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)

Rémi de Matos-Machado

▶ **To cite this version:**

Rémi de Matos-Machado. 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). Géographie. Université Sorbonne Paris Cité, 2018. Français. NNT : 2018USPCC033 . tel-02128272

HAL Id: tel-02128272
https://theses.hal.science/tel-02128272

Submitted on 14 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de doctorat

de l'université Sorbonne-Paris-Cité
préparée à l'université Paris-Diderot

École doctorale :
« Économies, espaces, sociétés, civilisations : pensée critique, politique et pratiques sociales » (ED 382)

UMR 8586 PRODIG

Présentée et soutenue publiquement à Paris le 8 novembre 2018

Président du jury :	**Jean-Paul AMAT**, Professeur émérite à Sorbonne Université
Rapporteurs :	**Philippe BOULANGER**, Professeur à Sorbonne Université
	Laurence HUBERT-MOY, Professeure à l'université Rennes 2
Examinateur :	**Birger STICHELBAUT**, Chercheur postdoctoral à l'université de Gand (Belgique) et collaborateur scientifique au musée *In Flanders Fields*
Directeur de thèse :	**Gilles ARNAUD-FASSETTA**, Professeur à l'université Paris-Diderot
Co-directeur de thèse :	**François BÉTARD**, Maître de conférences (HDR) à l'université Paris-Diderot
Membre invitée :	**Stéphanie JACQUEMOT**, Ingénieure d'études au Service Régional de l'Archéologie du Grand-Est (site de Metz)

Thèse de doctorat

de l'université Sorbonne-Paris-Cité
préparée à l'université Paris-Diderot

École doctorale :
« Économies, espaces, sociétés, civilisations : pensée critique, politique et pratiques sociales » (ED 382)

UMR 8586 PRODIG

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)

Par Rémi DE MATOS-MACHADO

Thèse de doctorat de géographie

Dirigée par Gilles ARNAUD-FASSETTA
Co-dirigée par François BÉTARD

Présentée et soutenue publiquement à Paris le 8 novembre 2018

Président du jury :	**Jean-Paul AMAT**, Professeur émérite à Sorbonne Université
Rapporteurs :	**Philippe BOULANGER**, Professeur à Sorbonne Université
	Laurence HUBERT-MOY, Professeure à l'université Rennes 2
Examinateur :	**Birger STICHELBAUT**, Chercheur postdoctoral à l'université de Gand (Belgique) et collaborateur scientifique au musée *In Flanders Fields*
Directeur de thèse :	**Gilles ARNAUD-FASSETTA**, Professeur à l'université Paris-Diderot
Co-directeur de thèse :	**François BÉTARD**, Maître de conférences (HDR) à l'université Paris-Diderot
Membre invitée :	**Stéphanie JACQUEMOT**, Ingénieure d'études au Service Régional de l'Archéologie du Grand-Est (site de Metz)

À Grand-Mère, à Grand-Père,
À Isabelle,
Aux soldats de Verdun

Remerciements

Voici que s'achèvent ces quatre années de doctorat, marquées par des moments de joie, parfois de découragement et de souffrance, mais aussi et surtout de plaisir, tant j'ai aimé m'investir dans ce travail de recherche dont le sujet passionnant continue, malgré l'aboutissement de la thèse, de susciter ma curiosité. Cette thèse m'a amené à découvrir les secrets archéologiques des forêts lorraines, à voyager aux quatre coins de l'Europe et dans des contrées lointaines, expériences au cours desquelles j'ai eu la chance de faire de précieuses rencontres. J'aimerais, à travers ces quelques lignes, remercier les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

Gilles ARNAUD-FASSETTA, je tiens à vous remercier pour la confiance que vous avez accordée à mon projet de recherche, pour m'avoir encadré sur un sujet pour le moins « exotique », pour vos précieux conseils tant sur le terrain que durant la rédaction et pour votre perfectionnisme quand il s'agissait de corriger le manuscrit. Ce sont ces exigences qui font de la thèse ce qu'elle est.

François BÉTARD, je te suis reconnaissant pour la qualité de ton encadrement, aussi bien durant la thèse que depuis 2013, année à partir de laquelle tu as commencé à suivre mes recherches sur les paysages de guerre. Je te remercie également de m'avoir poussé à me dépasser durant la rédaction et pour ta disponibilité à toute épreuve qui a grandement contribué à faire avancer la thèse.

Pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail, j'adresse mes remerciements à Laurence HUBERT-MOY, Professeur à l'université Rennes 2, et Philippe BOULANGER, Professeur à Sorbonne-Université (Paris IV). Je voudrais aussi remercier Birger STICHELBAUT, chercheur post-doctoral de l'université de Gand (Belgique), d'avoir accepté de juger cette thèse en tant qu'examinateur.

Jean-Paul AMAT, je vous exprime toute ma gratitude pour la générosité dont vous avez fait preuve à mon égard. Sans vous, ce projet de thèse n'aurait jamais pu voir le jour. Je n'oublierai pas les nombreuses invitations qui m'ont été adressées pour prendre part à des projets formidables, comme ma participation à la nouvelle exposition permanente du mémorial de Verdun.

Stéphanie JACQUEMOT, je tiens à te remercier pour m'avoir fait découvrir le monde des archéologues et de m'avoir accompagné sur le terrain pour interpréter ces fameux vestiges de guerre dont je ne connaissais que peu de choses. Merci de m'avoir toujours tenu au courant des événements scientifiques et culturels relatifs à la Première Guerre mondiale malgré les quelque 300 km qui nous séparent.

Clélia BILODEAU, je te remercie d'avoir libéré un peu de ton temps pour te consacrer à ma thèse et à ses enjeux méthodologiques. C'est grâce à toi que ma compréhension de la technologie LiDAR et de certains logiciels a pu être améliorée.

Jean-Pierre TOUMAZET, je t'adresse mes remerciements pour ton accueil chaleureux à chacun de mes déplacements en Auvergne, pour m'avoir aidé à me défaire du « snake » et à développer une méthodologie de cartographie performante. Le succès de cette thèse est en grande partie dû à ta collaboration.

Jean-Claude BERGÈS, c'est grâce à toi que j'ai pu découvrir les secrets de la carte auto-organisatrice de Kohonen. Je te remercie chaleureusement pour l'aide que tu m'as apportée, pour tes explications et pour le temps que tu m'as accordé pour concevoir ces fameux capteurs.

Je tiens à remercier les personnes qui ont contribué à la réussite de la thèse en me faisant don de leurs documents d'archives personnels : François BELLEIL, Daniel DAVAL, Édith DESROUSSEAUX DE MEDRANO, Vincent OLLIVE, Camille TRIDON et François XAVIER-BERNARD.

Joe HUPY, I am sincerely grateful for all the advice you provided on conflict landscapes and for accompanying me in the field. Also, I would like to thank you for having offered to participate into research projects.

Graziella RASSAT, tu ne liras peut-être pas mon manuscrit mais je tenais à te remercier pour m'avoir permis de rencontrer Jean-Pierre TOUMAZET. Indirectement, c'est en écoutant tes conseils que j'ai pu venir à bout de la thèse.

Ce projet de thèse n'aurait pu voir le jour sans la mise en place d'une coopération scientifique et technique avec les organismes détenteurs du nuage de points LiDAR et gestionnaires de la forêt domaniale de Verdun. Pour accéder librement à ces données et au terrain d'étude, une convention de recherche a été établie entre l'université Paris-Diderot, l'Office national des forêts (ONF) – Agence de Verdun et le Service régional de l'archéologie (SRA) – Site de Metz. J'adresse des remerciements tout particuliers à Gersende GÉRARD pour avoir fait en sorte que mes missions de terrain aient lieu dans de bonnes conditions. Gérald COLIN, toi qui connaît par cœur la forêt de Verdun, merci de m'avoir accompagné sur le terrain et d'avoir partagé avec moi ta passion pour la Grande Guerre. Ces discussions ainsi que les documents d'archives que tu m'as confiés m'ont beaucoup servi dans l'interprétation de mes résultats. Je remercie également Éric BONNAIRE, Cécile DARDIGNAC, Lilian DUBAND, Juliette FOLTIER, Frédéric HINSCHBERGER et René-Marc PINEAU, pour leur aide logistique, leurs conseils et/ou leur accompagnement sur le terrain.

Violaine JURIE, merci de m'avoir autorisé à exploiter comme jamais ils ne l'avaient été les ordinateurs du Pôle Image. J'espère que tu ne m'en veux pas d'avoir monopolisé toutes ces machines de jour comme de nuit.

Murielle GEORGES-LEROY, je t'adresse mes remerciements pour avoir participé à la relecture d'un de mes chapitres de thèse. Ton expérience m'a permis d'apporter de nettes améliorations au manuscrit.

Mathieu PANORYA, je t'adresse mes remerciements pour les discussions intéressantes et pour avoir apporté un regard critique sur mes interprétations historiques. Merci également d'avoir pris de mes nouvelles dans les moments difficiles.

Mes remerciements s'étendent également à toutes les personnes qui m'ont accompagné sur le terrain. Mes pensées vont en particulier à Romain PERRIER, qui m'a tenu compagnie à de nombreuses reprises, et avec qui j'ai pu découvrir les spécialités culinaires lorraines à travers les restaurants (et brasseries) de la ville de Verdun. De vrais inspecteurs du « Guide Michelin » ! J'adresse mes plus chaleureux remerciements à Julie NOURI et Régis GOMA, qui ont fait l'expérience des tiques et des ronces mais qui m'ont avant tout aidé dans le déploiement de mes mesures de terrain. Merci également à Valentin PRINTEMPS pour avoir tenté l'aventure du camping au mois de mars et dont l'aide a été précieuse sur le terrain. J'exprime aussi ma gratitude envers Denis JACQUEMOT, Théo WOHLSCHLEGEL et les étudiants de L2 (2015-2016) venus m'accompagner : Assala, Cloé, Lina, Marion, Mélanie, Romane, Ugo D. J'ai une pensée particulière pour Ugo GENESTOUT, étudiant de L2 qui a passé quelques jours avec moi sur le terrain et qui a été emporté par la maladie à un âge beaucoup trop jeune.

Je n'oublie pas mes collègues de l'université Paris-Diderot du laboratoire PRODIG, pour leurs précieux conseils et pour m'avoir tenu compagnie dans les moments de solitude : Candide, Catherine, Émilie, Jean-Claude, Malika, Monique, Nicolas, Salem et Vincent. J'ai une pensée particulière pour Gérard BELTRANDO, soudainement disparu en janvier 2016, qui m'a enseigné la climatologie durant mes années de Licence, qui a défendu mon projet de recherche et qui a contribué à ce que j'obtienne un contrat doctoral. Je remercie également les collègues du laboratoire LADYSS avec qui nous avons partagé les repas : Céline, Clélia et Étienne.

Atteindre ces objectifs n'aurait pas été possible sans l'aide de mes collègues thésards et post-doctorants : Benoît, Candide, Gashin, Guillaume, Ibrahima, José, Louis, Lucile, Mathilde, Maya, Oumar, Quentin, Romain C., Romain P. et Tidiane, en espérant n'oublier personne. Remerciements particuliers aux Alsaciens de la salle, Luc et Laurent, pour leurs discussions « rund um Elsass », pour les « spätzle » et pour les vidéos des « Inconnus ». Grâce à vous, je suis quadrilingue ! Merci également aux étudiants et doctorants ayant

séjourné quelques semaines à l'université et qui ont enrichi la vie du laboratoire : Florentina, Hamdi, Jouda, Maria, Marwen, Mohammed et Taos.

Merci à tous mes amis, de Paris, de Rouen, de Verdun et d'ailleurs, dont le soutien a été essentiel pour venir à bout de ce travail. Un remerciement tout particulier à Mathieu et Philippe du camping des Breuils, pour m'avoir accueilli à bras ouverts à chacun de mes passages à Verdun, pour les soirées pizzas et les soirées bières sur les bords de Meuse.

Enfin, le meilleur pour la fin. Ma reconnaissance est infinie envers mes parents, pour leur soutien sans faille, pour m'avoir préparé les petits plats du midi et pour m'avoir transmis la passion de la géographie et des voyages. Je remercie ma sœur, mon beau-frère, mon neveu et mes nièces, pour les conseils et les soirées « barbecue » après une bonne semaine de travail. Aline, je te remercie de m'avoir soutenu au quotidien et pour avoir supporté mes mauvaises humeurs.

Mille mercis à tous !

Acronymes

ACP – Analyse en composantes principales

BRGM – Bureau de recherches géologiques et minières

CAH – Classification ascendante hiérarchique

DGPS – *Differential Global Positioning System*

ECPAD – Établissement de communication et de production audiovisuelle de la Défense

IGN – Institut national de l'information géographique et forestière

IUCN - Union internationale pour la conservation de la nature

JMO – Journaux de marches et opérations

LiDAR – *Light detection and ranging*

LRM – *Local relief model*

MNT – Modèle numérique de terrain

ONF – Office national des forêts

SGA – Service géographique de l'armée

SHD – Service historique de la défense

SIG – Système d'information géographique

SOM – *Self-organizing maps*

SRA – Service régional de l'archéologie

SVF – *Sky-view factor*

TIN - *Triangulated irregular network*

TPI – *Topographic position index*

« Le cadre (entre Thiaumont et Fleury) est celui des pires champs de bataille de Verdun. En avant de ravins encore vaguement couverts de bois décharnés où les arbres sont réduits à l'état de poteaux, s'étend la zone où il y a des herbes. Au-delà, plus aucune végétation, pratiquement, mais de la pierraille retournée, et, plus souvent de l'argile crevée et labourée sur deux ou trois mètres de profondeur : un vrai relief lunaire… »

Caporal brancardier Pierre Teilhard de Chardin, lettre du 23 août 1916

Introduction générale

« *À Verdun, sous la forêt, les plaies* » titrait le journal *Le Monde* du 27 mai 2016 dans un grand format consacré à la forêt domaniale de Verdun[1]. Un siècle a passé depuis la célèbre bataille de Verdun et les traces de la Grande Guerre sont toujours aussi vives sur l'ancien champ de bataille dont la plus grande partie est recouverte par une vaste forêt de 10 000 ha. Entre les hêtres et les épicéas, agissant comme un pansement sur la topographie héritée des combats, se cachent encore d'innombrables reliefs nés des actions des soldats et de l'artillerie durant les années 1914-1918. Cratères d'obus, tranchées, abris enterrés ou emplacements de canon constituent des formes relictuelles ayant plus ou moins conservé leur aspect d'origine, s'exprimant par des micro et macro-reliefs en creux ou en bosse, aux géométries variées et de taille métrique. L'irruption de ces formes sur le champ de bataille a profondément marqué les milieux et les paysages. De manière tout à fait étonnante, la guerre a façonné des écosystèmes uniques, tirant profit des nouvelles conditions topographiques pour s'établir. Installé au cœur des ornières forestières et des cratères d'obus inondés, le crapaud Sonneur à ventre jaune, espèce d'intérêt communautaire, incarne un symbole de renaissance pour les milliers de soldats tombés au champ d'honneur.

[1]https://www.lemonde.fr/m-le-mag/visuel/2016/05/27/a-verdun-sous-la-foret-les-plaies_4927879_4500055.html

1. « Verdun 14-18, Forêt d'Exception »

La forêt domaniale de Verdun (figures 1 et 2) s'est vue attribuée le 20 juin 2014, par le ministère de l'Agriculture, le label « *Forêt d'Exception®* », destiné à promouvoir une gestion de la forêt durable et respectueuse des enjeux patrimoniaux (écosystèmes naturels, histoire, archéologie). Parmi les thèmes du contrat de projet, qui court jusqu'au 31 décembre 2018, le thème 1.1 *Inventaire du patrimoine culturel* décrit l'objectif de la sauvegarde des vestiges archéologiques en forêt. Pour mener à bien cette tâche, il convient de connaître précisément leur nombre et leur localisation. Les multiples formes de relief induites par les combats notamment les tranchées, abris et batteries d'artillerie, sont directement concernées par cet inventaire. Ces témoignages d'une occupation ancienne (*i.e.*, vestiges archéologiques) sont susceptibles de contenir du matériel archéologique permettant de reconstituer l'histoire des sociétés passées, en particulier guerrière, et abritent des biotopes qui leur sont inféodés. La thèse s'inscrit pleinement dans ce contrat de projet en cherchant à établir un inventaire des reliefs de la guerre, appelés *polémoformes*, en référence aux travaux de Amat (1987, 2001, 2015).

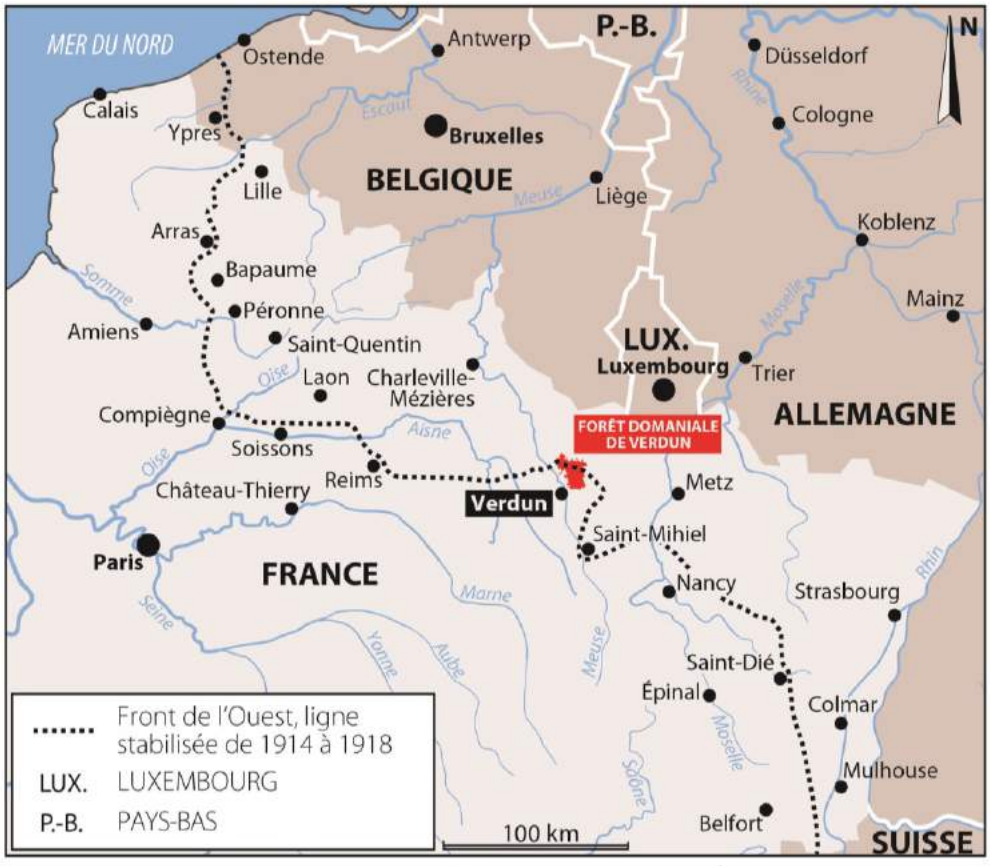


***Figure 1** – Localisation de la zone d'étude sur le front de l'Ouest*

La thèse se veut aussi une force de réflexion et de proposition autour d'un thème d'actualité et fédérateur, celui du centenaire de la Première Guerre mondiale, dont le calendrier chevauche assez fortuitement celui de la thèse, commencée en septembre 2014 et achevée en novembre 2018, soit à trente-huit jours près la durée du conflit. Durant ces quatre années, les commémorations ont été animées par des événements culturels principalement associés à la vingtaine de grandes batailles qui marquèrent les années 1914-1918. Ce centenaire a surtout été une véritable aubaine, en termes de développement, pour les régions traversées par le front, dont certaines subissent depuis des décennies des difficultés économiques. Le champ de bataille de Verdun, situé au centre d'un département en déclin, a accueilli près de 730 000 visiteurs/an entre 2013 et 2016 (Gérard, 2017), soit une affluence double de celle observée en année « normale » (Jacquemot, 2014 ; Amat, 2015). Cette hausse des activités culturelles et économiques se constate aussi sur le plan scientifique. En dehors du traditionnel champ historique, la Grande Guerre a suscité l'intérêt de nombreux géographes sur les thèmes des paysages de guerre. Les champs de bataille sont devenus de véritables laboratoires de recherches pluridisciplinaires, appréhendés aussi bien du point de vue géohistorique que sous un angle écologique. Dans cet élan, une vingtaine d'articles et ouvrages relatifs aux impacts environnementaux du premier conflit mondial et à la dimension de tactique militaire attribuée aux paysages ont été publiés entre 2014 et 2018 (Doyle, 2014 ; Amat, 2015 ; Devos *et al.*, 2015 ; De Matos-Machado *et al.*, 2016 ; Hubé, 2016 ; Magnini *et al.*, 2016 ; Stichelbaut et Cowley, 2016 ; Stichelbaut *et al.*, 2016 ; Taborelli *et al.*, 2016 ; Brenot et *al.*, 2017 ; Stichelbaut *et al.*, 2017 ; Taborelli *et al.*, 2017 a et b ; De Matos-Machado et Hupy, 2018 ; De Matos-Machado *et al.*, 2018 ; Gheyle *et al.*, 2018 ; Hanot et Simien, 2018 ; Hubé, 2018 ; Note *et al.*, 2018). Ils témoignent de l'engouement suscité par le centenaire 1914-1918 dans le champ de la **géographie**.

2. Objectifs scientifiques de la thèse

Conformément aux objectifs du contrat de projet «*Verdun 14-18, Forêt d'Exception* », le site d'étude de la thèse se limite au territoire de la forêt domaniale de Verdun, forêt de 10 000 ha située au nord-est de la ville éponyme. Les connaissances sur les riches patrimoines naturel et culturel de la forêt sont encore lacunaires, notamment à cause des difficultés de la prospection en milieu forestier. Dissimulées sous la canopée, les polémoformes peinent à être clairement définies, en particulier leur nombre et leur état de conservation. Jusqu'alors, les quelques cartes d'inventaire réalisées ont surtout consisté à localiser les tranchées les plus remarquables, véritables symboles de la Première Guerre mondiale, connue aussi sous l'expression de « Guerre des tranchées ». Le contexte national et européen de développement des mesures conservatoires des milieux, des sites et des paysages a suscité des questions. Combien de polémoformes existent sous forêt ? De quelle manière se répartissent-elles ? Quel est leur état de conservation ? Quelles parcelles doivent être conservées en priorité ? Le lien étroit entre les reliefs de guerre et les écosystèmes naturels implique également de

s'interroger sur la localisation des zones à haute valeur écologique. Un outil efficace et fonctionnel pour répondre à ces grandes questions sera de procéder à la cartographie exhaustive des polémoformes, qui fait actuellement défaut. Les cartes produites seront notamment destinées à accompagner les forestiers dans leur gestion de la forêt domaniale. De ce fait, **la thèse s'inscrit clairement dans une perspective de recherche applicable**.

La thèse se veut aussi travail de recherche fondamentale. Alors que le champ de bataille de Verdun est considéré comme l'un des sites les plus étudiés du point de vue de son histoire militaire – la bibliothèque nationale de France n'abrite pas moins de 374 ouvrages et 11 124 références numérisées en lien avec la bataille (Cochet, 2014) – de nombreuses questions restent en suspens, comme celle des impacts environnementaux de la bataille de 1916 et des événements de 1917 et 1918. Cette thèse de géographie environnementale s'intéresse avant tout aux perturbations géomorphologiques causées par les activités militaires de la Première Guerre mondiale. Quelle est l'étendue des bouleversements géomorphologiques engendrés sur le champ de bataille de Verdun ? Quelles sont les caractéristiques géométriques des polémoformes ? Quels sont les volumes de matériaux déplacés par les troupes et les bombardements ? La recherche fondamentale se veut aussi pluridisciplinaire et aborde des problématiques d'ordre archéologique et historique en lien avec les reliefs. Quelle est la diversité morphométrique des vestiges de guerre observés (*i.e.*, constructions en mou) ? Quel a été le rôle du milieu physique dans l'organisation des défenses ? Comment ont évolué les techniques de combat durant le conflit en relation avec le milieu ?

Figure 2 – *La forêt domaniale de Verdun et ses paysages de guerre. À gauche : la vieille ville de Verdun (dont la cathédrale au second plan), installée dans un méandre de la Meuse, et la forêt domaniale de Verdun (en arrière-plan) couronnant le plateau des Hauts de Meuse, dont la lisière se situe à seulement trois kilomètres du centre-ville. Cliché : R. de Matos-Machado, 12 avril 2016. À droite : le fort de Douaumont, îlot ouvert dans la marée forestière, garde les stigmates des combats. En marge des fils barbelés encerclant le sommet de l'enceinte, domine une topographie bosselée maintes fois retournées par les bombardements. Cliché : R. de Matos-Machado, 4 avril 2017.*

Comme tout travail de géographie, la thèse procède d'un emboîtement des échelles spatio-temporelles. Elle sort régulièrement des limites de la forêt domaniale en proposant des comparaisons géographiques avec d'autres sites de bataille du front de l'Ouest objets

d'études similaires, comme dans la région flamande (Masters et Stichelbaut, 2009 ; Stichelbaut, 2009 ; Gheyle *et al.*, 2013 ; Saey *et al.*, 2013 ; Note *et al.*, 2018), la Champagne (Devos *et al.*, 2015 ; Taborelli *et al.*, 2017a) et l'Argonne (Brenot *et al.*, 2016 ; Taborelli *et al.*, 2016, 2017 a et b). Elle dépasse aussi le cadre des paysages de guerre de 1914-1918 en faisant référence, chaque fois que cela s'impose, à ceux de la Seconde Guerre mondiale (Passmore *et al.*, 2013 ; Passmore *et al.*, 2014 ; Capps Tunwell *et al.*, 2015 ; Capps Tunwell *et al.*, 2017) ou de la guerre du Viêt Nam (Orians et Pfeiffer, 1970 ; Pfeiffer, 1975 ; Westing, 1975 ; Hupy, 2010). La thèse explore aussi les paysages passés à l'aide d'analyses diachroniques menées sur la période 1914-1918 et 1918-aujourd'hui. Cette vision rétrospective est impérative pour comprendre les processus de façonnement du paysage géomorphologique durant et après le conflit et sert aussi à mieux appréhender la logique actuelle des paysages de la forêt domaniale de Verdun.

Atteindre ces objectifs implique de déployer une méthodologie à la fois performante – la cartographie intégrale des polémoformes constitue le principal défi méthodologique de cette thèse – et innovante car il n'existe aucune méthode capable de répondre simultanément à l'ensemble des questions posées et à cette échelle. C'est cette démarche méthodologique que nous allons maintenant présenter.

3. Originalités de la démarche méthodologique

Comment inventorier et interpréter de manière exhaustive des millions de polémoformes enfouies sous un manteau forestier aussi étendu que la ville de Paris ? La démarche méthodologique s'appuie sur l'imagerie acquise par une mission LiDAR aéroportée ayant survolé en 2013 la forêt domaniale de Verdun. Cette mission, conduite dans le cadre du contrat de projet « *Forêt d'Exception* », a donné lieu à l'acquisition d'un nuage de points 3-D d'une précision centimétrique, rendant possible la détection des moindres anomalies topographiques sous forêt au moyen d'un modèle numérique de terrain (MNT). Comme le soulignent Nuninger *et al.* (2010), « *les MNT LiDAR produits jusque-là sont de manière générale sous-exploités car ils ne sont envisagés que comme des images à interpréter* ». **Notre approche va plus loin en proposant une exploitation géostatistique de l'imagerie LiDAR, bien au-delà de la simple visualisation** (figure 3).

Une première originalité de la thèse réside dans le développement d'une cartographie automatisée capable d'inventorier les polémoformes sur les 100 km² de la forêt domaniale. Cette piste de l'automatisation reste encore peu explorée. Dans le domaine des paysages de

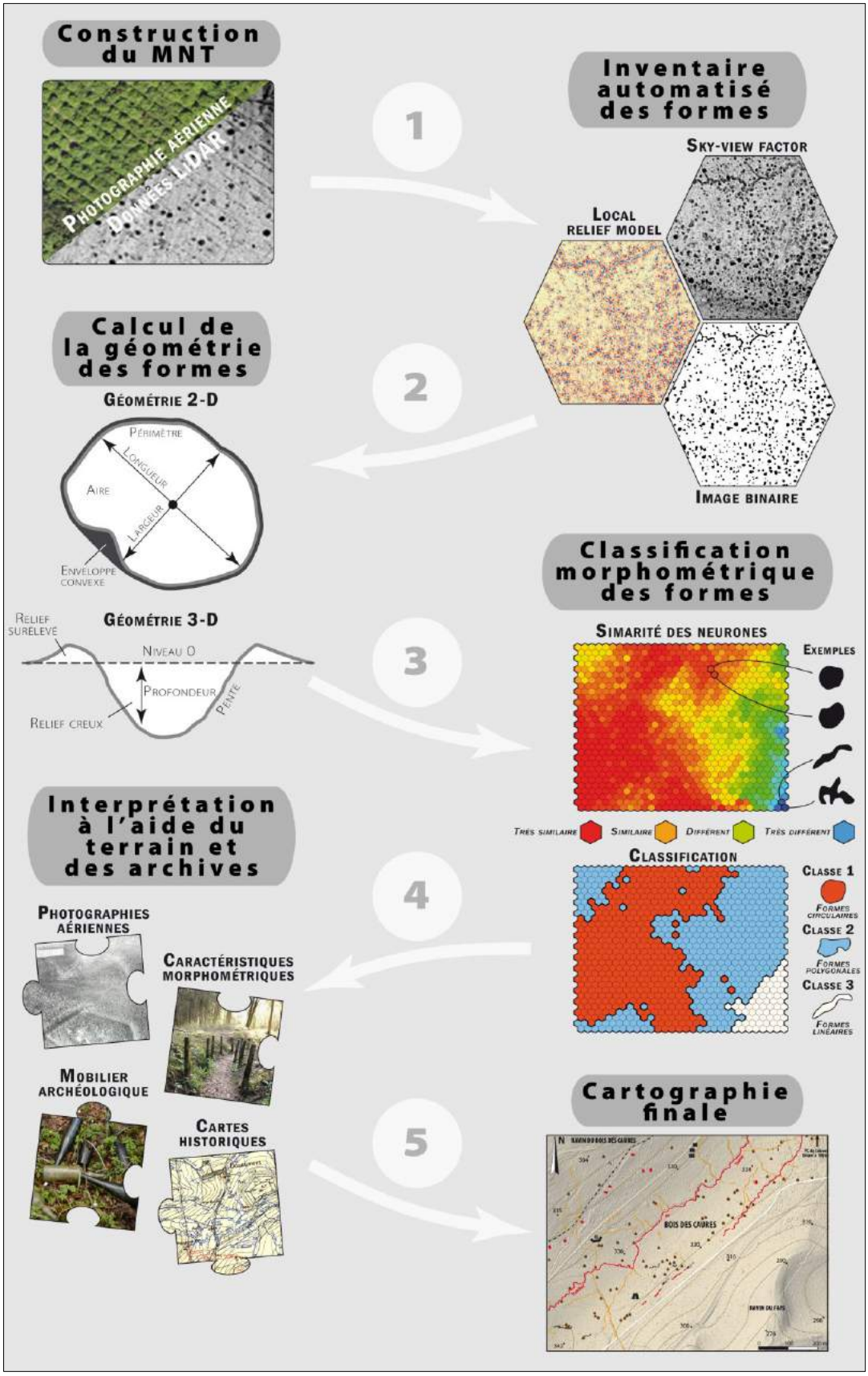


Figure 3 *– Démarche méthodologique de la thèse*

guerre, seuls les travaux de Brenot *et al.* (2016) et Magnini *et al.* (2016) s'y sont aventurés en expérimentant leur algorithme sur quelques hectares de champ de bataille. La méthode que nous proposons constitue donc la première en son genre à être déployée sur un espace aussi vaste.

Une première originalité de la thèse réside dans le développement d'une cartographie automatisée capable d'inventorier les polémoformes sur les 100 km² de la forêt domaniale. Cette piste de l'automatisation reste encore peu explorée. Dans le domaine des paysages de guerre, seuls les travaux de Brenot *et al.* (2016) et Magnini *et al.* (2016) s'y sont aventurés en expérimentant leur algorithme sur quelques hectares de champ de bataille. La méthode que nous proposons constitue donc la première en son genre à être déployée sur un espace aussi vaste.

La recherche implique aussi des campagnes de reconnaissance sur le terrain, visant à contrôler la qualité des résultats issus de l'inventaire. En complément, ces missions servent à interpréter avec l'aide des archéologues la nature des objets cartographiés. Cette démarche, qualifiée d'archéo-géomorphologique (Thornbush, 2012, 2013 ; Hesse, 2014 ; Nicu, 2016 ; Henselowsky *et al.*, 2017 ; Gheyle *et al.*, 2018), doit faire ressortir de ces observations *in situ* différents types de géométrie associés à chaque catégorie de polémoforme. Partant de ce principe, une classification vise à discriminer chaque objet cartographié selon ses caractéristiques géométriques. Elle fait appel aux méthodes d'analyses statistiques multivariées, capables de mettre en lumière différents groupes de formes. Cette étape est censée aboutir à une généralisation des conclusions faites ponctuellement sur le terrain, avec comme objectif final, l'obtention d'une carte des polémoformes à l'échelle de la forêt.

Afin de comprendre le nombre, l'origine et l'état de conservation actuel des polémoformes, la méthodologie exige des références au passé. Un moyen de répondre à cette requête consiste à exploiter les cartes et photographies aériennes produites un siècle plus tôt. La plupart des fonds est conservée dans des centres d'archives européens. Des visites conduites dans huit établissements, dont deux centres allemands, ont donné lieu à la consultation et/ou l'acquisition de près d'un millier de documents, dont la plupart ont pu être géoréférencés. En confrontant ces données anciennes avec la carte globale des polémoformes, nous sommes en mesure de fournir des éléments d'interprétation quant à la localisation des polémoformes et aux liens qu'elles entretiennent avec les paysages d'avant-guerre. Ces comparaisons servent aussi à rendre compte des temporalités des formes, fournissant des informations cruciales sur l'histoire du champ de bataille et sur les dégradations qui l'ont affecté durant la guerre (1914-1918) et après guerre (1918-2013).

4. Structuration de la thèse

Le travail de recherche de ces quatre années de doctorat structure la thèse **en quatre parties et neuf chapitres** (figure 4) :

- **La première partie aborde le cadre conceptuel et géographique**. Elle se compose de deux chapitres : 1) le premier comprend une partie théorique, explorant le concept de *paysage de guerre*, objet d'étude. Cette exploration s'enchaîne avec un état de l'art, d'abord général – recherches sur les rapports paysage/guerre – puis ciblé sur la forêt domaniale de Verdun ; 2) le chapitre 2 présente le terrain d'étude en suivant une logique chronologique, démarche permettant de reconstituer les grandes métamorphoses paysagères du champ de bataille jusqu'à aujourd'hui.
- **La deuxième partie est exclusivement méthodologique**. Étant donné la place accordée aux outils dans la thèse – en particulier la cartographie des polémoformes – il nous a semblé essentiel de développer un important volet méthodologique. Cette partie s'articule en trois chapitres et constitue de ce fait la plus volumineuse de la thèse : 1) le chapitre 3 focalise sur l'exploration et l'évaluation du nuage de points LiDAR et se termine sur la construction du MNT servant à la cartographie des polémoformes ; 2) le chapitre 4 constitue le cœur méthodologique de la thèse et met en lumière l'algorithme ayant permis la cartographie et la classification des polémoformes ;
  3) le chapitre 5 aborde les recherches en archives effectuées en Allemagne et en France et l'apport des documents récoltés auprès de ces établissements.
- **La troisième partie s'attache à la présentation et l'analyse des résultats**, notamment sous la forme d'une carte inédite des polémoformes. Elle est subdivisée en deux chapitres : 1) le chapitre 6 détaille l'inventaire en donnant les chiffres relatifs au nombre et catégories de polémoformes obtenus, puis divulgue la carte des polémoformes sous la forme d'un atlas. Les résultats de l'inventaire et de la classification sont discutés, comparés et mis en valeur sous la forme d'une typologie originale reflétant la diversité de polémoformes du site d'étude ; 2) le chapitre 7 élucide la question du bouleversement géomorphologique et de la répartition des polémoformes. Il s'intéresse ensuite à leurs temporalités, discussion rendue possible grâce au croisement de la carte et des archives anciennes.
- **La dernière partie s'intéresse aux évolutions paysagères post-guerre et examine les apports de la thèse en matière de gestion du territoire**. Elle comprend deux chapitres : 1) le chapitre 8 établit un diagnostic des conditions de conservation des polémoformes en comparant l'état actuel du relief avec celui de l'époque (1914-1918) au moyen des documents d'archives. Il présente ensuite les initiatives de valorisation scientifique conduites durant la thèse et se termine par une discussion sur la valeur patrimoniale des polémoformes ; 2) enfin, le chapitre 9, dernier de la thèse, aborde la dimension écologique des polémoformes et présente les apports de la cartographie en matière d'inventaire du patrimoine naturel.

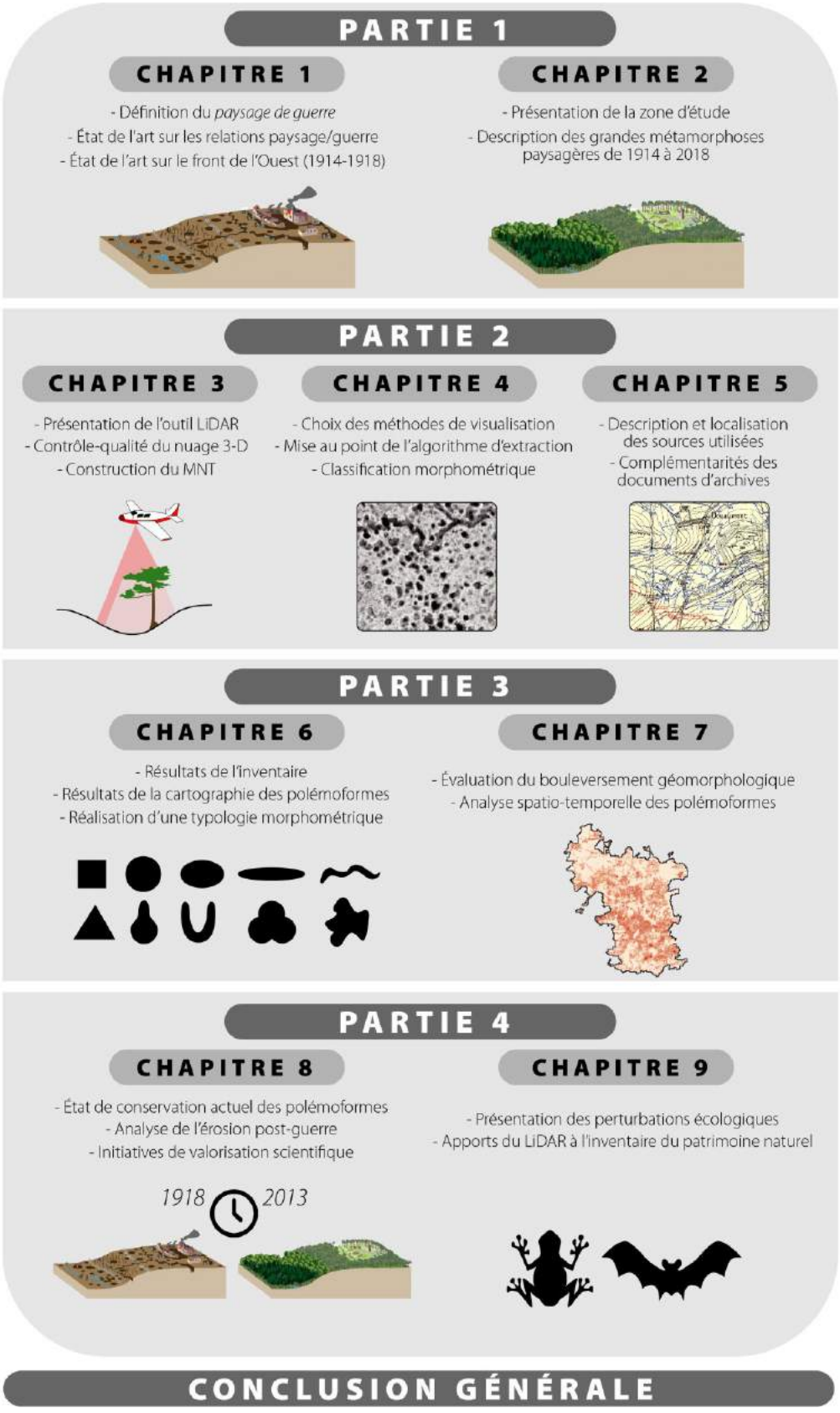


Figure 4 – *Organisation du manuscrit*

PARTIE 1

Présentation de l'étude :
cadre thématique et géographique

CHAPITRE 1

Les paysages de guerre, objets géographiques

p. 27

- Définition du *paysage de guerre*
- État de l'art sur les relations paysage/guerre
- État de l'art sur le front de l'Ouest (1914-1918)

CHAPITRE 2

La forêt domaniale de Verdun : genèse et évolution d'un territoire forestier

p. 71

- Présentation de la zone d'étude
- Description des grandes métamorphoses paysagères de 1914 à 2018

Chapitre 1
Les paysages de guerre, objets géographiques

Les commémorations du centenaire de la Première Guerre mondiale font que les paysages de guerre sont plus que jamais un sujet d'actualité, tant sur le plan scientifique que sociétal (Boulanger, 2001 ; Jacquemot, 2014 ; Amat, 2015 ; Landolt, 2018). Entre histoire, mémoire, géopolitique ou questions naturalistes, les paysages de guerre sont mobilisés par différents acteurs et dans des sens parfois différents. Derrière cette notion de *paysage de guerre* se cache en effet des définitions renvoyant aux différentes manières de penser la guerre (Amat, 1987, 2001 ; Boulanger, 2001 ; Steinbach et Husson, 2007 ; Verkindt et Blanc, 2013 ; Jansen-Verbeke et George, 2015). Un lieu présentant une valeur tactique, une zone occupée par des troupes armées, un terrain riche en ressources naturelles précieuses, constituent autant de zones de tension, soit des paysages potentiels de conflit (Adderley et Mills, 2014 ; Asadpour, 2016). La définition du *paysage de guerre* est d'abord rendue complexe par la polysémie qui touche le mot *paysage*. Encore aujourd'hui, cette notion de paysage qui semble si familière, trouve difficilement un sens fédérateur (Reynard, 2005 ; Germaine, 2009 ; Bourget et le Dû-Blayo, 2010 ; Robert, 2011 ; Gauché, 2015). À cet égard, les débats qu'elle suscite se diffusent dans le concept de *paysage de guerre*, comme le soulignent Carman et Carman (2006) : « *les champs de bataille tombent dans une catégorie de paysage, qui est une catégorie bien plus difficile à délimiter*[1] ». Quelques rappels épistémologiques situent ce chapitre dans une perspective large englobant les différents courants de pensée du *paysage* et du *paysage de guerre*. Cette réflexion nous permet de suggérer une définition « géographique » du paysage de guerre, celle qui sera suivie tout au long de notre recherche. Après avoir posé les cadres conceptuels de ce travail, un synopsis de l'évolution de la recherche relative aux paysages de guerre est présenté, des XXème et XXIème siècles surtout. Un focus est ensuite réalisé sur les paysages de guerre de la Première Guerre mondiale sur le front de l'Ouest, de la mer du Nord à la frontière suisse, qui présentent une multitude de faciès bouleversés par les affrontements. Cette dernière partie conclut sur une présentation de la manière d'aborder les paysages de guerre en forêt domaniale de Verdun, marquée par les combats comme très peu de sites de bataille en Europe.

[1]« *Battlefields also fall into the category of landscape, which is a category much more difficult to delineate* ».

1. Du paysage ordinaire au paysage de guerre

Cette thèse sur la forêt domaniale de Verdun s'inscrit dans une réflexion plus générale sur les paysages de guerre, très en vogue à l'heure des commémorations du centenaire de la Grande Guerre. Le syntagme *paysage de guerre* demande une clarification sémantique nécessitant pour commencer de rappeler la notion de *paysage* puis d'introduire celle de *paysage de guerre*, objet géographique qui constitue le fil rouge de ce mémoire.

1.1. Quelques rappels sur la notion de *paysage*

1.1.1. Une notion polysémique

S'il y a un mot que le géographe ne saurait ignorer, c'est bien celui de ***paysage***. Rares sont aujourd'hui les travaux de géographie n'abordant pas l'espace géographique sans sa dimension paysagère. Que ce soit en France ou à l'étranger, la notion s'impose, comme l'illustre l'analyse textuelle établie par Fourault-Cauët (2007) sur les trois grandes revues forestières, française (*Revue forestière française*), espagnole (*Montes*) et italienne (*L'Italia Forestale e Montana*). Entre 1945 et 2005, pas moins de 308 articles relatifs aux paysages ont ainsi vu le jour, soulignant la centralité du paysage dans les discours de géographes, plus spécifiquement ici sur les questions forestières. Le titre de cette thèse témoigne lui aussi de ce profond ancrage de l'approche paysagère dans le champ de la géographie. Pourtant, le paysage a longtemps été mis au second plan des études géographiques, en particulier au cours des Trente Glorieuses (1945-1973), où les partisans de la *Nouvelle Géographie* le considéraient comme un objet mal défini au point de ne plus lui associer de valeur scientifique. À l'époque, « *le « paysage » est un terme désuet et imprécis, donc commode, que chacun utilise à sa guise, le plus souvent en y adjoignant un qualificatif de restriction qui en altère le sens* » (Bertrand, 1968). Cinquante ans plus tard, malgré une popularité certaine de la notion auprès de la communauté des géographes, le flou persiste. À la question « *Qu'est-ce pour vous le paysage ?* » posée en 2013 à une soixantaine d'étudiants de licence à l'université de Tours, Gauché (2015) a relevé des réponses très variées, montrant toute l'ambiguïté du terme. Afin de situer notre travail, rappelons brièvement les définitions auxquelles se rattache aujourd'hui la notion de paysage.

1.1.2. Les trois écoles du paysage

Après avoir occupé une place centrale dans la géographie au cours des XVIIIème et XIXème siècles, puis avoir été délaissée dans les années 1950, la notion de paysage a été « reconstruite » dans les années 1970 grâce aux travaux de géographes naturalistes, en particulier ceux de Bertrand (Bertrand, 1968 ; Bertrand et Dollfus, 1973 ; Bertrand, 1978), qui ont grandement contribué à sa formalisation. Cet engouement tire ses origines de la montée

des préoccupations environnementales des années 1970 (Bertrand et Dollfus, 1973 ; Brossard et Wieber, 1984 ; Bourget et le Dû-Blayo, 2010) faisant suite notamment à la guerre du Viêt Nam (1955-1975) considérée comme la « *plus grande guerre écologique de l'histoire de l'humanité* » (Coryell, 2002). Il est aussi étroitement lié aux progrès faits dans le domaine informatique et de la télédétection, fournissant des outils adaptés à l'analyse globale des paysages et de leurs dégradations, dans l'espace et dans le temps (Bertrand et Dollfus, 1973).

Cette phase de conceptualisation a amené de nombreux géographes à repenser la notion de paysage. **Il existe trois écoles** :

- Certains géographes considèrent le paysage dans sa **matérialité** (approche objective, naturaliste ou holistique), comme un « tout » que l'on peut décomposer en « *diverses catégories spatiales* » et qui peut être caractérisé selon différentes méthodes (Bertrand et Dollfus, 1973 ; Bertrand, 1978 ; Rougerie et Beroutchachvili, 1991 ; Burel et Baudry, 1999 ; Reynard, 2005 ; Bourget et le Dû-Blayo, 2010 ; Gauché, 2015). Le paysage est un système en constante évolution dans lequel interagissent les entités qui le composent, représentant à la fois le monde biotique (biosphère, anthroposphère) et abiotique (atmosphère, hydrosphère, lithosphère). De ce fait, elle nécessite « *un découpage de l'espace à une échelle adaptée* » (Bourget et le Dû-Blayo, 2010).
- D'autres le considèrent dans sa **subjectivité** (approche humaniste, représentée ou culturelle), c'est-à-dire comme un espace représenté, senti et vécu (Bertrand et Dollfus, 1973 ; Rimbert, 1973 ; Reynard, 2005 ; Gauché, 2015). « *Pour savoir ce qu'est le paysage,* […] *il faut donc connaître ceux qui le regardent, essayer de déterminer si, au-delà des différences individuelles, se dégagent une perception commune, ou des perceptions en fonction des catégories d'utilisateurs* » (Becker, 1996).
- Enfin, il y a les géographes qui allient ces deux **conceptions objective et subjective**. Bertrand (1978) considère ainsi le paysage comme « *un médiat entre la société et la nature, soit une interprétation sociale de la Nature* ». Pour Brossard et Wieber (1980), il y a entre ces deux dimensions du paysage une enveloppe intermédiaire formée par le *paysage visible*, constituant un « *paysage potentiel pas encore perçu par les individus* » (Sahraoui *et al.*, 2016). Pour lui donner toute sa visibilité, le paysage doit être détecté au moyen d'outils, tels la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG). Les résultats de son étude « *prennent la forme de cartes et de statistiques spatiales* » (Robert, 2011), par la suite interprétés par l'individu (Brossard et Wieber, 1980, 1984 ; Wieber, 1995 ; Robert, 2011 ; Gauché, 2015 ; Sahraoui *et al.*, 2016). Pour Reynard (2005), le *paysage géomorphologique* combine « *la part géomorphologique objective du paysage* » et « *l'image que chaque observateur s'en fait* ».

Ainsi, la notion de paysage accepte plusieurs définitions, très discutées. Celle adoptée par le Conseil de l'Europe en 2000 à Florence et mentionnée dans la *Convention européenne du paysage* (CEP, article 1) est de plus en plus partagée par la communauté scientifique : reconnue d'un point de vue institutionnel, elle a intégré les deux approches matérielle et

représentée du paysage, qui « *désigne une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations* » (Germaine, 2009 ; Bourget et le Dû-Blayo, 2010). En complément de la notion de territoire à laquelle se rattache cette définition, **l'idée d'un emboîtement d'échelles**, absente de la définition, constitue elle aussi une vision indissociable de la notion de paysage. C'est ce qu'a en particulier montré Bertrand (Bertrand et Tricart, 1968 ; Beroutchachivili et Bertrand, 1978) dans son concept de *géosystème*, une « *unité spatiale bien délimitée et analysée à une échelle donnée* » (quelques kilomètres à quelques centaines de kilomètres carrés) qui se décline en *géofaciès* (quelques centaines à quelques kilomètres carrés) et *géotope* (plus petite unité géographique homogène discernable sur le terrain). Depuis la loi du 8 janvier 1993 sur la protection et la mise en valeur des paysages, différentes appellations sont employées selon l'échelle d'analyse du paysage : les *ensembles paysagers* à l'échelle régionale (1/250 000), les *unités de paysage* à l'échelle micro-régionale (1/100 000) et les *éléments de paysage* à l'échelle locale (Bourget et le Dû-Blayo, 2010).

1.2. L'émergence de la notion de *paysage de guerre*

Objet d'étude principal de ce mémoire, la notion de *paysage de guerre*, si elle semble *a priori* plus restrictive que celle de *paysage*, est aussi polysémique. Le paysage de guerre est un concept relativement récent né à la fin des années 1980 de la multiplication des travaux portant sur les relations entre guerre et paysages (Pearson, 2012) et faisant suite aux premières recherches réalisées dans les années 1970-1980 par Westing (Westing et Pfeiffer, 1972 ; Westing, 1975, 1980, 1983) dans les campagnes dévastées par la guerre du Viêt Nam.

1.2.1. Le paysage polémologique *de J.-P. Amat (1987)*

En France, **le concept a été abordé pour la première fois sous le terme de *paysage polémologique* par Amat (1987)**, dans un article abordant les dommages des combats de la Première Guerre mondiale sur les paysages de *l'Arc Meusien* (Argonne, Barrois, Hauts de Meuse ; Amat, 1987). Ce néologisme dérivé du mot grec *pólemos* signifiant *guerre*, que l'on retrouve en d'autres endroits sous l'appellation *polémopaysage* (Amat, 1987) ou *polémofaciès* (Amat, 2001), désigne un paysage objectif se référant à « *la matérialité des déchirures forestières, de la dénudation des terres, du décapage des sols jusqu'au substrat minéral* » héritée des combats, incluant les bombardements et l'aménagement du front par les soldats. Dans cette optique, le paysage polémologique est vu sous une dimension systémique, appelée *polémosystème* (figure 1.1). Ce dernier est une adaptation du *géosystème* de Bertrand (Bertrand et Tricart, 1968 ; Beroutchachivili et Bertrand, 1978) à la différence que l'équilibre entre les sphères biotiques et abiotiques est rompu par l'irruption d'une force destructrice dans le système : la guerre, associée à la sphère humaine (Amat, 2001).

L'introduction du concept de polémosystème s'est accompagnée d'une adaptation du vocabulaire associé aux composantes qui l'organisent :

- Le *polémosylvofaciès* désignant la composante biogéographique du système associée aux bois et forêts endommagés ou totalement détruits.
- La *polémotopographie* faisant référence à la composante géomorphologique impactée par les combats, **elle-même recouverte de *polémoformes*, c'est-à-dire de cratères d'obus et de formes aménagées (fossés, abris) sur le champ de bataille**.
- Le *polémosol* associé à la composante pédologique, dont la structure a totalement été désorganisée suite au brassage des horizons.

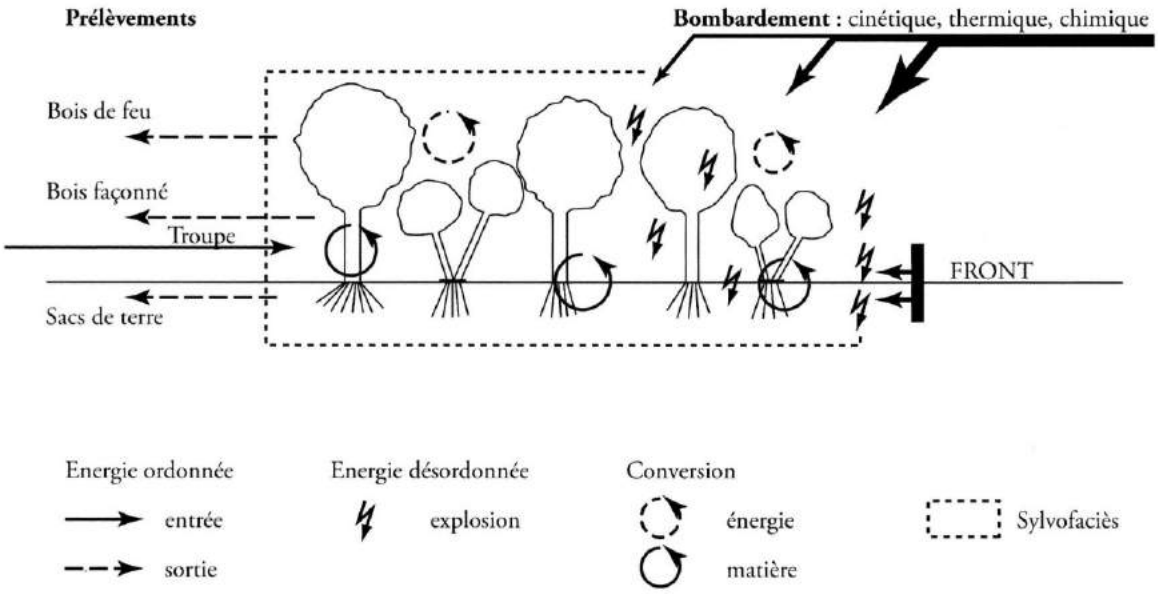


Figure 1.1 – *Naissance d'un polémofaciès forestier (Amat, 2015)*

Puisque le paysage de guerre est étudié sous une forme systémique, il ne peut être compris que s'il a fait l'objet d'une analyse dans le temps permettant de comprendre son organisation actuelle. Amat (2001) identifie **quatre grands stades de mutation paysagère** (figure 1.2) :

- Le paysage d'avant-guerre (qu'il retient comme *sylvofaciès d'avant-guerre* du fait que le terrain d'étude est forestier), s'intéressant à la configuration du milieu physique avant les combats.
- Le *polémofaciès*, défini plus tôt comme le résultat des destructions causées par les activités militaires.
- Le *polémofaciès abandonné*, où le champ de bataille est réapproprié par la nature et l'homme. C'est le temps de la cicatrisation.

- Le *polémofaciès civil aménagé*, tel qu'il apparaît aujourd'hui aux yeux des observateurs, où les stigmates de la guerre, toujours présentes, se fondent dans un paysage remodelé par les populations locales.

Ainsi, il suggère non pas une mais quatre définitions du paysage de guerre vu à travers le filtre du temps.

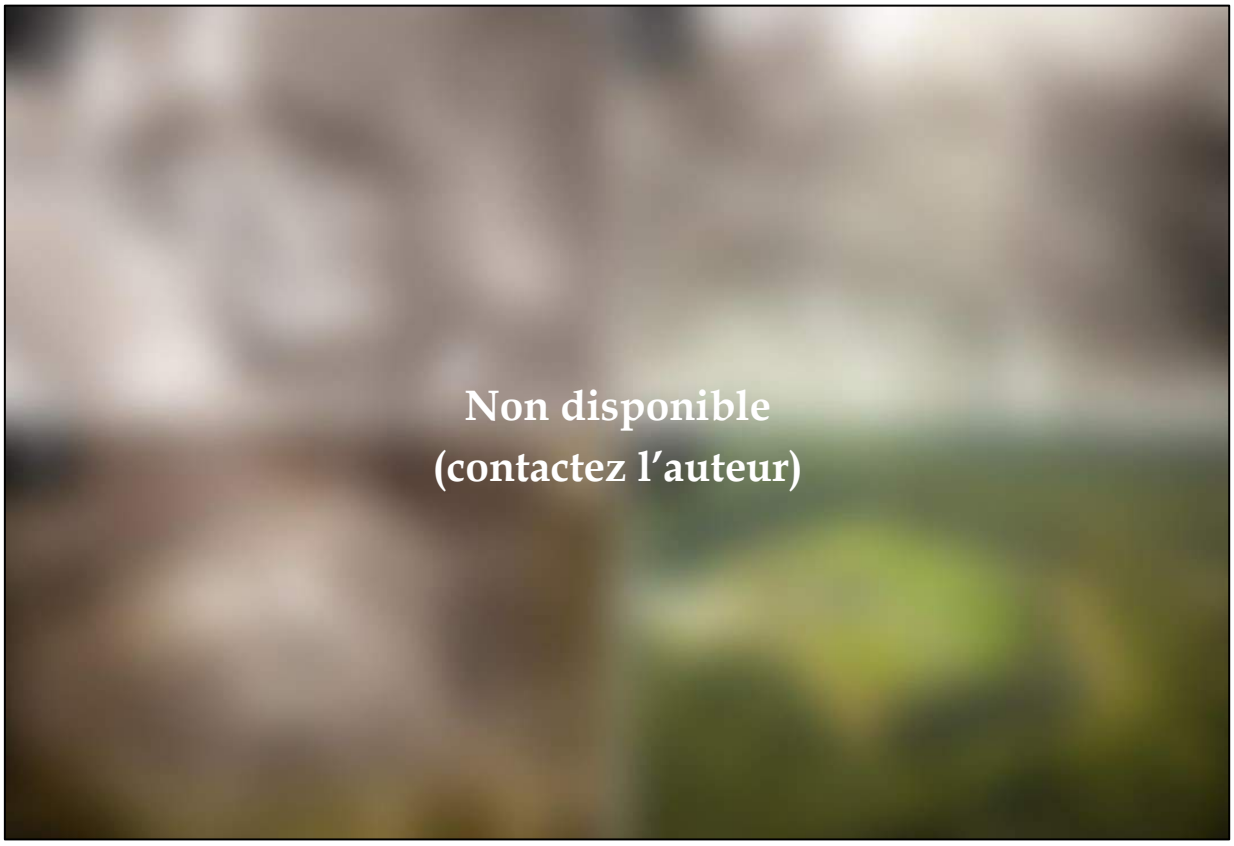


***Figure 1.2** – Les quatre stades de mutation du polémofaciès à travers l'exemple du fort de Douaumont (champ de bataille de Verdun). A : photographie aérienne du 19 février 1915 (Hauptstaatarchiv Dresden). B : photographie aérienne du 4 novembre 1916 (Service Historique de la Défense). C : photographie aérienne de 1927 (Service Historique de la Défense). D : photographie aérienne de 2018. Cliché : H. Wim (www.tracesofwar.com/sights/5902/Douaumont-Fortress.htm).*

1.2.2. De l'usage de la notion à l'heure des commémorations

Au cours des années 2000 et parallèlement aux 90ème et 100ème anniversaires de la Première Guerre mondiale, une myriade de travaux se référant au concept de *paysage de guerre* ont émergé (Saunders, 2001 ; Pearson *et al.*, 2010 ; Pearson, 2012 ; Gheyle *et al.*, 2013 ; Saunders *et al.*, 2013 ; Jansen-Verbeke et George, 2015). Cependant, ces recherches ont peiné à le définir clairement, voire l'ont ignoré. Un exemple de ce manque de conceptualisation se constate dans l'utilisation non-consensuelle du terme de *paysage de guerre* reflété par l'emploi de notions périphériques y faisant référence : *polémopaysage* (Steinbach et Husson, 2007), *paysage de guerre* (Boulanger, 2001 ; Jacquemot, 2014), *paysage de mémoire* (Verkindt et Blanc, 2013) ou *paysage mémoriel* (Jansen-Verbeke et George, 2015). Ce phénomène touche aussi bien la

France que le monde anglo-saxon où la notion de *conflict landscape* (Saunders, 2001 ; Saunders *et al.*, 2013 ; Adderley et Mills, 2014 ; Stichelbaut et Cowley, 2016), pourtant reconnue par une série de colloques[3], est parfois confrontée à celle de *military landscape* (Blades, 2003 ; Orr, 2003 ; Woodward, 2014) ou *battlefield landscape* (Carman et Carman, 2006). Indépendamment de ce manque de coordination, l'ambiguïté qui caractérise la notion peut être liée aux différentes façons d'appréhender le *paysage* puisque les trois approches objective, subjective ou combinée se reflètent dans les définitions des auteurs.

De ce point de vue, l'article de Boulanger (2001) focalisant sur les paysages bouleversés par les combats de la Première Guerre mondiale dans la région picarde est précis sur la définition du *paysage de guerre*, où il le considère sous ses dimensions objectives et subjectives : le paysage de guerre « *se révèle au travers de la perception des traces du conflit qu'il offre à l'observateur dans un espace donné. Il renvoie à la capacité de l'homme de façonner un espace par des forces qui conduisent à la destruction, puis à la reconstruction* ». **Dans son approche**, **Boulanger identifie trois catégories de paysage de guerre** :

- Le paysage *espace du front*, soit le lieu des combats, analysé sous un angle à la fois historique et tactique.
- Le paysage *des formes perceptibles*, s'intéressant aux traces visibles des combats. L'accent est donné sur l'habitat rural, les activités agricoles et les lieux de mémoire, plus que sur les stigmates portés par le milieu physique.
- Le paysage *patrimoine*, vu comme le « *dernier « être » vivant du conflit* ». Dans cette dimension, il est fait référence au paysage mémoriel, où la mémoire du passé est mise en valeur par un « *aménagement ludique et éducatif du paysage de guerre* ».

Dans cette vision alliant matérialité et représentation, la démarche systémique est abandonnée mais la question de l'échelle temporelle n'en est pas moins oubliée puisque « *les inscriptions de la violence s'effacent lentement avec le processus d'érosion de la nature ou par l'action de l'homme* ». Pour chaque définition, un rappel au passé démontre que le paysage de guerre ne peut être déchiffré sans la prise en compte du temps.

Côté anglo-saxon, le colloque *Landscapes of conflict: considering the role of landscape in civil and military conflicts* organisé en 2013 par l'université de Stirling a éclairci le débat sur le concept de *conflict landscape*. En synthèse des dix-huit communications présentées, **Adderley et Mills (2014) ont suggéré une typologie des paysages de guerre en trois classes** :

- Le *paysage géopolitique*, espace de tensions où les populations tentent de s'accaparer les ressources naturelles nécessaires à leur survie. À titre d'exemple, la vallée du Nil constitue potentiellement un paysage de guerre du fait de l'inégalité d'accès et des

[3]« *Landscapes of conflict: considering the role of landscape in civil and military conflicts* » en 2013 à Stirling (Écosse) ; « *Conflict landscapes and archaeology from above* » en 2014 à Ypres (Belgique) ; « *Landscapes of conflict* » en 2018 à Gand (Belgique).

conflits d'usage autour de l'eau, notamment pour l'irrigation des terres (Bouquet, 2011).

- Le *paysage patrimonial*, lieu de mémoire ayant pour vocation de conserver les liens « *entre le paysage et la mémoire sociale* ». Cette définition rejoint celle du paysage de guerre *patrimoine* de Boulanger (2001).
- Le *paysage matériel*, espace façonné par toute action militaire qui se reflète directement ou indirectement dans le paysage. Il se réfère au *polémofaciès* d'Amat (1987, 2001) et au paysage de guerre *des formes perceptibles* de Boulanger (2001).

Il faut bien souligner – l'intitulé du colloque le montre – que *guerre* et *conflit* ne sont pas équivalents, et ne peuvent être confondus.

Du fait que cette définition n'intègre pas assez la dimension temporelle, la typologie d'Adderley et Mills (2014) a été reprise par **Asadpour (2016) qui propose une autre catégorisation des paysages de guerre suivant une logique chronologique**. Il distingue :

- Le *paysage d'avant-guerre* (*Pre-war landscape of conflict*), coïncidant avec le paysage d'avant-guerre d'Amat (2001) et du paysage de guerre *espace de front* de Boulanger (2001).
- Le *paysage de guerre* (*War landscape of conflict*), trouvant son équivalent dans le *polémofaciès* d'Amat (2001).
- Le *paysage d'après-guerre* (*Post-war landscape of conflict*), intégrant à la fois les concepts de *polémofaciès abandonné* et *polémofaciès civil aménagé* d'Amat (2001) et de paysages *des formes perceptibles* et *patrimoine* de Boulanger (2001).

La définition que suggère Asadpour (2016) rejoint assez bien la conception française du *paysage de guerre* et notamment les définitions d'Amat et Boulanger. Elle constitue aussi la définition la plus récente à ce jour.

1.3. Quelle définition retenir ?

Dès lors, pour nous, géomorphologues, quel concept du *paysage de guerre* retenir dans cette diversité de définitions ? Il est clair que le *paysage de guerre* constitue un objet géographique défini par un lieu (le champ de bataille), par une composante de ce lieu (le relief hérité de la guerre) et par le temps (la période d'avant-guerre, celles de la guerre, de l'après-guerre et du présent ; figure 1.3). En forêt domaniale de Verdun, les stigmates géomorphologiques des combats de 1914-1918 persistent comme sur aucun autre champ de bataille (cf. *infra*, § 3.2). Ils se traduisent par la présence en nombre de formes de relief anthropogéniques induites par les bombardements et par l'aménagement du front. **Ce sont ces *polémoformes* qui nous intéressent en raison de leur valeur géomorphologique** (**ils constituent des formes d'un genre nouveau) et archéologique (certaines d'entre elles s'apparentent à des vestiges d'occupations humaines)**. Sous son angle spatial, le paysage de guerre de la forêt de Verdun constitue une entité géographique. Les polémoformes héritées de la Première Guerre mondiale ne subsistent qu'à l'intérieur du massif forestier dont l'action protectrice a permis la conservation depuis leur naissance un siècle plus tôt. La

lisière franchie, elles ont disparu sous l'effet du nivellement des terres par les engins agricoles. Ainsi, ce paysage de guerre *topographique* est aussi *paysage visible* au sens de la définition de Brossard et Wieber (1980) puisqu'il représente une image artificielle (LiDAR en 2013, cartes et photographies pour les périodes antérieures) visualisée puis interprétée par le lecteur. Par conséquent, les formes souterraines, bien qu'elles puissent être devinées, sont une composante généralement invisible du paysage.

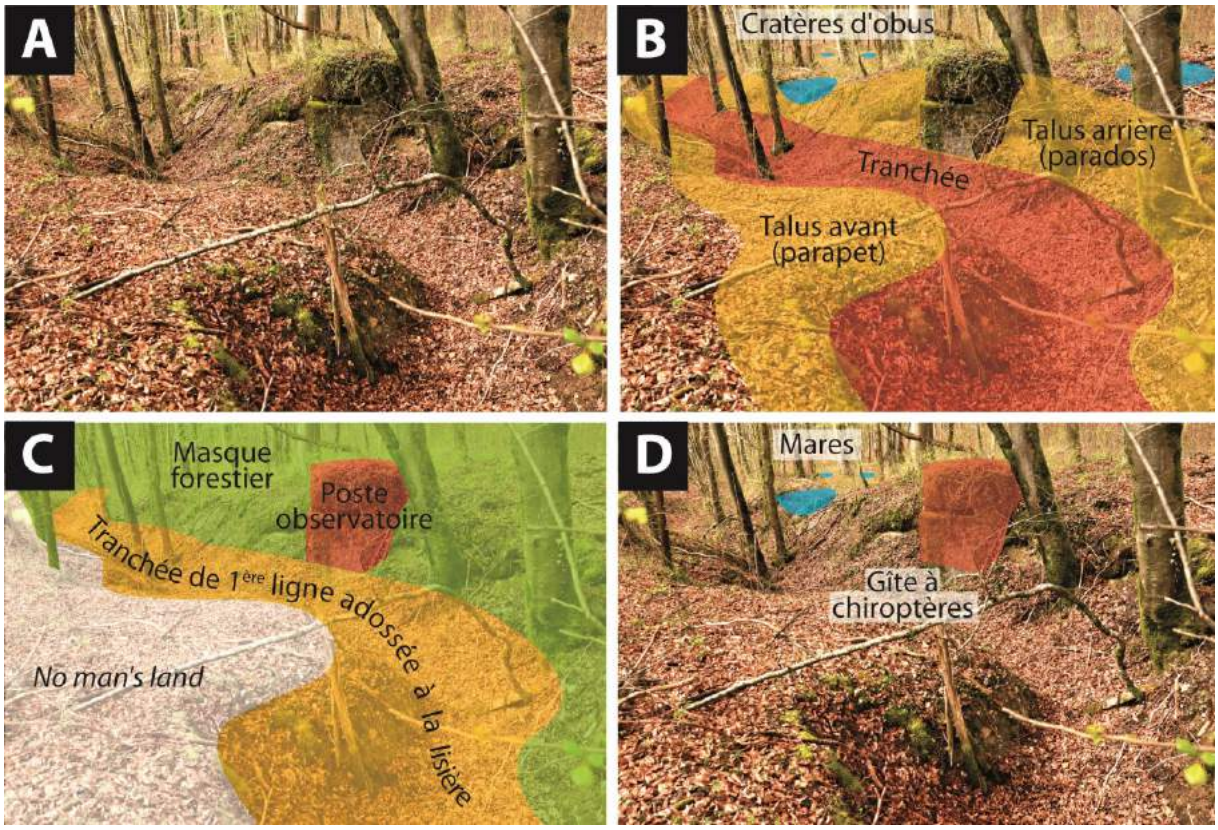


Figure 1.3 – *Les trois visions du paysage de guerre. A : une position allemande de la Première Guerre mondiale aperçue au cours d'une sortie de terrain en forêt domaniale de Verdun. Cliché : D. Jacquemot, 25 mars 2014. B : vision du paysage de guerre « topographique ». Les matériaux déblayés par le creusement du fossé ont créé deux talus de part et d'autre de la structure. C : vision du paysage de guerre « tactique ». Sur cette photographie, le front se situe à gauche et l'arrière-front à droite. La tranchée a été aménagée en lisière pour la masquer et la rendre difficilement accessible. Le poste observatoire, légèrement surélevé et bétonné, a servi à guetter les mouvements adverses à l'extérieur du bois. D : vision du paysage de guerre « écologique ». Durant l'hiver et le printemps, une grande partie des cratères d'obus de la forêt domaniale de Verdun se convertissent en mares, favorisant la présence d'espèces particulières. Les ouvrages bétonnés et galeries souterraines offrent également des niches écologiques pour les chiroptères.*

Notre conception du paysage de guerre fait aussi référence au paysage d'avant-guerre et aux appuis tactiques qu'il a offerts aux armées durant la Première Guerre mondiale (figure 1.3). Cette vision du paysage entre dans ce que l'on appelle classiquement la *géographie militaire* (Boulanger, 2006). Le milieu physique a joué un rôle important dans la disposition des armées. À ce titre, les rivières, les reliefs et aussi les forêts d'avant-guerre ont contribué à leur manière au conflit, en barrant le passage aux troupes ou en les protégeant de la vue et du feu de l'ennemi. Cette vision *antebellum* reconstruite à partir des fonds cartographiques et iconographiques de l'époque, est indispensable car elle constitue un outil essentiel d'aide à l'interprétation du paysage de guerre *topographique* en permettant de comprendre la répartition des polémoformes sur le territoire forestier.

Enfin, **une troisième façon de percevoir le paysage de guerre de la forêt de Verdun est le prisme écologique (**figure 1.3). En modifiant la topographie, les bombardements et les aménagements du champ de bataille ont agi comme une perturbation écologique sur la faune et la flore, de manière régressive en faisant disparaître des espèces, mais aussi de manière progressive en introduisant ou en favorisant de nouvelles espèces. Ainsi, certaines polémoformes sont aujourd'hui peuplées d'animaux et de plantes inexistantes avant le conflit, dont certaines font l'objet d'une protection à l'échelle européenne. Ce mémoire aborde cette dimension environnementaliste du champ de bataille en rendant compte des espèces ayant colonisé la forêt de Verdun et en contribuant à l'inventaire de mares subforestières et de gîtes à chiroptères.

Dans la partie suivante, nous allons voir que les relations entre paysage et guerre ont été appréhendées sous différentes formes au cours des XXème et XIXème siècles. La modernisation des conflits et l'essor des technologies digitales (informatique, télédétection) sont responsables pour une large part de ces évolutions.

2. L'évolution de la recherche sur les relations entre paysage et guerre

Bien qu'un nombre restreint d'auteurs invoquent ce concept de *paysage de guerre*, les relations entre paysage et guerre ont fait l'objet de nombreuses recherches depuis plus d'un siècle. L'influence du milieu physique sur l'organisation des armées, les impacts environnementaux de la guerre sur les paysages, l'inventaire et la conservation des vestiges de guerre, constituent des sujets tout aussi intéressants les uns des autres mais qui restent néanmoins peu connus des géographes. Cette deuxième partie du chapitre tente d'établir un état des connaissances relatives aux recherches sur les rapports paysage/guerre et aux différentes manières de les aborder.

2.1. Les paysages et leurs fonctions tactiques

2.1.1. Un questionnement ancien

Le rôle tactique du terrain dans les opérations militaires a sans doute constitué la première manière d'appréhender les relations entre paysage et guerre. De l'Antiquité jusqu'à nos jours, la guerre a constitué un phénomène récurrent sur les cinq continents. À force de répétition, le soldat s'est adapté, soit en perfectionnant ses armes, soit en améliorant son usage du terrain. Penser le paysage comme un outil de défense ou d'attaque est vite devenu une normalité. Les premiers exemples d'intégration du paysage dans le fonctionnement des armées sont anciens. Durant la guerre des Gaules, César fut surpris de voir ses cavaliers stoppés par les Celtes brittoniques qui profitèrent du terrain pour se défendre : « *repoussés par nos cavaliers, les Barbares se cachèrent dans les bois : ils trouvaient là une position remarquablement fortifiée par la nature et par l'art* » (César, 1825). Considéré comme un des trois éléments de la guerre avec « *les hommes et les armes* » (Villate, 1925), le terrain a soulevé un certain nombre de questions auprès des militaires mais rares en sont les analyses écrites. Le stratège chinois Sūn Zi a été le premier à fournir au VIème siècle avant J.-C. une étude manuscrite approfondie sur le sujet intitulée *Sūn Zi bīngfa* (connu en Occident sous le titre *L'art de la guerre* ; Sun Zi, 2015) et comportant deux chapitres sur l'usage tactique du terrain. Son œuvre fut suivie huit siècles plus tard par celle du théoricien militaire prussien Von Clausewitz, auteur de *Vom Kriege* (*De la guerre* ; Clausewitz, 2006), publiée après sa mort entre 1832 et 1835, intégrant des éléments sur la prise en compte des paysages dans les opérations militaires.

Plusieurs explications tentent d'élucider ce manque d'écrits sur le rôle tactique des paysages. Une première, donnée par l'officier géographe Villate, vient du fait que la nature ne bouge pas assez et qu'elle est « *toujours semblable à ce qu'elle fût* » pour qu'une attention lui soit apportée (Villate, 1925). À ce jour, son œuvre, *Les conditions géographiques de la guerre sur le front français*, est une des seules études s'étant exclusivement intéressées à l'influence du milieu physique dans les combats. Bien qu'il soit centré sur le premier conflit mondial, ce texte n'en reste pas moins une référence indispensable à la compréhension du rôle tactique des paysages. Ce manque d'intérêt pour l'étude scientifique des fonctions tactiques des paysages tient aussi son origine de la crainte d'aborder les questions de géopolitique au lendemain de la Seconde Guerre mondiale (1939-1945 ; Lacoste, 2008, 2012). En effet, ce paysage sous son angle tactique est une problématique de géopolitique comme l'atteste la définition du Robert (Le Robert, 2017) : la géopolitique est l'« *étude des rapports entre les données naturelles de la géographie et la politique*[4] *des États* ». Jusqu'en 1979, où il a fait l'objet d'un article dans *Le Monde* en référence au conflit cambodgien entre Khmers rouges et

[4]Comme le disait Clausewitz en 1832, « *la guerre est la continuation de la politique par d'autres moyens* » (Clausewitz, 2006).

Vietnamiens (Lacoste, 2008), le terme *géopolitique* a été interdit d'utilisation en Europe et aux États-Unis car faisant allusion au nazisme. Lacoste (1976) a été le premier géographe à briser le tabou dans son ouvrage intitulé *La géographie, ça sert, d'abord, à faire la guerre* où le terme n'est certes pas évoqué mais où il soulève la question du rôle des conditions naturelles dans l'histoire militaire, en donnant l'exemple du Fleuve rouge et de son intérêt stratégique durant la guerre du Viêt Nam[5].

2.1.2. Quel rôle des paysages dans l'organisation du champ de bataille ?

Le paysage est acteur dans la structuration du champ de bataille. Chaque enveloppe le composant influence de manière plus ou moins directe les opérations militaires. L'enveloppe biogéographique est de celles qui agissent de manière quasi systématique sur les décisions des armées.

Tout d'abord, **la forêt protège**. Par son feuillage, elle dissimule les troupes, effet néanmoins temporaire dans les forêts caducifoliées à l'opposé des forêts résineuses qui conservent leur feuillage en hiver (figure 1.4). L'expansion de l'Empire Romain au Ier siècle avant J.-C. fut pendant longtemps ralentie par les Barbares de Germanie ayant mis à profit leurs connaissances du terrain dans leur lutte contre Rome (Merglen, 1994). La forêt peut aussi être aménagée pour accentuer son rôle défensif ou pour faciliter l'observation et le tir d'artillerie. Durant la guerre de Sécession américaine, les soldats de l'Union utilisèrent les bois pour y construire de véritables forteresses à proximité de l'ennemi, permettant d'observer les moindres mouvements adverses en toute discrétion[6] (Reclus, 2014). La forêt fait aussi office d'obstacle pour les assaillants souhaitant s'y aventurer. Elle peut même devenir handicapante pour ses défenseurs, constat d'autant plus évident que l'armée est grande. Ainsi n'est-elle pas à mettre en cause dans l'échec cuisant de l'armée française lors de la guerre de Cent ans (1337-1453) en 1415 à Azincourt, pourtant maître du terrain et trois fois plus nombreuse que son adversaire anglais[7] (Minois, 2010) ?

En dehors des travaux de Villate (1925), la question du rôle des bois dans la guerre a été développée sous un angle scientifique dans les années 1990, principalement par Amat (2001) dans le cadre de sa thèse d'État intitulée *La forêt entre guerre et paix 1870-1995 : Étude de biogéographie historique sur l'Arc meusien de l'Argonne à la Woëvre*. À travers l'usage de sources photographiques et d'observations de terrain, il montre comment la forêt a contribué à

[5]Afin d'inonder la région du delta, l'aviation américaine entreprit le bombardement des digues du fleuve. Toutefois, cette opération, bien que partiellement menée, fut dénoncée et stoppée (Lacoste, 1976).

[6]Dans son texte de 1866 intitulé *Histoire des États américains : les États-Unis de 1864 à 1865*, le géographe Élisée Reclus évoquait le rôle des forêts dans le dispositif unioniste lors des combats de mai 1864 en Virginie : « *Au milieu de ces bois, où des corps entiers se glissaient inaperçus jusqu'à une petite distance de l'armée qu'ils voulaient attaquer en face ou sur les flancs, il était absolument indispensable de se retrancher derrière les abatis d'arbres et des fosses à tirailleurs* » (Reclus, 2014).

[7]L'armée française déploya son armée sur un espace d'1 km de large situé entre deux bois, la privant ainsi de ses ailes (Minois, 2010).

l'effort de guerre pendant les combats de 1914-1918. Parallèlement à ses recherches, le sujet a été repris dans un ouvrage de 1994 intitulé *Forêt et Guerre* (Corvol et Amat, 1994), dont six des vingt-sept chapitres focalisent sur l'influence de la forêt sur les armées au cours de conflits allant de la guerre des Gaules à la « Guerre de 14 ». Quelques géographes continuent de s'intéresser à l'implication des forêts dans l'art de la guerre, notamment Boulanger, auteur de *Géographie militaire* paru en 2006.

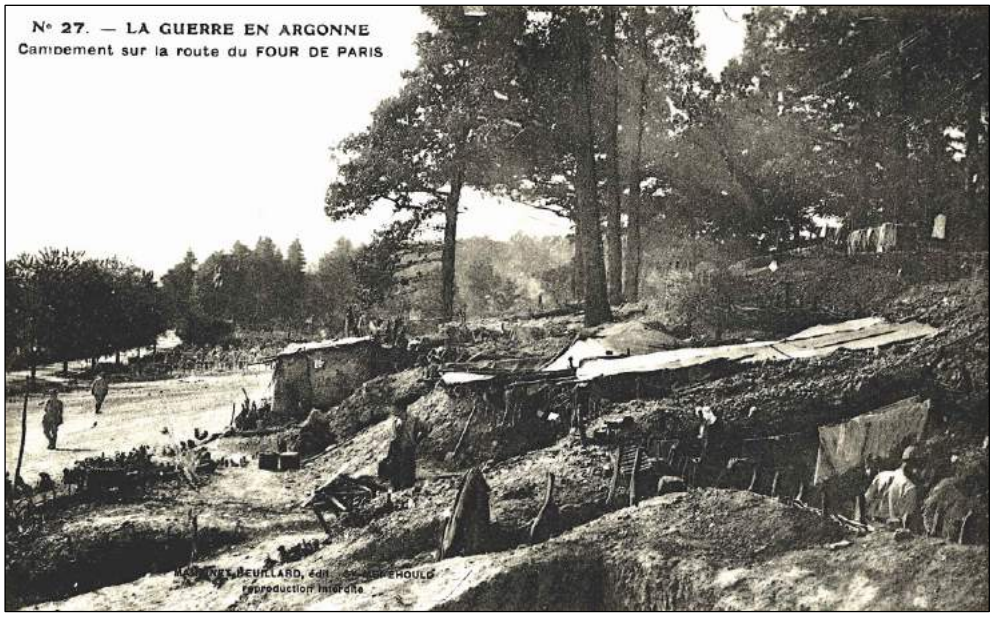


Figure 1.4 *– Position française camouflée (1914-1918) par un talus et un bois (collection personnelle)*

À l'instar des bois, **le relief a servi d'abri aux soldats jusqu'à la Seconde Guerre mondiale**, période marquée par un usage intense de l'aviation de bombardement permettant de s'affranchir du relief (Boulanger, 2006). Positionnées dans l'angle mort d'un vallon ou d'une colline, les troupes peuvent difficilement être vues et atteintes par des projectiles (Lacoste, 1976 ; Boulanger, 2006 ; figure 1.4). Durant la guerre du Viêt Nam, les *Viêt Cong* profitèrent largement du relief escarpé du territoire vietnamien pour se protéger des incursions ennemies[8] (Robert, 2011). Ces accidents du terrain peuvent aussi constituer des barrières difficilement franchissables. En témoignent les nombreux sites fortifiés répartis à travers le monde et perchés au sommet d'une colline ou d'une montagne, tel le fort de Mehrangarh à Jodhpur (Rajasthan), resté inviolé pendant les six siècles de son existence. En complément de leur fonction défensive, les hauteurs constituent aussi des sites stratégiques pour l'organisation des attaques en raison de leur position dominante, d'observatoires. Depuis l'apparition de l'artillerie au cours de la guerre de Cent ans (Minois, 2010) et l'augmentation des portées de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres, les hauteurs sont des points idéaux pour les canons pouvant prendre en enfilade les troupes

[8]« *Ce n'était pas des branches ni des feuilles que se serviraient les guérilleros pour se camoufler mais plutôt les contours des chemins, des collines et des vallées* » (Hilsman cité par Hersh, 1969).

situées en contrebas. Lors de la bataille de Gettysburg de 1863, les Confédérés, alors qu'ils occupèrent la colline de *Big Round Top* surplombant de plusieurs dizaines de mètres le champ de bataille, se rendirent compte de l'avantage que put offrir une telle position pour l'artillerie[9]. Ce fut le cas des forts de rive gauche de la Meuse durant l'offensive sur Verdun. Ces lignes de crête constituent aussi des points de départ aux attaques au sol. Les charges frontales y sont plus efficaces pour les troupes dévalant les pentes et souvent désastreuses pour les forces situées en position ascendante. Les exemples de ce type sont nombreux dans l'Histoire, à l'image des troupes napoléoniennes repoussées en 1809 lors d'un assaut au cours de la bataille de Talavera[10].

Souvent associée au relief, **la nature des sols**, **des roches sous-jacentes et les aquifères**, peuvent peser sur le déroulement des manœuvres militaires et des combats. Leur prise en compte reste cependant bien secondaire dans le discours des militaires, peut-être en raison de leur caractère bien moins visible que les formes du relief. Il existe cependant quelques cas d'intégration de ces paramètres dans la structuration du champ de bataille. Les sols peuvent être utilisés à des fins défensives. Édouard Bruce, chef de l'armée écossaise lors de la bataille de Bannockburn en 1314, positionna son armée de manière à ce qu'elle soit protégée sur son flanc gauche par les sols humides bordant le ruisseau Bannockburn. Forcée de combattre sur un terrain difficile, la cavalerie anglaise fut lourdement atteinte et dut se replier. Après deux jours de combats, la bataille se solda par une victoire écossaise décisive conduisant à l'indépendance de l'Écosse (Scott, 1837 ; Tipping *et al.*, 2014). Considérer les ressources en eau souterraines peut aussi s'avérer crucial au cours des guerres de siège. Dans un tel cas, il est impératif pour les armées de grande taille que les soldats aient accès à des points d'eau à proximité de leur campement, comme l'atteste le siège d'Alesia en 52 av. J.-C. Organisées autour de la cité, les troupes de César aménagèrent leurs défenses à seulement quelques centaines de mètres de sources d'eau, privant dans le même temps leur adversaire de cette ressource (Vidal et Petit, 2010).

Ces questionnements sur la topographie, la pédologie et la géologie dans la tactique militaire sont beaucoup étudiés par les chercheurs anglo-saxons, en particulier des géologues, et font l'objet d'une discipline à part entière : la *military geology* (aux États-Unis ou encore au Royaume-Uni, la géomorphologie est une science géologique et non pas géographique) ou *kriegsgeologen* en Allemagne. La première prise en compte scientifique de ces variables dans un dispositif militaire date de la guerre russo-japonaise (1904-1905) où les Russes employèrent des géologues dans les rangs de leur armée pour la construction de forts (Smith, 1964). Le rôle de la géomorphologie, de la pédologie et de la géologie a été

[9]« *Oates n'avait pas pris part à la controverse, mais dès qu'il eut atteint le sommet, il se rendit compte que les Confédérés avaient le moyen de forcer les Fédéraux à abandonner tout leur dispositif. Il suffisait de couper quelques arbres et de hisser les canons sur la colline* » (Alexander, 2012).

[10]« *Le 28, à six heures du matin, une forte canonnade commença sur toute la ligne anglaise, et deux divisions d'infanterie ennemie s'avancèrent intrépidement le long de la vallée pour déloger les troupes du général Hill ; mais à peine eurent-elles gravi la hauteur, qu'elles furent chargées à la baïonnette, et renversées avec un grand carnage* » (De Beauchamp, 1837).

particulièrement important au cours de la Première Guerre mondiale qui vît les armées se doter d'officiers géologues et géographes dès l'immobilisation du front à la fin de l'année 1914 (Lévy, 1926 ; SGA, 1936 ; Smith, 1964 ; Doyle *et al.*, 2000 ; Rose *et al.*, 2000). Plus récemment, ces relations ont été explorées dans une série de travaux portant sur la « Guerre de 14 » et sur la guerre de Sécession américaine (Doyle et Bennett, 1997 ; Underwood et Guth, 1998 ; Doyle *et al.*, 2001 ; Doyle et Bennett, 2002 ; Doyle *et al.*, 2005 ; Doyle, 2006 ; Doyle, 2014 ; Hippensteel, 2016). Le sujet a une nouvelle fois été discuté dans deux ouvrages remarquables : *Geology and Warfare: Example of the influence of terrain and geologists on military operations* (Rose et Nathanail, 2000) et *Fields of battle: Terrain in military history* (Doyle et Bennett, 2002). Dans son travail de thèse, Hupy (2005) examine les rapports entre relief et guerre en abordant le rôle de la « *position des armées en relation avec la topographie* ». En France, ce thème a été ré-introduit par Boulanger (2006), par Devos *et al.* (2015), puis par deux travaux publiés en 2018 par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM ; Hanot et Simien, 2018 ; Hubé, 2018). Il fait l'objet d'un ouvrage collectif intitulé *14-18. La Terre et le Feu. Géologie et géologues sur le front occidental* (parution prochaine) réalisé par des chercheurs membres de l'Association des géologues du Bassin de Paris.

Les cours d'eau possèdent eux aussi une valeur tactique certaine pour les armées. Ils sont d'abord des axes de communication et par conséquent des milieux privilégiés pour les invasions (Boulanger, 2001). Parmi les peuples ayant le plus profité des rivières dans la pratique de la guerre, citons les Vikings, qui firent de nombreuses incursions à travers les grands fleuves européens entre les VIIIème et XIème siècles[11]. Ces rivières constituent aussi des barrières pour toute armée se déplaçant, en particulier lorsqu'elles sont larges et dynamiques (Boulanger, 2001 ; Le Pautremat, 2007). Lors de la guerre de Vendée (1793-1795), les insurgés vendéens, privés de leurs ponts par les forces françaises, parvinrent difficilement à se rendre de part et d'autre de la Loire[12], compromettant ainsi leur révolte (Rolland-Boulestreau, 2013). Enfin, les rivières peuvent faire office d'armes pour quiconque sait les contrôler. L'assèchement ou le déclenchement volontaire d'inondations à partir de barrages ne constitue pas un fait rare. À Verdun par exemple, le marquis de Vauban fît ériger des ponts-écluses afin d'inonder la plaine de la Meuse et de protéger la cité de toute attaque par le Sud (Girardot, 1982).

À la forêt, au relief, au sol et à la rivière, s'ajoute **le climat**, dernière composante naturelle du paysage. Son rôle méconnu s'avère souvent important au cours des guerres. Il est d'abord intéressant de rappeler que la grande majorité des conflits passés, en particulier ceux

[11]« *Les Vikings remontaient aisément les principales rivières (qui ont conservé leurs noms) pour leurs incursions, et ces voies naturelles de pénétration leur servirent ensuite d'axes d'implantation* » (Renaud, 2003).

[12]« *Le 28 décembre 1793, le général Marceau écrit au Ministre de la Guerre et délimite deux pays insurgés à qui il donne les noms de petite Vendée, pays des Chouans, et grande Vendée, au sud de la Loire. Il conseille au Ministre de transformer la Loire en « une barrière impénétrable » entre les deux « Vendées »* » (Rolland-Boulestreau, 2013).

précédant la Révolution française, ont tenu compte de la saisonnalité dans leur déroulement en privilégiant l'hiver pour le repos des armées[13], période peu favorable aux combats en raison des conditions thermiques, de précipitations et de l'état de l'atmosphère régulièrement soumis au brouillard (Pagney, 2008). Certaines armées ont également profité des conditions hivernales pour se défaire des barrières naturelles que peuvent constituer les cours d'eau, à l'image du roi de Suède Charles X, qui en traversant le Grand Belt gelé parvint à défaire les Danois en 1658 (Pagney, 2008). Sur l'échelle plus courte des événements météorologiques, la question du temps se révèle aussi importante au cours d'une bataille. En ce sens, le débarquement du 6 juin 1944 en Normandie au cours de la Seconde Guerre mondiale a constitué « *sans doute la réussite la plus spectaculaire de la météorologie* », car celui-ci a été orchestré pour profiter d'une accalmie au cours d'une « *période météorologique tumultueuse* » (Pagney, 2008). L'emploi des armes chimiques durant la Première Guerre mondiale et en particulier le « gaz moutarde » a également impliqué de bien se renseigner sur les conditions météorologiques avant chaque bombardement, auquel cas les soldats seraient victimes de leur propre attaque[14]. Bien qu'intéressante dans l'art de la guerre, cette influence du climat sur le champ de bataille est mal connue comme le démontre le nombre restreint de travaux s'y intéressant. En France, seuls deux géographes y ont consacré leurs recherches : Pagney, auteur des ouvrages *Le climat, la bataille et la guerre* (2008) et *L'incertitude climatique et la guerre* (2016), et Savouret, qui a publié des articles sur les relations climat et guerre (*e.g.*, Savouret et Cantat, 2008 ; Savouret *et al.*, 2010, 2011).

2.2. Les paysages façonnés par la guerre

2.2.1. La guerre du Viêt Nam, précurseur dans l'analyse des dommages de guerre sur les paysages

Avec la montée des préoccupations environnementales dans les années 1970, est apparue une nouvelle manière d'appréhender les relations entre paysage et guerre consistant à analyser les conséquences des conflits armés sur le milieu naturel. En la matière, la guerre du Viêt Nam a été précurseur en raison des nombreuses agressions faites aux paysages. Le conflit a naturellement été suivi d'un nombre important d'études géographiques évaluant et dénonçant les dommages causés par l'armée américaine sur le territoire vietnamien. C'est en particulier le cas des recherches de Westing, considéré comme le « *pionnier dans l'étude des impacts environnementaux de la guerre* » (Westing, 2013). Avec ses collègues Orians et Pfeiffer, il a publié de nombreux travaux (Orians et Pfeiffer, 1970 ; Pfeiffer, 1975 ; Westing, 1975 ; Westing, 1980) portant sur les conséquences écologiques de

[13]Durant la guerre des Gaules (58-50 av. J.-C.), « *César, pour employer le reste de la campagne, se porte en personne sur le territoire des Morins et des Ménapiens, mais l'intempérie de la saison le force à ramener l'armée et à la mettre en quartier d'hiver* » (César, 1825).

[14]« *Les vagues (de gaz) réclamaient également des conditions atmosphériques particulières : temps sec sans soleil, vent dans la direction convenable avec une vitesse variant de 2 à 5 mètres, pour éviter les retours ou la dilution dans l'air* » (Anonyme, 1921).

l'utilisation de l'*agent orange* sur les forêts vietnamiennes, herbicide surpuissant employé par l'armée américaine entre 1961 et 1971 pour détruire les forêts et ainsi mieux lutter face aux *Viêt Cong*. Il en résulte encore aujourd'hui des séquelles sur l'environnement et sur les populations locales qui souffrent de cancers ou de malformations (Mossanen *et al.*, 2017 ; figure 1.5). Dans un article intitulé *The cratering of Indochina* paru en 1972 dans *Scientific American*, Westing et Pfeiffer abordent la question des bombardements et de leurs effets géomorphologiques. Ils estiment à 26 millions le nombre de cratères d'obus générés sur plus de 1 700 km² entre 1965 et 1971, illustrant le pouvoir destructeur de la guerre sur le relief (figure 1.5). Le thème de la guerre du Viêt Nam continue d'attirer l'attention des chercheurs. C'est le cas de Hupy (2010) puis de Tran (2006) et Robert (2011) qui l'ont tous deux abordé dans leur thèse de biogéographie historique.

Dans les années 1990 et 2000, de nouveaux travaux relatifs aux impacts environnementaux de la guerre ont émergé parallèlement à l'intérêt croissant suscité par les commémorations du centenaire de la Première Guerre mondiale. Une série de travaux ont tenté de les étudier, principalement en France, en Belgique, au Royaume-Uni et en Italie. Nous y reviendrons plus tard dans la présentation des paysages de guerre de 1914-1918 (cf. *infra*, § 3.1). En complément du premier conflit mondial, une attention particulière a été portée aux impacts paysagers générés par la Seconde Guerre mondiale. Du fait qu'elle se soit caractérisée par une lutte généralisée et par l'emploi d'un arsenal de guerre d'un nouveau genre, elle a fait l'objet de nombreuses études historiques et géographiques dont quelques-unes abordent la question des dommages de la guerre sur les paysages. À ce propos, les recherches de Passmore, de Capps Tunwell et de Harrison sont remarquables et uniques en leur genre car elles sont les seules à focaliser sur les dégâts géomorphologiques causés par ce conflit et en particulier ceux issus des bombardements dans la forêt normande des Andaines (Passmore *et al.*, 2013 ; Passmore *et al.*, 2014 ; Capps Tunwell *et al.*, 2015 ; Capps Tunwell *et al.*, 2016 ; Capps Tunwell *et al.*, 2017).

Figure 1.5 – *Conséquences de la Guerre du Viêt Nam sur les paysages ruraux. À gauche, une mangrove bombardée dans la province de Gia Định au sud du Viêt Nam. Cliché : A. H. Westing, août 1971 (Westing et Pfeiffer, 1972). À droite, une forêt partiellement détruite par les bombardements et l'agent orange dans la province de Gia Định. Cliché : A. H. Westing, août 1971 (Westing, 2013).*

Il existe aussi une multitude de travaux associés à des guerres plus localisées ou aux effets des activités militaires pratiquées en dehors d'un conflit (*i.e.*, essai, entraînement). Omar *et al.* (2005) ont consacré leurs recherches sur la guerre du Golfe (1990-1991) et ses effets sur la compaction et l'altération chimique des sols au Koweït. Dudley *et al.* (2002) ont abordé les séquelles de plusieurs conflits depuis la guerre du Viêt Nam à la guerre d'Irak (2003-2011) sur la vie sauvage et plus spécialement sur la faune. Une étude similaire, publiée par McNeely (2003), traite des effets de la guerre sur la biodiversité, notamment en contexte forestier. Berhe (2007) a discuté des conséquences de l'implantation de champs de mine sur le paysage à travers le monde. Ilyés (2006) a évoqué l'introduction de nouvelles formes de relief par la guerre, de la guerre Han-Xiongnu (133 av. J.-C. à 89 ap. J.-C.) aux conflits modernes. Francis (2011) a proposé un aperçu généraliste des actions effectuées par la guerre sur les écosystèmes aquatiques. Hernández-Delgado (2014) a quantifié les destructions faites aux barrières coralliennes de Porto Rico par les bombardements d'essai américains des années 1960-1970. Kiernan (2012, 2015), enfin, a examiné les effets d'affrontements contemporains sur les paysages du Laos (conflits du XIXème siècle avec les Chinois puis les Siamois, guerre civile laotienne de 1953 à 1973).

2.2.2. Évolution des dégâts infligés par la guerre sur l'environnement

D'un point de vue chronologique, **l'accroissement des dommages de la guerre sur l'environnement est corrélé à l'augmentation des énergies libérées par les combats**, **notamment de l'artillerie** (Hupy, 2005 ; Ilyés, 2006 ; Hesse, 2014). Les premières séquelles sur l'environnement remontent à l'Antiquité qui vit les hommes aménager le paysage pour se défendre face aux conquérants. Un exemple phare est la Muraille de Chine, 7 240 km de fortification contre les invasions des tribus nomades Xiongnu. Son édification, entre 1100 av. J.-C. et 1644 ap. J.-C., entraîna l'extraction de millions de m^3 de matériaux (Ilyés, 2006). Un exemple similaire est l'aménagement à travers l'Europe du *limes* de l'Empire Romain, prenant la forme de longs remparts de pierres (*e.g.*, le mur d'Hadrien construit entre 122 et 128 ap. J.-C., long de 120 km destiné à contrer les incursions des Picts d'Écosse), ou de fossés (*e.g.*, la tranchée de Csörsz dans la grande plaine de Hongrie, longue de 550 km, profonde de 2 à 4 m et large de 5 à 9 m, dont la construction exigea l'extraction de près de 15 millions de m^3 de terre ; Ilyés, 2006).

Ces perturbations géomorphologiques, à l'origine de la construction de défenses, se poursuivirent au Moyen-Âge avec une intensité croissante notamment aux abords des villes assiégées qui virent leurs envahisseurs aménager autour d'elles des réseaux de fossés (Ilyés, 2006 ; Minois, 2010 ; Hurard *et al.*, 2014). En réponse à ces attaques, les cités se fortifièrent de mottes surmontées de donjons puis de châteaux forts servant à la défense et à l'observation des alentours. Il en résulte aujourd'hui la présence parfois évidente de ces anciennes mottes castrales dans le paysage, à l'image de la motte de Brion dans le Puy de Dôme matérialisée par une butte résiduelle de plusieurs mètres de hauteur et de circonférence. Avec l'irruption de la guerre de Cent ans en 1337, « *une véritable frénésie de fortification se répand* […] *: moulins,*

manoirs, églises, fermes, granges, s'entourent de fossés, se dotent de hourds, voire de créneaux ; on y entasse les projectiles. Chaque communauté veut se doter d'un lieu de défense » (Minois, 2010). Ce conflit a constitué un tournant dans les méthodes de combats avec l'introduction de la poudre à canon sur le champ de bataille[15] sans que celle-ci ait pu réellement bouleverser le paysage géomorphologique du fait de son usage exclusivement réservé aux tirs de projectiles non explosifs (Lacabane, 1845 ; Hupy, 2005 ; Hupy et Schaetzl, 2006). L'avènement de l'artillerie lourde vers les années 1400 entraîna des adaptations urbaines (Salamagne, 1993 ; Ilyés, 2006). Les redoutes s'installèrent sur les lignes de crête pour accroître leur rayon d'action. Les cours d'eau furent déviés pour alimenter les douves et accentuer l'effet des remparts à l'image des citadelles du marquis de Vauban des XVIIème et XVIIIème siècles.

Le XIXème siècle a constitué un nouveau siècle de révolutions durant lequel la poudre à canon fut employée à des fins d'explosion. Il a fallu néanmoins attendre les années 1860 et la guerre de Sécession américaine pour la voir utilisée sur le champ de bataille mais de manière assez limitée du fait de son instabilité (Hupy, 2005 ; Hupy et Schaetzl, 2006 ; figure 1.6). Ce conflit s'est accompagné d'une multiplication des épisodes de *guerre de mine*, combats souterrains menés à partir de tunnels et de l'introduction de charges explosives sous les lignes ennemies. De telles explosions ont engendré des cicatrices géomorphologiques irréversibles, à l'image du grand cratère formé par la détonation de 3 600 kg d'explosifs le 30 juillet 1864 au cours du siège de Petersburg et qui persiste dans le paysage actuel (long de 60 m, large de 15 m et profond de 7 à 9 m ; Pittman, 2000).

La Première Guerre mondiale a marqué un nouveau stade dans l'évolution de l'artillerie et des perturbations faites à l'environnement. Jamais une guerre n'avait impacté le paysage de manière aussi directe. Obus explosifs ou à gaz, grenades et mines ont été employés de manière inédite à une échelle industrielle. Pour prendre conscience de l'immensité de cette guerre, donnons quelques chiffres : uniquement du côté français, la production quotidienne d'obus au 10 novembre 1914 est de 18 000 obus de 75 mm, 56 000 fin décembre et 63 000 au milieu du mois de janvier 1915, valeurs qui n'incluent pas les projectiles d'autres calibres et des autres pays belligérants (Amat, 2001). Au total, il est estimé à 1,45 milliard le nombre d'obus tirés au cours du conflit sur l'unique front occidental (Masson-Loodts, 2014), traduisant potentiellement près d'un milliard de cratères d'obus générés dans les campagnes belges et françaises. De ce fait, la « Guerre de 14 » eut des conséquences désastreuses, tant d'un point de vue humain (près de 10 millions de morts) qu'environnemental.

[15]« *S'il est un domaine que la guerre de Cent ans a considérablement fait évoluer, c'est évidemment celui de l'armée et des techniques militaires. Le conflit commence à coups de flèches et se termine à coups de canon* » (Minois, 2010).

Figure 1.6 – *Une position d'artillerie lourde reconstituée sur le champ de bataille de Gettysburg (1863). Remarquons le bourrelet en forme de fer à cheval disposé en avant du canon. Cliché : R. de Matos-Machado, 27 août 2015.*

Figure 1.7 – *Le cratère Lochnagar résultant de l'explosion d'une mine britannique durant la bataille de la Somme (1916). Les terrains occupés par le cratère Lochnagar, également nommé « Trou de mine de la Boiselle » ou « Grande mine », ont été achetés en 1978 par le britannique Richard Dunning qui en a fait un site de mémoire où se recueillent chaque année des milliers d'européens. Le cratère a été classé « monument historique » en 1998. Cliché : R. de Matos-Machado, 27 mars 2013.*

Sur le plan des paysages, les forêts furent rasées, les sols pulvérisés, les reliefs parfois abaissés de plusieurs mètres. Au sommet de la cote 304 (Meuse) par exemple, une différence de 4 mètres fut constatée lors d'un levé topographique après les bombardements de la bataille de Verdun (434 m en 1915, 430 m en 1917 ; Hupy et Schaetzl, 2006). De tels bouleversements s'observent également en profondeur puisque les épisodes de *guerre de mine* furent particulièrement fréquents en 1914-1918 (White, 2007 ; Hutchinson *et al.*, 2008 ; Stichelbaut et Chielens, 2013 ; Stichelbaut *et al.*, 2017). Dans la Somme notamment, de vastes *entonnoirs* (nom donné aux cratères formés par l'explosion d'une mine souterraine) émergèrent le 1er juillet 1916 à 7 h 30 lors du lancement de la bataille de la Somme. Ce fut le cas du cratère Lochnagar de La Boiselle (Somme) profond de 15 m et large de 80 m résultant

de l'explosion de 27 tonnes d'ammonal par les *Royal Engineer tunnelling companies* et dont les traces sont encore perceptibles (Doyle *et al.*, 2000 ; figure 1.7).

Plus meurtrière et plus sophistiquée suite à l'essor de l'aviation de bombardement et de l'arme atomique, la Seconde Guerre mondiale a, paradoxalement, engendré moins de dégâts dans les paysages naturels que la Première Guerre mondiale (Hupy et Schaetzl, 2006). Cela s'explique d'abord par la grande mobilité des opérations d'une guerre de mouvement. C'est aussi une question d'échelle : plutôt que de lutter sur une bande continue large de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, les combats se répandirent à travers des continents entiers, principalement en Europe. Les agglomérations furent principalement prises pour cible puisqu'elles formèrent des refuges privilégiés pour le matériel et le personnel de combats (Hupy et Schaetzl, 2006). Les exemples de guerre urbaine sont nombreux : le *Blitz* (1940-1941), la bataille de Stalingrad (1942-1943), la bataille de Marseille (1944), la bataille de Berlin (1945)… Toutefois, en raison de la forte capacité de résilience de la ville, les traces physiques des combats de la Seconde Guerre mondiale ont quasiment toutes été effacées. Il n'en reste plus que des traces mémorielles. Il en va de même en milieu rural, où les atteintes au milieu naturel furent très localisées. Les campagnes de Normandie font partie de ces paysages ravagés, qui furent d'abord aménagés puis bombardés lors du débarquement du 6 juin 1944 (Capps Tunwell *et al.*, 2016). En témoignent les nombreux cratères encore présents sur le littoral (*e.g.*, Pointe du Hoc). Dans des proportions décuplées, mentionnons également les régions d'Hiroshima et de Nagasaki au Japon, victimes de l'arme atomique, et qui ont sans doute constitué des cas uniques de destruction extrême des paysages par la guerre. Hormis ces quelques exemples, les cas de bouleversement paysager dans les campagnes restent rares.

Depuis la Seconde Guerre mondiale, plusieurs centaines de conflits ont multiplié les destructions des paysages sur la surface terrestre : guerre de Corée (1950-1953), guerre d'Algérie (1954-1962), guerre du Biafra (1967-1970), guerre Iran-Irak (1980-1988), guerre du Golfe (1990-1991), guerre d'Irak (2003-2011), autant d'événements néfastes pour l'environnement. Sans rappeler la guerre du Viêt Nam, dont les séquelles environnementales ont déjà fait l'objet d'une brève analyse, les guerres modernes de la fin du XXème siècle et du XXIème siècle ont elles aussi contribué à la dégradation du milieu naturel. Néanmoins, nous pouvons considérer que même si les armes actuelles possèdent un pouvoir destructeur bien plus fort[16] que par le passé (*e.g.*, bombe atomique, missile balistique), les dégâts sur l'environnement restent assez limités. Pour plusieurs raisons. D'abord, parce que le paysage militaire s'est considérablement métamorphosé en l'espace de quelques décennies. Sur le plan stratégique, les opérations d'infanterie de grande envergure ont régressé au profit d'opérations aériennes beaucoup plus rapides et efficaces. Les nouvelles technologies « *ont*

[16]Le plus grand cratère anthropogène du monde, le cratère Sedan aux États-Unis (390 m de diamètre et 98 m de profondeur), résulte d'un essai nucléaire américain du 6 juillet 1962 (Hesse, 2014).

pour résultat d'éloigner l'homme du champ de bataille » (Schmoll, 2006). Aux bombardements de masse ont succédé des bombardements stratégiques, ciblant des lieux particuliers plutôt que des régions toutes entières (Schmoll, 2006). Ces opérations sont plus fréquentes encore depuis l'apparition des images satellite dans les années 1970 et des armes de nouvelle génération capables de toucher leur cible à distance avec une précision déconcertante. Une deuxième raison est le coût actuel des opérations militaires. La pratique de la guerre aérienne implique le déploiement d'un matériel considérable et coûteux : avions, aéroports (ou porte-avions), missiles, etc. En France, d'après la loi de finances de 2015, un missile guidé AASM coûte 170 000 euros, un missile de croisière naval MDCN, 2,86 millions d'euros et un avion Rafale B, 73 millions d'euros (Sénat, 2015). D'après un article paru dans *Le Monde* en 2017, les dépenses relatives aux opérations menées par l'armée américaine de 2001 à 2017 en Afghanistan avoisineraient les 2 000 milliards de dollars (Guibert, 2017). Il résulte de ces coûts vite insupportables une utilisation limitée de ces armes. De ce fait, les dégâts physiques sont de plus en plus limités. Enfin, la décroissance des dommages environnementaux (visibles) causés par les guerres et autres activités militaires est aussi liée aux actions menées par la communauté internationale, de plus en plus soucieuse des armes employées par les pays en guerre, et dont la politique consiste à faire appliquer la doctrine « zéro mort » en passant notamment par le développement d'armes non-létales (Schmoll, 2006). Le démontrent les multiples conventions signées à la suite de la guerre du Viêt Nam, même si nombre d'entre elles ne sont pas respectées. C'est le cas par exemple du protocole additionnel I aux *Conventions de Genève* de 1949, signé par 159 États en 2002, dont l'article 35 interdit l'usage des « *méthodes et moyens de guerre conçus pour causer, ou dont on peut s'attendre qu'ils causeront, des dommages étendus, durables et graves à l'environnement naturel* » (Boulanger, 2006). Un autre exemple est donné par l'entrée en vigueur le 29 avril 1997 de la *convention sur l'interdiction de la mise au point, de la fabrication, du stockage et de l'usage des armes chimiques et sur leur destruction*, qui interdit l'emploi d'armes chimiques sur le champ de bataille. Mais cette convention est-elle respectée, comme le montre, entre autres, la guerre en Syrie ?

Ainsi au cours de l'Histoire, la guerre a bouleversé les paysages. Les dommages se sont accentués depuis l'Antiquité jusqu'à atteindre leur sommet durant la Première Guerre mondiale, conflit qui reste à l'heure actuelle le plus dévastateur de l'histoire militaire. Après avoir subi une nouvelle fois les méfaits des conflits lors de la Seconde Guerre mondiale puis la guerre du Viêt Nam, le milieu naturel a été relativement épargné par les affrontements de la fin du XXème siècle et du début du XXIème siècle du fait d'une transition d'une guerre terrestre vers une guerre aérienne fondée sur la planification d'opérations rapides et localisées. Cependant, la question des dysfonctionnements induits sur les écosystèmes reste globalement peu connue. Cet aspect de la guerre a partiellement été abordé dans la thèse (cf. *infra*, chapitre 9) mais constitue aujourd'hui un sujet de plus en plus discuté du fait de la place occupée par la question environnementale dans le débat public.

2.3. Le paysage de guerre et sa valeur archéologique

2.3.1. L'archéologie de la guerre

Dans les années 1980, les archéologues se sont rendus compte du potentiel offert par les champs de bataille pour retracer l'histoire des civilisations perturbées ou disparues. Dans ces lieux de rassemblement d'individus et tombeaux de nombre d'entre eux, les restes humains et matériels abondent (mobilier, relief), représentant autant de témoignages des sociétés et modes de vie passés (Desfossés *et al.*, 2008 ; Jacquemot et Legendre, 2011 ; Schnitzler et Landolt, 2013). De plus, ces sites forment souvent des entités géographiques bien définies, facilitant ainsi leur appréhension (Carman et Carman, 2006). Pour la bataille d'Azincourt par exemple, les limites du site sont données par les bois d'Azincourt et de Tramécourt (Minois, 2010), certes partiellement disparus, mais dont les traces se devinent par photographie aérienne ou grâce aux cartes anciennes.

L'Américain Scott a été un des premiers[17] à prendre conscience de la valeur archéologique des champs de bataille en s'intéressant au site de *Little Bighorn* dans le Montana aux États-Unis, théâtre des affrontements entre Américains et Amérindiens le 25 juin 1876 (Carman, 2005 ; Pollard et Banks, 2005 ; Scott et McFeaters, 2011 ; Wijnen *et al.*, 2016). Dans sa première étude majeure (Scott *et al.*, 1989), il considère « *les champs de bataille comme des laboratoires d'observation du comportement humain*[18] », offrant dans le même temps « *une opportunité unique d'étudier les matérialités produites par les conflits humains*[19] ». Tirant profit des recherches de Scott, un nombre important de champs de bataille ont été passés au peigne fin au cours des années suivantes : bataille de Maldon au Royaume-Uni en 991 (Petty et Petty, 1993), bataille de Palo Alto à la frontière mexico-étasunienne en 1846 (Haecker, 1994), bataille de Monmouth en 1778 (Sivilich, 1996) et bien d'autres.

Cet intérêt grandissant des archéologues pour l'étude des champs de bataille a fait naître à la fin des années 1990 le concept d'*archéologie du champ de bataille*, *battlefield archaeology* dans les pays anglo-saxons et *schlacht-feldarchäologie* en Allemagne (Carman, 2005 ; Pollard et Banks, 2005 ; Scott et McFeaters, 2011 ; Schnitzler et Landolt, 2013 ; Hesse, 2014 ; Wijnen *et al.*, 2016). Cette sous-discipline de l'archéologie historique a officiellement été reconnue en 2000 à Glasgow (Écosse) lors de la première conférence consacrée à l'archéologie du champ de bataille (*Fields of Conflict*), résultant en la naissance de la revue *Journal of Conflict Archaeology* qui rassemble depuis 2005 des travaux d'archéologues et

[17]Des études plus anciennes existent (Do Paço, 1962 ; Newman, 1981) mais n'ont pas eu le même retentissement que les recherches de Scott (Pollard et Banks, 2005).

[18]« *Battlefields may seem an unlikely place to look for human behavioral patterns, since they represent the most violent expressions of human behavior, but it is precisely for that reason that behavioral patterns are likely to be evident* ».

[19]« *Battlefields provide a unique opportunity to study the material byproducts of human conflict* ».

d'autres spécialistes des sciences humaines dont des géographes (Pollard et Banks, 2005 ; Scott et McFeaters, 2011 ; Hesse, 2014). Néanmoins, comme le démontre le titre de ce périodique, nous assistons depuis peu à une mise au second plan de l'archéologie du champ de bataille (*battlefield archaeology*) au profit d'une archéologie de la guerre (*conflict archaeology*) beaucoup plus populaire car ne se réduisant pas au seul et unique périmètre du champ de bataille et privilégiant une démarche pluridisciplinaire (Pollard et Banks, 2005 ; Wijnen *et al.*, 2016).

Parallèlement, en Europe occidentale, l'accord de Schengen en 1985 a accéléré la dynamique de modifications structurelles du réseau de transport (routes, autoroutes, lignes ferroviaires) inter- et péri-urbaines, entraînant la destruction partielle ou totale du mobilier archéologique enfoui dans les sols (Desfossés *et al.*, 2008 ; Jacquemot et Legendre, 2011 ; Schnitzler et Landolt, 2013). Face à ces menaces, les archéologues ont mis au point l'archéologie préventive consistant à contrôler le terrain avant chaque construction et éventuellement à interrompre les travaux en cas de découverte (Desfossés *et al.*, 2008 ; Jacquemot et Legendre, 2011 ; Schnitzler et Landolt, 2013). Dans le nord et le nord-est de la France, l'aménagement des axes de communication vers la Belgique, le Luxembourg et l'Allemagne a impliqué les archéologues dans de nombreuses fouilles sur un territoire largement touché par les combats de la Première Guerre mondiale. Entre 1988 et 1989, sur le tronçon Bapaume-Lille de la future ligne TGV Nord, les archéologues ont mis au jour des quantités considérables d'artefacts de la période 1914-1918. Ces sondages ont également permis la découverte de réseaux de fossés, incluant des tranchées et des sapes (cf. *infra*, § 3.1 ; Desfossés *et al.*, 2008). La multiplication des trouvailles relatives aux combats de 1914-1918 a suscité l'engouement de la communauté des archéologues français qui ont alors engagé des fouilles sur les zones de combats. En découle en 1991 la découverte retentissante par une équipe de quatre archéologues (Adam, Boura, Heller, Jacquemot) des ossements d'une vingtaine de Poilus à Saint-Rémy-la-Calonne (Meuse), parmi lesquels ceux de l'écrivain Alain-Fournier, auteur du *Grand Meaulnes* (1913), engendrant une vague médiatique à travers le pays (Jacquemot et Legendre, 2011 ; Schnitzler et Landolt, 2013). **C'est ainsi qu'est née l'archéologie de la Grande Guerre**, **domaine largement médiatisé à l'heure des commémorations du centenaire de la Première Guerre mondiale**. Cependant, cette discipline étroitement liée à l'archéologie de la guerre a mis un certain temps à se développer du fait du scepticisme de nombreux archéologues, estimant les vestiges de 1914-1918 comme « trop récents » pour être considérés comme tels (Jacquemot et Legendre, 2011). Le même souci s'est posé pour l'archéologie de la Seconde Guerre mondiale (Wijnen *et al.*, 2016) et pour tous les autres types de vestiges contemporains, « *que l'on croyait intégralement documentés par les sources historiques* » (Jacquemot et Legendre, 2011). Il a fallu patienter jusqu'en 2010 pour voir le Conseil national de la Recherche Archéologique reconnaître officiellement l'intérêt scientifique de ce type de vestige. Ainsi, une autre discipline a émergé : l'archéologie des conflits modernes, connue outre-Manche sous l'appellation *modern conflict archaeology* et enseignée depuis 2009 au Royaume-Uni (Saunders, 2012, 2013).

2.3.2. Les polémoformes, des vestiges archéologiques ?

L'étude des traces géomorphologiques des conflits passés constitue une manière d'appréhender les paysages de guerre à la fois comme objets géographique (formes de relief) et archéologique (traces des civilisations passées). 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, 2018). À partir du moment où elles constituent les témoins d'une occupation humaine passée, les polémoformes sont des *vestiges de guerre*. Dans le cas de la Première Guerre mondiale par exemple, les réseaux de fossés (tranchées, sapes), les restes d'abris, les batteries d'artillerie, forment autant de vestiges de guerre offrant la possibilité de comprendre les modes de vie des soldats et leurs manières d'interagir avec le milieu naturel (Jacquemot et Legendre, 2011 ; Schnitzler et Landolt, 2013 ; Jacquemot, 2014 ; Landolt, 2018 ; figure 1.8). À l'inverse, les cratères d'obus encore visibles dans le paysage peuvent difficilement être considérés comme tels, du fait qu'ils n'ont pas été directement occupés (à l'exception de ceux reconvertis en abris) et parce que leur apparition a résulté d'un processus aléatoire (bombardements) sans liens directs avec l'environnement. En revanche, ils peuvent présenter un intérêt dans les secteurs où ils ont volontairement été comblés au lendemain du conflit car certains ont pu servir de sépulture[20]. Ainsi, **nous pouvons associer aux polémoformes de la Première Guerre mondiale une valeur archéologique certaine**, si bien qu'un grand nombre d'entre elles conservent encore des ossements et des objets archéologiques autrefois détenus par les soldats.

Figure 1.8 – *Visite d'un chantier archéologique près d'Ypres (Belgique) lors de la conférence Conflict landscapes (2014). 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. Clichés : R. de Matos-Machado, 17 mai 2014.*

[20]À Monchy-le-Preux dans le Pas-de-Calais, la fouille du remblai d'un cratère d'obus a révélé le corps d'un soldat britannique (Desfossés *et al.*, 2008).

2.3.3. L'archéogéomorphologie, une autre manière d'aborder les vestiges de guerre

Dans un contexte où ces polémoformes font l'objet de multiples analyses depuis le début des commémorations du centenaire de la Première Guerre mondiale, une question se pose : leur étude non accompagnée de fouilles constitue-t-elle une manière de pratiquer l'archéologie du champ de bataille et plus largement l'archéologie de la guerre ? Autrement dit, la cartographie des vestiges de guerre *géomorphologiques*, courante à l'heure actuelle, suffit-elle pour être considérée comme une étude archéologique ?

Quelques chercheurs ont proposé un nouveau concept pour désigner l'ensemble des travaux abordant les vestiges archéologiques sous un angle géomorphologique sans faire appel aux techniques des archéologues : l'***archéogéomorphologie***[21] (*archaeogeomorphology*), branche de la géomorphologie, que l'on peut dénommer *archéogéomorphologie de la guerre* (*conflict archaeogeomorphology*) quand elle est appliquée aux vestiges de guerre (Hesse, 2014 ; Gheyle *et al.*, 2018). Évoquée pour la première fois par l'archéologue américaine Wandsnider (1992), la notion d'*archaegeomorphology* a été conceptualisée en 2012 par la géographe canadienne Thornbush (2012, 2013) mais peine encore à être reconnue comme une discipline à part entière, notamment en France (figure 1.9). En effet, les nombreux exemples d'études archéogéomorphologiques restent généralement associés au domaine de la géoarchéologie. Or, il existe une différence nette entre ces deux disciplines. Toute étude géoarchéologique implique de fouiller le terrain pour reconstituer l'état des paysages passés, ce que l'on appelle communément le paléo-environnement, de manière à interpréter l'origine de l'implantation d'un site archéologique et ses relations avec son environnement passé (Arnaud-Fassetta, 2008 ; Fouache, 2010 ; Burnouf, 2014). Cette « *réflexion sur les conditions environnementales du passé* » doit aussi « *servir à mieux comprendre le présent* » (Arnaud-Fassetta, 2008). De ce fait, la géoarchéologie se fonde sur la « *longue durée* » (Burnouf, 2014), « *le plus souvent à l'échelle de l'Holocène, voire du Quaternaire* » (Fouache, 2010). À l'inverse, lorsque les « *fouilles manquent et s'il n'y a pas de véritable collaboration avec les archéologues, seulement des consultations, ce travail doit être considéré comme essentiellement archéogéomorphologique*[22] » (Thornbush, 2012). Ainsi, la simple mise en lumière de formes de relief à valeur archéologique par le biais des SIG et de la télédétection constitue une étude archéogéomorphologique (Thornbush, 2012, 2013 ; Nicu, 2016 ; Henselowsky *et al.*, 2017). La question de l'échelle temporelle est également importante puisque l'archéogéomorphologie s'intéresse aussi aux périodes contemporaines. 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.

---

[21]Parfois appelée *archaeological topography* (Gheyle *et al.*, 2018).

[22]« *Where excavation is lacking and there is no real collaboration with archaeologists, only consultation, this work should be considered to be essentially archaeogeomorphological* » (Thornbush, 2012).

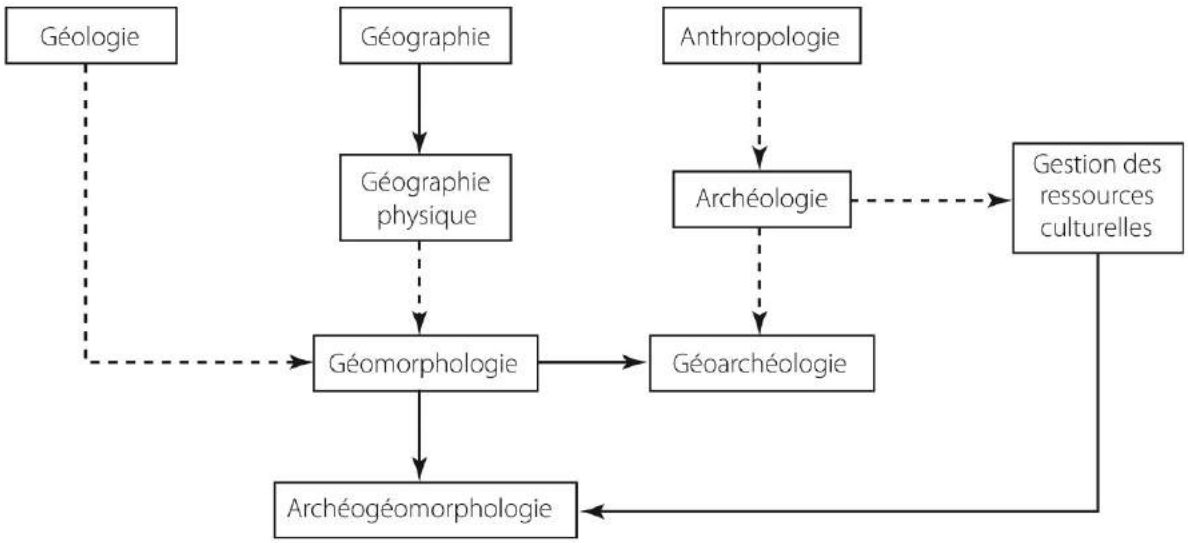
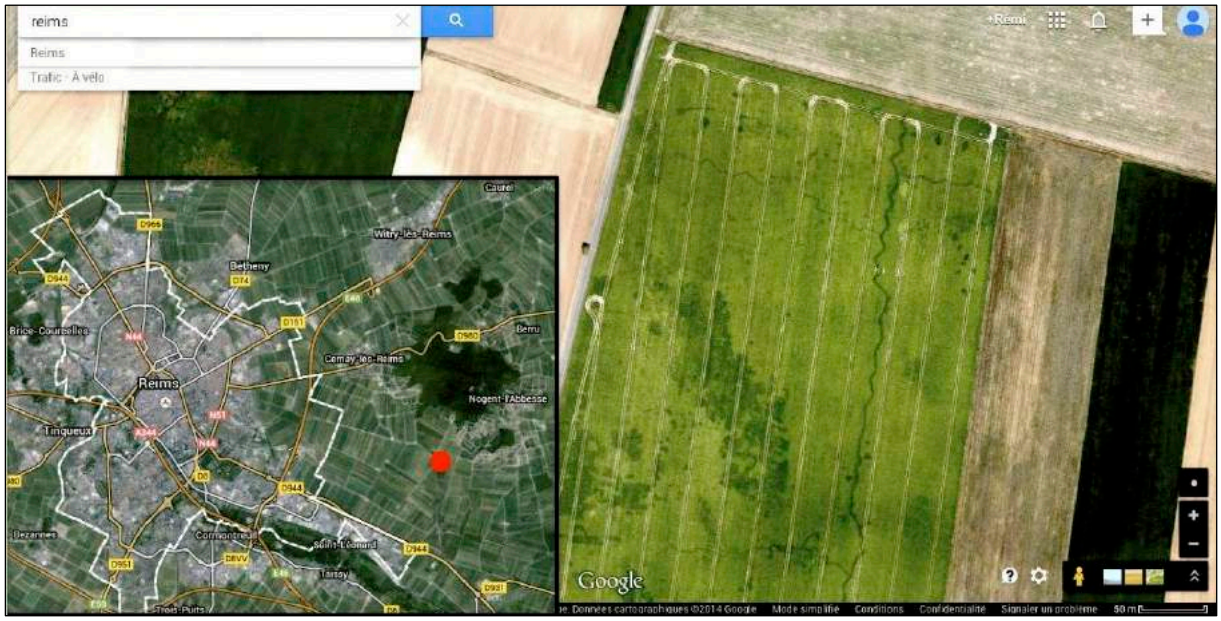


Figure 1.9 – *Placement de l'archéogéomorphologie (traduit de Thornbush, 2012)*

2.4. L'essor de la *géographie numérique* ou comment approcher les paysages de guerre grâce aux images

2.4.1. Les différentes méthodes d'analyse par imagerie

Avec l'essor des technologies digitales (télédétection, SIG, photogrammétrie, prospection géophysique), la mise à disposition de jeux de données géographiques sur l'internet public et les événements du centenaire de la Première Guerre mondiale comme trame de fond, il est aujourd'hui courant d'examiner les polémoformes et vestiges de guerre à partir de l'exploitation d'images acquises au sol (données électromagnétiques, photographies *in situ*) ou par les airs (images satellite, photographies aériennes, MNT). Agache (Agache et Bréart, 1975 ; Agache, 1979), précurseur de l'archéologie aérienne en France, a été un des premiers à rendre compte dans les années 1960-1970 des potentialités offertes par la photographie aérienne pour repérer les traces d'occupation humaine passée dans les paysages. Les résultats de ses missions de prospections menées jusqu'aux années 2000, en grande partie consultables sur son site internet *L'archéologie aérienne dans la France du nord* (Agache et Blanchet, 2018), ont permis entre autres la découverte de réseaux de tranchée de la Première Guerre mondiale en Picardie par analyse d'anomalies de croissance des cultures, d'humidité et de couleur des sols, sans toutefois les cartographier (figure 1.10). **Il a fallu attendre les années 2000 pour voir une généralisation de ces méthodes de prospection *non-invasives* à des fins d'inventaire des traces de la guerre dans les paysages**, en particulier celles induites par les combats de la Première Guerre mondiale.


reims
Reims
Trafic · À vélo
Witry-lès-Reims
Bétheny
Brimont
Bétheny
Brimont
Bétheny
Bétheny
Brimont
Bétheny
Brimont
Bétheny
Brimont

avons mis à profit la technologie LiDAR pour spatialiser les vestiges de guerre hérités des combats de 1914-1918 sur 70 ha du bois des Caures (De Matos-Machado, 2014 ; résultats publiés deux ans plus tard dans De Matos-Machado *et al.*, 2016 ; annexe A). Cette cartographie des polémoformes, une des premières issues de l'exploitation de cet outil laser, s'est conclue par la découverte de soixante-dix abris allemands auxquels se sont ajoutés quatre kilomètres de réseaux de fossés, démontrant ainsi tout le pouvoir révélateur du LiDAR sur ce champ de bataille aujourd'hui boisé (cf. *infra*, chapitres 2 et 3). En 2016, Stichelbaut *et al.* (2016) ont utilisé des données LiDAR sur un champ d'entonnoirs près d'Ypres (Belgique) issu de l'explosion de mines en 1914-1918, afin de mettre en relation des photographies aériennes d'époque et le paysage actuel. Kobiałka *et al.* (2016) ont effectué une analyse LiDAR des polémoformes induites par les combats de 1939 le long de la rivière Brda en Pologne. L'année 2016 a aussi été marquée par la publication d'un ouvrage majeur compilant une série d'études d'archéologie aérienne pour l'analyse des paysages de guerre (Stichelbaut et Cowley, 2016), incluant pas moins de cinq chapitres sur le LiDAR : bataille d'Isonzo en 1915-1917 (Soča en slovène ; Mlekuž *et al.*, 2016), camp d'entraînement de la Première Guerre mondiale de Randalstown en Irlande (Montgomery et McNeary, 2016), champs de bataille polonais de la Première et de la Seconde Guerre mondiale (Kiarszys, 2016 ; Zalewska, 2016) et anciennes traces du rideau de fer tchécoslovaque (Rak *et al.*, 2016). Taborelli *et al.* (2017a) ont mis à profit le LiDAR pour visualiser les cicatrices géomorphologiques de la Première Guerre mondiale en Argonne et en Champagne. Kobiałka *et al.* (2017) ont réitéré leur utilisation du LiDAR en Pologne en observant cette fois-ci les vestiges des camps de prisonniers de Tuchola et Czersk (1914-1918). Van der Schriek et Beex (2017) ont observé sur un MNT LiDAR des vestiges de la Seconde Guerre mondiale près de la ville de Bussum (Pays-Bas). Enfin, citons l'étude récente de Gheyle *et al.* (2018), ayant proposé à leur tour une analyse par le LiDAR des polémoformes de la Première Guerre mondiale près d'Ypres (Belgique).

Une autre manière d'approcher les paysages de guerre par les images, certes moins courante, a été suggérée par Masters et Stichelbaut (2009), Saey *et al.* (2013), Stichelbaut *et al.* (2017) et Note *et al.* (2018), reposant sur l'application d'un gradiomètre magnétique (sondage géophysique) dans la région d'Ypres. Ces études ont permis la découverte de polémoformes enfouies, incluant fossés, abris et cratères d'obus. À la différence des autres types de prospection présentés, le sondage géophysique révèle le paysage invisible, c'est-à-dire celui que les photographies aériennes et le LiDAR ne permettent pas de voir. Une telle approche constitue une bonne alternative en milieu ouvert et dans le cas où les formes n'apparaissent plus en surface.

2.4.2. Automatisation des techniques d'inventaire des polémoformes

Bien que prometteuses, la plupart des études sus-citées qui abordent la cartographie des polémoformes sont confrontées au problème récurrent du nombre d'objets à cartographier, constat propre au caractère destructeur de la Première Guerre mondiale qui a potentiellement engendré près d'un milliard de formes dans le paysage. L'objectif d'établir un inventaire des polémoformes aussi exhaustif que possible conduit à rechercher des méthodes de cartographie différentes que celles envisagées auparavant dont le principe se fondait sur une digitalisation manuelle particulièrement longue et fastidieuse. **Seul le recours à l'automatisation permet de répondre à ces objectifs**. Jusqu'à aujourd'hui, deux méthodes de cartographie automatique appliquées aux paysages de guerre ont été proposées. Brenot *et al.* (2016) ont implémenté, dans le bois de la Gruerie en Argonne, une méthode de cartographie exclusivement fondée sur l'exploitation automatique d'un MNT LiDAR sur une surface de 30 ha. La même année, Magnini *et al.* (2016) ont suggéré une autre approche automatisée sur environ 400 ha à proximité du fort de Luserna (Italie), prenant en compte uniquement les cratères d'obus. Ainsi, cette question des cartographies automatiques est d'une façon générale peu abordée et il convient naturellement de la développer compte tenu de l'accroissement du nombre de données disponibles.

3. Focus sur les paysages de guerre du front de l'Ouest (1914-1918)

Les empreintes de la Première Guerre mondiale, contrairement à celles d'autres conflits, sont particulièrement vives dans les paysages du fait de leur amplitude exceptionnelle, facilitant leur identification et leur caractérisation. C'est particulièrement le cas sur le front de l'Ouest, ligne de 700 km de la mer du Nord à la frontière suisse, où les destructions ont été les plus intenses du fait d'une immobilisation des combats de décembre 1914 à mars 1918. Il convient d'établir un panorama des mutilations faites aux paysages dans cette région de l'Europe puis de présenter la manière dont elles ont été abordées en forêt domaniale de Verdun, site de notre étude et théâtre d'affrontements exceptionnels entre Allemands et Français durant les années 1916 à 1918.

3.1. Matérialités de la guerre dans les campagnes belges et françaises

3.1.1. La militarisation des paysages avant 1914

Les premières interventions militaires sur les paysages sont intervenues bien avant le début des hostilités. Suite à la défaite de la France lors de la guerre franco-prussienne (1870-1871) et à l'annexion de l'Alsace-Moselle, le gouvernement lança un grand programme de fortification des frontières de l'Est de la France (Amat, 2001 ; Durup de Baleine, 2001 ; Amat, 2015). Sous la direction de l'ingénieur général Séré de Rivières (directeur du service du génie au ministère de la Guerre), des centaines de forts furent construits dès 1874 autour de cités

frontalières, en particulier Belfort, Épinal, Toul et Verdun. Ces constructions, de forme polygonale, entourées de fossés profonds de 5 m et large de 12 m selon les instructions, impliquèrent de lourds travaux de terrassement, entraînant le déblaiement de plusieurs millions de m^3 de terre. Une fois extraits, ces matériaux furent disposés au-dessus des forts afin d'amortir la chute et l'explosion des obus (Solard, 1935). Ces édifices nécessitèrent l'apport de pierres de taille souvent extraites de carrières locales pour la construction des murs intérieurs et le renforcement des escarpes[23] et contre-escarpes. Parallèlement à ces travaux, des opérations de déboisement militaire furent entreprises afin de garantir les liaisons optiques entre les forts et dégager les champs de tir (Marin, 1915 ; Amat, 1987, 2001, 2015). Dans la région de Verdun par exemple, la géographie forestière fut fortement marquée par ces aménagements. Sur certaines communes du futur champ de bataille, la surface des forêts passa de 1 390 ha en 1900 à 670 ha en 1914 (Amat, 2001, 2015).

3.1.2. Aperçu général des dommages de la Première Guerre mondiale

Pendant les premiers mois de la guerre, les armées furent mobiles. Durant cette phase de la guerre de mouvement les paysages ne furent que des décors de théâtre (Boulanger, communication personnelle), uniquement affectés par le passage des armées. À partir du mois de décembre 1914 la fin de la *course à la mer*[24] figea les armées. Les soldats s'enterrèrent et construisirent des fossés parallèles de part et d'autre du *no man's land*, zone tampon de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres entre les deux camps. Cet enlisement du front marqua l'entrée dans la guerre de position qui dura jusqu'au mois de mars 1918. Pendant quatre ans, les combats s'immobilisèrent sur cette ligne de 700 km. L'utilisation de plus d'un milliard de munitions, la mobilisation d'un nombre de soldats équivalent à la population de la France actuelle et la répétition des agressions sur cet espace frontal relativement étroit bouleversèrent le milieu physique de manière inédite. Premier obstacle matériel à la progression des armées, les forêts furent le plus éprouvées par cette guerre, dégradation d'autant plus accentuée que la ligne de front s'appuya sur nombre d'entre elles[25] (Marin, 1915 ; Amat, 1987 ; Clout, 1993 ; Amat, 2001 ; Puyo, 2004 ; Steinbach et Husson, 2006 ; Amat, 2015). **Sur 837 659 ha de forêts**, **652 855 ha (78 %) furent touchés et 200 000 ha furent totalement détruits**, victimes des bombardements (cf. *infra*, § 3.1.2) et/ou de l'exploitation des ressources ligneuses pour l'aménagement du front (cf. *infra*, § 3.1.3 ; Clout, 1993 ; Amat, 2001, 2015). Dans les secteurs les plus bouleversés, la zone rouge des années 1920 (cf. *infra*, chapitre 2), la guerre engendra une minéralisation complète du paysage où, entre les

[23]Talus inférieur du fossé d'un ouvrage fortifié (Larousse, 2005).

[24]Bloquée par la mer du Nord, la manœuvre de contournement de l'armée allemande échoua. L'offensive vers Paris (Plan Schlieffen) fut définitivement stoppée par les Alliés.

[25]« *Aussi, de la frontière suisse aux Flandres, les réseaux de tranchées parcourent un grand nombre de massifs forestiers : le massif Vosgien, tristement célèbre pour ses combats autour de l'Hartmannswillerkopf, du collet du Linge, des forêts de Saint-Dié, entre autres ; les forêts lorraines du Grand-Couronné des côtes de Moselle, de Meuse et d'Argonne ; et enfin les forêts de Champagne-Ardenne et de Picardie (Villers-Cotterêts, Vauclerc, Coucy et Saint-Gobain)* » (Puyo, 2004).

tranchées et marmites[26], ne subsistèrent que quelques lambeaux d'arbres[27] et les ruines des villages martyrs (figure 1.11). D'après Cadoux en 1926 (cité par Amat, 2001), ces dommages s'étendirent sur 3 306 350 ha répartis sur onze départements[28]. **Le ministère des Régions Libérées évalua à 333 millions de m³ le volume nécessaire pour combler les restes de tranchées et les cratères d'obus parsemant la ligne de front**. Ces chiffres parlent d'eux-mêmes et attestent du rôle particulièrement morphogène de la Première Guerre mondiale sur les paysages puisque « *quatre ans de guerre peuvent être mis en parallèle avec le temps géologique de la dernière période froide de l'ère quaternaire* » alors que « *sous couvert forestier à faible pente, les quantités de terre retournées auraient mis de 10 000 à 40 000 ans pour être érodées* » (Hotyat *et al.*, 1997). En 1922, le géographe René Musset stupéfait par ces dévastations, en est venu à se demander si ces terres pouvaient un jour être de nouveau habitées : « *La géographie agricole de cette vaste région (Nord et Nord-Est de la France) est transformée pour de longues années. Parfois elle l'est à tout jamais ; il est des points si meurtris qu'on n'y reverra plus les moissons d'antan* » (Musset, 1922).

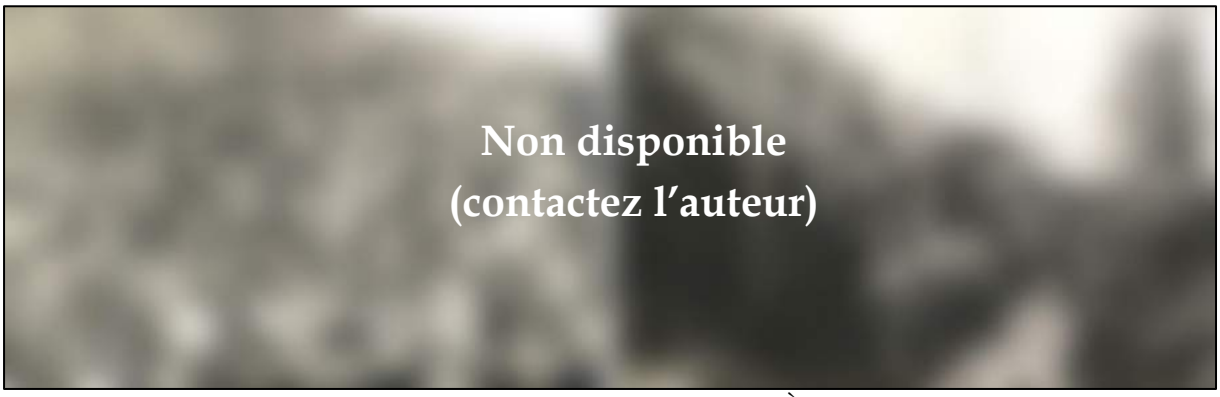


***Figure 1.11** – Le polémofaciès du champ de bataille de Verdun. À gauche, une vue d'un versant du ravin de la mort après les bombardements de 1916. À droite, une tranchée allemande équipée d'une banquette de tir, de caillebotis et de fascines en bois (Mémorial de Verdun).*

3.1.3. Le projectile d'artillerie et les mines, première cause de la création du polémofaciès

L'usage industriel du projectile d'artillerie et des explosifs au cours du conflit fut la première cause de transformation du paysage en polémofaciès du fait de son fort pouvoir érosif. En percutant le sol, les obus délivrent leur charge explosive, leur gaz ou leurs gerbes de balles, pulvérisant tout objet leur faisant obstacle et/ou transformant le relief en des champs de cratères de diamètre et de profondeur variables. **L'amplitude de ces bouleversements diffère selon le type d'armes employées**, chacune possédant ses propres

[26]En langage de Poilus, les marmites font référence aux cratères d'obus.

[27]« *Les effets dévastateurs des projectiles de gros, moyen et petit calibre, qui, fauchant dans un ouragan de fer tout ce qui se trouve sur leur passage, décapitent les arbres et ne laissent, à la place d'un bois touffu, qu'une sorte de lande sinistre, hérissée de troncs déchiquetés, jonchée de branches mortes* » (Marin, 1915).

[28]Aisne, Ardennes, Marne, Meurthe-et-Moselle, Meuse, Nord, Oise, Pas-de-Calais, Somme, Vosges, Territoire de Belfort.

effets mécaniques sur le paysage. Par ordre de destruction, du plus faible au plus fort, nous distinguons principalement[29] :

- **Les obus à balles**[30], voués à l'effacement du personnel de guerre, projetant des balles de plomb dans toutes les directions (Lafargue et Moureton, 1933). Pour le sous-bois, les gerbes propulsées sont particulièrement dévastatrices dans un rayon de 2 m et pour les individus dont le tronc n'excède pas 15 cm (Amat, 2001). Les dégâts matériels restent en revanche superficiels sur les sols. Ceux-ci subissent néanmoins sur le long terme les effets néfastes du plomb[31], dégradant de manière significative leur composition chimique et les écosystèmes associés.
- **Les obus explosifs**, destinés à démolir les édifices adverses, constituant le type d'agression le plus répandu sur le front mais aussi une des plus destructrices (Lafargue et Moureton, 1933 ; figure 1.12). Sous l'effet du souffle et de la propulsion d'éclats de fer à une vitesse pouvant dépasser les 1 000 m/s, les arbres sont déchiquetés causant l'ouverture progressive de la canopée. Si ce « bouclier » forestier disparaît, la surface se retrouve directement exposée. Hormis les phénomènes de mixage et de compaction affectant les horizons pédologiques (Hupy, 2005, 2006 ; Hupy et Schaetzl, 2006), les conditions géomorphologiques se modifient et voient s'introduire d'innombrables cratères dans le paysage, phénomène aggravé lorsque les obus heurtent directement le sol (tir percutant). Le terme de *cratérisation*[32] emprunté à l'astronomie est parfois employé pour évoquer ces processus d'érosion rapides et de grande ampleur (Certini et *al.*, 2013). Circulaires ou coalescents, profonds ou futiles, ces cratères possèdent une géométrie conditionnée par de multiples facteurs dont le calibre du projectile, sa trajectoire mais aussi la nature du terrain (géologie, profondeur des sols) pouvant influencer sa pénétration ou sa capacité de destruction (Department of the Army, 1981 ; Amat, 2001 ; Hupy, 2005). Par exemple, un cratère d'obus sculpté dans des calcaires massifs possède généralement une géométrie plus étroite et profonde qu'un cratère né en milieu argileux et humide (Hupy, 2005). Si les obus perforent les nappes phréatiques apparaissent des cratères inondés, faciès que l'on retrouve notamment sur les hauteurs du champ de bataille de Verdun. À proximité immédiate du point d'éclatement, une couronne d'éjectas résultant de la propulsion diffuse des matériaux rocheux se forme autour du cratère. En fonction de l'intensité de l'explosion, du volume de matériaux extraits et de la configuration du terrain (pente, hydrologie), cette couronne peut subsister.

[29]Les obus dits spéciaux, contenant des gaz toxiques, n'ont pas directement contribué au bouleversement de la topographie. Néanmoins, leurs effets sur les sols et la végétation ont été particulièrement néfastes (cf. *infra*, chapitre 9).

[30]Également connu sous le nom d'obus Shrapnel, du nom de son inventeur Henry Shrapnel.

[31]Par exemple, un obus de 155 contient 416 balles de plomb (Amat, 2001).

[32]En astronomie, la cratérisation désigne « *l'effet de la collision d'une météorite sur une surface et consiste en une formation de cratères bordés par une couronne d'éjectas* » (Certini *et al.*, 2013).

***Figure 1.12** – Exemples de cratères d'obus de taille commune sur le front de l'Ouest, l'un en forêt domaniale de Verdun (à gauche), l'autre en forêt domaniale de Spincourt (à droite). Clichés : R. de Matos-Machado et V. Printemps, 4 avril 2017.*

- **Les mines enterrées**, placées dans un fourneau[33], réservées à l'anéantissement des lignes ennemies. Ces armes passives (explosifs *in situ*) causent les dommages les plus importants sur les paysages en formant d'immenses cratères (figure 1.13). Le terme d'*entonnoir*[34] est parfois préféré à celui de *cratère* pour les désigner. L'utilisation de cette notion n'est pas anodine puisque du fait de leurs flancs saillants et de leur forme circulaire, ces polémoformes sont soumises à des processus de colluvionnement intenses parfois accompagnés de glissements. Elles accumulent en leur fond d'importants débris minéraux et organiques et sont par conséquent soumises à des changements rapides de leur morphologie. L'usage des mines reste limité aux secteurs possédant des terrains propices au creusement de galeries souterraines. Cette catégorie de polémofaciès s'observe remarquablement bien à *Hill 60* près d'Ypres (Belgique), à Vimy dans le Pas-de-Calais, à la Boisselle dans la Somme et de manière tout à fait exceptionnelle aux Éparges et à Vauquois dans la Meuse. Ces entonnoirs sont en revanche absents du champ de bataille de Verdun en raison des nombreuses nappes phréatiques qui s'y trouvent proches de la surface (cf. infra, chapitre 2). Durant ces épisodes de guerre de mines, les explosifs servent aussi de camouflet. Le principe de cette forme de combat souterrain fondée sur une analyse par le son des positions ennemies consiste à activer une charge explosive près des galeries adverses (De Varigny, 1915). La détonation provoque rarement des modifications de la topographie de surface mais génère en profondeur des cavités qui peuvent sur le long terme être soumises à des effondrements (Department of the Army, 1981).

[33]Cavité destinée à recevoir une charge d'explosif (Larousse, 2005).

[34]Il est difficile de retrouver l'origine de cette notion même si nous savons qu'elle était employée au XVIIIème siècle, notamment par le marquis de Vauban dans le volume 3 de ses *Œuvres militaires* (1794) ou par Gay de Vernon qui donne des éléments de définition dans son *Traité élémentaire d'art militaire et de fortification* (1805) : « *On nomme entonnoir l'excavation produite par l'effet d'une mine, en supposant que toutes les terres enlevées n'y soient pas retombées* ».

Figure 1.13 – *Quelques faciès d'entonnoirs résultant de l'explosion de mines souterraines. En haut, le champ d'entonnoirs de mine de la butte de Vauquois (Meuse). Cliché : R. Goma, 6 mars 2013 ; au centre, un entonnoir de mine aux Éparges (Meuse). Cliché : R. de Matos-Machado, 8 avril 2015 ; en bas, un panneau indiquant la présence de phénomènes d'érosion aux abords du cratère Lochnagar (Somme). Cliché : R. de Matos-Machado, 27 mars 2013.*

Hormis les travaux de quantification relatifs aux volumes de matériaux déplacés par l'artillerie (cf. *infra*, chapitre 6), **quelques auteurs se sont intéressés au nombre de cratères induits dans le paysage du front de l'Ouest, à leur variabilité morphologique, à leurs effets mécaniques sur les sols et à leurs potentialités écologiques**. Celi (1991) a étudié les impacts géomorphologiques de l'artillerie dans les Dolomites en Italie[35], révélant des modifications notoires dans les processus karstiques qui animent le massif (reconversion des cratères d'obus en dolines, fracturation des roches engendrant une modification des écoulements, etc.). Amat (2001) a conduit des relevés botaniques dans deux entonnoirs de mine en Argonne afin d'identifier d'éventuelles communautés végétales associées. Schwartz *et al.* (2003) ont analysé les traces pédologiques de la guerre en Lorraine dans les massifs boisés des Hauts de Mad, de Mort Mare, de Haye et du bois le Prêtre. Les recherches de Hupy et Schaetzl (Hupy, 2005, 2006 ; Hupy et Schaetzl, 2006 ; Hupy et Schaetzl, 2008), à l'origine de l'introduction du terme de *bombturbation* faisant référence à *« la cratérisation de la surface et le mixage des sols par les munitions explosives durant une guerre ou des activités similaires »*, ont consisté à comptabiliser sur dix quadras de 2500 m² de la forêt domaniale de Verdun un nombre total de 955 cratères d'obus explosifs de tout calibre. Ramené à l'hectare, des chiffres théoriques allant de 28 à 52 cratères/ha ont été proposés sur le champ de bataille de Verdun. Ces recherches sont aussi les premières à avoir mis en valeur le rôle de la pédologie et de la géologie dans la variété géométrique des cratères d'obus. La composition des roches, l'épaisseur des sols et la présence de nappes phréatiques, constituent ainsi autant de facteurs influençant la morphologie de ces polémoformes. Enfin, les effets de la déflagration des obus sur les sols et les roches ont aussi fait l'objet d'analyses approfondies sur le terrain et en laboratoire, révélant des phénomènes pédogénétiques propres aux champs de bataille de la Première Guerre mondiale. En 2013, nous avons réitéré la méthodologie de comptage des cratères d'obus et de mesures topométriques d'Hupy et Schaetzl (Hupy, 2005, 2006 ; Hupy et Schaetzl, 2006 ; Hupy et Schaetzl, 2008) sur 7 quadras de 400 m² répartis sur des sites aux contextes géologiques différents (champs de bataille de Vimy, de la Somme et de Verdun) afin d'explorer une nouvelle fois le rôle du terrain sur la morphologie des polémoformes (De Matos-Machado, 2013). Des profils topographiques et des sondages botaniques ont aussi été conduits dans les entonnoirs de mine Lochnagar et Hawthorn Ridge (Somme) afin de déterminer la présence d'espèces végétales spécifiques à ces faciès. Taborelli *et al.* (2016) ont étudié les dégâts géomorphologiques de l'artillerie et des soldats *via* l'utilisation du LiDAR en Champagne et en Argonne. Brenot *et al.* (2016) ont cartographié les polémoformes du bois de la Gruerie et quantifié les cubages de matériaux déplacés par l'artillerie et l'aménagement du front (cf. *infra*, chapitre 6). Magnini *et al.* (2016) ont cartographié les cratères d'obus parsemant les environs du fort de Luserna (Italie).

[35]Avec l'entrée en guerre de l'Italie le 23 mai 1915, le front de l'Ouest a été élargi jusqu'à la mer Adriatique.

3.1.4. L'aménagement du front et ses effets sur les paysages

Avec l'apparition de la guerre de position, le seul moyen de protection est de s'incruster dans le sol en creusant des fossés suffisamment profonds pour qu'un homme en position debout échappe au tir adverse. Ces ouvrages ont recouvert le front de la guerre des tranchées. **En fonction de leur usage et de leur orientation par rapport à la ligne d'affrontement**, **on distingue plusieurs types de fossés** :

- **Les tranchées** servent au tir du fusil et à la protection des défenses (GQGA, 1917a; Lafargue et Moureton, 1933). Elles s'organisent en lignes parallèles à l'orientation générale du front (figures 1.14 et 1.15). Dans ce cas, elles sont appelées parallèles. Pour mieux les renforcer, les matériaux extraits par leur creusement sont disposés de part et d'autre. Le bourrelet en avant de la position est appelé parapet, celui disposé en arrière, parados. Le profil longitudinal des tranchées présente généralement une sinuosité destinée à protéger les soldats des tirs en enfilades, des éclats d'obus et des gerbes de shrapnel (figure 1.16). Cette sinuosité, qui varie en fonction des objectifs tactiques, des conditions du terrain et de la nationalité des soldats, adopte des morphologies variées (GQGA, 1917a ; Stichelbaut, 2009 ; De Matos-Machado *et al.*, 2016) : rectiligne, vague, zig-zag, crémaillère, traverse. L'excavation d'une tranchée réglementaire française entraîne l'extraction d'1,50 m^3 de matériaux par mètre linéaire. Cependant, lorsque le terrain n'est pas propice au creusement (roche dure, terrain humide), la profondeur est diminuée au profit d'une augmentation des bourrelets, en privilégiant par exemple la gabionnade. D'après les instructions des manuels (GQGA, 1917a), le système de tranchée s'organise généralement sur trois lignes mais ce dispositif est en réalité peu appliqué car il ne tient pas compte des réalités du terrain (Amat, 2001) : la première ligne (tranchée principale) est normalement suivie de 20 à 40 m par une deuxième ligne d'appui (tranchée de dédoublement), de 150 à 200 m par une troisième ligne (tranchée de soutien) et éventuellement par une quatrième ligne (tranchée des réduits). Parfois, des tranchées supplémentaires sont aménagées entre la troisième et quatrième ligne (tranchées intermédiaires). L'ensemble forme ce que l'on appelle une position. Théoriquement au nombre de trois sur le champ de bataille, les positions sont espacées de quelques kilomètres les unes des autres.
- **Les boyaux de communication**, perpendiculaires au front**,** servent de liaison entre les positions mais peuvent être incorporés « *dans une organisation destinée à cloisonner la position* » (GQGA, 1917a ; Lafargue et Moureton, 1933), prenant alors l'aspect d'une tranchée (figures 1.14 et 1.15).
- **Les sapes** sont des axes de communication vers les postes d'écoute et de guetteur situés en avant des tranchées ou entre les défenses de l'arrière. D'après les manuels d'instructions, le tracé des sapes doit privilégier une forme rectiligne pour faciliter la circulation et les échanges du personnel et du matériel de guerre entre les organes de la défense (figure 1.16). Les dispositifs en vagues ou en zig-zag sont les plus

utilisés. Le cubage moyen d'un mètre linéaire de sape est de 2,10 m³ mais ce chiffre reste encore une fois théorique et associé à la doctrine militaire française. Les parapets et parados, classiquement disposés de part et d'autre de la sape, peuvent être arasés pour diminuer leur visibilité (GQGA, 1917a ; Lafargue et Moureton, 1933).

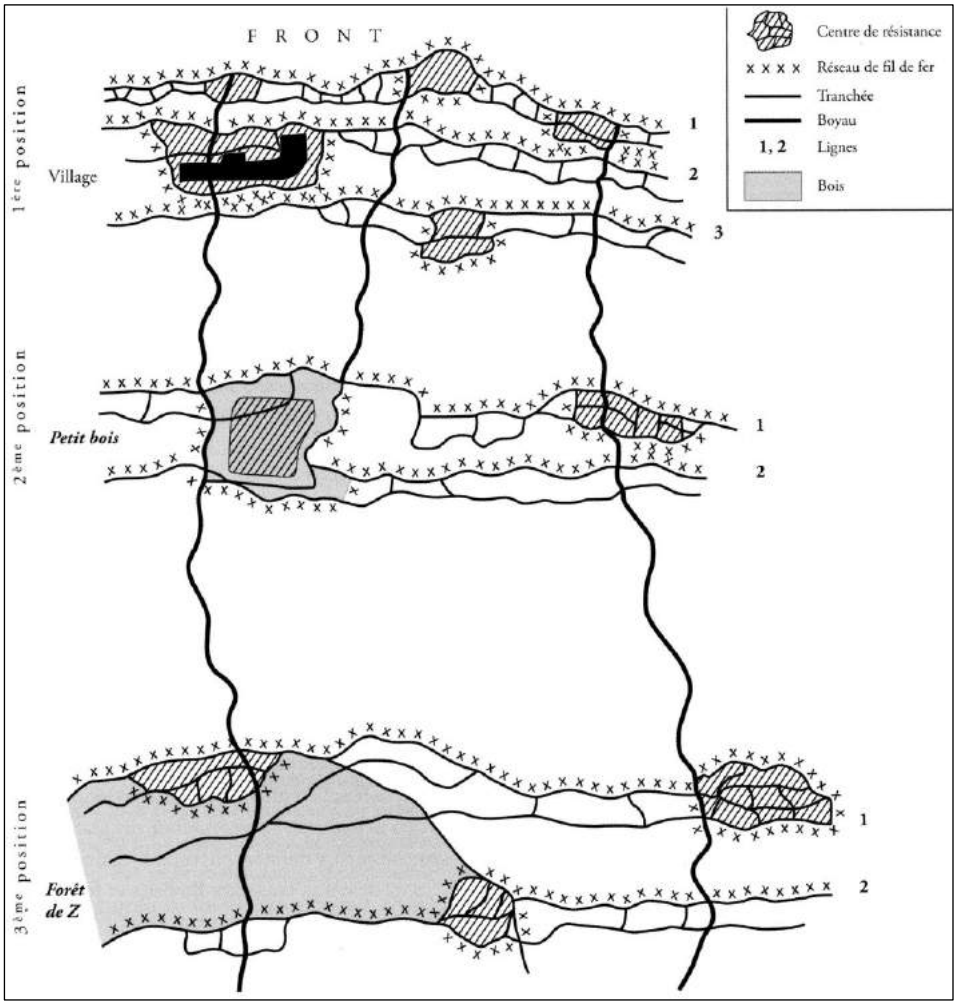


Figure 1.14 *– Schéma théorique de l'organisation d'un système de tranchées (Amat, 2015)*

Plusieurs milliers de kilomètres de réseaux de fossés ont été aménagés le long du front de l'Ouest. La mesure précise de ce kilométrage a soulevé la curiosité de quelques chercheurs ces dernières années. Les travaux de Stichelbaut (2009, 2011) ont été les premiers à donner des éléments de réponse sur les trente premiers kilomètres du front belge en partant de la mer du Nord. **Un total de 416 km de tranchées** (114 km côté allié, 298 km côté allemand) **et 256 km de sapes ont ainsi été découverts** par analyse de photographies aériennes d'époque**.** Devos *et al.* (2015) et Taborelli et *al.* (2016, 2017b) exploitant des plans directeurs **ont cartographié 13 000 km de réseaux de fossés** (7 014 km de tranchées, 6 045 km de boyaux) **entre le Pays Rémois et l'Argonne**. Ces travaux sont les seuls à ce jour à avoir proposé un inventaire du kilométrage de fossés aménagés sur le front de l'Ouest entre 1914 et 1918.

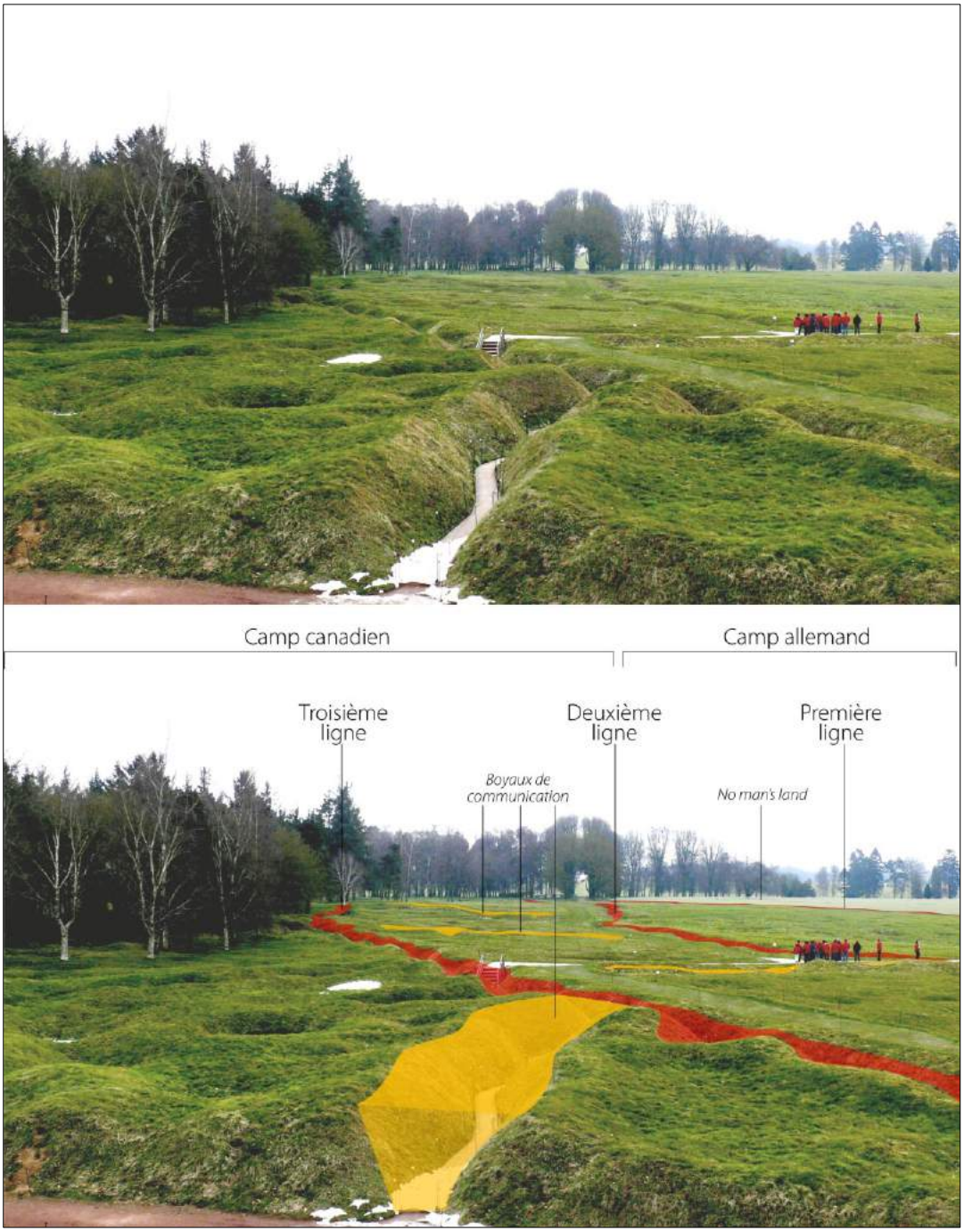


Figure 1.15 – *Vue d'un système de tranchées sur le champ de bataille de la Somme (Mémorial Terre-Neuvien de Beaumont-Hamel). Cliché : R. de Matos-Machado, 27 mars 2013.*

Figure 1.16 – *La tranchée, le boyau et le tunnel : trois axes de communication de la guerre de position. À gauche, une tranchée canadienne de troisième ligne en vagues au Mémorial Terre-Neuvien de Beaumont-Hamel (Somme). Cliché : R. de Matos-Machado, 27 mars 2013. Au centre, un boyau de communication allemand rectiligne en forêt domaniale de Verdun (Jumelles d'Ornes). Cliché : R. de Matos-Machado, 2 mai 2016. À droite, un tunnel observé sur le champ de bataille de l'Isonzo (Slovénie). Cliché : R. de Matos-Machado, 24 mai 2015.*

En complément des linéaires créés dans le paysage, **de nombreux édifices aux diverses fonctions ont été aménagés par les soldats aux abords des fossés** (Stichelbaut, 2009, 2011 ; Devos *et al.*, 2015 ; De Matos-Machado *et al.*, 2016 ; Taborelli *et al.*, 2017a). On distingue principalement :

- Les postes d'observation et de mitrailleuse, permettant de guetter les mouvements adverses et de défendre les positions. Ils forment des niches dans les tranchées.
- Les abris à personnel, servant au repos des troupes ou de protection contre les bombardements. Reliés au réseau de fossés, ils peuvent être individuels ou collectifs (escouade, section), souterrains ou hors-sol.
- Les abris à matériel, destinés au stockage des munitions et de toute autre matériel de guerre. Ils se trouvent souvent en retrait pour éviter les pertes.
- Les postes de commandement, généralement en arrière, régulièrement bétonnés, destinés à la coordination des opérations.
- Les positions d'artillerie, organisées en retrait, de manière individuelle ou en batteries, dont la mission première consiste à bombarder les lignes adverses.

Le front a également été équipé d'un réseau de voies ferrées permettant d'acheminer les vivres et le matériel de guerre. Ces voies se sont matérialisées sur le terrain par des plateformes surélevées en ballast larges de 2 m tout au plus ou par une incision du relief quand ce dernier présentait des ruptures de pente. Ces axes ont constitué de réelles alternatives face aux routes encombrées, parfois rendues impraticables par la boue (GQGA,

1917a). Le chemin de fer a aussi servi de support à l'artillerie (système d'artillerie lourde sur voie ferrée ; ALVF).

Dans les secteurs touchés par la guerre de mine, la guerre de tranchées s'est muée en combats souterrains privilégiant les tunnels comme moyen de déplacement (figure 1.16). Sur la butte de Vauquois par exemple, 17 km de galeries auraient été creusées par les Allemands et Français, certaines atteignant plus de 100 m de profondeur. Avec ses 519 explosions datant de 1915 à 1918, la butte offre aux observateurs un panorama proche du paysage lunaire où subsistent encore en surface des dizaines d'entonnoirs de mine, parfois profonds de 20 m (figure 1.13). Du fait de leur invisibilité, ces dégâts souterrains pourtant considérables restent peu connus. À Vimy, autre lieu des combats souterrains où les galeries ont été creusées à même la craie jusqu'à 50 m de profondeur, la situation actuelle est particulièrement préoccupante en raison des dégradations associées à cette roche (diaclasage, dissolution). Il en résulte aujourd'hui des instabilités en surface, consistant en des effondrements spontanés des galeries souterraines ou dans la formation de puits de dissolution associés à ces galeries dans lesquels les limons et argiles viennent s'engouffrer. Ces conséquences géomorphologiques bien différentes de celles exposées plus tôt ont largement été étudiées par White (2007) et Huchinson *et al.* (2008).

Ainsi, en complément du projectile d'artillerie, le creusement de milliers de kilomètres de réseaux de fossés, de milliers d'édifices de défense et de galeries souterraines ont largement bouleversé les paysages de l'Ouest européen, possédant un pouvoir érosif certes inférieur à celui des explosifs, mais tout de même notoire. Ainsi, **Devos *et al.* (2015) ont évalué à 145 millions de m³ le volume des matériaux extraits du sol par les travaux de creusement des réseaux de fossés à l'échelle du front de l'Ouest**. Ce chiffre théorique a été obtenu après avoir extrapolé les valeurs de cubages réglementaires (cf. ci-dessus) obtenus entre les régions de Reims et l'Argonne (Devos *et al.*, 2015 ; Taborelli *et al.*, 2016, 2017b). Il n'a pas intégré les travaux étrangers aux réseaux de fossés, les variations de creusement sur le terrain et les possibles différences de cubage avec les armées allemandes, anglaises, belges et autres. Par ailleurs, ces travaux ont largement affecté la géographie forestière (Marin, 1915 ; Amat, 2001 ; Puyo, 2004 ; Steinbach et Husson, 2006 ; Amat, 2015). Les lisières ont été particulièrement touchées, en particulier celles se trouvant face à l'ennemi, où des abatis[36] ont été aménagés (Amat, 2001, 2015). La forêt a aussi contribué à l'effort de guerre en approvisionnant le front en bois, pour les travaux de défenses et le chauffage. Ainsi, la fabrication de caillebotis au fond des tranchées, l'utilisation de gabions, de fascines et de claies comme méthodes de soutènement ou la production de bois de chauffe, ont nécessité l'extraction de volumes de bois considérables (Marin, 1915 ; Amat, 2001 ; Puyo, 2004 ; Amat, 2015) : « *Il faut par exemple un stère de rondins pour 10 mètres de tranchée, ou encore 40 à 50 mètres cubes de grumes pour construire un abri d'artillerie* » (Gadant cité par Puyo, 2004). Ainsi, côté français, près de

[36]Arbres couchés en direction de l'ennemi et souvent taillés en pic (Amat, 2001, 2015).

36,2 millions de m³ de bois ont été extraits des forêts entre 1914 et 1918, dont 37 % comme bois d'œuvre et 63 % comme combustible (Dabat cité par Puyo, 2004). Toutefois, ces chiffres mettent de côté les forêts et bois privés et n'incluent pas les volumes extraits par l'armée allemande.

3.2. Le LiDAR et l'archéogéomorphologie pour aborder les paysages de guerre de la forêt domaniale de Verdun

L'étude des impacts paysagers de la Première Guerre mondiale constitue un champ disciplinaire relativement vaste où chaque composante du milieu physique peut faire l'objet d'une réflexion à part entière. De ce fait, la question des forêts détruites a été abordée par des biogéographes, de même que celle des sols pollués par les résidus de munitions, restée aux mains des agronomes et géologues. Cette séparation des approches naturalistes du paysage de guerre démontre bien la complexité des processus de destruction ou de dégradation qui ont animé le front de l'Ouest, nécessitant une analyse approfondie par des spécialistes aguerris. Parmi ces approches, celle des conséquences topographiques des combats a longtemps été ignorée des géomorphologues. Cette mise en marge du relief dans l'étude des paysages de guerre tient notamment son origine de la faible visibilité des polémoformes, celles-ci s'étant retrouvées cachées sous les grands massifs forestiers plantés dans les années 1920-1930 le long de la ligne de front (les forêts de guerre ; cf. *infra*, chapitre 2) ou détruites par nivellement par les engins agricoles. Le manque de valeur archéologique accordé à ces reliefs jusqu'aux années 1990 a clairement constitué un autre argument de poids contre leur prise en compte par des travaux scientifiques. Avec leur reconnaissance en tant qu'objet archéologique dans les années 2000, le passage du centenaire de la Première Guerre mondiale et l'intégration aux sciences humaines des outils de détection tels que le LiDAR ou les prospections géophysiques, les polémoformes ont bénéficié d'un regain d'intérêt auprès des géomorphologues au point de constituer ces dernières années un des thèmes phares de l'anthropo-géomorphologie (Ilyès, 2006 ; Poesen, 2018).

Cette thèse s'inscrit pleinement dans ce courant et dans la continuité des recherches menées dans ce champ de la géomorphologie, en focalisant sur le champ de bataille de Verdun. Sur ce haut lieu de mémoire, les polémoformes se comptent par millions et pourtant, aucun inventaire n'a encore été réalisé sur l'ensemble du périmètre. Cette lacune tient son origine de l'aspect actuel du site, aujourd'hui reconverti en un vaste massif forestier (cf. *infra*, chapitre 2), rendant difficile les opérations d'observations des polémoformes que ce soit au sol ou par les airs. **Depuis 2013**, **un MNT LiDAR est disponible sur le périmètre de la forêt domaniale de Verdun**, linceul ayant recouvert la moitié du champ de bataille de Verdun sur la rive droite de la Meuse. Tout l'intérêt de notre travail a consisté à exploiter ces données extrêmement précises (de l'ordre du décimètre) pour examiner l'état de la topographie un siècle après les combats. Au vu des difficultés rencontrées par les études portant sur la cartographie des polémoformes, seul le recours à une méthode de cartographie automatisée semble capable d'inventorier les nombreuses polémoformes parsemant le sous-

bois de manière exhaustive et en un temps relativement court. La thèse implique le développement d'une méthodologie adaptée à ces enjeux, constituant dans le même temps la première cartographie automatisée de ce type appliquée sur un espace aussi vaste (100 km²). En complément, elle propose une approche pluridisciplinaire qualifiée d'*archéogéomorphologique* (cf. *supra*, § 2.3.3) en raison du caractère hybride des formes étudiées, constituant à la fois des objets géomorphologiques et archéologiques, et de la méthodologie envisagée, faisant appel à des méthodes de géomorphologues (analyse morphométrique, classification des formes) et d'archéologues (relevés archéologiques par prospection pédestre pour l'interprétation).

4. Conclusions

Avec le double essor de la notion de *paysage de guerre* dans le champ scientifique et de la commémoration du centenaire de la Première Guerre mondiale dans le champ sociétal, les champs de bataille ont constitué ces dernières années un thème de recherche prisé par les historiens, géographes, sociologues et archéologues. Parmi les dimensions les plus en vogue de ces paysages de guerre, celle des impacts environnementaux occupe une place prépondérante au sein de la communauté scientifique et s'inscrit dans le courant de pensée des sociétés actuelles de plus en plus soucieuses de l'état de notre planète. Ce constat est encore plus vrai en ce qui concerne les reliefs hérités de la guerre, dont la visibilité s'est largement accrue avec l'essor des nouveaux outils de détection et du fait de leur reconnaissance en tant que supports archéologiques. **C'est cette voie que nous proposons d'explorer dans ce mémoire en focalisant sur la forêt domaniale de Verdun**. Une des particularités de ce site réside dans le caractère exceptionnel des dommages géomorphologiques causés par la Grande Guerre, se matérialisant par un nombre extraordinaire de polémoformes conservées sur le terrain. De ce fait, **la forêt domaniale de Verdun constitue un des seuls laboratoires offrant la possibilité d'observer ces reliefs et donc d'évaluer concrètement la nature et l'amplitude des dommages de la Première Guerre mondiale sur le paysage géomorphologique**. Sur le plan patrimonial, ce site forme un musée à ciel ouvert où chaque polémoforme observée est un jalon qui retrace l'histoire du champ de bataille et son environnement d'origine. En faisant appel à l'imagerie LiDAR disponible sur ce site depuis 2013, la cartographie des polémoformes laisse ainsi entrevoir une opportunité de mieux comprendre la manière dont les soldats se sont appropriés le terrain et de dépister les attributs tactiques des paysages d'avant-guerre. Il convient maintenant de présenter le cadre géographique du mémoire et de décrire les processus paysagers ayant permis d'arriver à un tel résultat : celui d'un paysage à la fois bouleversé par des événements d'une intensité inédite et cicatrisé par un siècle d'aménagements forestiers. Un regard sera porté sur la période d'avant-guerre puis la période conflictuelle, où seront décrits les processus de formation du polémofaciès. Nous présenterons ensuite les grandes métamorphoses paysagères qui ont affecté le champ de bataille de Verdun au cours du siècle ayant suivi la guerre.

Chapitre 2
La forêt domaniale de Verdun : genèse et évolution d'un territoire forestier

De la Côte des Bar (à l'ouest) à la plaine de la Woëvre (à l'est) se dévoile une campagne agricole vallonnée et dominée sur près de la moitié de son territoire par la monotonie de vastes manteaux forestiers. C'est le Pays de Verdun, groupement intercommunal du Nord Meusien créé en 2004, articulé sur l'imposante vallée de la Meuse et représenté par une ville marquée par son histoire militaire et industrielle (figure 2.1). Nommée *capitale mondiale de la paix* en 1966 à l'occasion du cinquantième anniversaire de la bataille qui porte son nom, Verdun forme aujourd'hui la première agglomération du département de la Meuse par sa population riche de ses 24 500 habitants (INSEE, 2014). Malgré son apparence paisible, l'histoire paysagère de ce fragment de Lorraine est mouvementée. Elle a été rythmée par les nombreux conflits qui l'ont touchée depuis l'époque gallo-romaine, du fait de sa position stratégique longtemps aux marges du territoire qu'elle a occupé : la Gaule, la Lotharingie, le Royaume de France puis la France annexée du XIXème siècle. La Première Guerre mondiale (1914-1918), dont la bataille de Verdun (1916), reste néanmoins l'événement le plus marquant de l'histoire locale, de par sa violence et sa durée. Ce chapitre revient sur cette période historique qui a profondément transformé les paysages régionaux et sur la manière dont les dévastations qu'elle a causées ont été administrées au lendemain de la guerre par le gouvernement et les acteurs locaux. Il focalise précisément sur les paysages de la rive droite de la Meuse, où ont eu lieu la majeure partie des combats de l'année 1916 (figure 2.1). Cette approche diachronique, qui termine par un panorama du champ de bataille un siècle après les combats, s'accompagne d'éléments de présentation du cadre physique et de son rôle dans la guerre. Ainsi, ce chapitre pose le cadre dans lequel s'inscrivent les *polémoformes*, que nous allons caractériser, cartographier et quantifier dans les parties suivantes.

1. Histoire et paysages passés d'une région meurtrie

Pour mieux apprécier la métamorphose paysagère qui a touché la région au siècle dernier, il convient de rappeler l'histoire de ce territoire accoutumé aux conflits armés et de décrire ses grands faciès paysagers à l'aube de la guerre 14-18, dont la structure a localement influencé les armées dans l'aménagement du champ de bataille.

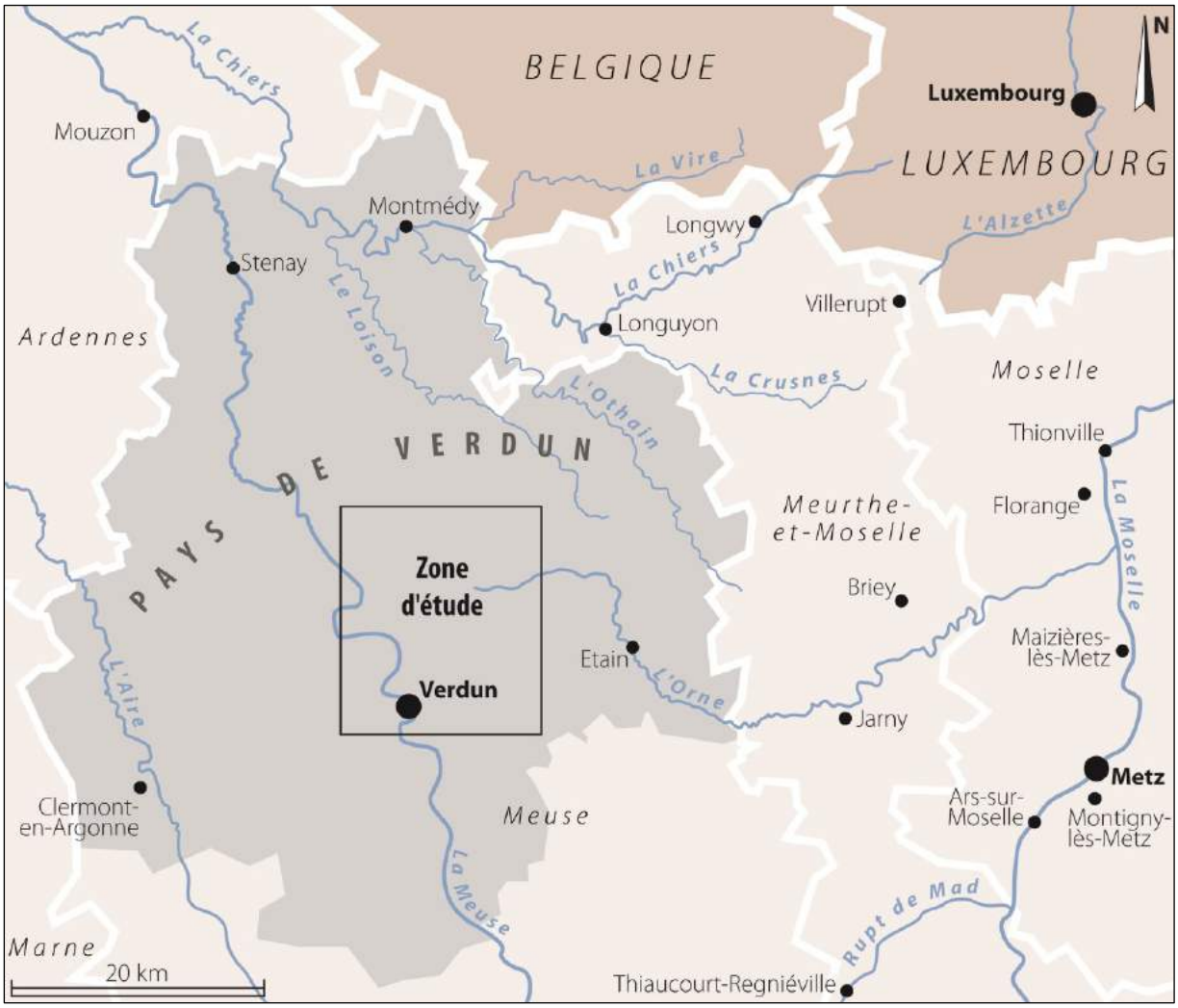


Figure 2.1 – *Localisation du Pays de Verdun et de la zone d'étude*

1.1. Le Pays de Verdun, une terre de conflits

L'histoire régionale remonte à l'Antiquité et plus précisément à l'époque gauloise (du VIIIème au IIIème siècle av. J.-C.) au cours de laquelle fut édifiée la cité fortifiée de Verdun (*Virodunum* ou *Verodunum*) sur un promontoire perché à 30 m en rive gauche de la Meuse. Du celte *ver* signifiant le gué et *dun* la hauteur, Verdun constitua dès l'époque gallo-romaine un *oppidum* (site fortifié) convoité que l'on a situé à la confluence du fleuve Meuse et de la Scance et sur la *via Virdunensis* reliant *Durocortorum* (nom latin de Reims) à *Divodurum* (nom

latin de Metz ; Legrand, 1878 ; Dollinger-Léonard, 1958 ; Girardot, 1982 ; Hirschmann, 1996 ; Gama, 1997). **Cette situation stratégique a fait de Verdun un site particulièrement exposé aux incursions de peuples européens** : les Romains en l'an 57 av. J.-C., Attila et les Huns en 451, les Francs de Clovis en 490, les Vikings en 889, Lothaire en 984 et les Prussiens en 1792, 1870 et 1914-1918 (Clouet, 1867 ; Farcy, 1872 ; Legrand, 1878 ; Girardot, 1982).

Avec la nouvelle frontière imposée par le traité de Francfort (1871), les territoires du Verdunois étaient mal desservis et peinaient à se connecter aux régions voisines. Seulement quatre axes les traversaient : deux voies ferrées à voie unique et deux routes, dont celle menant à Bar-le-Duc, qui prît en 1916 le nom de *Voie Sacrée* pour son intérêt stratégique au cours de la bataille de Verdun. Une des raisons du choix allemand de porter l'attaque sur Verdun lors de la bataille de 1916 « *était la faiblesse, pour ne pas dire l'inexistence du réseau français de communications* » (Miquel, 1995 ; Cochet, 2014 ; Prost et Krumeich, 2015). Ce manque d'infrastructures combiné aux espaces boisés (camouflage) et hauteurs (observatoire) dominant le nord-est de la ville contribua à accroître sa vulnérabilité[1] face à un ennemi situé à seulement 50 km plus à l'est suite à l'annexion de l'Alsace et de la Moselle (Legrand, 1878 ; figure 2.2). Pour ces raisons, le gouvernement comprit la nécessité de fortifier cette place de guerre par une série d'ouvrages et de forts. Reclus (1885) estima que « *c'est par cette ville que passerait la ligne la plus directe pour une armée d'invasion allemande* ».

Suite à cette prise de conscience, les paysages bordant la cité furent militarisés. L'État décida en 1874 d'aménager la place fortifiée de Verdun (nommée camp retranché de Verdun avant 1915) imaginée par l'ingénieur militaire Séré de Rivières. Cet aménagement consista à construire deux ceintures de forts autour de la cité. D'autres villes, Toul et Épinal, subirent le même sort et formèrent avec la cité meusienne un rideau fortifié étendu de Sedan à Belfort (figure 2.2***figure 2.2***). Au total, ce sont près de dix-neuf forts qui furent construits dans la région de Verdun entre 1874 et 1885, les plus célèbres étant les forts de Souville (1879), Tavannes (1879), Vaux (1884) et Douaumont (1885 ; Gama, 1997 ; Amat, 2001 ; Durup de Baleine, 2001). Avec la *crise de l'obus-torpille* et l'apparition des obus en acier et des poudres brisantes, ces édifices devinrent obsolètes (Amat, 2001 ; Durup de Baleine, 2001 ; Amat, 2015). Certains forts furent modernisés dans les années 1880, consistant notamment en l'ajout d'une carapace atteignant parfois 5 m d'épaisseur, composée de couches de sable, de béton et de terre (Solard, 1935). Ainsi, le relief, d'apparence réelle au-dessus de ces édifices et encore visible à l'heure actuelle, a été en réalité le fruit de longs travaux de terrassement.

[1]Les Prussiens l'avaient déjà remarqué en 1870, lors du siège de Verdun, où les canons ennemis installés sur le plateau, aux abords de la Côte Saint-Michel, pilonnaient la cité (Legrand, 1878).

1.2. Les Côtes de Meuse, socle de la place fortifiée de Verdun

L'ensemble du dispositif fortifié mis en place par le général Séré de Rivières s'appuyait sur la barrière topographique formée par les Côtes de Meuse et de Moselle, inscrites dans le système de cuestas de l'est du Bassin parisien, qui barra le passage aux Prussiens[2] de par son orientation nord-sud (figure 2.2).

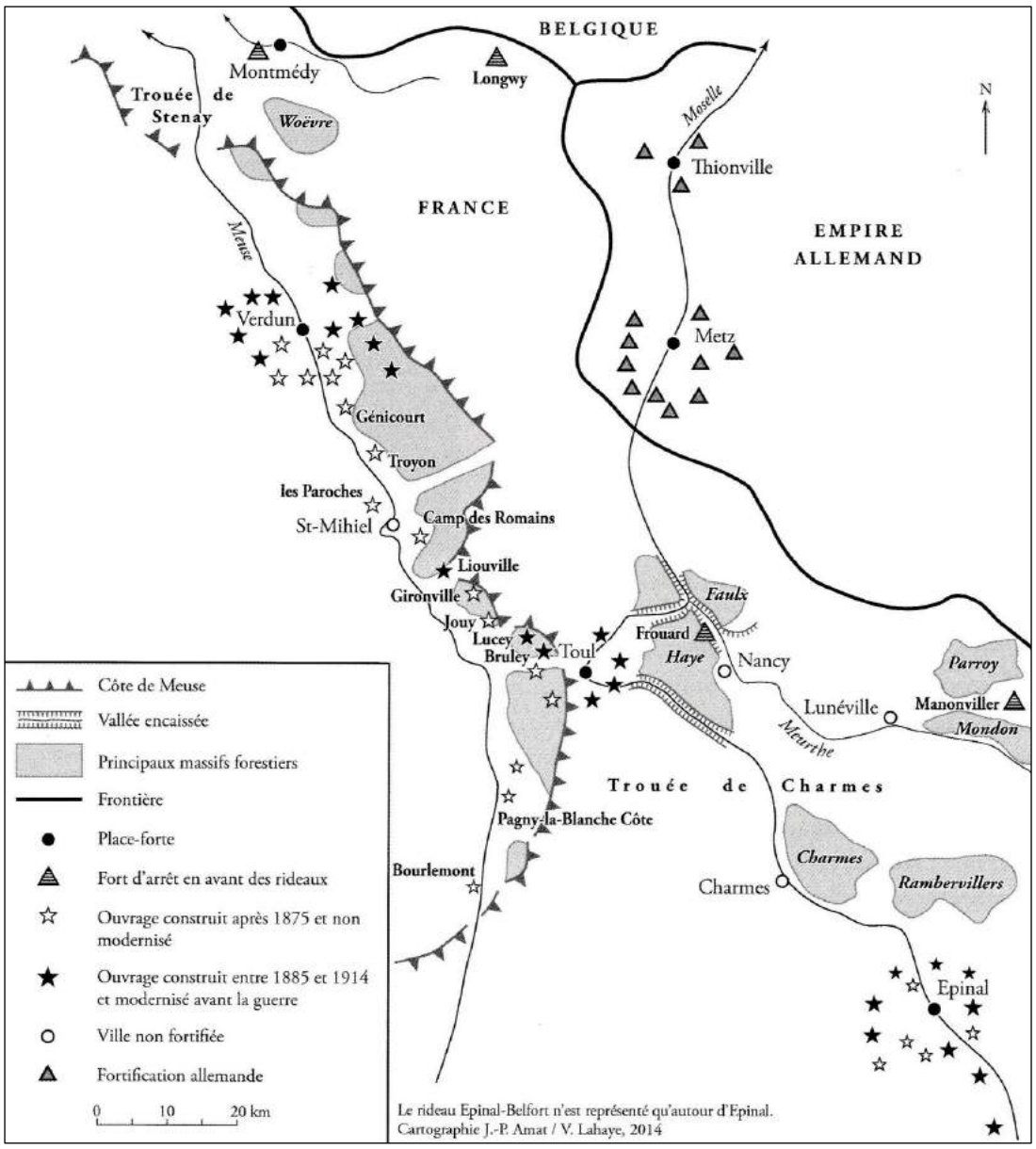


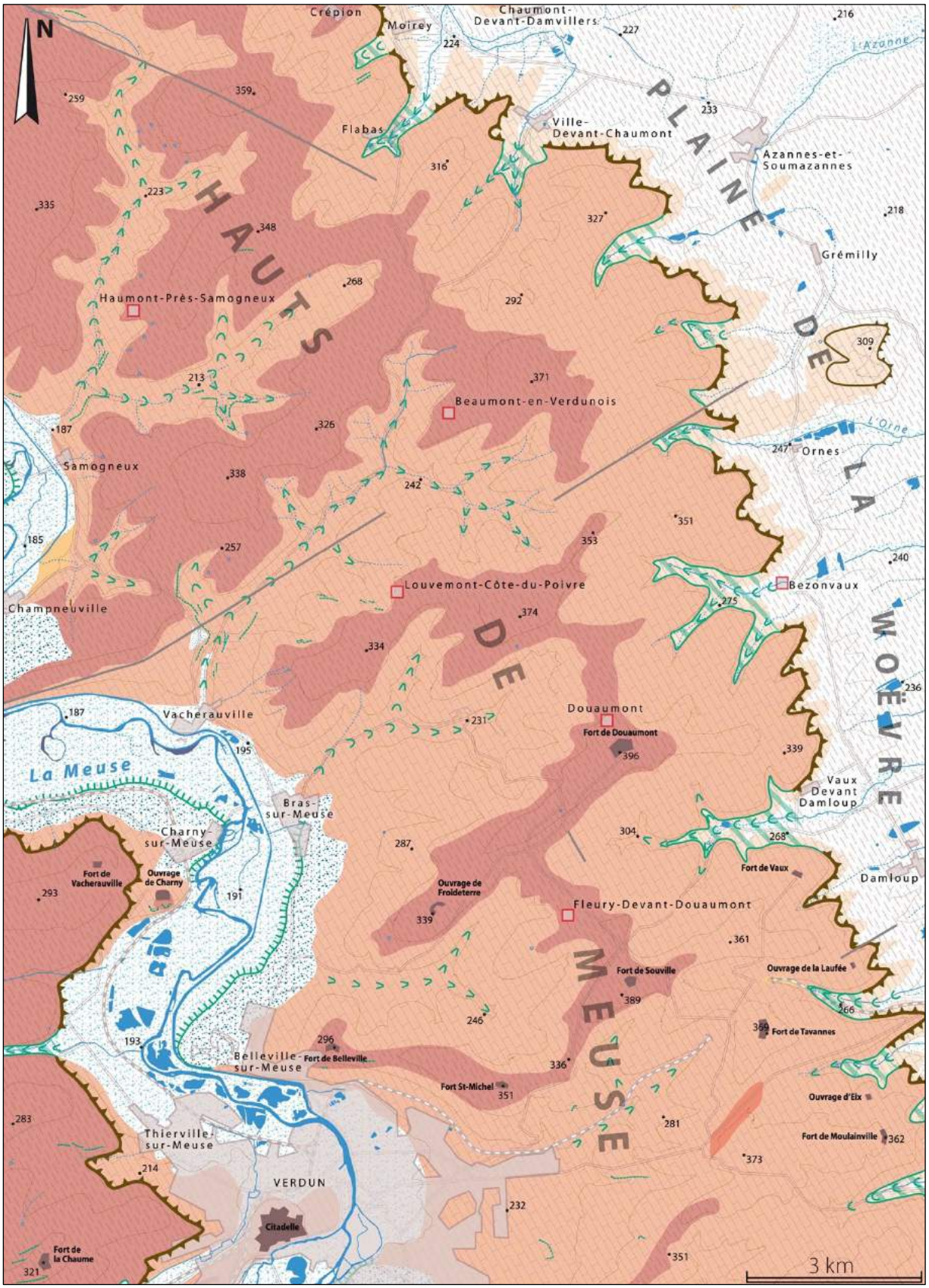
***Figure 2.2** – Les rideaux défensifs du système fortifié dit « Séré de Rivières », 1873-1914 (Amat, 2015)*

[2]« *Les Côtes de Meuse ou Hauts de Meuse sont une longue chaîne* […] *appelée à jouer un rôle capital dans la défense de la France, du côté de l'est, depuis la perte de notre frontière naturelle, le Rhin* […]. *Elles présentent pour nous cet avantage, de s'abaisser en pente douce du côté de la Meuse et de finir en hauts et brusques talus du côté de la Moselle et de ses affluents, formant un véritable rempart naturel et continu* » (Gasquet, 1892 cité par Amat, 2001).

