifs (batteries d'artillerie) et logistiques (piste, gare, chemins de fer, campements, etc.) (**fig.21**). Les échelles de production du plan partent de 1/5 000^e pour des opérations ponctuelles au 1/20 000^e pour l'artillerie. Ces plans étaient classés pendant la guerre « *secret Défense* » et ne devaient pas tomber aux mains de l'ennemi au risque de lui fournir des informations importantes.



Figure 21 : Extrait du plan directeur de tirs des GCTA du fort de Chenay au 1/20 000^e

4.1.2. Géoréférencement

Pour utiliser la carte du plan directeur de tir des GCTA et la projeter simultanément à nos données LiDAR sur ArcGIS, il était indéniable de le géoréférencer comme image raster en lui attribuant des coordonnées au moyen d'une transformation mathématique. Nous avons utilisé la transformation mathématique « *Thin Plate Spline* » avec 44 points de calages (réparties de manière homogène) (**tab.6**) car elle est considérée comme la plus performante pour recaler un plan ancien (Bakkouch et *al.*, 2015).

Carte	Echelle	Date d'édition	Couche de référence	Nombre de point de callage	Transformation	EQM
Plan directeur de tir	1 : 20 000	1918	Scan 25	44	Thin Plate Spline	0,000000702

Tableau 6 : Caractéristiques du plan directeur de tir des GCTA géoréférencé et paramètres utilisés pour son géoréférencement

À l'issue du géoréférencement, les images manifestent une erreur quadratique moyenne (EQM) permettant de juger de la précision de la correction. Elle représente l'écart moyen entre les coordonnées souhaitées et les coordonnées après transformation.

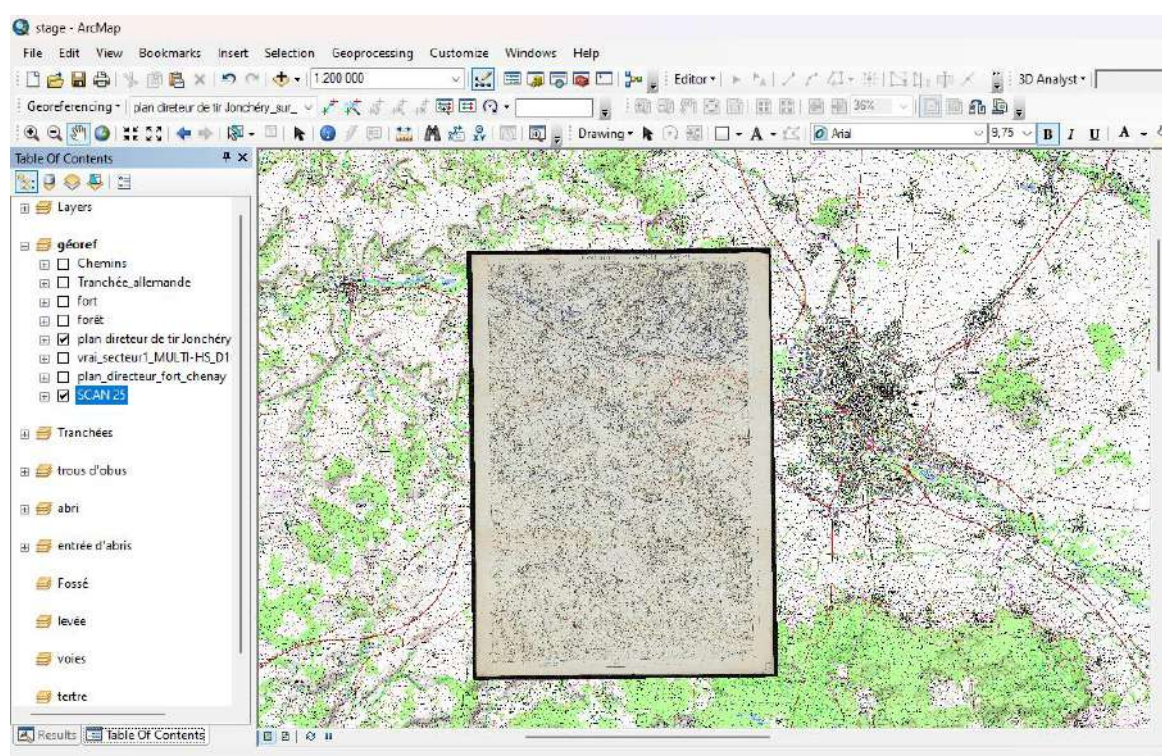


Figure 22 : Visualisation du plan directeur de tir après géoréférencement avec le SCAN 25 sur Arcmap.

IV. Résultats

Les résultats portent sur les polémoformes que nous avons pu reconnaître puis digitaliser à partir de l'image LiDAR de notre secteur d'étude.

A. Formes ponctuelles

1. Cratères d'obus

Au total, **228 cratères d'obus** ont été cartographiés (**fig.23**). Ce sont principalement des cratères d'obus singuliers de classe D1 dont le diamètre est compris entre 1,17 m et 15,38 m environ pour une profondeur comprise entre 0,17 et 6,58 m environ (De Machado, 2018, P.238) (**fig.24**). Leur distribution est en général homogène, avec une forte concentration près du fort. Ces polémoformes n'ont pas bénéficiés de reconnaissance sur le terrain permettant d'affiner leur caractérisation.