À Verdun, les forts occupèrent les éperons rocheux de la Côte de Meuse. Cette côte forme un relief monoclinal dissymétrique taillé dans une série de roches sédimentaires marquée par une alternance de couches résistantes (calcaires massifs) et de couches tendres (argiles et marnes) datées du Callovien à l'Oxfordien supérieur (figure 2.3) :

- **À l'ouest**, **le plateau structural des Hauts de Meuse** (le revers de cuesta), site d'étude principal de la thèse, orienté nord-ouest/sud-est, où s'observent des altitudes moyennes comprises entre 300 et 350 m, plus élevées sur la marge orientale en raison de l'inclinaison du plateau vers l'ouest (IGN, 2014). Surplombant de 100 m la plaine de la Woëvre à l'est, le plateau fut aménagé de forts et redoutes formant la ceinture fortifiée. Sa surface est incisée par des vallons (nommés localement *ravins*) taillés dans les calcaires et marnes de l'Oxfordien moyen et les calcaires massifs de l'Oxfordien supérieur (BRGM, 1958, 1969 ; Enay et Boullier, 1981 ; Amat, 2001 ; Carpentier, 2004). Ces vallons, aux morphologies variées (en V ou en berceau), sont plutôt étroits (rarement > 100 m) et profonds (30-120 m). La plupart sont drainés par des cours d'eau de taille modeste prenant leur source sur le plateau où les placages argileux et marno-calcaires de l'Oxfordien supérieur favorisent une nappe phréatique perchée (sources de débordement). Sur les hauteurs du plateau, la topographie assez plane correspond à une surface d'érosion où la majeure partie des placages argileux coiffés de calcaires et marnes de l'Oxfordien supérieur a disparu. Au nord-est du village d'Ornes s'élève la butte témoin des Jumelles d'Ornes[3].
- **À l'est**, **la plaine de la Woëvre** (dépression orthoclinale) dont les valeurs d'altitude varient de 200 à 250 m (IGN, 2014), se déploie à la base de la cuesta des Côtes de Meuse. De même orientation que le plateau, la plaine est ouverte dans les roches tendres creusées par l'Orne et ses affluents, qui se composent d'une épaisse couche de marnes et d'argiles silteuses du Callovien (BRGM, 1958, 1969 ; Enay et Boullier, 1981 ; Amat, 2001 ; Carpentier, 2004). Le terrain particulièrement imperméable contribue à l'extension de larges zones humides autour d'étangs (Chappe, Sponville, Vaux…).
- **La liaison entre les deux unités topographiques s'opère par les Côtes de Meuse**, formant un talus assez imposant de 80 à 110 m de commandement, à pente assez raide (7 à 15 % en moyenne et ponctuellement jusqu'à 60 % ; IGN, 2014). De profil convexe et tourné vers l'est, le tracé de la côte est fortement échancré par de multiples vallons anaclinaux. Le secteur compte une dizaine de vallons drainés par l'Orne, le ruisseau de Bezonvaux, le ruisseau de Tavannes, le ruisseau de Vaux... Ces derniers entaillent le binôme de roches dures (calcaires) et de roches tendres (marnes) de l'Oxfordien inférieur et moyen où s'interposent à la limite des deux sous-étages des

[3]D'après la définition de Joly (1997) et Foucault *et al.* (2014), elle n'est donc pas une avant-butte (relief ayant perdu son chapeau de roches dures) puisque le banc de calcaires oolithiques résistants de l'Oxfordien supérieur la surmonte et la protège de l'érosion. Elle marque l'extension plus ancienne du revers et du front de cuesta ayant subi un recul par érosion différentielle.


N
Crépion
Moirey
Chaumont-Devant-Damvillers
Flabas
Ville-Devant-Chaumont
Azannes-et-Soumazannes
Grémilly
HAUTS DE MEUSE
PLAINE DE LA WOËVRE
Haumont-Près-Samogneux
Beaumont-en-Verdunois
Samogneux
Ornes
Louvemont-Côte-du-Poivre
Bezonvaux
Champneuville
Douaumont
Fort de Douaumont
Vacherauville
La Meuse
Bras-sur-Meuse
Charny-sur-Meuse
Fort de Vacherauville
Ouvrage de Charny
Ouvrage de Froideterre
Fleury-Devant-Douaumont
Vaux Devant Damloup
Fort de Vaux
Damloup
Fort de Souville
Ouvrage de la Laufée
Fort de Tavannes
Belleville-sur-Meuse
Fort de Belleville
Fort St-Michel
Ouvrage d'Eix
Fort de Moulainville
Thierville-sur-Meuse
VERDUN
Citadelle
Fort de la Chaume
3 km

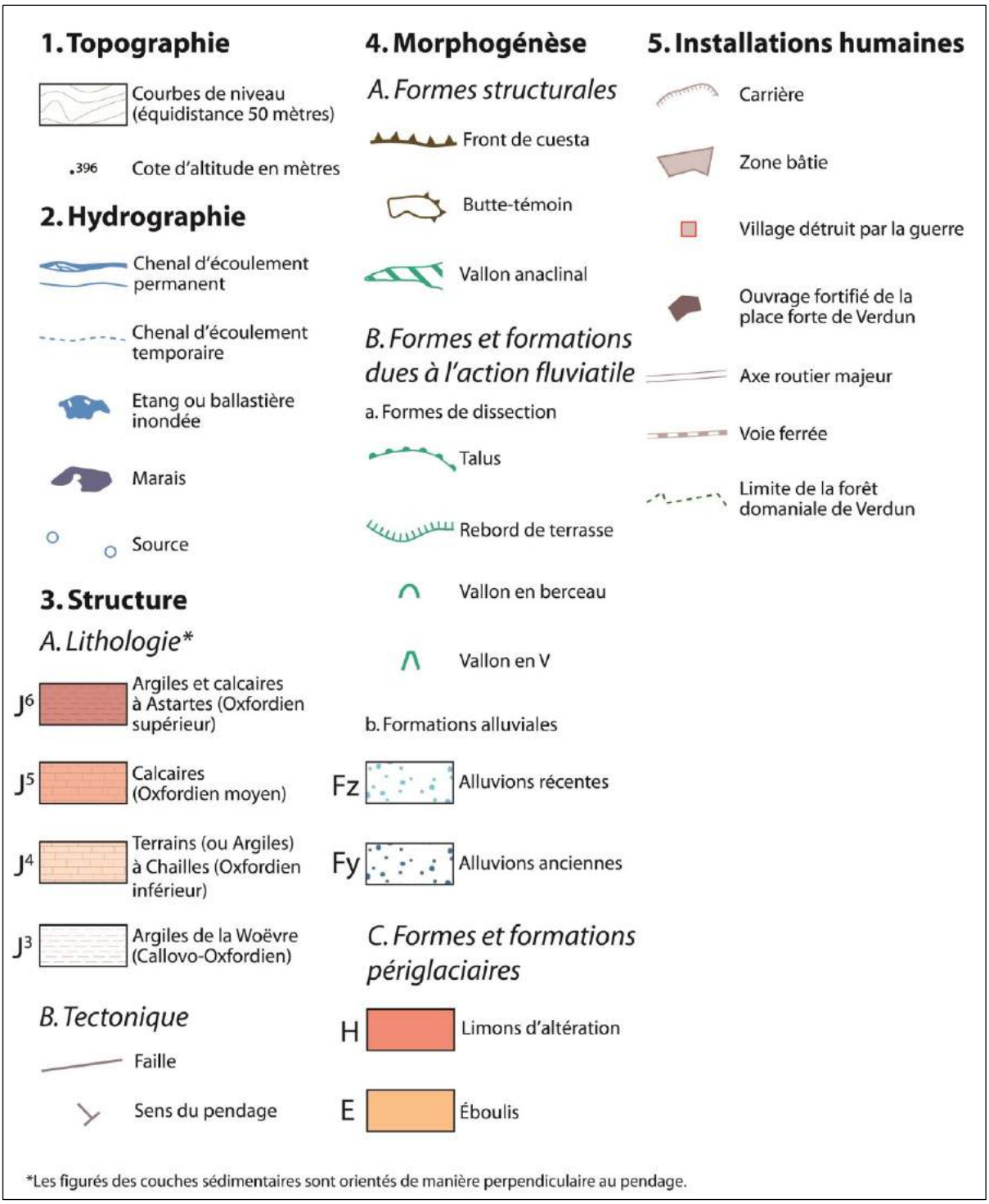


***Figure 2.3** – Carte géomorphologique des Hauts de Meuse en rive droite. La carte a été dessinée à partir des cartes topographiques de l'IGN (2014) et du BRGM (1958, 1969). Les données LiDAR fournies par l'ONF de Verdun et le SRA Grand-Est (site de Metz) ont servi au traçage des courbes de niveau et à l'identification de la morphologie des vallées.*

argiles à chailles et des oolithes ferrugineuses (BRGM, 1958, 1969 ; Enay et Boullier, 1981 ; Amat, 2001 ; Carpentier, 2004).

- Au cœur du plateau des Hauts de Meuse (à l'ouest du site étudié), **l'imposante vallée de la Meuse**, encaissée d'environ 150-200 m, limite l'extension du plateau sur 3 à 7 km selon les secteurs (IGN, 2014). L'agglomération de Verdun occupe un train de méandres au sud-ouest. Cette incision orthoclinale de revers (sud-nord) a développé un talus majeur en rive gauche (versant ouest de la vallée) formant un second front de cuesta[4].

1.3. La Meuse agricole et industrielle du début du XXème

À l'aube du premier conflit mondial, la Meuse ressemblait à ses départements voisins : des terroirs agricoles, céréaliers et viticoles, disposés le long des Côtes de Meuse jusqu'aux environs de Saint-Mihiel situé 50 km plus au Sud. Trois grands faciès résultant de la superposition des milieux naturels et de la société humaine définissaient la région de Verdun :

- **Les *agrofaciès* des Hauts de Meuse**, dominés par les *openfields* aménagés en lames de parquet (figure 2.4) où étaient cultivés le blé, l'avoine, l'orge, le seigle et la pomme de terre. Les paysans lorrains pratiquaient aussi l'élevage de bestiaux, en particulier les ovins (Malte-Brun, 1845 ; Joly, 1911 ; Zweig, 1938 ; Amat, 1987 ; Amat et Foucault, 1999 ; Amat, 2001 ; Steinbach et Husson, 2007 ; Amat, 2015) et les chevaux[5]. Les espaces bâtis étaient typiquement lorrains, disposés de part et d'autre de la rue principale (village-rue) et centrés sur leur terroir agricole (Amat, 2001). Ces villages étaient assis en position dominante sur les Hauts de Meuse, comme le précise leur toponymie : Haumont-près-Samogneux, Beaumont-en-Verdunois, Louvemont, Douaumont, Fleury-devant-Douaumont. Quelques fermes isolées émergaient par endroits, installées plus récemment en marge des territoires communaux sur d'anciens bois peu à peu remplacés par des terres arables : fermes d'Ormont et d'Anglemont sur la commune d'Haumont-Près-Samogneux, fermes de Mormont et d'Haudromont sur celle de Louvemont, ferme de Thiaumont sur celle de Douaumont. En limite de finage, les terroirs agricoles se transformaient en sylvofaciès de feuillus (Amat et Foucault, 1999 ; Amat, 2001, 2015 ; figure 2.4) : bois de Beaumont, bois de Neuville, bois d'Ornes, bois des Fosses... Sur la commune d'Haumont-près-Samogneux, représentative des villages alentours, la superficie boisée occupait environ 30 % du territoire communal, essentiellement sur les crêtes et les versants raides des ravins. Dans certains cas, les vallons humides de l'est du plateau faisaient place aux prairies (Zweig, 1938 ; Amat, 2001).

[4]Nous pouvons ainsi considérer que le relief des Côtes de Meuse s'inscrit dans un système de cuesta dédoublée.

[5]Une partie de la production de céréales était destinée à nourrir « *un grand nombre de chevaux* » (Malte-Brun, 1845), à tel point que le département de la Meuse constituait à la fin du XIXème siècle « *la circonscription française qui élève le plus de chevaux* » (Reclus, 1885).

***Figure 2.4** – Vue aérienne du village d'Ornes et de ses alentours au 11 octobre 1914 (Service Historique de la Défense)*

- **Les vergers du front de côte**, organisés selon un gradient caractéristique (figure 2.5) : le sommet de côte, à pente raide et non habité, était recouvert de boisements – à mi-versant émergeaient les espaces spécialisés dans la culture de la vigne et des arbres fruitiers, dont des pruniers, des mirabelliers, des cerisiers, des pommiers et des poiriers (Joly, 1911 ; Zweig, 1938 ; Amat, 2001, 2015) – en pied de versant s'adossaient les villages : Ville-devant-Chaumont, Ornes, Bezonvaux, Vaux-devant-Damloup. Le long des ruisseaux s'écoulant des hauteurs du plateau s'élevaient des moulins ; la plaine, parsemée de bois et bosquets, était occupée par des prairies marécageuses parfois exploitées en pâturages.
- **Le paysage urbain de Verdun-sur-Meuse** (rebaptisé Verdun en 1970), peuplé de 21 700 habitants en 1906 (EHESS), soit presque 4 000 de plus qu'à l'heure actuelle (INSEE, 2014), ce qui en faisait à l'époque (comme aujourd'hui) la ville la plus peuplée du département. Avec ses communes voisines de Belleville-sur-Meuse et Thierville-sur-Meuse, l'agglomération s'étalait entre les deux versants de la vallée : en rive gauche, se trouvait le centre historique appelé Ville Haute ; en contrebas et précisément au Sud-Est, Verdun se divisait en plusieurs quartiers insulaires formant la Ville Basse ; enfin, en rive droite, était situé le quartier Saint-Victor puis le Faubourg Pavé, un des seuls embryons urbains installés à l'extérieur de l'enceinte (Dollinger-Léonard, 1958 ; Girardot, 1982 ; Hirschmann, 1996 ; Gama, 1997 ; De Matos-Machado, 2019). Par sa situation géographique, desservie par la Meuse et située sur l'axe Reims-Metz, Verdun se développa largement lors de la Révolution industrielle et devint une cité animée. Elle y vit s'implanter de nombreuses usines,

forges, verreries, papeteries et des industries de confiserie (dragées très renommés) et distilleries[6] (eau de vie et liqueurs ; Malte-Brun, 1845 ; Reclus, 1878).

Figure 2.5 – *Les Côtes de Meuse au sud-est du fort de Vaux le 9 juillet 1915 (Bayerisches Hauptstaatsarchiv)*

Pendant des siècles, la géomorphologie régionale joua un rôle prépondérant dans le façonnement des paysages meusiens, rythmés par la succession des fronts et des revers de cuesta, des dépressions orthoclinales et des vallées. Au sortir de la Première Guerre mondiale, en novembre 1918, ce panorama n'était plus que ruines. Entre les villages détruits par les bombardements, les champs de blés avaient laissé place à des champs de cratères. Les bois, s'ils existaient encore, subsistèrent que sous forme de lambeaux. Quatre années de conflit suffirent à détruire ces campagnes vieilles de plusieurs siècles. Il convient d'expliquer l'origine de ces destructions et de décrire les processus ayant mené à un tel bouleversement paysager.

2. De l'agrofaciès au *polémofaciès*

Le 28 juillet 1914, la Première Guerre mondiale fut déclarée. Partageant une frontière commune avec la Moselle occupée, la région de Verdun fut une nouvelle fois condamnée à la destruction et la désolation. Au début du conflit, la région n'était guère concernée par les combats, ceux-ci ayant lieu plus à l'Ouest, en Champagne, et au Nord, dans l'Artois et la Flandre. Dès l'hiver 1914, le front se stabilisa et la guerre de position fît irruption dans le Verdunois. Ce fut à partir de 1916, année charnière marquée sur le front de l'Ouest par les batailles de Verdun et de la Somme puis à l'Est par l'offensive Broussilov, que les dégâts

[6]« *Les quelques quinze mille habitants vivaient du travail de leurs mains et de l'ingéniosité de leurs cerveaux dès longtemps façonnés par la civilisation : broderies, friandises, toiles de lin, fonderies, machines et meubles* » (Zweig, 1938).

paysagers commencèrent à s'accentuer. À elles seules, ces batailles causèrent la mort de près d'un million de soldats et la ruine des régions sinistrées.

2.1. Le tournant de 1916, l'année de la bataille de Verdun

21 février 1916, 6 h 30, bois des Caures, 10 km au nord de Verdun : « *L'ennemi déclenche un violent bombardement sur toutes nos positions de première et deuxième lignes, sur toutes les batteries de position, sur les routes, les carrefours et les cantonnements* » (JMO, 1916 ; figure 2.6). Telle fut la situation décrite par le 56ème bataillon de chasseurs à pied (BCP) au lancement de la bataille de Verdun. L'armée française subit un feu roulant d'une violence inouïe, détruisant toute vie et pulvérisant le sol d'une manière inédite : « *toutes les deux secondes, montre en main, c'est une grosse marmite qui fait tremblement de terre dans nos parages* » (Stéphane, 1929).

Le caractère exceptionnel (pour ne pas dire inédit) de cette bataille s'est avant tout remarqué dans l'importance des moyens matériels engagés dépassant tous les efforts logistiques observés jusqu'à ce jour. À l'aube du 21 février et en seulement 10 h, les Allemands amassèrent entre 1 200 et 1 500 pièces d'artillerie sur 5 km de front, représentant une moyenne d'une pièce positionnée tous les 12 m linéaires de front (Gascouin, 1921 ; Amat, 2001 ; Cochet, 2014 ; Prost et Krumeich, 2015 ; Desrousseaux de Medrano, 2016). Autant dire que la pluie d'obus qui s'abattit sur l'armée française aux premières heures de la bataille s'apparenta à une scène d'apocalypse : « *le bois des Caures donne l'impression tragique d'un furieux volcan en éruption au milieu d'un immense tremblement de terre* […]. *Marmites et puissants minens alternent, les unes déchirant l'air avec rage, les autres s'amenant lourdement* […]. *Il n'y a pas à dire mon bel ami : pour un beau* trommelfeuer*, c'est un beau* trommelfeuer *!* » (Stéphane, 1929). Il y a des points où le bombardement fut si puissant que les trous d'obus « *en arrivent à se chevaucher* » (Stéphane, 1929). Cet *orage d'acier* (Jünger, 1985) aurait fait tomber **entre 1 et 2 millions d'obus sur les Hauts de Meuse aux seules journées du 21 et 22 février 1916** et ces estimations dépasseraient les **40 millions de projectiles au milieu de la bataille (juillet)**, représentant en moyenne 2 250 impacts/ha (Solard, 1935 ; Pétain, 1986 ; Péricard, 1997 ; Amat, 2001 ; Cochet, 2014 ; Prost et Krumeich, 2015). Au total, on estime à **60 millions le nombre d'obus tombés à Verdun durant les 300 jours de la bataille** (Lafon, 2016) et un chiffre extraordinaire de 1,45 milliard d'obus est évoqué pour le front de l'Ouest tout entier entre 1914 et 1918 (Masson-Loodts, 2014). Comme l'exigeait la guerre de position, les soldats n'avaient comme seul moyen de protection que le sol pour s'enterrer. Il en a résulté le jaillissement de kilomètres de tranchées et de boyaux de communication, contribuant au même titre que l'artillerie au bouleversement géomorphologique du champ de bataille.

Figure 2.6 – *Représentation artistique du bombardement du 21 février 1916 sur la ville de Verdun (Mémorial de Verdun)*

Le front de Verdun, ce fut aussi un champ de bataille de taille modeste, bien moins important que sur d'autres sites d'affrontements de la Grande Guerre : un front large de 5 km et profond de 10 km en rive droite, élargi à une vingtaine de kilomètres pendant les combats en rive gauche[7] (mars à juin ; Pétain, 1986 ; Bernède, 2002 ; figure 2.7). Ainsi, la violence et la durée des combats sur un espace restreint ont eu pour effet de décupler les agressions faites aux paysages, transformant radicalement les bois et terres agricoles en un vaste terrain lunaire où s'entremêlaient cratères et lambeaux de tranchée[8] (figures 2.8 et 2.9). À l'époque, l'image d'une peau d'orange fut évoquée pour illustrer la topographie chaotique du champ de bataille, dont les traces sont encore bien visibles à l'heure actuelle (Hupy, 2006 ; Hupy et Schaetzl, 2006 ; Amat, 2015 ; De Matos-Machado *et al.*, 2016). Du point de vue des pertes humaines, la bataille de Verdun fut tout aussi marquante et constitua l'un des épisodes les plus meurtriers de la « Guerre de 14 », voire de l'histoire toute entière. **Le nombre de victimes s'éleva à 713 000 parmi lesquelles 300 000 furent déclarées mortes ou disparues** (Bernède, 2002 ; Cochet, 2014 ; Prost et Krumeich, 2015), soit 160 000 Français et 140 000 Allemands, représentant le troisième plus lourd bilan de l'histoire contemporaine après les batailles de la Somme (1916) et de Stalingrad (1942-1943).

[7]De violents affrontements eurent lieu en rive gauche dans le secteur du Mort-Homme et de la Côte 304. En contrôlant ces hauteurs, l'occupant avait la possibilité d'observer toute la rive droite.

[8]« *C'est la dévastation. Les bois n'ont plus d'arbres et ceux qui restent plus de feuilles. La terre est labourée par les obus dont les trous se touchent* » (Joubaire, 1917 ; cité par Prost et Krumeich, 2015).

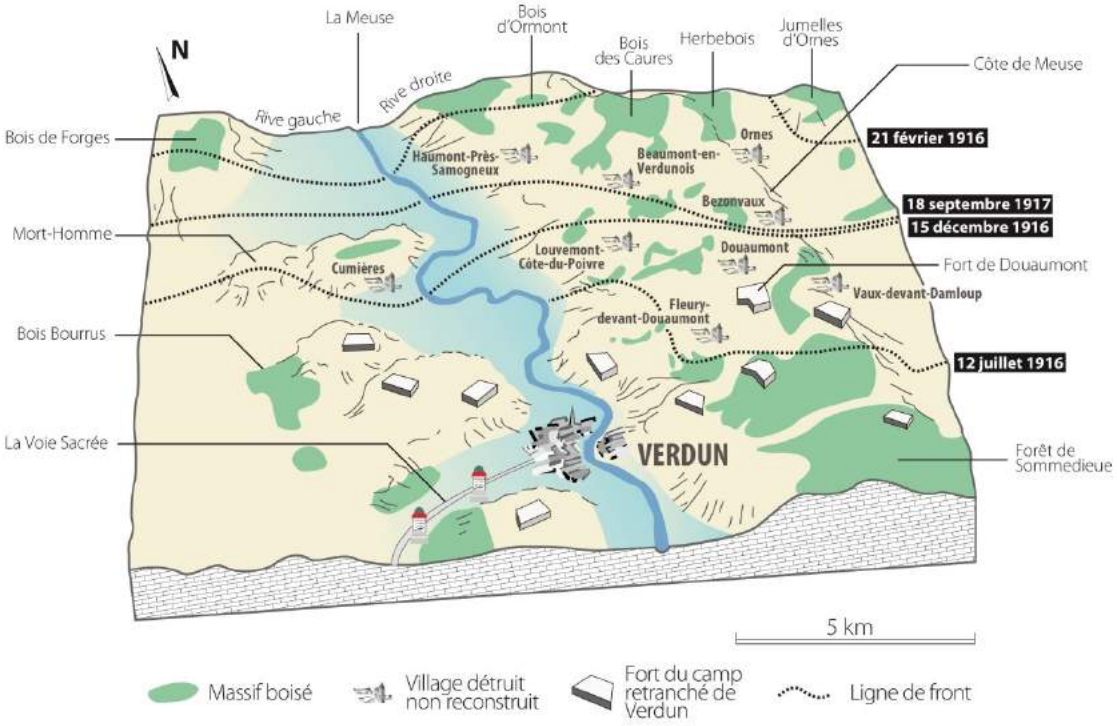


Figure 2.7 – *Présentation du champ de bataille de Verdun (modifié de De Matos-Machado et Hupy, 2019)*

Figure 2.8 – *La lisière orientale du bois des Fosses le 2 juin 1918 (Bayerisches Hauptstaatsarchiv)*

Bien que les enjeux stratégiques se déplacèrent vers d'autres parties du front après la bataille, notamment dans l'Aisne (bataille du Chemin des Dames), dans l'Artois (bataille de Vimy) et en Belgique (bataille de Passchendaele), les années 1917 et 1918 laissèrent tout autant leurs marques sur le champ de bataille de Verdun. Après la défaite, l'armée allemande se retrancha dans les positions défensives qu'elle aménagea avant et pendant la bataille en retrait de la ceinture fortifiée (SGA, 1916). Par conséquent, les stigmates de la guerre sont aussi très nombreux sur la ligne partant du fleuve Meuse et traversant le village de Brabant-sur-Meuse et les bois des Caures, de Beaumont et des Caurières. Cette ligne de front résista jusqu'à la fin de la guerre suite au changement tactique opéré par l'État-major allemand, consistant à renforcer les positions occupées par une série de tranchées maçonnées et d'abris faits de béton et de tôle cintrée (Gaber, 1998 ; Jacquemot et Legendre, 2011 ; Schnitzler et Landolt, 2014). De par cette solidification du front, beaucoup plus évidente du côté allemand que du côté français[9] (Gaber, 1998), et la poursuite des bombardements, l'impact paysager se décupla au cours des années 1917 et 1918.

2.2. Combattre en rase campagne

La *bataille devant Verdun*, comme certains l'appelaient à l'époque, eût lieu en rase campagne, forçant les armées à exécuter leurs manœuvres sur un terrain au degré d'ouverture important. Dans les deux camps, le soldat s'adapta à cet environnement hostile et exposé aux feux de l'artillerie. Il fut contraint de « *s'enterrer en s'incrustant au sol* » pour survivre (Nivelle ; cité par Bernède, 2002). Il s'en suivit l'aménagement de centaines de kilomètres de tranchées et de milliers d'abris qui marquèrent à jamais le sol de Verdun. Par endroits, des éperons se démarquaient du plateau. La plupart étaient déjà occupés par les redoutes fortifiées du système Séré de Rivières à la fin du XIXème siècle. D'autres, plus secondaires, étaient libres et possédaient une valeur stratégique inégalable. Comme le dit l'adage « *qui tient les hauts tient les bas* », bien connu des chasseurs alpins, le contrôle de ces positions permettait d'observer les moindres faits et gestes de l'armée adverse tout en nuisant à ses opérations. Les bouleversements géomorphologiques y furent plus importants qu'ailleurs. Dans les vallons, les versants opposés aux tirs, rarement atteints par l'artillerie adverse en raison de l'angle mort qui les couvrait, servaient de protection des soldats, des réserves et de points de rassemblement (Villate, 1925). Ces zones de défilement servaient aussi au cheminement des troupes qui pouvaient s'y déplacer en toute discrétion. Ce fut le cas par exemple du ravin de la Dame, nommé ravin de la Mort par les Poilus (Prost et Krumeich, 2015), qui constitua un véritable corridor pour les Allemands car son emprunt permettait de se rapprocher des forts[10]. Ainsi, **la topographie joua un rôle tactique certain pour l'organisation des positions de défense et l'observation.**

[9]Un prisonnier français raconta : « *Le sol large d'un mètre, est dallé ; les murs sont en pierre avec des joints cimentés ; ils ont trois mètres de haut avec un chemin de ronde d'un mètre cinquante* » (Miquel, 1995).

[10]« *Depuis le début du mois de mars, les Allemands n'ont pas cessé d'attaquer à la gauche du fort de Douaumont en direction de la ferme de Thiaumont* […]. *En mai, ils ont progressé dans le ravin de la Dame.*

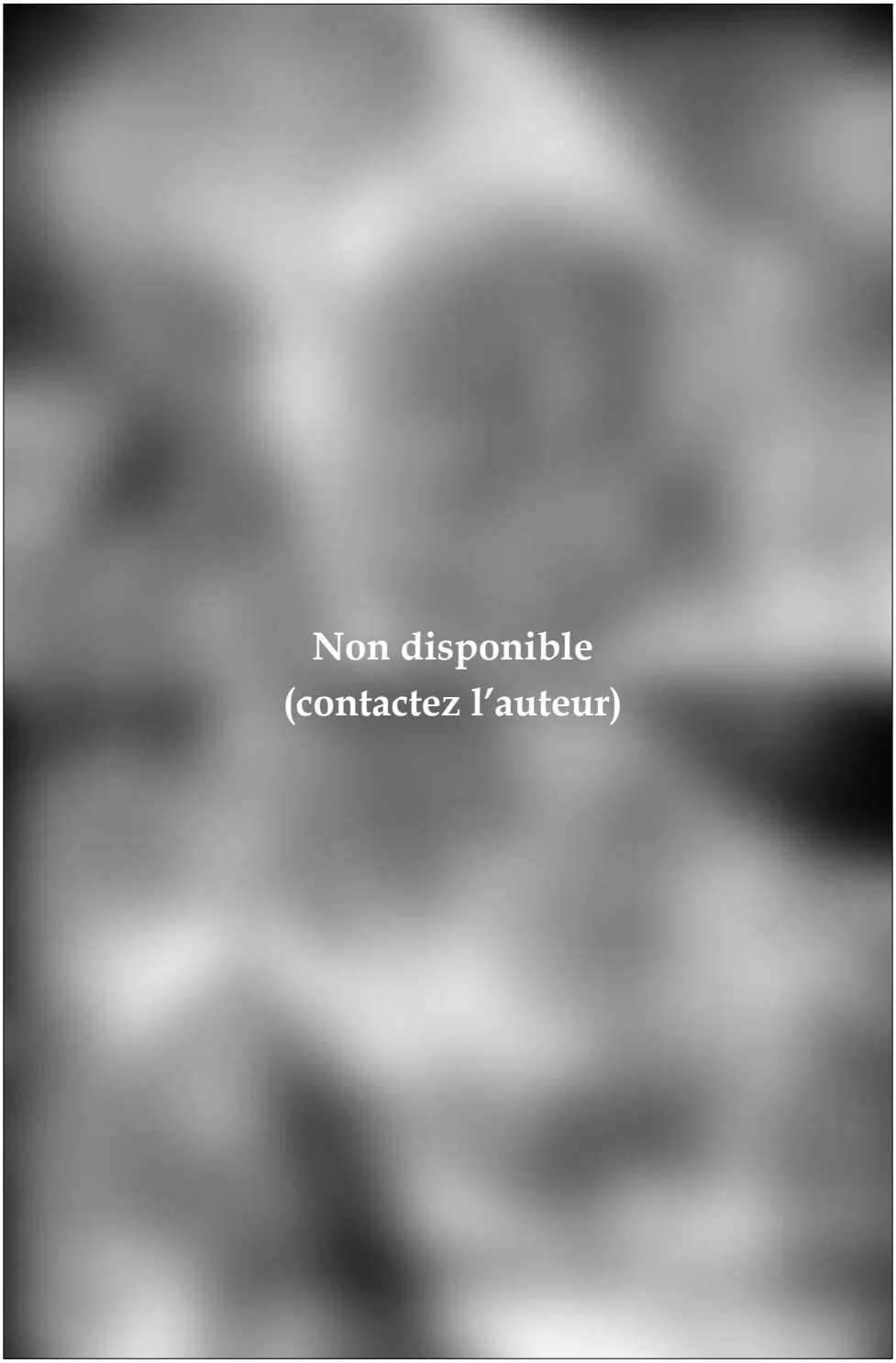


Figure 2.9 – *Le fort de Vaux avant et après le début de la bataille de Verdun (1916). A : photographie aérienne du 15 juin 1915 (Hauptstaatarchiv Dresden). B : photographie aérienne du 26 avril 1916 (Hauptstaatarchiv Dresden).*

Ainsi, dans les premiers jours de juin, le secteur entre ce ravin et celui de la Couleuvre, constituant une sorte de saillant dans le dispositif ennemi, est-il particulièrement menacé ? » (Bernède, 2002).

2.3. La forêt meusienne et ses fonctions tactiques

À partir du moment où le front s'immobilisa dès l'hiver 1914-1915, les armées se réfugièrent dans les bois des Hauts de Meuse, présents sur un tiers de la surface du champ de bataille en rive droite. Depuis l'Antiquité, **la forêt protégeait les positions de défense et d'observation** (Marin, 1915 ; Villate, 1925 ; Amat, 1987 ; Corvol et Amat, 1994 ; Amat, 2001 ; Steinbach et Husson, 2007 ; Amat, 2015). Elle montra une nouvelle fois son rôle capital lors des combats de 1914-1918. Dans les massifs feuillus encore intacts, la canopée assurait le camouflage des positions de défense et d'artillerie (Amat, 1987, 2001, 2015). Les Allemands, par leur offensive de 1916, profitèrent de cet avantage en masquant les milliers de pièces d'artillerie qui accompagnaient les soldats dans l'effort de guerre. Dès le 11 février, 654 pièces étaient déjà opérationnelles sans que l'État-major français en soit informé (Prost et Krumeich, 2015). Le 21 février, la surprise fut totale ! Vue de l'intérieur, ces forêts servirent à l'observation, notamment celles surplombant les lignes de crête (Villate, 1925 ; Amat, 1987 ; Corvol et Amat, 1994 ; Amat, 2001, 2015). À quelques mètres en arrière de la lisière, les combattants pouvaient scruter la rase campagne en toute discrétion au moyen de postes d'observation connectés de manière permanente avec les batteries d'artillerie situées au cœur des massifs, à l'abri des regards[11]. Formant un mur opaque de plusieurs mètres de hauteur, la forêt joua aussi un rôle de barrière (Villate, 1925 ; Amat, 1987 ; Corvol et Amat, 1994 ; Amat, 2001, 2015). En s'attaquant à un tel obstacle, les assaillants faisaient route vers l'inconnu, sans connaître l'état du terrain et des forces qui les attendaient. Pour accentuer ce rempart, les défenseurs aménagèrent des tranchées adossées aux lisières, souvent renforcées par des abattis, arbres couchés en direction de l'ennemi et taillés en pic (Amat, 2001, 2015). En résulte aujourd'hui d'innombrables cépées vestiges de ces aménagements. Ainsi, ces forêts riches en positions de défense contribuèrent à l'immobilisation des lignes de front et servirent de point de départ pour les attaques. Sur le front de Verdun, ce constat fut surtout observé au nord du champ de bataille, dans le camp allemand, où de véritables forteresses boisées furent aménagées pour l'occasion : bois d'Ormont, bois des Caures, Herbebois et Jumelles d'Ornes. Parce qu'elles firent partie intégrante des combats, les forêts en ont conservé les stigmates.

2.4. S'adapter à la nature des sols

Partout où ils s'installèrent, les combattants furent contraints de s'adapter à la lithologie régionale des affleurements rocheux, tantôt imperméables, tantôt résistants, rendant les travaux de creusement d'autant plus difficiles. Dans les secteurs où les bancs calcaires de l'Oxfordien moyen et supérieur affleuraient, les soldats du Génie firent face à la dureté des

[11] « *Le poste d'observation lui-même est ici une minuscule clairière, qu'un rideau de broussaille, à travers lequel on voit tout l'horizon, masque à la vue de l'ennemi* » (Historique du 39ème RAC, 1919 ; cité par Amat, 2001).

sols, rendant difficile voire stérile la construction des positions de défense[12]. Dans les récits de poilus, un autre adversaire redoutable d'une nature autre que militaire fut évoqué : la boue, à laquelle il était difficile d'échapper, tant elle était épaisse et collante (Savouret *et al.*, 2011 ; Prost et Krumeich, 2015). Pourtant peu propice au développement de terrains gras, les sols carbonatés du champ de bataille, à force d'être brassés par l'artillerie et piétinés par les soldats et chevaux, se transformèrent par endroit en étendues boueuses[13]. Les sites les plus pilonnés, à proximité des forts, furent principalement touchés par ce phénomène. En d'autres endroits, cette boue naquit naturellement à la suite du débordement de nappes qui affleuraient sur les hauteurs du champ de bataille, transformant les tranchées et boyaux en canaux de drainage (Villate, 1925 ; Prost et Krumeich, 2015). Ainsi, ces ouvrages n'étaient plus creusés, sous peine de se retrouver les pieds dans l'eau, mais surélevés et renforcés par des gabions et rondins de bois (Villate, 1925 ; Bernède, 2002 ; Prost et Krumeich, 2015). Déjà bien éprouvés par la rigueur du terrain, les soldats ne furent pas au bout de leur peine puisque les événements climatiques exceptionnels qui touchèrent les années de guerre accentuèrent l'âpreté des combats.

2.5. Le climat maussade des années 1914-1918

Traditionnellement océanique voire continental (Joly *et al.*, 2010), le climat qui régna sur la région de Verdun pendant les années de conflit fut exceptionnellement et successivement humide (1916), froid (1917) et chaud (1918). D'une façon générale, sur les 1 563 jours de conflit dans la région de la Marne et de la Meuse, la moitié fut des jours de pluie (648 jours). **L'année 1916 constitua de loin la plus arrosée de cette période** avec 1 067 mm de pluie enregistrés à Commercy, soit 300 mm de plus que la normale (758 mm relevée à Metz sur la période 1981-2010, station météorologique la plus proche du site d'étude ; Météo France), se positionnant à la sixième place des années les plus pluvieuses depuis 1877 en Meuse (Savouret *et al.*, 2011 ; Prost et Krumeich, 2015 ; Desrousseaux de Medrano, 2016). Ces fortes pluies furent d'ailleurs à l'origine du report de l'offensive allemande du 21 février 1916 (Bernède, 2002 ; Prost et Krumeich, 2015). L'ajout de grandes quantités d'eau dans les sols déjà bien fragilisés par l'artillerie eût pour effet de décupler les phénomènes d'engraissement du champ de bataille. Nous comprenons mieux pourquoi la boue de Verdun fut si marquante pour les soldats. Les pluies qui s'abattirent sur les Hauts de Meuse eurent naturellement pour conséquence d'approvisionner les nappes souterraines contenues dans les calcaires de l'Oxfordien supérieur, constituant un important aquifère fissuré et karstique (Enay et Boullier, 1981 ; Amat, 2001 ; Carpentier, 2004). Lorsqu'elles ne débordaient pas naturellement, les eaux phréatiques jaillissaient sous l'effet des obus qui, en explosant,

[12]« *Sous 30 à 40 cm de terre végétale, le sol de Verdun est fait de craie dure. Ce qui gêne le creusement des tranchées* » (d'après le Capitaine Serrigny ; cité par Prost et Krumeich, 2015).

[13]« *En certaines parties de Verdun, il fallait marcher sur des planches, à côté desquelles c'eût été la mort certaine par enlisement dans une mer de boue où furent engloutis des centaines d'hommes et des trains de matériel* » (Bridoux, 1930 ; cité par Bernède, 2002).

créaient des fissures ou engendraient une mise à l'air libre de la nappe. La morphologie en creux des formes induites par la guerre (cratères d'obus, tranchées), contribua davantage à l'humidification du terrain par piégeage des eaux. **Les journées furent froides, y compris sur le front et surtout pendant l'année 1917**. Alors que la normale (1981-2010) du mois le plus froid (janvier) affiche des valeurs de températures oscillant entre 0 et 2°C dans la vallée de la Meuse et entre 0 et 5°C pour le plateau des Hauts de Meuse (Hupy, 2006), on observe des températures inférieures à -10°C entre le 20 janvier et le 10 février 1917, soit pendant trois semaines[14] (Pagney, 2016). Ces vagues de froid se manifestèrent également au cours de l'hiver suivant où des records furent atteints : -20°C à Commercy. Parallèlement, ces épisodes de gel s'accompagnèrent de chutes de neige importantes, favorisant le maintien d'un manteau neigeux sur le champ de bataille (Savouret *et al.*, 2011 ; Pagney, 2016). **Quant à l'année 1918, elle enregistra des épisodes de canicule intenses**[15], particulièrement au mois de juillet, où le mercure afficha 34,5°C à l'ombre le 18 juillet à Commercy, soit 15°C au-dessus de la normale (19,5°C à Metz ; Météo France). Des épisodes similaires mais moins prononcés furent aussi enregistrés en août 1914 et mai 1915.

3. La « fabrique » de la forêt, ou comment restaurer les terres dévastées

Le 11 novembre 1918, l'armistice fut signé. Ce fut la fin des combats de la Grande Guerre, qui laissa derrière elle les traces de violents combats sur les paysages européens (Belgique, France, Italie, Russie) et turcs. Un des grands défis de cette période d'après-guerre, tant pour les Français que pour les autres pays, visa à restaurer les terres dévastées. Cette reconstruction dura plus d'une décennie pour la France. Le propos qui suit focalise sur cette période de l'histoire qui donna naissance aux vastes étendues forestières que nous connaissons aujourd'hui dans l'Est de la France : les *forêts de guerre*, à l'image de celle de Verdun, qui en reste le symbole.

3.1. La *Décennie de la Reconstruction* (1919-1932)

À l'issue de la « Guerre de 14 », le bilan meusien était catastrophique. En complément des millions d'hectares de terres agricoles ravagées, la surface forestière avait considérablement chuté : **65 % des surfaces forestières du département furent endommagées**, représentant près de 120 000 ha de terrain (Amat, 2001, 2015). La tendance était aussi valable pour le bâti

[14]« *La vague de froid persiste dans toute sa rigueur.* […] *J'ai retrouvé mes bottes collées au plancher par une couche de glace et l'aide d'un couteau a été nécessaire pour les détacher du sol* » (de Ferrari, 1920 ; cité par Savouret *et al.*, 2011).

[15]La chaleur est « *sénégalienne, et cependant, si nous ne précisons pas exactement notre position actuelle, il est aisé de comprendre que nous ne sommes pas dans la région tropicale… Ne croyez-pas, je vous prie, à une amplification de ma part : le thermomètre, qui dit la vérité toute pure, monte à une hauteur inusitée* » (de Ferrari, 1920 ; cité par Savouret *et al.*, 2011).

où près de **325 villages périrent**, **parmi lesquels 9 ne furent jamais reconstruits**[16]. Au début de l'année 1914, le département comptait près de 138 000 habitants. Sa population n'était plus que de 30 000 habitants en 1918 (Amat, 2001, 2015). Dès l'année 1919, l'État s'organisa pour remettre en état les terres dévastées. La première étape eut pour objectif d'établir un bilan des dévastations causées sur les territoires du nord et du nord-est du pays.

Pour ce faire, le ministère des Régions libérées, avec l'aide du bureau topographique de la reconstitution foncière de chaque département et le génie rural, entreprit **une vaste campagne de cartographie visant à classer les espaces bouleversés en trois degrés de destruction** (figure 2.10) **: la zone bleue, la zone jaune et la zone rouge**, appellation à l'origine des couleurs employées sur les cartes d'État-major (Musset, 1922 ; Amat, 1987 ; Clout, 1993, 1996 ; Amat, 2001 ; Steinbach et Husson, 2007 ; Amat, 2015) :

- Les terres faiblement bouleversées mais tout de même atteintes par le passage des armées constituèrent la *zone bleue*. Elles occupèrent généralement l'arrière front, à une dizaine de kilomètres des premières lignes mais leur superficie varia largement selon la situation et le déplacement du front pendant la guerre.
- Dans la *zone jaune*, les conséquences environnementales furent beaucoup plus amples. Ce fut la zone des opérations, victime des bombardements répétés, où les armées furent installées et où elles aménagèrent tranchées et abris en guise de troisième position. Géographiquement, elle marqua un espace intermédiaire situé entre la zone bleue et la zone rouge.
- Enfin, la *zone rouge*, complètement dévastée par les obus qui provoquèrent un brassage total des sols et dans certains cas un broyage de la roche sous-jacente. Cette zone rouge occupa les régions où « *la géographie agricole* […] *est transformée pour de longues années. Parfois elle l'est à tout jamais ; il est des points si meurtris qu'on n'y reverra plus les moissons d'antan* » (Musset, 1922). Toutefois, elle était discontinue, composée d'îlots coïncidant avec les sites de grandes batailles. À Verdun, la zone rouge incluait la majeure partie du champ de bataille sur une bande de 5 à 10 km, mais on la fit disparaître totalement à quelques kilomètres à l'est, dans la plaine de la Woëvre.

Tout le front fut cartographié de cette manière depuis la frontière belge jusqu'aux Vosges, la finalité de cette opération consistant à obtenir un bilan précis des superficies dévastées et d'associer à chacune des trois zones un mode de gestion adapté. Dans les zones jaune et rouge, un travail de « nettoyage » mené entre 1919 et 1925 conduit au désobusage des parcelles et à l'extraction du champ de bataille de tout autre objet dangereux (les restes de ferraille en particulier).

[16]En rive gauche, le village de Cumières ; en rive droite, les villages de Beaumont-en-Verdunois, Bezonvaux, Douaumont, Fleury-devant-Douaumont, Haumont-près-Samogneux, Louvemont, Ornes et Vaux-devant-Damloup.

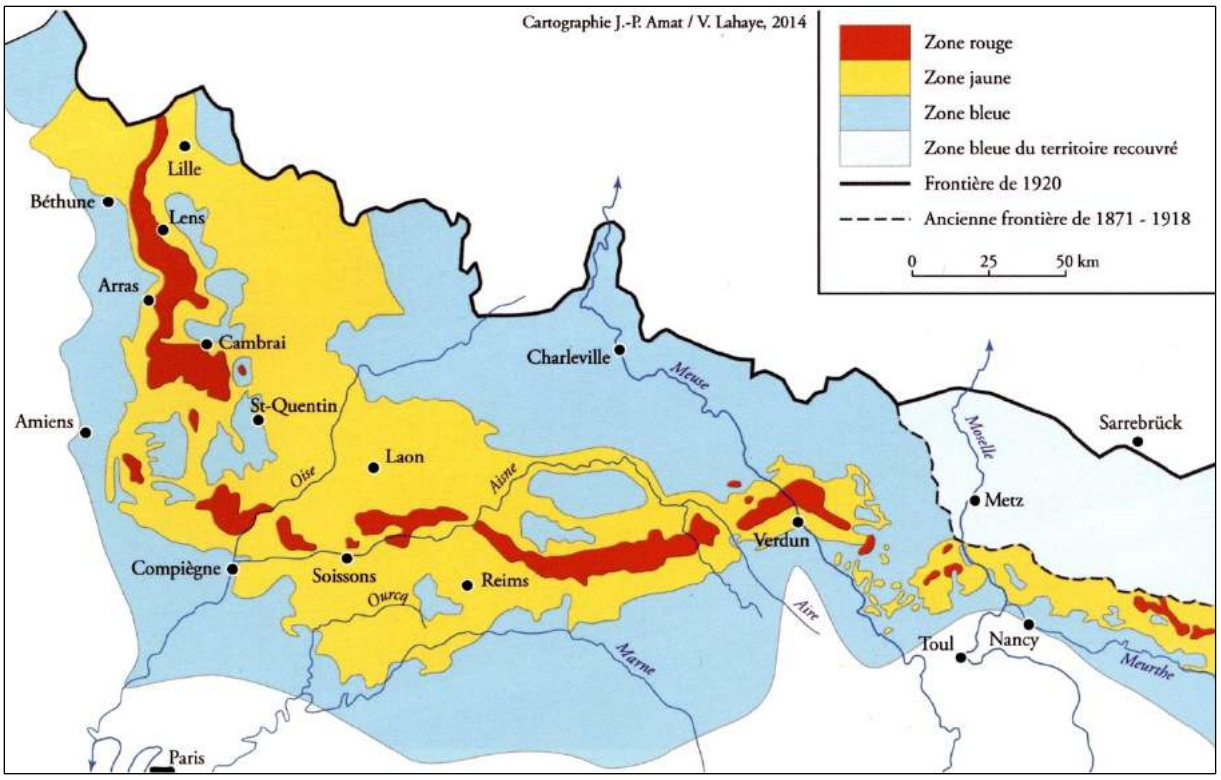


Figure 2.10 *– Le zonage des terres dévastées sur le front de l'Ouest (Amat, 2015)*

Cette opération incluait aussi le comblement de toutes les excavations créées durant le conflit : tranchées, cratères d'obus, abris enterrés (Amat, 2001, 2015). Parallèlement à cette campagne de restauration, des discussions, engagées avant la fin des combats, prirent place quant à l'avenir des terres dévastées et en particulier la zone classée rouge. Le 18 octobre 1919, une loi sur la *fixation des indemnités et avantages accessoires* fut votée. Son article 46 stipulait que « *l'État devra se rendre acquéreur* » de la zone rouge « *après tentatives de conciliation, si la remise en état du sol dépasse la valeur du terrain* » (Amat, 2001). Autrement dit, les surfaces concernées furent « gelées », à l'exception des ruines des villages détruits. Jusqu'en 1920, la zone rouge connut de multiples négociations[17]. Au bilan, il fut décidé pour le département de la Meuse que la zone rouge comprendrait 19 535 ha de terrains ravagés, incluant 46 communes dont la majeure partie était localisée sur le champ de bataille de Verdun, en rives gauche et droite de la Meuse (Clout, 1993, 1996 ; Amat, 2001, 2015). Cette décision lourde de conséquences mena à de nouveaux pourparlers avec les agriculteurs sinistrés, qui considérèrent ce choix comme inacceptable. À travers ces échanges, une nouvelle catégorie de territoires émergea au sein même de la zone rouge, destinés pour la plupart à être remis en culture : ce fut la *zone rose*, incluant tous les espaces situés en dehors du *no man's land* et des premières positions, mais qui officiellement, ne fut jamais reconnue par l'État. Le reste fut exproprié à titre conservatoire (Amat, 2001, 2015).

[17]Une imprécision règne quant à la surface qu'elle devait occuper. Il a fallu attendre la circulaire du 13 mars 1920 pour que son périmètre soit définitivement fixé.

Le 24 avril 1923, une nouvelle loi **subdivisa les terres rachetées par l'État en trois catégories** (figure 2.11) :

- Les terrains en mesure d'être remis en culture, représentant une surface de 2 442 ha (12 % du total de la zone rouge en Meuse) ;
- Les terres perdues, non labourables, vouées à être boisées dans le cadre du rétablissement des forêts domaniales et étendues sur environ 15 500 ha (80 %), décision qui fit débat au sein des associations d'anciens combattants, largement opposées au projet de boisement du champ de bataille (Amat, 2015) ;
- Les terrains destinés à la mémoire du champ de bataille ou convertis en camp militaire, recouvrant un espace de 1593 ha (8 % ; Amat, 1987 ; Clout, 1993, 1996 ; Amat, 2001, 2015).

Entre 1926 et 1929, l'État définit les institutions responsables de la gestion des deuxième et troisième catégories de terrains lors des commissions cantonales des dommages de guerre, les terrains de la première catégorie (3 980 ha après les opérations de remembrement et de cadastration) étant vendus aux enchères publiques de 1928 à 1934 (Amat, 1987, 2015). Pour la deuxième catégorie, dévolue au ministère de l'Agriculture, la gestion fut attribuée à la direction des Eaux et Forêts en 1929. La troisième catégorie fut dévolue la même année au ministère de l'Instruction Publique et des Beaux-Arts pour les sites de mémoire et au ministère de la Guerre pour les camps militaires et les champs de tir (Amat, 1987 ; Clout, 1993, 1996 ; Amat et Foucault, 1999 ; Amat, 2001, 2015 ; figure 2.11).

3.2. Naissance d'une *forêt de guerre*

Suite à l'affectation des terres de deuxième catégorie au ministère de l'Agriculture, la surface destinée à accueillir la nouvelle forêt domaniale en rive droite du champ de bataille de Verdun fut estimée à 9 292 ha. Seul le petit territoire du plateau de Douaumont (193 ha ; figure 2.11), au cœur du périmètre, fut exclu du boisement à la suite d'un accord passé avec les associations d'anciens combattants ; il constitue l'unique portion du champ de bataille restée en état (Amat, 1999). Cependant, la situation était claire : la région de Verdun était promise à un avenir forestier comme d'autres champs de bataille du front de l'Ouest, celui de Vimy par exemple, dont le nombre d'arbres plantés était censé se rapprocher du nombre de soldats manquants à l'appel, soit 11 178 (Amat, 2002, 2015). Ces forêts de substitution furent alors appelées *forêts de guerre*. Le domaine de Verdun fut divisé en deux sous-ensembles (figure 2.7) : un tiers d'anciens bois et deux tiers de terres arables, soit deux types d'occupation du sol auxquels devait être associé un mode de gestion adapté (Amat, 1987, 2001, 2015). Les bois d'avant-guerre furent restaurés et laissés en dynamique spontanée. En revanche, la tâche fut beaucoup plus complexe pour les anciennes terres cultivées. En prévision d'une réapparition des essences régionales au sein de ces espaces (principalement *Quercus robur* et *Fagus sylvatica*), les sols durent être recomposés.

Figure 2.11 *– L'attribution des terres sur le champ de bataille de Verdun rive droite. Bien que ces décisions datent des années 1920, la présente carte illustre l'état de l'occupation du sol en 2018.*

Il y eut nécessité de choisir des espèces adaptées à cet environnement considéré comme hostile : essences pionnières, post-pionnières et dryades, principalement des résineux. La meilleure manière de garantir le développement rapide de la forêt fut d'associer ces différentes essences. Ainsi, trois combinaisons d'espèces furent employées dans l'ensemble de la zone rouge[18] (Amat, 2015) :

- Le boisement de type A : couplage à quantités égales de deux post-pionnières adaptées à des conditions physiques difficiles, *Pinus sylvestris* (Pin sylvestre) et *Pinus nigra* (Pin noir), destinées à coloniser les milieux secs exposés et les moins carbonatés ;
- Le boisement de type B : association de *Picea abies* (Épicéa commun) avec des espèces de feuillus pionnières dans les milieux frais et les fonds de vallon ;
- Le boisement de type C : mélange de *Pinus nigra*, *Betula pendula* (Bouleau verruqueux) et *Alnus incana* (Aulne blanc) dans les secteurs caillouteux et secs.

3.3. Le rôle protecteur de la canopée

L'année 1935 marqua la fin de l'opération de boisement de la zone rouge en Meuse. **En seulement huit ans, près de 36 millions de plants furent mis en terre** (Amat, 2001, 2015). Les travaux de boisement se poursuivirent jusqu'aux années 50 dans les secteurs où les plantations échouèrent (ils donnèrent lieu aux peuplements des années 1970-1980). Pourtant contesté par les associations d'anciens combattants au lendemain de la guerre, le reboisement du champ de bataille de Verdun contribua largement à fossiliser les formes de relief liées aux combats. Ce constat a peut-être été plus vrai pour les anciens bois feuillus restaurés, qui n'ont quasiment pas bénéficié de travaux de nivellement. D'une façon générale, la jeune forêt, suite aux opérations de nettoyage, a conservé la topographie du champ de bataille. Elle a principalement consisté en une simple réorganisation du parcellaire, se traduisant localement par l'établissement de fossés servant à délimiter les parcelles (Amat, 2001 ; Steinbach et Husson, 2007 ; Amat, 2015). En se densifiant, la canopée et tous les éléments constituant le sous-bois ; feuilles, branches, litières et racines ; ont assuré la couverture des sols et les ont protégés des intempéries (Ziegler et Gianihelluca, 1998 ; Rey, 2003 ; Meuret, 2010). Par cette action protectrice, la forêt a permis la sauvegarde d'innombrables vestiges de guerre (Jacquemot et Legendre, 2011 ; Schnitzler et Landolt, 2013 ; Jacquemot, 2014 ; Rodriguez et Benaily, 2014 ; Dardignac et Benaily, 2015 ; Trouvé et David, 2015).

[18]Le terme de *cocktail châlonnais* fut utilisé pour désigner cette combinaison d'espèces (Amat, 2001, 2015).

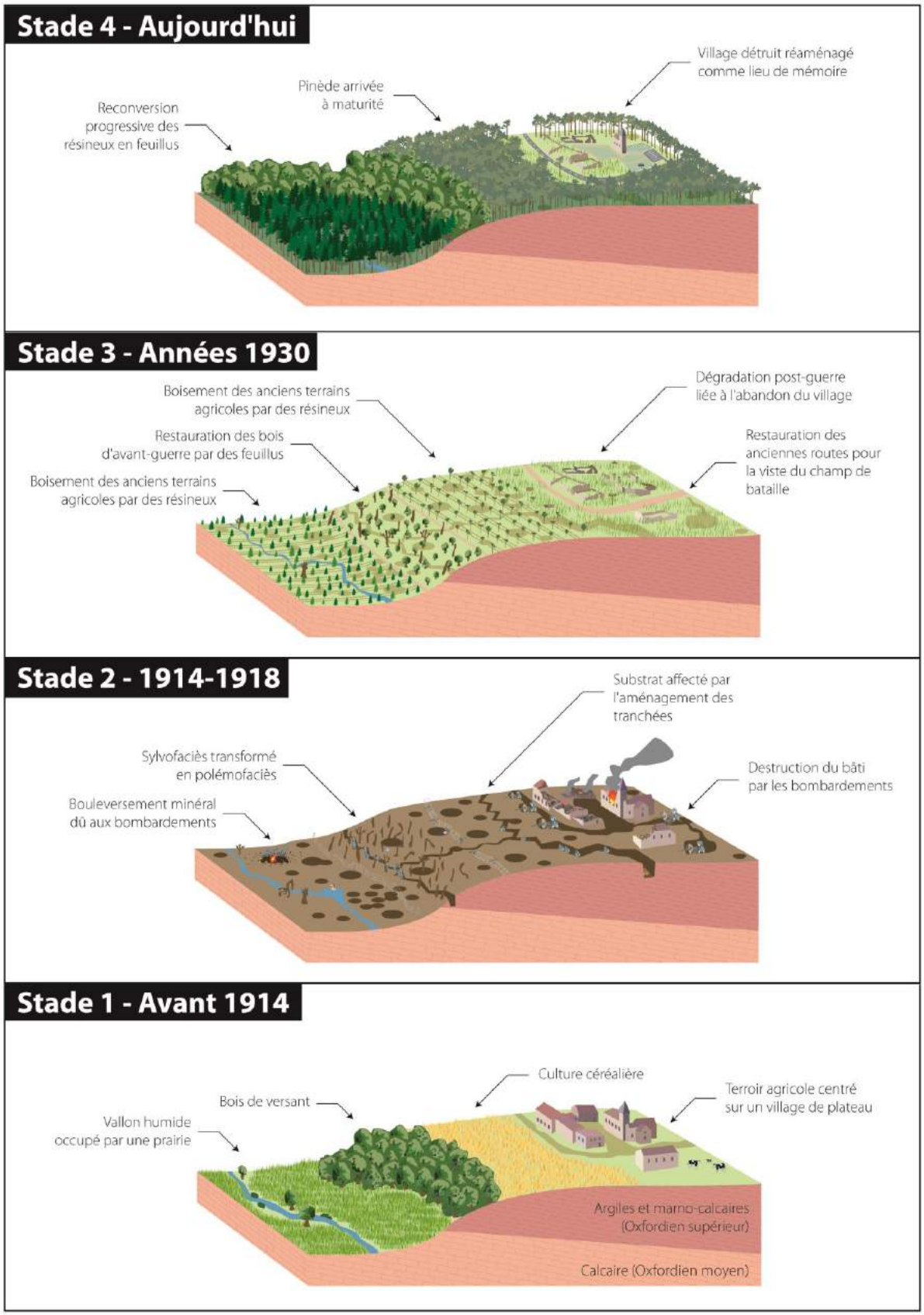


Figure 2.12 *– Quatre stades de la métamorphose paysagère depuis le début du XXème siècle (traduit de De Matos-Machado et Hupy, 2019)*

3.4. La crise des années 1960 et la disparition partielle des vestiges de guerre

Au début des années 1960, le projet de boisement du champ de bataille était loin de présenter le résultat escompté et ce, pour plusieurs raisons : des sols dépourvus de nutriments et de matière organique, une topographie bosselée empêchant le développement vertical des arbres plantés, des incendies répétés liés au tourisme (le nombre annuel de pèlerins se compte en milliers depuis la fin de la guerre), le bétail qui se multipliait dans cet environnement déserté par l'Homme... Le constat était alarmant : « *aucun bloc parcellaire n'est régulier ; pinèdes et pessières s'intriquent aux échelles inter- et intra-parcellaires, les vides à pelouses et fruticées occupent de larges surfaces en périphérie des ouvrages* » (Amat, 2001). Certaines essences furent retirées du projet à l'image de *Pinus sylvestris*, d'autres disparurent totalement comme *Betula pendula*. Du côté des anciens bois, ils « *sont encore de mauvais taillis très clairs* » (Amat, 2001). En réponse à ces perspectives des plus alarmantes, le plan d'aménagement de 1965 (une année avant la création de l'ONF) eut pour mission d'améliorer les peuplements, sur 55 % de la surface forestière (Amat, 2001, 2015). L'année 1974 marqua un tournant dans l'évolution des paysages forestiers de la zone rouge. Un nouveau plan d'aménagement, cette fois-ci sur le long terme, corrigea le parcellaire de 1928 afin d'exploiter au mieux les potentialités du milieu et décida de transformer les peuplements résineux en peuplements feuillus. À terme, le hêtre (*Fagus sylvatica*), espèce indigène, devait représenter l'essence dominante de la forêt de Verdun (Amat, 2001, 2015). Suite à cette décision, d'importants travaux forestiers furent lancés. Les jeunes hêtres furent directement plantés sous les peuplements résineux existants, où ils bénéficièrent d'une protection pendant quelques années (Amat, 2001 ; ONF, 2005 ; Steinbach et Husson, 2007 ; Amat, 2015). Arrivés à l'âge d'exploitabilité, les résineux furent abattus. Ces opérations nécessitèrent l'utilisation d'engins lourds et l'ouverture de bandes de plusieurs mètres de largeur, sans tenir compte du positionnement des tranchées et autres vestiges (Steinbach et Husson, 2007). Certains d'entre eux constituèrent des obstacles à la circulation et furent par conséquent effacés par nivellement du terrain. Ces dégradations liées à l'exploitation forestière persistèrent jusqu'aux années 2000, période où les enjeux historiques furent définitivement pris en compte dans les révisions des plans d'aménagement forestier (ONF, 2005 ; Steinbach et Husson, 2007).

3.5. Un siècle après, un champ de bataille cicatrisé

Cent ans ont passé depuis la fin du premier conflit mondial et personne n'avait imaginé que le champ de bataille de Verdun, devenu le tombeau de milliers de soldats, se transformerait en une vaste étendue forestière (figures 2.13 et 2.14). Forêt de mémoire avant tout, la forêt domaniale de Verdun a su conserver les souvenirs matériels hérités des combats comme aucun autre massif en Europe : fortifications, polémoformes, arbres mitraillés, *militaria*, le tout contenu sur 100 km² de terrains boisés implantés en rive droite sur

la majeure partie des Hauts de Meuse entre l'agglomération de Verdun au Sud et de Damvillers au Nord. Entre le lit de la Meuse et la lisière occidentale de la forêt contemporaine, là où les terres furent classées en zone jaune, les *openfields* nivelés et nettoyés de leur ferraille dominent à nouveau mais occupent un territoire bien amoindri. Sur les Côtes de Meuse, à l'est du massif forestier, la vigne a disparu au profit des vergers qui abondent et surplombent les pâturages tapissant la plaine de la Woëvre. Au sud-ouest, l'agglomération de Verdun souffre toujours d'un enclavement de son territoire, qui s'accompagne d'un phénomène de dépopulation. Un des défis majeurs de la communauté d'agglomération du Grand Verdun consiste à enrayer le déclin démographique qui touche la ville depuis les années 1980 en misant, entre autres options, sur l'énergie verte.

Figure 2.13 – *Vue vers le sud de la forêt domaniale de Verdun depuis l'abri 320. Ce point de vue sur la forêt permet d'apprécier à la fois la topographie bouleversée par les combats et les différents peuplements forestiers de la forêt domaniale de Verdun. Il s'agit de l'abri caverne, situé à quelques centaines de mètres (au sud) de l'Ossuaire de Douaumont. Au premier plan, relief criblé d'impacts d'obus qui se sont abattus sur l'abri caverne 320 ; au second plan, le Plateau de Douaumont (secteur hors aménagement forestier, dynamique végétale spontanée depuis la fin de la guerre) ; à l'arrière-plan, les peuplements gérés, feuillus et résineux. Cliché : R. de Matos-Machado, 18 mars 2015.*

Lieu de pèlerinage incarnant le mythe de l'affrontement de 1916, le champ de bataille de Verdun constitue aujourd'hui un tremplin de taille pour le développement économique d'un département en proie à l'exode rural. **Le site attire chaque année des centaines de milliers de visiteurs** (300 000 en 1929 ; Amat, 2015), fréquentation dopée par les événements du centenaire[19]. Depuis 1919, année marquée par la publication du premier guide Michelin illustré du champ de bataille *(Verdun, Argonne-Metz, 1914-1918)*, Français, Allemands ou

[19]476 559 en 2013, 794 533 en 2014, 597 215 en 2015 et 1 070 168 en 2016 sur les principaux sites de mémoire : Citadelle souterraine, fort de Douaumont, fort de Vaux, Ossuaire de Douaumont et Mémorial de Verdun (Gérard, 2017).

Britanniques entreprennent leur voyage sur le front de Verdun pour y visiter les sites de mémoire de la forêt domaniale de Verdun : l'Ossuaire de Douaumont, la Nécropole et le Mémorial de Verdun, la tranchée des Baïonnettes, les ouvrages fortifiés et les villages détruits imprégnés dans le sous-bois. L'hiver, le champ de bataille est déserté et la région ressent un vide démographique. Seuls quelques villages détruits et reconstruits en périphérie du champ de bataille résistent[20]. Sur le plan biogéographique, la forêt domaniale de Verdun est aujourd'hui une forêt mixte composée de diverses mosaïques paysagères dans lesquelles s'imbriquent pelouses, prairies, bois de feuillus et de résineux. Le massif est rythmé par la géométrie parcellaire, mais surtout par la transformation progressive des pessières et pinèdes en hêtraies[21], dont la moitié était déjà acquise en 2005 (ONF, 2005 ; figure 2.12). Par ailleurs, l'ONF s'est engagé depuis 2011 (projet *Giono*) à tester l'acclimatation d'espèces menacées par le changement climatique, le hêtre en particulier. La forêt de Verdun, site laboratoire, accueille sur 6 ha de terrain 12 156 arbres en provenance du Sud et de l'Ouest du pays (Bolis, 2016). Le massif domanial possède aussi la particularité, perçue comme paradoxale au vu de son histoire, d'abriter une biodiversité exceptionnelle, tant du point de vue de la faune que de la flore (cf. *infra*, chapitre 9). La mise à l'air libre des nappes phréatiques par les bombardements a contribué à introduire dans la région des espèces hygrophiles dont certaines sont remarquables, à l'image du Sonneur à ventre jaune *(Bombina variegata)*, crapaud aux couleurs flamboyantes présent dans les cratères d'obus inondés. Phénomène similaire pour les formes souterraines et abris bétonnés, dont l'environnement paisible offre des conditions idéales pour l'implantation des chiroptères, également très nombreux en forêt de Verdun. Ainsi, le champ de bataille se voit bénéficier d'une double sacralité : un lieu marqué par le sacrifice de milliers de soldats devenu le refuge d'une biodiversité exceptionnelle. En raison du caractère multifonctionnel de la forêt domaniale de Verdun, le Massif s'est vu attribuer le 20 juin 2014 le label « *Forêt d'Exception* ». À ce jour, seules sept forêts ont bénéficié de cette distinction. Créé en 2007 par l'ONF, ce label vise à distinguer les forêts domaniales françaises les plus remarquables du point de vue de leur patrimoine naturel et culturel, suivant une démarche d'exemplarité en matière de gestion et de développement durable. C'est dans ce cadre qu'une mission de télédétection par laser aéroporté a été cofinancée afin d'établir un inventaire précis des vestiges de guerre dissimulés par la forêt de Verdun (Jacquemot, 2014 ; Amat, 2015 ; De Matos-Machado *et al.*, 2016). **C'est sur l'exploitation de ces données que la thèse focalise avec l'objectif majeur de cartographier les empreintes paysagères de la guerre au moyen d'une approche croisée combinant géomorphologie et archéologie**. Ainsi, cette thèse s'inscrit pleinement dans ce contrat de projet en tentant d'établir un état des lieux du patrimoine culturel enfoui sous la canopée, un siècle après les événements de 1914-1918.

[20]Ornes (5 hab.), Grémilly (42 hab.), Ville-devant-Chaumont (51 hab.), Vaux-devant-Damloup (74 hab.), Samogneux (94 hab.), Moirey-Flabas-Crépion (134 hab.), Azannes-et-Soumazannes (172 hab. ; INSEE, 2015).

[21]Cette transition s'opère au rythme annuel moyen de 200 ha (Amat, 2015).

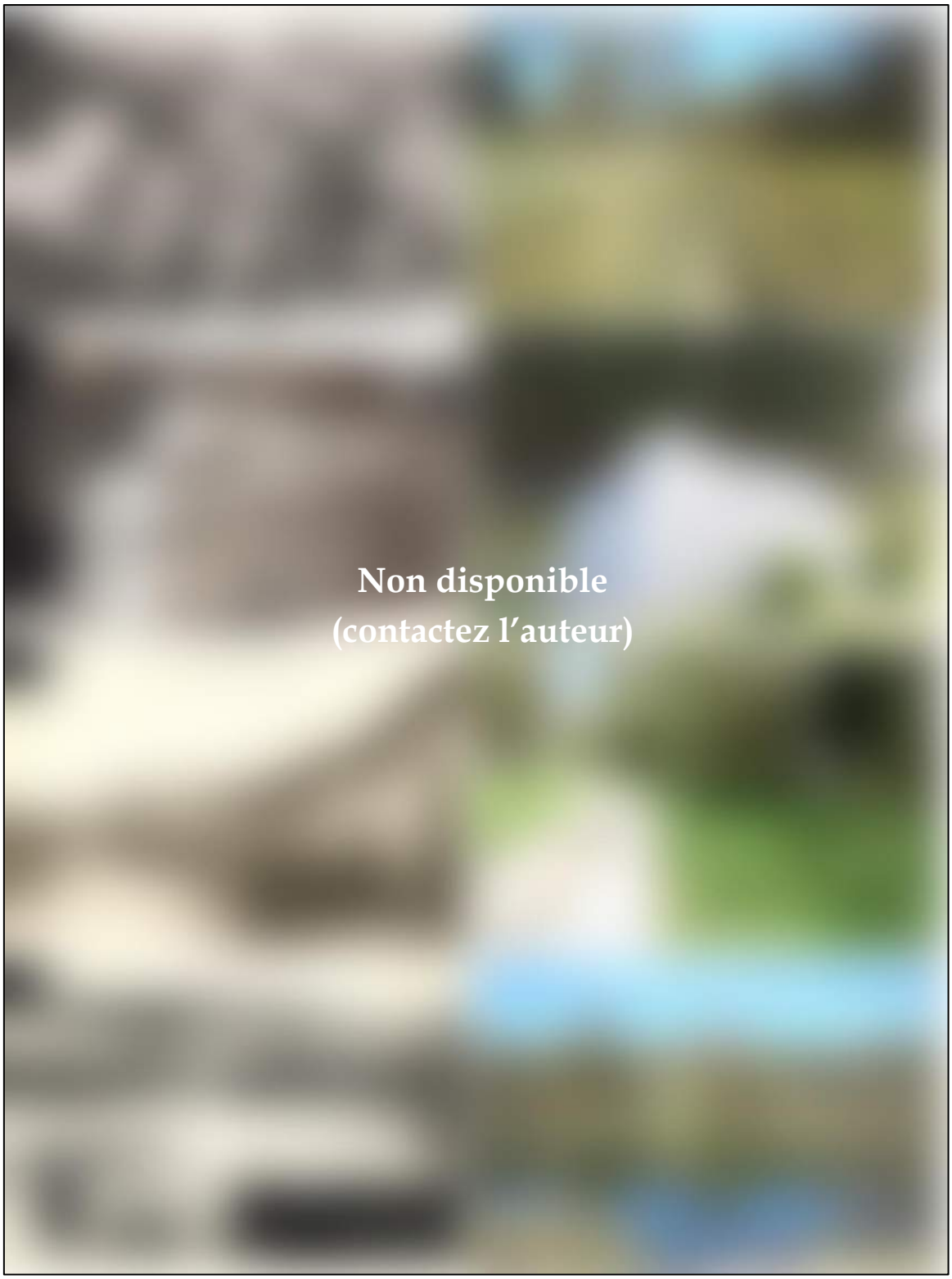


Figure 2.14 – *Couples de photographies diachroniques sur le champ de bataille de Verdun. A : le boyau de Londres au lendemain de la guerre (collection personnelle). B : le monument du lion à Souville au lendemain de la guerre (ONF - agence de Verdun). C : la Grande Rue d'Haumont-près-Samogneux en 1914 (Mémorial de Verdun). D : l'étang de Vaux au lendemain de la guerre (collection personnelle). Clichés : R. de Matos-Machado, 4 avril 2017.*

4. Conclusions

Autrefois occupé par de vastes étendues agricoles où se cultivaient les céréales, les fruits et le bétail, la région de Verdun a vu surgir en un peu plus d'un demi-siècle de vastes forêts résineuses sur son territoire, incluant la forêt domaniale de Verdun (rive droite) et du Mort-Homme (rive gauche). Comme un pansement sur une plaie, ces massifs ont recouvert les terres désolées, détruites par *l'ouragan de fer* qui frappa la région pendant les 300 jours de la bataille de Verdun. Ancrés au plus profond des mentalités et des paysages régionaux, les combats de la Première Guerre mondiale ont marqué la terre de traces indélébiles sur les hauteurs du fleuve Meuse, territoire grêlé telle une peau d'orange, perforé par l'artillerie et incisé par les tranchées. Comme si le temps s'était figé, la forêt de Verdun a su conserver cratères d'obus, réseaux de fossés, abris et batteries d'artillerie, en protégeant le sol d'un siècle d'érosion pluviale et agricole. Véritables trésors archéologiques, les *polémoformes* font aujourd'hui partie intégrante du plan d'aménagement forestier. Cependant, leur nombre et leur localisation exacts restent mal connus malgré la volonté des gestionnaires forestiers de vouloir les conserver. **L'un des objectifs de ce travail de thèse, intégré au projet** « ***Forêt d'Exception*** »**, est d'inventorier de manière exhaustive les polémoformes cachées sous la canopée**. Pour mener à bien ce projet, l'imagerie LiDAR obtenue en 2013 sur les 10 000 ha de la forêt de Verdun a été exploitée et la topographie sub-forestière a pu être modélisée à une échelle fine, ce qui a permis de visualiser les polémoformes, y compris les plus petites (< 1 m de diamètre), et d'analyser leur géométrie. Après avoir posé les cadres conceptuel et géographique de la thèse, la partie suivante focalise sur les développements méthodologiques permettant de faire « parler le LiDAR » pour déboucher sur une cartographie exhaustive et dynamique des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun.

PARTIE 2

Données et démarches méthodologiques

CHAPITRE 3

Le LiDAR : performances en milieu intra-forestier, contrôle-qualité et création du MNT

p. 103

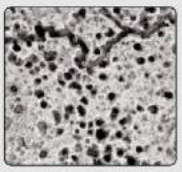
- Présentation de l'outil LiDAR
- Contrôle-qualité du nuage 3-D
- Construction du MNT

CHAPITRE 4

Visualisation des données LiDAR et déploiement d'une méthode de cartographie des polémoformes

p. 135

- Choix des méthodes de visualisation
- Mise au point de l'algorithme d'extraction
- Classification morphométrique



CHAPITRE 5

Enrichissement du LiDAR par les documents d'archives

p. 179

- Description et localisation des sources utilisées
- Complémentarités des documents d'archives

Chapitre 3
Le LiDAR : performances en milieu intra-forestier, contrôle-qualité et création du MNT

Réalisée les 26 et 27 mars 2013 dans le cadre du projet « *Forêt d'Exception* », la mission LiDAR de la forêt domaniale de Verdun a permis d'acquérir, sur les 100 km² du massif, des données altimétriques d'une précision extrêmement fine permettant d'envisager la construction de modèles numériques de surface à haute résolution. Par sa capacité à traverser le couvert forestier, le rayon laser émis par l'instrument LiDAR embarqué a donné lieu à une description précise de la topographie sub-forestière en grande partie héritée de la Première Guerre mondiale. De ce fait, les données altimétriques enregistrées au sol présentent un fort potentiel pour étudier et cartographier les polémoformes et vestiges archéologiques induits par les combats de la guerre 1914-1918. L'exploitation de la technologie LiDAR dans le domaine des sciences humaines et des sciences forestières est récente, notamment en France où le premier relevé LiDAR date de l'hiver 2006-2007. Ainsi, le présent travail s'inscrit pleinement dans la lignée de ces travaux en proposant de prospecter un nouveau massif boisé, la forêt domaniale de Verdun, avec la particularité de l'étudier sous un angle à la fois archéologique et géomorphologique, une approche totalement inédite. Après avoir présenté les généralités relatives à l'instrument LiDAR puis les métadonnées de la mission conduite sur la forêt domaniale de Verdun, ce chapitre décrit la nature et la qualité du jeu de données mis à notre disposition par l'ONF et le SRA, qui a servi de support à l'étude et à la cartographie des polémoformes. Pour ce faire, le nuage de points reproduisant les trois dimensions des paysages de la forêt domaniale de Verdun, canopée et sol compris, est analysé et filtré. En complément, la confrontation des données brutes avec les relevés topométriques effectués sur le terrain permet de détecter d'éventuelles erreurs de mesure et de les prendre en compte dans les traitements ultérieurs. Enfin, l'ensemble des analyses nous mène à ajuster la résolution du MNT issu de l'interpolation des points *sol* afin de permettre l'étude morphométrique des polémoformes.

1. Une technologie au service de la société

En s'affranchissant de la couverture forestière, la technologie LiDAR offre une alternative aux méthodes de télédétection passives, particulièrement en milieu intra-forestier, dont le principe fondé sur l'usage de la lumière solaire ne permet pas de percer le masque opaque de la canopée. L'usage du LiDAR en forêt domaniale de Verdun lève ainsi le voile sur plus de 80 ans de dynamique forestière ayant presque fait oublier les paysages géomorphologiques du champ de bataille.

1.1. Les différents types de LiDAR

Anciennement connu sous le nom *light radar*[1] lors de son essor dans les années 1960 (Chase *et al.*, 2017), le LiDAR – acronyme de *Ligth Detection and Ranging*[2] – est une méthode de télédétection utilisée pour l'étude de la surface terrestre ou de l'atmosphère. Le plus souvent, il sert à reconstituer la topographie 3-D d'une surface en dur sous la forme d'un nuage de points dont l'interpolation permet la création de modèles numériques de surface (Nuninger *et al.*, 2008 ; Nuninger *et al.*, 2010 ; Opitz, 2013 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014). À l'inverse des techniques de télédétection dites *passives* (ou *optiques*) consistant à étudier la surface à partir d'un rayonnement naturel (la lumière solaire), le LiDAR appartient aux techniques de télédétection dites *actives*, dont l'approche se fonde sur l'envoi d'un rayonnement artificiel (un faisceau laser) vers le sol (Doneus *et al.*, 2008 ; Fruchart, 2014 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014). Cette source de lumière peut être émise depuis le ciel ou directement depuis le sol. **En fonction de la position et du type de plateforme utilisé**, **le LiDAR prend des appellations différentes** (Bilodeau *et al.*, 2008 ; Doneus *et al.*, 2008 ; Doneus et Briese, 2011 ; Fruchart, 2014 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014 ; Chase *et al.*, 2017). Nous distinguons ainsi :

- **le LiDAR terrestre** (souvent nommé TLS pour *Terrestrial Laser Scanning*), fondé sur l'acquisition de données topographiques depuis un scanner laser terrestre. Les mesures étant réalisées en toute immobilité depuis le sol, son usage se limite à de petits espaces allant de la dizaine à la centaine de mètres, nécessitant ainsi l'acquisition de données très fines. L'utilisation d'un tel instrument permet de produire des modèles numériques de surface de résolution millimétrique du fait de la très grande densité de points enregistrés[3] (plusieurs milliers de points/m²).
- **le LiDAR satellitaire**, largement moins répandu et positionné à bord d'un satellite. À l'heure actuelle, les altimètres GLAS *(Geoscience Laser Altimeter System)* de la mission

[1]C'est la combinaison des termes *light* et *radar* qui est à l'origine du mot *lidar*.

[2]Le mot *radar* a finalement été supprimé car il faisait référence à une technologie bien différente.

[3]Le laboratoire LETG de l'université de Caen-Normandie utilise depuis peu cet instrument pour le suivi diachronique des falaises normandes. En recoupant les modèles acquis à différentes périodes, l'aléa peut être identifié. Le LiDAR terrestre a été également utilisé pour la reconstitution paléotopographique en contexte géoarchéologique sur le littoral médocain (Stéphan *et al.*, 2018).

spatiale américaine ICESat (*Ice, Cloud, and land Elevation Satellite* ; 2003-2010) et CALIOP *(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)* de la mission franco-américaine CALIPSO (*Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation* ; en service depuis 2006) sont les seuls à avoir fourni des données altimétriques de la surface terrestre depuis un LiDAR situé en orbite. Parce que la distance séparant l'instrument de la cible est importante (entre 600 et 700 km), les modèles numériques qui en découlent possèdent une résolution bien plus grossière, de l'ordre du kilomètre, mais ont l'avantage de couvrir une surface bien plus importante (échelle régionale à continentale).

- **le LiDAR aéroporté** (aussi nommé ALS pour *Airborne Laser Scanning*), placé dans un avion ou plus récemment sur un drone survolant la zone cible à quelques centaines de mètres d'altitude. L'instrument peut aussi équiper un hélicoptère, par exemple en milieu peu accessible (*e.g.*, montagnard). On parle alors de **LiDAR héliporté**. L'appellation varie également en fonction de la nature de la cible étudiée. La notion de **LiDAR topographique** s'emploie pour toute opération se référant à la reconstitution de la topographie continentale à partir d'un avion et de **LiDAR bathymétrique** pour les missions menées en mer visant à examiner la topographie sous-marine. Depuis quelques années, le terme de *LiDAR vert*[4] est associé au *LiDAR bathymétrique*[5] mais peut aussi désigner un *LiDAR topo-bathymétrique*, qui permet de décrire la morphologie des cours d'eau et de leur lit en se limitant toutefois aux eaux claires et peu profondes. Le *LiDAR aéroporté* reste la technique de prospection la plus populaire et la plus couramment utilisée par les géographes et les archéologues du fait de sa capacité à acquérir des données sur de grandes surfaces (forêts, bassins versants, côtes, etc.) à une résolution comprise entre le centimètre et le mètre. **C'est ce type d'instrument qui a été utilisé dans cette thèse pour prospecter la forêt domaniale de Verdun.**

1.2. Histoire et usages du LiDAR en sciences humaines

La technologie LiDAR est née dans le courant des années 1960, marquées alors par l'essor de la télédétection suite à la multiplication des conquêtes spatiales et le développement des ordinateurs et des supercalculateurs (Bilodeau *et al.*, 2008 ; Opitz, 2013 ; Chase *et al.*, 2017). C'est véritablement en 1962 que les altimètres laser se sont fait connaître auprès du grand public dans le cadre du projet *Luna See*, destiné à mesurer la distance Terre-Lune à partir d'un rayon laser (Fruchart, 2014). En 1971, la mission spatiale Apollo 15 a exploité une technologie identique pour cartographier la surface lunaire (Chase *et al.*, 2017). Alors que son utilisation était depuis son apparition limitée à l'astronomie, **la technologie LiDAR a vu son**

[4]Du nom de la longueur d'onde exploitée par l'émetteur (le vert).

[5]De nombreuses études ont utilisé cette technique pour la modélisation de la bathymétrie littorale et fluviale (Faux *et al.*, 2009 ; Allouis *et al.*, 2010 ; Mandlburger *et al.*, 2015 ; Corti Meneses *et al.*, 2017).

champ d'applications s'étendre dans les années 1980, notamment avec l'apparition du LiDAR aéroporté. Au cours de cette décennie, la NASA a mis au point deux altimètres laser embarqués à bord d'un avion : l'*Airborne Oceanographic LiDAR* (AOL) – qui servait à évaluer la teneur en chlorophylle et la température de la surface des océans (Yoder *et al.*, 1993) – et l'*Airborne Topographic Mapper*[6] (ATM) – qui étudiait la morphologie des banquises et glaciers des latitudes polaires (Opitz, 2013). Ces deux altimètres laser peuvent être considérés comme les précurseurs du LiDAR aéroporté tel que nous le connaissons aujourd'hui. Au milieu des années 1990, la technologie LiDAR a émergé au sein des sciences géomatiques, où elle est exploitée pour modéliser finement la surface terrestre, notamment la topographie sub-forestière (Opitz, 2013 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014).

C'est au début des années 2000 que la communauté des archéologues a pris conscience des potentialités offertes par cet outil pour repérer les traces d'anciennes occupations humaines dans leur contexte environnemental, notamment en **2001**, **année du premier survol LiDAR au-dessus d'un site archéologique** : le célèbre monument anglais de Stonehenge (Bewley *et al.*, 2005). Très vite, l'utilisation du LiDAR se généralise en milieu ouvert, notamment pour son aptitude à la prospection de territoires étendus, parfois difficiles d'accès et en un délai très court. Mais c'est en milieu forestier, propice à la préservation des vestiges archéologiques, que le caractère révolutionnaire du LiDAR se fait le plus remarquer, le laser parvenant à percer les « secrets » de la canopée et à dévoiler les moindres reliefs, même ceux que nous ne pouvons discerner sur le terrain. Ainsi, l'année 2004 a été marquée par la découverte d'anciennes traces d'activités agricoles dans une zone forestière du Bade-Wurtemberg en Allemagne (Sittler, 2004).

En France, **la première mission LiDAR menée en contexte forestier** a eu lieu en **forêt de Haye lors de l'hiver 2006-2007**, toujours à des fins archéologiques (Georges-Leroy *et al.*, 2011). Depuis, les prospections aériennes par LiDAR sur les massifs forestiers français se sont multipliées : forêt de Chailluz en 2009 (Nuninger *et al.*, 2010 ; Fruchart, 2014), forêt de Compiègne en 2011 (Horen *et al.*, 2015), forêt de la Braconne en 2013 (Rassat, thèse en cours), forêt de Verdun[7] en 2013 (De Matos-Machado *et al.*, 2016), forêt de Chambord en 2015, forêt d'Orléans en 2017. Toutes se sont concluent par la découverte de vestiges archéologiques inconnus à ce jour. Le dernier exemple majeur de l'utilisation de cette technologie en archéologie a eu lieu à l'étranger, plus précisément dans la jungle tropicale guatémalienne, où un LiDAR sur drone a révélé en 2018 l'existence de plus de 60 000 constructions mayas (Clynes, 2018).

Aujourd'hui, le LiDAR est devenu un outil opérationnel pour l'aménagement du territoire. En agronomie, il sert à étudier la hauteur de la végétation et à identifier des problèmes de croissance des cultures (Chase *et al.*, 2017). Dans la même optique, les forestiers ont adopté cet outil pour évaluer la biomasse forestière, incluant les volumes de bois et la

[6]La plupart des instruments actuels s'inspirent du modèle ATM (Chase *et al.*, 2017).
[7]Le présent travail se fonde sur l'exploitation de ces données.

densité de feuilles d'un houppier (Chase *et al.*, 2017). Plus proche de notre champ d'étude, les géomorphologues tirent profit du LiDAR pour modéliser les reliefs terrestres afin de mieux comprendre leur évolution, à l'image des vallées, paysages particulièrement morphogènes, où le LiDAR sert à mieux penser les aménagements hydrauliques et à prévenir le risque inondation (Doneus et Briese, 2011 ; Brousse, thèse en cours).

Ainsi, par ses usages multiples, le LiDAR a largement amélioré notre connaissance des paysages dans leurs dimensions spatiales et temporelles (Chase *et al.*, 2017), avancée encore plus notable suite à l'apparition ces dernières années du LiDAR embarqué sur drone, dont la grande mobilité favorise la multiplication des survols à une résolution plus fine et à un coût plus faible. Dans la lignée des travaux sus-cités, le LiDAR aéroporté a été employé en forêt de Verdun afin de rendre compte du nombre et de la variété des polémoformes conservées sous la canopée. À l'image des autres études où cet outil a été utilisé à des fins d'aménagement territorial, les découvertes faites à Verdun *via* le LiDAR seront intégrées à la prochaine révision du plan d'aménagement forestier (cf. *infra*, chapitre 8).

1.3. Le LiDAR aéroporté, une technique déployée sur la forêt domaniale de Verdun

1.3.1. Principe de fonctionnement du LiDAR aéroporté

Focalisons le propos sur le LiDAR aéroporté, technique de prospection déployée sur la forêt domaniale de Verdun. Positionné à bord d'un avion, l'instrument LiDAR est composé d'un émetteur assurant la diffusion d'impulsions lasers vers le sol et d'un récepteur captant le rayonnement réfléchi par la cible (Hyyppä *et al.*, 2000 ; Bilodeau *et al.*, 2008 ; Doneus *et al.*, 2008 ; Nuninger *et al.*, 2008, 2010 ; Wulder *et al.*, 2012 ; Opitz, 2013 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014 ; Chase *et al.*, 2017 ; figure 3.1).

À la différence de la technologie voisine du RADAR *(Radio detection and ranging)* qui exploite des ondes radio pour émettre un rayonnement, le LiDAR aéroporté utilise de la lumière généralement issue du proche infrarouge (pour permettre la propagation du signal à travers la végétation) et, dans une moindre mesure, du spectre visible (*e.g.*, le LiDAR vert, qui offre l'avantage de pénétrer des surfaces en eau). À l'aide d'un miroir oscillant, l'émetteur balaye la surface cible en produisant au sol une empreinte circulaire de 20 à 30 cm de diamètre en moyenne (Bilodeau *et al.*, 2008 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014). En connaissant la vitesse de la lumière et la position de l'appareil – l'avion est équipé d'un GPS embarqué associé à une station GPS au sol (pour corriger les relevés de position absolue) – la distance entre le LiDAR et la cible peut ainsi être calculée, paramètre permettant d'en déduire l'altitude du point d'impact (Hyyppä *et al.*, 2000 ; Bilodeau *et al.*, 2008 ; Doneus *et al.*, 2008 ; Nuninger *et al.*, 2008, 2010 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014). À chaque réception du signal, le

récepteur enregistre un point localisé dans l'espace, qui est ensuite stocké par le système d'enregistrement de données (Georges-Leroy *et al.*, 2014). Du fait qu'il scanne la surface à une vitesse vertigineuse, en moyenne de 10 000 à 100 000 impulsions/s (Hyyppä *et al.*, 2000 ; Devereux *et al.*, 2005 ; Crow *et al.*, 2007 ; Bilodeau *et al.*, 2008 ; Doneus *et al.*, 2008), le LiDAR produit des nuages de points d'une densité parfois très importante (de la dizaine à la centaine de points/m²), laissant envisager la production de modèles numériques de surface à très haute résolution. Les ondes du LiDAR exploitant la lumière infrarouge se propagent à travers la végétation. Différents objets (canopée, branches, feuilles, arbustes du sous-bois, sol) peuvent être ciblés simultanément, produisant une multitude d'échos vers le récepteur (figure 3.1). **On parle alors de LiDAR multi-écho, à l'image de celui utilisé à Verdun.** Avec cette technologie, le nuage de points subit un post-traitement de classification fastidieux destiné à séparer les différentes catégories de surface rencontrées par le faisceau laser (Doneus et Briese, 2011 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014). À l'issue du processus, un numéro de classe[8] est attribué à chaque point, respectant ainsi les codes prédéfinis par l'*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS). Après classification et analyse du nuage de points, on procède généralement à l'interpolation des points pour produire une image continue de la topographie, appelée modèle numérique.

Différentes appellations sont attribuées à ces modèles selon la catégorie d'objet qu'ils représentent. Cependant, elles sont marquées par une certaine ambiguïté du fait d'un usage non-consensuel et d'un changement de sens selon la langue. De notre point de vue, nous distinguons :

- le **modèle numérique de terrain** (MNT ; *Digital terrain model* ou DTM), issue de l'interpolation des points *sol* (classe 2) et reproduisant une image 3-D de la topographie ;
- le **modèle numérique de surface** (MNS ; *Digital elevation model* ou DEM), construit à partir des points formant le premier écho (cime des arbres, sommet du bâti…) ;
- le **modèle numérique d'élévation** (MNE ; *Digital surface model* ou DSM), résultant de la différence entre le MNT et le MNS. Les valeurs en sorties représentent une élévation. Le MNE est appelé **modèle numérique de canopée** (MNC ; *Canopy height model* ou CHM en anglais) quand il est généré en contexte forestier.

1.3.2. Description de la mission LiDAR dans la forêt domaniale de Verdun

La mission LiDAR de la forêt domaniale de Verdun s'inscrit dans le thème 1.1 *Inventaire du patrimoine culturel* du contrat de projet « *Forêt d'Exception* », destiné à associer les acteurs locaux dans une démarche commune de gestion durable du massif forestier. Le survol, opéré les 26 et 27 mars 2013 par SINTEGRA, entreprise grenobloise spécialisée dans la topographie

[8]En milieu forestier, les points correspondant au sol sont classés « 2 », la strate herbacée « 3 », la strate arbustive « 4 » et la strate arborée « 5 ».

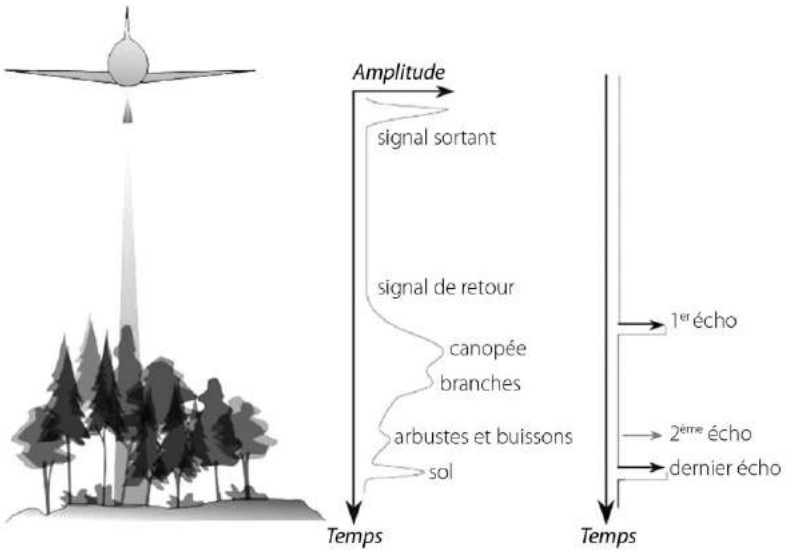


Figure 3.1 – *Principe de fonctionnement du LiDAR aéroporté multi-écho (traduit de Opitz, 2013)*

et la cartographie aérienne, a été cofinancé par l'ONF (agence de Verdun), le Conseil départemental et le GIP *Objectif Meuse*, la région Lorraine, le Mémorial de Verdun et le SRA Grand-Est (site de Metz), à hauteur de 61 940 € (mission aéroportée et classification du nuage de points). L'espace couvert par la mission, d'une **superficie de 115 km²** (figure 3.2), **inclut le territoire de la forêt domaniale de Verdun ainsi qu'une partie des terres agricoles localisées en sa périphérie** (entre 150 et 200 m depuis la lisière). Pour garantir de meilleurs rendements, le Massif a été survolé au tout début du printemps sous conditions phénologiques encore hivernales des espèces caducifoliées (Devereux *et al.*, 2005 ; Crow *et al.*, 2007 ; Georges-Leroy *et al.*, 2011, 2014), soit les deux-tiers de la surface prospectée. Le dispositif LiDAR utilisé se compose d'un scanner laser Riegl LMS Q680i très précis, mesurant jusqu'à 266 000 mesures altimétriques par seconde dans le proche infrarouge (Riegl, 2018) et positionné à bord d'un avion en mouvement (≈175 km/h) situé à 580 m du sol. Il en a résulté l'acquisition d'un nuage de points hautement précis (5 233 979 376 points) **à raison d'une densité moyenne de 45 pts/m² au sommet de la canopée et 17 pts/m² au sol** (1 947 483 601 points ont été classés sol, soit 37,20 % des impulsions émises par le LiDAR sachant qu'environ 5 % de la surface prospectée est dépourvue de végétation). Parce que le nuage produit possède un poids très important (136,58 GB), celui-ci a été découpé et livré en plusieurs morceaux exploitables, soit 560 dalles de 500 × 500 m (figure 3.2).

Ainsi, le livrable comprend :

1) **Un tableau d'assemblage** géoréférencé au format *shape (.shp)*, représentant les 560 dalles et leur numéro d'identification ;
2) 560 morceaux du **nuage de points géoréférencé** et trié en 2 classes (sol ; classe 2) et (sursol ; classe 4), fichier d'extension *.las*, constituant le format conventionnel de lecture des données LiDAR (Opitz, 2013) ;

3) 560 **MNT à une résolution de 50 cm** (taille de pixel = 0,5 × 0,5 m) en format *ascii*, représentant la topographie sub-forestière ;
4) 560 **MNS à une résolution de 50 cm** en format *ascii* à partir des points les plus hauts des classes *sol* (2) ou *sursol* (4) selon la présence de végétation ;
5) 560 **MNC à une résolution de 50 cm** en format *ascii*. Ces images renseignent sur la hauteur des arbres ;
6) **L'image ombrée** (en 9 morceaux) issue du MNT à 50 cm de résolution, simulant une illumination du terrain par une source lumineuse artificielle reconstituant la lumière solaire, type de visualisation idéal pour se familiariser avec le jeu de données (cf. *infra*, chapitre 4).

Afin de faciliter l'analyse du nuage de points, les dalles ont été fusionnées en dalles plus grandes afin de réduire le nombre d'itérations lors des traitements. Pour ce faire, nous avons fait appel au logiciel libre LAStools® de l'entreprise RAPIDLASSO GmbH disposant d'une toolbox pour ArcGIS®, très pratique pour la gestion et l'affichage de nuages de points (Hug *et al.*, 2004 ; Stereńczak *et al.*, 2016). L'opération de fusion a été entreprise à l'aide de la fonction *lasmerge*. Bien que l'objectif est d'examiner un seul et unique fichier, les performances de l'ordinateur[9] utilisé (8 GB de mémoire vive, affichage 32 bits, processeur Intel Core I5) ne nous ont pas permis de travailler avec un nombre inférieur à 171 dalles sur l'ensemble du territoire forestier, rendant peu aisées la visualisation des données et leur exploitation.

2. Analyse du nuage de points et contrôle qualité

Comme tout travail scientifique reposant sur l'usage de l'outil LiDAR, **il est impératif d'évaluer le comportement et la qualité du nuage de points** à partir de la simple analyse de la répartition des mesures ou par l'accomplissement de levés topographiques sur le terrain. En complément des nombreuses études portant sur les applications du LiDAR dans différents champs disciplinaires, des travaux ont tenté d'évaluer la qualité des données acquises par cet instrument et d'identifier d'éventuels facteurs aggravants. Ces travaux démontrent que les données LiDAR contiennent généralement des erreurs d'estimation d'altitude, souvent minimes, mais qui doivent être considérées au moment de l'exploitation des données et de la réalisation de traitements spécifiques (*e.g.*, création d'un MNT, analyses morphométriques de formes, quantification de surface ou volume). Ainsi, dans leurs travaux portant sur la végétation de la baie du Mont-Saint-Michel, Bilodeau *et al.* (2010) ont mesuré une imprécision altimétrique moyenne de l'ordre du décimètre. Hodgson *et al.* (2003) ont constaté aussi des écarts dans leur jeu de données LiDAR acquis au-dessus d'un bassin versant de la Caroline du Nord, où ils y ont enregistré des imprécisions allant de 33 cm à 1,53 m. À notre tour, nous avons contrôlé la précision des données de la forêt domaniale de Verdun en prévision de l'élaboration d'un MNT.

[9]L'usage d'une machine puissante est conseillé afin de raccourcir les temps de traitement.

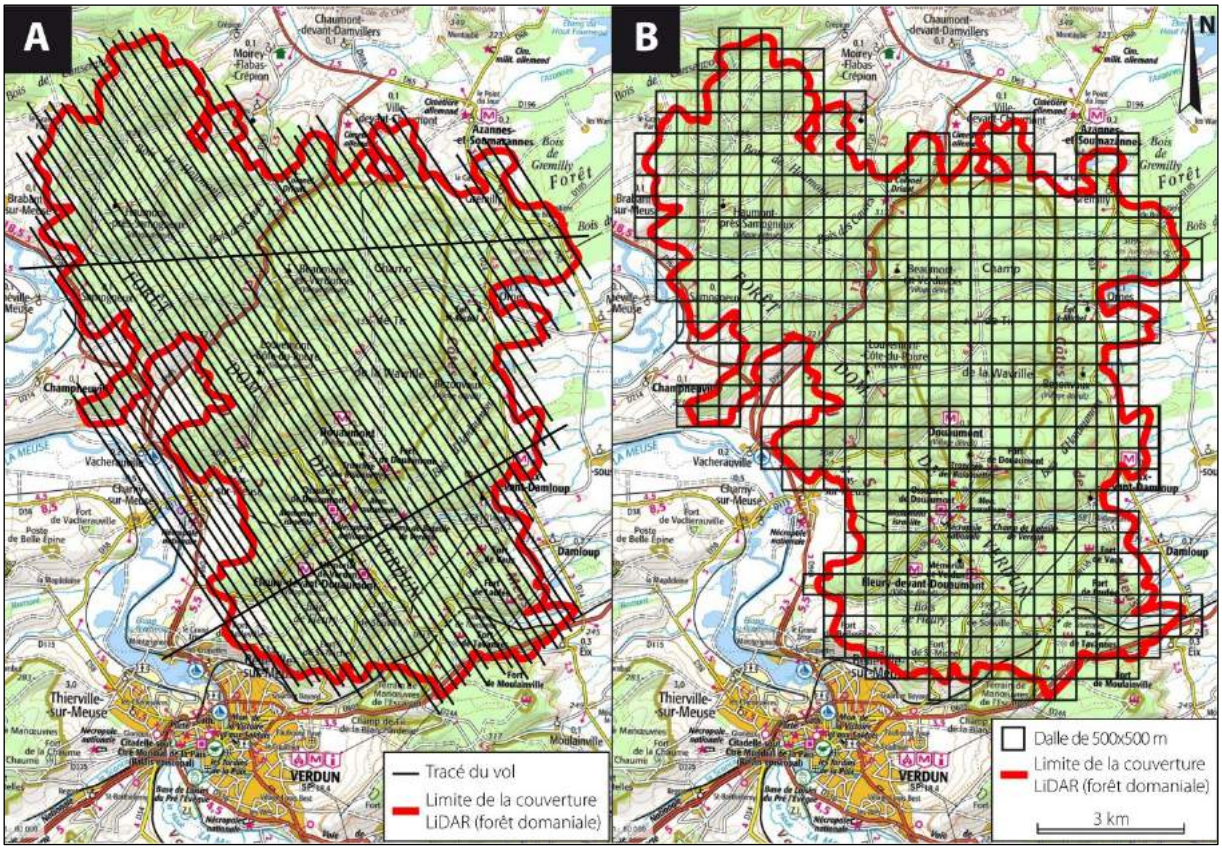


Figure 3.2 – *La mission LiDAR aéroportée des 26 et 27 mars 2013 sur la forêt domaniale de Verdun. A : plan de vol de la mission. B : localisation des 560 dalles LiDAR (modifié de Méchin, 2013).*

2.1. Répartition des points enregistrés par le LiDAR

Le meilleur moyen d'évaluer la qualité des mesures effectuées par le LiDAR est de produire une carte de densité de points. Notre étude s'intéressant aux formes du relief de la forêt domaniale de Verdun (MNT), nous avons privilégié une analyse des points *sol* (classe 2), carte obtenue de la manière suivante :

1) À l'aide de la fonction *las2las (filter)* de la toolbox LAStools (*filter by classification or return* = 2 ; *output format* = *las*), un nouveau fichier *las* est produit, comportant uniquement les points *sol* de la dalle en entrée. L'opération est automatisée sur les 171 fichiers grâce à l'option par lot d'ArcGIS® (clic droit sur l'outil) ;
2) Dans *Outils de gestion des données*, un jeu de données *las* est créé à partir des 171 fichiers de points *sol* précédemment obtenus ;
3) L'outil *Statistiques de points LAS sous forme de raster* permet de finaliser le processus en construisant une carte de densité de points sol.

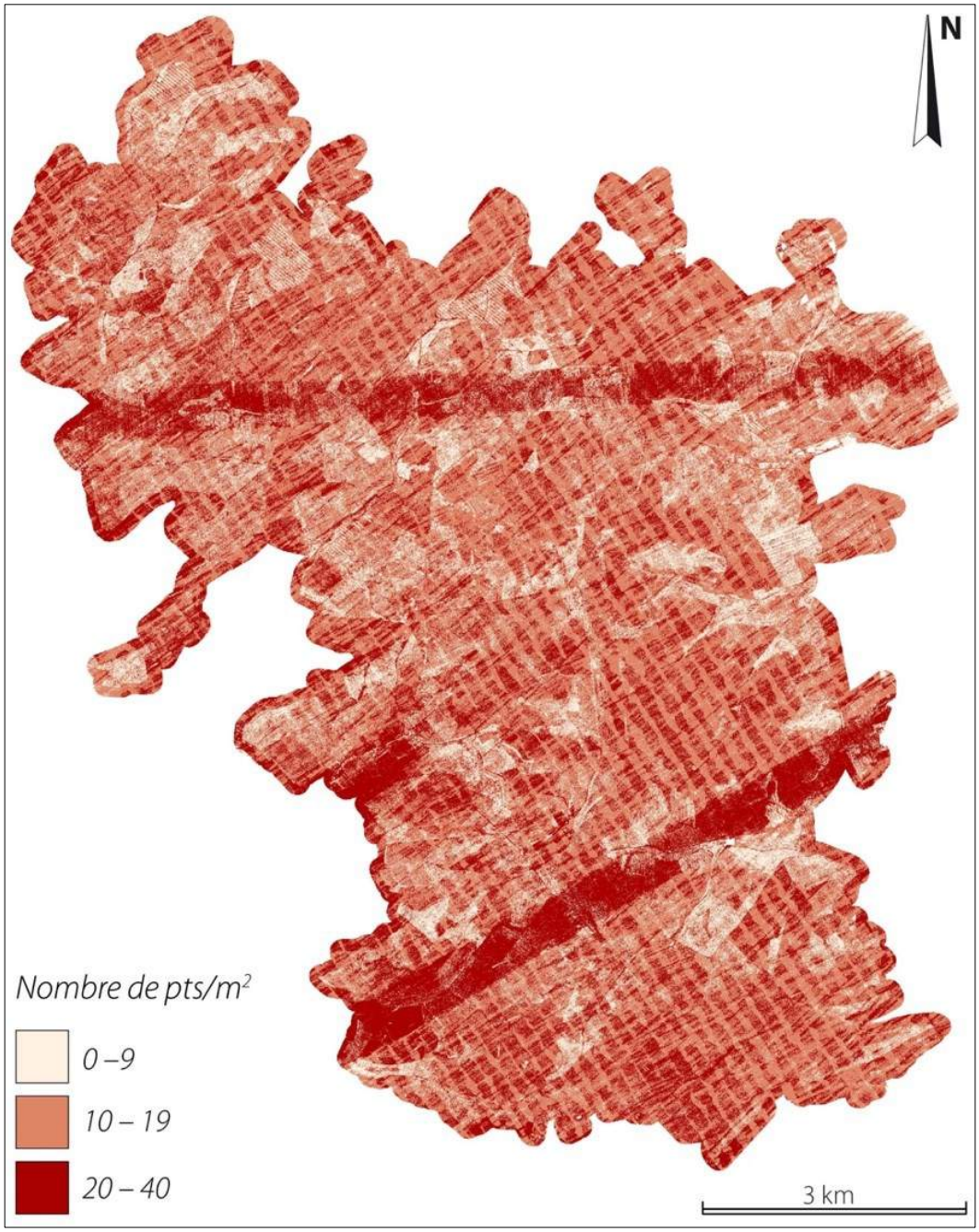


Figure 3.3 – *Carte des points sol après filtrage sur la classe 2. La résolution du raster est de 1 m.*

L'analyse de la carte obtenue (figure 3.3) montre que la densité de points enregistrés au sol est très variable dans l'espace puisqu'elle évolue **entre 0 et 40 pts/m² selon les secteurs de la forêt pour une moyenne de 17 pts/m²** :

1) Deux zones aux densités importantes se détachent (moyenne de 22 pts/m² ; taux de pénétration moyen de 34,58 % par rapport au total des impulsions). Celles-ci dessinent des lignes, une au nord du massif traversant la forêt d'Ouest en Est, une autre plus au Sud la traversant du Sud-Ouest vers le Nord-Est. La mise en relation de la carte de densité de points avec le plan de vol de la mission LiDAR montre que ces lignes coïncident avec les zones de double passage de l'avion,

multipliant ainsi le nombre de mesures dans ces secteurs. Cependant, le taux de pénétration reste constant quel que soit le nombre de vols opérés au-dessus d'une même zone, constat déjà établi par Georges-Leroy *et al.* (2011) en forêt de Haye. Un autre secteur à forte densité de points se distingue au centre-ouest de la forêt sous la forme d'un amas plus compact (moyenne de 25 pts/m²), correspondant à une enclave de surfaces agricoles dans la lisière où l'absence de végétation dense et arborée a favorisé la prise de mesures altimétriques.

2) Une portion non négligeable du territoire possède aussi des valeurs de densité bien plus faibles qu'ailleurs. Les secteurs concernés, disposés d'une manière assez aléatoire, semblent refléter la géométrie du parcellaire forestier. Ce phénomène est intéressant puisqu'après avoir superposé la carte d'occupation du sol fournie par l'ONF à la carte des points sol, nous avons remarqué que cette densité de points est bien plus faible dans les parcelles résineuses (moyenne de 14 pts/m² et maximum de 80 pts/m² ; taux de pénétration moyen de 31,16 %), phénomène mieux visible dans les pessières (moyenne de 13 pts/m² contre 15 pts/m² dans les pinèdes). Certaines parcelles feuillues dont les arbres sont encore au stade juvénile (branchage relativement dense) sont également concernées (figure 3.4). Ce rôle parfois limitant de la végétation dans l'acquisition des données LiDAR a déjà été évoqué par Devereux *et al.* (2005), Crow *et al.* (2007), Bater et Coops (2009), Doneus et Briese (2011), Georges-Leroy *et al.*, (2011), Bollandsås *et al.* (2012) et Georges-Leroy *et al.* (2014). Plus localement, on constate l'absence totale de mesures au sol, parfois sur des zones assez étendues (> 1 ha). Cette insuffisance est à mettre en relation avec une trop grande densité de végétation (taux de pénétration de 0 %) ou à la présence d'eau au sol – type de surface faisant obstacle au laser en raison de sa capacité à absorber les rayons infrarouges – empêchant les retours d'onde vers le récepteur LiDAR (aucune donnée altimétrique enregistrée ; Faux *et al.*, 2009 ; Smeeckaert *et al.*, 2013 ; Hooshyar *et al.*, 2015). Ainsi, ces surfaces *no data* apparaissent principalement au pied des Côtes de Meuse (à l'est) où se situent la majeure partie des étendues d'eau de la forêt domaniale de Verdun (cf. *supra*, chapitre 2). D'autres, plus discrètes mais beaucoup plus nombreuses, émergent sur les hauteurs du massif forestier où affleure la nappe phréatique atteinte par les cratères d'obus.

Par ailleurs, sur l'ensemble du massif, nous remarquons la présence d'artefacts prenant la forme de zébrures plus ou moins larges orientées nord-ouest/sud-est. Ces lignes correspondent aux fauchées tracées par le LiDAR lors de son survol. Pour ne laisser aucun vide dans l'espace, les fauchées ont été superposées, faisant ainsi accroître les densités de points dans les secteurs soumis à de multiples balayages sans pour autant accentuer le pouvoir de pénétration des impulsions laser.

Figure 3.4 – *Une parcelle récemment plantée en hêtre près du bois d'Ormont. L'absence de couvert arborescent favorise le développement des espèces pionnières héliophiles (e.g., ronces) et la densification du sous-bois. Cliché : R. de Matos-Machado, 21 avril 2016.*

2.2. Facteurs limitants lors de l'acquisition de données LiDAR

D'une façon générale, les erreurs dans les données altimétriques acquises *via* l'utilisation d'un LiDAR se matérialisent par des écarts d'altitude entre les points acquis par télédétection et la réalité. Cette approximation résulte de l'accumulation de deux biais (Huising et Gomes Pereira, 1998 ; Wang *et al.*, 2008 ; Bilodeau, 2010 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014) :

- **L'erreur systématique** : elle consiste en un déplacement des valeurs dans une même magnitude et même direction par rapport à la valeur de référence, produisant ainsi de faux résultats. Du fait que cette erreur soit facilement identifiable, il est souvent possible de la quantifier, donc de la corriger. Plusieurs sources d'erreur systématique peuvent être identifiées : alignement de l'axe de visée, bruit atmosphérique, pente de la surface cible, intégration des données ;
- **L'erreur aléatoire** : le déplacement des valeurs s'effectue selon des magnitudes et directions qu'il est difficile de prédire. Elle ne peut être corrigée mais peut être minimisée. Le diamètre du faisceau laser, sa capacité à diverger, la précision des composants électroniques, la longueur d'onde, l'estimation de la position de l'appareil et le type d'occupation du sol sont autant de sources d'erreur aléatoire.

Lors d'un survol LiDAR, l'entreprise chargée de la mission entreprend généralement une estimation de ces erreurs afin de les corriger. Pour ce faire, elle utilise des surfaces de contrôle, généralement planes et dépourvues de végétation (*e.g.*, routes) afin de valider la précision absolue du nuage de points. Dans le cas de la mission de Verdun, l'entreprise SINTEGRA a eu recours à 6 surfaces de contrôle. À l'issue de l'évaluation, un écart moyen de -0,3 cm a été obtenu – ce qui signifie que les altitudes enregistrées par le LiDAR sont

surestimées – et les données LiDAR ont été validées et livrées avec une précision planimétrique *(x, y)* de 20 cm et une précision altimétrique *(z)* de 10 cm (Méchin, 2013). Cependant, l'analyse préliminaire de la carte de densité de points sol montre des insuffisances dans le jeu de données (cf. *supra*, § 2.1). **Nous proposons d'approfondir ce contrôle-qualité en essayant de quantifier les imprécisions liées aux types de forêt**, de manière *in situ* à partir de deux échantillons, l'un situé dans une frênaie, l'autre dans une pessière.

2.3. Contrôle-qualité du nuage de points sous deux types de peuplements forestiers

2.3.1. Description des surfaces de contrôle

L'évaluation du rôle limitant de la forêt sur la qualité d'acquisition des données LiDAR se fait en comparant le nuage de points avec des levés topographiques sur le terrain. Souhaitant par la suite produire une cartographie des polémoformes du secteur étudié, **l'échantillonnage a été mené en juillet 2015 sur 200 formes** incluant principalement des trous d'obus (figure 3.5*figure 3.5*). Les échantillons ont été relevés dans des peuplements forestiers de différente nature, localisés au nord du domaine où les formes sont particulièrement bien distinctes (arrière du front) à l'inverse des secteurs les plus touchés par les combats de 1914-1918. Ainsi, le corpus de données de terrain comprend :

- Une base ***Feuillus***, composée de **100 mesures de terrain** effectuées dans les parcelles 76 et 77, occupées par une frênaie au sous-bois dense et riche en plantes rudérales (ronces, orties). Le secteur a été soumis à quelques travaux forestiers (martelage et coupe irrégulière en 2011 pour la parcelle 76 ; martelage et coupe irrégulière non exploitée en 2015 pour la parcelle 77) ;
- Une base ***Résineux***, faite à partir de **78 mesures de terrain** réalisées dans les parcelles 5 et 8, dont la surface est majoritairement représentée par l'épicéa. La strate arbustive y est très dense en parcelle 5, composée non seulement des mêmes espèces rudérales mais aussi de clématites (parcelle martelée en 2007 et 2014 mais non exploitée ; coupe préparatoire). Le sous-bois est un peu plus clair dans la parcelle 8 (martelée en 2010 – coupe de régénération – et exploitée en 2012 et 2013) ;
- Une base ***Eau***, constituée de **22 formes inondées**. En effet, la parcelle 8 posséde la particularité d'abriter un grand nombre de formes inondées pendant l'hiver. Cette configuration du terrain a donné l'occasion de vérifier le caractère obstruant de l'eau pour une prospection laser utilisant des ondes infrarouges, cas pour la mission de Verdun. L'intérêt de conduire une mission de terrain l'été était de pouvoir mesurer exactement la profondeur de chaque entité asséchée. Cependant, leur repérage a été plus compliqué. Quelques indices ont aidé à les identifier : absence de strate arbustive

au fond des formes ; grande quantité de feuilles mortes liée à un « effet entonnoir » ; fond relativement humide.

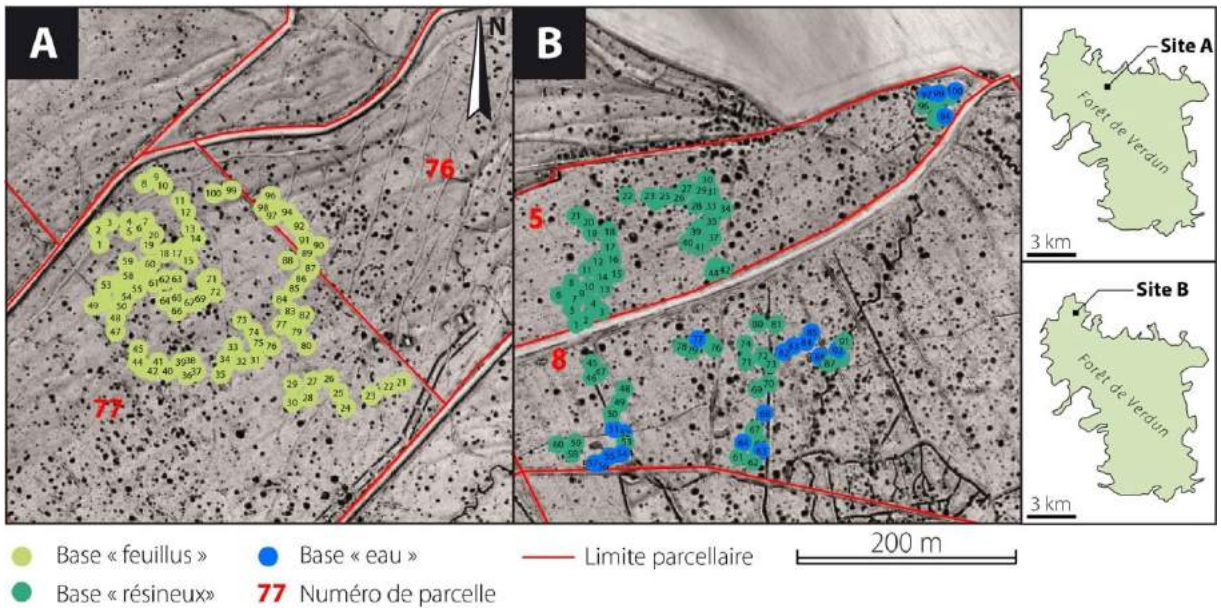


Figure 3.5 – *Localisation des sites de contrôle et des échantillons. A : échantillonnage sous feuillus (frênaie) dans le bois des Caures. B : échantillonnage sous résineux (pessière) au nord du bois d'Ormont.*

2.3.2. Présentation de la méthode d'échantillonnage

Habituellement, la fiabilité des données LiDAR est évaluée en comparant la valeur d'altitude d'un point de contrôle (récoltée par le DGPS) et celle du point LiDAR le plus proche. Cependant, aucun appareil de la sorte n'a été utilisé au cours de la mission de terrain en raison de l'imperméabilité liée au couvert forestier et au sous-bois, beaucoup trop denses en période estivale ; l'utilisation d'un DGPS Trimble® GeoXT 3000 a tout de même été testée, en vain. En complément, aucune borne géodésique de l'IGN, référence qui aurait pu être exploitée comme point de contrôle, n'existait à proximité. Plutôt que de reporter la mission à l'automne suivant (absence de feuilles), nous avons estimé ces écarts en mesurant la profondeur réelle des 200 formes échantillonnées à l'aide d'un télémètre laser TruPulse® 360-B[10]. Lors de nos déplacements, nous avons utilisé un carnet de terrain incluant des images LiDAR imprimées[11], une carte topographique et une boussole. L'échantillonnage a été conduit sur les formes les plus accessibles. Pour chaque relevé, deux personnes sont requises (figure 3.6) : une première personne chargée de tenir une mire positionnée au centre de la forme, soit le point le plus bas ; la seconde, équipée du télémètre, se place à la limite de la forme et vise la mire située en contrebas. Dans le cas d'un cratère d'obus, la limite coïncide avec le bourrelet formé par les éjectas projetés par l'explosion. Pour les fossés, le détenteur

[10]L'appareil fournit des valeurs au dixième près.

[11]Les données LiDAR ont été prétraitées avant la mission de terrain *via* l'algorithme du *SVF*, méthode de visualisation que nous décrirons dans le chapitre 4 (cf. *infra*).

du télémètre se positionne sur le parapet ou le parados (cf. *supra*, chapitre 1). Si la structure est un abri creusé, alors nous nous plaçons sur les déblais déposés autour de la structure. Une fois le dispositif en place, trois valeurs sont enregistrées : la distance verticale, la hauteur de mire et la hauteur des yeux (pour limiter la marge d'erreur, les 200 relevés ont été mesurés par la même personne). La profondeur de la forme est calculée sur la base de ces trois paramètres à partir de la formule suivante :

$$VD + (HM - HY)$$

Où VD = distance verticale ; HM = hauteur de mire ; HY = hauteur des yeux

Enfin, l'orientation de la visée est enregistrée à l'aide d'une boussole, mesure qui a permis à la fin de la mission de terrain de repérer le point LiDAR associé au point de contrôle.

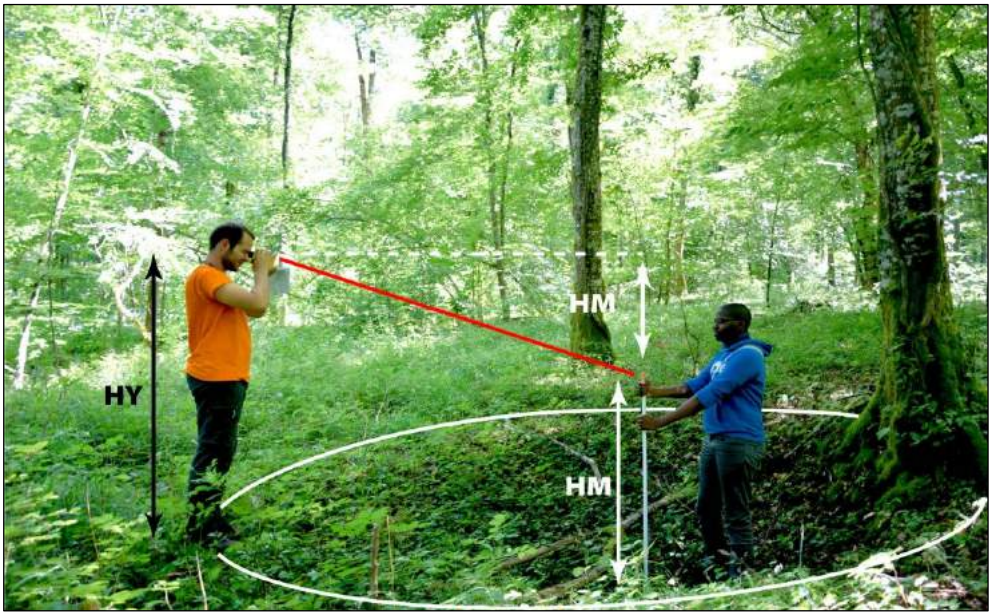


Figure 3.6 – *Schéma du dispositif de mesure au télémètre laser. Cliché : Julie Nouri, 21 juillet 2015.*

2.3.3. Évaluation de la fiabilité des mesures faites au télémètre

Afin de connaître la précision des mesures opérées avec le télémètre laser, un test de répétitivité a été réalisé en intérieur (sur fond plat). Les mesures ont consisté à se positionner à 2 m d'un mur (distance moyenne entre le fond des formes et le télémètre) et à viser les graduations d'un décamètre fixé verticalement sur ce mur. Pour chaque centimètre sur une échelle de 30, 10 mesures ont été prises, espacées de quelques secondes (le temps de se relâcher et de se repositionner, reproduisant ainsi les gestes de terrain). Parce que les formes étudiées sont creuses, l'inclinaison de la ligne de mire a été prise en considération. Ainsi, les

graduations basses[12] (20 à 49 cm) ont été ciblées pour le test. Au total**, ce sont 300 mesures qui ont été enregistrées**, **révélant une marge d'erreur assez conséquente de ± 10 cm**, que nous ne pouvons corriger étant donné l'inopérabilité du DGPS au moment de la mission (figure 3.7). Nous avons donc fait le choix de considérer cette marge d'erreur dans les calculs futurs.

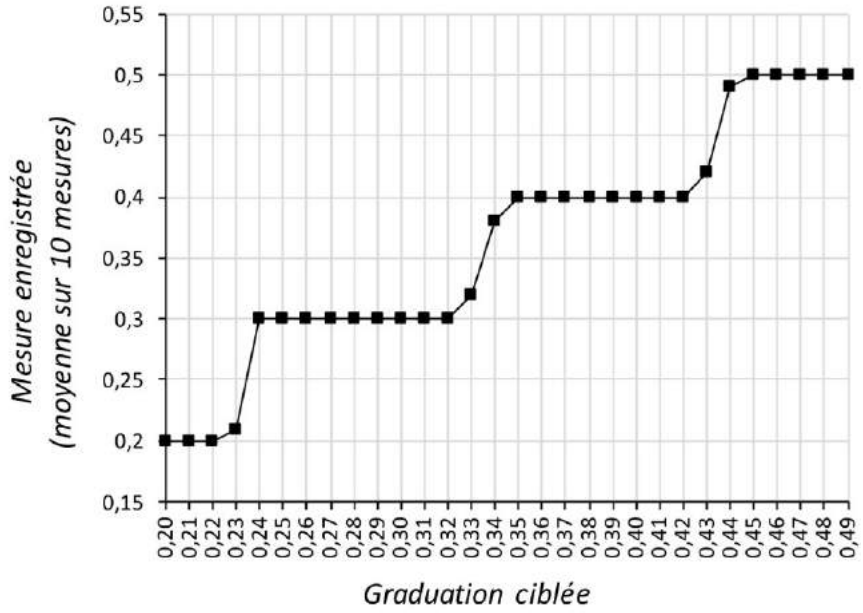


Figure 3.7 – *Résultats du test de répétitivité des mesures effectuées au télémètre laser. Chaque point correspond à la moyenne des dix mesures.*

2.4. Confrontation des relevés de terrain et du nuage de points

2.4.1. Calcul de la profondeur théorique et formalisation des données

La profondeur réelle des 200 formes étant acquise, il nous reste à estimer la profondeur théorique donnée par le nuage de points. Il faut donc déterminer les points du nuage à partir desquels la profondeur théorique a été calculée. Nous procédons comme suit :

- Pour le point le plus bas : après avoir vectorisé les 200 formes sur ArcGIS®, un centroïde est tracé au centre de chaque polygone *via* l'outil *Entités vers points*. La valeur du point du nuage le plus proche est retenue comme altitude minimale.
- Pour le point le plus haut : depuis chaque centroïde, un rayon est tracé manuellement puis orienté selon la valeur d'azimut retenue sur le terrain – le paramétrage de cet angle se fait après clic droit et sélection de l'option direction. La valeur du point du nuage le plus proche de l'intersection entre la limite de la forme et l'axe azimutal est retenue comme altitude maximale.

[12]La graduation 0 cm a été placée au pied du mur.

Ainsi, **les profondeurs théoriques des formes ont été calculées et confrontées aux profondeurs réelles** (figure 3.8). Un tableau de données a été créé pour chaque catégorie d'échantillons (feuillus, résineux, eau) pour mieux apprécier les écarts de valeurs (tableau 3.1 et annexe B). Ces derniers peuvent être négatifs (surestimation de la profondeur par le LiDAR), positifs (sous-estimation) ou nuls (bonne estimation). Pour mieux se rendre compte des différences de valeurs entre les tableaux, la moyenne a été calculée pour résumer la tendance centrale des écarts et l'écart-type a servi d'indicateur à la variabilité de ces valeurs. En complément, et comme dans la plupart des travaux portant sur la qualité des données LiDAR, un indice de fiabilité a été calculé. Nous utilisons généralement **l'erreur moyenne quadratique** (EMQ ; *Root Mean Square Error* ou RMSE) pour ce genre d'opération. Cet indice permet la comparaison entre les tableaux (c'est-à-dire entre différents types de peuplement) et l'itération d'une étude à l'autre (les données LiDAR de Verdun avec celles d'une autre mission). L'erreur moyenne quadratique est obtenue de la manière suivante :

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Z_i - Z_i')^2}$$

Où Z_i = altitude théorique (LiDAR) ; Z_i' = altitude réelle (terrain) ; dans notre cas, Z_i et Z_i' correspondent à des profondeurs

Base de données	Sous-estimation	Bonne estimation	Surestimation	Écart minimum	Écart maximum	Moyenne	Écart type	EMQ
FEUILLUS (100)	30%	56%	14%	0	0,8*	0,03*	0,23*	0,23*
RESINEUX (78)	92%	3%	5%	0	1,5*	0,25*	0,29*	0,38*
EAU (22)	100%	0%	0%	0.1	1,3*	0,63*	0,29*	0,69*

Tableau 3.1 – *Résultats de l'analyse des écarts observés et théoriques sur les 200 échantillons. *La marge de ± 10 cm du télémètre laser doit être prise en compte.*

2.4.2. Étude des écarts de profondeur entre les trois bases de données

L'étude du tableau 3.1 permet de rendre compte de deux phénomènes : 1) la présence systématique d'erreurs d'approximation dans le nuage de points quel que soit le jeu de données analysé ; 2) des erreurs d'amplitude différente selon le type de peuplements et de la présence ou absence d'eau dans les formes. Il apparait que le LiDAR a tendance à sous-estimer la profondeur des 200 formes échantillonnées. Ce constat est plus évident pour les échantillons des bases *Résineux* et *Eau* (respectivement 92 % – 72 sur 78 – et 100 % – 22 sur 22 ; tableau 3.1 et annexe B) alors que ceux de la base *Feuillus* bénéficient d'une meilleure approximation de leur profondeur puisque plus de la moitié des valeurs réelles coïncident avec les valeurs théoriques (56 % – 56 sur 100 – ; tableau 3.1 et annexe B).

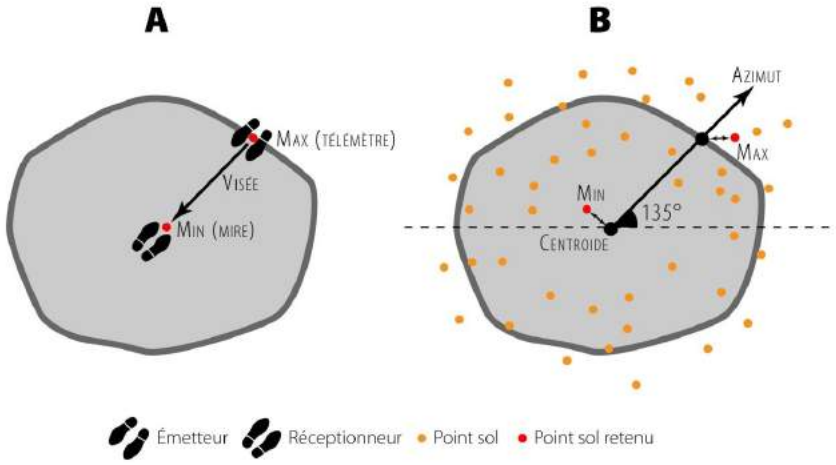


Figure 3.8 – *Acquisition des valeurs de profondeur sur le terrain et sur le nuage de points. A : dispositif de mesure sur le terrain. B : identification des points retenus pour le calcul des écarts théoriques.*

Une autre particularité plus surprenante est la surestimation des valeurs de profondeur par le LiDAR, écart visible dans 14 % des échantillons de *Feuillus* (14 sur 100) et 5 % de *Résineux* (4 sur 78). L'analyse de la tendance centrale des écarts (moyenne) pour chaque base de données reflète bien l'amplitude des chiffres annoncés plus tôt. Pour *Feuillus*, l'écart moyen observé reste minime (3 cm), ce qui concorde assez bien avec le nombre important de valeurs correctement estimées alors qu'il affiche une valeur bien plus importante pour *Résineux* (25 cm) et *Eau* (63 cm), témoignant de plus grands écarts de profondeur dans ces bases. L'analyse de l'erreur moyenne quadratique (EMQ) appuie les chiffres apportés par la moyenne et justifie une amplitude d'erreurs plus forte dans la pessière (38 cm) que dans la frênaie (23 cm). La tendance semble identique pour les formes inondées (69 cm) dont le LiDAR peine à estimer correctement la profondeur. Toutefois, l'analyse de la distribution des écarts démontre que la moyenne des échantillons *Résineux* est anormalement tirée vers le haut. C'est pourquoi les valeurs de moyenne et d'EMQ doivent être analysées avec précaution. Ce comportement inattendu est dû à la présence de valeurs extrêmes dans la base comme l'illustre le nombre d'écarts de plus de 1 m[13] alors qu'il n'en existe pas dans la base *Feuillus*. La dispersion des valeurs (écart-type) y est par conséquent plus élevée dans *Résineux* (29 cm), à l'opposé de *Feuillus*, où les écarts sont atténués (écart-type de 23 cm ; écart maximum de 80 cm pour le cratère d'obus n°26). Sans ces valeurs aberrantes, les paramètres de position et de dispersion s'amenuisent et deviennent plus réalistes. Ainsi, la moyenne des écarts n'est plus que de 21 cm pour *Résineux*, phénomène similaire pour la dispersion où la tendance est à l'homogénéisation (écart-type de 20 cm, soit une valeur inférieure à *Feuillus*). Suite à ce réajustement, l'EMQ est aussi affectée car elle n'atteint plus que 29 cm (au lieu de 38 cm auparavant). Après analyse du comportement des valeurs d'écarts sur les trois échantillons et à partir de différents indices, la question d'une différence significative de

[13]Trois valeurs d'écarts sont supérieures à un mètre. Il s'agit des objets n°16 (1,5 m), 4 (1,3 m) et 40 (1,1 m).

fiabilité entre les types de peuplements forestiers se pose, autrement dit entre les populations *Feuillus* et *Résineux*. **Seul le recours à des tests statistiques adaptés peut permettre d'y répondre.** Par conséquent, nous avons tenté de vérifier cette hypothèse en utilisant le logiciel RStudio®.

2.4.3. Vérification, à partir de tests statistiques, de l'approximation des données LiDAR sous peuplement résineux

L'analyse du tableau 3.1 permet de constater que la moyenne des erreurs des échantillons *Feuillus* est visuellement inférieure à celle des échantillons *Résineux* (écart de 22 cm). Mais compte tenu de la faible population étudiée (100 pour *Feuillus* et 78 pour *Résineux*), nous ne pouvons nous contenter d'attester que les données LiDAR ont tendance à se dégrader dans les forêts résineuses. Il est impératif de savoir si ces moyennes sont significativement différentes. Afin de déterminer le test statistique le plus adéquat à la comparaison des moyennes, nous avons commencé par tester la normalité des deux échantillons en les confrontant à une distribution gaussienne (loi normale). Pour ce faire, nous utilisons le test de Shapiro-Wilk *via* la fonction *shapiro.test* de RStudio®. Les résultats du test montrent que l'hypothèse d'une normalité des données peut être rejetée (W = 0,80 et *p-value* = $4{,}62 \times 10^{-10}$ pour *Feuillus* ; W = 0,79 et *p-value* = $4{,}40 \times 10^{-9}$ pour *Résineux* ; soit une *p-value* largement inférieure au seuil significatif de 0,05 pour les deux populations). Le choix se porte vers un test non paramétrique. Sachant que la présente étude s'intéresse à comparer les moyennes de *Feuillus* et *Résineux*, nous avons choisi un test non paramétrique adapté à l'analyse de deux échantillons : le test de Wilcoxon-Mann-Whitney. Il existe deux variantes de ce test : le test pour échantillons indépendants et le test pour échantillons appariés. Puisque nos échantillons ne s'organisent pas par paire et parce que les effectifs sont différents, nous avons opté pour le test pour échantillons indépendants. Après application de la fonction *wilcoxon.test*, l'hypothèse d'une égalité des moyennes est rejetée (W = 1451 et *p-value* = $1{,}77 \times 10^{-13}$; soit une *p-value* bien en-dessous du seuil significatif de 0,05).

Ainsi, la présence d'une différence significative des valeurs de moyenne entre *Feuillus* et *Résineux* est démontrée sans toutefois tenir compte de la marge d'erreur du télémètre. Un second test, réalisé avec intégration des 10 cm de marge d'erreur (la valeur a été ajoutée à toutes les formes de *Feuillus* et soustraite à toutes les formes de *Résineux*), montre que les moyennes sont significativement égales (*p-value* = 0,31). Cependant, un tel comportement dans le jeu de données nous semble improbable. **Nous considérons que la fiabilité des données LiDAR de la forêt domaniale de Verdun a incontestablement tendance à se dégrader dans les pessières et très probablement dans les peuplements de pins noirs** (un autre échantillonnage aurait pu être mené sous *Pinus nigra* pour évaluer la qualité des données LiDAR sous ce type de peuplement mais nous avons préféré exploiter le reste du temps pour d'autres types d'observations – cf. *infra*, chapitre 4).

2.4.4. Discussion sur la fiabilité des données LiDAR en fonction des types d'occupation du sol

La présence d'essences sempervirentes sur le territoire prospecté par le LiDAR semble avoir joué un rôle prépondérant dans la fiabilité des données LiDAR acquises au sol, en tout cas pour le type d'instrument déployé[14]. Le feuillage composant ces espèces (aiguilles) constitue un toit opaque difficile à franchir (figures 3.9 et 3.10), peut-être plus évident chez *Picea abies* que chez *Pinus nigra*, en raison de sa morphologie plus verticale – les branches apparaissent dès la base du tronc – et de ses branches étalées, prenant ainsi l'aspect de draperies, raison pour laquelle le sondage a été entrepris sous ce type de peuplement.

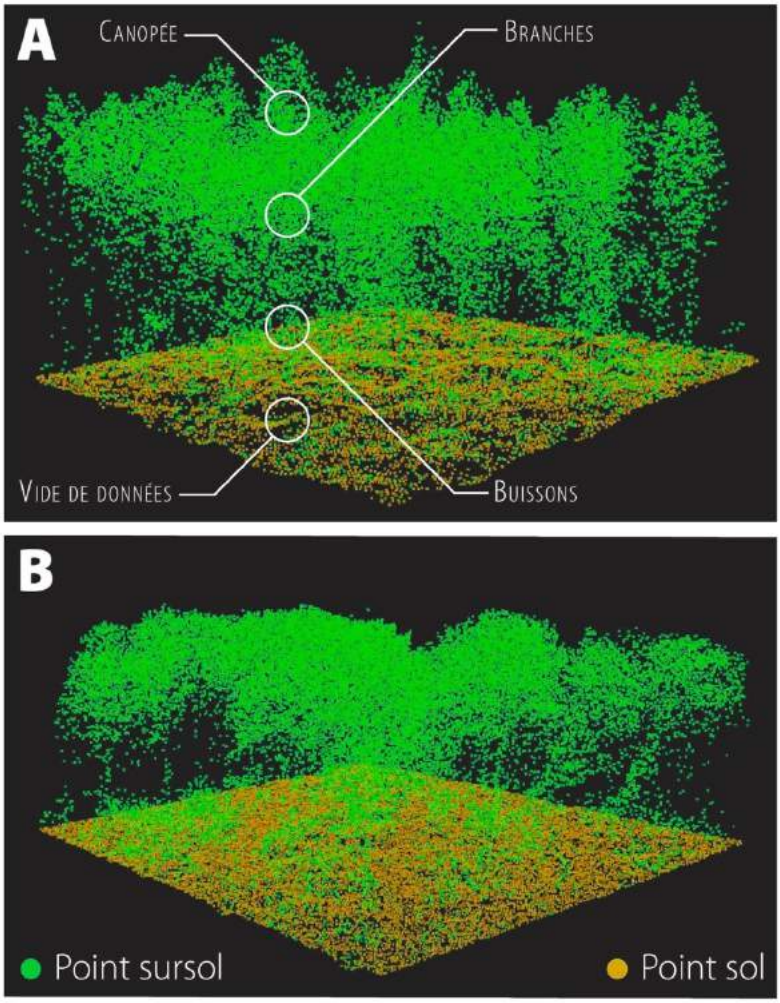


Figure 3.9 – *Analyse 3-D du nuage de points sous deux types de peuplements. A : extrait du nuage sous pessière en parcelle n°8. La densité de points au sol est assez faible car atténuée par le feuillage et la structure verticale des arbres. Certaines parties n'ont pas été scannées par le laser (tâches noires). B : extrait du nuage sous frênaie en parcelle n°77. La densité de points au sol est plus importante et uniforme car les impulsions sont parvenues à la surface.*

[14]Il existe d'autres technologies LiDAR, plus coûteuses, utilisant des longueurs d'onde permettant de s'affranchir de ce biais.

Plusieurs cas de figure caractérisent le comportement des impulsions laser dans cet environnement résineux. Dans la majorité des cas, environ les deux-tiers de ces impulsions ont été stoppées par le houppier et ont été renvoyées vers le récepteur d'après les observations faites sur la carte des points sol (cf. *supra*, § 2.1). Une autre part s'est frayée un chemin entre les branches et touffes d'aiguilles mais s'est vite retrouvée interceptée par les rameaux situés à la base du tronc ou par la végétation généralement dense des strates arbustive et herbacée. Cet obstacle a été particulièrement impénétrable dans les forêts résineuses abritant les plantules de hêtres censés les remplacer (cf. *supra*, chapitre 2). Dans un tel cas, la confusion dans la classification des objets sol et sursol est inévitable puisque le point correspondant au dernier écho se situe alors quelques centimètres au-dessus du sol (figure 3.10). C'est probablement ce phénomène qui a tendance à faire accroître l'erreur d'estimation du niveau sol. Heureusement, ce genre de résultat n'est pas systématique puisqu'une autre partie du signal, bien qu'infime, est parvenue à percer le sous-bois permettant d'obtenir des points correctement alignés avec le niveau sol. D'après le tableau 3.1, 3 % des profondeurs de forme sont correctement estimées (2 formes sur 78). Tenant compte de la marge d'erreur du télémètre, 35 % de valeurs supplémentaires (28 formes sur 78 – celles dont l'écart calculé est de 10 cm) seraient correctement évaluées. Si cela était vrai, 38 % des valeurs de *Résineux* (30 formes sur 78) seraient alors parfaitement représentatives de la réalité. En environnement de feuillus, l'interception des impulsions LiDAR par la canopée a de façon générale été un phénomène quasi-inexistant étant donné l'absence de feuillage au moment de la mission. Cependant, les branches ont pu obstruer le signal et empêcher quelques impulsions de continuer leur route vers le sol.

L'analyse du nuage de points brut démontre également qu'une autre partie du signal a été éclipsée par la couverture végétale occupant le sous-bois, comme dans les environnements résineux (figure 3.9). Ainsi, l'accroissement de la densité de points sol sous feuillus n'est pas lié à la nature du sous-bois (assez similaire aux résineux) mais bien à l'absence d'un obstacle supplémentaire (le houppier), en particulier pour les forêts de feuillus suffisamment âgées où domine la strate arborée. Dans les parcelles où le résineux a disparu au profit du hêtre, les individus juvéniles sont majoritaires (strate arbustive) et filtrent largement les signaux laser en raison d'une forte densité de branchage. Dans certains cas, la profondeur réelle des formes a été surestimée par le LiDAR, phénomène plus souvent observé sous feuillus (15 % – 15 formes sur 100 dont 3 dans la marge d'erreur du télémètre) que sous résineux (5 % – 4 formes sur 78 dont 2 dans la marge d'erreur du télémètre) avec des écarts parfois importants (> 50 cm pour 5 formes issues des 2 bases).

Plusieurs raisons expliquent cette surestimation des valeurs. Premièrement, la mission de terrain a été menée deux ans et trois mois après le survol LiDAR. Les formes des parcelles prospectées ont pu évoluer pendant cette période. Ceci est d'autant plus vrai que cinq d'entre elles (les formes n°9, 12, 27, 36 et 80 de la base *Feuillus*) se situent à proximité immédiate d'un chemin forestier et quatre coïncident avec des écarts de plus de 50 cm. Il est

fortement probable qu'elles aient subi un remblaiement partiel suite au passage d'engins forestiers. Il reste donc neuf formes dont l'interprétation demeure inconnue. Partant du principe que la forêt est très fréquentée à la fois par l'homme (agents forestiers, randonneurs, fouilleurs clandestins) et la grande faune, les formes ont pu être dégradées. Cependant, cette hypothèse était assez peu probable et ne peut être appliquée que ponctuellement (éventuellement sur une ou deux formes) voire nullement. Il serait plus réaliste de considérer une erreur faite au moment de la mesure (cible mal visée ou mal enfoncée) ou de la retranscription des relevés.

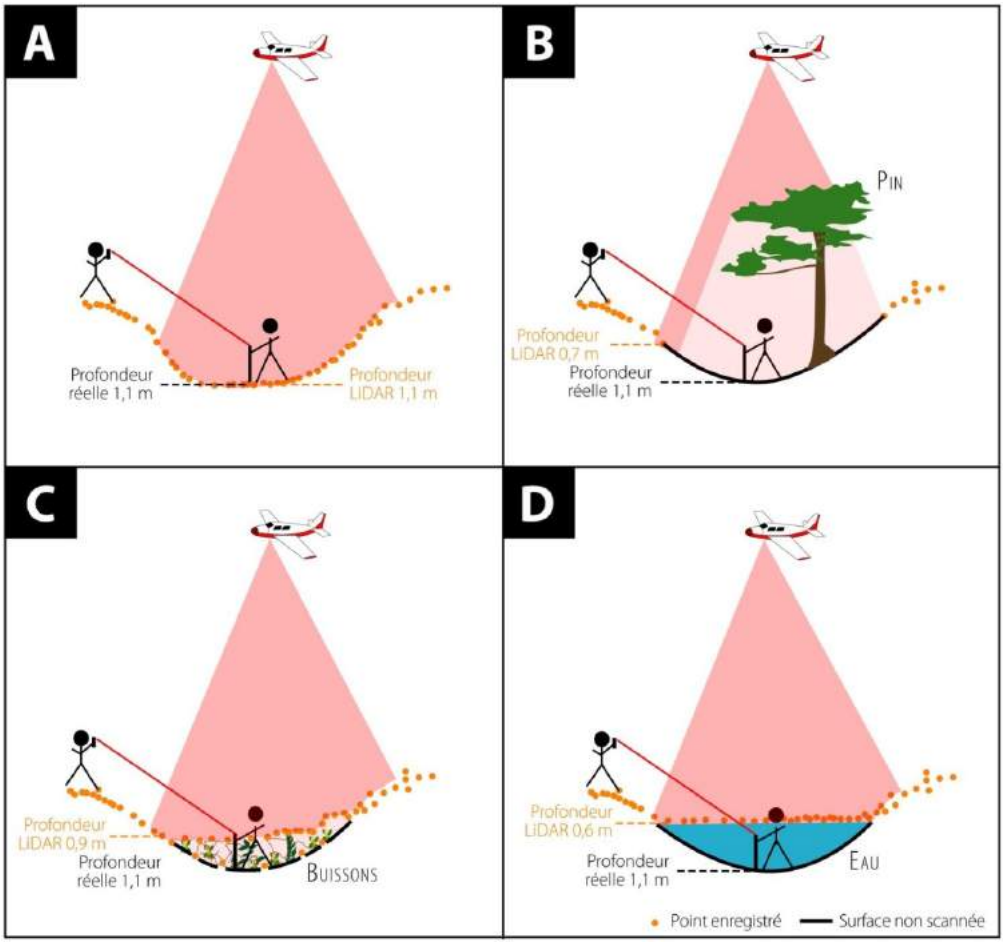


***Figure 3.10** – Comportement des impulsions laser dans différents environnements. A : milieu ouvert ou peuplement feuillus. B : peuplement résineux. C : présence d'une strate arbustive dense au sol. D : présence d'eau au sol.*

Concernant les formes inondées, l'eau a constitué un obstacle infranchissable pour 100 % des échantillons, confirmant les observations faites par d'autres études sur ce type de surface[15] (figure 3.10). Par endroit, le hiatus est supérieur à un demi-mètre, signifiant que cette valeur doit être ajoutée à celle de la profondeur initiale afin d'obtenir un chiffre réel. Ce constat peut paraître assez handicapant dans un objectif de caractérisation de la géométrie des formes. Malheureusement, il est difficile de corriger ce problème au vu de la variabilité

[15]L'absence de signal sur les formes inondées a été exploitée pour cartographier les mares de la forêt domaniale de Verdun à des fins d'inventaire de la biodiversité (cf. *infra*, chapitre 9).

de ces écarts (erreur aléatoire variable d'une forme à l'autre) et du nombre important d'objets de la sorte sur le territoire (plusieurs milliers). Seul le recours à des mesures de terrain exhaustives à l'aide d'un télémètre pourrait permettre d'estimer précisément la morphologie des formes sous l'eau (une telle opération, chronophage, n'a pas été conduite).

2.4.5. Considérer les erreurs d'estimation altimétrique dans la poursuite des travaux

La comparaison des relevés de terrain avec le nuage de points LiDAR a permis de mettre en lumière des approximations d'altitude au sein de deux surfaces de contrôle. Si ce phénomène existe sur quelques hectares prospectés, cela signifie qu'il se manifeste probablement à l'échelle de la forêt de Verdun toute entière, conclusion qui convergerait ainsi vers d'autres études (Devereux *et al.*, 2005 ; Crow *et al.*, 2007 ; Bater et Coops, 2009 ; Doneus et Briese, 2011 ; Georges-Leroy *et al.*, 2011 ; Bollandsås *et al.*, 2012 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014). Cela impliquerait de construire un MNT tenant compte de ces marges d'erreur, opération d'autant plus complexe que ces imprécisions varient d'un type de peuplement à l'autre voire à l'échelle même d'une parcelle. Plutôt que de corriger directement ces erreurs sur le nuage de points, nous avons préféré ne pas les considérer dans la construction du MNT car cette étape aurait été particulièrement longue étant donné le poids des fichiers à traiter (54,53 GB de points *sol*). De plus, le traitement d'un MNT non corrigé n'affecte pas fondamentalement et directement la méthodologie de ce travail de thèse (*i.e.*, inventaire des formes et classification morphométrique). **Les erreurs d'estimation seront en revanche prises en compte dans les post-traitements** et ajoutées aux données lorsque cela sera jugé nécessaire (*e.g.*, description de la morphométrie des formes et analyse des quantités de terres déplacées par les combats dans le chapitre 6).

3. Construction du modèle numérique de terrain

Après avoir analysé le jeu de données LiDAR et évalué leur fiabilité, l'étape suivante consiste à interpoler les points sol, traitement servant à produire un MNT destiné à être utilisé plus tard pour l'inventaire et la classification des polémoformes. Parmi les nombreuses méthodes d'interpolation d'un nuage de points, il convient de choisir celle qui est la plus adaptée à notre terrain. Une fois la résolution choisie et le MNT construit, une opération de débruitage est menée afin de nettoyer l'image des aspérités naturelles du relief pouvant compromettre la qualité des résultats.

3.1. L'interpolation ou le passage du point à une surface continue

L'interpolation est un calcul réalisé par échantillonnage (et non pas en tout point d'un territoire) « *sous l'hypothèse qu'il est possible, par inférence, d'estimer, avec une précision acceptable*

ou souhaitée, les valeurs prises par une variable en d'autres points de l'espace considéré » (Caloz et Collet, 2011). Dans notre cas, nous cherchons à prédire les valeurs d'altitude théoriques comprises entre des points *sol* observés dans l'objectif de représenter une image continue du relief, appelée MNT (figure 3.11). Ce dernier constitue en quelque sorte une grille (couramment appelée *grid*) où la valeur de chaque case (appelée pixel ou cellule – taille définie par l'opérateur) correspond à une valeur d'altitude théorique calculée sur la base des échantillons mesurés. Pour cette raison, l'opération d'interpolation se réfère parfois au terme de *gridding* (Hengl et Evans, 2009).

Il existe **deux familles de méthodes d'interpolation**, autrement dit deux approches pour évaluer la valeur des pixels du *grid* (Bater et Coops, 2009 ; Hengl et Evans, 2009 ; Drouin et Saint-Laurent, 2010 ; Caloz et Collet, 2011) :

- **La méthode déterministe** (empirique ou mécanique) : elle consiste à créer une surface sur la base de points mesurés sans poser d'hypothèse statistique (pas de notion de probabilité) ;
- **La méthode stochastique** (probabiliste) : elle se fonde sur la quantification d'une autocorrélation spatiale entre les points mesurés (corrélation entre les voisins) et par le calcul de probabilités. Plusieurs initialisations peuvent conduire à des résultats différents.

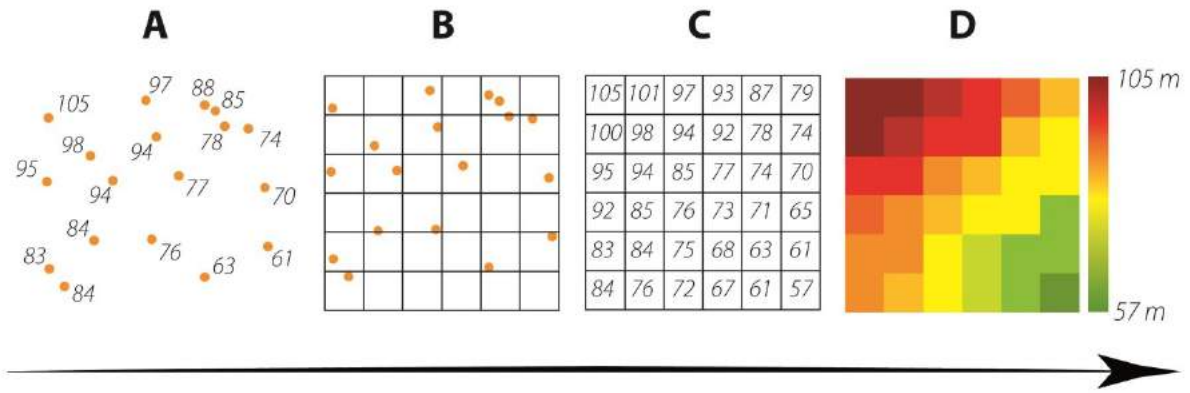


Figure 3.11 – *Principe d'interpolation des points sol. A : le jeu de données en entrée contient des points sol définis par une altitude. B : un grid est généré par l'opérateur. C : une valeur d'altitude théorique est associée à chaque pixel sur la base des observations. D : création et discrétisation du MNT.*

Pour la construction de MNT, on utilise le plus souvent des méthodes d'interpolation déterministes. Les plus populaires, généralement disponibles sur SIG sont :

- **la pondération inverse à la distance** (PID ; *inverse distance weighting* ou IDW) : elle se base sur la méthode développée par Watson et Philip (1985) consistant à étudier les points *sol* entourant le centre d'un pixel et la distance qui les sépare. Plus cette distance sera faible, plus la valeur du pixel sera influencée par la valeur du point le plus proche. La pondération diminue avec la distance ;

- **les voisins naturels** *(natural neighbor)* : développée par Sibson (1981), l'interpolation par voisins naturels est assez similaire à l'interpolation PID au sens où elle repose également sur une pondération des valeurs de points sol. Cependant, au lieu d'étudier la distance de ces points avec le centre du pixel traité, elle analyse les relations de superposition entre des polygones de Voronoï (aussi appelés Thiessen). Prenons un pixel possédant huit points sol (figure 3.12). Un diagramme de Voronoï est tracé sur la base de ces échantillons : pour chaque point, on dessine un polygone dont les limites correspondent à la médiatrice séparant ce point et son voisin. Une fois les huit polygones construits, un neuvième polygone est produit au centre du pixel puis un pourcentage de superposition est calculé. On attribue ainsi au pixel la valeur du point sol associé à l'aire de superposition la plus grande.

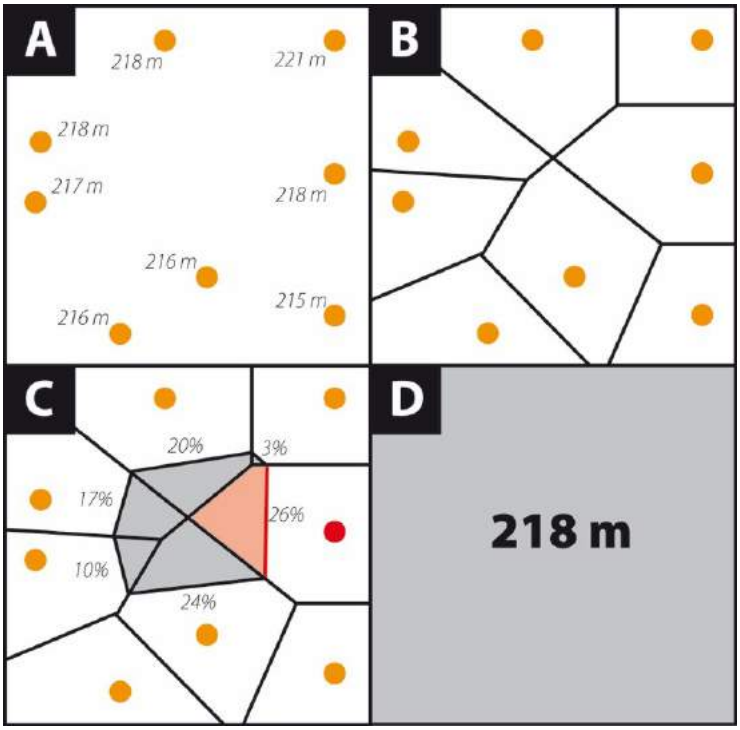


Figure 3.12 *– Fonctionnement de la méthode d'interpolation par voisins naturels sur un pixel. A : points sol en entrée. B : traçage des polygones de Voronoï autour des points sol. C : traçage d'un ultime polygone au niveau du centroïde et calcul des parts de superposition. D : on attribue au pixel la valeur du point sol possédant la part de superposition la plus grande (modifié de ESRI, 2018).*

- **l'interpolation par *splines* :** elle consiste à minimiser la courbure globale d'une surface et à la faire passer par les points échantillonnés (Hengl et Evans, 2009). Le mot *spline* est la traduction anglaise du mot *cerce* en français, désignant un gabarit en bois donnant le contre-profil d'une courbe (Larousse, 2018). Un moyen de comprendre la logique mathématique de cette méthode d'interpolation est d'observer le comportement élastique d'une cerce.
- **la méthode ANUDEM :** cette méthode développée par Hutchinson (1989) à des fins de modélisation hydrologique produit un modèle reflétant au mieux les propriétés

d'écoulement d'une surface notamment en conservant les limites de bassin-versant (lignes de crête). Pour cette raison, il est demandé à l'opérateur de fournir au préalable un fichier contenant des isolignes.

- **le réseau triangulé irrégulier** (*triangulated irregular network* ou TIN) : à l'inverse de toutes les méthodes d'interpolation présentées jusqu'alors, celle-ci ne permet pas de produire un *grid* fait de pixels. Elle repose sur la construction de triangles dont les sommets sont censés relier les points sol. Plusieurs alternatives existent pour construire ces triangles mais la plus courante reste la triangulation de Delaunay, utilisée dans ArcGIS®. Le terme *irrégulier* signifie que la résolution varie en fonction des variations du relief (résolution plus importante lorsqu'elles sont importantes, résolution atténuée lorsqu'elles sont faibles).

Parmi les **approches stochastiques**, nous retiendrons uniquement **le krigeage** *(kriging)*, méthode d'interpolation populaire (Hengl et Evans, 2009) initialement proposée par Krige (1951)[16] pour prédire la distribution de minerais à partir de forages connus (Oliver et Webster, 1990). Alors que les méthodes déterministes se contentent de prédire un phénomène avec incertitude, les méthodes stochastiques tentent de connaître la probabilité que ce phénomène ait lieu en un point donné. Dans le cas du krigeage, cette notion de probabilité est apportée par un semi-variogramme permettant de quantifier l'autocorrélation spatiale du jeu de données en entrée, autrement dit de connaître la distance à partir de laquelle les points ne se ressemblent plus (Oliver et Webster, 1990). La surface d'interpolation est ensuite créée sur la base du modèle produit par le variogramme ; elle s'accompagne d'informations relatives aux erreurs d'interpolation. Pour cette raison, le krigeage s'utilise à la fois pour l'interpolation et pour la simulation (Hengl et Evans, 2009).

3.2. Les voisins naturels comme méthode privilégiée

La sélection d'une méthode d'interpolation adaptée à notre jeu de données est une étape importante du travail de thèse. En cas de mauvaise décision, les résultats pourraient être considérablement faussés sans forcément en avoir conscience. Pour nous guider vers le choix le plus juste, plusieurs études ont confronté ces méthodes pour évaluer leur précision notamment lorsqu'elles sont appliquées sur des nuages de points issus de données LiDAR (Bater et Coops, 2009 ; Hengl et Evans, 2009 ; Guo *et al.*, 2010 ; Godone et Garnero, 2013). La plupart de ces études ont démontré que l'interpolation par voisins naturels fournit le plus faible taux d'erreurs quand un *grid* de résolution fine est généré (< 1 m ; Bater et Coops, 2009 ; Godone et Garnero, 2013). Elle est aussi la méthode produisant le moins d'artéfacts dans l'image en conservant au mieux la forme des reliefs (Bater et Coops, 2009). En complément, elle possède l'avantage d'être simple à paramétrer et de produire des résultats en un délai très court même en présence d'un nuage de points très dense. Du fait qu'elles

[16]En réalité, le terme de *krigeage* a été proposé par le français Georges Matheron dans les années 1960.

affichent des valeurs de RMSE particulièrement faibles, les méthodes de la pondération inverse à la distance et du réseau triangulé irrégulier constituent aussi de bonnes alternatives aux voisins naturels (Guo *et al.*, 2010). Cependant, la seconde a le désavantage de fournir un format d'image différent des MNT habituels composés de pixels, rendant de nombreux traitements incompatibles avec ce type de données. L'interpolation par *splines* n'est pas adaptée à la construction de MNT à haute résolution car elle peine dans ce cas à représenter les portions d'image à fort gradient de pente en produisant notamment des valeurs situées bien au-delà des valeurs en entrée (Hengl et Evans, 2009). Elle est en revanche une méthode de choix lorsque l'exploitation de résolutions plus grossières est envisagée (Bater et Coops, 2009 ; Guo *et al.*, 2010 ; Godone et Garnero, 2013). Le krigeage n'est tout simplement pas une méthode appropriée lorsque les densités de points sont importantes en raison de son fort pouvoir de lissage et de sa haute sensibilité aux zones de forte concentration de points (Hengl et Evans, 2009). On peut en revanche faire appel à elle en cas de faible densité de points (Bater et Coops, 2009). Ainsi, ces études révèlent qu'aucune des méthodes exposées n'est universelle tandis que leur utilisation varie en fonction du type de terrain étudié, de la densité des points fournis en entrée et de la résolution souhaitée en sortie (Bater et Coops, 2009). Elles convergent aussi vers l'idée que **la méthode des voisins naturels est la plus adaptée à des données de type LiDAR**. **C'est donc cette approche qui a été privilégiée pour la construction du MNT de la forêt domaniale de Verdun** (figure 3.12).

3.3. Le choix d'une bonne résolution

La qualité du MNT dépend aussi de sa résolution. D'une manière générale, plus la taille du pixel est faible, plus la résolution du MNT est fine et mieux sera reproduite la réalité du terrain (Gao, 1997 ; Pain, 2005 ; Hengl et Evans, 2009 ; Maynard et Johnson, 2014). Une image de résolution millimétrique affiche par exemple les moindres détails d'une pierre au sol alors qu'une image de résolution métrique en fait totalement abstraction. Tout l'enjeu de cette étape consiste à minimiser les écarts de rendu entre la surface interpolée et la surface réelle (Hengl et Evans, 2009). Un premier paramètre pouvant nous guider vers le bon choix de résolution est de vérifier si à l'issue de l'interpolation, l'objet étudié est encore discernable. Puisque nous avons cartographié les formes de relief induites par les combats de 1914-1918, il convient de choisir une résolution adaptée à la taille de ces formes (figure 3.13). Dans le cas où une résolution grossière est choisie, par exemple 10 m, les cratères d'obus sont lissés et les pentes amoindries par le modèle car leur diamètre est largement inférieur à la taille du pixel (Gao, 1997 ; Pain, 2005 ; Smith *et al.*, 2006 ; Maynard et Johnson, 2014). Avec un pixel d'1 m, l'identification de ces formes devient possible mais l'étude de leur géométrie ne l'est pas forcément. Par exemple, une dépression circulaire d'environ 1 m de diamètre produite sur le terrain par un obus de 75 mm ne peut être perçue du fait de la forme rectangulaire du pixel. Avec une résolution de 10 cm, ce même cratère apparaît sous une forme proche de celle que nous percevons en réalité, soit un cercle, permettant d'envisager une étude morphométrique

de l'objet. À partir d'un certain seuil, la précision du modèle ne varie plus et dans certains cas, l'augmentation de la résolution en-dessous d'un certain seuil (variable selon l'objet d'étude) a pour effet de dégrader l'image en faisant apparaître les aspérités naturelles du relief, complexifiant son interprétation (Smith *et al.*, 2006 ; Hengl et Evans, 2009). Ainsi, la décision de retenir une taille de pixel donnée est un choix purement arbitraire dépendant à la fois de la taille du phénomène que l'on souhaite étudier et des traitements envisagés une fois le MNT acquis (Pain, 2005 ; Hengl et Evans, 2009).

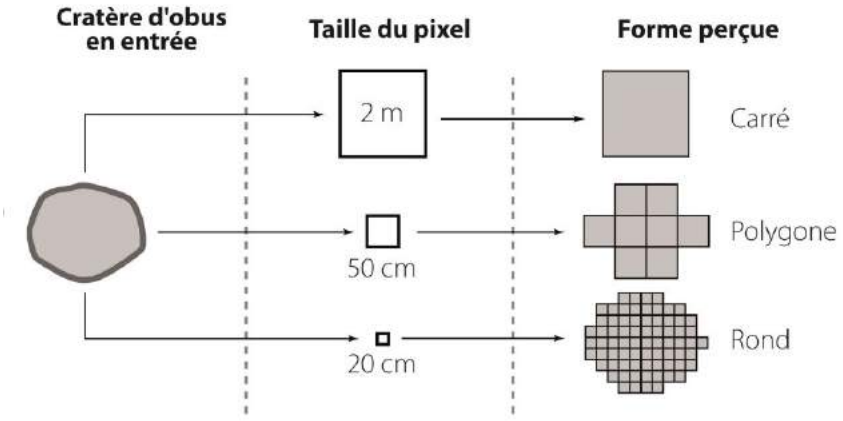


Figure 3.13 – *Évolution du rendu d'un objet en fonction de la résolution choisie*

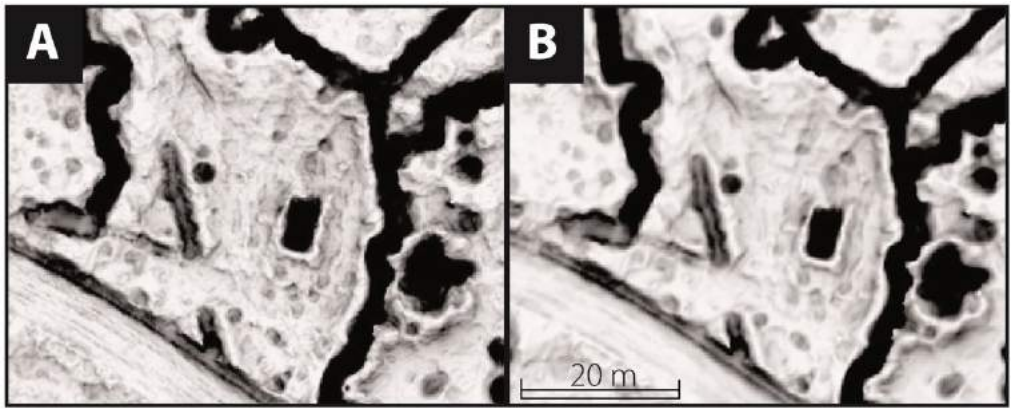


Figure 3.14 – *Aperçu des effets du filtre sur un extrait d'image LiDAR. L'image ci-dessus représente un extrait du MNT LiDAR (traité en SVF ; cf. infra, chapitre 4) dans le bois d'Ormont au nord du massif. On y voit en noir des réseaux de défense (linéaires), des abris (formes polygonales) et cratères d'obus (disques). A : rendu avant traitement. B : rendu après filtrage (lors de l'utilisation du module Mesh denoise de SAGA GIS, les paramètres suivants ont été retenus : threshold = 0.9 ; number of iterations for normal updating = 10 ; number of iterations for vertex updating = 20). On constate une disparition assez significative des aspérités naturelles du relief. En complément, les contours des formes sont régularisés.*

Le second paramètre a résidé dans le poids du fichier généré à l'issue de l'interpolation. Bien que cela puisse constituer un détail, cette variable peut vite devenir un handicap et ce, dès l'étape de l'interpolation. En produisant un MNT à haute résolution, le nombre de pixels à créer est plus important et implique l'ordinateur dans des calculs fastidieux. À l'inverse, en

privilégiant une résolution grossière, le nombre de pixels à traiter est faible et le temps de traitement est optimisé (Gao, 1997 ; Hengl et Evans, 2009). Maleika (2015) a tenté de quantifier la variation de la taille des fichiers en fonction de la résolution choisie sur une zone d'1 km². Le résultat est spectaculaire puisqu'à une résolution de 10 m, le MNT obtenu ne pèse que 0,04 MB alors qu'il s'alourdit considérablement avec un pixel de 1 cm (381 MB), soit une multiplication par 9 525 du poids de l'image ! Il paraît donc évident de choisir une résolution adaptée à la taille du jeu de données en entrée et aux capacités de calcul de l'ordinateur utilisé pour les traitements. Ainsi, **une résolution de 20 cm est privilégiée pour notre jeu de données.** L'échelle de 50 cm proposée par SINTEGRA n'est pas adaptée aux plus petites formes étudiées, en l'occurrence les cratères d'obus de 75 mm. Aussi, l'exploitation d'une résolution de 10 cm sur un échantillon de MNT ne permet pas de rendre compte d'une amélioration du rendu mais accentue au contraire le bruit causé par les aspérités naturelles du relief. Enfin, la taille du fichier obtenu (9,03 GB) est jugée raisonnable pour la réalisation des traitements destinés à cartographier et quantifier les formes mais constitue en revanche une résolution un peu trop importante pour des personnes n'utilisant qu'un seul ordinateur[17].

3.4. Débruitage du MNT

L'interpolation des points *sol* à partir de la méthode des voisins naturels et d'une taille de pixel de 20 cm a permis de produire un MNT particulièrement adapté à la détection des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun. Toutefois, la grande précision de cette image se retrouve biaisée par le bruit causé par les aspérités de très faible dimension (de l'ordre du centimètre). Parce que cette information supplémentaire peut complexifier l'interprétation de la géométrie des formes, il a été décidé de la supprimer en recourant à un algorithme de lissage nommé *mesh denoise* dans la littérature, développé par Sun (2007). À l'inverse des méthodes communes de filtrage[18], celle-ci possède la particularité de ne pas lisser les formes mais de conserver leur angulosité. Initialement destiné à améliorer le rendu 3-D d'objets artistiques, l'algorithme a été réadapté en géomorphologie par Stevenson *et al.* (2010) et testé sur différents types de MNT d'une résolution parfois importante (jusqu'à 6 m de résolution). Les résultats montrent que, quel que soit le MNT exploité, la surface est largement améliorée sur les portions planes (où le bruit est plus important) et qu'elle reste pratiquement inchangée sur les secteurs à pentes fortes (autrement dit, ces formes anguleuses ne sont pas lissées mais préservées). En prévision de traitements approfondis, **le MNT de la forêt domaniale de Verdun a donc été débruité en utilisant l'algorithme *mesh***

[17]Les ressources logistiques offertes par le Pôle Image de l'université Paris-Diderot ont permis d'utiliser simultanément jusqu'à 10 ordinateurs pour effectuer les traitements.

[18]Il existe de nombreuses méthodes de lissage (filtres linéaires, non linéaires ou variables). Une méthode assez commune consiste à appliquer un filtre de Gauss sur l'image. Dans notre cas, ce filtre a possédé le net désavantage de flouter l'image, éliminant ainsi l'angulosité des formes.

denoise disponible dans le module du même nom de SAGA GIS®. Les résultats montrent une profonde amélioration du rendu (figure 3.14).

4. Conclusions

La mission LiDAR menée en 2013 sur la forêt domaniale de Verdun a conduit à la production d'un nuage de points particulièrement dense composé de plus de 5 milliards de données altimétriques sur une surface d'environ 120 km², représentant une moyenne de 45 points/m². À titre de comparaison, la précision d'acquisition de la première mission LiDAR aéroportée réalisée en France, en contexte forestier et à des fins archéologiques (Georges-Leroy *et al.*, 2011), déjà exceptionnelle à l'époque, n'était que de 5,2 points/m². Le jeu de données sur lequel repose ce travail de thèse est donc extrêmement précis. L'étude des points *sol*, catégorie de mesure particulièrement intéressante pour l'analyse du relief, a montré la présence d'une certaine hétérogénéité dans leur répartition au sein même du territoire forestier. Plus que les zones à forte densité de points souvent liées au passage répété du faisceau laser, ce sont les « vides » qui nous ont interpellés. Du fait qu'ils coïncidaient avec la géométrie du parcellaire forestier, l'hypothèse d'un rôle limitant joué par la nature biogéographique du terrain a été émise, nous impliquant dans une démarche de validation sur le terrain. Comme l'ont montré de nombreuses études, **l'évaluation *in situ* de la fiabilité des données LiDAR sous différentes essences forestières a permis de mettre en lumière une approximation assez importante des valeurs altimétriques sous forêt résineuse**, **de l'ordre de 25 cm en moyenne**, imprécision moins importante mais tout de même présente en contexte de feuillus (3 cm). Parce que la correction du nuage semble difficilement applicable au vu de la très grande taille du jeu de données (54,53 GB) et de la faiblesse de l'échantillonnage sur le terrain (aucune information sur les pinèdes ou les parcelles récemment plantées en hêtres), nous nous sommes contentés de considérer ces chiffres *a posteriori* sur les résultats. Ce chapitre visait aussi à déboucher sur la construction d'un MNT, support graphique servant à la production des résultats de la thèse. Après analyse de la littérature relative aux méthodes d'interpolation, **c'est finalement l'approche par voisins naturels qui a été retenue pour modéliser le relief sub-forestier**, celle-ci ayant l'avantage de produire des résultats à la fois précis et rapides. La production d'un MNT de qualité reposait également sur la sélection d'une résolution adaptée au phénomène étudié. **Un *grid* de 20 cm semblait être la solution la plus conforme à nos données**, essentiellement pour sa relative précision et la taille exploitable du fichier ainsi créé. Enfin, **un ultime traitement de préparation du MNT a dû être réalisé en faisant appel à l'algorithme de débruitage de Sun *et al.* (2007)**, ayant pour objectif d'améliorer le rendu de l'image en éliminant le bruit causé par les aspérités naturelles du relief, élément pouvant constituer un frein aux futurs traitements.

Chapitre 4
Visualisation des données LiDAR et déploiement d'une méthode de cartographie des polémoformes

Après avoir décrit et évalué la fiabilité du jeu de données LiDAR puis construit le MNT, nous entrons dans le cœur méthodologique de la thèse ayant consisté à cartographier et classifier les polémoformes de la forêt domaniale de Verdun. Cinq étapes fondamentales caractérisent cette partie de la méthodologie :

1) Le MNT préalablement construit doit permettre de mettre en lumière les aspérités de la topographie sub-forestière. Pour ce faire, différentes méthodes de visualisation sont appliquées afin d'explorer le terrain et obtenir un aperçu global de la localisation et de la variété des formes à étudier.
2) Des observations sont menées sur le terrain et croisées au MNT pour servir d'apprentissage à la reconnaissance des polémoformes. En parallèle, deux sites échantillons sont prospectés de manière quasi exhaustive pour servir de base de validation lors de la phase de détection.
3) L'inventaire exhaustif des formes contenues par le MNT est entrepris sur les deux zones échantillons en utilisant une méthode de cartographie semi-automatisée. Les résultats de la détection sont contrôlés au moyen des observations *in situ*, qui servent à la calibration de la méthode jusqu'à l'obtention de statistiques de détection satisfaisantes. Une fois validée, la méthode est généralisée à l'ensemble de la forêt domaniale de Verdun.
4) L'analyse de la géométrie des formes extraites à l'aide des SIG permet de produire des tableaux de données morphométriques. Des analyses statistiques univariée et multivariée sont conduites sur ces tableaux pour étudier la variété morphométrique des formes. Elles servent à les classifier et à proposer une première cartographie des formes de la forêt domaniale de Verdun.
5) Les volumes contenus par chacune des formes sont quantifiés pour affiner la première cartographie. L'étude des relations de voisinage entre déblais/remblais sert de tri pour repérer les erreurs de classification. L'analyse des relations de proximité entre les formes permet d'affiner les précédentes cartographies en rendant possible la détection d'incohérences dans leur localisation.

1. Analyse préliminaire à partir des méthodes de visualisation de données LiDAR

Comme le font généralement tous les *lidaristes*[1], le travail de cartographie que nous allons réaliser nécessite une exploration du terrain à partir des SIG et des différents outils de visualisation qu'ils proposent. Depuis l'essor des MNT à haute résolution en sciences humaines, notamment dans le domaine de l'archéologie (cf. *supra*, chapitre 3), de nombreuses méthodes de traitement de ces données sont apparues ou ont résulté d'une modernisation de techniques plus anciennes. Nous proposons de présenter les méthodes communément appliquées à des MNT hautement précis et de sélectionner celles les plus à mêmes de répondre à nos objectifs de cartographie.

1.1. Approches par l'analyse de la lumière solaire

1.1.1. Ombrage

L'ombrage ou *analytical hill-shading* (figure 4.1) développé par Yoëli (1965) est une méthode de visualisation standard couramment utilisée pour visualiser un MNT. Elle a l'avantage d'offrir des résultats rapides et précis dans le cas où l'éclairage est correctement paramétré (Devereux *et al.*, 2005 ; Smith et Clark, 2005 ; Nuninger *et al.*, 2010 ; Challis *et al.*, 2011 ; Georges-Leroy *et al.*, 2011 ; Kokalj *et al.*, 2011 ; Zakšek *et al.*, 2011 ; Laplaige, 2012 ; Kokalj *et al.*, 2013 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014). En effet, **ce mode de visualisation permet de simuler une illumination du terrain par une source lumineuse artificielle reconstituant la lumière solaire**. La provenance de cette lumière solaire « hypothétique » dépend de l'azimut (0 à 360°) et de l'angle zénithal (0 à 90°) choisis en amont (Challis *et al.*, 2011 ; Georges-Leroy *et al.*, 2011 ; Kokalj *et al.*, 2011 ; Laplaige, 2012 ; Fruchart, 2014 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014 ; Hesse, 2014 ; Guyot *et al.*, 2018). Ce mode de visualisation offre un large choix de combinaisons possibles pour des résultats variés. L'ombrage est particulièrement adapté aux topographies planes car il permet de repérer assez facilement les objets creux ou surélevés notamment quand une lumière rasante est utilisée. En revanche, il procure de moins bons résultats lorsque la topographie est accidentée car une telle configuration du relief fait émerger dans l'image des ombres portées. Pour pallier cette difficulté, nous avons adapté les paramètres d'illumination à l'importance et l'orientation de la pente. L'ombrage a été utilisé ponctuellement car le relief rugueux des Hauts de Meuse ne permet pas de visualiser de manière homogène l'ensemble du MNT de la forêt domaniale de Verdun (les ombres portées cachent les polémoformes des ravins).

[1]Ce métier n'est pas officiellement reconnu bien que le terme soit de plus en plus utilisé pour désigner les personnes travaillant dans le champ de la télédétection LiDAR.

1.1.2. Ombrage multidirectionnel et analyse en composantes principales

La faible capacité de visualisation de l'ombrage dans des contextes de topographie accidentée a orienté les chercheurs vers d'autres alternatives. **Une première méthode, l'ombrage multidirectionnel, consiste à calculer les images acquises à plusieurs azimuts** (Devereux *et al.*, 2008 ; Kokalj *et al.*, 2011 ; Zakšek *et al.*, 2011 ; Laplaige, 2012 ; Štular *et al.*, 2012 ; Kokalj *et al.*, 2013 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014). Généralement, seize azimuts sont proposés dans la littérature et dans les logiciels. Plutôt que d'analyser ces images séparément, il est possible d'en faire une moyenne[2]. Toutefois, ces techniques possèdent leurs propres lacunes, d'abord parce qu'elles peuvent générer des illusions optiques faussant notre interprétation de la topographie (des objets creux peuvent paraître en surélévation ; Kokalj *et al.*, 2011 ; Hesse, 2014), ensuite parce que chaque azimut équivaut à une interprétation. Ainsi, l'analyse de l'image produite est rendue difficile, surtout quand celle-ci est calculée à partir d'un grand nombre d'azimuts (dans certains logiciels, soixante-quatre azimuts sont proposés). Afin de supprimer des effets de redondance inutiles (les images possédant des azimuts voisins offrent des rendus très similaires), Devereux *et al.* (2008) ont proposé d'utiliser les **analyses en composantes principales (ACP) pour résumer l'information contenue sur plusieurs images et pour rendre compte des similarités et dissimilarités entre elles** (Smith et Clark, 2005 ; Devereux *et al.*, 2008 ; Challis *et al.*, 2011 ; Kokalj *et al.*, 2011 ; Zakšek *et al.*, 2011 ; Laplaige, 2012 ; Štular *et al.*, 2012 ; Kokalj *et al.*, 2013 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014). Conformément au principe de l'ACP, les images calculées constituent des composantes (combinaisons de variables, ici, des azimuts). Il est ensuite possible d'afficher une par une ces composantes ou de les combiner. Certes, cette méthode d'analyse multivariée résume l'information contenue par plusieurs images (par exemple seize) en seulement deux ou trois images mais l'interprétation n'en est pas moins facilitée (figure 4.1). Aucune de ces deux méthodes n'a été retenue pour analyser le relief de la forêt domaniale de Verdun.

1.1.3. Sky-view factor

Une autre méthode de visualisation est le *sky-view factor* (*SVF* ; figure 4.1), utilisée bien avant l'apparition du premier MNE en 1986 (mission SPOT 1). En reprenant les travaux de Nusselt (1928) sur les facteurs de vue *(view factors)*, Reifsnyder a introduit en 1967 une nouvelle méthode **permettant d'évaluer la proportion d'énergie radiative reçue par une surface donnée** : « *the view factor for the portion of sky visible* », aujourd'hui appelé *sky-view factor*. En 1990, Dozier et Frew ont développé un algorithme permettant de calculer le *SVF* sur chaque pixel d'un MNT. Généralisé, cet indice est aujourd'hui fréquemment utilisé dans le domaine de la géographie et de l'archéologie (Nuninger *et al.*, 2010 ; Challis *et al.*, 2011 ;

[2]Un poids peut également être donné aux azimuts en fonction de l'orientation de la pente (cas du modèle MDOW ; *Multi-Directional Oblique Weighting Model* ; Nuninger *et al.*, 2010).

Kokalj *et al.*, 2011 ; Zakšek *et al.*, 2011 ; Laplaige, 2012 ; Štular *et al.*, 2012 ; Kokalj *et al.*, 2013 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014 ; Guyot *et al.*, 2018). De nombreux outils ont été développés et intégrés dans les SIG, rendant le calcul du *SVF* relativement simple, d'où sa popularité. Quelques paramètres doivent néanmoins être définis en amont (longueur du rayon de calcul, nombre d'azimuts). Comparé à la méthode de l'ombrage, le *SVF* se fonde sur une illumination diffuse (dans toutes les directions à l'intérieur d'une demi-sphère) et non pas unidirectionnelle. Les ombres portées sont ainsi supprimées (Kokalj *et al.*, 2011). Cet indice permet d'obtenir de meilleurs résultats lorsque la topographie est accidentée. Néanmoins, la lecture du relief est rendue difficile sur les surfaces à forte pente puisque l'illumination y est moindre (image sombre ; Laplaige, 2012). De plus, les structures en surélévation sont assez mal délimitées à l'inverse de celles qui sont creuses (Doneus, 2013). Sur le plan graphique, il génère une image en noir et blanc. Les valeurs proches de 0 (noir) signifient que les pixels occupent des surfaces creuses car celles-ci sont peu éclairées. À l'inverse, les valeurs proches de 1 (blanc) indiquent qu'ils se situent en surélévation (proportion de ciel visible importante). Sur le champ de bataille, le *SVF* a été efficace pour localiser les polémoformes qui, le plus souvent creuses, sont plus sombres que le reste de l'image (cf. *infra*, 3.3).

1.1.4. Indice d'ouverture topographique

Afin de résoudre ce problème de visualisation lié à la pente, une autre méthode a été proposée par Yokoyama *et al.* (2002) : l'indice d'ouverture topographique, généralement nommé *openness* dans la littérature, **permettant d'évaluer si la vue est obstruée ou dégagée depuis une surface donnée** (Yokoyama *et al.*, 2002 ; Prima *et al.*, 2006 ; Zakšek *et al.*, 2011 ; Doneus, 2013 ; Guyot *et al.*, 2018). Cette méthode dérivée du *SVF* ne se limite plus au calcul de l'illumination dans une demi-sphère, l'horizon variant en fonction de la rugosité de la surface. Cela signifie que l'indice d'ouverture topographique est insensible à la pente. Il offre donc un meilleur contraste sur les versants abrupts et une délimitation plus claire des objets en surélévation (Doneus, 2013). Tout comme le *SVF*, la longueur du rayon de calcul ainsi qu'un nombre d'azimuts doivent être prédéfinis. À l'issue du traitement, deux images sont calculées (Doneus, 2013) : une image en ouverture positive (*positive openness* ; figure 4.1), l'autre en ouverture négative (*negative openness* ; figure 4.1). L'indice d'ouverture positive est calculé en établissant la moyenne des angles zénithaux. Lorsqu'il est haut, cela signifie que l'espace étudié domine son voisinage. À l'inverse, quand il est bas, le degré de fermeture est élevé et l'espace est alors considéré comme creux (visibilité obstruée par les flancs). L'indice d'ouverture négative, lui, est le résultat de la moyenne des angles nadir. Ainsi, un indice faible est associé à une concavité, un indice fort, à une convexité. Bien que ces deux indices semblent très proches du point de vue des résultats apportés, ils sont en fait complémentaires puisque les angles calculés diffèrent. Par exemple, l'indice d'ouverture négative rend mieux compte de la morphologie du fond d'une tranchée que l'indice d'ouverture positive. Ainsi, l'indice d'ouverture topographique se révèle être une méthode particulièrement adaptée au MNT de la forêt domaniale de Verdun, en particulier lorsqu'il s'agit de détecter les polémoformes situées à flanc de coteau.

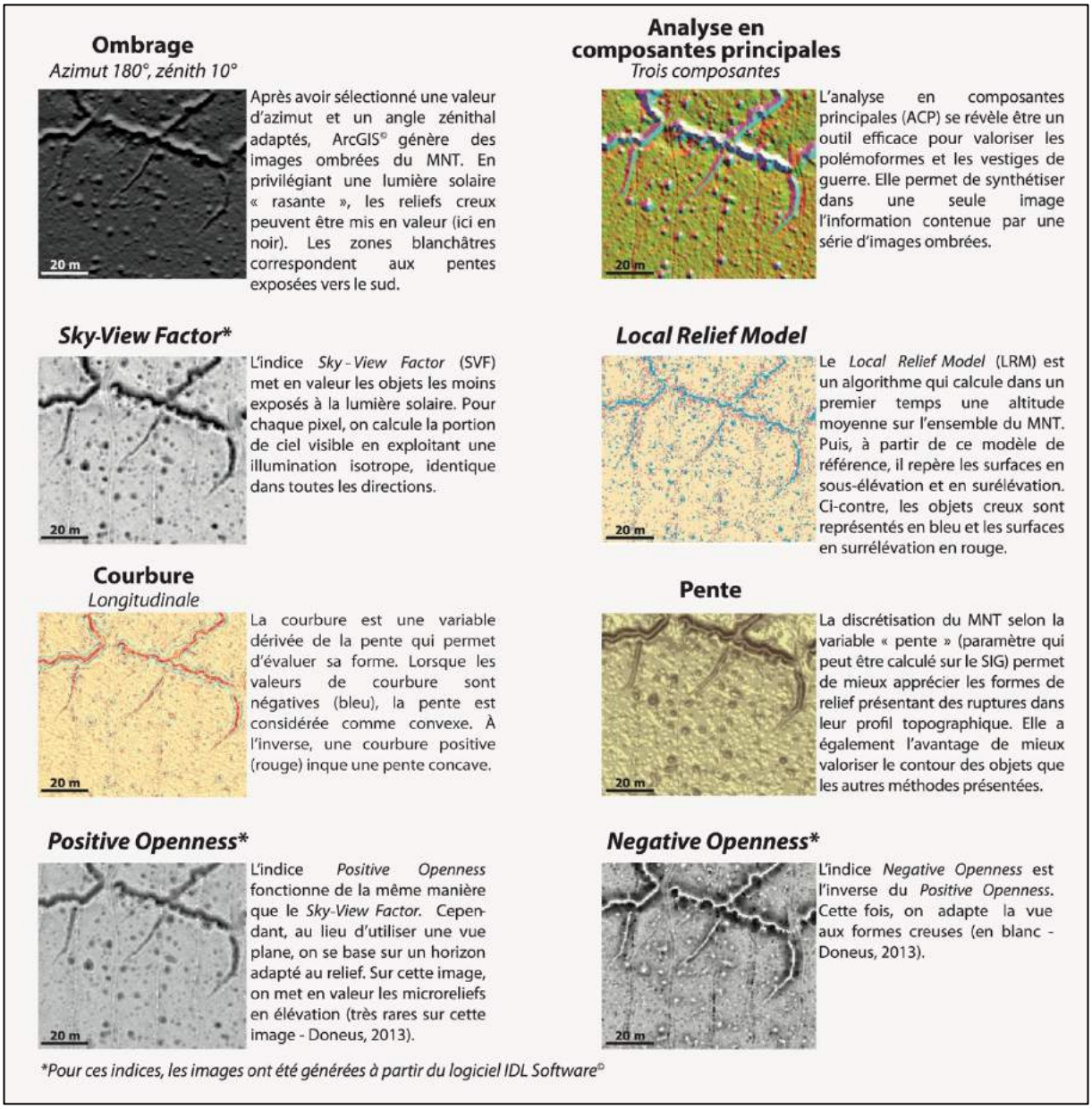


Figure 4.1 *– Synopsis des différentes méthodes de visualisation employées pour la détection des vestiges de guerre (modifié de De Matos-Machado* et al.*, 2016)*

1.2. Approches par la topographie

1.2.1. Pente

Un moyen rapide et efficace de mettre en évidence les aspérités du relief consiste à calculer la pente de chaque pixel, paramètre disponible dans la plupart des SIG (figure 4.1). Elle se calcule après avoir déterminé l'écart d'élévation qui caractérise un pixel et ses voisins (Smith et Clark, 2005 ; Prima *et al.*, 2006 ; Klingseisen *et al.*, 2008 ; Hengl et Reuter, 2009 ; Challis *et al.*, 2011 ; Fruchart, 2014 ; Laplaige, 2012 ; Štular *et al.*, 2012 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014). En complément de sa simplicité de calcul, la pente possède l'avantage d'être facilement compréhensible par l'utilisateur puisqu'elle s'exprime en degrés ou en %. Avec ces unités de mesure, il est aisé de discrétiser le MNT en classes et d'assimiler une valeur de seuil lors de la réalisation de masques binaires. D'un point de vue visuel, l'analyse d'une image des pentes révèle les moindres variations du relief. Ainsi, une tranchée, avec ses flancs raides proches de la verticalité se détache particulièrement bien dans un environnement plan. Les routes et voies ferrées, par leur largeur et leur platitude, contrastent tout aussi bien avec le reste de l'image. La pente sert aussi à analyser au préalable la géométrie 3-D des formes, notamment pour détecter des phénomènes de concavités ou de convexité dans leur profil bien que la courbure (ci-après) soit plus adaptée pour ce genre d'opération. Pour faciliter la lecture des images de pente, des courbes de niveau peuvent être superposées (Hengl et Reuter, 2009 ; Nuninger *et al.*, 2010 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014). D'autres auteurs proposent de la combiner avec l'ombrage pour de meilleurs rendus (Doneus et Briese, 2010 ; Laplaige, 2012 ; Štular *et al.*, 2012). Ainsi, la pente est un outil particulièrement bien adapté à l'analyse des formes du champ de bataille de Verdun (cf. *infra*, 3.3) et a souvent été employé durant les sorties de terrain.

1.2.2. Courbure

En complément de la pente, dont il est dérivé, l'indice de courbure *(curvature)* est un autre moyen de détecter des variations topographiques au sein d'un MNT (figure 4.1). **Caractérisant la forme des pentes, il permet une analyse plus précise de la géométrie des formes et leur profil 3-D**, d'où son utilité dans le domaine de la géomorphologie dynamique et de la modélisation des écoulements. Introduit dans les années 70 par Evans (1972, 1980) puis repris par d'autres auteurs (Heerdegen et Beran, 1982 ; Zevenbergen et Thornes, 1987 ; Smith et Clark, 2005 ; Klingseisen *et al.*, 2008 ; Pirotti et Tarolli, 2010), l'indice de courbure fait l'objet de nombreuses confusions dans la littérature notamment parce que le même terme est utilisé en mathématiques. Schmidt *et al.* (2003) ont clarifié la définition de cet indice largement utilisé en géomorphologie. Même si différentes manières de le calculer existent, ils distinguent principalement 1) la courbure longitudinale (ou profil ; en anglais : *contour curvature*, *profile curvature*), et 2) et la courbure transversale (ou planiforme ; en anglais : *plan curvature*, *planform curvature*, *tangential curvature*). Les définitions proposées par ESRI (2018a) sont particulièrement explicites pour décrire ces deux indices. Du fait que cet indice

constitue l'un des seuls à proposer des chiffres précis sur la géométrie 3-D des formes, il sera exploité lors de la phase de classification (cf. *infra*, 3.3).

1.2.3. Modèle de relief local

Le modèle de relief local, généralement nommé dans la littérature *local relief model* (LRM) et dans une moindre mesure *trend removal* ou *residual relief* (figure 4.1), **est une méthode qui sépare les reliefs de petite taille de la tendance topographique générale**[3] (Hiller et Smith, 2008 ; Hesse, 2010 ; Challis *et al.*, 2011 ; Laplaige, 2012 ; Štular *et al.*, 2012 ; Kokalj *et al.*, 2013 ; Georges-Leroy *et al.*, 2014 ; Guyot *et al.*, 2018). Contrairement aux autres méthodes de visualisation et d'extraction de relief, quelques traitements sont nécessaires avant d'obtenir l'image souhaitée. Exposons les étapes majeures (cf. Hesse, 2010) :

1) La première opération, le lissage du MNT, supprime les reliefs de petites tailles et de faire apparaître uniquement les grandes formes du relief.
2) L'algorithme procède ensuite à la soustraction des deux MNT (le MNT d'origine et le MNT lissé) pour créer une nouvelle image conservant les petits reliefs en sous-élévation ou en surélévation par rapport au niveau topographique général (MNT lissé).
3) La différence est une image composée de valeurs métriques négatives et positives : les valeurs négatives correspondent aux reliefs concaves (creux), les valeurs positives, aux reliefs convexes (surélevés), les valeurs proches de 0 représentent la tendance topographique générale (formes planes), autrement dit un niveau 0 théorique.

Très efficace dans des contextes de topographie plane, le modèle de relief local présente des lacunes lorsqu'il est appliqué sur des secteurs à forte pente (Hesse, 2010 ; Štular *et al.*, 2012 ; Doneus, 2013 ; Kokalj *et al.*, 2013). Ainsi, des problèmes de délimitations de relief peuvent être constatés sur les versants abrupts. Toutefois, ce manque est largement compensé par la capacité du modèle à distinguer les reliefs concaves et convexes, chose que ne permettent pas de faire les autres méthodes de visualisation présentées. Aussi, le modèle fournit directement la profondeur ou la hauteur des objets extraits (Hesse, 2010), ce qui est un grand avantage lorsqu'on souhaite acquérir les paramètres morphométriques des polémoformes. **Pour toutes ces raisons, la méthode LRM sera privilégiée pour le traitement du MNT de la forêt domaniale de Verdun.**

[3]Plusieurs algorithmes ont été proposés ces dernières années, notamment celui de Hesse (2010), qui est aujourd'hui le plus cité.

1.3. Approches par la modélisation hydrologique

Un autre moyen de repérer les polémoformes consiste à modéliser les réseaux hydrographiques du MNT. Cela est possible grâce aux outils d'hydrologie disponibles dans de multiples SIG. En analysant l'altitude de chaque pixel du MNT, le logiciel détermine la direction des flux d'eau théoriques. Sous l'effet de la gravité, un flux se dirige toujours vers le ou les pixels de plus basse altitude. De cette manière, le réseau de drainage peut être reconstitué (Zevenbergen et Thorne, 1987 ; Tarboton, 1997 ; Gruber et Peckham, 2009 ; figure 4.2). Une des particularités des polémoformes réside dans leur endoréisme et leur forme creuse de type « dépression fermée » (cf. *supra*, chapitre 1). Durant les mois d'hiver, lorsque les nappes phréatiques sont saturées, les eaux sont piégées par ces dépressions. **L'analyse du réseau de drainage modélisé à partir des SIG permet de repérer directement ces reliefs creux sans exutoire qui créent un effet d'entonnoir** (tous les flux voisins sont capturés ; Angel *et al.*, 2004 ; Reif *et al.*, 2009 ; Rahimi et Alexander, 2013 ; Telbisz *et al.*, 2016 ; Wu et Lane, 2016 ; figure 4.2).

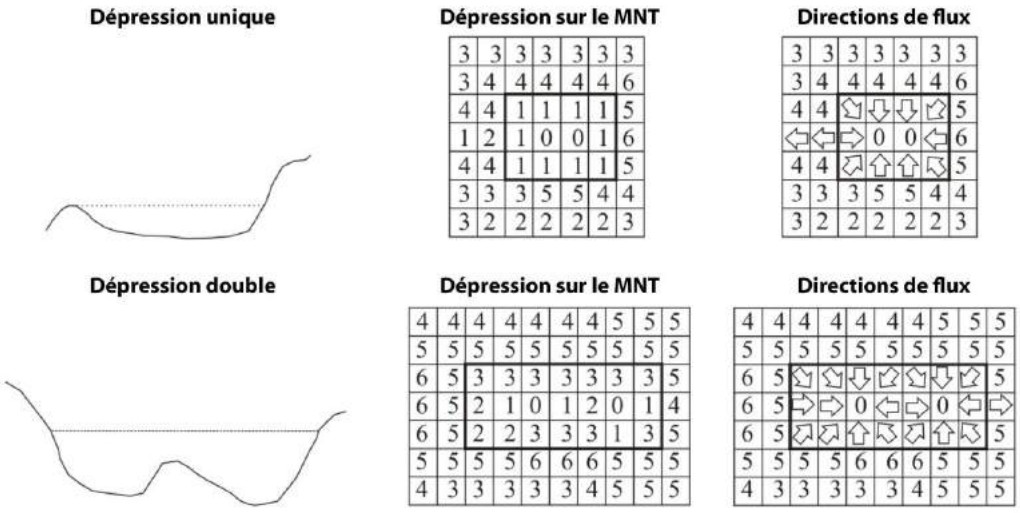


Figure 4.2 *– Dépression sur le terrain et sur un MNT (traduit et modifié de Vesakoski et al., 2014)*

Les cratères d'obus et les constructions en mou isolés répondent parfaitement à cette loi et peuvent être facilement identifiés par cette technique de cartographie. En revanche, cette méthode s'avère moins efficace pour détecter les fossés linéaires (tranchées, boyaux de communication) d'abord parce que l'effet d'entonnoir est moins évident (la forme est ouverte sur deux côtés) et du fait que l'irrégularité du profil des fonds de fossés cause des difficultés d'interprétation (par endroit, le fossé peut être plus profond, faisant alors apparaître des concavités dans le profil longitudinal[4]). Dans d'autres cas, les fossés ont été aménagés dans le sens de la pente. Une telle configuration facilite le repérage de ces formes sur SIG

[4]Le logiciel interprète alors ces tranchées comme une succession de cuvettes et non pas comme des structures linéaires continues.

puisqu'elles canalisent les eaux de la même manière qu'un talweg. Néanmoins, ces exemples sont rarement observés sur le MNT. Pour résumer, l'approche par la modélisation hydrologique est intéressante pour cartographier les dépressions fermées et de forme compacte (*i.e.*, cratères d'obus, abris, emplacements de canon). En revanche, elle est moins adaptée à la détection des formes linéaires. Cette technique n'est donc pas efficace pour cartographier toutes les catégories de formes en forêt domaniale de Verdun. Enfin, elle ne donne aucune information concernant les formes en surélévation (*i.e.*, couronnes d'éjectas, remblais, parapet et parados). Par conséquent, cette méthode de cartographie n'a pas été retenue.

1.4. Méthodes alternatives non testées

1.4.1. Indice d'insolation

L'insolation (ou irradiance), mesure très fréquente en géographie et plus particulièrement en climatologie, se définit par « *l'exposition d'un objet au rayonnement solaire direct* » (Météo France). Son calcul au moyen des SIG a été proposé par Hetrick *et al.* (1993) qui ont implémenté la boîte à outils Solarflux pour Arc/Info[5]. **L'indice d'insolation se calcule en évaluant l'énergie solaire reçue par chaque pixel d'un MNT** (Hengl et Reuter, 2009 ; Challis *et al.*, 2011). Pourtant plus ancien que d'autres méthodes décrites plus haut, l'indice d'insolation est assez peu utilisé pour visualiser la topographie d'un MNT à haute résolution. Une des raisons principales réside dans son temps de calcul particulièrement long (raison pour laquelle il n'a pas été appliqué dans l'étude). Les utilisateurs de SIG privilégient plutôt le SVF pour détecter des anomalies topographiques, bien que ce dernier calcule la portion de ciel visible (et non pas le total du rayonnement solaire reçu). De plus, le grand nombre d'options proposées pour le calculer peut désorienter l'utilisateur. Cependant, son application en architecture est devenue fréquente dans un contexte d'augmentation de la demande en énergie solaire photovoltaïque (Carneiro *et al.*, 2009 ; Lukač *et al.*, 2014 ; Martínez-Rubio *et al.*, 2016).

1.4.2. Indice de position topographique

À l'instar du modèle de relief local, l'indice de position topographique, plus connu sous le nom de *topographic position index* (TPI) ou *difference from mean elevation* (DIFF), **évalue la position *z* de chaque pixel par rapport à un niveau 0 théorique** (Guisan *et al.*, 1999 ; De Reu *et al.*, 2013 ; Mokarram *et al.*, 2015). Contrairement au LRM qui calcule une différence d'élévation entre un pixel et une surface lissée, le TPI calcule une différence d'élévation entre un pixel et la moyenne de ses voisins (la taille du voisinage est définie par l'utilisateur). Cette

[5]Ancien nom de la version avancée ArcGIS (avant 10.1).

méthode de calcul est relativement récente : proposée en 1999 par Guisan *et al.*, elle a été reprise par Gallant et Wilson (2000), par Weiss (2001) et Jenness (2006). Son usage est fréquent pour caractériser les grandes formes de relief (plaine, plateau, vallées, montagnes, etc.) ou les macro- et micro-reliefs[6]. L'indice produit une carte composée de valeurs *positives*, correspondant à des pixels plus hauts que la moyenne d'élévation environnante (reliefs surélevés), et *négatives*, correspondant à des pixels plus bas que la moyenne d'élévation environnante (reliefs creux). Enfin, les valeurs proches de 0 représentent les reliefs plats mais aussi les reliefs à pente régulière (Jenness, 2006). Découvert plus tardivement que le LRM, le TPI n'a pas été appliqué au MNT LiDAR de la forêt domaniale de Verdun.

1.5. Synthèse et choix des méthodes retenues pour l'inventaire et l'analyse morphométrique des formes

Malgré l'essor assez récent du LiDAR en sciences humaines, il existe un grand nombre d'outils de visualisation adaptés à l'analyse de MNT à haute résolution. La description de chacun d'entre eux a permis de rendre compte d'une certaine redondance, à l'image du LRM et du TPI, qui produisent des résultats tout à fait comparables. La complexité et la vitesse de calcul, ainsi que la facilité de lecture des résultats ont constitué des critères décisifs dans le choix des méthodes exposées. De manière générale, des utilisateurs peu expérimentés (les plus nombreux) privilégient des outils simples proposant des résultats rapides et faciles d'interprétation. Ainsi, il n'est pas étonnant de voir que l'ombrage, le SVF et la pente sont à l'heure actuelle les méthodes de visualisation les plus populaires pour les raisons évoquées ci-dessus. Par ailleurs, la plupart des auteurs converge dans l'idée de croiser ces approches afin de permettre de meilleurs rendus. Sans l'usage des courbes de niveau ou du SVF, l'image des pentes peut provoquer quelques confusions dans la lecture du relief, conduisant à des interprétations erronées. Cette approche croisée a donc un intérêt. Ce travail a retenu les méthodes les plus pertinentes pour l'analyse de polémoformes spécifiques à la forêt domaniale de Verdun. **L'algorithme de Hesse (2010) permettant de produire un LRM a été sélectionné pour l'extraction des formes depuis le MNT**. L'outil est facilement accessible sur internet et possède l'avantage de produire dans un délai relativement court des résultats pertinents et faciles d'interprétation (Kokalj *et al.*, 2011 ; Zakšek *et al.*, 2011; Relief Visualization Toolbox, 2015). **Le *SVF*, utilisé lors des opérations d'interprétation, de cartographie des formes linéaires** (cf. *infra*, § 3.2.5), **a constitué l'outil de premier choix (avec la pente) pour la production de fonds cartographiques de terrain**. Enfin, **la pente et la courbure ont servi au calcul de variables morphométriques pour caractériser la géométrie 3-D des formes compactes inventoriées**. Après avoir présenté les différentes méthodes de visualisation exploitées pour la cartographie des polémoformes, intéressons-nous aux observations effectuées sur le terrain et aux bénéfices apportés en termes d'interprétation.

[6]Weishampel *et al.* (2011) se sont servis du TPI pour localiser au Bélize des artefacts maya sous forêt ; Doctor et Young (2013) l'ont utilisé pour détecter des dépressions karstiques dans l'État de Virginie (USA) ; Brenot *et al.* (2016) l'ont exploité pour extraire les polémoformes contenues sur un MNT LiDAR du bois de la Gruerie (Argonne).

2. Appréciation des formes sur le terrain et acquisition d'une base de données de validation

Avant de procéder à la cartographie des formes de la forêt domaniale de Verdun, il était impératif de se rendre sur le terrain pour avoir une idée réelle de la taille des objets étudiés et de leur diversité morphologique. Cela a permis notamment d'éviter les valeurs morphométriques aberrantes dans les tableaux de données. En complément, ces missions de terrain ont consisté à acquérir une base solide de validation pour la cartographie finale, en échantillonnant et interprétant près de 1 000 formes réparties sur près de 1 000 ha (1/10e du territoire forestier). Ainsi, cette deuxième partie du chapitre présente les sites visités entre 2013 et 2017 ainsi que la démarche méthodologique envisagée.

2.1. Liste des sites visités entre 2013 et 2017

2.1.1. Connaissances générales acquises sur les paysages de guerre

Bien que l'étude ait essentiellement porté sur le champ de bataille de Verdun, nos connaissances des paysages de guerre ont préalablement été recueillies sur d'autres sites. En 2013, le mémoire de Master 1 a repris les travaux de Hupy (2005) pour évaluer l'influence du terrain et de la géologie sur la variabilité morphologique des polémoformes sur le champ de bataille de la Somme (et secondairement les sites de Vimy[7] et Verdun ; cf. *supra*, chapitre 1). C'était là une première occasion de se familiariser avec les polémoformes. Il s'en est suivi au printemps 2014 la découverte du champ de bataille d'Ypres[8] (Belgique) dans le cadre de la conférence sur les paysages de guerre organisée par l'université de Gand *(Conflict landscapes from above)*, qui nous a fait découvrir des formes aux géométries différentes inscrites dans les plaines argileuses et humides de Flandres. Nos voyages sur le champ de bataille de l'Isonzo[9] en Slovénie (à l'occasion d'une autre conférence : *rediscovering the Great War multidisciplinary research of modern conflicts*), sur le site de la bataille de Gettysburg[10] aux États-Unis, de l'Hartmannswillerkopf[11] (Alsace) ou de la Pointe du Hoc[12] (Normandie) ont été aussi riches en apprentissage. Ces observations internationales nous ont permis d'aiguiser notre regard pour mieux reconnaître les formes de la guerre et mieux interpréter les facteurs de leur variabilité.

---

[7]La crête de Vimy dans les Hauts de France a été le théâtre d'une bataille décisive en 1917.

[8]Il s'agit d'un autre site emblématique de la Première Guerre mondiale sur lequel ont eu lieu les 4 batailles d'Ypres (1914, 1915, 1917, 1918). « L'ypérite », surnom donné au « gaz moutarde », provient du nom de ce champ de bataille car c'est ici que l'arme a été employée pour la première fois.

[9]Lieu de 12 affrontements entre Italiens et Austro-Hongrois entre 1915 et 1917.

[10]Bataille décisive de la guerre de Sécession (1863).

[11]L'Hartmannswillerkopf, Vieil Armand en français, a été le site de combats de 1915 entre Français et Allemands.

[12]Un des sites du débarquement allié du 6 juin 1944.

2.1.2. Missions de terrain en forêt domaniale de Verdun

Au cœur de l'étude, le site du champ de bataille de Verdun a fait l'objet de nombreuses visites (figure 4.3 et tableau 4.1) à commencer par celles de 2013 menées dans le cadre de la réalisation du mémoire de Master 1. Cet exercice nous a appris à identifier dans les paysages les cratères d'obus aux formes si caractéristiques. En 2014, dans le cadre du mémoire de Master 2, trois nouveaux sites ont été sélectionnés sur la base des observations réalisées en 2013 afin d'en cartographier les vestiges de guerre à l'aide d'une approche archéogéomorphologique croisée à l'imagerie LiDAR, pour la première fois exploitée. L'étude a établi trois cartes d'interprétation, le bois d'Ormont, le bois des Caures et les environs de l'ouvrage de Froideterre, révélant diverses morphologies de polémoformes selon les camps et la topographie. Elle a également montré une certaine redondance des formes sur l'ensemble du massif, démontrant l'intérêt d'automatiser le travail de cartographie. Afin d'obtenir une interprétation des formes aussi exhaustive que possible, sept nouveaux sites répartis dans différents camps (allemands et français) et environnements physiques ont été partiellement échantillonnés en 2015 (première mission de terrain réalisée durant la thèse) : bois Chauffour, bois d'Haumont, secteur de la ferme d'Anglemont, Herbebois, butte-témoin des Jumelles d'Ornes, secteur du tunnel de Tavannes et sud de la commune d'Azannes-et-Soumazannes. Dans l'idée de contrôler la qualité de la cartographie des formes, deux sites partiellement échantillonnés en 2014 et 2015 ont de nouveau été prospectés en 2016, de manière quasi exhaustive. Les sites échantillons retenus sont le bois d'Ormont et la butte-témoin des Jumelles d'Ornes. Enfin, une dernière mission de terrain conduite en 2017 avec les mêmes objectifs que celle de 2015, a enrichi la base de données des formes interprétées. Cinq nouveaux sites ont été visités : bois d'Hardaumont, bois de Neuville, bois le Chaume, côte du Poivre et la Wavrille. **Au cours de ces quatre années de thèse**, **ce sont près de 1 000 ha de forêt qui ont été prospectés**.

2.2. Présentation de la démarche archéo-géomorphologique conduite sur le terrain

Nous considérons la démarche *archéogéomorphologique* (Thornbush, 2012, 2013 ; Hesse, 2014 ; Nicu, 2016 ; Henselowsky *et al.*, 2017 ; Gheyle *et al.*, 2018) comme une approche nouvelle née de l'essor des technologies digitales consistant à interpréter les formes en analysant à la fois leur morphologie, leur richesse archéologique et leur organisation, le tout de manière *in situ* (observations de terrain) et *ex situ* (analyse des données LiDAR). Notre approche n'a en aucun cas impliqué de fouilles archéologiques ou d'analyses de coupes stratigraphiques. Une simple prospection pédestre, parfois avec l'aide des archéologues du SRA et des agents de l'ONF, a été conduite, en complément de la visualisation de l'imagerie LiDAR. Ainsi, l'interprétation des formes a été réalisée en analysant leur géométrie (formes orthogonales aux pentes fortes voire verticales pour les constructions en mou ; formes plus émoussées pour les cratères d'obus), le mobilier archéologique éventuellement présent (*i.e.*, bouteilles, *militaria*, morceaux de tôles, éclats

d'obus, matériaux de construction, etc.), leur localisation sur le champ de bataille (relations de proximité, distance aux fossés, histoire forestière) et d'autres indices paysagers pouvant nous aider (*e.g.*, arbres centenaires, structures d'avant-guerre). Avant chaque mission de terrain, les coordonnées des formes à échantillonner ont été transférées du SIG vers un DGPS Trimble® GeoXT 3000 (au moyen du logiciel GPS Pathfinder Office®) équipé d'un écran tactile pour la visualisation de documents numériques (cartes IGN, données LiDAR, etc.). Un itinéraire reliant les échantillons a été planifié pour faciliter la navigation dans le sous-bois. En complément, un « dictionnaire » (table attributaire) a été créé puis intégré au DGPS. De cette manière, les informations récoltées sur le terrain ont directement été intégrées à l'appareil. Chaque sortie a été menée durant les mois de mars et avril, période phénologique où l'absence de feuillage des peuplements caducifoliés a offert un niveau de visibilité optimal[13]. Ces conditions étaient en effet nécessaires pour s'orienter et repérer à distance les formes à échantillonner. En complément du DGPS, le matériel de terrain a inclus un télémètre laser (pour mesurer *in situ* les dimensions des formes), un manuel de terrain (composé de cartes imprimées servant à l'orientation en cas de panne du DGPS ou de non réception de signal), une carte topographique (scan 25 de l'IGN), une boussole (en cas de panne ou d'inopérabilité du DGPS) et un appareil photographique (l'interprétation a parfois pu se faire après la mission de terrain avec l'aide des archéologues du SRA ou en analysant l'organisation des formes sur l'imagerie LiDAR). Au bilan, le travail de terrain a été un outil autant d'interprétation que de validation des formes identifiées par télédétection. Cependant, le couplage archéologie/étude morphologique, performant pour répondre aux besoins de l'étude, a parfois été inopérant en raison de la complexité de certains échantillons (coalescence de plusieurs formes) et/ou de l'absence d'artéfacts. **Ainsi**, **près de 879 formes ont été échantillonnées sur 15 secteurs différents de la forêt domaniale de Verdun**.

Site échantillonné	Année(s) de prospection	Nombre de formes interprétées
Bois d'Ormont	2014, 2015*, 2016	428
Jumelles d'Ornes	2013, 2015, 2016	323
Bois des Vignes	2014	30
Bois de Neuville	2017	28
Bois des Caures	2014, 2015*	26
Côte du Poivre	2017	25
Herbebois	2015	20
Bois Chauffour	2015	17
Bois d'Haumont	2015	16
Bois le Chaume	2017	14
Secteur de la ferme d'Anglemont	2015	13
Secteur du tunnel de Tavannes	2015	13
Bois d'Hardaumont	2017	10
La Wavrille	2017	3
Sud d'Azannes-et-Soumazannes	2015	2

Tableau 4.1 – *Liste des sites visités entre 2013 et 2017. *Le bois d'Ormont et le bois des Caures ont été parcourus en 2015 lors du contrôle qualité des données LiDAR.*

[13]De 10 à 30 m au début du printemps contre moins de 5 m en été.

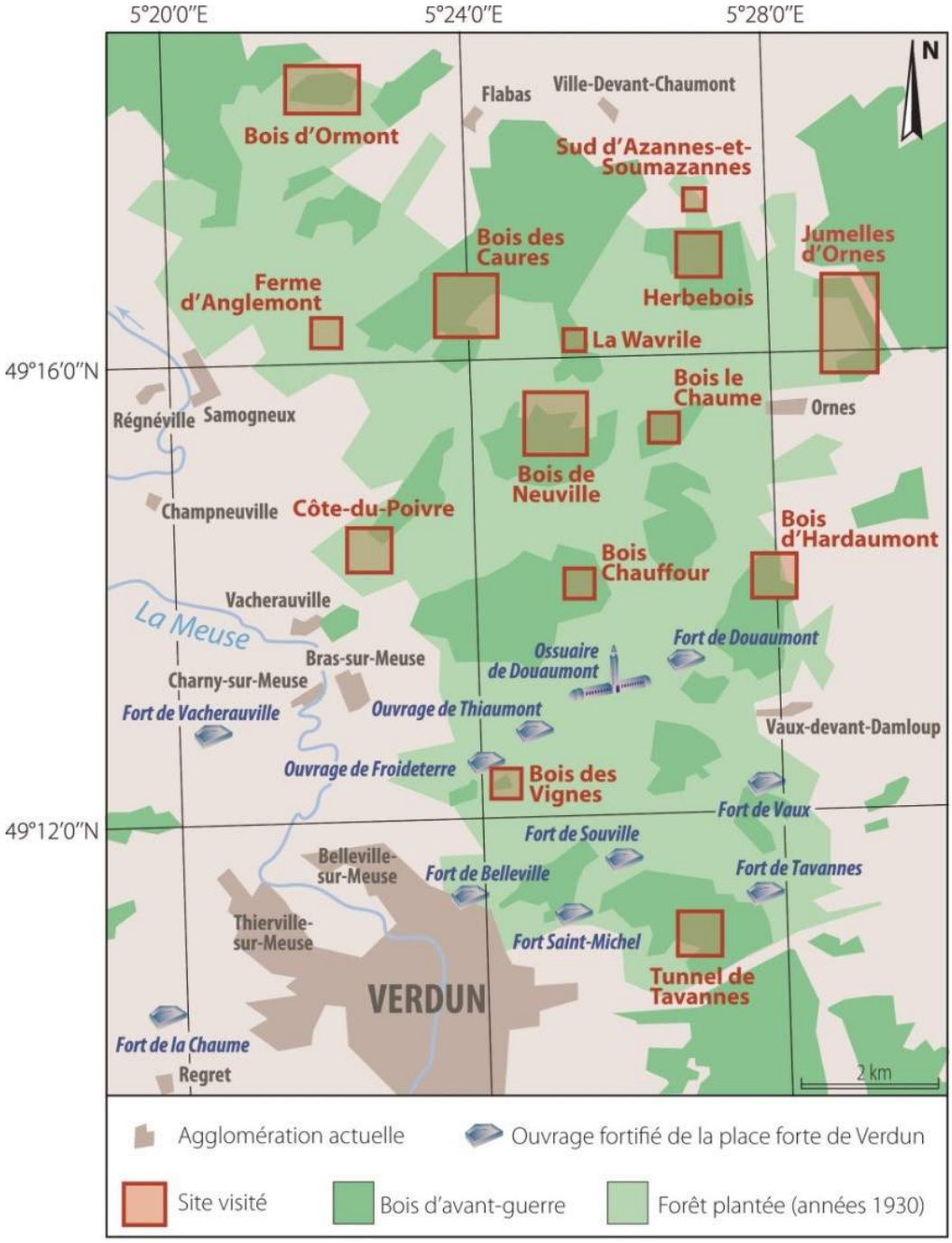


Figure 4.3 – *Localisation des sites visités*

3. Inventaire des formes et acquisition de leurs caractéristiques géométriques

Après les étapes de visualisation préliminaire et d'observations réalisées sur le terrain, l'étape suivante consiste à conduire l'inventaire semi-automatisé des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun et à en extraire les principales caractéristiques géométriques (figure 4.4). À partir de là, nous avons attribué à toutes les couches d'informations créées la projection Lambert 93[14] et le système de coordonnées associé (RGF93). Avant de passer à l'étape de la cartographie, le MNT a été préparé et la méthode testée et calibrée sur les sites échantillons évoqués avant de la généraliser sur l'ensemble du massif forestier.

3.1. Pré-traitement du MNT

De tout temps, l'Homme exploite et façonne les paysages. La composante géomorphologique témoigne de ces activités passées. Bien que le LiDAR ne permette pas d'observer les traces d'occupation contenues dans les sols – archives largement privilégiées par les archéologues avant l'apparition de la prospection aéroportée – il permet d'en observer directement l'inscription topographique si celle-ci est encore visible. Ainsi, les données LiDAR de la forêt domaniale de Verdun révèlent un palimpseste d'occupations de l'époque gallo-romaine à nos jours. Les témoins de cette occupation sont des microreliefs de géométrie variée et d'altitude plus ou moins prononcée.

Nous y trouvons notamment et de manière assez marquée de nombreux linéaires résultant des anciens parcellaires agricoles mais aussi d'anciennes limites cadastrales et communales. La présence de ces structures paysagères n'est pas aussi forte que dans d'autres forêts françaises, la guerre ayant contribué au nivellement du terrain et à l'effacement de nombreuses structures anciennes.

Pour cette raison et suite aux explorations faites sur l'imagerie LiDAR et les cadastres napoléoniens acquis aux archives départementales de la Meuse (cf. *infra*, chapitre 5), **la grande majorité des formes observées dans le périmètre de la forêt domaniale de Verdun sont issues de la période 1914-1918 et de l'après-guerre**. **Nous avons donc éliminé les structures post-conflit**. Un moyen de s'affranchir d'une grande partie de ces éléments exogènes (les formes extraites contiennent sans doute d'autres structures d'avant-guerre) est d'utiliser la base de données cartographiques de l'ONF pour identifier les structures dites « modernes » (informations vectorielles).

[14]Projection officielle en France depuis le décret n°2000-1276 du 26 décembre 2000.

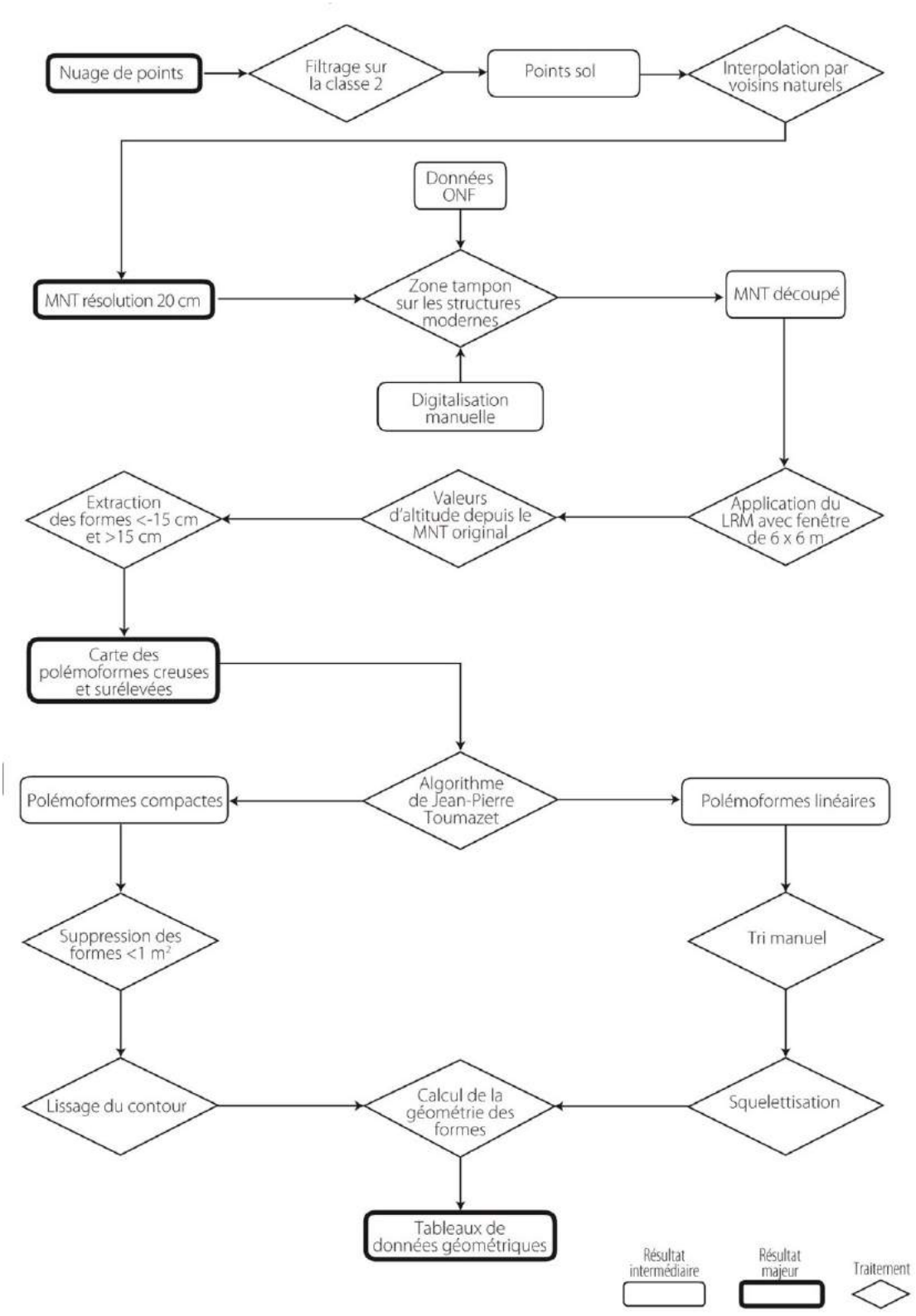


Figure 4.4 – *Chaîne de traitements décrivant la procédure d'inventaire des formes (traduit de De Matos-Machado* et al.*, 2018)*

Pour supprimer les formes étrangères à la période 1914-1918, une zone tampon de largeur variable est tracée autour d'elles puis utilisée comme pochoir afin de découper le MNT :

- 3 m pour les cloisonnements prononcés, les fossés forestiers et limites parcellaires matérialisées par un fossé ;
- 5 m pour les chemins forestiers ;
- 7 m pour les routes bitumées et les voies ferrées.

Cette opération permet de sauvegarder les fragments de données contenant des polémoformes (figure 4.5).

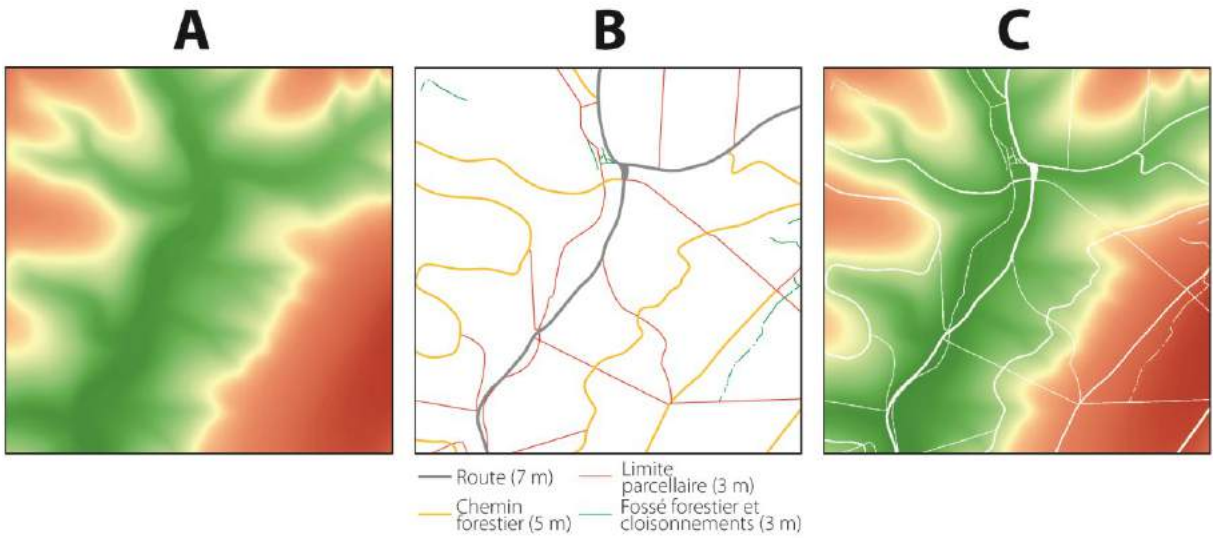


***Figure 4.5** – Suppression des structures post-conflit. A : extrait du MNT original à 20 cm de résolution. B : couche vectorielle incluant les données de l'ONF (routes, chemins forestiers, limites parcellaires) et les données digitalisées manuellement (fossés forestiers, cloisonnements). C : MNT après découpage.*

3.2. Extraction des formes depuis le MNT

3.2.1. Présentation des deux sites échantillons

Avant d'être généralisée à l'échelle de la forêt toute entière, la méthode de cartographie semi-automatique a été testée sur des zones échantillons ayant bénéficié d'observations sur le terrain. Cette opération a permis d'évaluer la qualité de détection de la méthode et de la calibrer en fonction des résultats obtenus. Pour ce faire, **deux sites parmi ceux cités plus tôt, abritant un nombre et une variété de formes importants, ont été retenus**. Le critère topographique a aussi été pris en compte dans le choix de ces sites pour évaluer la sensibilité de la méthode aux pentes :

- **Le premier secteur (290 ha) se situe à l'extrême nord de la forêt domaniale de Verdun, incluant le bois d'Ormont** (figures 4.3 et 4.6). Il s'agit d'un ancien site d'occupation allemande de 1917-1918, parsemé de nombreux abris, positions

d'artillerie, cratères d'obus, tranchées et boyaux de communication, positionnés au sommet du plateau des Hauts de Meuse entre 330 et 360 m et sous-tendu par une topographie plane. 428 polémoformes y ont été échantillonnées et interprétées (tableau 4.1).

- **Le second site (420 ha) occupe la butte témoin des Jumelles d'Ornes**, qui surplombe la plaine de la Woëvre à quelques encablures au nord du village reconstruit d'Ornes (figures 4.3 et 4.6). La variété de polémoformes observées durant notre mission de terrain a été importante, avec la présence de nombreux abris étagés mais aussi d'infrastructures linéaires qui les relient. Le commandement entre la plaine et le sommet de la butte est d'environ 75 m. Les pentes y sont plus fortes que sur le précédent site puisqu'elles sont en moyenne de 15 % et atteignent par endroit plus de 40 %. 323 formes ont été échantillonnées (tableau 4.1).
- En complément, les observations menées sur les treize autres secteurs (tableau 4.1) ont aussi servi à la validation, soit 217 échantillons supplémentaires.

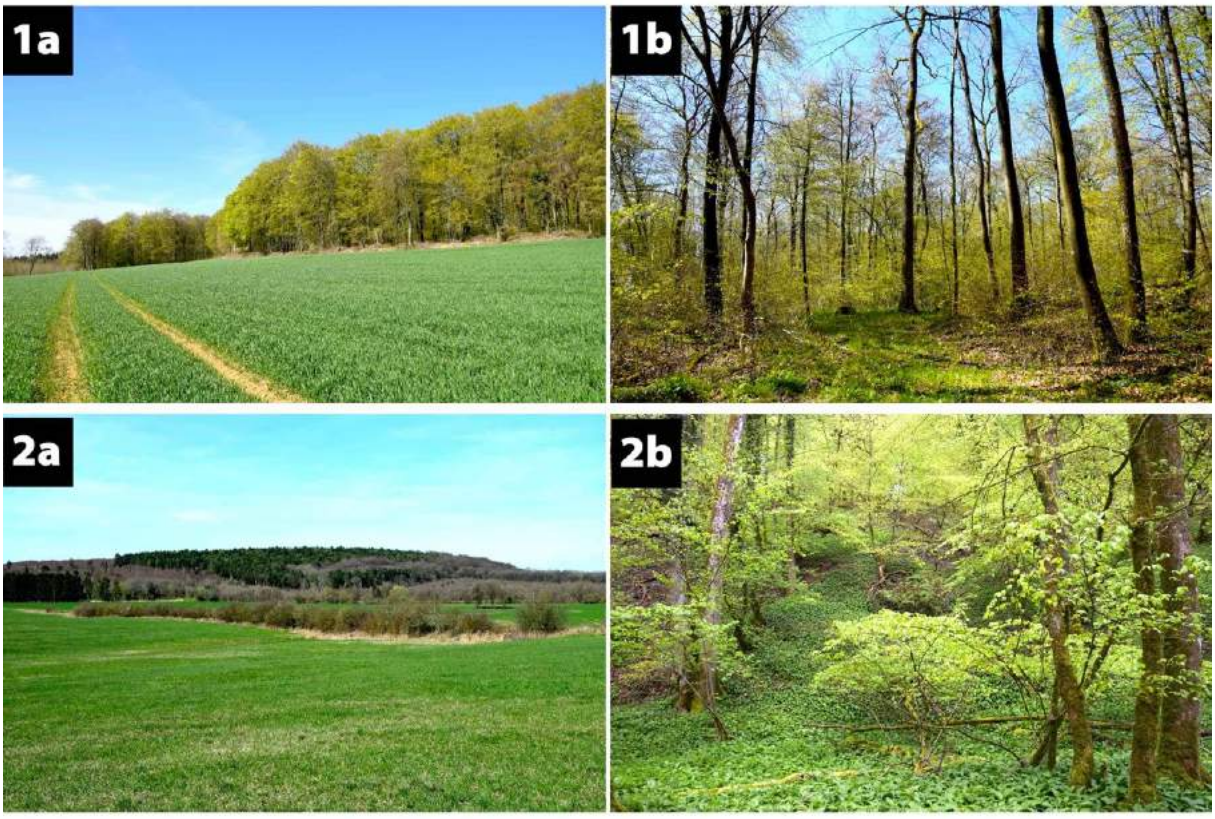


***Figure 4.6** – Aperçu des deux sites échantillons. 1a : lisière sud-est du bois d'Ormont. Cliché : R de Matos-Machado, 21 avril 2016. 1b : sous-bois du bois d'Ormont. Cliché : R. de Matos-Machado, 21 avril 2016. 2a : la butte témoin des Jumelles d'Ornes vue depuis le sud. Cliché : R. de Matos-Machado, 4 avril 2017. 2b : sous-bois du bois de Breuil sur le versant nord de la butte. Cliché : R. de Matos-Machado, 28 avril 2016.*

L'avantage de tester la méthode sur de petites surfaces est que les plus lourds traitements peuvent être réalisés en un délai très court. À titre d'exemple, le calcul du LRM sur les 710 ha de sites tests a nécessité une trentaine de minutes alors que la même opération sur l'ensemble de la forêt a pris plusieurs heures. Ainsi, une erreur dans le traitement ou une non-satisfaction des résultats liée à un mauvais choix de méthodes peut être rapidement être corrigée.

3.2.2. Inventaire des formes

Nous avons donc à notre disposition deux MNT représentant le bois d'Ormont et les Jumelles d'Ornes, nettoyés de structures post-conflit. Sur ce jeu de données, **une méthodologie d'extraction impliquant quatre étapes majeures a été appliquée** :

1) À l'aide de la *Relief Visualization Toolbox* (Kokalj *et al.*, 2011; Zakšek *et al.*, 2011; Relief Visualization Toolbox, 2015) dont l'approche se base sur l'algorithme développé par Hesse (2010), **le LRM a été calculé pour chaque MNT** en utilisant une taille de pixel équivalente au raster en entrée (*cell size* = 0,2 m) et une fenêtre glissante rectangulaire de 30 × 30 pixels (c'est-à-dire 6 × 6 m puisqu'un pixel équivaut à 0,2 m ; figure 4.7). Après plusieurs tests, cette taille a semblé être la plus adaptée aux dimensions des formes.
2) **Le LRM a été discrétisé en trois classes afin de représenter les reliefs creux** (valeurs négatives ; classe 1), **les reliefs plats** (valeurs proches de 0 ; classe 2) **et les reliefs surélevés** (valeurs positives ; classe 3 ; figure 4.7). Par exemple, dans le cas où le LRM varie de -2 à 2 m, les limites de classe sont les suivantes : pour la classe 1 entre [-2 ; -0,15] ; pour la classe 2 entre]-0,15 ; 0,15[; et pour la classe 3 entre [0,15 ; 2]. En choisissant ces seuils de -0,15 et 0,15 m, la rugosité naturelle de la surface (non éliminée lors de la phase de débruitage ; cf. *supra*, chapitre 3) a été supprimée et les formes les plus intéressantes, conservées. Un masque binaire (image représentant les pixels d'une seule classe) a été créé pour les classes 1 et 3.
3) **L'algorithme introduit par Toumazet** (Toumazet *et al.*, 2017 ; De Matos-Machado *et al.*, 2019) **a été utilisé pour séparer les formes compactes et linéaires**, puisque celles-ci ont bénéficié de méthodes d'extraction et d'analyses morphométriques différentes (cf. *infra*, § 3.3.3 à 3.3.6 et § 4.2 à 4.3). L'algorithme se fonde sur les mesures d'une emprise géométrique minimale (communément appelée *bounding box*), représentant le plus petit rectangle englobant une forme (figure 4.8). À l'issue de cette étape, **quatre images binaires ont été obtenues** : **1) les formes compactes et creuses** ; **2) les formes compactes et surélevées** ; **3) les formes linéaires et creuses** ; **4) les formes linéaires et surélevées**.

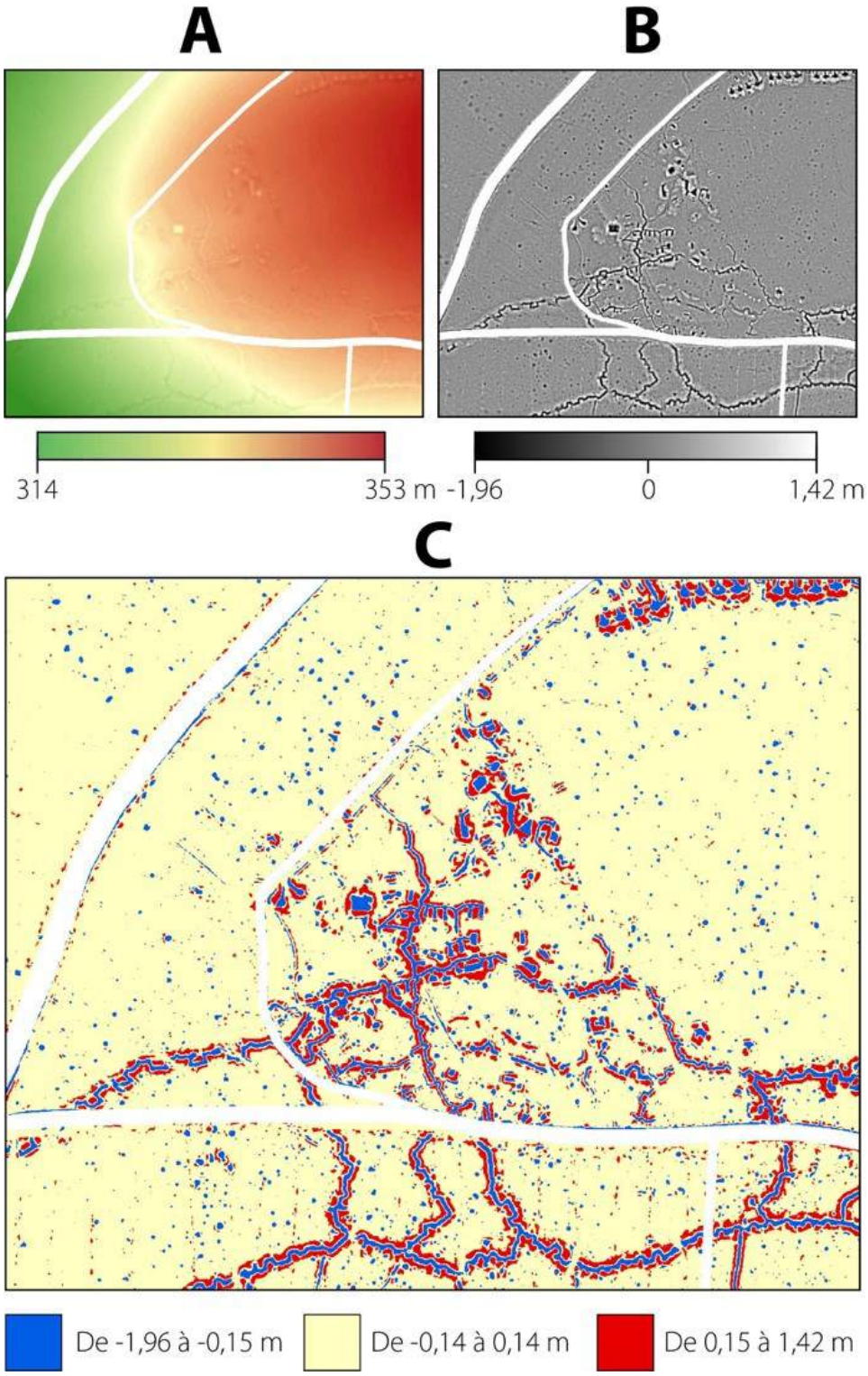


Figure 4.7 – *Application de l'algorithme du LRM sur un extrait du MNT LiDAR. A : MNT découpé à 20 cm de résolution. B : résultat après application de l'algorithme du LRM. C : discrétisation du MNT en trois classes (bleu : formes creuses ; beige : forme planes ; rouge : formes surélevées).*

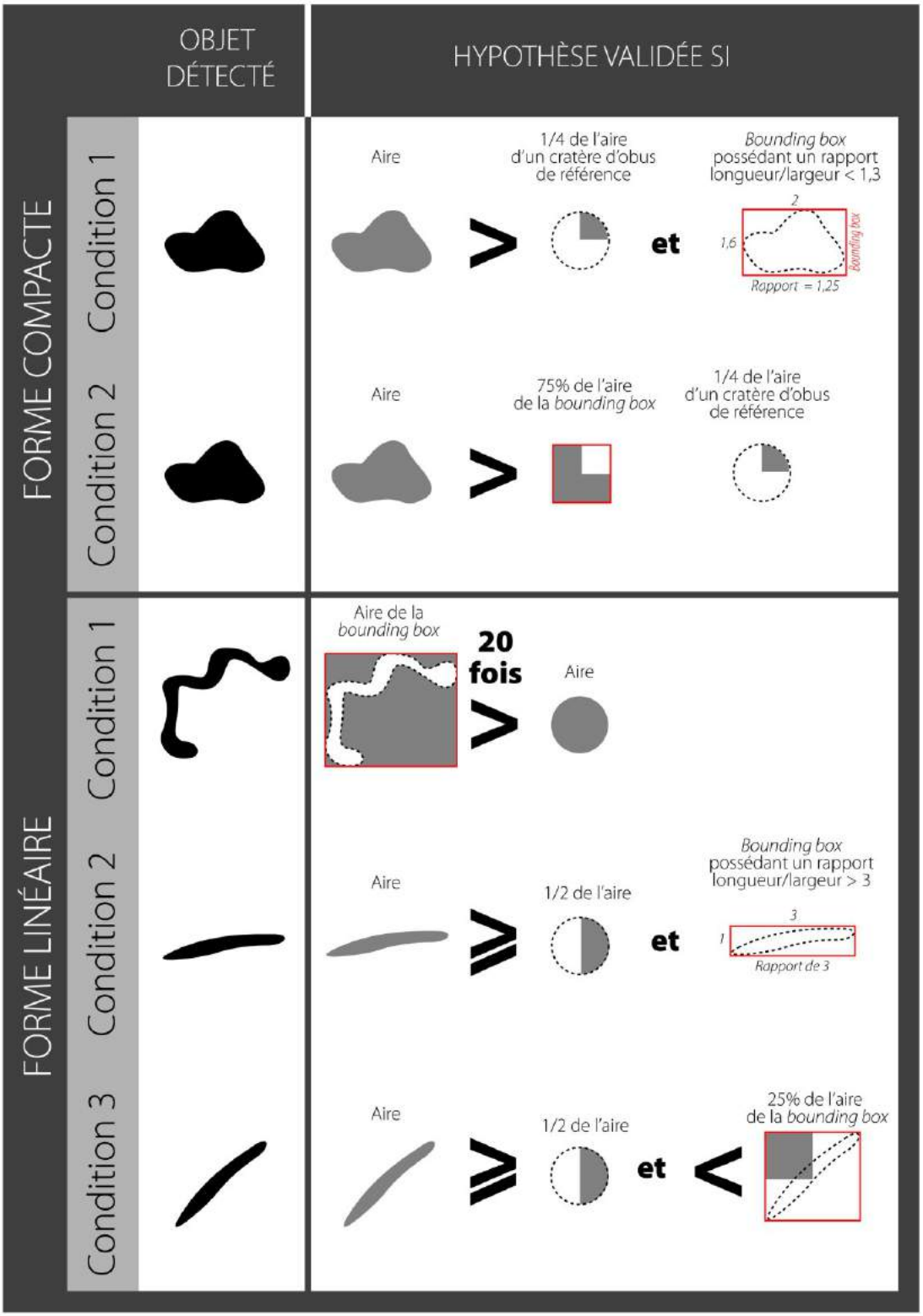


***Figure 4.8** – Tri des formes compactes et linéaires à partir de l'algorithme de Toumazet*

4) **Un traitement par morphologie mathématique a été appliqué aux quatre images binaires** en utilisant l'outil *Filter* du logiciel Terrset®. Pour les images contenant les formes compactes, une double fermeture (2 × dilatations puis 2 × érosions) avec une fenêtre de 3 × 3 pixels a été réalisée **afin d'améliorer le contour des formes, de raccorder celles qui sont très proches et de supprimer les éventuelles concavités qu'elles contiennent** (formes *donuts* ; figure 4.9). Pour les images contenant les formes linéaires, la même opération a été conduite avec la même taille de fenêtre, suivie d'une ouverture (érosion puis dilatation). Ce traitement supplémentaire a permis de mieux distinguer les tronçons de tranchée dans les secteurs où les réseaux sont denses (*e.g.*, cantonnement où de nombreux boyaux relient des abris, abris alignés en épis). Les formes contenues par les quatre images ont été converties en données vectorielles à l'aide de l'outil *Entité vers polygone* (ArcGIS®) afin de caractériser leur géométrie. Enfin, les dernières formes *donuts* non traitées par morphologie mathématique ont été comblées en utilisant l'outil *Fusionner* (ArcGIS®).

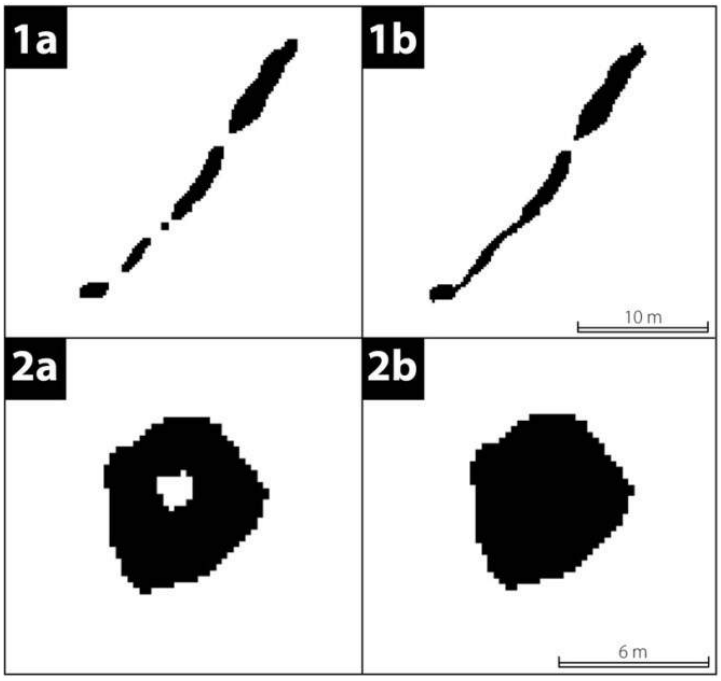


Figure 4.9 – *Aperçu des résultats du traitement par morphologie mathématique. 1a et 1b : exemple d'un morceau de tranchée avant et après traitement ; 2a et 2b : exemple d'un cratères d'obus « donuts » avant et après traitement.*

Par la suite, des traitements adaptés aux quatre catégories de formes extraites ont été appliqués :

1) **Formes compactes et creuses** : elles correspondent aux entités les plus intéressantes du corpus de données car elles englobent la grande majorité des polémoformes (cratères d'obus, abris, batteries d'artillerie, etc.), dont la forme est généralement petite et creuse comme l'indique une instruction de l'État-major

français[15] (figure 4.10). Une classification morphométrique de ces formes a semblé pertinente compte tenu de la variété géométrique qu'elles offrent (circulaire pour les cratères d'obus ; carrées, rectangulaires, triangulaires ou polygonales pour les constructions en mou). En vue d'une telle opération, la méthodologie d'extraction a nécessité trois étapes supplémentaires :

- Les polygones situés en bordure d'image et d'axes de communication (jusqu'à une distance d'1 m) ont été supprimés au moyen d'une requête spatiale car ils sont susceptibles d'être tronqués et de rendre le travail de classification difficile ;
- La surface en mètres carrés de chaque polygone a été calculée grâce au calculateur de champs et après avoir créé un nouveau champ *aire* dans la table attributaire. Une ultime requête attributaire a été réalisée pour éliminer les formes dont l'aire était strictement inférieure à 1 m² (entre 70 et 80 cm de diamètre[16]) ;
- L'effet de pixellisation produit lors de la conversion des images raster en vecteur (la forme carrée des pixels engendre une irrégularité du contour des polygones) a été gommé *via* l'outil *Lisser un polygone* (ArcGIS®). L'algorithme PAEK et une tolérance de 3 m ont été privilégiés pour cette opération (la pixellisation est encore importante avec une tolérance de 2 m et le lissage trop « érosif » au-dessus de 3 m).

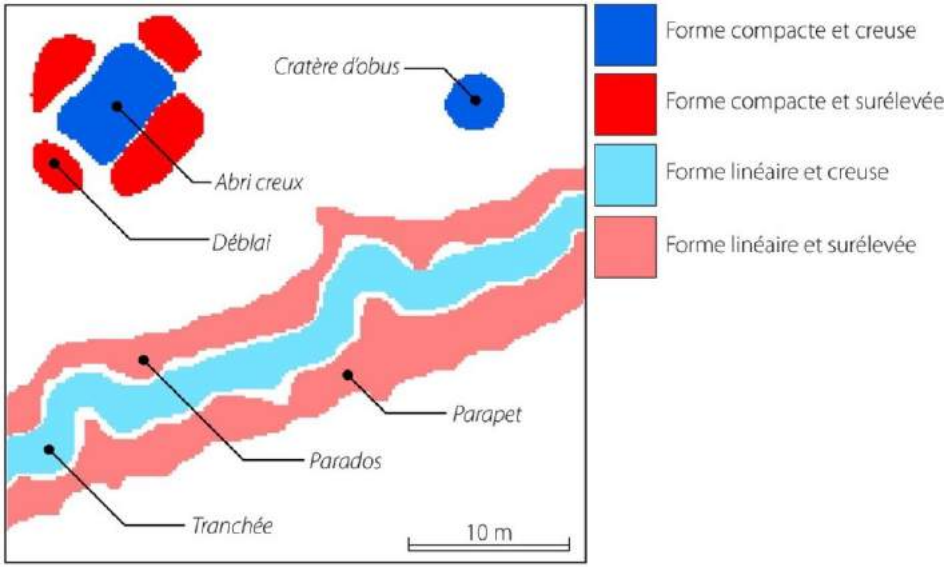


Figure 4.10 *– Aperçu des quatre catégories de formes*

[15]« *L'abri établi entièrement en relief sera très rare, on cherchera toujours à enterrer plus ou moins l'abri* » (GQGA, 1917).

[16]Cette valeur correspond à la taille minimale des cratères d'obus causés par les tirs de calibre 75 mm (Arnould et Simon, 1994 ; Amat, 2001 ; Hupy, 2006), soit le plus petit calibre des canons à longue portée utilisé sur le champ de bataille de Verdun mais aussi la taille minimale des polémoformes identifiées sur le terrain.

2) **Formes compactes et surélevées** : elles correspondent aux remblais issus de la formation des formes creuses (figure 4.10). Elles sont par conséquent moins intéressantes à étudier mais aussi plus difficiles à catégoriser. Aucun travail de classification n'a été mené sur ces formes. Cependant, leur volume (cf. *infra*, § 5.1) et leur proximité avec les formes creuses ont été analysés (cf. *infra*, § 5.2) pour repérer plus finement les constructions en mou dont la plupart sont entourées de remblais volumineux à l'inverse des cratères d'obus (cf. *infra*, § 5.1).
3) **Formes linéaires et creuses** : elles correspondent aux tranchées et boyaux de communication (figure 4.10). Leur géométrie est plus élémentaire que les formes compactes puisqu'elle se caractérise par une ligne plus ou moins sinueuse. Une simple analyse de leur tracé a été envisagée, impliquant le calcul de leur longueur et de leur sinuosité. Pour accomplir cette tâche, les données ont dû être « linéarisées ». La procédure qui suit a permis de convertir en lignes ces formes originellement surfaciques :
    - L'outil *Create Skeleton* de la *toolbox Polygon to Centerline* (la *toolbox* existe uniquement en version anglophone pour ArcGIS®) a été utilisé pour convertir les polygones en lignes. Cet outil a généré une version simplifiée et linéique des polygones appelée squelette (la structure est similaire à un graphe ; figure 4.11), chaque polygone étant représenté par une ligne formant l'axe médian (central) ;
    - Du fait que le squelette se compose de lignes contiguës mais non connectées entre elles, celles-ci ont été raccordées à l'aide de l'outil *Fusionner des lignes* (ArcGIS®). Cette opération a généré une seule ligne entre chaque nœud (intersection) au lieu de plusieurs avant l'opération, diminuant de manière significative le nombre d'entités ;
    - Un point a été créé à chaque extrémité du réseau (lignes connectées sur un seul côté) *via* l'outil *Sommets d'entités vers points* (ArcGIS®) et l'option *dangle*. Ce traitement a permis de repérer les ramifications potentiellement inutiles (lorsque les polygones sont trop larges, des concavités se forment et des lignes du squelette viennent occuper ces espaces, créant une ramification inutile sur l'axe central) ;
    - Un nouveau champ nommé *longueur* a été ajouté dans la table attributaire dans lequel la longueur de chaque ligne a été calculée en mètres. À l'aide d'une requête spatiale, les lignes juxtaposant les points créés dans l'étape précédente ont été sélectionnés. Enfin, une ultime requête attributaire a été conduite sur la sélection courante afin de supprimer toutes celles mesurant strictement moins d'1 m, seuil retenu pour supprimer les lignes inutiles.

    À l'issue de ces quatre étapes, il n'a malheureusement pas été possible de procéder de manière automatique à l'extraction unique des tranchées et boyaux

de communication car leur ressemblance avec les autres structures linéaires[17] est trop forte (cf. *supra*, § 3.1). Aucune autre méthode de visualisation, y compris une analyse multivariée, n'ont été jugées efficaces pour accomplir cette tâche. Seul le recours au SVF et à la carte des formes linéaires et surélevées[18] comme supports de visualisation a permis de les identifier et de les extraire manuellement.

4) **Formes linéaires et surélevées** : elles correspondent principalement aux remblais de fossés (*e.g.*, parapet et parados) et aux talus formés lors de l'aménagement des cloisonnements, chemins forestiers et routes traversant la forêt. Une requête spatiale a permis d'extraire uniquement les remblais associés aux réseaux de défense en vue d'une analyse de leur volume (cf. *infra*, § 5.1).

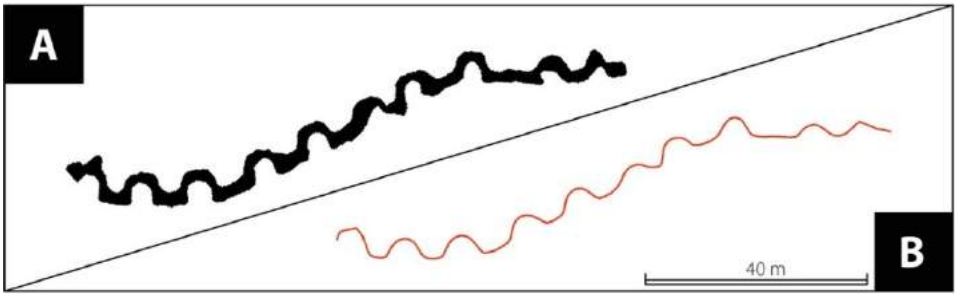


Figure 4.11 – *Exemple de squelettisation sur un tronçon de tranchée. A : avant la squelettisation. B : après la squelettisation.*

3.2.3. Validation de la méthode et généralisation à l'ensemble du massif forestier

Les observations *in situ* conduites sur les deux sites échantillons et les treize sites satellites **ont servi de moyen de calibration pour le développement d'une méthode d'inventaire automatique des polémoformes compactes**. L'ultime version de cette méthode a permis d'extraire du MNT 472 cratères d'obus sur 529 interprétés sur le terrain, soit un taux de détection de 89,22 %. En revanche, 57 n'ont pas été repérés, soit 10,78 %. Sur ces formes non détectées, 18 (31,57 %) ont constitué des formes tronquées par des cloisonnements forestiers ou oubliées (c'est le cas quand la profondeur se situe au-delà du seuil prédéfini : > -15 cm) et 39 (68,42 %) sont des cratères d'obus inondés. Dans son étude des mares de la forêt domaniale de Verdun, Printemps (2017 ; mémoire de recherche co-dirigé parallèlement au travail de thèse) a montré l'inefficacité du LRM à détecter les surfaces en eau puisque l'énergie émise par le LiDAR (proche infrarouge) a été partiellement, voire totalement absorbée par l'eau. Pour y remédier, des méthodes alternatives ont été exploitées, dont l'analyse de la densité de points sol et de l'intensité du signal LiDAR. L'inventaire des mares proposé par Printemps (2017) comble le hiatus et complète la cartographie des polémoformes

[17]Cloisonnements et fossés non repérés lors de la préparation du MNT.

[18]Le parapet et le parados peuvent servir de moyen d'identification dans le cas où ils existent encore.

non repérées par l'algorithme (cf. *infra*, chapitre 9). En ce qui concerne les constructions compactes en mou (abris et positions d'artillerie), 306 des 350 formes identifiées sur le terrain ont bien été inventoriées, soit 87,42 % de taux de détection. Seule 44 (12,57 %) ont été oubliées dont 5 (11,36 %) forment des formes construites inondées. Les 39 formes restantes (88,63 %) n'ont pas été détectées pour les raisons évoquées plus tôt (troncage) ou parce que la fenêtre utilisée pour le calcul du LRM n'est pas adaptée à leur taille (formes dont les dimensions excèdent 6 × 6 m). En calculant différents LRM à partir de tailles de fenêtre variées, ce problème peut être résolu. À propos des formes linéaires, 440 m de tranchées et boyaux de communication sur 16,28 km (2,70 %) n'ont pas été détectés sur les deux sites d'étude *via* l'algorithme de détection pour les raisons sus-citées (fossés inondés, mauvaise adaptation de la fenêtre du LRM) ou du fait d'un seuil d'extraction trop bas (-15 cm). Ce constat a directement été fait sur l'imagerie LiDAR puisque les formes linéaires ne nécessitent pas de passage sur le terrain pour être identifiées (interprétation faite grâce aux plans directeurs ; cf. *infra*, chapitre 5). À l'inverse des formes compactes oubliées – beaucoup trop nombreuses pour être cartographiées manuellement – **les formes linéaires non extraites ont été digitalisées manuellement en utilisant l'image du *SVF***.

Compte tenu de ces taux de détection particulièrement satisfaisants, **la méthode a été implémentée à l'échelle du massif forestier tout entier afin d'obtenir une vision globale du nombre et de la distribution des polémoformes compactes et linéaires**. Comme sur les sites tests, les formes linéaires non extraites ont été digitalisées manuellement pour compléter la cartographie (soit 44 km de réseaux extraits à la main). Au cours des traitements, certaines formes ont été supprimées, d'abord celles qui sont potentiellement tronquées (représentant 24 023 formes compactes et creuses et 25 257 formes compactes et surélevées puis celles inférieures à 1 m² (soit 219 726 formes compactes et creuses qui ont été supprimées contre 334 779 formes compactes et surélevées) atténuant de manière significative le bruit causé par les petites structures.

3.3. Obtention des caractéristiques géométriques des formes compactes et creuses

Seules les formes compactes et linéaires creuses ont fait l'objet d'une analyse morphométrique en vue de l'établissement d'une typologie et d'une cartographie automatique des polémoformes. Les observations de terrain et les résultats de l'inventaire (figure 4.10) montrent que chaque catégorie de polémoformes possède une géométrie commune (des formes circulaires pour les cratères d'obus et des formes rectangulaires, triangulaires et polygonales pour les constructions en mou). Pour les formes compactes et creuses, le choix a été fait de discrétiser les entités en fonction de leur taille, leur profil 3-D et leur forme géométrique. Ces variables dites morphométriques ont été calculées à l'aide de plusieurs logiciels, principalement des SIG (figure 4.12).

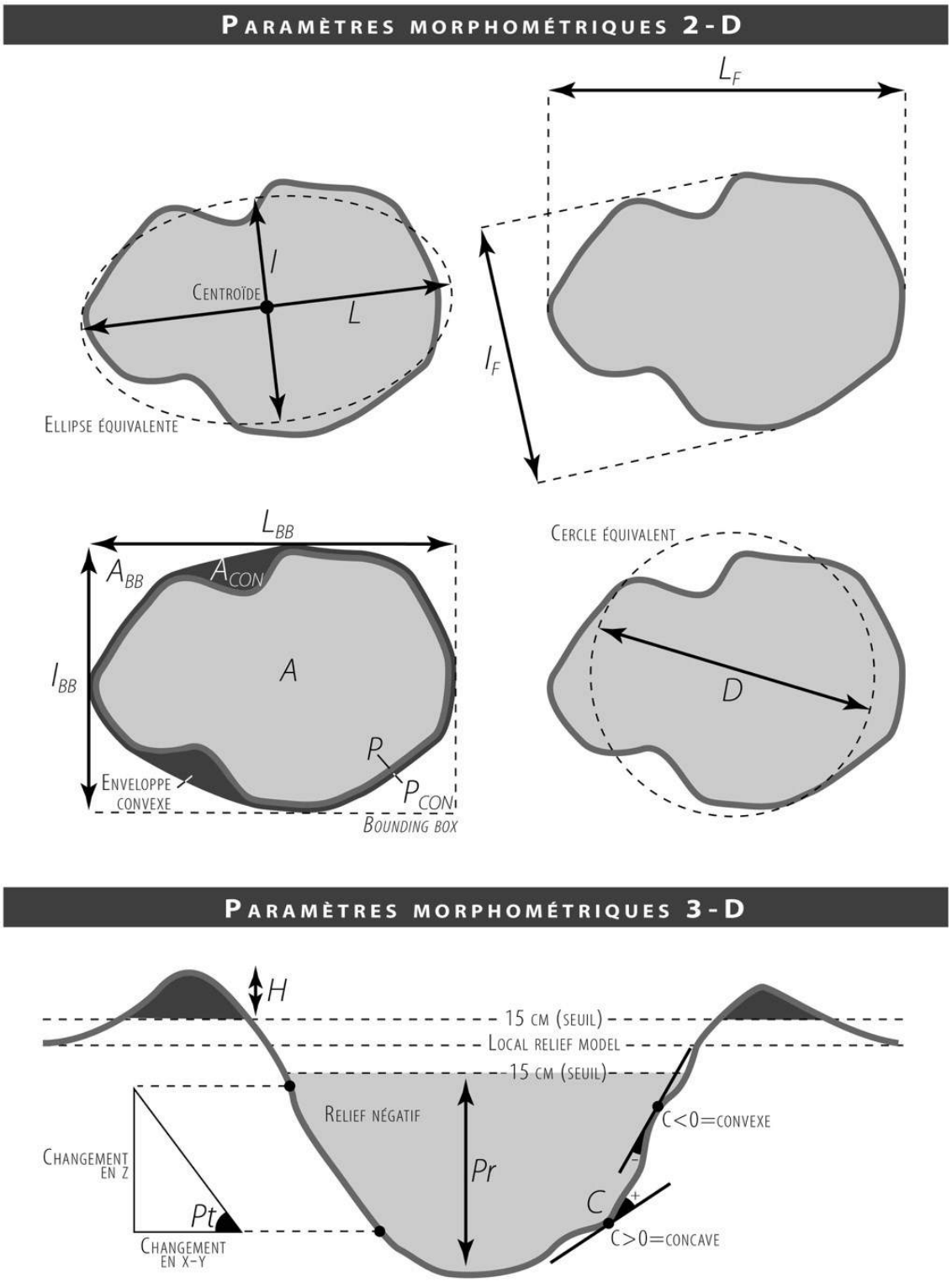


Figure 4.12 *– Calcul des paramètres morphométriques 2-D et 3-D (traduit de De Matos-Machado* et al.*, 2019)*

3.3.1. Les variables élémentaires

Un premier moyen de se familiariser avec la géométrie des polygones est d'utiliser les variables élémentaires dites de « taille » (figures 4.12 et 4.13). Ce premier ensemble offre un moyen d'identifier les formes de petite ou de grande taille et de connaître leur degré d'allongement. Dans cette catégorie de paramètres, nous distinguons :

- **la longueur** *(L)* : correspond dans notre cas au grand axe et qui se définit par l'axe le plus long d'une ellipse équivalente englobant une forme et passant par son centroïde (le barycentre). Bien que la longueur semble être un paramètre simple à obtenir, il n'est pas forcément facile de trouver l'outil adéquat permettant de la calculer. Dans ArcGIS®, l'outil *Géométrie zonale* (table) est le seul moyen d'effectuer cette opération. Les résultats obtenus (dans un tableau, à associer aux entités par le biais d'une jointure) représentent la longueur d'un demi-axe, autrement dit le rayon. Il faut donc multiplier cette valeur par deux pour obtenir un chiffre cohérent. Par ailleurs, une perte de précision est possible au moment du calcul car l'outil implique de convertir les polygones en raster (géométrie orthogonale). Le lissage réalisé plus tôt n'a donc eu aucune utilité pour ce genre de calcul. Malheureusement, aucune autre alternative n'a été trouvée, y compris dans les logiciels libres.
- **la largeur** *(l)* : c'est l'axe le plus court d'une ellipse équivalente (petit axe) englobant une forme, passant par son centroïde et disposé perpendiculairement à l'axe majeur. Cette variable se calcule de la même manière que la longueur.
- **le diamètre maximum de Feret** *(L_F)* : il semble plus adapté à la définition de la longueur au sens où nous l'entendons car il correspond à la plus grande droite traversant une forme de part en part. Parmi les logiciels que nous avons exploités, seuls SAGA GIS® (module *Polygon Shape Indices*, où L_F se nomme *Maximum distance*) et R desktop® (package *lakemorpho via* la fonction *lakeMaxLength*) ont permis de calculer ce paramètre. La première option a été choisie car jugée plus rapide (une seconde de calcul pour chaque entité dans le logiciel libre R, sachant que des millions de formes doivent être mesurées ; quelques dizaines de minutes pour toutes les entités dans SAGA GIS®).
- **le diamètre minimum de Feret** *(l_F)* : il s'agit entre autre de la plus grande largeur d'une forme, sans respect d'une logique de perpendicularité avec L_F. Elle ne se calcule pas dans SAGA GIS® mais peut en revanche être générée dans ArcGIS® en faisant appel à l'outil *Emprise Géométrique Minimale (bounding box)* et en utilisant une enveloppe par largeur (*rectangle by width*, c'est-à-dire selon la plus petite largeur). La variable *MBG_Width* produite en sortie est considérée comme le diamètre minimum de Feret.
- **l'aire** *(A)* : elle permet de connaître la surface d'une forme en mètres carrés. Elle se calcule dans ArcGIS® *via* l'option *Calculer la géométrie de la table attributaire* après avoir ajouté un nouveau champ numérique.
- **le périmètre** *(P)* : il estime la longueur du contour d'une forme en mètres. Tout comme l'aire, le périmètre se calcule dans la table attributaire au moyen du même outil.

- **la longueur de la *bounding box*** *(L_{BB})* : pour rappel, la *bounding box* représente le plus petit rectangle englobant une forme. La mesure de ses dimensions, de son aire et de son périmètre, permet de générer des indices morphométriques intéressants (cf. *infra*, § 3.3.3). L'outil *Emprise Géométrique Minimale* d'ArcGIS® en utilisant une enveloppe par aire (*rectangle by area*, c'est-à-dire selon la plus petite aire) offre un moyen de calculer sa longueur en mètres, représentée par la variable *MBG_Length* en sortie.
- **la largeur de la *bounding box*** *(l_{BB})* : même démarche que pour la longueur. La variable *MBG_Width* en sortie représente la largeur en mètres de la *bounding box* générée.
- **l'aire de la *bounding box*** *(A_{BB})* : une fois la *bounding box* générée, l'option *Calculer la géométrie* (ArcGIS®) permet d'obtenir son aire en mètres carrés.
- **l'aire de l'enveloppe convexe** *(A_{CON})* : à l'instar de la *bounding box*, l'enveloppe convexe représente la plus petite entité convexe englobant une forme. D'un point de vue géométrique, l'enveloppe convexe possède une forme très proche de l'entité étudiée à la différence que les concavités sont comblées. Elle se calcule en mètres carrés dans ArcGIS® *via* l'outil *Emprise Géométrique Minimale* et l'option d'enveloppe convexe *(convex hull)* puis dans la table attributaire à l'aide de l'outil *Calculer une géométrie*.
- **le périmètre de l'enveloppe convexe** *(P_{CON})* : même démarche que pour l'aire de l'enveloppe convexe, mais en choisissant le périmètre comme variable à calculer.
- **le diamètre équivalent** *(D)* : mesure le diamètre du cercle équivalent englobant une forme. Il se calcule *via* l'outil *Emprise Géométrique Minimale* (ArcGIS®) et l'option cercle *(circle)* et est représenté en mètres par la variable *MBG_Diameter*.

3.3.2. Les variables 3-D

Puisque le LiDAR nous permet d'apprécier les formes à la fois en plan et en 3-D, il est également possible de générer des variables renseignant sur la hauteur ou profondeur des formes et sur l'inclinaison et le profil de leur pente (figures 4.12 et 4.13) :

- **La profondeur** *(Pr)* : elle évalue l'importance de l'encaissement d'une forme par rapport à la tendance topographique générale (niveau 0) calculée par le LRM. Cette variable s'obtient en évaluant l'écart d'altitude des pixels contenus par une forme creuse au moyen des *Statistiques Zonales (table)* d'ArcGIS® et de l'option *range* (calcule l'écart entre la valeur d'altitude minimale et maximale). Cette hauteur s'exprime en mètres.
- **La pente** *(Pt)* : elle estime le degré d'inclinaison d'une surface (cf. *supra*, § 1.2.1). La pente de chaque pixel qui compose un MNT se calcule en % ou en degrés à partir de l'outil *Pente* d'ArcGIS®. Les *Statistiques Zonales* (ArcGIS®) offrent ensuite un moyen de connaître les statistiques de pente au sein même d'une forme : pente maximale, pente

minimale, écart de pente, pente moyenne, etc. Dans notre cas, seule la pente maximale nous intéresse pour connaître l'inclinaison des flancs de chaque forme. Cependant, il est risqué de se limiter à la valeur d'un seul pixel au sens où celle-ci peut être biaisée par la présence d'artefacts dans la forme. Pour éviter une telle aberration, le percentile 90 (Pt_{90} ; 10 % des valeurs de pente les plus fortes) a été mesuré pour chaque forme *via* la fonction *v.rast.stats* et l'option percentile du logiciel GRASS (peu de logiciels proposent le percentile comme option de calcul). Les valeurs en sortie s'expriment en degrés.

- **La courbure** *(C)* : permet de caractériser la forme de la pente (cf. *supra*, § 1.2.2). Dans notre cas, seule la courbure longitudinale (direction de la pente maximale) est calculée pour repérer les pentes convexes, concaves ou régulières. Dans un premier temps, elle se calcule *via* l'outil *Courbure* d'ArcGIS®. Puis, comme pour la pente, on fait appel au logiciel GRASS pour calculer à la fois le percentile 10 (C_{10} ; 10 % des valeurs de courbure les plus faibles ; pour détecter la présence de convexités dans les formes), le percentile 90 (C_{90} ; pour détecter la présence de concavités dans les formes) et l'écart de courbure (C_E ; pour détecter les gros écarts, synonymes d'orthogonalité dans les formes).

Variable		Symbole	Unité	Logiciels et outils utilisés pour les calculs
Aire	2D	A	m²	ArcGIS® - Calculer géométrie
Périmètre		P	m	ArcGIS® - Calculer géométrie
Axe majeur (longueur)		L	m	ArcGIS® - Géométrie zonale
Axe mineur (largeur)		l	m	ArcGIS® - Géométrie zonale
Diamètre minimum de Feret		L_F	m	SAGA GIS® - *Polygon shape indices*
Diamètre maximum de Feret		l_F	m	ArcGIS® - Emprise géométrique minimale
Longueur de la *bounding box*		L_{BB}	m	ArcGIS® - Emprise géométrique minimale
Largeur de la *bounding box*		l_{BB}	m	ArcGIS® - Emprise géométrique minimale
Aire de la *bounding box*		A_{BB}	m²	ArcGIS® - Emprise géométrique minimale
Aire de l'enveloppe convexe		A_{Con}	m²	ArcGIS® - Emprise géométrique minimale
Périmètre de l'enveloppe convexe		P_{Con}	m	ArcGIS® - Emprise géométrique minimale
Diamètre équivalent		D	m	ArcGIS® - Emprise géométrique minimale
Profondeur	3D	Pr	m	ArcGIS® - Statistiques zonales
Pente		Pt	°	ArcGIS® - Pente
Courbure longitudinale		C	m	ArcGIS® - Courbure

Tableau 4.2 – *Liste des variables morphométriques élémentaires et 3-D (traduit de De Matos-Machado* et al.*, 2019)*

Variable	Symbole	Formule	Unité	Interprétation
Circularité de Miller	*Cir*	$4\pi A / P^2$	0 à 1	1 = cercle ; 0,5 = polygone ; 0,1 = ligne
Rectangularité	*Rec*	A_{BB} / A	0 à 1	1 = carré ; 0,5 = polygone avec concavités ; 0,1 = polygone avec grandes concavités
Aspect ratio	*Asp*	l_F / L_F	0 à 1	1 = cercle ; 0,70 = carré ; 0,57 = triangle ; 0,25 = formes allongées ; 0,1 = ligne
Élongation	*E*	L_F^2 / A	0 à 1	0,1 = cercle ; 0,2 = ellipse et rectangle ; 0,4 = formes allongées ; 0,5 = ligne
Convexité	*Con*	P_{CON} / P	0 à 1	1 = contour convexe ; 0,5 = contour sinueux
Solidité	*Sol*	A / A_{CON}	0 à 1	1 = absence de concavités ; 0,5 = concavités égales à 50 % de *A*
Defect area	*Def*	$(A_{CON} - A) / A$	%	0 = absence de concavités ; 100 = concavités égales à *A* ; 50 = concavités égales à 50 % de A
Percentile 90 de pente	Pt_{90}	-	°	10 % des valeurs de pente les plus fortes
Écart de courbure	C_E	-	m	$C_{MAX} - C_{MIN}$
Percentile 10 de courbure	C_{10}	-	m	10 % des valeurs de courbure les plus faibles
Percentile 90 de courbure	C_{90}	-	m	10 % des valeurs de courbure les plus fortes

Tableau 4.3 – *Liste des variables morphométriques dérivées (traduit de De Matos-Machado* et al.*, 2019)*

3.3.3. Les variables dérivées

Maintenant que nous avons les moyens de caractériser la taille des polygones et leur géométrie 3-D, il nous faut connaître leur forme générale (circulaire, rectangulaire, triangulaire, polygone plus complexe) et la géométrie de leur contour (régulière, sinueuse, orthogonale). Pour ce faire, d'autres variables morphométriques ont été calculées sur la base de celles obtenues précédemment (tableau 4.3) :

- **L'indice de circularité de Miller** *(Cir)* : il a été introduit par Miller en 1953 pour étudier la forme de bassins-versants en Virginie et dans le Tennessee (États-Unis). L'indice varie de 0 à 1. La formule se définie comme suit :

$$4\pi A \, / \, P^2$$

Où 0,1 = ligne ; 0,5 = polygone ; 1 = cercle

- **L'indice de rectangularité** *(Rec)* : différents indices de rectangularité sont proposés dans la littérature (Rosin, 2003 ; Liu *et al.*, 2015). Cependant, la formule suivante a été retenue pour sa simplicité et son efficacité à repérer les polygones rectangulaires :

$$A \,/\, A_{BB}$$

Où 0,1 = polygone avec grandes concavités ; 0,5 = polygone avec concavités ; 1 = carré (forme de la bounding box)

- **L'*aspect ratio*** *(Asp)* : il constitue un indice morphométrique conventionnel permettant d'étudier le degré d'allongement d'une entité et sa forme géométrique. Cet indice est souvent utilisé pour caractériser la forme des particules notamment en volcanologie (Hentschel et Page, 2003 ; Leibrandt et Le Pennec, 2015). Il varie de 0 à 1 :

$$l_F \,/\, L_F$$

Où 0,1 = ligne ; 0,25 = polygone allongé ; 0,57 = triangle ; 0,7 = carré ; 1 = cercle

- **L'indice d'élongation** *(E)* : évalue l'importance de l'allongement d'un polygone. Plusieurs formules ont été proposées dans la littérature pour calculer cet indice. Celle illustrée dans Liu *et al.* (2015) a été appliquée :

$$L_F{}^2 \,/\, A$$

Où 0,1 = cercle ; 0,2 = ellipse ou rectangle ; 0,4 = polygone allongé ; 0,5 = ligne

- **L'indice de convexité** *(Con)* : compare la géométrie du contour d'un polygone donné à un polygone parfaitement convexe. L'indice varie de 0 à 1. D'après Liu *et al.* (2015), l'indice de convexité se calcule comme suit :

$$P_{CON} \,/\, P$$

Où 0,5 = contour sinueux ; 1 = contour parfaitement convexe

- **L'indice de solidité** *(Sol)* : similaire à la convexité, l'indice de solidité compare l'aire d'un polygone donné à un polygone parfaitement convexe (Liu *et al.*, 2015). Autrement dit, cet indice quantifie la part de surface vide dans un polygone. Il varie de 0 à 1 :

$$A \,/\, A_{CON}$$

Où 0,1 = surface des concavités égale à 90 % de A ; 0,5 = surface des concavités égale à 50 % de A ; 1 = polygone parfaitement convexe

- **La *defect area*** *(Def)* : cet indice constitue un autre moyen d'apprécier l'importance des concavités dans une forme (peut être traduit par « zone de défaut »). La formule de Liu *et al.* (2015) est la suivante :

$$(A_{CON} - A) \,/\, A$$

Où 0 = polygone parfaitement convexe ; 100 = surface des concavités égale à A

Notons également que l'utilisation de cinq autres variables morphométriques citées par Liu *et al.* (2015) n'a pas donné lieu à de résultats probants. Cependant, elles pourraient se révéler intéressantes dans d'autres études. Il s'agit entre autres de :

- L'indice de rectangularité (une autre version) ;
- L'indice de convexité de Feret ;
- L'indice de compacité ;
- L'*Axial ratio* ;
- L'indice de Paris.

3.4. Obtention des caractéristiques géométriques des formes linéaires et creuses

En ce qui concerne les formes linéaires et creuses correspondant *grosso modo* aux réseaux de tranchée et de boyaux de communication, **seuls deux indices ont été calculés pour chaque entité linéaire extraite** (rappelons que ces formes sont originellement surfaciques mais elles ont été converties en lignes *via* un processus de squelettisation) :

- **La longueur** *(L)* : celle-ci s'exprime en mètres et a été calculée dans ArcGIS® à l'aide de l'outil *Calculer la géométrie* disponible dans la table attributaire.
- **L'indice de sinuosité** *(Is)* : couramment utilisé en hydrogéomorphologie pour caractériser le tracé des cours d'eau, cet indice a été défini par Brice (1964) dans ses travaux sur la rivière du Loup dans le Nebraska. Du fait que son utilisation soit pertinente pour décrire la morphologie des réseaux de fossés, il a été appliqué à notre jeu de données et calculé *via* la *Stream Gradient & Sinuosity Toolbox* (Dilts, 2015) disponible pour ArcGIS®. Théoriquement, l'indice de sinuosité correspond au rapport de la longueur du chenal sur la longueur d'onde (ligne directe entre deux méandres) :

$$L \,/\, \lambda$$

Où 1 < Is < 1,05 = cours d'eau rectiligne ; 1,05 < Is < 1,5 = cours d'eau sinueux ; > 1,5 = cours d'eau à méandres.

4. Caractérisation morphométrique et classification des formes

En somme, deux tableaux de données morphométriques ont été produits :

1) **Un tableau pour les formes compactes et creuses** se composant de vingt-quatre indices morphométriques dont douze constituant des variables de taille *(L*, *l*, L_F, l_F, *A*, *P*, L_{BB}, l_{BB}, A_{BB}, A_{Con}, P_{Con} et *D)*, cinq des variables 3-D *(Pr*, Pt_{90}, C_{10}, C_{90} et C_E*)* et sept des variables dérivées des deux premières catégories de variable décrivant la forme géométrique des polygones et de leur contour *(Cir*, *Rec*, *Asp*, *E*, *Con*, *Sol* et *Def)*.
2) **Un tableau pour les formes linéaires et creuses** se composant de deux variables morphométriques dont une de taille *(L)* et une *(Is)* permettant de caractériser la morphologie de leur tracé.

L'analyse qui suit consiste dans un premier temps à explorer ces deux tableaux et la variabilité morphométrique générale des polémoformes au moyen des statistiques univariée et multivariée. Nous exploitons ensuite les méthodes de statistiques multivariées sur le tableau des formes compactes et creuses à des fins de classification. Cette étape n'a pas été appliquée au tableau des formes linéaires et creuses (cf. *infra*, 4.3). Tous les traitements statistiques ont été réalisés dans le logiciel libre R et ont nécessité l'installation des *packages Kohonen* et *Stats*.

4.1. Aperçu général de la variabilité morphométrique des formes au moyen des statistiques univariée et multivariée

L'analyse de la variabilité des paramètres morphométriques obtenus sur chaque entité permet d'étudier leur comportement et de mettre en évidence des phénomènes d'hétérogénéité dans le jeu de données. Dans un premier temps, **l'examen de la population au moyen d'une analyse univariée a été mené à l'aide des critères habituels** : paramètres de position (moyenne et médiane) et paramètres de dispersion (en particulier les intervalles interquartiles). Cette étape sert à évaluer la variabilité morphométrique des formes pour chaque variable indépendamment des autres. **Pour les formes compactes et creuses**, **les variables ont (en complément) été comparées pour identifier d'éventuels phénomènes de corrélation et supprimer les variables redondantes** (variables liées). L'ACP se révèle être le meilleur outil pour répondre aux objectifs. Ces analyses statistiques préliminaires ont ainsi servi à identifier le « cocktail » de variables le plus adapté à la classification, c'est-à-dire celles dont le pouvoir discriminant a permis la séparation des formes aux géométries différentes et le regroupement des formes aux géométries similaires.

4.2. Classification des formes compactes et creuses à partir d'une approche croisée d'analyses multivariées

En prévision de la classification des formes compactes et creuses, le tableau de données correspondant a été centré-réduit *via* la fonction *Scale*. Cette opération a l'avantage de préserver le profil de variation des variables et de les rendre comparables malgré des unités et moyennes différentes. Par la suite, une analyse multivariée combinée consistant en une utilisation conjointe de la carte auto-organisatrice de Kohonen (*self-organizing map* ou *SOM* en anglais) et de la classification ascendante hiérarchique a été privilégiée pour classifier les formes (figure 4.13). Après avoir utilisé les analyses en composantes principales (ACP) puis l'algorithme des centres mobiles *(k-means)*, c'est finalement cette approche multivariée combinée qui s'est montrée la plus performante lors de la phase de classification[19]. Par ailleurs, cet enchaînement d'analyses multivariées a déjà été exploité avec succès par d'autres chercheurs notamment sur des indices morphométriques, démontrant tout l'intérêt de son application sur notre jeu de données (Olteanu-Raimond et Ruas, 2015 ; Unglert *et al.*, 2016).

4.2.1. La carte auto-organisatrice de Kohonen

La première étape du processus menant à la classification des formes compactes et creuses repose sur l'application de la carte auto-organisatrice de Kohonen (figure 4.13). L'algorithme a été proposé en 1982 par le Finlandais Teuvo Kohonen et vise à regrouper dans des classes les individus aux caractéristiques similaires (Oja et Kaski, 1999 ; Agarwal et Skupin, 2008 ; Ehsani et Quiel, 2009 ; Olteanu-Raimond et Ruas, 2015). **Le processus d'attribution des individus aux classes est semblable à la méthode des centres mobiles à la différence qu'il prend en compte une notion de topologie entre les classes**, **augmentant de manière significative leur contraste**. C'est une des raisons pour lesquelles nous avons préféré la carte auto-organisatrice de Kohonen à l'algorithme des centres mobiles. Ainsi, chaque individu est associé à une classe en fonction de sa proximité avec les individus de la même classe mais aussi des classes voisines. Une autre particularité de la carte auto-organisatrice de Kohonen réside dans son espace de représentation en 2-D. Chaque classe est représentée graphiquement par un *neurone*, contenant *n* individus, ici des polémoformes. L'ensemble forme un réseau de neurones appelé *carte de Kohonen*. La taille du réseau est directement définie par l'opérateur au début du processus de calcul. Ses dimensions doivent être suffisamment importantes afin que les contraintes topologiques agissent sur le jeu de données. Aucune règle n'existe réellement pour définir la taille de la grille. Plusieurs dimensions doivent être testées afin d'identifier la plus adaptée. Dans notre cas, des grilles de 10 × 10 à 30 × 30 neurones ont été générées. Le traitement a conduit à une matrice des distances (*U-matrix*) représentant les distances euclidiennes entre chaque neurone. Il est

[19]Faible pouvoir discriminant de l'ACP et des centres mobiles dans notre cas, causant l'apparition de formes normalement différentes au sein d'une même classe.

également possible de visualiser indépendamment ou simultanément la part d'influence des variables pour chaque neurone. Ainsi, la carte auto-organisatrice de Kohonen grâce à sa grille neuronale en 2-D permet d'apprécier facilement et efficacement les catégories d'individus, comme l'ont montré les travaux d'Agarwal et Skupin (2008) et Ehsani et Quiel (2009). Bien que cette méthode d'analyse multivariée facilite la lecture d'un jeu de données aussi important (plusieurs centaines de milliers d'entités), **elle ne permet pas d'établir, seule, une typologie précise des formes en raison du grand nombre de classes obtenus *in fine***.

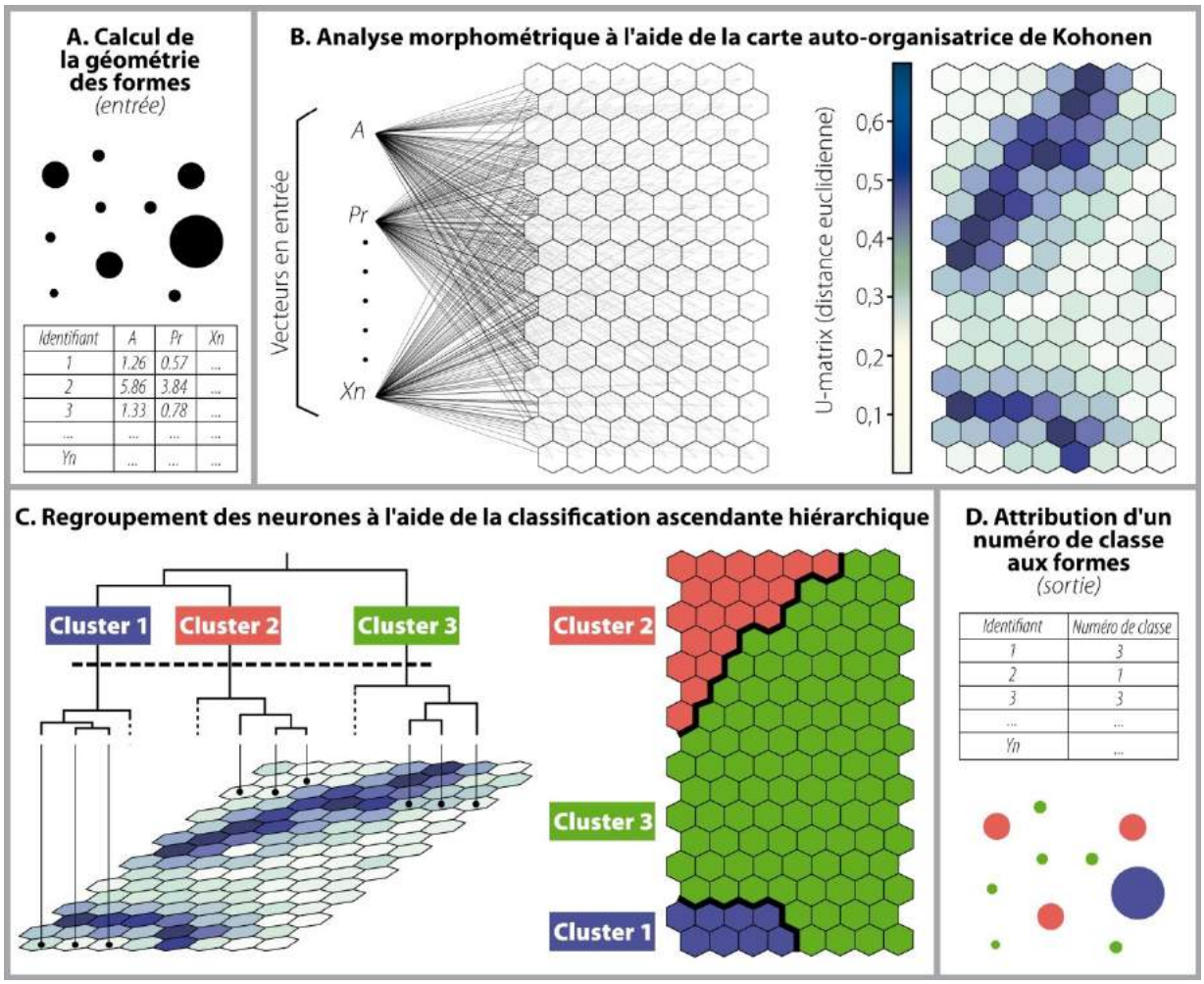


Figure 4.13 *– Explication de la procédure d'analyse morphométrique et de classification des formes (traduit de De Matos-Machado* et al.*, 2019)*

4.2.2. La classification ascendante hiérarchique

La deuxième étape consiste donc à diminuer le nombre de classes obtenues *via* la carte auto-organisatrice de Kohonen dans l'objectif d'obtenir un nombre de classes représentatif de la réalité (figure 4.13). Pour ce faire, nous avons fait appel à une technique de classification relativement courante en géographie, la classification ascendante hiérarchique (CAH), dont l'usage unique ne permettait pas de classifier correctement les formes. Comme

toute méthode de classification, la CAH vise à rassembler dans des classes des individus qui se ressemblent (Sanders, 1989). Cette fois-ci, les échantillons de départ constituent les classes ou neurones obtenus par la carte auto-organisatrice de Kohonen. Par conséquent, les données sont déjà pré-classées (900 classes pour une grille de 30 × 30 neurones). À l'image de la *U-matrix* produite dans la carte auto-organisatrice de Kohonen, une matrice des distances euclidiennes est calculée entre chaque individu. L'algorithme de la CAH est relativement simple puisqu'il procède à l'agrégation des classes en se rapportant à la matrice des distances. Ainsi, **plus cette distance est faible**, **plus les individus se ressemblent et plus ils ont de chance d'être regroupés** (Sanders, 1989). Dans notre cas, la méthode d'agrégation de Ward a été retenue car elle permet d'obtenir des classes les plus homogènes et distinctes possible du point de vue de leurs variables. À l'initiation de la phase de calcul, le nombre de classes équivaut au nombre d'individus, soit au maximum 900 dans le cas d'une grille de 30 × 30 neurones. À chaque itération, les paires d'individus dont la distance est la plus faible sont agrégées. L'opération se répète jusqu'à obtenir une seule et unique classe. À l'issue du calcul, un arbre hiérarchique ou dendrogramme est généré. Ce support graphique permet d'apprécier les écarts de ressemblance entre les classes et de définir le nombre de classes adéquat pour la classification. Nous procédons alors au découpage de l'arbre là où des sauts d'inertie apparaissent (grands écarts entre les classes). Le nombre de branches situées au-dessus de la troncature détermine le nombre de classes retenues (Sanders, 1989).

4.2.3. Quelles étapes pour une classification accomplie ?

Du fait que le nombre de formes à classifier et la diversité géométrique des formes sont importants, **le processus a nécessité d'appliquer cet enchaînement de classifications à trois reprises** :

1) **Une première classification** (avec une grille de 30 × 30 neurones) a permis de repérer les cratères d'obus dont le poids dans le jeu de données était trop important. Les autres types de formes se retrouvaient « noyés » dans la masse, empêchant leur identification. **La combinaison des variables *Asp*, *Cir*, *Con*, C_{90} et Pt_{90} est celle qui a permis d'apprécier au mieux les cratères d'obus**.
2) **Une deuxième classification** (avec une grille de 30 × 30 neurones) a été appliquée aux formes restantes afin de repérer les constructions en mou. L'utilisation de variables 3-D (analyse des pentes et de leur profil) a été privilégiée car les observations menées sur le terrain ont montré que les formes « construites » possèdent généralement des pentes saillantes et concaves. **La combinaison des variables C_{90} et Pt_{90} a donné les meilleurs résultats**. Les autres formes n'ont pas pu être classées (pas de signature morphométrique particulière).
3) Enfin, **une ultime classification** (avec une grille de 10 × 10 neurones) a été conduite sur les constructions en mou identifiées dans la deuxième classification avec pour objectif de discriminer les individus selon leur forme géométrique (vue

en plan). De ce fait, **nous avons fait appel aux variables *Asp*, *Cir* et *Rec* pour identifier ces différences dans le jeu de données** : cercle, rectangle, triangle, polygones, etc.

Une fois classées, la morphométrie des polémoformes a été décrite au moyen de boîtes de dispersion (figure 4.14), graphique adapté aux comparaisons de variables permettant de rendre compte des spécificités de chaque classe. Ces diagrammes résument l'information de position (moyenne, médiane) et de dispersion des valeurs (intervalles quartiles, valeurs extrêmes).

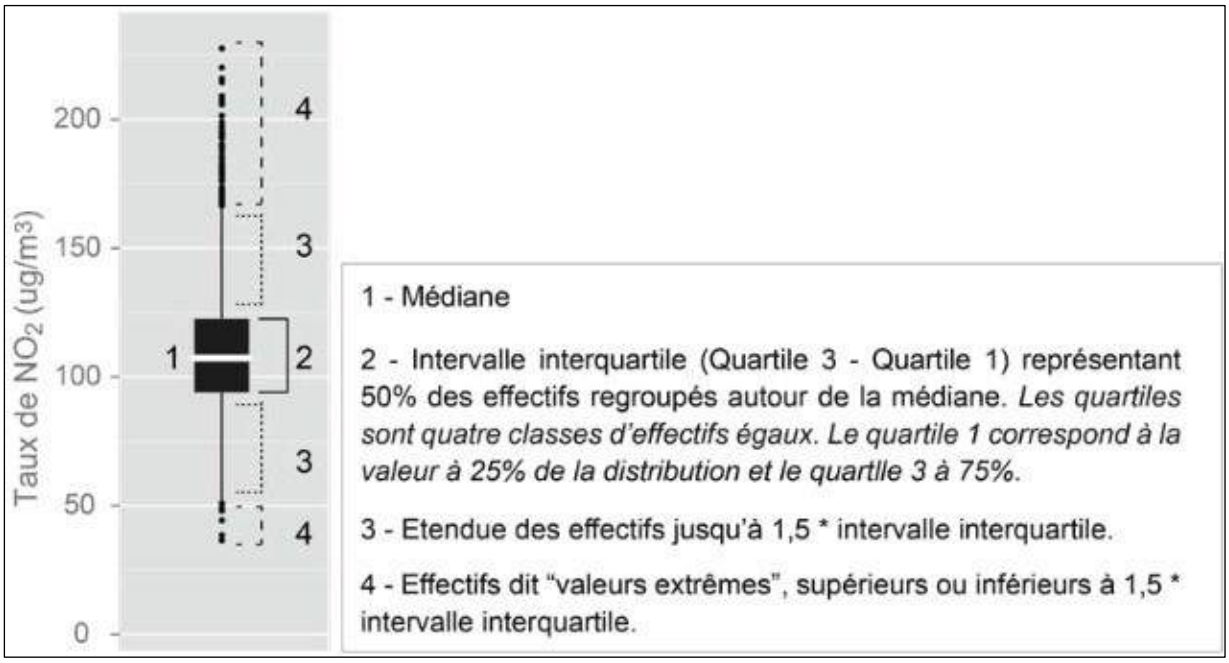


***Figure 4.14** – Interprétation d'une boîte de dispersion. Exemple d'une boîte de dispersion illustrant des concentrations journalières des taux de NO_2 (Duché, 2013)*

4.3. Analyse des formes linéaires et creuses

À l'inverse des formes compactes et creuses dont le nombre et la variété géométrique ont rendu pertinente leur classification, **les formes linéaires et creuses n'ont pas bénéficié d'une telle analyse**. Une classification sur la base des deux indices sus-cités *(L, Is)* n'a pas permis d'établir la distinction entre tranchées et boyaux de communication du fait d'une trop grande proximité morphométrique. **Cette catégorisation a été opérée par tri manuel à l'aide des plans directeurs** (cf. *infra*, chapitre 5). Néanmoins, l'analyse univariée a tiré de la longueur et de l'indice de sinuosité de ces réseaux de fossés des informations intéressantes quant à la morphologie des dispositifs de défense des deux camps (allemands et français).

5. Quantification de l'érosion d'origine militaire

La majorité des auteurs ayant étudié les impacts géomorphologiques de la guerre ont tenté d'estimer selon différentes méthodes la superficie bouleversée par la guerre et les volumes de matériaux déplacés (chiffres cités par les artilleurs, rapports rédigés pendant les campagnes de remblaiement des années 20, sondages sur le terrain, MNT à haute résolution). À notre tour, nous proposons une estimation de l'érosion d'origine militaire sur le champ de bataille de Verdun en calculant la superficie occupée par les polémoformes et le volume des formes cartographiées sur ArcGIS®. En complément de cette recherche fondamentale et purement géomorphologique, les résultats obtenus servent à affiner la cartographie des constructions en mou en permettant d'identifier et de supprimer les erreurs de classification.

5.1. Estimation de la superficie et du volume des polémoformes

La quantification de la superficie des formes constitue une opération relativement simple sollicitant l'outil *Calculer géométrie* de la table attributaire d'ArcGIS®. Cet outil offre la possibilité d'estimer l'aire de chaque entité cartographiée en différentes unités de mesures. Nous avons dans notre cas privilégié le mètre carré. L'opération est plus technique en ce qui concerne les volumes puisqu'elle implique de faire appel à l'outil *Volume du polygone* de *3D Analyst*[20]. Son usage a nécessité la création d'une surface TIN (cf. *supra*, chapitre 3). Ainsi, le MNT construit pour l'extraction des formes n'a pu être réutilisé pour ce traitement. Les paramètres choisis pour la construction du TIN grâce à l'outil *Jeu de données LAS vers tin* sont les suivants :

- Type d'affinage : *random* ;
- Méthode d'affinage : *percent* ;
- Valeur d'affinage : 20 ;
- Nombre maximum de nœuds en sortie : 1 000 000 000.

L'outil *Volume du polygone* permet de calculer le volume contenu entre le polygone positionné à une altitude donnée et la surface TIN (figure 4.15). Il faut donc estimer l'altitude de chaque polygone en utilisant les *Statistiques zonales (table)* sur le MNT d'origine et l'option maximum (pour les polygones représentant les formes creuses, cette option permet de situer l'altitude du pixel le plus haut contenu par la forme) ou minimum (pour les polygones représentant les formes surélevées, cette option permet de situer l'altitude du pixel le plus bas contenu par la forme). Après avoir établi la jointure du tableau créé avec la couche vectorielle des formes extraites, le volume a pu être calculé en sélectionnant l'option *Above* pour les formes surélevées et *Below* pour les formes creuses. Au moment de la création du LRM, des seuils de -15 et +15 cm ont été appliqués pour extraire les polémoformes sans

[20]À ne pas confondre avec l'outil Surface-Volume de la même *toolbox*.

prendre en compte les aspérités naturelles du relief. **Il faut par conséquent ajouter aux valeurs obtenues le volume restant**. Ce dernier a été calculé de la manière suivante :

$$A \times 0{,}15$$

Où 0,15 représente la profondeur en mètres située entre le fond de la forme extraite et le niveau topographique de référence.

En raison du caractère particulièrement chronophage de cette étape de calcul des volumes de forme, la quantification n'a pas été opérée sur l'ensemble des structures cartographiées. Alors que les formes compactes et creuses, linéaires et creuses et linéaires et surélevées ont bénéficié d'une telle opération, **cette dernière n'a été réalisée que partiellement pour les formes compactes et surélevées, uniquement autour des formes potentiellement** « **construites** » où l'estimation des volumes de remblais a permis d'affiner leur cartographie.

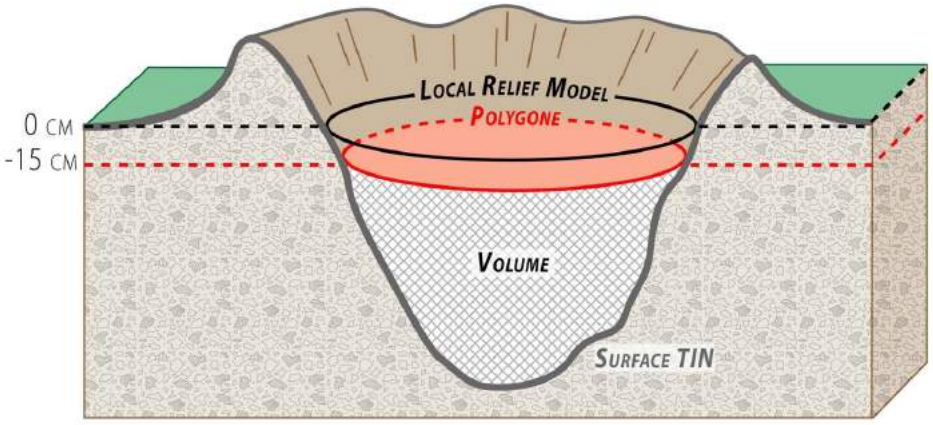


Figure 4.15 – *Exemple de calcul du volume d'un cratère d'obus*

5.2. Localisation des constructions en mou à partir de l'étude des volumes de remblais

Bien que la classification morphométrique permette de catégoriser les polémoformes en familles géométriques, nous constatons par endroit des erreurs d'attribution de classe en raison de similitudes géométriques qui caractérisent des formes d'origines différentes (*e.g.*, un cratère d'obus et une construction de forme circulaire). Pour remédier à ce problème et du fait que les polémoformes construites constituent des structures à haute valeur patrimoniale, **un affinage de la cartographie a été entrepris en repérant et quantifiant les remblais situés à proximité des formes potentiellement aménagées par les soldats**. En effet, l'aménagement du front extrayait du sol des volumes importants de terre, disposés autour des ouvrages pour les protéger des tirs ennemis et des éclats d'obus (GQGA, 1917a). Ces remblais sont particulièrement visibles sur les données LiDAR où ils apparaissent sous la forme d'amas volumineux à proximité des constructions enterrées, à l'inverse des autres types de polémoformes, tels que les cratères d'obus, dont la couronne d'éjectas a généralement

disparu (figure 4.10). Pour repérer automatiquement ces remblais volumineux indiquant la présence de constructions, une zone tampon de 5 m (valeur retenue pour englober l'ensemble des remblais) a été tracée autour des polémoformes potentiellement construites. L'outil *Jointure spatiale* d'ArcGIS® a ensuite permis de calculer la valeur totale du volume contenue par chaque zone tampon. Par la suite, l'attribution des seuils volumiques permettant d'attester de la présence de constructions a été réalisée à l'aide des échantillons observés dans les zones tests (cf. *supra*, 2). Ces derniers possèdent des volumes de remblais compris entre 0,75 et 181[21] fois le volume creusé (par exemple, une valeur de 1 signifie que le volume du remblai est égal au volume creusé). De ce fait, les polémoformes possédant à leur proximité un volume de remblai compris entre ces seuils ont été considérées comme étant des structures aménagées[22]. Bien qu'intéressante, cette approche n'a cependant pas permis de dévoiler pleinement les formes construites et notamment souterraines puisqu'il y avait une certaine volonté de la part des soldats de l'époque à dissimuler les remblais comme l'indique cette note de 1917[23]. Pour cette raison, la détection de fossés à proximité des formes construites ; la plupart de celles-ci reliées aux réseaux de tranchées et de boyaux de communication ; a une nouvelle fois permis d'affiner la cartographie sans toutefois donner lieu au repérage des galeries souterraines.

6. Étude des relations de proximité entre les formes compactes et linéaires

De manière à améliorer les statistiques de détection des constructions en mou (et de récupérer celles dépourvues de remblais), une analyse de leur proximité avec les réseaux de fossés a été entreprise. En effet, lors de l'aménagement du front, la plupart des ouvrages étaient systématiquement reliés aux tranchées et boyaux de communication pour éviter aux soldats de s'exposer aux vues de l'ennemi (GQGA, 1917a). Certains types de construction n'impliquaient cependant pas de tels aménagements, à l'image des positions d'artillerie, parfois isolées, notamment celles situées à distance des premières lignes (Taborelli *et al.*, 2017a). Une telle analyse a exigé de faire appel à une carte des réseaux de défense de l'époque, information qui n'était pas donnée par l'imagerie LiDAR puisque celle-ci date de 2013. La réponse a été trouvée dans les plans directeurs, qui sont des cartes topographiques sur lesquelles sont cartographiés les ouvrages aménagés par les soldats sur le front. Ainsi, les réseaux de fossés manquants – la cartographie a déjà partiellement été réalisée grâce aux données LiDAR – ont été digitalisés manuellement dans ArcGIS® après avoir géoréférencé

[21]L'importance de cette valeur s'explique par la présence de remblais issus du creusement de galeries souterraines (la forme compacte et creuse associée correspondant à l'entrée du tunnel).

[22]Décision qui a eu pour conséquence d'exclure un certain nombre de constructions (celles possédant un volume de remblai situé en dehors des seuils définis).

[23]« *Les parallèles et les boyaux constituent d'excellents couverts pour dissimuler les entrées d'abri. Encore faut-il que des déblais de volume anormal ne viennent pas révéler les constructions souterraines sous-jacentes. Le mieux est, quand on le peut, d'évacuer les déblais à assez grande distance* » (GQGA, 1917a).

ces plans. L'identification de fossés à proximité des constructions en mou a ensuite été réalisée à l'aide d'une requête spatiale dans ArcGIS®. **Toutes les polémoformes dont le contour est situé à moins de 20 m d'une tranchée ou d'un boyau de communication ont été considérées comme des formes construites**.

7. Conclusions

Le développement d'une méthodologie adaptée à l'inventaire des polémoformes sur près de 100 km² a constitué le plus grand défi de ce travail de thèse. Alors que la cartographie n'avait été menée que sur quelques hectares et de manière manuelle au début de la thèse, **celle-ci a progressivement évolué en proposant une approche automatisée**, **réduisant de manière significative la durée des traitements de plusieurs mois à seulement quelques jours**. Comme toute étude en géographie, des prospections pédestres ont été menées entre 2013 et 2017, **permettant de récolter un total de 879 échantillons**. Ces observations *in situ* se sont révélées particulièrement utiles à la fois pour se familiariser avec la morphologie des polémoformes et pour calibrer la méthode de cartographie jusqu'à l'obtention de statistiques de détection satisfaisantes. Plus qu'un simple inventaire, la démarche a également consisté à classifier la majeure partie des formes cartographiées ; c'est-à-dire les formes compactes et creuses (les formes linéaires et creuses ont quant à elles été interprétées à l'aide des documents d'archives) ; sur la base de critères morphométriques, étape permettant leur interprétation et leur cartographie. À cet égard, la plupart des outils employés pour cette opération ont été adaptés de disciplines voisines de la géographie, notamment l'archéologie, la volcanologie ou encore la planétologie. En complément de la cartographie des polémoformes, résultat majeur de la thèse, **la superficie occupée par les polémoformes ainsi que les volumes qui leurs sont associés (volumes déblayés) ont été évalués**, offrant une idée concrète du bouleversement géomorphologique causé par les combats de 1914-1918 sur le front de Verdun. Afin de donner une profondeur temporelle à l'ensemble des cartes produites, ces dernières ont été confrontées à des documents historiques issus de différents centres d'archives allemands et français, incluant des cartes, des photographies aériennes et des récits de soldats. Il convient de conclure cette partie méthodologique en présentant chacune des sources historiques utilisées à cet effet.

Chapitre 5
Enrichissement du LiDAR par les documents d'archives

Comme dans le domaine des armes et des techniques militaires, la Première Guerre mondiale a été un tournant dans le domaine de l'aéronautique et de la télédétection. Onze années après l'exploit des frères Wright (1903) aux États-Unis, l'aviation a connu une véritable révolution qui n'a eu de cesse de progresser jusqu'à la signature de l'armistice en 1918. Pour prendre le dessus sur l'adversaire, les armées ont développé de nouveaux engins volants capables d'effectuer des missions de reconnaissance aérienne et, dans une moindre mesure, de procéder au bombardement de sites stratégiques. Grâce aux nombreux vols engagés, notamment sur le front de l'Ouest, des milliers de photographies aériennes ont été tirées pour aider les États-majors à mieux connaître leur ennemi. Parallèlement, les armées ont chargé leur service géographique de cartographier les positions de l'adversaire à une échelle extrêmement fine (jusqu'au 1/5 000). De tels travaux ont nécessité de mener des observations directes sur le terrain à l'aide d'arbres observatoires, de plateformes artificielles suspendues ou de repérage par le son. Le traitement des photographies aériennes enrichit les informations contenues par ces plans. Bien qu'il ait partiellement disparu au cours des années d'après-guerre, cet héritage documentaire se dissémine dans les nombreux centres d'archives des pays belligérants. En Allemagne et en France, ces collections sont d'une richesse et d'une variété exceptionnelles. Les commémorations du centenaire ont grandement contribué à leur divulgation et à leur numérisation, permettant de consulter une large part de ces archives à distance. Outre leur valeur historique, nous pouvons associer à ces documents une valeur géographique, par les formes de représentation spatiale et/ou les éléments localisés qu'ils fournissent de façon souvent très précise, offrant ainsi de précieux témoignages sur les paysages passés. Par l'exploitation de la profondeur temporelle des documents d'archives, l'image LiDAR de 2013 peut être « décortiquée » et dynamisée pour faire apparaître les grandes phases de métamorphoses géomorphologiques et paysagères du champ de bataille de Verdun. Cet ultime chapitre méthodologique présente les différents types de données utilisées, la manière dont elles ont été obtenues puis exploitées dans un SIG. Il se termine par une brève discussion sur les complémentarités entre les documents d'archives et les données LiDAR.

1. Principales sources historiques utilisées

« *La géographie, ça sert, d'abord, à faire la guerre* » (Lacoste, 1976). Cette célèbre formule se prête bien au rôle joué par les géographes pendant la Première Guerre mondiale car en plus d'être une guerre des hommes, la Première Guerre mondiale a aussi été une guerre des cartes. Aucun combat n'a été couronné de succès sans maîtrise du terrain et c'est l'usage des images et des cartes qui l'a assurée. Dans le cadre d'une approche archéogéomorphologique comme la nôtre, qui s'appuie sur l'étude des paysages, la lecture de tels documents rend compte de l'état de la topographie à différentes époques, notamment avant la transformation du terrain en polémofaciès. L'acquisition d'une partie de ces archives dans des établissements franco-allemands (cf. *infra*, § 2) permet d'envisager une analyse diachronique du relief du champ de bataille de Verdun. Mais d'abord, il convient de décrire les différents types de ressources documentaires et iconographiques exploitées en commençant par les photographies aériennes.

1.1. Les photographies aériennes de 1914-1918

Pourtant tirées à plusieurs centaines de milliers d'exemplaires pendant la Première Guerre mondiale, les photographies aériennes ont fait leur apparition au sein des armées moins d'un demi-siècle avant la déclaration de la guerre. Les premiers clichés employés à des fins militaires sont apparus durant de la guerre de Sécession américaine (1861-1865) et ont représenté le front entre Richmond et Petersburg dans l'État de Virginie (Bourgeois et Stichelbaut, 2009 ; Stichelbaut et Chielens, 2013). En France, c'est seulement en 1910 que l'État-major a pris conscience des potentialités tactiques de la photographie aérienne en installant en région parisienne (École de Chalais-Meudon) un laboratoire d'aérologie et de téléphotographie dont la mission première était de concevoir des appareils photographiques pour cerfs-volants et ballons dirigeables (Villatoux, 2010). Au début de la guerre, le ciel fut pris d'assaut par les « saucisses », nom donné aux ballons dirigeables à la forme allongée transportant à leur bord une équipe chargée d'effectuer des prises de vue à partir d'appareils photographiques rudimentaires en bois. Ces premières missions étaient prometteuses mais en raison de nombreux accidents (faible mobilité, grande taille et fragilité des ballons), ces engins volants furent vite remplacés par des aéroplanes plus furtifs et rapides (Dumarche, 1988 ; Villatoux, 2010 ; IGN, 2014). Au mois d'octobre 1914, trois mois après le commencement de la guerre, les sections photographiques apparurent au sein de l'armée française. Leur création coïncida avec le passage de la *guerre de mouvement* à une *guerre de position*, période où l'insuffisance de connaissance du terrain à grande échelle se fît sentir dans les armées engagées. Pour pallier cette insuffisance, les États-majors conférèrent alors aux photographies aériennes un rôle stratégique dans la reconnaissance des positions

adverses[1]. Dès lors, des missions furent régulièrement menées, permettant d'apprécier l'évolution du champ de bataille quasi quotidiennement (Dumarche, 1988 ; Stichelbaut, 2006, 2009 ; Villatoux, 2010 ; Stichelbaut et Chielens, 2013 ; IGN, 2014). En Flandres par exemple, les forces aériennes belges entreprirent entre 1914 et 1918 pas moins de 24 164 vols au-dessus du front dont 1 467 destinés à la production de photographies aériennes (Stichelbaut, 2009).

Au cours du conflit, trois grands types de photographies aériennes furent produits (Anonyme, 1916 ; Dumarche, 1988 ; Stichelbaut, 2009 ; Villatoux, 2010 ; IGN, 2014 ; figure 5.1) :

- **Les photographies verticales** (les plus courantes) furent prises à des altitudes moyennes (généralement entre un et quatre kilomètres) perpendiculairement à la surface ciblée (en réalité, les outils de l'époque ne permettaient pas de produire des photographies strictement verticales). Elles permettaient d'observer les moindres détails du paysage, parfois jusqu'au soldat, et étaient par conséquent très utiles d'un point de vue tactique pour localiser les positions ennemies ;
- **Les photographies obliques** furent réalisées à basse altitude (moins d'un kilomètre en général) et obtenues par inclinaison de l'appareil photographique. Leur interprétation était plus simple car le rendu était similaire à la vision d'un homme. Elles servirent à l'artillerie pour identifier les zones d'opération ;
- **Les photographies panoramiques** étaient une variante de la photographie oblique, obtenues à des altitudes variables (parfois jusqu'à six kilomètres) par un appareil dont l'axe optique était quasi parallèle à l'horizon. À la différence des deux autres catégories de photographie, le ciel y apparaissait. Plus rares, elles avaient l'avantage de représenter une vue générale du front.

L'altitude n'est pas la seule variable qui influençait la précision des images récoltées. Des lentilles à focales variables équipèrent les appareils photographiques (26, 50 et 120 cm pour les Français ; 25, 50, 70 et 120 cm pour les Allemands) et chacune possédait un usage spécifique mais toujours destiné au repérage des dispositifs de défenses adverses (Stichelbaut, 2009 ; Villatoux, 2010 ; IGN, 2014). Par ailleurs, les photographies tirées pendant le conflit furent souvent de mauvaise qualité en raison des conditions météorologiques, de l'instabilité des avions, de problèmes techniques, de manipulation de l'appareil photographique ou du manque de précision des lentilles (SGA, 1936 ; Dumarche, 1988 ; Stichelbaut, 2009 ; Stichelbaut et Chielens, 2013). **Au bilan, côté français, il est estimé à 600 000 le nombre de photographies aériennes imprimées tout au long du conflit** (IGN,

[1]À l'issue de la première bataille d'Ypres en décembre 1914, le commandant Guillabert de la 8ème armée déclarait : « *Les photographies donnent d'une manière saisissante tout l'essentiel de l'organisation du front ennemi, de Wytschaete à Passchendaele* […]. *On y découvre aussi, par les traces nombreuses de points d'impact visibles sur le sol, les effets du tir de notre artillerie sur les objectifs déjà repérés* » (cité par Villatoux, 2010).

2014), chiffre certainement comparable pour le camp allemand au vu de la richesse des collections conservées dans les centres d'archives outre-Rhin (cf. *infra*, § 2.2).

***Figure 5.1** – Trois types de photographies aériennes tirées pendant la Grande Guerre. A : photographie verticale française du 13 juillet 1917 (collection personnelle). B : photographie oblique allemande du 30 juin 1916 (Bundesarchiv-Abteilung Militärarchiv). C : photographie panoramique française du 25 août 1917 (collection de François-Xavier Bernard).*

L'interprétation des photographies aériennes demande un effort certain, d'abord pour distinguer les éléments du paysage naturel, puis pour identifier les constructions militaires[2] (sachant que le camouflage des objets peut complexifier l'analyse ; Stichelbaut, 2006, 2009 ; Stichelbaut et Chielens, 2013). La difficulté réside aussi dans le déchiffrage des annotations manuscrites, parfois incompréhensibles, incomplètes ou effacées, mais pourtant d'une importance cruciale. Une bonne photographie est censée préciser le lieu de la surface photographiée, l'auteur (et/ou le numéro d'escadre), l'altitude de l'avion, la date et l'heure de la photographie et la distance focale. Pour notre étude, les informations de lieu et de date de la prise de vue suffisent (cf. *infra*, § 3.1.1) mais en l'absence d'un de ces deux paramètres, l'exploitation des photographies est difficile. Du fait qu'elles représentent la réalité du terrain à différentes époques (quand nous disposons d'images diachroniques), les photographies aériennes servent à l'étude des paysages aussi bien géomorphologique que biogéographique. Elles aident à mieux comprendre les processus et la vitesse de destruction du relief et des

[2]Pour l'aide à la lecture des photographies aériennes, nous conseillons l'ouvrage co-édité par Stichelbaut et Chielens (2013).

massifs boisés tout en offrant un moyen de repérer les aménagements militaires (Amat, 1988 ; Bourgeois et Stichelbaut, 2009 ; Stichelbaut et Chielens, 2013). Elles possèdent aussi l'avantage d'avoir été produites en grand nombre sur le front et sont par conséquent faciles à consulter. Les photographies aériennes ont donc constitué une donnée de premier choix pour la production de cartes diachroniques du champ de bataille de Verdun.

1.2. Les plans directeurs

Suite à la défaite de la guerre franco-prussienne de 1870-1871 et parallèlement aux progrès de l'artillerie, l'État-major français prît conscience que l'usage de la carte ne devait plus être limité au commandement mais devait aussi servir sur le terrain (Lévy, 1926 ; SGA, 1936 ; Combaud *et al.*, 2016 ; Taborelli *et al.*, 2017a). Dès l'année 1914, le Service géographique de l'Armée (SGA, ancêtre de l'Institut géographique national) ravitailla les artilleurs en cartes au 1/80 000 et 1/200 000 pour aider aux opérations. La production s'accéléra avec l'apparition de la guerre statique fin 1914. Pour satisfaire ses besoins, l'État-major français restructura le SGA et créa en janvier 1915 les groupes de canevas de tir (GCTA), unités essentiellement constituées d'officiers cartographes et d'ingénieurs des services hydrographiques de la marine (Lévy, 1926 ; SGA, 1936 ; Combaud *et al.*, 2016). Ces groupes eurent pour mission de reprendre et compléter les levés topographiques (canevas) destinés à l'artillerie de campagne et de produire pour toutes les unités, infanterie comprise, des cartes à plus grandes échelles (figures 5.2 et 5.3). Côté allemand, l'équivalent des groupes de canevas de tir fut créé au printemps 1915 : les *Kriegvermessungs-Abteilungen* (Villate, 1925). Les cartes produites par les deux camps étaient appelées **plans directeurs**[3] et furent tirées aux **échelles 1/5 000** (jusqu'à trois kilomètres de côté, pour les croquis d'attaque), **1/10 000** (jusqu'à six kilomètres de côté, pour l'infanterie) et **1/20 000 pour les Français et 1/25 000 pour les Allemands** (jusqu'à dix kilomètres de côté, pour l'artillerie ; GQGA, 1917b ; GQGA, 1918 ; Lévy, 1926 ; SGA, 1936 ; Bacchus, 1988 ; Villatoux, 2010 ; Combaud *et al.*, 2016 ; Taborelli *et al.*, 2017 a et b). Elles complétèrent les cartes existantes par observations directes sur le terrain, par les airs (les photographies aériennes étaient utilisées pour compléter les plans ; SGA, 1936 ; Bacchus, 1988 ; Stichelbaut, 2006, 2009 ; Villatoux, 2010 ; Stichelbaut et Chielens, 2013), ou de manière plus surprenante, par le son (à partir de 1915 pour les Français et 1916 pour les Allemands ; Lévy, 1926 ; SGA, 1936 ; Bacchus, 1988 ; Combaud *et al.*, 2016). Au total, **plus de 13 millions de plans directeurs français furent imprimés entre 1914 et 1918** (93 % d'entre eux entre 1916 et 1918) à l'échelle de tout le front de l'Ouest (Belgique

[3]Entre 1914 et 1915, ces plans servaient uniquement aux artilleurs et étaient alors appelés plans directeurs de tir. Par ailleurs, le mot « directeur » signifie que ces cartes renseignaient sur les constructions adverses invisibles depuis la position de tir, qu'elles « dirigeaient » (Combaud *et al.*, 2016).

incluse ; Lévy, 1926 ; SGA, 1936 ; Combaud *et al.*, 2016). Les chiffres sont mal connus du côté allemand mais doivent être tout aussi importants[4].

La lecture des plans directeurs est relativement simple malgré l'absence fréquente d'une légende. Celle-ci peut être consultée dans des ouvrages spécifiques[5]. Sur chaque document étaient cartographiées la majorité des constructions aménagées (la carte n'était pas exhaustive ; cf. *infra*, § 4.2.2). Nous y trouvons à la fois les réseaux de fossés, les abris, les batteries d'artillerie, les chemins de fer, mais aussi des informations secondaires, telles que les entonnoirs de mine (très peu sur les plans du champ de bataille de Verdun), les réseaux de barbelés et d'autres types de défense. La précision et le nombre d'édifices présents sur les plans augmentent avec l'échelle (maximum d'informations sur ceux au 1/5 000). La distinction entre les deux camps s'opère par la couleur : **en rouge**, **les positions françaises, en bleu**, **les positions allemandes.** Cette logique est maintenue sur les plans allemands (figure 5.3).

En raison de la précision exceptionnelle des plans directeurs et du nombre important de tirages, ces ressources ont constitué un autre type de document privilégié pour dynamiser les cartes de formes obtenues par extraction semi-automatique. Cependant, aucun document antérieur à l'année 1916 n'a été trouvé. Les plans récupérés nous ont uniquement renseignés sur l'évolution du champ de bataille entre le début de la bataille de Verdun et l'armistice. En complément, ces plans ont permis de repérer sur les images LiDAR de 2013 les formes conservées ou disparues (en particulier les réseaux de fossés).

1.3. Les photographies *in situ* et les cartes postales

L'essor de la photographie aérienne durant la Première Guerre mondiale s'est logiquement accompagné d'un mouvement de production photographique au sol. Alors que les scènes de guerre n'étaient représentées que par les gravures et peintures jusqu'à la fin du XIXème siècle, la photographie était surtout utilisée par la société civile (Guillot, 2010). Ce phénomène est notamment lié à la naissance, quelques années avant la guerre (1912), de l'appareil photographique « révolver » de Kodak, aisément transportable du fait de sa petite taille. Il permettait aux personnes l'utilisant de développer elles-mêmes leurs photographies sans passer par un laboratoire (Jalabert et Puton, 2014). En conséquence, de nombreux soldats emportèrent leur propre appareil photographique sur les lieux des combats dès 1914. Un nombre incalculable de photographies furent ainsi tirées pendant la Grande Guerre, en grande majorité issues du domaine privé (figure 5.4).

[4]Dans un numéro spécial d'IGN magazine (IGN, 2014) consacré à la cartographie de la Grande Guerre, l'officier historien Rémy Porte évoque un nombre de 800 millions de plans allemands imprimés (les copies d'un même plan étaient comptabilisées).

[5]Nous conseillons la lecture de l'article de Combaud *et al.* (2016).

Figure 5.2 – *Les cartographes des groupes de canevas de tir en action au QG de la place fortifiée de Verdun. Cliché : J. Bouchetal, 1er janvier 1916 (ECPAD).*

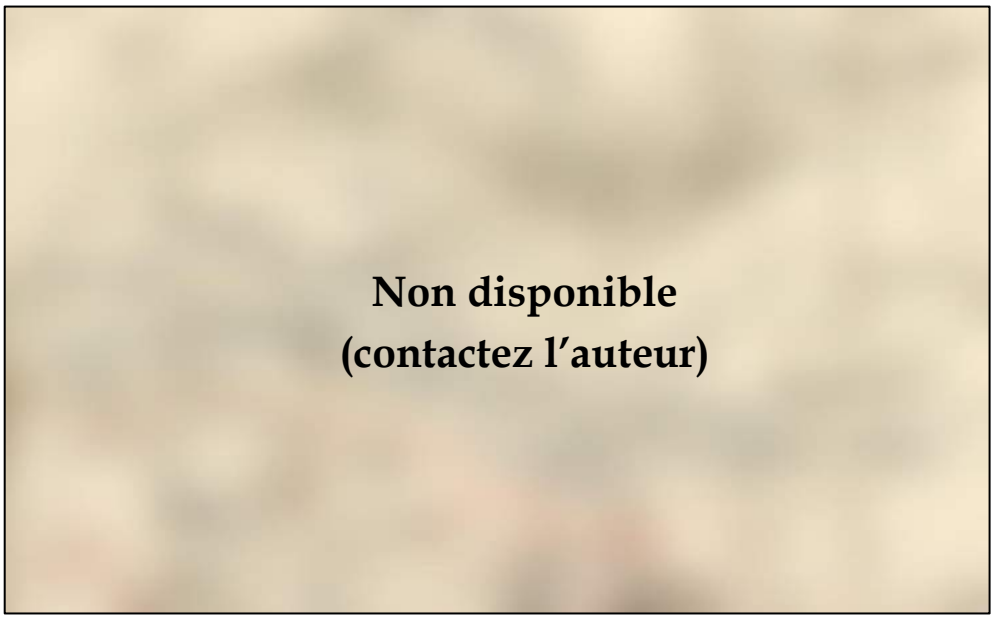


Figure 5.3 – *Extrait d'un plan directeur allemand au 1/10 000 du 10 mars 1917. Le secteur cartographié se situe au sud-ouest du village détruit d'Ornes. En bleu, les positions allemandes, en rouge, les positions françaises (Bayerisches Hauptstaatsarchiv).*

En complément, de nombreux tirages commandés par les institutions du domaine public furent produits, notamment les médias souhaitant illustrer leurs journaux par des photographies et ainsi servir l'effort national et la propagande (Lafon, 2008 ; Guillot, 2010 ; Jalabert et Puton, 2014). Certains soldats furent même amenés à vendre leurs productions aux médias. Des reportages photographiques furent aussi conduits par l'armée afin d'immortaliser les scènes de vie des soldats, des combats au front et des paysages ravagés par les bombardements.

Figure 5.4 – *Vue des ruines du village d'Haumont-près-Samogneux depuis le nord-ouest (juin 1917). Au premier plan, une tranchée allemande. Au second plan, les ruines du village. À l'arrière-plan sur la droite, le fort de Douaumont (Bayerisches Hauptstaatsarchiv).*

Figure 5.5 – *Carte postale illustrant les bombardements du 21 février 1916 dans le bois des Caures (collection personnelle)*

Parallèlement aux photographies, la carte postale se développa pour renseigner auprès du grand public sur les ravages de la guerre. Ces documents, portant pour la plupart sur des ruines de villages ou des paysages bouleversés (un des rares thèmes non censurés), naquirent des photographies prises par des professionnels ou des amateurs (Danchin, 2011 ; figure 5.5). Plus rarement, la carte postale représentait un dessin, notamment quand l'auteur souhaitait illustrer un paysage en cours de destruction (Danchin, 2011). La plupart des productions, qui servirent ainsi de propagande pour illustrer les destructions causées par le camp adverse n'en demeurent pas moins des documents précieux pour connaître l'état des paysages.

En complément des photographies aériennes et des plans directeurs, ces ressources iconographiques, issues du domaine public ou privé, possèdent un potentiel considérable en matière de reconstitution des paysages passés. Même si elles n'ont pas été utilisées en priorité dans le cadre d'une analyse diachronique du champ de bataille, elles ont servi d'illustration à l'échelle locale, notamment lorsque les informations toponymiques sont renseignées pour repérer le lieu de la prise de vue.

1.4. Les journaux de guerre

Au cours de la Première Guerre mondiale, chaque unité de l'armée française devait rédiger un compte-rendu des opérations menées quotidiennement sur le front. Ces documents, appelés *journaux de marches et opérations* ou **JMO**, contenaient des informations relatives aux effectifs, aux opérations et à la reconnaissance (Roucaud, 2007). En Allemagne, les mêmes consignes furent données et les officiers se devaient de compléter un *Kriegstagebuch* ou KTB[6]. Pour la thèse, ces documents ont constitué **une source pertinente dans la mesure où ils apportent des informations relatives aux paysages et aux constructions**. Cependant, leur étude demande un certain effort, d'abord parce que tous les événements y étaient relatés quotidiennement (y compris jusqu'aux moindres détails), ensuite parce qu'elle implique une recherche préalable des troupes ayant combattu à Verdun (seuls les journaux des unités de Verdun nous ont intéressé). Malgré ce lourd travail, quelques recherches ont été menées, uniquement dans les JMO français et en grande majorité dans ceux du Génie (corps des troupes ayant pour mission d'aménager le champ de bataille et de construire les défenses), où de nombreux croquis de constructions accompagnés de leurs dimensions apparaissent (figure 5.6). Des informations sur la configuration des paysages, notamment sur la nature des sols creusés, y sont également mentionnées.

[6]En réalité, ces journaux de guerre existaient depuis 1850 pour les Allemands et 1874 pour les Français.

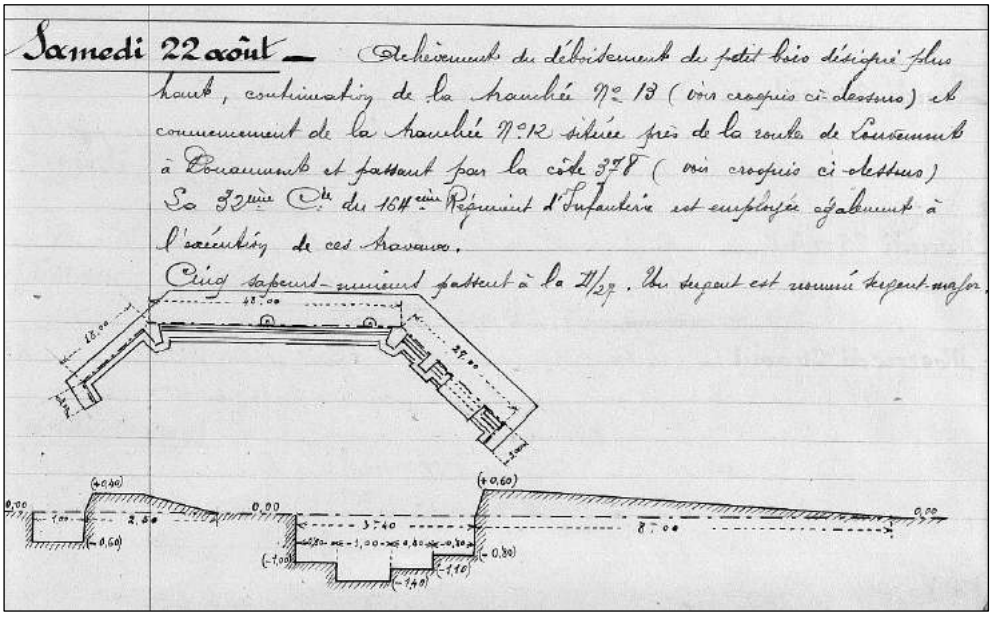

Samedi 22 août — Achèvement du déboisement du petit bois désigné plus haut, continuation de la tranchée N° 13 (voir croquis ci-dessous) et commencement de la tranchée N° 12 située près de la route de Louvemont à Douaumont et passant par la côte 378 (voir croquis ci-dessous)
La 32ème Cie du 164ème Régiment d'Infanterie est employée également à l'exécution de ces travaux.
Cinq sapeurs-mineurs passent à la 11/27. Un sergent est nommé sergent-major.

Figure 5.6 – Extrait du JMO du 9ème régiment du génie le 22 août 1915. Ce JMO de la compagnie 25-5 du 9ème RG montre l'avancée des travaux dans le secteur de la ferme des Chambrettes au nord du fort de Douaumont le 22 août 2015. Des croquis de tranchées avec leurs dimensions apparaissent (site web Mémoire des Hommes).

2. Localisation et inventaire des documents récoltés

Bien que le nombre précis de documents de la Première Guerre mondiale ayant survécu soit inconnu, **le corpus entier se chiffre à plusieurs millions de documents.** Cette imprécision est principalement liée à la part prépondérante des ressources du domaine privé, dont l'existence demeure inconnue du grand public. Dans les centres d'archives publics, très peu d'inventaires ont été menés et il reste difficile de rendre compte précisément du nombre de documents conservés. En 2009, Stichelbaut a déchiffré cette voie en produisant un inventaire proche de l'exhaustivité[7] sur une douzaine de centres d'archives, incluant des archives militaires, des musées et mémoriaux. Ce travail nous a grandement guidé, en ciblant notamment les établissements susceptibles de répondre à notre demande sur le front de Verdun (figure 5.7). Cependant, nos recherches n'ont pas eu pour but d'établir un inventaire exhaustif des sources cartographiques et iconographiques du front de Verdun, foisonnantes, parfois inutiles voire inexploitables. **Nous nous sommes contentés de retenir les documents les plus intéressants** (lieu, date clé), **les mieux conservés** (pour limiter les erreurs d'interprétation et/ou de géoréférencement) **et de meilleure qualité** (où les polémoformes sont visibles). Présentons maintenant le corpus documentaire obtenu sur notre zone d'étude.

[7]Cet inventaire fondé sur la recherche de documents relatifs au front belge a été complété la même année par un travail collectif co-édité par le même auteur portant sur toutes les archives de la Grande Guerre : Stichelbaut *et al.* (2009).

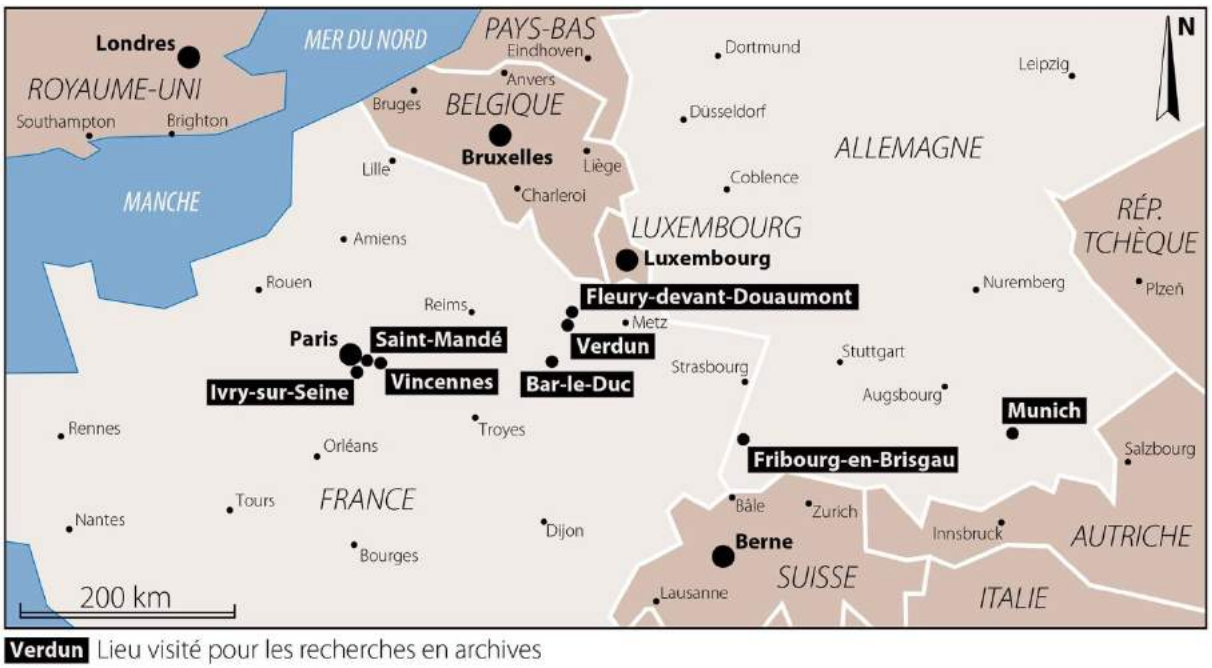


***Figure 5.7** – Localisation des centres d'archives visités*

2.1. Les ressources documentaires françaises

Le travail de thèse portant sur le champ de bataille de Verdun, il semblait indispensable de récolter des documents au sein des centres d'archives français. Les visites ont été entreprises au printemps 2015 et 2016 (durant les missions de terrain) pour les centres meusiens et pendant l'été 2016 pour ceux de la région parisienne.

2.1.1. Le Service historique de la Défense (SHD) de Vincennes

Parmi les établissements publics visités en France, **le plus important est le Service historique de la Défense (SHD) de Vincennes**, établissement où sont conservées la plupart des archives du ministère de la Défense et la majorité des documents issus de la Première Guerre mondiale côté français. Les archives sont organisées selon les quatre composantes des forces armées françaises : l'armée de Terre (série GR), l'armée de l'Air (série AI), la Marine nationale (série MV) et la Gendarmerie nationale (série GD). Pour chaque composante, les sous-séries sont classées par ordre alphabétique et chacune d'elles correspond à une période de l'histoire et/ou un thème particulier. Pour notre part, seules les séries des cotations GR, AI et MV ont été consultées[8] (annexe C). C'est au SHD que la plupart des plans directeurs dessinés par les groupes de canevas de tir ont subsisté bien que le nombre de documents consultables soit bien différent du nombre de plans tirés pendant le conflit (cf. *supra*, § 1.1).

[8]L'ouvrage de De Auer-Véran (2008) portant sur les archives de l'aéronautique militaire et les catalogues mis à notre disposition à l'accueil du SHD ont été utilisés pour identifier les côtes susceptibles de nous intéresser.

La section GR / 6M / LVI / B y est entièrement consacrée[9], contenant pas moins de 3 155 plans de diverses parties du front dont 1 279 plans à 1/5 000, 706 plans au 1/10 000, 981 plans au 1/20 000, 169 plans au 1/50 000 et 20 autres plans à des échelles allant du 1/6 250 au 1/200 000. Cette section a logiquement été consultée et **114 plans du front de Verdun ont été récupérés** ; un mois a été nécessaire pour photographier tous les plans (seul moyen de reproduction autorisé avec les photocopies) ; tableau 5.1. D'autres plans figurent dans des séries différentes et dans les JMO mais ceux-ci n'ont pas été intégrés à la base de données[10]. La richesse documentaire du SHD réside aussi dans le nombre important de photographies aériennes disponibles sur la période 1914-1918. **Ce patrimoine est estimé à près de 12 000 photographies**, nombre bien inférieur aux tirages réellement réalisés[11] (Beylot, 2009 ; Stichelbaut, 2009). De plus, leur dépouillement est particulièrement complexe car ces collections apparaissent dans plusieurs séries et sous-séries. Sur les dix sous-séries étudiées, seules les sous-séries AI / 1A[12], AI / Z[13] et GR / 19N[14] détiennent des photographies aériennes du front de Verdun (ce travail a représenté la consultation de 63 sous-sections, soit environ deux mois de dépouillement de documents). **260 documents ont été récupérés** (annexe C). Enfin, le SHD détient près de 18 453 JMO des forces terrestres françaises engagées durant le conflit de 1914-1918 (Roucaud, 2007). Leur lecture s'opère au moyen d'un portail informatisé consultable à distance (Mémoire des Hommes). Ces documents sont classés par grandes unités, par régiments et par bataillons. Pour cette raison, une recherche préalable des troupes ayant combattu à Verdun s'est imposée pour cibler les JMO utiles[15]. **27 JMO ont été consultés** (annexe C).

2.1.2. L'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN)

Connu sous le nom de Service géographique de l'Armée jusqu'en 1940, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) de Saint-Mandé détient un grand nombre de cartes éditées pendant la Première Guerre mondiale. Alors que la plupart des plans directeurs sont stockés au SHD, l'IGN conserve des cartes historiques de tous genres sur la période 1914-1918. Les documents sont disponibles au format numérique à partir d'un ordinateur situé à l'accueil de la cartothèque[16]. **44 cartes ont été récoltées** (annexe C),

[9]GR : série de l'Armée de terre ; 6M : sous-série du fonds des cartes et plans ; LVI / B : section des canevas de tir (1914-1918).

[10]Ces plans sont consultables dans des ouvrages et sont d'une qualité médiocre (pliures). De plus, ils constituent souvent des doublons des plans de la section GR / 6M / LVI / B.

[11]200 000 d'après Beylot, 2009.

[12]AI : série de l'Armée de l'air ; 1A : sous-série des archives de l'aéronautique militaire.

[13]Z : sous-série des fonds entrés par voie extraordinaire.

[14]19N : sous-série des armées du front occidental (1914-1918).

[15]Les plans directeurs qui affichent les numéros et les positions de bataillon sont d'une grande utilité pour identifier les troupes ayant combattu à Verdun. Les recherches privées menées par François Belleil, professeur d'histoire/géographie au lycée Marc Chagall de Reims, et Vincent Ollive, Maître de conférences en géographie à l'université de Lorraine, nous ont aussi grandement aidées.

[16]Fonds Guerre Mondiale 1 ou GM1.

principalement des documents publiés par le SGA, incluant 3 cartes générales du front de Verdun (du 1/50 000 au 1/80 000), 5 cartes topographiques d'avant-guerre de la région de Verdun (du 1/40 000 au 1/50 000), 6 plans directeurs du front de Verdun (du 1/10 000 au 1/20 000) et 30 cartes des unités engagées à Verdun et sur le front occidental (du 1/50 000 au 1/600 000). La photothèque de l'IGN, détient, elle, près de 5 millions de photographies aériennes mais aucune n'a été prise avant l'année 1919. Quelques photographies relatives à la région de Verdun ont été consultées ; trop récentes, elles n'ont pas été retenues pour notre étude.

2.1.3. Musée de l'Armée à Paris

Le musée de l'Armée détient certainement avec le SHD **la plus grande collection de photographies aériennes du front occidental**. Près de 3 000 documents y sont conservés au sein du cabinet des dessins, estampes et photographies (Beylot, 2009). Le projet ATHENA (armes, techniques, histoire, emblèmes, nation, armée) de modernisation du musée, a rendu l'accès à ces collections malheureusement impossible durant la réalisation de ce mémoire. Après dix années de travaux, la salle de lecture n'a été rendue accessible qu'en mars 2018. Une recherche dans ces archives au cours du printemps de la même année n'a pas été envisagée au vu du calendrier d'élaboration de la thèse.

2.1.4. Établissement de communication et de production audiovisuelle de la Défense (ECPAD)

À l'inverse du SHD, qui a conservé des documents édités par le SGA ou confiés par des donateurs privés, l'ECPAD (fort d'Ivry-sur-Seine) détient des photographies et reportages produits par les forces armées françaises depuis 1915. Aucune photographie aérienne ou plan directeur n'a été trouvé dans ces archives. En revanche, **12 photographies** issues des séries CB, E, G, J, M, N et des collections Williamson Pierre et Lefèvre Gilles **ont été retenues** pour leurs scènes captivantes d'un point de vue paysager (annexe C).

2.1.5. La bibliothèque d'étude de Verdun

La bibliothèque d'étude de Verdun – à ne pas confondre avec le centre de documentation du Mémorial de Verdun (cf. *infra*, § 2.1.6) – possède un grand nombre de documents relatifs à la Première Guerre mondiale dont une collection assez importante de photographies aériennes du front de Verdun. Celles-ci peuvent être consultées dans le fonds Rudolf Ingber (classeurs 2 et 3) et la collection Wiedemann (70143 bis). **55 photographies aériennes ont été photographiées**[17]. Notre visite a aussi permis l'**acquisition de 5 plans directeurs au 1/20 000**

[17]Pas de scanner disponible sur place.

issus du tome 4 de la collection des *Armées françaises dans la Grande Guerre*[18] et de 4 clichés de paysages dans le fonds Rudolf Ingber (classeurs 1, 3 et 5 ; annexe C).

2.1.6. Le centre de documentation du Mémorial de Verdun

Le centre de documentation du Mémorial de Verdun situé à l'emplacement du village détruit de Fleury-devant-Douaumont possède une bibliothèque spécialisée dans la Première Guerre mondiale. Hormis les nombreux ouvrages portant sur les témoignages des combats, sur l'artillerie, sur les faits historiques de la bataille de Verdun, nous y avons trouvé de nombreuses ressources iconographiques. Tout d'abord, il est possible d'accéder à une partie du fonds numérisé *via* l'ordinateur mis à la disposition des chercheurs. La visualisation du fonds Nicolas Czubak a donné lieu à la **récupération de 23 photographies aériennes**. L'autre partie de la collection du centre de documentation n'a pas été numérisée et doit être consultée sur place. L'accès aux fonds CP12 (bataille de Verdun), CP23 (Verdun, ville, bataille, monuments, villages détruits) et CP24 (vie au front, abris, tranchées, fortification, ravitaillement, communications) nous a permis d'**enrichir notre base par 21 photographies et cartes postales** (annexe C).

2.1.7. Archives départementales de la Meuse

Les archives départementales de la Meuse à Bar-le-Duc conservent une part importante des collections privées du département de la Meuse. À l'image des autres centres d'archives départementaux, les collections sont classées par série et par ordre alphabétique. Les documents relatifs à la Grande Guerre sont pour la plupart numérisés[19] et directement consultables sur les machines de la salle de lecture. Ils peuvent sur demande être téléchargés. En visualisant les documents de la sous-série Fi (collection iconographique sur la Première Guerre mondiale : Meuse, 1914-1918), nous nous attendions à enrichir notre base. Bien que la collection soit riche de photographies privées et de cartes postales, nos recherches n'ont pas donné lieu à la découverte de nouvelles photographies aériennes ou plans directeurs. Toutefois, la consultation de la sous-série 3P (P : finances, cadastres, postes, 1800-1940) a permis de récupérer les **cadastres napoléoniens des communes sur lesquelles s'étend la forêt domaniale de Verdun, soit un total de 477 plans répartis sur 25 communes**. Ces précieux documents du XIXème siècle nous ont renseignés sur l'**occupation du sol avant la Première Guerre mondiale**. Pour cette raison, ils ont été utilisés en amont de l'inventaire des formes pour identifier les structures antérieures à la période 1914-1918.

---

[18]D'après la description donnée par le portail Gallica de la bibliothèque nationale de France, « *la collection des Armées françaises dans la Grande Guerre est présentée comme « l'histoire définitive de la Grande Guerre, établie d'après les journaux de marche des unités et la documentation la plus complète »* […] *et s'élève à 107 volumes, organisés en 11 tomes* ».

[19]En cet anniversaire du centenaire de la Grande Guerre, les fonds de la Première Guerre mondiale sont très prisés.

2.2. Les ressources documentaires allemandes

À l'inverse des centres de documentation français privilégiant un accès libre et gratuit aux archives de la Grande Guerre[20], la politique allemande est plus stricte puisque la récupération de documents par quelque moyen que ce soit est soumise au paiement d'un montant variable selon le type de reproduction et la nature des archives. Il en a découlé un nombre limité de documents consultés lors de nos visites[21]. Une autre différence réside dans la centralisation des archives. Alors que la plupart des documents français de la Grande Guerre sont principalement conservés au SHD de Vincennes, ceux de l'Allemagne sont dispersés à travers le pays[22]. D'après l'inventaire réalisé par Stichelbaut (2009) et Haupt (2009), les archives allemandes de la Grande Guerre sont conservées dans trois centres d'archives majeurs : ceux de Munich, Fribourg-en-Brisgau[23] et Stuttgart. Cependant, **les archives du front de Verdun se trouvent essentiellement à Munich et Fribourg-en-Brisgau.** Nous avons donc organisé une visite de ces deux établissements ; le séjour en Allemagne a eu lieu en septembre et octobre 2016.

2.2.1. Bayerisches Hauptstaatsarchiv (Abt. IV: Kriegsarchiv)

Parmi les centres d'archives allemands les plus fournis en ressources iconographiques et cartographiques, citons les archives bavaroises de la guerre de Munich *(Bayerisches Hauptstaatsarchiv)*. Il est estimé à **300 000 le nombre de photographies aériennes du front de l'Ouest qui y sont conservées** (Haupt, 2009), ce qui en fait certainement la collection la plus importante d'Europe voire du monde. Nous y trouvons également de nombreux plans directeurs édités par les *Kriegvermessungs-Abteilungen*. Les archives sont organisées par grands thèmes. Les collections suivantes ont été consultées (annexe C) :

- ***Karten von Schlacht um Verdun*** ou cartes du champ de bataille de Verdun : la collection contient un nombre assez important de plans (équivalents des plans directeurs français). **12 d'entre elles ont été retenues (du 1/5 000 au 1/25 000)** ;
- ***BS-Aufklärung*** (*BS* pour *Bildsammlungen*) ou collection photographique de reconnaissance : les documents sont classés par unité dans 127 *kartonen* (boîtes). Il s'agit certainement de la collection de photographies aériennes la plus remarquable du centre bien que le nombre exact de documents qu'elle contient ne soit pas connu (Stichelbaut, 2009). Elle se compose de photographies aériennes prises par les

[20]Nous entendons par-là que les documents peuvent être récupérés gratuitement par voie numérique ou photographique à condition de ne pas les publier.

[21]Une fiche comprenant les côtes des documents désirés a été complétée dans chaque centre d'archives. Après règlement, les fonds ont été reçus par voie postale sur un CD-ROM.

[22]À l'issue du conflit, les différentes armées allemandes (armées de Bavière, de Saxe, de Prusse…) ont ramené ces documents dans leur État respectif.

[23]Il s'agit d'une antenne de la *Bundesarchiv* de Coblence spécialisée dans les archives militaires.

escadres de l'armée de l'air bavaroise *(Feldflieger-Abteilung)*. **5 photographies aériennes**[24] sont issues de cette collection (*kartonen* 2, 52 et 57) ;

- ***BS-Nachlass*** ou collections photographiques privées : la consultation des fonds du général Konrad Krafft von Dellmensingen a permis de retenir **5 photographies de paysages du champ de bataille** (K3a-12r, K3a-13r, K3a-19r, K4-8r et K6-14r) ;
- ***BS-Rundblick Weltkrieg S. 1,1. Westfront*** ou collection de photographies panoramiques de la Première Guerre mondiale du front de l'Ouest : elle contient de nombreuses photographies panoramiques prises au sol. Certaines d'entre elles offrent un aperçu des paysages de la région de Verdun avant les combats de 1916. **21 documents ont été retenus**, constituant les photographies panoramiques n°280, 298, 318, 333, 345 et 384[25].
- Les collections *BS-VermTr (VermTr* pour *Vermessungstruppen)*, *Staudinger-Sammlung* et *Bild Sammlung Negative Allgemeine Serie* ont aussi été consultées mais aucun document du front de Verdun n'a été repéré dans les boîtes dépouillées.

2.2.2. Bundesarchiv-Abteilung Militärarchiv

Alors que la *Bayerisches Hauptstaatsarchiv* de Munich détient les fonds de l'armée de Bavière, la *Bundesarhiv-Abteilung Militärarchiv* de Fribourg-en-Brisgau conserve les archives de l'armée prussienne. Elle possède une collection iconographique et cartographique exceptionnelle dont l'inventaire est lui aussi incomplet. La collection de cartes issues de la période 1914-1918 est, en termes quantitatifs, très proche du fonds cartographique du SHD. Près d'une centaine de cartes du front de Verdun (équivalents des plans directeurs français) ont ainsi été observées dans le fonds *PH 3-Kart* (*Generalstab des Feldheeres* ou cartes de l'État-major de l'armée allemande) et **29 ont pu être récupérées (du 1/5 000 au 1/80 000).** La collection iconographique est elle aussi très riche. La consultation des fonds *PH 19* (*Fliegertruppen* ou escadres de l'armée de l'air prussienne) a permis d'enrichir la base par **13 photographies aériennes** (annexe C). Certaines sont disponibles sur papier, d'autres sur microfilms mais l'exploitation de documents affichés sur écran est rendue difficile pour toutes fins cartographiques[26].

2.3. Les ressources documentaires américaines de la *National Archives and Records Administration* (NARA)

Cité comme le centre majeur des archives américaines, la *National Archives and Records Administration* (NARA) de Washington détient de nombreuses cartes et photographies aériennes produites par les forces armées américaines entre 1917 et 1919 (Stichelbaut, 2009).

[24]Les plus intéressantes ont été sélectionnées bien que le nombre de photographies aériennes du front de Verdun observées dans ces boîtes soit beaucoup plus important.

[25]En réalité, ces photographies panoramiques sont le fruit de l'assemblage de photographies prises côte à côte. Un panorama contient donc plusieurs photographies.

[26]Des notes ont été prises sur une centaine de photographies aériennes.

Une petite collection de photographies aériennes françaises est également conservée. Afin de prendre connaissance du fonds documentaire relatif au front de Verdun, des contacts ont été pris avec l'administration de la NARA pour éviter tout déplacement inutile. En réponse à notre demande, un dossier contenant 6 photocopies de photographies du champ de bataille de Verdun nous a été envoyé par voie postale. Au vu des résultats insuffisants, nos recherches à la NARA n'ont pas été poursuivies bien que le dossier reçu mentionne que le centre de cartographie soit susceptible de détenir de tels documents[27].

2.4. Documents obtenus par voie privée

Suite à la mise en place d'une convention de recherche avec l'ONF dans le cadre du travail de thèse, l'intégralité de la base de données iconographiques enrichie par G. Colin[28] a pu être récupérée. **Cette dernière se compose de 8 plans directeurs (du 1/5 000 au 1/20 000) et de 261 photographies et cartes postales du front de Verdun**. En complément, notre mission de support scientifique (2015) pour le compte du Mémorial de Verdun (cf. *infra*, chapitre 8) a permis de nous procurer près de **400 documents de types photographies et cartes postales et 13 photographies aériennes au format numérique**. Ces documents confiés par É. Desrousseaux de Medrano[29] proviennent directement de 5 centres d'archives français et allemands incluant la Bibliothèque de documentation internationale contemporaine (BDIC) de Nanterre, l'ECPAD, l'Historial de Péronne (Somme), le Musée de la Grande Guerre de Meaux et l'*Hauptstaatsarchiv* de Dresde (Allemagne). Par ailleurs, le succès de ces recherches provient aussi de la générosité de donateurs privés rencontrés durant le doctorat. Nous les en remercions (par ordre alphabétique) :

- **J.-P. Amat**, professeur émérite de géographie à l'université Paris-Sorbonne (Paris 4) : 1 plan directeur et 4 photographies aériennes.
- **F. Belleil**, professeur d'histoire/géographie au lycée Marc Chagall de Reims : 13 plans directeurs du 1/10 000 au 1/20 000.
- **D. Daval**, archéologue bénévole associé à la Maison des sciences de l'homme et de l'environnement Claude-Nicolas Ledoux de Besançon : 40 photographies et cartes postales.
- **V. Ollive**, Maître de conférences en géographie à l'université de Lorraine (Nancy) : 4 plans directeurs du 1/10 000 au 1/20 000.
- **C. Tridon**, antiquaire à Verdun : 6 plans directeurs du 1/10 000 au 1/20 000.
- **F. Xavier-Bernard**, consultant dans le domaine linguistique et éditorial à Milan : 56 photographies aériennes.

---

[27]Réponse à notre demande : *"Please note we have located only some images of Verdun, France for World War I showing distant views position from hillside as well as the ruins that may be interest. We were unable to locate any aerial views as you requested in your email. You may still need to contact the Cartographic unit (carto@nara.gov) regarding aerial photographs".*

[28]Agent forestier à l'ONF de Verdun et passionné d'histoire.

[29]Commissaire de l'exposition permanente du Mémorial de Verdun.

Enfin, 50 documents ont directement été achetés sur des brocantes meusiennes, **incluant 18 photographies aériennes et 32 photographies et cartes postales**.

Centre d'archives	Cartes	Photographies aériennes	Photographies et cartes postales	JMO
SHD	114	260	0	27
IGN	44	0	0	0
ECPAD	0	0	12	0
Bibliothèque de Verdun	5	55	4	0
Centre de documentation du mémorial	0	23	21	0
Bayerisches Hauptstaatsarchiv	12	5	26	0
Bundesarchiv-Abteilung Militärarchiv	29	13	0	0
Voie privée	32	85	732	0
TOTAL	*236*	*441*	*795*	*27*

Tableau 5.1 – *Inventaire des documents récoltés durant les recherches en archives*

3. Réalisation des cartes diachroniques du champ de bataille de Verdun

Après avoir décrit la nature des données utilisées et leurs sources, il convient maintenant de présenter la façon dont elles ont été structurées dans une base de données spatialisées en vue d'être exploitées à des fins diachroniques. Sur les centaines de documents récoltés, une partie se compose de documents de mauvaise qualité, incomplets ou redondants. Une sélection basée sur un certain nombre de critères n'a conservé que les fonds utiles. Ce travail a uniquement été opéré sur les photographies aériennes et les plans, les seuls à pouvoir être confrontés aux données LiDAR ; comme précisé plus tôt, les JMO, les photographies *in situ* et les cartes postales ont servi d'illustration et à affiner l'interprétation des cartes de formes. Une fois ce tri effectué, le géoréférencement d'une partie des documents et d'éventuelles corrections géométriques ont été menées. À la suite de cette opération, les cartes diachroniques ont été réalisées en confrontant les cartes de formes avec les documents d'archives par superposition (lorsqu'ils ont été géoréférencés) ou par simple visualisation (lorsqu'ils ne l'ont pas été). En complément, nous avons procédé à la digitalisation des réseaux de fossés cartographiés sur les plans directeurs, information qui servira à évaluer le degré de conservation de ces vestiges (cf. *supra*, chapitre 8). Ce chapitre termine par une brève discussion sur les complémentarités du LiDAR et des archives de la Grande Guerre à l'étude de la topographie sub-forestière de la forêt domaniale de Verdun.

3.1. Construction de la base de données à incorporer au SIG

La sélection a uniquement porté sur les documents destinés à être géoréférencés. Au vu de la consistance du corpus de données (tableau 5.1) et du travail qu'a représenté leur géoréférencement, seule une partie des documents a été incorporée au SIG. Présentons les différents critères de sélection retenus.

3.1.1. Sélection des photographies aériennes

Afin de rendre utile le géoréférencement, les photographies aériennes doivent répondre à plusieurs exigences. Il n'y a aucun intérêt à importer ces documents dans un SIG si les informations qu'ils contiennent sont d'office mal représentées (*e.g.*, photographies ondulées sur les côtés, déchirures) ou tout simplement invisibles (*e.g.*, pixellisation liée à une mauvaise numérisation des photographies, photographie floutée). **Quatre critères de sélection ont été appliqués pour retenir les photographies aériennes exploitables** :

- **Le mode d'acquisition** : seules les photographies aériennes obtenues par voie numérique ont été conservées (scanner, clé USB, CD-ROM, email). Tous les fonds procurés par appareil photographique (SHD, bibliothèque d'étude de Verdun) n'ont pas été retenus car du fait de leur mode de conservation (boîtes fréquemment dépouillées, photographies compressées sous le poids des piles de documents), les photographies sont ondulées et parfois déchirées. En complément, la prise en compte des déformations liées aux lentilles de notre appareil photographique a compliqué l'opération de géoréférencement ;
- **La qualité de l'image** : le pixel de l'image doit être suffisamment fin pour apercevoir les polémoformes. Quand la taille du pixel est plus importante que la taille du phénomène à étudier, l'image n'a pas été retenue ;
- **L'inclinaison de l'axe optique** : les photographies aériennes verticales ont été privilégiées ainsi que les photographies obliques aux degrés d'inclinaison modérés. En revanche, aucune photographie panoramique n'a été utilisée ;
- **Les annotations** : les photographies retenues contiennent au moins des informations sur le lieu de la prise de vue (pour localiser l'image) et sur sa date (pour rendre possible la diachronie).

Une fois appliqué l'ensemble de ces critères, **seules 78 photographies aériennes ont été éligibles au géoréférencement** (annexe C). Bien entendu, l'unique usage de ces quelques dizaines de photographies ne permet pas de couvrir l'ensemble du territoire prospecté par le LiDAR. De plus, il ne peut y avoir d'analyses diachroniques des formes sans superposition d'images. En effet, sur les 78 photographies géoréférencées, seules 37 secteurs sont représentés et seulement 15 bénéficient d'une information à différents pas de temps, ce qui semble insuffisant étant donné l'importance du corpus de données de ce type récolté dans les centres d'archives. Afin d'exploiter au mieux les potentialités diachroniques offertes par les

photographies aériennes (ces documents possèdent d'ailleurs l'avantage de montrer des clichés antérieurs à la bataille de Verdun, ce qui n'est pas le cas des plans directeurs), celles qui n'ont pas pu être géoréférencées ont été visualisées séparément comme de simples images (l'analyse diachronique est tout de même possible mais plus aisée dans un SIG). Puis, les secteurs bénéficiant de multiples superpositions d'images ont été étudiés de manière approfondie pour mieux rendre compte de la vitesse de transformation des paysages (cf. *infra*, chapitre 7).

3.1.2. Sélection des plans directeurs

Contrairement aux photographies aériennes focalisant sur une infime portion du champ de bataille, les plans directeurs donnent une vision globale du terrain ; ce constat est surtout vrai pour les échelles des 1/20 000 et 1/25 000. Ils ont par conséquent l'avantage de permettre l'étude diachronique des paysages sans multiplier les opérations de géoréférencement. Seule une partie des 236 plans directeurs **a été géoréférencée en se basant sur les trois critères de sélection suivants** :

- **Le mode d'acquisition** : il s'agit là aussi d'un critère décisif dans la sélection des documents car lorsqu'un appareil photographique a été employé, il était impossible d'obtenir des plans en un seul morceau à une qualité exploitable (en moyenne, 12 clichés ont été tirés pour obtenir un plan directeur). Les plans obtenus par voie numérique (un seul morceau) ont donc été privilégiés ;
- **L'intervalle des tirages** : parmi les plans obtenus par voie numérique, certains ont été tirés à moins d'une semaine d'intervalle sur le même secteur. Lorsqu'un tel cas se présente, les changements, toujours très locaux ne rendent pas suffisamment compte de modifications majeures dans le paysage. Aussi, dans une volonté de produire un faible nombre de cartes diachroniques (évolutions plus visibles), le choix d'un intervalle plus long a été privilégié (de quatre à neuf mois) ;
- **Les auteurs** : afin de préserver la confidentialité de leurs propres positions, les cartographes faisaient en sorte de représenter en toute exhaustivité les défenses adverses et de ne pas en divulguer davantage sur leur propre camp (GQGA, 1917b). L'unique usage d'un plan français ou allemand n'a pas été recommandé puisque la réalité du champ de bataille n'est pas totalement révélée. Dans la mesure du possible (quand les plans des deux camps sont disponibles à des dates proches), les plans directeurs français et allemands ont été couplés.

En conséquence de l'application de ces critères, **30 plans directeurs allemands et français ont été géoréférencés**, représentant sept époques différentes (février, juin et novembre 1916, mars et juillet 1917, janvier et octobre 1918 ; annexe C). Les autres plans, notamment ceux aux échelles plus fines (1/5 000 et 1/10 000), ont été utilisés en complément des photographies aériennes pour des analyses diachroniques locales (cf. *infra*, chapitre 7) ou pour l'évaluation de la conservation des réseaux de fossés (cf. *infra*, § 3.4).

3.2. Importation et géoréférencement des documents

La confrontation des cartes obtenues par exploitation du MNT de la forêt domaniale de Verdun avec les archives de la Grande Guerre a été fait directement dans ArcGIS® 10.5. Comme lors de la phase d'inventaire des formes, nous avons attribué à l'ensemble des données importées la projection Lambert 93 et le système de coordonnées RGF93. Une fois les données incorporées au logiciel, deux problèmes se sont posés :

- Le choix de la méthode de géoréférencement afin de minimiser l'erreur de calage ;
- Le choix des points de calage (ou points d'amer) ;

Les paragraphes suivants éclaircissent ces questions.

3.2.1. Orthorectification et géoréférencement des photographies aériennes

L'analyse de photographies aériennes sur SIG implique de corriger les distorsions de l'image créées par les lentilles au moment de la prise de vue. Ce processus, appelé orthorectification, permet de supprimer les effets de perspective et de créer une nouvelle image planimétriquement correcte « *avec une échelle cohérente dans toutes les parties de l'image* » (ESRI, 2018b). Cette étape intermédiaire assez longue nécessite de traiter les photographies sur des logiciels adaptés (Stichelbaut, 2009). Elle suppose de détenir des informations précises sur l'appareil photographique utilisé pour la prise de vue (angle de visée, distance focale). Or, ces informations sont difficilement accessibles dans le cas des photographies aériennes de 1914-1918. Dans l'objectif de cartographier précisément l'occupation du sol, l'orthorectification a été indispensable mais, dans notre cas, une erreur de calage de quelques mètres n'a pas constitué un réel problème dans la mesure où la cartographie a déjà été réalisée lors de l'inventaire des formes ; seules des analyses comparatives et des tris sont conduits. Étant donné l'objectif secondaire de ces diachronies par rapport à la méthodologie développée dans le chapitre 4, une solution de rapidité a été trouvée qui permet de minimiser les distorsions de l'image. **La méthode retenue consisté à réaliser une géo-rectification**. Plutôt que de retravailler l'image en amont de la phase de géoréférencement, les corrections sont menées pendant le géoréférencement. Dans les options de géo-rectification de la barre d'outils de géoréférencement d'ArcGIS®, une méthode a particulièrement retenu notre attention : **la transformation polynomiale de 2ème ordre** (Stichelbaut, 2009 ; Étienne, 2014 ; ESRI, 2018c).

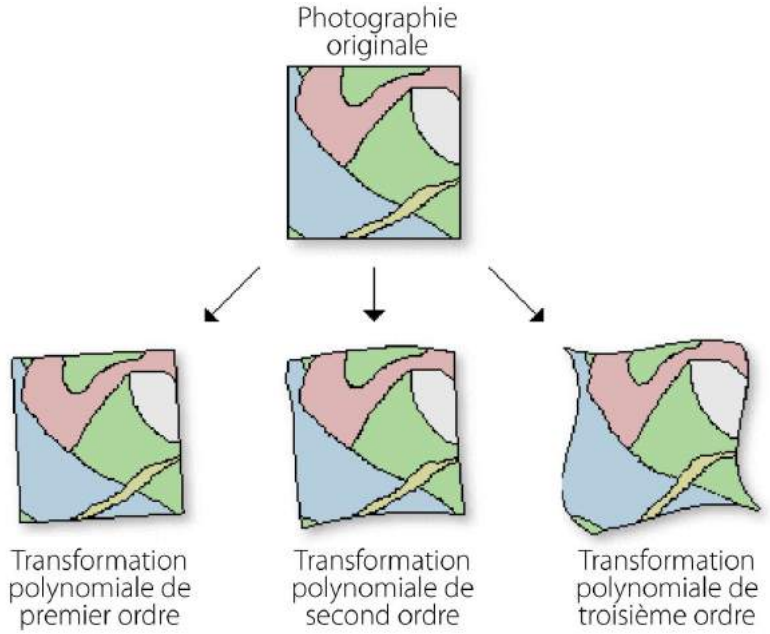


***Figure 5.8** – Effets d'une géo-rectification de photographie aérienne à partir des méthodes polynomiales (traduit du site web d'ESRI)*

D'après l'étude de Rocchini et Di Rita (2005) portant sur la comparaison des erreurs liées à la géo-rectification et l'orthorectification, la transformation polynomiale de 2ème ordre est la méthode produisant l'erreur moyenne quadratique la plus proche de celle obtenue par orthorectification. Toutefois, ce constat est uniquement valable dans un environnement plat, configuration qui se prête assez bien au champ de bataille de Verdun. Cette transformation a donc été appliquée à notre jeu de photographies aériennes. Par ailleurs, les méthodes de transformation polynomiales ont l'avantage de procéder à une correction globale de l'image et non pas locale comme le proposent d'autres méthodes (transformations par *spline* ou par ajustement), d'où leur utilisation assez courante en substitution des vraies méthodes d'orthorectification (Hughes *et al.*, 2006 ; Del Río *et al.*, 2013 ; Étienne, 2014). Ainsi, l'aspect rectangulaire de la photographie originale a disparu pour faire place à une photographie déformée adaptée à la réalité de l'espace (figure 5.8).

Concernant les points de calage, l'image LiDAR traitée en *SVF* (cf. *supra*, chapitre 4) a servi de support au géoréférencement. Elle a l'avantage de posséder une partie des traces des paysages passés visibles à la fois sur les photographies aériennes et les plans directeurs. Un certain nombre de points ont été créés jusqu'à obtenir un calage permettant la superposition des formes des deux époques. Généralement, une dizaine de points suffit pour faire coïncider les données de 1914-1918 et de 2013. Ces points correspondent systématiquement à des points « durs » (Hughes *et al.*, 2006) localisés sur des formes anguleuses. Par exemple, l'angle d'un boyau de communication (zigzag) repéré facilement (lorsqu'il a été conservé) à la fois sur l'image LiDAR et la photographie aérienne peut faire office de point de calage (figure 5.9).

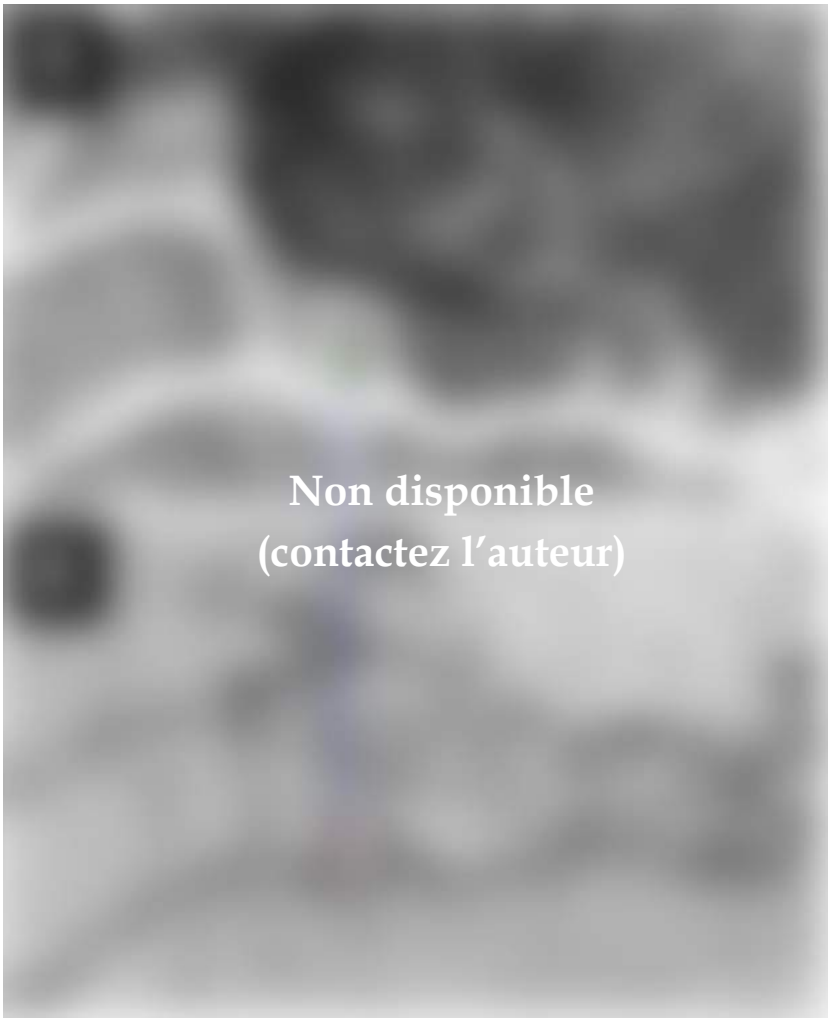


Figure 5.9 – *Exemple de point de calage lors du géoréférencement d'une photographie aérienne. A : photographie aérienne allemande du 30 mai 1917 représentant la portion sud-ouest du bois d'Ormont au nord du champ de bataille de Verdun. B : extrait de l'image LiDAR traitée en SVF. L'opération du géoréférencement telle qu'elle s'affiche sur ArcGIS® est reconstituée, avec en vert le point à géoréférencer, en rouge le point de référence déjà localisé et en bleu la trajectoire empruntée par la photographie aérienne durant le géoréférencement (Bayerisches Hauptstaatsarchiv).*

3.2.2. Corrections géométriques et géoréférencement des plans directeurs

Lors du géoréférencement des plans directeurs, une géo-rectification est également nécessaire pour éliminer l'effet des pliures et aplanir l'image sur ces portions (certes, ces pliures sont atténuées au moment de la numérisation mais elles n'ont pas totalement disparu). À l'inverse des photographies aériennes où le réajustement a été global, la transformation dans le cas des plans directeurs n'a concerné que les portions d'image affectées par les pliures. Ainsi, une méthode privilégiant les ajustements locaux a été utilisée.

La géo-rectification par *spline* d'ArcGIS®, qui a produit les meilleurs résultats, a été appliquée à tous les plans.

Ancêtres de l'actuelle carte topographique de l'IGN au 1/25 000, les plans directeurs portent de nombreux points de repère facilitant ainsi leur calage avec les images LiDAR malgré une étendue beaucoup plus importante que les photographies aériennes. En complément de l'image LiDAR utilisée pour le calage des photographies aériennes, la carte topographique SCAN 25 actuelle de la forêt domaniale de Verdun a logiquement servi de support au géoréférencement.

3.3. Analyses diachroniques

3.3.1. Étude des formes sur la période 1914-1918

Maintenant que les données d'archives s'accordent géographiquement avec les cartes de formes élaborées plus tôt (figures 5.10 et 5.11), nous avons les moyens d'étudier la temporalité du champ de bataille. Cependant, seule une partie des formes cartographiées semi-automatiquement bénéficie de cette profondeur temporelle :

- **À l'échelle de la forêt domaniale de Verdun, en réalisant l'analyse uniquement à partir des plans directeurs** : seuls les réseaux de fossés sont concernés car faciles à représenter. Les cratères d'obus sont exclus de l'analyse compte tenu de leur absence sur ces plans. S'ajoute les autres vestiges construits, tels que les abris et les batteries d'artillerie car leur nombre ne permet pas de les traiter de manière exhaustive. De plus, leur représentation risquerait de surcharger la carte ;
- **À l'échelle de quelques sites, en réalisant l'analyse à partir des plans directeurs et des photographies aériennes** : les réseaux de fossés et les autres vestiges construits sont concernés, tout en excluant de nouveau les cratères d'obus pour les raisons évoquées plus tôt.

Bien qu'elle soit particulièrement cruciale, cette phase méthodologique ne nécessite pas de traitements approfondis. **Chaque forme est croisée aux couches temporelles (archives géoréférencées ou non) puis associée à sa période d'origine**. Une couche de données vectorielles pour chaque période définie est alors créée. À l'échelle de la forêt domaniale de Verdun, est possible le choix de dates entre les sept périodes retenues (cf. *supra*, § 3.1.2). À l'échelle locale, cet « étagement » varie en fonction des richesses iconographique et cartographique disponibles.

3.3.2. Étude des formes sur la période 1918-2013

Cette étape a fait l'objet d'une méthodologie à part entière au sens où seuls quelques plans directeurs et photographies aériennes représentatifs du champ de bataille en fin de guerre ont été exploités. Symbole du conflit, les réseaux de fossés possèdent une haute valeur patrimoniale et historique, raison pour laquelle ils se doivent d'être cartographiés pour être conservés. L'inventaire des fossés, mené dans le chapitre précédent, est un premier pas vers la sauvegarde de ces vestiges. Les archives nous donnent les moyens de localiser les secteurs les plus érodés où n'ont subsisté que quelques fragments de fossés. Pour ce faire, il est impératif de connaître l'état de ces réseaux au sortir de la guerre. La réponse est donnée par les plans directeurs des derniers mois de lutte mais pour mieux exploiter l'information qu'ils contiennent, l'ensemble des réseaux a été digitalisé, ouvrant la voie à une quantification de leur nombre, de leur longueur et de leur degré de fragmentation. La comparaison de la couche vectorielle ainsi créée avec les cartes de formes extraites du MNT LiDAR permet de repérer les secteurs où ces réseaux sont particulièrement fragmentés, voire totalement disparus. Les zones prioritaires de conservation peuvent ainsi être définies pour adapter les pratiques forestières à ces enjeux (cf. *infra*, chapitre 8).

Une étude analogue à celle menée sur les réseaux de fossé a également été appliquée aux cratères d'obus mais cette fois de manière plus locale et en utilisant exclusivement les photographies aériennes où ils étaient représentés. D'un point de vue géomorphologique, l'analyse diachronique de ces formes est pertinente car en quantifiant sur quelques secteurs (par digitalisation) les cratères contenus sur les deux images (photographie aérienne et LiDAR), elle permet (l'analyse diachronique) d'estimer une tendance à l'érosion du massif forestier tout entier. Ces résultats ont alimenté la discussion sur les chiffres de cratères obtenus par voie semi-automatique.

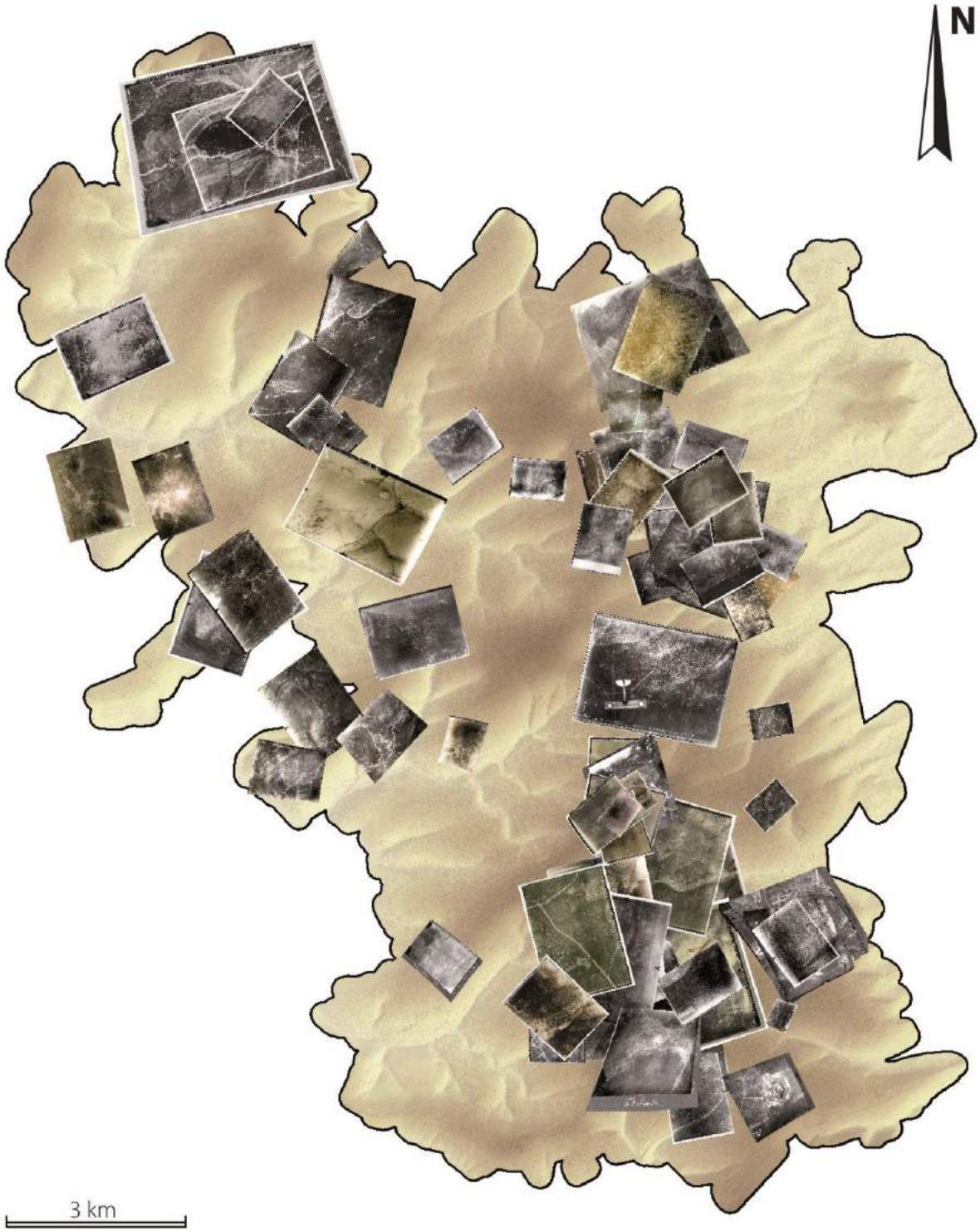


Figure 5.10 – *Aperçu des résultats du géoréférencement des photographies aériennes*

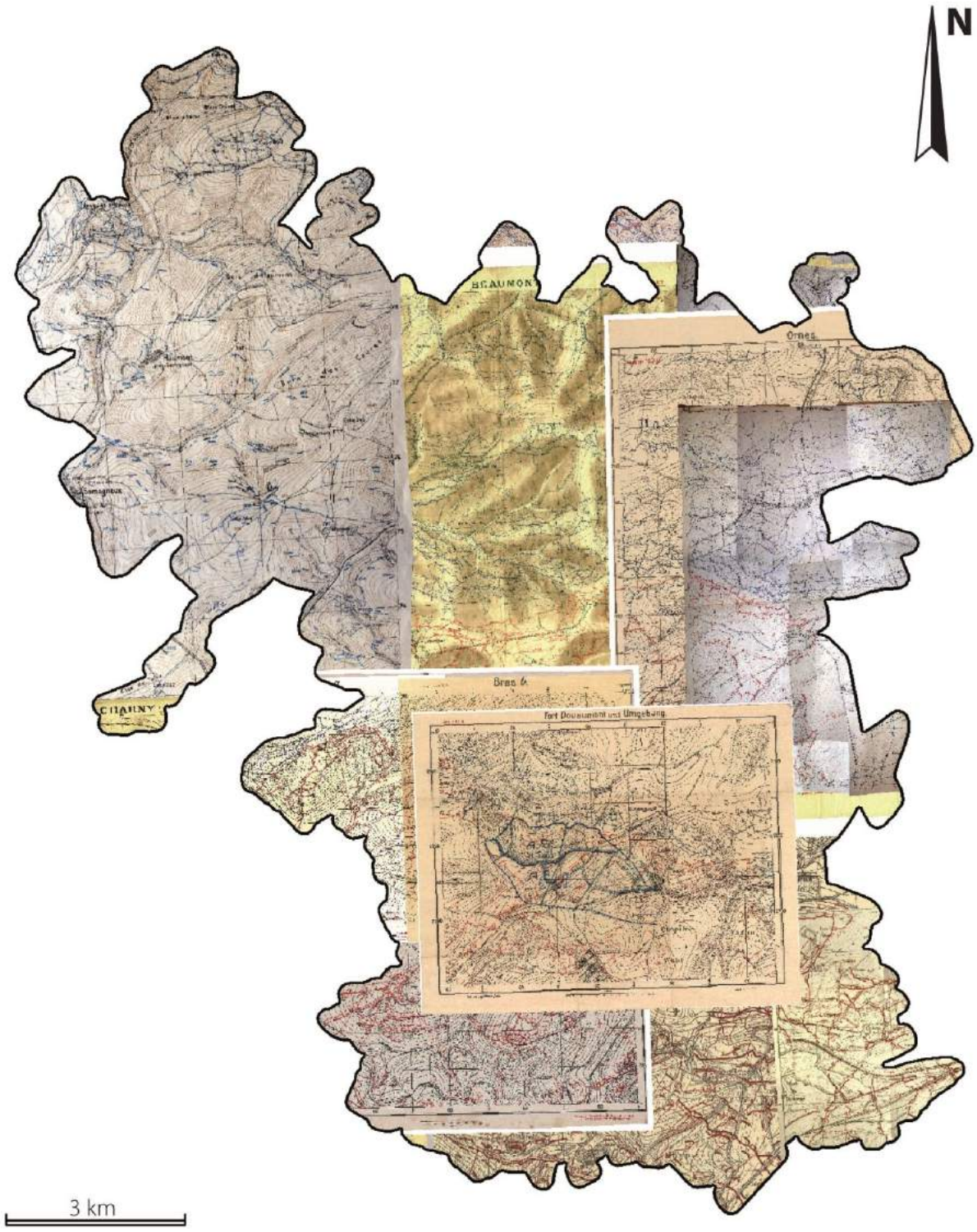


***Figure 5.11** – Aperçu des résultats du géoréférencement des plans directeurs*

4. LiDAR et archives : quelles complémentarités ?

Ce chapitre se termine par une brève discussion sur les apports de chacune des sources d'images : LiDAR et archives. Les potentialités du LiDAR ayant été démontrées (cf. *supra*, chapitres 3 et 4), il est question de dévoiler les limites de cette technologie pour l'étude des paysages de guerre. Il en découle une analyse des apports et des limites des données d'archives exploitées dans le cadre de ce travail.

4.1. Les limites de la prospection par télédétection

Au-delà des erreurs liées à une mauvaise calibration du MNT (cf. *supra*, chapitre 3), la technologie LiDAR a révélé certaines limites au moment de la confrontation du MNT avec les photographies aériennes et plans directeurs. Deux problèmes majeurs ont été identifiés :

- Une première limite est d'ordre temporel. Le nuage de points a été acquis en 2013, soit quasiment un siècle après les évènements de 1914-1918. Il en résulte une configuration du terrain affichée par le MNT en inadéquation avec la situation géomorphologique de 1918. Durant le temps écoulé, les formes ont évolué. Sur le champ de bataille, l'aménagement d'une forêt de 10 000 ha a effacé une partie des traces anciennes. L'inventaire des formes réalisé ne reflète que partiellement le relief actuel. De plus, de nouvelles empreintes ont modifié significativement les paysages géomorphologiques du champ de bataille. Ainsi, l'image LiDAR constitue un palimpseste accumulant les traces d'occupations humaines laissées par les combats de la Première Guerre mondiale, par les activités du XXème siècle et localement par celles d'époques antérieures à 1914-1918 ;
- Un second problème réside dans la nature même de l'image LiDAR exploitée. Elle est le fruit d'une construction informatisée et non pas une représentation instantanée de la réalité comme le sont les photographies. Le MNT généré est né de données ponctuellement enregistrées (les points d'altitude) et il a été décidé d'une méthode d'interpolation permettant de convertir ce mode de représentation ponctuel en représentation continue. Malgré de fortes ressemblances, l'image produite n'en demeure pas moins une image artificielle des paysages géomorphologiques du champ de bataille. D'ailleurs, le contrôle-qualité entrepris sur le terrain a démontré qu'il pouvait y avoir de réels écarts entre les mesures observées sur le terrain et celles issues du LiDAR. Une erreur préjudiciable est donc de se fier pleinement à ces images LiDAR.

4.2. Les plans directeurs et les photographies aériennes : une alternative pour cartographier les polémoformes ?

Dans quelle mesure les documents d'archives, en particulier les photographies aériennes et les plans directeurs, ont été complémentaires du LiDAR ? Cette partie a dans le même temps permis de justifier les raisons pour lesquelles le LiDAR a été privilégié pour

cartographier les polémoformes de la forêt domaniale de Verdun alors que les fonds d'archives récoltés ont pu suffire pour atteindre un tel objectif.

4.2.1. Apports et limites des photographies aériennes

Au contraire de l'imagerie acquise par LiDAR aéroporté, les photographies aériennes présentent l'avantage d'afficher une vision réaliste des paysages à un instant donné. Il n'y a rien de plus précieux que de travailler sur de telles ressources documentaires lorsqu'on étudie un champ de bataille (comme celui de Verdun), pour des aspects d'abord historiques (connaître les activités humaines et occupations du sol passées) puis méthodologiques (ces photographies aériennes constituent une vraie base de validation et d'interprétation de ce qui peut être observé sur le MNT). La staticité de l'image LiDAR, le fameux palimpseste, est aussi moins évidente sur les photographies aériennes car toutes les empreintes des époques postérieures n'existent pas (entre la date de tirage du document et 2013). Elles sont par conséquent beaucoup plus facilement déchiffrables. Néanmoins, ce sont là les seuls apports constatés dans notre étude.

Du côté des limites, l'échelle est déjà un premier problème. Alors que le LiDAR donne une vision globale des 100 km² du champ de bataille, la photographie aérienne ne représente qu'une infime partie de l'espace étudié, borné à quelques centaines de mètres tout au plus, réduisant de manière significative notre champ de vision. Ce constat permet de faire la liaison avec une seconde limite d'ordre méthodologique. Étant donné la grande échelle géographique de ces documents, il est nécessaire de répéter l'opération de géoréférencement de multiples fois avant d'obtenir une couverture globale du secteur étudié. De ce fait, l'exploitation des photographies aériennes à des fins cartographiques est particulièrement chronophage alors que les données LiDAR sont d'office calées dans l'espace grâce au DGPS embarqué. Au moment de la visualisation des photographies aériennes, un autre problème a été constaté, déjà rapporté par les photo-interprètes de l'époque : les défenses construites en milieu forestier (phénomène assez courant ; cf. *supra*, chapitre 2) sont difficilement voire nullement perceptibles en période de pleine activité végétative et lorsque la canopée est particulièrement dense. Par conséquent, il s'agit d'une grande limite à notre travail diachronique car la plupart des massifs boisés ne permettent pas de localiser les aménagements enfouis dans le sous-bois lorsque les photographies aériennes sont employées. Dans la même logique, et parallèlement à l'essor de la photographie aérienne durant la Grande Guerre, les soldats ont mis au point de nouvelles techniques pour se protéger de la vue des aviateurs, comme le camouflage ou l'enterrement (Villatoux, 2010). La première innovation nous a particulièrement intéressée car même si certaines constructions s'observent sur le LiDAR, elles ne sont pas forcément visibles sur les photographies aériennes, celles-ci ayant pu être volontairement cachées (Stichelbaut, 2009 ; Stichelbaut et Chielens, 2013). C'est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles l'attaque allemande du 21

février 1916 a été une surprise totale[30]. L'utilisation du camouflage constitue donc un frein à l'étude diachronique dans le cas où des formes bien présentes au sol ne sont pas révélées depuis le ciel.