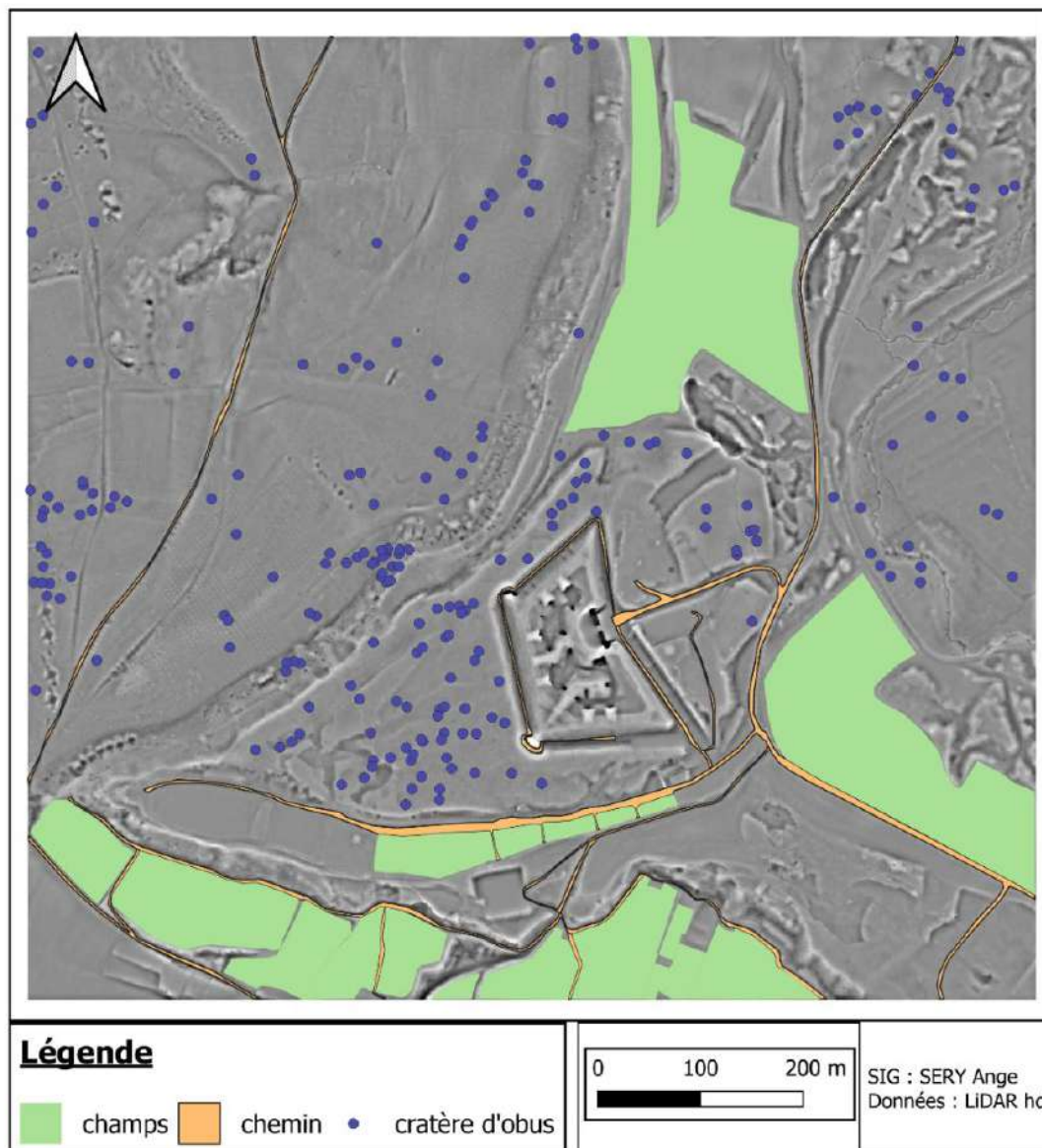


Figure 23 : Inventaire cartographique des cratères d'obus du secteur fort de Chenay.

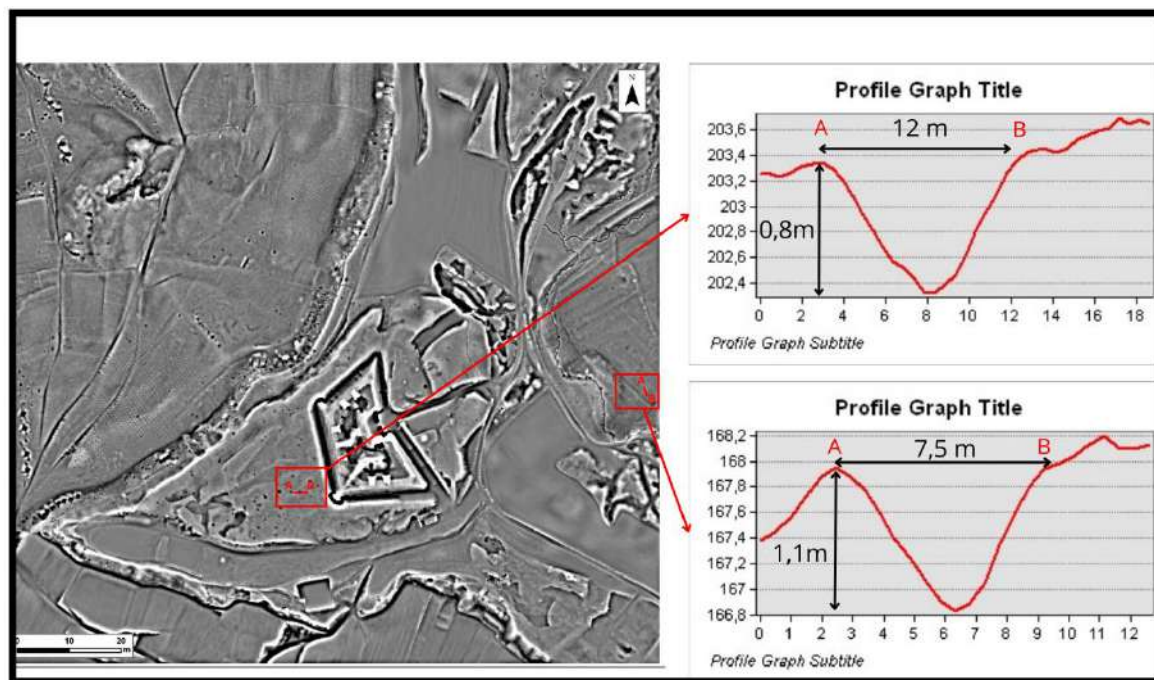


Figure 24 : Informations morphométrique (diamètre, profondeur) de deux cratères d'obus. Le profil topographique montre la forme des trous d'obus (forme en « U ») mais avec des diamètres et profondeurs différents.

2. Abris

Au total, **41 abris** ont été identifiés grâce au LiDAR puis cartographiés (**fig.25**). Parmi ces abris, nous avons pu identifier 9 abris pouvant correspondre à des batteries d'artilleries allemandes (**fig.26**), 1 à un bunker (**fig.27**) et 6 à des dépôts de munition en raison de leur signature morphométrique. Notre hypothèse n'a pas pu être vérifiée du fait d'aucune sortie sur le terrain par manque de temps.

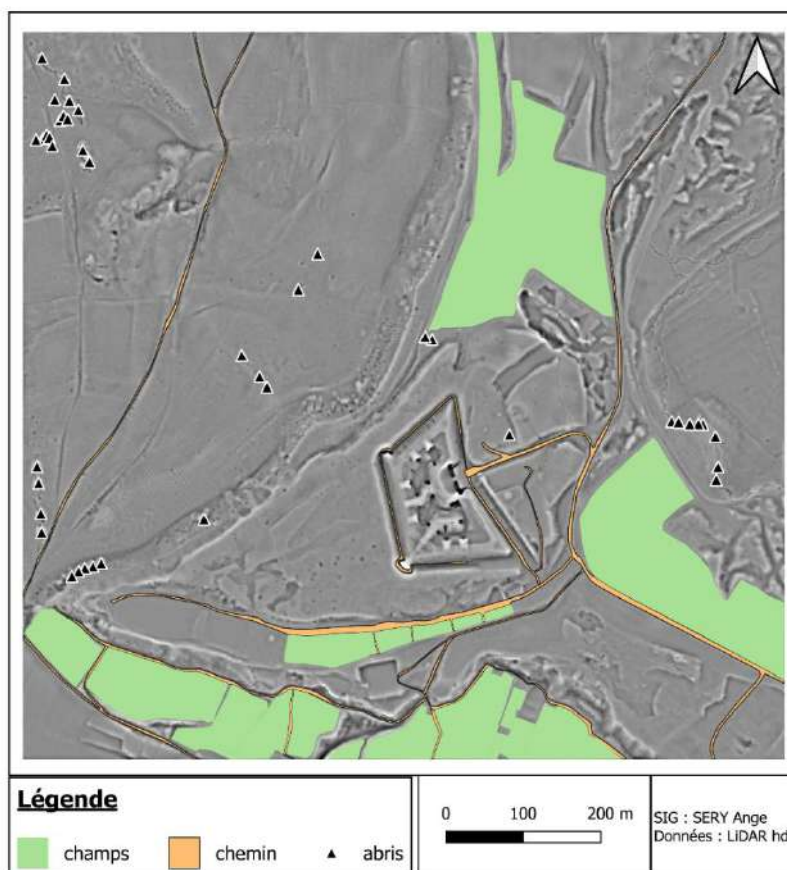


Figure 25 : Inventaire cartographique des abris de guerre du secteur fort de Chenay.

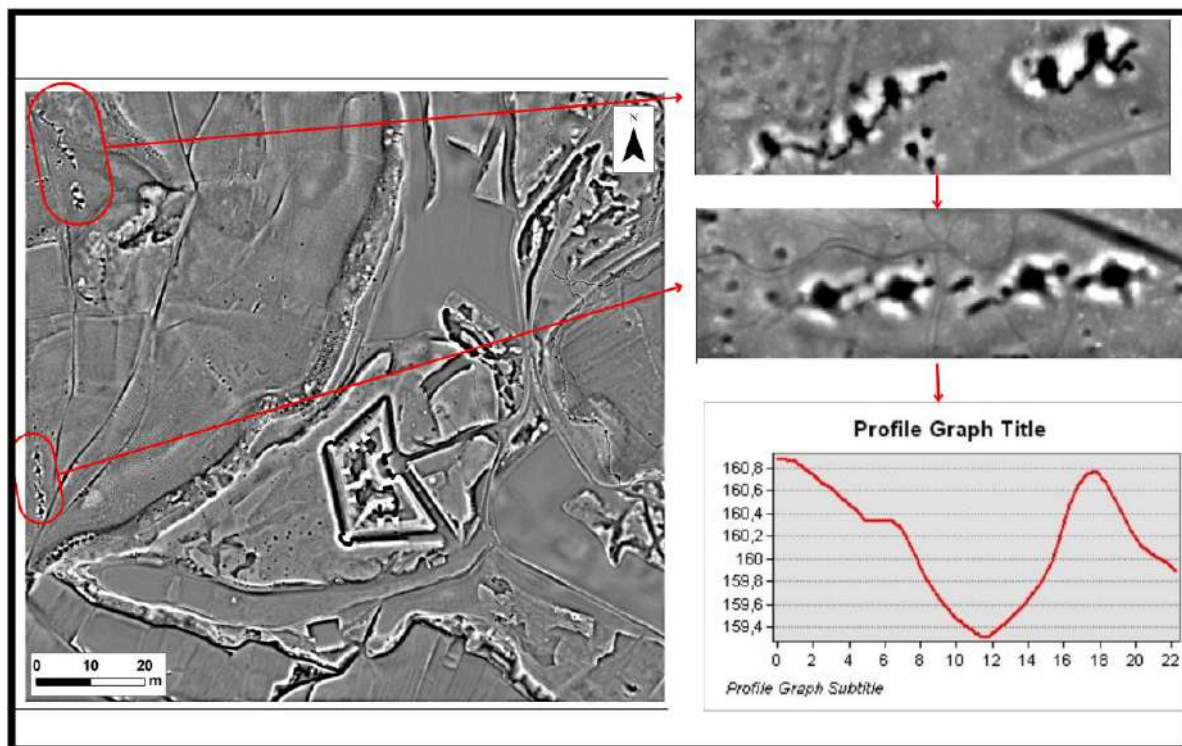


Figure 26 : Abris pouvant correspondre à des batteries d'artilleries allemandes. Ces abris sont tous orientés vers la ligne de front française.