4.2.2. Apports et limites des plans directeurs

Les potentialités offertes par les plans directeurs à l'étude des paysages de guerre font aussi l'objet d'interrogations. Tout d'abord, un grand avantage de ces plans peut être trouvé dans leur étendue comparable à celle du périmètre prospecté au LiDAR. Un seul plan peut suffire à recouvrir l'ensemble du champ de bataille en rive droite, en particulier quand des échelles au 1/20 000 et 1/25 000 sont privilégiées. Plus cette échelle est fine (< 1/20 000), plus grand est le nombre de plans à géoréférencer pour obtenir une vue globale du site étudié. Par conséquent, la phase de géoréférencement est plus longue mais tout de même raisonnable dans ce cas de figure (moins d'une dizaine de plans lorsque l'échelle minimale au 1/5 000 est employée). Un autre apport se fonde sur la capacité des plans directeurs à offrir un aperçu de l'état initial des organisations du champ de bataille, incluant aussi bien les défenses situées en milieu ouvert qu'en milieu sub-forestier (le masque de la canopée ne constitue pas une limite). Leur utilisation est donc pertinente pour réaliser les cartes diachroniques de formes à l'échelle de la forêt toute entière.

Malgré les bénéfices attribués aux plans directeurs, des inconvénients ont été relevés au moment de leur confrontation avec le MNT. À l'instar de ce dernier, les plans constituent des représentations abstraites du champ de bataille. Chaque cartographe possède sa propre vision du terrain et une certaine hétérogénéité existe non seulement entre différents plans (lorsque les auteurs étaient différents) mais aussi au sein du même plan (le degré de détails peut varier localement). La plupart de ces plans étant réalisés par observations directes sur le terrain, des imprécisions cartographiques ont pu être introduites. Ces approximations sont directement corrélées à la capacité du cartographe à analyser l'espace qu'il reproduisait, à évaluer la distance qui le séparait de l'objet cartographié, à repérer les organisations ennemies cachées ou non, tout cela dans un contexte de tension défavorable (en effectuant ces observations, le soldat cartographe s'exposait aux tirs de l'ennemi et se devait de réaliser ses relevés rapidement). En superposant les cartes de formes aux plans directeurs, de possibles décalages sont nés, non d'un mauvais géoréférencement du document mais d'une erreur de localisation par l'auteur de la carte (cependant, ces plans restent globalement précis et des écarts pluri-métriques ont rarement été constatés). Des manques peuvent aussi apparaître, soit parce que l'objet en question n'a tout simplement pas été perçu au moment des repérages (distance trop importante avec le camp ennemi, organisations camouflées ou enterrées, présence d'une lisière forestière, etc.), soit parce que cet oubli était volontaire. Dans ce dernier cas, l'échelle peut être mise en cause. Plus celle-ci est petite (*e.g.*, 1/20 000), plus le degré de précision l'est aussi. En procédant à une généralisation, certains figurés sont

[30]« *Les photographies aériennes n'ont en effet par permis de déceler les préparatifs de la bataille de Verdun et aucun renseignement humain n'a pu suppléer cette carence* » (Villatoux, 2010).

simplifiés, d'autres supprimés. L'origine du cartographe constitue un autre facteur expliquant ces absences d'organisations sur les plans directeurs (pourtant apparentes sur les données LiDAR). Comme évoqué plus tôt (cf. *supra*, § 3.1.2), une certaine confidentialité dans la représentation des positions alliées était préservée au cas où ces plans tomberaient entre les mains de l'ennemi (GQGA, 1917b). Pour les plans dessinés par les groupes de canevas de tir, il en a résulté un manque de précision dans le camp français (phénomène inverse du côté allemand). Pour accélérer la production, les cartographes pouvaient aussi ne représenter que les secteurs actifs du front, faisant disparaître de la carte les positions antérieures (GQGA, 1917b). À l'inverse, les plans directeurs peuvent afficher de manière abusive des aménagements défensifs bien qu'il s'agisse d'un phénomène assez rare. C'est ce qui s'est passé au moment de la superposition de plans directeurs successifs où des organisations présentes dans le premier plan n'apparaissaient plus dans le second (figure 5.12). Enfin, une dernière limite identifiée est l'absence quasi totale des cratères d'obus sur ces plans (les entonnoirs les plus importants sont tout de même apparents). Aucune analyse diachronique de ces formes n'a pu être envisagée par l'usage unique des plans directeurs.

***Figure 5.12** – Exemple d'anomalie constatée sur deux plans directeurs. A : plan directeur français (Fleury) au 1/5 000 du 15 août 1916. B : plan directeur français (Fleury) au 1/5 000 du 25 août 1916 (Service Historique de la Défense). Notons l'absence d'une partie de la tranchée Genty sur le second plan (B) alors que celle-ci apparaissait dix jours plus tôt sur le premier plan (A). Cette anomalie pourrait être due à un abandon de projet ou à une disparition du fossé sous l'effet des bombardements. Il ne s'agit pas d'un cas isolé puisque plusieurs exemples similaires ont été trouvés lors de l'exploitation des plans directeurs.*

5. Conclusions

Ce chapitre a révélé la richesse exceptionnelle des archives de la Grande Guerre encore présentes dans une dizaine d'établissements répartis entre la France et l'Allemagne. Bien entendu, de nombreux fonds de ces centres documentaires restent à exploiter mais aussi ailleurs en Europe et dans le monde. **Au total**, **plus d'un millier de documents ont été récoltés au cours de nos recherches conduites durant près de cinq mois**. Afin d'apprécier l'évolution des formes sur la période 1914-1918 et 1918-2013, la méthodologie a consisté à incorporer une partie de ces données d'archives au SIG pour finalement les confronter aux cartes de formes préalablement réalisées. Cette opération, menée à l'échelle de la forêt pour les réseaux de fossés puis plus localement pour les autres catégories de polémoformes (fossés inclus), a permis la réalisation de cartes diachroniques des formes, laissant envisager une amélioration des connaissances sur l'organisation du champ de bataille durant le conflit et sur la conservation des formes jusqu'à la réalisation de la mission LiDAR en 2013. Bien qu'il ait été utilisé dans un but géomorphologique et archéologique, nous espérons que ce corpus documentaire construit sera exploité par d'autres chercheurs et à d'autres fins. C'est pourquoi **les documents récoltés** (à l'exception de quelques collections, notamment celles issues de donateurs privés) **ont été déposés en version numérisée au centre de documentation du Mémorial de Verdun pour faciliter leur consultation** (dossier De Matos-Machado Rémi). Ce dernier chapitre de la seconde partie portant sur les aspects méthodologiques a pour objectif d'approfondir l'étude des apports et limites du LiDAR dans la cartographie des polémoformes en contexte forestier et de s'interroger sur les complémentarités offertes par les documents d'archives. La comparaison des différentes sources de données **a permis de considérer la prospection LiDAR comme méthode la plus pertinente pour cartographier les polémoformes à l'échelle des 10 000 ha de la forêt de Verdun** malgré la consistance du corpus de données historiques obtenu.

PARTIE 3

Résultats et interprétation de la cartographie des polémoformes

CHAPITRE 6

Inventaire, classification et caractérisation morphométrique des polémoformes

p. 215

- Résultats de l'inventaire
- Résultats de la cartographie des polémoformes
- Réalisation d'une typologie morphométrique

CHAPITRE 7

Quantification de l'érosion et variabilité spatio-temporelle des polémoformes durant le conflit

p. 269

- Évaluation du bouleversement géomorphologique
- Analyse spatio-temporelle des polémoformes

Chapitre 6
Inventaire, classification et caractérisation morphométrique des polémoformes

L'un des attendus de ce mémoire est de produire une cartographie exhaustive des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun. Cette cartographie a été réalisée de manière semi-automatique à partir d'une méthodologie inédite combinant des techniques de traitement d'images spécifiques et des analyses statistiques multivariées. Du fait que les formes compactes et creuses sont intéressantes à étudier en raison de leur diversité géométrique, une classification leur a été appliquée afin de les catégoriser. Elle a reposé sur l'usage successif de l'algorithme des cartes auto-organisatrices de Kohonen et de la classification ascendante hiérarchique (critère d'agrégation de Ward), opération qui a nécessité un post-traitement destiné à réduire les erreurs d'omission et de commission de la classification. Cette rectification a été effectuée à partir de l'étude des volumes de remblais situés à proximité de ces formes et de l'analyse des relations de proximité entre elles et les réseaux de fossés. Les formes linéaires et creuses ont, elles aussi, bénéficié d'une analyse statistique afin d'identifier des types de fossés en fonction de la morphologie de leur tracé. Néanmoins, cette catégorisation s'est faite à partir d'une simple analyse univariée. Cette approche croisée d'analyses statistiques a donné lieu à la cartographie de plus d'un million de polémoformes compactes et creuses et de plus de 400 km de tranchées et boyaux à l'échelle de la forêt, représentant les dernières cicatrices géomorphologiques visibles de la Première Guerre mondiale. La classification des formes révèle une certaine diversité et complexité des reliefs induits par le conflit. Elle permet de dégager au sein des formes compactes et creuses plusieurs catégories de polémoformes, elles-mêmes caractérisées par une multitude de géométries. Sur la base de ces résultats, une typologie des polémoformes de la forêt est proposée, unique dans le secteur. Elle est partiellement transposable à d'autres champs de bataille, avec l'avantage de représenter la réalité du terrain (ce à quoi les manuels militaires ne peuvent prétendre).

1. Inventaire des polémoformes

En première partie de ce chapitre, le nombre, la taille et la géométrie des formes compactes et creuses sont présentés et interprétés à partir de l'analyse statistique univariée des vingt-quatre variables morphométriques qui les caractérisent. Une analyse similaire est conduite sur les formes linéaires et creuses sur la base des deux variables morphométriques obtenues. En plus de fournir des informations générales sur le nombre et la diversité des polémoformes, cette étape permet de préparer l'analyse multivariée des formes compactes et creuses en repérant et supprimant les variables redondantes à l'aide d'une ACP.

1.1. Formes compactes et creuses

1.1.1. Diversité des formes inventoriées

Sur les 100 km² de terrain prospectés, un corpus de 1 068 191 formes compactes et creuses a été constitué. Il exclut les formes dont l'aire est inférieure à 1 m² et les formes tronquées situées en bordure d'image ou d'axes de communication. D'une manière générale, la forte dissymétrie de la distribution des vingt-quatre variables analysées (figures 6.1, 6.2 et 6.3 et annexe D) démontre une forte présence de formes aux géométries communes (phénomène en l'occurrence causé par les nombreux cratères d'obus parsemant le champ de bataille ; cf. *infra*, § 3.1).

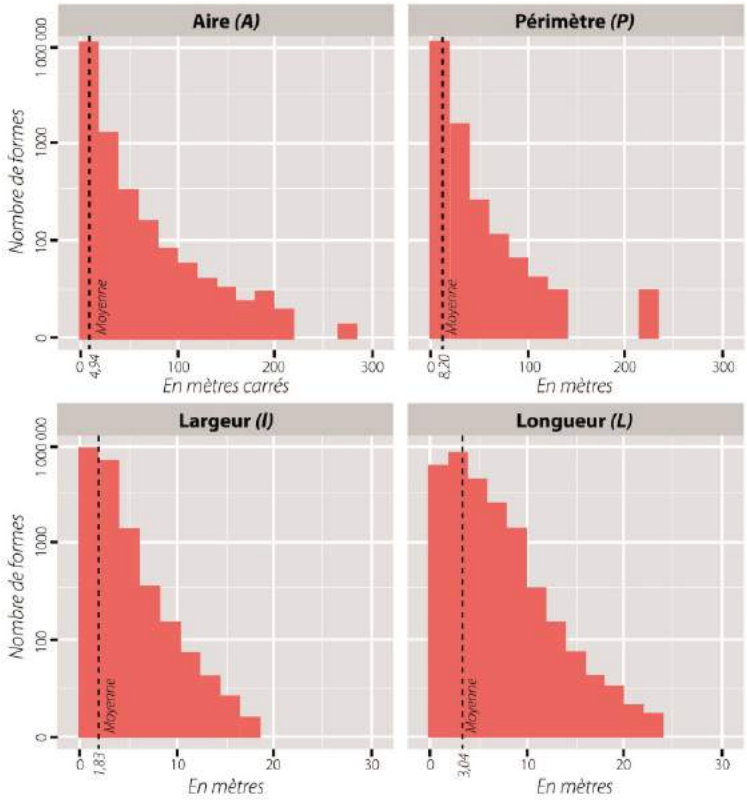


***Figure 6.1** – Histogrammes des variables de taille*

Les formes cartographiées possèdent une taille relativement modeste, en moyenne de 1,83 m de largeur *(l)* et 3,04 m de longueur (*L* ; figure 6.1 et annexe D). Alors que leur aire *(A)* est inférieure à 6,3 m² pour 75 % d'entre elles et inférieure à 3,5 m² pour la moitié d'entre elles ($\overline{A}$ = 4,94), une centaine d'individus (0,04 %) sont de taille supérieure à 50 m², nés de la coalescence de plusieurs formes (A_{MAX} = 263). Du point de vue de la géométrie générale (figure 6.2 et annexe D), l'histogramme de l'élongation *(E)* montre que la plupart sont compactes : la moitié a un indice inférieur à 0,02 (formes circulaire, ovoïde ou rectangulaire) et seuls 3 % excèdent un indice de 0,05, ces dernières constituant des entités de formes allongées parfois longues d'une vingtaine de mètres (L_{MAX} = 23,76). Nombreuses sont les formes circulaires (la moitié a un indice de circularité supérieur à 0,90) et peu possèdent une forme orthogonale et anguleuse (1 % sont pourvues d'un indice de rectangularité supérieur à 0,85). Ces formes compactes généralement composées d'un contour lisse (75 % avec une valeur de solidité comprise entre 0,99 et 1) peuvent présenter un aspect tortueux.

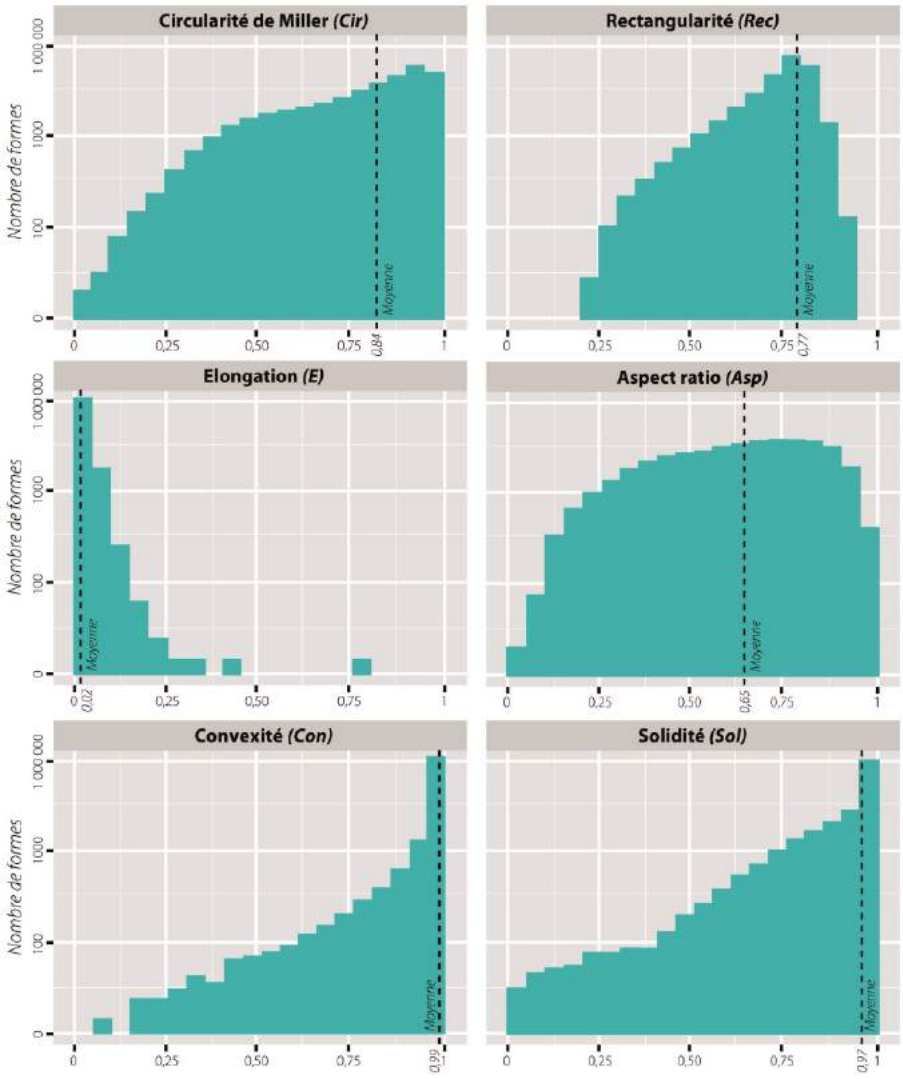


***Figure 6.2** – Histogrammes des variables de formes*

Ainsi, 7 % se caractérisent par un indice de solidité *(Sol)* inférieur à 0,90, signifiant que leur contour est riche en concavités, parfois en raison de la coalescence de plusieurs formes (*e.g.*, superposition de cratères d'obus ; forme allongée et sinueuse). L'histogramme des périmètres illustre bien ce constat, dévoilant des valeurs en inadéquation avec l'aire de certaine formes (P_{MAX} = 217 ; 2 % des valeurs de *P* sont supérieures à 20). Du point de vue de la géométrie 3-D (figure 6.3 et annexe D), ces formes sont peu profondes avec des valeurs de profondeur *(Pr)* comprises entre 0,15 et 9,24 m ($\overline{Pr}$ = 56) ; la moitié n'atteint pas 0,47 m de profondeur et seuls 8 % dépassent le mètre. Il en résulte l'enregistrement de valeurs de pente *(Pt_{90})* plutôt faibles sur l'ensemble de la forêt domaniale puisque seulement 5 % des formes possèdent des flancs raides inclinés à plus de 30° et 0,4 % à plus de 40°. **Ainsi, la forêt domaniale de Verdun montre des formes de relief de petite taille, de géométrie simple, et peu profondes**.

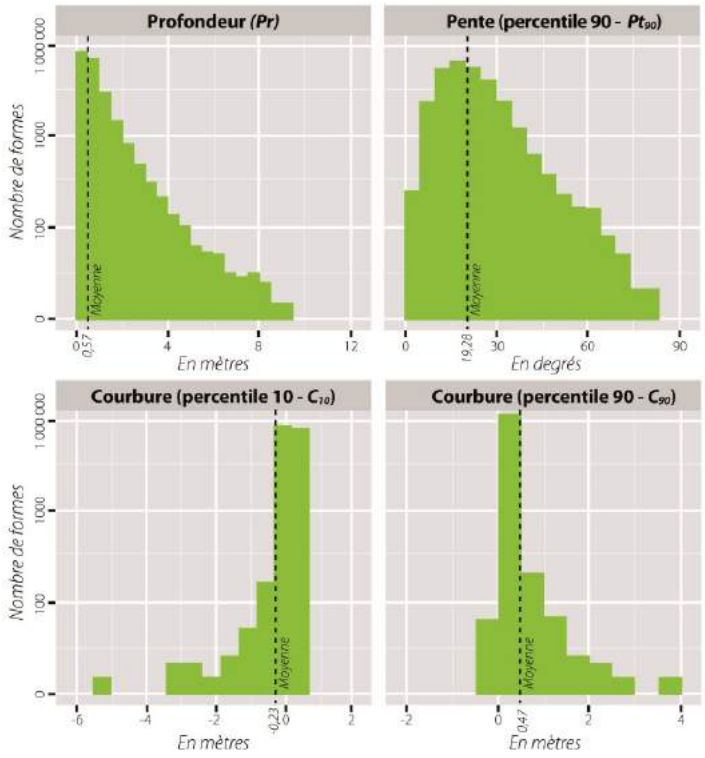


***Figure 6.3** – Histogrammes des variables 3-D*

1.1.2. Repérage et suppression des variables redondantes

L'ACP est une méthode statistique de premier choix pour identifier les variables au comportement similaire, du fait de sa capacité à les hiérarchiser en fonction de leur influence sur le jeu de données. Plutôt que de réaliser une classification morphométrique sur un nombre de variables conséquent, **une sélection directement opérée sur le graphique des axes factoriels ne retient que les variables jugées pertinentes pour la catégorisation des formes** (celles qui se complétaient ; figure 6.4). Autrement dit, seuls les paramètres non liés ont été conservés. L'exploitation simultanée des vingt-quatre variables ne ferait qu'alourdir

les traitements sans donner de meilleurs résultats (voire diminuer leur qualité). Trois ACP ont été réalisées :

1) **La première ACP** (figure 6.4) **menée sur les vingt-quatre variables morphométriques** a dévoilé la présence de trois groupes de variables : 1) celles décrivant les formes selon leur taille ; 2) celles caractérisant la profondeur et la pente des formes ; 3) celles reflétant la diversité morphométrique des formes et de leur contour. L'axe factoriel 1 (F1) défini par les variables de taille représente à lui seul 55 % de l'information du nuage. Malgré une variance particulièrement importante, il ne semble pas intéressant de classifier sur la base de ces paramètres puisqu'il en ressortirait une cartographie des formes selon leurs dimensions (l'axe F1 oppose les petites formes, à gauche, et les grandes formes, à droite). L'axe factoriel 2 (F2) dévoile la présence de deux autres groupes de variables, à savoir celles caractérisant le contour des formes (où s'opposent les formes compactes, en haut à gauche, et les formes allongées, en bas à droite) et celles relatives à la géométrie 3-D des formes (où apparaissent les formes profondes et pentues, en haut à droite, et les formes superficielles, en bas à gauche). De notre point de vue, une classification exploitant les variables des deux derniers groupes évoqués a été jugée plus efficace puisqu'elle est parvenue à discriminer les entités en fonction de leur forme, de leur profondeur et de leur pente et à séparer les types de polémoformes (cratères d'obus, formes construites, etc. ; cf. *infra*, § 2.1.1). Une ACP a été réalisée sur chacun de ces deux groupes pour contrôler et supprimer la présence éventuelle de variables redondantes afin d'optimiser la classification.
2) **La seconde ACP** (figure 6.4) **a été appliquée aux sept variables renseignant sur la géométrie du contour des formes** (*Asp*, *Cir*, *Con*, *Def*, *E*, *Rec*, *Sol*). Leur projection sur les axes F1 et F2 dévoile la présence de variables liées : *E* a été supprimée car elle résume une partie de l'information contenue par *Asp* et *Cir* ; *Sol* a été éliminée car elle présente un comportement similaire à *Con* et *Rec* ; *Def* a été rejetée car elle reflète l'information décrite par *Con*.
3) **La troisième ACP** (figure 6.4) **a été conduite sur les cinq variables décrivant la géométrie 3-D des formes** (C_E, C_{10}, C_{90}, *Pr*, Pt_{90}). Des variables redondantes ont aussi été identifiées dans ce groupe : C_E et C_{10} ont été supprimées en raison de leurs similitudes avec C_{90} (variable choisie pour définir la pente des formes car elle permet le repérage des pentes concaves associées aux abris et positions d'artillerie) ; *Pr* a été éliminée du fait de sa proximité avec Pt_{90} (il nous semble plus pertinent de conserver cette variable pour différencier les formes selon leur pente et non leur profondeur, cette dernière constituant en quelque sorte une variable de taille).

Au bilan, **seules six des vingt-quatre variables générées ont été retenues pour la classification** (cf. *infra*, § 2.1.1) : *Asp*, *Cir*, *Con*, C_{90}, Pt_{90} et *Rec*.

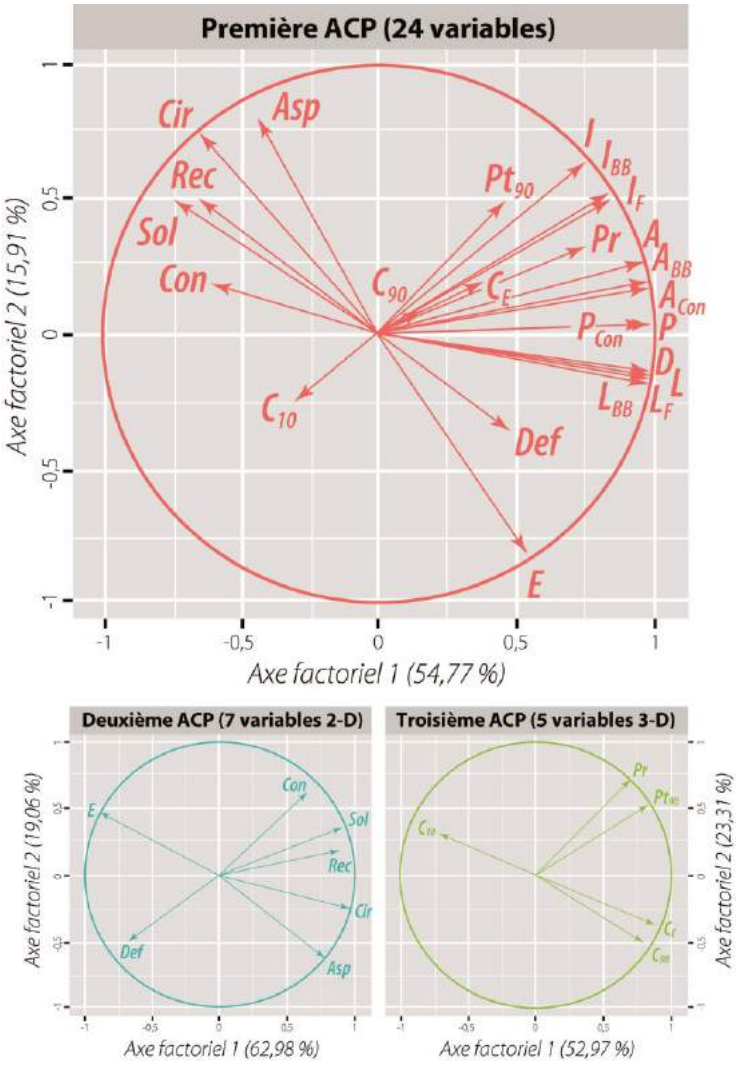


Figure 6.4 *– Projection des variables morphométriques et identification des variables liées. Les variables opposées ou possédant des directions proches constituent les variables liées (redondantes).*

1.1.3. Qualité des valeurs morphométriques obtenues

Bien que l'analyse des indices de taille et de forme permette de distinguer assez aisément différentes catégories de polémoformes (cf. *infra*, § 3), les valeurs morphométriques obtenues doivent être interprétées avec précaution, en particulier celles associées aux variables 3-D (*Pr*, Pt_{90}, C_{10}, C_{90}). Il existe ainsi deux biais associés à la méthodologie d'inventaire employée :

- Durant la mission de terrain destinée à contrôler la qualité du nuage de points LiDAR (cf. *supra*, chapitre 3), une sous-estimation de 25 ± 10 cm des profondeurs de formes a été constatée dans les parcelles résineuses prospectées, tendance similaire dans les parcelles feuillues à hauteur de 3 ± 10 cm et pour les formes inondées où cette sous-estimation est équivalente à la hauteur d'eau présente dans chaque forme. Dans un souci de gain de temps, ces marges d'erreurs (utilisées plus loin dans la quantification des volumes de terre ; cf. *infra*, chapitre 7) n'ont pas été considérées dans la construction du MNT, opération qui n'a semble-t-il eu aucun effet sur l'efficacité de notre méthode durant la phase de calibrage sur les deux sites échantillons.

Néanmoins, pour obtenir la topographie en *z* la plus réaliste possible, il faudrait tenir compte de ces marges d'erreur ;

- L'inventaire des formes s'est fondé sur le calcul d'un LRM, algorithme ayant pour objectif d'évaluer une tendance générale de la topographie (niveau 0) et de repérer les pixels situés de part et d'autre de ce seuil (Hesse, 2010). De ce fait, la profondeur des formes a été évaluée en mesurant l'écart entre le fond de la forme et le niveau 0 (et non pas le sommet du bourrelet s'il y en avait un).

En complément, les valeurs morphométriques obtenues ne tiennent pas compte des éventuelles évolutions ayant affecté les formes depuis leur naissance. Nous pouvons en effet imaginer qu'elles furent bien plus profondes et saillantes qu'elles ne le sont aujourd'hui du fait des phénomènes d'érosion naturelle et anthropique (Hupy, 2006 ; Brenot *et al.*, 2016). De ce fait, les formes étudiées ne reflètent pas la réalité de la topographie à l'issue de la guerre. Hupy (2005, 2006) et Capps Tunwell *et al.* (2016) ont constaté sur leurs terrains respectifs que les formes qu'ils avaient échantillonnées (cratères d'obus et de mines) étaient bien moins profondes qu'à leur naissance, du fait de leur dégradation par des aménagements ou des processus de colluvionnement provoquant une accumulation de sédiments et de débris organiques en leur fond. Sur la cote 108, Taborelli *et al.* (2017b) ont évalué à une dizaine de mètres l'épaisseur du remblai occupant le fond d'un cratère de mine, soit environ un tiers de sa profondeur initiale. Pour obtenir de vraies valeurs de profondeur, de pente et de courbure, il serait nécessaire de quantifier ces remblais au moyen de prospections géophysiques ou pédologiques, sachant que ces épaisseurs varient en fonction de la pente des formes (corrélation positive entre l'inclinaison de la pente et l'importance du colluvionnement) et du substrat dans lequel elles s'inscrivent.

1.2. Formes linéaires et creuses

La cartographie semi-automatisée des formes creuses[1] **a donné lieu à l'inventaire de 423,96 km de fossés**. L'exploitation des plans directeurs allemands et français différencie tranchées et boyaux. L'analyse des deux variables morphométriques calculées sur ces entités montre que les réseaux sont particulièrement fragmentés. 17 638 sections de fossés ont été extraites, chacune possédant une longueur comprise entre 0,24 m et 447,06 m ($\overline{L}$ = 24,03)[2]. D'une manière générale, **ces entités sont de petite taille**, reflétant le morcellement ou la disparition par érosion de ces vestiges (cf. *infra*, chapitre 8). Concernant leur tracé, **ces formes sont globalement sinueuses** puisque l'indice de sinuosité (*Is*) est en moyenne de 1,12 pour

[1]La cartographie de ces formes n'était pas totalement automatisée puisqu'une partie des fossés a été cartographiée manuellement.

[2]Lors de la phase d'extraction automatique, tous les tronçons inférieurs à 1 m avaient été supprimés. Cependant, certaines formes plus petites ont été vectorisées par la suite.

un minimum et un maximum variant de 0 à 6,35 (la valeur 0 reflète les fossés formant des cercles fermés). Alors que 20 % des formes ont un indice compris entre 1 et 1,20, 3 % sont situés en-deçà de 1 et 17 % au-delà de 1,20.

2. Classification des polémoformes

Sur les 1 068 191 formes compactes et creuses cartographiées, une série de trois classifications a été entreprise en utilisant les six variables morphométriques retenues après suppression des variables redondantes. Les résultats de chaque classification sont décrits puis la fiabilité des données classées est évaluée à l'aide des observations de terrain conduites entre 2013 et 2017. Cette évaluation montre que la cartographie des formes construites présente un certain nombre d'erreurs d'attribution des classes. Deux traitements supplémentaires conduits sur les formes construites améliorent les statistiques de classification, reposant sur une analyse de la présence/absence de remblais et de fossés à proximité des formes.

2.1. Classification des formes compactes et creuses sur la base des critères morphométriques

Trois classifications menées sur le tableau des valeurs morphométriques des formes compactes et creuses ont donné lieu à l'identification de formes aux géométries distinctes.

1) **La première classification** (A ; figure 6.5) **a consisté à retirer du jeu de données les cratères d'obus** dont le poids ne permet pas de repérer les autres catégories de formes (effet de masse). D'après les observations de terrain, la forme de ces cratères d'obus est circulaire et la pente, assez faible, paramètres pris en compte dans le calcul : *Asp*, *Cir*, *Con*, C_{90} et Pt_{90}. Cette classification a permis de distinguer trois classes de formes :
    A1)Les formes circulaires, compactes, à pente faible ;
    A2)Les formes polygonales, compactes, à pente faible ;
    A3)Les formes complexes et/ou allongées, à pente modérée.

    La classe A1 correspond aux cratères d'obus singuliers (une dépression) possédant une forme circulaire révélatrice. Les classes A2 et A3 regroupent des formes aux géométries variées, plus ou moins complexes mais distinctes de la signature circulairedes cratères d'obus. Du fait que les cratères d'obus appartiennent à la classe A1, cette dernière a été mise de côté. En revanche, une nouvelle classification a été appliquée aux formes composant les classes A2 et A3 car celles-ci n'ont pas encore été interprétées. Ces deux classes ont par conséquent été fusionnées.

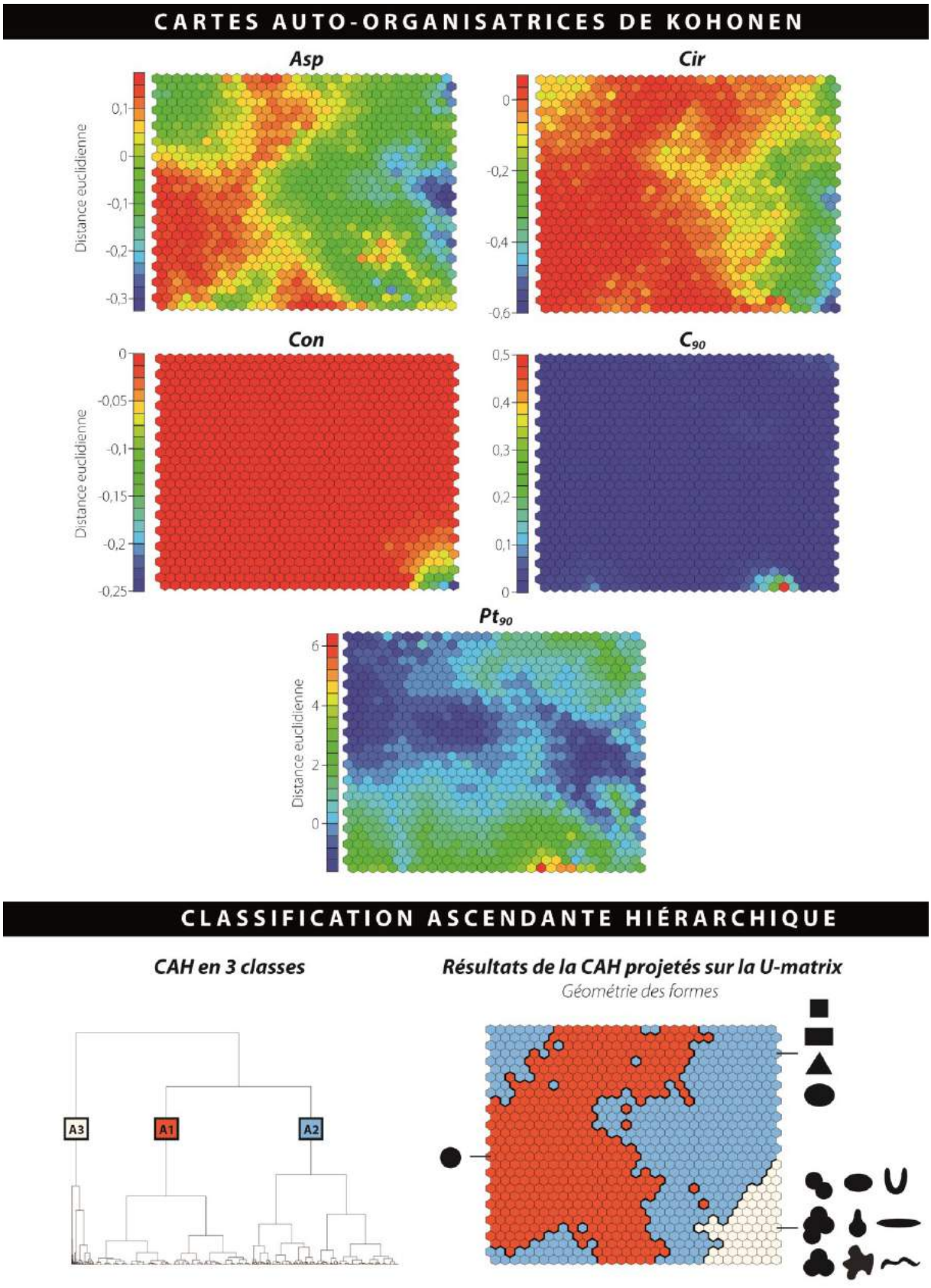


Figure 6.5 – *Résultats de la première classification*

2) **La seconde classification** (B ; figure 6.6) a été appliquée aux formes résultant de la fusion des classes A2 et A3. Cette opération **a servi à repérer les formes construites** (vestiges de guerre) à partir de l'étude de leur pente. D'après nos observations, celles-ci possèdent des pentes bien plus raides que les autres formes et des flancs concaves reflétant la présence d'anciennes parois verticales. Les paramètres suivants ont logiquement été retenus pour cette classification : C_{90} et Pt_{90}. Elle a donné lieu à quatre nouvelles classes de formes :

B1) Les formes peu marquées, à pente faible et régulière ;
B2) Les formes assez marquées, à pente modérée et régulière ;
B3) Les formes marquées, à pente forte et régulière ;
B4) Les formes très marquées, à pente forte et concave.

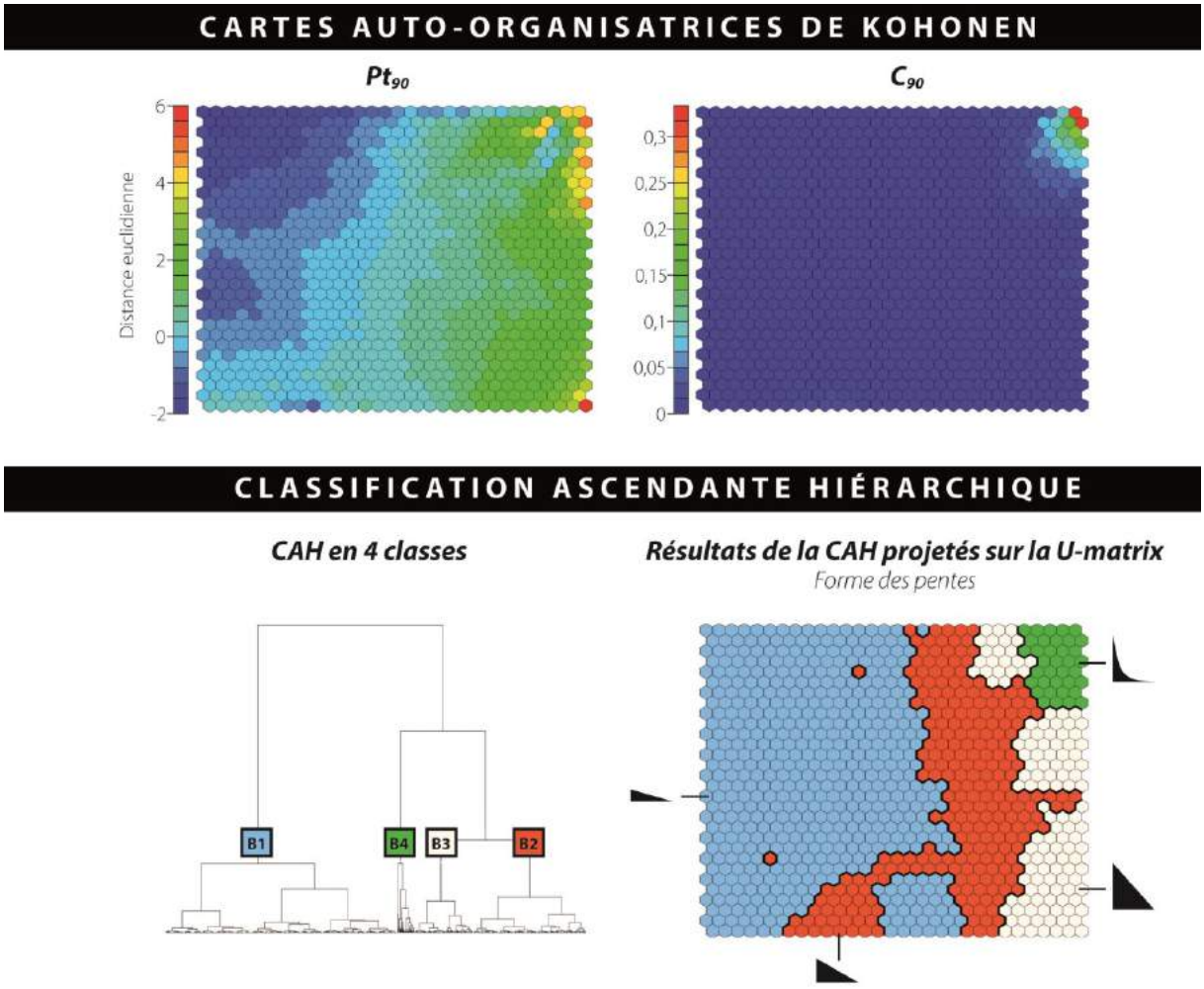


***Figure 6.6** – Résultats de la deuxième classification*

3) **La troisième classification** (C ; figure 6.7) **a consisté à étudier la variabilité morphométrique en plan** des deux classes précédemment créées par la fusion de B1 et B2 puis de B3 et B4. Les variables *Asp*, *Cir* et *Rec* ont donné les meilleurs résultats en permettant de distinguer neuf classes de formes. Pour les formes des classes B1 et B2, trois catégories géométriques ont été identifiées :

C1) Les formes polygonales au contour sinueux ;
C2) Les formes polygonales allongées au contour sinueux ;
C3) Les formes linéaires.

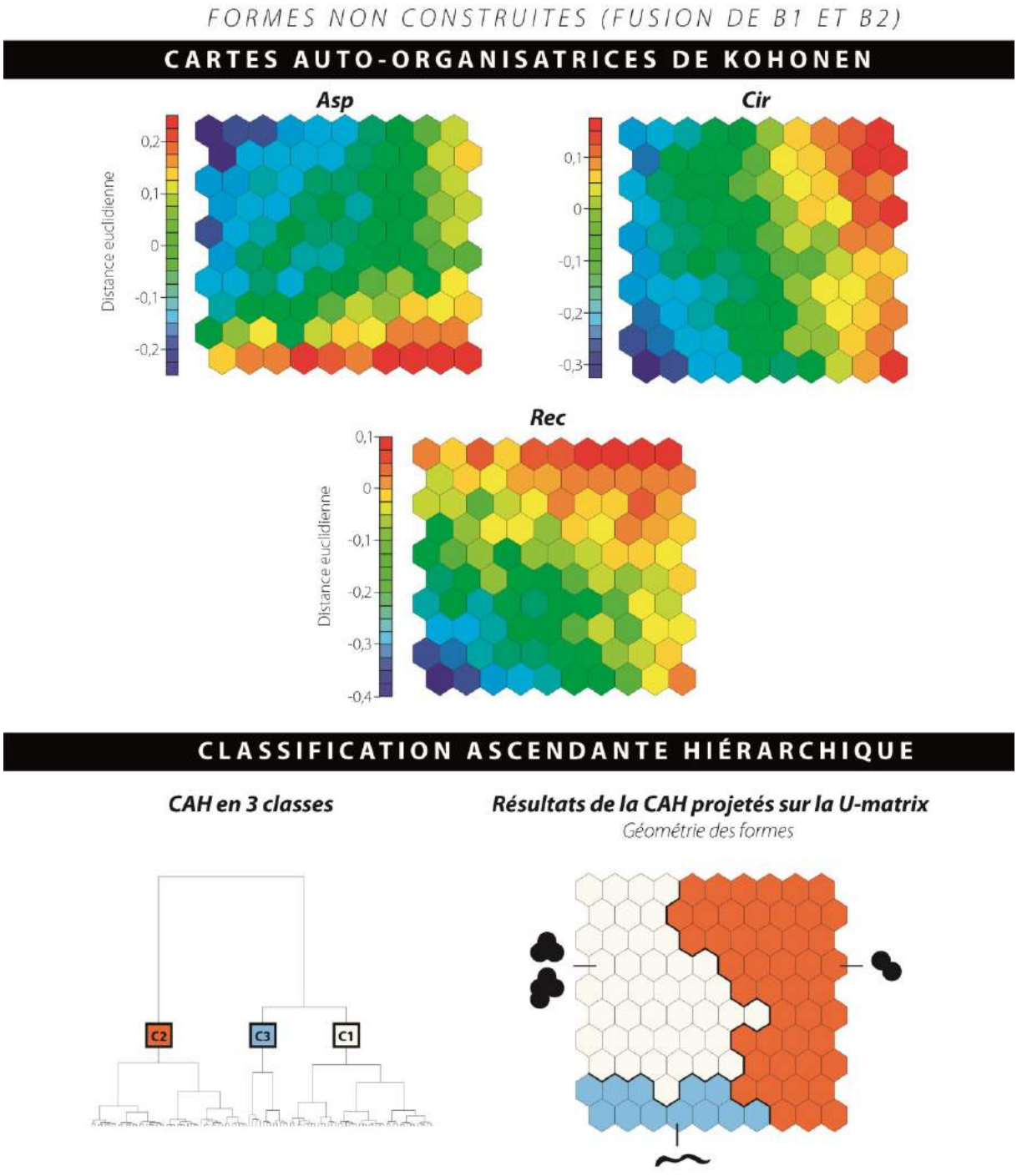


***Figure 6.7** – Résultats de la troisième classification*

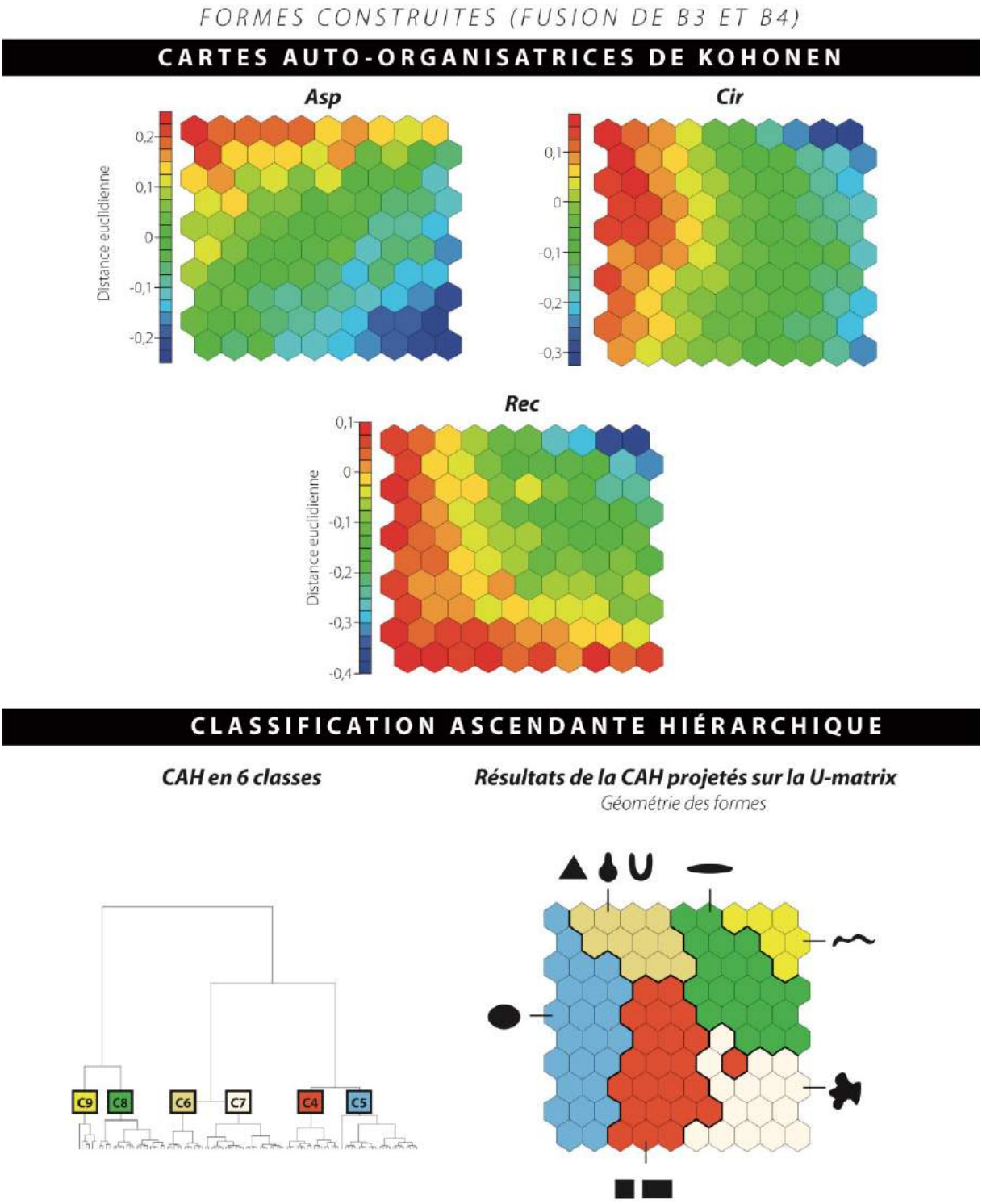


***Figure 6.7** – Résultats de la troisième classification (suite)*

Appliquée aux formes des classes B3 et B4, la classification a permis de distinguer six types de géométrie :

C4) Les formes carrées et rectangulaires ;
C5) Les formes rectangulaires émoussées ;
C6) Les formes triangulaires, en forme de poire ou fer à cheval ;
C7) Les formes polygonales au contour très sinueux ;
C8) Les formes polygonales allongées ;
C9) Les formes linéaires.

2.2. Classification finale des polémoformes

Sur la base de ces résultats, une ultime classification intègre à la cartographie la classe des cratères d'obus singuliers (A1) et les formes linéaires et à fusionner les classes similaires (C3 et C9 ; C4 et C5). Ainsi, une classification finale (D) en dix classes de formes a été obtenue (tableaux 6.1 et 6.2). Sur les 1 068 191 formes inventoriées (tableau 6.1), 656 173 formes (61 %) ont été interprétées grâce aux observations de terrain et documents d'archives comme des polémoformes (D1, D2, D3, D4, D5, D6 et D7), incluant cratères d'obus (D1, D2 et D3) et abris et positions d'artillerie (D4, D5, D6). 8562 formes (D8) constituent des fossés ou autre dépressions causées par les aménagements forestiers (0,80 %) et ne sont donc pas des polémoformes.

À cela s'ajoutent les 17 638 formes linéaires et creuses subdivisées en deux classes à l'aide des plans directeurs (tableau 6.2) : 5 045 sections de tranchées (D9) et 12 593 sections de boyaux de communication (D10), auxquelles sont intégrées les entités de classe D7 du fait qu'elles représentent la même information (ces dernières sont trop petites pour avoir été classées en entité linéaire par l'algorithme de Toumazet). Notons par ailleurs que 403 456 formes compactes et creuses (37,77 %) n'ont malheureusement pas pu être interprétées compte tenu de leur géométrie peu anguleuse[3] (combinaison de formes plus ou moins elliptiques, rectangulaires ou triangulaires). Au bilan, six classes de polémoformes compactes et creuses ont été retenues (D1 à D6) contre deux classes de polémoformes linéaires et creuses (D9 et D10 ; figure 6.8 et figure 6.2). Une description et une interprétation de chacune sont faites *infra*, § 3.

[3]Ces classes ont systématiquement été mises de côté à chaque classification.

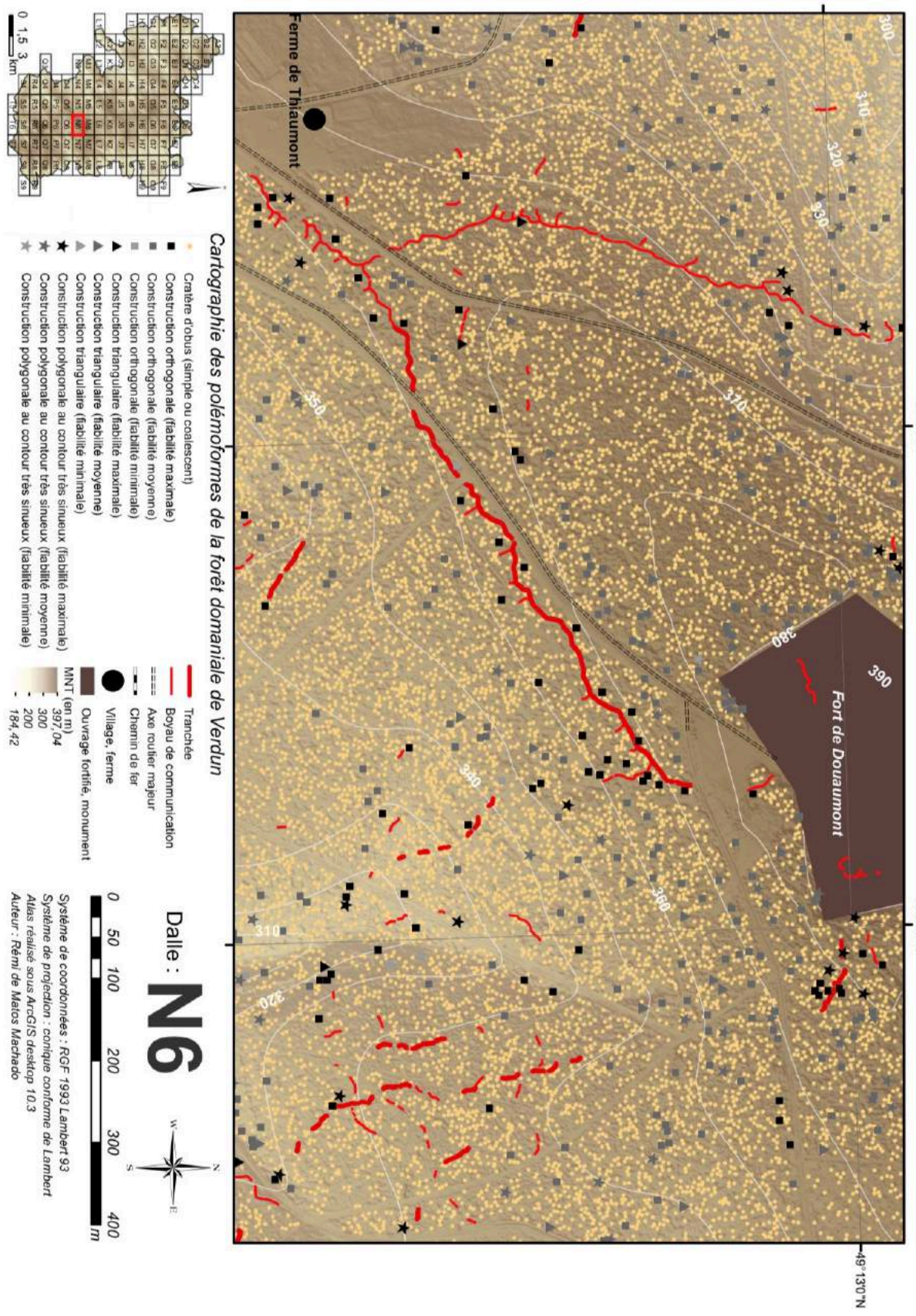


Figure 6.8 *– Extrait de l'atlas des polémoformes (dalle N6, fort de Douaumont)*

Classe	Ancienne classe	Type de forme	Nombre	%	% parmi les formes classifiables
D1	A1	Formes circulaires, à pente faible	591 660	55,39	89,01
D2	C1	Formes polygonales au contour sinueux, à pente faible	40 547	3,80	6,10
D3	C2	Formes polygonales au contour très sinueux à pente faible	5 238	0,49	0,79
D4	C4+C5	Formes carrés et rectangulaires plus ou moins anguleuses, à pente forte et concave	13 763	1,29	2,07
D5	C6	Formes triangulaires, en forme de poire ou fer à cheval	1 851	0,17	0,28
D6	C7	Formes polygonales au contour très sinueux, à pente forte et concave	2 415	0,23	0,36
D7	C3+C9	Formes linéaires	699	0,07	0,11
D8	C8	Formes polygonales allongées	8 562	0,80	1,29
Inclassables		Formes sans signature morphométrique	403 456	37,77	-
		TOTAL	*1 068 191*	*100*	*100*

***Tableau 6.1** – Classification finale des formes compactes et creuses*

Classe	Type de forme	Nombre	%
D9	Tranchées	5 045	28,60
D10	Boyaux de communication	12 593	71,40
	TOTAL	*17 638*	*100*

***Tableau 6.2** – Classification finale des formes linéaires et creuses*

2.3. Évaluation de la qualité de classification et propositions d'amélioration

2.3.1. Confrontation avec les observations in situ

La confrontation des résultats de la classification morphométrique avec les données de terrain (879 échantillons interprétés mais seulement 783 détectés par l'algorithme ; 89,07 % ; et 551 classifiables ; 62,68 %) met en lumière des erreurs dans l'attribution des classes. Du point de vue des cratères d'obus (D1, D2 et D3), l'usage successif des cartes auto-organisatrices de Kohonen et de la classification ascendante hiérarchique classe correctement 366 formes (92,89 %) mais 28 (7,10 %) présentent des erreurs d'omission (cratères d'obus classés comme des formes construites ; D4, D5 et D6). Au vu de ces statistiques de détection particulièrement satisfaisantes, nous considérons que la cartographie proposée pour les cratères d'obus (D1, D2 et D3) est robuste (figures 6.9 et 6.10). Les résultats de la classification sont en revanche moins précis pour les formes construites (figures 6.9 et 6.10), en particulier ceux des classes D4, D5 et D6. Sur les 157 formes recensées durant les prospections pédestres, 117 (74,52 %) sont correctement classées mais 40 (25,47 %) sont associées aux classes D1, D2 et D3 (cratères d'obus), suggérant que les chiffres avancés par la classification surestiment le

nombre réel de formes construites en forêt domaniale de Verdun (bien que la validation n'ait été conduite que sur une faible part des formes inventoriées). Cependant, il semble difficile de récupérer ces formes construites dans la classe des cratères d'obus, tant leur signature morphométrique est proche de celles de ces derniers. Seule une analyse au cas par cas (des milliers de formes sont concernées) à partir des fonds d'archives permettrait de corriger ces erreurs. Par ailleurs, hormis les échantillons de terrain, nous constatons que la base des formes construites contient des erreurs, identifiables sans passage sur le terrain, qui se traduisent par la présence de formes jugées non construites et inclassables dans le corpus (signature morphométrique différente des formes construites et des cratères d'obus). Du fait de leur haute valeur patrimoniale, **la cartographie des formes construites a subi un post-traitement consistant à en optimiser la détection** (en l'occurrence les classes D4, D5 et D6).

2.3.2. Affinage de la cartographie des formes construites (D4, D5 et D6)

La plupart des formes construites observées dans les classes D4, D5 et D6 sont entourées de remblais volumineux résultant de l'extraction des matériaux du sol par les soldats (les formes construites intégrées aux cratères d'obus ne possèdent pas cette spécificité). L'association de ces deux types de formes (forme creuse et forme surélevée volumineuse) a été un critère décisif dans l'affinage de la carte des formes construites. Pour rappel, la sélection a été opérée en conservant uniquement les formes creuses dont les remblais représentent entre 0,75 et 181 fois le volume creusé, seuils associés aux échantillons observés sur le terrain. Après application du filtre, le nombre de formes considérées comme construites par la classification morphométrique a diminué de 11,60 %, passant de 18 029 à 15 937 formes. Plus précisément, cette diminution touche la classe D6, affichant une baisse de 14,20 % (2 072 formes contre 2 415 auparavant). Les classes D4 et D5 sont moins concernées, avec respectivement 11,04 % et 12,37 % de formes éliminées (12 243 contre 13 763 formes pour D4 ; 1 622 contre 1 851 formes pour D5). D'une façon générale, cette opération a accru la fiabilité de la carte des formes construites en repérant celles à forte probabilité d'occurrence de tels vestiges. Toutefois, les formes dépourvues de remblais n'ont pas pour autant été éliminées de la base mais une fiabilité moindre leur a été associée.

Comme la plupart des édifices aménagés sur le champ de bataille était connectée aux fossés, la distance des formes à ces réseaux est un critère d'analyse supplémentaire pour une cartographie solide des formes construites. Une fiabilité maximale est ainsi attribuée aux formes des classes D4, D5 et D6 situées à une distance inférieure ou égale à 20 m. Cette opération a amélioré de manière significative la précision de la cartographie puisque 56,91 % des formes se situent au-delà de cette distance, soit potentiellement autant de formes susceptibles de ne pas constituer des abris ou positions d'artillerie.

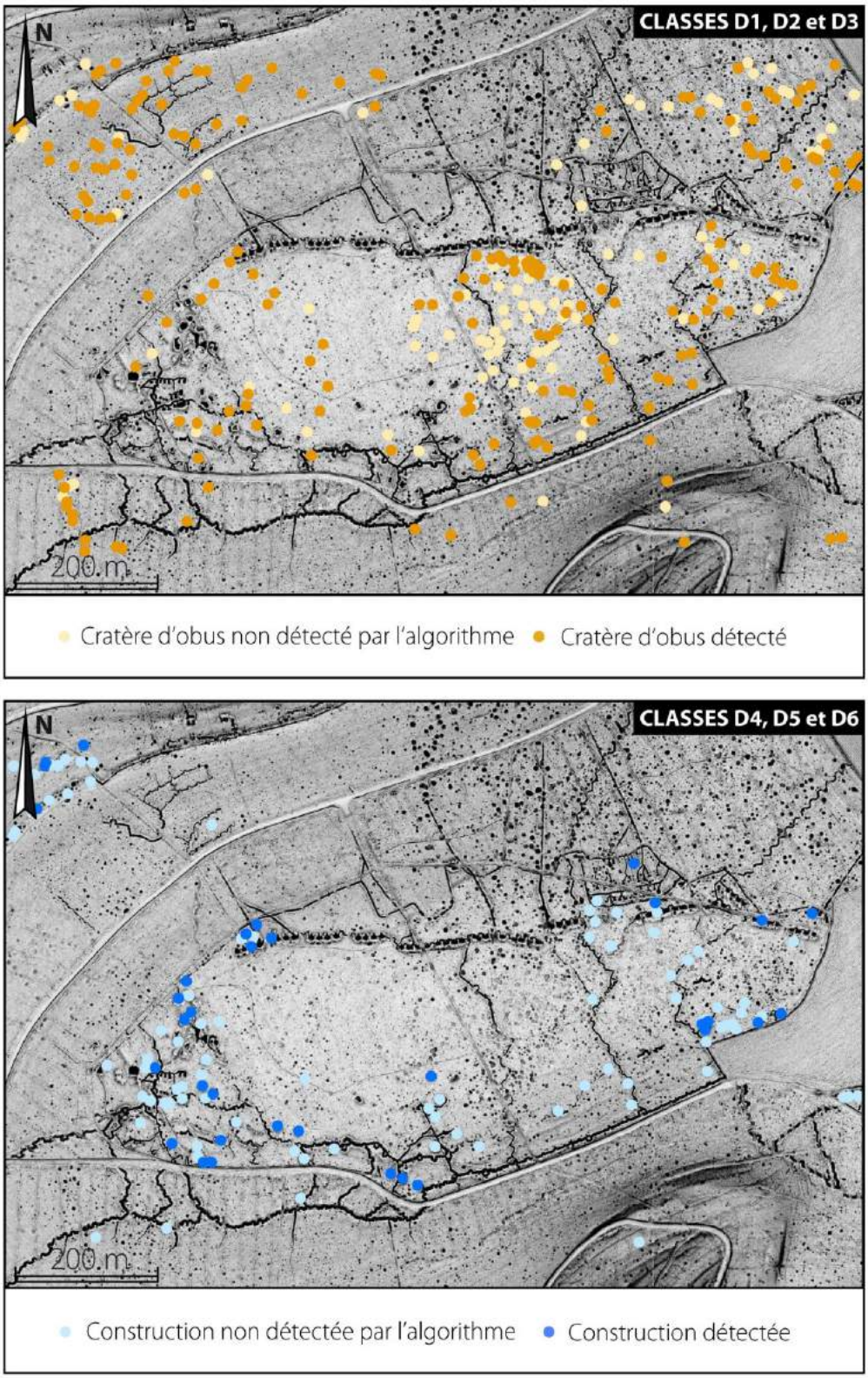


***Figure 6.9** – Confrontation des résultats de la détection avec les données in situ (bois d'Ormont). Statistiques de détection sur ce site : 204 cratères d'obus détectés sur 300 (70 des cratères d'obus non détectés sont des mares) ; 34 constructions détectées sur 119 (41 constructions non détectées sont adossées à une tranchée ou boyau de communication).*

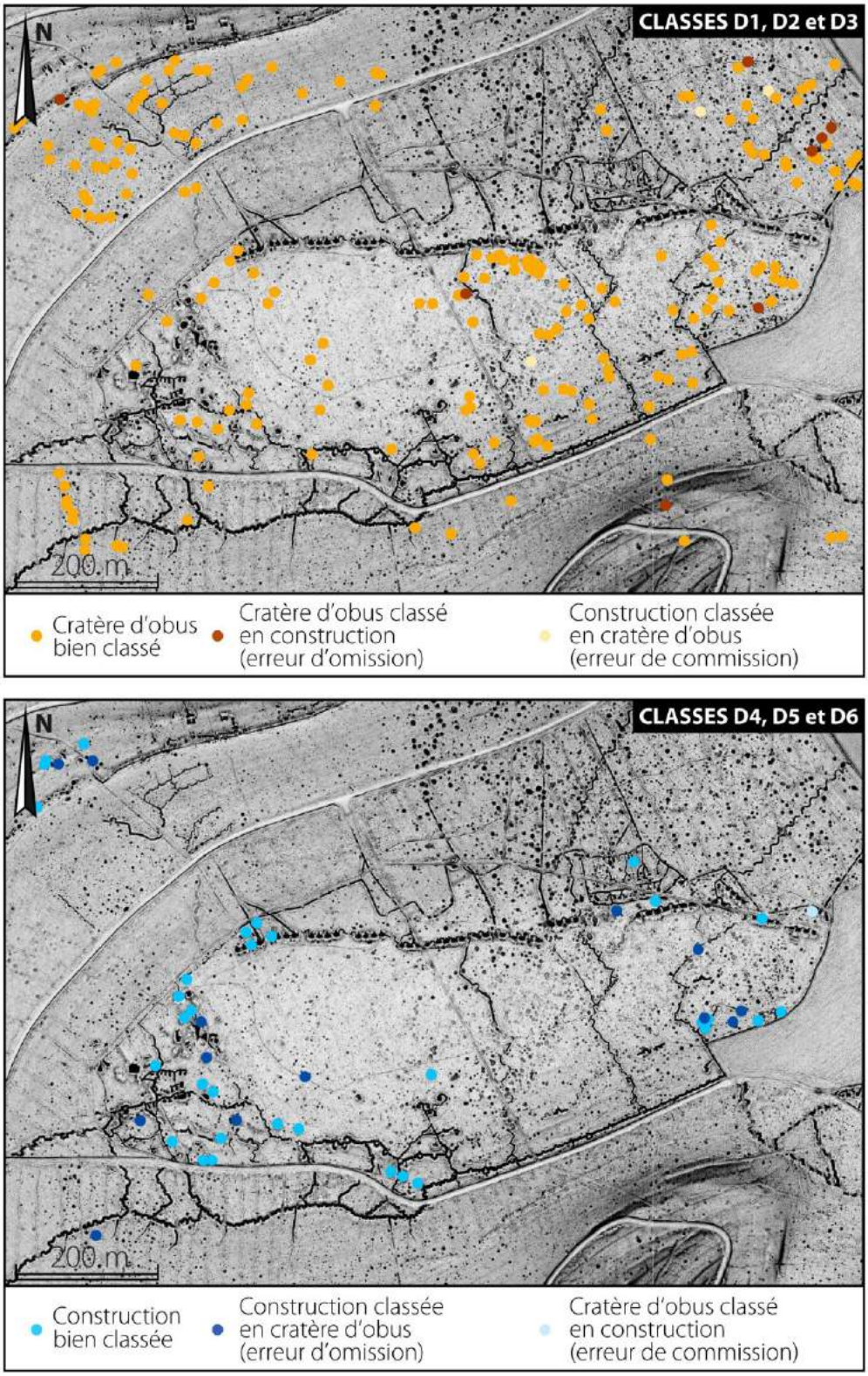


Figure 6.10 – *Confrontation des résultats de la classification avec les données in situ (bois d'Ormont). Statistiques de détection sur ce site : 192 cratères d'obus bien classés, 8 classés en construction, 4 constructions classées en cratères d'obus ; 20 constructions bien classées, 13 classées en cratères d'obus, 1 cratère d'obus classé en construction.*

Malgré les tris opérés dans les classes D4, D5 et D6, il semble difficile de se fier pleinement à la dernière cartographie obtenue (application du seuil de distance), qui peut contenir des formes non construites (*e.g.*, un cratère d'obus de géométrie similaire aux formes construites, dont la couronne d'éjectas est volumineuse et qui se situe à moins de 20 m d'un fossé). De même que des formes ont pu être oubliées, comme le montrent les échantillons interprétés sur le terrain (8 échantillons ont été supprimés après sélection des formes situées à moins de 20 m des fossés, soit un nombre accru pour l'ensemble de la forêt). Toutefois, les cartographies précédentes semblent aussi victimes d'un manque de fiabilité lié à la présence en nombre de formes non construites dans le corpus. **Plutôt que de n'en retenir qu'une, ces trois cartes sont conservées**, **chacune avec son niveau de fiabilité** (tableau 6.3).

Niveau de fiabilité	Critère retenu
Minimal	Signature morphométrique
Modéré	Signature morphométrique + présence d'un remblai volumineux
Maximal	Signature morphométrique + présence d'un remblai volumineux + proximité avec les réseaux de fossés

Tableau 6.3 *– Définition des trois niveaux de fiabilité attribués aux formes compactes construites (D4, D5 et D6)*

3. Proposition d'une typologie de référence des polémoformes

À l'heure actuelle, à l'exclusion des manuels militaires qui ne font qu'évoquer la réalité du terrain, très peu de typologies morphométriques des polémoformes de la Première Guerre mondiale existent. Stichelbaut (2009) a proposé une typologie des positions d'artillerie et des réseaux de fossés en Flandres sans toutefois proposer de classification des abris en raison de leur faible visibilité sur les photographies aériennes. Gheyle *et al.* (2018) ont complété cette typologie grâce à l'exploitation de données LiDAR dans le même secteur, suggérant différentes géométries d'abris. Devos *et al.* (2015) et Taborelli *et al.* (2017a) ont proposé une typologie de l'organisation des polémoformes cartographiées sur les plans directeurs français de 1914-1918 sans décrire précisément leur morphométrie (les formes étant représentées par des figurés). Dardignac et Benaily (2015) ont produit une étude similaire sur les forêts francilienne (camp retranché de Paris) en combinant archives historiques et prospections pédestres. De ce fait, notre typologie morphométrique exploitant entièrement le LiDAR est inédite. Elle reste, bien entendu, ouverte à des modifications au vu du nombre de formes encore à prospecter sur d'autres champs de bataille.

3.1. Les cratères d'obus

3.1.1. Aperçu général du nombre de cratères d'obus

Les cratères d'obus (D1, D2 et D3) **sont le type de formes le plus fréquemment observé** puisque qu'ils représentent 59,68 % des formes compactes et creuses inventoriées et 95,89 % des formes classées et interprétées, **soit un total de 637 445 cratères** (tableau 6.1 et annexe E). Pour les classes de cratères d'obus coalescents (D2 et D3), chaque entité doit être multipliée par le nombre de dépressions qu'elles contiennent pour obtenir le nombre d'impacts réels d'obus au sol. Nous considérons ainsi que 81 094 cratères d'obus ont été cartographiés dans D2 (au lieu de 40 547) et 15 714 dans D3 (au lieu de 5 238 ; les cratères d'obus à plus de deux dépressions étant majoritaires), portant à 688 468 le nombre minimal d'impacts d'obus comptabilisés. Ramené aux 9 615 ha de la forêt, cela représente une densité moyenne de 72 cratères/ha, chiffre soumis à de fortes variabilités au sein même du massif (cf. *infra*, chapitre 7).

À une époque antérieure à la prospection LiDAR de la forêt, Hupy et Schaetzl (Hupy, 2005, 2006 ; Hupy et Schaetzl, 2006 ; Hupy et Schaetzl, 2008) avaient évalué sur la base de dix quadras de 0,25 ha chacun une densité de cratères théorique de 41 cratères/ha pour l'ensemble du massif, chiffre assez proche de nos estimations. En généralisant la marge d'erreur de classification constatée à l'échelle des échantillons (7,10 %), une occurrence de 48 881 cratères d'obus dans des classes différentes de D1, D2 et D3 peut être avancée. La prise en compte de ce chiffre nous amène à **une nouvelle estimation de 737 349 impacts**, soit une moyenne ajustée de 77 cratères/ha. Considérant maintenant les formes dont la classification est impossible, une part non négligeable de cratères d'obus a été « oubliée » dans la cartographie. Pour rappel, 403 456 du million de formes étudiées (37,77 %) n'ont pas pu être interprétées. Une première raison est la petite taille de certains objets dont le tracé du contour ne se démarque pas assez, rendant difficile leur identification. La seconde concerne les formes imbriquées dont la géométrie trop complexe ne permet pas de les interpréter. Ce constat est particulièrement évident dans les secteurs lourdement bombardés du cœur du massif où l'entropie a été si forte que la topographie a pris des allures de peau d'orange. Dans de tels cas, les cratères d'obus normalement repérables grâce à leur contour circulaire révélateur ont fait place à une intrication de trous et de bosses aux contours mal définis, empêchant individualisation et cartographie. De ce fait, notre algorithme a certainement exclu des cratères dans ces secteurs fortement bombardés. Afin de déterminer cet ordre de grandeur, un comptage de cratères d'obus a été conduit sur une photographie aérienne du 25 octobre 1916 acquise au-dessus du fort de Douaumont, un des lieux les plus bombardés du champ de bataille présentant un faciès de peau d'orange (figure 6.11). Ce lendemain de la contre-offensive française est marqué par un pilonnage intense du fort. Encore « frais », les cratères d'obus peuvent être digitalisés manuellement. En complément, la situation reflète assez bien l'état du relief à la fin de la guerre puisque l'ouvrage n'a été que peu affecté après cette date en raison du déplacement de la ligne de front vers le nord du champ de bataille (cf.

infra, chapitre 7). Au total, un nombre de 1329 cratères d'obus a été détecté sur la photographie aérienne alors que notre méthode de cartographie n'en a inventorié que 732 (taux de détection de 55,07 %), révélant une défaillance significative de l'algorithme dans les secteurs fortement bombardés (soit 44,93 % de cratères non détectés). Afin d'affirmer cette hypothèse et de contrôler que cette sous-estimation n'affecte pas l'ensemble du massif prospecté, une autre photographie aérienne a été étudiée (figure 6.12), acquise le 9 octobre 1918 (un mois avant l'armistice) aux abords du bois d'Haumont, secteur situé en retrait des premières lignes, moins frappé par l'artillerie et présentant une topographie relativement intacte où émergent quelques cratères d'obus singuliers. Le comptage a permis de repérer sur la photographie 817 cratères d'obus contre 710 sur l'imagerie LiDAR, confirmant l'hypothèse d'une sous-estimation importante du nombre de polémoformes de ce type, dans les secteurs les plus bombardés uniquement (86,90 % cratères détectés par l'algorithme aux abords du bois d'Haumont[4]). Dans l'objectif d'obtenir une tendance générale de cette sous-estimation, les statistiques acquises sur la photographie aérienne du fort de Douaumont (un chiffre de 1,81 doit être multiplié par le nombre de cratères observés sur notre cartographie pour obtenir le nombre total de cratères repérés sur la photographie aérienne) ont été appliquées à toutes les zones de la forêt dont la densité dépasse les 100 cratères/ha (107 au fort de Douaumont). Le traitement a **suggéré un nouveau total de 770 886 cratères** pour le massif entier, soit une moyenne ajustée de 80 cratères/ha pour les 9 615 ha de forêt.

Cependant, ces estimations sont à nuancer car elles n'intègrent pas les formes volontairement supprimées (pour rappel, 219 726 formes inférieures à 1 m² et 24 023 formes tronquées ont été retirées du jeu de données) et celles inondées (24 405 mares ont été cartographiées, soit autant de cratères potentiels ; cf. *infra*, chapitre 9) incluant probablement des cratères d'obus. Ajoutons à cela que les impacts ayant disparu par effet de superposition ne sont pas non plus comptabilisés. Dans les secteurs les plus bombardés, il n'était pas rare d'observer ce genre de phénomène où un obus tombait et explosait à l'intérieur d'un cratère d'obus, le faisant ainsi disparaître (un seul cratère est alors visible au sol). Rappelons également que notre analyse porte sur l'état du relief en 2013. Or, depuis la fin de la guerre, les paysages ont fortement évolué, par érosion naturelle et par érosion anthropique. Dans le cadre des opérations de nettoyage des années 1920, de la naissance de la forêt de Verdun (les parcelles enrésinées couvraient les deux tiers de la forêt), de la patrimonialisation du champ de bataille (travaux d'aménagement, monuments et nécropoles, etc.) et de l'activité touristique, les terrains ont pu être nivelés causant la disparition de nombreuses formes.

[4]En réalité, ce taux de détection se situe bien en-deçà du taux réel de cratères inventoriés dans ce secteur (93,79 %) puisque 42 des 107 formes non repérées sont inondées (rappelons que notre méthodologie a été inefficace sur les formes inondées mais une cartographie complémentaire de ces zones humides a comblé ce hiatus ; cf. *infra*, chapitre 9). Les phénomènes d'érosion naturelle ou anthropique doivent également être intégrés puisque 18 cratères ont été effacés par la construction de cloisonnements.

Figure 6.11 – *Comparaison des taux de détection de cratères d'obus entre la cartographie LiDAR et une photographie aérienne du fort de Douaumont*

***Figure 6.12** – Comparaison des taux de détection de cratères d'obus entre la cartographie LiDAR et une photographie aérienne dans le secteur du bois d'Haumont. La photographie aérienne est à l'origine oblique. La distorsion de l'image provient du géoréférencement de la photographie sur ArcGIS®.*

3.1.2. Description morphométrique des cratères d'obus

Il est procédé à l'analyse de chacune des trois classes morphométriques de cratères d'obus, cratères circulaires, cratères coalescents allongés et cratères coalescents allongés au contour très sinueux.

Classe	Paramètre	*Asp*	*Cir*	*Con*	C_{90}	Pt_{90}	*Rec*	Classe	Paramètre	*Asp*	*Cir*	*Con*	C_{90}	Pt_{90}	*Rec*
D1		0,23	0,21	0,69	0,04	2,33	0,33	D1		0,77	0,94	1,00	0,43	18,66	0,80
D2	*Min*	0,12	0,17	0,67	-0,12	5,65	0,33	D2	*Me*	0,39	0,39	0,98	0,45	20,52	0,63
D3		0,25	0,19	0,65	0,10	7,79	0,25	D3		0,69	0,48	0,92	0,45	21,30	0,52
D1		0,99	1,00	1,00	9,10	71,26	0,93	D1		0,70	0,91	1,00	0,36	15,11	0,81
D2	*Max*	0,88	0,95	1,00	10,20	59,56	0,92	D2	*Q1*	0,33	0,33	0,96	0,39	17,20	0,58
D3		0,91	0,93	1,00	2,22	34,87	0,88	D3		0,62	0,38	0,87	0,39	18,12	0,45
D1		0,77	0,93	0,99	0,44	19,18	0,79	D1		0,84	0,96	1,00	0,50	22,77	0,93
D2	$\bar{X}$	0,39	0,39	0,97	0,48	20,68	0,62	D2	*Q3*	0,44	0,44	0,99	0,54	23,97	0,68
D3		0,68	0,46	0,90	0,46	21,24	0,50	D3		0,76	0,55	0,95	0,53	24,57	0,56

***Tableau 6.4** – Valeurs morphométriques obtenues pour les cratères d'obus (D1, D2 et D3)*

La classe D1 se compose de cratères d'obus singuliers dont le diamètre *(D)* est compris entre 1,17 et 15,38 m pour une profondeur *(Pr)* comprise entre 0,17 et 6,58 m avec toutefois une prédominance de cratères de petite taille inférieurs à 3 m de diamètre (D_{Q1} = 1,78 ; D_{Q3} = 2,98) et 1 m de profondeur (95,43 % ; tableau 6.4). Ce constat s'explique par la plus grande fréquence des obus de petit calibre 75 et 77 mm, produisant des cratères de 0,8 à 1,2 m de diamètre et 0,3 à 0,5 m de profondeur (Arnould et Simon, 1994 ; Amat, 2001 ; tableau 6.5). À cela, s'ajoutent les obus de mortiers de tranchée, provoquant des formes aux dimensions similaires souvent situées entre 1,50 et 3 m de diamètre et inférieures à 1,50 m de profondeur (calibres 58 et 150 mm ; Amat, 2001). En revanche, les cratères des obus de calibre supérieur à 200 mm sont bien moins nombreux, diamètres entre 4 et 5 m (29 619 cratères ; 5 %) et supérieurs à 5 m (6 913 cratères ; 1,16 %) ; 14 cratères de diamètre supérieur à 10 m sont peut-être le résultat des calibres, exceptionnels, des 400 mm français et 420 mm allemands. Les formes sont également peu profondes puisque *Pr* indique que seulement 0,09 % d'entre elles atteignent plus de 2 m de profondeur. La faiblesse de ces chiffres laisse à penser que les formes ont été partiellement remblayées puisque les plus gros cratères devraient avoir une profondeur minimale de 5 m (tableau 6.5). Or, seuls deux individus dépassent ce seuil. Ces propos relatifs à l'évolution des formes au cours du siècle écoulé sont discutés au chapitre 8. Comme le montre le graphique de l'indice de circularité *(Cir* ; figure 6.13), peu de cratères prennent la forme d'un cercle parfait (0,13 % où *Cir* = 1 et 2,68 % où *Cir* = 0,99) puisque *Cir* est en moyenne de 0,93 (cercle anguleux) et se situe dans 14 % des cas en-deçà de 0,90 (ovale, forme en poire). La largeur minimale rencontrée *(l_{MIN})*, 0,6 m contre une longueur minimale *(L_{MAX})* de 1,13 m, illustre la présence d'objets assez allongés dans le corpus (tableau 6.4). Malgré ces irrégularités de forme, la majorité des cratères d'obus relevés présente un contour régulier dépourvu de concavités car 98,12 % d'entre eux ont un indice de convexité égal à 1 et 0,02 % (153 cratères), inférieur à 0,98. Les valeurs d'inclinaison et de forme des pentes de

ces cratères d'obus sont globalement faibles avec une moyenne de 19,18 ° pour Pt_{90} et de 0,04 m pour C_{90} (soit une pente faible et quasi linéaire).

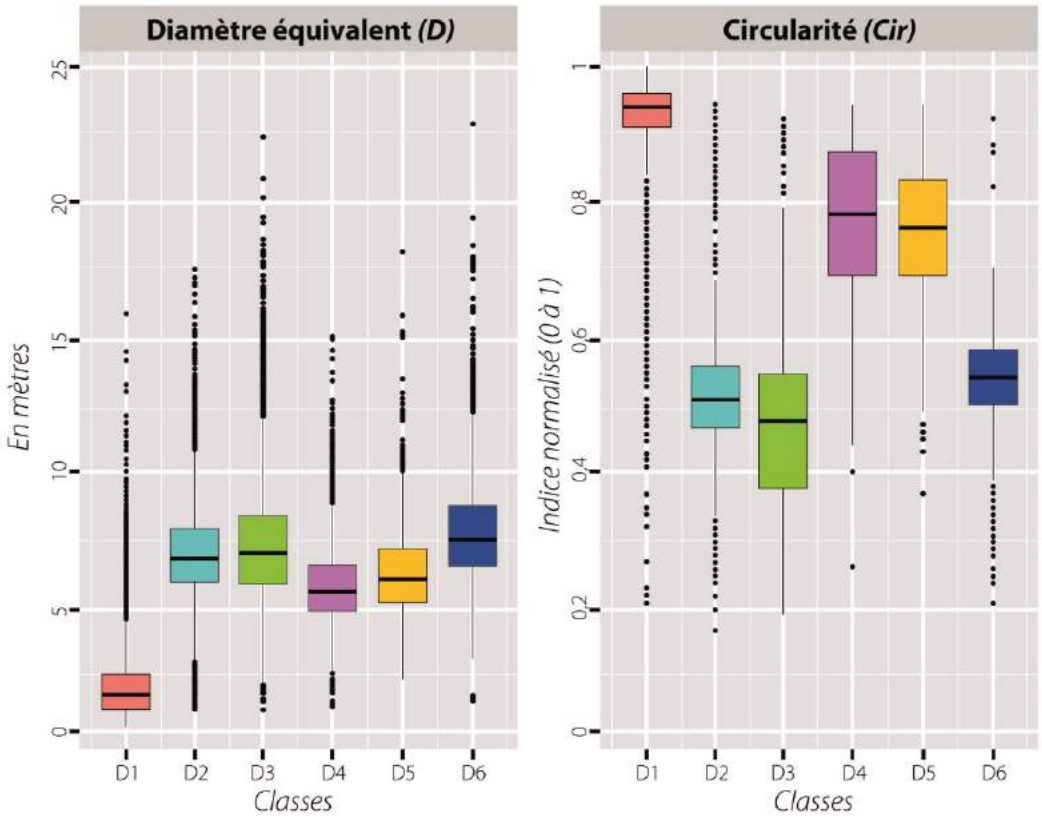


Figure 6.13 *– Boîtes de dispersion de deux variables renseignant sur la présence de cratères d'obus*

La classe D2 contient des cratères d'obus coalescents à deux dépressions. 25 % de ces cratères coalescents ont des dimensions double de celles des cratères singuliers de la classe D1 (A_{Q1} = 8,56 ; D_{Q1} = 6,01 ; L_{Q1} = 5,77 ; cas où deux cratères de même taille se superposent) et dans la moitié des cas des valeurs triplement plus importantes (A_{Me} = 11,24 ; D_{Me} = 6,89 ; L_{Me} = 6,64 ; cas où un cratère de petit calibre et un cratère de gros calibre se superposent ; tableau 6.4). Les cratères coalescents combinant deux cratères de gros calibre (D > 10) sont plus rares mais occupent tout de même une place notoire dans la base (1,56 %, soit 634 individus). Les formes correspondant à la fusion de deux cratères de calibre exceptionnel (D > 15) sont, elles, très rares (16 cratères). Les valeurs de profondeur des cratères *(Pr)*, de pente *(Pt_{90})* et de courbure *(C_{90})* sont logiquement proches de celles de la classe D1 (Pr_{Me} = 0,78 ; Pt_{90_Me} = 20,52 ; C_{90_Me} = 0,46). En revanche, une grande différence réside dans la forme de leur contour, qui s'éloigne largement de la forme circulaire des cratères singuliers ($\overline{Cir}$ = 0,51 ; figure 6.13). Le dédoublement des formes a ainsi causé l'introduction de concavités dans leur contour ($\overline{Con}$ = 0,97), d'où une aire convexe supérieure à l'aire ($\overline{A_{Con}}$ = 15,20 ; $\overline{A}$ = 12,22).

Type de projectile	Diamètre (en m)	Profondeur (en m)
Bombe de mortier 58 mm (16 kg)	1,50 à 3	0,80 à 1
Bombe de mortier 58 mm (40 kg)	4 à 4,50	1
Obus 75 mm	0,8 à 1,2	0,3 à 0,5
Obus 120 mm	2,50	0,9
Bombe de mortier 150 mm	1,50 à 3	0,80 à 1
Obus 155 mm	3,5	1,1
Obus 220 mm	4,6	1,4
Bombe de mortier 240 mm	6 à 10	1,50 à 3
Obus 270 mm	7	3
Bombe de mortier 340 mm	8 à 11	3 à 4
Obus 370 mm	10 à 20	5 à 10

Tableau 6.5 – *Taille des cratères causés par différents types de projectiles (Amat, 2001)*

La classe D3 inclut des cratères d'obus coalescents à trois ou plus de trois dépressions (très rarement deux dépressions). La taille des formes relevées oscille entre 0,92 m de largeur minimale *(l_{MIN})* et 18,85 m de longueur maximale *(L_{MAX})* pour une surface moyenne de 18,22 m² et un diamètre équivalent légèrement plus élevé que pour D2 étant donné la présence de cratères à plus de deux dimensions dans le corpus ($\overline{D}$ = 7,49 ; D_{Me} = 7,12 ; tableau 6.4). Comme dans D2, des cratères coalescents issus de bombardements à gros calibre forment une part non négligeable des individus (10,93 % ; 573 cratères). Les formes induites par des calibres exceptionnels sont plus nombreuses (1,01 % ; 53 cratères). Très peu de variations de profondeur et de pente ont été constatées dans D3 par rapport à D1 et D2 (Pr_{Me} = 0,96 ; Pt_{90_Me} = 21,30 ; C_{90_Me} = 0,45) alors que des différences majeures de forme ont été observées. De ce point de vue, des centaines de combinaison géométrique ont été identifiées mais tous les individus ont en commun une sinuosité de leur contour particulièrement forte ($\overline{Con}$ = 0,90 ; $\overline{Sol}$ = 0,71) et notamment un écart important entre l'aire convexe et l'aire, en moyenne de 8,67 m² ($\overline{A_{Con}}$ = 26,89 ; $\overline{A}$ = 18,22).

Contrairement à ce que l'on aurait pu attendre, la présence de couronnes d'éjectas autour des cratères d'obus (D1, D2 et D3) est particulièrement rare et assez aléatoire. Pour les autres cratères, nous suggérons que les éjectas ont disparu sous l'effet du colluvionnement touchant les rebords de cratères et/ou par nivellement du terrain suite aux aménagements forestiers. **Au bilan des trois classes de formes identifiées** : **classe C1, trois types de cratères d'obus de tailles différentes ont été relevés ; classes C2, trois types et C3, six types, conditionnés par des tailles et morphologies différentes** (figure 6.14).

3.1.3. Discussion

De la comparaison de nos résultats sur la morphométrie des cratères d'obus du champ de bataille de Verdun[5] à ceux d'autres sites (deux études en dehors de Verdun), nous avons conclu que la taille des cratères observés est comparable aux formes relevées ailleurs :

- Dans le bois de la Gruerie (Argonne, Marne, France), Brenot *et al.* (2016) ont trouvé des cratères variant entre 1,13 et 7,61 m de diamètre pour 0,75 m de profondeur moyenne, valeurs comparables aux nôtres ;
- À proximité du fort Luserna (Trentino, Italie), Magnini *et al*. (2016) ont échantillonné des cratères de taille similaire, de moins de 1 m à plus de 10 m de diamètre et de 0,5 à 2 m de profondeur.

En revanche, cette brève analyse comparative est imparfaite à partir du moment où l'on intègre à la comparaison les entonnoirs de mine, dont les caractéristiques morphométriques ont été étudiées par deux autres études :

- Sur la cote 108 (Aisne, France), Taborelli *et al.* (2017b) ont mesuré des formes bien plus imposantes que les nôtres, comprises entre 10 et 89 m de diamètre et profondes de 10 à 22 m ;
- Dans le Saillant d'Ypres (Flandre, Belgique), Stichelbaut *et al.* (2016) ont relevé des entonnoirs de mine aux diamètres compris entre 10 et 75 m.

Constatons aussi une ressemblance entre les cratères d'obus du champ de bataille de Verdun et ceux de conflits plus récents, bien que ces derniers possèdent une taille souvent supérieure aux formes que nous avons cartographiées (bombardements aériens ; cf. *supra*, chapitre 1). Ainsi, dans la forêt normande des Andaines, Capps Tunwell *et al.* (2016) ont enregistré des cratères de la Seconde Guerre mondiale compris entre 3,6 et 11,3 m de diamètre et 1,5 et 3 m de profondeur. Des formes aussi impressionnantes mais plus profondes ont été aperçues dans les rizières vietnamiennes (guerre du Viêt Nam) par Westing et Pfeiffer (1972) qui ont proposé des valeurs situées entre 12 et 15 m de diamètre et entre 6 et 9 m de profondeur. Dans les paysages laotiens (guerre du Viêt Nam), des ordres de grandeur comparables ont été suggérés par Kiernan (2015) pour des cratères de 10 à 12 m de diamètre et de 5 m de profondeur moyenne.

[5]Les chiffres relatifs au nombre de polémoformes (cratères d'obus, abris et positions d'artillerie, réseaux de fossés) par rapport aux années de guerre et à d'autres champs de bataille sont discutés dans le chapitre 8.

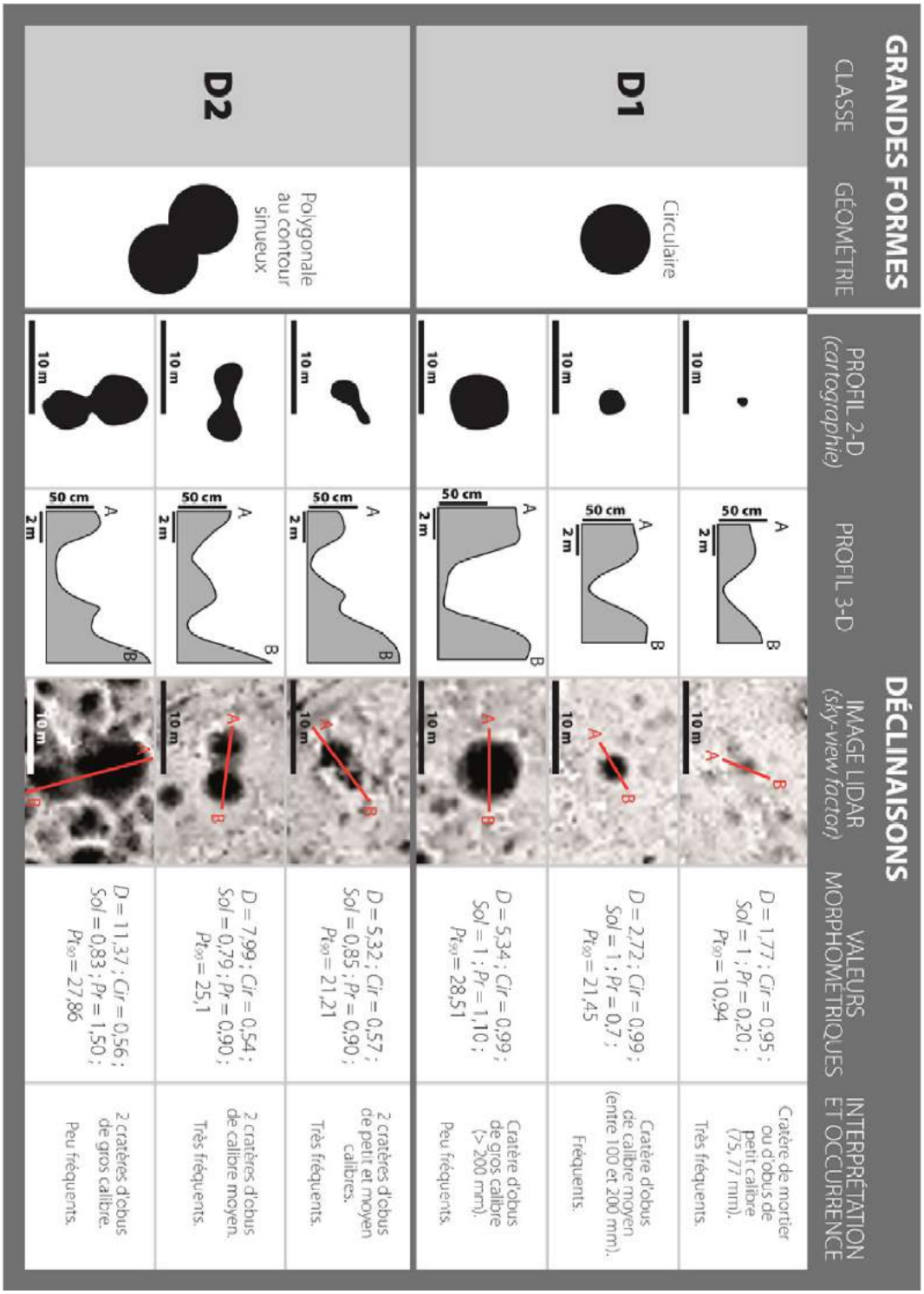


***Figure 6.14** – Principaux types de cratères d'obus*

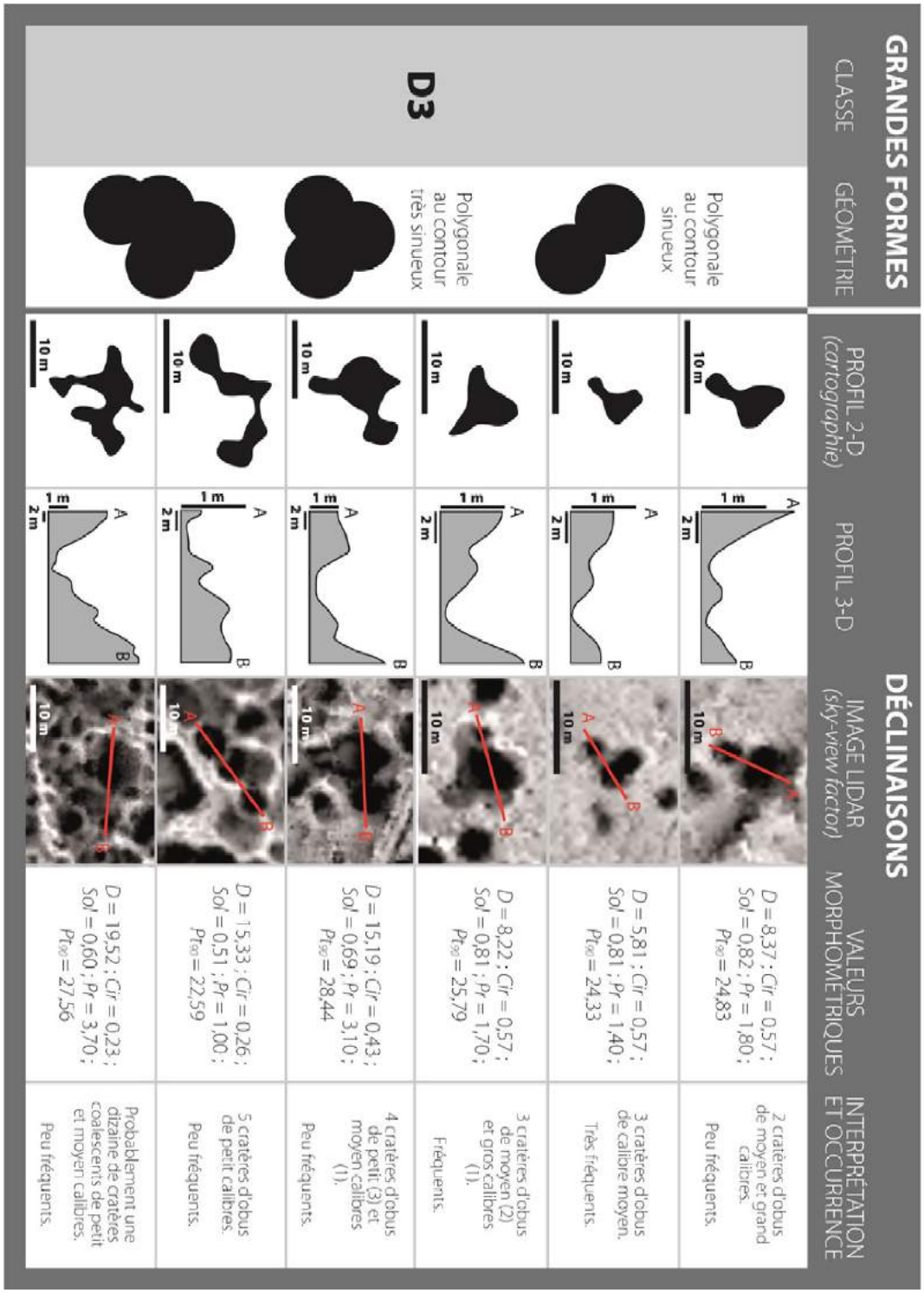


***Figure 6.14** – Principaux types de cratères d'obus (suite)*

Il apparaît opportun d'élargir l'analyse en comparant la morphométrie des cratères d'obus avec ceux induits par des impacts météoritiques, tant leur géométrie est proche. Nous prenons pour référence la typologie établie par Salomon et Auly (2010) sur 230 astroblèmes. La confrontation de la géométrie 2-D et 3-D de ces deux types de formes permet de constater des similitudes morphométriques malgré leurs différences de taille : comme les cratères d'obus, la plupart des cratères météoritiques (*i.e.*, type A, les plus communs, résultant d'un impact vertical) forme une dépression circulaire entourée d'une couronne d'éjectas plus ou moins épaisse. Il existe des cas de cratères coalescents, phénomène résultant de l'explosion d'une météorite au contact de l'atmosphère (plusieurs projectiles se forment et s'éparpillent). Les ressemblances s'observent aussi dans les processus morphogénétiques que Melosh (cité par Salomon et Auly, 2010) a divisé en trois grandes phases : 1) le stade du contact ; 2) le stade du creusement ; 3) le stade des transformations (retour à l'équilibre).

Si nous centrons de nouveau notre analyse sur les cratères d'obus, plusieurs arguments expliquent ces variations importantes de la dimension des cratères d'un terrain à un autre (Villate, 1925 ; Hupy, 2006 ; Hupy et Schaetzl, 2006 ; Hupy et Schaetzl, 2008 ; Hupy et Koehler, 2012 ; Capps Tunwell *et al.*, 2016) :

- **Le type d'explosif employé** : à matériau encaissant identique, un obus de 75 mm (≈ 6 kg d'explosifs) engendre des cratères plus petits qu'un obus de 400 mm (≈ 90 kg d'explosifs ; Beyel, 1911 ; ministère de l'armement et des fabrications de guerre, 1918). Cette relation est exponentielle, traduisant une croissance rapide et continue à mesure que le calibre de l'obus augmente (figure 6.15). La taille des cratères dépend aussi des modèles et des réglages. Alors que les obus fusants explosent au-dessus du sol, les obus percutants délivrent leur énergie au contact d'un objet. L'effet est plus dévastateur pour les obus dotés d'un système à retardement, en particulier les obus torpille « *destinés à traverser les terres ou les maçonneries et, une fois qu'ils y ont pénétré, à agir à la façon d'un fourneau de mine* » (Girardon, 1896) ;
- **La pénétration du projectile dans le sol**, fonction de l'angle de tir. Généralement, les tirs plongeants (verticaux ou courbes) possèdent un pouvoir beaucoup plus destructeur que les tirs rasants (tendus ou plats), du fait que les projectiles pénètrent le sol de manière quasi verticale. L'usage du tir rasant a dominé dans l'artillerie française durant presque toute la guerre, à l'opposé des Allemands qui employaient surtout le tir plongeant (Gascouin, 1921). Ce constat laisse à penser que le bouleversement géomorphologique induit par l'artillerie est plus important quand on se situe du côté français (bombardements allemands) que l'inverse ;
- **Le type de sol** : comme le constate Villate (1925), « *la nature du sol peut provoquer un rendement moindre dans le tir de l'artillerie* ». Les formes s'estompent rapidement sur des substrats tendres de type argileux alors qu'elles résistent mieux sur des substrats durs de type calcaire. « *Une étude géologique permet de se rendre compte à l'avance si les trous d'obus créés, au cours de la préparation d'artillerie, seront étroits et profonds ou bien larges et superficiels* » (Villate, 1925). Par ailleurs, dans les terrains tendres, les chances qu'un obus pénètre la surface sans exploser sont plus importantes que sur des

terrains durs, en raison de la capacité d'amortissement de ce type de sol. La probabilité qu'un cratère se forme serait donc moins forte en contexte argileux et humide.

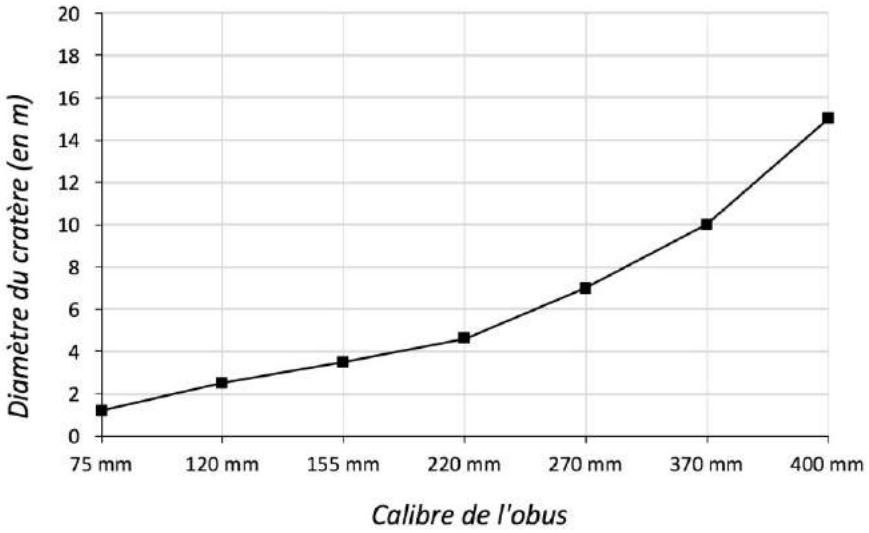


Figure 6.15 – *Variation de la taille des cratères en fonction du poids de l'explosif. Les valeurs considérées sont celles du tableau 6.5 (les projectiles de mortier sont exclus de l'analyse)*

Ce dernier paramètre a été étudié plus en détail en croisant la carte des cratères d'obus de la classe D1 et la carte géomorphologique de la forêt domaniale de Verdun (cf. *supra*, chapitre 2). Les diamètres et profondeurs des entités sont comparés selon les trois types de substrat du site d'étude (tableau 6.6). **Les résultats montrent que les cratères d'obus sont plus petits et plus profonds dans les calcaires de l'Oxfordien** que dans les argiles et marno-calcaires. **Les formes sont plus évasées au sommet du plateau des Hauts de Meuse où affleurent les marno-calcaires de l'Oxfordien supérieur**. Dans ces milieux, la persistance de l'eau en raison de l'imperméabilité du substrat et du débordement des nappes perchées favorise la déstabilisation et l'élargissement des flancs de cratères (Hupy, 2005, 2006). Ce constat devrait s'observer dans les argiles du Callovien mais ce n'est pas ce que semble indiquer le tableau 6.6. Cette anomalie semblerait liée à la localisation des cratères d'obus dans le périmètre des roches calloviennes, celles-ci se situant en marge du champ de bataille (nord-est), secteurs moins bombardés.

Géologie	Diamètre (en m)	Profondeur (en m)
Marno-calcaires de l'Oxfordien supérieur	2,53	0,52
Calcaires de l'Oxfordien moyen et inférieur	2,49	0,54
Argiles du Callovien	2,42	0,48

Tableau 6.6 – *Taille moyenne des cratères d'obus dans différents contextes géologiques*

3.2. Les abris (à personnel ou à matériel) et les positions d'artillerie

3.2.1. Aperçu général du nombre de constructions

Les bénéfices attendus de la cartographie semi-automatique sont particulièrement importants du point de vue du nombre d'abris et positions d'artillerie conservés, pour des raisons principalement archéologiques et historiques. **Le déploiement de notre algorithme a permis de cartographier entre 18 029** (fiabilité minimale) **et 6 866** (fiabilité maximale ; cf. *supra*, § 2.2) **abris ou positions d'artillerie potentiels** sur l'ensemble du site d'étude, avec une moyenne de 2 à 1 constructions/ha. Ils se déclinent en trois catégories morphométriques :

- 13 763 à 5 226 abris carrés et rectangulaires ;
- 1 851 à 689 abris ou positions d'artillerie triangulaires, en poire ou fer à cheval ;
- 2 415 à 951 abris ou positions d'artillerie polygonaux au contour très sinueux.

Ce corpus représente 1,69 % de l'ensemble des formes compactes et creuses cartographiées et 2,71 % des formes classées et interprétées, soit une part très faible comparée aux autres catégories de formes repérées (tableau 6.1 et annexe E). La faiblesse du nombre de constructions dans le million de formes extraites du MNT a rendu difficile leur détection, du fait de leur signature morphométrique peu commune dans le jeu de données. Le défi était de réussir à les séparer des cratères d'obus particulièrement nombreux sur le champ de bataille de Verdun, opération qui a été accomplie de manière satisfaisante.

3.2.2. Description morphométrique des abris et positions d'artillerie

Trois catégories de formes associées aux abris et positions d'artillerie ont été identifiées, soit autant de classes à caractériser d'un point de vue morphométrique. Au moment de leur description, nous n'avons pas tenu compte des niveaux de fiabilité des formes. En d'autres termes, ont été analysés les chiffres obtenus à l'issue de la classification morphométrique (avant les tris ; cf. *supra*, § 2.2).

La classe D4 présente l'aire moyenne la plus faible avec 14,25 m² (figure 6.16 et tableau 6.7). Seulement 12,62 % des constructions possèdent une aire comprise entre 20 et 50 m² et 32 abris (0,23 %) dépassent ce dernier seuil. En plus de renseigner sur leurs faibles dimensions ($\bar{l}$ = 3,03 ; $\bar{L}$ = 5,86), leurs largeur et longueur moyennes indiquent que les formes sont légèrement allongées, la longueur étant plus importante de 2,83 m que la largeur. **Les abris et positions d'artillerie de la classe D4 correspondent à des édifices assez orthogonaux**, **parfois émoussés**, **prenant la forme d'ellipse** (l'aspect anguleux de ces formes ayant disparu). L'indice de rectangularité *(Rec)* est de ce fait le plus important des trois catégories d'abris (D4, D5 et D6) avec une moyenne de 0,75. 18,69 % des formes possèdent un indice supérieur à 0,80 et prennent une forme quasi rectangulaire et assez anguleuse ; nous sommes cependant assez loin de la forme à angles droits dont l'indice serait de 1, ce que tend également à montrer l'*aspect ratio (Asp)* où 16,65 % des formes ont un indice compris entre

0,65 et 0,75 (figure 6.16 et tableau 6.7). Les formes rectangulaires émoussées complètent le corpus et se traduisent par des formes proches d'une ellipse. Toutes les formes observées partagent une solidité importante comme l'indiquent les variables *Conv* et *Sol* (en moyenne de 0,99 et 0,96) et la proximité de la moyenne de l'aire convexe avec l'aire ($\overline{A_{Con}}$ = 14,84). De ce fait, les abris et positions d'artillerie de la classe D4 ont une forme simple au contour régulier. Par rapport aux cratères d'obus, ces constructions sont beaucoup plus encaissés comme l'indique la variable des profondeurs ($\overline{A_{Con}}$ = 0,51 pour D1 contre 1,39 pour D4). Cet accroissement de la profondeur s'accompagne d'une inclinaison plus importante des flancs de formes, d'où une moyenne des pentes de 33,35° et l'occurrence de valeurs extrêmes (42 formes > 60°) témoignant de la présence de parois proches de la verticalité (présence de murs). Enfin, une autre particularité des flancs des abris est leur concavité, certes pas très prononcée, mais tout de même présente, confortant l'hypothèse d'une verticalité initiale des flancs ($\overline{C_{90}}$ = 0,69).

Classe	Paramètre	*Asp*	*Cir*	*Con*	C_{90}	Pt_{90}	*Rec*	Classe	Paramètre	*Asp*	*Cir*	*Con*	C_{90}	Pt_{90}	*Rec*
D4		0,21	0,26	0,79	-0,30	10,71	0,36	D4		0,54	0,78	1,00	0,62	32,29	0,76
D5	*Min*	0,50	0,37	0,72	0,23	9,61	0,53	D5	*Me*	0,73	0,76	0,99	0,58	32,30	0,70
D6		0,37	0,21	0,64	0,27	11,25	0,34	D6		0,51	0,54	0,95	0,60	31,74	0,60
D4		0,94	0,94	1,00	14,14	69,75	0,93	D4		0,45	0,69	0,99	0,52	30,34	0,72
D5	*Max*	0,92	0,94	1,00	9,96	74,34	0,86	D5	*Q1*	0,69	0,69	0,97	0,48	30,41	0,65
D6		0,97	0,92	1,00	8,75	68,70	0,80	D6		0,46	0,50	0,92	0,50	29,90	0,56
D4		0,53	0,77	0,99	0,69	33,35	0,75	D4		0,63	0,87	1,00	0,75	35,40	0,79
D5	$\bar{X}$	0,73	0,75	0,97	0,68	33,19	0,69	D5	*Q3*	0,78	0,83	1,00	0,70	35,28	0,74
D6		0,54	0,53	0,93	0,67	32,49	0,59	D6		0,61	0,58	0,97	0,73	64,61	0,63

***Tableau 6.7** – Valeurs morphométriques obtenues pour les abris et positions d'artillerie (D4, D5 et D6)*

La classe D5 contient des abris et positions d'artillerie de plus grande taille que D4, avec une aire moyenne de 19,81 m² et des dimensions moyennes de l'ordre de 4,18 m de largeur et 5,72 m de longueur (figure 6.16 et tableau 6.7). Alors que seulement 12,62 % des constructions de D4 possèdent une aire supérieure à 20 m², c'est plus d'un tiers des valeurs (36,14 %) qui dépasse ce seuil dans D5. Cet accroissement des variables de taille s'accompagne d'une accentuation de la complexité des formes puisque l'allongement du périmètre ($\overline{P}$ = 15,03 pour D4 contre 17,81 pour D5) engendre des irrégularités de contour. De ce fait, les valeurs de solidité *(Sol)* significativement inférieures à celles de D4 ($\overline{Sol}$ = 0,91 pour D5 contre 0,96 pour D4) montrent l'apparition de concavités dans les formes. Du point

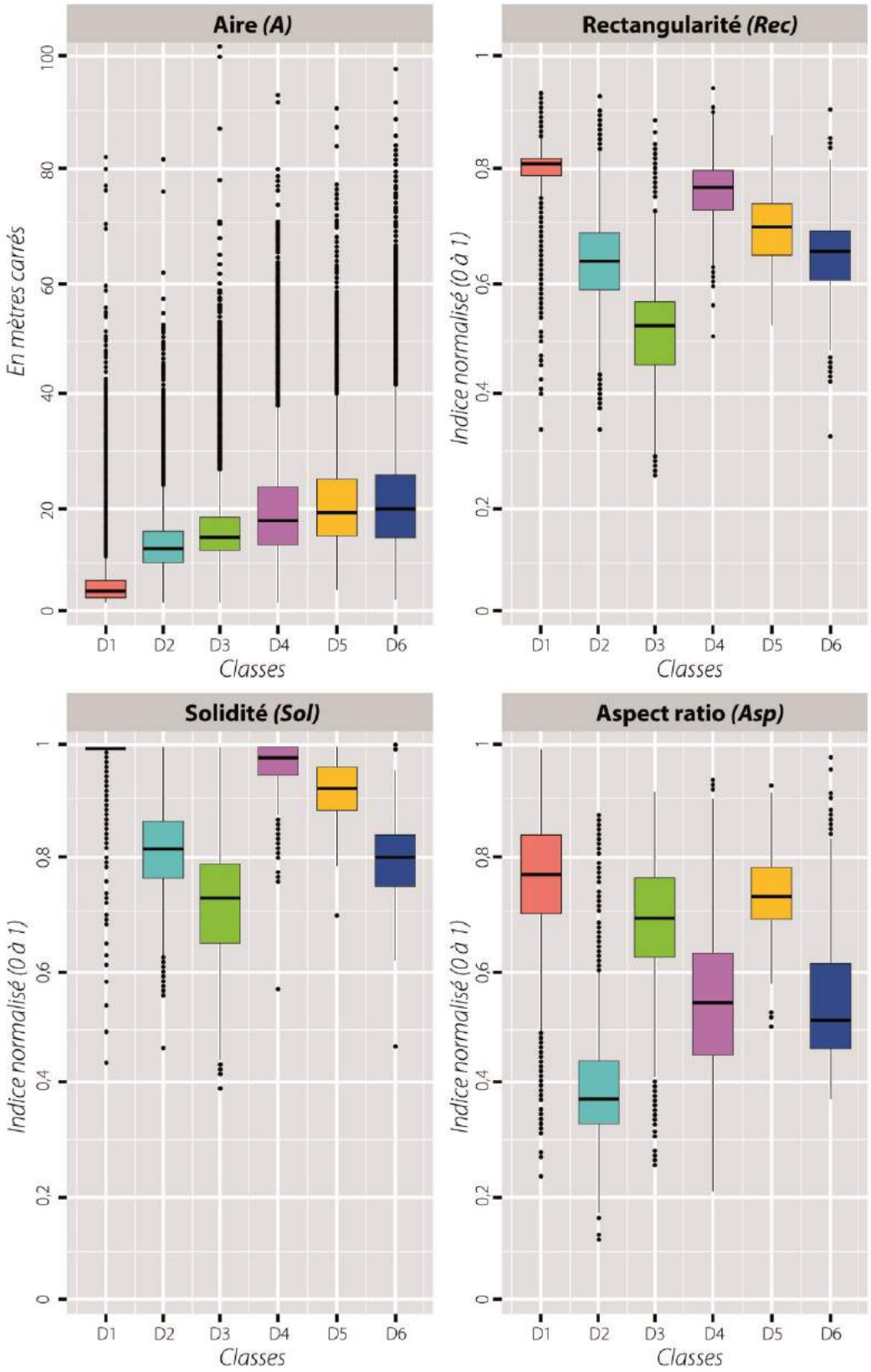


Figure 6.16 – *Boîtes de dispersion de deux variables renseignant sur la présence d'abris et de positions d'artillerie*

de vue de leur forme générale, la classe D5 se compose d'entités assez variées aux extrémités souvent allongées **donnant à la forme un aspect triangulaire aux sommets très émoussés** (formes « en poire »). Plus rarement, celles-ci prennent une forme semi-circulaire, voire une forme de « fer à cheval », accompagnée d'une hausse de la valeur des variables associées à la concavité des formes (*Sol*, *Con*, *Def*). Dans la plupart des cas, les contours restent assez lisses mais soumis à une sinuosité assez forte comme l'illustre la valeur du premier quartile de *Sol* (Sol_{Q1} = 0,88). Ce constat est assez visible dans les lieux les plus bombardés du champ de bataille où les cratères d'obus coalescents apparaissent (deux dépressions ou plus) et où une partie d'entre eux ont été classés dans D5, dévoilant une erreur dans la classification. Cet effet a en grande partie été effacé après les opérations de tri appliquées aux formes (cf. *supra*, § 2.2). À propos de la variabilité, ces formes en *z* semblent plus profondes de 0,27 m en moyenne par rapport à D4 et de 1,15 m par rapport aux cratères d'obus de D1. Les pentes, elles, sont du même ordre de grandeur que D4 ($\overline{P_{90}}$ = 33,35 pour D4 et 33,19 pour D5), bien qu'on dénote une hausse des extrêmes ($\overline{P_{90\_MAX}}$ = 69,79 pour D4 contre 74,34 pour D5). Leur profil, en revanche, est identique, les deux classes se composant de formes au profil assez concave.

La classe D6 présente des abris et positions d'artillerie dont les dimensions se situent un palier au-dessus de D4 et D5 ($\overline{A}$ = 20,28 ; $\overline{P}$ = 21,45 ; $\overline{l}$ = 3,47 ; $\overline{L}$ = 7,10) et des trois classes de cratères d'obus (D1, D2 et D3), **ce qui en fait le type dominant de polémoformes compactes et creuses** (figure 6.16 et tableau 6.7). Avec un indice de solidité moyen de 0,79, **ces formes possèdent un contour des plus sinueux** avec les cratères d'obus coalescents à deux dépressions ou plus (pour D3, $\overline{Sol}$ = 0,71). Elles correspondent aussi aux formes dont la variabilité géométrique est la plus importante après D4 (écarts de 0,15 entre ASP_{Q1} et ASP_{Q3} pour D6 contre 0,18 pour D4), témoignant de la présence de formes sans signature morphométrique commune dans le corpus. En revanche, toutes **les entités sont profondes**, la moyenne étant la plus haute de toutes les classes de formes ($\overline{Pr}$ = 1,73). 29,52 % des formes se situent ainsi au-dessus de 2 m de profondeur et 8,65 % au-dessus de 3 m. Le profil des pentes est en revanche relativement proche des autres classes de constructions (D4 et D5), tant du point de vue de l'inclinaison ($\overline{P_{90}}$ = 33,35 pour D4 ; $\overline{P_{90}}$ = 33,19 pour D5 ; $\overline{P_{90}}$ = 32,49 pour D6) que de la forme ($\overline{C_{90}}$ = 0,69 pour D4 ; $\overline{C_{90}}$ = 0,68 pour D5 ; $\overline{C_{90}}$ = 0,68 pour D6).

Au sein des trois catégories de formes repérées sur l'imagerie LiDAR, **vingt-six sous-catégories ont été identifiées** (figure 6.17) :

- Dans la classe C4, **quatorze types d'abris** ;
- Dans la classe C5, **trois types d'abris et cinq types de positions d'artillerie** ;
- Dans la classe C6, **un type d'abri et trois types de positions d'artillerie**.

Figure 6.17 – *Principaux types d'abris et de positions d'artillerie*

***Figure 6.17** – Principaux types d'abris et de positions d'artillerie (suite)*

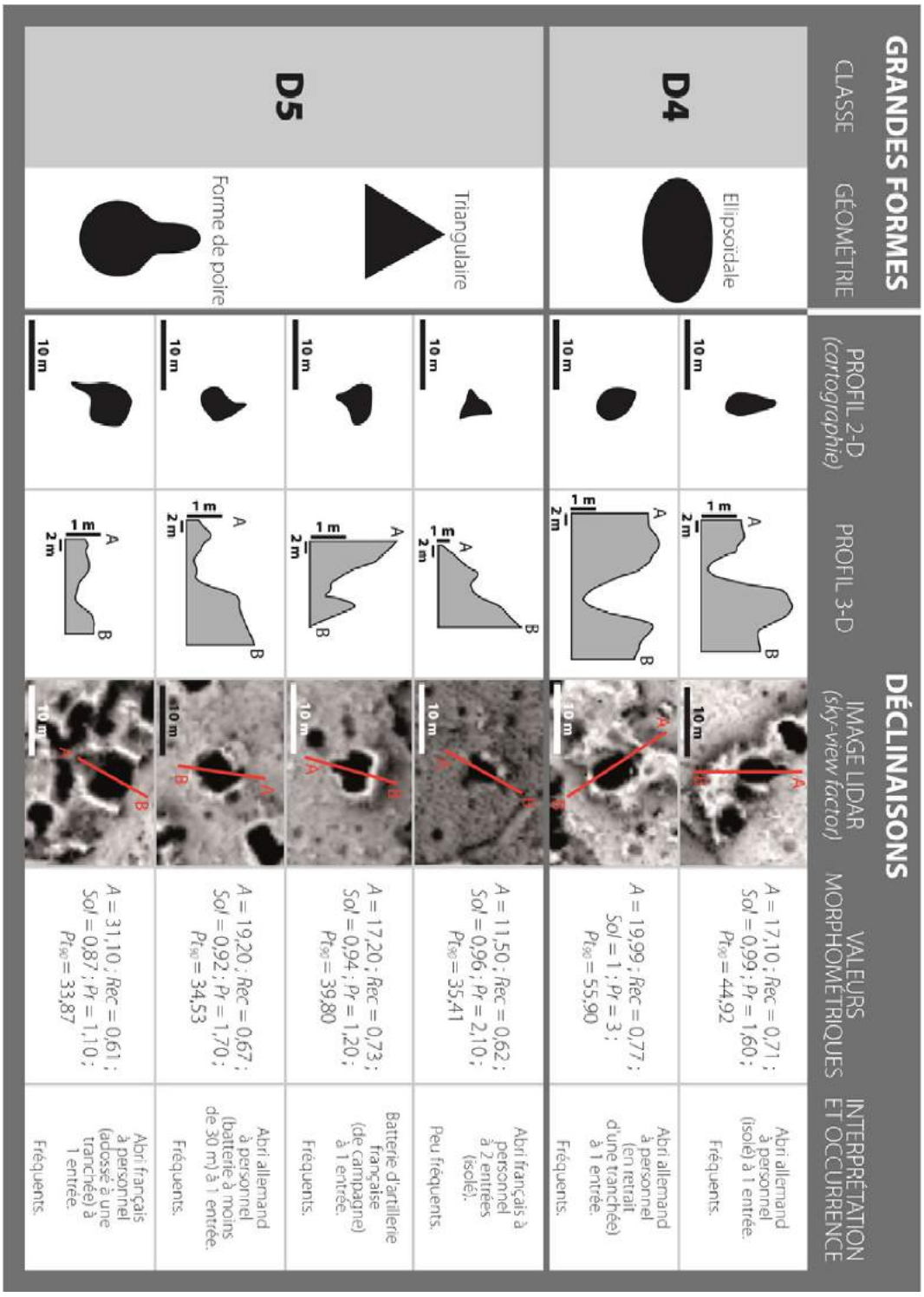


***Figure 6.17** – Principaux types d'abris et de positions d'artillerie (suite)*

Figure 6.17 – *Principaux types d'abris et de positions d'artillerie (suite)*

Figure 6.17 – *Principaux types d'abris et de positions d'artillerie (suite)*

3.2.3. Discussion

La forte variabilité des valeurs morphométriques associées à ces trois classes de construction et en particulier l'aspect ratio (*Asp* est compris entre 0,21 et 0,97) renseignant sur les types de formes géométriques rencontrés, indique la présence d'abris et de positions d'artillerie de géométrie très diverses reflétant les recommandations des États-majors en matière d'aménagement du champ de bataille. Si l'on s'en tient aux consignes des manuels militaires français (ceux des armées allemandes n'ont pas été consultés), la géométrie des abris et positions d'artillerie est fonction de cinq variables :

- **La diversité fonctionnelle** : à chaque fonction est associée une géométrie. À titre d'exemple, un abri à personnel n'a pas la même taille ni la même géométrie qu'une position d'artillerie, cette dernière nécessitant des dimensions adaptées à l'installation des canons. L'État-major français distingue pas moins de neuf types d'abris répartis en trois catégories (GQGA, 1917a) et trois types de positions d'artillerie (GQGA, 1917 c ; tableau 6.8). On imagine que ce chiffre est plus élevé en comptant les ouvrages allemands (ou autres).

Type de forme	Type	Sous-type
Abri	1) Abris pour le personnel seul	1) Postes de commandement ; 2) postes de secours ; 3) etc.
	2) Abris pour le matériel seul	1) Abris à munitions ; 2) à vivres ; 3) etc.
	3) Abris pour le personnel et le matériel	1) Abris pour hommes (avec leurs armes) ; 2) abris pour mitrailleuses ; 3) abris pour engins de tranchée ; 4) abris pour canons ; 5) abris pour projecteurs ; 6) etc.
Positions d'artillerie	1) Batterie isolée	-
	2) Batterie de campagne	-
	3) Batterie lourde	-

Tableau 6.8 – *Typologie des abris et positions d'artillerie selon les instructions militaires françaises (GQGA, 1917 a et c)*

- **La capacité d'accueil** : plus nombreux sont les personnes ou matériels à accueillir, plus grande est la surface aménagée. « *Les abris pour hommes seront établis pour une escouade, une demi-section, une section au plus* » (GQGA, 1917a). Les effectifs associés à chacune de ces unités sont d'une dizaine d'hommes pour une escouade, une trentaine pour une demi-section et une soixantaine pour une section. Le constat est le même pour les positions d'artillerie, la surface variant en fonction du type de calibre utilisé ;
- **La résistance des constructions** (pour les abris) : les instructions distinguent les abris légers « *assurant la protection contre les éclats d'obus et, dans une certaine mesure, contre les coups des obus de petit calibre (77, 105)* » et les abris à l'épreuve « *capables de résister à un tir systématique et réglé des pièces de moyen calibre (130, 150) et à des coups isolés de la pièce de gros calibre la plus fréquemment employée (210)* ». Il en résulte une adaptation de la taille et de la géométrie pour chaque type d'aménagement. Dans le premier cas, les

abris de petite taille et la dispersion sont privilégiés pour compenser les risques de perte. Pour le second type, les constructions sont plus volumineuses et aménagées dans les points d'appui importants (GQGA, 1917a) ;

- **Le mode de construction** : différents matériaux étaient employés pour renforcer les ouvrages. L'emploi du béton, du ciment et même de parpaings était fréquent, le plus souvent pour l'aménagement des abris à l'épreuve afin de contrer les effets de l'artillerie de gros calibre. L'usage de ces matériaux a permis le maintien de certaines constructions et la conservation de leur aspect d'origine (cas des constructions anguleuses ou aux flancs raides) ;
- **Le type de terrain** : il est surtout question de se protéger des inondations de manière à optimiser la durée de vie des positions. Des fossés d'évacuation des eaux ou merlons pouvaient être aménagés dans ou à proximité des constructions pour limiter ce risque. De manière plus générale, « *le roc dur, un terrain humide obligeront à diminuer la profondeur et à augmenter le relief* » (GQGA, 1917a).

En complément des informations renseignées par les manuels militaires, les observations de terrain et les données LiDAR montrent que la taille et la géométrie des formes sont aussi fonction d'autres facteurs, notamment de l'état de conservation. Indépendamment des processus d'érosion post-guerre, certaines entités ont présenté différents degrés de destruction liés aux bombardements durant le conflit. De ce fait, de nombreux édifices ont été touchés par des obus, générant des formes uniques sur le champ de bataille (*e.g.*, un ou plusieurs cratères d'obus au sein d'un abri ou d'une position d'artillerie ; figure 6.16).

Par ailleurs, notre inventaire n'a pas pris en compte certains types de constructions suscités. Cette lacune concerne :

- **Les niches-refuge**, destinées à l'attaque/défense (positions de mitrailleuse, mortiers de tranchée) ou à la protection des hommes, des coureurs et des munitions (GQGA, 1917a ; Normand, 1921). Creusées dans les flancs des fossés avec lesquels elles ont été confondues, elles n'ont pu être repérées. Il semble difficile de les identifier par quelque moyen que ce soit, à cause de leur faible taille ;
- **Les abris** « **en épis** », alignés et reliés aux fossés, généralement localisés à l'arrière des premières lignes dans les cantonnements. Du fait qu'ils soient accolés aux fossés, nous ne sommes pas parvenus à les séparer des formes linéaires et creuses. Seule une cartographie manuelle à partir d'une observation des données LiDAR *(SVF)* permettrait de les intégrer à l'inventaire ;
- **Les abris en galerie de mine** (abris-cavernes), qui abritent les hommes des bombardements (GQGA, 1917a ; Normand, 1921). Souterrains, la technologie LiDAR s'est révélée inopérante pour les détecter. Une prospection géophysique serait une alternative ;
- **La plupart des abris à l'épreuve**, puisque notre cartographie a privilégié l'inventaire des formes en mou (abris légers). Toutefois, ceux de grande taille et visibles en surface ont fait l'objet d'une cartographie manuelle en raison de leur potentiel écologique (cf. *infra*, chapitre 9).

Alors que les cratères d'obus constituent le type de formes le plus étudié dans les recherches sur les paysages de guerre, **les abris et positions d'artillerie restent peu abordés**. La difficulté à les détecter (quelle que soit la méthode de prospection utilisée) est une raison de cette lacune. Sur les photographies aériennes d'époque, ces constructions sont difficilement perceptibles, fondues dans le paysage (camouflage) ou situées sous bois (détection impossible durant la période d'activité végétative). Sur les plans directeurs, elles sont représentées mais il n'est pas possible de caractériser leur géométrie réelle (représentation par un figuré). Sur les images LiDAR, elles peuvent être distinguées à condition que leur géométrie se démarque des autres types de formes (*e.g.*, cratères d'obus). Par ailleurs, il n'est pas sans rappeler le grand nombre de catégories associées aux constructions, ce qui rend leur interprétation encore plus complexe (tableau 6.17). L'ensemble de ces raisons fait que nos chiffres peuvent difficilement être confrontés aux études suggérant des typologies d'abris et de positions d'artillerie, à notre connaissance au nombre de deux :

- Stichelbaut (2009) a recensé sur le front belge de 1914-1918, à partir de photographies aériennes de l'époque, pas moins de dix types de positions d'artillerie, incluant des positions légères (formes en mou), lourdes (casemates en bois ou bétonnés) ou sur rail. Parmi les catégories suggérées, trois (GP1-1, GP1-3 et GP5) ont été identifiées à Verdun (figure 6.18), les sept autres étant situées en dehors de la zone couverte par le LiDAR ou absentes du terrain ou écartées par notre méthodologie. Stichelbaut n'est cependant pas parvenu à établir une typologie des abris, souvent camouflés.
- Gheyle *et al.* (2018) ont distingué au sud du même secteur (région d'Ypres) mais avec d'autres données (LiDAR) cinq catégories de constructions de type « abri » parmi lesquelles trois (e, f et g) ont été repérées sur notre site avec des géométries assez proches (figure 6.18). Deux types de positions d'artillerie ont aussi été recensés mais aucun des deux n'a été aperçu sur le front de Verdun.

Les résultats de ces brèves comparaisons montrent que **les géométries de polémoformes rencontrées en forêt domaniale de Verdun existent aussi ailleurs**, conclusion qui nous amènera à envisager la reproduction de notre méthodologie sur d'autres champs de bataille.

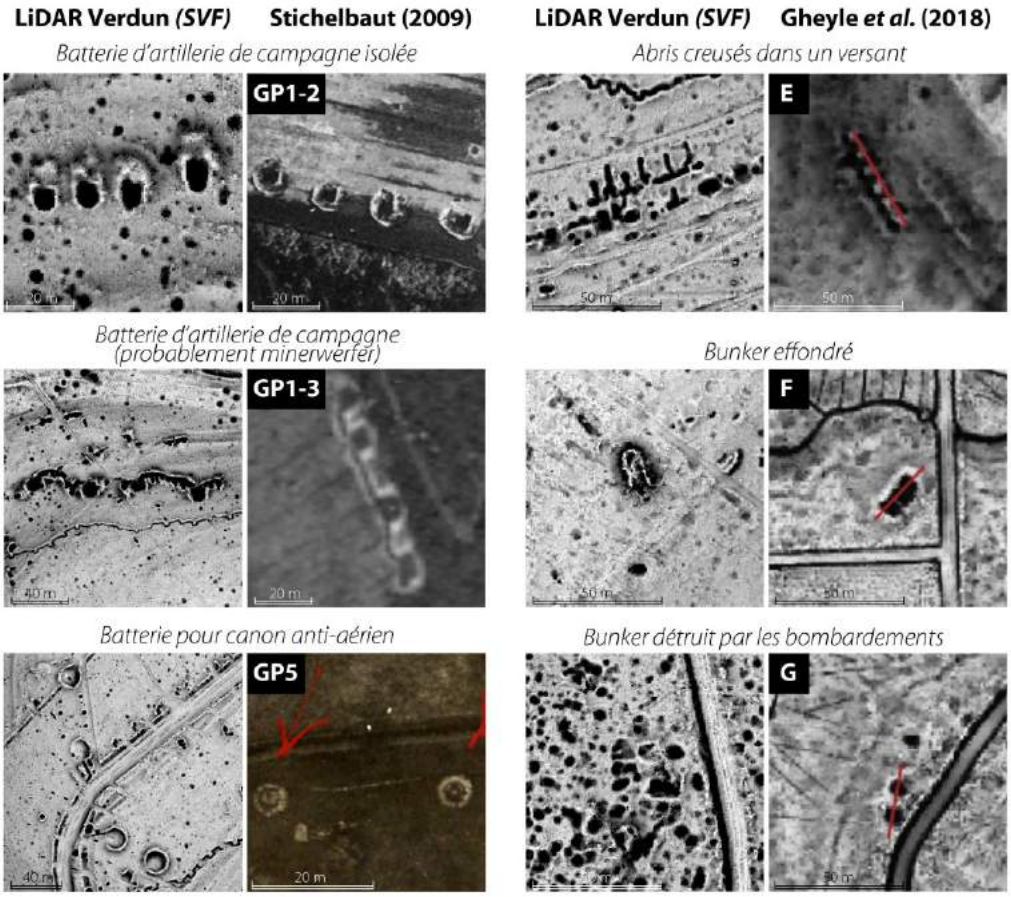


***Figure 6.18** – Comparaison d'abris et de batteries d'artillerie entre différents champs de bataille*

3.3. Les réseaux de fossés

3.3.1. Aperçu général du nombre de tranchées et de boyaux de communication

La méthodologie mise en place a permis de cartographier 423,96 km de fossés, soit une moyenne de 44 m de fossés/ha (tableau 6.2 et annexe E). 5 045 des 17 638 sections de fossés repérées sont des tranchées (28,60 % ; D9) et 12 593, des boyaux de communication (71,40 % ; D10). En termes de longueur, **145,63 km de tranchées** (34,35 %) **ont été cartographiées contre 278,33 km de boyaux de communication** (65,65 %). Au simple regard des proportions, le degré de fragmentation semblerait plus important pour les boyaux de communication. À l'opposé des formes compactes et creuses dont l'inventaire a entièrement été réalisé de manière automatique, les réseaux de fossés (formes linéaires et creuses) ont été extraits semi-automatiquement. La première partie de l'algorithme a consisté à isoler automatiquement ces formes à l'aide d'un LRM et d'un processus de squelettisation. La seconde a permis de compléter manuellement les fossés qui n'avaient pas été repérés à la première étape. Par conséquent, l'inventaire a été exhaustif (taux de détection 100 %) et aucun fossé conservé au moment de la mission LiDAR n'a semble-t-il été oublié.

3.3.2. Description morphométrique des tranchées et boyaux de communication

L'analyse de la longueur *(L)* des réseaux de fossés a montré que les sections de tranchées étaient comprises entre 0,24 et 447,06 m de longueur pour une moyenne de 28,86 m (figure 6.19 et tableau 6.9). La moitié est longue de 11,57 à 33,11 m. Les grandeurs sont du même ordre pour les boyaux de communication puisque *L* varie de 0,33 à 424,76 m et est en moyenne de 22,10 m. La moitié est comprise entre 10,37 et 25,65 m. Ces chiffres révèlent que les formes ne présentent pas un profil continu comme cela aurait été le cas à leur construction. Avec l'action des processus d'érosion naturelle et anthropique, ces linéaires ont été fragmentés, en particulier par les aménagements forestiers. Il est intéressant de remarquer que les chiffres exposés et notamment les moyennes de longueur de section coïncident assez bien avec la largeur séparant les cloisonnements aménagés par l'ONF. Les recommandations formulées dans le rapport d'aménagement de 2005 indiquent des valeurs d'espacement de l'ordre de 20 m sous résineux et de 25 m sous feuillus (ONF, 2005), valeurs proches des deux moyennes. Ainsi, la faiblesse des chiffres relevés doit être mise en relation avec le morcellement des réseaux faisant suite aux travaux d'aménagement forestiers et ne doit pas être interprétée comme reflétant la taille réelle des formes au moment de leur construction.

Classe	Paramètre	*L*	*Is*	Classe	Paramètre	*L*	*Is*
D9	*Min*	0,24	0,00	D9	*Me*	18,70	1,10
D10		0,33	0,00	D10		15,70	1,07
D9	*Max*	447,06	3,93	D9	*Q1*	11,57	1,04
D10		424,76	6,35	D10		10,37	1,03
D9	$\bar{X}$	28,86	1,14	D9	*Q3*	33,11	1,19
D10		22,10	1,11	D10		25,65	1,14

Tableau 6.9 – *Valeurs morphométriques obtenues pour les réseaux de fossés (D9 et D10)*

L'indice de sinuosité *(Is)* nous renseigne sur la morphologie des tracés de fossés (figure 6.19 et tableau 6.9). Pour les tranchées (D9), *Is* est en moyenne de 1,14, se traduisant par la présence de linéaires plutôt sinueux. Du côté des boyaux de communication (D10), la sinuosité des linéaires apparaît plus faible puisque *Is* est en moyenne de 1,11. Cette tendance à la diminution de la sinuosité pour les sections de boyaux se constate également lorsque l'on compare les valeurs des troisièmes quartiles associées aux deux catégories de formes (Is_{Q3} = 1,19 pour les tranchées ; Is_{Q3} = 1,14 pour les boyaux). L'analyse approfondie de la distribution des valeurs de *Is* (tableau 6.10) indique une prépondérance des sections rectilinéaires, pour les boyaux (40,52 %), plus faible pour les tranchées (29,31 %), justifiant l'écart des moyennes de *Is* pour les deux catégories de fossés. On retrouve les recommandations des manuels de l'infanterie et du génie pour le maintien d'une certaine rectilinéarité des boyaux de communication sur le champ de bataille dans un objectif d'accélération des flux entre les

tranchées (GQGA a, 1917). Il n'est pas étonnant de constater la part minoritaire des sections sinueuses, de 35,73 %, incluant 94 % de sections tenaillées, à crémaillère ou en vagues. Les géométries très sinueuses et à angle droit (en traverses) sont aussi rares mais tout de même présentes à 2,11 %, **témoignant de la reconversion des boyaux de communication en tranchées lorsque l'orientation du front change**. À l'opposé, **les sections de tranchées adoptent un tracé beaucoup plus sinueux** destiné à empêcher les actions d'enfilade (tirs, éclats d'obus). Ainsi, 48,10 % des sections de tranchée possèdent un indice supérieur à 1,10, incluant surtout des profils bastionnés, tenaillés, en crémaillère ou en vagues (93,61 %) et dans une moindre mesure en traverses (6,38 %).

Indice de sinuosité *(Is)*	Type de tracé	Part des tranchées (%)	Part des boyaux (%)
0	Boucle fermée	0,03	0,02
1 à 1,05	Rectiligne ; quasi-rectiligne	29,31	40,52
1,06 à 1,10	Bastionné ou à redans espacés ; tenaillés, à crémaillère ou en vagues à faible longueur d'onde ; rectilignes courbés (virage)	22,53	23,69
1,11 à 1,20	Tenaillés, à crémaillère ou en vagues à longueur d'onde modérée ; courbés (virage) et tenaillés, à crémaillère ou en vagues à longueur d'onde modérée	25,17	21,48
1,21 à 1,50	Bastionné ou à redans faiblement espacés ; fossés tenaillés, à crémaillère ou en vagues à longueur d'onde importante	19,86	12,14
> 1,50	En traverses ; courbés en traverses ; boucle ouverte	3,07	2,11

Tableau 6.10 – *Interprétation de l'indice de sinuosité*

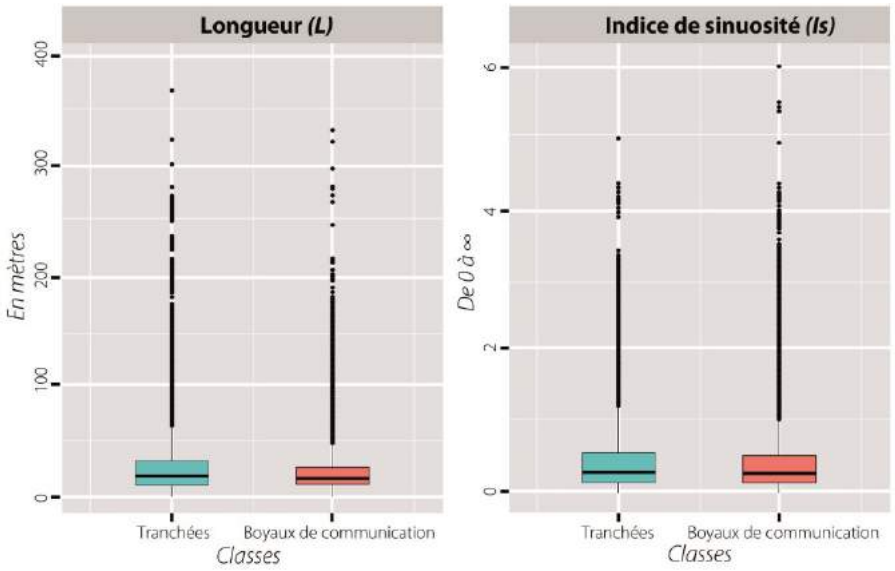


Figure 6.19 – *Boîtes de dispersion des variables morphométriques décrivant les réseaux de fossés*

Sur la base de ces chiffres et après lecture de la carte obtenue, **vingt-et-un types de tranchées et boyaux de communication ont été identifiés**, aux tracés de forme et de sinuosité variés (figure 6.20). **Neuf types de tracés de tranchées et douze de boyaux de communication ont été relevés**. Ces derniers occupent une part largement supérieure à celles des tranchées dans les fossés cartographiés (les deux tiers).

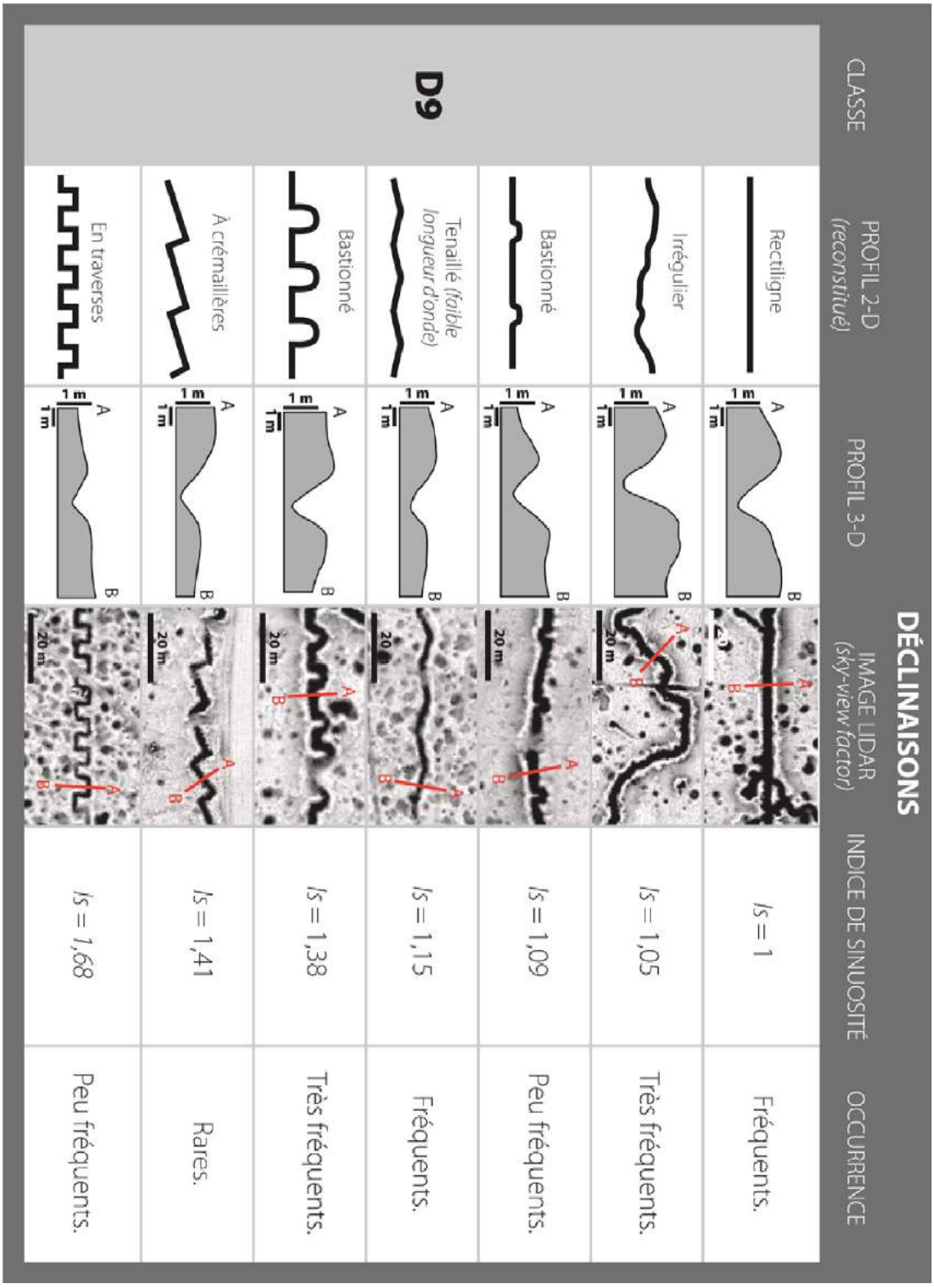


***Figure 6.20** – Principaux types de fossés*

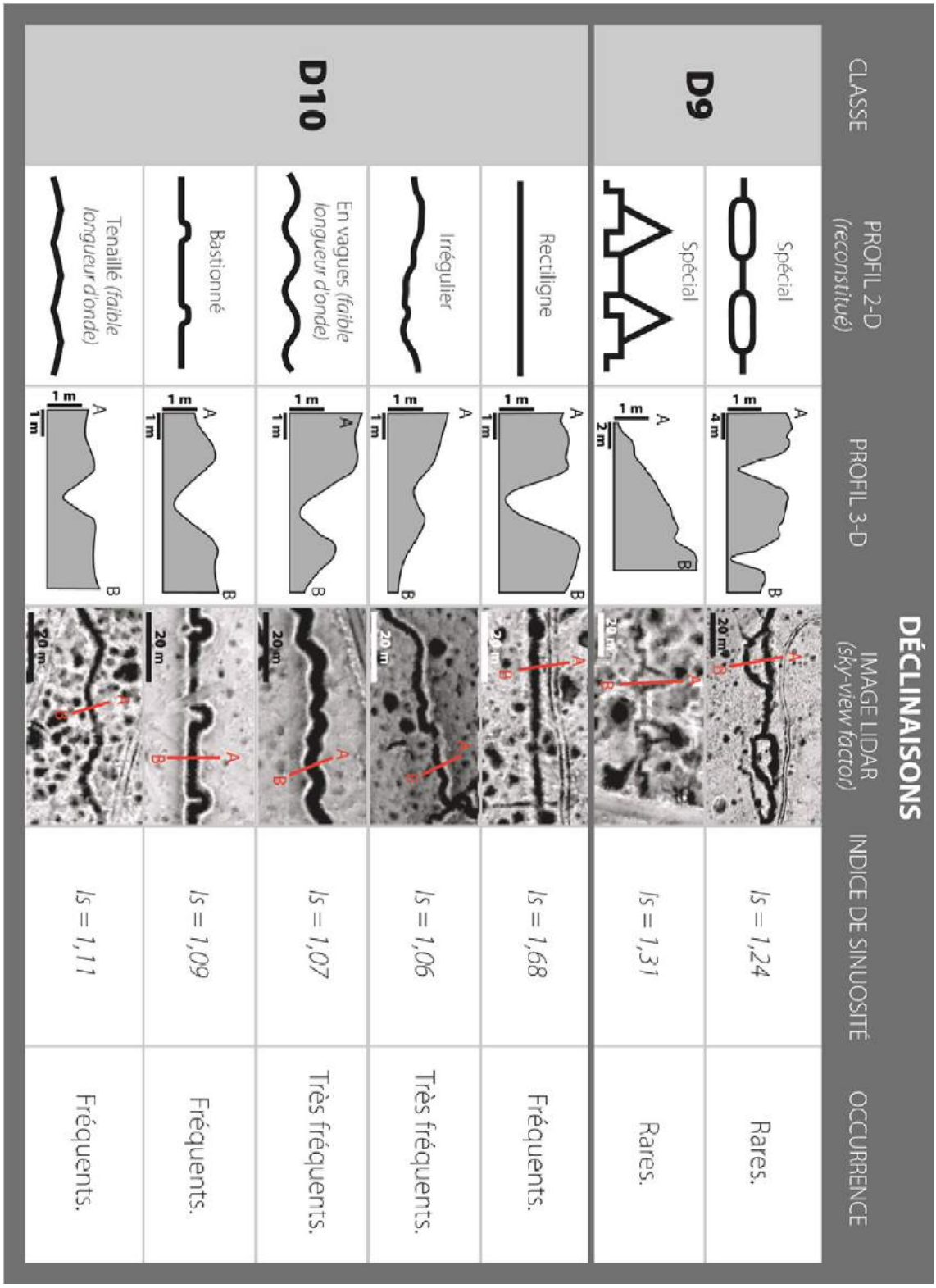


Figure 6.20 – *Principaux types de fossés (suite)*

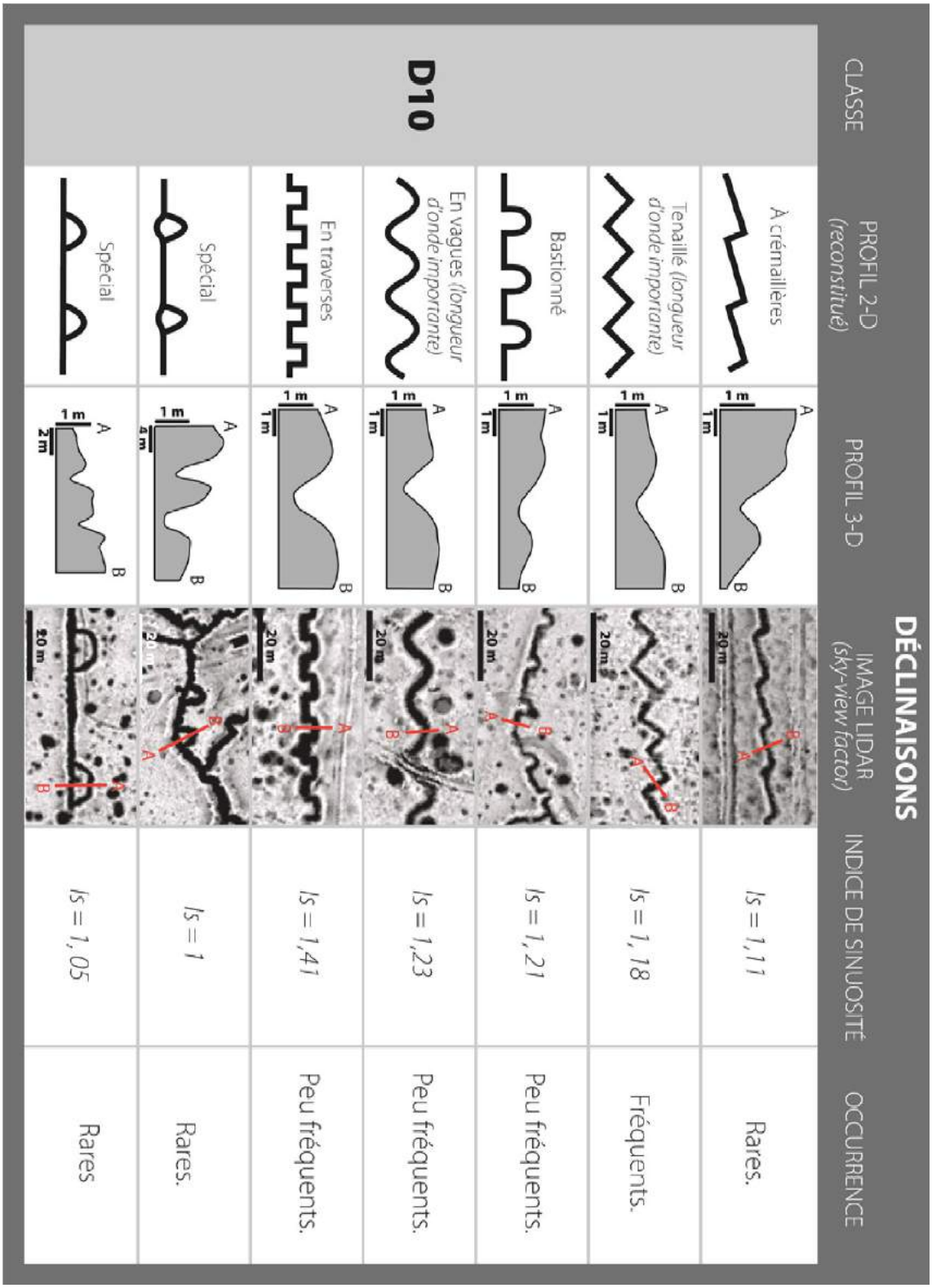


Figure 6.20 – *Principaux types de fossés (suite)*

3.3.3. Discussion

Plus qu'une discussion sur le kilométrage de fossés cartographiés (celle-ci sera menée dans le chapitre 8), c'est une comparaison de la typologie avec deux études de référence qui est proposée. Déjà mentionnées plus tôt, seules deux recherches ont étudié la variabilité morphologique des réseaux de fossés de la Première Guerre mondiale et ont suggéré une classification de ces formes. Stichelbaut (2009) a identifié sur le front belge pas moins de dix tracés de tranchée et quinze tracés de boyaux de communication. Taborelli *et al.* (2017a) ont distingué trois tracés de tranchée et cinq tracés de boyaux.

En faisant abstraction des différents moyens méthodologiques employés par ces études (photo-interprétation d'images aériennes, plans directeurs et/ou imagerie LiDAR), nous constatons par simple comptage des catégories que la **variabilité morphométrique des tracés observés sur le champ de bataille de Verdun est forte**. Alors que la surface prospectée est presque cinq fois plus petite que celle étudiée par Stichelbaut (2009 ; 96,15 km² contre 443,5 km²), presque autant de catégories de fossés ont été relevées sur notre site d'étude.

En complément, la plupart des sections cartographiées manquent de régularité dans leur tracé, constat inverse à ce que semblent indiquer les études sur les réseaux flamands et champenois. À Verdun, il n'est pas rare d'observer des tracés rectilignes intégrant un profil sinueux au sein d'une même section. Cette grande richesse morphologique des fossés sur notre site d'étude, accompagnée d'un manque d'homogénéité dans la géométrie de chaque section cartographiée, sont difficilement explicables mais **deux hypothèses peuvent être proposées** :

- La première concerne l'irrégularité géomorphologique et géologique du champ de bataille de Verdun, forçant les soldats à adapter constamment le tracé de leurs ouvrages en tenant compte du relief et du substrat (Schnitzler et Landolt, 2013). Un exemple parlant est celui de la tranchée allemande du Taurus dans le bois des Caures dont le tracé général s'adapte dans un premier temps à la courbe de niveau 330 m (à l'est) située quelques mètres au-dessus du niveau de débordement de la nappe phréatique, puis s'adosse à la ligne de crête (à l'ouest) rejoignant le ravin du bois des Caures, démontrant ainsi l'usage de la topographie dans le dispositif de défense (figure 6.21) ;
- La variabilité morphologique des fossés dépend aussi de l'origine des soldats qui les ont aménagés, constat avancé par Stichelbaut (2009). Pour vérifier cela, six surfaces de taille identique (10 ha) et recouvertes de fossés ont été analysées, trois en camp allemand, trois en camp français (tableau 6.11). Les résultats de cette enquête montrent que la sinuosité des fossés est d'une façon générale plus importante côté allemand que côté français (*Is* = 1,16 contre 1,13 pour les tranchées ; *Is* = 1,12 contre 1,11 pour les boyaux), reflétant ainsi les deux doctrines de combats allemandes et françaises, la première privilégiant « *le culte du retranchement* » (esprit défensif) alors

que la deuxième misait sur « *la rapidité du mouvement en avant* » (esprit offensif ; Normand, 1921).

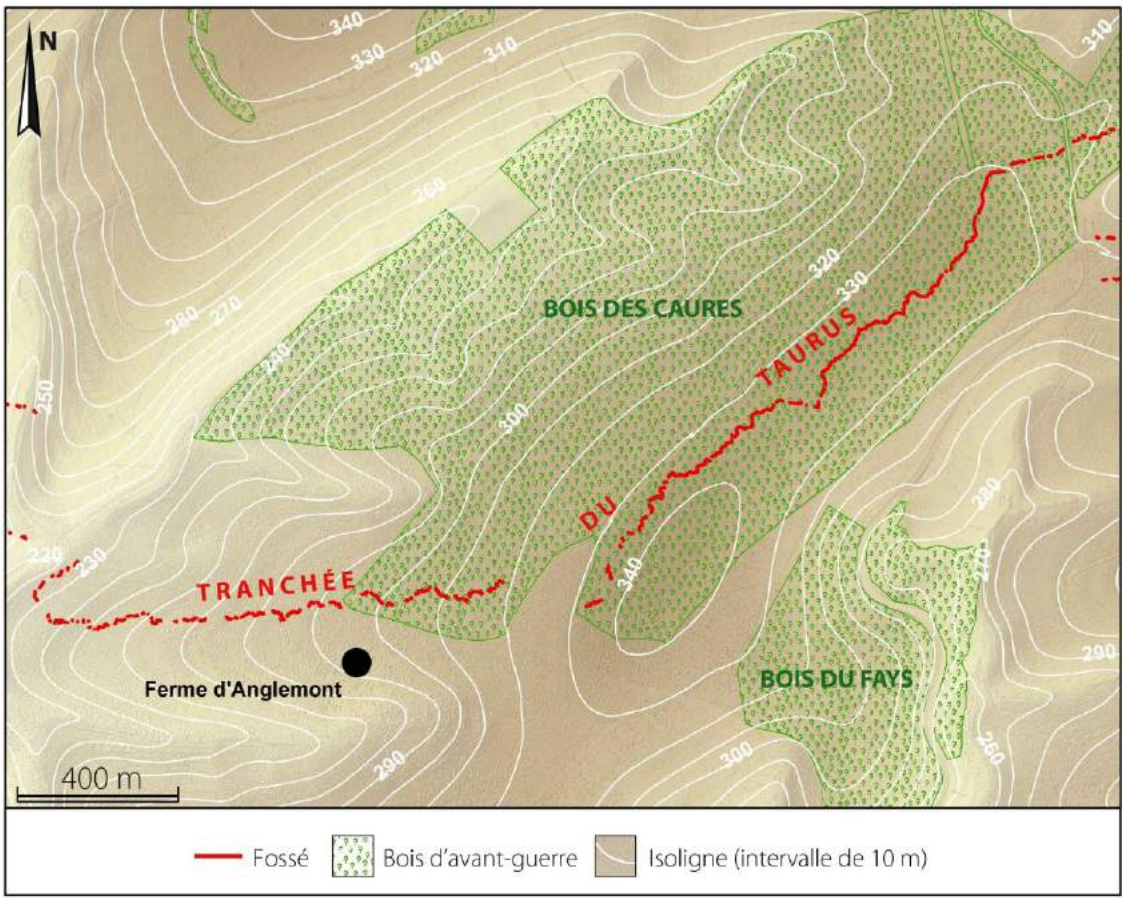


Figure 6.21 – *Tracé de la tranchée allemande du Taurus dans le bois des Caures*

	Lieu	Tranchées (en km)	Tranchées *(ls)*	Boyaux (en km)	Boyaux *(ls)*
Camp allemand	Bois d'Ormont	0,68	1,17	1,25	1,18
	Bois de Champneuville	0,66	1,15	1,15	1,08
	Jumelles d'Ornes	1,47	1,16	0,95	1,10
	Moyenne	-	*1,16*	-	*1,12*
Camp français	Côte du Poivre	1,30	1,10	1,15	1,09
	Bois des Vignes	0,17	1,15	1,01	1,11
	Tunnel de Tavannes	0,97	1,14	0,73	1,12
	Moyenne	-	*1,13*	-	*1,11*

Tableau 6.11 – *Comparaison des réseaux de fossés allemand et français*

4. Conclusions

L'application de l'algorithme semi-automatique d'extraction et de classification des formes au MNT LiDAR de la forêt domaniale de Verdun **a permis d'inventorier pas moins de 655 474 polémoformes compactes et creuses ainsi que 423,96 km de polémoformes linéaires et creuses**, **se déclinant en huit grands types**, eux-mêmes subdivisés en plusieurs catégories :

1) Les cratères d'obus singuliers ;
2) Les cratères d'obus coalescents à deux dépressions ;
3) Les cratères d'obus coalescents à trois dépressions ou plus ;
4) Les abris orthogonaux plus ou moins anguleux ;
5) Les abris et positions d'artillerie triangulaires, en forme de poire ou fer à cheval ;
6) Les abris et positions d'artillerie au contour très sinueux ;
7) Les tranchées ;
8) Les boyaux de communication.

La caractérisation morphométrique des entités cartographiées, leur analyse sur le terrain et à l'aide des documents d'archives ont mis en **lumière les facteurs influençant la géométrie des polémoformes**, **incluant l'origine de leur création** (bombardements, aménagement du front) et des variables secondaires, tels que **l'état de conservation** (degré de destruction, superposition de formes), **la nature du terrain** (milieu humide/milieu sec, résistance de la roche, épaisseur des sols, topographie) ou **le mode de fabrication pour les constructions** (hors-sol, semi-enterré, souterrain ; matériaux). Les comparaisons avec d'autres champs de bataille ont révélé que les polémoformes conservées en forêt domaniale de Verdun sont présentes ailleurs, notamment en Flandres ou en Argonne, **démontrant tout l'intérêt de reproduire notre méthodologie ailleurs**. La confrontation de nos données avec celles d'autres recherches a aussi montré que **les polémoformes sont globalement plus nombreuses**, **en quantité et en diversité**, **à Verdun**, du fait de l'intensité exceptionnelle des combats entre les années 1916 et 1918. Après ce chapitre consacré à l'analyse globale du nombre de polémoformes, le chapitre suivant focalise sur leur variabilité spatio-temporelle afin d'interpréter leur répartition au moyen des documents d'archives (plans directeurs, photographies aériennes) et des observations *in situ*. Une évaluation de l'érosion artificielle causée par l'introduction des polémoformes dans le paysage est aussi entreprise pour approcher la mesure de ce bouleversement.

Chapitre 7
Quantification de l'érosion et variabilité spatio-temporelle des polémoformes durant le conflit

Après avoir établi un inventaire général des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun, ce chapitre vise à dynamiser la cartographie en examinant les phénomènes spatiaux et les temporalités associés aux formes. Tout d'abord, une quantification de l'érosion artificielle liée aux bombardements et aux excavations, conduite à l'échelle de la forêt toute entière, permet d'évaluer l'amplitude des bouleversements géomorphologiques causés par les combats. L'opération consiste en l'élaboration d'un zonage en degrés de destruction du paysage géomorphologique sur la base de deux critères : superficie et volume des polémoformes. L'examen conjoint de cette carte et de celles du chapitre précédent montre les contrastes de la répartition des formes au sein du massif, avec des secteurs soumis à de fortes concentrations (au centre notamment) et d'autres totalement dépourvues de formes (dans les marges). Pour interpréter ces variabilités spatiales, les plans directeurs et les photographies aériennes récoltés sont exploités, ceux-ci donnant un aperçu des conditions paysagères passées. La confrontation de la cartographie semi-automatisée avec ces ressources documentaires replace les formes dans leur contexte d'origine et révèle les potentialités tactiques du champ de bataille : rôle des bois d'avant-guerre, des lignes de crête ou de la géologie sous-jacente. En plus de fournir des éléments d'interprétation, les ressources iconographiques citées servent à animer la cartographie générale des formes en reconstituant les différentes lignes de front de la période 1916-1918. De ce fait, des diachronies permettent d'associer à chaque section de fossé une date approximative de construction. Une démarche similaire, à une échelle plus locale, permet de mieux saisir les vitesses d'aménagement du champ de bataille et les évolutions de l'organisation des positions. Trois études de cas sont proposées : une position française (secteur du massif fortifié de Souville), une position allemande (l'Herbebois), et une position frontale (la côte du Poivre).

1. Évaluation des bouleversements géomorphologiques causés par les combats

Dans un objectif d'évaluation des bouleversements géomorphologiques causés par les combats, une quantification de l'érosion artificielle liée aux bombardements et aux aménagements des défenses a été réalisée dans le périmètre de la forêt. Cette opération vise dans un premier temps à calculer la superficie occupée par les formes cartographiées et interprétées comme polémoformes, soit potentiellement la superficie directement bouleversée par les activités militaires. Dans un second temps, le calcul des volumes des polémoformes donne une idée des quantités de matériaux (roches, sol, sédiments) déplacés par les actions de l'artillerie et de l'aménagement du front. Parallèlement, un bilan déblais/remblais est effectué sur les réseaux de fossés afin de vérifier si les volumes creusés par les soldats (formes linéaires et creuses) correspondent aux cubages des remblais (formes linéaires et surélevées). L'ensemble des résultats permet de proposer un zonage des bouleversements géomorphologiques et d'estimer l'amplitude générale de ces perturbations.

1.1. Calcul de la surface perturbée

Le premier indicateur du bouleversement géomorphologique est la part de la surface affectée par les combats. Les résultats de ce traitement, visibles dans le tableau 7.1, montrent que la surface occupée par les polémoformes (remblais inclus) représente 7,98 % de la zone d'étude (96,15 km²), **soit une surface modifiée d'au moins 7,67 km²**. Comme l'on pouvait s'y attendre, les cratères d'obus constituent la première cause du bouleversement géomorphologique du champ de bataille de Verdun avec près de 4 km² de terrain remués (5,29 % du site d'étude). Viennent ensuite les réseaux de fossés, occupant une surface de 1,93 km² (2,01 %), puis les abris et positions d'artillerie en mou (tous niveaux de fiabilité confondus), ayant modifié la topographie à hauteur de 0,62 km² (0,64 %).

Type de forme	Nombre	Surface (km²)	Surface (km²) avec remblais	Part occupée dans la zone d'étude (en %)
Cratères d'obus (une dépression)	591 660	2,34	3,97	4,13
Cratères d'obus (deux dépressions)	40 547	0,49	0,94	0,98
Cratères d'obus (deux dépressions ou plus)	5 238	0,09	0,17	0,18
Abris carrés et rectangulaires	13 763	0,19	0,45	0,47
Abris et positions d'artillerie triangulaires, en forme de poire ou fer à cheval	1 851	0,03	0,07	0,07
Abris et positions d'artillerie au contour très sinueux	2 415	0,04	0,1	0,10
Tranchées	5 045	0,31	0,69	0,72
Boyaux de communication	12 593	0,56	1,24	1,29
TOTAL	*673 811*	*3,20*	*7,67*	*7,98*

Tableau 7.1 – *Superficie bouleversée par catégorie de polémoformes*

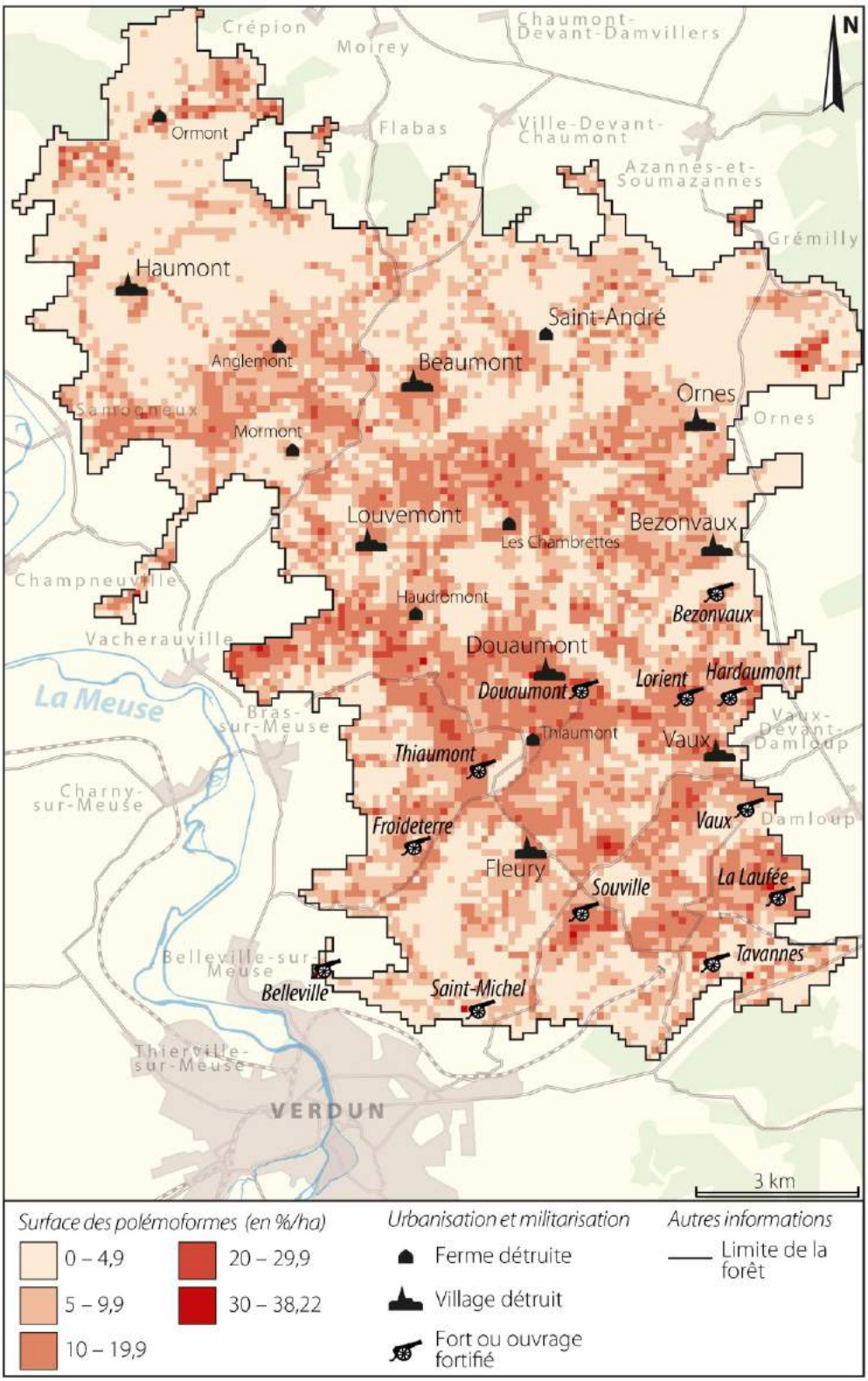


***Figure 7.1** – Superficie occupée par les polémoformes. Chaque pixel équivaut à 1 ha.*

La figure 7.1 montre une forte variabilité du changement topographique puisque le taux d'occupation des polémoformes/ha est compris entre 0 et 38,22 % pour une moyenne de 6,67 %. Le centre sud de la forêt semble le plus affecté, secteur qui coïncide avec la zone des combats de l'année 1916 (bataille de Verdun ; Pétain, 1986 ; Miquel, 1995 ; Bernède, 2002 ; Prost et Krumeich, 2015). Sur la ligne Côte du Poivre – carrières d'Haudromont – fort de Douaumont – ouvrage d'Hardaumont, où l'affrontement a piétiné de mars à décembre 1916, la fréquence des polémoformes est de l'ordre de 15 à 35 %/ha. D'autres noyaux plus restreints apparaissent au sud de cette ligne, dans les environs des forts de Souville et de Vaux, de l'ouvrage de la Laufée et dans le ravin des Fontaines, autres secteurs durement touchés entre juin et octobre 1916. Au nord du massif, la répartition des formes est plus hétérogène bien qu'on y observe localement des chiffres comparables à la moitié sud. Dans le secteur de la ferme des Chambrettes, située au cœur de la ligne de front de l'après bataille (décembre 1916 – août 1917), les polémoformes occupent de l'ordre de 10 à 25 %/ha. Dans la continuité de cette ligne, les valeurs se maintiennent autour de 10 à 20 %/ha, en particulier à l'Ouest, au niveau de la cote 304, ou à l'Est, près du village détruit d'Ornes. Des amas secondaires bien moins imposants mais où la concentration en polémoformes est notable (10 à 35 %) émergent dans les marges, notamment au Nord au niveau de la deuxième position allemande des années 1917-1918 correspondant *grosso modo* aux anciens bois de la ligne Samogneux – bois d'Ormont – bois des Caures – Herbebois – Jumelles d'Ornes.

Comme cela avait été mentionné, les chiffres exposés dans le tableau 7.1 et la figure 7.1 ne tiennent pas compte des polémoformes possiblement manquantes :

- Soit pour des raisons méthodologiques : notons que les formes non classées (sans signature morphométrique) occupent 3,56 km² de la zone d'étude (3,70 %), auxquels doivent être ajoutées les formes inondées avec 0,22 km² (0,24 % ; cf. *infra*, chapitre 9). Citons aussi les formes oubliées par notre algorithme.
- Soit pour des raisons propres à l'histoire du champ de bataille : certaines formes nivelées ou érodées ne sont pas comptabilisées bien qu'elles aient existé et contribué au changement topographique. D'autres ont pu être dissimulées par les soldats eux-mêmes pour ne pas alerter l'ennemi sur la possible présence d'ouvrages (GQGA, 1917 a). Dans ce dernier cas, le relief a été altéré mais ces actions n'ont laissé aucune trace sur le terrain.

Il en résulte une sous-estimation des valeurs de recouvrement des formes à l'hectare, en particulier dans les secteurs ayant été soumis à de profondes perturbations (cf. *supra*, chapitre 6).

1.2. Volumes de matériaux déplacés

1.2.1. Aperçu général

Afin d'évaluer concrètement les conséquences géomorphologiques de la Première Guerre mondiale sur le champ de bataille, **le volume de déblais des polémoformes cartographiées a été quantifié** (tableau 7.2). **Le cubage total a été estimé au minimum à 2,81 ± 0,04 millions de m³** en tenant compte des marges d'erreur liées au nuage de points LiDAR (cf. *supra*, chapitre 3). En rapportant ce chiffre aux années de combats (soit entre février 1916 et novembre 1918) et à la superficie de la zone d'étude, **nous pouvons estimer une tendance minimale à l'érosion de l'ordre de 9 741 t/km²/an**. Si l'on s'intéresse à la part occupée par chaque catégorie de polémoformes dans le cubage total, nous constatons que la mobilisation des matériaux tient avant tout son origine des bombardements opérés par l'artillerie puisque le volume total des déblais de cratères d'obus équivaut à 1,34 ± 0,05 millions de m³ (47,69 %), soit une moyenne de 2,10 m³ de matériaux déplacés pour chaque nouveau cratère. Le cubage représenté par le creusement des réseaux de fossés est également important, estimé à 1,17 ± 0,09 millions de m³ (41,64 %), soit une moyenne de 2,75 m³ par mètre linéaire de fossés. En revanche, les volumes excavés par la construction des défenses compactes (tout niveau de fiabilité confondu) semblent bien moins importants, autour de 0,30 ± 0,009 millions de m³ (10,68 %). Bien que les estimations associées à ces aménagements semblent minimes, il n'en est rien à l'échelle de la construction, chaque édifice ayant exigé l'extraction moyenne de 16,63 m³ de terre. Sur une surface identique, nous pouvons considérer que **la construction d'abris et de positions d'artillerie constitue, loin avant les réseaux de fossés et cratères d'obus, le type d'action militaire le plus morphogène**.

Type de forme	Volume sous feuillus (millions de m^3)	Volume sous résineux (millions de m^3)	Volume ajusté* (millions de m^3)	Part du volume total (en %)
Cratères d'obus	1,01	0,20	1,34 ± 0,05	47,69
Abris et positions d'artillerie	0,23	0,04	0,30 ± 0,009	10,68
Réseaux de fossés	0,90	0,24	1,17 ± 0,09	41,64
TOTAL	*2,14*	*0,48*	*2,81 ± 0,04*	*100*

***Tableau 7.2** – Volumes déblayés par catégorie de polémoformes. *Le volume ajusté tient compte des marges d'erreurs obtenues sous peuplements feuillus et résineux.*

D'une façon générale, **les cubages mesurés varient fortement, entre 0 et 2 225 m³/ha pour une moyenne de 260,61 m³/ha**. Comme le montre la figure 7.2, le cubage des polémoformes/ha est assez bien corrélé au pourcentage d'occupation des polémoformes, ce qui signifie que les secteurs les plus occupés en polémoformes sont aussi ceux présentant les cubages de matériaux déplacés les plus forts.

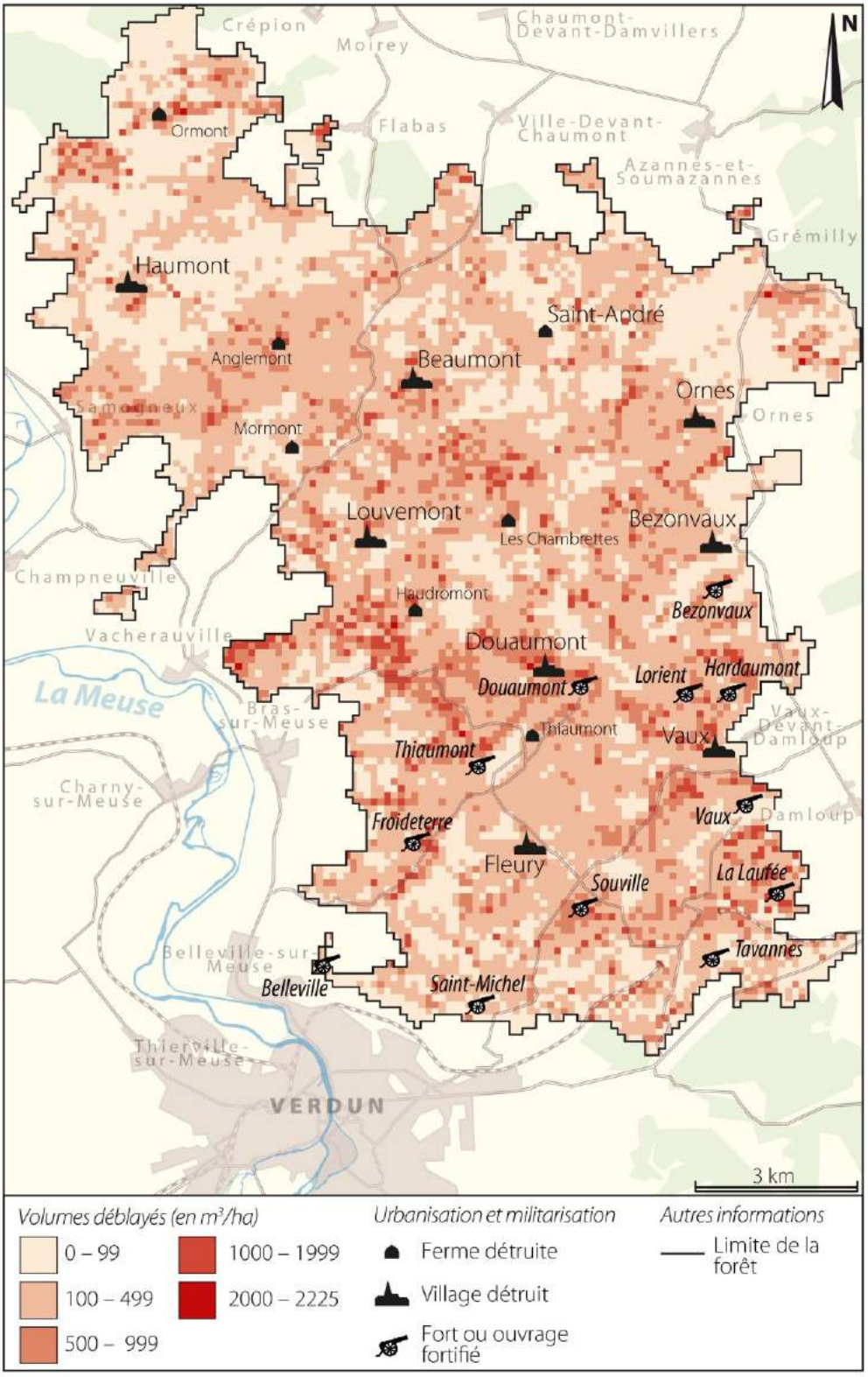


Figure 7.2 – *Spatialisation des volumes de polémoformes*

Il n'est pas étonnant d'observer d'importants déplacements de matière dans la zone des combats de 1916, où les volumes déplacés/ha se situent fréquemment entre 500 et 2 000 m³/ha, notamment sur la côte du Poivre, à proximité de la carrière d'Haudromont, de l'ouvrage de Thiaumont et du fort de Douaumont[1]. D'autres sites ressortent particulièrement bien (500 et 2 000 m³/ha), notamment près de l'ouvrage de la Laufée, de l'ouvrage d'Hardaumont, de la ferme des Chambrettes, des Jumelles d'Ornes et du bois d'Ormont. Notons également la présence de vides importants où les déplacements de matière sont quasi nuls (constat similaire pour la figure 7.1) : 500 m à l'est du village détruit d'Haumont-près-Samogneux, 500 m au nord du village détruit d'Ornes, secteur de la ferme Saint André et de la ferme d'Ormont, ravin du Poivre, sud-est du bois des Vignes, est de la chapelle Sainte Fine et du fort de Vaux.

1.2.2. Analyse des volumes de déblais associés aux polémoformes construites

Les déblais associés à chaque catégorie de polémoforme construite ont été étudiés séparément puis comparés (les différentes classes de cratères d'obus sont exclues de l'analyse car il n'y a pas de réel intérêt à les étudier séparément[2]). En ce qui concerne les abris et positions d'artillerie (tableau 7.3), les abris orthogonaux (D4) sont **la catégorie d'abris ayant causé les modifications topographiques les plus profondes** avec pas moins de 0,17 ± 0,017 millions de m³ déblayés (62,82 %). Les volumes associés aux constructions de la deuxième catégorie (D5) et de la troisième catégorie (D6) sont, eux, plus faibles avec respectivement 0,04 ± 0,004 (14,70 %) et 0,06 ± 0,007 (22,19 %) millions de m³ déblayés. À nombre égal, le pouvoir morphogène des constructions des deuxième et troisième catégories est bien plus fort que celui des abris orthogonaux : 12,35 m³/construction pour D4, 21,60 m³/construction pour D5 et 24,84 m³/construction pour D6.

Type de forme	Volume sous feuillus (millions de m³)	Volume sous résineux (millions de m³)	Volume total (millions de m³)	Part du volume total (en %)
Abris carrés et rectangulaires	0,13	0,02	0,17 ± 0,017	62,82
Abris et positions d'artillerie triangulaires, en forme de poire ou fer à cheval	0,03	0,006	0,04 ± 0,004	14,70
Abris et positions d'artillerie au contour très sinueux	0,04	0,01	0,06 ± 0,007	22,19
TOTAL	*0,23*	*0,04*	*0,3 ± 0,009*	*100*

Tableau 7.3 – *Volumes déblayés par l'aménagement des abris et positions d'artillerie*

[1]Ces quatre lieux constituent parmi les rares sites à présenter des pics de déplacements de matière supérieurs à 2 000 m³/ha.

[2]Logiquement, plus les impacts d'obus sont nombreux, plus les volumes sont importants.

À propos des réseaux de fossés (tableau 7.4), **les boyaux de communication**, plus longs au total, **sont à l'origine de la majeure partie des déplacements de matière causés par ce type d'aménagement** avec un cubage de l'ordre de 0,75 ± 0,12 million de m³ (64,09 %). **Les chiffres sont moindres pour les tranchées** : 0,42 ± 0,06 million de m³ (35,90 %). Alors que les volumes associés aux cratères d'obus et constructions compactes peuvent être interprétés sans équivoque, les valeurs obtenues pour les réseaux de fossés semblent plus discutables pour des raisons méthodologiques. Un premier résultat nous a montré que les cubages obtenus par mètre linéaire (2,88 m³ pour les tranchées ; 2,69 m³ pour les boyaux) étaient en désaccord avec les valeurs préconisées par les manuels militaires français, les cubages associés aux tranchées étant nettement supérieurs à ceux des boyaux, soit une information inverse aux recommandations de l'État-major (1,50 m³ pour les tranchées ; 2,10 m³ pour les boyaux). De l'analyse approfondie de cette anomalie il résulte que les erreurs d'estimations de volumes dans le jeu de données sont liées à l'outil exploité pour le calcul des volumes. Cependant, les formes compactes ne sont pas concernées par ce phénomène pour les raisons évoquées ci-dessous.

Type de forme	Volume sous feuillus (millions de m^3)	Volume sous résineux (millions de m^3)	Volume total (millions de m^3)	Part du volume total (en %)
Tranchées	0,32	0,08	0,42 ± 0,06	35,90
Boyaux de communication	0,58	0,16	0,75 ± 0,12	64,09
TOTAL	*0,90*	*0,24*	*1,17 ± 0,09*	*100*

Tableau 7.4 – *Volumes déblayés par l'aménagement des réseaux de fossés*

Par endroit, les volumes de fossés sont largement surestimés par rapport à la réalité du terrain actuel. Ce constat n'est visible que dans les sections de fossés longues et pentues (plus souvent le cas pour les tranchées). Afin de quantifier des volumes de formes, l'outil utilisé implique de renseigner en entrée la hauteur maximale dans chaque entité. Le volume est ensuite calculé en-dessous de ce seuil. Or, dans le cas d'une entité soumise à des changements de pente, l'outil devient défaillant comme l'illustre la figure 7.3.

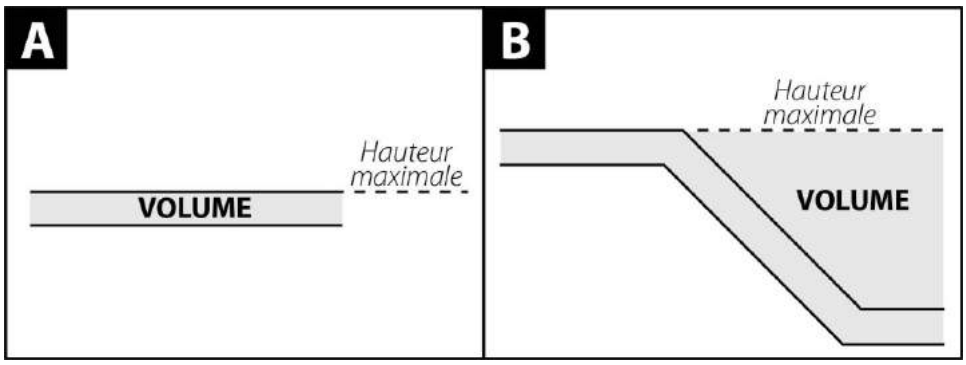


Figure 7.3 – *Biais rencontré sur les fossés pentus lors du calcul de volume. A : résultat pour un fossé plat. B : résultat pour un fossé en pente.*

Pour obtenir des cubages de fossés plus réalistes, la méthodologie de Brenot *et al.* (2016) a été appliquée à notre jeu de données consistant à interpoler sur les 423,96 km de fossés les

dimensions recommandées dans les manuels (cf. ci-dessus). De nouvelles valeurs sont ainsi suggérées : **les volumes déblayés par le creusement des tranchées seraient de 0,21 millions de m³ contre 0,58 millions de m³ pour les boyaux**, soit des valeurs largement inférieures aux nôtres. Pour les quantifications futures, une méthodologie différente privilégiant l'usage du MNT et considérant le dénivelé des formes devra être privilégiée.

1.2.3. Le champ de bataille de Verdun, site le plus bouleversé de la Grande Guerre ?

Cette problématique de la guerre en tant qu'agent morphogène a soulevé la curiosité de quelques chercheurs, qui ont tenté de calculer les volumes de terre déplacés par la guerre sur des sites fortement touchés par la Première Guerre mondiale. Les estimations varient largement d'un champ de bataille à l'autre. Une des premières études est celle d'Amat (1987) qui a évalué en Argonne (Meuse) sur un quadra d'1 km² « *un cubage de matériau déplacé de l'ordre de 200 000 m³* », soit une moyenne de 2 000 m³/ha. Le Borgne (cité par Arnould et Simon, 1994) a relevé au Chemin des Dames et dans les forêts de Saint-Gobain et de Coucy-Basse (Aisne) des valeurs bien inférieures (conditions différentes de longueur des combats, de situation sur le front), où elles atteignent respectivement de 110 à 185 m³/ha et de 80 à 140 m³/ha. Dans le bois de Barisis (Aisne), les volumes déplacés sont de 118 000 m³ sur une surface de 47 ha, soit une moyenne de 2 500 m³/ha (Arnould et Simon, 1994 ; Buridant, 2003). Dans le bois de la Gruerie (Argonne), Brenot *et al.* (2016) ont calculé sur une surface de 30 ha des volumes compris entre 219 et 1 052 m³/ha pour les cratères d'obus et un volume de 984 m³/ha pour les réseaux de fossés. En Flandres, le long de 40 km de ligne de front, Poesen (2018) a évoqué un volume moyen de matériaux déplacés par les obus de 767 t/ha (*i.e.*, 511 m³/ha si l'on considère un poids cubique d'1,5 kg/m³) sur une surface de 1 262 km², de 279 t/ha (*i.e.*, 186 m³/ha) pour les réseaux de fossés sur une surface de 697 km² et de 138 t/ha (*i.e.*, 92 m³/ha) pour les entonnoirs de mine sur une surface de 109 km². Compte tenu des valeurs obtenues à Verdun (*i.e.*, entre 0 et 2 225 m³/ha ; moyenne de 260,61 m³/ha) et des différences observées avec les autres études, **nous suggérons que le champ de bataille de Verdun figure parmi les sites de la Grande Guerre les plus bouleversés d'un point de vue géomorphologique** (si ce n'est le plus bouleversé en considérant les formes oubliées par l'algorithme).

1.2.4. Bilan déblais/remblais des réseaux de fossés (formes linéaires et creuses)

Nonobstant les erreurs d'estimations de volumes constatées sur les réseaux de fossés, la réalisation d'un bilan déblais/remblais a été tentée[3] (tableau 7.5), consistant à comparer les volumes des déblais (formes linéaires et creuses) et des remblais (formes linéaires et

[3]Cette opération a été réalisée avant d'avoir détecté l'anomalie associée aux cubages des fossés.

surélevées). D'une manière générale, **les volumes de déblais et de remblais de fossés coïncident assez mal et indiquent la présence de remblais moins volumineux que les déblais** (2,07 ± 0,17 millions de m³ pour les déblais contre 1,41 ± 0,17 millions de m³ pour les remblais). La tendance est la même lorsque les tranchées et boyaux de communication sont analysés séparément (les remblais de tranchées représentent 66,66 % du volume des déblais ; les remblais de boyaux représentent 68,93 % du volume des déblais).

Type de forme	Volume des déblais (millions de m^3)	Volume des remblais (millions de m^3)
Tranchées	0,75 ± 0,12	0,50 ± 0,13
Boyaux de communication	1,32 ± 0,22	0,91 ± 0,21
TOTAL	*2,07 ± 0,17*	*1,41 ± 0,17*

Tableau 7.5 – *Bilan déblais/remblais des réseaux de fossés*

L'interprétation de ces chiffres doit être donnée, nous suggérons la disparition d'une partie des remblais :

- **durant le conflit** : les formes ont été dissimulées (GQGA, 1917a) ou simplement altérées par les bombardements ;
- **par effet de gravité** (érosion naturelle) : les matériaux ont été remobilisés par les processus de colluvionnement affectant les parapets et parados. Une partie de ces matériaux s'est déversée dans les fossés, une autre, vers l'extérieur des formes ;
- **par les activités anthropiques post-guerre** : la plupart des remblais, plus facilement visibles et moins intéressants d'un point de vue historique et archéologique, ont été nivelés par les opérations d'aménagement forestier (*e.g.*, passage d'un cloisonnement, plantations).

Cependant, lorsque ces bilans sont spatialisés, il arrive que les remblais soient plus importants que les déblais, phénomène qui pourrait s'expliquer par le comblement des fossés. Ce constat est particulièrement visible pour les fossés très larges et profonds ayant contribué à la formation de remblais volumineux où la mobilisation de matière et le comblement sont plus importants : tranchée de Walonsevaux (Malbrouk), tranchée de Silésie (Jumelles d'Ornes), tranchée du Terrier (Herbebois), tranchée de Mahomet (bois de Neuville), boyau de Belgrade (bois de Nawé), boyau de Londres (secteur du bois des Vignes), boyau de la Sarre (bois des Hospices). La proximité de la nappe souterraine constitue un autre facteur, forçant les soldats à surélever les fossés plutôt qu'à les enterrer (*e.g.*, tranchée du Taurus ; cf. *supra*, chapitre 6). Dans une moindre mesure, il arrive que les volumes de remblais coïncident avec les volumes des déblais mais aucune logique spatiale ne semble se dégager (distribution aléatoire).

1.3. Cartographie du bouleversement géomorphologique

À l'image des travaux d'Amat (2001), de Hupy (2005, 2006) et de Note *et al.* (2018), qui ont chacun proposé un indice de bouleversement, **une cartographie des degrés de bouleversement géomorphologique est proposée** sur la base des deux critères sus-cités, à savoir :

- La superficie occupée par les polémoformes/ha ;
- Le volume de matériaux déblayés/ha.