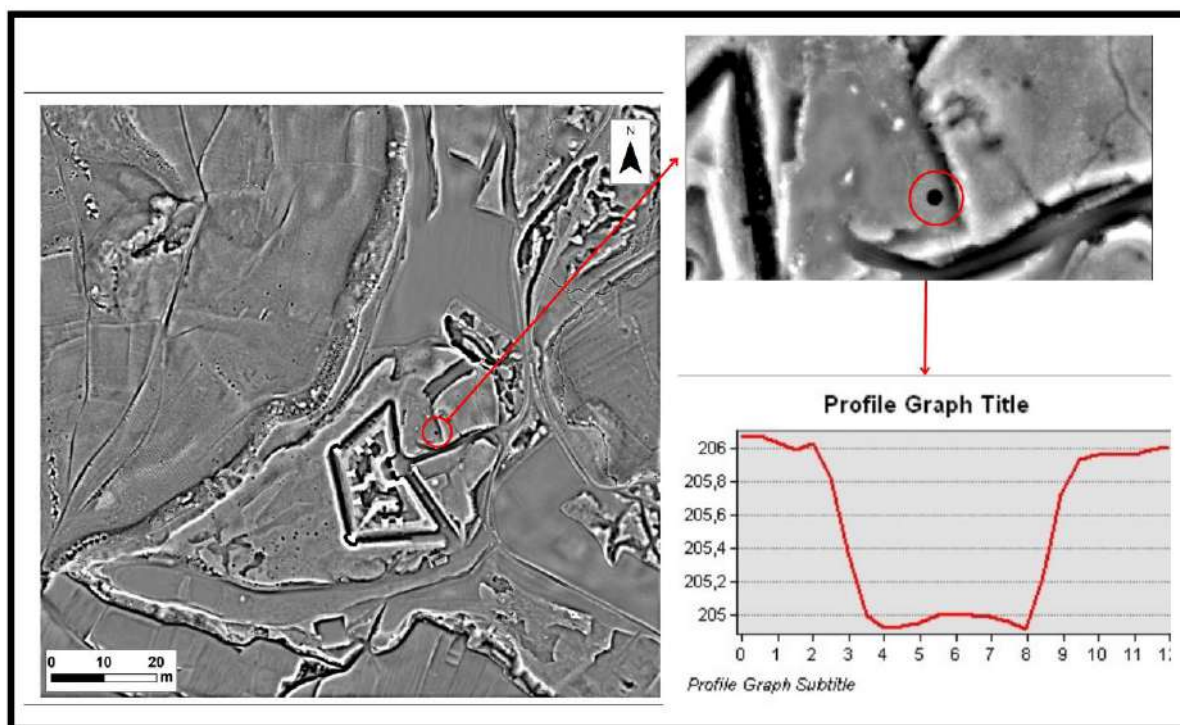


Figure 27 : Excavation allemand pour bunker (fondation).

B. Forme linéaire

1. Tranchées

Les tranchées sont les seuls polémoformes linéaires que nous avons cartographiées avec une longueur totale de **1673 m** (fig.28). Le plan directeur de tir des GCTA, nous a permis de confirmer

que ces formes linéaires correspondent bien à des tranchées qui ont été occupées par les Allemands. De plus, grâce au plan directeur de tir, nous constatons l'effacement d'un ou plusieurs tranchées à certains endroits du secteur d'étude (fig.29).

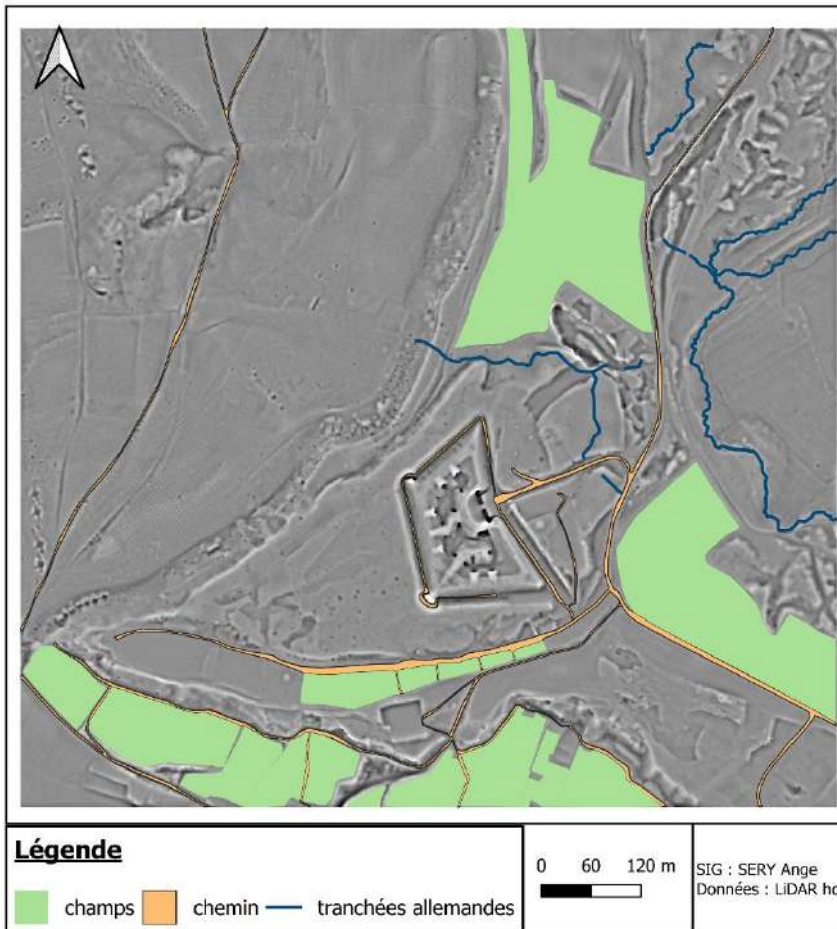


Figure 28 : Inventaire cartographique des tranchées allemandes du secteur fort de Chenay.

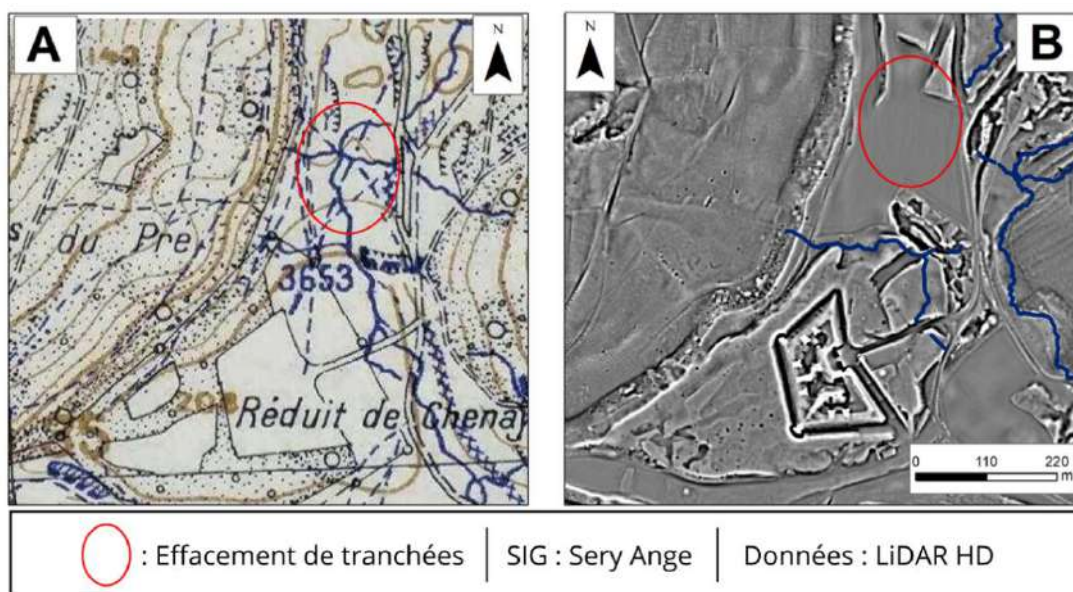


Figure 29 : Documents cartographiques anciens (plan directeur de tir des GCTA [A]) comparé au LiDAR (TPI) sur lequel apparaît des tranchées [B]. Le plan directeur de tir atteste l'existence de tranchées allemandes dans une zone pas loin du fort en 1918 alors que LiDAR témoigne de l'absence de tranchées dans cette même zone (champs).