Cette catégorisation réalisée en quatre classes de bouleversement (figure 7.4 et tableau 7.6) reprend celle proposée par Hupy (2005, 2006) et lui associe une cartographie (celle-ci n'avait pas été réalisée). Pour être produite, la carte a nécessité les traitements suivants :

1) Les deux rasters ont été normalisés de 0 à 1 (fonction *redimensionner par* d'ArcGIS®) ;
2) Les deux rasters normalisés ont été ajoutés (*calculatrice raster* d'ArcGIS®) ;
3) Le raster obtenu a été normalisé et discrétisé en quatre classes de bouleversement (indice de 1 à 4) par amplitudes égales (0,25) ;
4) Le raster a été lissé *via* la fonction *ré-échantillonner* d'ArcGIS®, la méthode *majority* et une taille de cellule double de celle entrée.

Indice de bouleversement	Densité de polémoformes	Nature de la topographie
Indice 1 - Faible	Formes singulières espacées	Topographie d'avant-guerre dominante avec des modifications localisées
Indice 2 - Modéré	Formes singulières proches et souvent coalescentes	Topographie d'avant-guerre fortement altérée
Indice 3 - Fort	Formes singulières quasi-inexistantes en majorité coalescentes	Topographie d'avant-guerre fortement voire totalement altérée
Indice 4 - Exceptionnel	Formes coalescentes uniquement	Topographie d'avant-guerre disparue

Tableau 7.6 – *Catégories de bouleversement géomorphologique (traduit et adapté de Hupy, 2006)*

L'interprétation de la répartition des degrés de bouleversement géomorphologique à l'échelle de la forêt exige de connaître la variabilité spatiale et la localisation préférentielle de chaque catégorie de polémoformes. C'est le questionnement auquel nous allons maintenant répondre, consistant à décrire puis expliquer leur répartition. **C'est la connaissance des phénomènes spatiaux associés aux polémoformes qui permettra de comprendre les bouleversements géomorphologiques**.

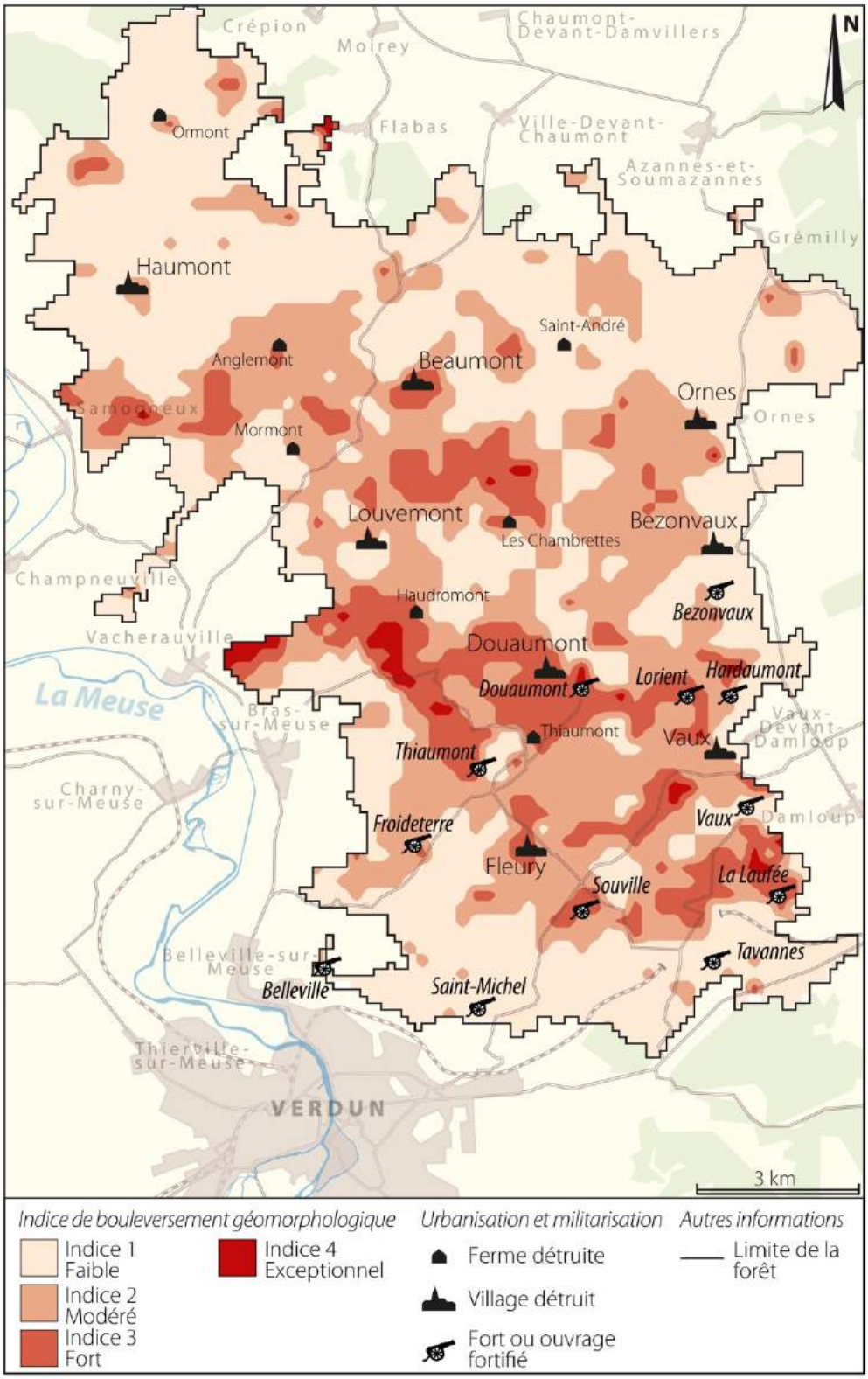


Figure 7.4 – *Indice de bouleversement géomorphologique*

2. Description et interprétation de la localisation des polémoformes

L'analyse qui suit vise à déchiffrer les logiques de répartition des formes en forêt. Elle permet de répondre aux trois questions fondamentales posées en géographie : *Où ?*, *Pourquoi là ?* et *Pourquoi pas ailleurs ?* Pour illustrer notre propos, des cartes de densité ont été réalisées dans ArcGIS®. Pour les cratères d'obus, les abris et positions d'artillerie, l'opération a impliqué deux traitements : 1) convertir les entités cartographiées en points *via* la fonction *Entités vers points* ; 2) construire les cartes à l'aide de l'outil *Densité de points*. Pour les réseaux de fossés, une *Jointure spatiale* a été faite entre les entités linéaires (comportant un champ de longueur) et un quadrillage (comportant des polygones de 1 ha chacun reproduisant la géométrie des pixels). Une fois produites, les cartes sont décrites puis interprétées au moyen des connaissances acquises sur le terrain et des documents d'archives.

2.1. Analyse des densités

2.1.1. Les forts, lieux les plus bombardés ?

L'étude de la figure 7.5 montre que l**a distribution des cratères d'obus**[4] **est hétérogène**, **de 0 à 180 impacts/ha**, associant zones lourdement bombardées et zones épargnées par les tirs. Intéressons-nous dans un premier temps aux îlots de fortes concentrations de cratères d'obus. Un premier amas (≈ 300 ha) se démarque dans le centre-nord de la forêt près de la ferme des Chambrettes. Sur un cercle de 100 ha centré sur les ruines de la construction, pas moins de 10 818 impacts sont relevés (1,57 % du total), représentant une moyenne de 108 impacts/ha, valeur largement supérieure à la moyenne du massif, autour de 72 cratères/ha. Plus précisément, ce même cercle contient 62 % de pixels dépassant les 100 impacts/ha et 37 % les 120 impacts/ha, démontrant le caractère violent des bombardements dans ce secteur. Un second site, plus au Sud, communément appelé le « Quadrilatère des forts », forme géométrique d'environ 700 ha formée par l'ouvrage de Thiaumont et les forts de Douaumont, Vaux et Souville (annexe F). Ce périmètre comporte à lui seul 61 989 impacts représentant approximativement 1/10ème du nombre total d'impacts comptabilisés, soit une moyenne de 89 impacts/ha. Les concentrations sont encore plus importantes près des forts où elles sont fréquemment supérieures à 100 impacts/ha (46 % des pixels dans un cercle de 100 ha centré sur le fort de Douaumont ; 44 % pour l'ouvrage de Thiaumont ; 28 % pour le fort de Souville ; 15 % pour le fort de Vaux) et jusqu'à 120 impacts/ha (25 % pour Douaumont, 12 % pour Thiaumont, 4 % pour Vaux, 3 % pour Souville). C'est aussi dans ce quadrilatère que s'observe la densité maximale de cratères d'obus avec 180 impacts/ha.

[4]Nous entendons par « cratères d'obus » le nombre d'impacts et non le nombre d'entités. Ainsi, une entité appartenant à la classe D2 contient deux impacts et une entité de la classe D3 généralement trois impacts.

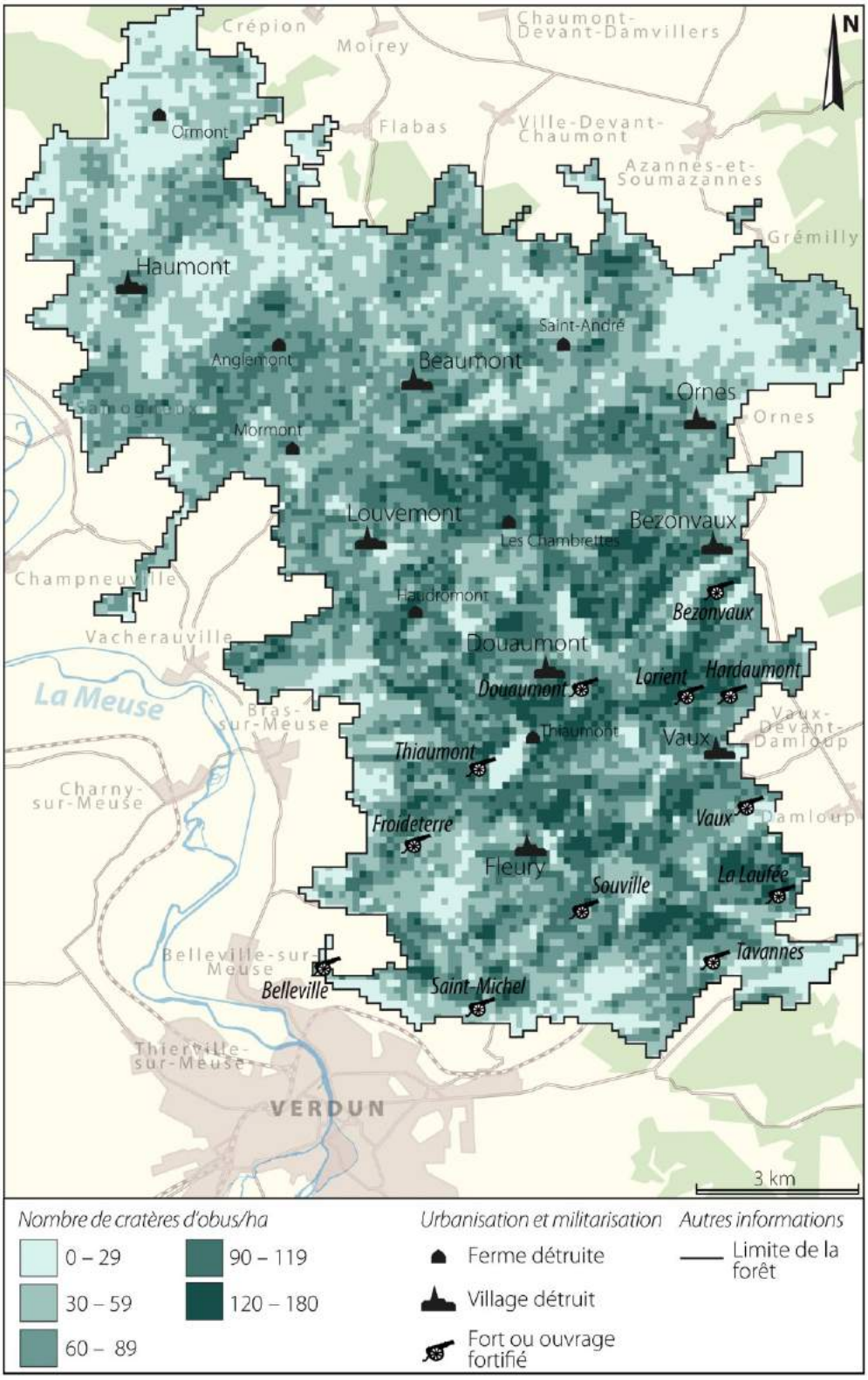


Figure 7.5 – *Carte de densité des cratères d'obus (D1, D2 et D3)*

D'autres amas plus secondaires à forte concentration d'impacts se distinguent ailleurs dans la forêt. D'abord, à l'ouest du village détruit de Bezonvaux, dans le bois des Caurrières et le bois Hassoule (≈ 170 ha), où des densités supérieures à 120 impacts/ha sont fréquemment observées. L'occurrence de cratères d'obus est aussi très élevée dans les environs de l'ouvrage de Lorient et d'Hardaumont (≈ 100 ha), de 120 à 150 impacts/ha. Deux derniers clusters émergent au sud-est du massif, dans les secteurs de l'ouvrage de la Laufée (≈ 50 ha), de la batterie de l'Hôpital et du fort de Tavannes (≈ 60 ha). Ces chiffres confirment que les édifices fortifiés sont une cible majeure pour l'artillerie. Notons cependant que la présence de champs de cratères particulièrement denses existe aussi dans des zones situées en retrait des forts. Le périmètre de la ferme des Chambrettes en est un bel exemple puisqu'il correspond au secteur le plus bombardé du champ de bataille alors qu'aucun fort n'apparaît (intérêt stratégique de la ferme[5]).

Les « vides », aux densités rarement supérieures à 30 impacts/ha, apparaissent surtout en marge de la zone étudiée. Un premier vide (≈ 230 ha) se trouve au pied des Côtes de Meuse entre l'Herbebois et la butte témoin des Jumelles d'Ornes. Un second (≈ 240 ha) se distingue dans le secteur de la ferme d'Ormont qui semble avoir été peu bombardé dans la mesure où 2 818 cratères ont été enregistrés dans un cercle de 100 ha centré sur la construction, soit cinq fois moins que dans les environs de la ferme des Chambrettes. Dans ce même cercle, seuls 32 % des pixels dépassent les 30 impacts/ha et 31 % possèdent une valeur inférieure à 20 impacts/ha. Un troisième hiatus (≈ 230 ha) se situe à l'est du village détruit d'Haumont-près-Samogneux, entre le bois d'Haumont et le bois des Caures. Enfin, trois autres secteurs à faible densité d'impacts, mais de superficie plus faible, apparaissent au sud de la forêt : un premier (≈ 80 ha) dans les environs de la batterie de Mardi-Gras au sud-est du fort de Tavannes, un second (≈ 60 ha) à proximité du tunnel de Tavannes entre les forts de Souville et de Tavannes, et enfin un troisième (≈ 40 ha) à l'est du bois des Vignes.

Si nous focalisons maintenant notre propos sur les figures associées aux trois catégories de cratères d'obus (annexe F), celle des formes singulières reflète assez bien la carte générale. La seule différence s'observe dans le Quadrilatère des forts où la densité moyenne d'impacts a fortement baissé[6], passant de 89 impacts/ha toutes classes confondues (D1, D2 et D3) à 71 impacts/ha (D1 uniquement). Pour la classe D2, nous constatons dans ce même quadrilatère une concentration de 12 784 cratères (15 % des entités de la classe). Au centre-nord du massif, la concentration des cratères de D2 prend la forme d'une bande large de 0,5 à 1,5 km, traversant tout le massif d'Ouest en Est et passant notamment par le périmètre de la ferme des Chambrettes, qui reste avant tout dominé par des formes singulières (D1). La tendance

[5]En plus d'offrir une vue surplombante sur les Hauts de Meuse, la ferme des Chambrettes, comme toute autre habitation sur le champ de bataille, constituait un point d'appui des défenses (Normand, 1921).

[6]Baisse compensée par une densité importante de cratères d'obus coalescents.

est plus faible sur le reste du massif où très peu d'amas se démarquent. Enfin, la classe D3 se caractérise par une forte concentration de cratères dans le Quadrilatère des forts (3 054 impacts ; 19 %), et à proximité de la ferme des Chambrettes (537 impacts dans un cercle de 100 ha centré sur la ferme ; 3,41 %). Ces formes sont pratiquement absentes ailleurs. L'analyse de la distribution des cratères dans chacune des classes est complémentaire de celle menée sur la carte générale (figure 7.5) dans la mesure où **elle permet de repérer les secteurs où les formes coalescentes sont nombreuses**, **soit potentiellement des zones où le nombre d'impacts d'obus a été sous-estimé** (cf. *supra*, chapitre 6).

Par ailleurs, la comparaison de la densité moyenne de cratères obtenue avec les estimations faites ailleurs (tableau 7.7) ne fait que conforter l'hypothèse d'un bouleversement géomorphologique plus important à Verdun, en particulier lorsque les fronts champenois (11 impacts/ha sur la cote 108 ; 61 impacts/ha dans le bois de la Gruerie) et italien (9 impacts/ha au fort Luserna) sont étudiés, ceux-ci affichant des scores nettement plus faibles que sur notre site d'étude. Les écarts semblent plus serrés dans le Saillant d'Ypres (Belgique) où des statistiques similaires à celles relevées à Verdun ont été obtenues mais où les maximums enregistrés dépassent aisément nos chiffres (jusqu'à 480 cratères/ha). Néanmoins, dans ce dernier cas de figure, l'étude porte sur la topographie d'époque. Selon ces chiffres, le champ de bataille de Verdun (avec celui d'Ypres ?) constituerait ainsi le site le plus « cratérisé » du front de l'Ouest, propos confirmés par Keegan (2013) : « *la Somme n'a pas été le plus arrosé des champs de bataille du front Ouest. Le taux d'obus au mètre carré place Verdun au premier rang. En durée des bombardements, ce sont les hauteurs de l'Aisne et le Chemin des Dames qui méritent la palme ; en cruauté de pilonnage, le secteur d'Ypres l'emporte* ».

Lieu	Nombre d'impacts comptabilisés	Superficie du site échantillonné (en ha)	Densité moyenne (cratères/ha)	Étude
Bois de la Gruerie (Argonne)	1 837	30	61	Brenot *et al.* (2016)
Fort Luserna (Italie)	3 420	400	9	Magnini *et al.* (2017)
Cote 108 (Champagne)	607	57	11	Taborelli *et al.* (2017b)
Crête de Messines	Non renseigné	14 250	0 à 480	Notes *et al.* (2018)

Tableau 7.7 – *Statistiques de cratères d'obus obtenues sur d'autres champs de bataille*

2.1.2. La construction des défenses (abris, positions d'artillerie), un phénomène localisé

Alors que les cratères d'obus se répartissent de manière assez uniforme avec ponctuellement la formation d'amas à haute densité d'impacts, **les abris et positions d'artillerie**[7] (figure 7.6) **ont une distribution beaucoup plus contrastée**, **opposant de grandes zones vides à de petites zones à forte concentration**.

[7]Niveau de fiabilité maximal.

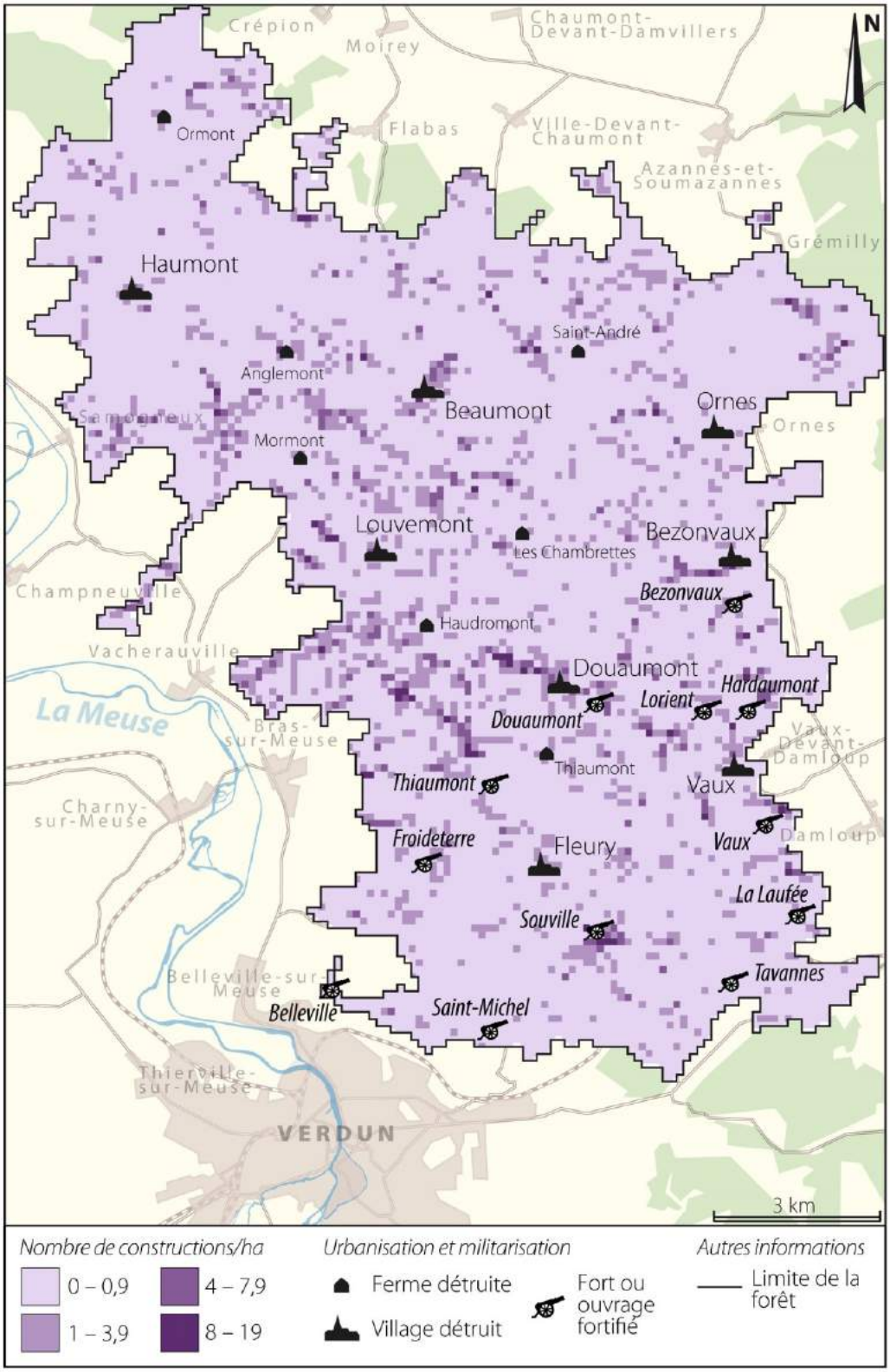


Figure 7.6 – *Carte de densité des abris et positions d'artillerie (D4, D5 et D6)*

Pour illustrer cette tendance à l'agrégation des formes, une analyse de la dispersion des semis de points associés aux cratères et aux constructions a été faite en utilisant l'indice de dispersion de Taylor (1977 ; annexe G) selon la méthode des voisins les plus proches (son calcul est possible dans ArcGIS® *via* la fonction *Average nearest neighbour* des *Statistiques spatiales*). Les deux indices obtenus indiquent que la tendance est à une légère dispersion pour les cratères d'obus (R = 1,04) alors qu'elle est fortement agrégée dans le cas des abris et positions d'artillerie (R = 0,57), résultats qui appuient les propos sus-cités.

La carte de densité des abris et positions d'artillerie (figure 7.6) **dévoile des densités variant de 0 à 19 constructions/ha** (0 à 43 pour les formes au niveau de fiabilité minimal) pour une moyenne de 1 construction/ha sur toute la forêt. D'une manière générale, les zones à forte densité indiquent que les constructions sont nombreuses et alignées. Ces zones prennent un aspect linéaire, coïncidant avec la forme allongée des ravins : ravin du Helly (≈ 40 ha), au nord-ouest du fort de Douaumont, entre 1 et 16 constructions/ha ; ravin de la Mort au sud-ouest (≈ 50 ha), jusqu'à 17 constructions/ha ; ravin du Cul Brûlé (≈ 15 ha), à l'ouest du village détruit de Louvemont, jusqu'à 19 constructions/ha (maximum enregistré). D'autres zones à forte concentration se démarquent dans quelques talwegs, où les valeurs de densité dépassent régulièrement 4 constructions/ha : ravin de Neuville (≈ 20 ha), vallée de l'Orne (≈ 15 ha), ravin Desserieux (≈ 15 ha), ravin de la Fausse Côte (≈ 20 ha), fond des Rousses (≈ 40 ha), fond du Loup (≈ 15 ha), etc.

Quand ils ne sont pas dans les talwegs, les abris et positions d'artillerie apparaissent au sommet du plateau bien que cette configuration soit plus rare. Les secteurs de la côte du Poivre, de la cote 344, de la ferme d'Anglemont et du village détruit de Beaumont-en-Verdunois sont particulièrement touchés par ce phénomène et comptent parmi les rares sites à présenter des densités importantes (entre 1 et 4 constructions/ha et ponctuellement jusqu'à 12 constructions/ha) sur un espace aussi étendu (de 50 à 120 ha). Six autres amas plus petits (de 20 à 40 ha) émergent un peu partout dans le massif : au bois d'Ormont, au bois de Brabant (Malbrouck), au bois des Caures, au bois de la Wavrille, au nord de l'Herbebois ou encore au sud du fort de Souville. Plus rarement, les constructions occupent le talus des Côtes de Meuse auxquels s'ajoutent les versants de la butte témoin des Jumelles d'Ornes.

Concernant les sous-catégories d'abris et positions d'artillerie (annexe F), nous constatons que la cartographie de la classe D4 reflète assez bien la cartographie générale (figure 7.6). Les densités varient de 0 à 14 constructions/ha. Les ravins de la Mort et du Helly présentent des densités d'abris rectangulaires et ellipsoïdaux élevées (proches de 5 constructions/ha). La côte du Poivre se démarque aussi (entre 1 et 5 constructions et ponctuellement jusqu'à 8 constructions). C'est cependant dans le ravin de la Fausse Côte qu'est relevée la densité maximale (14 constructions/ha). Six autres secteurs abritent des densités proches de 10 constructions/ha : ferme d'Anglemont, ravin du Cul Brûlé, bois de la Wavrille, Jumelles d'Ornes, secteur l'ouvrage de la Laufée et sud du fort de Souville.

Avec un nombre de constructions largement inférieur à celui de la classe D4, les constructions des classes D5 et D6 sont plus rares et moins diffuses (0 à 4 constructions/ha pour D5 contre 0 à 5 constructions/ha pour D6). Pour D5, les pics d'occurrence s'observent dans les ravins de la Mort, du Helly, au sud du fort de Souville et dans le bois d'Ormont (jusqu'à 4 constructions/ha). Pour D6, la distribution est différente bien qu'on observe encore une concentration de valeurs assez importantes dans les ravins de la Mort (jusqu'à 5 constructions/ha) et du Helly. L'agrégation est moins flagrante ailleurs mais reste significative dans le ravin du Cul Brûlé, dans le fond des Rousses et au sud du fort de Souville.

2.1.3. Les réseaux de fossés, une répartition assez diffuse

À l'image des cratères d'obus, **la distribution des réseaux de fossés**, **assez diffuse**[8], **laisse apparaître quelques agrégats** (figure 7.7). Les valeurs de densité affichées par les pixels sont contrastées, **de 0 à 459 m de linéaires/ha**. Cinq zones à forte densité s'individualisent. La première est la côte du Poivre, site particulièrement touché par l'aménagement de fossés où des densités largement supérieures à la moyenne[9] sont relevées, entre 50 et 300 m/ha avec des pics supérieurs à 400 m/ha. C'est dans ce périmètre que se trouve la densité maximale observée sur le massif (459 m/ha). Un second amas assez allongé s'étend du bois de Brabant (Malbrouck) au bois d'Ormont avec des valeurs aussi importantes. Pas moins d'une douzaine de pixels présentent des valeurs dépassant les 300 m/ha. Un troisième site, autour de l'ouvrage de la Laufée, avec un maximum de 393 m/ha. Dans les deux autres secteurs du périmètre de l'ouvrage d'Hardaumont et de la butte témoin des Jumelles d'Ornes, les réseaux de fossés sont aussi très présents mais en proportion plus faible, entre 50 et 200 m/ha, atteignant jusqu'à 400 m/ha aux Jumelles d'Ornes et 350 m/ha autour de l'ouvrage d'Hardaumont.

L'analyse séparée des cartes de tranchée et boyaux de communication indique une répartition des pixels suivant la géométrie des réseaux (annexe F). Étant donné l'orientation du front dans le secteur de Verdun (cf. *infra*, 3.1), ces zones à forte densité s'étendent d'Ouest en Est pour les tranchées et du Nord au Sud pour les boyaux de communication. Les fortes densités de tranchées indiquent des systèmes dédoublés (présence de deux ou trois lignes) ou de linéaires bien conservés (c'est-à-dire peu fragmentés). Les vides renseignent sur la localisation des zones de contact se matérialisant par l'apparition d'un *no man's land*. Toutefois, ces zones à faible densité de tranchées ne doivent pas être interprétées systématiquement comme tel, d'autres facteurs existent (*e.g.*, destruction des tranchées, aucun aménagement réalisé).

[8]Étant donné le type d'implantation des fossés (implantation linéaire), l'indice de dispersion de Taylor n'a pas pu être appliqué.

[9]44 m/ha (cf. *supra*, chapitre 6).

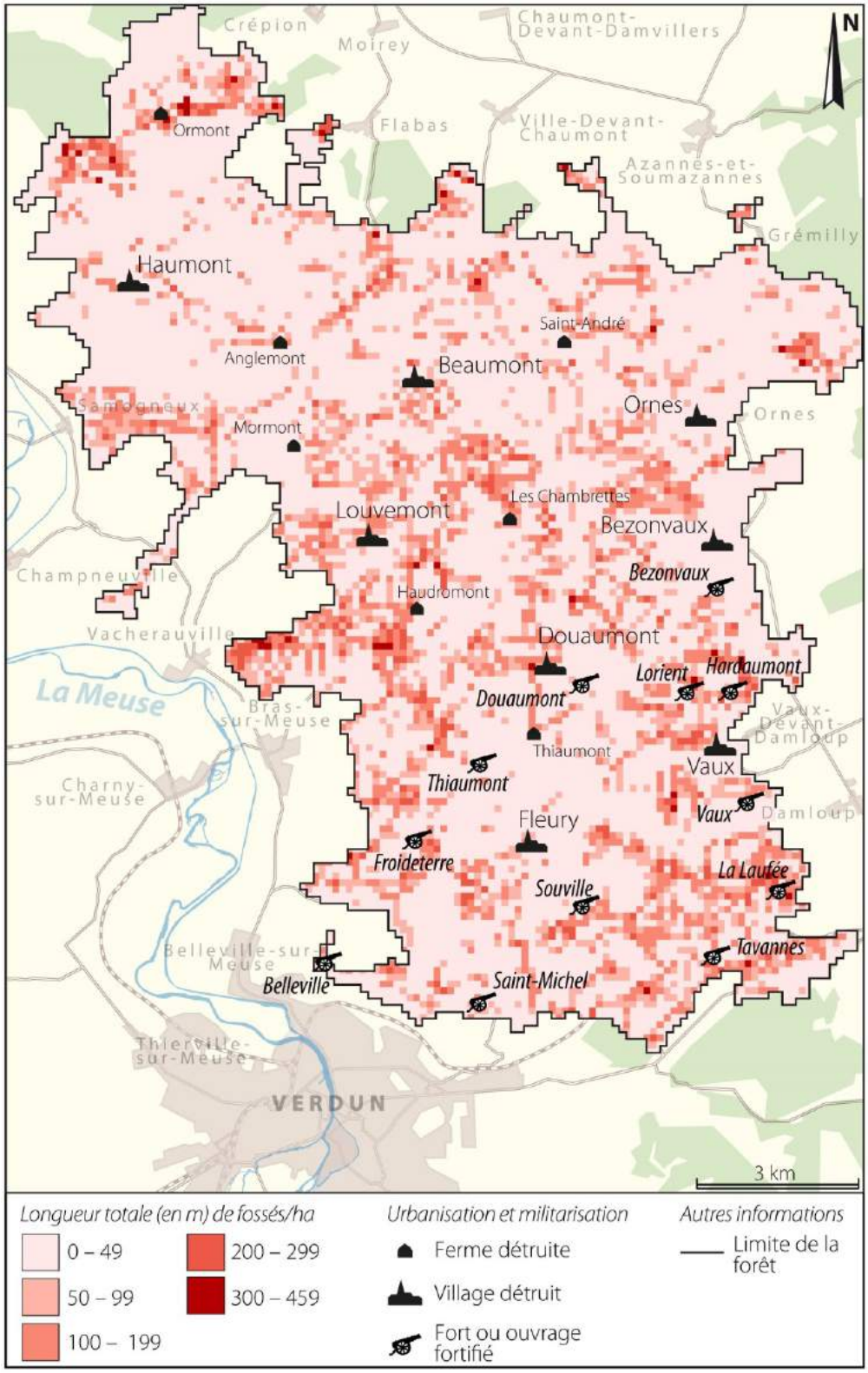


Figure 7.7 – *Carte de densité des fossés (D9 et D10)*

Pour les boyaux de communication, les pixels aux valeurs élevés révèlent la présence de lieux bien connectés où les lignes se multiplient (parfois plus de dix fossés relevés dans un pixel). De ce fait, la carte des boyaux de communication se révèle être un bon indicateur de présence d'abris, ces derniers nécessitant (pour la plupart) un raccordement au réseau.

2.2. Facteurs de répartition

2.2.1. Le gradient « polémologique »

La distance à la ligne de front est le critère le plus décisif du gradient de bouleversement physique. Ce phénomène associé aux épisodes de guerre statique est connu depuis 1919, année marquée par la publication d'une cartographie du front en trois degrés de destruction par le ministère des Régions libérées (cf. *supra*, chapitre 2). Ce document dévoile un gradient de destruction se traduisant par une altération totale des paysages au niveau du front (zone rouge), altération qui tend à s'estomper à mesure que la distance à la ligne de front s'allonge, passant à un degré de destruction modéré (zone jaune) puis léger (zone bleue). Sur le champ de bataille de Verdun rive droite, ce gradient est l'un des plus contrastés : ici la zone rouge correspond « *au plus grand périmètre d'un seul tenant de toute la zone rouge française* » (Amat, 2015) avec un gradient plus resserré qu'ailleurs, puisque la zone jaune ne mesure que 5 km tout au plus alors qu'elle atteint jusqu'à 25 km en Champagne et 50 km dans l'Aisne ou dans le Pas-de-Calais.

L'analyse des cartes de densité de formes (figures 7.5, 7.6 et 7.7) met en lumière des variabilités dans la zone rouge (pour rappel, cette dernière comprend la totalité de la forêt). À cette échelle, il est difficile de rendre compte d'un phénomène unique de bouleversement physique extrême tant la ligne de front s'est déplacée sur le champ de bataille. Celui-ci s'observe en plusieurs endroits, principalement autour des quatre lignes de front majeures du front de Verdun (figure 7.8) :

- La ligne « Côte du Poivre – Carrières d'Haudromont – Fort de Douaumont – Ouvrage d'Hardaumont », mise en place au début de la bataille (février à avril 1916) et réactivée à la fin (octobre à décembre 1916), soit cinq mois de stabilité.
- La ligne « Côte du Poivre – Ouvrage de Thiaumont – Fleury-devant-Douaumont – Fort de Souville – Ouvrage de la Laufée », cœur de la bataille (juin à septembre 1916), soit quatre mois de stabilité.
- La ligne « Vacherauville – Louvemont – Ferme des Chambrettes – Bezonvaux », installée à la fin de la bataille et stabilisée jusqu'au mois d'août 1917, soit huit mois de stabilité.
- La ligne « Samogneux – Cote 344 – Beaumont – Bezonvaux », fixée au mois d'août 1917 et immobilisée jusqu'à la fin de la guerre, soit quinze mois de stabilité.

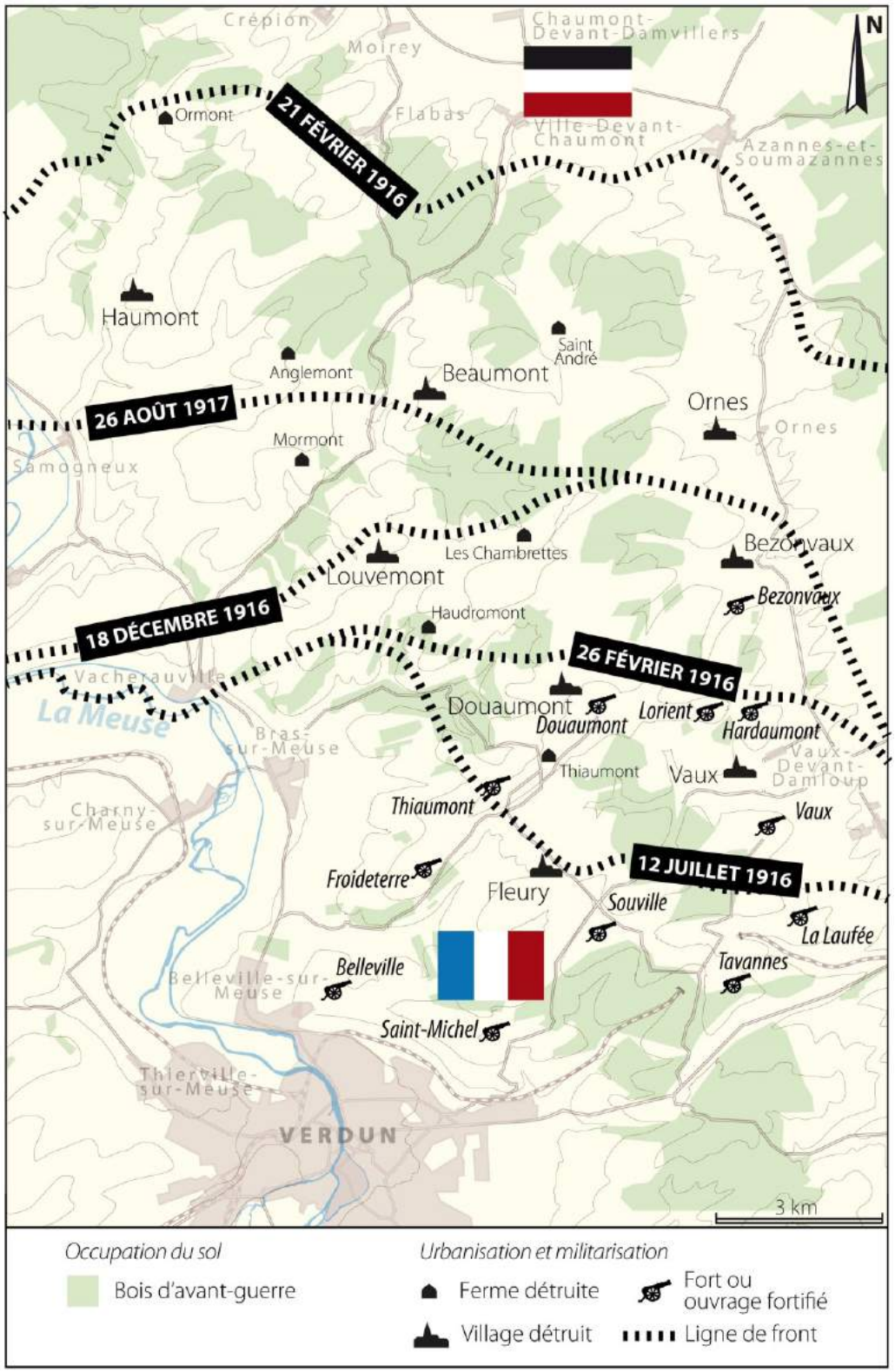


Figure 7.8 – *Déplacement de la ligne de front entre 1916 et 1918*

Ce gradient « polémologique » est principalement dû à la stagnation en un même endroit des actions de l'artillerie dont un des rôles était de « *tenir sous son feu la première ligne ennemie pour empêcher l'infanterie d'en sortir* » (Normand, 1921). Les tirs étaient aussi destinés à détruire les obstacles du *no man's land* afin de permettre aux troupes de progresser vers le camp adverse (Gascouin, 1921 ; Normand, 1921). Seuls les obus explosifs furent jugés efficaces pour détruire les barbelés, lacets, hérissons ou chevaux de frise, constamment aménagés par l'ennemi, ce qui favorisa la création d'un paysage lunaire dans ces zones de contact (figure 7.9). Les vitesses de transformation du paysage furent ici rapides dans la mesure où l'irruption de la bataille de 1916 se conjugua avec l'essor de l'artillerie de rupture consistant en un « pilonnage » concentré des positions avancées[10] destiné à provoquer une trouée dans les lignes adverses. Les lignes des réduits, les observatoires, ouvrages fortifiés ou postes de commandement furent aussi concernés par ces destructions. En réalité, cette tactique de la trouée existait depuis 1915 mais fut rendue encore plus efficace et dévastatrice avec l'explosion de la production de munitions en 1916 (Gascouin, 1921 ; Normand, 1921).

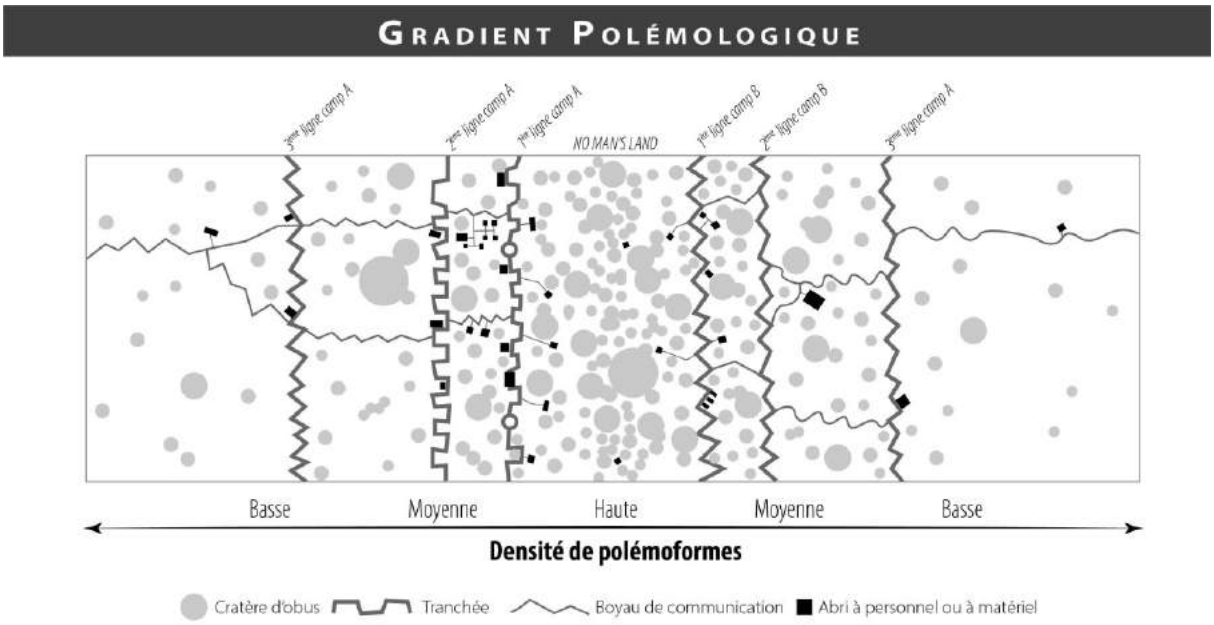


Figure 7.9 – *Le gradient polémologique (traduit de De Matos-Machado* et al.*, 2019)*

Les conséquences de ces actions d'anéantissement s'observent remarquablement bien dans le Quadrilatère des forts, en particulier sur la ligne de front « Thiaumont – Fleury – Vaux », ayant subi en juin 1916 « *l'assaut le plus spectaculaire donné depuis le 21 février* » (Miquel, 1995). Et pour cause ! 2 000 pièces d'artillerie furent déployées par l'armée allemande aux alentours du 23 juin, faisant pleuvoir des centaines de milliers d'obus sur cette ligne (incluant près de 200 000 obus toxiques en complément des obus explosifs ;

[10]En 1915, les tirs étaient conduits sur des zones relativement larges destinés à effacer les obstacles du *no man's land*.

Miquel, 1995 ; Amat, 2001). Côté français, la riposte fut moins violente mais tout de même importante avec près de 1 000 canons en action (Miquel, 1995). Les combats persistèrent dans ce secteur jusqu'au mois d'août avec une intensité soutenue. Ainsi, il est dit que le village de Fleury-devant-Douaumont a été pris et repris seize fois (Le Naour, 2014). Les densités importantes de cratères d'obus observées au nord-est du village ou dans les environs de l'ouvrage de la Laufée constituent les preuves de ce duel tenu entre les deux armées lors de l'été 1916, chacune tentant de prendre l'ascendant sur son rival par des bombardements massifs et concentrés.

C'est ce qui advint également au secteur de la ferme des Chambrettes à la fin de la bataille (figure 7.5). Pour parfaire sa contre-offensive d'octobre 1916, l'armée française se devait de reprendre aux Allemands la série d'observatoires de la ligne de crête étendue de la côte du Poivre à l'ouvrage d'Hardaumont (Anonyme, non daté ; Guillaumat, 1923). La ferme des Chambrettes était l'un des deux sites à atteindre par les Français (avec la route de Louvemont), du fait qu'elle constituait un observatoire naturel perché à 350 m surplombant les ravins du bois de Neuville et des Fosses où se trouvaient de nombreux abris et positions d'artillerie allemands (cf. plans directeurs). La ferme des Chambrettes, comme d'autres secteurs du champ de bataille (*e.g.*, croupe d'Hardaumont, bois des Caurrières, bois Hassoule, bois Chaufour), furent soumis à des combats d'une intensité extraordinaire entre le 15 et 19 décembre 1916. À ces deux dates, la ferme fut prise et reprise trois fois (deux fois par les Français, une fois par les Allemands ; Anonyme, non daté ; Guillaumat, 1923). Chaque assaut s'accompagna d'un barrage d'artillerie[11] destiné à couvrir l'infanterie en progression et à détruire tout obstacle lui barrant le passage, complétant les nombreux cratères déjà produits par « les tirs préliminaires de destruction ». La position fut finalement capturée par les Français le 19 décembre 1916, dernier jour de la bataille de Verdun.

En 1917, les bombardements s'effectuèrent en profondeur et sur des zones élargies. Il n'en demeure pas moins que la doctrine de l'artillerie fut toujours tournée vers une « destruction intégrale » du camp adverse (Normand, 1921). La staticité du front de Verdun fut aussi plus évidente lors de cette année 1917, du fait que le centre des opérations se sont déplacés, notamment dans l'Aisne au Chemin des Dames. La ferme des Chambrettes et le bois des Caurrières font partie des secteurs victimes de cette fixation des bombardements[12], accentuant les effets déjà dévastateurs de 1916 : « *Si le calme était venu assez rapidement* (après la bataille de Verdun) […], *le centre de friction, le fantastique réceptacle de projectiles lancés par les deux partis* […], *s'établissait maintenant dans la région des Chambrettes et du Bois des Caurrières avec la même intensité, et n'en devait pas sortir tant qu'une nouvelle attaque ne viendrait pas le reporter plus au nord* » (Guillaumat, 1923). Cette dernière intervint seulement huit mois après

[11]Un soldat du 4ème régiment de Zouaves s'exprime : « *Il ne faut pas dépasser notre barrage d'artillerie qui roule devant nous, et l'allure est de 100 m par 4 minutes* » (Anonyme, non daté).

[12]Ces deux lieux sont positionnés sur la ligne de front « Vacherauville – Louvemont – Ferme des Chambrettes – Bezonvaux » maintenue de décembre 1916 à août 1917.

l'immobilisation des premières lignes dans ce périmètre. Il n'est donc pas étonnant de constater des densités de cratères extraordinaires près des deux lieux sus-mentionnés.

Par ailleurs, la figure 7.5 renseigne sur **une occurrence de vides plus forte dans le nord que dans le sud de la forêt**, phénomène déjà évoqué par Brenot *et al.* (2016) sur 30 ha du bois de la Gruerie (Argonne) où ils avaient relevé un nombre double de cratères d'obus dans les lignes françaises (1 142 impacts) que dans les lignes allemandes (526 impacts). Une première hypothèse suggèrerait que l'artillerie allemande – installée au nord du massif et visant les positions françaises au Sud – a été plus active que l'artillerie française. Cependant, cet argument ne semble valable que pour le début de l'année 1916 où le rapport de force est favorable aux Allemands (3 pièces d'artillerie contre 1 ; Prost et Krumeich, 2015). En effet, cette supériorité allemande dans les premiers mois de la bataille de Verdun est rattrapée par l'artillerie française durant l'été 1916, qui profite de la mobilité et de la rapidité de tir de ses canons de 75 : « *À Verdun, nous avons une artillerie formidable qui, m'a-t-on dit, tire 20 à 30 coups tandis que les Allemands en tirent 1* » (Clémenceau cité par Prost et Krumeich, 2015). Une seconde hypothèse mettrait en cause les méthodes de tir. Alors que l'artillerie allemande se fondait sur une utilisation massive du tir courbe, l'artillerie française privilégiait le tir rasant[13], amenant « *de nombreux accidents, puisque le moindre ressaut de terrain et la moindre branche d'arbre, accrochant l'obus au passage, provoquent son éclatement au-dessus de la tête des fantassins des premières lignes* » (Gascouin, 1921). De ce fait, « *il exista jusqu'en 1917 et même 1918, beaucoup d'angles morts du terrain, dans la plupart des secteurs, où il ne tombait jamais d'obus français, en raison de la trajectoire généralement tendue que suivaient ceux-ci* » (Gascouin, 1921). Cette hypothèse est plus probable.

Puisqu'il dépend de la localisation des lignes de front successives, c'est-à-dire des tranchées et boyaux des premières lignes, ce gradient polémologique devrait également apparaître sur la figure 7.7. En effet, les manuels militaires préconisent un espacement des tranchées de plus en plus resserré à mesure que l'on se rapproche du front[14], phénomène doublement visible du fait que le front s'organise en deux camps. Une connectivité importante du réseau constitue une autre caractéristique des positions avancées, se traduisant par une multiplication des boyaux entre les lignes (GQGA, 1917a). Alors que l'on s'attendait à observer des densités importantes le long des trois lignes, le gradient polémologique est paradoxalement moins visible en raison des discontinuités dans ces lignes. Nous suggérons que l'artillerie est principalement responsable de ce hiatus. Face à un tel déluge, les fossés ne résistent pas : « *Le bombardement des premières lignes les fait disparaître ou n'en laisse subsister que des lambeaux. Nuit après nuit, les soldats s'efforcent, d'un côté comme de l'autre, de les reconstruire, mais les obus qui ne cessent de pleuvoir ont raison de ces tentatives* »

[13]« *Cette pauvreté de notre artillerie (française) en ce qui concerne le tir courbe* […] *est la caractéristique dominante de notre système d'artillerie durant toute la guerre* » (Gascouin, 1921).

[14]Pour rappel, la première ligne est suivie de 20 à 40 m par une deuxième ligne et de 150 à 200 m par une troisième ligne.

(Prost et Krumeich, 2015). Cette hypothèse est confortée par la corrélation significative affectant les figures 7.5 et 7.7 puisque les zones fortement cratérisées sont régulièrement dépourvues de fossés. Ce lien est évident dans le Quadrilatère des forts, riche en cratères d'obus, où le kilométrage de fossés est largement inférieur aux secteurs voisins. L'analyse des plans directeurs montre que ces vides proviennent à la fois d'un aménagement moindre du champ de bataille (bois de la Caillette, nord-est du fort de Souville, ravin Chambitoux, environs du fort de Vaux) et d'une destruction des défenses par l'artillerie (environs de Fleury-devant-Douaumont et de l'ouvrage de Thiaumont, sud-est du fort de Douaumont). Ce constat d'une destruction des fossés par l'artillerie s'observe aussi ailleurs, comme au bois des Caurrières, dans l'Herbebois ou dans les environs de la ferme d'Anglemont. À l'inverse, les zones peu aménagées apparaissent entre les Côtes de Meuse et les Jumelles d'Ornes, entre le bois d'Haumont et le bois des Caures ou au sud de la ferme d'Ormont.

Cette baisse d'intensité du gradient polémologique est aussi constatée pour la figure 7.6 mais d'autres raisons concourent à l'expliquer. En effet, **l'occurrence de cratères d'obus ne semble pas influencer la distribution des abris et positions d'artillerie dans la mesure où ceux-ci ne suivent pas la logique du gradient polémologique**. Pour les abris, la raison proviendrait des biais méthodologiques constatés lors de l'analyse des résultats de la classification (cf. *supra*, chapitre 6), cette dernière ayant mis en lumière des insuffisances dans l'extraction des édifices accolés aux fossés, pourtant nombreux en premières lignes. Le rôle du terrain constitue un autre facteur majeur dans leur répartition, plus que la localisation des lignes de front. Pour les positions d'artillerie, la distribution est plus dispersée et pas forcément localisée à proximité immédiate du front. Depuis 1916, l'artillerie s'échelonne en profondeur, jusqu'à 3 km derrière les premières lignes[15], alors qu'on la trouve principalement dans les positions avancées au cours des années précédentes[16]. Les batteries d'artillerie deviennent même mobiles à partir de 1917, en particulier côté allemand (Normand, 1921). Les positions d'artillerie s'organisent aussi selon les caractéristiques du terrain, aspect que nous allons maintenant aborder.

2.2.2. Le gradient « topographique »

La répartition des trois grandes catégories de polémoformes identifiées est aussi conditionnée par le terrain, paramètre largement exploité depuis l'Antiquité par les armées (cf. *supra*, chapitres 1 et 2). Au vu des observations faites sur les cartes de densité, **deux facteurs semblent prévaloir dans l'organisation des polémoformes**, **la topographie**, lignes de crête, talwegs, **et les bois** antérieurs au conflit.

[15]« *La distance des batteries de campagne à la première ligne est déterminée par la puissance maxima du tir de barrage, donc, pas plus de 3000 m* » (Normand, 1921).

[16]En fin 1914 et 1915, les batteries d'artillerie sont casematées près de la première ligne (Normand, 1921).

D'une façon générale, les lignes de crête de la forêt semblent avoir été plus perturbées par l'artillerie que les talwegs. 402 226 cratères d'obus (63,09 %) se situent au-dessus de la moyenne d'altitude relevée sur l'ensemble des données LiDAR (soit 295 m, correspondant approximativement au seuil au-dessus duquel se trouvent les lignes de crête), révélant une localisation préférentielle de ces polémoformes dans les points hauts. La raison principale de cette dichotomie réside dans le caractère stratégique des hauteurs, permettant de surveiller les points bas (GQGA, 1917a ; Villate, 1925 ; Hupy, 2005 ; Boulanger, 2006 ; Devos *et al.*, 2015). Il en résulte une action intense de l'artillerie visant ces positions afin d'empêcher l'ennemi d'entreprendre ses opérations d'observation. Comme l'affirme Villate (1925), « *ces observatoires ne sont que des points dans l'espace, ils n'ont pas une valeur absolue, ils ne peuvent se défendre eux-mêmes. Il faut une organisation défensive pour les protéger contre les entreprises ennemies* ».

La place fortifiée de Verdun forme une série de redoutes aménagées sur les éperons rocheux du plateau des Hauts de Meuse, « *assez rapprochées pour se couvrir mutuellement par leurs feux* » (Rocard, 1993). Pas moins de vingt-huit forts et des dizaines d'ouvrages secondaires (casemates, batteries d'artillerie) défendirent ces hauteurs et constituèrent des cibles privilégiées pour les assaillants. Par exemple le fort de Douaumont, construit entre 1885 et 1887 puis modernisé jusqu'en 1913 en réponse à la « crise de l'obus-torpille », forme le plus grand ouvrage fortifié de la place mais aussi le plus haut (presque 400 m d'altitude). Ces raisons en ont fait un site particulièrement bombardé par les deux armées. Quelques chiffres illustrent ces attaques : en 1915, 60 obus allemands de 420 mm sont tirés sur le fort (Solard, 1935) ; le 24 octobre 1916, 118 obus français de 370 et 400 mm (Bernède, 2002) ; du 1er juillet au 1er novembre 1917, 20 000 obus allemands de 40 à 420 mm (Solard, 1935) ; au total, entre 1914 et 1918, 120 000 obus auraient été tirés dans les environs du fort (Pétain, 1986).

Ce pilonnage ne constitue pas un fait isolé puisque d'autres redoutes ont subi les feux de l'artillerie dans des proportions aussi exceptionnelles. À l'ouvrage de Thiaumont, la pluie d'obus fit disparaître l'édifice. Aux abords du fort de Souville, 30 000 à 40 000 obus de tous calibres (Solard, 1935 ; Pétain, 1986). Il en résulte autour de ces ouvrages des densités de cratères d'obus exceptionnelles : entre 100 et 180 impacts/ha relevés sur le LiDAR.

À la manière des redoutes, les tranchées servent aussi à la défense des hauteurs du champ de bataille. C'est ce que tend à montrer la cartographie générale des polémoformes (annexe E) où les cas de linéaires s'accrochant aux accidents du terrain sont nombreux. « *Le choix de l'emplacement découle surtout de l'obligation de couvrir les observatoires* […]. *La parallèle principale doit donc être choisie de telle façon que l'ensemble de l'organisation assure la sécurité de cette ligne d'observatoires* » (Girardeau, 1921). « *On établira d'autre part une organisation à contre-pente en vue d'arrêter par une action puissante de feux l'ennemi qui aurait franchi la crête* » ou de « *rejeter l'ennemi au-delà de la crête par la contre-attaque* » (GQGA, 1917a). Les Allemands

complétaient régulièrement ce dispositif par une autre parallèle située sur la « crête militaire » entre la première et la troisième ligne (Girardeau, 1921). En complément, les deux camps font en sorte que les fossés soient aménagés en dehors des creux du relief afin d'éviter qu'ils se transforment en « *canaux de drainage* » (Villate, 1925). De ce fait, rares sont les fossés aménagés dans les talwegs ou de manière parfaitement perpendiculaire aux courbes de niveau.

À l'opposé, **les points bas constituent des lieux relativement épargnés par l'artillerie à l'exception des ravins situés dans la ligne de mire des forts**, en particulier ceux défendus par des tourelles et/ou des batteries. « *Toutes les parties du champ de bataille qui sont dissimulées aux vues reçoivent peu d'obus en général, ou moins d'obus que les autres* » puisque « *l'ennemi ne voyant pas le mouvement qui y règne, ne peut effectuer sur ces vallons que des tirs sur zone* […] *difficiles à vérifier* » (Villate, 1925). Il n'est pas étonnant d'y observer les densités d'abris les plus importantes. **Ce constat nous permet d'introduire la notion de gradient topographique** (figure 7.10). **Ce dernier se manifeste par un accroissement du nombre d'abris à mesure que l'encaissement du relief s'intensifie**, faisant apparaître sur la carte des agrégats linéaires qui reflètent la morphologie des vallons. Ce phénomène s'observe particulièrement bien dans les célèbres ravins situés à l'ouest du fort de Douaumont, notamment le ravin de la Mort, où jusqu'à 16 abris/ha ont été relevés (annexe E). D'autres ravins solidement aménagés parsèment le champ de bataille, notamment le fond des Rousses (jusqu'à 16 abris/ha) où les combats ont été rudes pendant l'année 1916 ou le ravin Desserieux (jusqu'à 10 abris/ha) pendant les années 1917 et 1918.

Au sein de ces vallons, **un phénomène de dissymétrie émerge liée à l'exposition aux tirs d'artillerie** (annexe E). Il est en effet possible de constater dans les secteurs en marge des lignes de front une densité d'abris plus importante sur les versants non exposés aux tirs. Un exemple flagrant est celui des Jumelles d'Ornes, dont la butte témoin permettait aux Allemands de dissimuler leurs installations en arrière de la butte. Au nord de la forêt, on constate que les densités d'abris augmentent sur les versants sud (à l'abri des tirs français) alors qu'elle décroît fortement au Sud où les édifices se situent principalement sur des versants nord (à l'abri des tirs allemands). En revanche, cette dissymétrie disparait au centre de la forêt – où se situent les grandes lignes de front – pour faire place à une symétrie résultant du passage des deux armées à différentes époques. Ainsi, dans le cas du ravin de la Mort, le versant sud est couvert d'abris allemands (1916) alors que le versant nord a commencé à être vigoureusement aménagé par les Français à l'issue de la bataille de Verdun (fin 1916, 1917 et 1918).

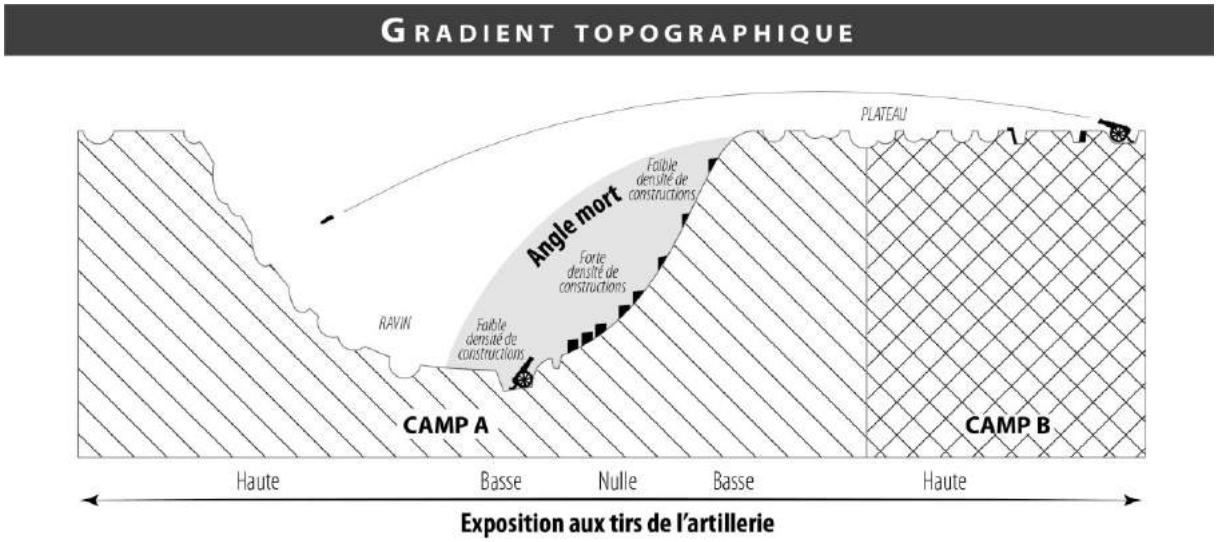


Figure 7.10 – *Le gradient topographique (traduit de De Matos-Machado* et al.*, 2019)*

Ce phénomène de gradient topographique affecte également les positions d'artillerie (Normand, 1921 ; Villate, 1925). « *Des batteries se sont installées de préférence derrière une crête, en un point tel que leurs obus pouvaient franchir la crête tout en donnant aux pièces le maximum de protection derrière un abri naturel* » (Villate, 1925). Ces opérations impliquaient de mettre en lien les artilleurs avec une équipe d'observateurs positionnée sur la ligne de crête, ayant pour mission d'observer le camp adverse et de transmettre aux artilleurs les coordonnées de tir. De cette manière, les pièces d'artillerie restaient à couvert, d'où un nombre assez conséquent de polémoformes des classes D5 et D6 (emplacements de batteries) en-dessous de la moyenne d'altitude du MNT (49,08 % des formes en-dessous de 295 m), en particulier au centre de la forêt où les ravins constituaient l'unique moyen de protection dans ces lieux soumis à d'intenses bombardements (les bois ayant disparu).

2.2.3. Le facteur biogéographique

Le paramètre biogéographique constitue un autre facteur prédisposant dans l'organisation des défenses mais sa prise en compte est d'une façon générale secondaire comparée au paramètre topographique. Il convient néanmoins d'en décrire les effets sur le champ de bataille. Sur les hauteurs, quand la topographie devient plane et ne permet pas aux troupes de se dissimuler, les bois servent de cache. Ce rôle protecteur de la forêt, déjà discuté plus tôt, est assez visible dans le bois d'Ormont, de Brabant, de Louvemont, l'Herbebois, le bois de Breuil (Jumelles d'Ornes), de Nawé, des Essarts ou des Hospices, où les densités de constructions (abris, batteries d'artillerie, fossés) s'intensifient dès lors que l'on entre dans la lisière (figure 7.6 et annexe F).

À la manière des gradients polémologique et topographique, **un gradient biogéographique pourrait ainsi être proposé quoique moins prononcé que les deux précédents**. Les courtes distances séparant les polémoformes construites et les limites forestières[17] sont la preuve que ces lisières faisaient partie intégrante des dispositifs de défense et d'observation (23,85 % des polémoformes de D4, D5 et D6 situées à l'intérieur des bois sont à moins de 20 m d'une lisière et 50,44 % à moins de 50 m). Ce phénomène est aussi valable pour les réseaux de fossés car nombreux à posséder un tracé adossé aux lisières forestières (51 km de fossés sous forêt, soit 12,02 % à moins de 10 m d'une lisière) ou presque (126 km de fossés sous forêt, soit 29,71 % à moins de 50 m d'une lisière). Il est intéressant de constater que de nombreux boyaux et tranchées reprennent le tracé des anciens fossés forestiers entourant les bois, reconversion nécessitant peu de travaux pour les soldats.

Par ailleurs, l'analyse des distances associées aux classes D5 et D6 dévoile une moyenne plus faible dans la moitié sud du massif (la ligne Louvemont-Bezonvaux constitue la ligne centrale de la forêt) que dans la moitié nord (60,5 m dans la moitié sud contre 69 m dans la moitié nord). Ces différences pourraient refléter les méthodes d'installation des batteries d'artillerie (auxquelles sont associés des abris), celles-ci variant en fonction de la doctrine de tir des deux camps (cf. *supra*, § 2.2.1) : « *L'intérieur des futaies doit être réservé généralement aux canons à trajectoire courbe, qui exigent peu de déboisements. Les canons à trajectoire tendue trouvent place de préférence à leurs lisières antérieures* » (GQGA, 1917a). Concernant les cratères d'obus, nous constatons que les densités peuvent être particulièrement importantes à l'intérieur des limites des bois. Nous pouvons tout d'abord suggérer qu'aucun lien n'existe *a priori* entre la localisation de ces massifs et les cratères d'obus et que les zones boisées aux fortes densités de cratères sont simplement le résultat du passage de la ligne de front (gradient polémologique) ou d'actions de pilonnage localisées (présence d'ouvrages fortifiés). Ce serait par exemple le cas du bois Chaufour (ligne de front de février à avril 1916), d'Hardaumont et de Bezonvaux (ouvrages d'Hardaumont, de Lorient et ligne de front de février à avril 1916), de la Laufée (ouvrage de la Laufée et ligne de front de juin à septembre 1916), ; du bois Hassoule, de Neuville, des Fosses et de Louvemont (ligne de front de décembre 1916 à août 1917). Néanmoins, compte-tenu du potentiel protecteur de ces bois, il serait difficile de croire en une indifférence totale de l'artillerie à leur égard. Il semblerait que ces hautes valeurs de densités dans les bois soient liées au passage des lignes de front successives mais qu'elles dépendent aussi de facteurs plus locaux comme la présence de constructions au sein de ces massifs. Ce phénomène est bien visible dans l'Herbebois, massif vigoureusement aménagé par les Allemands où se trouve un nombre important d'abris, positions d'artillerie et fossés (cf. *infra*, § 3.2.2), victime de bombardements lourds par l'artillerie française (puis américaine en 1918). D'autres bois possèdent les mêmes caractéristiques : bois de Brabant, d'Ormont, de Breuil (Jumelles d'Ornes) ou de Contant.

Enfin, on peut se demander si ce nombre important de polémoformes (en général) dans les bois d'avant-guerre est le fruit d'une meilleure conservation du relief, du fait qu'ils aient

[17]Les distances ont été calculées *via* la fonction *Proche* d'ArcGIS.

été conservés lors de la phase de restauration du champ de bataille. C'est la question à laquelle nous répondrons dans le chapitre 8, lorsque nous traiterons des paysages post-guerre.

2.2.4. Un rôle restreint de la géologie

Plusieurs auteurs ont mis en avant le caractère décisif de la nature géologique du terrain dans l'organisation des polémoformes sur les champs de bataille de la Première Guerre mondiale (Doyle et Bennett, 1997 ; Rose et Nathanail, 2000 ; Hupy, 2005 ; Boulanger, 2006 ; Hanot et Simien, 2018 ; Hubé, 2018). Cependant, **la confrontation des données géologiques avec les cartes de densité de formes montre que la nature du substrat n'influence pas ou peu leur localisation**, du fait qu'elle soit d'une façon générale favorable aux armées[18]. **Les nappes phréatiques constituent en revanche un facteur limitant dans la mesure où un certain nombre de sources** favorisent la stagnation des eaux en surface à certains endroits. Quelques exemples très localisés d'adaptation des constructions à ces sols aquifères peuvent être donnés : celui de la tranchée allemande du Taurus, déjà évoqué dans le chapitre précédent (adaptation à la courbe de niveau 330 m) ; cantonnement allemand dans le bois d'Ormont, situé entre la zone d'affleurement de la nappe et la lisière forestière (annexes E et F) ; réseaux de boyaux français concentrés au-dessus de la courbe 350 m, près du fort de Souville (annexe E) ; ou d'une manière générale, dans les vallons fortement encaissés où affleure la nappe alluviale.

3. Cartographie diachronique à l'aide des documents d'archives

Maintenant que les processus de distribution des polémoformes ont été compris, il convient de leur donner une profondeur temporelle à l'aide des documents d'archives, principalement à partir des plans directeurs (de l'échelle de la forêt à celle du site de l'ordre du km²) et secondairement à l'aide des photographies aériennes (échelle locale uniquement). Cette analyse permet ainsi de dater les polémoformes et de situer les lieux des combats par grande période. L'opération est principalement menée sur les réseaux de tranchée puis de manière plus restreinte sur les abris et positions d'artillerie.

[18]« *Dans l'ensemble, les régions calcaires offrent un sol sur lequel les troupes et convois peuvent facilement circuler en toutes saisons, quitte à prendre certaines précautions après les pluies* » (Villate, 1925).

3.1. Évolution des réseaux de fossés à l'échelle de la forêt domaniale de Verdun

3.1.1. 1916 et la bataille de Verdun

L'analyse du kilométrage associé aux réseaux de fossés pour les sept périodes étudiées révèle que l'aménagement sur le front de Verdun s'est fait de manière non linéaire, traduisant des moments de faible et de forte activité (figure 7.11 et tableau 7.8).

Période	Kilométrage	Kilométrage cumulé	Moyenne/mois
Février 1916	46,98	46,98	3,36*
Juin 1916	87,65	134,63	21,91
Novembre 1916	60,43	195,06	12,09
Mars 1917	76,00	271,06	19,00
Juillet 1917	37,47	308,53	9,37
Janvier 1918	61,83	370,36	10,31
Novembre 1918	53,60	423,96	5,36

Tableau 7.8 – *Statistiques de kilométrage de fossés par période. *Cette moyenne a été obtenue en prenant comme référence le mois de décembre 1914 correspondant à la date de début de la guerre de position (premiers aménagements de masse).*

Comme attendu, **la longueur totale du réseau avant la bataille (février 1916) était faible** (au minimum[19] de 46,98 km ; figure 7.12) car l'État-major français ne s'attendait pas à être attaqué sur cette portion du front (Bernède, 2002 ; Prost et Krumeich, 2015). Hormis les nombreux forts occupant le terrain, ce dernier présentait des défaillances, en particulier un nombre insuffisant de défenses aménagés en arrière des premières lignes : « *la deuxième position était à peine ébauchée. La troisième était tracée ; sur la quatrième, on avait fait quelques travaux* » (Pelade, cité par Prost et Krumeich, 2015). En arrière, des points d'appui encerclés de réseaux apparaissaient, à l'image du bois des Caures où cinq centres de résistance (redoutes R1 à R5) précédés d'une ligne de tranchées furent aménagés au début de l'année 1916. Il s'agissait d'ailleurs d'un des seuls secteurs[20] du champ de bataille à avoir résisté aux deux millions d'obus et aux milliers de fantassins allemands lancés le 21 février 1916 sur un front large de 5 km et profond de 2 km (Bernède, 2002 ; Cochet, 2014 ; Prost et Krumeich, 2015). Au cœur de cette défense héroïque, les 56e et 59e bataillons de chasseurs à pied du lieutenant-colonel Driant, arc-boutés aux restes de tranchées de la première position (Stéphane, 1929 ; Bernède, 2002).

[19]Pour rappel, ce kilométrage reflète la situation de 2013. Par conséquent, les valeurs proposées sous-estiment les valeurs réelles.

[20]D'autres secteurs ont aussi bien résisté à cette offensive, comme dans l'Herbebois, défendu par les 164ème, 233ème, 243ème et 327ème RI (Paquet, 1928).

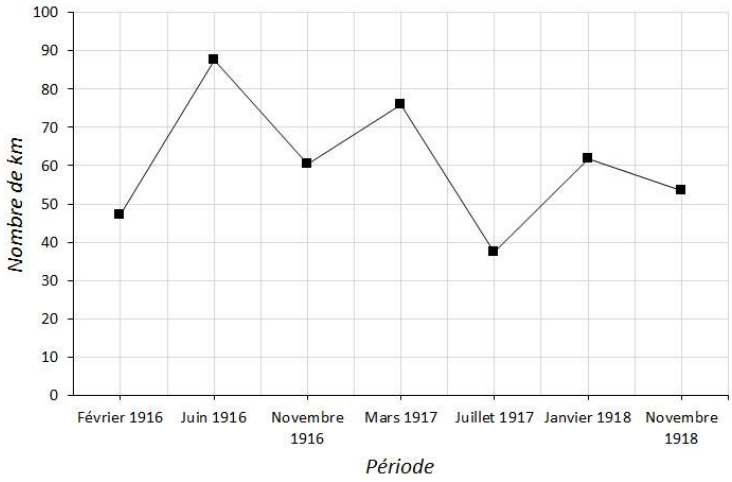


Figure 7.11 – *Évolution du kilométrage de fossés de février 1916 à novembre 1918*

Avec l'irruption de la bataille de Verdun, synonyme de bombardements exceptionnels, les deux armées s'enterrèrent davantage et construisirent des kilomètres supplémentaires de tranchées et de boyaux. Les fossés discontinus furent progressivement remplacés par des réseaux totalement connectés[21], permettant aux hommes de rester à couvert durant leurs déplacements (Normand, 1921). La ligne « Poivre – Haudromont – Douaumont – Hardaumont » fut particulièrement concernée et vît émerger une nouvelle position, inexistante avant 1916 (figure 7.13). Pour garantir la sécurité du front, le génie français commença à aménager plus au sud (3 km) une seconde position sur la ligne « Froideterre – Fleury – Souville – Laufée », afin « *qu'elle ne puisse être soumise en même temps que celle-ci* (la première) *à un tir de préparation d'artillerie* » (GQGA, 1917a). En l'espace de quatre mois (février à juin 1916), le kilométrage tripla (134,63 km), résultat de travaux exceptionnels de la part des deux armées effectués au rythme soutenu de **21,91 km/mois**, **soit la plus forte activité durant toute la guerre**.

À partir de l'été 1916, le front s'immobilisa sur la ligne « Poivre – Thiaumont – Fleury – Souville – Laufée ». On assista surtout à une densification des défenses existantes, justifiant la baisse d'activité caractérisant la période juin-novembre 1916 (12,09 km/mois, soit presque deux fois moins qu'au début de la bataille ; figure 7.14). La deuxième position française du printemps 1916, en pleine construction, se transforma en première position à l'exception de sa partie ouest où les Allemands ne parvinrent pas à progresser vers l'ouvrage de Froideterre. Il en résulta l'improvisation d'une position quasiment perpendiculaire au sens général du front, entre la côte du Poivre et l'ouvrage de Thiaumont. En complément, les positions existantes se densifièrent en comblant les vides latéraux, en ajoutant de nouvelles lignes et des boyaux les connectant (secteur de l'ouvrage de Froideterre, sud-ouest de Fleury-devant-Douaumont, nord-est et sud du fort de Souville, secteur de l'ouvrage de la Laufée).

[21]« *La nécessité de l'organisation en profondeur et des actions latérales conduit à organiser des parties parfois étendues du boyau et à y relier des emplacements de combat en plein champ* » (GQGA, 1917a).

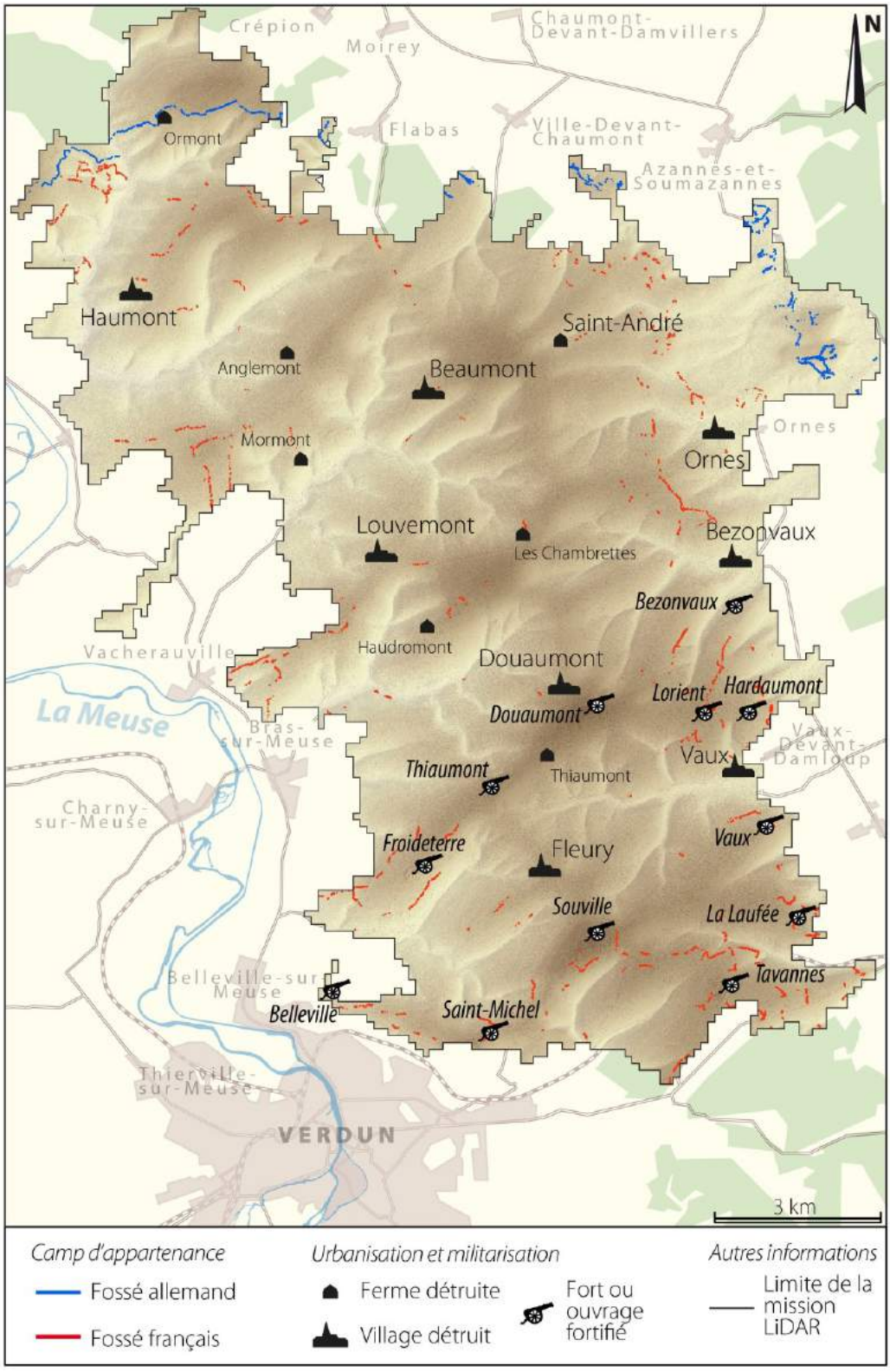


Figure 7.12 – *Carte des fossés en février 1916*

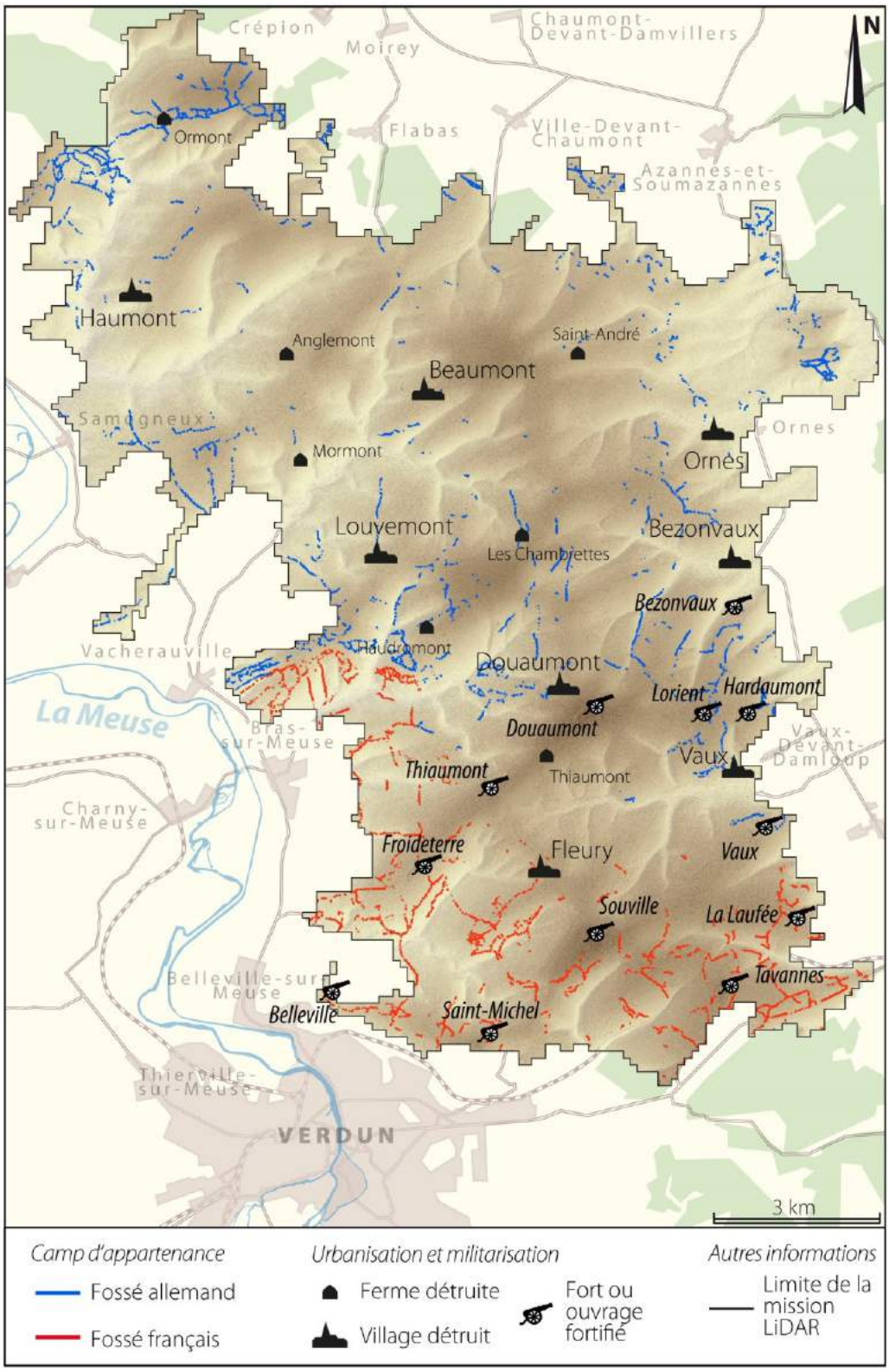


Figure 7.13 – *Carte des fossés en juin 1916*

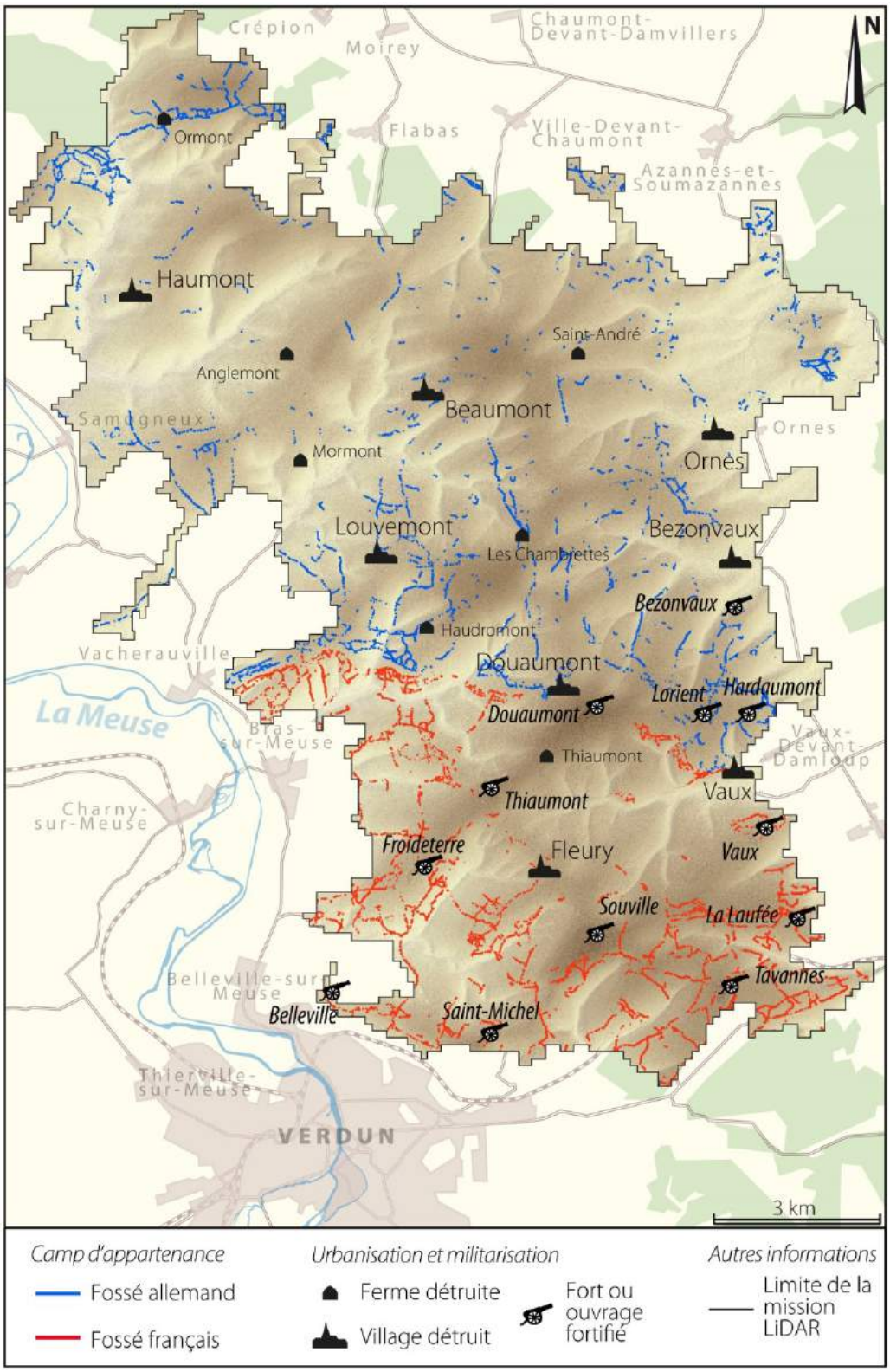


Figure 7.14 – *Carte des fossés en novembre 1916*

Parallèlement, les Allemands organisèrent leur arrière-front en prévision d'une éventuelle contre-attaque française. De longs boyaux furent creusés entre la deuxième position (Poivre – Haudromont – Douaumont – Hardaumont) et une troisième encore à l'état embryonnaire (Vacherauville – Louvemont – Chambrettes – Bezonvaux), distante de 3 à 6 km de la première selon les lieux (Poivre – Thiaumont – Fleury – Souville – Laufée). Au total, 60,43 km de fossés furent construits entre l'été et l'automne 1916, amenant la longueur du réseau à 200 km environ.

3.1.2. L'après-bataille et le printemps 1917

L'après bataille fut marquée par un regain d'activité qui dura jusqu'au printemps 1917 (19 km/mois). Cette croissance trouve ses origines dans l'aménagement d'un nouveau front sur la ligne « Vacherauville – Louvemont – Chambrettes – Bezonvaux », portant les combats à environ 9 km de Verdun (alors que ceux-ci avaient lieu à 4 km de la ville au mois de juillet 1916 ; figure 7.15). La ligne de front du 21 février 1916 (début de la bataille de Verdun) fît office de deuxième position pour les Allemands tandis que l'ancienne ligne de front « Poivre – Haudromont – Douaumont – Hardaumont » remplissait cette fonction pour les Français. Des positions intermédiaires furent érigées côté allemand, d'abord sur la ligne « Samogneux – Cote 344 – Beaumont – Ornes », puis plus au nord entre le bois des Caures et l'Herbebois. En répercussion du déplacement des combats au-delà de la ceinture fortifiée, les Français furent forcés de construire de nouveaux boyaux afin de soutenir l'effort de guerre dans les positions nouvellement creusées. Au total, pas moins de 76 km de fossés s'ajoutèrent au réseau, représentant le deuxième plus grand total après les épisodes du printemps 1916.

Une nouvelle période d'enlisement eût lieu à la fin du printemps 1917 et s'accompagna comme lors de l'été précédent par une déperdition des travaux de tranchée (9,37 km/mois ; figure 7.16). La connexité[22] s'améliora à l'intérieur et entre les positions par l'ajout de boyaux de communication. Quelques tranchées furent également aménagées, tout d'abord dans la zone des combats sur la ligne « Vacherauville – Louvemont – Chambrettes – Bezonvaux » puis à l'Ouest (Brabant-sur-Meuse, ferme d'Anglemont), dans le prolongement des retranchements allemands creusés entre le bois des Caures et l'Herbebois, complétant la position intermédiaire continue de « Samogneux – Cote 344 – Beaumont – Ornes »[23].

---

[22]« *La **connexité** désigne, dans la **théorie des graphes**, la capacité d'un réseau d'assurer la mise en relation des nœuds* (ici, les intersections de fossé) *par les arêtes d'un réseau* (ici, les fossés). *Elle indique s'il est possible, à partir de n'importe quel nœud, de rejoindre les autres* » (http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/connectivite-connexite).

[23]À ce moment, deux positions intermédiaires se trouvent entre les première et deuxième positions allemandes.

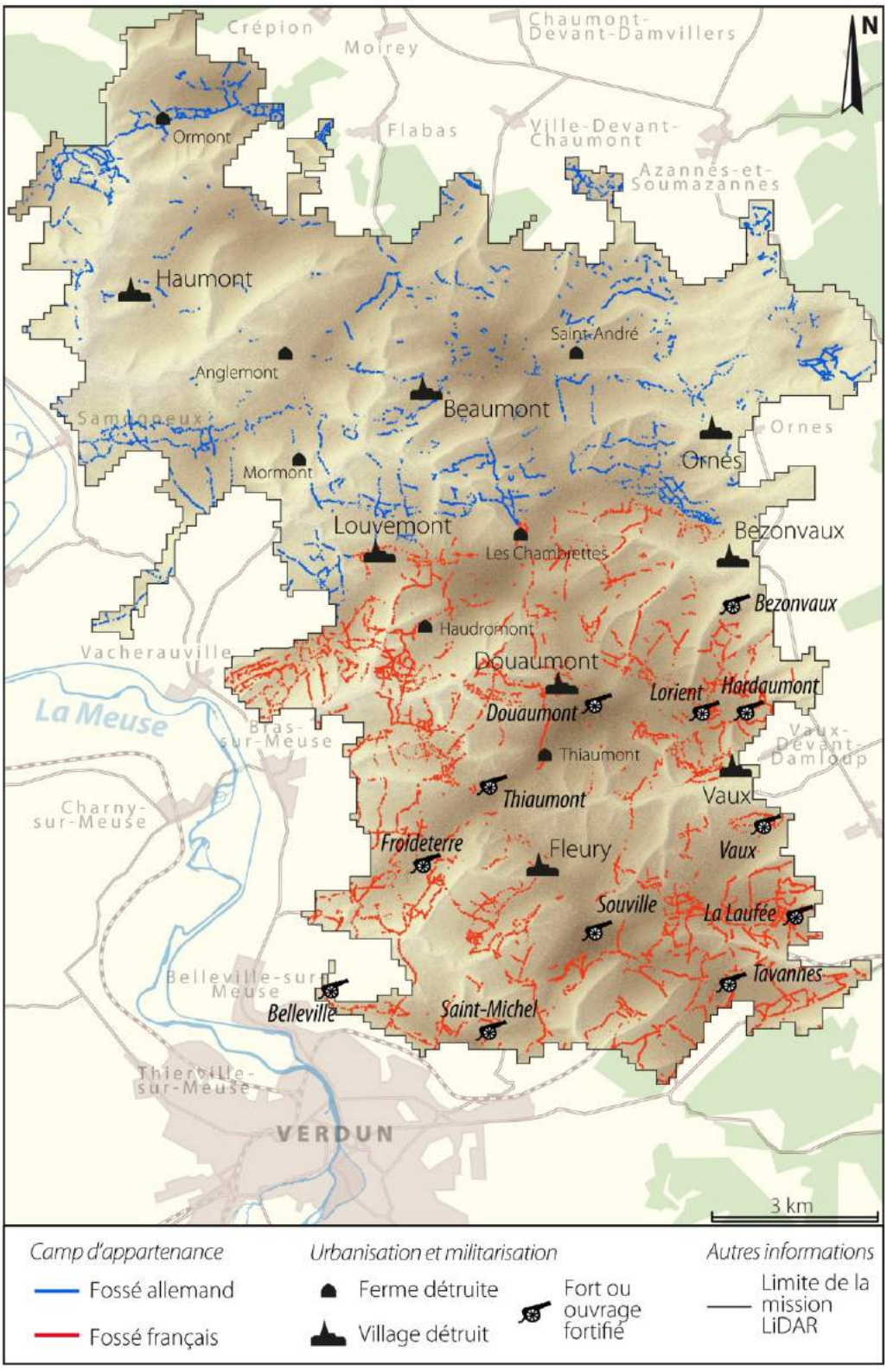


Figure 7.15 – *Carte des fossés en mars 1917*

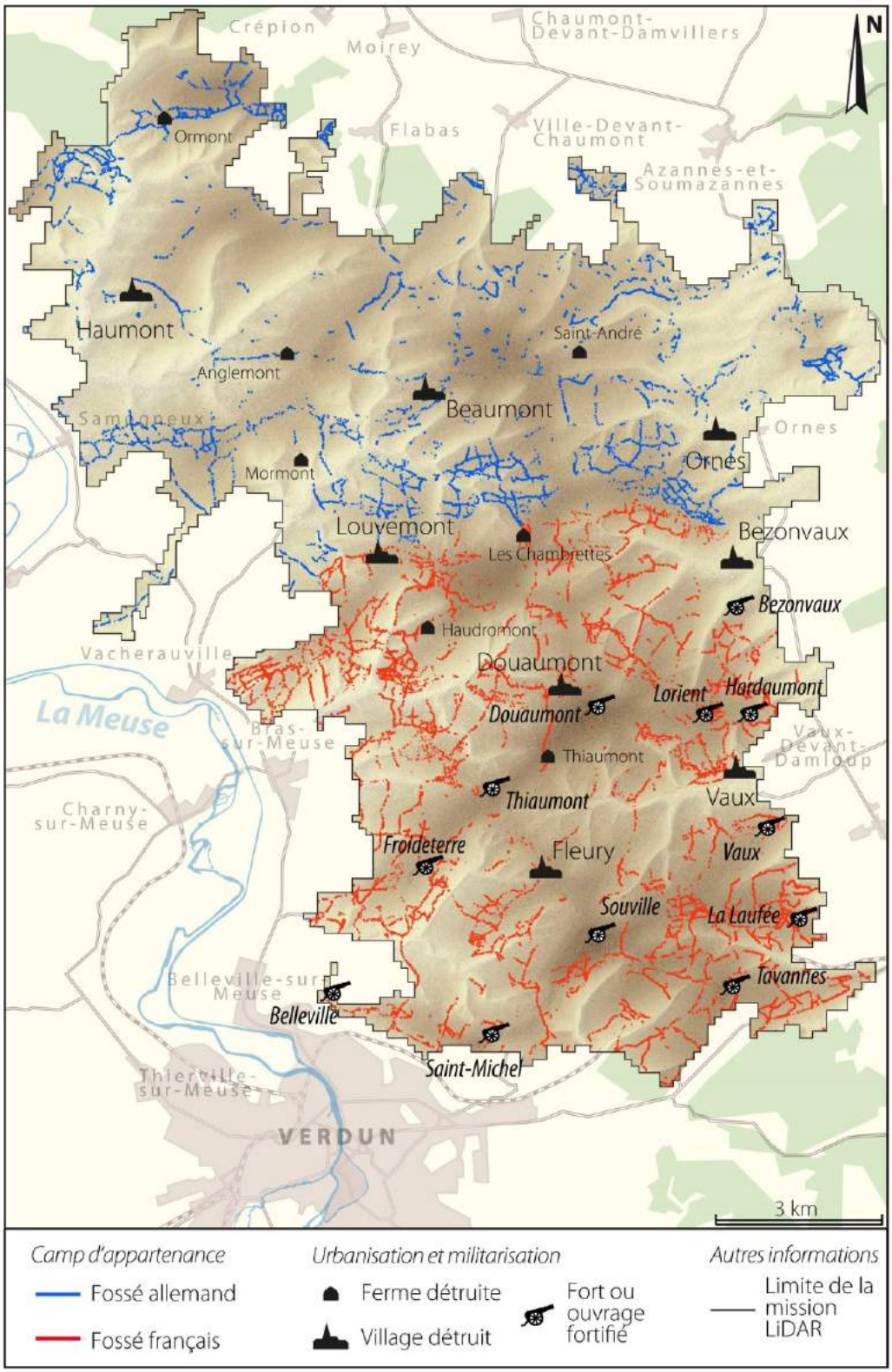


Figure 7.16 – *Carte des fossés en juillet 1917*

3.1.3. La bétonisation du front de 1917 et 1918

Durant la seconde bataille de Verdun, plus précisément à la fin du mois d'août 1917, la ligne de front se déplaça légèrement plus au nord pour gagner la ligne « Samogneux – Cote 344 – Beaumont – Bezonvaux » et ne bougea plus jusqu'à la fin de la guerre. Après l'été 1917, l'arrière-front allemand fut de nouveau renforcé, les lignes furent dédoublées et les connexions furent améliorées (Laparra, 2013), phénomène particulièrement visible dans le bois des Caures, le bois le Comte et le bois d'Ormont. Cependant, **pour garantir la pérennité de ces nouvelles positions**, **des matériaux en dur** (ciment, briques, béton) **furent employés en masse pour consolider les ouvrages** (Dubail et Steinbach, 2013 ; Fombaron, 2013). « *Le bloc préfabriqué en béton armé, appelé* Eisenbetonstein » (Dubail et Jacquinet, 2011) se généralisa en 1917 côté allemand et fut utilisé à la fois pour la construction des fossés et des abris (figure 7.17). Le béton fut parfois moulé sur place pour l'aménagement des abris à l'épreuve comme en témoignent les observations faites sur le terrain. 61,83 km furent ainsi aménagés au rythme de 10,31 km/mois entre juillet 1917 et janvier 1918, portant à 370,36 km la longueur totale du réseau (figure 7.18).

Entre janvier et novembre 1918, les positions ne bougèrent plus (figure 7.19). Tandis que la ligne de front « Samogneux – Cote 344 – Beaumont – Bezonvaux » se fortifia davantage, les axes se multiplièrent dans l'arrière-front, provoquant une densification généralisée du réseau de fossés sur le champ de bataille. Les travaux se firent au rythme de 5,36 km/mois, soit une moyenne comparable aux travaux effectués avant 1916. On peut d'abord relier la faiblesse de ces chiffres à la staticité qui caractérise le nouveau front, limitant ainsi la création de nouvelles positions sur le champ de bataille et donc le creusement de nouvelles tranchées. L'emploi du béton peut constituer un autre facteur, impliquant les soldats dans des aménagements plus longs que par le passé. Une autre explication pourrait provenir des nouvelles méthodes d'aménagement du front employées dès l'été 1917 par les Allemands (qui se généralisa ensuite dans les deux camps), consistant à relier les cratères d'obus entre eux plutôt que d'aménager entièrement de nouveaux axes qui seraient à coup sûr détruits par l'artillerie[24] (figure 7.20). **Avec les 53,60 km de fossés nouvellement créés**, **la longueur du réseau à la fin du conflit atteignit au minimum 423,96 km**.

[24]Note du 30 juin 1917 du général Sixt von Arnim (cité par Normand, 1921) : « *Les positions construites jusqu'à ce jour, et comportant plusieurs lignes continues, ont été méthodiquement détruites par l'ennemi* […] *par l'emploi de grandes quantités de munitions* ». « *Toute tentative de travaux sous le feu épuise les forces combatives* […]. *Il faut donc employer une autre méthode* ». « *Pendant la bataille, plus de tranchées continues devant le front ; elles seront remplacées par des nids de combattants dans les trous d'obus, tenus par des groupes et mitrailleuses isolées, disposées en quinconce* ».

Figure 7.17 – *Usage du béton sur le champ de bataille de Verdun. A : l'abri bétonné allemand du Krokodil (1918) dans le ravin du bois des Caures. Cliché : R. de Matos-Machado, 3 avril 2014. B : sac de ciment pétrifié près de la tranchée du Taurus dans le bois des Caures. Cliché : R. de Matos-Machado, 3 avril 2014. C : abri bétonné allemand dans le bois d'Ormont. Cliché : R. de Matos-Machado, 24 mars 2014. D : tonneau de ciment pétrifié à proximité d'un abri bétonné allemand. Notons les traces laissées par les douves disparues. Cliché : R. de Matos-Machado, 19 mars 2014. E : tranchée allemande maçonnée dans le bois d'Ormont. Cliché : D. Jacquemot, 20 mars 2014. F : observatoire bétonné allemand au sommet d'une ligne de crête dans l'Herbebois. Cliché : R. de Matos-Machado, 20 mars 2015.*

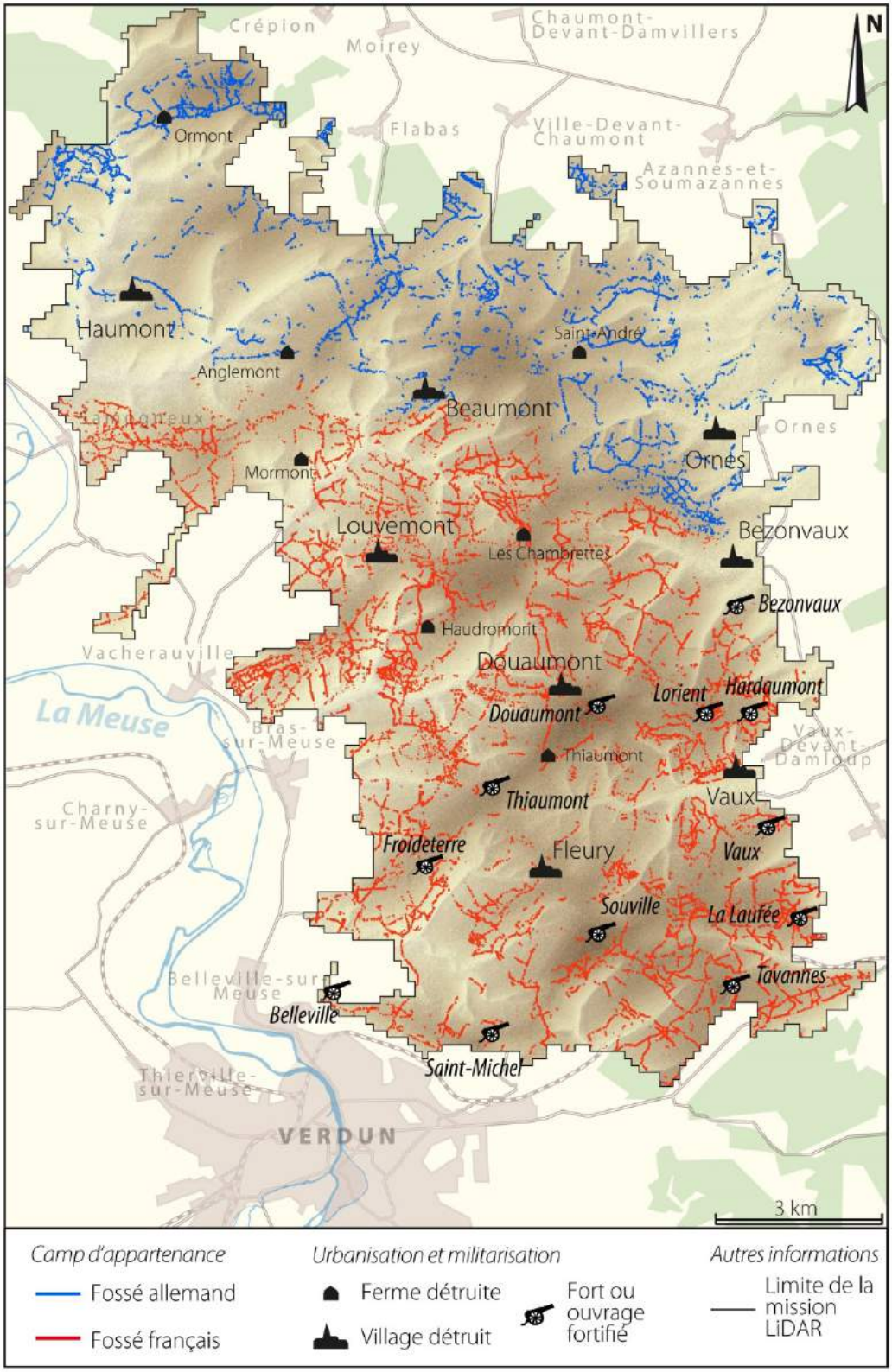


Figure 7.18 – *Carte des fossés en janvier 1918*

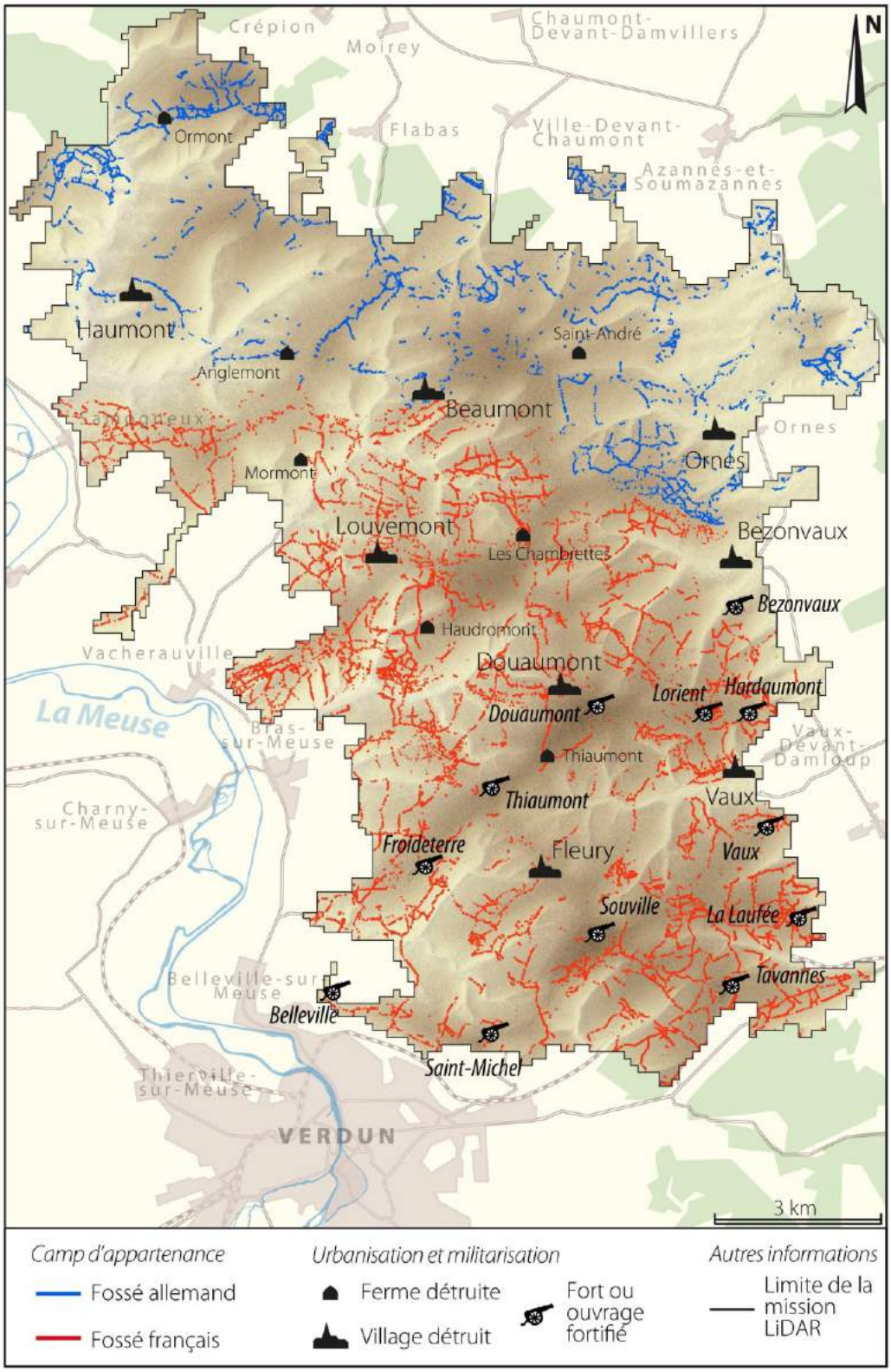


Figure 7.19 – *Carte des fossés en novembre 1918*

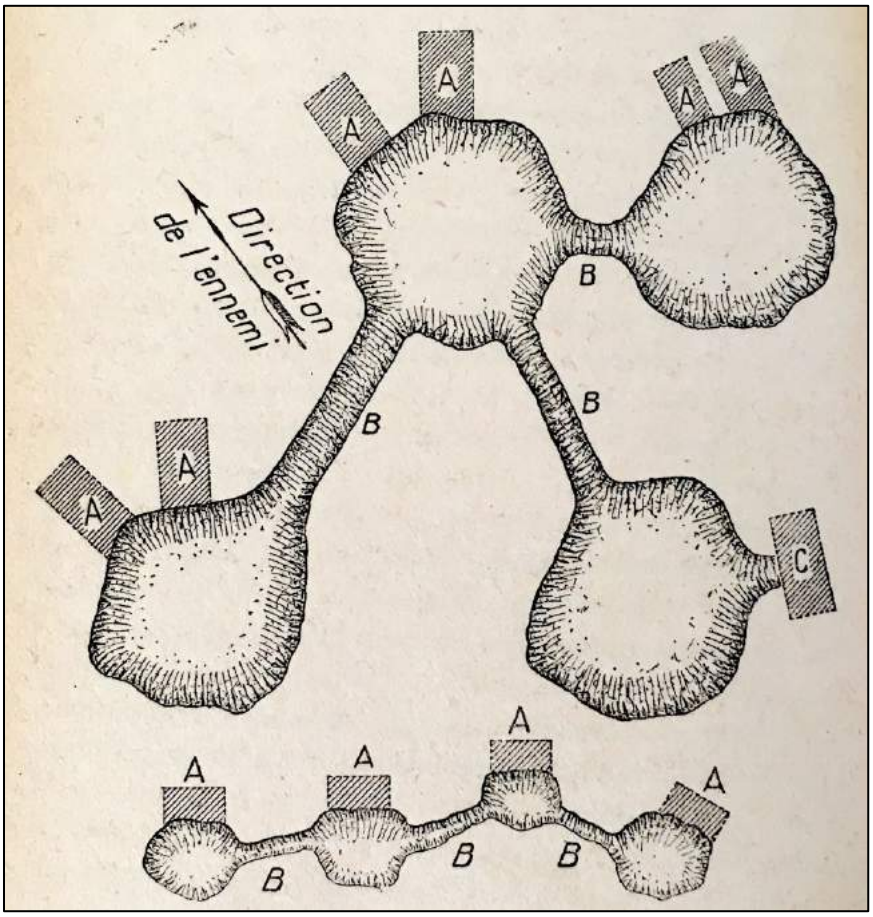


Figure 7.20 – *Aménagement des cratères d'obus en position de défense. A : abri. B : boyau. C : PC (Normand, 1921)*

3.2. Analyse de la transformation du champ de bataille à l'échelle locale

Le croisement des plans directeurs et photographies aériennes offre la possibilité d'étudier à l'échelle de quelques sites les temporalités des polémoformes entre 1916 et 1918, permettant à partir de l'analyse de leur localisation de rendre compte des spécificités de chaque site : évolution de l'organisation des positions durant la guerre, caractéristiques des combats sur le front ou l'arrière-front, usage du terrain. Pour ce faire, trois sites ont été retenus pour la diversité des positions qu'ils proposent (front/arrière-front ; tranchées, boyaux de communication, abris et positions d'artillerie), leur appartenance durant le conflit (camps allemand ou français, ou les deux) et leur bon état de conservation (vestiges bien visibles). Cette étude complète ainsi les trois analyses diachroniques de notre travail de Master 2 (cartographie manuelle) ayant porté sur le bois des Caures, le bois d'Ormont et le périmètre de l'ouvrage de Froideterre (annexe H).

3.2.1. Premier site : le fort de Souville et ses abords

La première étude de cas focalise sur les positions françaises organisées autour du fort de Souville au sud de la forêt domaniale de Verdun (figure 7.21).

Au lancement de la bataille en 1916, la place fortifiée de Verdun s'organisait en deux rideaux défensifs circulaires centrés sur la ville. Sur le premier rideau se trouvait le fort de Souville distant de 5 km de la cité, surplombant les Hauts de Meuse à 388 m et localisé à la lisière nord du bois des Malades, lui-même bordé à l'Ouest par le bois des Essarts puis à l'Est par le bois des Hospices.

Considéré comme un des plus grands ouvrages fortifiés de la place, le fort de Souville ou plus précisément le massif fortifié de Souville, du fait qu'il fut creusé dans une colline, reliait par des réseaux souterrains plusieurs abris et casemates disposés autour de l'ouvrage, auxquels s'ajoutaient une batterie d'artillerie terrassée à 400 m au sud-ouest du fort ainsi que deux autres batteries plus petites, à 100 et 300 m à l'est. Le secteur était également équipé à environ 1 km à l'est du fort par la batterie de l'Hôpital, puis à 1,3 km par la batterie du Tunnel (le nom se réfère au tunnel de Tavannes, édifice sur lequel la batterie se trouvait et qui abritait la voie ferrée reliant Verdun à Metz). Enfin, une voie ferrée traversait d'Ouest en Est le site d'étude, reliant le fort au magasin de munitions à l'Est.

Dès le lancement de la bataille, de longues lignes de défense furent aménagées puisque « *les effectifs engagés sont si nombreux que l'on ne peut concevoir que des lignes de combattants continues occupant des lignes de tranchées également continues* » (Normand, 1921). La région de Souville fut choisie pour y implanter un tronçon de la seconde position française. Durant tout le printemps 1916, les tranchées de Buisseguin et Christophe formèrent la première ligne de cette seconde position, retranchement qui fut précédé au Nord par une série de lignes intermédiaires occupant la première position[25] (Bretelle du Tunnel ; plus tard, tranchée Galleyrand ; tranchée Bley).

Dès le début de l'été 1916 et en réponse à l'avancée allemande opérée vers le Sud, la première ligne fut partiellement dédoublée par une tranchée de deuxième ligne à l'ouest du tunnel de Tavannes. De nombreux boyaux furent aménagés pour faciliter les échanges entre l'arrière-front et les premières positions situées à 1 km au nord. C'est le cas (d'Ouest en Est) du boyau de la Caillette, de l'Étang, du boyau Ollive et de Contant.

[25]Normand (1921) à propos de l'aménagement des lignes entre les première et deuxième positions : « *Entre les deux, on peut organiser autant de positions intermédiaires que le permettent le terrain et les moyens. En outre, le compartimentage du terrain doit faire tomber l'ennemi dans une nasse* ».

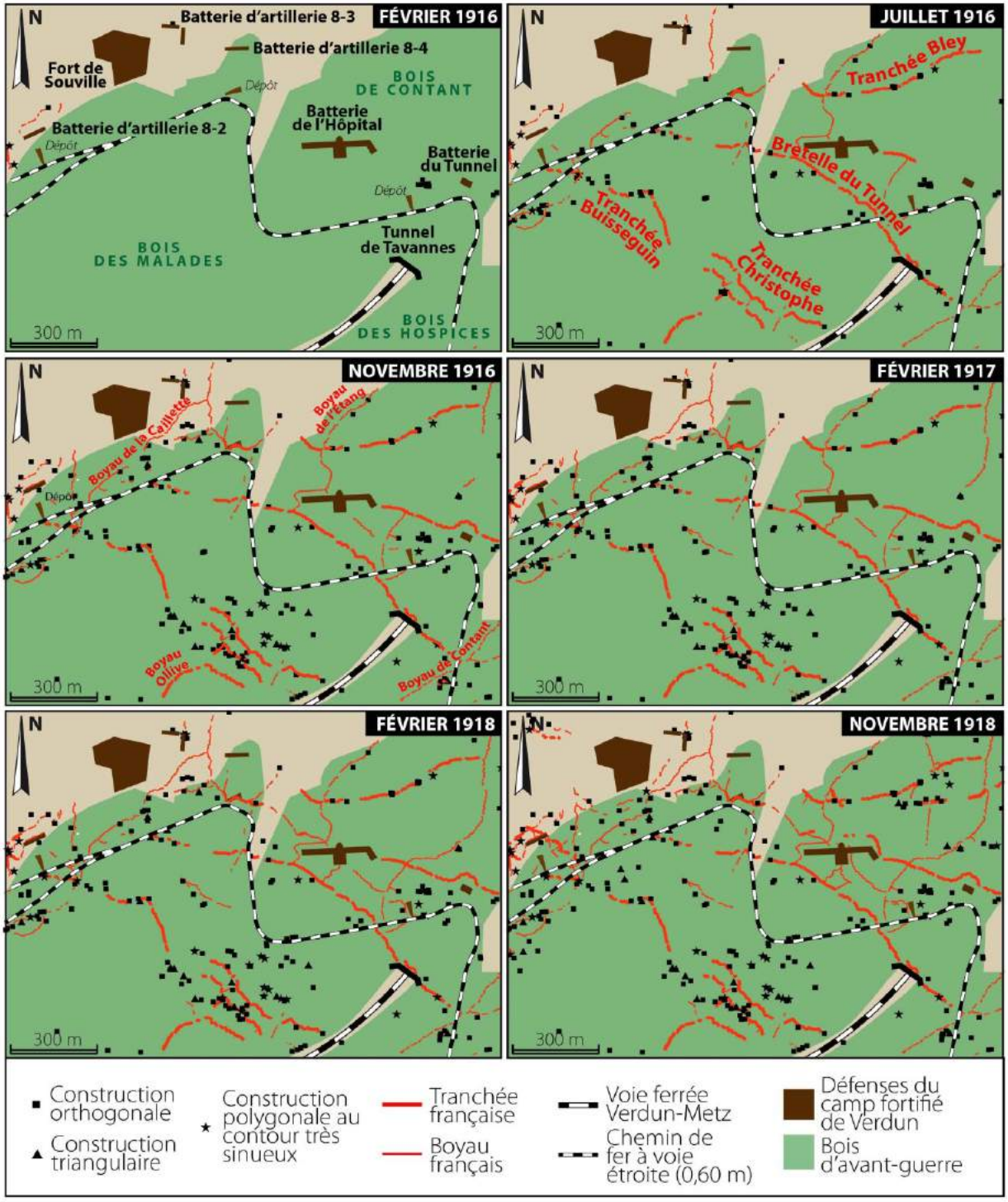


***Figure 7.21** – Carte diachronique du secteur du fort de Souville*

À partir de l'automne 1916, les tensions s'atténuèrent dans le secteur de Souville et permirent à l'artillerie de campagne de s'implanter en masse dans le bois des Hospices, se protégeant ainsi des vues de l'ennemi. Pas moins d'une vingtaine de batteries furent déployées (entre 75 et 155 mm d'après les plans directeurs) en avant ou en arrière des tranchées de Boisseguin et Christophe, auxquelles furent associés un certain nombre d'abris à personnel et à munitions (rarement plus de 100 m de distance). Avec l'éloignement du front et la baisse des effectifs allemands sur le front de Verdun, le réseau de fossés fut étendu et aménagé plus solidement. **L'usage du profil irrégulier, très courant durant la bataille, fut**

remplacé par des profils plus réguliers et sinueux, comme en témoignent le boyau perpendiculaire à la tranchée Christophe (profil en traverses) et la tranchée de troisième ligne (profil tenaillé).

Très peu de changements furent opérés dans l'après-bataille (1917-1918). Pendant toute cette période, le secteur de Souville (à l'exception du quartier de batteries) constitua une zone passive destinée à la surveillance de la position, alors considérée comme la troisième en arrière du front. Seuls quelques boyaux furent ajoutés au réseau, permettant de raccorder les axes inachevés en 1916 (boyau Ollive devenu Belmont) ou de faciliter leur liaison (système de bretelles à l'image du boyau reliant le boyau Belmont au boyau de l'Étang).

3.2.2. Deuxième site : l'Herbebois, un bois aménagé en forteresse

Le second site abordé se localise dans le nord de la forêt domaniale de Verdun, dans le massif boisé de l'Herbebois, bordé sur sa lisière orientale par le front de cuesta des Côtes de Meuse (figure 7.22).

Au déclenchement de la bataille de 1916, l'Herbebois se situait sur la partie est de la position française la plus avancée, traversant d'Ouest en Est le champ de bataille et s'appuyant sur un certain nombre de bois : le bois de Brabant, d'Haumont, des Caures, de Ville. À ce moment précis, la défense française était d'une façon générale « *assez peu fortifiée* » (Miquel, 1995) mais la première position respectait les préconisations faites par l'État-major durant l'été 1915 : « *La tranchée continue ne répondant plus aux nécessités de la situation* », on la transforme « *en groupes d'ouvrages en greffant sur elles des ouvrages fermés où on place les mitrailleuses de flanquement. Ces ouvrages sont à intervalles moyens de 100 à 150 m* » (Normand, 1921). Dans l'Herbebois, la position s'organisait donc en deux lignes : une première à la lisière nord du massif (rôle tactique) composée de tranchées discontinues (tranchées numérotées) et une seconde à une centaine de mètres en arrière faite d'ouvrages plus robustes (F, H, K, L). L'arrière-front (non représentée sur la figure) présentait en revanche un faible nombre de tranchées. Il en résulta une avancée rapide des troupes allemandes durant les premiers jours de l'offensive. Ainsi, le 23 février, la capture de la première position française et de l'Herbebois fut inévitable (Paquet, 1928).

Le site fut peu affecté par la bataille de Verdun, **seulement quelques bombardements**, **du fait qu'il se situait bien en retrait du centre des opérations** (5 km de février à avril et d'octobre à décembre 1916 ; 8 km de juin à septembre 1916). Entre février et novembre 1916, un tronçon de tranchée, long de 400 m, fut creusé au nord du bois mais ce fut là les seules évolutions visibles dans ce secteur.

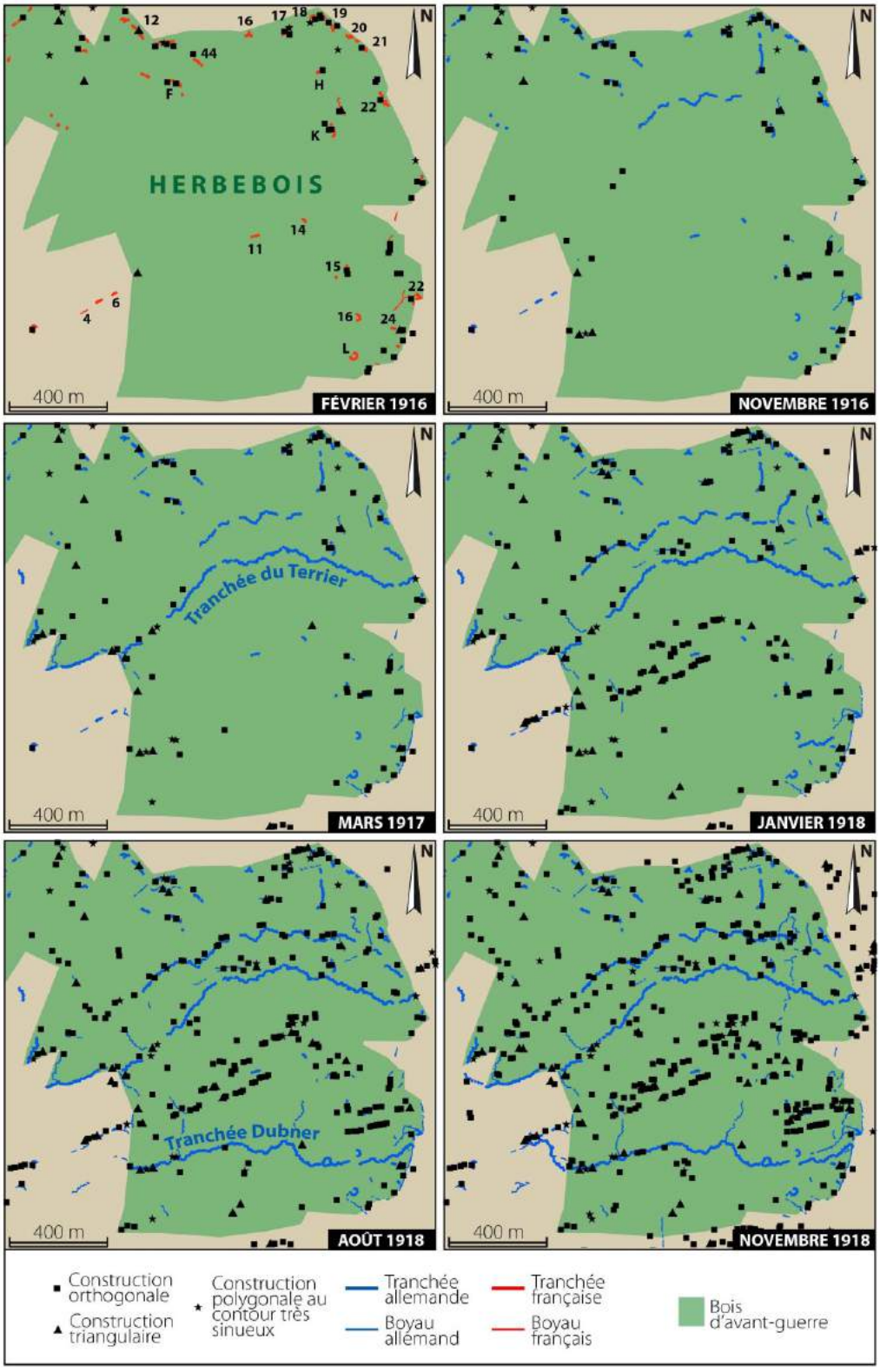


***Figure 7.22** – Carte diachronique de l'Herbebois*

Le printemps 1917 fut marqué par l'implantation d'un des plus grands ouvrages linéaires allemands de l'Herbebois : la tranchée du Terrier, raccordant les lisières ouest et est par un linéaire de 1,8 km de long suivant de manière assez remarquable les courbes de niveau 310-320 m. Avec son tracé sinueux, adoptant par endroit un profil bastionné, cette tranchée constituait une ligne intermédiaire[26] de la deuxième position allemande jusqu'en août 1917, puis de la première position entre août 1917 et la fin du conflit. Quelques fossés forestiers bordant la lisière du bois furent aménagés en tranchée (profil rectiligne). C'est en particulier le cas au sud-est du bois où fut érigée la tranchée des Hêtres.

Avec l'avancée française de l'été 1917, l'Herbebois fut placé à seulement 300 m de la nouvelle ligne de front rejoignant Samogneux à Bezonvaux. **En réponse à ces changements**, **les garnisons allemandes intensifièrent leurs travaux et commencèrent à aménager le secteur en forteresse en faisant usage du béton**. Malgré la proximité du front (les batteries furent généralement organisées en arrière durant les premières années du conflit), l'Herbebois fut renforcé par de nombreuses pièces d'artillerie, dans les tranchées (mortier de tranchée ou *minenwerfer*) et entre les lignes (artillerie de campagne). « *Les grandes portées de nos pièces ne doivent pas nous conduire à maintenir l'artillerie loin en arrière. Pour les* minenwerfer, *prescriptions analogues, sauf que ceux destinés à prendre sous un feu d'efficacité les organisations ennemies seront poussés suffisamment en avant* » (Ludendorff cité par Normand, 1921).

En janvier 1918, plusieurs dizaines de batteries organisées par paire étaient déjà installées dans le ravin des Renards, bénéficiant d'une double protection naturelle (topographie et masque forestier). Le dispositif de défense respectait à la lettre les recommandations faites par l'État-major consistant à installer en arrière des positions d'artillerie des lignes d'observatoires en dur (figure 7.17), particulièrement bien visibles sur la ligne de crête nord du massif à proximité de la tranchée du Terrier.

Les travaux se poursuivirent ardemment jusqu'à la fin du conflit. L'Herbebois fut d'abord renforcé entre janvier et août 1918 par une nouvelle tranchée sur la ligne de crête sud (tranchée Dubner) couvrant les batteries d'artillerie du ravin des Renards. Deux boyaux furent reliés à cette parallèle pour connecter le nord et le sud du massif. Cependant, ces ouvrages ne furent jamais achevés. À l'occasion de ce renforcement, une dizaine de canons furent déployés dans le sud-est, puis à l'ouest, en dehors du bois, afin de compléter le dispositif. Aucun changement majeur ne fut opéré entre août et novembre 1918 (densification des défenses existantes et prolongement des fossés).

[26]La première ligne de la position correspondait à la tranchée du Spitzberg, située entre 100 et 200 m au sud de la lisière sud de l'Herbebois alors que la première ligne de la seconde position (tranchée de Gédis) se trouvait à 800 m au nord de la lisière nord.

3.2.3. Troisième site : la côte du Poivre, un exemple d'affrontement frontal

Le troisième et dernier site constitue la partie occidentale de la côte du Poivre (secteur du bois Franco-boche et de Bride), ligne de crête située à l'ouest de la forêt domaniale de Verdun oscillant entre 230 et 300 m d'altitude sur le tronçon étudié (figure 7.23).

Au début de l'année 1916, la côte du Poivre se situait à près de 7 km au sud de la ligne de front sur une troisième position française encore à l'état embryonnaire. Comme dans la plupart des positions occupant l'arrière-front, **la côte du Poivre était à ce stade dépourvue de défenses** malgré le caractère stratégique que pouvait offrir une telle position pour l'observation. Seul un unique boyau discontinu traversait le secteur, reliant les villages de Bras et Louvemont. Le 25 février, les troupes allemandes gagnèrent le fort de Douaumont, engendrant l'état d'alerte général dans le camp français. À ce moment précis, il leur suffisait de franchir la même distance qu'ils avaient parcourue durant les quatre derniers jours pour capturer Verdun. « *Pour tenir face au nord, sur le front entre Meuse et Woëvre* […], *il est indispensable de boucher un trou qui menacerait de s'ouvrir entre le village de Douaumont et la rive droite de la Meuse à hauteur de Bras* » (Bernède, 2002). La côte du Poivre constitua l'un de ces centres de résistance durant toute la bataille. Les Allemands, malgré de nombreuses tentatives, notamment en avril et août 1916, ne réussirent jamais à progresser à plus de 200 m au sud de la côte.

Durant tout le printemps, une lutte acharnée pris place sur ces hauteurs. Le paysage changea radicalement, d'abord sous l'effet des bombardements allemands incessants, puis par la construction d'innombrables fossés faisant de ce secteur l'un des plus aménagés. **De mars à mai**, **environ 5,3 km de tranchées et boyaux furent creusés dans les deux camps sur une surface de moins d'1 km²**. Le manque de régularité dans les tracés témoigne des tensions qui se sont tenues sur cette partie du front.

Au début de l'été, les lignes allemandes occupaient le versant nord et le sommet de la ligne de crête, couvert par le bois Franco-boche. Elles s'organisaient en trois lignes : en avant, la tranchée de Bismarck ; en arrière (80 m), la tranchée de Brême ; puis, la tranchée de Bade (50 m en arrière). Les lignes françaises étaient moins abouties et plus espacées puisqu'elles se composaient de deux parallèles distantes de 200 m l'une de l'autre : la tranchée Saint-Gratien à la base du versant sud, protégeant le ravin du Monument où furent dissimulés des dizaines d'abris, et la tranchée d'Arhail, précédant la ligne de crête surplombant le bois Bride.

La situation s'inversa durant l'été 1916, où les Français substituèrent aux Allemands la tranchée de Bismarck, les forçant à défendre une position constituée de deux lignes contre trois côté français. Ce dispositif se stabilisa jusqu'en décembre 1916 mais fut renforcé par de nouveaux boyaux (une dizaine) entre les lignes existantes. Le déplacement de la ligne de front à 500 m plus au nord permit aux Français de gagner la côte du Poivre. De ce fait, les soldats du génie effectuèrent des travaux de raccordement visant à connecter les fossés des

deux camps autrefois séparés par le *no man's land*. Peu de changements furent opérés après l'été 1917, les efforts se concentrant sur la nouvelle ligne de front installée à 4 km au nord.

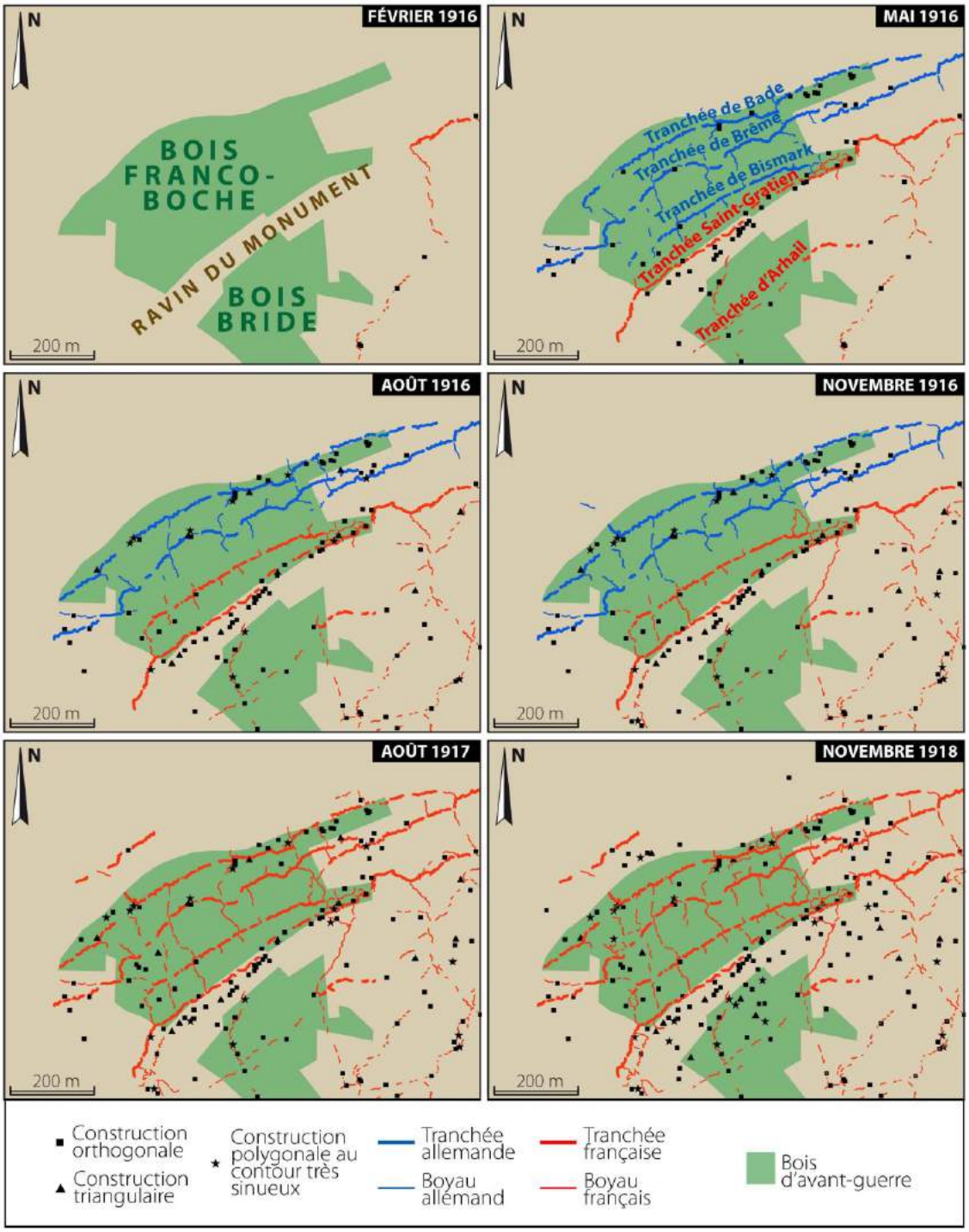


Figure 7.23 – *Carte diachronique de la côte du Poivre*

4. Conclusions

Afin d'approfondir la présentation des résultats bruts de la cartographie des polémoformes, ce chapitre a proposé une réflexion sur l'étendue des perturbations géomorphologiques causées par la Grande Guerre sur le front de Verdun. Pour évaluer de manière plus concrète ces impacts, l'étude a quantifié la superficie atteinte pas les combats et calculé les volumes de matériaux déplacés, **révélant une tendance minimale à l'érosion de l'ordre de 9 741 t/km²/an entre 1916 et 1918 à l'échelle du site d'étude**. La forte variabilité spatiale de ces perturbations, illustrée par un zonage en différentes catégories de destruction, nous a mené à réfléchir aux logiques de répartition des polémoformes. Les cartes de densité ont révélé des processus spatiaux emboîtés : d'abord, **un gradient polémologique général**, **puis des phénomènes associés à la nature du terrain** (facteurs topographique, biogéographique et géologique) qui le tempèrent. L'interprétation du gradient polémologique a impliqué de faire appel au passé afin de situer les grandes lignes de front ayant traversé le champ de bataille de Verdun. Cette information a pu être révélée en confrontant notre cartographie des polémoformes aux documents d'archives consultés en Allemagne et en France. De ce fait, quatre zones à fortes concentrations de formes reflètent les quatre lignes de front majeures ayant traversé les Hauts de Meuse d'Ouest en Est. En complément, **trois sites ont été analysés plus localement** (échelle du km²) répartis entre diverses parties du champ de bataille (camp allemand/français, ligne de front/arrière-front), fournissant des éléments de chronologie intéressants en termes historique et archéologique (datation des ouvrages). De plus, **l'étude a permis de mieux saisir les liens entre paysage et guerre et les évolutions dans les méthodes de combats et de défenses durant le conflit**. La dernière partie de la thèse s'intéressera à la manière dont le paysage de guerre de 1914-1918 persiste dans le paysage actuel. Seront notamment abordées les questions relatives au degré de conservation des polémoformes, aux stratégies de valorisation associées et au devenir des supports cartographiques produits. Elle s'achèvera par une discussion autour du potentiel écologique du champ de bataille et des bénéfices du LiDAR pour contribuer à l'inventaire du patrimoine naturel.

PARTIE 4

Valorisation de la recherche
et
conservation des paysages de guerre

CHAPITRE 8

Diagnostic conservatoire du champ de bataille et initiatives de médiation et vulgarisation scientifique

p. 325

- État de conservation actuel des polémoformes
- Analyse de l'érosion post-guerre
- Initiatives de valorisation scientifique

CHAPITRE 9

Le patrimoine naturel au filtre du LiDAR

p. 361

- Présentation des perturbations écologiques
- Apports du LiDAR à l'inventaire du patrimoine naturel

Chapitre 8
Diagnostic conservatoire du champ de bataille et initiatives de médiation et vulgarisation scientifique

Ce chapitre présente les enjeux actuels de gestion et de conservation des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun. Pour cela, il convient de connaître l'état de conservation de la topographie héritée et plus particulièrement l'état des vestiges de guerre du fait de leur haute valeur patrimoniale. Dans un premier temps, les chiffres de cratères d'obus, d'abris et de positions d'artillerie obtenus *via* notre algorithme sont discutés et comparés avec des estimations de l'époque 1914-1918 afin de déterminer si le chiffrage a évolué après le conflit. En complément, une évaluation du kilométrage de réseaux disparus entre 1918 et 2013 permet de situer les zones fortement altérées et celles où les fossés ont été bien conservés. Elle est suivie d'une discussion autour des processus d'érosion responsables de l'effacement des polémoformes, incluant les phénomènes naturels et anthropiques. Nous abordons dans un second temps les raisons pour lesquelles les polémoformes et vestiges de guerre associés méritent conservation. Deux cartes relatives à la conservation des vestiges de guerre réalisées sur la base de différents critères (nombre et variété de polémoformes, taux d'effacement ou de conservation des fossés, etc.) offrent un outil de gestion opérationnel pour les forestiers. Cette partie présente aussi les multiples initiatives de valorisation conduites durant la thèse, destinées à porter à connaissance les apports du LiDAR. Ces démarches incluent diverses actions de médiation et de vulgarisation scientifique. Enfin, dans un contexte où ces polémoformes bénéficient d'enjeux forts de conservation et valorisation, nous ouvrons le débat sur la reconnaissance de ces objets en tant que patrimoine géomorphologique, suggérant de désigner comme géomorphosite le champ de bataille de Verdun.

1. État des polémoformes au moment du relevé LiDAR (2013)

Le siècle écoulé depuis la fin de la Première Guerre mondiale s'est accompagné de changements paysagers majeurs sur le champ de bataille, dont la naissance de la forêt domaniale de Verdun dans les années 1920-1930. Pour accompagner les projets sylvicoles, des travaux de nettoyage et de nivellement sont conduits par les forestiers depuis des décennies pour garantir la pérennité du massif. À ces interventions, s'ajoutent les réajustements spontanés du milieu naturel, notamment l'érosion du relief par les actions d'écoulement et de colluvionnement, censée aboutir à un pseudo-état d'équilibre. Ainsi, les documents cartographiques produits dans cette thèse ne reflètent pas la réalité du terrain au moment des combats et il convient de prendre en considération ces actions anthropiques et naturelles pour les interpréter. Interrogeons d'abord les chiffrages de polémoformes obtenus par notre cartographie et tentons d'évaluer les différences entre le relief actuel (2013) et celui du passé (1918).

1.1. Cratères d'obus, abris et positions d'artillerie : quel chiffrage en 1914-1918 ?

1.1.1. Les cratères d'obus

Le déploiement de notre algorithme et la prise en compte de différents paramètres (cf. *supra*, chapitre 6) nous ont permis d'estimer à 770 000 le nombre de cratères d'obus en forêt de Verdun. Que vaut ce chiffrage par rapport au nombre de cratères au sortir de la guerre ?

Les moyens de connaître le nombre passé de cratères d'obus sont rares. De notre point de vue, il en existerait deux :

- La première consiste à faire appel aux estimations des artilleurs ;
- La seconde repose sur une comptabilisation des cratères sur les photographies aériennes d'époque. Cette méthode, qui nous semble plus fiable dans la mesure où elle se fonde sur une image de la réalité, ne permet cependant pas de renseigner sur le nombre d'entités en milieu boisé (avant 1914). Aussi, elle est plus difficile à déployer car elle implique de géoréférencer un nombre conséquent de documents pour recouvrir la totalité du front.

Comme l'ont précisé Taborelli *et al.* (2017a), « *l'intensité de l'obusage peut être estimée de différentes manières, soit (i) par le nombre de tubes ou de pièces d'artillerie, (ii) par le nombre de coups tirés, (iii) ou par la consommation journalière d'obus ou le tonnage correspondant* ». La deuxième approche a été retenue ici. **Des valeurs proposées pour le nombre d'obus tombés à Verdun, celle de 60 millions revient régulièrement**[1]. Cependant, il ne concernerait que l'année 1916 alors que les combats se sont poursuivis dans le secteur jusqu'à la fin de l'année 1918.

[1]Un chiffre situé entre 40 et 53 millions d'obus est souvent évoqué mais concerne la période du 21 février au 23 juillet 1916 (les cinq derniers mois de la bataille ne sont pas inclus).

Aucune statistique n'a été trouvée pour la période 1917-1918 et nous nous bornons à comparer nos chiffres avec cette estimation.

À première vue, nos chiffres sous-estimeraient largement le nombre réel de cratères d'obus présents à la fin de la guerre. Néanmoins, ces écarts sont à nuancer. D'abord, ce chiffre de 60 millions se rapporte au champ de bataille qui inclut la rive gauche où les combats ont été intenses entre mars et juin 1916. **Nous pouvons donc tenter de soustraire la part des obus tirés en rive gauche**. Les données à ce propos n'ont pas été trouvées. Nous nous sommes donc contentés d'évaluer le nombre de mois d'activité sur chacun de ces fronts[2] et d'appliquer ces statistiques aux estimations. Le cumul des mois de combats sur les deux rives représenterait quatorze mois : quatre mois en rive gauche (mars à juin), soit 28 % du temps ; dix mois en rive droite (février à décembre), soit 100 % du temps. Ce constat, certes simpliste, permettrait de réduire approximativement de 18 millions le nombre d'obus tirés sur la rive droite, **soit une nouvelle estimation de 42 millions d'obus**.

Mentionnons qu'une part importante de ces obus n'engendrait aucun impact au sol puisque les projectiles utilisés incluaient à la fois des obus explosifs, des obus à mitrailles ou à balles, des obus toxiques et spéciaux de type incendiaire (Laffargue et Moureton, 1933). Seuls certains obus explosifs[3] avaient un effet morphogène. La proportion de ces types d'obus est assez mal connue. Avec la guerre de position dès l'hiver 1914-1915 et la fortification du front, les modes opératoires de l'artillerie privilégient les obus explosifs pour la destruction des ouvrages défensifs (Gascouin, 1921). Durant tout le conflit, l'usage d'obus toxiques semblerait assez minime par rapport aux obus explosifs et à mitrailles ou à balles, du fait qu'il implique des conditions météorologiques optimales pour être employé. En témoignent les bombardements du 23 juin 1916, journée particulièrement clémente[4] qui a vu tomber 100 000 obus toxiques dans le secteur du Quadrilatère des forts (Prost et Krumeich, 2015). Plus concrètement, 4,5 % (au minimum) des projectiles tirés sur le front de l'Ouest furent des obus toxiques (Van Huysse ; cité par Hubé, 2016). Concernant les obus à mitrailles ou à balles, leur nombre est souvent confondu avec les obus explosifs. Gascouin (1921) donne quelques informations quant aux proportions d'obus de ce type employés par les Allemands et Français durant le conflit : « *la proportion d'obus à balles tirés* […] *était de 10 % au plus en 1918, alors qu'elle avait été de 50 % au moins en 1914* ». Keegan (1977) complète ces propos en proposant pour l'armée britannique un rapport de deux tiers d'obus à balles contre un tiers d'obus explosifs entre les 24 juin et 1er juillet 1916 lors des préparatifs de la bataille de la Somme. En appliquant les statistiques de Van Huysse, 4,5 % d'obus toxiques, et de Gascouin, 30 % d'obus à balles en 1916 si l'on considère une décroissance linéaire des

[2]En réalité, ils l'ont été tout au long de l'année 1916 mais certaines périodes ont été marquées par une forte activité.

[3]Parfois, les obus percutant étaient programmés pour produire des ricochets (Taborelli *et al.*, 2017a).

[4]Cf. chronique 1914-1918 des séquences de temps dans Savouret et *al.* (2011).

proportions entre 1914 et 1918, **nous arrivons** « **seulement** » **à un total de 27 millions d'obus explosifs potentiellement morphogènes pour 1916**.

Par ailleurs, Hubé (2016) a suggéré que **20 à 25 % des obus tirés durant le conflit** (hors mortiers de tranchée) **auraient été défaillants**, donc sans aucun impact géomorphologique. Ce phénomène a bien été noté puisqu'un grand nombre d'obus non explosés (52 ; figure 8.1) ont été repérés au cours de nos missions de terrain, constat confirmé par le service du déminage, qui extrait chaque année entre 500 et 700 tonnes de munitions toutes guerres confondues, dont une majorité de la Première Guerre mondiale (Masson-Loodts, 2014 ; Hubé, 2016). En déduisant ces pourcentages des 27 millions d'obus obtenus précédemment, **nous suggérons un nombre situé entre 20 et 22 millions d'obus ayant engendré un cratère au sol**, soit une densité moyenne comprise entre 2 000 et 2 300 cratères/ha sur le champ de bataille de Verdun – rive droite.

Malgré la prise en compte de ces trois paramètres dans le comptage des cratères d'obus, nous sommes encore loin des chiffres relevés *via* notre algorithme de cartographie, qui plus est, se réfèrent à l'ensemble de la période conflictuelle à l'inverse des estimations faites par les artilleurs. Trois interprétations sont possibles :

- Plus de 90 % des cratères ont disparu entre les deux dates (1918-2013) ;
- Des variables inconnues ou difficilement chiffrables ont été exclues (*e.g.*, plusieurs impacts en un même endroit mais un seul cratère visible) ;
- Une part importante de cratères a été oubliée par notre algorithme malgré les révisions proposées après analyse de deux photographies aériennes.

Il est difficile de privilégier une de ces hypothèses. La combinaison des trois facteurs est plus probable. L'analyse des chiffres associés aux autres catégories de polémoformes et la comparaison des réseaux de fossés entre 1918 et 2013 permettront d'en connaître davantage sur la part des reliefs disparus.

Au bilan, il est impossible d'évaluer précisément le nombre de cratères d'obus sur le champ de bataille rive droite à la fin de la guerre, tant les chiffres diffèrent d'une source à l'autre. Toutefois, il est clair que ces estimations, celles de nos cartes et celles provenant des sources historiques, se complètent et ne doivent pas être interprétées isolément. En effet, les époques et objets géographiques étudiés sont différents, tout comme les méthodes de comptage employées. **Pour évaluer au mieux l'impact géomorphologique de l'artillerie la piste à privilégier est le croisement de ces chiffres**.

Figure 8.1 – *Quelques exemples d'explosifs rencontrés durant les missions de terrain. A : Obus allemand de 105 mm sur la côte du Poivre. Cliché : V. Printemps, 4 avril 2017. B : Obus allemand de 77 mm dans le bois d'Ormont. Cliché : D. Jacquemot, 25 mars 2014. C : Obus allemand de 150 mm aux Jumelles d'Ornes. Cliché : R. de Matos-Machado, 2 mai 2016. D : pose d'une rubalise à proximité d'une munition non explosée permettant aux démineurs d'identifier facilement « l'intrus ». En complément, une base de données SIG contenant les points GPS de chaque explosif trouvé a été transmis à l'ONF en vue de leur extraction. Cliché : R. de Matos-Machado, 4 avril 2017. E : amas d'obus à gaz (quatre) trouvé dans le bois d'Ormont. Cliché : R. de Matos-Machado, 19 mars 2014. F : restes d'un crapouillot, obus de mortier de tranchée allemand (minenwerfer). Cliché : R. de Matos-Machado, 4 avril 2017.*

1.1.2. Les abris et positions d'artillerie

La difficulté est encore plus grande lorsqu'il s'agit d'estimer le nombre d'abris et positions d'artillerie. Un premier inconvénient majeur réside dans le fait qu'il en existe différents types et que tous n'ont pas systématiquement engendré d'impacts géomorphologiques au sol au moment de leur édification (*e.g.*, un édifice bénéficiant d'une barrière naturelle n'impliquait pas forcément d'excavation). Une seconde difficulté concerne les statistiques disponibles car la majorité des références bibliographiques porte sur l'année 1916. Enfin, même avec des chiffres précis, la comparaison avec notre base de données serait complexe puisque notre algorithme n'est pas parvenu à distinguer clairement chaque catégorie de construction, cette opération ne pouvant être réalisée que par une analyse au cas par cas des entités. De ce fait, les constructions ne peuvent être analysées que de manière conjointe et il est impossible de connaître la part respective de ces formes dans le jeu de données.

Néanmoins, quelques méthodes de comptage pourraient être proposées malgré leur difficulté de déploiement :

- La première, de même nature que pour les cratères d'obus, se fonderait sur l'étude des photographies aériennes mais avec les mêmes inconvénients.
- La seconde serait semblable à la différence que le support documentaire serait constitué par les plans directeurs, qui ont l'avantage de révéler les ouvrages dissimulés par les bois. Cependant, les documents dont nous avons disposé ne sont pas suffisamment précis pour réaliser cette opération de comptage (seuls les plans au 1/5 000, disponibles localement et à certaines dates, sont éligibles pour ce traitement).
- La troisième impliquerait de connaître les effectifs et le matériel engagés sur le front de Verdun et la capacité d'accueil des ouvrages. Ces statistiques sont difficiles à manier car soumises à une forte variabilité selon les camps et les périodes. À la fin du mois de juin 1916, 500 000 Français et 600 000 Allemands se faisaient face (Prost et Krumeich, 2015). Il est cependant difficile d'admettre que ces soldats vivaient dans les 180 000 à 275 000 abris potentiels répartis sur le champ de bataille[5]. De même, nous ne pouvons dire que le nombre de pièces d'artillerie déployées le 28 mai 1916 sur le front reflétait le nombre réel de batteries engagées, soit un chiffre de 3 947 batteries[6] (Prost et Krumeich, 2015).

Compte tenu des inconvénients du comptage des abris et positions d'artillerie, nous avons préféré attendre l'analyse de la cartographie des réseaux de fossés de 1918, beaucoup plus robuste de notre point de vue, pour avancer des chiffres concrets en termes de disparition des polémoformes sur le champ de bataille de Verdun.

[5]Chiffre obtenu en divisant le nombre de soldats engagés (1,1 million) par la capacité moyenne d'accueil des abris à cette époque (de 4 à 6 hommes ; Normand, 1921).

[6]1 727 pièces côté français contre 2 220 côté allemand (Prost et Krumeich, 2015).

1.2. Cartographie du taux d'effacement des fossés entre 1918 et 2013

À l'inverse des cratères d'obus, des abris et positions d'artillerie, la carte des fossés de 1918 permet un regard objectif sur le nombre de polémoformes disparues et de proposer une cartographie du taux d'effacement des formes à l'unité parcellaire de la forêt. Ce maillage parcellaire a été privilégié pour la discrétisation puisque les aménagements forestiers, impliquant notamment des travaux d'entretien et de conservation, sont conduits à cette échelle. La carte produite pourra ainsi être directement exploitée par les gestionnaires forestiers.

L'étude de la cartographie de 1918 à l'aide de l'outil *Calculer la géométrie* révèle que **le réseau de fossés atteignait 1 032,12 km au sortir de la guerre** (figures 8.2 et 8.3). Les réseaux plus anciens, disparus sous l'effet de l'artillerie, ne sont pas comptabilisés et on peut imaginer que leur prise en compte gonflerait significativement ce chiffre. **La comparaison des réseaux entre 1918 et 2013 révèle une déperdition de 608,16 km de fossés**, **soit une perte considérable de 58,92** % : **plus de la moitié du réseau a disparu**. Cet effacement de la polémotopographie est très variable d'une parcelle à l'autre (figure 8.4 et tableau 8.1).

Taux d'effacement (en %)	Nombre de parcelles	Pourcentage de parcelles
Classe 1 (0-19)	45	9,38
Classe 2 (20-49)	164	34,17
Classe 3 (50-89)	220	45,83
Classe 4 (90-100)	51	10,63
TOTAL	*480*	*100,00*

Tableau 8.1 – *Nombre de parcelles par classe d'effacement des fossés*

D'une manière générale, la majorité des parcelles (classe 3) a un taux de disparition compris entre 50 et 89 %. 220 parcelles sur 480 (45,83 %) ont perdu au minimum la moitié de leur réseau en un siècle. Elles sont disséminées dans le massif, sans logique spatiale évidente. Un tiers des parcelles (classe 2), soit 164 (34,17 %), a un taux d'effacement de l'ordre de 20 à 49 %. Comme pour la classe 3, leur répartition est assez diffuse.

Concernant les extrêmes, les parcelles relativement bien conservées (classe 1, taux compris entre 0 et 19 %) ne sont que 45 (9,38 %). La plupart sont en marge du massif, principalement au Nord mais peuvent s'observer au cœur de la forêt, en particulier quatre d'entre elles près du fort de Douaumont. Toutefois, les chiffres de cette classe doivent être analysés avec précaution car 31 des 45 parcelles concernées étaient dépourvues de fossés en 1918. Par conséquent, il n'y a eu aucun changement entre les deux dates. Il paraît en revanche plus intéressant de focaliser notre propos sur les 14 parcelles restantes, couvertes de fossés en 1918. Sur ce corpus, le taux d'effacement minimal relevé est de 8 % (parcelle 54), ce qui signifie qu'aucune **des parcelles recouvertes de fossés au sortir de la guerre n'a été maintenue intacte**.

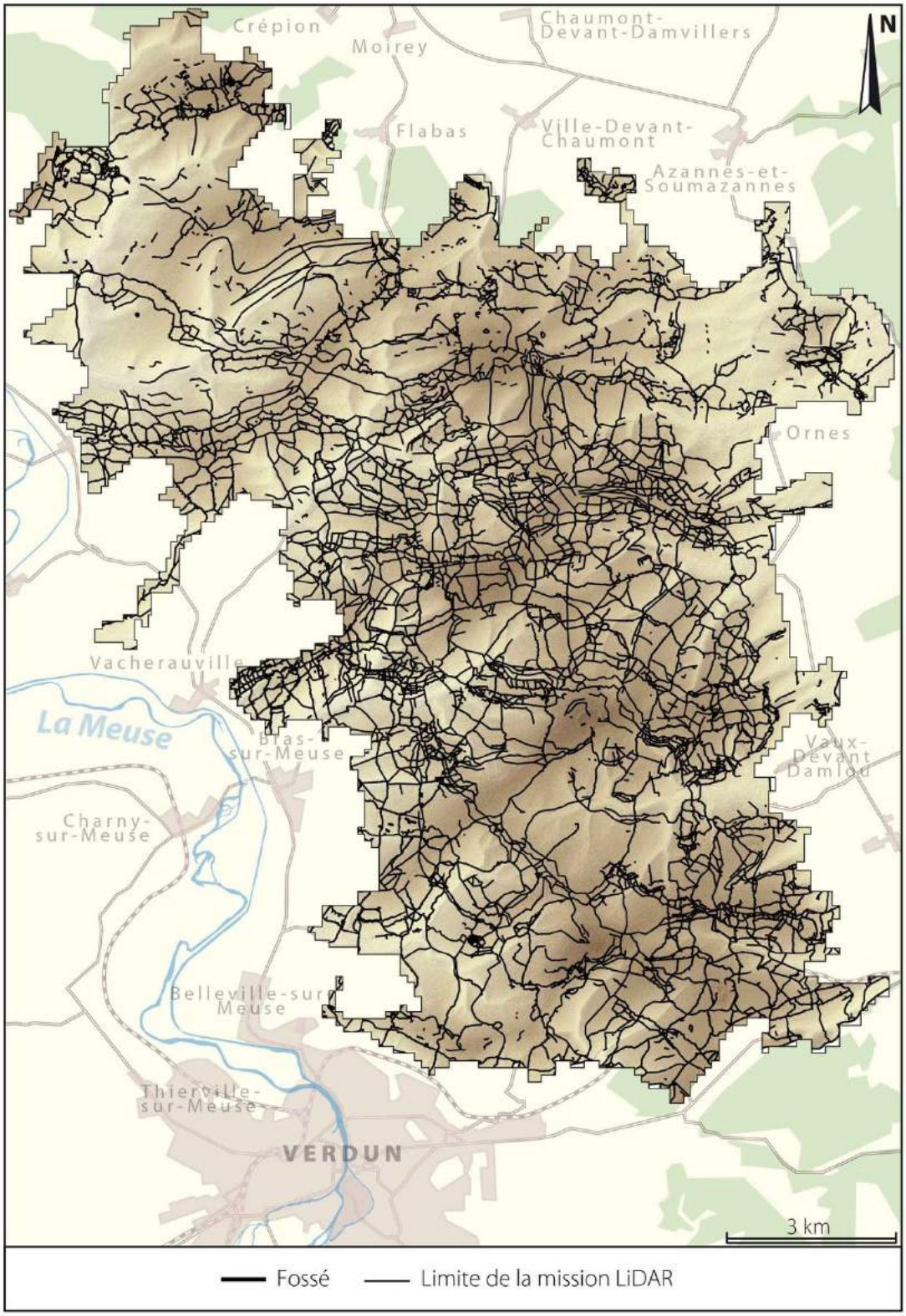


Figure 8.2 – *Carte des fossés en 1918*

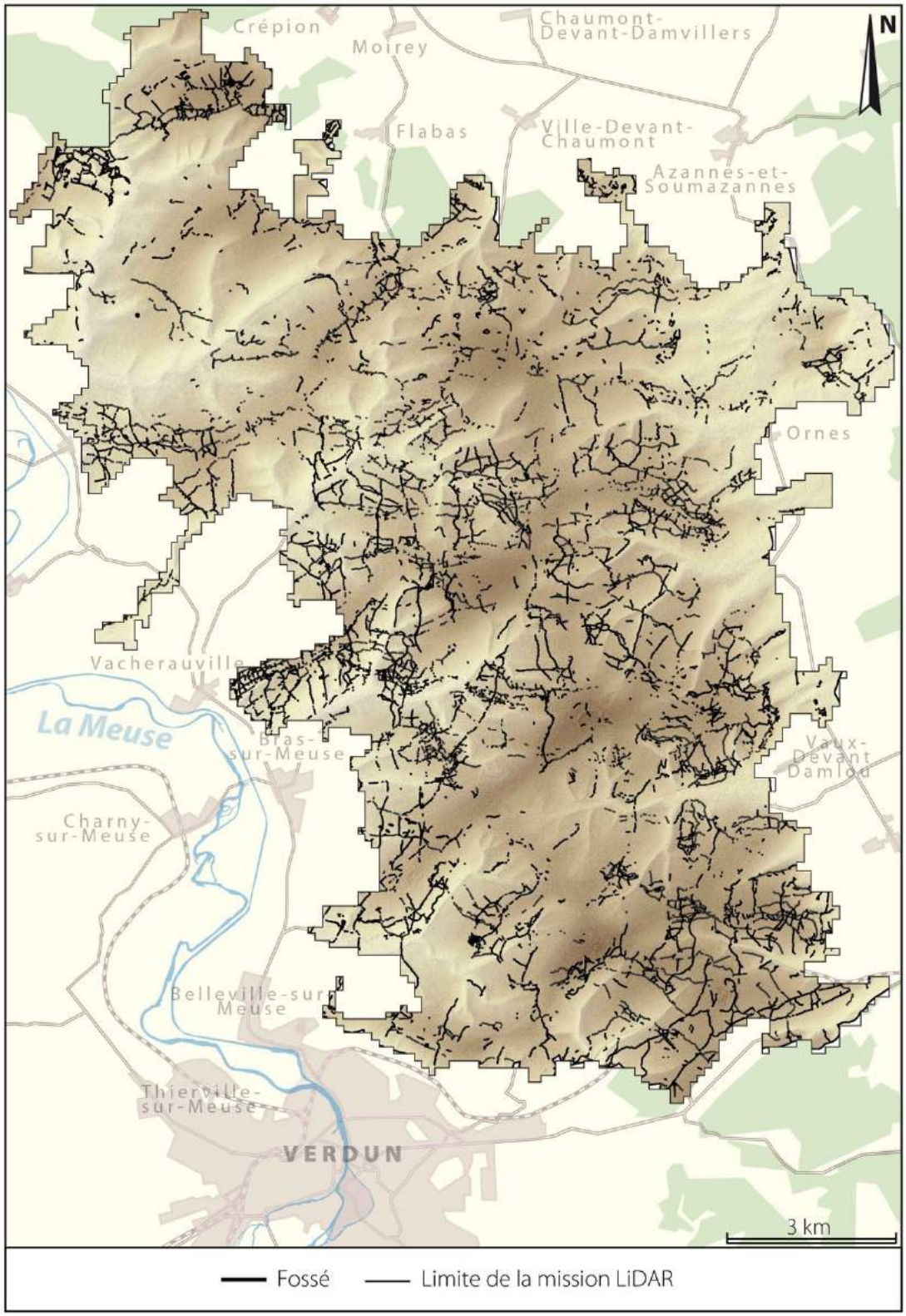


***Figure 8.3** – Carte des fossés en 2013*

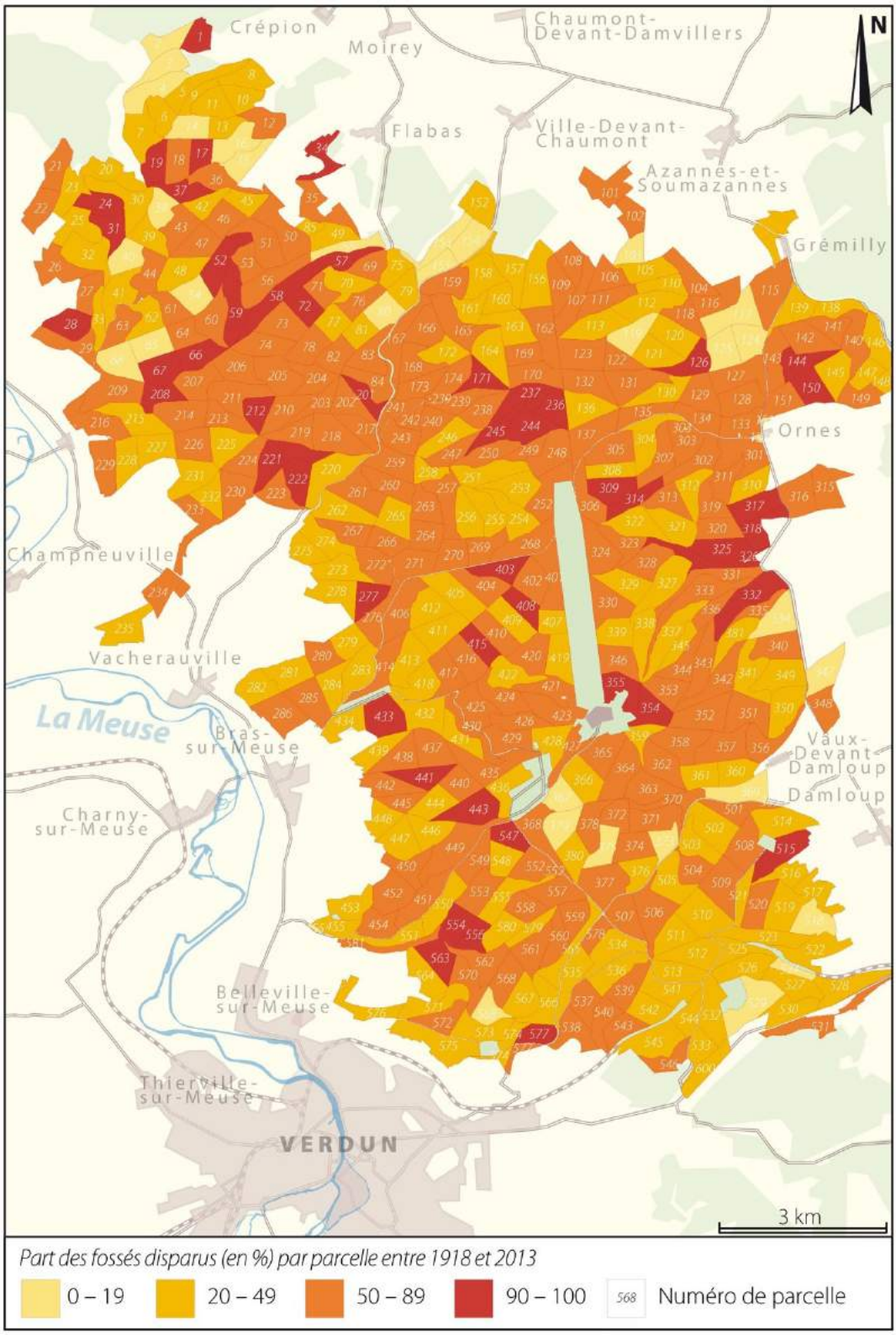


Figure 8.4 – *Taux de conservation des fossés par parcelle*

À l'opposé de la classe 1, la classe 4 se compose de parcelles totalement nivelées ou presque puisque le taux d'effacement y est très élevé, entre 90 et 100 %. Elles émergent un peu partout dans le massif et forment dans certains cas des amas, par exemple entre le bois de la Wavrille et des Fosses (parcelles 236, 237, 244 et 245), dans le ravin du bois des Caures (parcelles 52, 57, 58, 59, 66, 67 et 208) ou près du village détruit de Bezonvaux (parcelles 317, 318, 325 et 326). Le nombre de parcelles concernées reste significatif : 51 parcelles (10,63 %). Parmi elles, 24 ont perdu toute trace des réseaux de la Première Guerre mondiale car le taux relevé y est de 100 %. Pour la parcelle 403 (maximum parmi ces 24 parcelles), les pertes sont importantes avec 1,68 km de linéaires disparus. Ce n'est cependant pas dans cette parcelle que le taux d'effacement est le plus préoccupant, ce dernier apparaissant dans la parcelle 358 de la classe 3, entité ayant perdu 3,70 km de fossés.

L'obtention de ces statistiques d'effacement à l'échelle du massif forestier soulève une question : si ce taux d'effacement équivaut à 58,92 % pour les réseaux de fossés, est-il imputable aux cratères d'obus, abris et positions d'artillerie ? La réponse est multiple. Nous considérons d'abord qu'une corrélation significative existe entre l'érosion des fossés et les autres polémoformes. Ainsi, dans la parcelle 515 (taux d'effacement de fossés de 97,39 %), le nombre de cratères d'obus (845) et de constructions (6) est significativement bas par rapport aux parcelles voisines 514 (1 980 cratères d'obus et 40 constructions) et 516 (1 072 cratères d'obus et 20 constructions) où les taux d'effacement sont moindres, respectivement de 38,24 % et 45,75 %. D'autres exemples similaires existent mais la corrélation n'est pas parfaite. Dans la parcelle 415 par exemple, où le taux d'effacement de fossés affiche 100 %, 337 cratères d'obus existent encore, qui devraient avoir totalement disparu dans le cas d'une corrélation parfaite. En revanche, aucun abri ou position d'artillerie n'apparaît dans l'entité. Par ailleurs, certains fossés observés sur les plans directeurs ont pu être cartographiés alors qu'ils n'ont en réalité jamais existé (projets abandonnés), constat confirmé par l'analyse de plans directeurs antérieurs à 1918 (cf. *supra*, chapitre 5). Dans un tel cas, un taux d'effacement important a été relevé dans les parcelles, anomalie qui confirmerait l'inapplicabilité du taux d'effacement général obtenu pour les fossés sur les autres catégories de polémoformes.

Au bilan, il est difficile de proposer des chiffres robustes sur les effectifs de cratères d'obus, abris et positions d'artillerie disparus bien qu'une certaine corrélation ait été détectée avec le taux d'effacement de fossés. De même, nous ne pouvons justifier clairement les écarts de valeurs obtenus pour les cratères d'obus entre notre cartographie et les estimations des artilleurs. Les trois hypothèses sont laissées ouvertes (cf. *supra*, § 1.1.1). Tentons maintenant d'identifier les processus responsables de cette érosion des polémoformes puis d'évaluer l'amplitude de ces actions.

1.3. Les processus d'érosion post-guerre responsables de l'effacement des polémoformes

1.3.1. Les travaux sylvicoles et autres activités anthropiques

Le recouvrement du champ de bataille de Verdun par une forêt de 10 000 ha, une décennie après la guerre, a eu pour effet de conserver une part importante des polémoformes. « *La forêt les a littéralement « figés » de manière parfois saisissante alors que, dans les zones en cultures, les tranchées et fortifications diverses ont été nivelées et sont aujourd'hui invisibles* » (Jacquemot et Legendre, 2011). Malgré cette initiative « bienfaisante »[7] d'un point de vue archéologique et géomorphologique, la conduite d'un tel projet de boisement a nécessité des phases de nettoyage et de nivellement. Ces travaux se sont accompagnés de dégradations sur le relief, engendrant localement la disparition totale de polémoformes. Il convient d'identifier les travaux les plus destructeurs et d'estimer l'amplitude de ces perturbations. Pour ce faire, la carte du taux d'effacement des fossés et la carte d'occupation du sol de l'ONF ont été croisées (figure 8.5). Cette dernière date de 2006 (contrat de projet 2006-2020) et sera révisée dans le cadre du nouveau contrat de projet.

La carte d'aménagement de l'ONF renseigne sur les modes de gestion forestière actuels. Cette documentation permet de retracer assez facilement l'histoire forestière de chaque parcelle en identifiant le type et l'âge du peuplement actuel. **Les peuplements de la forêt domaniale de Verdun sont de trois types** :

- **Les peuplements feuillus adultes** (plus de 45 ans) : ils reprennent pour la majorité d'entre eux le tracé des bois antérieurs à 1914 et occupaient 2 500 ha du massif en 2006.
- **Les résineux** : ils occupaient les surfaces agricoles antérieures à 1914 et s'étendaient sur 3 000 ha en 2006.
- **Les peuplements feuillus juvéniles** (de 0 à 45 ans) : ils se substituent aux peuplements résineux arrivés à l'âge d'exploitation ou minés par les atteintes parasitaires. Ils représentaient une surface de 3 500 ha en 2006.

À ces trois catégories s'ajoutent les milieux ouverts, composés par des prairies, champs de culture et fruticées.

Comme l'illustre le tableau 8.2, **toutes les parcelles forestières, y compris les milieux ouverts, ont subi un nivellement conséquent depuis 1918. Le taux d'effacement le plus bas concerne les peuplements adultes de feuillus, avec une moyenne de 55,20 % pour ce type de parcelle** qui correspond *grosso modo* aux massifs boisés d'avant-guerre. Cela signifie que, même si la conservation a été importante au sein de ces anciens bois restaurés, l'érosion a « gommé » ou fait disparaître plus de la moitié des formes.

[7]Décision prise par le gouvernement dans les années 1920.

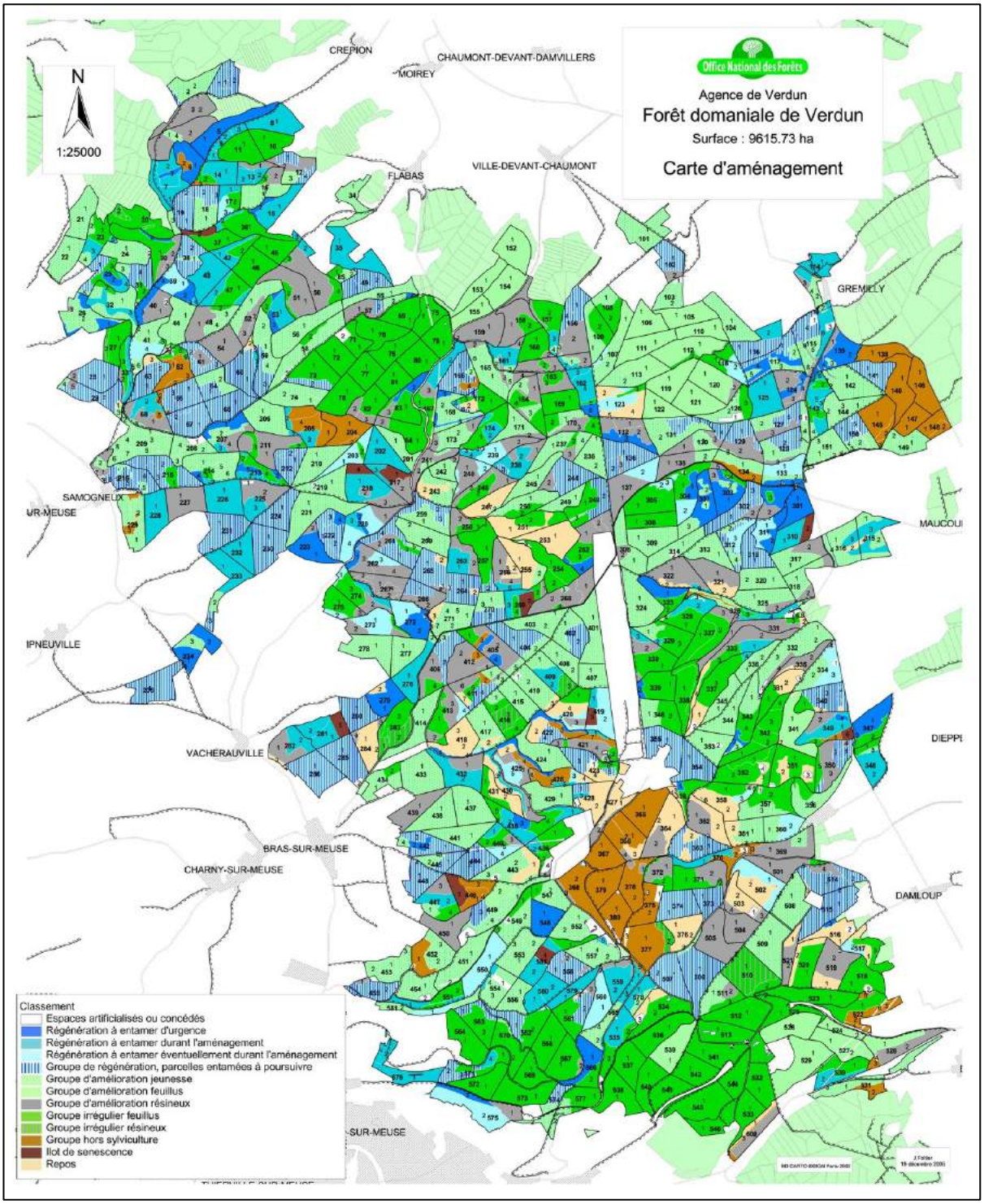


***Figure 8.5** – Carte de l'aménagement forestier 2006-2020 (ONF - Agence de Verdun)*

Type de peuplement	Taux d'effacement moyen (en %)	Nombre de parcelles concernées
Feuillus adultes	55,2	77
Résineux	57,73	200
Feuillus juvéniles	59,79	70
Milieux ouverts	62,13	133

***Tableau 8.2** – Taux d'effacement des fossés par type d'occupation du sol*

Les parcelles résineuses possèdent un taux d'effacement moyen de l'ordre de 57,73 %, tandis que les parcelles en peuplements feuillus juvéniles le sont à 59,79 %. Enfin, ce taux est le plus élevé pour les milieux ouverts où il atteint près de 62,13 %.

Cette hausse des valeurs est probablement corrélée au nombre et/ou à l'intensité des interventions anthropiques sur le milieu. Pour justifier cela, prenons connaissance des différents travaux entrepris par les forestiers pour chaque type de peuplements :

- Pour les anciens bois d'avant-guerre (feuillus adultes ; *e.g.*, parcelles 10, 80, 119, 308, 529, 568), des travaux sylvicoles importants furent menés au lendemain de la guerre. Les forestiers intervinrent de deux manières. D'abord, ils procédèrent à un nettoyage du terrain en éliminant les bois endommagés (car vulnérables aux infections) et en éclaircissant le sous-bois colonisé par les broussailles ; puis ils reboisèrent les trouées à l'intérieur de ces anciens espaces boisés soit par semis, soit par plantation (Amat, 2001 ; Buridant, 2006 ; Amat, 2015). Entre cette phase de restauration et notre époque, **la dynamique spontanée** a dominé permettant de reconstituer « *une forêt qui n'est donc pas trop éloignée de la forêt « climacique » des Côtes de Meuse* » (ONF, 2005). Ponctuellement, des travaux de dégagement furent réalisés. Les parcelles proches de Verdun furent par moment exploitées pour fournir du bois de chauffage aux populations (ONF, 2005). **La disparition des fossés dans ces parcelles pourrait être liée aux premiers travaux sylvicoles de la décennie de la Reconstruction (1919-1932) auxquels s'ajoutent l'ouverture de cloisonnements et d'axes de communication dans les années 1970** (second plan d'aménagement de 1974).
- Les résineux (*e.g.*, parcelles 8, 35, 159, 272, 317, 535) constituent la première vague de boisement des anciennes terres agricoles et sont destinés à préparer les sols en vue de l'introduction d'espèces feuillues (figure 8.6). Dès 1920, des opérations de désobusage furent menées consistant à purger les engins de guerre et autres objets métalliques de surface.Dans le seul périmètre de la forêt domaniale de Verdun, ce nettoyage représente le chiffre exceptionnel de 200 000 t (Amat, 2015). Face à la reconquête végétale et au manque de moyens financiers, **aucun nivellement ne fut réalisé**, **hormis pour les voies d'accès aux nouvelles parcelles**. Les plantations de résineux faites en ligne à espacement constant recoupaient fossés et cratères d'obus. Le plan d'aménagement de 1974 apporta des améliorations dans les peuplements résineux qui échouaient en procédant à des nivellements, censés faciliter le développement de nouveaux individus. **Mais cette opération**, **quoique loin d'être systématique**, **fut catastrophique** : « *elle gomme les traces du passé* », c'est-à-dire les polémoformes, et

« *bouleverse des sols*[8] *qui étaient en cours de lente reconstitution* » (Steinbach et Husson, 2007). Par « reconstitution du sol », il faut entendre ici la reconstitution progressive de l'horizon de surface, humifère. En complément, l'exploitation des individus plantés, entièrement menée au moyen d'engins mécanisés destructeurs, impliquait **de nombreux cloisonnements**, aujourd'hui visibles sous la forme de lignes parallèles espacées de quelques dizaines de mètres (figure 8.6). De ce fait, il est logique de constater une hausse du taux d'effacement des fossés pour ce type de peuplement par rapport à la catégorie précédente.

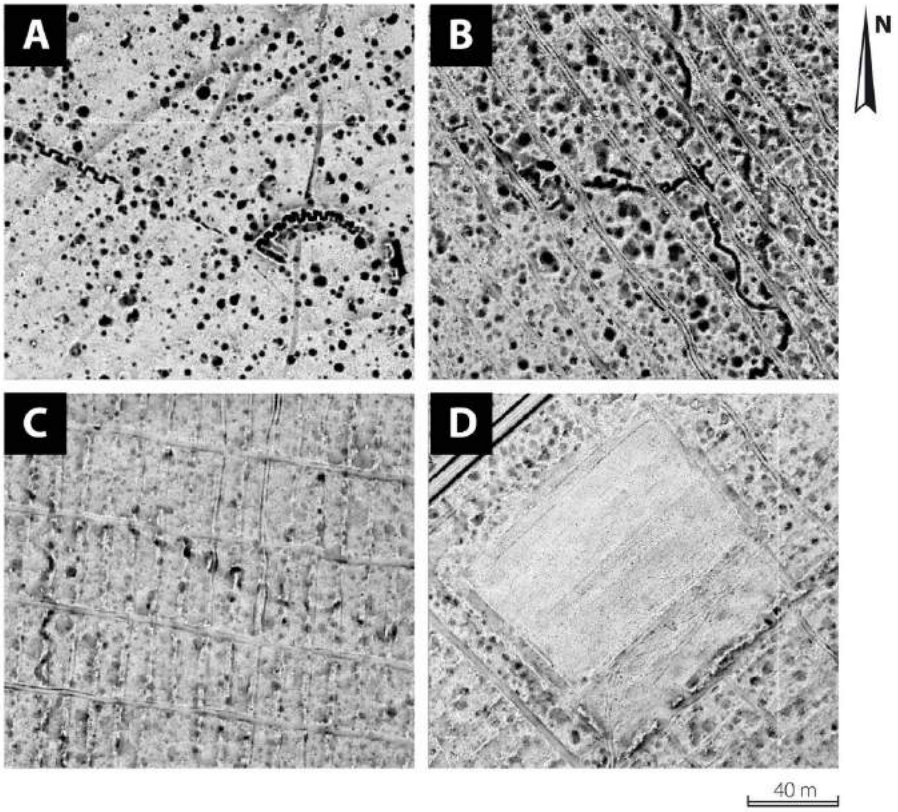


Figure 8.6 *– Aperçu de la topographie des parcelles sous différents types de peuplement. A : peuplement feuillus adulte associé à un bois d'avant-guerre (parcelle 106). B : peuplement résineux (parcelle 218). C : peuplement de jeunes feuillus (parcelle 277). D : milieu ouvert, champ de culture (parcelle 410). Les quatre images ont été générées via la méthode du SVF.*

- Les jeunes feuillus (*e.g.*, parcelles 52, 67, 141, 362, 403, 441) remplacent les futaies résineuses. En 1974, les peuplements résineux en bonne santé arrivaient à l'âge d'exploitabilité. **L'ONF s'engagea dans une phase de transformation progressive des résineux en feuillus**, principalement le hêtre, climacique en Lorraine. La méthode de gestion choisie fut et reste encore dans certaines parcelles[9] la méthode du

[8]Par « reconstitution du sol », il faut entendre ici la reconstitution progressive de l'horizon de surface, humifère.

[9]Il a été décidé de maintenir une partie des résineux de la forêt pour conserver la mémoire forestière.

groupe de régénération stricte, favorisant le développement des individus à renouveler (le hêtre) au moyen de coupes d'amélioration[10] (sur les résineux), la finalité étant de retirer tous les résineux une fois la croissance des jeunes hêtres assurée. Dans la plupart des cas, cette régénération est artificielle. L'opération implique la mise en terre de plants de hêtres sous les résineux par plantation en bande, à environ 12 m d'intervalle, avec coupe d'abri, entre lesquelles sont aménagés des cloisonnements pour les engins agricoles. **Ces travaux sont assez destructeurs dans la mesure où les cloisonnements**, **perpendiculaires aux anciennes lignes de la plantation**, **entraînent un nivellement tous les 20 à 30 m** (intervalle moyen entre les cloisonnements ; figure 8.6). En conséquence, une hausse du taux d'effacement moyen est constatée dans les parcelles de jeunes feuillus, assez faible (+ 2,06 pts par rapport aux peuplements résineux et + 4,59 pts par rapport aux feuillus adultes).

- Les milieux ouverts sont de plusieurs types : prairies, champs de culture et fruticées. Les prairies s'observent fréquemment au sud de la forêt à proximité des sites de mémoire (*e.g.*, parcelles 404, 378, 526, 543, 554). Elles servent à dégager les vues et à faciliter les accès. Elles sont de ce fait très fréquentées et parfois aménagées en aires de repos. **L'érosion des formes y est plus intense** comme l'illustre la hausse du taux d'effacement dans ces milieux (+ 2,34 pts par rapport aux feuillus juvéniles et + 6,93 pts par rapport aux feuillus adultes ; tableau 8.2). En réalité, cet accroissement tiendrait surtout aux modes de gestion, notamment sur les champs de culture. Ces derniers sont des pépinières (cf. *supra*, chapitre 2, projet Giono ; *e.g.*, parcelles 285, 434), ou des cultures à gibier (*e.g.*, parcelles 58, 208, 314, 332, 343, 444), notamment pour le cerf, le chevreuil et le sanglier, abondants dans le massif. Dans ce dernier cas, les cultures, maïs, luzerne et topinambours **exigent des travaux agricoles par voie mécanique**. Le taux d'effacement y est de ce fait le plus haut de la forêt domaniale, sans excéder toutefois 61,48 %. Les fruticées, elles, ne se trouvent que sur les 193 ha du plateau de Douaumont, seul espace du champ de bataille maintenu en dynamique spontanée depuis la fin du conflit. Se pose donc la question de la conservation dans ce périmètre formé par les parcelles 365, 366, 367, 375, 378, 379 et 380. Assez logiquement, **le taux d'effacement de fossés y est particulièrement bas**, **soit 35,39 %** (23,53 pts en-dessous de la moyenne). Comment expliquer ce chiffre encore assez élevé alors qu'aucune intervention forestière n'a été faite dans ce secteur ? La réponse se trouve dans les processus naturels propres au plateau de Douaumont, particulièrement humide du fait de sa position géomorphologique à l'affleurement de la nappe phréatique. Nous pouvons suggérer que l'humidité du milieu a déstabilisé les pentes des fossés et favorisé leur remblaiement. Ces explications ouvrent la voie à une réflexion sur l'influence des processus naturels dans la disparition des polémoformes (cf. *infra*, § 1.3.2).

[10]Selon l'ONF, les coupes d'amélioration permettent « *d'éclaircir les peuplements trop denses et exploiter les arbres moins bien conformés au profit des plus beaux arbres* » (http://www.onf.fr/enforet/++oid++4c9e/@@display_event.html).

En complément des travaux sylvicoles, **d'autres facteurs anthropiques sont à l'origine de dégradations du polémorelief**, mais plus difficilement quantifiables. 1) Les nombreux aménagements ont complètement fait disparaître la topographie passée : axes routiers, ossuaire de Douaumont, nécropole de Fleury, mémorial de Verdun, parkings autour des forts, sentiers pédestres (dans une moindre mesure) représentent plusieurs centaines d'hectares. 2) Les visiteurs contribuent à l'érosion des polémoformes, notamment par le piétinement hors des sentiers balisés. Les comportements sont parfois inconscients (activités sportives, amusements dans les tranchées). Au vu des milliers de pèlerins qui visitent chaque année la forêt domaniale (1 070 168 en 2016, incluant les visites de la Citadelle souterraine de Verdun ; Gérard, 2017), une partie des dégradations engendrées sur le polémorelief est imputable à l'activité et aux flux touristiques. Les parcelles bordant les grands axes routiers et aires de repos seraient certainement les plus concernées. 3) Paradoxalement, les associations responsables de la patrimonialisation du site contribuent aussi à l'altération des modelés hérités de la guerre. Les démarches de réaménagement du champ de bataille peuvent être destructrices lorsqu'elles ne sont pas réfléchies en amont et accompagnées par des professionnels de l'archéologie et de la gestion patrimoniale. Ainsi, la mise au jour expose les vestiges enfouis aux intempéries, à l'érosion et aux actes de pillage. Par un accompagnement scientifique, guidé par des spécialistes des fouilles archéologiques, le maintien du polémorelief serait davantage garanti (Schnitzler et Landolt, 2013). 4) Autre catégorie d'acteurs, les pilleurs, depuis peu surnommés « détectoristes » par les archéologues sont les véritables destructeurs du patrimoine archéologique. L'augmentation du nombre de cas de pillage est en grande partie liée à l'essor des nouvelles techniques de détection de métaux. En dépouillant la forêt de ses trésors archéologiques, ces voleurs non seulement saccagent les microreliefs (de par leur action de creusement) mais encore privent les archéologues et les historiens militaires d'informations indispensables à l'interprétation des vestiges de guerre. Malheureusement, ces comportements sont difficilement contrôlables car le trafic d'objets archéologiques forme un commerce illégal très lucratif sur ce territoire comme ailleurs dans le monde (Jacquemot et Legendre, 2011 ; Schnitzler et Landolt, 2013). Pour contrer ces actes malveillants, l'État a instauré une collaboration entre le ministère de l'Intérieur et la sous-direction de l'archéologie. Ainsi, selon les articles 311-4 et 322-3 du Code pénal, les pilleurs encourent une peine de 150 000 euros d'amende et de dix ans de prison si le délit est commis en bande organisée.

1.3.2. Effet de remaniement du polémorelief par ruissellement et colluvionnement

Comme l'ont souligné Arnould et Simon (1994) au Chemin des Dames, « *les parapets et parados des tranchées ont perdu un peu de substance par érosion et les fonds de tranchées se sont légèrement colmatés* ». Pour investir pleinement ce sujet sur le rôle des processus naturels dans la disparition des polémoformes en forêt domaniale de Verdun, il aurait été nécessaire de réaliser une série de carottages sur le terrain afin de mesurer précisément l'épaisseur des

dépôts dans les polémoformes et dans leurs alentours. Cette opération n'a pas été réalisée mais le sujet a déjà été évoqué par trois auteurs.

Les recherches menées par Hupy (Hupy, 2005 ; Hupy et Schaetzl, 2006, 2008 ; Hupy et Koehler, 2012) sur le site de Verdun ont aussi porté sur la pédogénèse post-conflit. L'étude de coupes de sol sur quelques cratères d'obus **a révélé que ces polémoformes possédaient en leur fond des épaisseurs de dépôts plus importantes que sur des sols non perturbés** (figures 8.7 et 8.8).

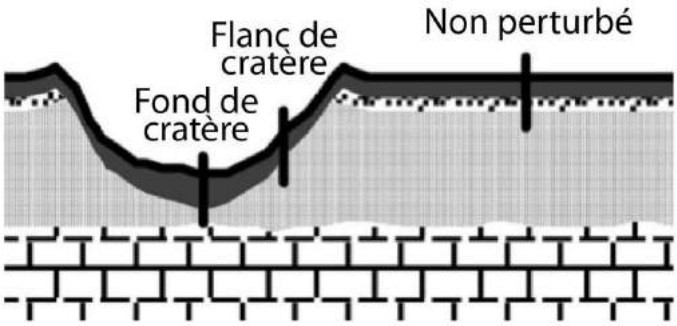


Figure 8.7 – *Différences d'épaisseur de dépôts en milieu perturbé et non perturbé (traduit de Hupy et Schaetzl, 2008)*

Dans l'Herbebois, l'épaisseur moyenne des dépôts organiques (horizon O) dans trois cratères d'obus atteignait 10 cm. En complément, il a été constaté un épaississement de l'horizon organo-minéral (horizon A) par rapport aux sols intacts situés à proximité. **L'épaisseur combinée des deux horizons avoisinait les 20 cm dans le fond des cratères d'obus alors qu'elle n'était à quelques mètres que de 4 cm sur les sols non perturbés**, témoignant d'une pédogénèse plus poussée dans les cratères. Ce constat est lié à un double phénomène : 1) les eaux superficielles sont captées par ces dépressions en entonnoir, engendrant une accumulation de débris organiques en leur fond (colluvionnement) ; 2) l'accroissement des épaisseurs de dépôts organiques et de la percolation des eaux de surface favorise le lessivage et accélère la pédogénèse, phénomène qui justifie les épaisseurs différentes des horizons O et A entre les deux milieux sondés. Une étude similaire à celle de Hupy a été conduite quelques années plus tôt par Schwartz *et al.* (2003) dans le Bois-le-Prêtre, massif largement touché par les combats de 1914-1918, situé en Meurthe-et-Moselle à environ 60 km au sud-est de Verdun. Du fait de la relative proximité des deux sites, les conditions géomorphologiques qui les caractérisent sont assez proches, rendant leur comparaison pertinente. L'échantillonnage mené au moyen de coupes pédologiques a été réalisé sur une tranchée et sur un cratère d'obus. Comme à Verdun, **il a été constaté un comblement partiel des polémoformes**, **de l'ordre de 65 cm pour la tranchée** (profil I) **et 23 cm pour le cratère d'obus** (profil IV), suggérant l'hypothèse d'une aggradation plus forte dans les fossés que les cratères d'obus. En résumé, **l'amplitude du remblaiement des**

polémoformes de la forêt de Verdun pourrait être comprise entre 20 et 65 cm[11] mais il nous paraît difficile de généraliser ces chiffres à l'ensemble du massif étant donné le faible nombre d'échantillons analysés, qui plus est, sur des sites différents.