C. Inventaire global

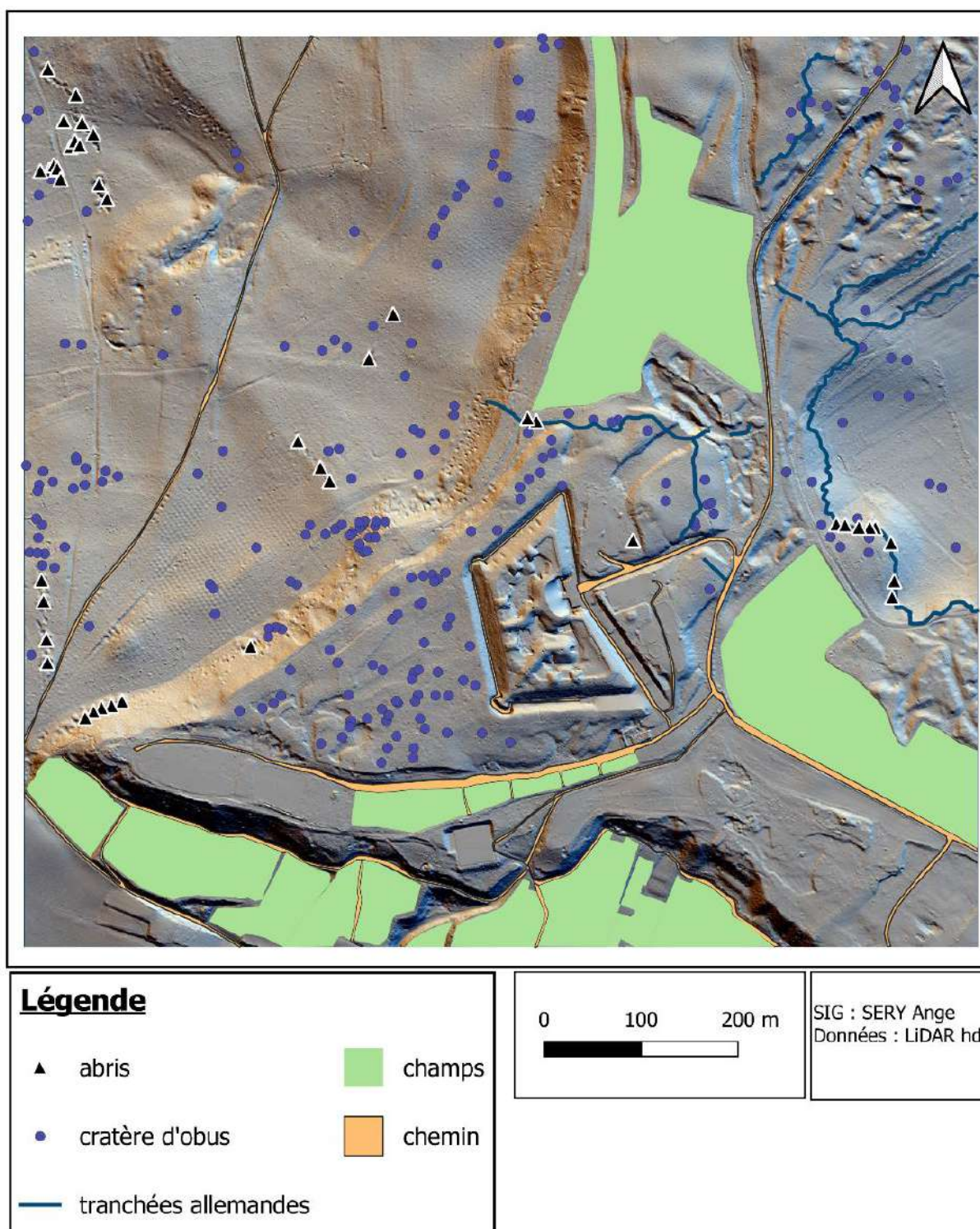


Figure 30 : Inventaire cartographique global du secteur du fort de Chenay.

Conclusion

Au cours des dernières décennies, le LiDAR a gagné en importance au sein de la communauté géographique, offrant des avantages significatifs en termes d'efficacité et de rapidité d'investigation, en particulier en milieu forestier.

Dans le cadre de ce stage, un inventaire cartographique global a été réalisé sur un secteur incluant le fort de Chenay, en utilisant le LiDAR. Pour cela, une stratégie d'enregistrement basée sur des traitements de visualisation a été développée pour élaborer un protocole de digitalisation. Cet inventaire inclut des polémoformes tels que des tranchées (1673), des cratères d'obus (228) et des abris de guerre (41) détectés grâce au LiDAR. Cependant, ces éléments n'ont pas été vérifiés sur le terrain. Par ailleurs, des documents d'archives, notamment le plan directeur de tir des GCTA du secteur Jonchery-sur-Vesle à l'échelle 1/20 000^e, ont facilité l'identification des tranchées et confirmé qu'elles faisaient partie de la ligne de défense allemande.

Ce stage a été une opportunité exceptionnelle pour moi, offrant une immersion concrète dans le monde de la recherche sous la supervision d'un doctorant. J'ai également développé un intérêt pour les produits dérivés du LiDAR et la gestion de leur qualité. Le LiDAR a un rôle majeur à jouer pour les décennies à venir.

Bibliographie

A

Amat J.-P., 1987, Guerre et milieux naturels : les forêts meurtries de l'Est de la France, 70 ans après Verdun, *L'Espace géographique*, 16(3), p. 217-233. DOI : [10.3406/spgeo.1987.4253](https://doi.org/10.3406/spgeo.1987.4253)

Amat J.-P., 2001, *La forêt entre guerres et paix, 1870-1995 : Étude de biogéographie historique sur l'Arc meusien de l'Argonne à la Woëvre*. (Thèse d'Etat, Lille 1, Lille). Repéré à www.persee.fr/doc/htn_0018-439x_2000_num_2_1_2717_t1_0086_0000_1

Ancelin P.-Y., 2020, *Approche archéogéographique du Saint-Mont (Vosges), par croisement de données Lidar, documentaires et archéologiques*. Université de Lorraine, 135 p.

B

Bennett R., Welham K., Hill R. A. et Ford A., 2012, A Comparison of Visualization Techniques for Models Created from Airborne Laser Scanned Data, *Archaeological Prospection*, 19(1), p. 41-48. DOI : [10.1002/arp.1414](https://doi.org/10.1002/arp.1414)

Bakkouch L., Birh H., Ruggeri P., Follin J.-M., Simonetto E. et Touzard P., 2015, Comparaison de méthodes de recalage d'images pour le géoréférencement de clichés anciens., (124), p. 22. Repéré à <https://www.researchgate.net/publication/310749399>

C

Chevigny E., Saligny L., Granjon L., Goguey D., Cordier A., Pautrat Y. et Giosa A., 2018, Identifier et enregistrer des vestiges archéologiques sous couvert forestier à partir de données LiDAR : méthode et limites, *ArchéoSciences*, (2018), p. 31-43. DOI : [10.4000/archeosciences.5727](https://doi.org/10.4000/archeosciences.5727)

Code du patrimoine, Article,, Livre V : archéologie § Article L510-1 (2016). Repéré à https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000032860107/

Cohen A., Klassen S. et Evans D., 2020, Ethics in Archaeological Lidar, *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 3(1), p. 76-91. DOI : [10.5334/jcaa.48](https://doi.org/10.5334/jcaa.48)

Crutchley S., 2018, Using Airborne Lidar in Archaeological Survey : The Light Fantastic. p.94. Repéré à <https://www.researchgate.net/publication/326783321>

D

De Matos Machado R., 2018, *Paysages de guerre et Lidar : de la caractérisation des polémoformes à la conservation des patrimoines naturel et culturel de la forêt domaniale de Verdun (Meuse, France)* (Thèse de doctorat, Sorbonne Paris cité, Paris). Repéré à <https://theses.fr/2018USPCC033>

De Matos Machado R., Amat J.-P., Arnaud-Fassetta G. et Bétard F., 2016, Potentialités de l'outil LiDAR pour cartographier les vestiges de la Grande Guerre en milieu intra-forestier (bois des Caures, forêt domaniale de Verdun, Meuse), *EchoGéo*, (38). DOI : [10.4000/echogeo.14791](https://doi.org/10.4000/echogeo.14791)

Devereux B. J., Amable G. S. et Crow P., 2008, Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection, *Antiquity*, 82(316), p. 470-479. DOI : [10.1017/S0003598X00096952](https://doi.org/10.1017/S0003598X00096952)

Devos A., Laratte S., Taborelli P. et Lesjean F., 2019, Un exemple de structure cellulaire de défense : la Butte de Brimont, apport des plans directeurs et du Lidar (France), *Revue de géographie historique*, (14-15). DOI : [10.4000/geohist.660](https://doi.org/10.4000/geohist.660)

E

Eric B., 2015, Waterloo 1815-2015. Mémoires européenne, belge et locales en Brabant wallon, *Revue d'histoire du Brabant wallon*, (t.29), p. 94-126. Repéré à <https://www.academia.edu/14085701>

G

Gheyle W., Stichelbaut B., Saey T., Note N., Van Den Berghe H., Van Eetvelde V., Van Meirvenne M. et Bourgeois J., 2018, Scratching the surface of war. Airborne laser scans of the Great War conflict landscape in Flanders (Belgium), *Applied Geography*, 90, p. 55-68. DOI : [10.1016/j.apgeog.2017.11.011](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.11.011)

H

Hesse R., 2014, Geomorphological traces of conflict in high-resolution elevation models, *Applied Geography*, 46, p. 11-20. DOI : [10.1016/j.apgeog.2013.10.004](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.10.004)

J

Jenness J., 2006, Topographic Position Index (TPI) v. 1.2. Repéré à <https://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>

K

Kokalj Ž. et Somrak M., 2019, Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping, *Remote Sensing*, 11(7), p. 747. DOI : [10.3390/rs11070747](https://doi.org/10.3390/rs11070747)

Kokalj Ž., Zakšek K. et Oštir K., 2011, Application of sky-view factor for the visualisation of historic landscape features in lidar-derived relief models, *Antiquity*, 85(327), p. 263-273. DOI : [10.1017/S0003598X00067594](https://doi.org/10.1017/S0003598X00067594)

M

Morin J., 1995, Un Vauban méconnu, le général Séré de Rivières, *Revue Historique des Armées*, 198(1), p. 24-32. DOI : [10.3406/rharm.1995.4424](https://doi.org/10.3406/rharm.1995.4424)

S

Sahar B. H., 2018, *Inversion des formes d'ondes LiDAR pour l'estimation des caractéristiques des cultures et des forêts par des techniques probabilistes et variationnelles* (Toulouse 3 - Paul Sabatier, Toulouse). Repéré à <https://theses.hal.science/tel-02070697>

Schindling J. et Gibbes C., 2014, LiDAR as a tool for archaeological research: a case study, *Archaeological and Anthropological Sciences*, 6(4), p. 411-423. DOI : [10.1007/s12520-014-0178-3](https://doi.org/10.1007/s12520-014-0178-3)

Scott D., Fox R., Connor M. et Harmon D., (s. d.), Archaeological Perspectives On the Battle of the Little Bighorn, *University of Oklahoma Press*, p. 310. Repéré à <https://core.tdar.org/document/81305/>

Štular B., Kokalj Ž., Oštir K. et Nuninger L., 2012, Visualization of lidar-derived relief models for detection of archaeological features, *Journal of Archaeological Science*, 39(11), p. 3354-3360. DOI : [10.1016/j.jas.2012.05.029](https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.05.029)

T

Taborelli P., 2018, *Les conditions géographiques et l'organisation spatiale du front de la Grande Guerre : application à l'évaluation environnementale post-conflit en Champagne-Ardenne (France)*. (Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims). Repéré à <https://hal.science/tel-03080350>

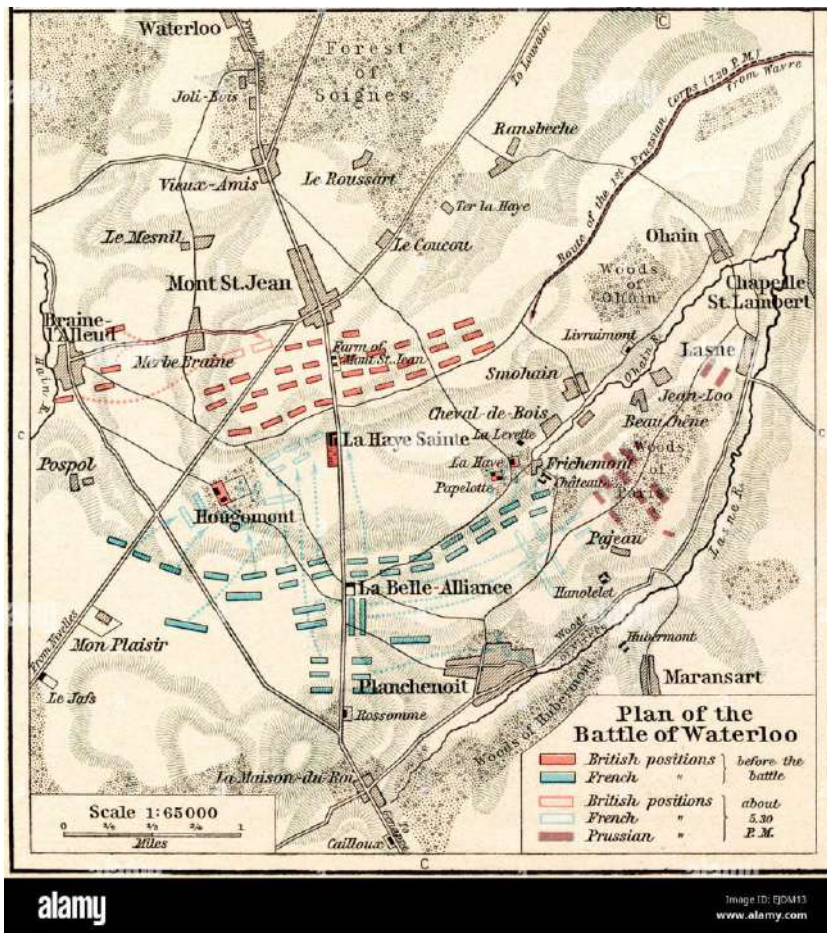
Z

Žiga K. et Ralf H., 2017, *Airborne laser scanning raster data visualization: A Guide to Good Practice*. 90 p. Repéré à <http://zalozba.zrc-sazu.si/p/P14>