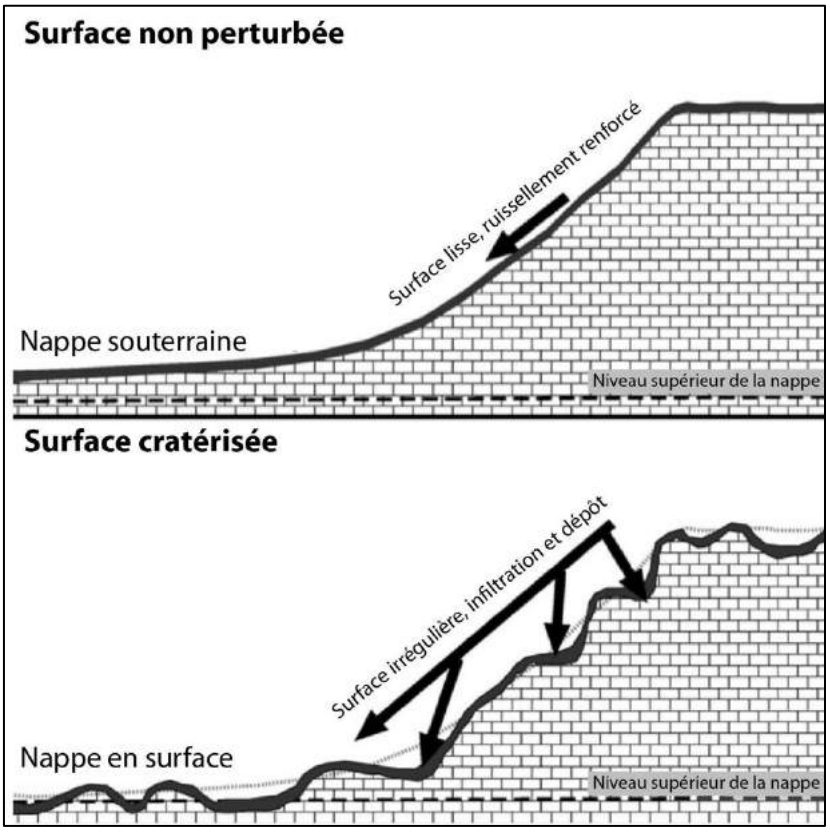


Figure 8.8 *– Conséquences des bombardements sur l'hydrologie de surface (traduit de Hupy et Schaetzl, 2008)*

Par ailleurs, les deux études mentionnées ont été menées sur des terrains plats qui ne permettent pas d'apprécier l'ampleur des processus de remblaiement dans les vallons pourtant nombreux en forêt de Verdun. Sous l'effet de la gravité et de l'augmentation des pentes, le colluvionnement est plus intense sur les versants, favorisant probablement l'écrêtement des polémoformes. Les recherches entreprises par Ollive (2014) sur la côte du Poivre ont permis de répondre en partie à cette problématique bien qu'elles n'aient pas directement porté sur la mesure de dépôts au sein des polémoformes. La méthodologie déployée a consisté à digitaliser les courbes de niveau d'un plan directeur français au 1/20 000 et de la carte topographique actuelle de l'IGN au 1/25 000 puis à créer deux MNT à partir de l'interpolation des points résultant du traçage des courbes. Les deux modèles ont ensuite été soustraits afin de mettre en lumière les zones de dépôts et d'érosion. **Il a en a résulté l'enregistrement de valeurs d'érosion assez importantes dans les talwegs** (érosion

[11]Un chiffre de 50 cm est également proposé par Steinbach et Husson (2006).

linéaire) **avec un maximum de 12 m dans le ravin de Parfondevaux**, au nord du secteur d'étude. À l'inverse, **les phénomènes de dépôts ont pour la plupart été localisés à mi-versant et dans les fonds de vallon, avec des épaisseurs pouvant aller jusqu'à 15,5 m à l'est du bois Bride**. Au-delà des biais méthodologiques possibles, de telles valeurs peuvent être reliées au caractère instable des matériaux recouvrant le plateau des Hauts de Meuse dans ce secteur (déblais et remblais), en lien avec le brassage continuel des sols par l'artillerie et le creusement de tranchées (pour rappel, les densités les plus importantes de fossés ont été relevées sur la côte du Poivre). En conséquence, ces matériaux ont été remobilisés par les eaux ruisselantes, s'écoulant par les talwegs et déposant leur charge solide à mi-versant et dans les fonds de vallon, à l'intérieur même des polémoformes. Aucun lien avec le substrat sous-jacent n'a en revanche été trouvé par Ollive (2014), constat que nous confirmons après avoir confronté la carte du taux d'effacement des fossés et la carte géologique (à l'exception peut-être des zones humides).

Pour confirmer les observations faites par Ollive (2014) et afin d'identifier un éventuel lien entre la disparition des polémoformes et la situation topographique, nous avons croisé la carte des taux d'effacement de fossés avec le MNT LiDAR et la carte de pentes (tableaux 8.3 et 8.4). Paradoxalement, **l'analyse des relations altitude/effacement à l'échelle des parcelles montre que la situation topographique n'a aucune influence sur l'érosion des fossés**. Alors que l'on s'attendait à observer une érosion accrue dans les parcelles implantées à mi-versant ou dans les fonds de vallon, il n'existe quasiment pas de différences entre les trois classes topographiques analysées (fond de vallon, mi-versant, sommet de plateau). **Même constat pour les pentes où les taux d'effacement les plus faibles sont dans les parcelles où la moyenne des pentes est la plus forte**.

Ces résultats suggèrent deux hypothèses : 1) aucun lien n'existe entre la topographie et le taux d'effacement ; 2) les phénomènes d'érosion sont invisibles à notre échelle d'analyse (les parcelles) et nécessiteraient un affinement de l'échelle pour être appréciés (*e.g.*, échelle des formes topographiques : lignes de crête, versants, talwegs). La seconde hypothèse est plus probable compte tenu des résultats obtenus par les trois études sus-citées. Un moyen de l'affirmer consisterait à utiliser localement des photographies aériennes d'époque pour évaluer le taux de reliefs disparus. Mieux encore, nous pourrions utiliser la photogrammétrie à partir de ces documents pour reconstituer un MNT d'époque, à l'image des expérimentations faites par Stichelbaut (2009) et Ollive (2014) sur quelques photographies.

Altitude (en m)	Taux d'effacement moyen (en %)	Nombre de parcelles concernées
Fond de vallon (205-274)	58,39	130
Mi-versant (275-314)	58,90	173
Sommet de plateau (315-375)	59,32	177

Tableau 8.3 – *Taux d'effacement des fossés par classe d'altitude*

Pente (en degrés)	Taux d'effacement moyen (en %)	Nombre de parcelles concernées
Pente faible (4,95-9)	58,41	244
Pente modérée (10-14)	60,44	227
Pente forte (15-17,72)	51,37	6

Tableau 8.4 – *Taux d'effacement des fossés par classe de pente*

Enfin, **le taux d'effacement est plus faible dans certains réseaux allemands du nord de la forêt**, qui ont mieux résisté à l'épreuve du temps en raison des matériaux et des modes de construction (murs maçonnés ou bétonnés, gabions, etc.). De nombreux auteurs ont rapporté ces observations. « *Vers 1930 déjà, un témoin* […] *s'étonnait de retrouver des positions allemandes quasi intactes alors que les travaux français « n'ont pu résister aux intempéries d'un seul lustre* » (Péricard ; cité par Gaber, 1998). Toutefois, comme l'affirme Gaber (1998), « *il ne faudrait cependant pas en conclure que rien de sérieux n'aurait été construit par les Français* ». Les doctrines d'emploi de l'infanterie interviennent dans ces différences de conservation (cf. *supra*, chapitre 7).

Ainsi le temps met-il en péril ce patrimoine archéologique et géomorphologique du plus grand champ de bataille sauvegardé de la Grande Guerre, à la fois par des processus anthropiques intenses et par des actions naturelles, plus discrètes : « *La vitesse du processus amène à penser que, sauf rupture, d'ici à quelques décennies, les reliefs les moins marqués devraient être gommés par la seule action des éléments naturels* » (Steinbach et Husson, 2006). **Pour ralentir ces effets – et si on souhaite le faire – il convient de mettre en place des actions de protection sur le champ de bataille**. **La conservation des polémoformes passe aussi par des actions de médiation auprès du grand public**. En donnant au visiteur les moyens d'interpréter les paysages de guerre (panneaux d'interprétation, cartes des polémoformes, visions des paysages passés, sensibilisation sur les risques encourus par des fouilles archéologiques clandestines), ce dernier s'adapte et diminue ses actions sur le milieu, contribuant ainsi à la conservation de la polémotopographie. C'est en particulier sur ces initiatives conservatoires et de valorisation que porte la seconde section de ce chapitre.

2. Enjeux de conservation et actions de médiation et vulgarisation

L'idée de la conservation des polémoformes, portée par le comité de pilotage du projet « *Forêt d'Exception* », n'est pas de préconiser des méthodes précises de protection du patrimoine archéo-géomorphologique mais de suggérer deux cartographies, la première sur les zones sensibles (nombre important de vestiges conservés) et la seconde sur les zones où des mesures de protection seraient prioritaires (vestiges en cours de disparition). Sont ensuite présentées les actions de médiation et de vulgarisation conduites durant la thèse contribuant indirectement à la conservation des polémoformes. Le chapitre se conclut par une discussion sur la valeur géopatrimoniale de la forêt domaniale de Verdun et sur les

possibilités d'en faire un géomorphosite, statut qui favoriserait le maintien en l'état de la polémotopographie.

2.1. Les polémoformes, l'un des derniers témoignages physiques de la Grande Guerre

La Première Guerre mondiale a marqué nos paysages autant que nos mémoires, sans doute, pour une part, par sa violence et de ses conséquences sur l'environnement et les populations. Elle ne doit pas être oubliée car elle fait partie intégrante de notre histoire. Mais comment faire pour se la rappeler sans l'avoir vécu ? Cette mémoire de la guerre a en partie disparu le le 5 mai 2011, avec la mort de Claude Choules (britannique décédé à l'âge de 110 ans), dernier combattant vivant de la Première Guerre mondiale. Jusqu'alors, les soldats survivants étaient les seuls êtres humains à entretenir un lien direct avec le passé. Cette mémoire s'est estompée puis a disparu. Dans un premier temps, on note la disparition progressive de notre patrimoine immatériel, constitué par les témoignages recueillis par les familles auprès de leurs ancêtres décédés.

D'un autre côté, on voit émerger d'autres processus, en lien avec le passé mais toujours aussi présents de nos jours : le patrimoine matériel de la Première Guerre mondiale. **Les polémoformes et autres vestiges de guerre sont l'un des seuls éléments physiques qui nous restent de cette guerre**. Pourtant, ce type d'objet a souvent été mis de côté en raison de la prépondérance accordée aux mémoriaux (Jacquemot et Legendre, 2011 ; Schnitzler et Landolt, 2013). Les arbres, les sols ou encore le relief ont permis de fixer ce champ de bataille, parfois de manière spectaculaire comme en forêt de Verdun. Il est indispensable de conserver ces paysages. Tâche qui reste particulièrement complexe quand on sait qu'une grande partie de ces vestiges sont en voie de disparaître notamment parce qu'ils ne bénéficient pas ou peu de mesures conservatoires (Schnitzler et Landolt, 2013). Notre rôle consiste à produire des fonds documentaires opérationnels pour entreprendre la sauvegarde des polémoformes, en particulier, et du patrimoine archéologique qui leur est associé. En d'autres termes, la thèse promeut une approche conservatoire qui implique de réfléchir sur les vestiges à conserver en priorité. Dès lors, deux questions peuvent se poser : 1) qu'entendons-nous par *conservation* ? ; 2) que faire de ces millions de polémoformes ?

Il existe une certaine ambiguïté dans l'emploi du mot *conservation*, du fait de sa proximité avec les mots *préservation* et *protection*, dont les sens sont pourtant différents. Cette confusion trouve aussi ses sources dans la définition qui lui est associée dans la langue anglaise, *conservation* pouvant se traduire en français par *préservation* (Bétard, 2017). Pour clarifier ces termes, il convient d'abord de définir la notion de *protection*. En Français, *protéger* désigne l'action d'instaurer des modes de gestion destinés à empêcher la disparition d'un site ou d'un objet. Un site Natura 2000, un parc naturel ou une réserve naturelle, constituent autant d'exemples d'outils de protection règlementaires destinés à garantir le maintien des écosystèmes (Depraz, 2008). *Conserver* et *préserver* constituent deux manières de *protéger*. « *La*

conservation s'identifie à la volonté de défendre, de garder des ressources en bon état » alors que « *la préservation signifie davantage mettre en l'état à l'abri des dégradations ou de la destruction* » (Glon, 2005). Dans le cas des polémoformes de la forêt de Verdun, le terme conservation est le plus approprié car la démarche conservatoire implique la mise en place de pratiques intégrant les enjeux humains (exploitation forestière), au contraire de la préservation, qui se fonde sur « *une protection sans intervention humaine associée à l'idée de sanctuarisation* » (Bétard, 2017).

À l'instar de la célèbre polémique « *doit-on reboiser Verdun ?* » qui avait fait surgir dans les années 1925-1929 des tensions calomnieuses entre l'État et les associations d'anciens combattants (Amat, 1987, 2001, 2015), l'ancien champ de bataille suscite un nouveau débat, certes moins virulent, mais qui doit être réfléchi : « *doit-on tout conserver ?* » La question est déjà évoquée depuis un certain temps, précisément depuis le 9 juillet 2001, date d'application de la loi d'orientation sur la forêt, engageant l'ONF dans un mode de gestion plus équitable intégrant conservation du patrimoine archéologique et exploitation forestière (Jacquemot et Legendre, 2011). Une nouvelle phase de concertation eut lieu en 2004 avant l'élaboration du plan d'aménagement forestier 2006-2020 (ONF, 2005). Elle donna lieu à la mise en place de plusieurs zonages de protection sur le périmètre domanial, tenant compte à la fois des spécificités règlementaires de la forêt (site classé *Partie centrale du champ de bataille de Verdun* et *Monuments historiques*) et des enjeux historiques cartographiés par Amat (2001). Pour les tranchées et boyaux de communication, « *l'ONF s'engage* […] *à adapter la disposition des axes à niveler à l'inventaire et, en présence de vestiges, à ne pas niveler plus de 20 % de la surface (ce qui correspond à un axe nivelé de 4 m de large tous les 20 m). Cependant, et afin de ne pas handicaper trop lourdement la desserte des parcelles, l'ONF s'autorisera si nécessaire le nivellement d'un passage sur les tranchées tous les 40 m* » (ONF, 2005). En ce qui concerne les autres vestiges bâtis (*e.g.*, bunkers), « *ils feront l'objet d'un respect strict par la gestion et l'exploitation forestière ; une zone de 5 à 20 m de rayon autour de chaque ouvrage sera maintenue non nivelée et interdite de passage aux engins* » (ONF, 2005). Un dernier point important du rapport mentionne que « *ce zonage n'empêchera pas les gestionnaires de porter toute l'attention souhaitable aux vestiges situés en dehors des zones délimitées* ». La cartographie semi-automatique réalisée dans le cadre de la thèse possède là tout son intérêt car elle permet de connaître la localisation précise des vestiges de guerre situés en dehors des zonages définis dans le plan d'aménagement 2006-2020. En complément, le LiDAR permet d'apprécier l'état de conservation de ces vestiges et de cibler les parcelles où leur effacement est particulièrement avancé. Par ailleurs, il y a nécessité de conserver autant que possible les polémoformes dépourvues de valeur archéologique, car celles-ci peuvent présenter d'autres valeurs d'un intérêt crucial pour les paysages de la forêt domaniale de Verdun. Ainsi, les cratères d'obus contribuent à accroître la richesse du site de par leur intérêt géomorphologique (cf. *infra*, § 2.4) et écologique (cf. *infra*, chapitre 9). Au bilan, l'intégralité des polémoformes présentes en forêt de Verdun ne peut être protégée mais la combinaison des cartes du plan d'aménagement de 2006-2020 et de nouvelles données issues du LiDAR doit permettre, autant que faire se peut, de les conserver.

2.2. Cartographie des zones prioritaires de conservation

Pour aider au déploiement de mesures de protection sur l'ancien champ de bataille, nous proposons de construire deux cartographies destinées à devenir des outils d'aide à la décision en matière de conservation du patrimoine archéo-géomorphologique de la forêt, en particulier les vestiges de guerre (les cratères d'obus sont exclus de l'analyse). Ces documents se fondent sur les données recueillies par le croisement des données LiDAR et des archives :

- La première carte se destine à **localiser les parcelles dont l'héritage patrimonial est particulièrement fort** : nombre de vestiges importants et bien conservés ;
- La seconde carte a pour objectif de **situer les parcelles où les vestiges sont menacés de disparition**, c'est-à-dire celles où l'érosion est particulièrement avancée et où le nombre de vestiges est important.

Le maillage privilégié pour la réalisation des deux cartes est la parcelle de gestion pour les raisons déjà évoquées.

La réalisation de la première carte que nous nommons *Carte de sensibilité patrimoniale* se fonde sur les quatre critères suivants :

- Nombre d'abris et positions d'artillerie (D4, D5 et D6) de fiabilité maximale ;
- Richesse des vestiges (nombre de classes D4, D5 et D6) ;
- Kilométrage de fossés (D9 et D10) ;
- Taux de conservation des fossés (inverse du taux d'effacement des fossés ; la transformation est décrite dans le point 3 ci-dessous).

La carte a exigé les traitements suivants (sur ArcGIS®) :

1) Une jointure spatiale est effectuée entre la couche vectorielle des parcelles de l'ONF et les quatre variables mentionnées (à ce moment précis, la quatrième variable correspond toujours au taux d'effacement de fossés). Le résultat permet d'obtenir une unique couche vectorielle (les parcelles) comprenant les informations de chaque variable dans la table attributaire ;
2) Un raster est créé pour chacune des quatre variables en convertissant la couche précédente en raster (*Polygone vers raster*) et en adaptant à chaque fois le champ de valeurs sur la variable souhaitée (résolution spatiale de 1 m).
3) Le taux d'effacement des fossés est converti en taux de conservation grâce à la fonction *redimensionner par*. L'option *SymmetricLinear* est choisie pour inverser les valeurs.
4) Les quatre rasters obtenus sont normalisés de 0 à 1 pour comparaison, à l'aide de la fonction *redimensionner par* et l'option *Linear*.
5) Les quatre rasters sont additionnés à l'aide de la *Calculatrice raster*.
6) Le raster final obtenu est normalisé de 0 à 1 et discrétisé en trois classes de sensibilité (faible, moyenne, forte) par amplitudes égales (0,33).

La réalisation de la seconde carte des *Zones prioritaires de conservation* prend en compte les cinq critères suivants :

- Nombre d'abris et positions d'artillerie (D4, D5 et D6) de fiabilité maximale ;
- Richesse des vestiges (nombre de classes D4, D5 et D6 de fiabilité maximale présentes) ;
- Kilométrage de fossés (D9 et D10) ;
- Taux d'effacement des fossés ;
- Fréquentation touristique (zone tampon de 100 m autour des axes routiers).

Les étapes à suivre pour la construction de la carte sont les suivantes :

1) Les étapes sont identiques à la première cartographie jusqu'à l'étape 4 (à l'exception de l'étape 3 car le taux d'effacement des fossés est utilisé) ;
2) Les cinq rasters sont combinés à l'aide de la fonction *Somme pondérée*, permettant de les additionner et de leur associer une valeur de pondération. La hiérarchisation est la suivante : pondération de 1 pour la fréquentation touristique ; pondération de 2 pour le nombre et la richesse d'abris et positions d'artillerie et le kilométrage de fossés ; pondération de 3 pour le taux d'effacement des fossés.
3) Le raster final est normalisé et discrétisé en trois classes de priorité (faible, moyenne, forte) par amplitudes égales (0,33).

La figure 8.9 résume l'information décrite par la figure 7.6 et l'annexe E en situant précisément les parcelles à haute densité de constructions. **Elle révèle que les parcelles à forte sensibilité patrimoniale se situent sur les positions aménagées sur le champ de bataille entre 1914 et 1918** (*e.g.*, parcelles 217, 229, 252, 281, 321, 351, 420, 454, 502).

En complément, **ces parcelles se retrouvent régulièrement dans les peuplements feuillus adultes** (bois d'avant-guerre) où la conservation des vestiges est relativement bonne (*e.g.*, parcelles 11, 78, 111, 140, 253, 286, 542). Les parcelles moins sensibles se localisent quant à elles en dehors du centre, entre les positions du nord et du sud de la forêt, ainsi que dans les zones anciennement agricoles massivement plantées en résineux après le conflit (*e.g.*, parcelles 17, 59, 144, 236, 332, 554). De grands vides apparaissent dans le ravin de Coassinvaux, entre le bois d'Haumont et le bois des Caures, au sud du bois de la Wavrille, entre les Côtes de Meuse et les Jumelles d'Ornes, dans le ravin des Vignes. Notons également la présence de hiatus dans le plateau de Douaumont et aux abords du fort de Douaumont, où les constructions sont rares en raison des nombreux bombardements subis. La figure 8.10 montre une information assez différente dans la mesure où **les parcelles à forte sensibilité patrimoniale ne correspondent pas forcément aux parcelles à conserver en priorité**. C'est le cas par exemple du bois d'Ormont (parcelle 11), du bois de Brabant (parcelles 20 et 30), de l'Herbebois (parcelles 105, 110 ou 111), des environs de l'ouvrage d'Hardaumont (parcelles 356, 357, 360 ou 361) ou du bois des Caurrières (parcelles 321, 322 ou 328), secteurs qui ont en commun d'abriter de nombreux vestiges, la plupart en bon état de conservation, et d'être en marge des grands axes routiers (c'est-à-dire de la fréquentation touristique).

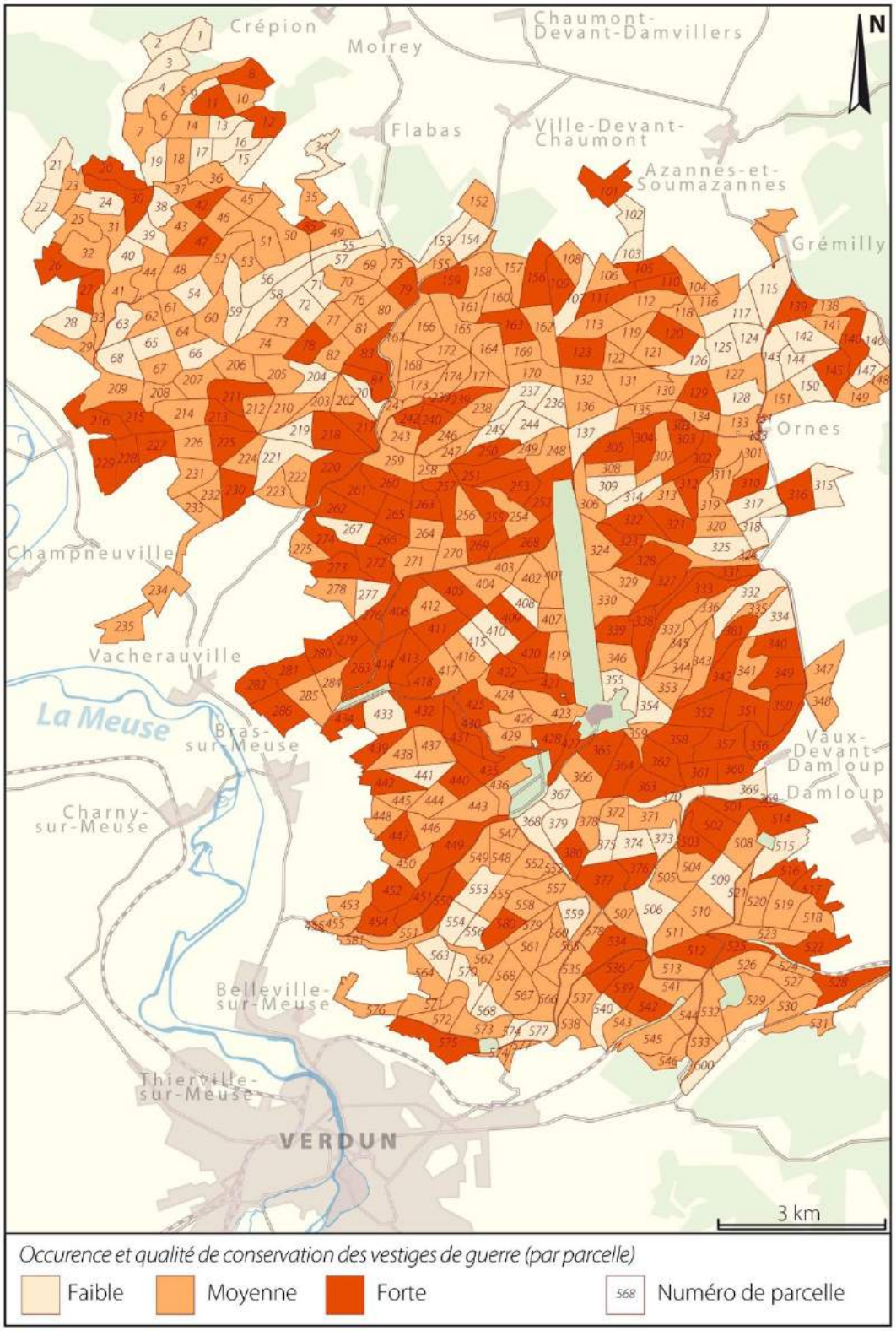


***Figure 8.9** – Carte de sensibilité patrimoniale*

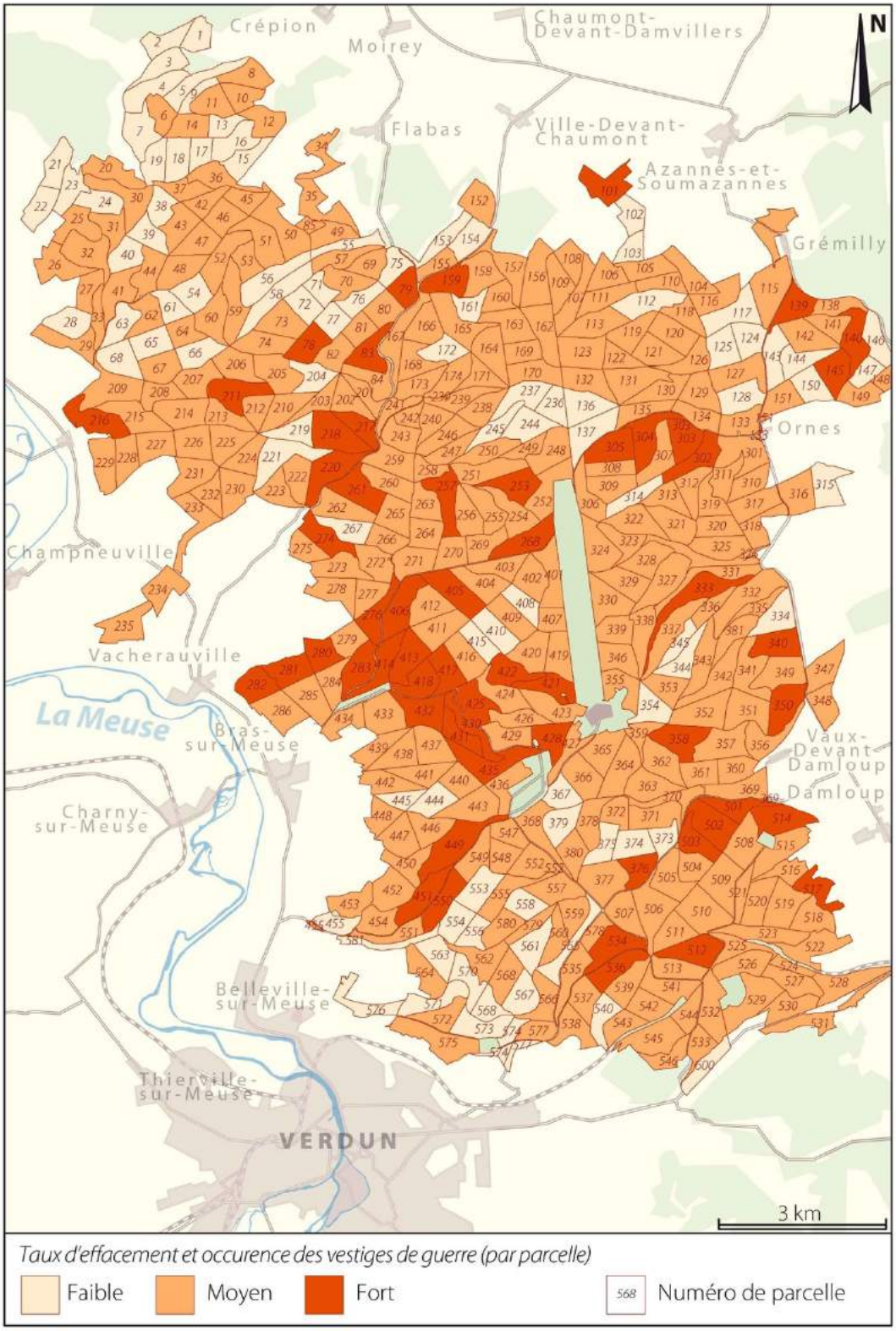


Figure 8.10 – *Carte des zones prioritaires de conservation*

Les secteurs les plus riches en vestiges et les plus vulnérables sont à l'inverse très proches des routes et des sites de mémoire. Un amas de parcelles à conserver en priorité apparaît en particulier dans le ravin de la Mort et à proximité de l'ancienne ferme d'Haudromont (parcelles 283, 413, 414, 431 ou 432), traversés par la route menant de l'ossuaire de Douaumont à Bras-sur-Meuse, équipée d'une aire de repos. Dans une moindre mesure, c'est aussi le cas dans le bois Fumin (parcelles 503, 502), près du fort de Souville (parcelles 534 et 536), de l'ouvrage de Froideterre (parcelles 449, 451 et 550), sur la côte du Poivre (parcelles 280, 281 et 282), dans le bois le Chaume (parcelles 302, 303, 304 et 305), aux Jumelles d'Ornes (parcelles 139, 140 et 145) ou près de l'ancienne ferme de Mormont (parcelles 218, 220 et 261).

Les figures que nous venons de décrire, exploitables en l'état, restent pour le moment fictives et ouvertes à d'autres propositions. Il conviendrait notamment de réfléchir avec le comité de pilotage « *Forêt d'Exception* » (annexe I) à la pondération de certaines d'entre elles ou à la pertinence du maillage retenu dans un objectif de meilleure gestion des vestiges de guerre.

2.3. Porter à connaissance des apports du LiDAR à Verdun

Un enjeu pour les anciens pays belligérants est de transmettre au grand public la connaissance du passé. Sur ce point, les commémorations du Centenaire ont fait naître un certain nombre d'événements culturels et films documentaires sur le sujet, une aubaine pour nous. Durant ces quatre années de thèse, différentes initiatives de médiation et de vulgarisation scientifique ont été entreprises, visant toutes à valoriser nos travaux et à porter à connaissance les apports de la technologie LiDAR au champ de bataille de Verdun, le premier à bénéficier d'une cartographie exhaustive des polémoformes de la Grande Guerre.

Une des premières initiatives de valorisation de notre recherche, la plus gratifiante, est la participation **au projet de rénovation du Mémorial de Verdun**. Ce projet, mené en collaboration avec J.-P. Amat (comité scientifique), É. Desrousseaux de Medrano (commissaire), l'agence Le Conte Noirot (scénographie et muséographie) et On Situ (création numérique) a consisté à produire une série d'images LiDAR et de cartes d'interprétation du champ de bataille de Verdun, destinées à être installées sur des bornes interactives composant la dernière partie de l'exposition permanente (figure 8.11). Positionnées au nouveau deuxième étage, en retrait d'une terrasse panoramique donnant sur l'ossuaire de Douaumont, trois écrans permettent au public de voyager dans l'espace et le temps du champ de bataille par un jeu de zooms et de superposition d'images LiDAR, de cartes et photographies aériennes anciennes et actuelles.

Des contributions similaires (production documentaire) ont été faites dans le cadre de deux expositions temporaires, l'une organisée à Paris, l'autre en Auvergne :

- ***L'hyperbataille de Verdun* au musée de l'Armée** (Invalides) du 26 janvier au 4 avril 2016 ;
- ***Remettre en culture les champs de bataille de la Grande Guerre* à l'Historial du paysan soldat** (Fleuriel, Allier) des 14 avril au 14 octobre 2018 et 2019.

La filmographie constitue un autre moyen de médiation numérique populaire, en particulier quand il s'agit de la Première Guerre mondiale, illustrée par d'innombrables ressources iconographiques. À l'occasion du Centenaire, de nombreux documentaires ont été diffusés sur les chaînes de télévision, telle que la série événement *Apocalypse : la Première Guerre mondiale* ou **le film *Verdun, ils ne passeront pas*, réalisé par Serge de Sampigny, production à laquelle nous avons contribué** par le biais d'Ijin Prod (figure 8.11), agence spécialisée dans la création d'images de synthèse et prestataire d'Histodoc (producteur de films historiques) au moment de la réalisation.

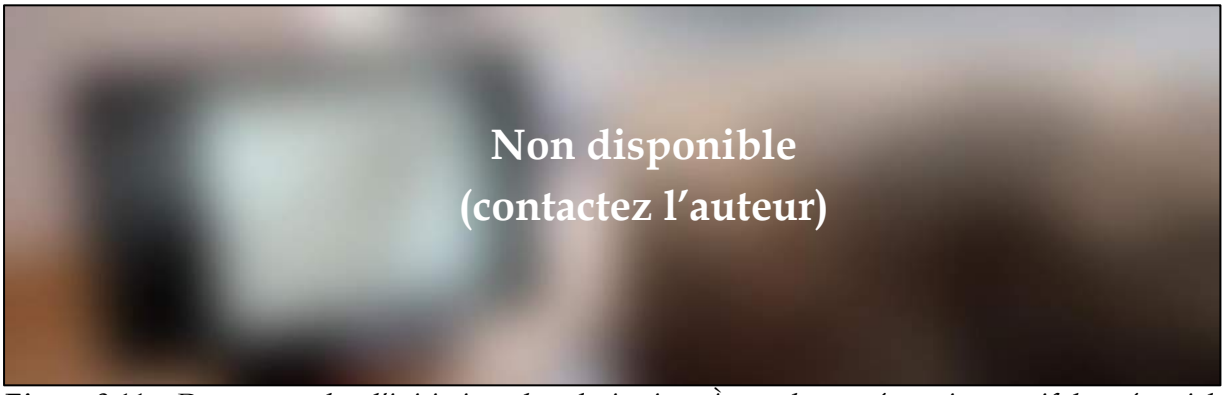


Figure 8.11 – *Deux exemples d'initiatives de valorisation. À gauche, un écran interactif du mémorial de Verdun montrant une carte d'interprétation du secteur de l'ouvrage de Froideterre avec en arrière-plan une image LiDAR ombrée. À droite, un extrait du film documentaire Verdun, ils ne passeront pas illustrant une image en SVF du fort de Douaumont, habillée par l'équipe graphiste d'Ijin Prod.*

Parallèlement à ces contributions, et dans l'élan de curiosité touchant la mission LiDAR de Verdun, nous avons été sollicités à de multiples reprises pour faire connaître auprès du grand public les apports scientifiques de cette technologie, en France ou à l'étranger :

- **Interview (2018) pour le magazine américain *Discover*** (titre de la communication : *Life after war*[12]) par Katherine Kornei ;
- **Invité de la conférence de presse (2017) de l'*European Geosciences Union General Assembly 2017* de Vienne en Autriche** (titre de la communication : *Anthropogenic landforms of warfare origin and their ecological significance: The Verdun Forest, NE France*[13]).

[12]http://discovermagazine.com/2018/may/life-after-war
[13]http://client.cntv.at/egu2017/press-conference-7

- **Interview (2017) pour le quotidien viennois *Der Standard*** (titre de la communication : *Große Mengen von Leichen hinterlassen "sehr speziellen Untergrund"*[14]).
- **Reportage télévisé (2016) de 5 min pour la chaîne Arte** (titre du reportage : *Vestiges de guerre en forêt de Verdun*[15]) par Fanny Lépine ;
- **Interview (2016) pour le magazine belge *Le Vif*** (titre de la communication : *Histoire : la technologie au secours du patrimoine*[16]) par Isabelle Masson-Loodts ;
- **Interview (2016) pour le magazine français *Sciences et Avenir*** (titre de la communication : *Verdun : les vestiges de la bataille traqués par le lidar*[17]) par Carole Chatelain ;
- **Interview (2016) pour le quotidien français *20 minutes*** (titre de la communication : *À Verdun, la forêt est gardienne de la mémoire*[18]) par Audrey Chauvet.

Des initiatives de médiation plus directes ont été conduites dans le cadre de journées de sensibilisation. Trois sorties de terrain (2016, 2017, 2018) destinées à sensibiliser les gestionnaires forestiers de l'ONF (originaires de tout le pays jusqu'aux Outre-mer) sur le patrimoine archéologique et les applications du LiDAR ont été coordonnées en collaboration avec l'ONF (Agence de Verdun) et le Service Régional de l'Archéologie (site de Metz). Soucieux de propager les nouvelles avancées du LiDAR auprès d'un public élargi, nos travaux nous ont mené à communiquer dans le cadre d'animations, qu'elles soient locales [organisées par la ville de Verdun, les 4 jours de Verdun (2014) et la Fête de la Science (2016)] ou nationales [cycle de conférences de la bibliothèque nationale de France (2018) portant sur l'*Archéologie de la Guerre : de la fouille à l'écriture de l'Histoire*]. En plus de faire valoir nos travaux, ces actions ont contribué et contribueront, on l'espère, à mieux conserver les patrimoines culturel et géomorphologique de la forêt domaniale de Verdun, et au sens large, de toutes les forêts de guerre.

2.4. Le champ de bataille de Verdun, un géomorphosite ?

Cette dernière partie de chapitre **pose le débat sur la possibilité d'attribuer au champ de bataille de Verdun la valeur de géomorphosite** (ou site d'intérêt géomorphologique), statut qui permettrait d'œuvrer dans le sens d'une meilleure reconnaissance et conservation des polémoformes. Le *géomorphosite* est « *l'expression physique et territorialisée du patrimoine géomorphologique* » (Bétard, 2015). Reconnu depuis une dizaine d'années, le *patrimoine géomorphologique* désigne « *l'ensemble des formes du relief – de l'échelle des microformes à celle des reliefs majeurs – qu'une société considère comme digne d'être conservé et transmis aux générations futures* » (André *et al.*, 2013 ; cités par Bétard, 2015).

[14]https://derstandard.at/2000056613243/Grosse-Mengen-von-Leichen-hinterlassen-sehr-speziellen-Untergrund

[15]https://info.arte.tv/fr/vestiges-de-guerre-en-foret-de-verdun

[16]http://www.levif.be/actualite/belgique/histoire-la-technologie-au-secours-du-patrimoine/article-normal-579275.html

[17]https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/data/verdun-les-vestiges-de-la-bataille-traques-par-le-lidar_103744

[18]https://www.20minutes.fr/planete/1847543-20160527-verdun-foret-gardienne-memoire

Cette définition aborde l'idée de reconnaître un héritage, l'objet relief, menacé par des processus érosifs le plus souvent anthropiques. Sa sauvegarde passe par une patrimonialisation visant à faire connaître auprès du grand public (vulgarisation) l'ensemble des valeurs qui lui sont associées (Sellier, 2009 ; Giusti et Calvet, 2010 ; Portal, 2014 ; Bétard, 2015), le stade ultime étant la mise en place d'outils juridiques de protection, variant en fonction de l'échelle spatiale du site à conserver (*e.g.*, site classé, site inscrit, réserve naturelle nationale, réserve naturelle régionale, arrêtés préfectoraux de protection de géotope ; Bétard, 2015). En ce sens, les processus de désignation d'un lieu en tant que géomorphosite sont complexes et reposent sur une méthodologie précise « *visant à analyser et à dégager les valeurs attribuées aux reliefs et aux modelés* » (Portal, 2014). Les polémoformes de la forêt domaniale de Verdun pourraient constituer un patrimoine géomorphologique car ce sont des objets « reliefs », qui peuvent être reconnus pour leur valeur scientifique « centrale », à laquelle il est possible d'adjoindre un lot de valeurs « additionnelles » (valeur culturelle, historique et archéologique ; valeur écologique). Ces valeurs dites « intrinsèques » (Reynard *et al.*, 2016), sont bien présentes à Verdun. On peut en effet attribuer aux polémoformes :

- une *valeur centrale* d'ordre *scientifique*, définie par des processus morphogénétiques spécifiques aux activités militaires (rares à l'échelle du globe) et aux conditions du terrain (roches calcaires et couvert forestier permettant la bonne conservation des formes, nappes phréatiques perchées générant des mares au sein des formes) ;
- des *valeurs additionnelles*, dont 1) une valeur esthétique propre au caractère monumental des paysages cratérisés et aux faciès de zones humides sur les hauts du plateau ; 2) une valeur culturelle associée aux combats de 1914-1918, aux politiques de mémoire et de patrimonialisation, aux travaux sylvicoles dans la jeune forêt du champ de bataille ; et 3) une valeur écologique liée à ces biotopes originaux que sont devenues les polémoformes et à l'appartenance de la forêt à plusieurs zonages environnementaux (cf. *infra*, chapitre 9).

Les polémoformes de la forêt de Verdun présentent également une valeur « d'usage » (Reynard *et al.*, 2016), d'abord parce qu'elles constituent, au même titre que les forts et monuments commémoratifs, des lieux de mémoire à valeur touristique. Ce constat est peut-être plus vrai pour les bâtis militaires et fossés symboles de la guerre des tranchées. On associe également à ces polémoformes des usages éducatifs. Verdun est un classique des voyages scolaires, d'abord pour le mythe associé à la bataille de 1916, mais aussi et surtout parce que l'ancien champ de bataille est un des seuls endroits d'Europe offrant à ses visiteurs le privilège de cheminer à travers les traces authentiques des combats. Les événements sportifs (*e.g.*, « Trail des poilus », « Trail des tranchées », sentiers VTT, randonnées) et culturels (*e.g.*, promenade bioluminescente en forêt, bataille reconstituée) organisés par les acteurs locaux témoignent de cette gestion « intégrée » des polémoformes, allant bien au-delà des seuls enjeux conservatoires. Compte tenu de ces valeurs et des menaces qui pèsent sur elles, les polémoformes pourraient ainsi représenter un patrimoine géomorphologique « digne d'être conservé » (figure 8.12).

Toutefois, se pose le problème de l'origine et de la temporalité des polémoformes. Pouvons-nous qualifier de géomorphosite un lieu au patrimoine géomorphologique essentiellement artificiel et dont le caractère exceptionnel n'a que quelques décennies ? Concernant la première interrogation, la majorité des études évoque le patrimoine naturel comme élément fondateur du géomorphosite (Reynard, 2005 ; Giusti et Calvet, 2010 ; Sellier, 2013). Ce lien proviendrait du rattachement de la notion de *patrimoine géomorphologique* à celle de *géopatrimoine*, qu'une de ses définitions considère « *comme un sous-ensemble du patrimoine naturel regroupant des biens à caractère géologique (roches, minéraux, fossiles), géomorphologique (formes de relief), pédologique (sols) et hydrologique (rivières, lacs, nappes…)* » (Gray, 2013 ; cité par Bétard, 2015). Néanmoins, depuis quelques années, on constate une évolution sémantique du concept de géopatrimoine, liée à un gain d'intérêt pour le patrimoine anthropique. Cette vision plus holistique du géopatrimoine se constate en particulier dans les définitions les plus récentes, comme celle de Bétard *et al.* (2017), qui associe un patrimoine culturel (« *l'histoire des liens entre l'Homme et la Terre* ») au traditionnel patrimoine naturel (« *la mémoire de la planète* »). L'existence de géomorphosites où une grande importance est portée aux reliefs anthropogéniques constitue une autre preuve de cette prise en compte de l'humain dans la valorisation des paysages géomorphologiques. Ainsi, le caractère remarquable des paysages de Killarney (Irlande), classés en parc national en 1932, tient son origine des formes de relief naturelles mais aussi des nombreux reliefs anthropogènes d'époque néolithique ou contemporaine (cairns, mines, etc. ; Portal, 2014). Plus proche de notre secteur d'étude, le plateau des Mauges, au sud du Massif armoricain (Vendée), forme un autre exemple de géomorphosite combinant ces reliefs naturels et anthropogènes. Il est formé d'un « *puissant manteau argileux résultant de l'altération des roches du socle par hydrolyse météorique sous climat tropical humide* » (Wyns *et al.*, 1998 ; cité par Comentale, 2012) et exploité depuis des lustres par les populations locales notamment pour la fabrication de poteries (Comentale, 2012). Ces activités ont généré des argilières de plusieurs centaines de mètres de diamètre, souvent inondées, renforçant la dimension esthétique et écologique du paysage. Plus récemment encore est apparue la notion de technotope, qui désigne « *un biotope ou un géotope fortement artificialisé qui se singularise par une histoire et/ou une gestion technique favorable à la conservation de la biodiversité et/ou de la géodiversité* » (Bétard, 2017). L'introduction de ce concept ouvre la voie vers une définition plus englobante du géopatrimoine et du patrimoine géomorphologique, qui reconnaît les milieux anthropisés comme des sites potentiels d'intérêt géopatrimonial. Sur le plan de la temporalité, la littérature scientifique donne très peu d'informations, bien que l'accent soit souvent donné au temps long. Ce constat est assez logique compte tenu de la définition traditionnelle inféodée au patrimoine géomorphologique, constituant un « *objet géomorphologique participant à la compréhension et à la reconstitution de l'histoire de la Terre* » (Grandgirard, 1997 ; cité par Reynard, 2005). Néanmoins, pour Reynard (2005), il n'y a semble-t-il aucune limite temporelle puisqu'il distingue les géomorphosites actifs et passifs : « *les premiers permettent de comprendre et visualiser la dynamique des reliefs actuels, alors que les seconds constituent des archives des paléoenvironnements et permettent de prendre conscience de la profondeur temporelle des reliefs actuels* ». Si l'on s'en tient à la catégorie du géomorphosite actif,

tout relief illustrant des signes d'évolution actuelle et présentant une valeur exceptionnelle parmi celles mentionnées plus tôt aurait toute sa place dans la liste des géomorphosites, **constat qui s'appliquerait aux polémoformes de la forêt de Verdun** (colluvionnement, glissements, effondrements, remblaiement, battement des nappes phréatiques au sein des formes inondées). Pour Bétard *et al.* (2017), le caractère « hérité » des géomorphosites ne s'inscrit pas nécessairement sur le temps long puisque les héritages peuvent être d'ordre « naturel » (temps long) ou « artificiel » (anthropocène). Il y a donc un réel intérêt à mêler « *temps de la Terre et temps de l'Humanité* ». Au bilan, pour la forêt de Verdun, où les actions de l'Homme sont exclusivement à l'origine du caractère remarquable du site, l'utilisation du terme géomorphosite est peut-être encore trop précoce compte tenu de la prépondérance de la dimension naturelle dans la plupart des définitions actuelles. On peut dans un premier temps introduire le terme de polémo-géomorphosite, comme l'a suggéré Bétard (2017), néologisme qui permet de mettre l'accent sur le rôle des activités humaines, en particulier militaires, dans la formation de ce site d'intérêt géomorphologique. Ainsi, le débat est lancé sur l'éligibilité de la forêt domaniale de Verdun à devenir un géomorphosite.

Figure 8.12 – *Le boyau de Londres, un fossé parmi tant d'autres.Ce tronçon de boyau français a été photographié au sud-ouest du fort de Douaumont sous un peuplement d'épicéas. Il forme une partie du boyau de Londres (nommé boyau de Loumède à partir de 1918), qui reliait la ville de Verdun au bois des Caurrières. Avec ses 10 km de longueur, il était l'un des axes les plus longs du champ de bataille de Verdun. Bien conservé, il présente encore les traces d'une ossature bétonnée sur ses flancs, destinée à les renforcer. Cliché : R. de Matos-Machado, 4 avril 2017.*

3. Conclusions

L'analyse diachronique entreprise au moyen de documents d'archives et de cartes a permis d'identifier des évolutions significatives dans le nombre et la conservation des polémoformes depuis la fin du conflit. **Il a dans un premier temps été montré que le nombre de cratères d'obus associé à la topographie de 2013 était significativement inférieur aux estimations faites sur la période 1914-1918** (essentiellement 1916). Ce phénomène affectait-il aussi les autres catégories de polémoformes ? Pour les abris et positions d'artillerie, sans méthode de comptage fiable, l'hypothèse n'a pu être vérifiée. En revanche, **l'exploitation des plans directeurs de 1918 a révélé que près de 60 % des tranchées et boyaux de communication avaient disparu**, confirmant les observations faites sur les cratères d'obus. Une des raisons premières expliquant la baisse de l'effectif de polémoformes proviendrait des processus d'érosion post-guerre. Deux causes principales en seraient à l'origine : 1) certains types de gestion sylvicole ont un pouvoir morphogène plus important que d'autres (plantations résineuses des années 70-80, plantation en bande avec coupe d'abri) ; 2) moins bien documentés car moins visibles sur le LiDAR, les processus d'érosion naturelle, qui induisent un comblement partiel des polémoformes de l'ordre d'un demi-mètre, valeur qui s'accentue dans les ravins où les phénomènes d'aggradation sont renforcés. Comme issue à vocation finalisée, des outils sont réalisés sous forme de cartes, directement exploitables par les gestionnaires forestiers. Compte tenu des menaces qui pèsent sur les polémoformes, **ces cartes identifient les parcelles au riche patrimoine culturel et celles ayant le plus souffert de l'érosion post-guerre**. La conservation des polémoformes passe aussi par des initiatives individuelles. C'est ainsi que **des actions visant à mieux faire connaître l'état actuel du champ de bataille ont été conduites** durant les quatre années de thèse : projets artistiques (musée, films documentaires), interviews (presse écrite, journaux télévisés, conférence de presse), journées de sensibilisation ou culturelles. Afin de contribuer davantage à la reconnaissance des polémoformes, **un débat a été ouvert sur la possibilité d'attribuer à la forêt domaniale de Verdun la valeur de** « **géomorphosite** », classement qui renforcerait une approche de la gestion conservatoire du site notamment par la mise en place d'outils juridiques de protection à l'échelle du périmètre domanial (*e.g.*, élargissement du site classé actuel centré sur le quadrilatère des forts).

Chapitre 9
Le patrimoine naturel au filtre du LiDAR

Ce dernier chapitre ouvre vers une autre dimension fondamentale des paysages de guerre de la forêt domaniale de Verdun : celle des conséquences écologiques des combats et de leurs effets sur le long terme. Que ce soit sur le site d'étude ou dans d'autres parties du front de l'Ouest, cette question n'a fait l'objet que de très peu de travaux, pour des raisons souvent politiques, notamment lorsqu'elle se réfère aux effets néfastes de la guerre sur l'environnement : « *L'État n'envisage pas pour l'heure de reconnaître le risque, sous peine d'ouvrir la boîte de Pandore des réparations à financer* » (Cochet, 2014). Nos propos n'ont pas l'objectif d'exprimer un avis sur ce débat mais d'accroître la connaissance et la compréhension des impacts écologiques sur le champ de bataille de Verdun. L'idée première consiste à établir un état de l'art de ces questions environnementales, en présentant les effets, négatifs et positifs, de la guerre sur le site d'étude, notamment les conséquences de l'irruption de polémoformes sur les écosystèmes. Dans un second temps, le LiDAR est employé pour faire inventorier et cartographier deux biotopes favorables aux amphibiens et aux chiroptères, deux classes de vertébrés présentant une diversité et des effectifs importants dans la forêt de Verdun. *Primo*, les zones humides, type de milieu susceptible d'abriter des espèces d'amphibiens d'intérêt communautaire. *Secundo*, les constructions bétonnées, qui fournissent des informations sur le patrimoine naturel (gîtes à chiroptères) et archéologique (vestiges de guerre). Après avoir répondu à l'inventaire du patrimoine culturel, objectif prioritaire de la thèse et du contrat de projet « *Forêt d'Exception* », ce dernier point répond donc en partie à un autre thème du contrat de projet : le thème 1.2 *Inventaire du patrimoine naturel*.

1. Impacts écologiques de la Grande Guerre sur le champ de bataille de Verdun

« *Cent ans après, elle fait encore des morts*[1] ». Le conflit de 1914-1918 a laissé derrière lui des séquelles environnementales si grandes qu'on en aperçoit encore les traces aujourd'hui. Restes de ferraille dans les cultures, munitions non explosées, pollution aux métaux lourds, percolation de substances toxiques dans les nappes : tous constituent une actualité de la Grande Guerre touchant le quotidien des habitants des anciennes régions sinistrées. Fait extraordinaire, les paysages de guerre cicatrisés du front de l'Ouest renferment aussi une grande richesse écologique, marquée par la présence de populations d'espèces animales et végétales remarquables sur ces terres autrefois désolées. Présentons cet héritage méconnu de la Grande Guerre.

1.1. Conséquences néfastes des combats

1.1.1. Effets sur la faune et la flore

En raison de la faculté du relief et des sols à avoir conservé (sous forme visible) les stigmates de combats vieux d'un siècle, les composantes géomorphologique et pédologique semblent avoir été le plus affectées par la Grande Guerre. En réalité, cette guerre a touché toutes les sphères du milieu physique, y compris les moins visibles (*i.e.*, faune et flore de l'époque, nappes souterraines), ce qui en fait un conflit difficile à appréhender en matière de conséquences environnementales. La tâche se révèle particulièrement compliquée quand il s'agit d'évaluer l'amplitude des perturbations provoquées sur la biosphère.

Parent (2004) est un des premiers naturalistes à avoir étudié la question des impacts militaires sur la faune et la flore de la région de Verdun. Ses recherches, menées depuis les années 1970 en Lorraine, ont révélé que les aménagements et les bombardements du front avaient littéralement détruit toute forme de vie (en dehors de la microflore et microfaune). Parent (2004) a considéré que la Première Guerre mondiale avait provoqué l'effacement de toutes les populations de reptiles présentes au début du XXème siècle ainsi qu'une majorité des amphibiens. Cependant, il semble difficile de connaître précisément leur population et le nombre d'espèces existantes avant la guerre car « *on ne dispose d'aucune information sur l'état ancien de l'herpétofaune* ». « *Les seules données anciennes disponibles sont celles qui furent rassemblées par les zoologistes allemands qui participèrent dans la région à la Première Guerre mondiale ! On relève malheureusement quelques erreurs de détermination dans ces travaux* » (Parent, 2004). À partir de relevés réalisés entre les années 1970 et 2000 en forêt domaniale de Verdun et dans les territoires voisins, ses travaux ont révélé que **la plupart des espèces de reptiles et d'amphibiens préexistantes avaient recolonisé le champ de bataille au lendemain de la**

[1]Propos tenus par la journaliste-archéologue Isabelle Masson-Loodts lors d'un entretien sur la chaîne de télévision France 24 : http://www.france24.com/fr/20140410-grande-guerre-paysages-en-bataille-destruction-environnement-isabelle-masson-loodts

guerre, **soit 13 espèces d'amphibiens et 5 espèces de reptiles**[2]. En revanche, **1 espèce d'amphibien n'a semble-t-il pas survécu au conflit** (*i.e.*, *Pelodytes punctatus*) et est aujourd'hui présumée éteinte. De même, 3 autres espèces (un amphibien, *Rana dalmatina* et deux reptiles, *Podarcis muralis* et *Vipera aspis*) n'auraient pas regagné le champ de bataille et seraient restés en marge des zones fortement bouleversées.

D'une façon générale, Parent (2004) constate une pauvreté certaine de l'herpétofaune dans la forêt domaniale de Verdun par rapport aux territoires voisins, à trois niveaux : 1) richesse spécifique ; 2) population (nombre d'individus ; à l'exception de *Rana esculenta*) ; 3) superficie occupée (des surfaces très importantes sont encore dépourvues d'amphibiens et reptiles). Les autres groupes faunistiques (avifaune, mammalofaune, entomofaune, etc.) font l'objet de recherches approfondies dans le cadre du contrat de projet « *Forêt d'Exception* ». Quelques conclusions intéressantes ressortent de ces rapports. Sur le plan de l'avifaune, les populations de petits Pics (*Dendrocopos major*, *Dryobates minor* et *Leiopicus medius*) sont, par rapport à des stations voisines de la forêt, significativement faibles dans les parcelles en peuplements matures (Millarakis, 2016a). Un autre rapport sur les populations d'insectes (ONF, 2017) suggère que les combats de 1914-1918 auraient engendré un appauvrissement des effectifs de coléoptères saproxyliques du fait de la destruction de la majeure partie des bois d'avant-guerre par les bombardements.

En dehors des questions relatives aux surfaces forestières détruites (cf. *supra*, chapitres 1 et 2), les conséquences néfastes des combats s'observent aussi à travers la flore. Sur les arbres, les blessures sont nombreuses. **La guerre a donné naissance à des forêts mitraillées** (figure 9.1), **conservant dans leur tronc les traces de *militaria* et/ou présentant une morphologie tortueuse qui reflète les agressions subies**.

Amat (1987, 2001, 2015) a consacré une grande partie de ses recherches aux arbres reliques des forêts de guerre, dont on perçoit encore les traces en forêt domaniale de Verdun. Il distingue deux catégories de blessures :

- Les *arbres ferraillés*, qui « *portent des fragments métalliques à l'extérieur ou à l'intérieur de leurs troncs ou de leurs branches maîtresses* ». Ce sont des *arbres cloutés* ayant servi de support à l'observation (construction d'observatoire ; figure 9.1) ou aux télécommunications (antenne, câbles électriques). Ce sont aussi des *arbres mitraillés*, éventrés par les balles et éclats d'obus, ou des *perches et brins soutiens de réseaux*, comportant des restes de fils barbelés disposés en avant des tranchées (figure 9.1) ;
- Les « *gueules cassées* » qui « *portent les marques d'une profonde brutalisation* ». Ces arbres présentent des formes extraordinaires : des *chandelles* (tronc sectionné soit sous l'effet

[2]*Salamandra salamandra terrestris*, *Triturus alpestris alpestris*, *T. cristatus cristatus*, *T. helveticus helveticus*, *T. vulgaris vulgaris*, *Bombina variegata variegata*, *Alytes obstetricans obstetricans*, *Bufo bufo*, *B. calamita*, *Hyla arborea arborea*, *Rana temporaria temporaria*, *R. esculenta*, *R. lessonae*, *Anguis fragilis*, *Lacerta agilis*, *L. vivipara*, *Coronella austriaca* et *Natrix natrix helvetica*.

d'une coupe, soit de l'explosion d'un obus), des *cépées foisonnantes* (rejets de souche profitant de l'ouverture du sous-bois par les bombardements) et des *morphologies de compensation* (changement de direction de croissance du tronc, dédoublement de houppier ; figure 9.1) liées à un traumatisme.

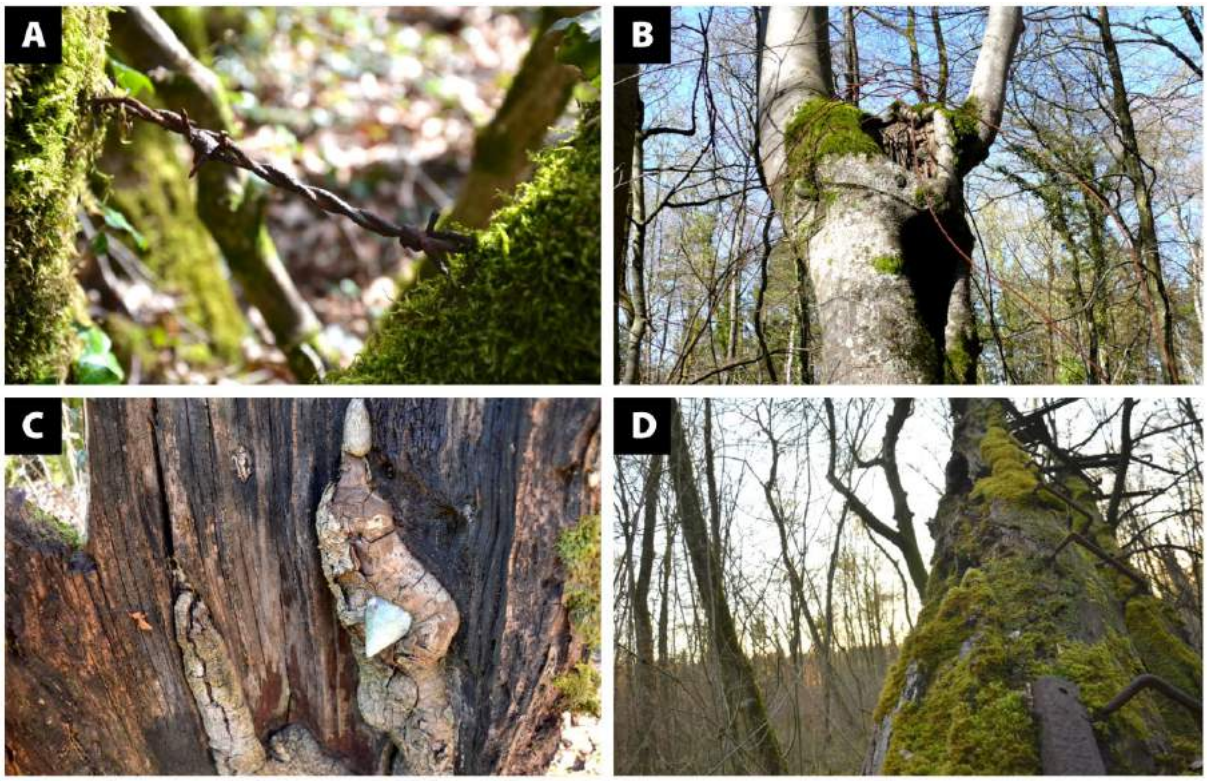


Figure 9.1 – *Exemples d'agressions affligées aux arbres. A : fil de fer barbelé absorbé par un hêtre relictuel. Cliché : D. Jacquemot, 20 mars 2014. B : hêtre relictuel présentant une morphologie de compensation. Notons également la présence de câbles en fer sur le tronc. Cliché : R. de Matos-Machado, 20 mars 2014. C : tête d'obus plantée dans le tronc d'un arbre relique. Cliché : D. Jacquemot, 20 mars 2014. D : échelle menant à une plateforme d'observation aménagée sur un hêtre. Cliché : D. Jacquemot, 25 mars 2014.*

En ouvrant la canopée, les bombardements ont littéralement détruit le sous-bois. Le tapis végétal et les sols ont, pour la plupart, été totalement détruits sous l'effet du blast. Parent (2004) a identifié trois conséquences majeures de ces bombardements dans le sous-bois : 1) la régénération forestière spontanée a mis un certain temps avant de s'établir ; 2) certaines espèces herbacées et muscinales ont localement disparu ; 3) des phénomènes d'acidification des sols sont apparus localement, s'accompagnant d'une émergence de plantes acidiphiles (*e.g.*, *Luzula pilosa*). **L'ensemble de ces raisons justifie le faible nombre d'espèces herbacées relevées dans le sous-bois de la forêt, qui équivaut à 10 espèces sur une surface prospectée de 1 ha** (Parent, 2004). Néanmoins, « *aucun taxon de la flore d'avant 1914 n'est considéré véritablement éteint* » (Millarakis, 2016a). On peut aussi s'interroger sur les conséquences possibles sur la biosphère de l'emploi en grand nombre d'obus à gaz, comportant des substances chimiques potentiellement mutagènes. Aucune conclusion n'a été tirée pour la faune, mais pour la flore, Parent (2004) conclut qu'il n'existe « *guère d'anomalie stable dans les*

secteurs les plus touchés […]. *Les rares anomalies observées correspondent à des formes tératologiques bien connues qui apparaissent partout dans la nature et qui ne peuvent être mises en rapport avec l'emploi de ces gaz lors de la Première Guerre mondiale* ». Néanmoins, il signale trois particularités observées au cours de campagnes de terrain menées à Verdun et sur d'autres sites de bataille, sans toutefois désigner directement les obus à gaz comme la cause de ces anomalies : 1) *Anemone nemorosa* à fleurs géantes (6 cm de diamètre) dans une population normale ; 2) *Anemone ranunculoides* à fleurs doubles (douze pétales au lieu de cinq ou six) ; 3) *Paris quadrifolia* à cinq feuilles (au lieu de quatre) dans des cratères d'obus. Cette question relative aux obus employés durant le conflit permet de faire le lien avec le point suivant, qui traite de la pollution liée aux munitions non explosées et encore contenues par les sols.

1.1.2. Effets sur le long terme des restes enfouis de munitions

À l'opposé des effets mécaniques de la guerre, dont la plupart sont visibles en surface, les agressions chimiques sont difficiles à percevoir. Elles sont pourtant bien présentes sur l'ancien front occidental et prend même des proportions inquiétantes à l'heure où les restes enfouis de munitions se dégradent sous l'effet de la corrosion (Cochet, 2014 ; Masson-Loodts, 2014 ; Hubé, 2016). Cette question a dernièrement fait l'objet d'une enquête par Hubé (2016), géologue et auteur de l'ouvrage *Sur les traces d'un secret enfoui*. En restant dans les sols, ces engins sont de vraies « bombes à retardement » jusqu'au jour où ils perdent leur étanchéité et se vident de leur chargement explosif, chimique ou incendiaire (figure 9.2).

***Figure 9.2** – Situations à risque aux bois Chaufour et de Neuville. A : munitions non explosées au contact d'une mare. Cliché : R. de Matos-Machado, 25 mars 2015. B : obus explosif ouvert sous l'effet de la corrosion. Cliché : R. de Matos-Machado, 4 avril 2017.*

Le contenant de la munition contribue aussi à la pollution du milieu du fait de son caractère métallique (fer, acier) soumis aux processus de dissolution. Ainsi, **ces munitions libèrent des quantités importantes de substances chimiques dangereuses pour l'environnement**. Un autre problème réside dans la capacité de certaines substances à se maintenir dans les sols durant des centaines d'années. C'est en particulier le cas des sels de perchlorate, particules explosives présentes en grand nombre dans les munitions de la Première Guerre mondiale, certains calibres accueillant jusqu'à 90 kg de perchlorate (Hubé,

2016). En plus de leur caractère toxique[3], ces sels se déplacent facilement en milieu souterrain sous l'effet de la percolation. Cette caractéristique favorise la migration de ces particules vers les sous-sols qui peuvent se déverser dans les nappes d'eau souterraine, situation particulièrement problématique lorsqu'on sait qu'une part importante de ces eaux phréatiques est utilisée pour l'agriculture. « *À l'Automne 2011, une alerte à la pollution a été déclenchée dans cinq cent cinquante communes autour de la ville de Douai en raison du perchlorate issu des obus de la Grande Guerre présents en grand nombre dans le sol de cette région* » (Cochet, 2014). Il ne s'agit pas d'un cas isolé puisque ces épisodes de pollution semblent se multiplier[4].

D'autres substances chimiques inquiètent les spécialistes, comme l'arsenic, substance cancérigène et fréquemment chargée dans les obus allemands, en particulier les obus *blaukreuz* (croix bleue) dont on estime la production à environ 31,5 millions (Bausinger et Preuß, 2005 ; Bausinger *et al.*, 2007 ; Hubé, 2016). C'est aussi le cas des métaux lourds, provenant soit de la charge de l'obus (un obus à balles contenait au minimum 250 balles de plomb ou acier), soit des têtes d'obus (celles-ci étaient faites d'environ 70 % de cuivre et 30 % de zinc), dont les effets sur l'environnement sont déjà connus (Souvent et Pirc, 2001 ; Bausinger et Preuß, 2005 ; Bausinger *et al.*, 2007 ; Van Meirvenne *et al.*, 2008 ; Meerschman *et al.*, 2011 ; Hubé, 2016).

Bausinger et Preuß (2005) puis (Bausinger *et al.*, 2007) ont tenté de quantifier cette pollution sur deux anciens sites de démantèlement de munitions. L'étude la plus récente a été conduite sur la *Place à gaz* (figure 9.3), située dans la forêt domaniale de Spincourt, contiguë à celle de Verdun, et où auraient été détruits près de 200 000 obus chimiques allemands dans les années 1920. L'aspect actuel du site, réduit à une clairière de 70 m de diamètre au sol carbonisé, offre déjà un indice sur les quantités de particules chimiques potentiellement présentes. Les résultats de l'étude donnent des chiffres impressionnants : des quantités d'arsenic comprises entre 2 019 et 175 904 mg/kg ont été relevées (le taux normal d'arsenic dans les sols[5] est de 6 mg/kg) ; les concentrations en cuivre, plomb et zinc atteignent respectivement 16 877, 12 690 et 133 237 mg/kg (le taux normal de cuivre dans les sols[6] est de 13,3 mg/kg, de 35,2 mg/kg pour le plomb et de 88 mg/kg pour le zinc). On peut penser que ce type de pollution affecte aussi (en proportion beaucoup plus faible car ces chiffres traduisent un site de destruction massive d'obus) les territoires ayant subi le feu des bombardements. Il est même très probable que cette hypothèse soit valide au vu des quantités d'obus n'ayant pas fonctionné correctement (20 à 25 % ; cf. *supra*, chapitre 8).

[3]Les sels de perchlorate font partie de la longue liste des perturbateurs endocriniens reconnus (Hubé, 2016). Néanmoins, ils sont relativement peu toxiques par rapport à d'autres particules explosives comme la TNT par exemple.

[4]https://www.lemonde.fr/planete/article/2016/09/20/les-bombes-a-retardement-de-la-premiere-guerre-mondiale_5000906_3244.html

[5]http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52066-FR.pdf

[6]http://www7.inra.fr/lecourrier/assets/C22Baize.pdf

Figure 9.3 – *La Place à gaz dans la forêt domaniale de Spincourt. Cliché : R. de Matos-Machado, 24 mars 2015.*

1.2. La guerre, facteur de biodiversité

1.2.1. Les plantes obsidionales (ou polémochores)

Fait paradoxal, la forêt domaniale de Verdun cache aussi une biodiversité insoupçonnée. **Les plantes obsidionales témoignent de cette richesse biologique d'origine militaire**[7], qui par définition, forment des espèces « *propagées par les mouvements et campements des armées* » (Lambinon, 1997). Le terme *obsidional* provient du latin *obsidionalis*, adjectif dérivé du mot *obsidium*, signifiant siège (Vernier, 2014). Il tend à être remplacé par *polémochore*, ce dernier s'adaptant davantage au vocabulaire botanique car il représente dans ce cas un type d'*anthropocorie* (dissémination des graines par l'Homme ; Vernier, 2006 ; Amat, 2015). Une des premières études traitant des relations entre la guerre et les plantes est celle des naturalistes Gaudefroy et Mouillefarine, qui publièrent en 1871 *Florula Obsidionalis*, ouvrage listant les espèces probablement introduites par le passage des Prussiens au cours du siège de Paris (guerre franco-prussienne ; Vernier, 2006). D'autres recherches ont été menées plus récemment, notamment par Parent (1991, 2004), qui a consacré une partie de sa vie à l'étude de la flore obsidionale. Il les catégorise en quatre types :

- Les *obsidionales vraies*, introduites par le mouvement des troupes, et visibles en de nombreux endroits ;

[7]Nous recommandons la lecture de l'ouvrage *Plantes obsidionales* de Vernier (2014) sorti à l'occasion des commémorations du Centenaire.

- Les *obsidionales occasionnelles*, introduites par le mouvement des troupes ou par d'autres moyens, et visibles très localement ;
- Les *obsidionales indirectes*, apparues après 1918 avec la naissance de nouveaux biotopes ;
- Les *obsidionales présumées*, dont le caractère obsidional n'est pas confirmé, mais qui coïncident avec des sites d'ancienne occupation militaire.

Selon Vernier (2006, 2014), il existe principalement trois origines à l'apparition de ces espèces « exotiques » :

- La première et principale cause constitue l'alimentation des animaux domestiques. Environ 11 millions de chevaux furent enrôlés et servirent sur les zones de combat (guerre de mouvement) ou dans l'arrière-front pour le ravitaillement (déplacement d'engins lourds durant la guerre de position). La mobilisation d'un nombre aussi important de chevaux nécessita de transporter sur le front des quantités considérables de fourrage pour les alimenter, provenant de régions proximales ou lointaines ;
- La seconde provient des graines déplacées involontairement par les soldats, celles-ci se logeant dans les vêtements et autres types de biens. L'emploi de véhicules légers ou le déplacement des trains sur le front a aussi contribué à la dissémination des graines. Par exemple, il n'est pas rare d'observer le long des anciennes voies ferrées une occurrence importante de plantes obsidionales ;
- La troisième est liée à leur usage par les soldats. Certaines plantes ont été amenées pour être cultivées et (ou) servir à l'alimentation du personnel de guerre. On note aussi des cas où elles furent acheminées sur le front puis employées à des fins médicinales. D'autres formes d'utilisation de ces plantes existent, pour la literie par exemple.

Les recherches de Parent (1991, 2004) en forêt domaniale de Verdun ont donné lieu à la découverte de 16 espèces obsidionales, chiffre revu à la hausse par Millarakis (1999, 2016a), qui complète la base précédente par 19 espèces supplémentaires, **soit au bilan un nombre de 35 espèces obsidionales incluant 5 obsidionales vraies**, **3 obsidionales occasionnelles**, **24 obsidionales indirectes et 3 obsidionales présumées** (tableau 9.1). Parmi elles, seule la Bermudienne des montagnes *(Sisyrinchium montanum)*, également surnommée Herbe aux yeux bleus, s'est naturalisée (figure 9.4). Considérée comme une obsidionale vraie, elle est originaire d'Amérique du Nord et « *serait arrivée avec les troupes américaines en 1917* » (Vernier, 2006).

Étude	Obsidionale vraie	Obsidionale occasionnelle	Obsidionale indirecte	Obsidionale présumée
Parent (1991, 2004)	*Carex brizoides*	*Iris germanica*	*Alisma plantago-aquatica*	
	Galega officinalis	*Laburnum anagyroides*	*Alnus incana*	
	Geranium pratense	*Potentilla recta*	*Buxus sempervirens*	
	Hieracium bauhinii		*Epilobium ciliatum*	
	Sisyrinchium montanum		*Hesperis matronalis*	
			Orchidaceae (*e.g.*, *Orchiaceras verdunensis*)	
			Pyrolaceae	
			Syringa vulgaris	
Mise à jour par Millarakis (1999, 2016)			*Agrimonia repens*	*Asplenium scolopendrium*
			Brachypodium pinnatum subsp. *rupestre*	*Asplenium trichomanes*
			Buddleja davidii	*Mercurialis perennis*
			Bunias orientalis	
			Carex riparia	
			Ceterach officinarum	
			Dianthus chinensis	
			Erigeron annuus	
			Euphorbia brittingeri	
			Heracleum mantegazzianum	
			Laburnum anagyroides	
			Lamium galeobdolon subsp. *argenteum*	
			Linaria repens	
			Lysimachia punctata	
			Matricaria discoidea	
			Melilotus albus	

Tableau 9.1 – *Listes des plantes obsidionales de la forêt domaniale de Verdun (Parent, 1991, 2004 ; Millarakis, 1999, 2016)*

D'autres espèces obsidionales, à l'apparence plus commune, tapissent le sous-bois de la forêt. C'est le cas notamment de la Laîche fausse-brize *(Carex brizoides)* ou crin végétal, dont l'aire naturelle se situe en Europe centrale et de l'Est, et qui « *servait de bourrage aux paillasses des soldats de la Première Guerre mondiale. Les paillasses, souvent laissées sur place après la défaite allemande, ont libéré les graines de cette plante que l'on trouve sur les anciens emplacements d'abris militaires allemands* » (Vernier, 2006). Par ailleurs, la présence d'ouvrages empierrés ou bétonnés, parfois accompagnés d'éboulis, a favorisé l'introduction d'une flore rupicole et chasmophytique (figure 9.4), notamment des spécimens rares de fougères *(Asplenium trichomanes*, *Ceterach officinarum)*. De même, on trouve autour de ces ouvrages des milieux ouverts souvent occupés par des pelouses rases riches en orchidées et quelques hybrides

intergénériques (*e.g.*, *Orchiaceras verdunensis*). L'ambiance fraîche qui règne dans les douves des forts (fossés secs) a aussi contribué à l'apparition de pyrolacées. De ce fait, les anciens forts de la place fortifiée de Verdun présentent un intérêt floristique certain. Au fort de Tavannes et ses environs par exemple, 117 espèces herbacées ont été relevées, nombre qui fluctue fortement d'un fort à l'autre (Parent, 2004).

Figure 9.4 – *L'Herbe aux yeux bleus et le Cétérach officinal, deux espèces obsidionales (Millarakis, 2016a)*

1.2.2. Les polémoformes, de nouveaux biotopes pour la faune et la flore

En modifiant les conditions topographiques, **la Première Guerre mondiale a créé de nouveaux biotopes, colonisés par des espèces végétales et animales inexistantes dans la région avant 1914**. Ces relations entre les polémoformes et la biodiversité sont d'une façon générale peu étudiées, certainement en raison de la jeunesse de la discipline qui traite de ces questions : la *biogéomorphologie*, également nommé *écogéomorphologie* (Bétard, 2017).

Dans les premiers mois suivant l'armistice, certains remarquèrent l'émergence en grand nombre d'espèces chasmophytiques sur les remblais des cratères d'obus et des réseaux de fossés. Des espèces telles que *Galeopsis angustifolia*, *Teucrium botrys*, *T. montanum*, *T. scorodonia*, *Thymus praecox* et *T. pulegioides* s'implantèrent durablement sur ces faciès pierreux, parfois jusqu'aux années 1960 dans les secteurs où la reprise des ligneux fut difficile (Amat, 2001 ; Parent, 2004 ; Amat, 2015). Ce fut là un premier signe positif de l'irruption de ces polémoformes sur les écosystèmes.

Quatre-vingt-dix années plus tard, Parent (2004) note dans ses *Trois études sur la Zone Rouge de Verdun* que « *c'est le fort le plus bombardé pendant la Première Guerre mondiale (celui de Froideterre) qui présente de loin l'intérêt le plus grand pour l'herpétofaune*[8] ». Ce phénomène n'est pas isolé. Le pilonnage incessant des sommets du plateau des Hauts de Meuse (où se trouve Froideterre) entre 1916 et 1918 a eu pour effet de libérer les eaux contenues par les nappes souterraines perchées. Du fait de leur endoréisme, cratères d'obus et fossés piègent ces eaux

[8]La cartographie semi-automatique réalisée dans le cadre de cette thèse démontre que c'est bien le fort de Douaumont qui a été le plus touché par les bombardements.

et forment sur les hauteurs du champ de bataille des mares soumises au rythme hydrologique de la nappe souterraine (figure 9.5). La naissance de ces zones humides s'est accompagnée d'une colonisation des polémoformes inondées par des espèces hygrophiles et hydrophiles.

Figure 9.5 – *Exemples de biotopes créés par la Première Guerre mondiale. A : cratère d'obus inondé près des Jumelles d'Ornes. Cliché : R. de Matos-Machado, 4 avril 2017. B : abri bétonné allemand dans l'Herbebois. Cliché : R. de Matos-Machado, 21 mars 2015.*

D'abord, sur le plan floristique, il existerait dans la forêt au moins 10 espèces en association avec ces biotopes, comme le Plantain d'eau *(Alisma plantago-aquatica)* ou l'Épipactis des marais *(Epipactis palustris)*, cette dernière constituant une espèce d'intérêt national *(liste rouge des orchidées de France métropolitaine)* et international (statut NT, *near threatened*, de l'IUCN ; Parent, 2004 ; ONF, 2005 ; Amat, 2015). La faune a également su profiter de ces transformations, en particulier l'herpétofaune, qui trouve dans les cratères inondés un refuge pour la reproduction. C'est le cas par exemple du Sonneur à ventre jaune *(Bombina variegata)*, espèce symbolique de la forêt domaniale de Verdun (figure 9.6), bénéficiant de plusieurs statuts dont celui d'espèce protégée par la *convention mondiale de Washington*, la directive « Habitats », la *convention de Berne* et la *convention de Bonn*. Sa population serait estimée à 4 747 individus dans la forêt (Llanque et Henry, 2008). Les cratères d'obus constituent un habitat potentiel pour cette espèce, bien qu'il ne s'agisse pas de son habitat de prédilection (près de 80 % des relevés en forêt ont eu lieu dans des ornières créées par les engins forestiers ; Llanque et Henry, 2008 ; Perret, 2012). Notons d'ailleurs que la forêt domaniale de Verdun forme une des stations européennes les plus septentrionales de l'espèce. On trouve aussi dans ces mares une autre espèce d'intérêt communautaire, le Triton crêté *(Triturus cristatus)*, espèce protégée par la *convention de Berne* et la directive « Habitats » et qui a colonisé l'ancien champ de bataille. Enfin, on note la présence d'espèces plus communes comme *Ichtyosaura alpestris*, *Lissotriton helveticus* et *L. vulgaris.*

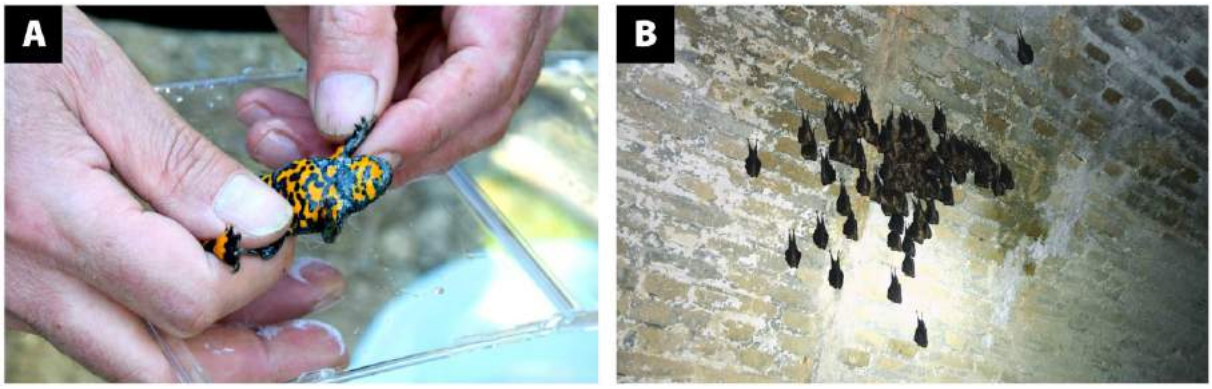


Figure 9.6 *– Le Sonneur à ventre jaune et le Grand rhinolophe, deux espèces présentes en forêt domaniale de Verdun. A : Sonneur à ventre jaune photographié dans les mains d'Éric Bonnaire, agent de l'ONF habilité à manipuler l'espèce. Cliché : R. de Matos-Machado, 20 avril 2016. B : colonie de Grands rhinolophes en hibernation dans une galerie du fort de Souville. Cliché : R. de Matos-Machado, 25 avril 2016*

Les polémoformes souterraines, avec les abris bétonnés enterrés, présentent aussi un intérêt écologique. Les conditions environnementales particulières qui règnent sous terre (températures stables, hygrométrie élevée) et la proximité d'une réserve de nourriture (la forêt), constituent autant de facteurs ayant favorisé l'installation de colonies importantes de chauves-souris (Durup de Baleine, 2001 ; ONF, 2005 ; Masson-Loodts, 2014 ; Amat, 2015 ; Tillon *et al.*, 2017 ; figures 9.5 et 9.6). Sur les 23 espèces de chiroptères recensées en région Lorraine, 19 sont présentes en forêt domaniale de Verdun[9], représentant une population d'environ 10 000 individus, soit approximativement 1/5ème de l'effectif régional (Tillon *et al.*, 2017 ; tableau 9.2). Parmi elles, on trouve en majorité des espèces communes mais aussi d'autres quasi menacées (statut NT, *near threatened*, de l'IUCN), tels que *Myotis bechsteinii*, *Nyctalus leisleri*, *N. noctula* et *Pipistrellus nathusii*, dont les colonies sont parfois inférieures à 20 individus. Les espèces sont toutes forestières et hibernent pour la plupart dans les réseaux souterrains de l'ancien champ de bataille. Toutefois, le Murin à oreilles échancrées (*Myotis emarginatus*, 2 000 individus) et le Grand murin (*M. myotis*, 5 000 individus) sont les deux espèces les plus fréquentes dans les souterrains, en été comme en hiver (Tillon *et al.*, 2017). Cette dernière espèce présente des effectifs « *d'importance nationale* ». D'une façon générale, la forêt domaniale de Verdun constitue un site exceptionnel du point de vue des populations et des espèces de chiroptères qu'elle abrite.

[9]Les quatre autres espèces non visibles à Verdun sont *Esptesicus nilssonii*, *Vespertilio murinus*, *Miniopterus schreibersii* et *Pipistrellus pygmaeus*.

Espèce	Population estimée en forêt domaniale de Verdun et du Mort-Homme	Part de la population en Lorraine (en % ou estimation)
Rhinolophus hipposideros	800	13
Rhinolophus ferrumequinum	1 500	53
Myotis alcathoe	Probablement faible	-
Myotis brandtii	34	30
Myotis bechsteinii	20	15 à 20
Myotis daubentonii	150	Faible
Myotis emarginatus	2 000	30
Myotis nattereri	45	7
Myotis myotis	5 000	15
Myotis mystacinus	223	16
Eptesicus serotinus	31	20
Nyctalus leisleri	Probablement rare	-
Nyctalus noctula	Probablement faible	-
Pipistrellus pipistrellus	-	Forte (espèce la plus commune)
Pipistrellus nathusii	Probablement forte	-
Pipistrellus kuhlii	À confirmer	-
Plecotus auritus	60	20
Plecotus austriacus	10	8
Barbastella barbastellus	10	5
TOTAL	*Au minimum 9 883*	*Au minimum 19*

Tableau 9.2 – *Listes des espèces de chiroptères de la forêt domaniale de Verdun et du Mort-Homme. La forêt domaniale du Mort-Homme se situe à 2 km à l'ouest de la forêt domaniale de Verdun (Tillon et al., 2017)*

1.2.3. La forêt, une mosaïque de milieux favorable à la biodiversité

Avec ses nombreuses espèces floristiques et faunistiques, parfois remarquables, la forêt de Verdun forme un haut lieu de biodiversité forestière en Lorraine, voire en France, une des raisons qui lui valurent la labellisation « *Forêt d'Exception* ». Néanmoins, les événements de 1914-1918 ne sont pas les seuls facteurs responsables de cette richesse écologique. En recouvrant d'un « linçeul » l'ancien champ de bataille, les forestiers ont permis la sauvegarde de nombreux arbres relictuels, datant de la période d'avant-guerre. En complément de leur valeur patrimoniale, ces arbres, riches en cavités, possèdent une valeur écologique certaine, du fait qu'ils procurent un habitat et un refuge de qualité pour certaines espèces d'oiseaux, chauves-souris, insectes et champignons (ONF, 2005 ; Millarakis, 2016a).

Dans le cadre du reboisement du champ de bataille, conduit à partir d'espèces pionnières, post-pionnières et dryades, les forestiers ont introduit des essences exotiques en provenance d'Europe de l'Est et du Sud (*Laburnum anagyroides*, *Pinus nigra*) et de contrées lointaines (Amérique du Nord : *Pseudotsuga menziesii*, *Quercus rubra* ; Asie : *Larix kaempferi*), qui ont la capacité de se développer sur des sols pauvres en nutriments (Parent, 2004 ; Amat, 2015). La plantation de ces forêts de substitution, surtout les peuplements d'épicéas, a été profitable à d'autres espèces, telles que des orchidées (*Cephalanthera damasonium*, *C. longifolia*, *Epipactis helleborine*, *Neottia nidus-avis*, *Platanthera bifolia*) et des plantes saprophytiques[10] (*Monotropa hypopitys*, *Pyrola rotundifolia*). À noter aussi l'importance des espèces lianescentes dans des peuplements résineux plantés comme *Clematis vitalba* et *Tamus communis* (Millarakis, 1999 ; Parent, 2004 ; ONF, 2005), environnement fort apprécié par le Bouvreuil pivoine *(Pyrrhula pyrrhula)*, passereau caractéristique de la forêt (Millarakis, 2016b).

Les zones de contact entre la forêt et la clairière abritent des espèces de lisière comme *Epipactis muelleri*, *Equisetum telmateia*, *Polygonatum odoratum*, *Vicia pisiformis*, *Vincetoxicum hirundinaria*. Cette richesse floristique s'observe aussi dans les milieux ouverts, autour des lieux de mémoire entretenus. À proximité des forts, des monuments, des cimetières et des villages détruits, les pelouses et friches thermophiles sont riches en orchidées *(Epipactis helleborine*, *Neottia nidus-avis)*, en espèces de prairie *(Bunias orientalis*, *Crepis sancta* subsp. *nemausensis*, *Globularia bisnagarica)* et en plantes ornementales naturalisées *(Buxus sempervirens*, *Dianthus chinensis*, *Lysimachia punctata* – figure 9.7), dont certaines sont considérées comme des obsidionales indirectes (Parent, 2004 ; cf. *supra*, § 1.2.1).

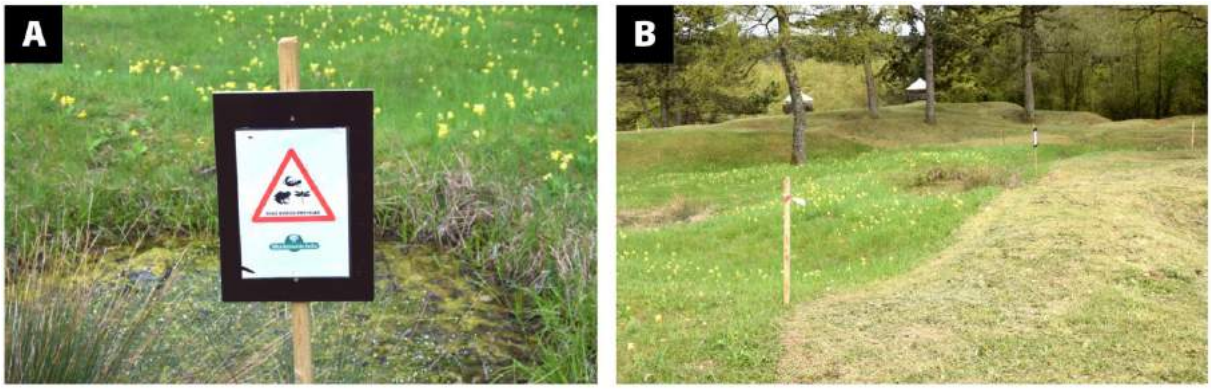


Figure 9.7 – *Biodiversité aux abords de l'abri-caverne des quatre cheminées. A : panneau de sensibilisation à la biodiversité associé à un cratère d'obus en eau. Cliché : R. de Matos-Machado, 30 avril 2016. B : fauche sélective d'une pelouse présentant un intérêt floristique et faunistique. Cliché : R. de Matos-Machado, 30 avril 2016.*

[10]« *Se dit des végétaux supérieurs, des champignons et des micro-organismes qui se nourrissent de matière organique morte* » (https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/saprophyte/70972).

Mentionnons aussi la flore spontanée du plateau de Douaumont, seul endroit de la forêt à abriter des fruticées à Poirier, Pommier et Prunier, issues des anciens vergers des villages détruits, dont Fleury-Devant-Douaumont (Amat et Foucault, 1999 ; Amat, 2001 ; Parent, 2004 ; Amat, 2015). Ces faciès ont favorisé deux espèces d'oiseaux : la Fauvette babillarde *(Sylvia curruca)* et le Torcol fourmilier *(Jynx torquilla)*, dont les populations sont, avec le Bouvreuil pivoine *(Pyrrhula pyrrhula)*, largement supérieures à celles des forêts de l'Est de la France (Millarakis, 2016b). La forêt abrite aussi une riche biodiversité d'insectes, en relation avec les mosaïques de milieux (*e.g.*, bois anciens, pelouses calcaires, fruticées, accotements routiers). Entre 2013 et 2016, 126 espèces de papillons ont été relevées, notamment 76 rhopalocères (papillons diurnes) – dont une espèce en danger *(Maculinea arion)* et deux quasi menacées *(Thymelicus acteon*, *Limenitis populi)* – représentant 90 % des spécimens des Côtes de Meuse (Millarakis et Antonot, 2015). En ce qui concerne les coléoptères, il reste difficile d'évaluer précisément la richesse des espèces présentes sur le site. Mentionnons cependant l'existence d'espèces rares au niveau national comme *Epiphanis cornutus*, *Mycetophagus populi* et *Sinodendron cylindricum* (ONF, 2017).

1.2.4. Zonages environnementaux de la forêt domaniale de Verdun

Son patrimoine naturel exceptionnel vaut à la forêt domaniale de Verdun d'être classée dans différents zonages environnementaux (figure 9.8), visant surtout à protéger les zones humides, les gîtes à chiroptères et pelouses calcaires proches des lieux de mémoire, où l'intérêt floristique et faunistique est maximal (ONF, 2005 ; Amat, 2015). Ainsi, l'ancien champ de bataille s'inscrit :

- dans le réseau Natura 2000 : *Zone Spéciale de Conservation* (ZSC *Corridor de la Meuse*), depuis 1998, initialement bornée au plateau de Douaumont, puis étendue en 2010 aux forêts de Verdun et du Mort-homme. Elle tient son origine essentiellement des populations d'amphibiens et chiroptères, jugées d'intérêt communautaire (directive « Habitats ») ;
- *Zone de Protection Spéciale* (ZPS *Forêt et zones humides du pays de Spincourt*) depuis 2003, créée en raison de l'intérêt ornithologique (directive « Oiseaux ») des milieux humides du secteur des Jumelles d'Ornes (nord-est de la forêt de Verdun) et de la forêt voisine de Spincourt ;
- depuis 2012, dans une *Zone Naturelle d'Intérêt Écologique Faunistique et Floristique continentale de type 1* (ZNIEFF *Forêt de Verdun*) et *de type 2* (ZNIEFF *Côtes de Meuse*).

Une *Réserve Biologique Intégrale* (RBI des Jumelles d'Ornes) est également en cours de classement, secteur qui, une fois le projet approuvé, ne bénéficiera plus d'interventions de la part des forestiers (dynamique spontanée).

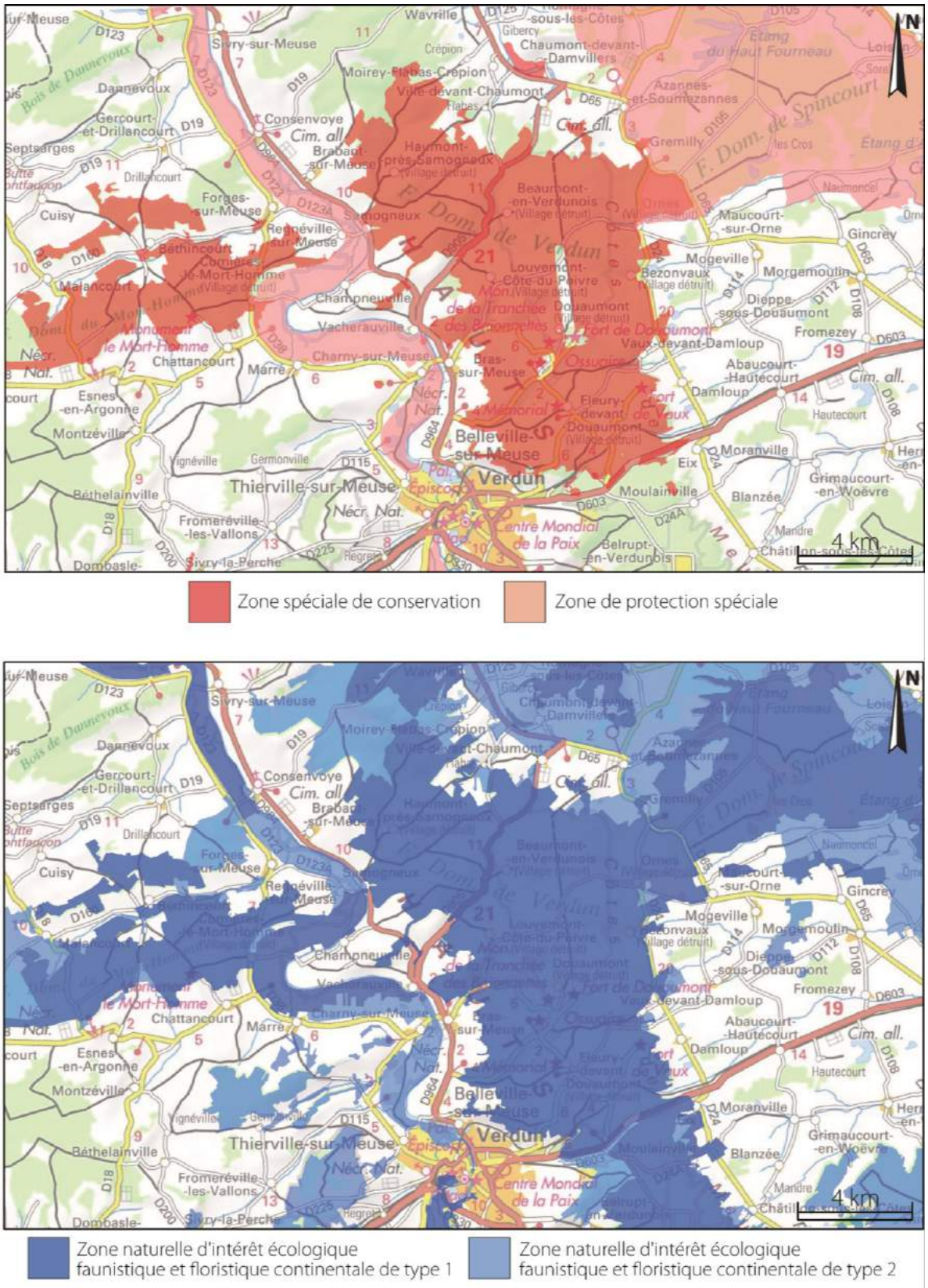


Figure 9.8 – *Cartes des zonages écologiques (inventaire national du patrimoine naturel et géoportail)*

2. De l'intérêt de cartographier les mares et bunkers grâce au LiDAR

Nous l'avons vu, la forêt domaniale de Verdun recèle de nombreuses richesses écologiques qu'il convient de protéger, du fait de la présence d'espèces d'intérêt communautaire, parfois placées sur la liste rouge de l'IUCN. Ce bref état de l'art a aussi montré qu'il existe un lien fort entre ce patrimoine naturel et les conditions environnementales créées par la Première Guerre mondiale. Les polémoformes, de par leur morphologie creuse ou souterraine, à l'abri des perturbations climatiques (*e.g.*, températures, précipitations, vent) et anthropiques, offrent un refuge pour la faune et la flore. Ce constat est encore plus vrai sur les hauteurs de la forêt, où la perforation de la nappe phréatique par les bombardements a fait naître des zones humides, milieu reconnu pour leur diversité biologique. Cette dernière partie du chapitre et de la thèse s'attache à présenter les résultats d'un travail d'inventaire ayant permis de localiser grâce au LiDAR les polémoformes inondées de la forêt, refuge privilégié par les amphibiens et autres espèces aquatiques, et les abris bétonnés, à la fois gîte à chiroptère et vestige archéologique. Ces recherches contribuent à enrichir l'inventaire du patrimoine naturel de la forêt et complètent dans le même temps la cartographie des vestiges de guerre (bunkers).

2.1. Inventaire des zones humides

2.1.1. Caractérisation des polémoformes inondées

Inventorier des zones humides implique de réfléchir à des méthodes et des échelles d'observation adaptées pour les délimiter. « *Repérer les limites et cartographier ces écosystèmes complexes et polymorphes représente aujourd'hui un enjeu majeur pour leur inventaire mais aussi leur suivi* » (Gramond *et al.*, 2005). La complexité du processus visant à cartographier ces zones humides provient en particulier du caractère éphémère de ces milieux, soumis aux variations hydrologiques des niveaux d'eau dans et au-dessus du sol, au sein d'une même année (variation intra-annuelle) ou d'une année à l'autre (variation inter-annuelle ; Gramond *et al.*, 2005 ; Barnaud et Fustec, 2007 ; Hubert-Moy et Clément, 2014).

Des critères permettent de délimiter une zone humide. L'eau étant « *l'élément déterminant primaire et majeur de qualification du caractère humide d'un milieu* » (Hubert-Moy et Clément, 2014), on aurait tendance à privilégier cet indicateur pour saisir les limites de la zone humide. En réalité, « *il s'avère qu'à l'usage, c'est souvent le plus mauvais descripteur du caractère humide d'un lieu, en raison de son caractère fluctuant* ». On peut donc s'interroger sur l'étendue de la zone que l'on souhaite cartographier : se limiter aux eaux permanentes ? englober les surfaces adjacentes présentant un caractère humide ?

Pour guider le chercheur, Mérot *et al.* (2005 ; cités par Barnaud et Fustec, 2007) ont mis au point une typologie fonctionnelle des zones humides dans le Massif armoricain, généralisable à d'autres sites, proposant des limites spatiales et des méthodes adaptées pour les caractériser. Ils distinguent :

- la *zone humide potentielle*, correspondant à l'enveloppe maximale de la zone humide, dont la limite est conditionnée par différents critères comme les changements d'état du sol (disparition de traces d'hydromorphie) ou le paysage géomorphologique (caractère creux d'un relief). On peut aussi faire appel à des outils plus élaborés (cartes des sols, MNT) permettant de repérer théoriquement « *un espace où la probabilité d'identifier un milieu humide est élevée* » (Hubert-Moy et Clément, 2014).
- la *zone humide effective*, définie comme « *la zone dans laquelle la saturation en eau atteint 100 % en période hivernale* » (Mérot *et al.*, 2005 ; cités par Barnaud et Fustec, 2007). Sa délimitation s'opère en repérant les limites d'extension des espèces végétales hygrophiles et des sols hydromorphes.
- la *zone humide efficace*, qui a trait à une fonction particulière (caractéristiques géochimiques, zone d'extension d'espèces remarquables, phénomènes hydrologiques, etc.) et dont la surface est généralement contenue par une des deux zones humides sus-citées (parfois les deux).

Dans le cadre de la co-direction (avec C. Clauzel) du mémoire de recherche d'un étudiant du Master *Télédétection et géomatique appliquées à l'environnement* (TGAE) de l'université Paris-Diderot (Printemps, 2017), **une cartographie des zones humides de la forêt domaniale de Verdun répond partiellement aux objectifs fixés dans le thème 1.2 *Inventaire du patrimoine naturel* du contrat de projet « *Forêt d'Exception* »**. Les limites privilégiées pour délimiter les zones humides sont celles de la *zone humide potentielle*, définie par le contour des mares en mars 2013 (date du relevé LiDAR). Il s'avère en effet que les zones humides repérées sur notre MNT ne sont pas systématiquement saturées en hiver, ce qui nous permet d'exclure la zone humide effective de notre raisonnement (de même que la zone humide efficace, qui ne répond pas à nos objectifs). Les observations *in situ* nous confortent dans cette idée car certains plans d'eau, bien visibles sur nos images, n'existaient pas lors de notre passage sur le terrain, bien que les traces anciennes de mares aient été aperçues (couleurs et état de la litière). Les raisons de cette absence d'eau doivent être trouvées dans le régime pluviométrique qui caractérisent l'hiver de l'année 2013 (relevé LiDAR) et celui de 2017 (relevé terrain). La station météorologique de Jarny (30 km à l'est de Verdun) a enregistré entre octobre 2012 et mars 2013 un cumul d'eau plus important de 82,6 mm que sur la période octobre 2016/mars 2017, ce qui a pu influencer le niveau de remplissage des zones humides (Printemps, 2017).

Le MNT LiDAR fournissant uniquement des informations d'altitude, il fallait trouver une méthode alternative capable de renseigner sur la présence de zones humides potentielles (l'analyse morphologique est insuffisante pour ce type d'opération). La réponse a été trouvée dans le nuage de points brut, qui offre un moyen de déterminer les densités de points *sol*. En complément, chaque point du nuage comporte une information sur l'intensité du signal reçu

par le capteur à chaque impulsion. Compte tenu du comportement physique des rayons infrarouges en contexte humide (cf. *supra*, chapitre 3), l'exploitation de ces deux paramètres – densité de points et intensité du signal – s'est montrée pertinente pour répondre aux objectifs fixés (figure 9.9). Nous ne revenons pas sur la définition et l'intérêt de la densité de points *sol* pour cartographier les zones humides potentielles, décrits dans le chapitre 3.

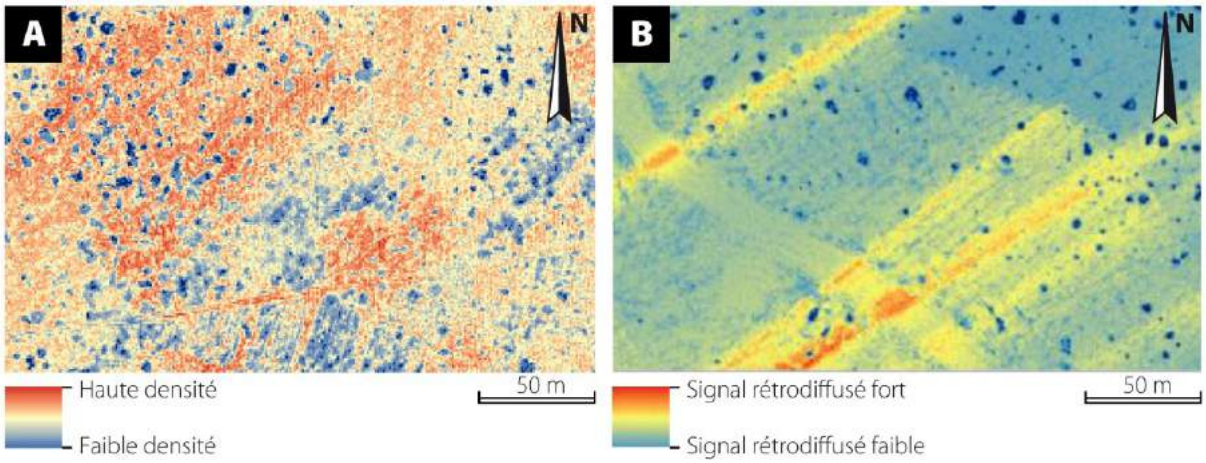


Figure 9.9 – *Extraits des images de densité de points sol et d'intensité du signal. A : image de densité de points sol dans le bois de la Wavrille. Les tâches bleues situées au nord-ouest correspondent à des mares, à l'inverse de celles situées au sud-est, reflétant les difficultés de pénétration du laser dans un peuplement résineux ; B : image d'intensité du signal. Les tâches bleues constituent des mares où le signal laser est fortement absorbé (modifié de Printemps, 2017).*

Attardons-nous sur le second paramètre. L'analyse de l'intensité du signal LiDAR[11] renseigne directement sur l'amplitude du signal rétrodiffusé vers le capteur (Song *et al.*, 2002 ; Lang et McCarty, 2009 ; Kashani *et al.*, 2015). Lorsqu'une impulsion laser est émise vers le sol, la surface obstruée réémet un signal vers le capteur. C'est l'intensité de ce signal qui est évaluée. La valeur d'intensité diffère selon la nature de la surface. Plus les propriétés physiques de ces surfaces diffèrent, plus les valeurs d'intensité obtenues sont contrastées. Song *et al.* (2002) sont parmi les premiers à avoir étudié les potentialités du LiDAR pour différencier des types d'occupation du sol. Quelques années plus tard (Lang et McCarty, 2009), le paramètre d'intensité du nuage de points fut exploité comme moyen de détection des surfaces en eau en contexte forestier. Bien que ce paramètre soit aujourd'hui couramment utilisé, son utilisation n'en est pas moins facilitée, notamment parce que les valeurs d'intensité ne sont jamais fixes. Elles diffèrent d'un capteur et d'une mission à l'autre car l'intensité du signal est sensible à de nombreux facteurs : longueur d'onde employée par le capteur, angle d'incidence du rayon laser, conditions atmosphériques au moment du vol, capacité du rayon à ne pas diverger. Pour une utilisation optimale, plusieurs traitements doivent être réalisés en amont. L'inventaire des zones humides potentielles étant secondaire

[11]Ce paramètre peut être calculé dans ArcGIS® *via* l'outil *LAS dataset to raster* et l'option *Intensity* dans les champs de valeurs.

à l'étude, de tels traitements n'ont pas été entrepris. Les images d'intensité sont donc interprétées telles quelles (pour une méthodologie détaillée, cf. Printemps, 2017).

2.1.2. Résultats de l'inventaire

Avec un taux de détection approximatif de 80,44 %, la combinaison des paramètres de densité de points et d'intensité du signal a permis de cartographier un total de 19 343 zones humides potentielles sur l'ensemble de la forêt de Verdun. Cette estimation a été revue à la hausse après complètement manuel de l'inventaire à l'aide du *SVF*, qui permet d'apprécier visuellement la présence/absence de zones humides[12] mais pas de les délimiter précisément. De ce fait, 4 702 entités ont été ajoutées au corpus précédent, **représentant un total de 24 045 zones humides potentielles recensées** (figure 9.10).

Comme attendu, la majorité des zones humides potentielles cartographiées se situe sur les hauteurs de la forêt, où affleurent les substrats argileux et marno-calcaires de l'Oxfordien supérieur. On trouve également une densité de zones humides importante à la limite des terrains de l'Oxfordien supérieur et moyen, marquée par le débordement de la nappe perchée. Trois sites présentent un intérêt certain pour les espèces aquatiques. Il s'agit du bois de la Wavrille, de la cote 378 (sud de la ferme des Chambrettes) et des hauteurs du Quadrilatère des Forts (côte de Froideterre et côte de Thiaumont à Souville), où ont été relevées des densités supérieures à 100 mares/ha, dont la plupart étaient remplies au moment de la mission de terrain. Mentionnons également des lieux comme le bois d'Ormont, le bois d'Haumont, le bois des Caures, la cote 344, la côte du Poivre et la côte de Belleville, qui affichent un nombre moyen de 50 mares/ha. Notons cependant que de nombreux échantillons observés sur ces sites en 2017 étaient asséchés (*e.g.*, côte du Poivre), confirmant le caractère temporaire des zones humides dans les secteurs où les densités sont inférieures à 100 mares/ha. Les vallons anaclinaux des Côtes de Meuse – où s'écoulent des ruisseaux – et la plaine de la Woëvre – formée de marnes et argiles imperméables du Callovien – à l'est de la forêt, constituent aussi des zones d'habitat préférentiel des espèces hygrophiles car des densités significatives de mares y sont enregistrées, régulièrement au-dessus de 100/ha. Tous les sites visités dans ces terrains (*e.g.*, est des Jumelles d'Ornes, ravin des Fontaines) en 2017 étaient couverts de formes inondées.

[12]Le *SVF* révèle la présence de zones humides là où les cartes de densités de points et d'intensité n'en ont pas trouvé. Le choix des valeurs retenues lors du seuillage peut être mis en cause. Cette lacune peut aussi refléter l'absence d'un état humide du milieu durant la mission de terrain.

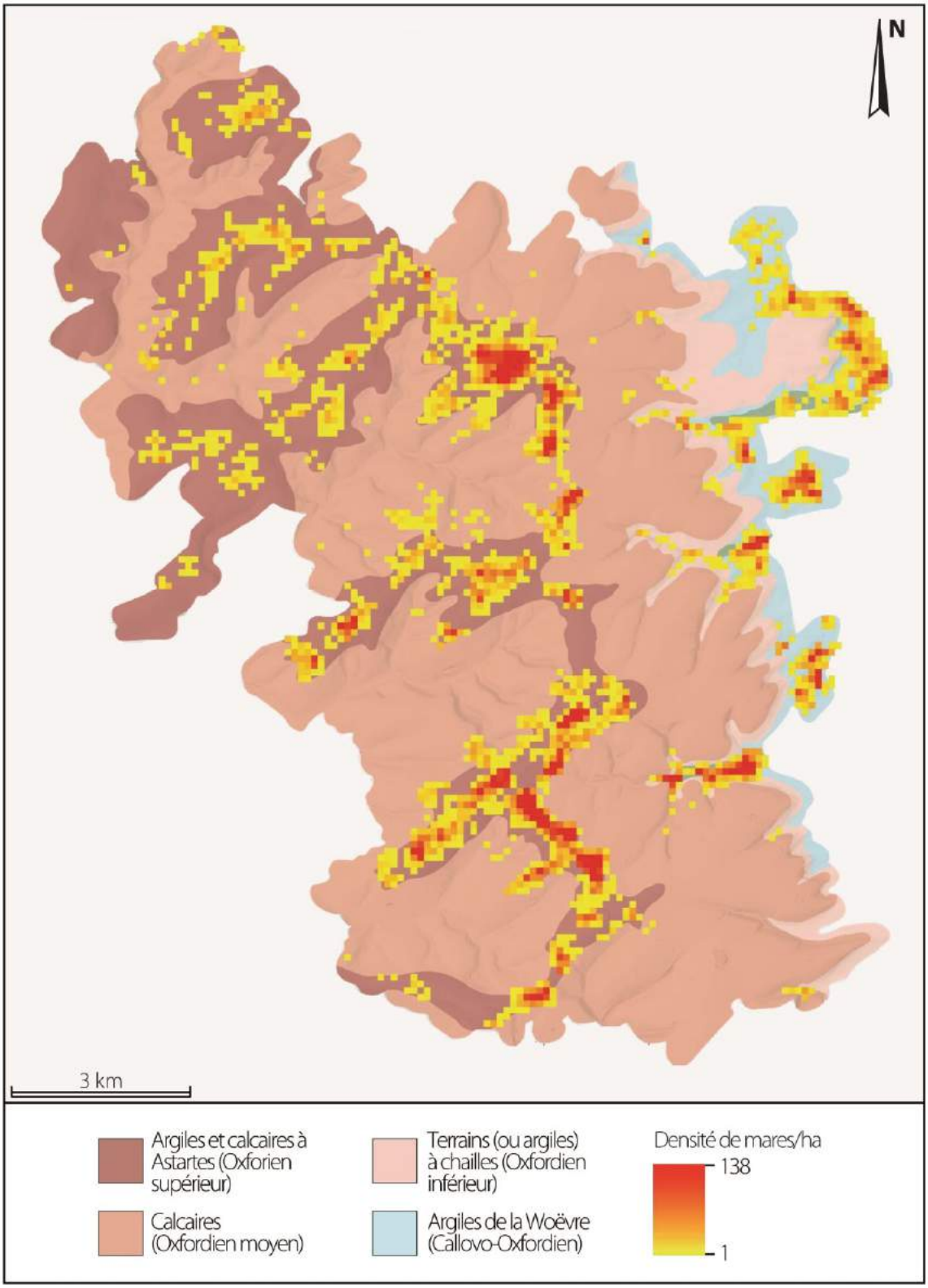


Figure 9.10 – *Carte d'inventaire des zones humides potentielles (modifié de Printemps, 2017)*

2.2. Identification des gîtes à chiroptères

2.2.1. Repérage des bunkers

À l'opposé des zones humides, les forts, ruines des villages détruits ou autres éléments bâtis du champ de bataille (ossuaire de Douaumont, mémorial de Verdun) se distinguent aisément sur le MNT, du fait de leur morphologie anguleuse et de leurs flancs saillants souvent proches de la verticalité. L'identification des abris bétonnés (bunkers) est en revanche moins évidente car la majorité, enterrée, ne laisse apparaître en surface que quelques portions de mur. Pour cette raison, la cartographie semi-automatique de ces vestiges a vite été abandonnée alors que notre objectif de départ consistait à classer ces formes compactes et surélevées sur la base de leur orthogonalité. En raison de leurs valeurs historique, archéologique et écologique, il nous a paru évident de rechercher une méthode alternative de localisation. Leur nombre restreint nous a permis d'envisager un inventaire manuel, partiellement accompli par l'ONF grâce à des prospections pédestres. La méthodologie retenue pour cette opération – consistant à repérer les constructions inconnues à ce jour – s'est fondée sur le croisement de deux paramètres, l'*indice de courbure* et le *SVF* (figure 9.11 – cf. *supra*, chapitre 4) :

1) La démarche privilégiée a reposé dans un premier temps sur l'utilisation de l'*indice de courbure* qui offre un moyen d'identifier les structures verticales de ces édifices. Ce repérage est possible lorsque l'écart de valeurs est important entre des pixels voisins (passage d'une pente concave – valeur positive – à une pente convexe – valeur négative). Plus l'orthogonalité est forte, plus ce contraste de valeur est important, ce qui permet de différencier les polémoformes aux pentes moyennes et celles aux flancs verticaux.
2) L'hypothèse de la présence d'une construction bétonnée est vérifiée en utilisant le *SVF*. Celui-ci renseigne sur la présence d'une surface lisse (teinte homogène et claire) et d'angles droits dans la forme. Si un lieu interprété comme bunker dans la première étape ne présente pas les caractéristiques attendues, alors la forme en question est exclue de la base. Dans le cas contraire, l'hypothèse de présence d'une construction bétonnée est validée.

2.2.2. Résultats de l'inventaire

Sur ce principe, **91 nouvelles constructions ont été recensées**, **complétant les 69 édifices déjà connus de l'ONF** (figure 9.12). Cependant, les résultats obtenus *via* le LiDAR exigent une validation de terrain, étape qui n'a pas été réalisée dans la thèse. Cette étude constitue une nouvelle preuve de l'efficacité du LiDAR à repérer les moindres anomalies topographiques et vestiges archéologiques en contexte infra-forestier. Le caractère enterré et peu visible des abris nouvellement enregistrés explique probablement la faiblesse des chiffres obtenus par prospection pédestre (nombre des 69 abris listés dans le corpus précédent sont hors sol).

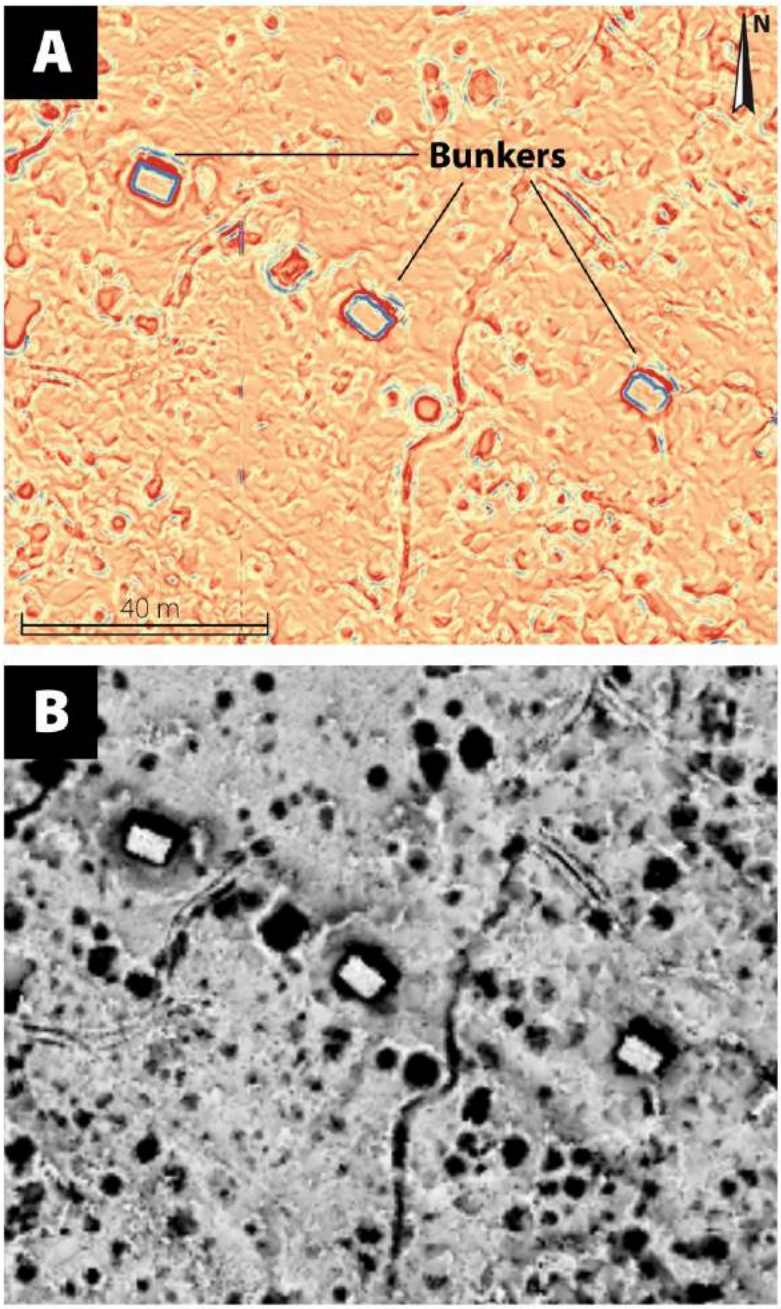


Figure 9.11 – *Détection de trois abris bétonnés dans le bois de la Wavrille. A : image LiDAR calculée selon l'indice de courbure. Les couleurs bleutées correspondent à des pentes convexes alors que les couleurs rougeâtres sont associées aux pentes concaves. Notons le contraste important des valeurs de courbure aux abords des trois abris bétonnés identifiés. B : image LiDAR calculé selon le SVF. Remarquons la teinte claire et la forme anguleuse des bunkers repérés dans l'image A.*

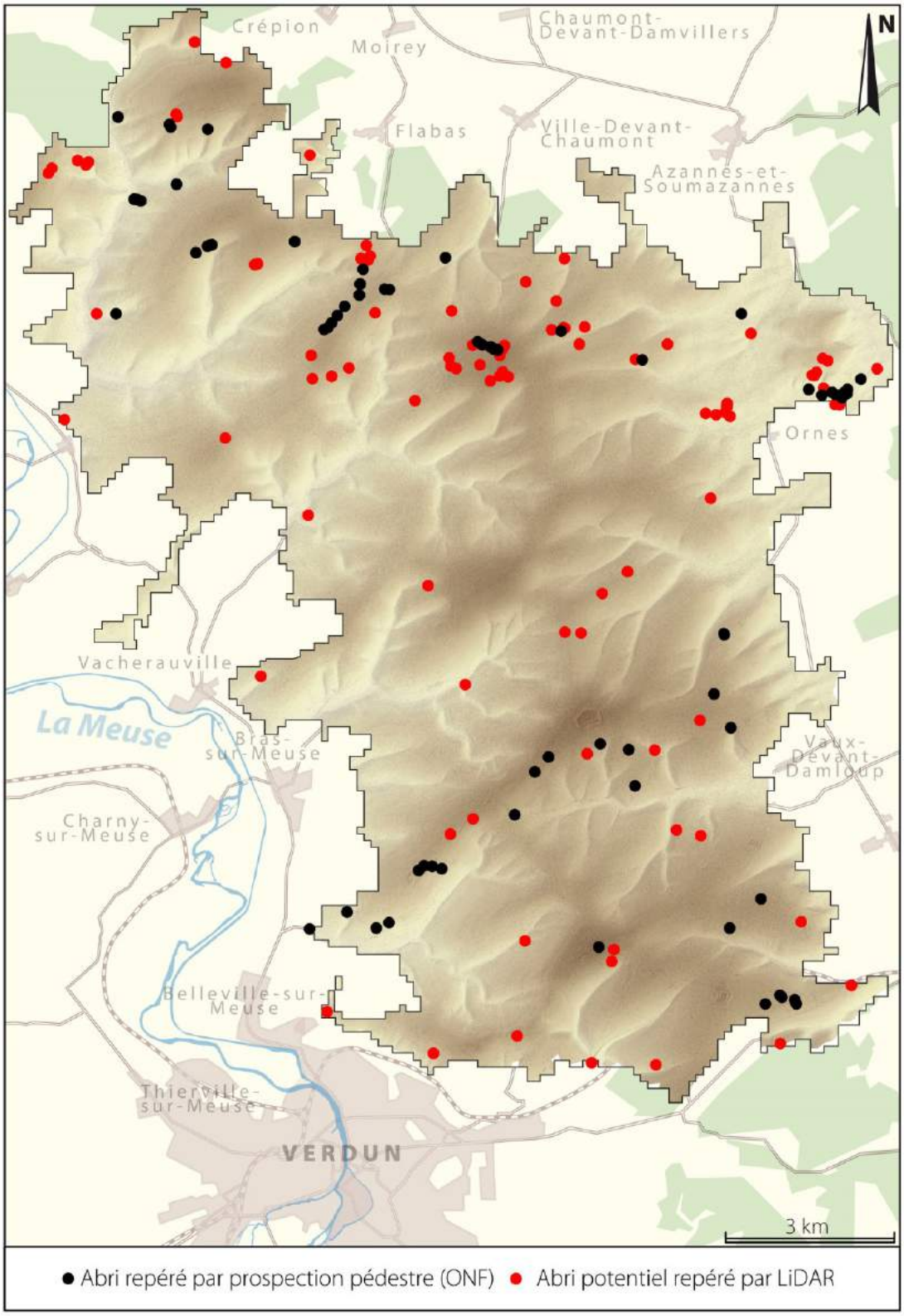


Figure 9.12 – *Carte d'inventaire des abris bétonnés*

La plupart des abris nouvellement cartographiés se situe au nord de la forêt, dévoilant un potentiel écologique fort des positions allemandes bétonnées de 1917 et 1918. Ceci est particulièrement vrai dans le bois des Caures (18 constructions dont 9 nouvelles), le bois de la Wavrille (17 constructions dont 12 nouvelles) et les Jumelles d'Ornes (19 constructions dont 9 nouvelles), sites qui présentent d'ailleurs un intérêt confirmé pour la flore et la faune aquatique. Notons également de nouvelles découvertes dans le sud de la forêt, dans des positions françaises probablement intégrées à la place fortifiée de Verdun. Cela se constate sur la côte de Froideterre et dans sa continuité (jusqu'à l'ouvrage d'Hardaumont) mais aussi de manière plus isolée (secteur de Souville, côte de Belleville). Enfin, une dizaine de nouveaux abris émergent au centre de la forêt (*e.g.*, bois des Caurrières), là où les combats ont été les plus forts, raison qui explique peut-être la pauvreté des chiffres dans ce périmètre.

3. Conclusions

La puissance dévastatrice de l'arsenal de guerre déployé à Verdun entre 1916 et 1918 a eu pour effet de transformer en profondeur les paysages de ce secteur du Nord meusien. Les destructions furent si fortes qu'elles ont affecté le fonctionnement des écosystèmes sur le long terme. **Un effet majeur de la Grande Guerre fut la disparition de populations d'animaux et de plantes**. Certaines ne revinrent pas. D'autres survécurent dans des refuges sur les marges du champ de bataille, caractérisées par une entropie moindre. En recolonisant la zone rouge dans l'après-guerre, **la faune et la flore s'adaptèrent aux nouvelles conditions du milieu**. La dégradation de la qualité des sols par les restes enfouis de munitions constitua probablement un frein à cette renaissance. Les recherches récentes montrent d'ailleurs que cette pollution chimique constitue une problématique d'actualité pour les sociétés humaines, et ce, pour encore des années, compte tenu de la capacité de ces particules à se maintenir dans les sols. Fait inattendu, **la guerre a aussi engendré de nouveaux biotopes et favorisé l'apparition d'une biodiversité exceptionnelle** sur un champ de bataille vidé de toute vie. Cette reconquête biologique assistée par l'Homme a, entre autres, favorisé l'installation d'espèces faunistiques et floristiques remarquables pour la région. **Un certain nombre trouvent refuge dans les cratères d'obus et abris souterrains**. C'est en particulier le cas des amphibiens et des chiroptères, ayant bénéficié d'une attention particulière en cette fin de chapitre, du fait de leur diversité et de l'importance de leurs populations, d'intérêt régional à national. Cette dernière partie a ainsi tenté d'apporter une pierre à l'édifice des connaissances en matière du patrimoine naturel de la forêt, **en proposant deux cartes d'inventaire**, l'une sur les zones humides, l'autre sur les gîtes à chiroptères, toutes deux imaginées grâce au LiDAR.

Conclusion générale

L'un des objectifs du contrat de projet « *Verdun 14-18, Forêt d'Exception* », signé en 2013 pour la période 2014-2018, était d'améliorer les connaissances relatives aux patrimoines de la forêt domaniale de Verdun, territoire phare de la guerre de position de la Première Guerre mondiale. La recherche scientifique est un des domaines de prospection retenus. Dans ce cadre, la recherche doctorale a tenté de répondre aux attendus du projet en produisant des fonds documentaires solides et exploitables par les gestionnaires de la forêt. La thèse se voulait aussi novatrice sur le plan de la recherche fondamentale. Elle s'inscrit dans la lignée de travaux sur les impacts paysagers de la Grande Guerre, qui répondent à la demande sociétale, comme les commémorations du centenaire ou les enjeux écologiques. Sa démarche est construite sur la pluridisciplinarité, associant différentes sciences (géomorphologie, archéologie, histoire, écologie) et outils (LiDAR). Par ce couplage d'approches, elle propose un regard croisé sur la forêt domaniale de Verdun à travers l'usage de la télédétection et de documents d'archives permettant de retracer l'histoire du site et de mettre en avant ses spécificités environnementales et patrimoniales. La thèse contribue au développement général de la recherche en géographie environnementale, notamment par le biais d'une méthodologie éprouvée, transposable à d'autres sites de bataille, voire à des reliefs et objets géographiques autres que ceux issus de la guerre. Ainsi, **les apports de cette recherche intégrée au carrefour des sciences fondamentales et appliquées**, **sont multiples** :

- **Apports scientifiques**, permettant de rendre compte des découvertes *in situ* ;
- **Apports méthodologiques**, focalisant sur les originalités de la méthode de cartographie ;
- **Apports sociétaux**, traitant du rôle des documents invoqués dans la thèse pour les sociétés.

Cette conclusion générale se termine par des perspectives de recherche, à court ou moyen terme, à la suite des travaux engagés dans cette thèse.

1. Apports scientifiques : rappel des résultats fondamentaux

1.1. Enrichissement de l'inventaire archéogéomorphologique et écologique

L'enjeu principal de la thèse consistait à connaître précisément le nombre et la localisation des polémoformes, incluant notamment des vestiges de guerre à haute valeur patrimoniale. D'un point de vue quantitatif, **le développement d'un algorithme de cartographie semi-automatisé a permis d'en découvrir 655 474**, se déclinant en trois catégories :

- **Les cratères d'obus**, présents en grand nombre, avec pas moins de 637 445 entités repérées, incluant des formes singulières et coalescentes ;
- **Les constructions compactes associées aux abris** (à personnel et matériel) **et aux positions d'artillerie**, qui représentent jusqu'à 18 029 formes (pour le niveau de fiabilité minimal) ;
- Enfin, **les constructions linéaires** résultant de l'aménagement de tranchées et boyaux de communication, dont le kilométrage total conservé atteint 423,96 km.

À cela, s'ajoutent les résultats de l'inventaire du patrimoine naturel. **L'étude de la dimension écologique de la forêt a révélé l'existence de 24 045 zones humides potentielles** – susceptibles d'accueillir des espèces floristiques et faunistiques remarquables, comme le Sonneur à ventre jaune *(Bombina variegata)* – **et de 91 nouveaux abris bétonnés** s'ajoutant aux 69 localisés par l'ONF, constructions constituant à la fois des gîtes à chiroptères et des vestiges de guerre. De ce fait, ces derniers contribuent aussi à l'inventaire du patrimoine culturel de la forêt.

Cette thèse est aussi la première à avoir analysé la diversité morphologique exceptionnelle des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun au moyen d'une combinaison de méthodes statistiques multivariées. **Cette analyse morphométrique s'est conclue par l'élaboration d'une typologie archéogéomorphologique distinguant 59 géométries de polémoformes dont** :

- 12 types de cratères d'obus ;
- 26 types d'abris et positions d'artillerie ;
- 21 types de tranchées et boyaux de communication.

Ce catalogue de référence complète ainsi les quatre typologies de polémoformes existantes sur d'autres parties du front de l'Ouest (Stichelbaut, 2009 ; Devos *et al.*, 2015 ; Taborelli *et al.*, 2017a ; Gheyle *et al.*, 2018). Pour les archéologues et géomorphologues, un tel document sera un outil de reconnaissance des polémoformes de la Grande Guerre sur des sites voisins (ou lointains ?) n'ayant pas encore bénéficié d'une étude similaire.

1.2. Amélioration des connaissances relatives à l'histoire du champ de bataille

En complément des chiffres relatifs à leur nombre, un autre enjeu majeur de la thèse consistait à expliquer les localisations des polémoformes sur le site d'étude. Ces interprétations ont d'abord été menées au moyen d'observations *in situ* conduites entre 2013 et 2017, **ayant permis le déchiffrage de 879 polémoformes réparties sur 15 sites**, soit un total approximatif de 1 000 ha prospectés. La cartographie a été confrontée à plus d'un millier de documents historiques récoltés dans **8 centres d'archives allemands et français et dans le domaine privé** – 78 photographies aériennes et 30 plans directeurs ont été géoréférencés – renseignant sur l'histoire des paysages passés et sur l'influence de ces paysages sur l'organisation des défenses. **Il en a découlé un affinement précis et métré de trois phénomènes spatiaux** :

- **Un gradient polémologique des densités de polémoformes**, croissant à mesure que l'on se rapproche des lignes de front (staticité des bombardements et des aménagements sur les zones de contact) ;
- **Un gradient topographique**, traduisant une hausse des densités de cratère d'obus sur les hauteurs du champ de bataille (sites d'observation) et par une élévation du nombre de constructions dans les points bas (non exposés aux bombardements) ;
- **Une intégration des bois d'avant-guerre dans les dispositifs de défense** (tranchées en lisière) et le camouflage des abris et positions d'artillerie (rôle protecteur de la canopée).

De plus, l'exploitation des documents d'archives a permis, au-delà de la simple analyse spatiale des polémoformes, **d'étudier leurs temporalités durant le conflit**. Prenant la forme de cartes diachroniques, cette opération a renseigné sur les dates d'apparition des formes dans le paysage. Mieux encore, **ces cartes situent les zones d'activité du front à sept dates différentes** – en plus de donner la localisation précise des lignes de front successives – et offrent désormais un moyen d'affiner l'analyse des évolutions des doctrines de combats des deux camps entre 1916 et 1918 (*e.g.*, changements de tracé de fossé, positionnement des abris et batteries d'artillerie).

1.3. L'atteinte de la guerre sur la zone d'étude

L'analyse des densités de polémoformes, de leur superficie et des volumes qu'elles contiennent ont éclairé le caractère exceptionnel des combats sur le front de Verdun. Les comparaisons avec d'autres sites de bataille (Brenot *et al.*, 2016 ; Magnini *et al.*, 2016 ; Stichelbaut *et al.*, 2016 ; Taborelli *et al.*, 2017b) montrent que **c'est le caractère répétitif des polémoformes**, **plus que leur taille**, **qui font de Verdun un des sites les plus bouleversés de la Grande Guerre**. Les densités conséquentes de cratères d'obus relevés témoignent de la haute fréquence des bombardements, **affichant une moyenne de 77 cratères/ha sur les 9 615**

ha de la zone d'étude et des valeurs atteignant par endroit plus de 100 impacts/ha (*e.g.*, 180 impacts/ha en moyenne dans le Quadrilatère des forts). **Nous avons estimé à 7,67 km²** (7,98 % de la forêt) **la superficie occupée par les polémoformes cartographiées**, soit autant d'espace ayant vu leurs conditions topographiques changer durant le conflit. Les outils de mesure des volumes disponibles dans la plupart des SIG ont été l'opportunité de quantifier précisément le cubage des déblais et remblais des entités cartographiées, autrement dit d'estimer la part de l'érosion artificielle causée par les bombardements et aménagements du champ de bataille. **Nous avons ainsi estimé à 2,81 ± 0,04 millions de m³ le volume total de matériaux déplacés par ces activités** (la moitié par l'artillerie), **soit une tendance minimale à l'érosion de l'ordre de 9 741 t/km²/an**. Rapportés à l'hectare, ces déplacements équivalent à 260,61 m³/ha avec des pics supérieurs à 2 000 m³, le plus souvent près des forts.

1.4. État de conservation des vestiges de guerre

Un autre apport des documents d'archives, en particulier les plans directeurs, a été de fournir des informations sur l'état de conservation des polémoformes. Ceci a surtout été le cas pour les réseaux de fossés, facilement identifiables sur ces plans, qui ont par conséquent été vectorisés (ceux de 1918) puis comparés avec la situation de 2013 pour évaluer la proportion des formes disparues entre les deux dates. **Il en est ressorti l'identification de 608,16 km de fossés effacés, ce qui équivaut à une perte considérable de 58,92 % du réseau initial** (au sortir de la guerre). Cet effacement touche aussi les autres polémoformes bien qu'elles n'aient pas fait l'objet d'une étude approfondie sur les plans directeurs. La confrontation des chiffres de cratères d'obus repérés sur le LiDAR avec les estimations des artilleurs (20 à 22 millions d'impacts) révèle en effet qu'une part conséquente de ces formes a disparu au cours du siècle dernier.

Ces résultats nous ont interrogés sur les processus responsables de l'atténuation de la polémotopographie. **L'érosion anthropique liée aux travaux sylvicoles et aux activités touristiques est le premier facteur de cette déperdition**. Il s'avère que les parcelles reconverties en essences résineuses – en particulier les boisements des années 1970-1980 – et, récemment, en feuillus juvéniles sont les plus touchées par ce phénomène, avec notamment près de 51 parcelles (10,63 %) ayant perdu entre 90 et 100 % des fossés initiaux. **La part des processus naturels dans l'érosion des polémoformes ne doit pas non plus être négligée**. Cet aspect, s'il n'a pas fait l'objet d'une méthodologie précise, a mobilisé les connaissances acquises par d'autres études, notamment celles de Schwartz *et al.* (2003), Hupy et Schaetzl (2008) et Ollive (2014), d'eux d'entre elles ayant été conduites en forêt domaniale de Verdun. **Ces recherches ont mis en évidence une tendance au remblaiement naturel des polémoformes de l'ordre de 20 à 65 cm**, pouvant aller jusqu'à des accumulations de 10 m dans les vallons alentours.

2. Apports méthodologiques : intérêt d'une cartographie automatisée

2.1. Rapidité et exhaustivité de la méthode de cartographie

La totalité des résultats produits par la thèse – à l'exception de ceux issus de l'inventaire du patrimoine naturel – repose sur la cartographie générale des polémoformes et sur les produits dérivés de cette carte (cartes de densité de polémoformes, carte des volumes de matériaux déplacés, carte du bouleversement géomorphologique, carte des taux de conservation des formes). **Le défi majeur de la thèse a donc consisté à développer une méthodologie adaptée aux enjeux suscités**. Il est clair que seul le recours à l'automatisation pouvait répondre à cet objectif. Ainsi, **le développement d'un algorithme de cartographie semi-automatique** (en collaboration avec J.-P. Toumazet et J.-C. Bergès) **a permis d'inventorier et classifier les polémoformes en seulement quelques semaines alors que la même procédure menée de manière totalement manuelle aurait pris plusieurs années**.

Comme pour tout traitement automatique, la méthodologie utilisée ne permet pas une détection complète. La confrontation de la cartographie générale avec les échantillons terrains et documents d'archives (photographies aériennes en particulier) a révélé quelques lacunes dans l'inventaire, justifiant l'introduction de marges d'erreur. **En ce qui concerne les cratères d'obus**, **89,22 % des formes échantillonnées sur le terrain ont été extraits**. **Le taux de détection est légèrement plus faible pour les abris et batteries d'artillerie car il atteint 87,42 %**. Pour les réseaux de fossés, ce taux significativement haut (97,30 %) a été retravaillé (vectorisation manuelle) pour atteindre une détection de 100 %.

La classification et la part des polémoformes correctement classées ont donné les résultats suivants :

- **Pour les cratères d'obus**, les résultats sont statistiquement robustes et équivalent à **92,89 % de formes correctement classées** ;
- **La classification des abris et batteries d'artillerie s'est révélée plus difficile** compte tenu de la complexité morphométrique et de la diversité de ces formes. **Elle a été efficace sur 74,52 % d'entre elles** et s'est accompagnée de quelques erreurs de commission (cratères d'obus classés en constructions). Pour affiner les résultats, des traitements supplémentaires – quantification des remblais à proximité des formes et analyse de proximité avec les fossés – ont consisté à retirer du corpus les formes considérées comme non construites. À l'issue de cette opération, une cartographie des constructions en trois niveaux de fiabilité a été proposée ;
- Les fossés ne sont pas concernés par la classification morphométrique, inopérante pour ce type de forme. Elle a été opérée manuellement à l'aide des plans directeurs.

2.2. Une méthodologie d'inspirations multiples

Le succès de cette méthode dépend en grande partie de son caractère pluridisciplinaire. Son déploiement a impliqué de faire appel à des outils différents de ceux communément utilisés en géographie. Parmi les disciplines qui nous ont inspiré, nous trouvons, de la plus proche à la plus éloignée de notre champ :

- **la karstologie** : les formes karstiques sont relativement analogues aux polémoformes, en particulier les dolines, ayant fait l'objet de nombreuses recherches méthodologiques sur leur inventaire, et dont la morphologie est très similaire à celle des cratères d'obus ;
- **l'hydrogéomorphologie** : l'indice de sinuosité adopté pour l'étude des cours d'eau s'est révélé particulièrement efficace pour caractériser le tracé des réseaux de fossés ;
- **l'histoire** : les archives constituent les instruments de recherche privilégiés par les historiens. La méthodologie a consisté à en exploiter une partie pour reconstituer l'histoire des paysages passés de la forêt de Verdun ;
- **l'archéologie** : la plupart des méthodes de visualisation de données LiDAR décrites dans la thèse (*e.g.*, *SVF*, *LRM*) ont émergé d'équipes d'archéologues ;
- **la volcanologie** : la plupart des indices morphométriques utilisés dans la classification des polémoformes compactes et creuses sont issus de recherches en volcanologie (analyses morphologiques des cendres et pierres projetées par des éruptions volcaniques) ;
- **la planétologie** : une partie de la méthodologie développée a tiré profit des études sur les cratères d'impacts météoritiques (terrestres ou extraterrestres, notamment ceux associés aux champs de cratères lunaires et martiens), du fait de leur grande proximité morphologique avec les cratères d'obus ;
- **l'informatique** : la méthode des cartes auto-organisatrices de Kohonen appartient au champ des réseaux de neurones artificiels.

3. Apports sociétaux : contribution à la conservation du champ de bataille

3.1. Prise en compte des cartes dans le prochain plan d'aménagement forestier

Qu'en est-il du devenir des cartes produites ? **Un des intérêts majeurs de la thèse était de produire des fonds documentaires opérationnels et directement exploitables pour être intégrés au prochain plan d'aménagement forestier** et ainsi contribuer à la mise en œuvre de mesures conservatoires des polémoformes et des vestiges de guerre. Au-delà de la cartographie générale des polémoformes, renseignant sur la localisation précise des enjeux culturels et historiques, **deux cartes ont été proposées à l'échelon de la parcelle**, entité de gestion de l'ONF :

- **Une carte de sensibilité patrimoniale**, situant les parcelles riches en vestiges de guerre, sur le plan quantitatif (effectif) et qualitatif (diversité des vestiges présents) ;

- **Une carte des zones prioritaires de conservation**, rendant compte des parcelles où l'effacement des vestiges est avancé.

La seconde est particulièrement intéressante pour la gestion forestière car **elle révèle des situations alarmantes où il ne reste que peu de vestiges**, sur des parcelles qui présentent une certaine vulnérabilité du fait de leur proximité avec de grands axes de communication très fréquentés. C'est en particulier le cas dans le secteur du ravin de la Mort et, plus secondairement, dans d'autres secteurs répartis sur l'ensemble de la forêt. Il conviendra de réfléchir avec le comité de pilotage « *Forêt d'Exception* » à l'utilité de cette carte et éventuellement à revoir l'échelon d'analyse (maillage intra-parcellaire ?).

Cette recherche a aussi donné lieu à la production de cartes d'inventaire du patrimoine naturel susceptibles d'aider les forestiers dans la conservation d'habitats d'intérêt écologique. Elles dévoilent la présence de zones à enjeux non seulement sur les hauteurs de la forêt, où les zones humides sont nombreuses, mais aussi au sein des positions de défense aménagées durant le conflit, en l'occurrence les réseaux de fossés allemands de 1917 et 1918 au nord de la forêt et les fortifications françaises au sud, riches en abris bétonnés favorables à l'hibernation et à la reproduction des chiroptères.

3.2. Valorisation dans le cadre d'initiatives de médiation et de vulgarisation scientifique

Nous ne pouvons conclure sans rappeler les multiples actions de valorisation scientifique effectuées au cours de ces quatre années. **Ces initiatives – 17 au total –** conduites dans un cadre muséographique, filmographique, événementiel ou journalistique, **ont permis de porter à connaissance**, **en France ou en Europe, l'histoire des paysages et les apports du LiDAR en forêt domaniale de Verdun**. F. Cochet déclarait en 2014 que le boisement de l'ancien champ de bataille dans les années 1920-1930 « *n'est pas sans poser quelques problèmes mémoriels. Bien des visiteurs du champ de bataille pensent que les arbres recouvraient comme aujourd'hui, la totalité du site* ». Ainsi, ces actions pédagogiques conduisent à une meilleure compréhension de la forêt et à sa reconnaissance patrimoniale. Elles ont aussi pour vocation de sensibiliser les spectateurs et visiteurs sur la fragilité des vestiges de guerre et écosystèmes associés. De manière indirecte, **la conservation de l'ancien champ de bataille passe donc par ces activités éducatives**. À l'heure où les commémorations du centenaire s'achèvent, il convient de poursuivre ces initiatives car la survie de la mémoire collective de la Grande Guerre et des polémoformes en dépendent.

4. Perspectives

Au-delà des nombreux résultats qu'apporte la thèse, **d'autres pistes de recherche pourraient être explorées à court ou moyen terme** afin d'approfondir les connaissances sur le patrimoine culturel de la forêt domaniale de Verdun et d'une façon plus générale sur les paysages de guerre. Voici quelques suggestions.

4.1. Application de la méthode de cartographie sur d'autres champs de bataille

À l'origine, nous avions l'idée de développer une méthode de cartographie sur quelques sites échantillons avant de la généraliser à d'autres sites plus importants. Pour des questions purement logistiques – processus de calculs lourds – la possibilité d'une généralisation à l'ensemble de la forêt avait été exclue. La mise à notre disposition du Pôle Image de l'université Paris-Diderot, centre de ressources informatiques, nous a finalement fait réfléchir à l'éventualité « d'oser » le travail de généralisation sur tout le champ de bataille. **La relative rapidité des traitements et la robustesse des résultats qui en ont découlé nous convainquent que cette méthodologie peut être reproduite**, à condition d'avoir accès à des données LiDAR à haute résolution et des moyens informatiques adaptés au jeu de données à traiter. Les comparaisons avec d'autres champs de bataille ont souligné l'intérêt d'une telle initiative car elles ont révélé l'existence de similitude dans la morphologie des polémoformes. De plus, cette méthodologie ne se borne pas uniquement aux simples polémoformes mais se prêterait aussi à l'étude d'autres formes de relief, comme les reliefs karstiques, volcaniques et météoritiques susceptibles de présenter des géométries de formes similaires aux nôtres.

4.2. Amélioration de la cartographie des polémoformes

La cartographie générale des polémoformes présente quelques lacunes dans l'inventaire. Maintenant que leurs propriétés morphométriques sont bien connues, un moyen d'optimiser la détection consisterait à adopter une *analyse orientée objet d'images*, plus communément appelée *object-based image analysis* (OBIA). Cette approche, initialement développée en imagerie médicale et télédétection optique, est depuis peu employée en géomorphométrie pour cartographier automatiquement des formes de relief (Drăguț et Blaschke, 2006 ; Verhagen et Drăguț, 2012). Dans notre cas, il s'agirait de demander à l'ordinateur de rechercher automatiquement sur l'ensemble du MNT toutes les polémoformes similaires à une polémoforme de référence. Conformément à la typologie morphométrique obtenue sur la forêt domaniale de Verdun, l'opération pourrait donc être effectuée 59 fois, soit le nombre de géométries identifiées sur notre site d'étude. Cette méthodologie permettrait d'affiner la cartographie et d'obtenir notamment des chiffres précis quant au nombre réel d'abris et batteries d'artillerie, formes étudiées conjointement compte tenu de leur proximité morphologique. **Cette piste a déjà fait l'objet d'une réflexion avec J.-P. Toumazet**.

4.3. Vers une géomorphologie dynamique et quantitative du champ de bataille

Une autre piste de réflexion consisterait à développer le volet géomorphologique de la thèse, plus particulièrement celui de la quantification de l'érosion artificielle d'origine militaire. Cet aspect, peu abordé, mériterait d'être approfondi en raison des moyens techniques disponibles depuis peu sur la forêt domaniale de Verdun. Nous faisons notamment allusion à la dernière mission LiDAR aéroportée conduite en février 2018 sur les forêts de Verdun et de Spincourt, ayant donné lieu à de nouvelles données altimétriques capables de renseigner sur l'état du relief cinq ans après la première mission LiDAR. Sur le plan de l'érosion naturelle, le court laps de temps écoulé entre les deux missions ne permettrait pas d'évaluer la part des processus naturels dans l'effacement des polémoformes. En revanche, **l'exploitation de ces nouvelles données offrirait un moyen d'évaluer l'efficience des nouvelles mesures conservatoires engagées par l'ONF** depuis la signature du contrat de projet « *Forêt d'Exception* ». Par ailleurs, l'acquisition d'un corpus de photographies aériennes d'époque – pouvant être complété par d'autres fonds (*e.g.*, archives du musée de l'Armée, non consultées durant la thèse) – laisse envisager de nouveaux développements méthodologiques, en particulier photogrammétriques, connus pour leur capacité à modéliser le relief en 3-D. Comme l'ont testé Stichelbaut (2009) et Ollive (2014) sur quelques zones échantillons, **la construction d'un « paléo-MNT » servirait à connaître précisément les conditions géomorphologiques de 1914-1918 et à songer à une évaluation « plus en profondeur » des changements topographiques au cours du siècle dernier**. Enfin, une telle approche pourrait être complétée et validée au moyen de carottages déployés sur le terrain – comme l'a fait Ollive (2014) près de la côte du Poivre **– opération qui permettrait d'estimer précisément l'épaisseur des matériaux érodés ou déposés entre 1918 et 2018**.

En somme, si le couplage de l'outil LiDAR et d'une approche transdiciplinaire permet de retracer l'histoire de la forêt domaniale de Verdun et d'en exposer les conditions géomorphologiques actuelles et passées, le travail s'inscrit aussi dans une recherche plus large des paysages hérités de la Grande Guerre et pose les jalons de la recherche du futur sur l'ancien champ de bataille.

Bibliographie

A

ADDERLEY P., MILLS C., 2014. Landscapes of conflict. *Landscapes*, Vol. 15, n°2, pp. 98-102. DOI : 10.1179/1466203514Z.00000000027

AGACHE R., BRÉART B., 1975. *Atlas d'archéologie aérienne de Picardie : le bassin de la Somme et ses abords à l'époque protohistorique et romaine*. Société des Antiquaires de Picardie, Amiens, 164 p.

AGACHE R., 1979. Nouveaux apports des prospections aériennes en archéologie préromaine et romaine de la Picardie. Résultats archéologiques. *Cahiers archéologiques de Picardie*, n°6, pp. 33-90. DOI : 10.3406/pica.1979.1290

AGACHE R., BLANCHET J.-C., 2018. L'archéologie aérienne dans la France du Nord [consulté le 1er mai 2018]. URL : www.archeologie-aerienne.culture.gouv.fr/fr/

AGARWAL P., SKUPIN A., 2008. *Self-Organising Maps: Applications in geographic information science*. John Wiley and Sons, Chichester, 214 p.

AGGLOMÉRATION DU GRAND VERDUN, 2015. *Contrat de ville du Grand Verdun (2015-2020)* [consulté le 04 mars 2016]. URL : www.meuse.gouv.fr/content/download/12845/81299/file/Contrat%20de%20ville%20d%20Grand%20Verdun.pdf

ALEXANDER B., 2012. *Sun Tzu ou l'art de gagner des batailles : Saratoga, Waterloo, Gettysburg, la Marne, la Bataille de France, Stalingrad, la Normandie, la Corée*. Traduit de l'anglais par J. Bersani, Tallandier, Paris, 295 p.

ALLOUIS T., BAILLY J.-P., PASTOL Y., LE ROUX C., 2010. Utilisation conjointe de trains d'ondes LiDAR vert et infrarouge pour la bathymétrie des eaux de très faibles profondeurs. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n°191, pp. 52-61. URL : hal.archives-ouvertes.fr/hal-00581299/document

AMAT J.-P., 1987. Guerre et milieux naturels : les forêts meurtries de l'Est de la France, 70 ans après Verdun. *L'Espace géographique*, Vol. 16, n°3, pp. 217-233. DOI : 10.3406/spgeo.1987.4253

— 1988. La photographie militaire aérienne, source pour l'étude des paysages ruraux de la Grande Guerre. In : MUSÉE DE L'ARMÉE ET MUSÉE D'HISTOIRE CONTEMPORAINE (EDS), *Vues d'en haut 14-18 : la photographie aérienne pendant la guerre de 1914-1918. Exposition du 20 octobre 1988 au 31 janvier 1989. Hôtel national des Invalides*. Musée de l'armée, Musée d'histoire contemporaine, Paris, pp. 37-42

— 2001. *La forêt entre guerre et paix, 1870-1995 : étude de biogéographie historique sur l'arc meusien de l'Argonne à la Woëvre*. Thèse d'État, université de Lille 1, Lille, 1285 p.

— 2002. Bois et forêts du champ de bataille arrageois, une reconstitution entre anonymat et gloire. In : *La Grande Reconstruction - Reconstruire le Pas-de-Calais après la Grande Guerre*. Actes du colloque d'Arras, 8-10 novembre 2000, Archives départementales du Pas-de-Calais, pp. 143-158

— 2015. *Les forêts de la Grande Guerre : histoire, mémoire, patrimoine*. Presses de l'Université Paris-Sorbonne, Paris, 548 p.

AMAT J.-P., FOUCAULT B. DE, 1999. *Contribution à une monographie historique, floristique et phytosociologique du plateau de Douaumont (forêt domaniale de Verdun)*. ONF, Bar-le-Duc, Service Départemental de la Meuse, 128 p.

ANGEL J. C., NELSON D. O., PANNO S. V., 2004. Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: An example from Illinois' sinkhole plain. *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. 66, n°1, pp. 9−17. URL : ww.caves.org/pub/journal/PDF/V66/v66n1-Angel.pdf

ANONYME, 1916. De l'étude des organisations allemandes par le moyen des photographies aériennes. 1ère partie. Les travaux de sapes. *Bulletin du service de la photographie aérienne aux armées*, n°3, pp. 3-32

ANONYME, 1921. La Grande Guerre dans les revues et les livres. *Les Archives de la Grande Guerre et de l'Histoire Contemporaine*, Vol. 7, pp. 113-128. URL : gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6583285b?rk=21459;2

ANONYME, NON DATÉ. *Historique du 166ème régiment d'infanterie pendant la guerre 1914-1918*. Numérisé par M. Teraillon, Berger-Levrault, Nancy-Paris-Strasbourg, 40 p.

ANONYME, NON DATÉ. *Historique du 4ème régiment de Zouaves*. Numérisé par J. Charraud, Imprimerie nationale, Paris, 86 p. URL : www.horizon14-18.eu/wa_files/RZ004_Histo.pdf

ARNAUD-FASSETTA G., 2008. La géoarchéologie fluviale : concepts, attendus et méthodes d'étude rétrospectives appliqués à la caractérisation du risque hydrologique en domaine méditerranéen. *EchoGéo*, n°4, 14 p. URL : journals.openedition.org/echogeo/2187 ; DOI : 10.4000/echogeo.2187

ARNOULD P., SIMON L., 1994. Forêts, guerre, après-guerre autour du Chemin-des-Dames. In : CORVOL A., AMAT J.-P. (EDS), *Forêt et guerre*. L'Harmattan, Paris, pp. 251-269

ASADPOUR A., 2016. From landscape of conflict to landscape of defense. Concepts and relations of landscape to war. *Manzar*, n°34, pp. 50-57

B

BACCHUS M., 1988. L'utilisation des photographies aériennes pour l'établissement des plans directeurs pendant la guerre de 1914-1918. In : MUSÉE DE L'ARMÉE ET MUSÉE D'HISTOIRE CONTEMPORAINE (EDS), *Vues d'en haut 14-18 : la photographie aérienne pendant la guerre de 1914-1918. Exposition du 20 octobre 1988 au 31 janvier 1989. Hôtel national des Invalides*. Musée de l'armée, Musée d'histoire contemporaine, Paris, pp. 29-36

BARNAUD G., FUSTEC É., 2007. *Conserver les milieux humides : pourquoi ? comment ?*. Éditions Quae et Educagri, Versailles, Dijon, 295 p.

BATER C. W., COOPS N. C., 2009. Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. *Computers & Geosciences*, Vol. 35, n°2, pp. 289-300. DOI : 10.1016/j.cageo.2008.09.001

BAUSINGER T., PREUß J., 2005. Environmental remnants of the First World War: Soil contamination of a burning ground for arsenical ammunition. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol. 74, n°6, pp. 1045-1052. DOI : 10.1007/s00128-005-0686-z

BAUSINGER T., BONNAIRE É., PREUß J., 2007. Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun. *Science of the Total Environment*, Vol. 382, pp. 259-271. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2007.04.029

BECKER M., 1996. Paysage perçu, paysage vécu, paysage planifié. Le cas de Belle-Île-en-Mer. *Revue géographique de l'Ouest et des pays de l'Atlantique Nord*, n°170, pp. 407-418. DOI : 10.3406/noroi.1996.6719

BERHE A. A., 2007. The contribution of landmines to land degradation. *Land Degradation & Development*, Vol. 18, n°1, pp. 1-15. DOI : 10.1002/ldr.754

BERNÈDE A., 2002. *Verdun 1916 : le point de vue français*. Cénomane, Le Mans, 382 p.

BEROUTCHACHVILI N., BERTRAND G., 1978. Le géosystème ou « système territorial naturel ». *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, Vol. 49, n°2, pp. 167-180. DOI : 10.3406/rgpso.1978.3548

BERTRAND G., 1978. Le paysage entre la Nature et la Société. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, Vol. 49, n°2, pp. 239-258. DOI : 10.3406/rgpso.1978.3552

BERTRAND G., TRICART J., 1968. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, Vol. 39, n°3, pp. 249-272. DOI : 10.3406/rgpso.1968.4553

BERTRAND G., DOLLFUS O., 1973. Le paysage et son concept. *L'Espace géographique*, Vol. 2, n°3, pp. 161-163. URL : www.persee.fr/doc/spgeo_0046-2497_1973_num_2_3_1395

BÉTARD F., 2015. Protection et valorisation du patrimoine géomorphologique en Île-de-France (Bassin de Paris, France). *VertigO*, Vol. 15, n°1, 30 p. URL : www.journals.openedition.org/vertigo/16115 ; DOI : 10.4000/vertigo.16115

— 2017. *Géodiversité, biodiversité et patrimoines environnementaux. De la connaissance à la conservation et à la valorisation*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Vol. 1, université Paris-Diderot, Paris, 270 p.

BÉTARD F., HOBLÉA F., PORTAL C., 2017. Les géopatrimoines, de nouvelles ressources territoriales au service du développement local. *Annales de géographie*, n°717, pp. 523-543. URL : www.cairn.info/revue-annales-de-geographie-2017-5-page-523.htm ; DOI : 10.3917/ag.717.0523

BEWLEY R. H., CRUTCHLEY S. P., SHELL C. A., 2005. New light on an ancient landscape: Lidar survey in the Stonehenge World Heritage Site. *Antiquity*, Vol. 79, n°305, pp. 636-647. DOI : 10.1017/S0003598X00114577

BEYEL (L[CL]), 1911. *Artilleries allemande et française. Comparaison*. Berger-Levrault, Nancy, Paris, 92 p.

BEYLOT A., 2009. Images of conflict: An introduction. In : STICHELBAUT B., BOURGEOIS J., SAUNDERS N., CHIELENS P. (EDS), *Images of conflict: Military aerial photography and archaeology*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne, pp. 135-150

BILODEAU C., DEROIN J.-P., SITTLER B., 2008. Le LiDAR. Apports en archéologie. *Archéopages*, n° 23, pp. 64-77. URL : dolia.inrap.fr/flora/ark:/12345/01393 71

BILODEAU C., 2010. *Apports du LiDAR à l'étude de la végétation des marais salés de la baie du Mont-Saint-Michel*. Thèse de doctorat, université Paris-Est, Champs-sur-Marne, 209 p. URL : tel.archives-ouvertes.fr/tel-00587416/document

BLADES B. S., 2003. European military sites as ideological landscapes. *Historical Archaeology*, Vol. 37, n°3, pp. 46-54. DOI : 10.1007/BF03376610

BOLIS A., 2016. *« Dernière chance pour la biodiversité » - Les arbres de Verdun, déplacés pour le climat* [consulté le 19 février 2018]. Les grands formats du Monde. URL : www.lemonde.fr/planete/visuel/2016/07/29/derniere-chance-pour-la-biodiversite-les-arbres-de-verdun-premiers-deplaces-climatiques_4976100_3244.html

BOLLANDSAS O. M., RISBØL O., NESBAKKEN A., GOBAKKEN, NÆSSET E., 2012. Using airborne small-footprint laser scanner data for detection of cultural remains in forests: An experimental study of the effects of pulse density and DTM smoothing. *Journal of Archaeological Science*, Vol. 39, n° 8, pp. 2733-2743. DOI : 10.1016/j.jas.2012.04.026

BOULANGER P., 2001. Le paysage de guerre dans le canton de Lassigny. *Ruralia*, n°8, 25 p. URL : journals.openedition.org/ruralia/216

— 2006. *Géographie militaire*. Ellipses, Paris, 384 p.

BOUQUET C., 2011. Conflits et risques de conflits liés à l'eau en Afrique. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, n°255, pp. 341-362. URL : journals.openedition.org/com/6283 ; DOI : 10.4000/com.6283

BOURGEOIS J., STICHELBAUT B., 2009. Military aerial photographs from 1914 to the present: A survey of the sources. In : STICHELBAUT B., BOURGEOIS J., SAUNDERS N., CHIELENS P. (EDS), *Images of conflict: Military aerial photography and archaeology*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne, pp. 1-12

BOURGET E., LE DÛ-BLAYO L., 2010. Définition d'unités paysagères par télédétection en Bretagne : méthodes et critiques. *Norois*, n°216, pp. 69-83. URL : journals.openedition.org/norois/3399 ; DOI : 10.4000/norois.3399

BRENOT J., SAULIÈRE N., LÉTY C., TABORELLI P., ZÉLIE B., BLONDEAU R., DEVOS A., DESFOSSES Y., 2017. How much did the soldiers dig? A quantification of WW1 remains in Argonne, France. *Geoarchaeology*, Vol. 32, n°5, pp. 534-548. DOI : 10.1002/gea.21623

BRGM, 1958. *Étain* [document cartographique]. 1 : 50 000, Carte géologique de la France, feuillet 136, Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Orléans

BRGM, 1969. *Verdun-sur-Meuse* [document cartographique]. 1 : 50 000, Carte géologique de la France, feuillet 135, Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Orléans

BRICE J. C., 1964. *Channel patterns and terraces of the Loup River in Nebraska*. United States Geological Society, Washington, Paper 422-D, 41 p. URL : pubs.usgs.gov/pp/0422d/report.pdf

BROSSARD T., WIEBER J.-C., 1980. Essai de formulation systématique d'un mode d'approche du paysage. *Bulletin de l'Association de géographes français*, n°468-469, pp. 103-111. DOI : 10.3406/bagf.1980.5160

— 1984. Le paysage : trois définitions, un mode d'analyse et de cartographie. *L'Espace géographique*, Vol. 13, n°1, pp. 5-12. DOI : 10.3406/spgeo.1984.3887

BROUSSE G., thèse en cours. *Efficience des travaux de restauration et résilience des rivières torrentielles altérées*. Thèse de doctorat, université Paris-Diderot, Paris

BUREL F., BAUDRY J., 1999. *Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*. Éditions TEC & DOC, Paris, 359 p.

BURIDANT J., 2003. La forêt mutilée – la reconstitution forestière dans l'Aisne après la Grande Guerre. *Graines d'Histoire – La mémoire de l'Aisne*, n°17, pp. 13-24

— 2006. Effacer la guerre : la reconstitution forestière de la zone rouge sur le Chemin des Dames. In : MARTIN P., SIMIZ S. (EDS), *L'empreinte de la guerre : de la Grèce classique à la Tchétchénie*. Lavauzelle, Panazol, pp. 507-518

BURNOUF J., 2014. Historiographie, attendus épistémologiques et concepts de la géoarchéologie. In : CARCAUD N., ARNAUD-FASSETTA G. (EDS), *La géoarchéologie française au XXI*ème *siècle*. CNRS Éditions, Paris, pp. 9-12

C

CALOZ R., COLLET C., 2011. *Analyse spatiale de l'information géographique*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 383 p.

CAPPS TUNWELL D., PASSMORE D. G., HARRISON S., 2015. Landscape archaeology of World War Two German logistics depots in the Forêt domaniale des Andaines. *International Journal of Historical Archaeology*, Vol. 19, n°2, pp. 233-261. DOI : 10.1007/s10761-015-0287-4

— 2016. Second World War bomb craters and the archaeology of Allied air attacks in the forests of the Normandie–Maine National Park, NW France. *Journal of Field Archaeology*, Vol. 41, n°3, pp. 312-330. DOI : 10.1080/00934690.2016.1184930

— 2017. A witness in the landscape: The bombing of the Forêt domaniale des Andaines and the Normandy campaign, NW France, 1944. *War in History*, Vol. 25, n°1, pp. 69-102. DOI : 10.1177/0968344516650228

CARMAN J., 2005. Battlefields as cultural resources. *Post-Medieval Archaeology*, Vol. 39, n°2, pp. 215-223. DOI : 10.1179/007943205X62624

CARMAN J., CARMAN P., 2006. *Bloody meadows: Investigating landscapes of battle*. The Sutton publishing, Thrupp, 242 p.

CARNEIRO C., MORELLO E., DESTHIEUX G., 2009. Assessment of solar irradiance on the urban fabric for the production of renewable energy using LIDAR data and image processing techniques. In : SESTER M., BERNARD L., PAELKE V. (EDS), *Advances in GIScience*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 83-112. DOI : 10.1007/978-3-642-00318-9_5

CARPENTIER C., 2004. *Géométries et environnements de dépôt de l'Oxfordien de l'Est du Bassin de Paris.* Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy, 470 p. URL : tel.archives-ouvertes.fr/tel-00008237/document

CELI M., 1991. The impact of bombs of World War I on limestone slopes of Monte Grappa. In : *Proceedings, International conference on environmental changes in karst areas*. International Geographical Union, International Speleological Union, università di Padova, Padoue, pp. 279-287. URL : wug.cab.unipd.it:8080/DigLib/DataBase/repository/106262684926/parte_decima_da_pag_279_a_304.pdf

CERTINI G., SCALENGHE R., WOODS W. I., 2013. The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*, Vol. 127, pp. 1-15. DOI : 10.1016/j.earscirev.2013.08.009

CÉSAR J., 1825. *Guerre des Gaules.* Traduit du latin par T. Berlier, Parmantier, Paris, 401 p.

CHALLIS K., FORLIN P., KINCEY M., 2011. A generic toolkit for the visualization of archaeological features on airborne LiDAR elevation data. *Archaeological Prospection*, Vol. 18, n°4, pp. 279-289. DOI : 10.1002/arp.421

CHASE A. S. Z., CHASE D. Z., CHASE A. F., 2017. LiDAR for archaeological research and the study of historical landscapes. In : MASINI N., SOLDOVIERI F. (EDS), *Sensing the past. Geotechnologies and the environment*. Springer, Cham, pp. 89-100. DOI : 10.1007/978-3-319-50518-3_4

CLAUSEWITZ C., 2006. *De la guerre.* Traduit de l'allemand par L. Murawiec, Perrin, Paris, 427 p.

CLOUËT L. (ABBÉ), 1867. *Histoire de Verdun et du pays verdunois*. Ch. Laurent, Verdun, Tome 1, 538 p. URL :gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k853832x.r=Histoire%20de%20Verdun%20et%20du%20pays%20verdunois?rk=42918;4

CLOUT H. D., 1993. The revival of rural Lorraine after the Great War. *Geografiska Annaler*, Vol. 75B, n°2, pp. 73-91. DOI : 10.2307/490701

— 1996. *After the ruins. Restoring the countryside of Northern France after the Great War*. University of Exeter Press, Exeter, 350 p.

CLYNES T., 2018. *Exclusive: laser scans reveal Maya "Megalopolis" below guatemalan jungle* [consulté le 17 mars 2018]. National Geographic. URL : news.nationalgeographic.com/2018/02/maya-laser-lidar-guatemala-pacunam/

COCHET F., 2014. *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle. 1914-1918*. Perrin, Ministère de la Défense, Paris, 517 p.

COMBAUD A., DEVOS A., CHALUMEAU L., TABORELLI P., BOLLOT N., 2016. Les plans directeurs de la Grande Guerre. Une nécessaire innovation cartographique. *Revue internationale de géomatique*, Vol. 26, n°3, pp. 363-393. DOI : 10.3166/rig.2016.00004

COMENTALE B., 2012. Du patrimoine artisanal au patrimoine géomorphologique sur la marge méridionale du Massif armoricain. *Géocarrefour*, Vol. 87, n°3-4, pp. 229-238. URL : www.journals.openedition.org/geocarrefour/88592655 ; DOI : 10.4000/geocarrefour.8859

CORTI MENESES N., BAIER S., GEIST J., SCHNEIDER T., 2017. Evaluation of green-LiDAR data for mapping extent, density and height of aquatic reed beds at Lake Chiemsee, Bavaria-Germany. *Remote Sensing*, Vol. 9, n° 12, 17 p. DOI : 10.3390/rs9121308

CORVOL A., AMAT J.-P. (EDS), 1994. *Forêt et guerre*. L'Harmattan, Paris, 325 p.

CORYELL S., 2002. Le grand mensonge des « guerres propres » – Au Vietnam, l'Agent Orange tue encore [consulté le 25 avril 2018]. *Le Monde Diplomatique*, mars. URL : www.monde-diplomatique.fr/2002/03/CORYELL/8572

CROW P., BENHAM S., DEVEREUX B. J., AMABLE G. S., 2007. Woodland vegetation and its implications for archaeological survey using lidar. *Forestry*, Vol. 80, n° 3, pp. 241-252. DOI : 10.1093/forestry/cpm018

D

DANCHIN E., 2011. Destruction du patrimoine et figure du soldat allemand dans les cartes postales de la Grande Guerre. *Revue historique des armées*, n°10, 23 p. URL : journals.openedition.org/amnis/1371 ; DOI : 10.4000/amnis.1371

DARDIGNAC C., BENAILY G., 2015. *Le Camp retranché de Paris : prospections archéologiques dans les forêts domaniales franciliennes*. Rapport de prospections archéologiques, Office National des Forêts, Agence Études Ile-de-France Nord-Ouest, Parc de la Faisanderie, Fontainebleau, 219 p., non publié

DE AUER VÉRAN F., 2008. *Archives de l'aéronautique militaire de la Première Guerre mondiale. Répertoire numérique détaillé de la série A, 1914-1919, et guide des sources.* Service historique de la Défense, Département de l'armée de l'air, Vincennes, 570 p. URL : www.servicehistorique.sga.defense.gouv.fr/sites/default/files/SHDAI_GRE_1A_2A.pdf

DE BEAUCHAMP, 1837. *Histoire de la Guerre d'Espagne et de Portugal sous Napoléon*. Tome 1, Renouard, Paris, 380 p.

DEL RÍO L., GRACIA F. J., BENAVENTE J., 2013. Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, Vol. 196, pp. 252-266. DOI : 10.1016/j.geomorph.2012.07.027

DE MATOS-MACHADO R., 2013, *Impacts de la Première Guerre mondiale sur le milieu naturel dans le nord et le nord-est de la France : apports d'une approche anthropo-géormorphologique à la compréhension des polémosystèmes induits par un conflit militaire*. Mémoire de master 1, université Paris-Diderot, Paris, 109 p.

— 2014. *Apport de la télédétection LiDAR à l'étude géomorphologique d'un champ de bataille de la Première Guerre mondiale : exemple de la forêt domaniale de Verdun (Meuse)*. Mémoire de master 2, université Paris-Diderot, Paris, 113 p.

— 2019. Verdun - Meuse. In : ARNAUD-FASSETTA G., CARCAUD N. (EDS), *Les rivières en villes - Aujourd'hui, hier, demain*. CNRS Éditions, sous presse

DE MATOS-MACHADO R., AMAT J.-P., ARNAUD-FASSETTA G., 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*, n°38, 23 p. URL : journals.openedition.org/echogeo/14791 ; DOI : 10.4000/echogeo.14791

DE MATOS-MACHADO R., HUPY J. P., 2019. The conflict landscape of Verdun, France: Conserving cultural and natural heritage after WW1. In : LOOKINGBILL T., SMALLWOOD P. (EDS), *Collateral values: The natural capital created by landscapes of war*. Springer, sous presse

DE MATOS-MACHADO R., TOUMAZET J.-P., BERGÈS J.-C., AMAT J.-P., ARNAUD-FASSETTA G., BÉTARD F., BILODEAU C., HUPY J. P., JACQUEMOT S., 2019. War landform mapping and classification on the Verdun battlefield (France) using airborne LiDAR and multivariate analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*. Accepté

DEPARTMENT OF THE ARMY, 1981. *Explosive ordnance reconnaissance*, Headquarters, field manual, Washington, 318 p.

DEPRAZ S., 2008. *Géographie des espaces naturels protégés*. Armand Colin, Paris, 320 p.

DE REU J., BOURGEOIS J., BATS M., ZWERTVAEGHER A., GELORINI V., DE SMEDT P., CHU W., ANTROP M., DE MAEYER P., FINKE P., 2013. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, Vol. 186, pp. 39-49. DOI : 10.1016/j.geomorph.2012.12.015

DESFOSSÉS Y., JACQUES A., PRILAUX G., 2008. *L'archéologie de la Grande Guerre*. Éditions Ouest-France, Rennes, 127 p.

DESROUSSEAUX DE MEDRANO E. (ED), 2016. *Dans la bataille : Verdun 1916*. Nouvelles éditions Jean-Michel Place, Paris, 158 p.

DE VARIGNY H., 1915. Mines et tranchées. *Pages d'histoire – 1914-1915*, Vol. 82, 81 p.

DEVEREUX B. J., AMABLE G. S., CROW P., CLIFF A. D., 2005. The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity*, Vol. 79, n°305, pp. 648-660. DOI : 10.1017/S0003598X00114589

DEVEREUX B. J., AMABLE G. S., CROW P., 2008. Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. *Antiquity*, Vol. 82, n°316, pp. 470-479. DOI : 10.1017/S0003598X00096952

DEVOS A., TABORELLI P., DODICI M., CHALUMEAU L., BURIDANT J., BOLLOT N., COMBAUD A., DESFOSSÉS Y., 2015. Rôle des conditions géographiques sur l'organisation spatiale des réseaux de défense de la Grande Guerre. Application à la Champagne (région de Reims). *Physio-Géo*, Vol. 9, p. 157-174. URL : journals.openedition.org/physio-geo/4615 ; DOI : 10.4000/physio-geo.4615

DILTS T. E., 2015. *Stream Gradient and Sinuosity Toolbox for ArcGIS 10.1*. University of Nevada, Reno. URL : www.arcgis.com/home/item.html?id=c8eb4c21384e45258ccba1b33cd4e3cb

DOCTOR D. H., YOUNG J. A., 2013. An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter LIDAR-derived digital elevation data. In : LAND L., DOCTOR D. H., STEPHENSON J. B. (EDS), *Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst: Proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference, May 6-10, Carlsbad, New Mexico*. NCKRI Symposium 2., National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, pp. 449-458. URL : www.marshall.edu/cegas/geohazards/2013pdf/presentations/GeohazS5/3_Doctor-Young_LIDAR%20for%20sinkholes_GeohazardsForum_2013.pdf

DOLLINGER-LÉONARD Y., 1958. De la cité romaine à la ville médiévale dans la région de la Moselle et la Haute Meuse. In : MAYER T. (ED), *Studien zu den Anfängen des europäischen Städtewesens: Reichenau-Vorträge, 1955-1956*. Vorträge und Forschungen,

Institut für geschichtliche Landesforschung des Bodenseegebietes, Lindau-Constance, Vol. 4, pp. 195-226. DOI : 10.11588/vuf.1975.0.15363

DONEUS M., BRIESE C., FERA M., JANNER M., 2008. Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. *Journal of Archaeological Science*, Vol. 35, n°4, pp. 882-893. DOI : 10.1016/j.jas.2007.06.013

DONEUS, M., BRIESE, C., 2011. Airborne laser scanning in forested areas - Potential and limitations of an archaeological prospection technique. In : COWLEY D. (ED), *Remote sensing for archaeological heritage management. Proceedings of the 11th EAC heritage management symposium, Reykjavik*. EAC Occasional Paper No. 5, Occasional Publication of the Aerial Archaeology Research Group No. 3, EAC, Brussels, pp. 53-76

DO PAÇO A., 1962. Em torno de Aljubarotta. I-O problema dos ossos dos combatentes da batalha. *Anais da Academia Portuguesa da História*, Vol. 2, n°12, pp. 115-63

DOYLE P., 2006. Military geology and the Battle of Gettysburg, July 1863. *Geology Today*, Vol. 22, n°4, p. 142-149. DOI : 10.1111/j.1365-2451.2006.00571.x

— 2014. Geology and the war on the Western Front, 1914-1918. *Geology Today*, Vol. 30, n°5, p. 183-191. DOI : 10.1111/gto.12066

DOYLE P., BENNETT M. R., 1997. Military geography: terrain evaluation and the British Western Front 1914-1918. *The Geographical Journal*, Vol. 163, n°1, p. 1-24. DOI : 10.2307/3059682

DOYLE P., BENNETT M. R., COCKS F. M., 2000. Geology and warfare on the British sector of the Western Front 1914-1918. In : ROSE E. P. F., NATHANAIL C. P. (EDS), *Geology and warfare: Examples of the influence of terrain and geologists on military operations*. The Geological Society, Bath, pp. 179-235

DOYLE P., BOSTYN F., BARTON P., VANDEWALLE J., 2001. The underground war 1914-1918: The geology of the Beecham dugout, Passchendaele, Belgium. *Proceedings of the Geologists' Association*, Vol. 112, n°3, p. 263-274. DOI : 10.1016/S0016-7878(01)80006-7

DOYLE P., BENNETT M. R. (EDS), 2002. *Fields of battle: Terrain in military history*. Springer, Dordrecht, 390 p. DOI : 10.1007/978-94-017-1550-8

DOYLE P., BARTON P., VANDEWALLE J., 2005. Archaeology of a Great War dugout: Beecham Farm, Passchendaele, Belgium. *Journal of Conflict Archaeology*, Vol. 1, n°1, p. 45-66. DOI : 10.1163/157407705774928908

DOZIER J., FREW J., 1990. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, n°5, pp. 963-969. DOI : 10.1109/36.58986

DRĂGUȚ L., BLASCHKE T., 2006. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, Vol. 81, n°3-4, p. 330-344. DOI : 10.1016/j.geomorph.2006.04.013

DROUIN A., SAINT-LAURENT D., 2010. Comparaison des méthodes d'interpolation pour l'élaboration de modèles numériques d'élévation de haute précision dans la représentation micro-topographique des plaines inondables. *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 55, n°4, pp. 526-539. DOI : 10.1080/02626667.2010.481088

DUBAIL E., JACQUINET G., 2011. La construction de campagne. In : JACQUEMOT S., LEGENDRE J.-P. (EDS), 2011. *Vestiges de guerres en Lorraine : le patrimoine des conflits mondiaux*. Serpenoise, Metz, pp. 65-70

DUBAIL E., STEINBACH F., 2013. Des matériaux de construction variés. In : SCHNITZLER B., LANDOLT M. (EDS), 2013. *À l'est, du nouveau ! Archéologie de la Grande Guerre en Alsace et en Lorraine*. Éditions des Musées de la Ville de Strasbourg, Strasbourg, pp. 133-136

DUCHE S., 2013. *La pollution de l'air en région parisienne : exposition et perception sur les sites touristiques*. Thèse de doctorat, université Paris-Diderot, Paris, 259 p. URL : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00840818/document

DUDLEY J. P., GINSBERG J. R., PLUMPTRE A. J., HART J. A., CAMPOS L. C., 2002. Effects of war and civil strife on wildlife and wildlife habitats. *Conservation biology*, Vol. 16, n°2, p. 319-329. DOI : 10.1046/j.1523-1739.2002.00306.x

DUMARCHE L., 1988. La photographie aérienne de 1914-1918 : une nouvelle arme de guerre. In : MUSÉE DE L'ARMÉE ET MUSÉE D'HISTOIRE CONTEMPORAINE (EDS), *Vues d'en haut 14-18 : la photographie aérienne pendant la guerre de 1914-1918. Exposition du 20 octobre 1988 au 31 janvier 1989. Hôtel national des Invalides*. Musée de l'armée, Musée d'histoire contemporaine, Paris, pp. 8-15

DURUP DE BALEINE A., 2001. L'ouvrage fortifié de Froideterre : de l'outil de défense au paysage de mémoire. In : DUPRE J.-P. GAL (ED), *Le Génie*. Revue Historique des Armées, ministère de la Défense, Vincennes, numéro hors-série, pp. 50-60

E

EHESS, *Verdun*. Notice communale, Ldh/EHESS/Cassini [consultée le 19 février 2018]. École des Hautes Études en Sciences Sociales (EHESS), Paris. URL : cassini.ehess.fr/cassini/fr/html/fiche.php?select_resultat=39383

EHSANI A. H., QUIEL F., 2009. Self-organizing maps for multi-scale morphometric feature identification using shuttle radar topography mission data. *Geocarto International*, Vol. 24, n°5, 335-355. DOI : 10.1080/10106040802642577

ENAY R., BOULLIER A., 1981. L'âge du complexe récifal des Côtes de Meuse entre Verdun et Commercy et la stratigraphie de l'Oxfordien dans l'Est du Bassin de Paris. *Geobios*, Vol. 14, n°6, pp. 727-771. DOI : 10.1016/S0016-6995(81)80150-7

ESRI, 2018a. *Fonction courbure* [consulté le 5 mai 2018]. URL : http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm

— 2018b. *Notions de base de l'orthorectification d'un jeu de données raster* [consultées le 30 mars 2018]. Environmental systems research institute (ESRI), Redlands, États-Unis. URL : desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-of-orthorectifying-a-raster-dataset.htm

— 2018c. *Notions de base du géoréférencement d'un jeu de données raster* [consultées le 30 mars 2018]. Environmental systems research institute (ESRI), Redlands, États-Unis. URL :

desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm

ÉTIENNE L., 2014. *Accentuation récente de la vulnérabilité liée au recul du trait de côte et à l'extension des sebkhas dans l'archipel de Kerkennah (Tunisie)*. Thèse de doctorat, université Paris-Diderot, Paris, 328 p.

EVANS I. S., 1972. General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics. In : CHORLEY R. J. (ED), *Spatial Analysis in Geormorphology*. Methuen & Co, Londres, pp. 17-90

— 1980. An integrated system of terrain analysis and slope mapping. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 36, pp. 274-295

F

FARCY C., 1872. *Histoire de la Guerre de 1870-1871 : l'Empire. - La République*. J. Dumaine, Paris, 504 p.

FAUX R. N., BUFFINGTON J. M., WHITLEY M. G., LANIGAN S. H., ROPER B. B., 2009. Use of airborne near-infrared LiDAR for determining channel cross-section characteristics and monitoring aquatic habitat in Pacific Northwest rivers: A preliminary analysis. In : BAYER J. M., SCHEI J. L. (EDS), *PNAMP Special Publication: Remote sensing applications for aquatic resource monitoring*. Pacific Northwest Aquatic Monitoring partnership, Cook, pp. 43-60. URL : www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2009_faux_r001.pdf

FOMBARON J.-C., 2013. L'évolution de la notion de fortification de campagne dans l'armée allemande. In : SCHNITZLER B., LANDOLT M. (EDS), 2013. *À l'est, du nouveau ! Archéologie de la Grande Guerre en Alsace et en Lorraine*. Éditions des Musées de la Ville de Strasbourg, Strasbourg, p. 143

FOUACHE E., 2010. L'approche géoarchéologique. In : *Regards croisés sur l'étude archéologique des paysages anciens. Nouvelles recherches dans le Bassin méditerranéen, en Asie centrale et au Proche et au Moyen-Orient*. Maison de l'Orient et de la Méditerranée Jean Pouilloux, Lyon, pp. 17-30. URL : www.persee.fr/doc/mom_1955-4982_2010_act_56_1_1324

FOUCAULT A., RAOULT J.-F., CECCA F., PLATEVOET B., 2014. *Dictionnaire de géologie - tout en couleur - 5000 définitions*. Dunod, Paris, 396 p.

FOURAULT-CAUËT V., 2007. Le paysage dans trois revues forestières européennes : une notion consensuelle, des panoramas variés ?. *Revue forestière française*, n°4, pp. 379-392. URL : www.documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/9848/379_392_FOURAULT.pdf?sequence=1 ; DOI : 10.4267/2042/9848

FRANCIS R. A., 2011. The impacts of modern warfare on freshwater ecosystems. *Environmental Management*, Vol. 48, n°5, p. 985-999. DOI : 10.1007/s00267-011-9746-9

FRUCHART C., 2014. *Analyse spatiale et temporelle des paysages de la forêt de Chailluz (Besançon, Doubs) de l'Antiquité à nos jours*. Thèse de doctorat, université de Franche-Comté, Besançon, 346 p. URL : hal.archives-ouvertes.fr/tel-01099184

G

GABER S., 1998. *Mémoire de la Grande Guerre en Lorraine*. Serpenoise, Metz, 143 p.

GALLANT J. C., WILSON J. P., 2000. Primary topographic attributes. In : WILSON J. P., GALLANT J. C. (EDS), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley, New York, pp. 51-85

GALLICA. *Les armées françaises dans la Grande Guerre* [consultées le 30 mars 2018]. Bibliothèque numérique de la Bibliothèque Nationale de France, Paris. URL : gallica.bnf.fr/html/und/histoire/les-armees-francaises-dans-la-grande-guerre

GAMA F., 1997. Verdun. *Documents d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France*. Association pour les fouilles archéologiques nationales, Vol. 1, 158 p.

GAO J., 1997. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 11, n°2, pp. 199-212. DOI : 10.1080/136588197242464

GASCOUIN F. E. (G[AL]), 1920. *L'évolution de l'artillerie pendant la guerre*. Bibliothèque de philosophie scientifique, 287 p.

GAUCHÉ É., 2015. Le paysage à l'épreuve de la complexité : les raisons de l'action paysagère. *Cybergeo: European Journal of Geography*, n°742, 28 p. URL : journals.openedition.org/cybergeo/27245 ; DOI : 10.4000/cybergeo.27245

GEORGES-LEROY M., BOCK J., DAMBRINE E., DUPOUEY J.-L., 2011. Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye. *ArchéoSciences*, Vol. 35, pp. 117-129. URL : journals.openedition.org/archeosciences/3015 ; DOI : 10.4000/archeosciences.3015

GEORGES-LEROY M., NUNINGER L., OPITZ R., 2014. Le lidar : une technique de détection au service de l'archéologie. *Techniques de l'Ingénieur*, 27 p.

GÉRARD M., 2017. 2016. *Les chiffres clés du tourisme en Meuse.* 11 p. URL : http://www.tourisme-meuse.com/images/EspacePro/Observatoire/MeuseTourismeChiffresCles2016.pdf

GERMAINE M.-A., 2009. *De la caractérisation à la gestion des paysages ordinaires des vallées dans le nord-ouest de la France : représentations, enjeux d'environnement et politiques publiques en Basse-Normandie*. Thèse de doctorat, université de Caen, Caen, 648 p.

GHEYLE W., DOSSCHE R., BOURGEOIS J., STICHELBAUT B., VAN EETVELDE V., 2013. Integrating archaeology and landscape analysis for the cultural heritage management of a World War I militarised landscape: The German field defences in Antwerp. *Landscape Research*, Vol. 39, n°5, pp. 502-522. DOI : 10.1080/01426397.2012.754854

GHEYLE W., STICHELBAUT B., SAEY T., NOTE N., VAN DEN BERGHE H., VAN EETVELDE V., VAN MEIRVENNE M., BOURGEOIS J., 2018. Scratching the surface of war. Airborne laser scans of the Great War conflict landscape in Flanders (Belgium). *Applied Geography*, Vol. 90, pp. 55-68. DOI : 10.1016/j.apgeog.2017.11.011

GIRARDEAU (C[L]), 1921. *Organisation du terrain (deux conférences)*. Charles Lavauzelle & Cie, Paris, Limoges, 50 p.

GIRARDON E., 1896. *Organisation du matériel d'artillerie*. Berger-Levrault, Nancy, Paris, 496 p.

GIRARDOT A., 1982. *Histoire de Verdun*. Privat, Toulouse, 302 p.

GIUSTI C., CALVET C., 2010, L'inventaire des géomorphosites en France et le problème de la complexité scalaire. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, Vol. 16, n°2, pp. 223-244. DOI : 10.4000/geomorphologie.7947 ; URL : www.journals.openedition.org/geomorphologie/7947

GLON É., 2005. *Wilderness* et forêts au Canada : une relation très ambiguë à la nature. In : ARNOULD P., GLON É. (EDS), *La nature a-t-elle encore une place dans les milieux géographiques ?*. Publications de la Sorbonne, Paris, pp. 201-222

GODONE D., GARNERO G., 2013. The role of morphometric parameters in Digital Terrain Models interpolation accuracy: A case study. *European Journal of Remote Sensing*, Vol. 46, n°1, pp. 198-214. DOI : 10.5721/EuJRS20134611

GQGA, 1917a. *Instruction sur l'organisation du terrain à l'usage des troupes de toutes armes*. Grand Quartier Général des Armées (GQGA), État-major, Imprimerie nationale, Paris, 238 p. URL : gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6564551b.texteImage

GQGA, 1917b. *Instruction sur les plans directeurs et les cartes et plans spéciaux*. Grand Quartier Général des Armées (GQGA), État-major, Imprimerie nationale, Paris, 36 p. URL : gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6552158z.r=Instruction%20sur%20les%20plans%20directeurs%20et%20les%20cartes%20et%20plans%20spéciau?rk=42918;4

GQGA, 1917c. *Instruction sur l'organisation et la construction des batteries. Annexe à l'instruction du 30 juin 1911 sur l'organisation et la construction des batteries de siège*. Grand Quartier Général des Armées (GQGA), État-major, Henri Charles-Lavauzelle, Paris, 183 p. URL : gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6557567v?rk=42918;4

GQGA, 1918. *Manuel de l'officier de batterie*. Grand Quartier Général des Armées (GQGA), État-major, Imprimerie nationale, Paris, 418 p.

GRAMOND D., SAVY B., GRAFFOUILLÈRE M., BARTOUT P., 2005. Méthodologies de délimitation des zones humides : de l'image satellitale à l'analyse terrain. *Bulletin de l'Association de géographes français*, Vol. 82, n°2, pp. 246-255. DOI : 10.3406/bagf.2005.2459

GRUBER S., PECKHAM S., 2009. Land-surface parameters and objects in hydrology. In : HENGL T., REUTER H. I. (EDS), *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Elsevier, Developments in Soil Science, Vol. 33, pp. 171-194

GUIBERT N., 2017. États-Unis : des guerres à 2000 milliards de dollars depuis 2001 [consulté le 1er mai 2018]. *Le Monde*, 13 juillet 2017. URL : www.lemonde.fr/ameriques/article/2017/07/13/États-Unis-des-guerres-a-2000-milliards-de-dollars-depuis-2001_5160073_3222.html

GUILLAUMAT (GAL), 1923. Discours du général Guillaumat, membre du Conseil supérieur de la Guerre, ancien commandant en chef de l'armée de Verdun. *L'Écho de l'Ossuaire de Douaumont et des champs de bataille de Verdun*, n°13, pp. 143-158. URL : gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k62678809/

GUILLOT H., 2010. La section photographique de l'armée et la Grande Guerre. De la création en 1915 à la non-dissolution. *Revue historique des armées*, n°258, pp. 110-117. URL : journals.openedition.org/rha/6938

GUISAN A., WEISS S. B., WEISS A. D., 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, Vol. 143, n°1, pp. 107-122. DOI : 10.1023/A:1009841519580

GUO Q., LI W., YU H., ALVAREZ O., 2010. Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, n°6, pp. 701-712. DOI : 10.14358/PERS.76.6.701

GUYOT A., HUBERT-MOY L., LORHO T., 2018. Detecting Neolithic burial mounds from LiDAR-derived elevation data using a multi-scale approach and machine learning techniques. *Remote Sensing*, Vol. 10, n°2, p. 19. DOI : 10.3390/rs10020225

H

HAECKER C. M., 1994. *A thunder of cannon: Archaeology of the Mexican-American War battlefield of Palo Alto*. University of Michigan Library, Ann Arbor, 248 p.

HANOT F., SIMIEN F., 2018. *Sous les lignes de front. Regards géologiques sur la Grande Guerre*. BRGM éditions, Orléans, 176 p.

HAUPT P., 2009. Great War aerial photographs in German archives: A guide to the sources. In : STICHELBAUT B., BOURGEOIS J., SAUNDERS N., CHIELENS P. (EDS), *Images of conflict: Military aerial photography and archaeology*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne, pp. 151-164

HEERDEGEN R. G., BERAN M. A., 1982. Quantifying source areas through land surface curvature and shape. *Journal of Hydrology*, Vol. 57, n°3-4, pp. 359-373. DOI : 10.1016/0022-1694(82)90155-X

HENGL T., REUTER H. I. (EDS), 2009. *Geormorphometry: Concepts, software, applications*, Elsevier, Developments in Soil Science, Vol. 33, 796 p.

HENGL T., EVANS I. S., 2009. Mathematical and digital models of the land surface. In : HENGL T., REUTER H. I. (EDS), *Geomorphometry: Concepts, software, applications*. Elsevier, Developments in Soil Science, Vol. 33, pp. 31-63

HENSELOWSKY F., KINDERMANN K., BUBENZE O., 2017. Scales in Geoarchaeology beyond "a site": The advance of an (Archaeo-)geomorphological perspective. In : *Geophysical research abstracts*. EGU General Assembly 2017, Vienne, Vol. 19, p. 15207. URL : meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-15207.pdf

HENTSCHEL M. L., PAGE N. W., 2003. Selection of descriptors for particle shape characterization. *Particle & Particle Systems Characterization*, Vol. 20, n°1, pp. 25-38. DOI : 10.1002/ppsc.200390002

HERNÁNDEZ-DELGADO E. A., ACUÑA A. M., OTAÑO-CRUZ A., SULEIMAN-RAMOS S. E., 2014. Bomb-cratered coral reefs in Puerto Rico, the untold story about a novel habitat: From reef destruction to community-based ecological rehabilitation. *Revista de Biología Tropical*, Vol. 62, n°3, pp. 183-200

HERSH S. M., 1969. *Chemical and Biological Warfare: America's Hidden Arsenal*. Anchor Books, New York, 307 p.

HESSE R., 2010. LiDAR-derived Local Relief Models - A new tool for archaeological prospection. *Archaeological prospection*, Vol. 17, n°2, pp. 67-72. DOI : 10.1002/arp.374

— 2014. Geomorphological traces of conflict in high-resolution elevation models. *Applied geography*, Vol. 46, pp. 11-20. DOI : 10.1016/j.apgeog.2013.10.004

HETRICK W. A., RICH P. M., WEISS S. B., 1993. Modeling insolation on complex surfaces. In : *Proceedings of the 13th ESRI International User Conference*. Palm Springs, Vol. 2, pp. 447-458. URL : www.professorpaul.com/publications/hetrick_et_al_1993_esri.pdf

HIPPENSTEEL S. P., 2016. Carbonate rocks and American Civil War infantry tactics. *Geosphere*, Vol. 12, n°2, pp. 354-365. DOI : 10.1130/GES01266.1

HIRSCHMANN F. G., 1996. *Verdun im hohen Mittelalter : Eine lothringische Kathedralstadt und ihr Umland im Spiegel der geistlichen Institutionen*. Trierer historische Forschungen, Trèves, 1026 p.

HODGSON M. E., JENSEN J. R., SCHMIDT L., SCHILL S., DAVID B., 2003. An Evaluation of LIDAR - and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84, n°2, pp. 295-308. DOI : 10.1016/S0034-4257(02)00114-1

HOOSHYAR M., KIM S., WANG D., MEDEIROS S. C., 2015. Wet channel network extraction by integrating LiDAR intensity and elevation data. *Water Resources Research*, Vol. 51, n°12, pp. 10029-10046. DOI : 10.1002/2015WR018021

HOREN H., BRASSEUR B., FEISS T., HERAUDE M., BURIDANT J., GALLET-MORON E., RASSAT S., MONTOYA C., BURBAN-COL V., 2015. Relation entre les structures archéologiques identifiées sur un levé LIDAR et la typologie des sols du massif forestier de Compiègne (Nord de la France). *Revue du Nord*, Hors Série n°23, pp. 85-94

HOTYAT M., ARNOULD P., SIMON L., 1997. *Les forêts d'Europe*. Nathan, Paris, 413 p.

HUBÉ D., 2016. *Sur les traces d'un secret enfoui : enquête sur l'héritage toxique de la Grande Guerre*. Michalon, Paris, 234 p.

— 2018. *14-18 Tremblements de guerre. Les géologues au cœur de l'histoire*. BRGM éditions, Orléans, 192 p.

HUBERT-MOY L., CLÉMENT B., 2014. Délimitation et caractérisation des zones humides. In : BOUZILLÉ J.-B. (ED), *Écologie des zones humides : concepts, méthodes et démarches*. Tec & Doc-Lavoisier, Paris, pp. 25-60

HUG C., KRZYSTEK P., FUCHS W., 2004. Advanced lidar data processing with LasTools. In : OHRAN A. M. (ED), *Conference: 20th, International congress for photogrammetry and remote sensing*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 35, Istanbul, pp. 832-837. URL : www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2009_faux_r001.pdf

HUGHES M. L., MCDOWELL P. F., MARCUS W. A., 2006. Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, Vol. 74, n°1-4, pp. 1-16. DOI : 10.1016/j.geomorph.2005.07.001

HUISING E. J., GOMES PEREIRA L. M., 1998. Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53, n°5, pp. 245-261. DOI : 10.1016/S0924-2716(98)00013-6

HUPY J. P., 2005. *Assessing landscape disturbance and recovery across a WWI battlefield: Verdun, France*. Thèse de doctorat, Michigan State university, East Lansing, 209 p.

— 2006. The long-term effects of explosive munitions on the WWI battlefield surface of Verdun, France. *Scottish Geographical Journal*, Vol. 122, n°3, pp. 167-184. DOI : 10.1080/00369220618737264

— 2010. Khe Sanh, Vietnam: Examining the long-term impacts of warfare on the physical landscape. In : PALKA E., GALGANO F. (EDS), *Modern military geography*. Routledge, New York, pp. 312-326

HUPY J. P., SCHAETZL R. J., 2006. Introducing "bombturbation", a singular type of soil disturbance and mixing. *Soil Science*, Vol. 171, n°11, p. 823-836. DOI : 10.1097/01.ss.0000228053.08087.19

— 2008. Soil development on the WWI battlefield of Verdun, France. *Geoderma*, Vol. 145, n°1, pp. 37-49. DOI : 10.1016/j.geoderma.2008.01.024

HUPY J. P., KOEHLER T., 2012. Modern warfare as a significant form of zoogeomorphic disturbance upon the landscape. *Geomorphology*, Vol. 157-158, p. 169-182. DOI : 10.1016/j.geomorph.2011.05.024

HURARD S., LORIN Y., TIXADOR A., 2014. Une archéologie de la guerre de siège moderne (XVIIe-XVIIIe siècles) à l'échelle européenne. *Les Nouvelles de l'archéologie*, n°137, pp. 19-24. URL : journals.openedition.org/nda/2584 ; DOI : 10.4000/nda.2584

HUTCHINSON D. J., DIEDERICHS M., PEHME P., SAWYER P., ROBINSON P., PUXLEY A., ROBICHAUD H., 2008. Geomechanics stability assessment of World War I military excavations at the Canadian National Vimy Memorial Site, France. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 45, n°1, pp. 59-77. DOI : 10.1016/j.ijrmms.2007.04.014

HUTCHINSON M. F., 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of pits. *Journal of Hydrology*, Vol. 106, n°3-4, pp. 211-232. DOI : 10.1016/0022-1694(89)90073-5

HYYPPÄ J., PYYSALO U., HYYPPÄ H., SAMBERG A., 2000. Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. In : *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LiDAR*. European Association of Remote Sensing Laboratories. Dresden, Vol. 1, pp. 139-147. URL : pdfs.semanticscholar.org/2feb/5165715308c68581e523a9d088447784f12b.pdf

I

IGN, 2014. *Forêts de Verdun et du Mort-Homme - Champ de bataille de Verdun* [document cartographique]. 1 : 25 000, Top 25, feuillet 3112 ET, Institut géographique national (IGN), Saint-Mandé

— 2014. 14-18, ou la géographie des désastres. Dossier spécial : la cartographie de la Grande Guerre. *IGN magazine*, n°74, pp. 6-20. URL : www.ign.fr/publications-de-l-ign/Institut/Publications/IGN_Magazine/74/IGNmag74.pdf

ILYÈS Z., 2006. Military activities: warfare and defense. In : SZABÓ J., DÁVID L., LÓCZY D. (EDS), *Anthropogenic geomorphology: a guide to man-made landforms*. Springer, Dordrecht, pp. 217-231

INSEE. *Séries historiques sur la population et le logement en 2014* [consultées le 15 février 2018]. Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), Paris, URL : www.insee.fr/fr/statistiques/

J

JACQUEMOT S., 2014. Regard archéologique sur les villages martyrs de la Grande Guerre en Lorraine. *Archéopages*, n°40, pp. 140-147. URL : www.journals.openedition.org/archeopages/641#tocto1n2 ; DOI : 10.4000/archeopages.641

JACQUEMOT S., LEGENDRE J.-P. (EDS), 2011. *Vestiges de guerres en Lorraine : le patrimoine des conflits mondiaux*. Serpenoise, Metz, 232 p.

JALABERT L., PUTON J.-P., 2014. La photographie de la Grande Guerre, affirmation d'un témoignage patrimonial. *In Situ. Revue des patrimoines*, n°23, 27 p. DOI : 10.4000/insitu.10992

JANSEN-VERBEKE M., WANDA G., 2015. Les paysages mémoriels de la Grande Guerre (1914-1918) : un changement de paradigme dans la recherche sur le tourisme de mémoire. *Via*, n°8, 25 p. URL : journals.openedition.org.rproxy.sc.univ-paris-diderot.fr/viatourism/485 ; DOI : 10.4000/viatourism.485

JENNESS J., 2006. *Topographic Position Index extension for ArcView 3.x, v. 1.3a*, Jenness Enterprises. URL : www.jennessent.com/arcview/tpi.htm

JMO, 1916. *56ème bataillon de chasseurs à pied*. Journal des marches et opérations (JMO), 4 août 1914 - 6 juillet 1916, côte 26 N 830/1. URL : www.memoiredeshommes.sga.defense.gouv.fr/fr/arkotheque/inventaires/ead_ir_consult.php?a=4&ref=SHDGR__GR_26_N_II

JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHES J., HILAL M., WAVRESKY P., 2010. Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo : European Journal of Geography*, n°501, p. 25. URL : journals.openedition.org/cybergeo/23155 ; DOI : doi.org/10.4000/cybergeo.23155.

JOLY F., 1997. *Glossaire de géomorphologie : base de données sémiologiques pour la cartographie*. Armand Colin, Paris, 325 p.

JOLY H., 1911. *Géographie physique de la Lorraine et de ses enveloppes*. Albert Barbier, Nancy, 350 p.

JÜNGER E., 1985. *Orages d'acier : journal de guerre*. Traduit de l'allemand par H. Plard, Gallimard, Paris, 439 p.

K

KASHANI A. G., OLSEN M. J., PARRISH C. E., WILSON N., 2015. A review of LIDAR radiometric processing: From *ad hoc* intensity correction to rigorous radiometric calibration. *Sensors*, Vol. 15, n°11, pp. 28099-28128. DOI : 10.3390/s151128099

KEEGAN J., 1977. *The face of battle: A study of Agincourt, Waterloo and the Somme*. Vintage books, New York, 354 p.

KIARSZYS G., 2016. Erased landscapes: Conflict, memory and post-World War II landscape transformation in Western Poland. In : STICHELBAUT B., COWLEY D. (EDS), *Conflict landscapes and archaeology from above*. Ashgate publishing, Farnham, pp. 219-234

KIERNAN K., 2012. Impacts of war on geodiversity and geoheritage: Case studies of karst caves from Northern Laos. *Geoheritage*, Vol. 4, n°4, pp. 225-247. DOI : 10.1007/s12371-012-0063-3

— 2015. Nature, severity and persistence of geomorphological damage caused by armed conflict. *Land Degradation & Development*, Vol. 26, n°4, pp. 380-396. DOI : 10.1002/ldr.2216

KLINGSEISEN B., METTERNICHT G., PAULUS G., 2008. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 23, n°1, pp. 109-121. DOI : 10.1016/j.envsoft.2007.05.007

KOBIAŁKA D., KOSTYRKO M., KAJDA K., 2017. The Great War and its landscapes between memory and oblivion: The case of prisoners of war camps in Tuchola and Czersk, Poland. *International Journal of Historical Archaeology*, Vol. 21, n°1, pp. 134-151. DOI : 10.1007/s10761-016-0348-3

KOBIAŁKA D., KOSTYRKO M., WAŁDOCH F., 2016. Archeologia II wojny światowej: Materialne przekształcenia w krajobrazie leśnym wzdłuż rzeki Brdy (na odcinku od jeziora Śpierewnik do Rytla) związane z działaniami wojennymi w 1939 roku. *Zeszyty Chojnickie*, n°32, pp. 151-168

KOHONEN T., 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, Vol. 43, n°1, pp. 59-69. DOI : 10.1007/BF00337288

KOKALJ Ž., ZAKŠEK K., OŠTIR K., 2011. Application of sky-view factor for the visualization of historic landscape features in lidar-derived relief models. *Antiquity*, Vol. 85, n°327, pp. 263-273. DOI : 10.1017/S0003598X00067594

— 2013. Visualizations of lidar derived relief models. In : OPITZ R. S., COWLEY C. D. (EDS), *Interpreting archaeological topography - Airborne laser scanning, Aerial photographs and ground observation*. Oxbow Books, Oxford, pp. 100-114

L

LACABANE L., 1845. De la poudre à canon et de son introduction en France. *Bibliothèque de l'école des chartes*, tome 6, pp. 28-57. DOI : 10.3406/bec.1845.451825

LACOSTE Y., 1976. *La Géographie, ça sert, d'abord, à faire la guerre*. La Découverte, Paris, 214 p.

— 2008. La géopolitique : une histoire contrastée. *La revue pour l'histoire du CNRS*, n°22, 7 p. URL : histoire-cnrs.revues.org/8082 ; DOI : 10.4000/histoire-cnrs.8082

— 2012. La géographie, la géopolitique et le raisonnement géographique. *Hérodote*, n°146-147, pp. 14-44. DOI : 10.3917/her.146.0014

LAFFARGUE (C[DT]), MOURETON (C[NE]), 1933. *Les leçons de l'artilleur. Le livre du canonnier avec la manœuvre illustrée du 75*. Charles Lavauzelle & Cie, Paris, 326 p.

LAFON A., 2008. La photographie privée de combattants de la Grande Guerre : perspectives de recherche autour de la camaraderie. *Matériaux pour l'histoire de notre temps*, n°91, pp. 42-50. URL : swww.cairn.info/revue-materiaux-pour-l-histoire-de-notre-temps-2008-3-page-42.htm

— 2016. *La France de la Première Guerre mondiale*. Armand Colin, Malakoff, 191 p.

LAMBINON J., 1997. *Les introductions de plantes non indigènes dans l'environnement naturel*. Conseil de l'Europe, Strasbourg, 28 p.

LANDOLT M., 2018. L'archéologie de la Grande Guerre : une nécessaire interdisciplinarité. *Histoire et archéologie*, n°6, pp. 61-75. URL : www.journals.openedition.org/artefact/817 ; DOI : 10.4000/artefact.817

LANG M. W., MCCARTY G. W., 2009. Lidar intensity for improved detection of inundation below the forest canopy. *Wetlands*, Vol. 29, n°4, pp. 1166-1178. DOI : 10.1672/08-197.1

LAPARRA J.-C., 2013. L'organisation défensive allemande sur le front ouest. In : SCHNITZLER B., LANDOLT M. (EDS), 2013. *À l'est, du nouveau ! Archéologie de la Grande Guerre en Alsace et en Lorraine*. Éditions des Musées de la Ville de Strasbourg, Strasbourg, pp. 130-131

LAPLAIGE C., 2012. *Comparaison de signaux (géophysique, LiDAR) utilisés dans l'étude des dynamiques anthropiques et naturelles*. Thèse de doctorat, université de Franche-Comté, Besançon, 322 p. URL : www.theses.fr/2012BESA1002/document

LAROUSSE, 2005. *Le petit Larousse illustré en couleurs*. Larousse, VUEF, Paris, 1 856 p.

LAROUSSE, 2018. *Définition du mot cerce* [consultée le 17 mars 2018]. Dictionnaire de français. URL : www.larousse.fr/dictionnaires/francais/cerce/14231

LÉGIFRANCE, 2018. *Code du patrimoine. Version consolidée au 9 avril 2018* [consulté le 5 mai 2018]. URL : www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006074236

LEIBRANDT S., LE PENNEC J.-L., 2015. Towards fast and routine analyses of volcanic ash morphometry for eruption surveillance applications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 297, pp. 11-27. DOI : 10.1016/j.jvolgeores.2015.03.014

LE NAOUR J.-Y., 2014. *1916 : l'enfer*. Perrin, Paris, 374 p.

LE PAUTREMAT P., 2007. Eau et stratégie militaire. *La Revue Internationale et Stratégique*, n°66, pp. 119-130. DOI : 10.3917/ris.066.0119

LE ROBERT, 2017. *Le Robert illustré*. Dictionnaires Le Robert, Paris, 2132 p.

LÉVY A., 1926. *Le Service géographique de l'armée 1914-1918*. Berger-Levrault, Nancy, Paris, Strasbourg, 75 p. URL : gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k141115z

LIU E. J., CASHMAN K. V., RUST A. C., 2015. Optimising shape analysis to quantify volcanic ash morphology. *GeoResj*, Vol. 8, pp. 14-30. DOI : 10.1016/j.grj.2015.09.001

LLANQUE C., HENRY A., 2008. *Étude et gestion de deux populations de Sonneurs à ventre jaune (Bombina variegata) en Lorraine*. Mémoire de master 2, Office National des Forêts (ONF), Verdun, 102 p.

LUKAČ N., SEME S., ŽLAUS D., ŠTUMBERGER G., ŽALIK B., 2014. Buildings roofs photovoltaic potential assessment based on lidar (light detection and ranging) data. *Energy*, Vol. 66, pp. 598-609. DOI : 10.1016/j.energy.2013.12.066

M

MAGNINI L., BETTINESCHI C., DE GUIO A., 2016. Object-based shell craters classification from LiDAR-derived sky-view factor. *Archaeological Prospection*, Vol. 24, n°3, pp. 211-223. DOI : 10.1002/arp.1565

MALEIKA W., 2015. The influence of the grid resolution on the accuracy of the digital terrain model used in seabed modelin. *Marine Geophysical Research*, Vol. 36, n°1, pp. 35-44. DOI : 10.1007/s11001-014-9236-6

MALTE-BRUN V.-A., 1845. *Précis de la géographie universelle ou description de toutes les parties du monde sur un plan nouveau*. Bureau des publications illustrées, Paris, Tome 2, 649 p. URL : gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k36473b

MANDLBURGER G., HAUER C., WIESER M., PFEIFER N., 2015. Topo-bathymetric LiDAR for monitoring river morphodynamics and instream habitats - A case study at the Pielach River. *Remote Sensing*, Vol. 7, n°5, pp. 6190-6195. DOI : 10.3390/rs70506160

MARIN L., 1915. *Comment on reconstituera les forêts de France détruites ou mutilées par la guerre*. La Science et la Vie, n°24, pp. 165-176

MARTÍNEZ-RUBIO A., SANZ-ADAN F., SANTAMARIA-PEÑA, MARTÍNEZ A., 2016. Evaluating solar irradiance over facades in high building cities, based on LiDAR technology. *Applied Energy*, Vol. 183, pp. 133-147. DOI : 10.1016/j.apenergy.2016.08.163

MASSON-LOODTS I., 2014. *Paysages en batailles. Les séquelles environnementales de la Grande Guerre*. Nevicata, Bruxelles, 102 p.

MASTERS P., STICHELBAUT B., 2009. From the air to beneath the soil – revealing and mapping great war trenches at Ploegsteert (Comines-Warneton), Belgium. *Archaeological Prospection*, Vol. 16, n°4, pp. 279-285. DOI : 10.1002/arp.357

MAYNARD J. J., JOHNSON M. G., 2014. Scale-dependency of LiDAR derived terrain attributes in quantitative soil-landscape modeling: Effects of grid resolution vs. neighborhood extent. *Geoderma*, Vol. 230-231, pp. 29-40. DOI : 10.1016/j.geoderma.2014.03.021

MCNEELY J. A., 2003. Biodiversity, war, and tropical forests. *Journal of Sustainable Forestry*, Vol. 16, n°3-4, pp. 1-20. DOI : 10.1300/J091v16n03_01

MECHIN C., 2013. *Forêt domaniale de Verdun. Levé Lidar. Rapport technique*. Sintégra, Meylan, 13 p.

MEERSCHMAN E., COCKX L., ISLAM M. M., MEEUWS F., VAN MEIRVENNE M., 2011. Geostatistical assessment of the impact of World War I on the spatial occurrence of soil heavy metals. *Ambio*, Vol. 40, n°4, pp. 417-424. DOI : 10.1007/s13280-010-0104-6

MÉMOIRE DES HOMMES, 1918. *Journaux des unités engagées dans la Première Guerre mondiale* [consultés le 31 mars 2018]. Ministère de la Défense et des Anciens combattants, Paris. URL : www.memoiredeshommes.sga.defense.gouv.fr/fr/article.php%3Flarub%3D2%26titre%3Djournaux-des-unites-engagees-dans-la-premiere-guerre-mondiale

MERGLEN A., 1994. La forêt germanique contre les armées romaines. In : CORVOL A., AMAT J.-P. (EDS), *Forêt et guerre*. L'Harmattan, Paris, pp. 19-28

MÉTEO FRANCE. *Données climatiques de la station de Metz* [consultées le 19 février 2018]. URL : www.meteofrance.com/climat/france/metz/57039001/normales

— *Glossaire* [consulté le 7 mars 2018]. URL : www.meteofrance.fr/publications/glossaire152363-insolation

MEURET J.-C., 2010. Archéologie, paysage et histoire d'une forêt du Néolithique à nos jours : le massif de Domnaiche-en-Lusanger (Loire-Atlantique). *Annales de Bretagne et des Pays de l'Ouest*, Vol. 117, n°4, pp. 7-81

MILLARAKIS P., 1999. *Étude de la végétation de la forêt domaniale de Verdun (département de la Meuse)*. ONF, Service Départemental de la Meuse, Bar-le-Duc, 59 p.

— 2016a. *Verdun Forêt d'Exception (55, Meuse) : la flore obsidionale et de mémoire*. Office National des Forêts (ONF), Verdun, 12 p.

— 2016b. *Verdun Forêt d'Exception (55, Meuse) : inventaire de l'avifaune nicheuse*. Office National des Forêts (ONF), Verdun, 34 p.

MILLARAKIS P., ANTONOT F., 2015. *Verdun Forêt d'Exception (55, Meuse) : contribution à la mise à jour des connaissances des papillons diurnes (Lépidoptères rhopalocères, Zygènes et macrohétérocères diurnes)*. Office National des Forêts (ONF), Verdun, 26 p.

MILLER V. C., 1953. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. *Technical Report 3*, Department of Geology, Columbia University, New York, 30 p.

MINISTÈRE DE L'ARMEMENT ET DES FABRICATIONS DE GUERRE, 1918. *Renseignements sur les matériels d'artillerie de tous calibres en service sur les champs de bataille des armées françaises*. Imprimerie nationale, Paris, 308 p.

MINOIS G., 2010. *La Guerre de Cent ans*. Perrin, Paris, 816 p.

MIQUEL P., 1995. *Mourir à Verdun*. Tallandier, Paris, 315 p.

MLEKUŽ D., KOŠIR U., ČREŠNAR M., 2016. Landscapes of death and Suffering: Archaeology of conflict landscapes of the upper Soča valley, Slovenia. In : STICHELBAUT B., COWLEY D. (EDS), *Conflict landscapes and archaeology from above*. Ashgate publishing, Farnham, pp. 127-146

MOKARRAM M., ROSHAN G., NEGAHBAN S., 2015. Landform classification using topography position index (case study: salt dome of Korsia-Darab plain, Iran). *Modeling Earth Systems and Environment*, Vol. 1, n°4, 7 p. DOI : 10.1007/s40808-015-0055-9

MONTGOMERY H. A., MCNEARY R. W. A., 2016. Airborne laser scanning and the archaeological interpretation of Ireland's World War I landscape: Randalstown training camp, County Antrim, Northern Ireland. In : STICHELBAUT B., COWLEY D. (EDS), *Conflict landscapes and archaeology from above*. Ashgate publishing, Farnham, pp. 91-108

MOSSANEN M., KIBEL A. S., GOLDMAN R. H., 2017. Exploring exposure to Agent Orange and increased mortality due to bladder cancer. *Urologic Oncology: Seminars and Original Investigations*, Vol. 35, n°11, pp. 627-632. DOI : 10.1016/j.urolonc.2017.07.030

MUSSET R., 1922. La reconstitution agricole des régions dévastées du nord et du nord-est de la France. *Annales de Géographie*, Tome 31, n°172, pp. 355-360. URL : www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1922_num_31_172_10135 ; DOI : 10.3406/geo.1922.10135

N

NEWMAN P., 1981. *The Battle of Marston Moor, 1644*. Anthony Bird Publishers, Strettington, 176 p.

NICU I. C., 2016. Geoarchaeology or Archaeogeomorphology? – Border sciences. In : NICU I. C. (ED), *Hydrogeomorphic risk analysis affecting chalcolithic archaeological sites from Valea Oii (Bahlui) watershed, Northeastern Romania : An interdisciplinary approach*. Springer International Publishing, Cham, pp. 45-54. DOI : 10.1007/978-3-319-25709-9

NORMAND (CEL), 1921. *L'évolution de la fortification de campagne en France et en Allemagne*. Berger-Levrault, Paris, 113 p.

NOTE N., GHEYLE W., VAN DEN BERGHE H., SAEY T., BOURGEOIS J., VAN EETVELDE V., VAN MEIRVENNE M., STICHELBAUT B., 2018. A new evaluation approach of World War One's devastated front zone: A shell hole density map based on historical aerial photographs and validated by electromagnetic induction field measurements to link the metal shrapnel phenomenon. *Geoderma*, Vol. 310, pp. 257-269. DOI : 10.1016/j.geoderma.2017.09.029

NUNINGER L., OŠTIR K., KOKALJ Z., MARSETIC A., 2008. *Lidor. Acquisition, traitement et analyse d'images LiDAR pour la modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale du Languedoc oriental*. Rapport d'ATIP Jeune Chercheur (CNRS), Besançon, Ljubljana, 95 p. URL : halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00483129/document

NUNINGER L., FRUCHART C., OPITZ R., 2010. LiDAR : quel apport pour l'analyse des paysages ?. *Bulletin AGER*, n°20, pp. 34-43. URL : halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00617050

NUSSELT W., 1928. Graphische Bestimmung des Winkel Verhältnisses bei der Wärmestrahlung. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 72, n°20, p. 673

O

OJA E., KASKI S., 1999. *Kohonen Maps*. Elsevier, Amsterdam, 400 p.

OLIVER M. A., WEBSTER R., 2007. Kriging: A method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 4, n°3, pp. 313-332. DOI : 10.1080/02693799008941549

OLLIVE V., 2014. *Impacts anthropiques et climatiques sur l'enregistrement sédimentaire holocène dans le bassin-versant de la Meuse : approches géomorphologiques, géophysiques et sédimentologiques*. Programme collectif de recherche : programme 31, INRAP Grand-Est nord, université de Lorraine, Loterr, Nancy, 65 p., non publié

OLTEANU-RAIMOND A.-M., RUAS A., 2015. Carte de Kohonen et classification ascendante hiérarchique pour l'analyse de données géohistoriques. *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 25, n°4, pp. 581-599. DOI : 10.3166/RIG.25.581-599

OMAR S., BHAT N. R., SHAHID S. A., ASSEM A., 2005. Land and vegetation degradation in war-affected areas in the Sabah Al-Ahmad Nature Reserve of Kuwait: A case study of Umm. Ar. Rimam. *Journal of Arid Environments*, Vol. 62, n°3, pp. 475-490. DOI : 10.1016/j.jaridenv.2005.01.009

ONF, 2005. *Forêt domaniale de Verdun. Révision d'aménagement forestier 2006-2020*. Office National des Forêts (ONF), Verdun, 116 p.

— 2017. *Verdun forêt d'exception : complément et bilan global de l'inventaire des coléoptères saproxyliques (55, Meuse)*. Office National des Forêts (ONF), Verdun, 15 p.

OPITZ R. S., 2013. In : OPITZ R. S., COWLEY C. D. (EDS), *Interpreting archaeological topography - Airborne laser scanning, aerial photographs and ground observation*. Oxbow Books, Oxford, pp. 13-31

ORIANS G. H., PFEIFFER E. W., 1970. Ecological Effects of the War in Vietnam. *Science*, Vol. 168, n°3931, pp. 544-554. URL : www.jstor.org/stable/1728609

ORR D. G., 2003. Preface: Landscapes of conflict. *Historical Archaeology*, Vol. 37, n°3, pp. 1-2. DOI : 10.1007/BF03376606

P

PAGNEY P., 2008. *Le climat, la bataille et la guerre*. L'Harmattan, Paris, 314 p.

— 2016. *L'incertitude climatique et la guerre*. L'Harmattan, Paris, 229 p.

PAIN C. F., 2005. In : ZERGER A., ARGENT R. M. (EDS), *MODSIM 2005 International congress on modelling and simulation*. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, pp. 1430-1436

PAQUET (L[CL]), 1928. La défense du bois de Ville et de l'Herbebois. Verdun (Février 1916). La journée du 22 février. *Revue militaire française*, n°85, pp. 38-67. URL : gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k121960s/f1.image.r=herbebois

PARENT G. H., 1991. Études écologiques et chorologiques sur la flore lorraine. Note 10. Les plantes obsidionales de la Lorraine. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de la Moselle*, n°45, pp. 45-110

— 2004. Trois études sur la zone rouge de Verdun, une zone totalement sinistrée. I. L'herpétofaune. II. La diversité floristique. III. Les sites d'intérêt botanique et zoologique à protéger prioritairement. *Ferrantia*, n°8, 285 p. URL : www.ps.mnhn.lu/ferrantia/publications/Ferrantia38.pdf.

PASSMORE D., CAPPS TUNWELL D., HARRISON S., 2013. Landscapes of logistics: the archaeology and geography of WWII German military supply depots in Central Normandy, north–west France. *Journal of Conflict Archaeology*, Vol. 8, n°3, pp. 165-192. DOI : 10.1179/1574077313Z.00000000025

PASSMORE D., HARRISON S., CAPPS TUNWELL D., 2014. Second World War conflict archaeology in the forests of north-west Europe. *Antiquity*, Vol. 88, n°342, pp. 1275-1290. DOI : 10.1017/S0003598X00115455

PEARSON C., 2012. Researching militarized landscapes: A literature review on war and the militarization of the environment. *Landscape Research*, Vol. 37, n°1, pp. 115-133. DOI : 10.1080/01426397.2011.570974

PEARSON C., COATES P., COLE T. (EDS), 2010. *Militarized landscapes: From Gettysburg to Salisbury Plain*. Continuum, Londres, 320 p.

PÉRICARD J., 1997. *Verdun : histoire des combats qui se sont livrés en 1916 sur les deux rives de la Meuse*. Nouvelle librairie de France, Paris, 611 p.

PERRET H., 2012. *Suivi de population du Sonneur à ventre jaune (Bombina variegata variegata) dans la Forêt Domaniale de Verdun (Meuse)*. Mémoire de master 2, université Jean Monnet, Saint-Étienne, 54 p.

PÉTAIN P., 1986. *La bataille de Verdun*. Avalon, Paris, 167 p.

PETTY G., PETTY S., 1993. A geological reconstruction of the site of the Battle of Maldon. In : COOPER J. (ED), *The Battle of Maldon: Fiction and fact*. The Hambledon Press, Londres, Rio Grande City, pp. 159-169

PFEIFFER E. W., 1975. Some effects of environmental warfare on agriculture in Indochina. *Agriculture and Environment*, Vol. 2, n°3, pp. 271-281. DOI : 10.1016/0304-1131(75)90018-1

PIROTTI F., TAROLLI P., 2010. Suitability of LiDAR point density and derived landform curvature maps for channel network extraction. *Hydrological Processes*, Vol. 24, n°9, pp. 1187-1197. DOI : 10.1002/hyp.7582

PITTMANN E. W., 2000. Geologists and the American Civil War. In : ROSE E. P. F., NATHANAIL C. P. (EDS), *Geology and warfare: Examples of the influence of terrain and geologists on military operations*. The Geological Society, Bath, pp. 84-106

POESEN J., 2018. Soil Erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 43, pp. 64-84. DOI : 10.1002/esp.4250

POLLARD T., BANKS I., 2005. Why a Journal of Conflict Archaeology and why now?. *Journal of Conflict Archaeology*, Vol. 1, n°1, pp. iii-vii. DOI : 10.1163/157407705774929024

POLYGON TO CENTERLINE, 2015. URL : pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/topographic-production/polygon-to-centerline.htm

PORTAL C., 2014. Appréhender le patrimoine géomorphologique. Approche géohistorique de la patrimonialité des reliefs par les documents d'archives. L'exemple du Parc National de Killarney (Kerry, Irlande). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, Vol. 20, n°1, pp. 15-26. URL : www.journals.openedition.org/geomorphology/10464#quotation ; DOI : 10.4000/geomorphologie.10464

PRIMA O. D. A., ECHIGO A., YOKOYAMA R., YOSHIDA T., 2006. Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. *Geomorphology*, Vol. 78, n°3-4, pp. 373-386. DOI : 10.1016/j.geomorph.2006.02.005

PRINTEMPS V., 2017. *Utilisation de l'outil LiDAR pour la détection des mares de la forêt domaniale de Verdun (Meuse)*. Mémoire de Master 1, université Paris-Diderot, Paris, 96 p.

PROST A., KRUMEICH G., 2015. *Verdun 1916 : une histoire franco-allemande de la bataille*. Tallandier, Paris, 318 p.

PUYO J.-Y., 2004. Les conséquences de la Première Guerre mondiale sur les forêts et les forestiers français. *Revue forestière française*, n°6, pp. 573-584. DOI : 10.4267/2042/5123

R

RAHIMI M., ALEXANDER E. C., 2013. Locating sinkholes in LiDAR coverage of a glacio-fluvial karst, Winona County, MN. In : LAND L., DOCTOR D. H., STEPHENSON J. B. (EDS), *Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst: Proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference, May 6-10, Carlsbad, New Mexico*. NCKRI Symposium 2., National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, pp. 469-480. URL : scholarcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1158&context=sinkhole_2013

RAK M., FUNK L., STARKOVÁ L., 2016. A Cold War conflict landscape in the borderlands of West Bohemia. In : STICHELBAUT B., COWLEY D. (EDS), *Conflict landscapes and archaeology from above*. Ashgate publishing, Farnham, pp. 235-252

RASSAT G., thèse en cours. *L'artisanat du fer en Charente et Dordogne avant le haut fourneau : approche paléométallurgique et environnementale*. Thèse de doctorat, université de Limoges, Limoges

RECLUS É., 1885. *Nouvelle géographie universelle : la terre et les hommes. III, L'Europe centrale (Suisse, Austro-Hongrie, Allemagne)*. Hachette et Cie, Paris, 982 p.

— 2014. *Histoire de la Guerre de Sécession aux États-Unis 1861-1865*. Pocket, Paris, 352 p.

REIF M., FROHN R. C., LANE C. R., AUTREY B., 2009. Mapping isolated wetlands in a karst landscape: GIS and remote sensing methods. *GIScience and Remote Sensing*, Vol. 46, n°2, pp. 187-211. DOI : 10.2747/1548-1603.46.2.187

REIFSNYDER W. E., 1967. Radiation geometry in the measurement and interpretation of radiation balance. *Agricultural Meteorology*, Vol. 4, n°4, pp. 255-265. DOI : 10.1016/0002-1571(67)90026-X

RELIEF VISUALIZATION TOOLBOX (RVT), 2015. URL : iaps.zrc-sazu.si/node/67731#v

RENAUD J., 2003. La toponymie normanique : reflet d'une colonisation. In : FLAMBARD-HERICHER A.-M. (ED), *La progression des Vikings : des raids à la colonisation*. Presses universitaires de Rouen et du Havre, Rouen, pp. 189-205

REY F., 2003. Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies. *Catena*, Vol. 50, n°2-4, pp. 549-562. DOI : 10.1016/S0341-8162(02)00121-2

REYNARD É., 2005. Géomorphosites et paysages. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, Vol. 11, n°3, pp. 181-188. URL : journals.openedition.org/geomorphologie/338 ; DOI : 10.4000/geomorphologie.338

REYNARD É., PERRET A., BUSSARD J., GRANGIER L., MARTIN S., 2016. Integrated approach for the inventory and management of geomorphological heritage at the regional scale. *Geoheritage*, Vol. 8, n°1, pp. 43-60. DOI : 10.1007/s12371-015-0153-0

RIEGL. *RIEGL LMS-Q680i* [consulté le 18 mars 2018]. RIEGEL® Laser Measurement Systems. URL : www.riegl.com/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/23/

RIMBERT S., 1973. Approches des paysages. *L'Espace géographique*, Vol. 2, n°3, pp. 233-241. DOI : 10.3406/spgeo.1973.1405

ROBERT A., 2011. *Dynamiques paysagères et guerre dans la province de Thua Thiên Huê (Viêt Nam central), 1954-2007 – Entre défoliation, déforestation et reconquêtes végétales*. Thèse de doctorat, université Paris-Sorbonne, 1170 p.

ROCARD J., 1993. Le fort de Douaumont. *Bulletin Monumental*, tome 151, n°1, pp. 311-320. DOI : 10.3406/bulmo.1993.3345 ; URL : www.persee.fr/doc/bulmo_0007-473x_1993_num_151_1_3345

ROCCHINI D., DI RITA A., 2005. Relief effects on aerial photos geometric correction. *Applied Geography*, Vol. 25, n°2, pp. 159-168. DOI : 10.1016/j.apgeog.2005.03.002

RODRIGUEZ P., BENAILY G., 2014. Les traces archéologiques du Camp retranché de Paris dans le Val-d'Oise. *Les Nouvelles de l'archéologie*, n°137, pp. 45-50. URL : journals.openedition.org/nda/2622; DOI : 10.4000/nda.2622

ROLLAND-BOULESTREAU A., 2013. La Loire : une frontière et un lieu de pacification (juin 1794-février 1795). In : BOIS J.-P. (ED), *La Loire, la guerre et les hommes*. Presses universitaires de Rennes, Rennes, pp. 175-182

ROSE E. P. F., NATHANAIL C. P. (EDS), 2000. *Geology and warfare: Examples of the influence of terrain and geologists on military operations*. The Geological Society, Bath, 498 p.

ROSE E. P. F., HÄUSLER H., WILLIG D., 2000. Comparison of British and German applications of geology in world war. In : ROSE E. P. F., NATHANAIL C. P. (EDS), *Geology and warfare: Examples of the influence of terrain and geologists on military operations*. The Geological Society, Bath, pp. 107-140

ROSIN P. L., 2003. Measuring shape: Ellipticity, rectangularity, and triangularity. *Machine Vision and Applications*, Vol. 14, n°3, pp. 172-184. DOI : 10.1007/s00138-002-0118-6

ROUCAUD M., 2007. Les journaux de marches et opérations (JMO) des unités de la mission française près des forces américaines : une mémoire partagée (1917-1919). *Revue historique des armées*, n°246, pp. 88-91. URL : journals.openedition.org/rha/2263

ROUGERIE G., BEROUTCHACHVILI C., 1991. *Géosystème et paysages. Bilans et méthodes*. Armand Colin, Paris, 305 p.

S

SAEY T., STICHELBAUT B., BOURGEOIS J., VAN EETVELDE V., VAN MEIRVENNE M., 2013. An interdisciplinary non-invasive approach to landscape archaeology of the Great War. *Archaeological Prospection*, Vol. 20, n°1, pp. 39-44. DOI : 10.1002/arp.1437

SAHRAOUI Y., VUIDEL G., FOLTETE J.-C., JOLY D., 2016. PixScape – un outil logiciel intégré pour l'analyse du paysage visible. *Cybergeo: European Journal of Geography*, n°799, 20 p. URL : journals.openedition.org.rproxy.sc.univ-paris-diderot.fr/cybergeo/27862 ; DOI : 10.4000 /cybergeo.27862

SALAMAGNE A., 1993. À propos de l'adaptation de la fortification à l'artillerie vers les années 1400 : quelques remarques sur les problèmes de vocabulaire, de typologie et de méthode. *Revue du Nord*, n°303, pp. 809-846. DOI : 10.3406/rnord.1993.4874

SALOMON J.-N., AULY T., 2010. Impacteurs et astroblèmes : essai de classification et approche géographique. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, Vol. 16, n°1, pp. 3-20. URL : journals.openedition.org/geomorphologie/7866 ; DOI : 10.4000/geomorphologie.7866

SANDERS L., 1989. *L'analyse des données appliquée à la géographie*. G.I.P. Reclus, Montpellier, 268 p.

SAUNDERS N. J., 2001. Matter and memory in the landscapes of conflict: The Western Front 1914-1999. In : BENDER B., WINER M. (EDS), *Contested landscapes: Movement, exile and place*. Berg, Oxford, pp. 37-53

— 2012. *Beyond the dead horizon: Studies in modern conflict archaeology*. Oxbow books, Oxford, 240 p.

— 2013. Trench art: The dawn of modern conflict archaeology. *Current World Archaeology*, n°62, pp. 40-45

SAUNDERS N. J., FAULKNER N., KOŠIR U., CRESNAR M., THOMAS S., 2013. Conflict landscapes of the Soča/Isonzo Front, 1915-2013: Archaeological-anthropological evaluation of the Soča Valley, Slovenia. *Arheo*, n°30, pp. 47-66.

SAVOURET E., CANTAT O., 2008. Analyse spatiale d'un rapport de force météorologique. Le Jour J : un calcul spatio-stratégique ?. *Publications du C.E.H.D. (Centre d'Études d'Histoire de la Défense)*, n°36, pp. 179-187

SAVOURET E., AMAT J.-P., CANTAT O., FILIPPUCCI P., 2010. Chronique du temps vécu à Verdun en 14-18. In : *Actes de l'Association Internationale de Climatologie*. Colloque de l'Association Internationale de Climatologie : risques et changement climatique, 1-4 septembre 2010, Vol. 23, pp. 571-576

SAVOURET E., AMAT J.-P., CANTAT O., FILIPPUCCI P., 2011. Au temps météorologique de la Grande Guerre : approche séquentielle des périodes contraignantes dans les tranchées sur le front de la Marne et de la Meuse, 1914-1918. *Climatologie*, Vol. 8, pp. 59-77

SCHMIDT J., EVANS I. S., BRINKMANN J., 2003. Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 17, n°8, pp. 797-814. DOI : 10.1080/13658810310001596058

SCHMOLL P., 2006. L'empreinte des nouvelles technologies sur les formes de la guerre. In : MARTIN P., SIMIZ S. (EDS), *L'empreinte de la guerre : de la Grèce classique à la Tchétchénie*. Lavauzelle, Panazol, pp. 541-549

SCHNITZLER B., LANDOLT M. (EDS), 2013. *À l'est, du nouveau ! Archéologie de la Grande Guerre en Alsace et en Lorraine*. Éditions des Musées de la Ville de Strasbourg, Strasbourg, 368 p.

SCHWARTZ C., FLORENTIN L., MOREL J.-L., 2003. *Impact d'activités militaires de la Première Guerre mondiale sur la qualité des sols*. Programme Life « Héritage bioculturel des forêts », ENSAIA-INPL, INRA, Laboratoire Sols et Environnement, Vandœuvre-lès-Nancy, 26 p., non publié

SCOTT W., 1837. *Œuvres de Walter Scott. Histoire d'Écosse*. Traduit de l'anglais par A. Montémont. Tome 1, Ménard, Paris, 332 p.

SCOTT D. D., FOX R., CONNOR M., HARMON D., 1989. *Archaeological perspective on the Battle of Little Bighorn*. University of Oklahoma Press, Norman, 310 p.

SCOTT D. D., MCFEATERS A. P., 2011. The archaeology of historic battlefields: A history and theoretical development in conflict archaeology. *Journal of Archaeological Research*, Vol. 19, n°1, pp. 103-132. DOI : 10.1007/s10814-010-9044-8

SELLIER D., 2009. La vulgarisation du patrimoine géomorphologique : objets, moyens et perspectives. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, Vol. 86, n°1, pp. 67-81. URL : www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_2009_num_86_1_2655 ; DOI : 10.3406/bagf.2009.2655

SÉNAT, 2015. *Projet de loi de finances pour 2015 : Défense : équipement des forces* [consulté le 1er mai 2018]. URL : www.senat.fr/rap/a14-110-8/a14-110-818.html

SGA, 1916. *Etain A* [plan directeur]. 1 : 20 000, tirage du 18 décembre 1916, Service Géographique des Armées (SGA), Groupe de canevas de tir

— 1936. *Service géographique de l'armée. Rapport sur les travaux exécutés du 1er août 1914 au 31 décembre 1919. Historique du service géographique de l'armée pendant la guerre.* Service géographique de l'armée, Imprimerie du Service géographique de l'armée, Paris, 458 p. URL : gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65587903/

SIBSON R., 1981. A brief description of natural neighbor interpolation. In : BARNETT V. (ED), *Interpolating multivariate data*. John Wiley & Sons, New York, pp. 21-36

SITTLER B., 2004. Revealing historical landscapes by using airborne laser scanning. A 3-D modell of ridge and furrow in forests near Rastatt (Germany). In : THIES M., KOCH B., SPIECKER H., WEINACKER H. (EDS), *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 "Laser-scanners for forest and landscape assessment"*. ISPRS, Fribourg, pp. 258-261. URL : citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.215.5975&rep=rep1&type=pdf

SIVILICH D. M., 1996. Analyzing musket balls to interpret a revolutionary war site. *Historical Archaeology*, Vol. 30, n°2, pp. 101-109. DOI : 10.1007/BF03373592

SMEECKAERT J., MALLET C., DAVID N., CHEHATA N., FERRAZ A., 2013. Large-scale classification of water areas using airborne topographic lidar data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 138, pp. 134-148. DOI : 10.1016/j.rse.2013.07.004

SMITH J. S. C., 1964. Military applications of geology. *Transactions of the Kansas Academy of Science*, Vol. 67, n°2, pp. 311-336. DOI : 10.2307/3626664

SMITH M. J., CLARK C. D., 2005. Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 30, n°7, pp. 885-900. DOI : 10.1002/esp.1210

SMITH M. P., ZHU A-X., BURT J. E., STILES C., 2006. The effects of DEM resolution and neighbourhood size on digital soil survey. *Geoderma*, Vol. 137, n°1-2, pp. 58-69. DOI : 10.1016/j.geoderma.2006.07.002

SOLARD (C[NE]), 1935. *Fortification. La fortification pendant la guerre 1914-1918*. École d'Application d'Artillerie, Fontainebleau, Tome 2, 148 p. URL : gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65565434

SONG J., HAN S., YU K., KIM Y., 2002. Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data. In : *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, Vol. 34, pp. 259-262. URL : http://www.isprs.org/proceedings/xxxiv/part3/papers/paper128.pdf

SOUVENT P., PIRC S., 2001. Pollution caused by metallic fragments introduced into soils because of World War I activities. *Environmental Geology*, Vol. 40, n°3, pp. 317-323. DOI : 10.1007/s002540000156

STAL C., BOURGEOIS J., DE MAEYER P., DE MULDER G., DE WULF A., GOOSSENS R., NUTTENS T., STICHELBAUT B., 2010. Kemmelberg (Belgium) case study: Comparison of DTM analysis methods for the detection of relicts from the first world war. In : REUTER R. (ED), *Remote sensing for science, education, and natural and cultural heritage : Proceedings of the EARSeL symposium 2010*. European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL), pp. 65-72

STEINBACH F., HUSSON J., 2006. La Grande Guerre et ses actuels effets rétroactifs en milieu forestier : gestion de l'héritage, ruptures et mémorialisation dans le Saillant de Saint-Mihiel. In : MARTIN P., SIMIZ S. (EDS), *L'empreinte de la guerre : de la Grèce classique à la Tchétchénie*. Lavauzelle, Panazol, pp. 519-532

— 2007. Palimpsestes et héritages des polémopaysages dans les massifs du Saillant de Saint-Mihiel. In : DUPOUEY, J.-L., DAMBRINE, E., DARDIGNAC, C., GEORGES-LEROY, M. (EDS), *La mémoire des forêts*. Actes du colloque « Forêt, archéologie et environnement ». ONF, INRA, DRAC Lorraine, Nancy, France, pp. 285-294. URL : www2.nancy.inra.fr/collectif/sylva2004/textes/actes/pdf_final/Steinbach_285_294.pdf

STÉPHAN P., ARNAUD-FASSETTA G., BOSQ M., CULIOLI C., BERTRAND F., COLIN A., COSTA S., COUTELIER C., EYNAUD F., SUANEZ S., VERDUN F., 2018. Holocene coastal changes along the Gironde estuary (SW France): New insights from the North Medoc peninsula beach/dune system. *Quaternaire*, sous presse

STÉPHANE M., 1929. *Verdun : ma dernière relève au bois des Caures*. Paris, Cabinet du Pamphlétaire, 223 p.

STERENCZAK K., CIESIELSKI M., BALAZY R., ZAWIŁA-NIEDZWIECKI T., 2016. Comparison of various algorithms for DTM interpolation from LIDAR data in dense mountain forests. *European Journal of Remote Sensing*, Vol. 49, n° 1, 599-621. DOI: 10.5721/ EuJRS20164932

STEVENSON J. A., SUN X., MITCHELL N. C., 2010. Despeckling SRTM and other topographic data with a denoising algorithm. *Geomorphology*, Vol. 114, n° 3, 238-252. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.07.006

STICHELBAUT B., 2006. The application of First World War aerial photography to archaeology: the Belgian images. *Antiquity*, Vol. 80, n°307, pp. 161-172. DOI : 10.1017/S0003598X00093339

— 2009. *World War One aerial photography: An archaeological perspective*. Thèse de doctorat, universiteit Gent, Gand, 434 p.

— 2011. The first thirty kilometres of the Western Front 1914-1918: An aerial archaeological approach with historical remote sensing data. *Archaeological prospection*, n°18, pp. 57-66. DOI : 10.1002/arp.397

STICHELBAUT B., BOURGEOIS J., SAUNDERS N., CHIELENS P. (EDS), 2009. *Images of conflict: Military aerial photography and archaeology*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne, 320 p.

STICHELBAUT B., CHIELENS P. (EDS), 2013. *La guerre vue du ciel : 1914-1918, le front en Belgique*. Fonds Mercator, Bruxelles, 350 p.

STICHELBAUT B., COWLEY D. (EDS), 2016. *Conflict landscapes and archaeology from above*. Ashgate publishing, Farnham, 301 p.

STICHELBAUT B., GHEYLE W., SAEY T., VAN EETVELDE V., VAN MEIRVENNE M., NOTE N., VAN DEN BERGHE H., BOURGEOIS J., 2016. The First World War from above and below. Historical aerial photographs and mine craters in the Ypres Salient. *Applied Geography*, Vol. 66, pp. 64-72. DOI : 10.1016/j.apgeog.2015.11.020

STICHELBAUT B., NOTE N., SAEY T., HANSSENS D., VAN DEN BERGHE H., BOURGEOIS J., VAN MEIRVENNE M., VAN EETVELDE V., GHEYLE W., 2017. Non-invasive research of tunneling heritage in the Ypres Salient (1914-1918) – research of the Tor Top tunnel system. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 26, pp. 109-117. DOI : 10.1016/j.culher.2017.02.001

ŠTULAR B., 2011. The use of lidar-derived relief models in archaeology topography. The Kobarid region (Slovenia) case study. *Arheološki vestnik*, n°62, pp. 393-432. URL : av.zrc-sazu.si/pdf/62/AV_62_2011_Stular.pdf

ŠTULAR B., KOKALJ Ž., OŠTIR K., NUNINGER L., 2012. Visualization of lidar-derived models for detection of archaeological features. *Journal of archaeological science*, Vol. 39, n°11, pp. 3354-3360. DOI : 10.1016/j.jas.2012.05.029

SUN X., ROSIN P. L., MARTIN R. R., LANGBEIN F. C., 2007. Fast and effective feature-preserving mesh denoising. *IEEE Transactions on Visualisation and Computer Graphics*, Vol. 13, n°5, pp. 925-938. DOI : 10.1109/TVCG.2007.1065

SUN ZI, 2015. *L'art de la guerre*. Traduit du chinois par J. Lévi, Pluriel, Paris, 328 p.

T

TABORELLI P., BOLLOT N., DEVOS A., DODICI M., DESFOSSES Y., BRENOT J., 2016. Apport des plans directeurs sur la compréhension de l'organisation spatiale du front durant la Grande Guerre. Application à l'Argonne. *Revue de Géographie Historique*, n°8. URL : rgh.univ-lorraine.fr/articles/view/66/

TABORELLI P., DEVOS A., DESFOSSES Y., BRENOT J., LARATTE S., 2017a. Typologie et organisation spatiale des « polémoformes » de la Grande Guerre révélées par l'outil LiDAR et les Plans directeurs. Application à la Champagne et à l'Argonne. *Revue de géographie historique*, n°10-11. URL : rgh.univ-lorraine.fr/articles/view/88/Typologie_et_organisation_spatiale_des_polemo_formes_de_la_Grande_Guerre_revelees_par_l_outil_LiDAR_et_les_Plans_directeurs_Application_a_la_Champagne_et_a_l_Argonne

TABORELLI P., DEVOS A., LARATTE S., BRENOT J., BOLLOT N., CANCES B., DESFOSSES Y., 2017b. Apport des plans directeurs et de l'outil LiDAR aéroporté pour la caractérisation des impacts morphologiques de la Grande Guerre : exemple de la cote 108 (Berry-au-Bac, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, Vol. 23, n°2, pp. 155-169. URL : doi.org/10.4000/geomorphologie.11711

TARBOTON D. G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, Vol. 33, n°2, pp. 309-319. DOI : 10.1029/96WR03137

TAYLOR P. J., 1977. *Quantitative methods in geography: An introduction to spatial analysis*. Boston, Atlanta, Dallas, Houghton Mifflin Company, 386 p.

TELA BOTANICA. *Picea abies* [consulté le 18 mars 2018]. Tela Botanica. Le réseau des botanistes francophones. URL : www.tela-botanica.org/bdtfx-nn-75288-synthese

TELBISZ T., LÁTOS T., DEÁK M., SZÉKELY B., KOMA Z., STANDOVÁR T., 2016. The advantage of LiDAR digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets - Aggtelek karst (Hungary) as an example. *Acta Carsologica*, Vol. 45, n°1, pp. 5-18. DOI : 10.3986/ac.v45i1.4138

THORNBUSH M. J., 2012. Archaeogeomorphology as an application in physical geography. *Applied Geography*, Vol. 34, pp. 325-330. DOI : 10.1016/j.apgeog.2011.12.005

— 2013. Introduction: Archaeogeomorphology (geomorphology, culture and place). *Applied Geography*, Vol. 42, pp. 155-156. DOI : 10.1016/j.apgeog.2013.04.012

TILLON L., RAYNAUD J.-C., LE ROUX M., DARNIS T., 2017. *Programme « Forêt d'exception » : inventaire des Chiroptères, forêts domaniales de Verdun et de Morthomme (55)*. ONF Réseau Mammifères, Paris, 80 p.

TRAN T., 2006. *Les perturbations anthropiques contemporaines dans les mangroves du sud Viêt-Nam, entre nature, civilisations et histoire. Approches par modélisation et analyses spatiales*. Thèse de doctorat, université Paris-Sorbonne, 1 210 p.

TROUVÉ F., DAVID S., 2015. Montmorency (Val-d'Oise, 95). *Les Nouvelles de l'archéologie*, n°139, pp. 45-50. URL : journals.openedition.org/nda/2913 ; DOI : 10.4000/nda.2913

U

UNDERWOOD J. R., GUTH P. L. (EDS), 1998. *Military geology in war and peace*. Geological Society of America, Boulder, 245 p.

UNGLERT K., RADIĆ V., JELLINEK A. M., 2016. Principal component analysis vs. self-organizing maps combined with hierarchical clustering for pattern recognition in volcano seismic spectra. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 320, pp. 58-75. DOI : 10.1016/j.jvolgeores.2016.04.014

V

VAN DER SCHRIEK M., BEEX W., 2017. The application of LiDAR-based DEMs on WWII conflict sites in the Netherlands. *Journal of Conflict Archaeology*, Vol. 12, n°2, pp. 94-114. DOI : 10.1080/15740773.2017.1440960

VAN MEIRVENNE M., MEKLIT T., VERSTRAETE S., DE BOEVER M., TACK F., 2008. Could shelling in the First World War have increased copper concentrations in the soil around Ypres?. *European Journal of Soil Science*, Vol. 59, pp. 372-379. DOI : 10.1111/j.1365-2389.2007.01014.x

VERHAGEN P., DRĂGUȚ L., 2012. Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping. *Journal of Archaeological Science*, Vol. 39, n°3, pp. 698-703. DOI : 10.1016/j.jas.2011.11.001

VERKINDT É., BLANC H., 2013. Le « paysage de mémoire ». Un concept en construction. *Espaces*, n°313, pp. 80-87

VERNIER F., 2006. Les plantes obsidionales, ces plantes qui suivent les troupes. In : MARTIN P., SIMIZ S. (EDS), *L'empreinte de la guerre : de la Grèce classique à la Tchétchénie*. Lavauzelle, Panazol, pp. 533-540

— 2014. *Plantes obsidionales : l'étonnante histoire des espèces propagées par les armées*. Vent d'Est, Strasbourg, 191 p.

VESAKOSKI J.-M., ALHO P., HYYPPÄ J., HOLOPAINEN M., FLENER C., HYYPPÄ H., 2014. Nationwide digital terrain models for topographic depression modelling in detection of flood detention areas. *Water*, Vol. 6, n°2, pp. 271-300. DOI : 10.3390/w6020271

VIDAL J., PETIT C., 2010. L'eau sur le site d'Alésia : la contrainte hydrogéologique lors du siège de 52 av. J.-C.. *Revue Archéologique de l'Est*, tome 59-1, n°181, pp. 241-263. URL : journals.openedition.org/rae/6500

VILLATE R., 1925. *Les conditions géographiques de la guerre : étude de géographie militaire sur le front français de 1914 à 1918*. Thèse de doctorat, université de Paris, Payot, Paris, 350 p.

VILLATOUX M.-C., 2010. Le renseignement photographique dans la manœuvre. L'exemple de la Grande Guerre. *Revue historique des armées*, n°261, pp. 3-13. URL : journals.openedition.org/rha/7090

W

WANG Y., WEINACKER H., KOCH B., 2008. A Lidar point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modelling in forest. *Sensors*, Vol. 8, n°6, pp. 3938-3951. DOI : 10.3390/s8063938

WATSON D. F., PHILIP G. M., 1985. A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geoprocessing*, Vol. 2, n°4, pp. 315-327.

WEISHAMPEL J. F., HIGHTOWER J. N., CHASE A. F., CHASE D. Z., PATRICK R. A., 2011. Detection and morphologic analysis of potential below-canopy cave openings in the karst landscape around the Maya polity of Caracol using airborne LIDAR. *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. 73, n°3, pp. 187-196. DOI : 10.4311/2010EX0179R1

WEISS A. D., 2001. *Topographic position and landforms analysis*. Poster, ESRI User Conference 2001, San Diego. URL : www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf

WESTING A. H., 1975. Environmental consequences of the Second Indochina War: A case study. *Ambio*, Vol. 4, n°5-6, pp. 216-222. URL : www.jstor.org/stable/4312150

— 1980. *Warfare in a fragile world. Military impact on the human environment*. SIPRI books, Londres, New York, 249 p.

— 1983. The environmental aftermath of warfare in Vietnam. *Natural Resources Journal*, n°23, pp. 365-389. URL : digitalrepository.unm.edu/nrj/vol23/iss2/7

— 2013. *Arthur H. Westing: Pioneer on the Environmental Impact of War*. Springer, Berlin, Heidelberg, 150 p. DOI : 10.1007/978-3-642-31322-6

WESTING A. H., PFEIFFER E., 1972. The cratering of Indochina. *Scientific American*, Vol. 226, n°5, pp. 21-29

WHITE M. C., 2007. *Geologic controls on instability in WWI excavation, Canadian National Memorial Site, Vimy, France*. Thèse de doctorat, Queen's university, 144 p.

WIEBER J.-C., 1995. Le paysage visible, un concept nécessaire. In : ROGER A. (ED), *La théorie du paysage en France (1974-1994)*. Champ Vallon, Seyssel, pp. 182-193

WIJNEN J. A. T., SCHUTE I. A., KOK R. S., 2016. Conflict archaeology in the Netherlands: The role of communities in an emerging archaeological discipline. *Journal of Community Archaeology & Heritage*, Vol. 3, n°1, pp. 22-39. DOI : 10.1080/20518196.2015.1123889

WOODWARD R., 2014. Military landscapes: Agendas and approaches for future research. *Progress in Human Geography*, Vol. 38, n°1, pp. 40-61. DOI : 10.1177/0309132513493219

WU Q., LANE C. R., 2016. Delineation and quantification of wetland depressions in the prairie Pothole Region of North Dakota. *Wetlands*, Vol. 36, n°2, pp. 215-227. DOI : 10.1007/s13157-015-0731-6

Y

YODER J. A., AIKEN J., SWIFT R. N., HOGE F. E., STEGMANN P. M., 1993. Spatial variability in near-surface chlorophyll *a* fluorescence measured by the Airborne Oceanographic Lidar (AOL). *Deap Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Vol. 40, n°1-2, pp. 37-53. DOI : 10.1016/0967-0645(93)90005-8

YOËLI P., 1965. Analytical hill shading. *Surveying and Mapping*, Vol. 25, n°4, pp. 573-579

YOKOYAMA R., SHIRASAWA M., PIKE R. J., 1965. Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 68, n°3, pp. 257-265

Z

ZAKŠEK K., OŠTIR K., KOKALJ Ž., 2011. Sky-view factor as a relief visualization technique. *Remote sensing*, Vol. 12, n°3, pp. 398-415. DOI : 10.3390/rs3020398

ZALEWSKA A., 2016. The 'Gas-scape' on the Eastern Front, Poland (1914-2014): Exploring the material and digital landscapes and remembering those 'Twice-Killed'. In : STICHELBAUT B., COWLEY D. (EDS), *Conflict landscapes and archaeology from above*. Ashgate publishing, Farnham, pp. 147-166

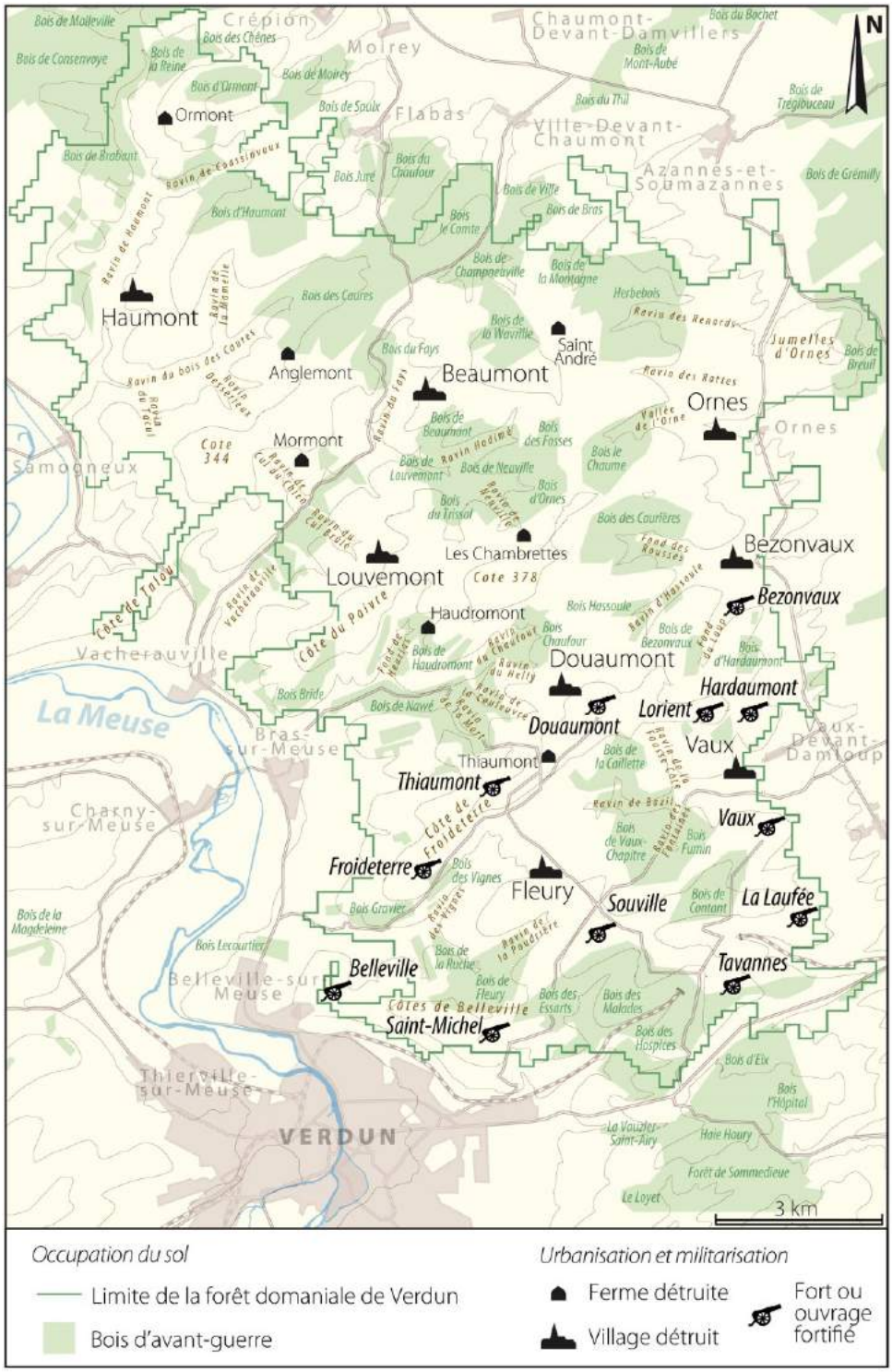
ZEVENBERGEN L. W., THORNE C. R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 12, n°1, pp. 47-56. DOI : 10.1002/esp.3290120107

ZIEGLER A. D., GIAMBELLUCA T. W., 1998. Influence of revegetation efforts on hydrologic response and erosion, Kaho'Olawe Island, Hawai'i. *Land Degradation & Development*, Vol. 9, n°3, pp. 189-206. DOI : 10.1002/(SICI)1099-145X(199805/06)9:3<189::AID-LDR272>3.0.CO;2-R

ZWEIG A., 1938. *L'éducation héroïque devant Verdun*. Traduit de l'allemand par B. Briod, Plon, Paris, 268 p.

Annexes

Annexe A – Carte des lieux cités dans la thèse



Annexe B – Résultats du contrôle qualité des données LiDAR

Tableau B.1 – *Calcul des écarts de profondeur de la base « feuillus »*

Numéro objet	Type	Profondeur réelle	Profondeur LiDAR	Écarts	Numéro objet	Type	Profondeur réelle	Profondeur LiDAR	Écarts
1	Trou d'obus	1	0,9	0,1	51	Trou d'obus	1,2	1,1	0,1
2	Trou d'obus	1,5	1,2	0,3	52	Trou d'obus	0,7	0,6	0,1
3	Trou d'obus	0,6	0,5	0,1	53	Trou d'obus	0,7	0,6	0,1
4	Trou d'obus	1,4	1,3	0,1	54	Trou d'obus	0,6	0,4	0,2
5	Trou d'obus	0,5	0,4	0,1	55	Trou d'obus	1,1	1	0,1
6	Trou d'obus	0,8	0,4	0,4	56	Trou d'obus	0,8	0,7	0,1
7	Trou d'obus	0,9	0,8	0,1	57	Trou d'obus	1,1	1,1	0
8	Trou d'obus	0,9	0,6	0,3	58	Trou d'obus	1,2	1	0,2
9	Trou d'obus	0,7	1,2	-0,5	59	Trou d'obus	1,2	1,1	0,1
10	Trou d'obus	1,1	1	0,1	60	Trou d'obus	0,8	0,7	0,1
11	Trou d'obus	0,7	0,7	0	61	Trou d'obus	1	0,8	0,2
12	Trou d'obus	0,5	1,1	-0,6	62	Trou d'obus	1,4	1,3	0,1
13	Trou d'obus	0,8	1	-0,2	63	Trou d'obus	1,3	1,1	0,2
14	Trou d'obus	1,5	0,7	0,8	64	Trou d'obus	1,2	1	0,2
15	Trou d'obus	1,2	0,5	0,7	65	Trou d'obus	0,7	0,6	0,1
16	Trou d'obus	1,1	1	0,1	66	Trou d'obus	0,5	0,4	0,1
17	Trou d'obus	1	0,5	0,5	67	Trou d'obus	0,9	1,2	-0,3
18	Trou d'obus	1,1	0,7	0,4	68	Trou d'obus	1,1	1	0,1
19	Trou d'obus	0,6	0,9	-0,3	69	Trou d'obus	0,7	0,6	0,1
20	Trou d'obus	1,4	1,2	0,2	70	Trou d'obus	1	0,9	0,1
21	Trou d'obus	1	0,5	0,5	71	Trou d'obus	0,8	0,7	0,1
22	Trou d'obus	0,8	0,3	0,5	72	Trou d'obus	0,8	0,7	0,1
23	Trou d'obus	1	0,9	0,1	73	Trou d'obus	1,2	1	0,2
24	Trou d'obus	1,4	1,3	0,1	74	Trou d'obus	0,7	0,6	0,1
25	Trou d'obus	0,9	0,7	0,2	75	Trou d'obus	0,7	0,6	0,1
26	Trou d'obus	1,8	0,9	0,9	76	Trou d'obus	1,5	1,4	0,1
27	Trou d'obus	1	1,4	-0,4	77	Trou d'obus	1,5	1,4	0,1
28	Trou d'obus	0,8	1	-0,2	78	Trou d'obus	0,8	0,7	0,1
29	Abri	2,2	1,7	0,5	79	Trou d'obus	1	0,9	0,1
30	Trou d'obus	1,2	1	0,2	80	Trou d'obus	1,7	2	-0,3
31	Abri	1,5	1,4	0,1	81	Trou d'obus	2,4	2,4	0
32	Abri	1,1	1	0,1	82	Trou d'obus	2,1	2	0,1
33	Trou d'obus	1,1	0,8	0,3	83	Trou d'obus	0,6	0,5	0,1
34	Abri	1,8	1,7	0,1	84	Trou d'obus	1,1	1,3	-0,2
35	Trou d'obus	1	0,8	0,2	85	Trou d'obus	1,2	1	0,2
36	Abri	0,8	1,3	-0,5	86	Trou d'obus	1,1	1	0,1
37	Trou d'obus	0,8	0,8	0	87	Trou d'obus	1,4	1,3	0,1
38	Trou d'obus	0,4	0,3	0,1	88	Trou d'obus	0,9	0,8	0,1
39	Trou d'obus	1,4	1,5	-0,1	89	Trou d'obus	1,5	1,4	0,1
40	Trou d'obus	1,5	0,9	0,6	90	Trou d'obus	1	0,9	0,1
41	Trou d'obus	1,5	1,4	0,1	91	Trou d'obus	0,9	0,8	0,1
42	Trou d'obus	0,7	0,5	0,2	92	Trou d'obus	0,9	0,7	0,2
43	Trou d'obus	1	0,9	0,1	93	Trou d'obus	0,8	0,7	0,1
44	Trou d'obus	1,3	1,2	0,1	94	Trou d'obus	1,3	1,2	0,1
45	Trou d'obus	1,4	0,8	0,6	95	Trou d'obus	0,6	0,5	0,1
46	Trou d'obus	1	0,8	0,2	96	Trou d'obus	1,2	1	0,2
47	Trou d'obus	0,6	0,5	0,1	97	Trou d'obus	0,7	0,6	0,1
48	Trou d'obus	1,4	1,2	0,2	98	Trou d'obus	0,9	0,8	0,1
49	Trou d'obus	1,9	1,8	0,1	99	Trou d'obus	0,8	0,7	0,1
50	Abri	0,6	0,5	0,1	100	Trou d'obus	1	0,9	0,1

Tableau B.2 – *Calcul des écarts de profondeur de la base « résineux »*

Numéro objet	Type	Profondeur réelle	Profondeur LiDAR	Écarts	Numéro objet	Type	Profondeur réelle	Profondeur LiDAR	Écarts
1	Trou d'obus	1,5	1,3	0,2	40	Trou d'obus	1,7	0,6	1,1
2	Trou d'obus	1,8	1,7	0,1	41	Trou d'obus	1,3	1,1	0,2
3	Trou d'obus	1,1	0,7	0,4	42	Trou d'obus	1,2	0,9	0,3
4	Trou d'obus	2,7	1,4	1,3	43	Trou d'obus	1	0,9	0,1
5	Trou d'obus	0,8	0,7	0,1	44	Trou d'obus	1,1	1	0,1
6	Trou d'obus	1,1	0,8	0,3	45	Trou d'obus	2,1	2	0,1
7	Trou d'obus	1,8	1,5	0,3	46	Trou d'obus	1,8	1,5	0,3
8	Trou d'obus	2,6	2,4	0,2	47	Trou d'obus	0,8	0,6	0,2
9	Trou d'obus	0,6	0,5	0,1	48	Trou d'obus	0,8	0,9	-0,1
10	Trou d'obus	1,3	1	0,3	49	Trou d'obus	1,2	1,1	0,1
11	Trou d'obus	1,4	0,9	0,5	50	Trou d'obus	1,9	1,8	0,1
12	Trou d'obus	2,2	2,5	-0,3	51	Tranchée	1,2	0,9	0,3
13	Trou d'obus	1,1	0,8	0,3	52	Trou d'obus	0,9	0,7	0,2
14	Trou d'obus	1,7	1,3	0,4	53	Trou d'obus	1,1	0,5	0,6
15	Trou d'obus	0,8	0,7	0,1	54	Trou d'obus	0,9	0,8	0,1
16	Trou d'obus	2,2	0,7	1,5	55	Trou d'obus	1,1	0,6	0,5
17	Trou d'obus	1,9	1,3	0,6	56	Trou d'obus	1	0,9	0,1
18	Trou d'obus	2,2	2,1	0,1	57	Trou d'obus	2,2	2,1	0,1
19	Trou d'obus	1,4	0,8	0,6	58	Trou d'obus	0,8	0,6	0,2
20	Trou d'obus	1,7	1,6	0,1	59	Trou d'obus	1	0,8	0,2
21	Trou d'obus	1,7	1,5	0,2	60	Trou d'obus	1,3	1	0,3
22	Trou d'obus	1,1	0,8	0,3	61	Trou d'obus	1,5	0,8	0,7
23	Trou d'obus	0,7	0,4	0,3	62	Trou d'obus	1,6	1,1	0,5
24	Trou d'obus	0,6	0,4	0,2	63	Trou d'obus	2	1,8	0,2
25	Trou d'obus	0,8	0,7	0,1	64	Trou d'obus	1,6	1,2	0,4
26	Trou d'obus	0,6	0,5	0,1	65	Trou d'obus	1,5	1,3	0,2
27	Abri	1,5	1,4	0,1	66	Trou d'obus	1,6	1,1	0,5
28	Trou d'obus	1,3	1,2	0,1	67	Trou d'obus	0,5	0,4	0,1
29	Trou d'obus	1,9	1,8	0,1	68	Trou d'obus	2,1	2	0,1
30	Trou d'obus	1,6	1,3	0,3	69	Trou d'obus	1,5	1,3	0,2
31	Trou d'obus	1,6	1,6	0	70	Trou d'obus	0,8	0,5	0,3
32	Trou d'obus	1	0,8	0,2	71	Trou d'obus	1,5	1,4	0,1
33	Trou d'obus	1,1	1	0,1	72	Tranchée	0,7	0,5	0,2
34	Trou d'obus	1,5	1,3	0,2	73	Trou d'obus	1,4	0,8	0,6
35	Trou d'obus	0,6	0,5	0,1	74	Trou d'obus	0,9	1	-0,1
36	Trou d'obus	1	0,7	0,3	75	Trou d'obus	2,5	2,3	0,2
37	Trou d'obus	1,1	1	0,1	76	Trou d'obus	1,1	1	0,1
38	Trou d'obus	2	1,7	0,3	77	Trou d'obus	1,2	1,8	-0,6
39	Trou d'obus	2	2	0	78	Trou d'obus	0,8	0,5	0,3

Tableau B.3 – *Calcul des écarts de profondeur de la base « eau »*

Numéro objet	Type	Profondeur réelle	Profondeur LiDAR	Écarts	Numéro objet	Type	Profondeur réelle	Profondeur LiDAR	Écarts
1	Trou d'obus	2,1	0,8	1,3	12	Trou d'obus	2	1,6	0,4
2	Trou d'obus	1,1	0,2	0,9	13	Trou d'obus	1,2	1	0,2
3	Trou d'obus	0,7	0,1	0,6	14	Trou d'obus	1	0,4	0,6
4	Trou d'obus	1,2	0,5	0,7	15	Trou d'obus	2	1,4	0,6
5	Trou d'obus	0,5	0,1	0,4	16	Trou d'obus	1	0,5	0,5
6	Trou d'obus	0,4	0,2	0,2	17	Trou d'obus	2	1,6	0,4
7	Trou d'obus	1,2	0,3	0,9	18	Trou d'obus	1,2	0,6	0,6
8	Trou d'obus	1,4	0,5	0,9	19	Trou d'obus	1,2	0,7	0,5
9	Trou d'obus	2,7	1,5	1,2	20	Trou d'obus	1,3	0,4	0,9
10	Trou d'obus	3	2,6	0,4	21	Trou d'obus	2	1,2	0,8
11	Trou d'obus	2,5	2,1	0,4	22	Trou d'obus	0,9	0,5	0,4

Annexe C – Tableaux relatifs aux documents récoltés dans les centres d'archives

Tableau C.1 – *Inventaire des côtes consultées dans les centres d'archives*

Centres d'archives	Types de document	Côte
SHD	Cartes	GR/6M/LVI/B
	Photographies aériennes	AI/1A/312, AI/1A/313, AI/1A/314, AI/1A/315, AI/1A/335, AI/1A/336, AI/Z/6684, AI/Z/21441, GR/19N/253, GR/19N/352, AI/151MO, GR/1K, GR/7N, GR/16N, GR/22N, GR/24N, MV/256GG
	JMO	Mémoire des Hommes : 65ème BI, 128ème DI, 1er, 3ème, 4ème, 6ème, 9ème et 21ème RG, 7ème, 14ème, 20ème, 27ème, 28ème, 29ème, 35ème, 41ème, 42ème, 44ème, 55ème, 109ème, 167ème, 226ème, 233ème, 365ème et 403ème RI, 8ème RZ
IGN	Cartes	Fonds "Guerre mondiale 1" (GM1)
ECPAD	Photographies et cartes postales	Séries CB, E, G, J, M, N ; collections Williamson Pierre et Lefèvre Gilles
Bibliothèque de Verdun	Cartes	Collection des "Armées françaises dans la Grande Guerre" (tome 4)
	Photographies aériennes	Collections Rudolf Ingber (classeurs 2 et 3) et Wiedemann (70143 bis)
	Photographies et cartes postales	Collection Rudolf Ingber (classeurs 1, 3 et 5)
Centre de documentation du mémorial	Photographies aériennes	Collection numérisée Nicolas Czubak
	Photographies et cartes postales	Collections CP12 (bataille de Verdun), CP23 (Verdun, ville, bataille, monuments, villages détruits), CP24 (vie au front, abris, tranchées, fortification, ravitaillement, communications)
Bayerisches Hauptstaatsarchiv	Cartes	Collection Karten von Schlacht um Verdun
	Photographies aériennes	BS-Aufklärung : kartonen 2, 40, 41, 42, 43, 44, 52, 57, 75, 76, Flieger-Abt. 291, 293 et 296, Kampfgeschwader Nr. 6
	Photographies et cartes postales	BS-Nachlass, BS-Rundblick Weltkrieg S. 1,1. Westfront, BS-VermTr
Bundesarchiv-Abteilung Militärarchiv	Cartes	PH 3-Kart
	Photographies aériennes	PH 19

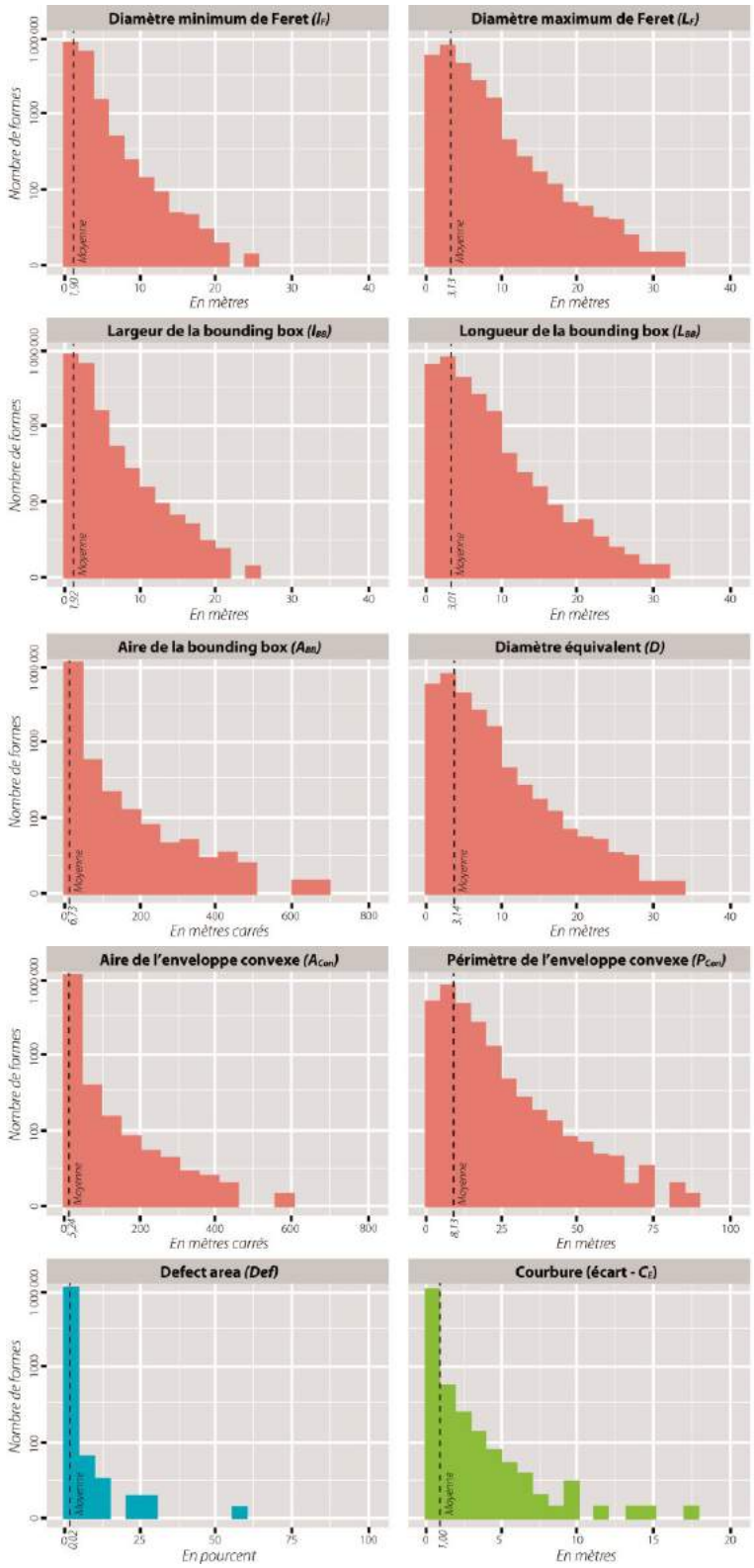
Tableau C.2 – *Liste des photographies aériennes géoréférencées*

Titre	Date de prise de vue	Titre	Date de prise de vue
Abords Ouest bois d'Haumont	9 octobre 1918	M. Raüme südwestl Fleury	24 juin 1917
Batterie de l'Hôpital	2 avril 1916	Nord de l'ouvrage du Buffle	22 juillet 1917
Bezonvaux Rücken	4 décembre 1917	Nord des carrières d'Haudromont	23 septembre 1916
Bois des Caures	14 août 1918	Nord-est de Beaumont	2 septembre 1917
Bois des Essarts	29 juillet 1916	Nord-est de Fleury	6 juillet 1916
Bois d'Ormont	4 juin 1917	Nord-est de la ferme d'Anglemont	22 juillet 1917
Bois Herbebois	28 avril 1916	Nördl Fleury	22 septembre 1917
Bois le Chaume Sud	25 avril 1916	Nördl fort Souville	18 août 1917
Boyau de la Mosquée	7 septembre 1917	Nord-ouest de Bezonvaux	24 novembre 1916
Boyau des deux bois	1er septembre 1917	Nordw Dorf Bezonvaux	23 décembre 1917
Boyau Franz Lehar	7 septembre 1917	Ormont Fme u. östlich	30 mai 1917
Boyau Franz Lehar	19 septembre 1917	Ormont Wald u. nördl	17 mars 1918
Caillette Wald	22 septembre 1917	Ornes Schlucht	16 août 1917
Caine Schlucht	5 décembre 1917	Ouest Côte du Poivre	5 mai 1916
Chapelle Sainte-Fine	14 septembre 1916	Ouvrage de Froideterre	18 mars 1916
Corne Nord-Est fort de Douaumont	25 octobre 1916	Ouvrage de la Caïne	3 juin 1917
Corne sud Herbebois	6 septembre 1917	Ouvrage de Nassau	24 janvier 1917
Côte du Poivre	16 mai 1916	Ouvrage du Coran	19 août 1917
Côte du Poivre	7 mai 1916	Route d'Azannes	7 septembre 1917
Douaumont et fort	9 avril 1916	Samogneux	17 août 1917
Fleury	6 juillet 1916	Südöstl Vaux Kreuz	19 janvier 1918
Fort de Douaumont	19 février 1915	Sud-ouest de Fleury	1er juillet 1916
Fort de Douaumont	29 avril 1916	Sud-ouest d'Ornes	6 septembre 1917
Fort de Douaumont	22 mai 1916	Sud-ouest du fort de Douaumont	31 mars 1916
Fort de Douaumont - La Caillette	31 mars 1916	Tranchée Bochemar	7 septembre 1917
Fort de Douaumont et Sud-Ouest	26 avril 1916	Tranchée d'Anglemont	13 juillet 1917
Fort de Souville	6 juillet 1916	Tranchée de Grèce	6 juillet 1917
Fort de Souville	9 avril 1916	Tranchée de Morchée	16 avril 1916
Fort de Tavannes	16 juin 1916	Tranchée de Ninive	7 septembre 1917
Fort de Vaux	26 avril 1916	Tranchée de Sérès	22 mai 1916
Fort de Vaux	19 février 1915	Tranchée de Théssalie	7 septembre 1917
Fort de Vaux	15 juin 1915	Tranchée de Weimar	19 août 1917
Fort de Vaux et sud	4 août 1916	Tranchée des 4 cheminées	19 août 1917
Haumont	6 mars 1918	Tranchée des Cévennes	7 septembre 1917
Herbebois	21 décembre 1917	Tranchée du Groenland	2 septembre 1917
La Haie Renard	23 août 1916	Vaux Schlucht	18 août 1917
La Vauche et l'Hermitage	13 juillet 1917	Westl Ornes	26 septembre 1917
Le Chenois	18 juin 1916	Westl Ornes	26 juillet 1917
Louvemont	17 août 1917	Westl Z. W. Hardaumont	6 décembre 1917

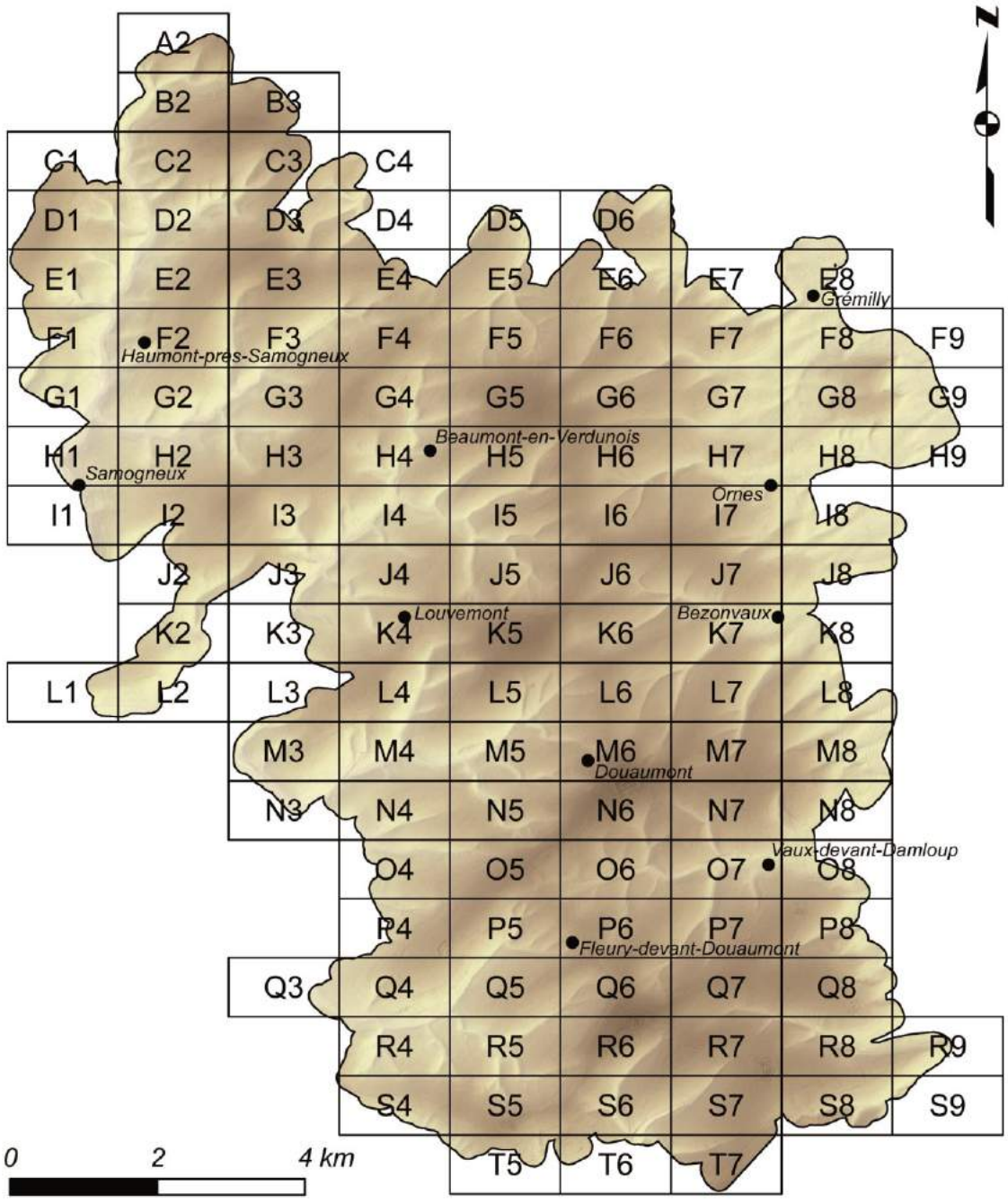
Tableau C.3 – *Liste des plans directeurs géoréférences*

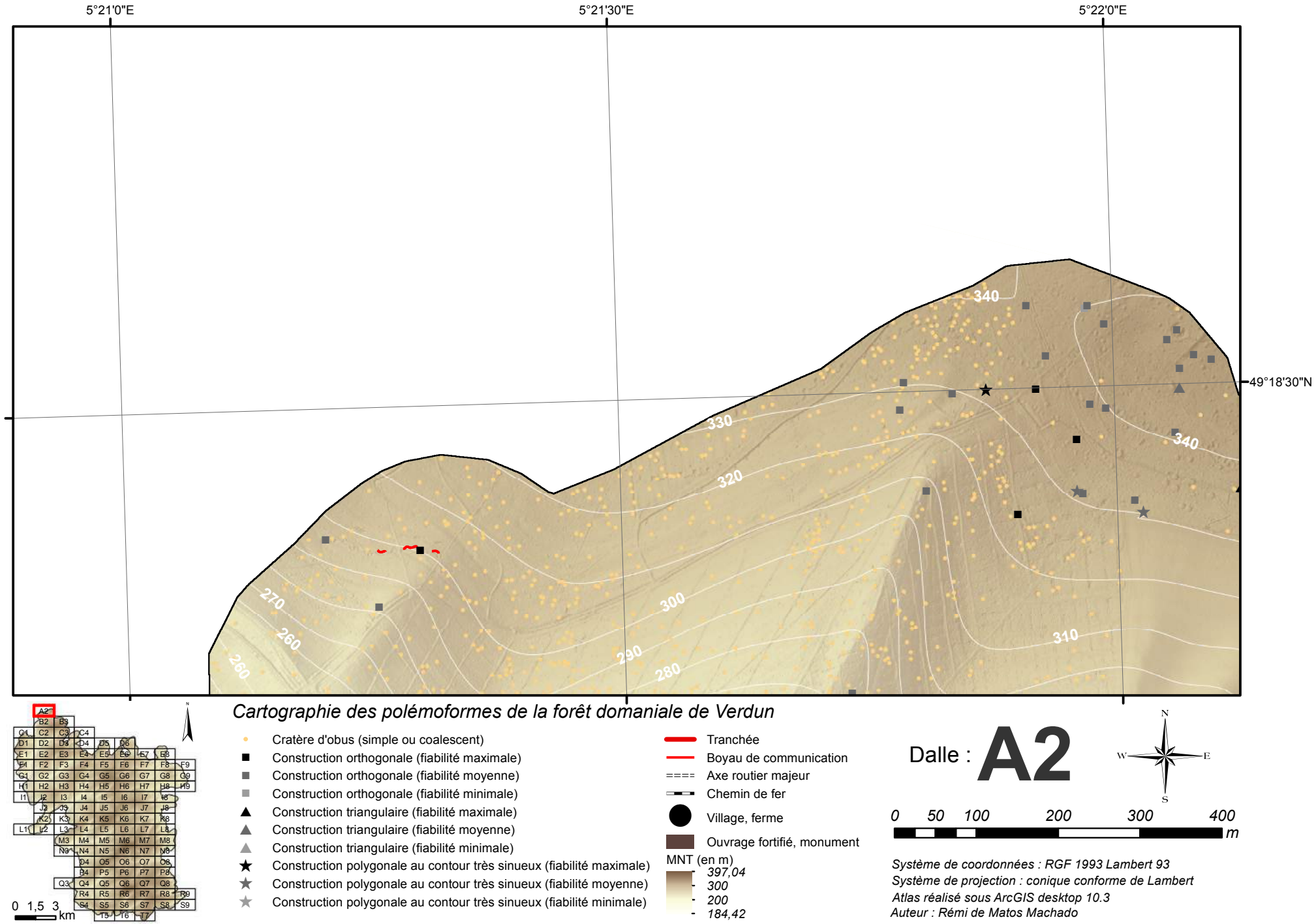
Titre	Date du tirage	Échelle	Origine	Période retenue pour la diachronie
Verdun	20 février 1916	1/25 000	Armée allemande	Février 1916
Verdun	25 février 1916	1/25 000	Armée allemande	
Rive droite	21 février 1916	1/25 000	Armée française	
Ornes	20 février 1916	1/25 000	Armée française	
Verdun	21 juin 1916	1/25 000	Armée allemande	Juin 1916
Souville	17 juin 1916	1/5000	Armée allemande	
Douaumont	6 juin 1916	1/5000	Armée française	
Vaux	12 juin 1916	1/5000	Armée française	
Verdun	5 novembre 1916	1/25 000	Armée allemande	Novembre 1916
Verdun B	14 novembre 1916	1/25 000	Armée française	
Étain A	23 novembre 1916	1/20 000	Armée française	
Poivre	14 novembre 1916	1/5000	Armée française	
Haudromont	7 novembre 1916	1/5000	Armée française	
Verdun	1er mars 1917	1/25 000	Armée allemande	Mars 1917
Ornes	10 mars 1917	1/10 000	Armée allemande	
Bezonvaux	2 mars 1917	1/5000	Armée française	
Les Chambrettes	6 mars 1917	1/5000	Armée française	
Poivre	5 mars 1917	1/5000	Armée française	
Louvemont	6 mars 1917	1/10 000	Armée française	
Verdun	7 juillet 1917	1/25 000	Armée allemande	Juillet 1917
Verdun B	27 juin 1917	1/20 000	Armée française	
Ornes	8 juillet 1917	1/10 000	Armée française	
Bezonvaux	14 juin 1917	1/5000	Armée française	
Verdun	8 janvier 1918	1/25 000	Armée allemande	Janvier 1918
Verdun B	25 janvier 1918	1/20 000	Armée française	
Mardi Gras	15 janvier 1918	1/10 000	Armée française	
Bezonvaux	14 janvier 1918	1/5000	Armée française	
Grémilly	24 janvier 1918	1/5000	Armée française	
Verdun B	9 octobre 1918	1/20 000	Armée française	Octobre 1918
Étain A	2 novembre 1918	1/20 000	Armée française	

Annexe D – Histogrammes des variables morphométriques restantes



Annexe E – Atlas détaillé des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

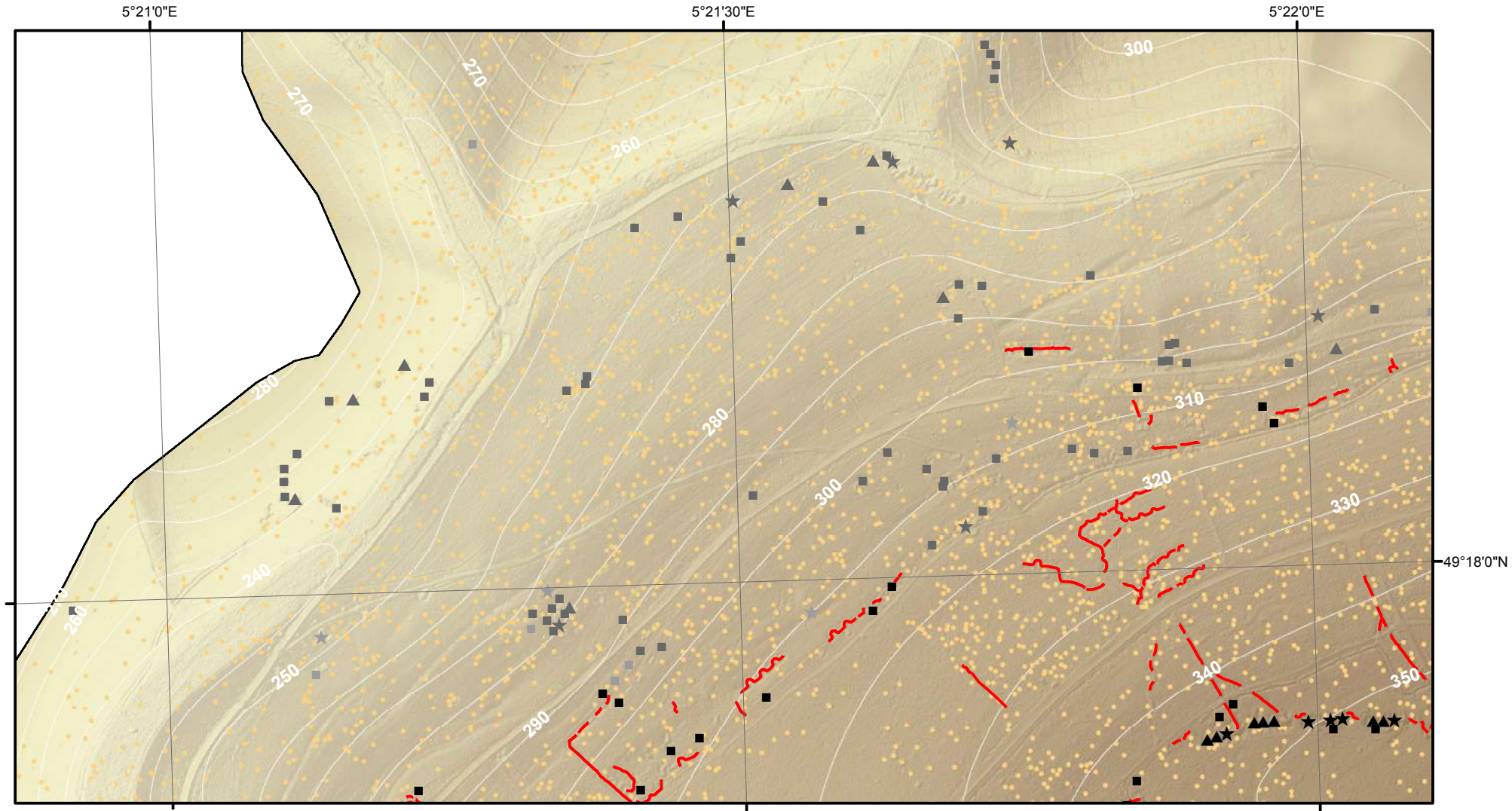
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

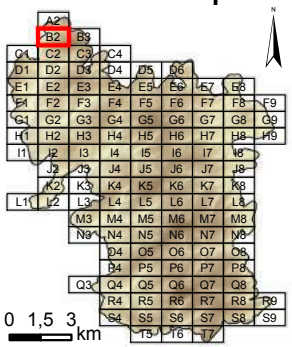
Dalle : **A2**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

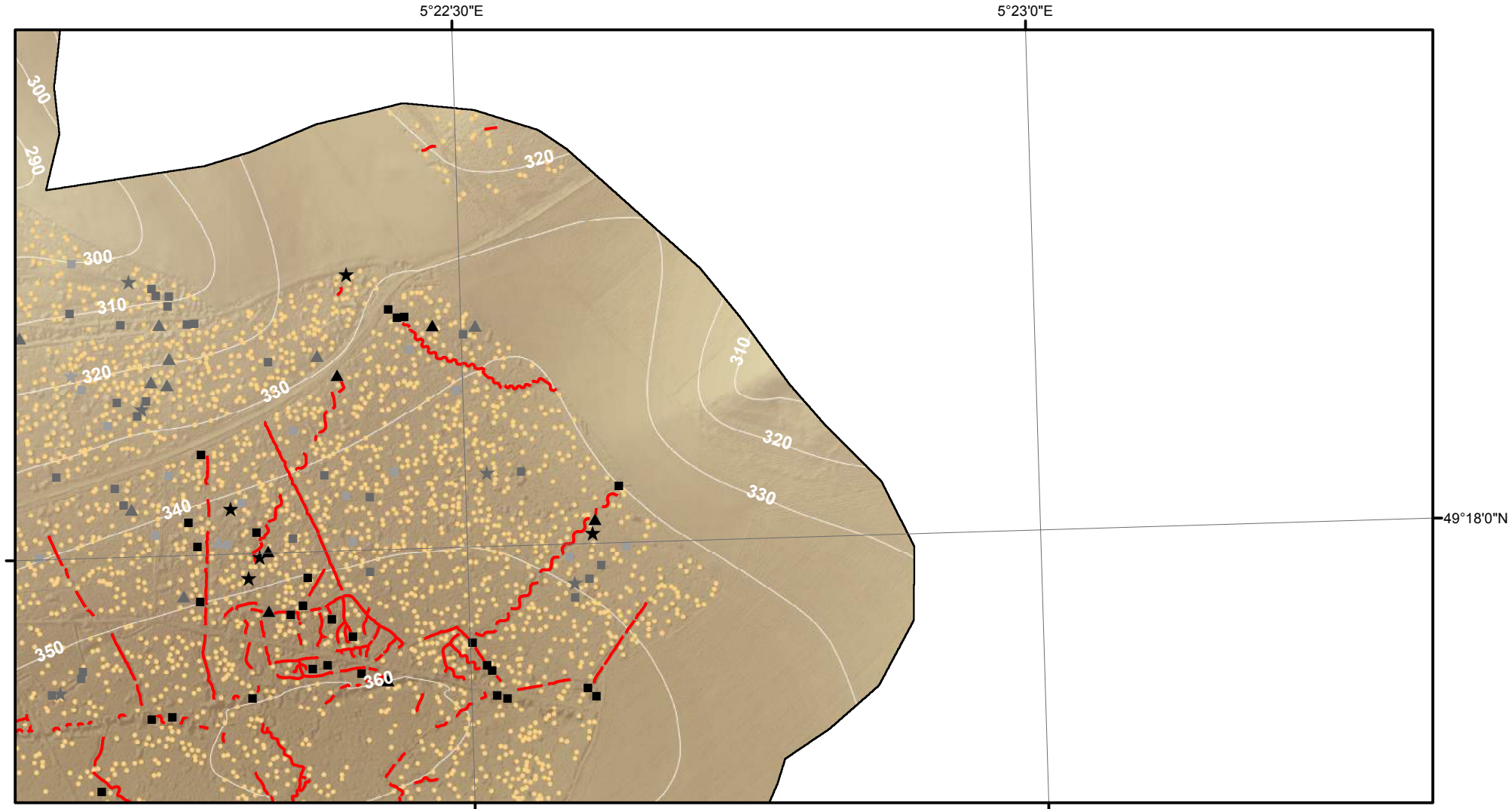
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **B2**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

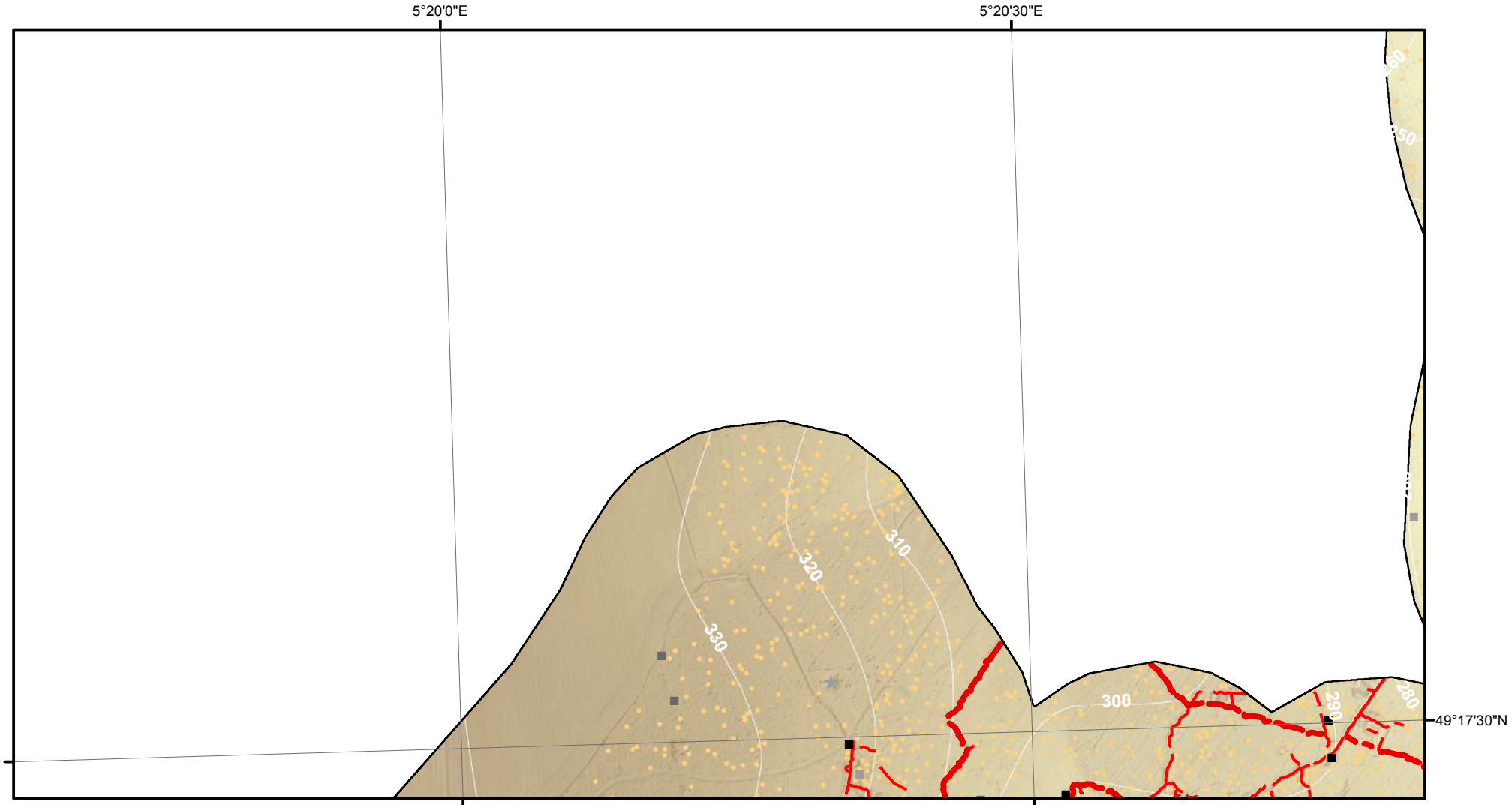
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

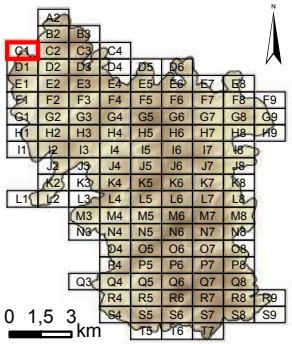
Dalle : **B3**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

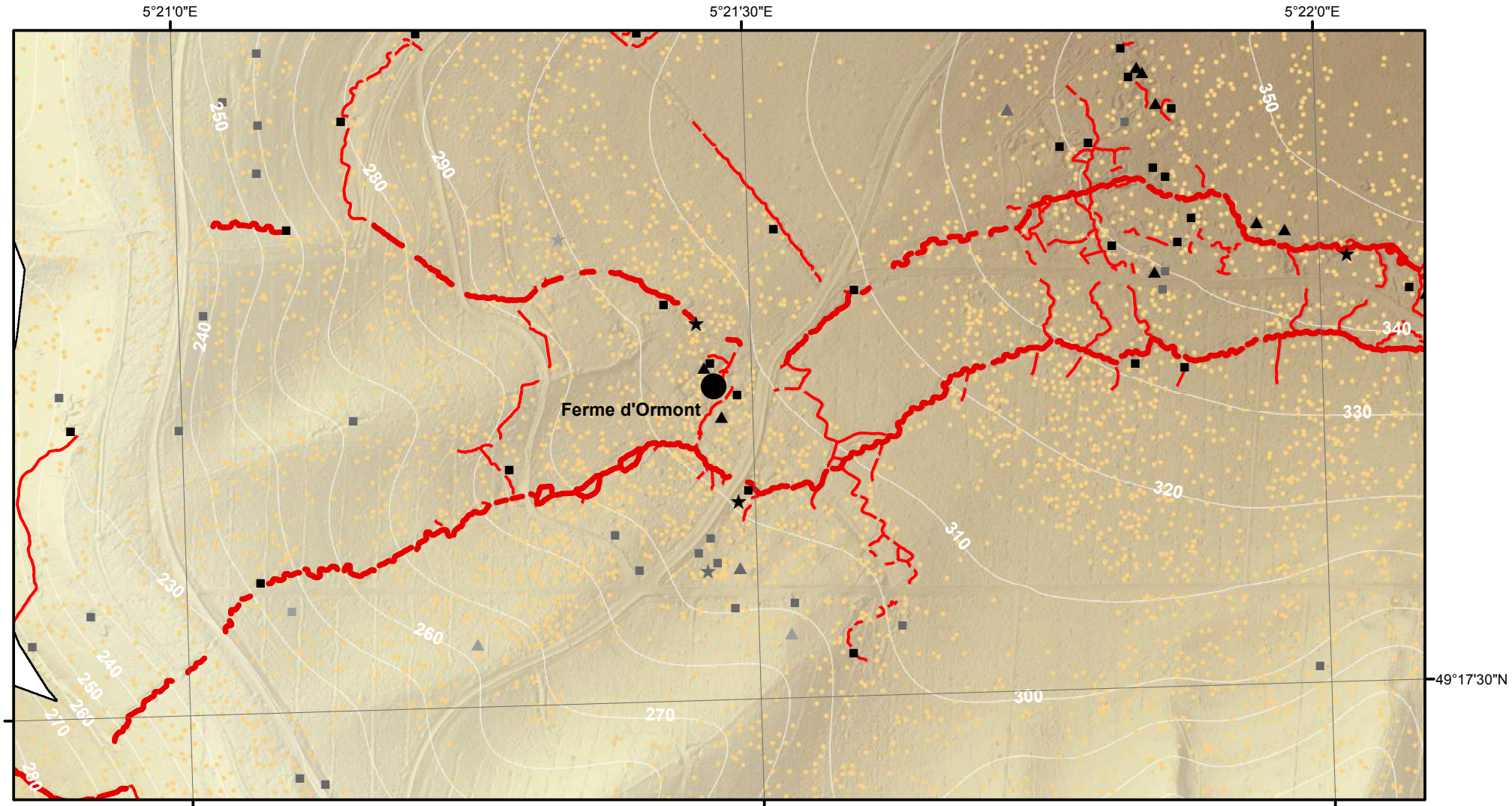
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **C1**

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

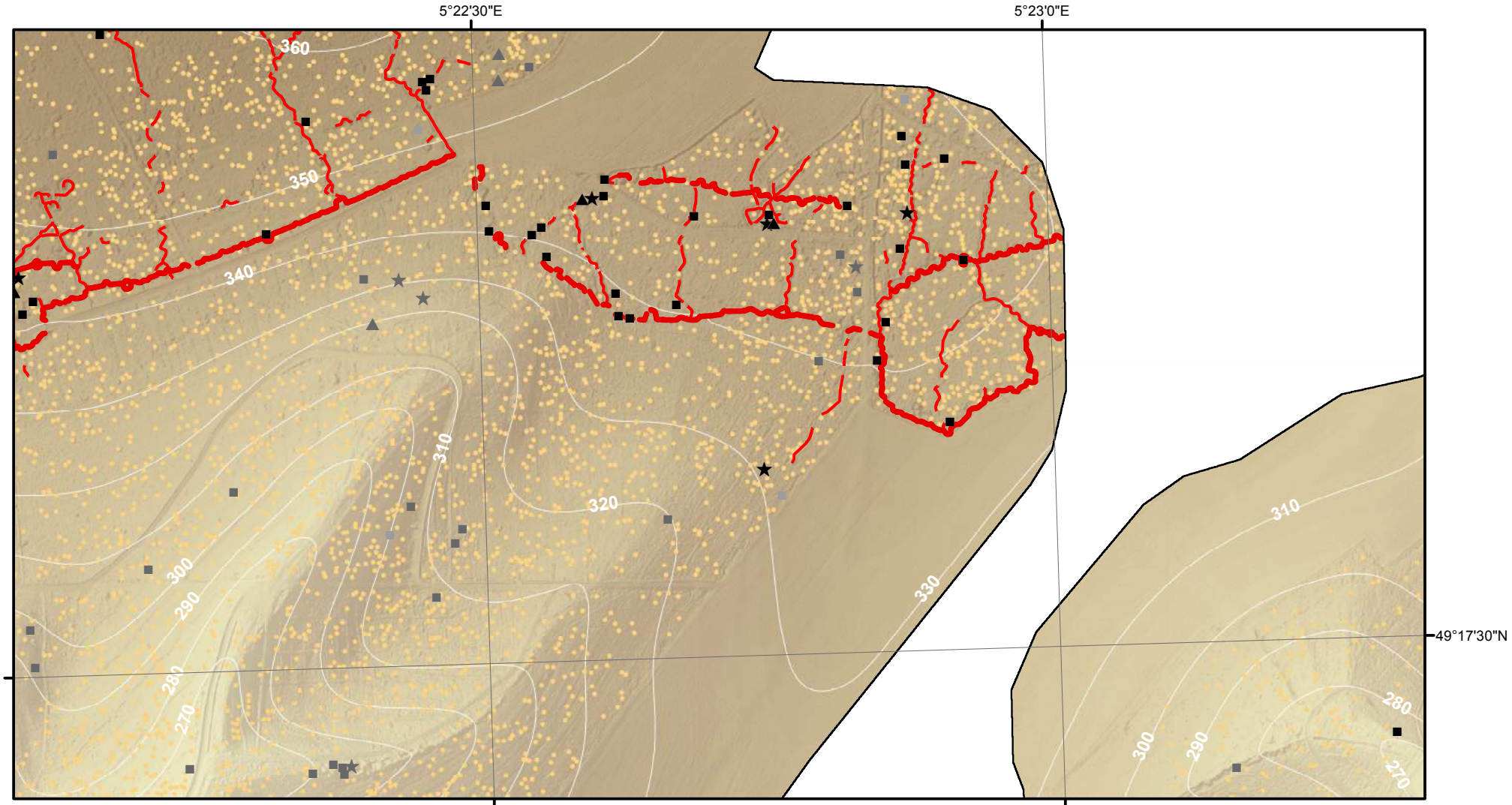
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **C2**

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

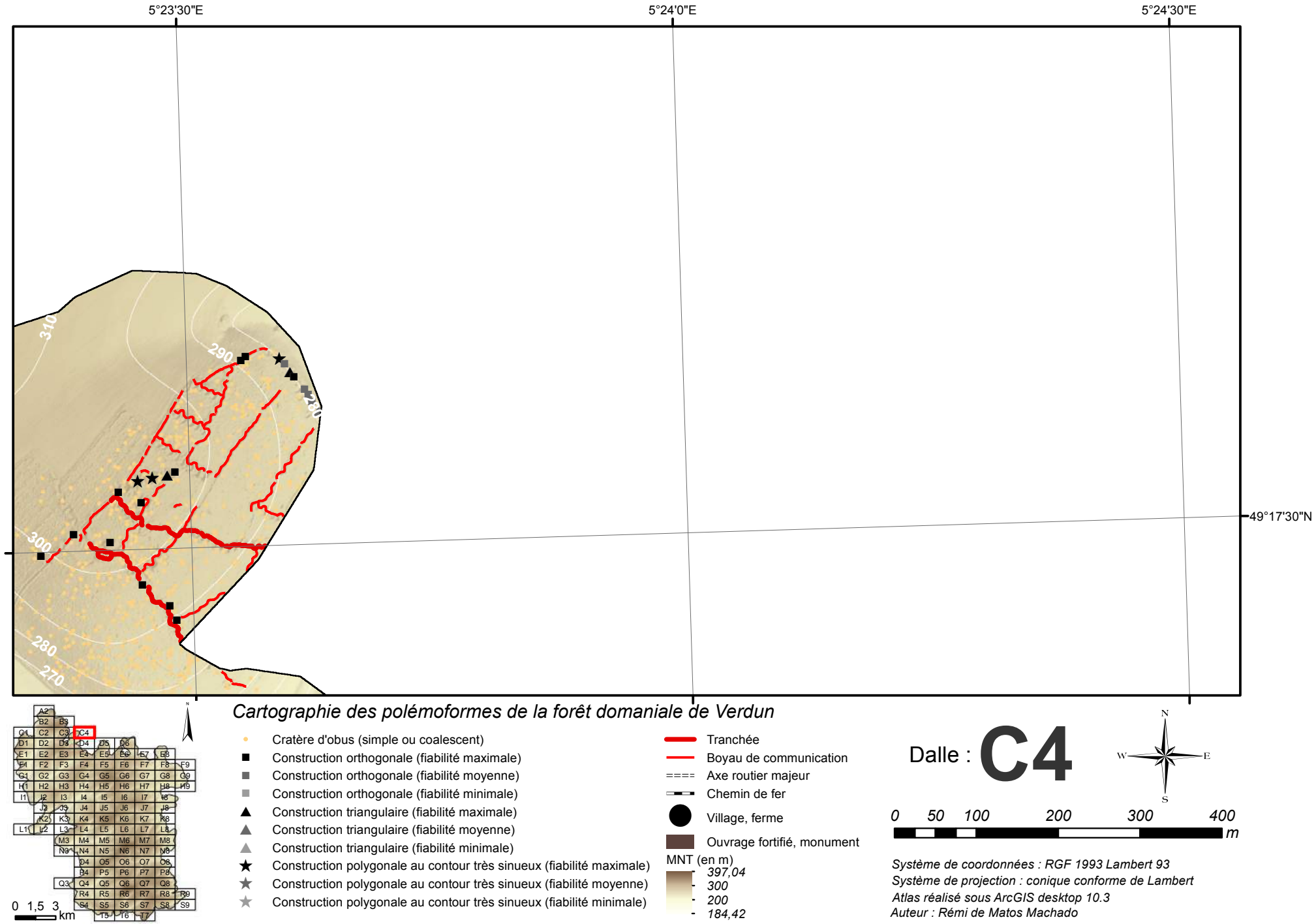
Dalle : **C3**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

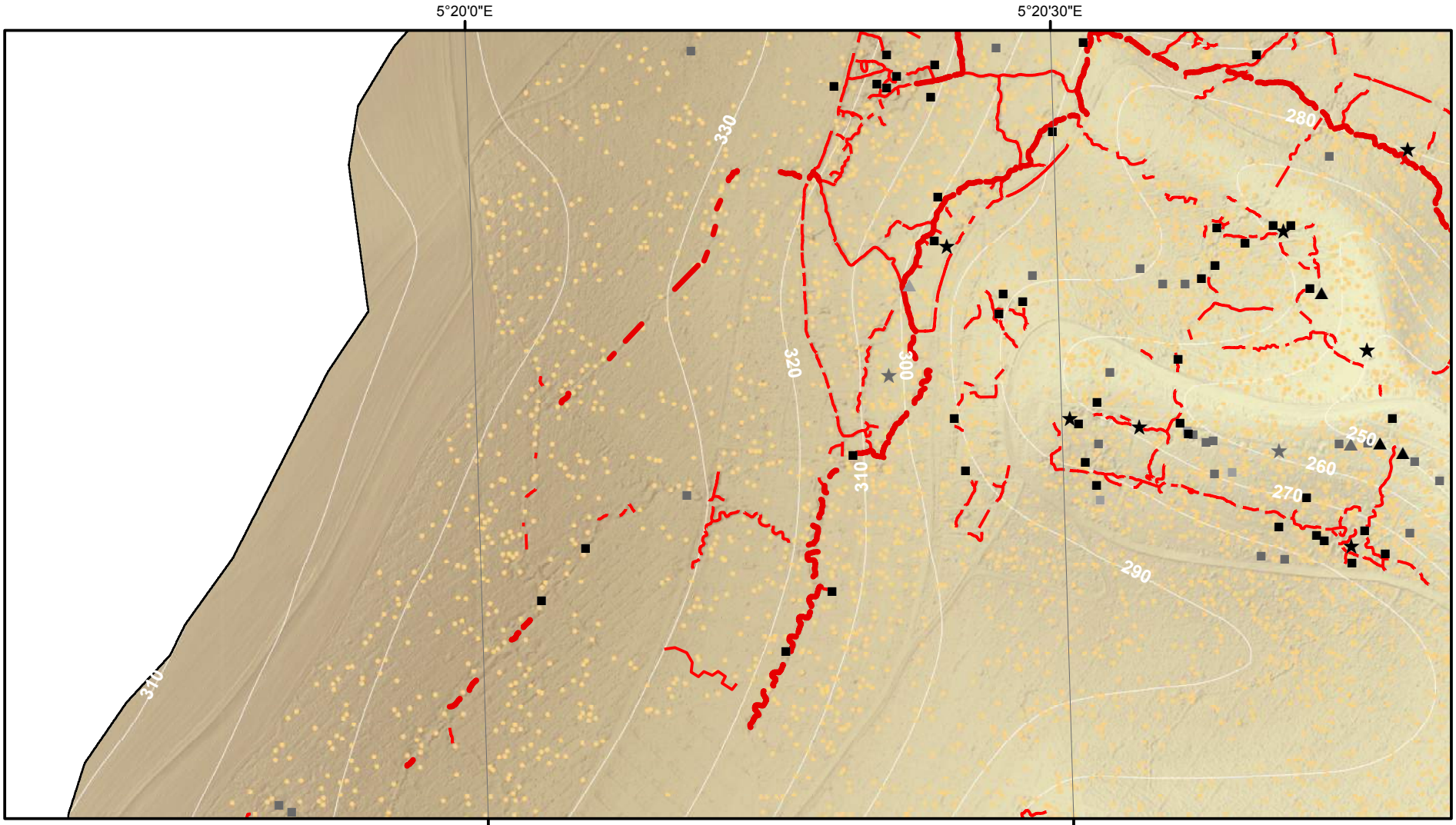
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

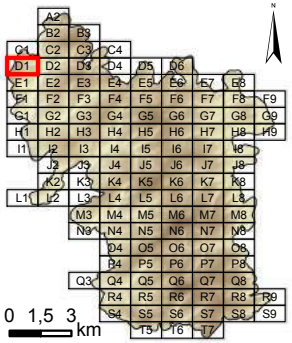
Dalle : **C4**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

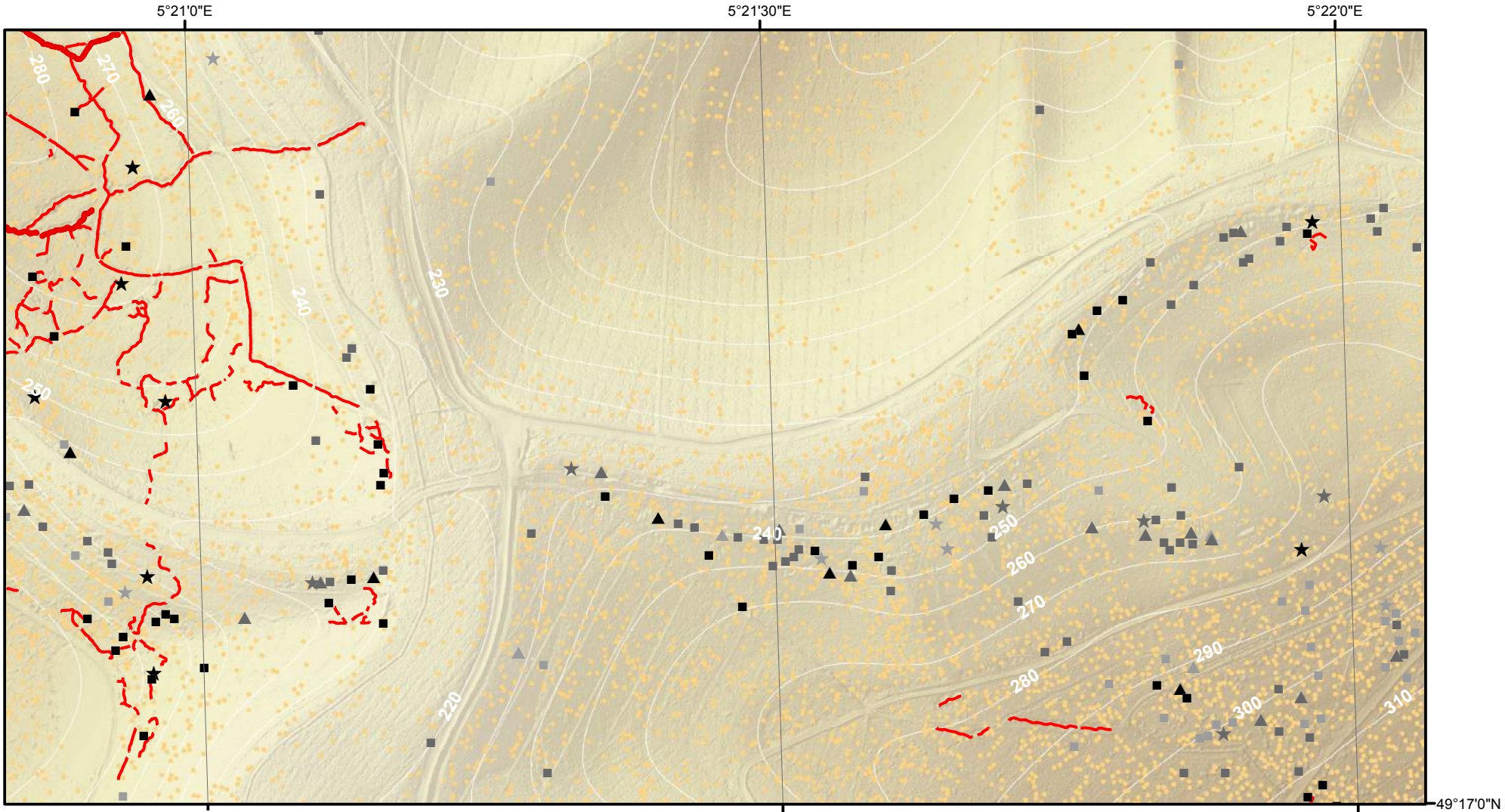
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **D1**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

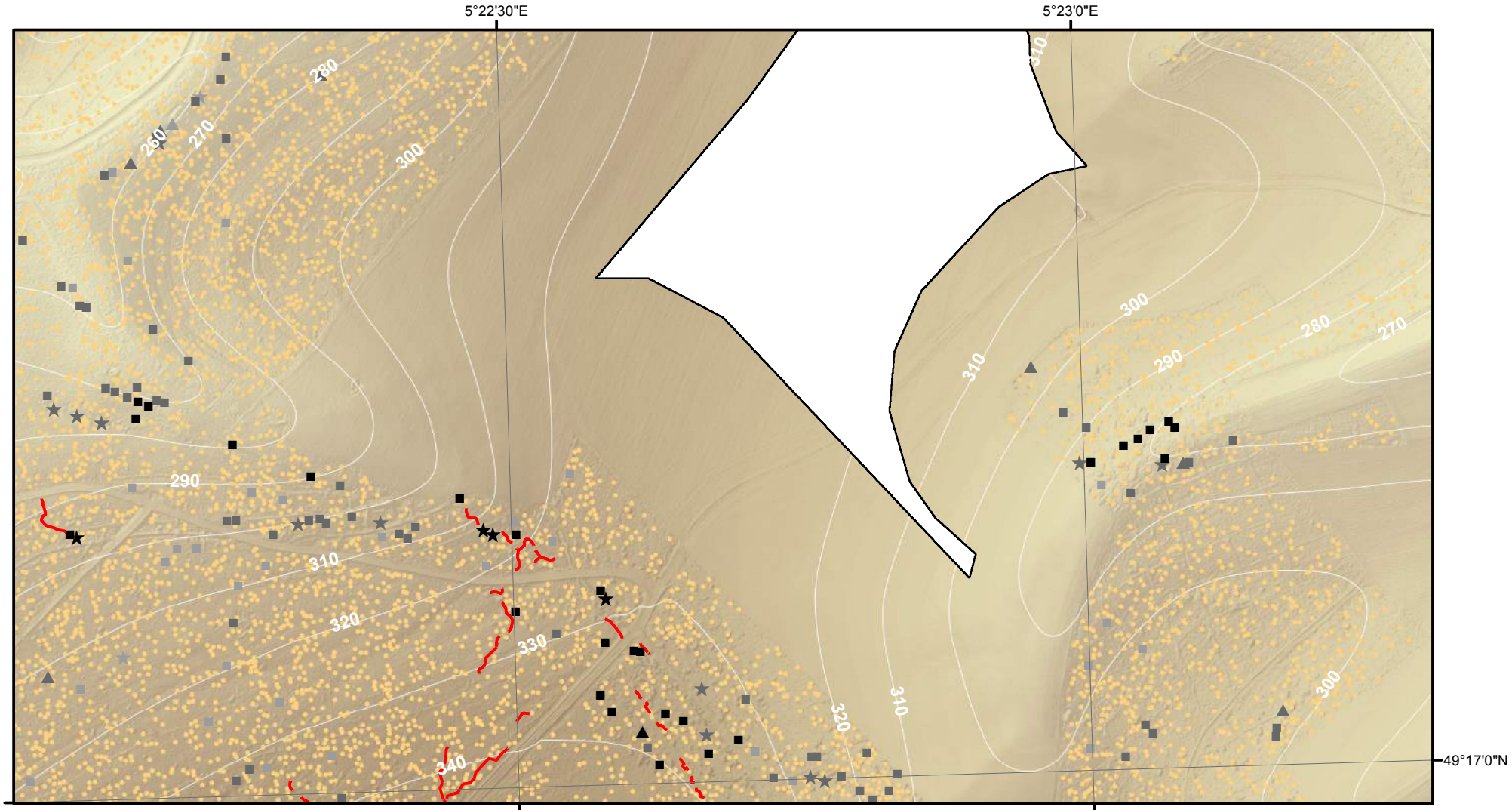
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **D2**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

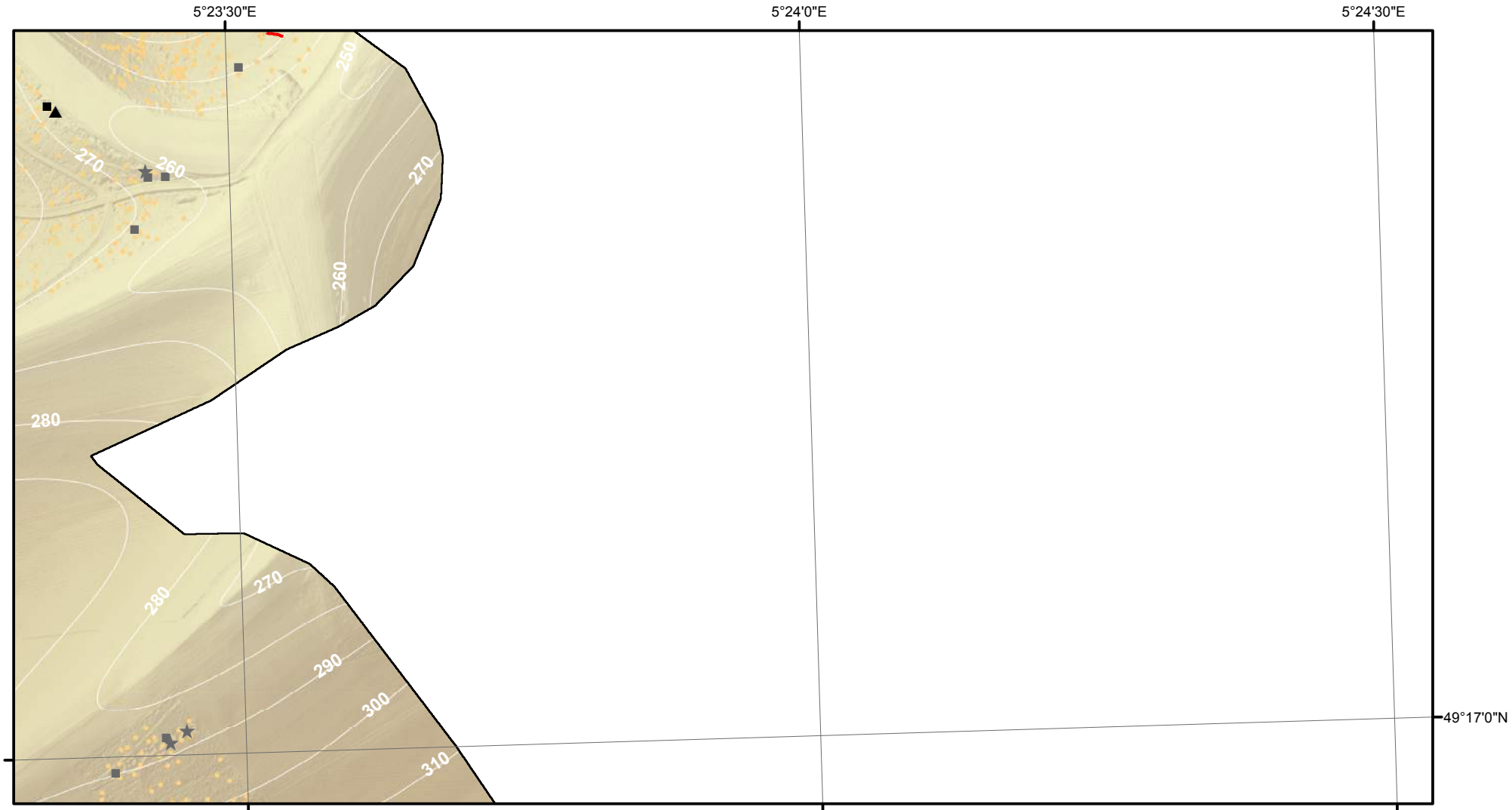
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

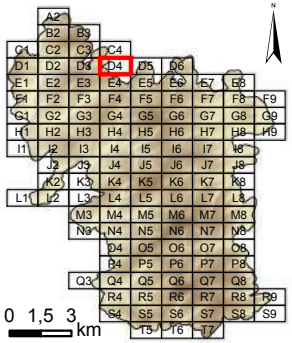
Dalle : **D3**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

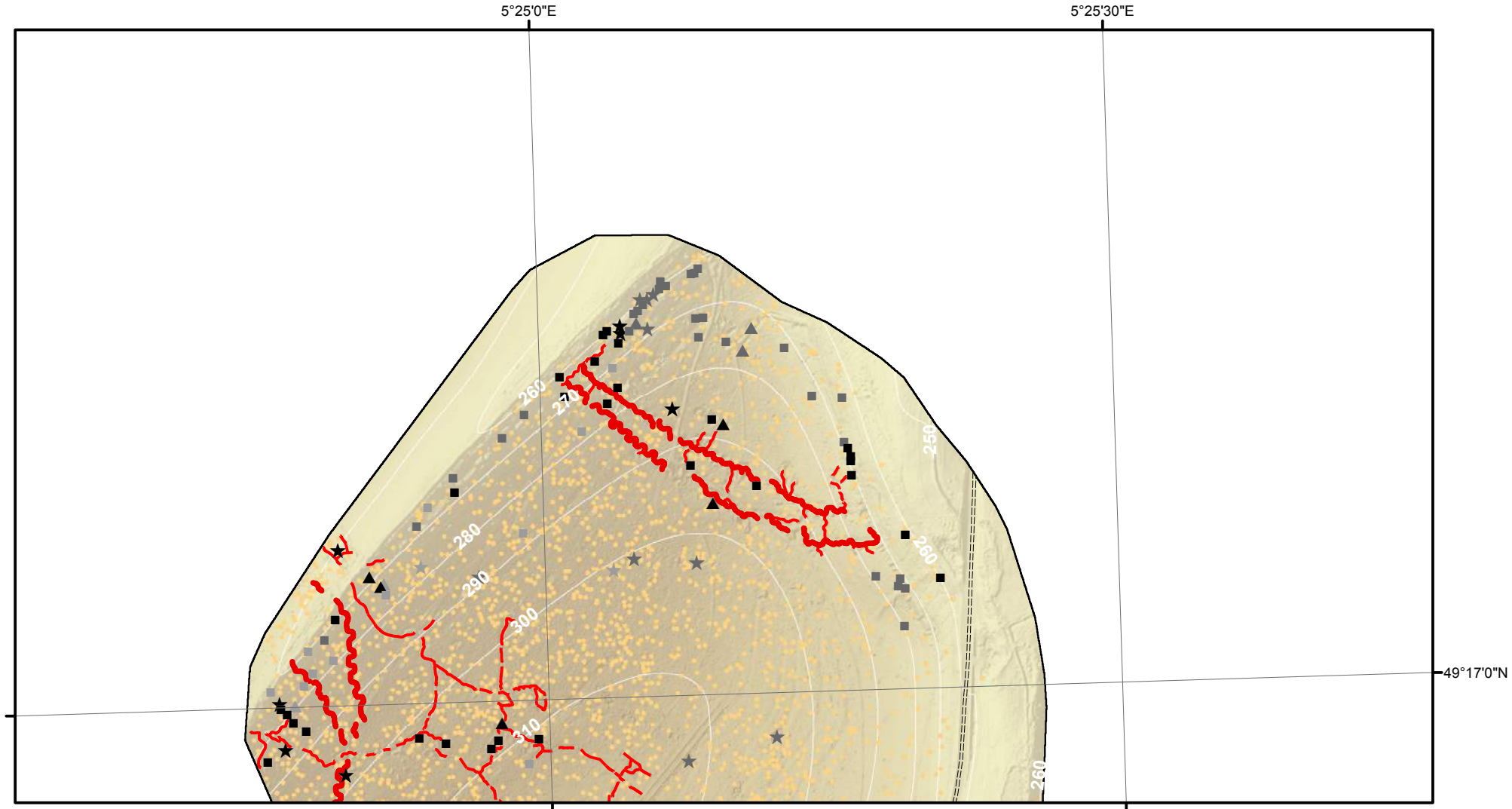
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **D4**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

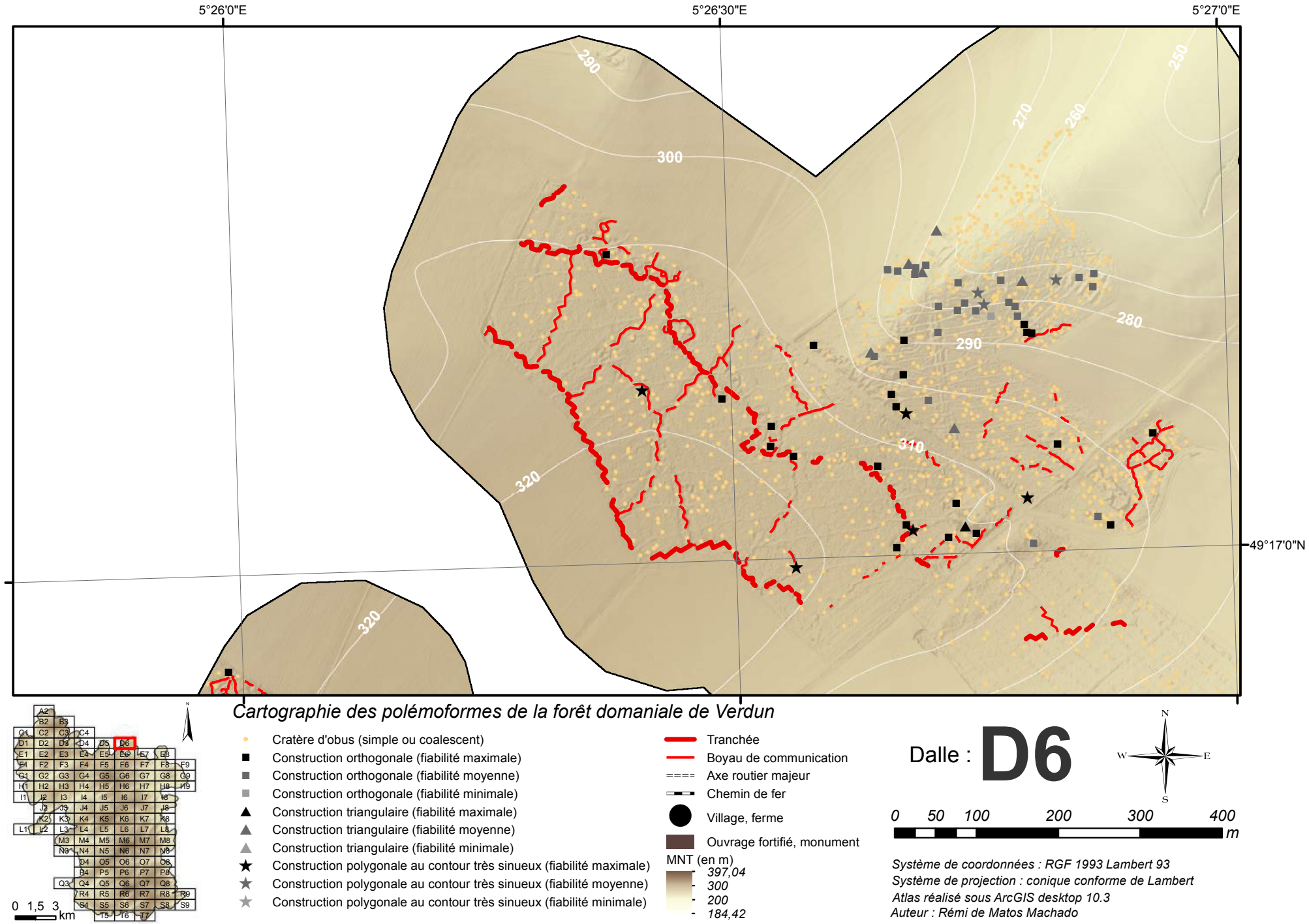
MNT (en m)
- 397,04
- 300
- 200
- 184,42

Dalle : **D5**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

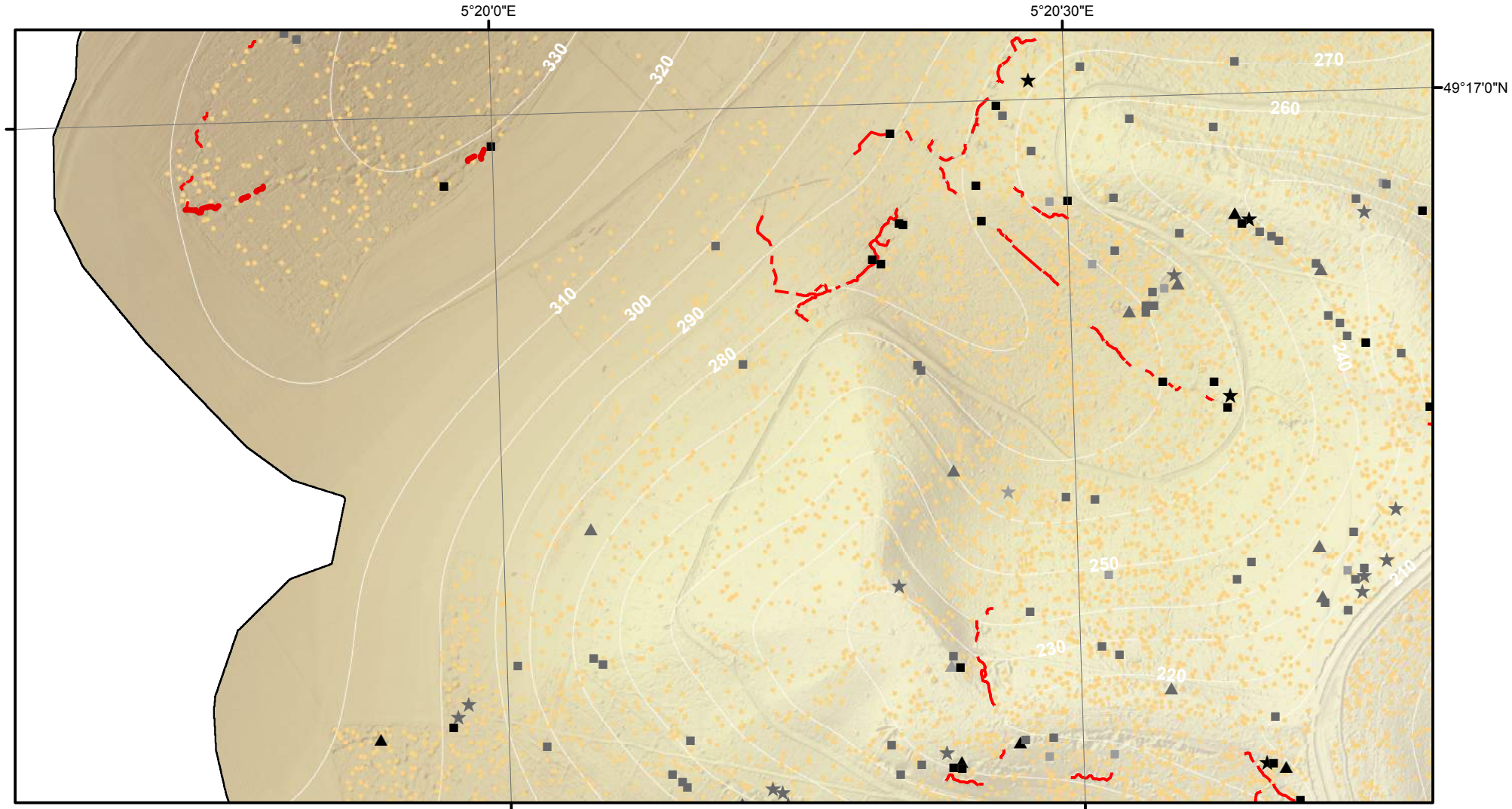
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **D6**

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

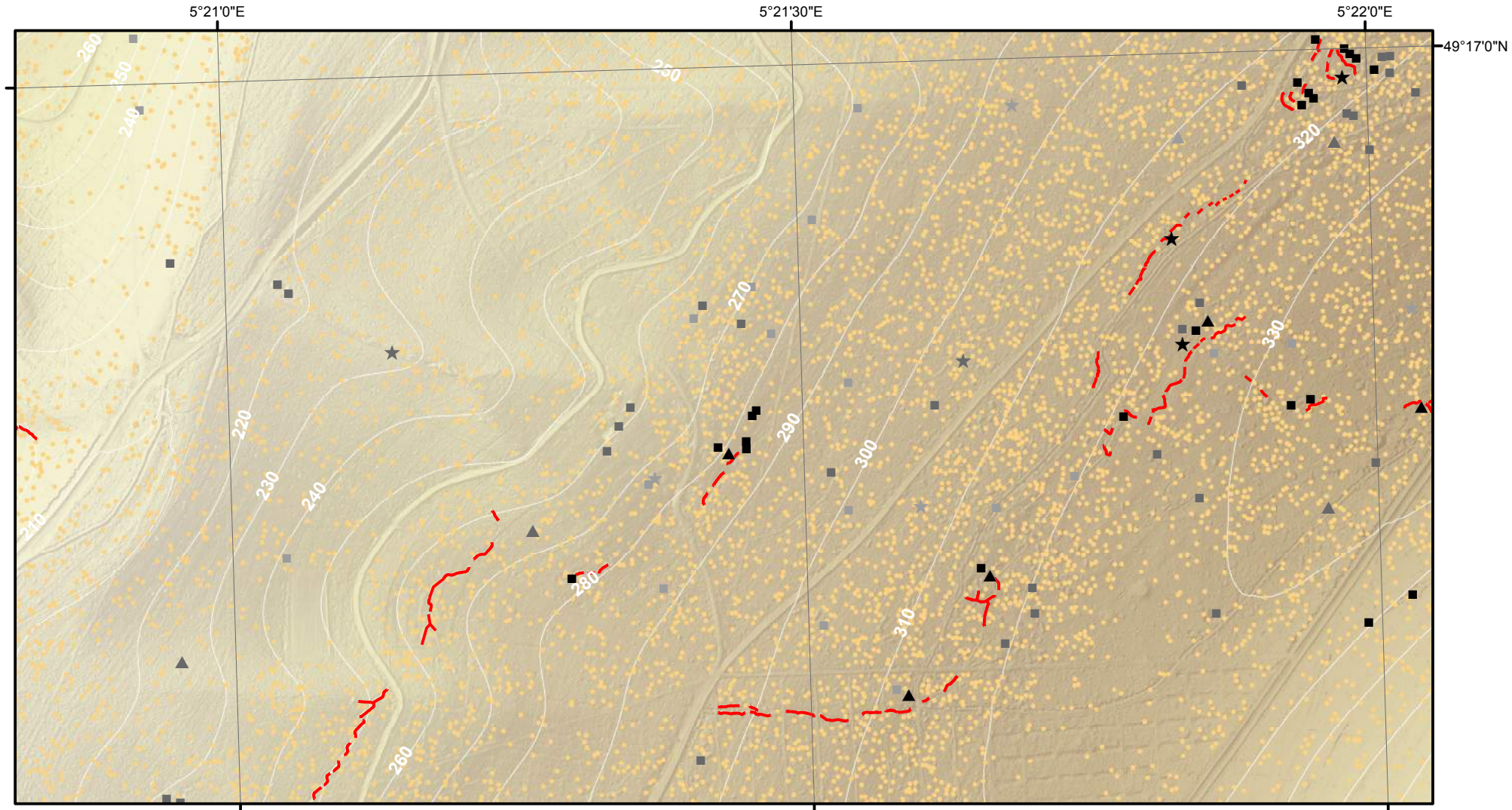
Dalle : **E1**

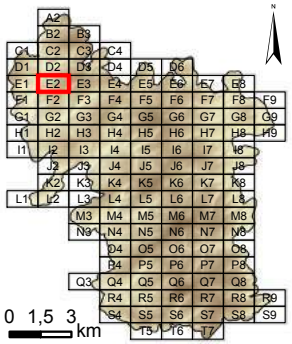
N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

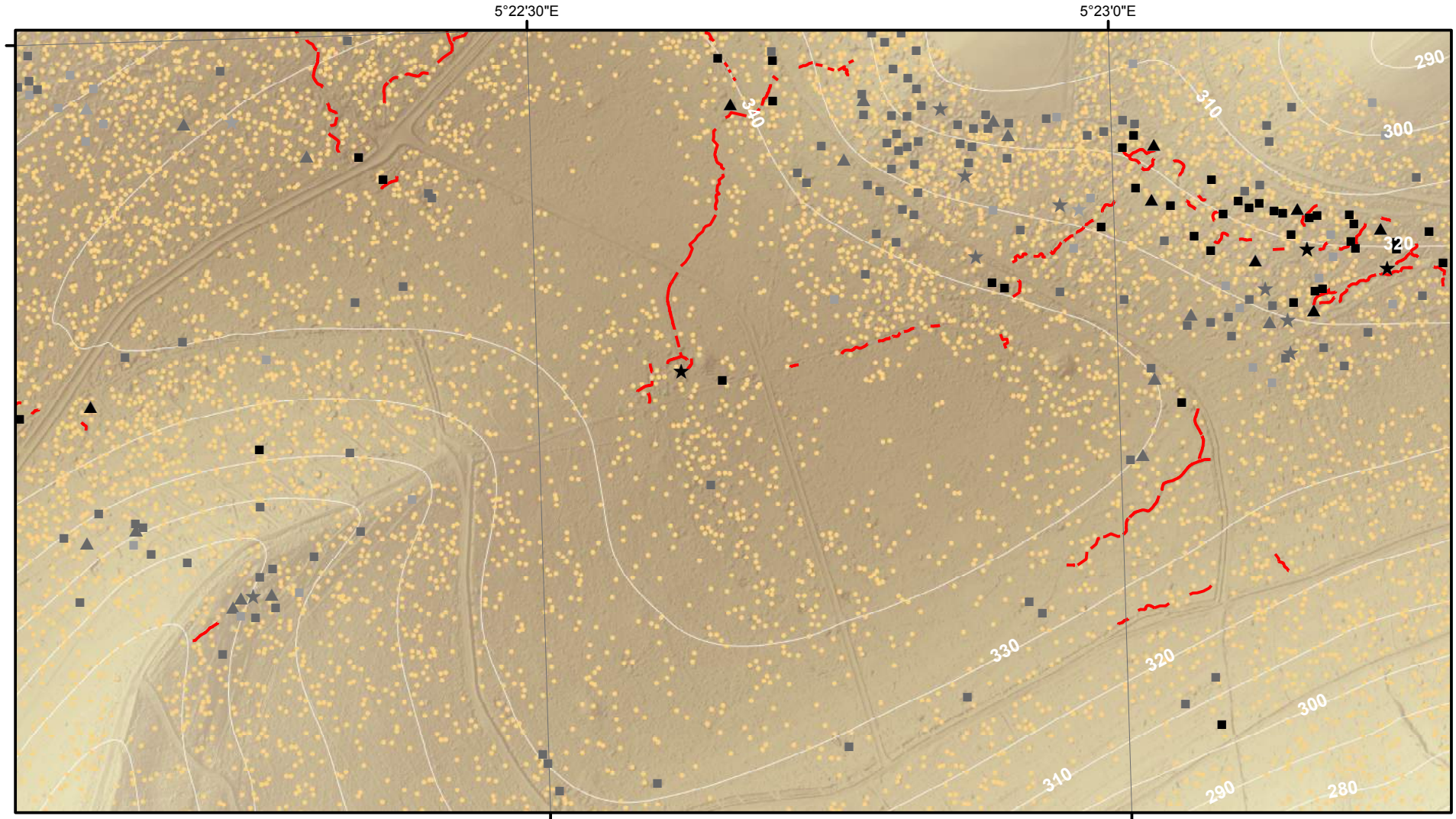
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **E2**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

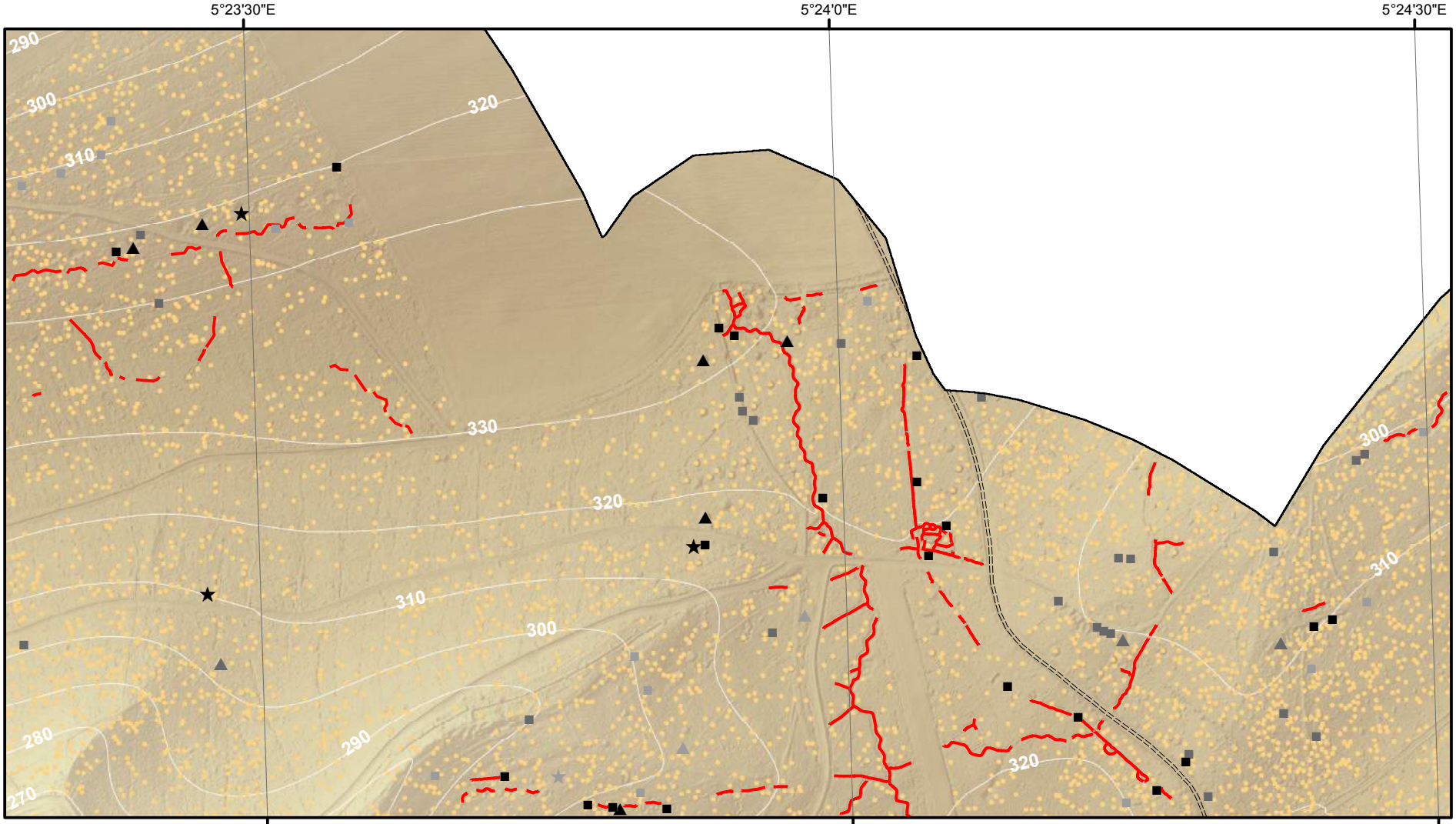
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

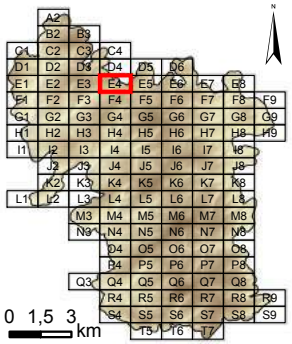
Dalle : **E3**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

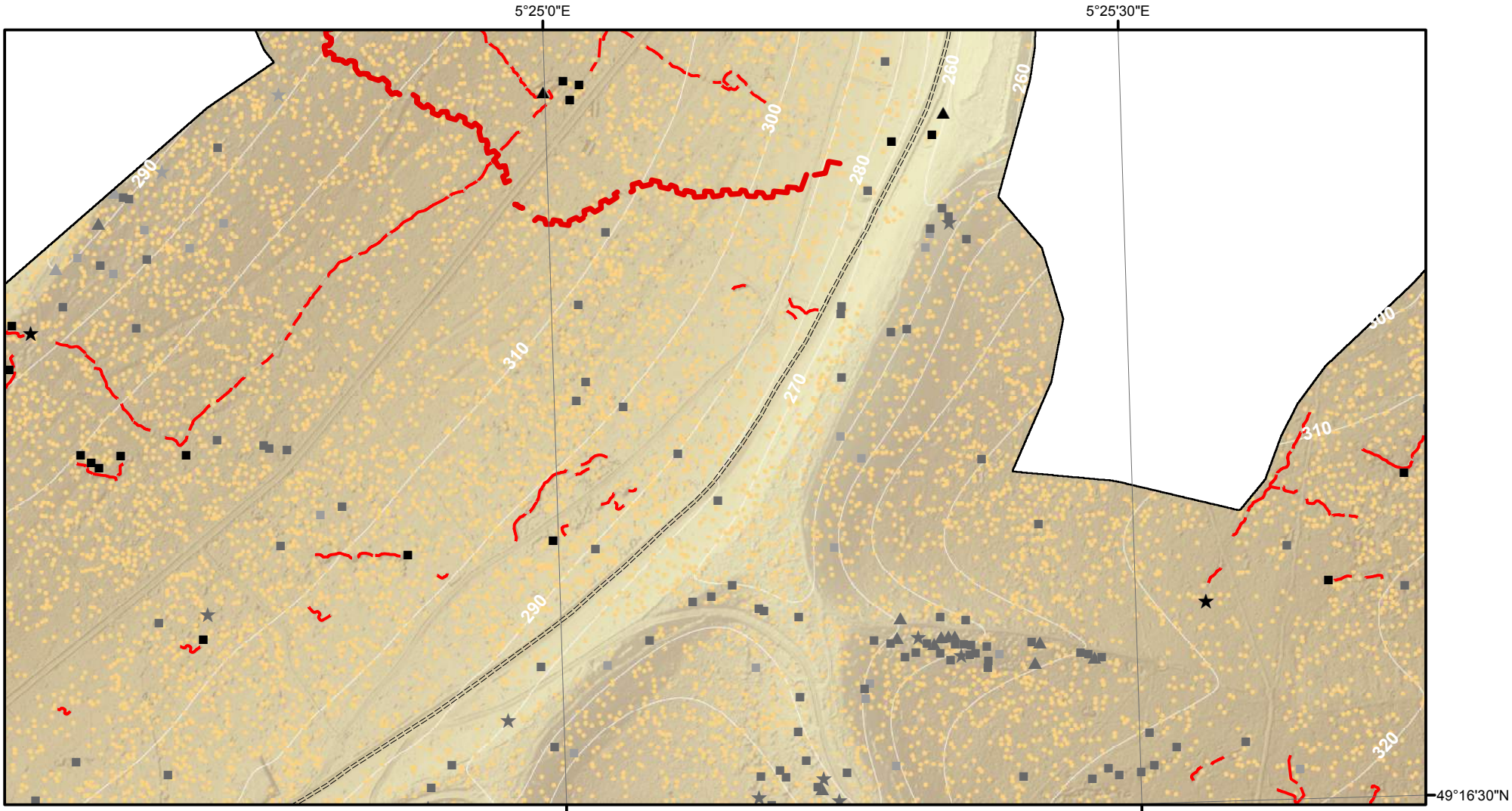
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **E4**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

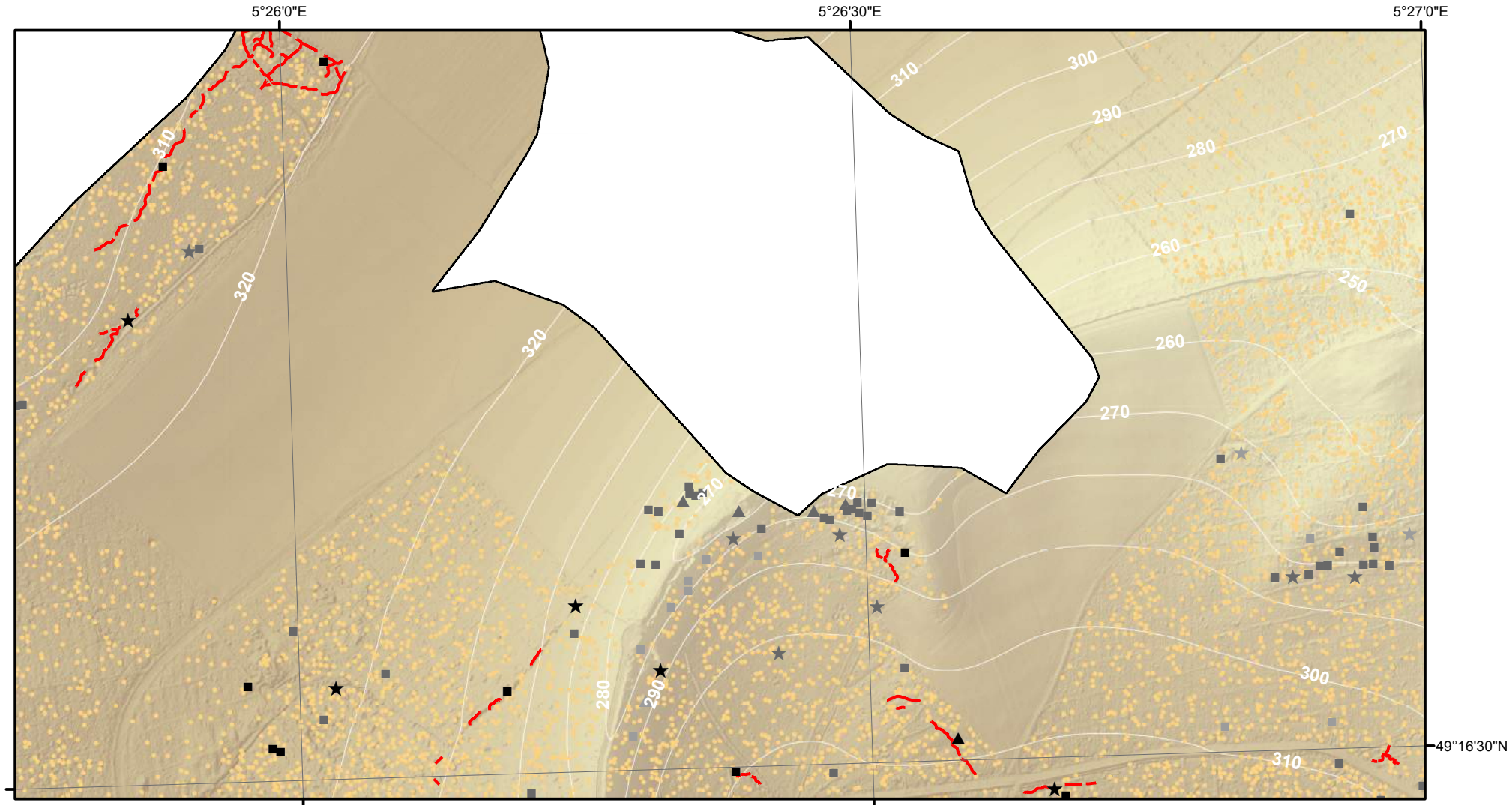
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **E5**

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

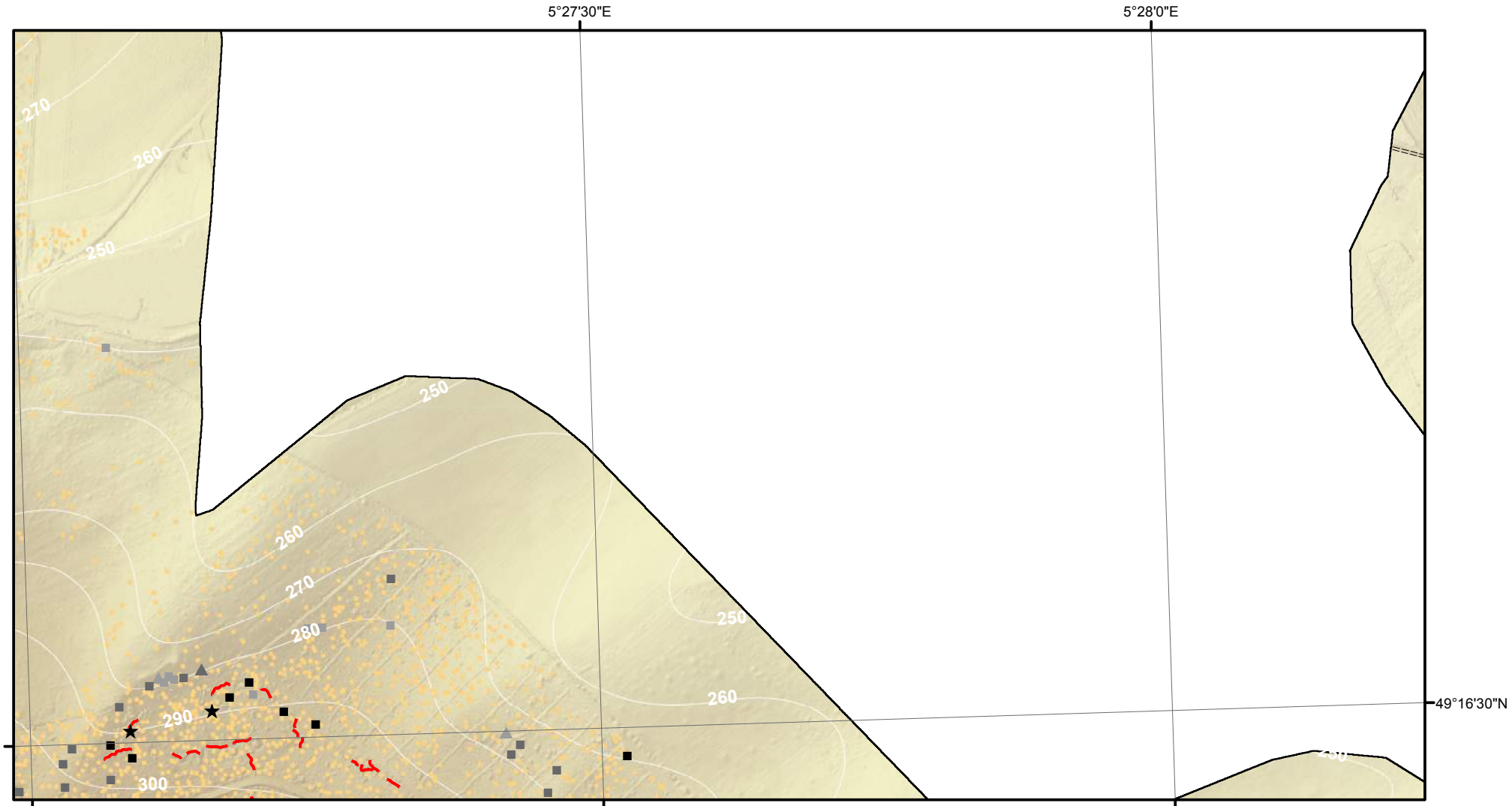
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

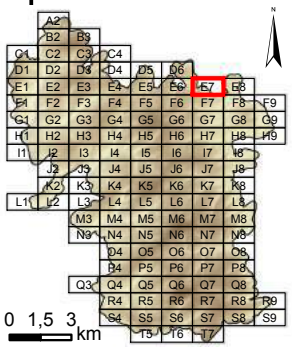
Dalle : **E6**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

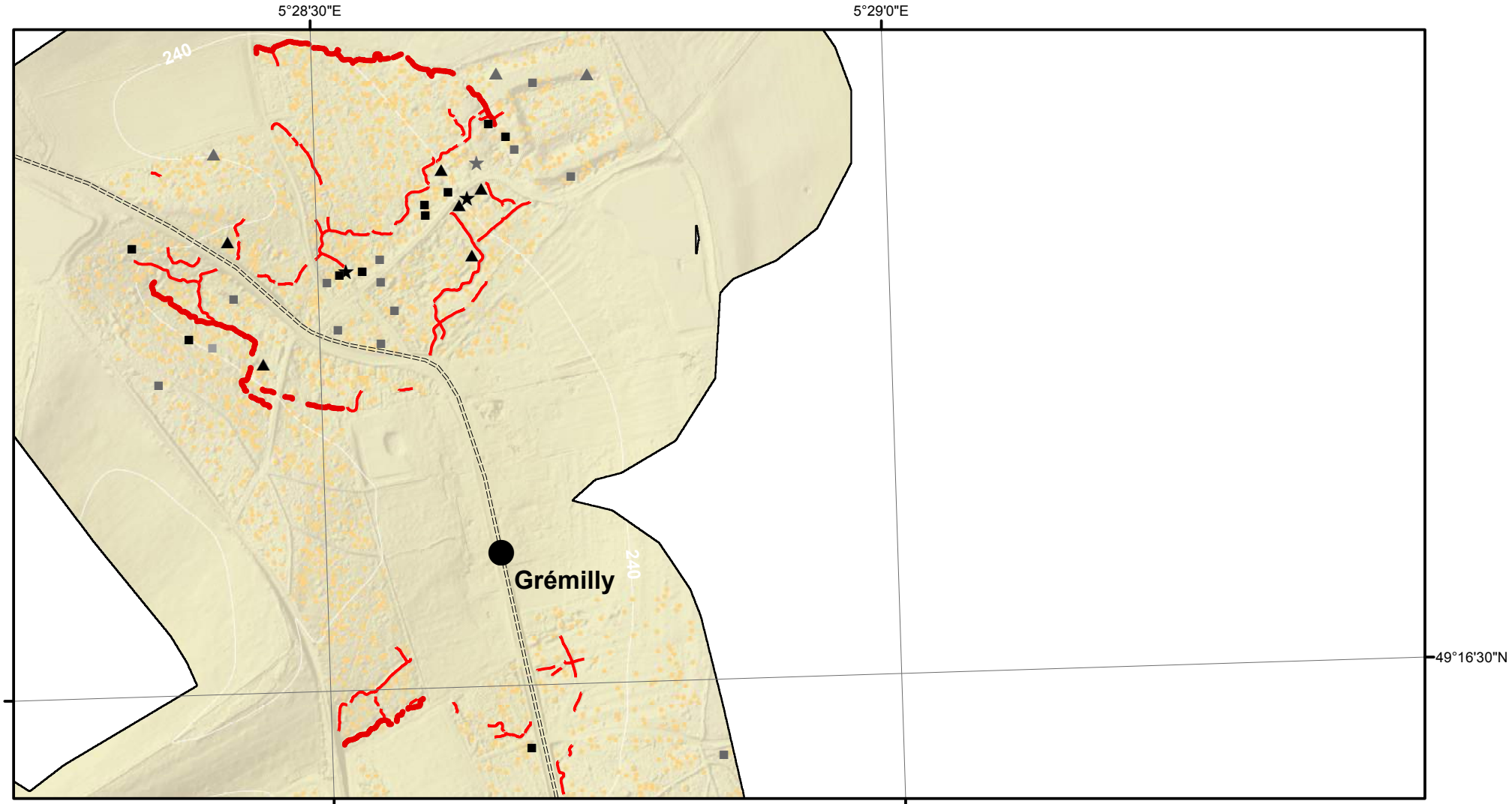
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **E7**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

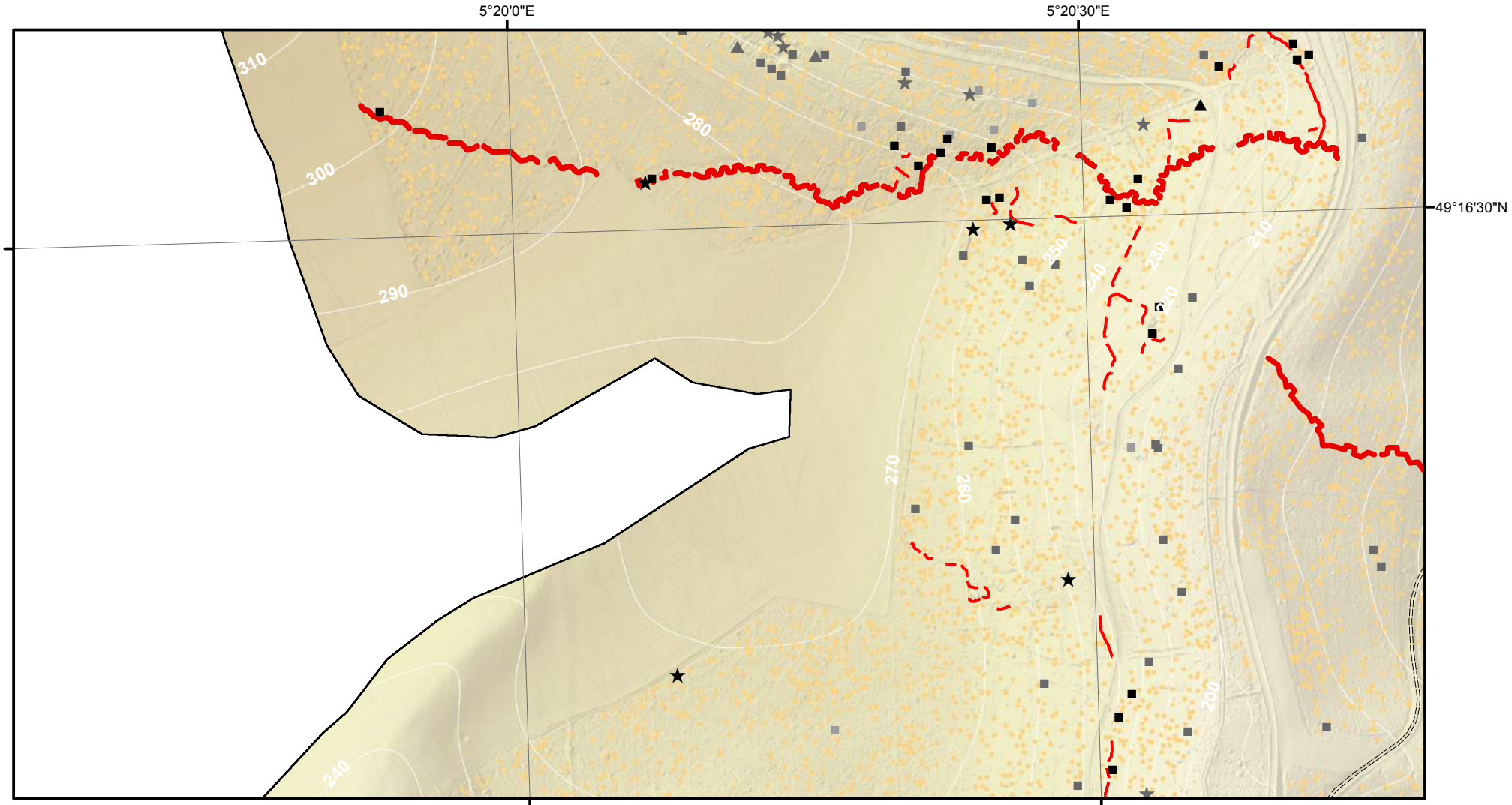
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

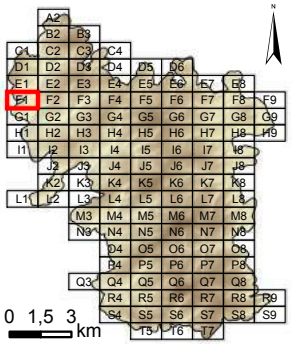
Dalle : **E8**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

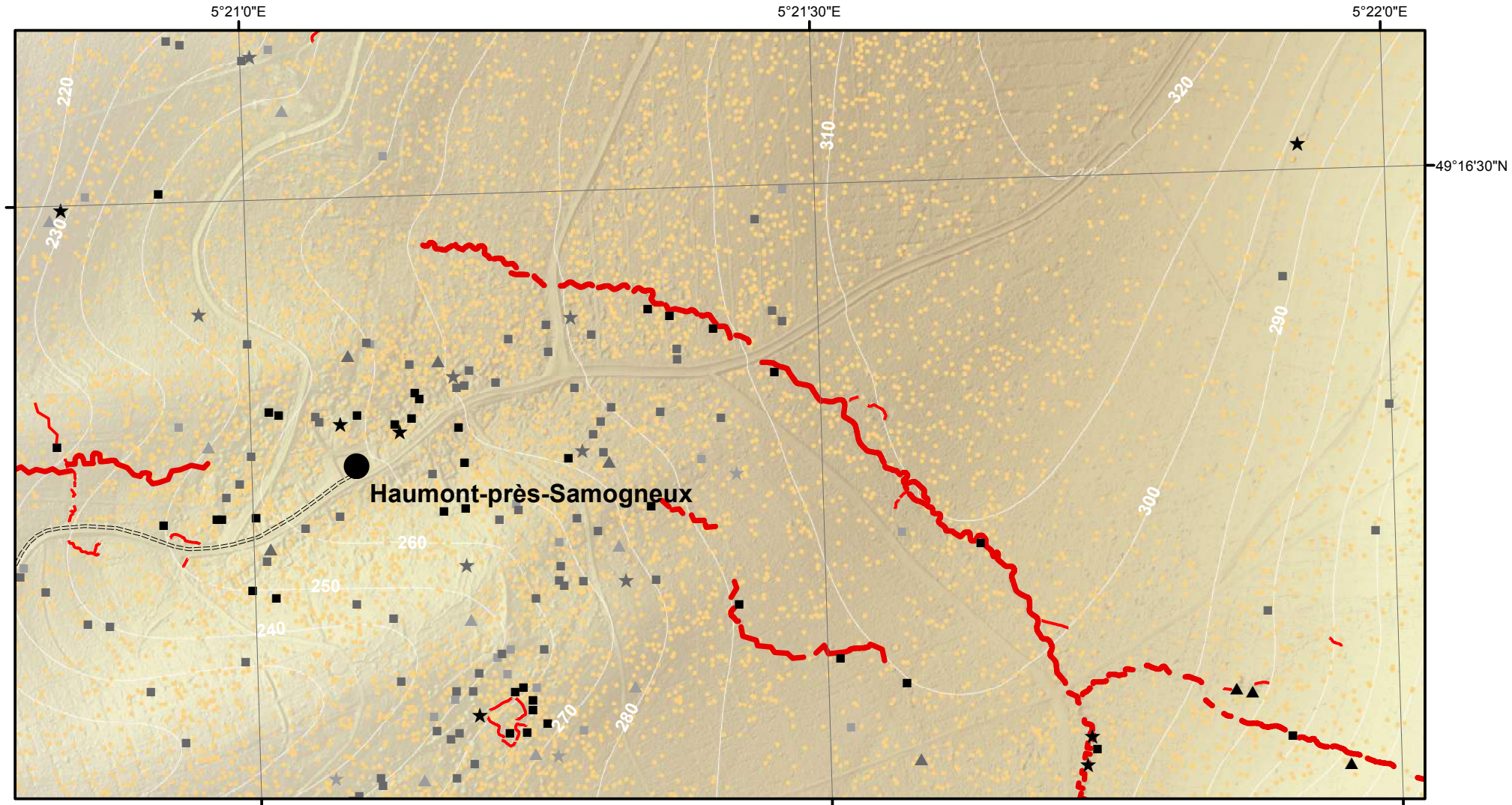
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **F1**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

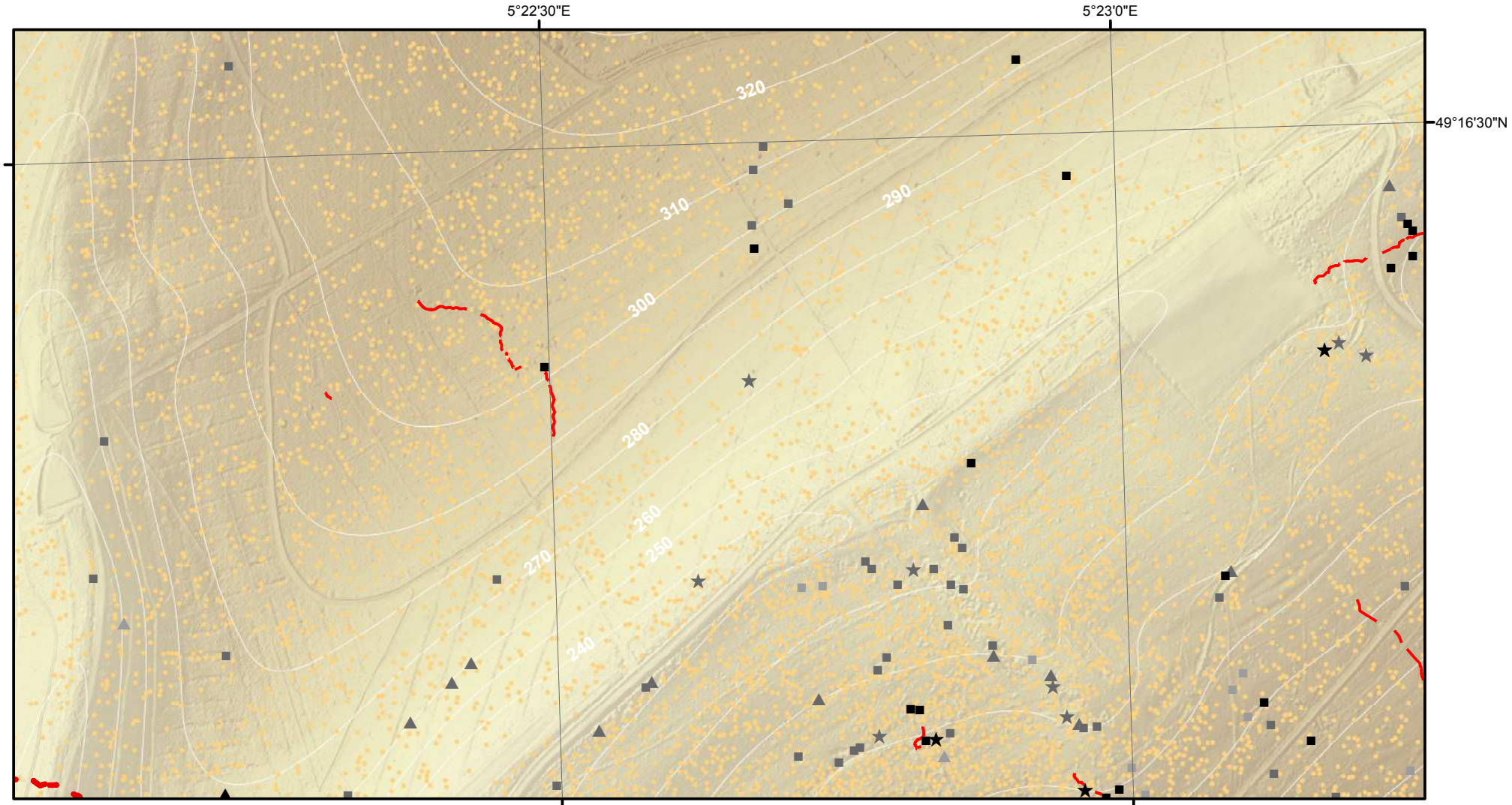
Dalle : **F2**

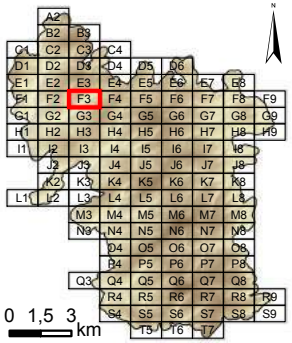
N
W E
S

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

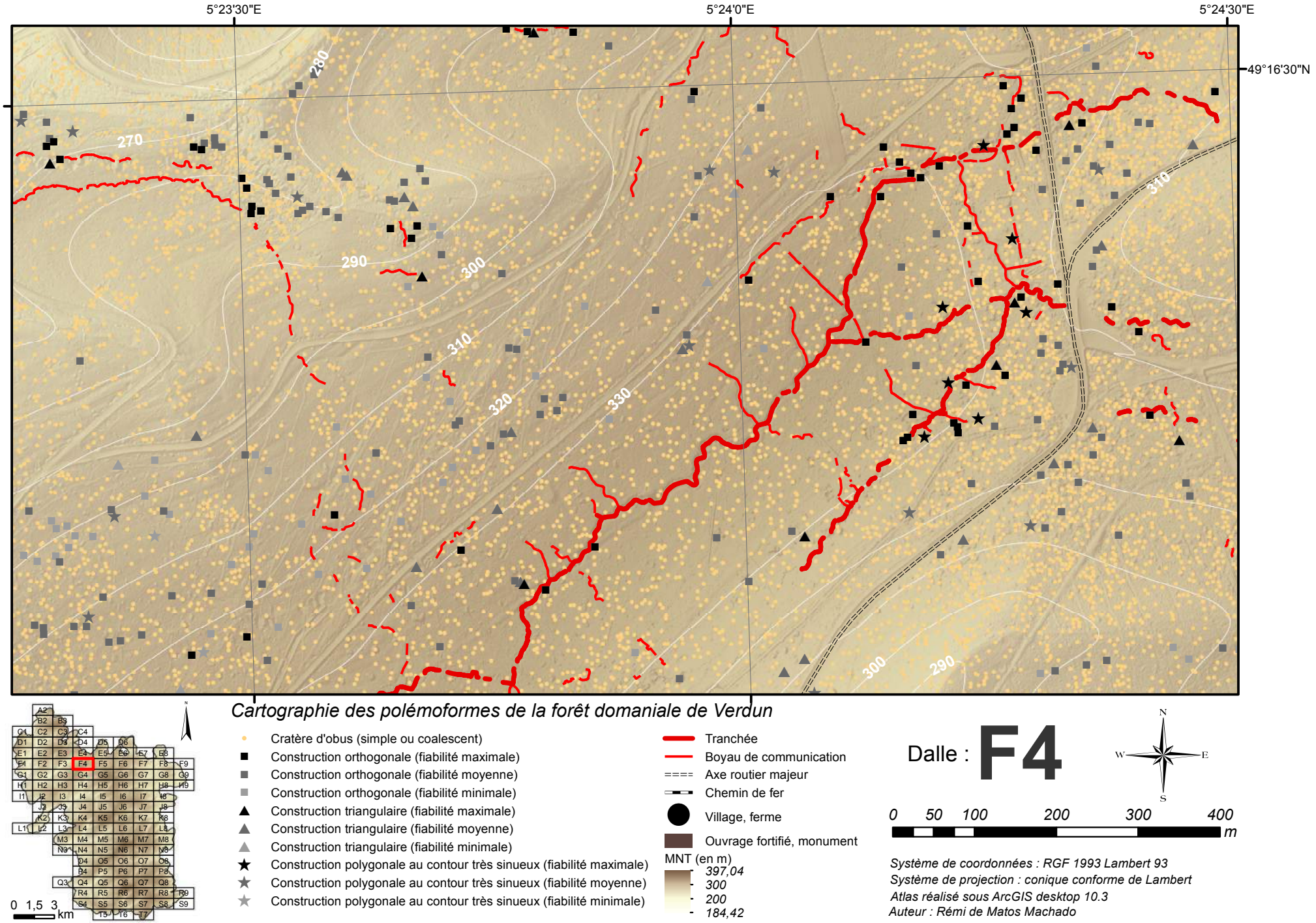
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **F3**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

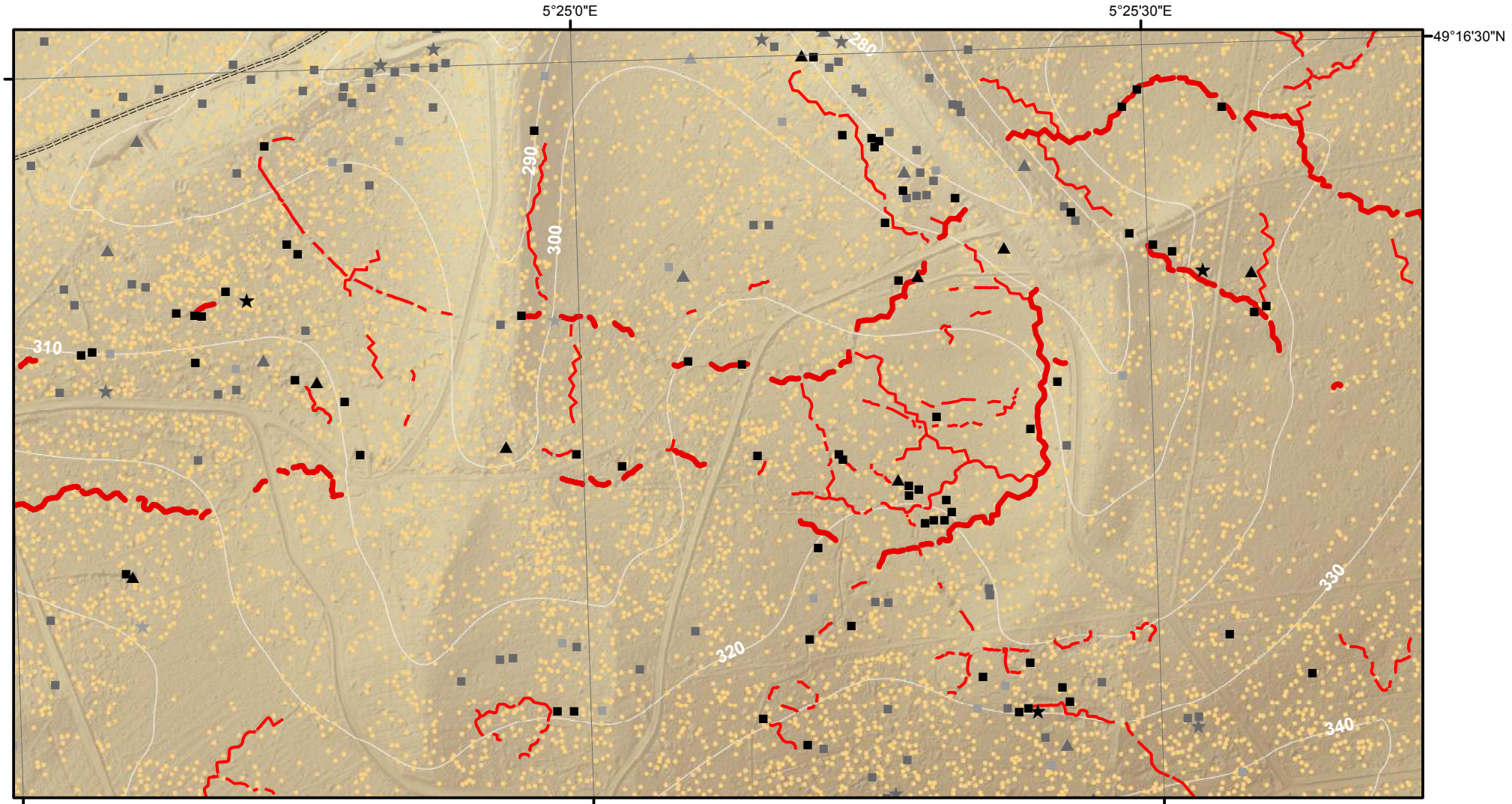
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

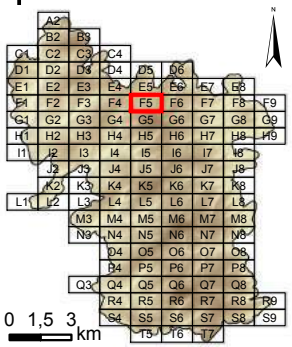
Dalle : **F4**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

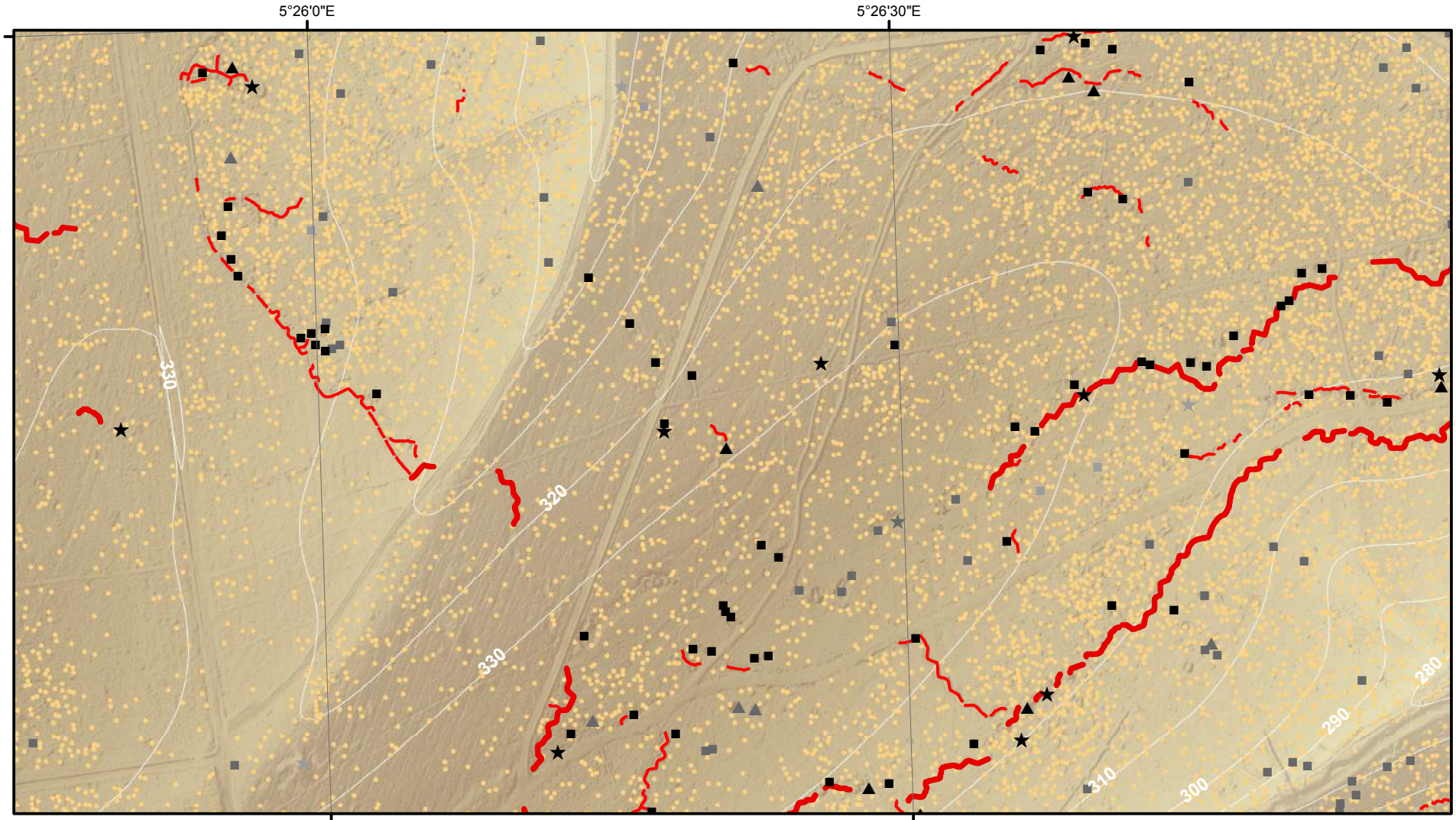
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **F5**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domanialle de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