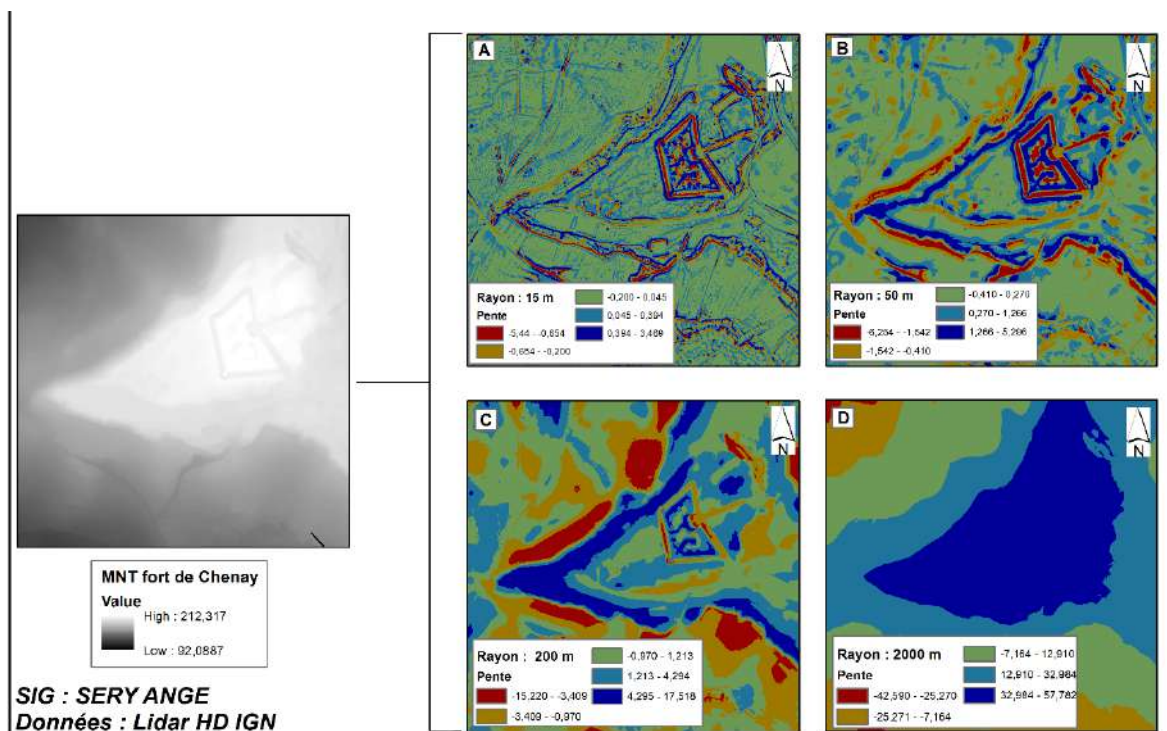
Liste de annexes

Annexe 1 : Plan de la bataille de Waterloo du 16 au 18 juin 1815.	36
Annexe 2 : Visualisation du TPI sur le fort de Chenay paramétré avec un voisinage de type circulaire. Le rayon de calcul est paramétré sur 16 (A), 60 (B), 200 (C), 2000 (D). A fur et à mesure que le rayon de calcul augmente, les poloméformes devienne à peine visible, laissant place à une carte entièrement clinométrique (D). Cela montre que le TPI est donc très dépendant de l'échelle d'analyse et les interprétations peuvent varier en fonction de chaque échelle (Jenness, 2006)...	36

Annexes



Annexe 1 : Plan de la bataille de Waterloo du 16 au 18 juin 1815.



Annexe 2 : Visualisation du TPI sur le fort de Chenay paramétré avec un voisinage de type circulaire. Le rayon de calcul est paramétré sur 16 (A), 60 (B), 200 (C), 2000 (D). A fur et à mesure que le rayon de calcul augmente, les poloméformes devienne à peine visible, laissant place à une carte entièrement clinométrique (D). Cela montre que le TPI est donc très dépendant de l'échelle d'analyse et les interprétations peuvent varier en fonction de chaque échelle (Jenness, 2006).

Table des matières

Sommaire	1
Liste des figures	3
Liste des tableaux	5
Sigles et abréviations	6
Introduction	7
I. Contexte : Archéogéomorphologie des conflits de guerres	8
A. L'archéologie de la guerre.....	8
B. Les polémoformes, des vestiges archéologiques	8
C. L'archéogéomorphologie, une nouvelle approche pour cartographier les vestiges de guerre 9	
II. LIDAR : Light Detection and Ranging	10
A. Généralités techniques	10
B. Le produit d'une acquisition LiDAR : le nuage de points	11
C. L'utilisation du LiDAR dans le monde.....	12
III. Fortifications Séré de Rivières : cas du fort de Chenay	12
A. Présentation du secteur d'étude	12
B. Matériel et Méthodes	14
1. Obtention d'un Model Numérique de Terrain (MNT)	14
1.1. Détermination du secteur d'étude.....	14
1.2. Téléchargement de la donnée brute	14
1.3. Décompression de la donnée brute.....	14
1.4. Création du MNT sur Arcmap	15
2. Traitement du MNT	16
2.1. Relief Visualization Toolbox (RVT)	16
2.1.1. Par l'analyse de la lumière	17
2.1.2. Par l'analyse de la topographie.....	18
3. Elaboration d'un protocole de digitalisation.....	20
4. Caractérisation des formes.....	23
4.1. Archives cartographiques et planimétriques.....	23

4.1.1.	Sélection des documents	23
4.1.2.	Géoréférencement	25
IV.	Résultats	26
A.	Formes ponctuelles	26
1.	Cratères d'obus	26
2.	Abris	27
B.	Forme linéaire	29
1.	Tranchées	29
C.	Inventaire global.....	30
	Conclusion	31
	Bibliographie	32
	Liste de annexes.....	35
	Annexes	36
	Table des matières	37