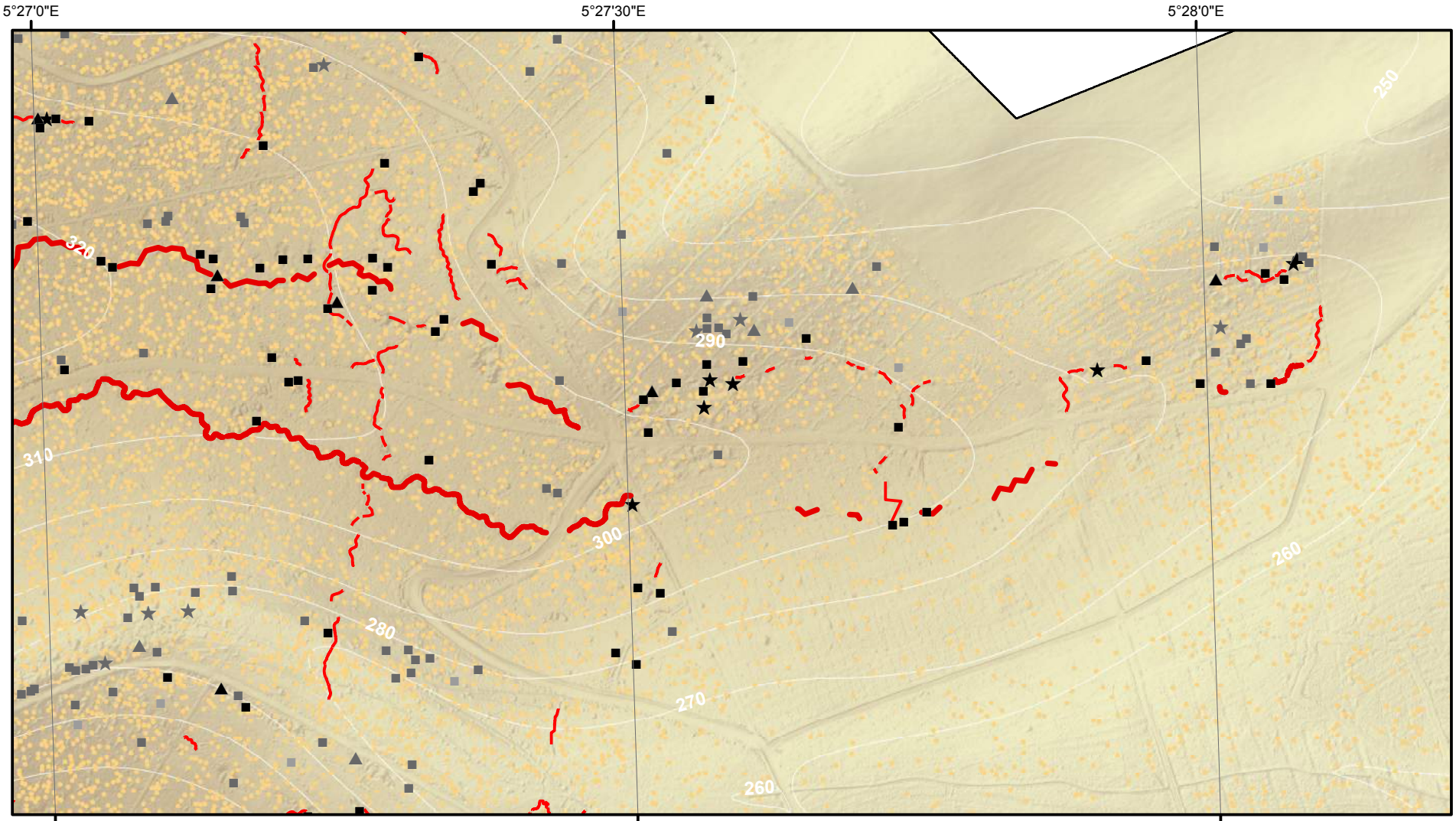
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

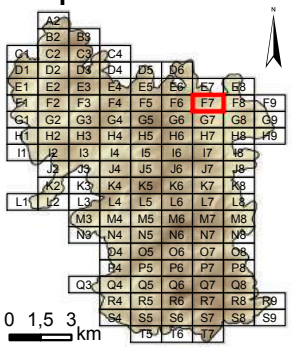
Dalle : **F6**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

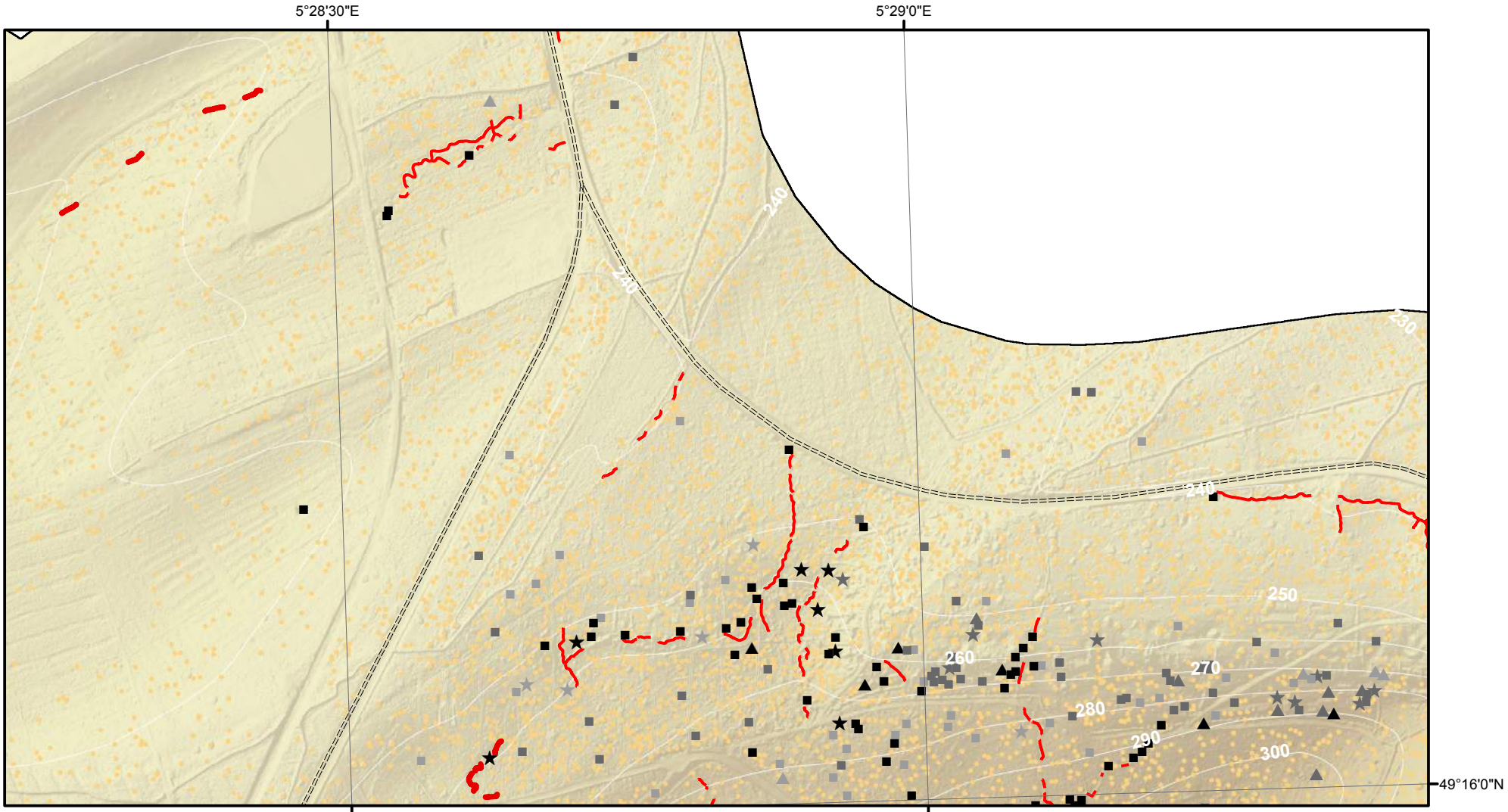
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

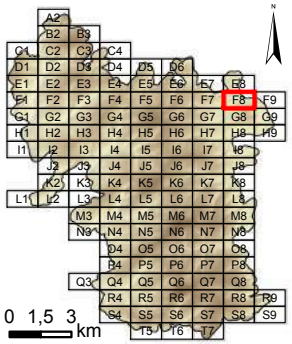
Dalle : **F7**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

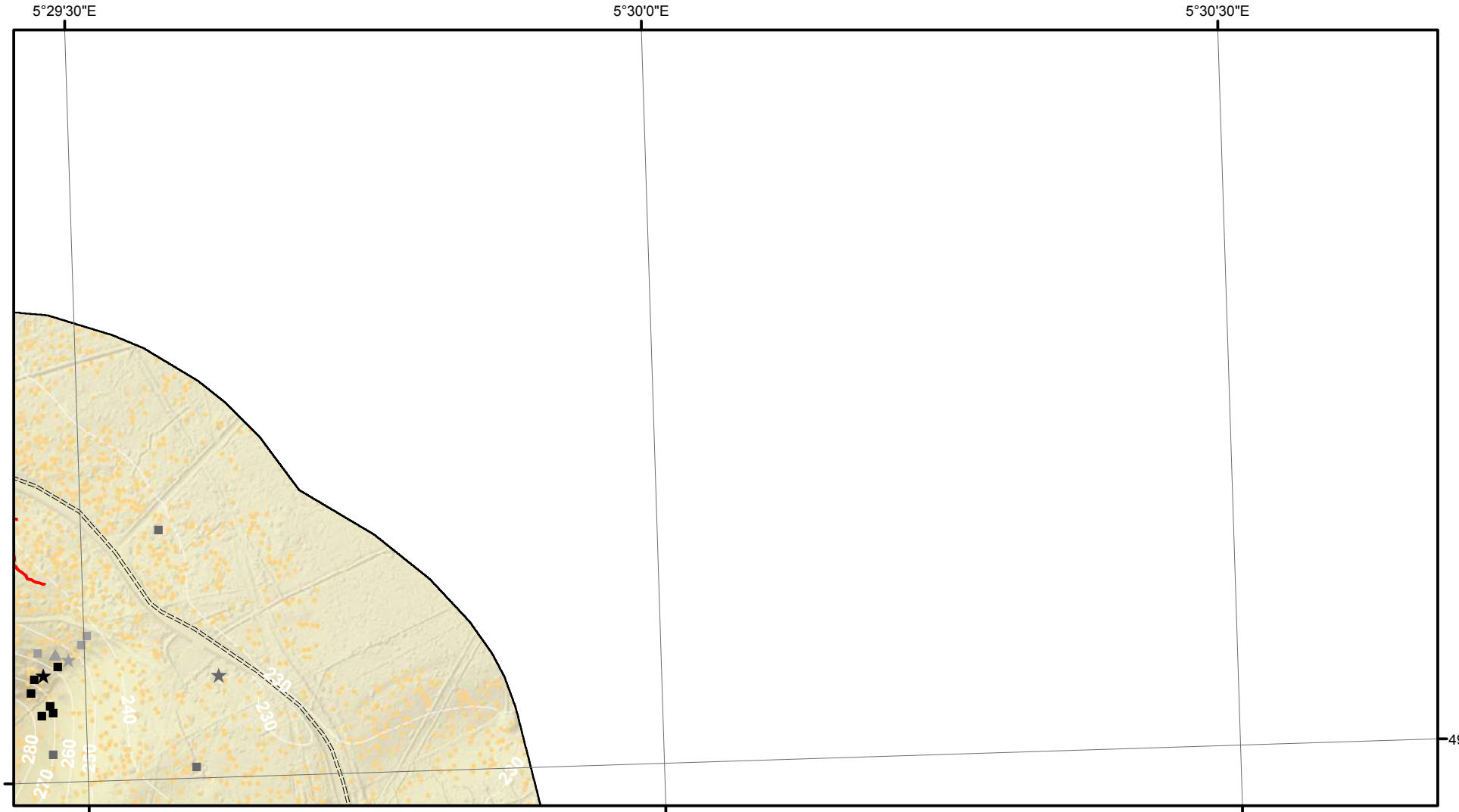
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

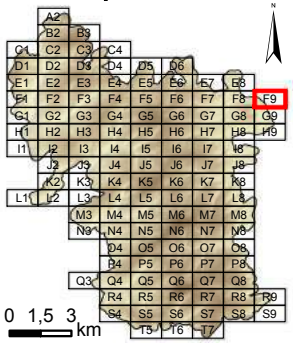
Dalle : **F8**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

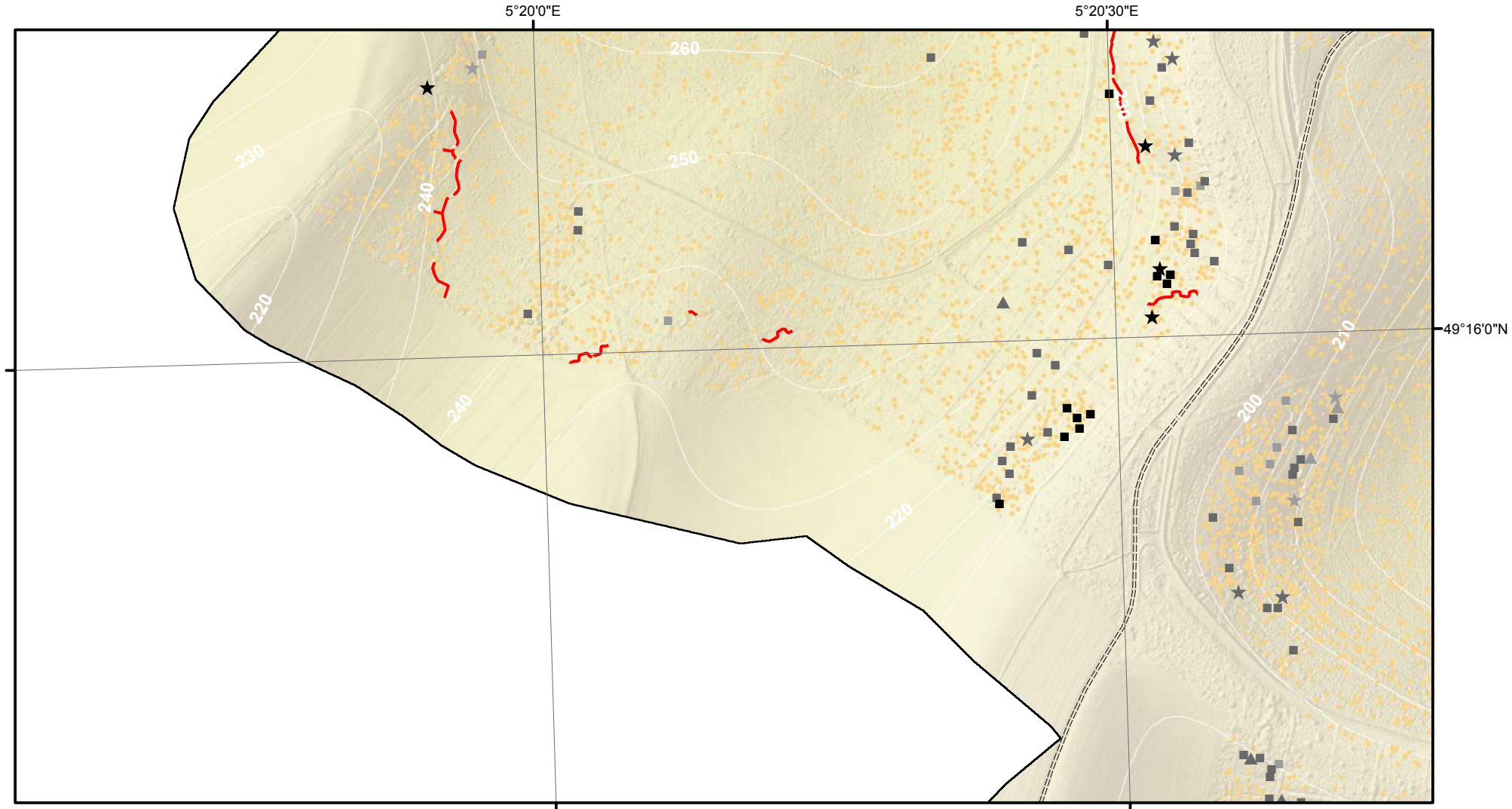
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

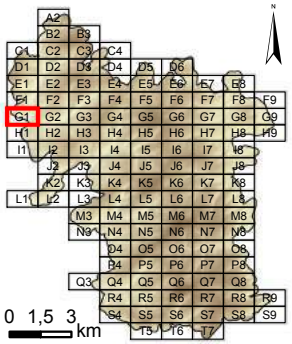
Dalle : **F9**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

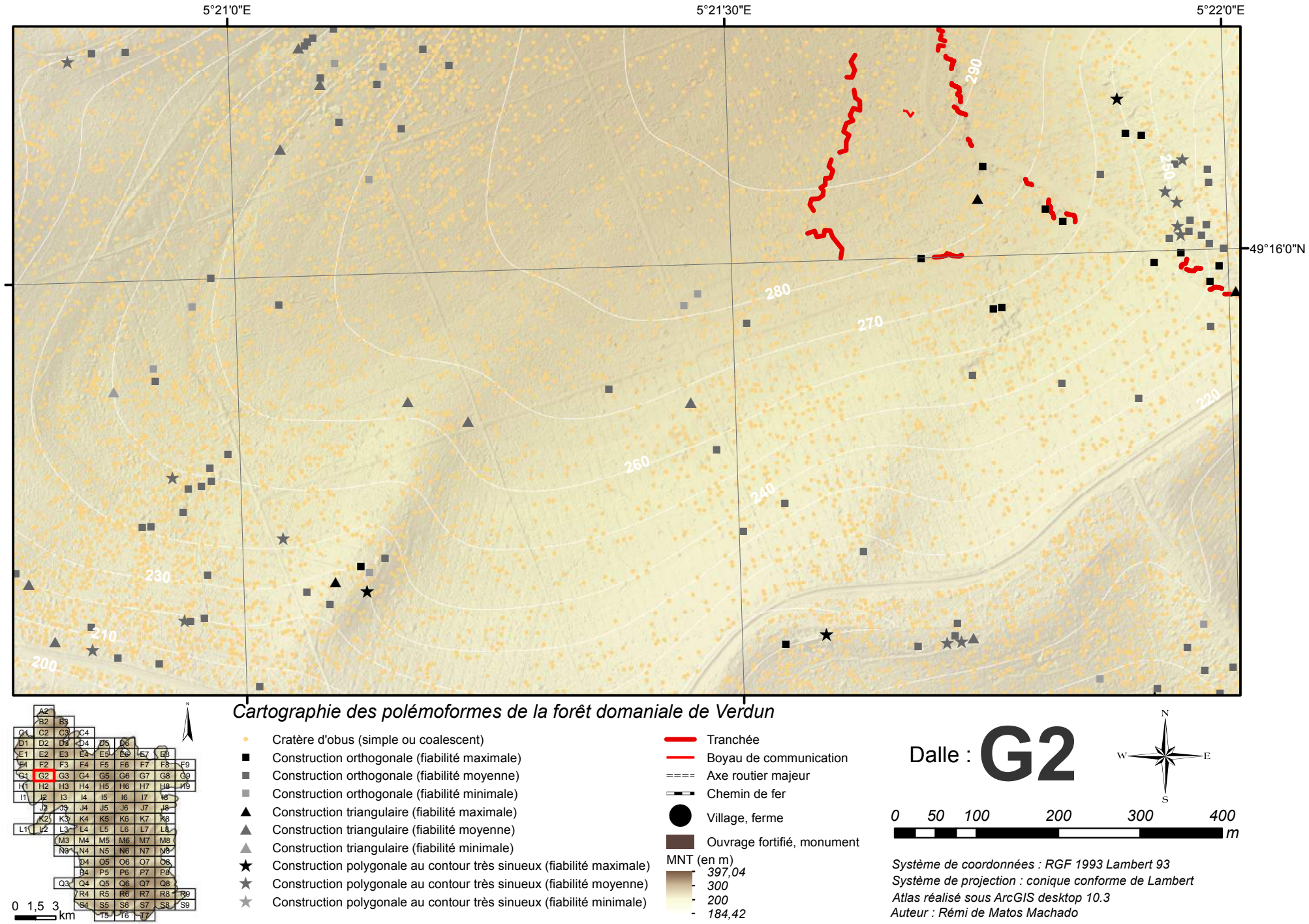
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **G1**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

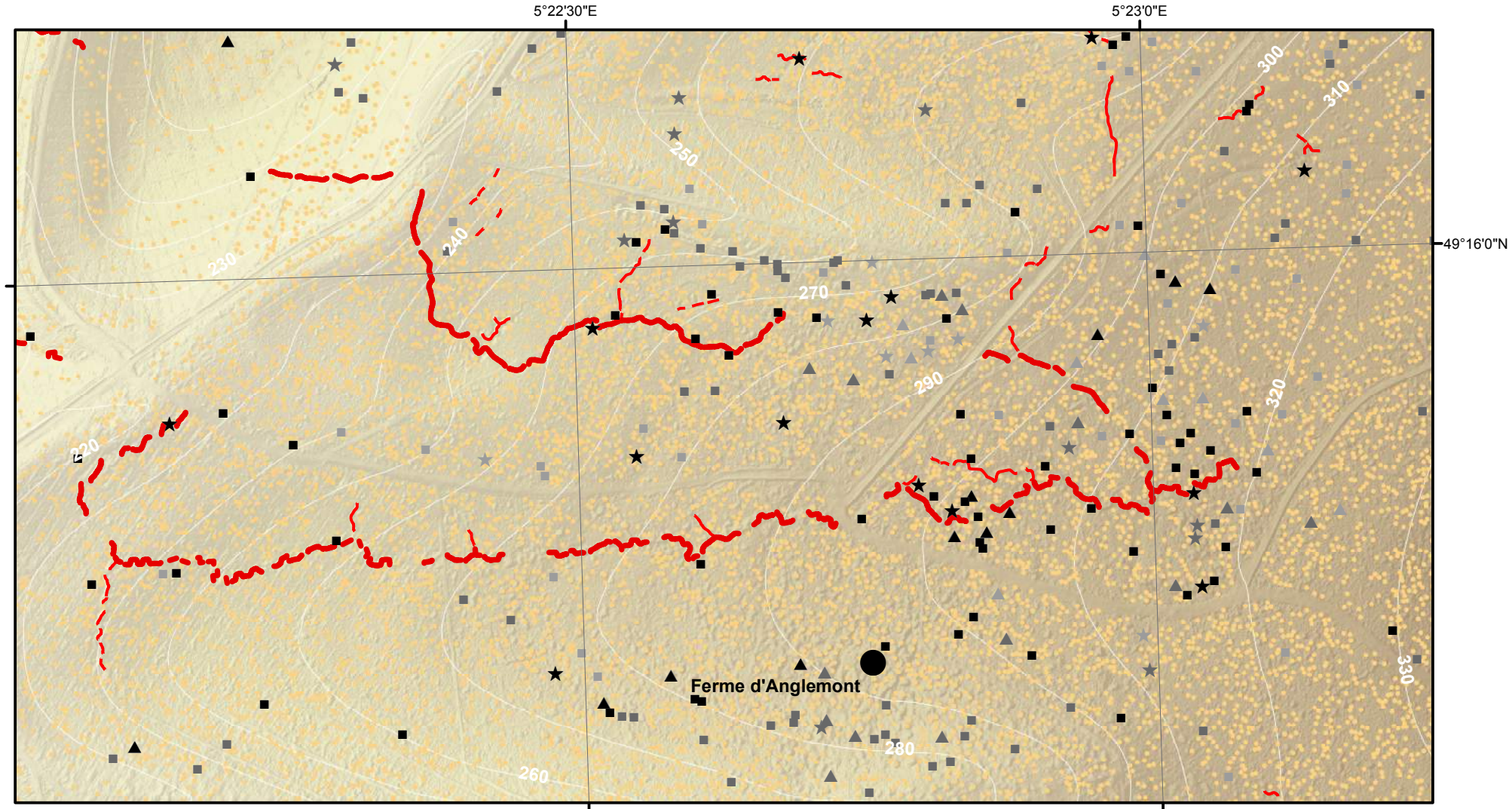
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

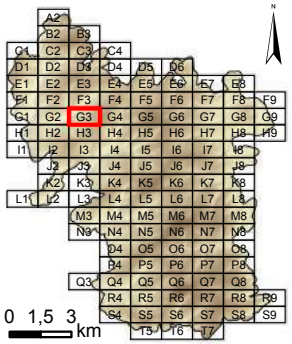
Dalle : **G2**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

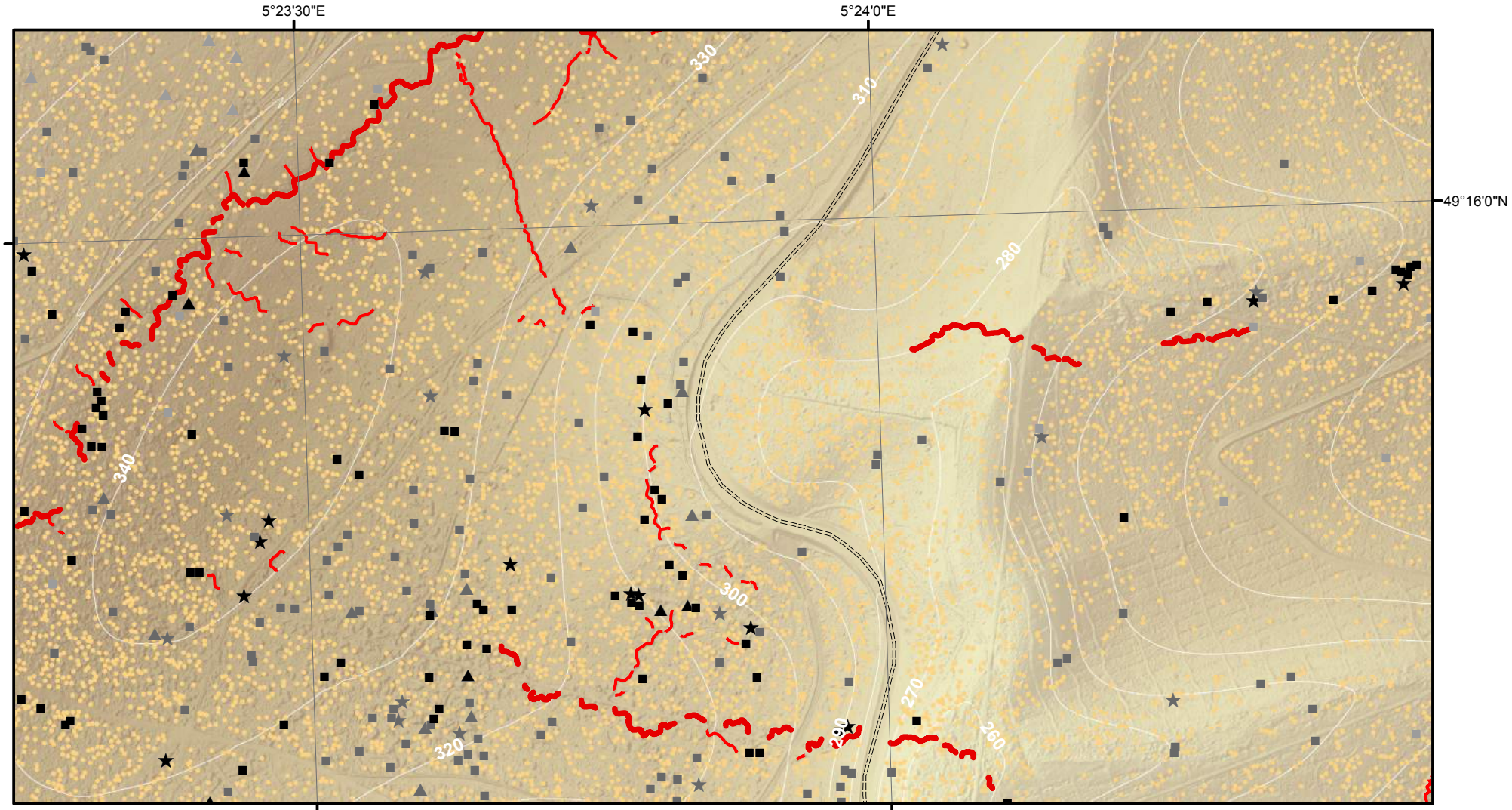
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **G3**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

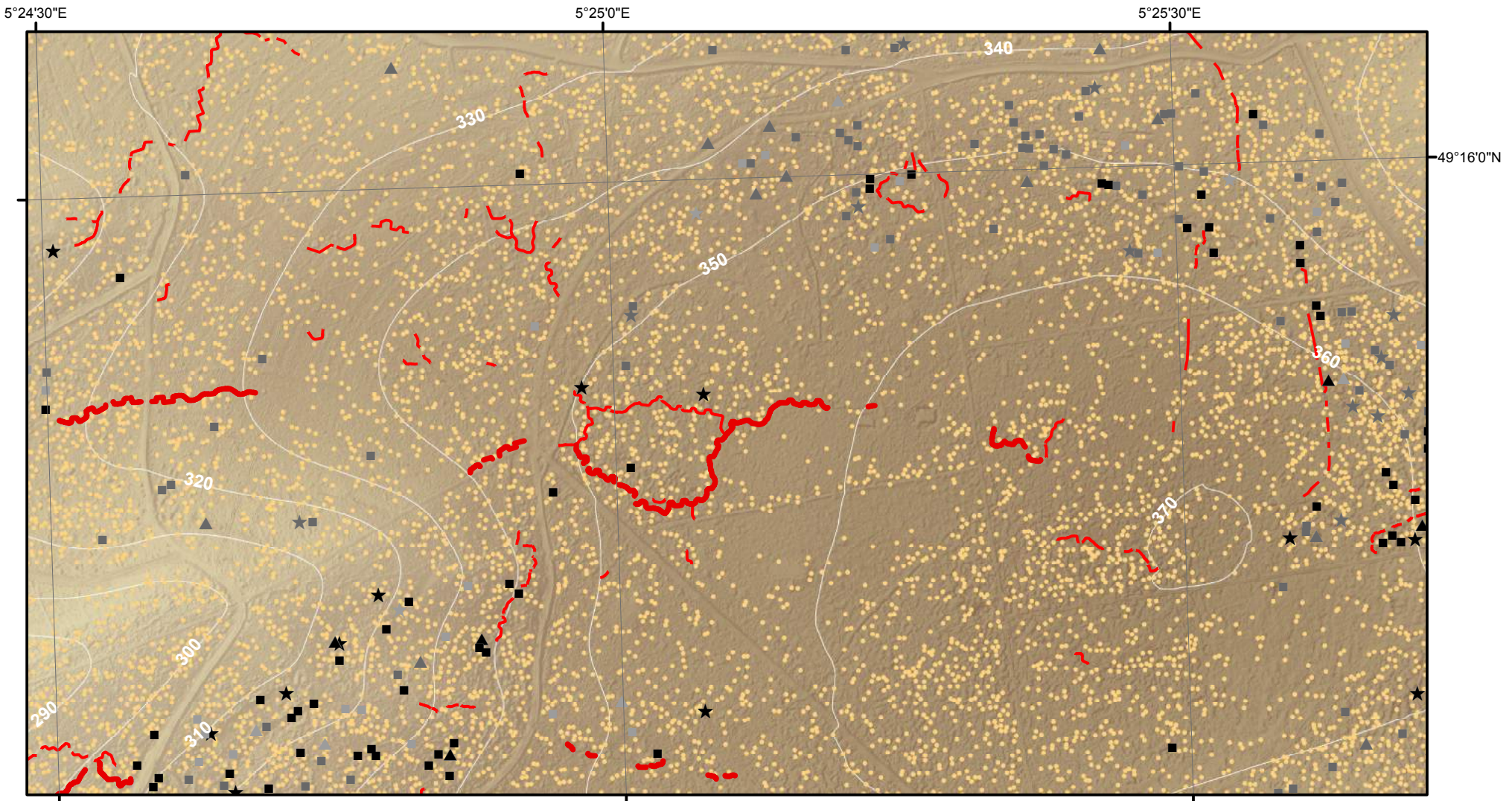
Dalle : **G4**

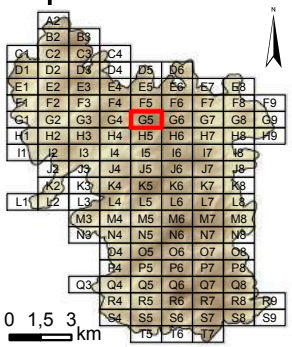
N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

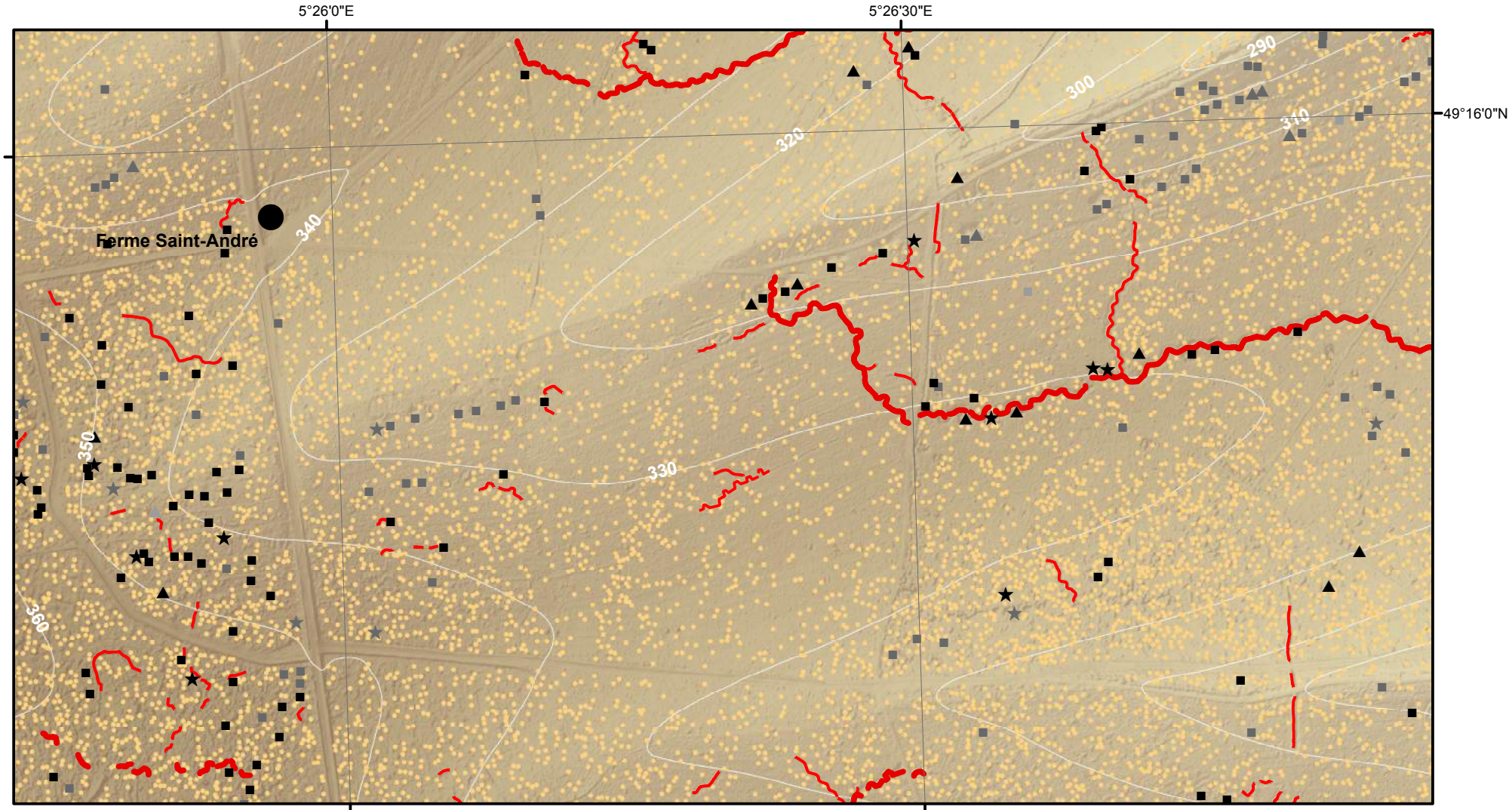
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **G5**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

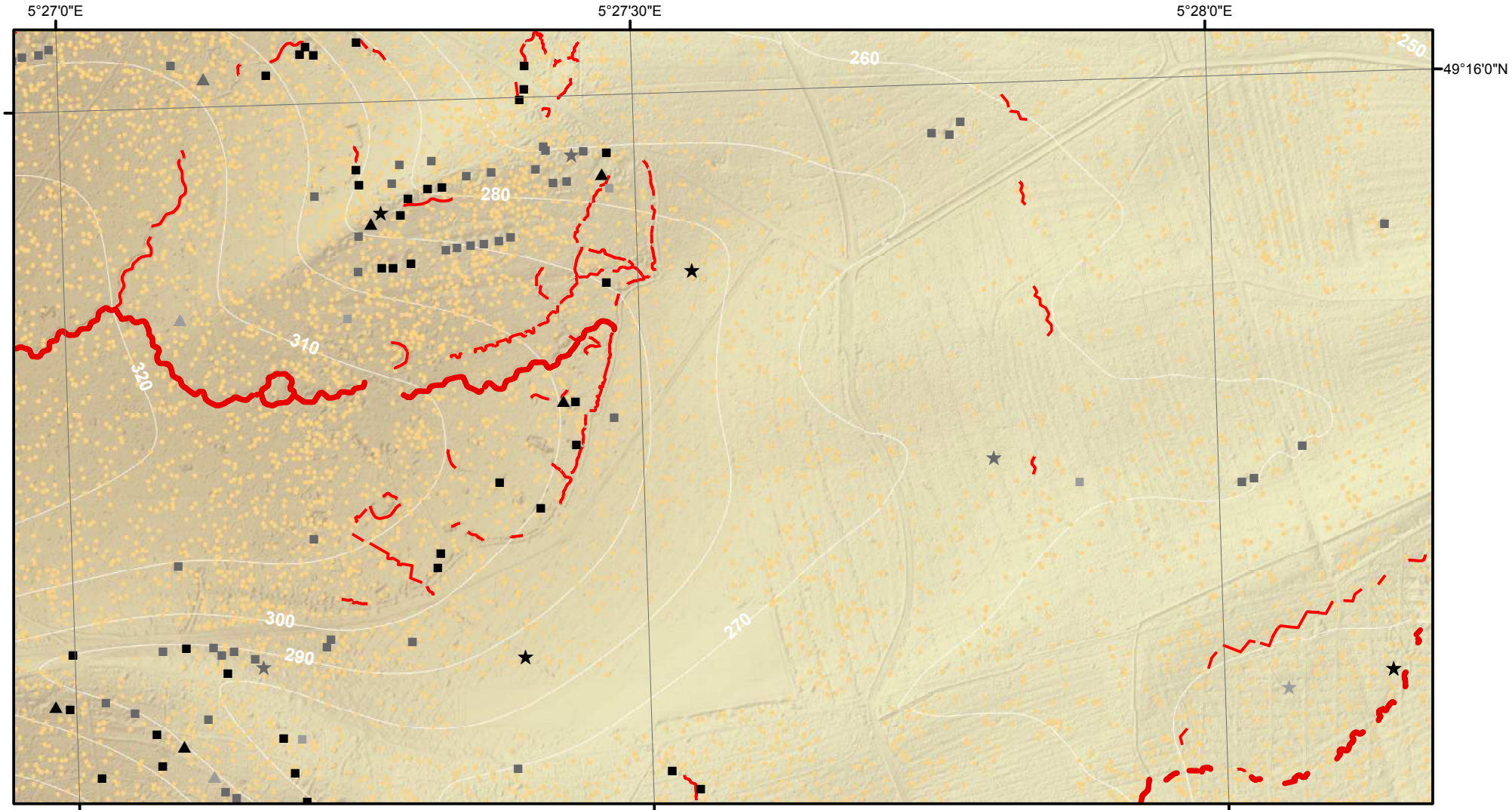
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

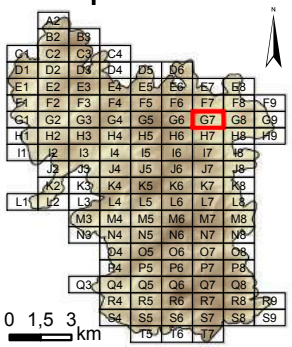
Dalle : **G6**

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

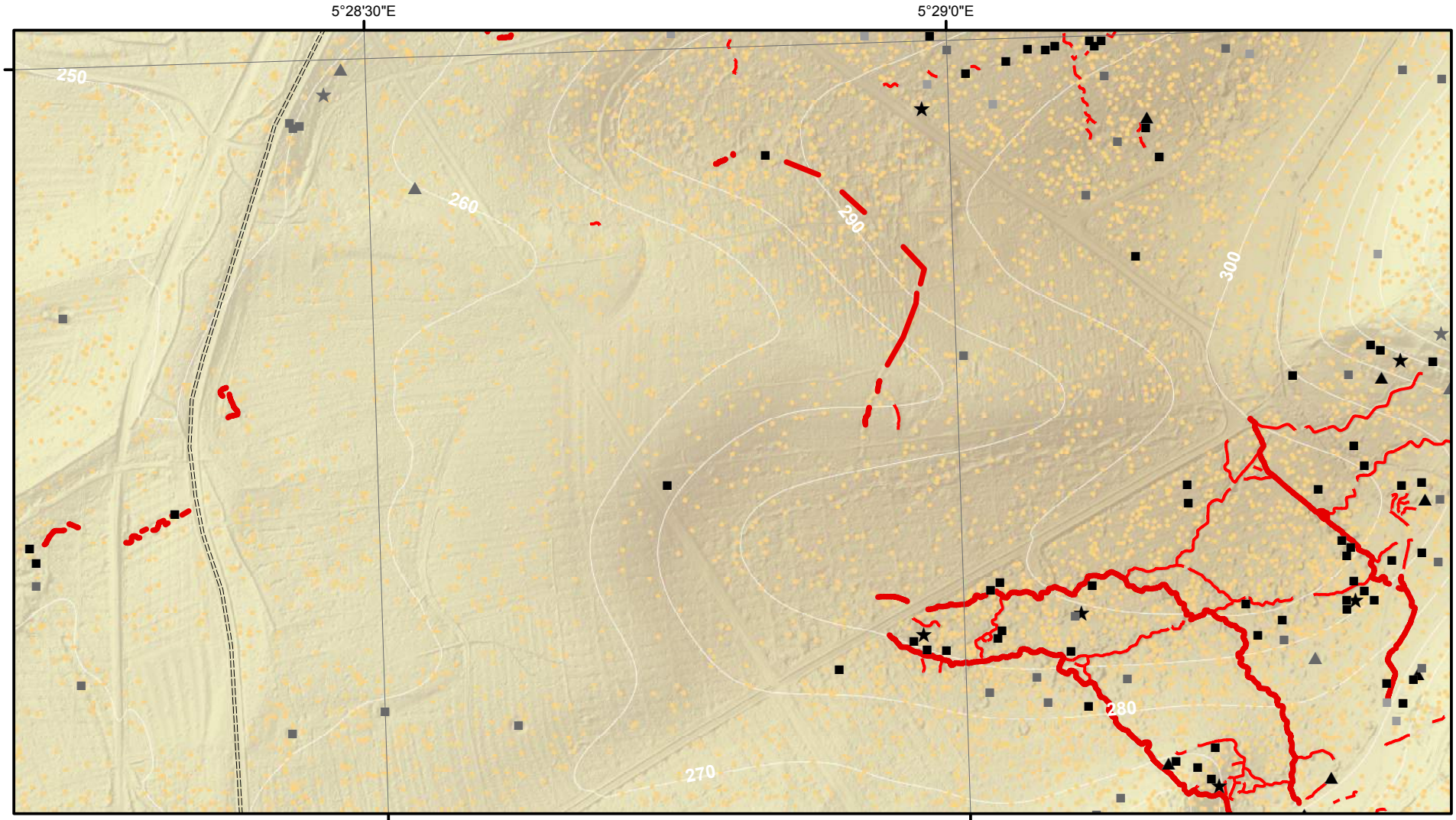
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

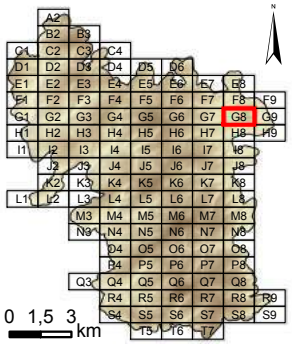
Dalle : **G7**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

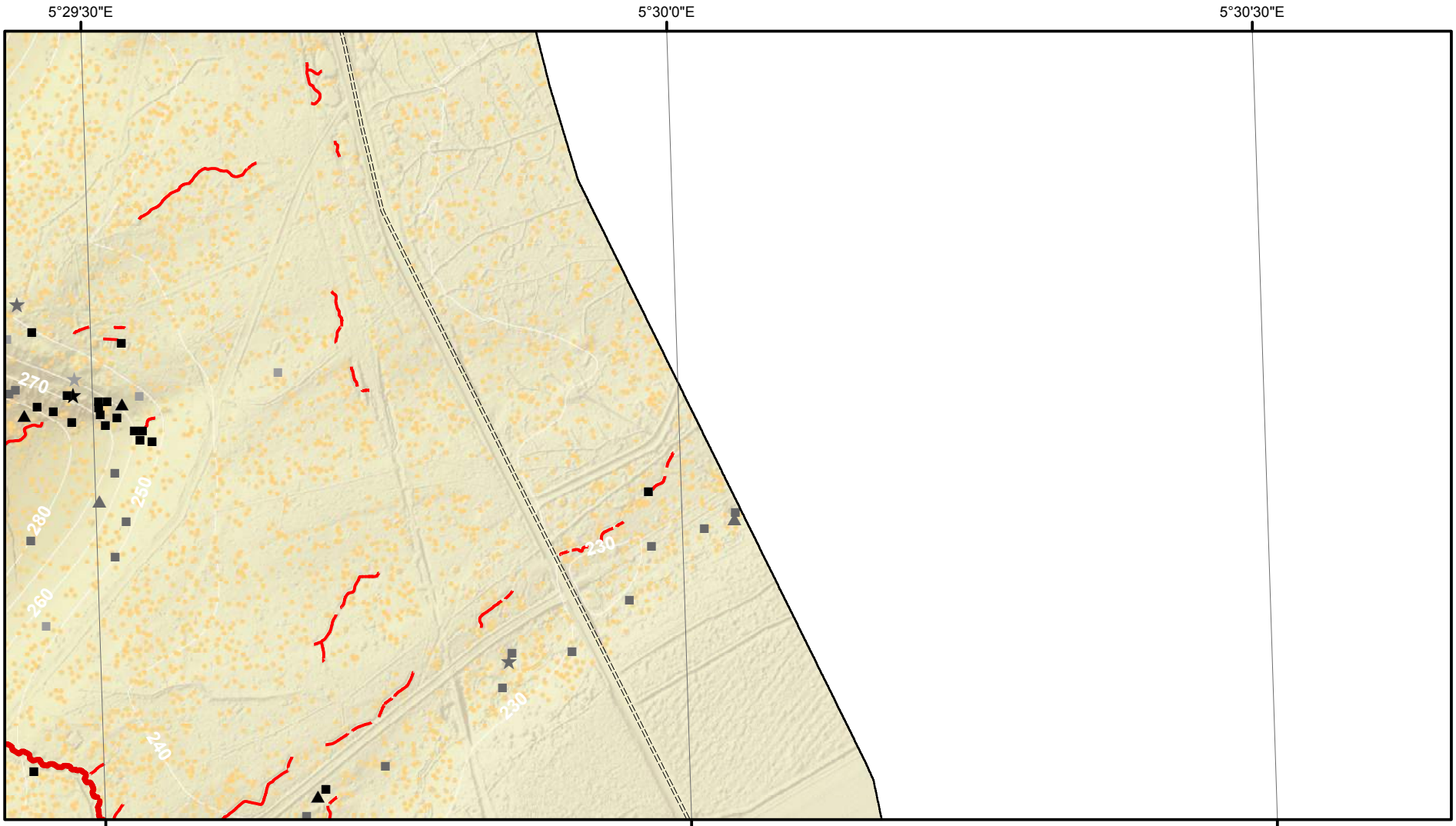
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

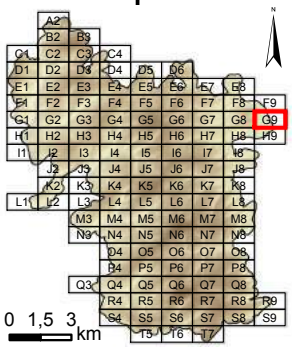
Dalle : **G8**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

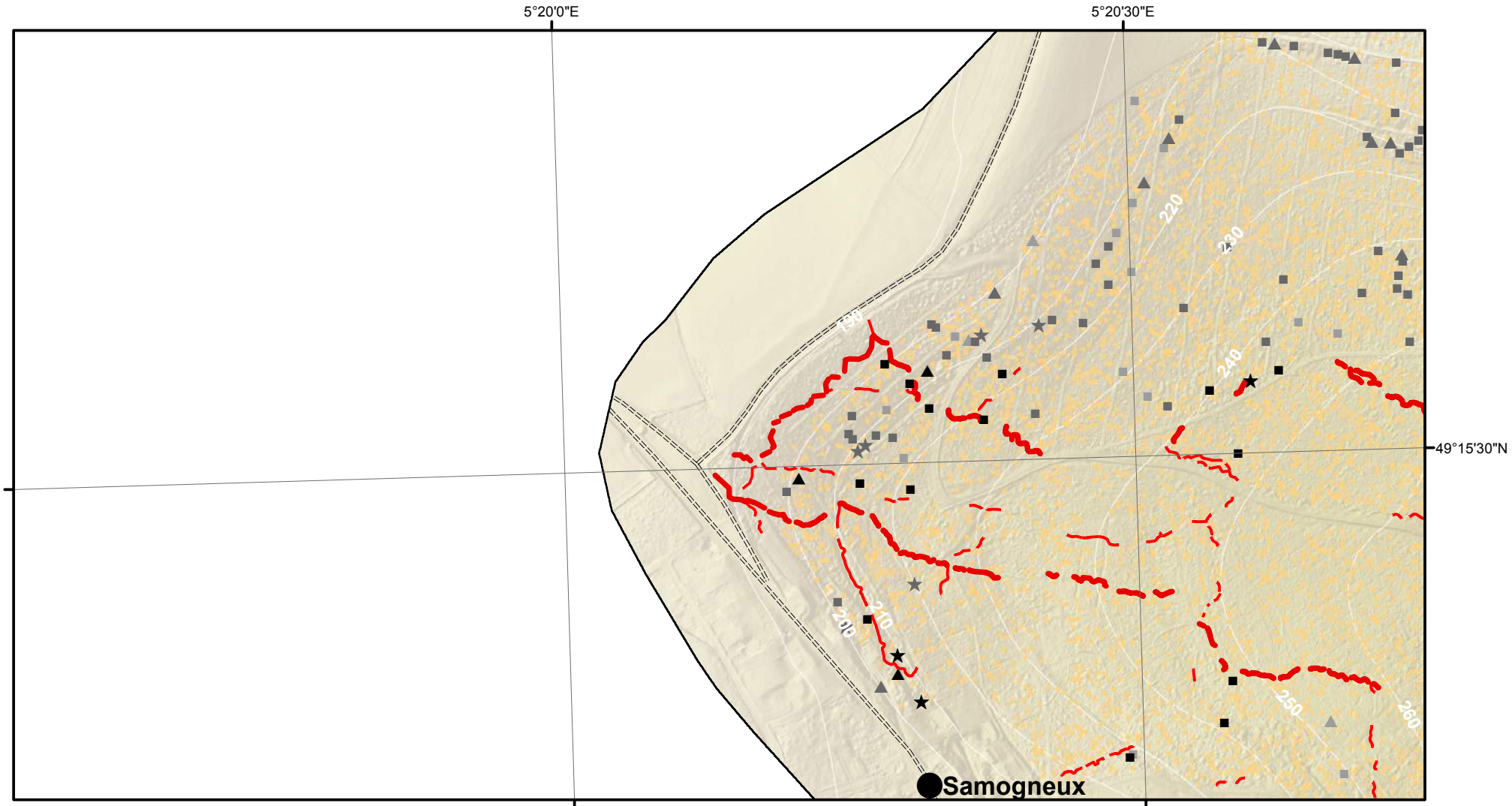
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

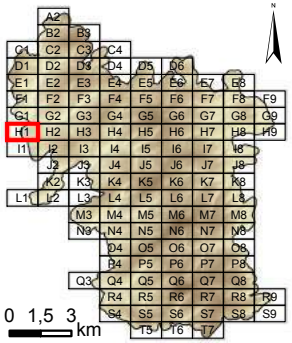
Dalle : **G9**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

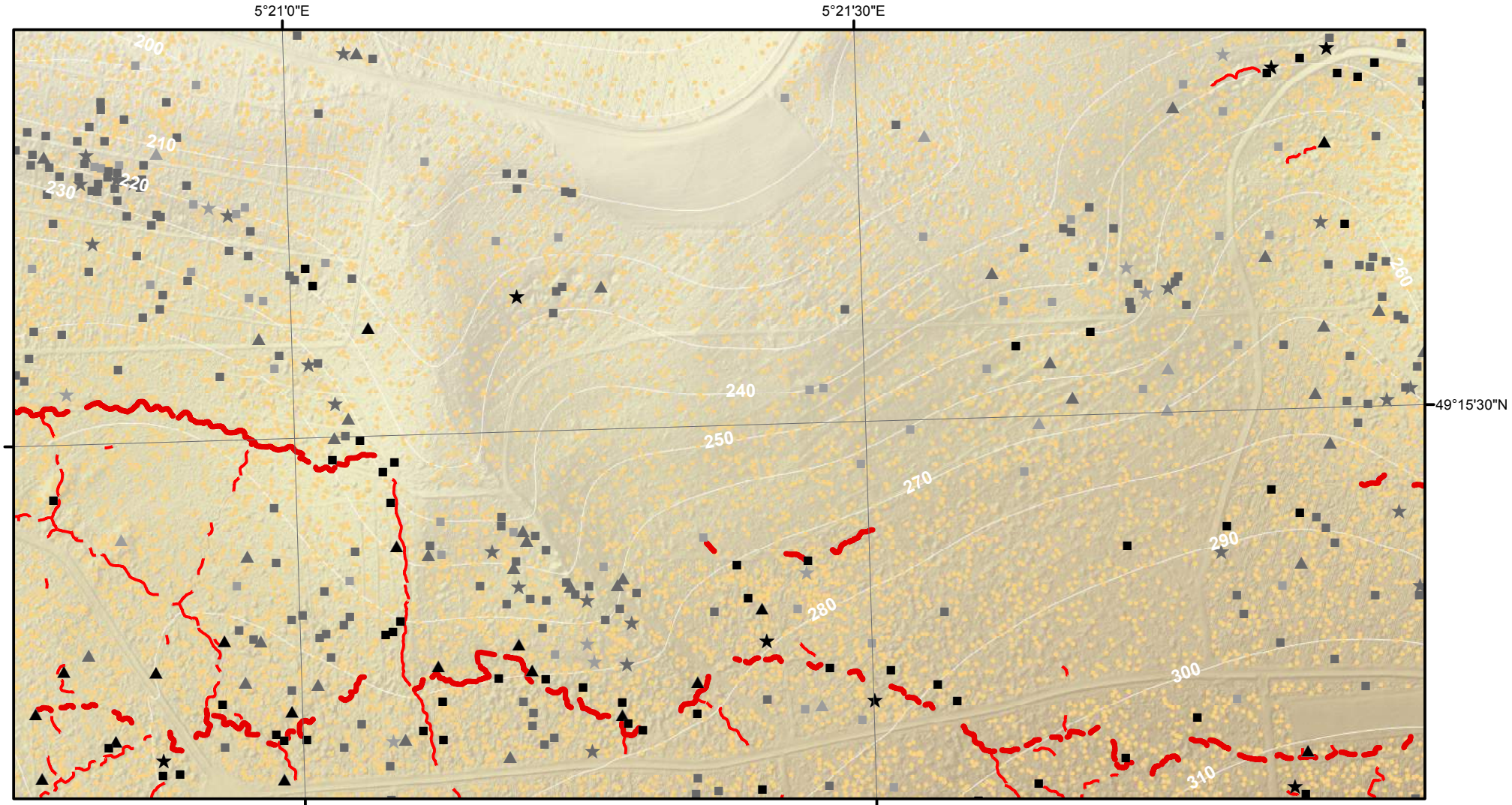
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **H1**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

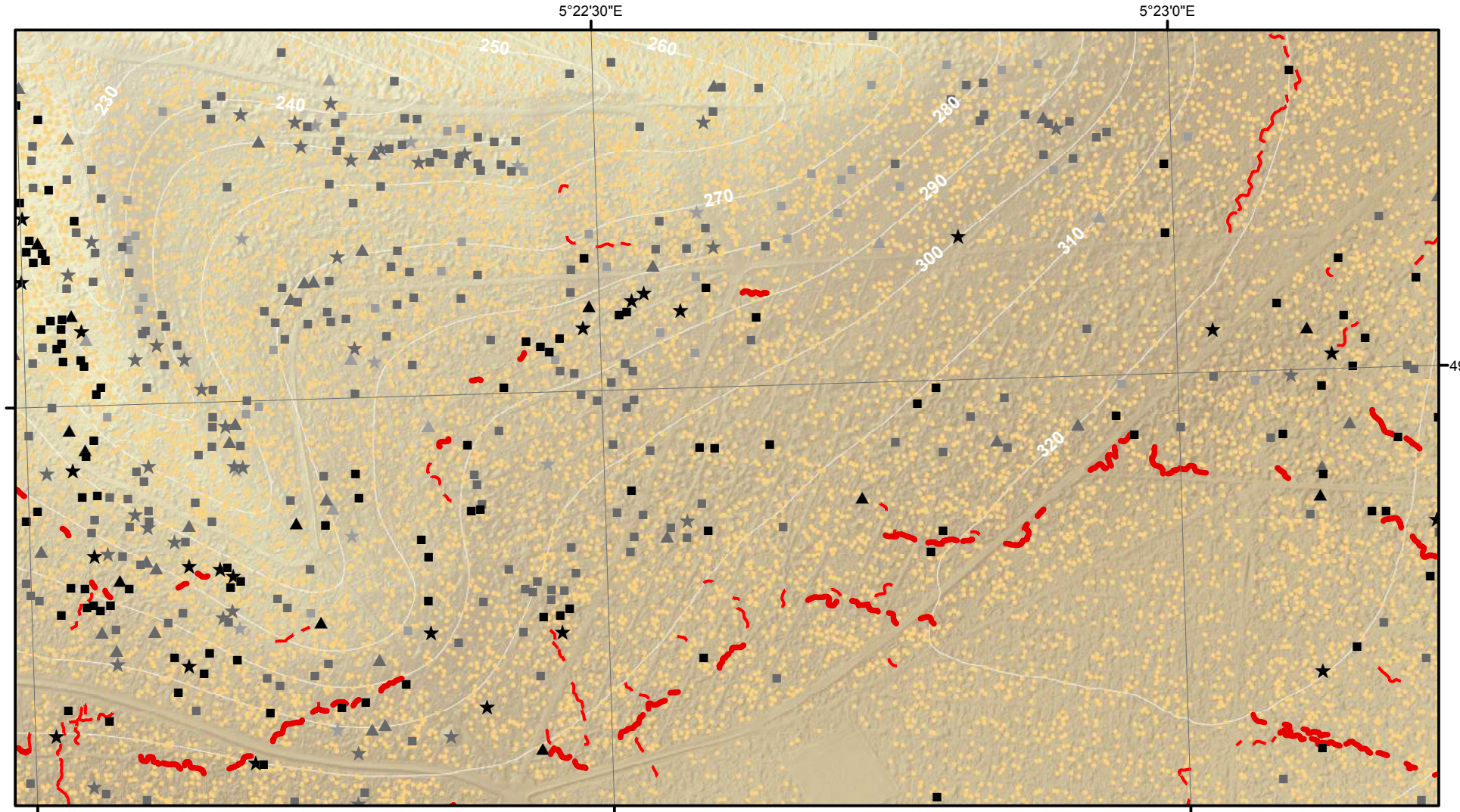
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **H2**

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

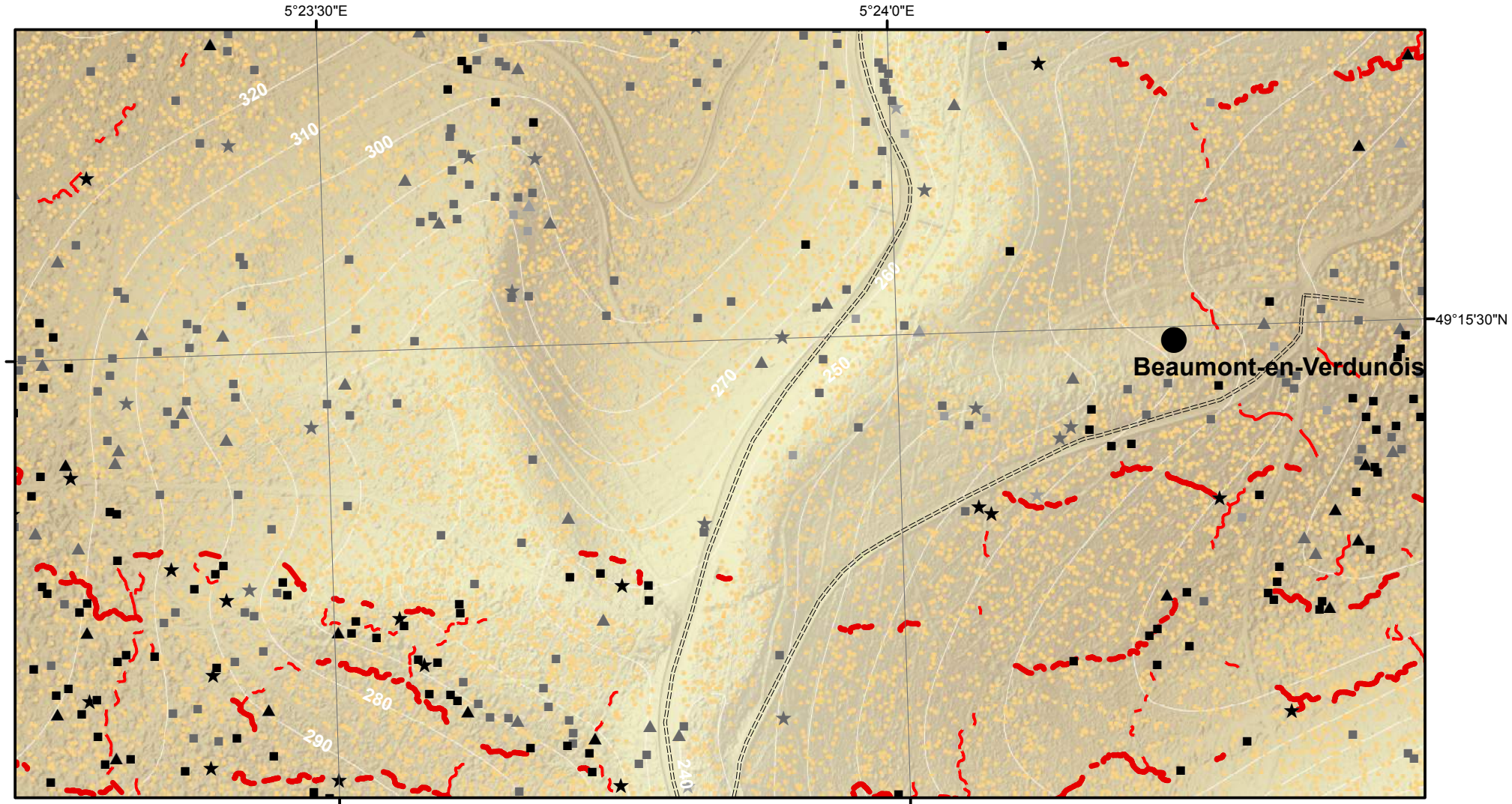
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **H3**

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

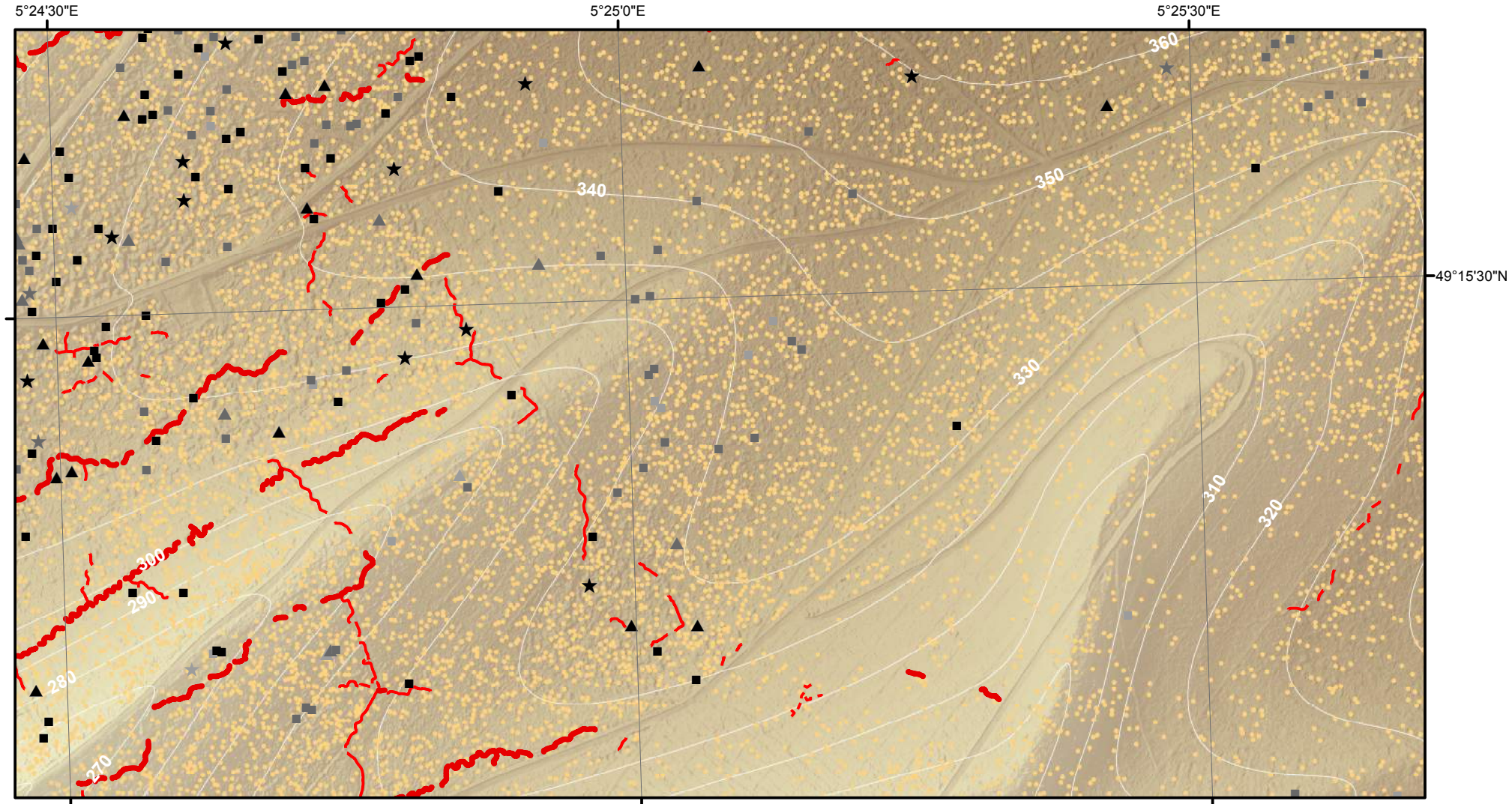
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

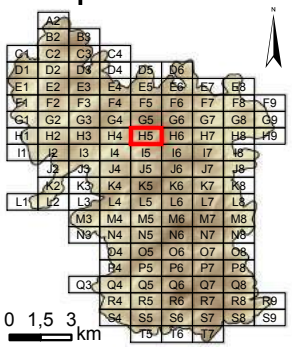
Dalle : **H4**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

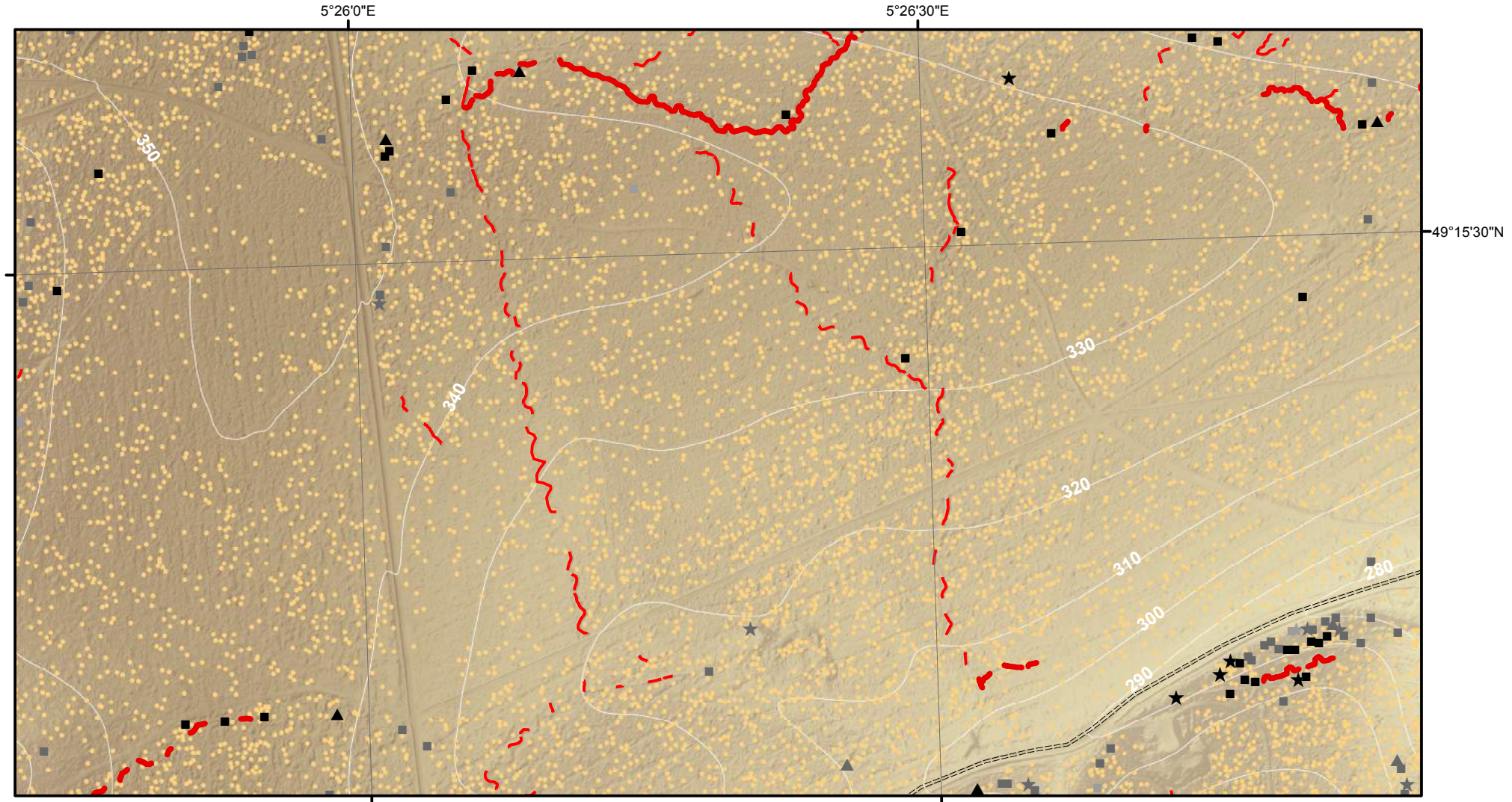
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

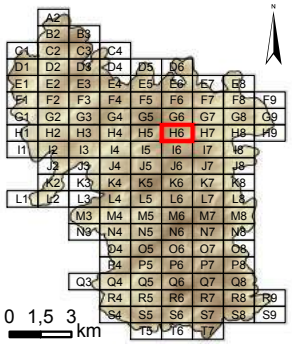
Dalle : **H5**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

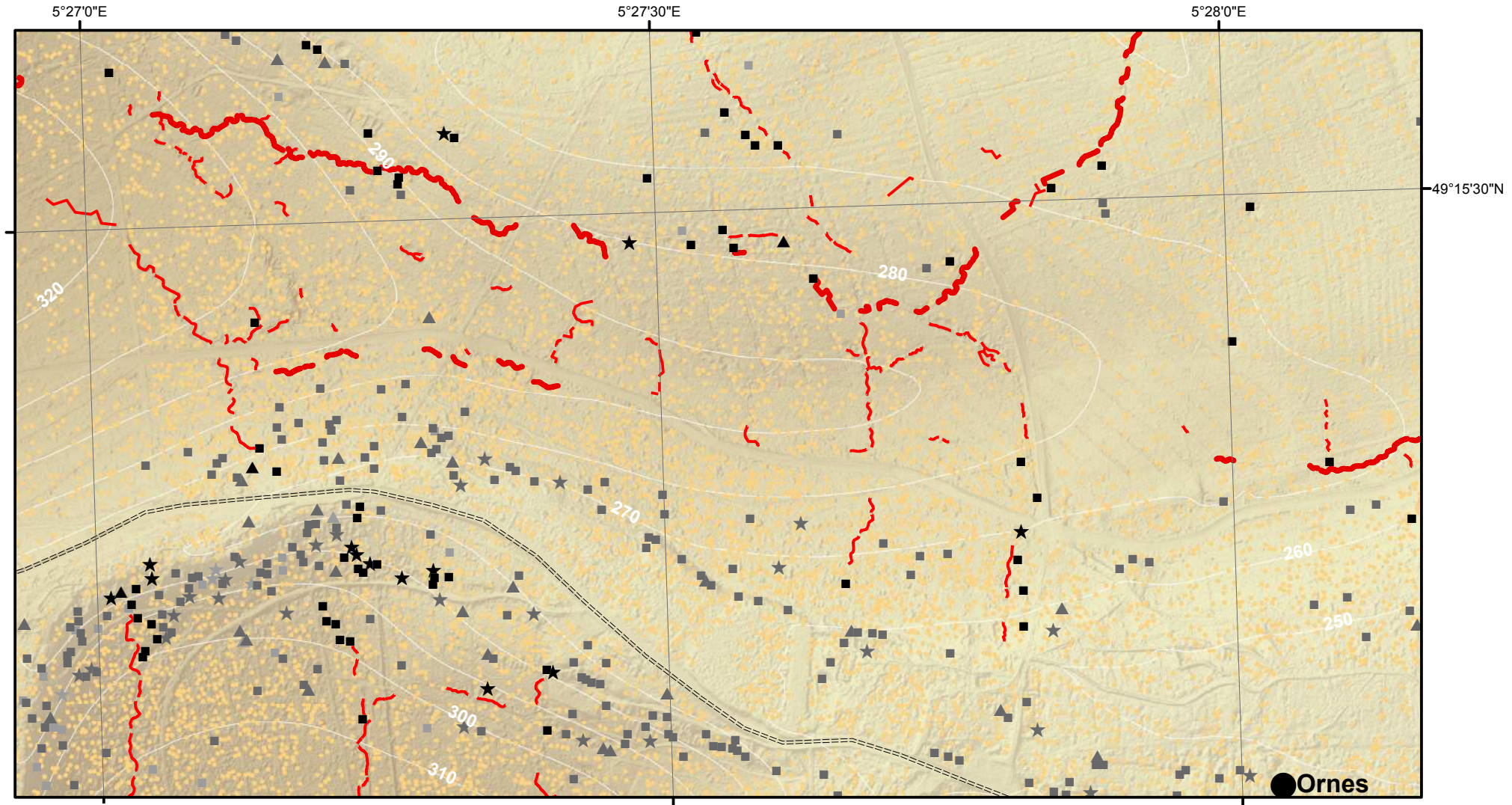
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **H6**

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

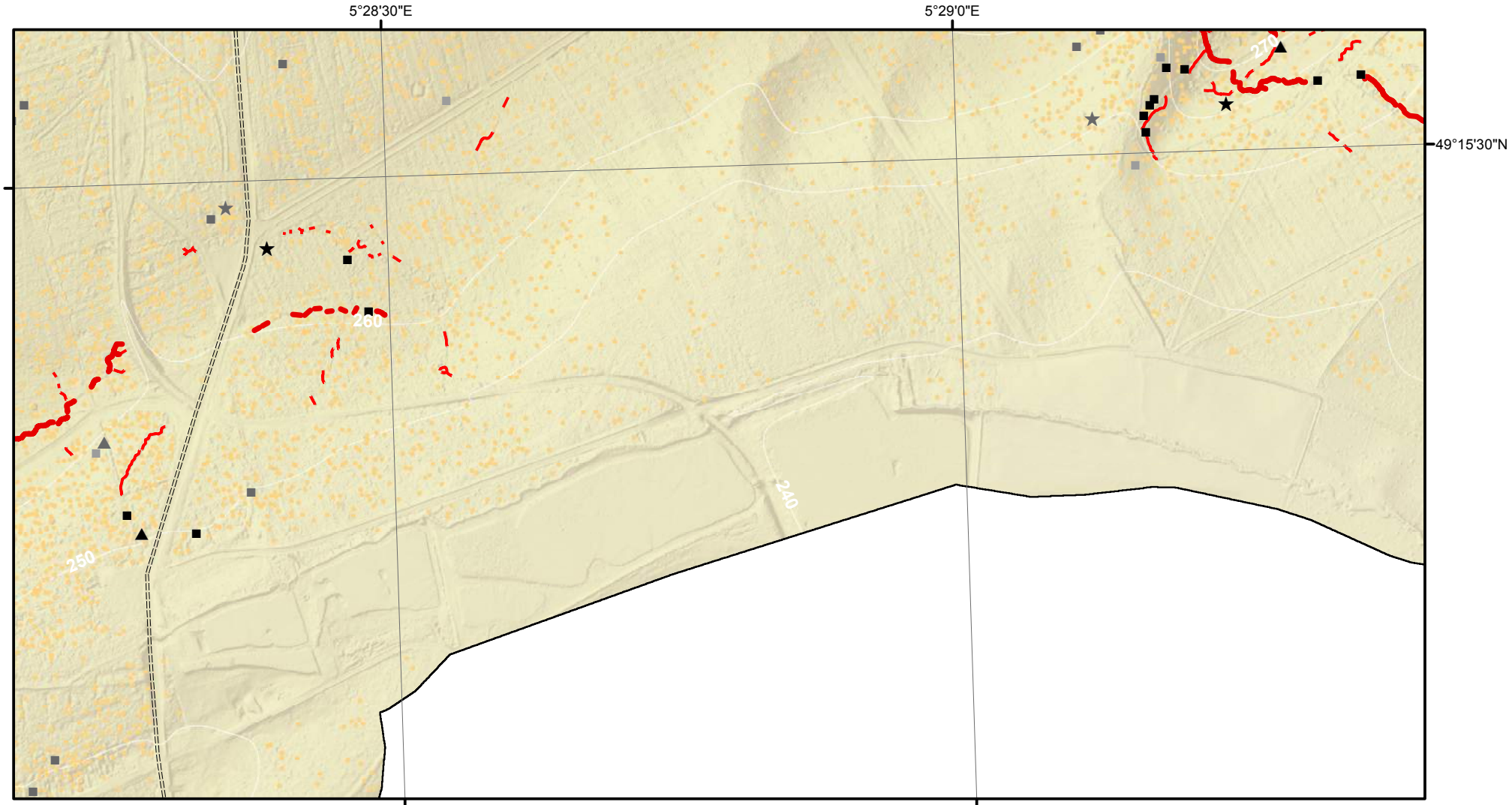
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

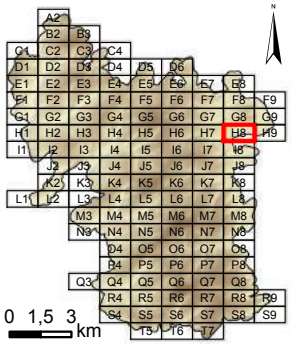
Dalle : **H7**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

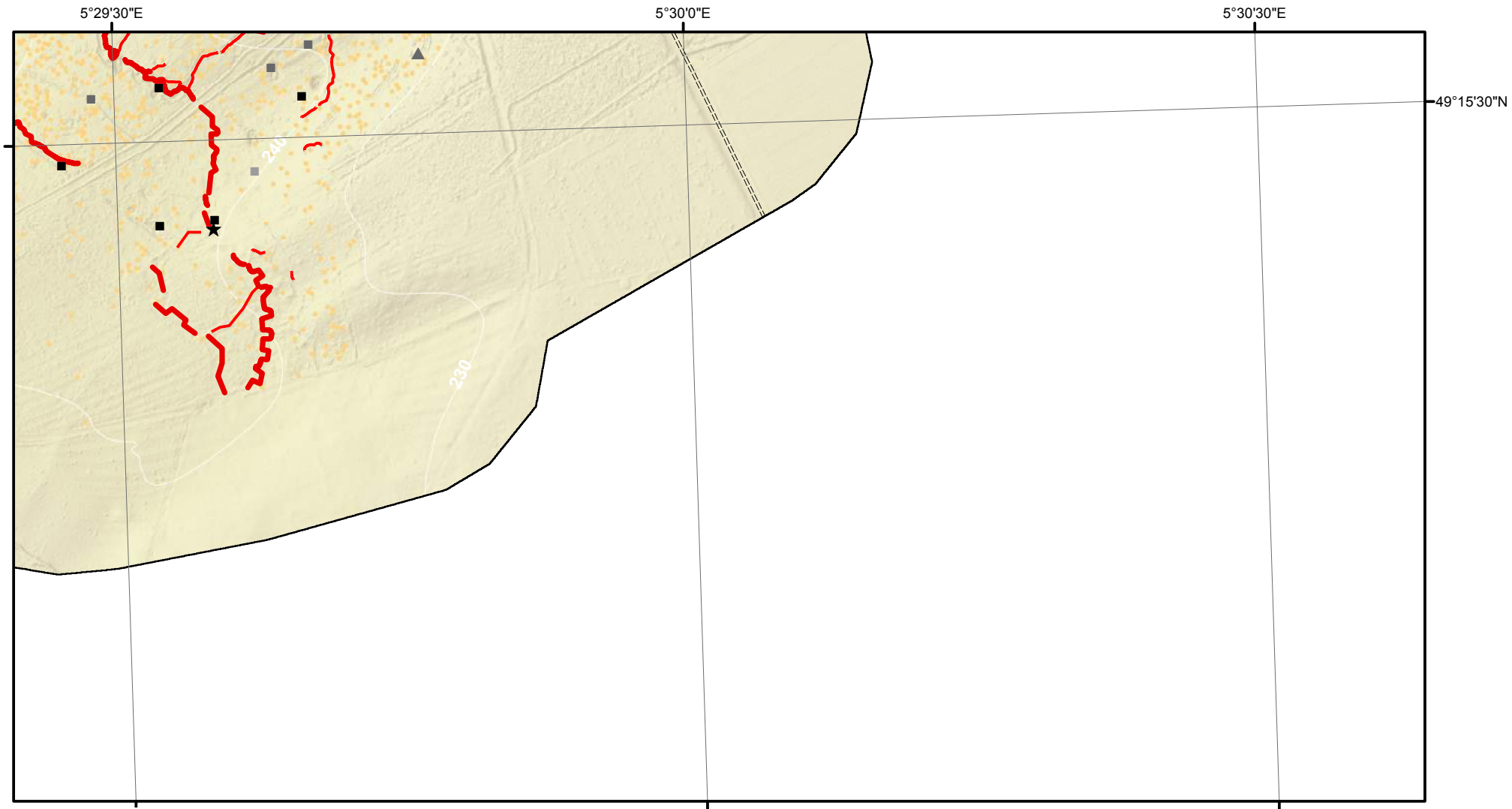
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

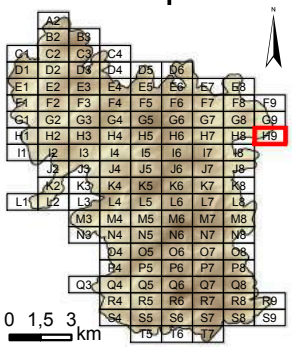
Dalle : **H8**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

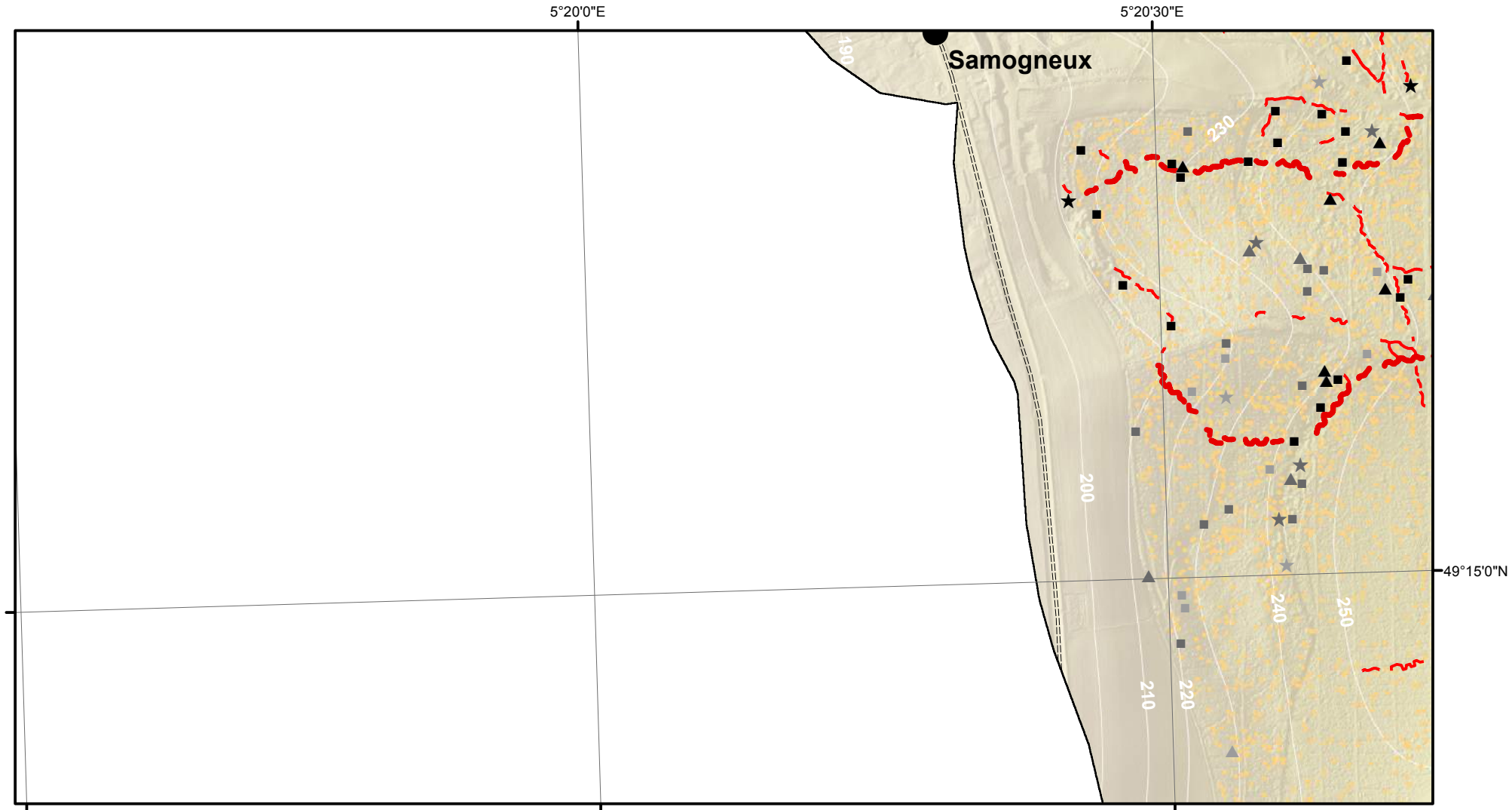
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

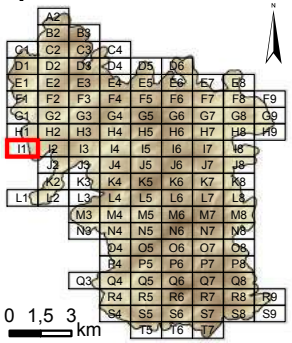
Dalle : **H9**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

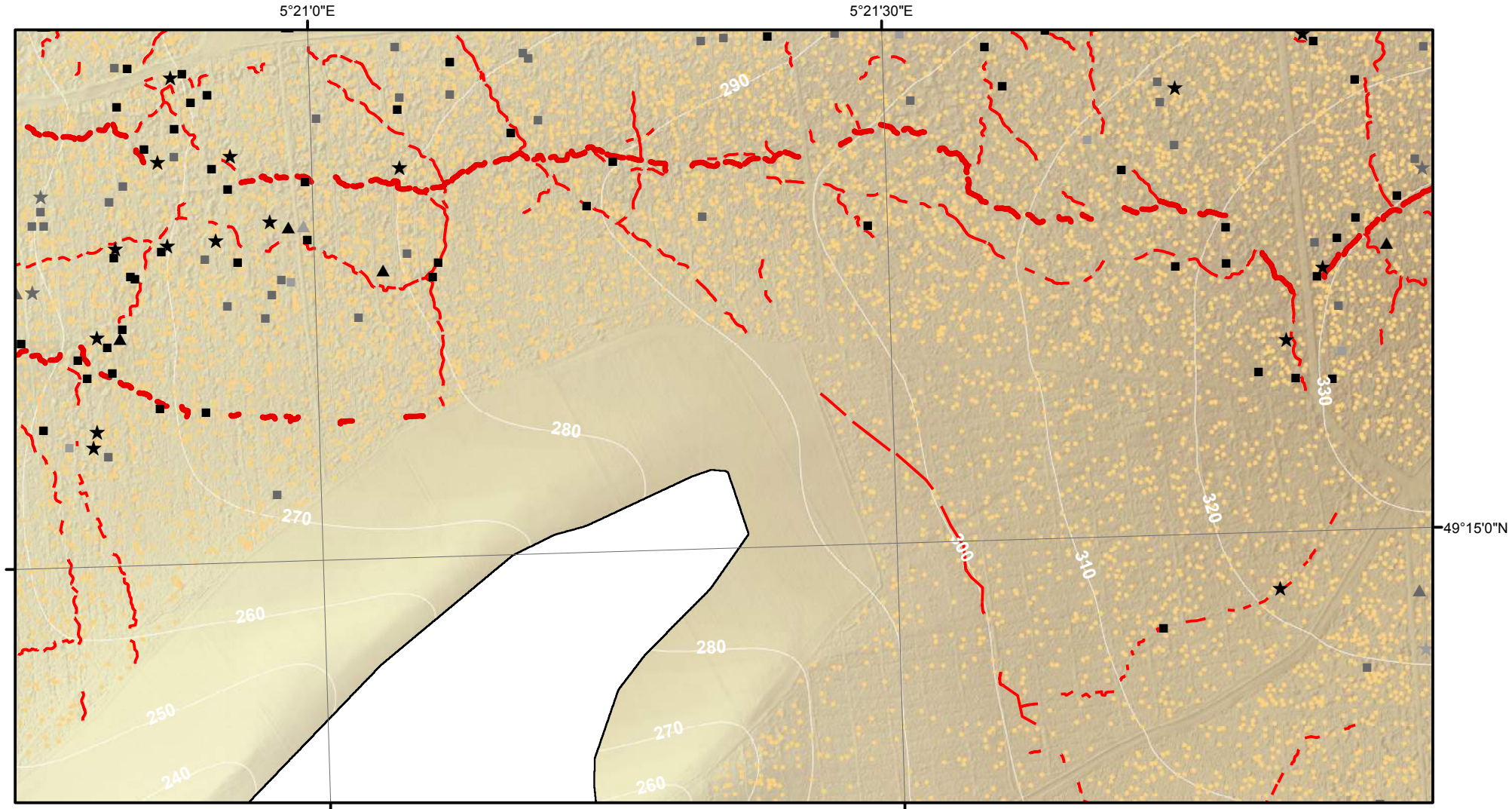
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **I1**

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

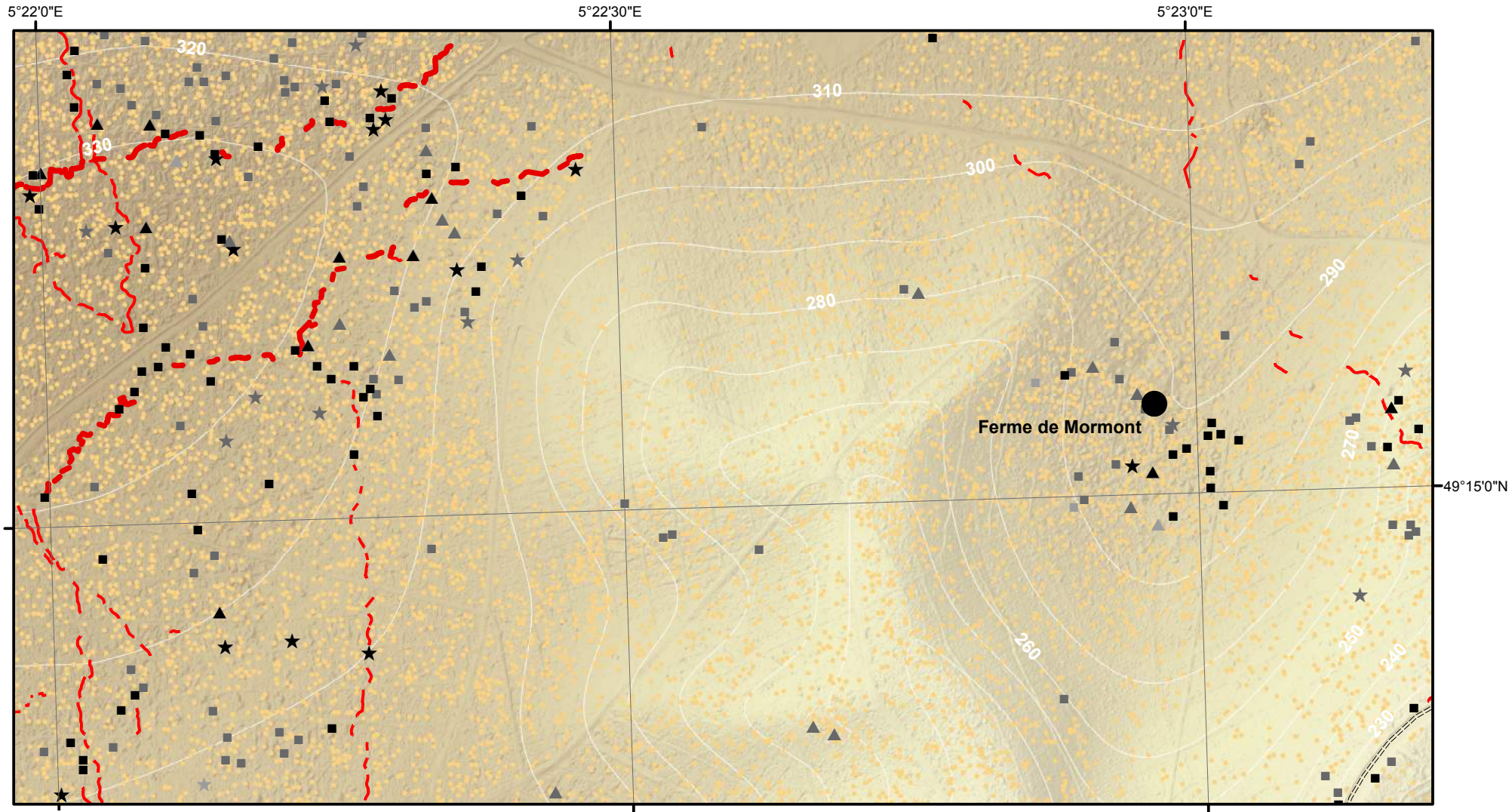
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

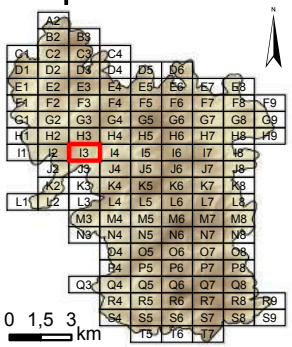
Dalle : **I2**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

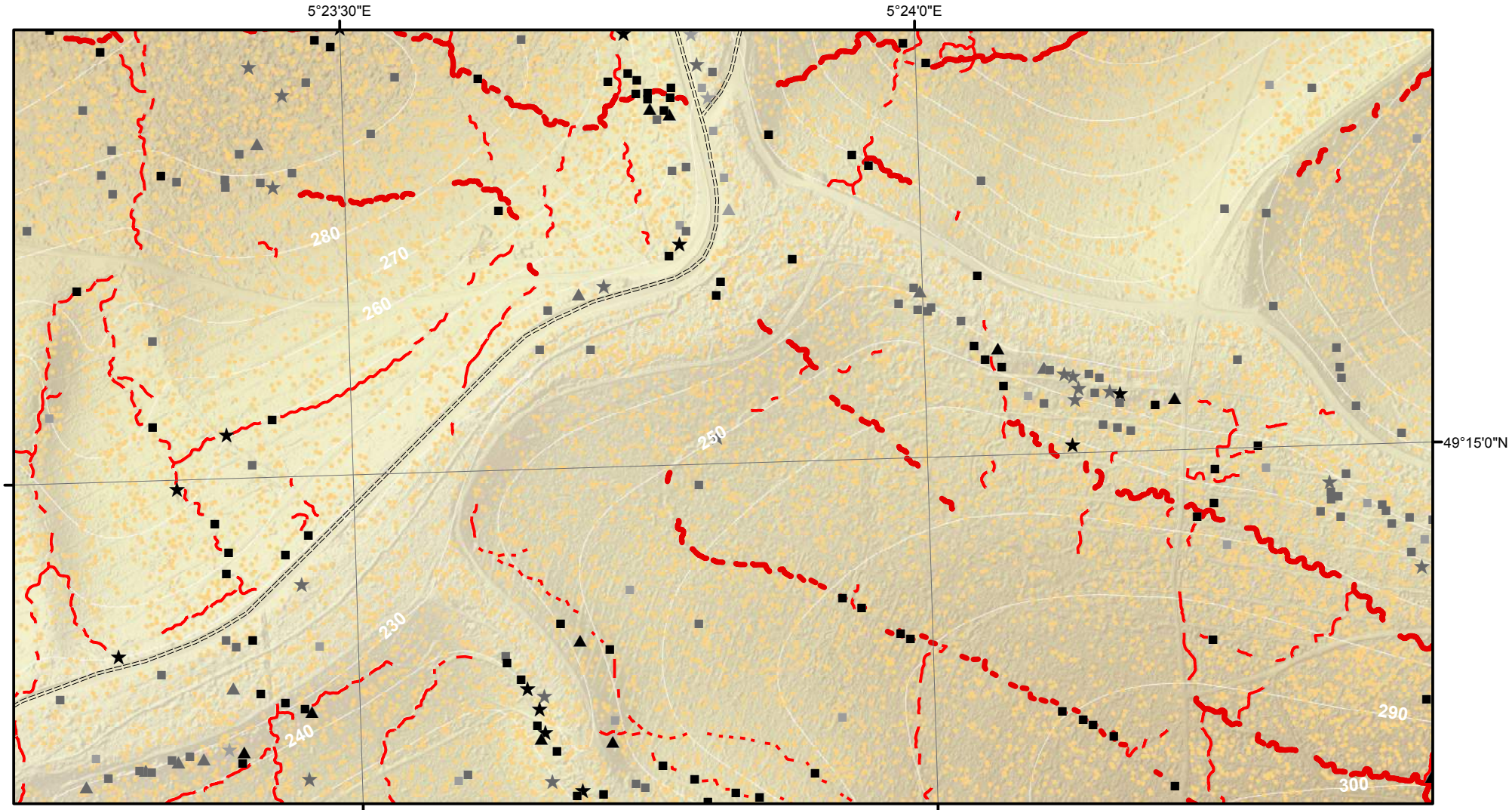
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **I3**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

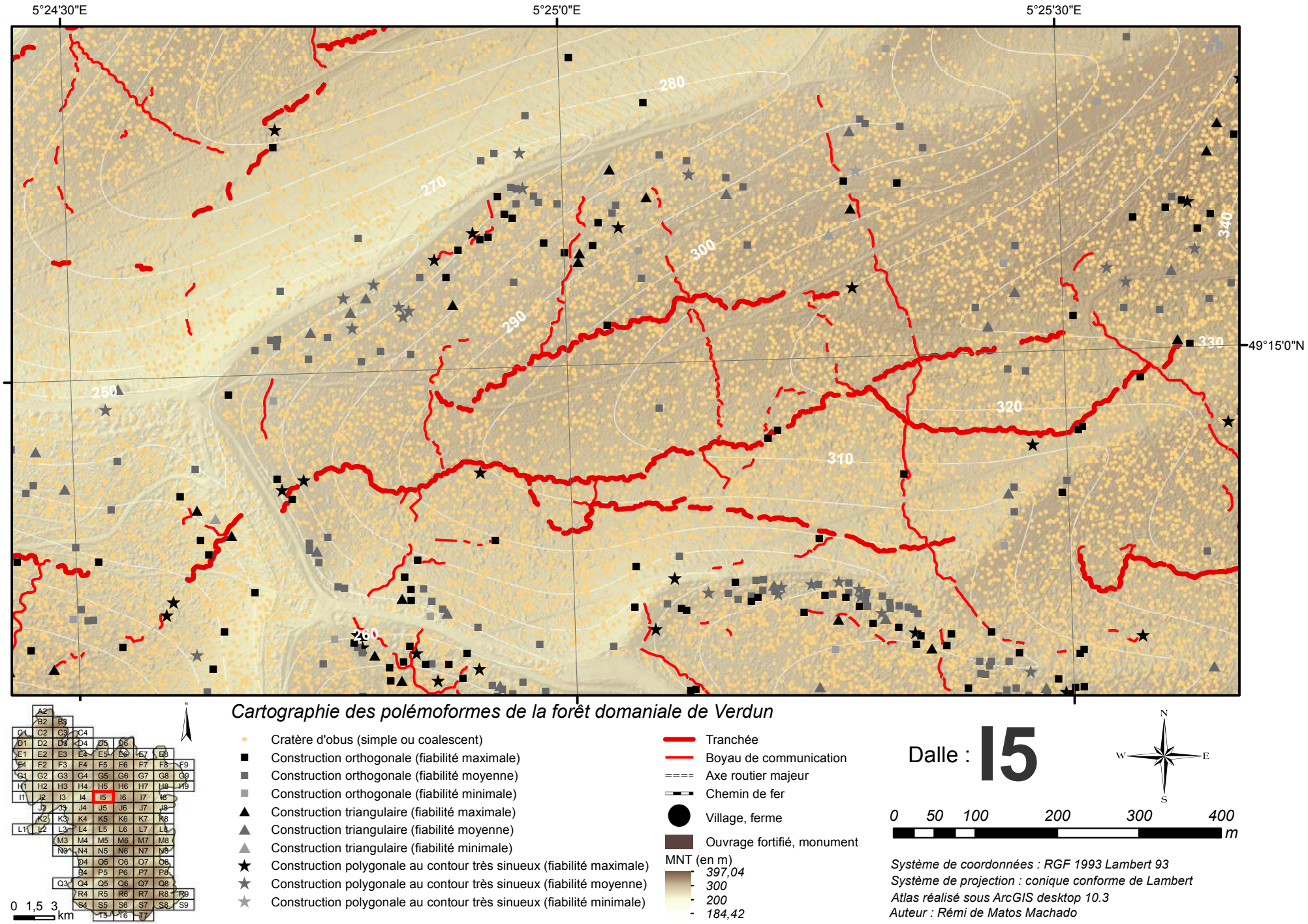
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **I4**

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

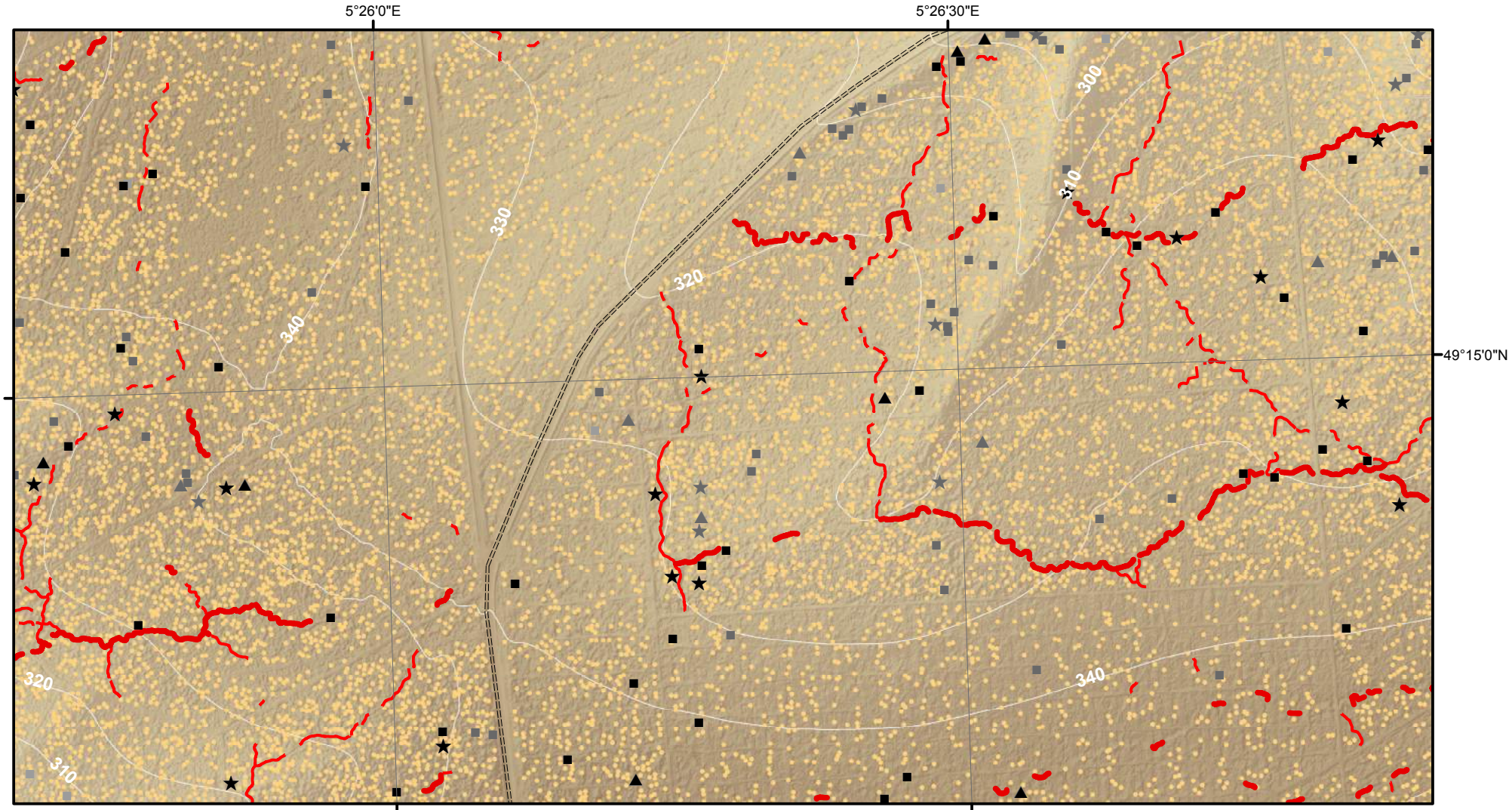
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **I5**

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

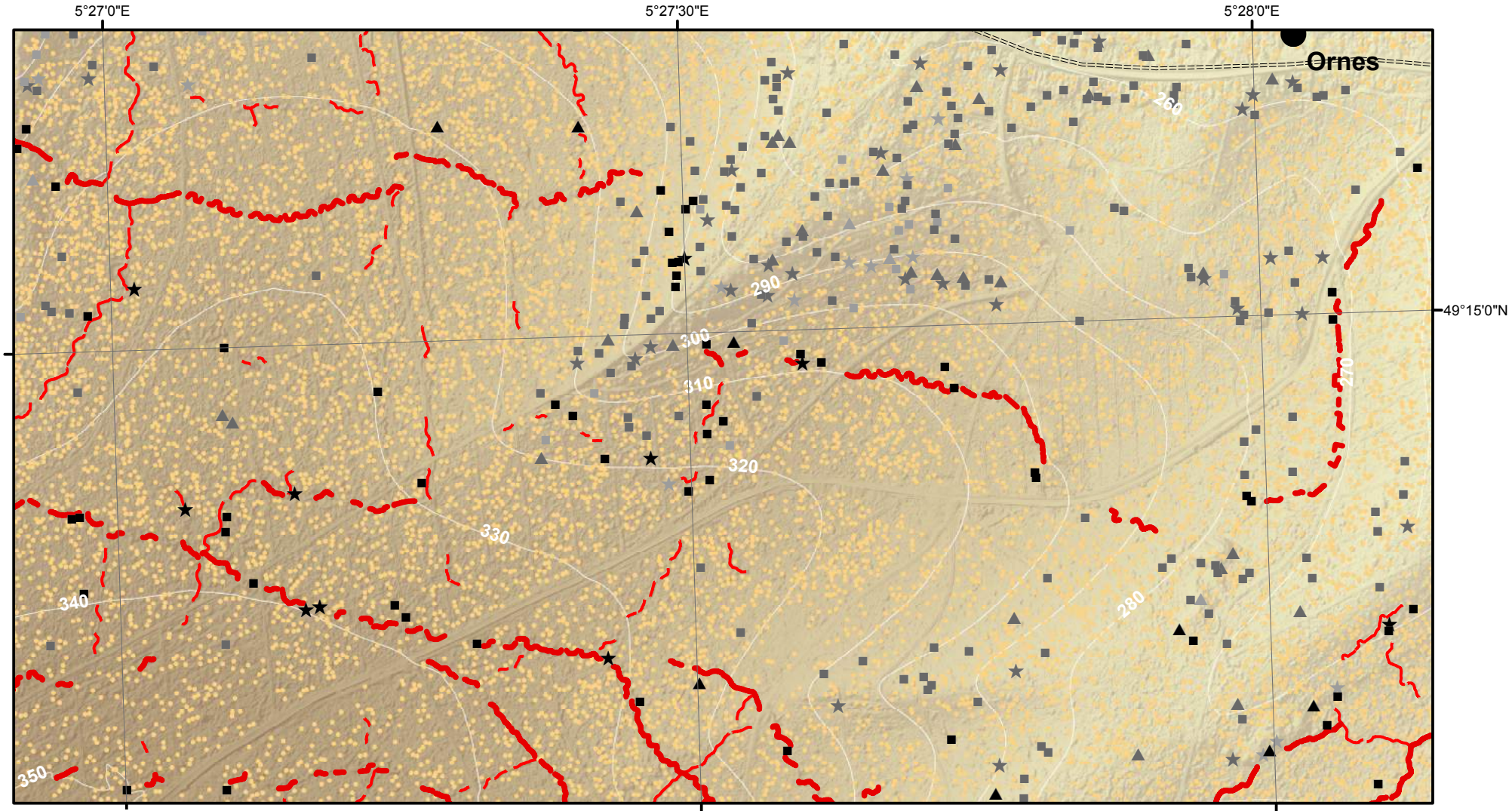
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

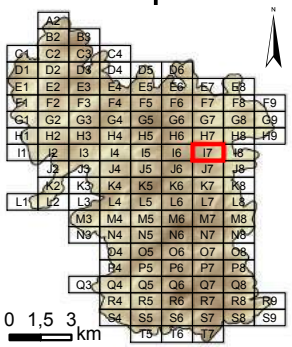
Dalle : **I6**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

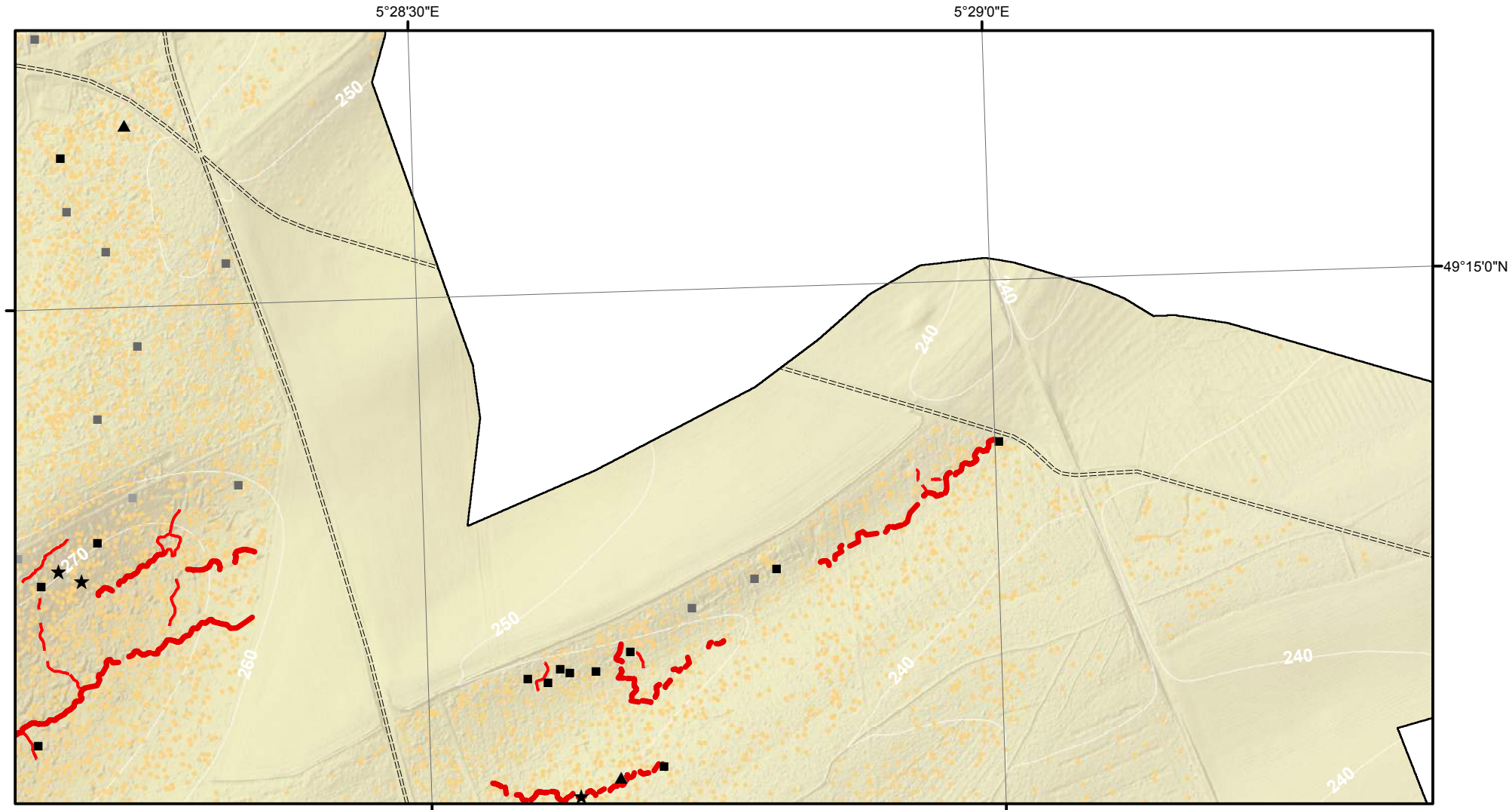
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

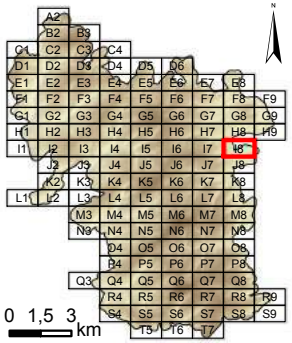
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **I7**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

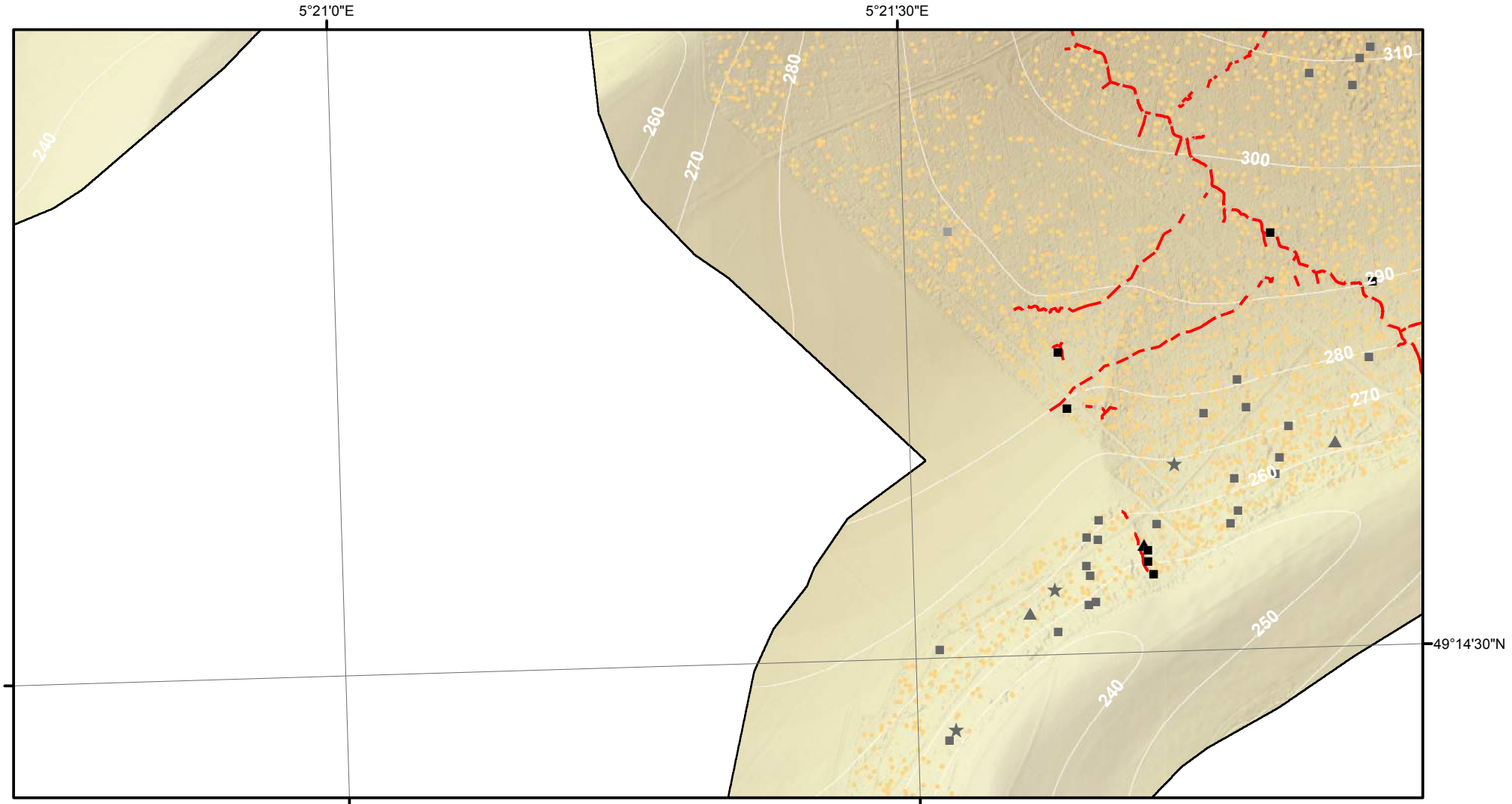
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

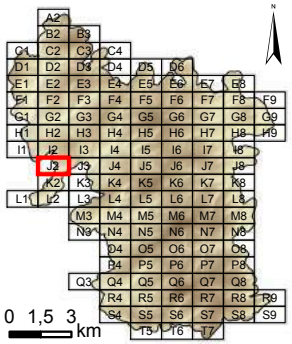
Dalle : **I8**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

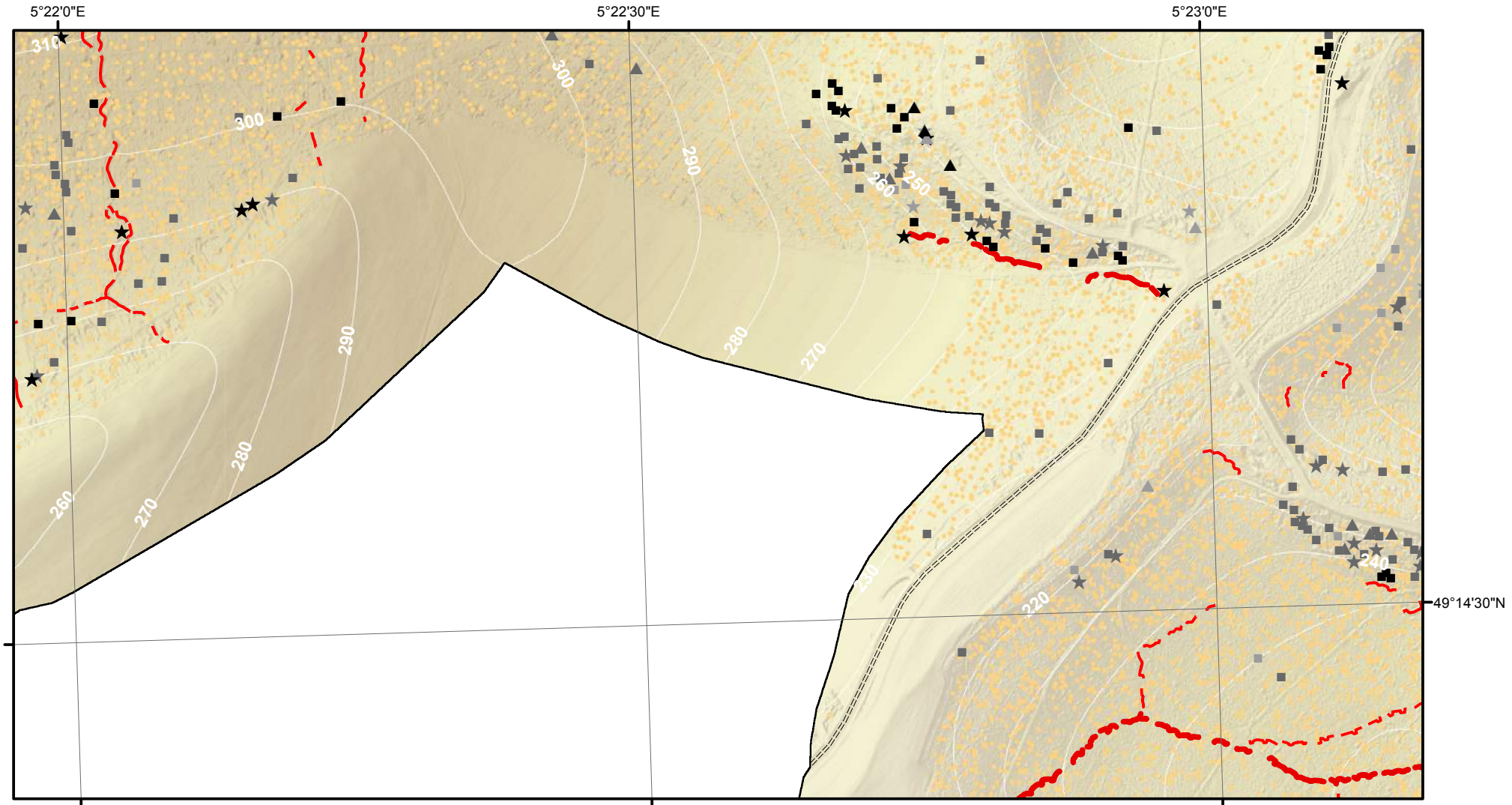
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

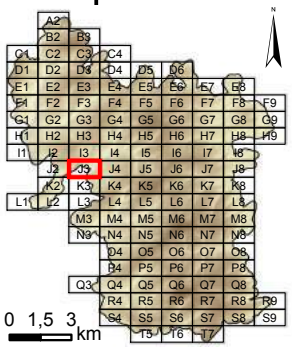
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **J2**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

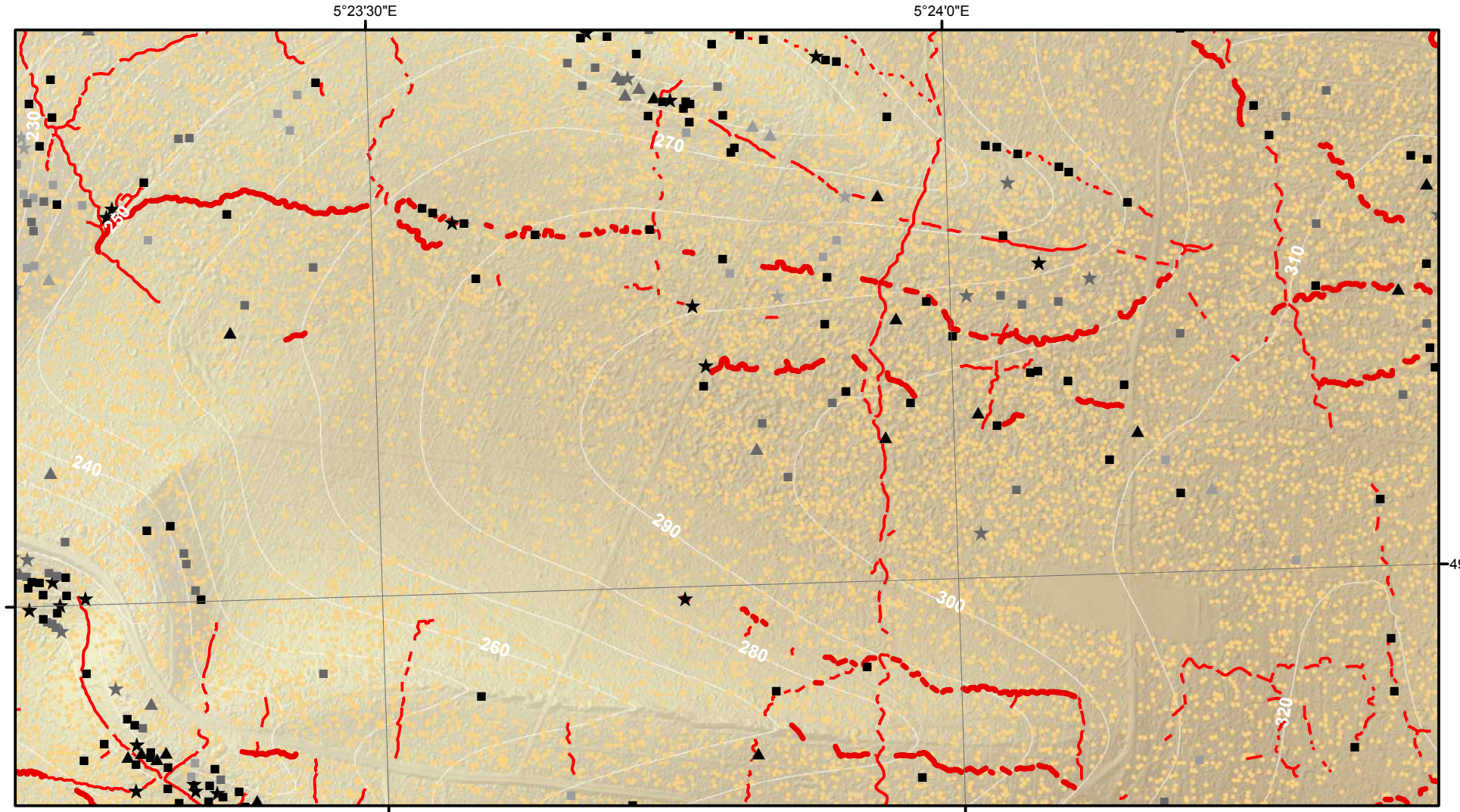
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

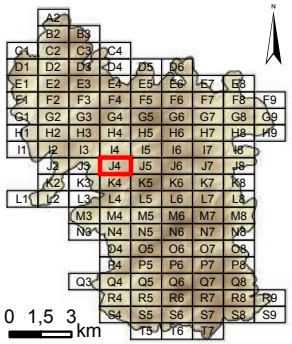
Dalle : **J3**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

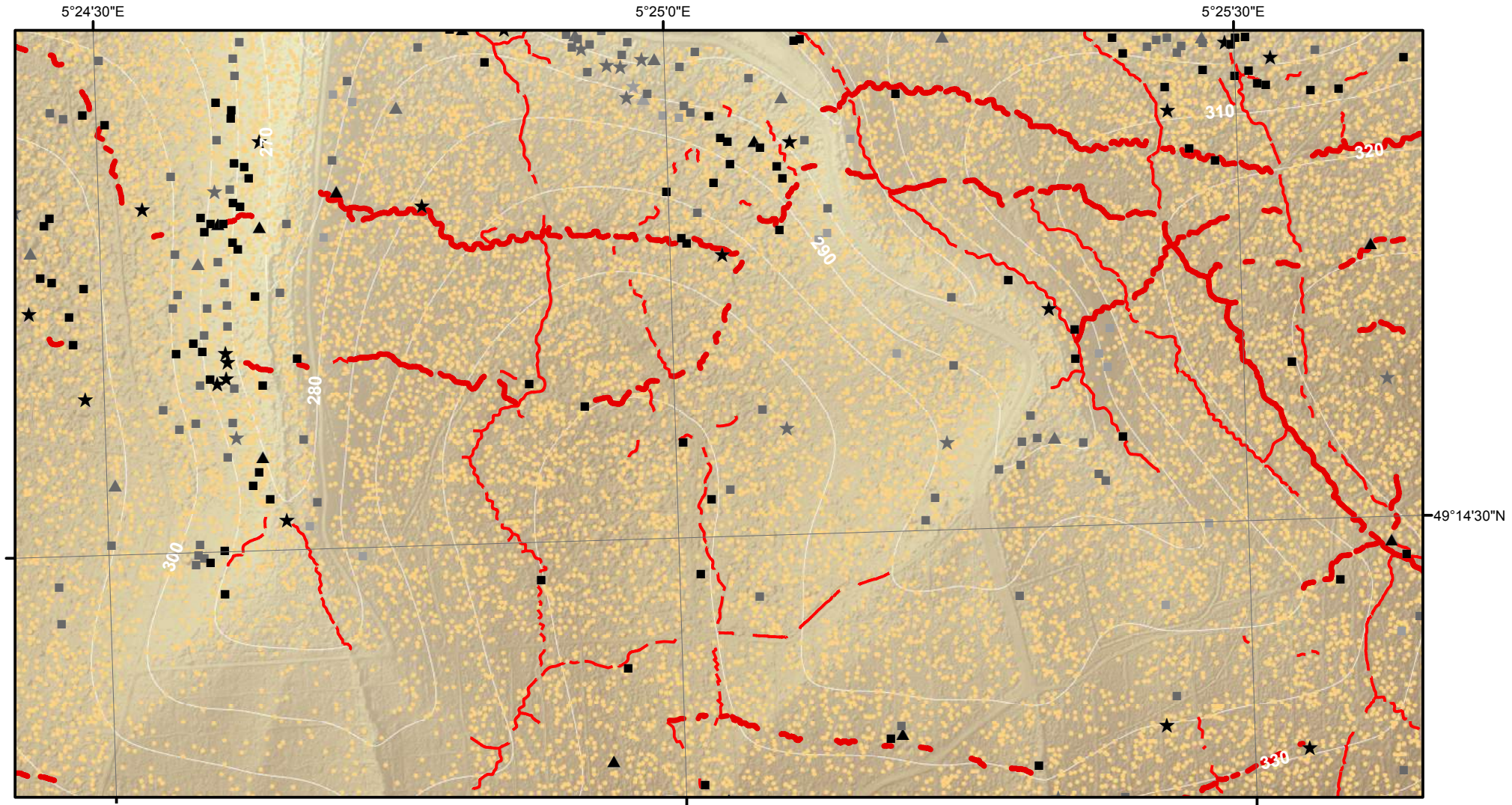
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

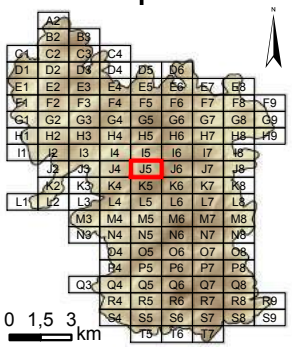
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **J4**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

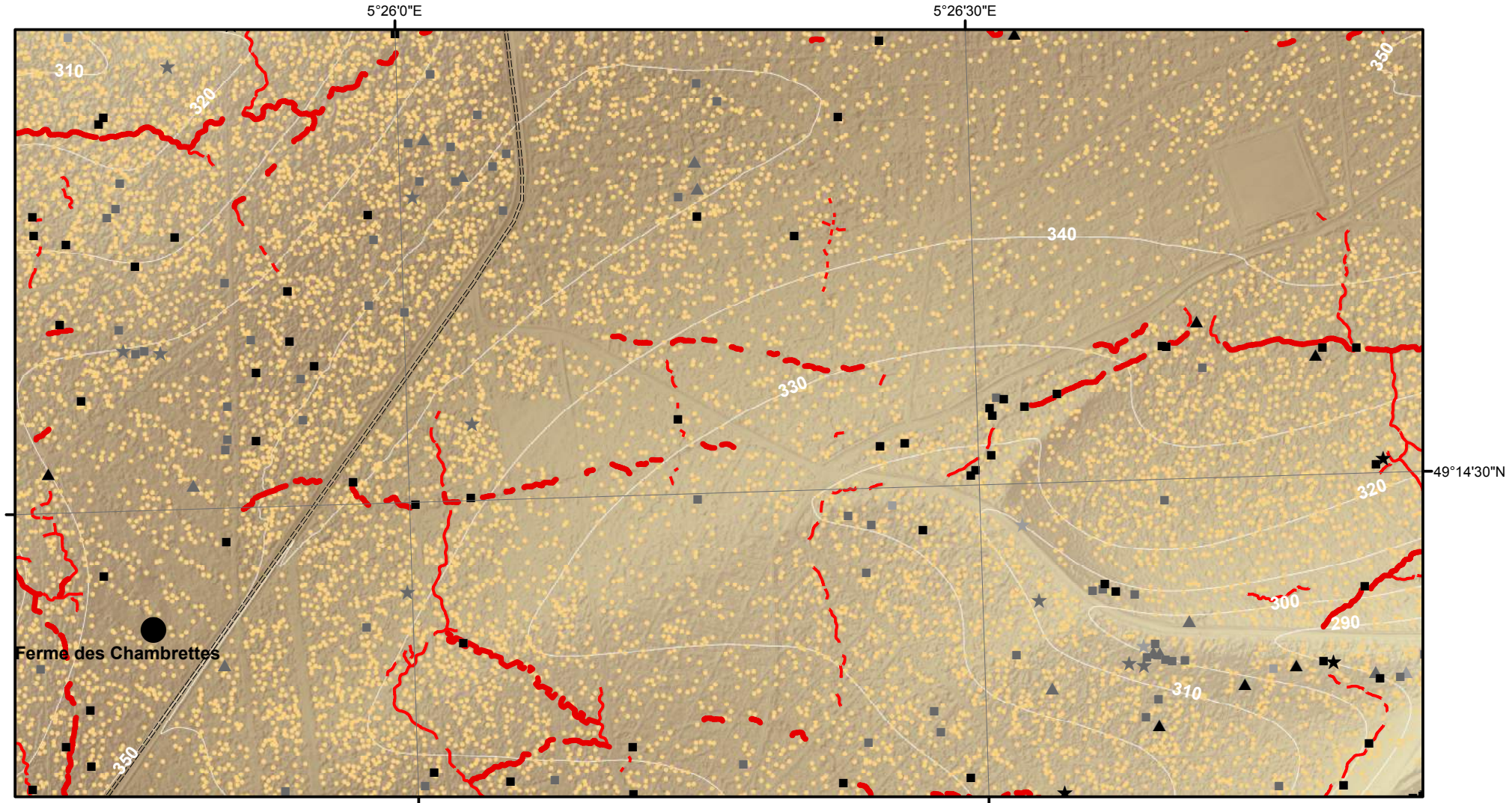
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

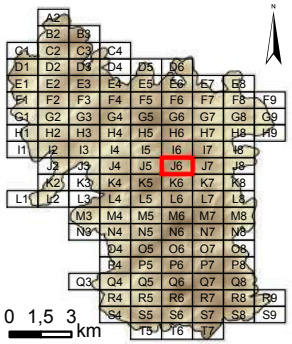
Dalle : **J5**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

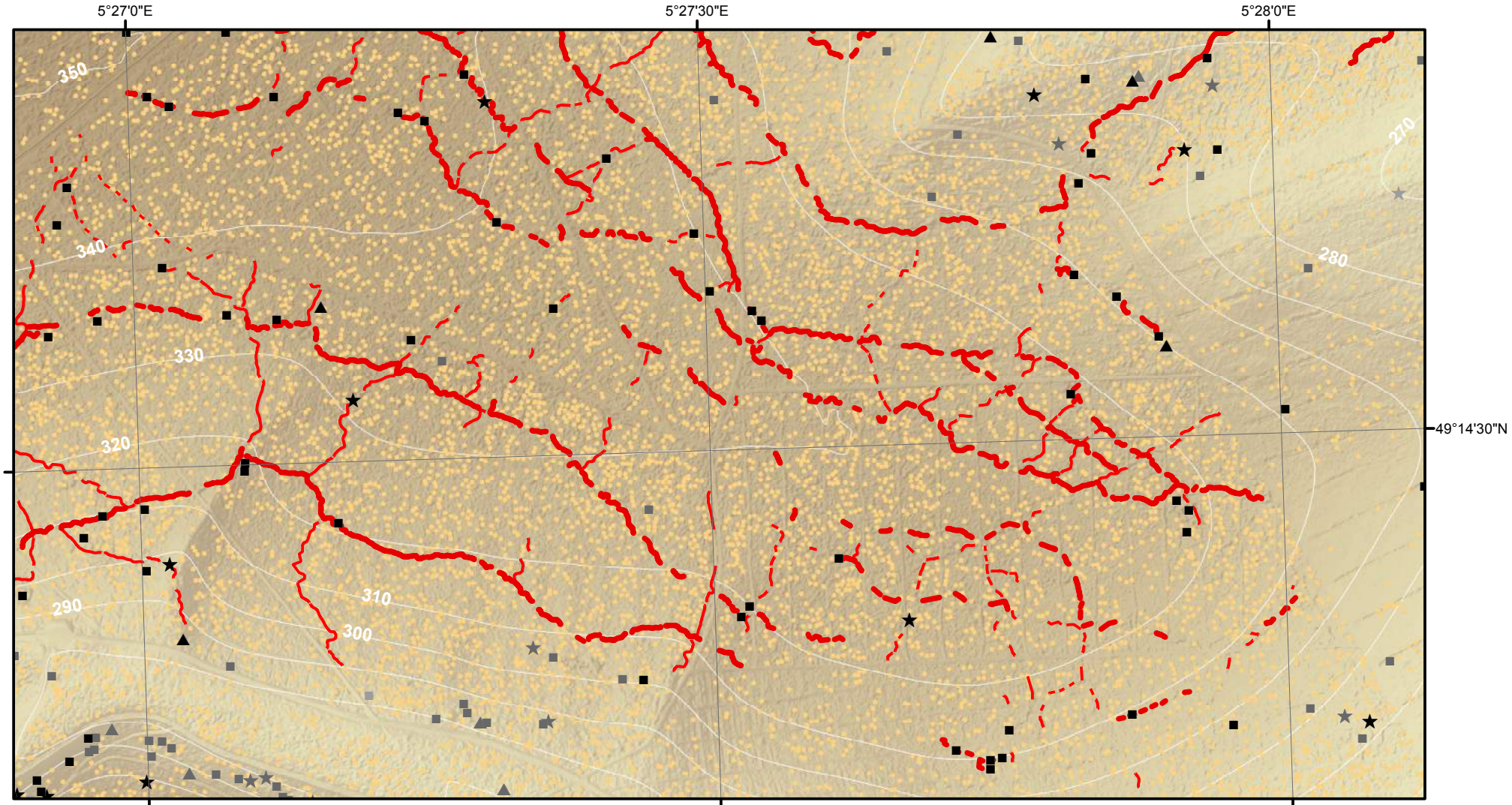
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

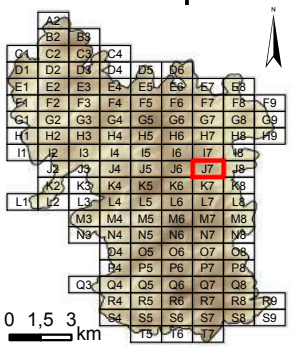
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **J6**

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

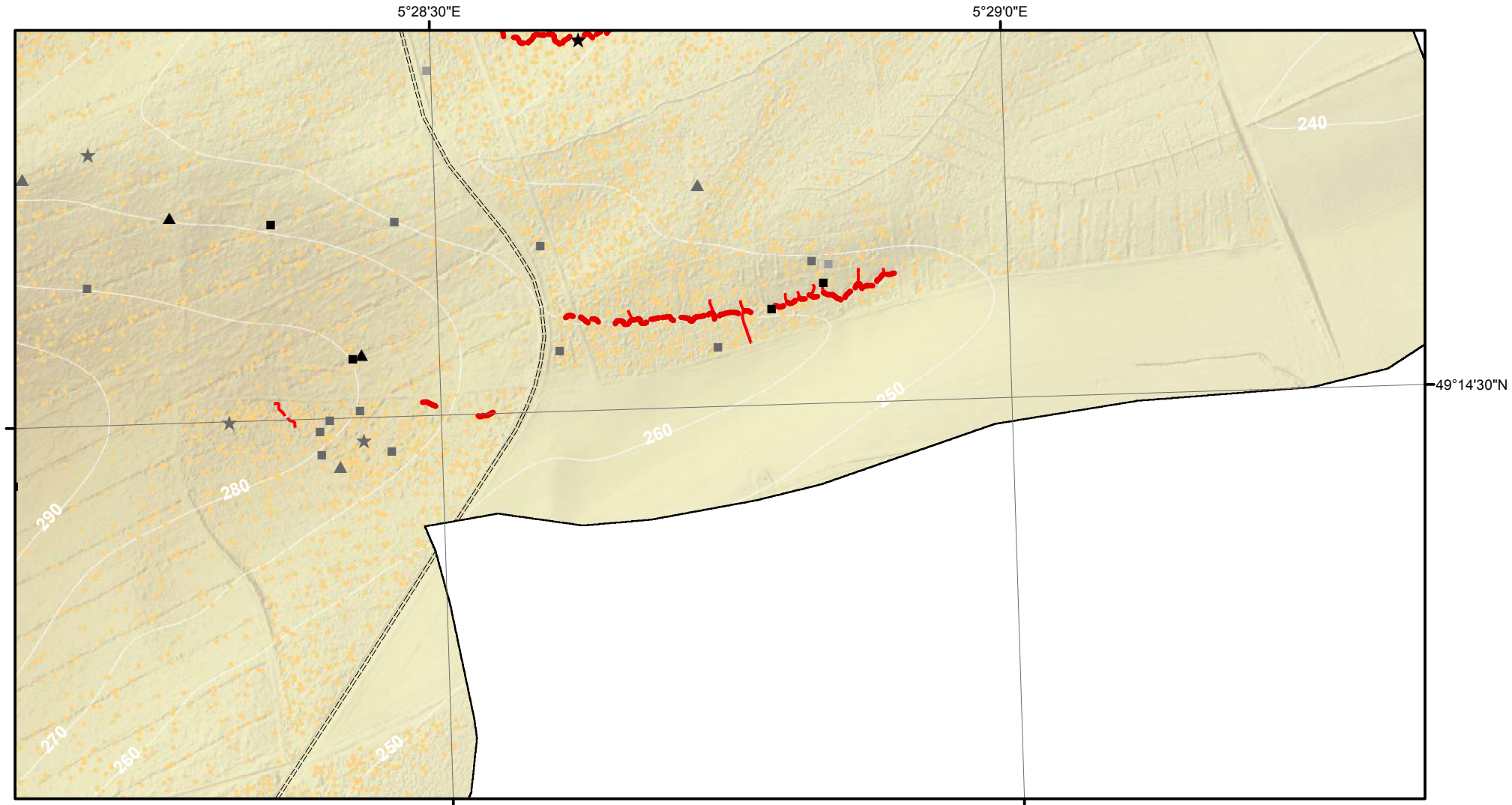
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

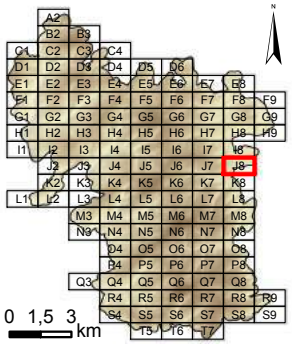
Dalle : **J7**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

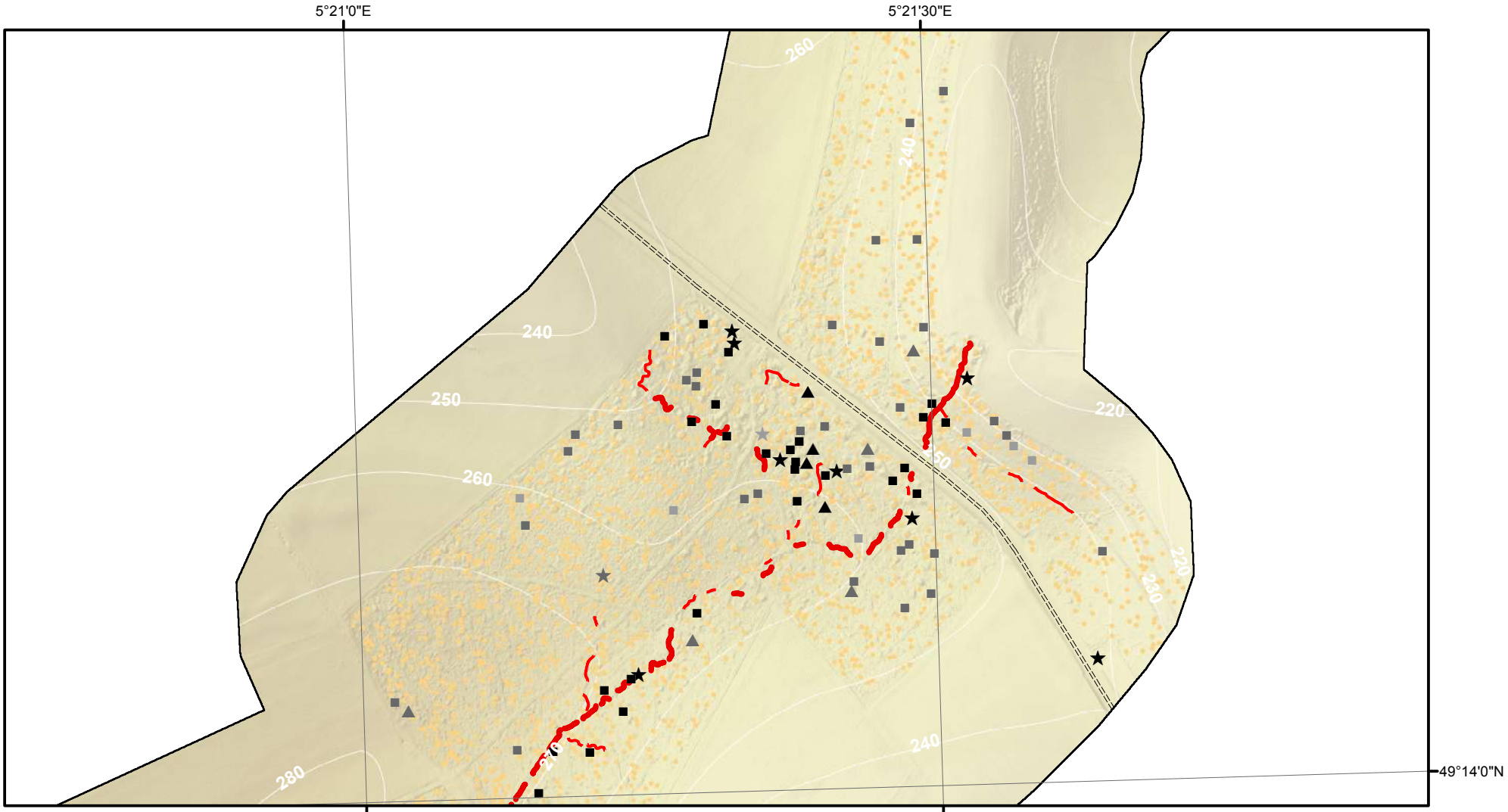
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **J8**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

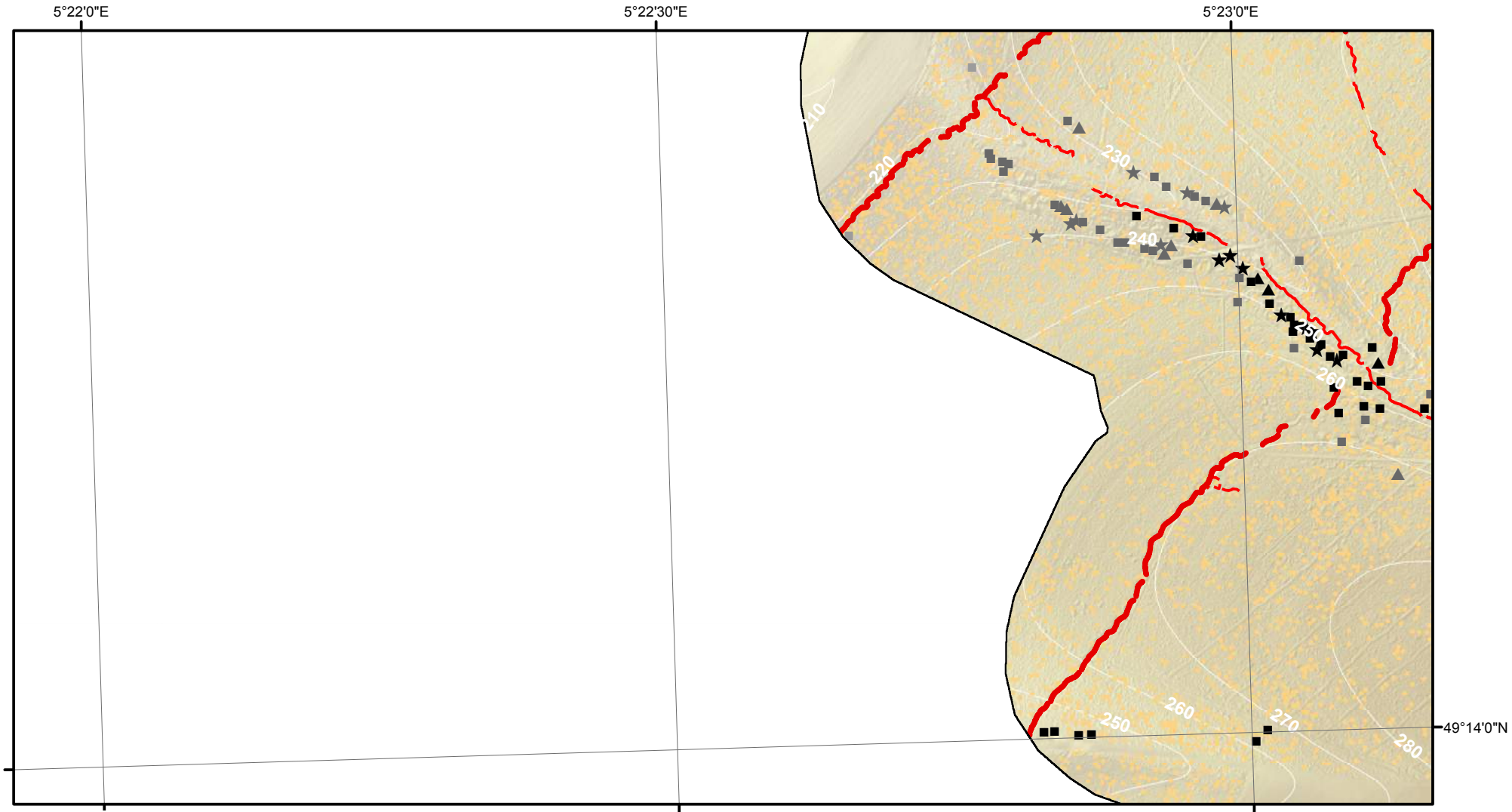
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

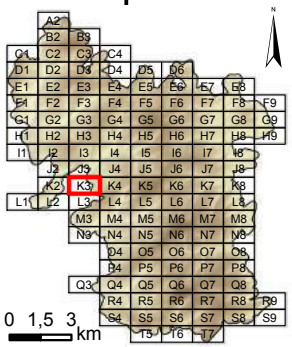
Dalle : **K2**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

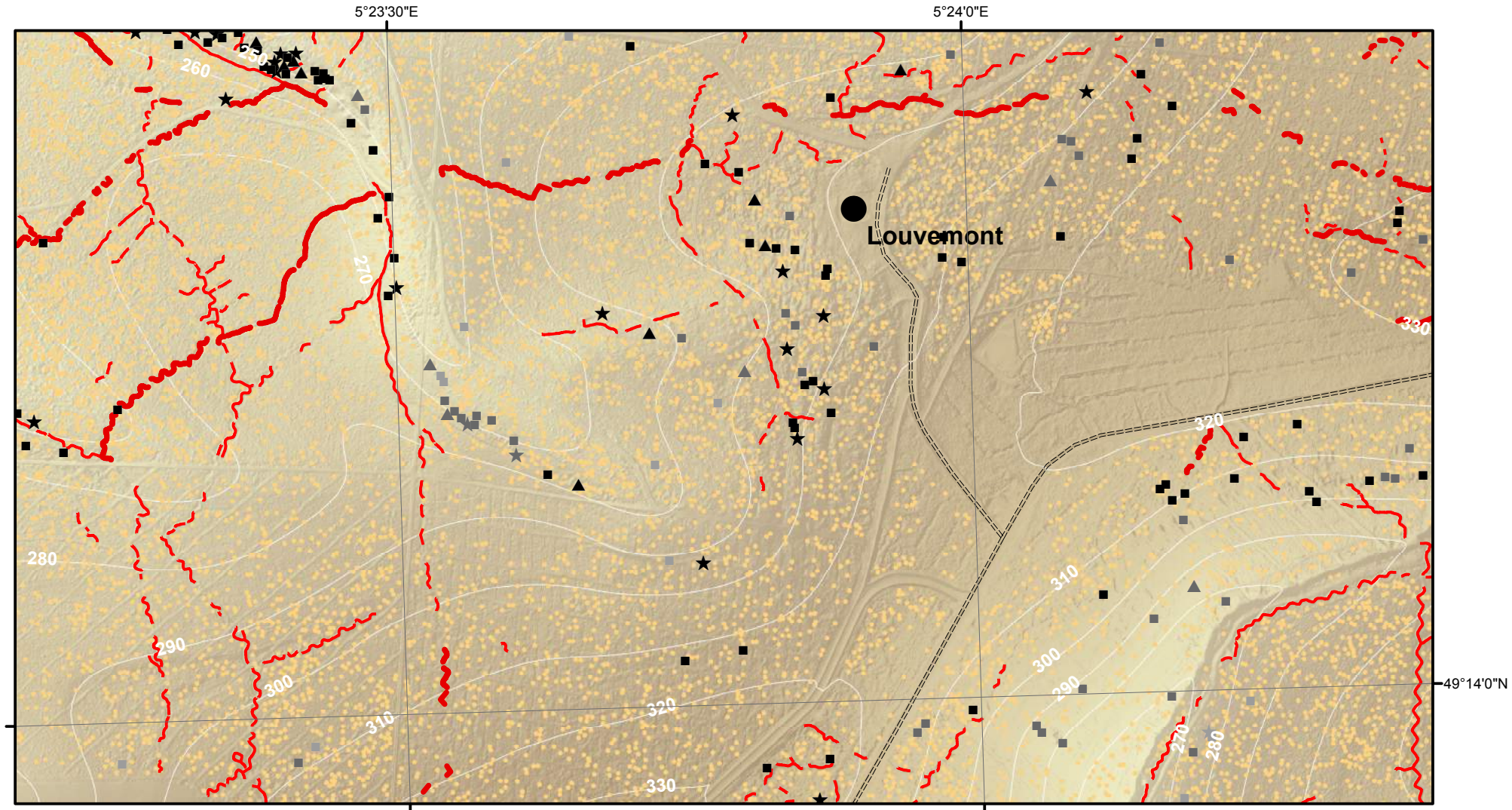
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **K3**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

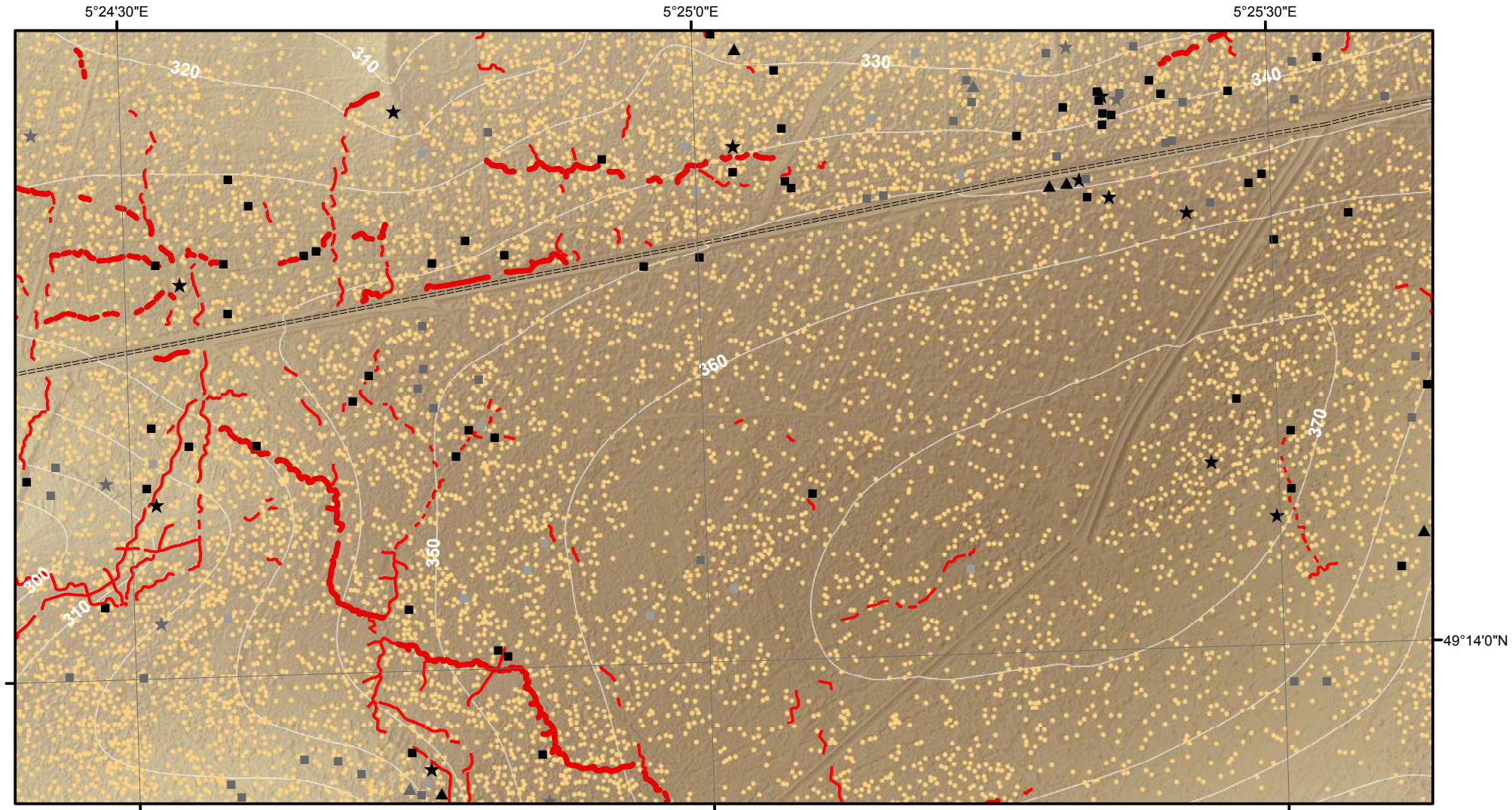
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **K4**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

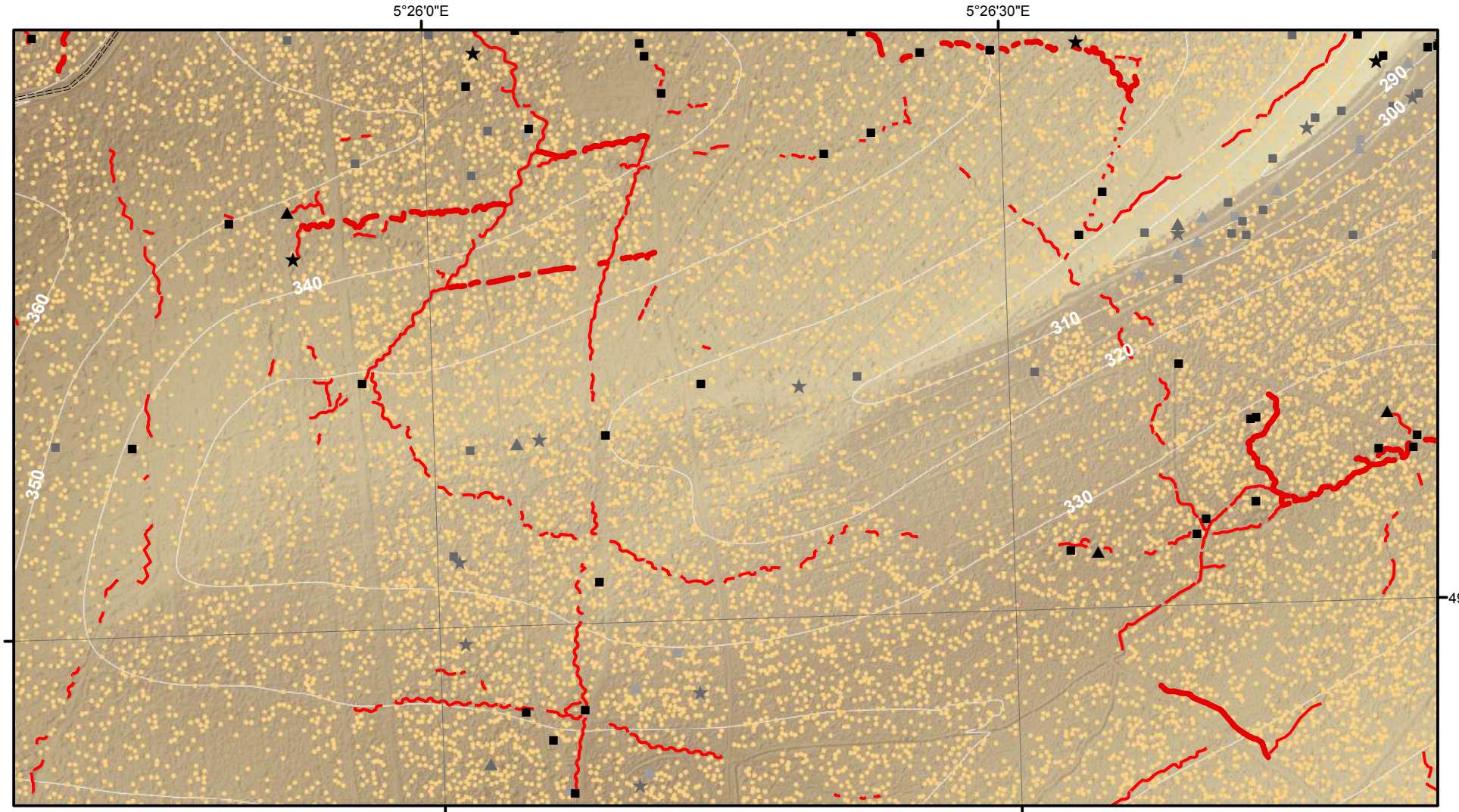
Dalle : **K5**

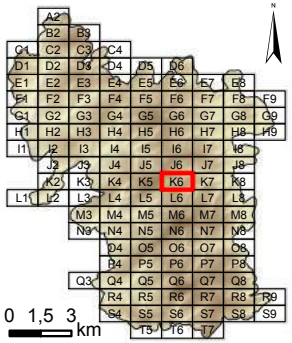
N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

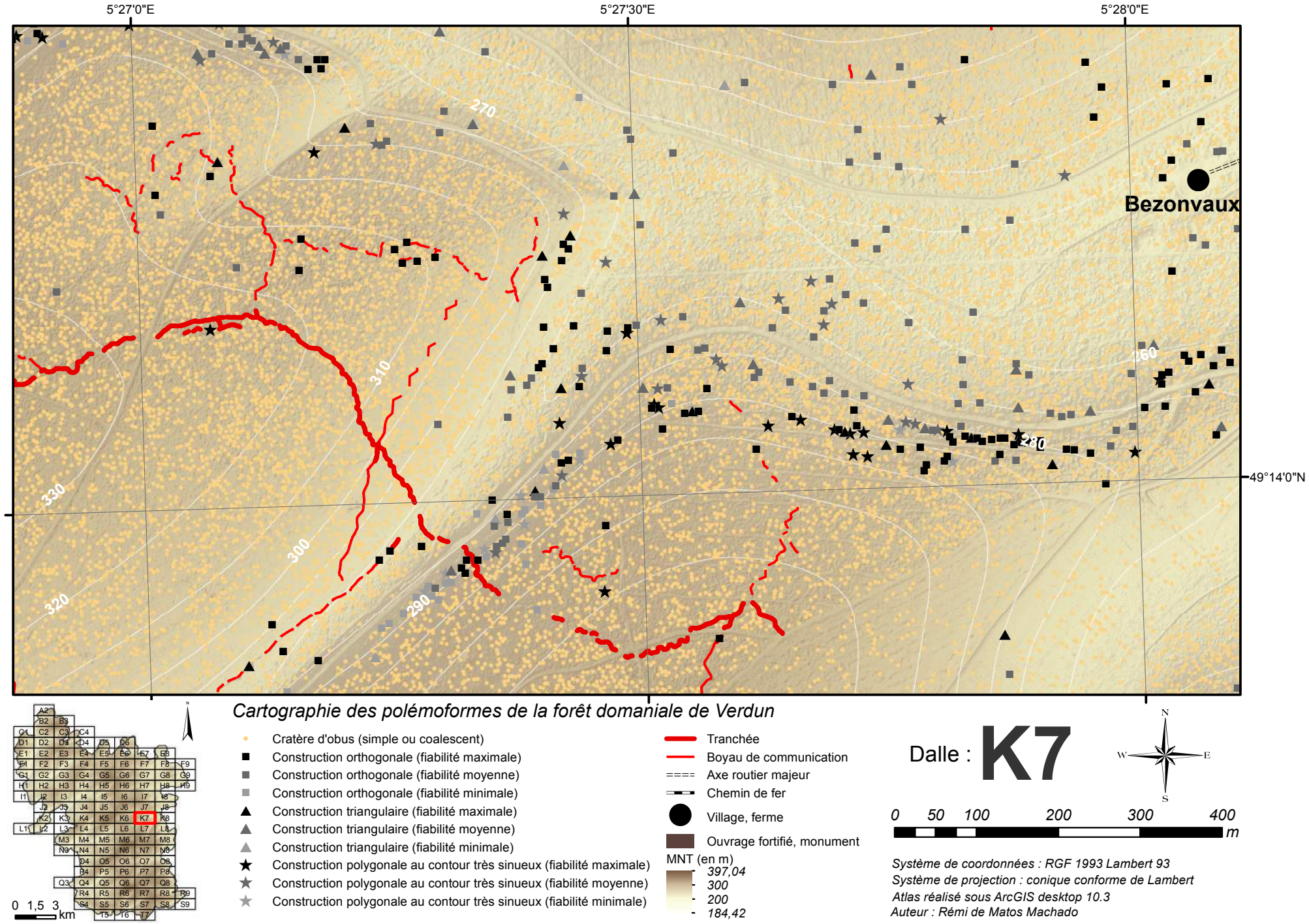
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

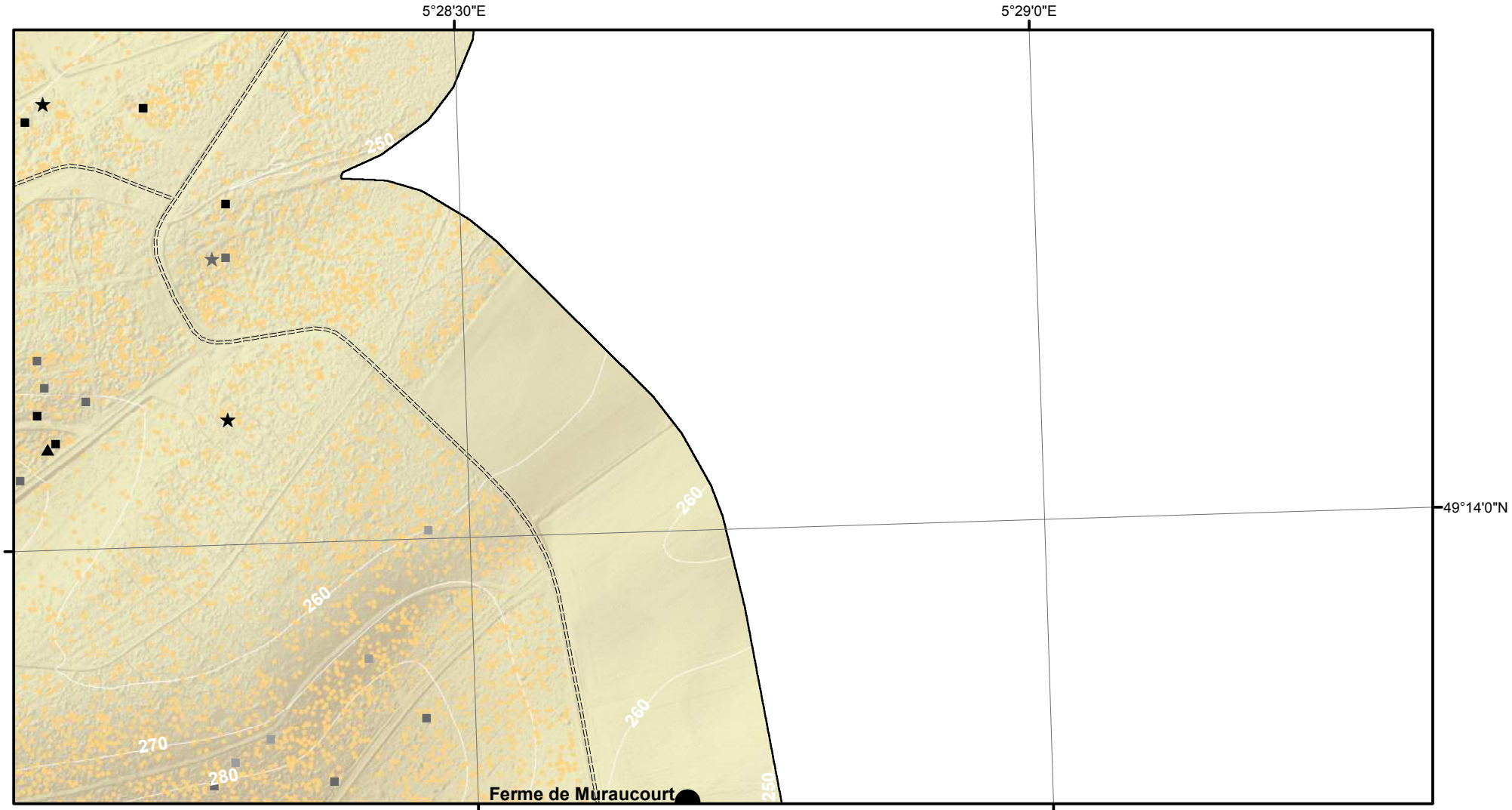
Dalle : **K6**

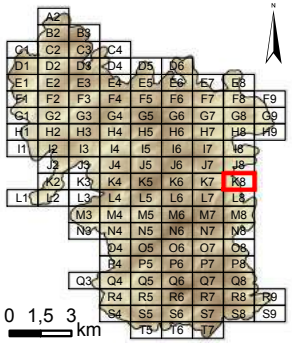
N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado


5°27'0"E
5°27'30"E
5°28'0"E
49°14'0"N
Bezonvaux
270
340
330
300
320
290
280
260
0 1,5 3 km
Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun
Cratère d'obus (simple ou coalescent)
Construction orthogonale (fiabilité maximale)
Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
Construction orthogonale (fiabilité minimale)
Construction triangulaire (fiabilité maximale)
Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
Construction triangulaire (fiabilité minimale)
Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)
Tranchée
Boyau de communication
Axe routier majeur
Chemin de fer
Village, ferme
Ouvrage fortifié, monument
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42
Dalle : K7
N
W
E
S
0 50 100 200 300 400 m
Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

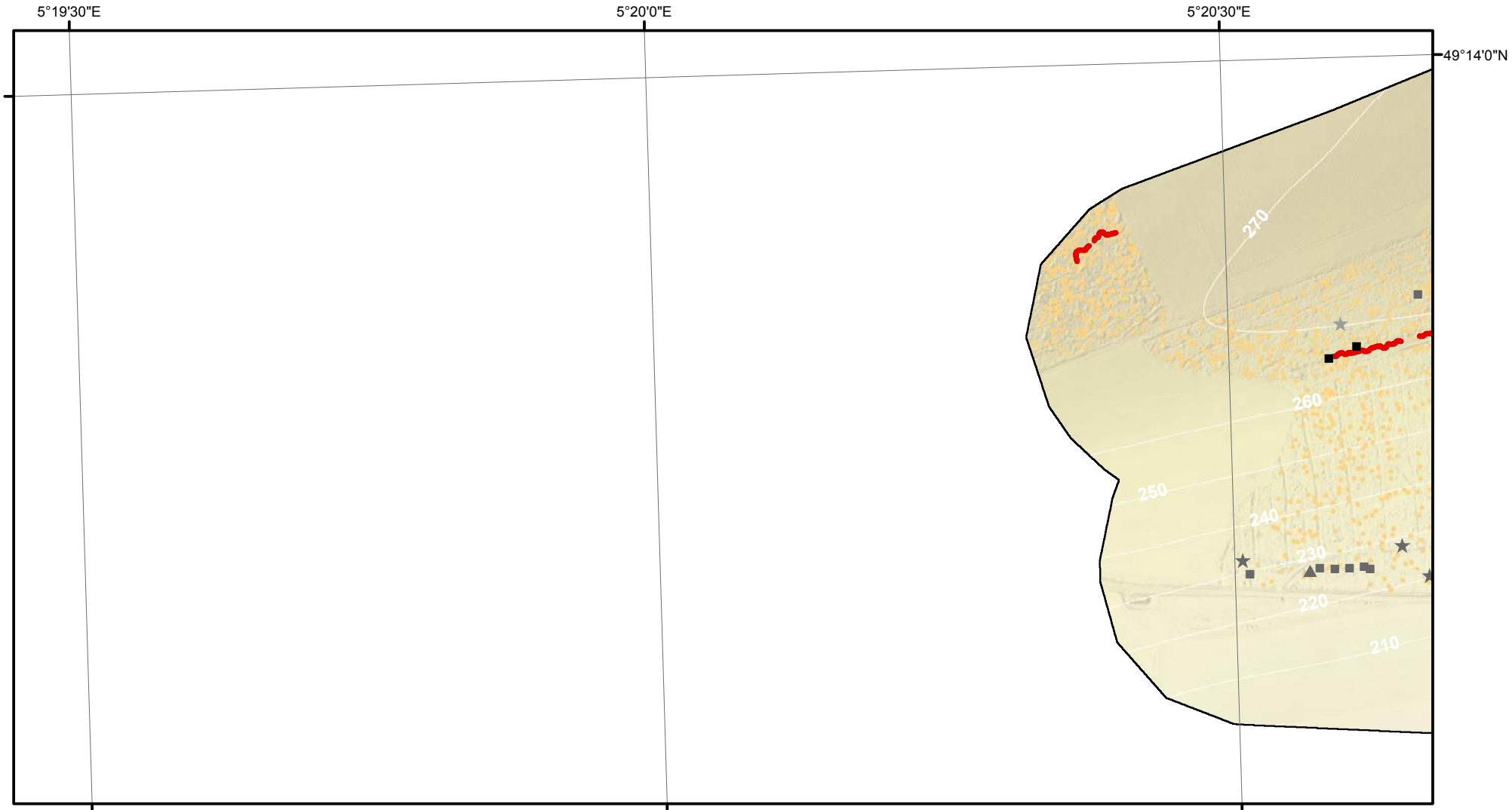
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

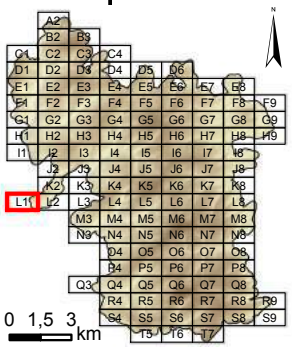
Dalle : **K8**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

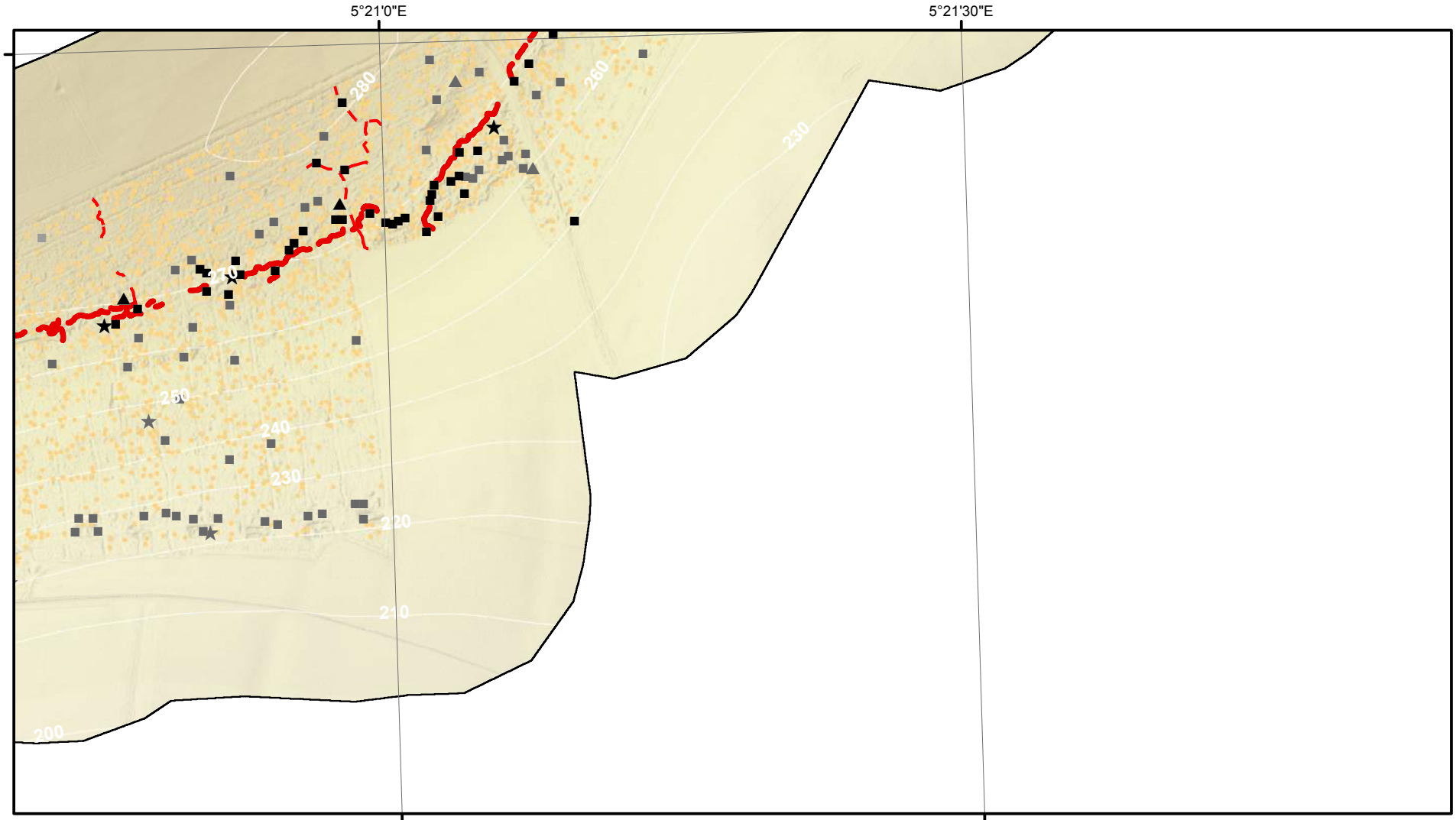
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

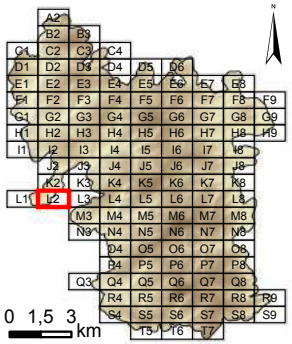
Dalle : **L1**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

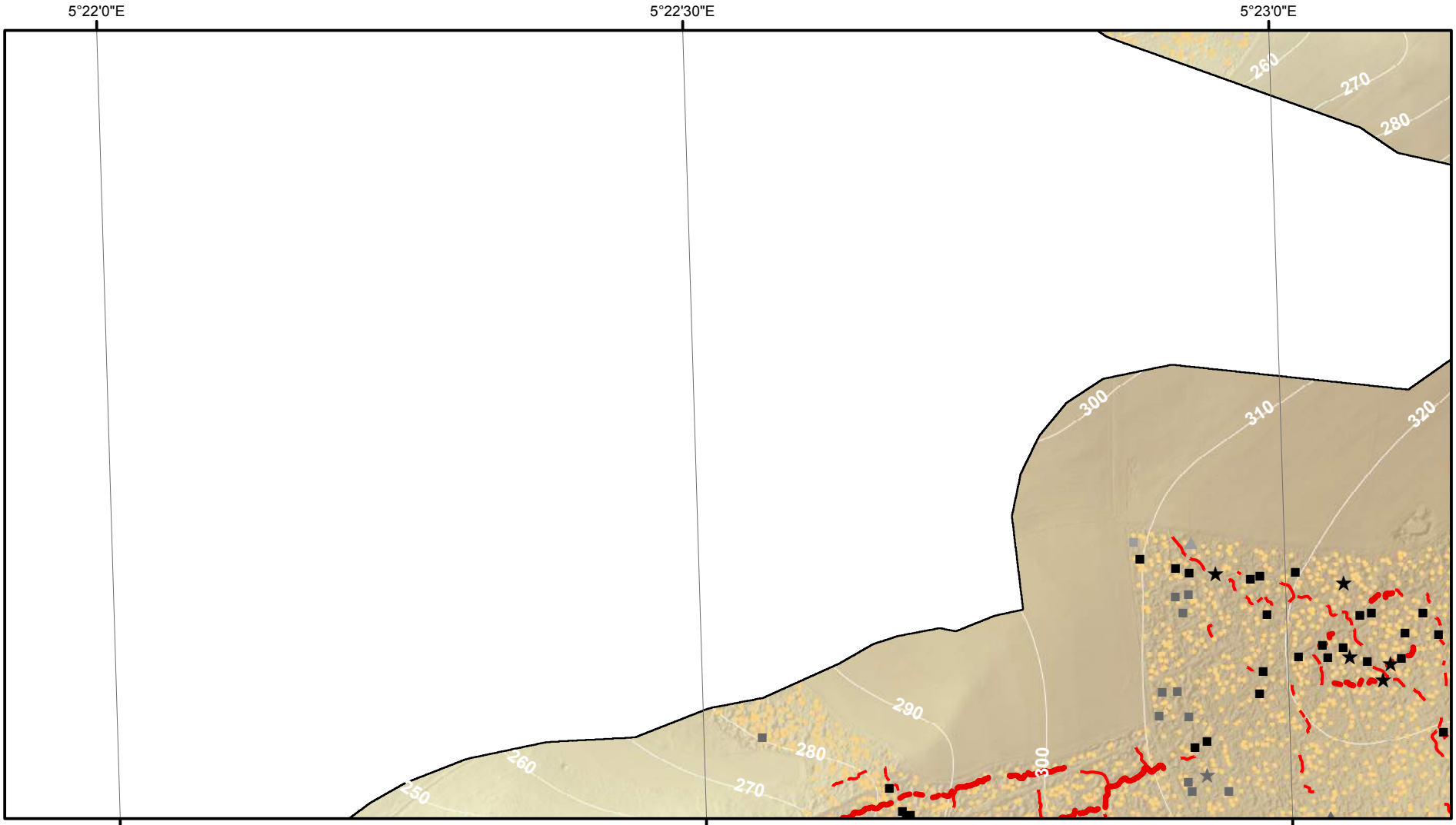
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

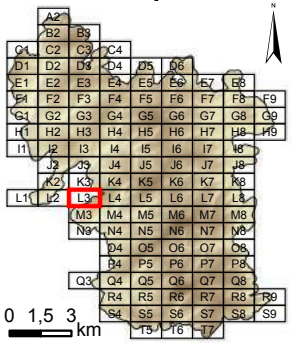
Dalle : **L2**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

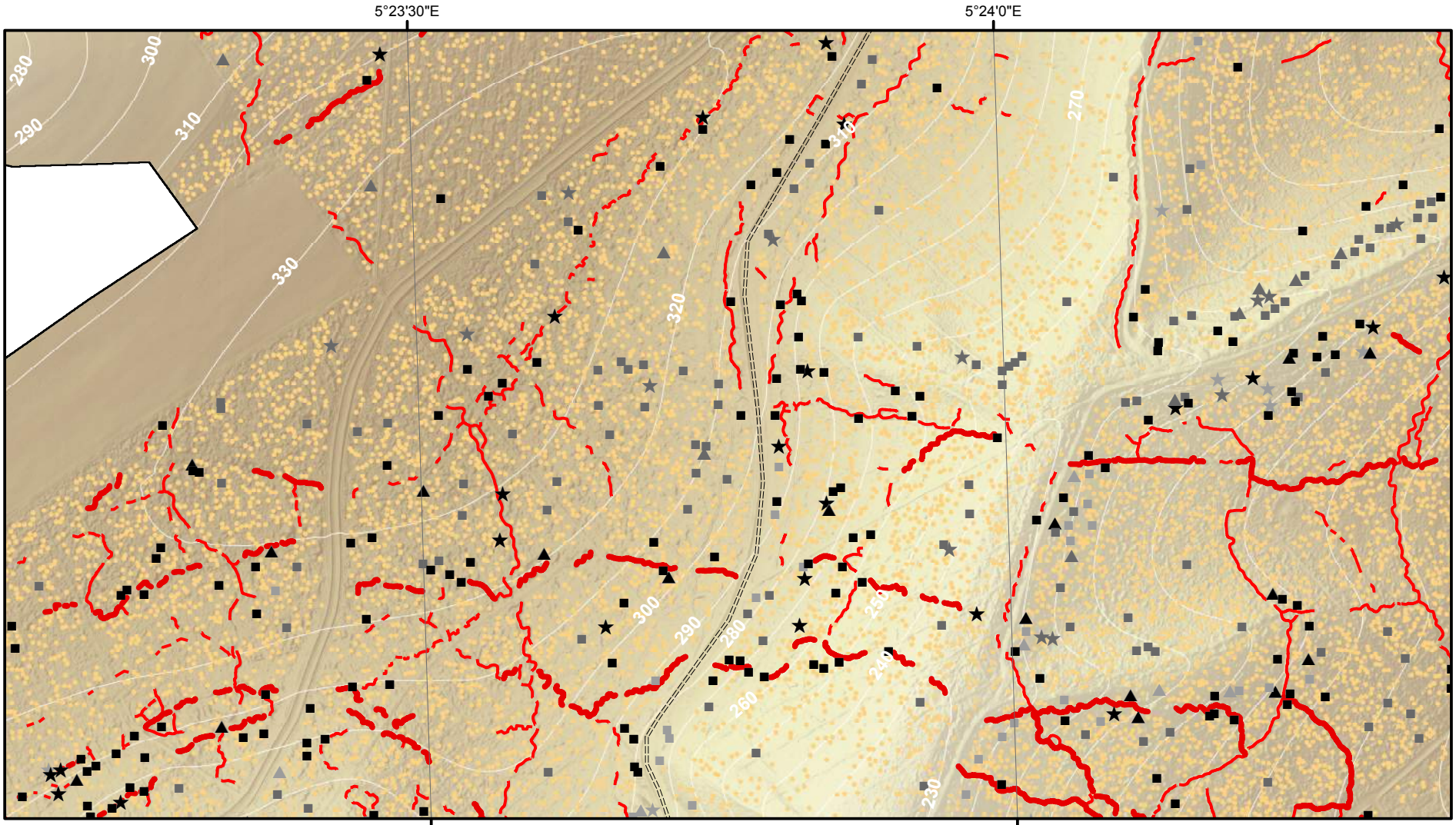
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **L3**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

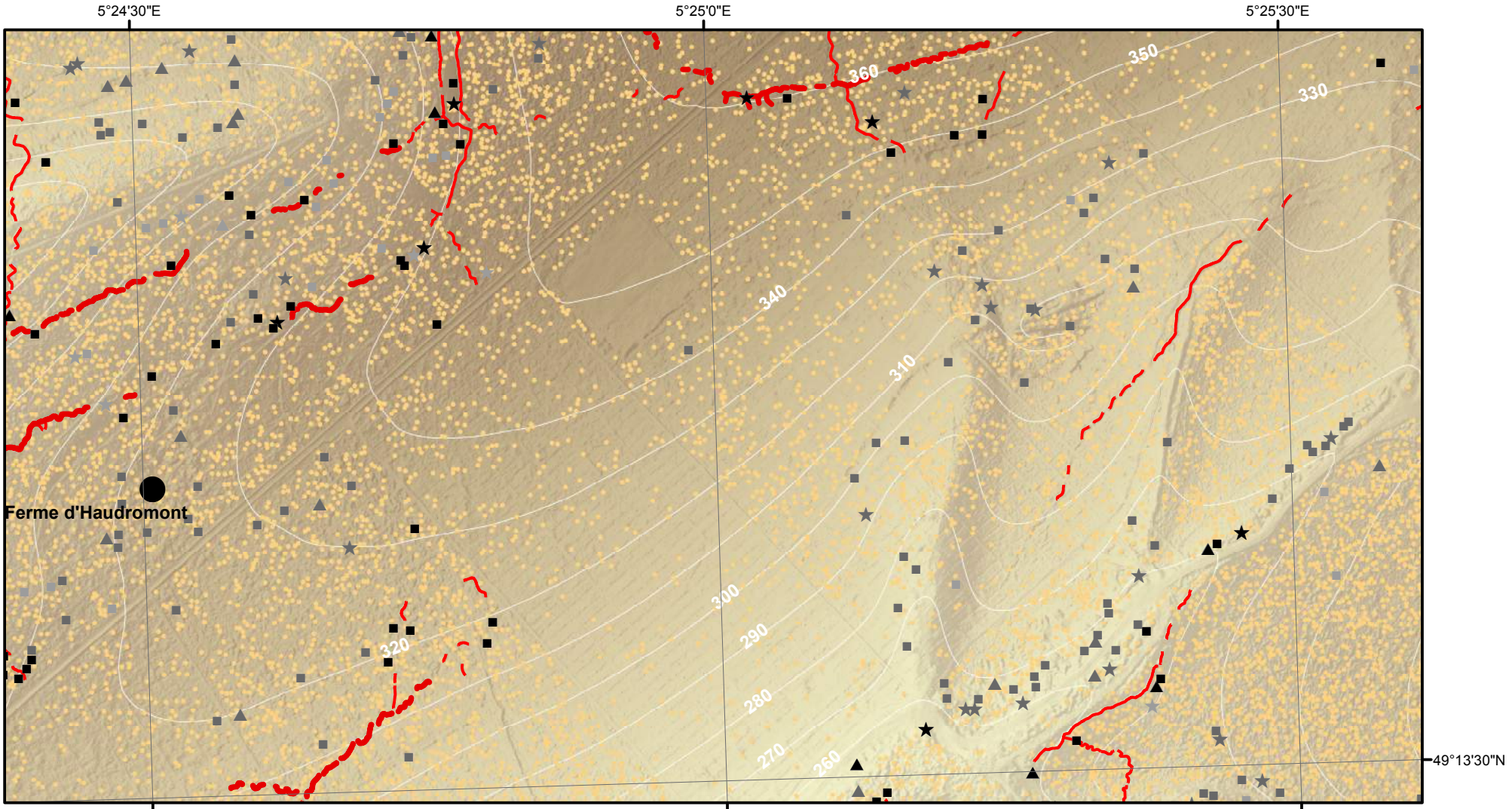
MNT (en m)
- 397,04
- 300
- 200
- 184,42

Dalle : **L4**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

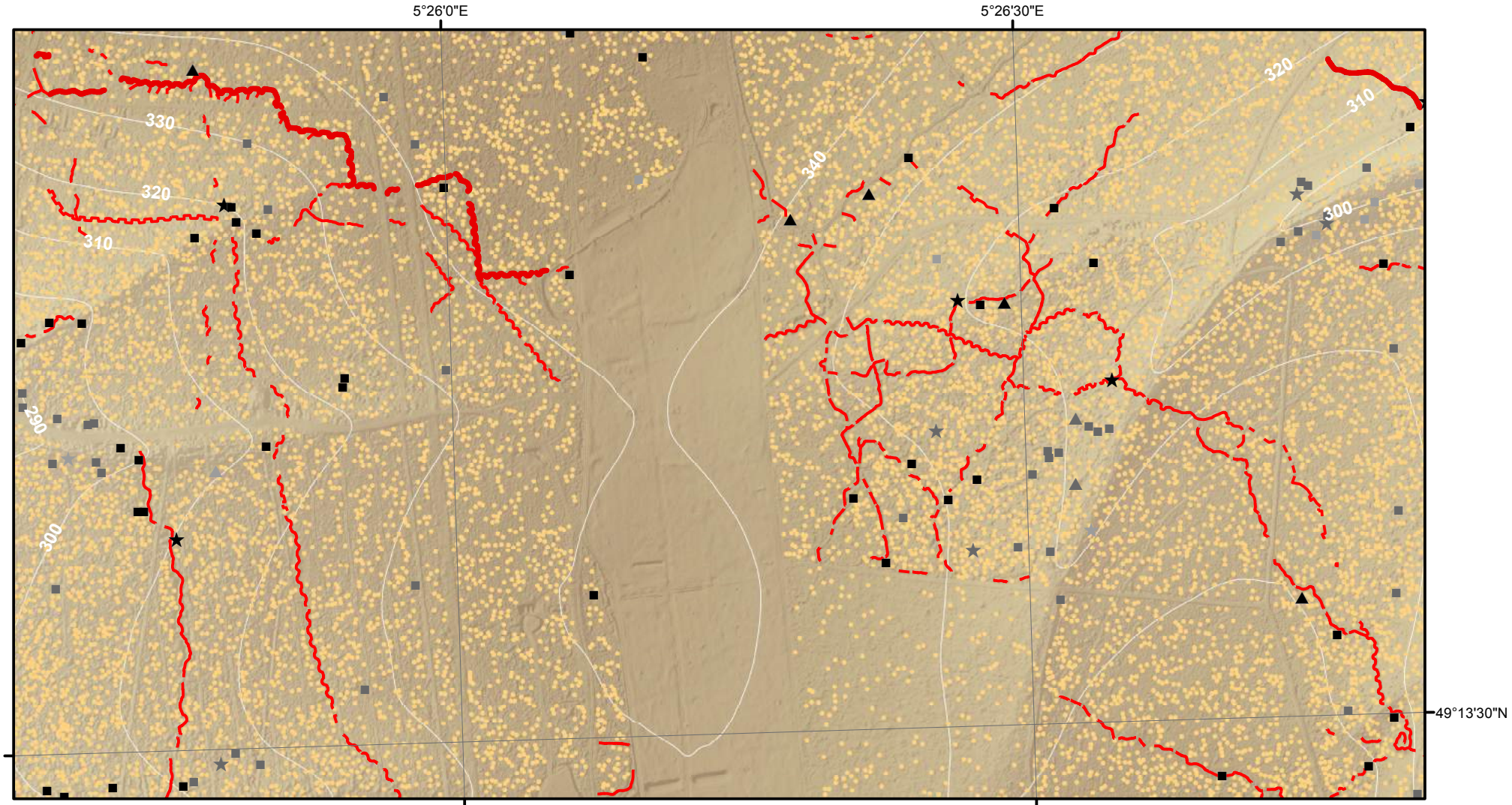
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **L5**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

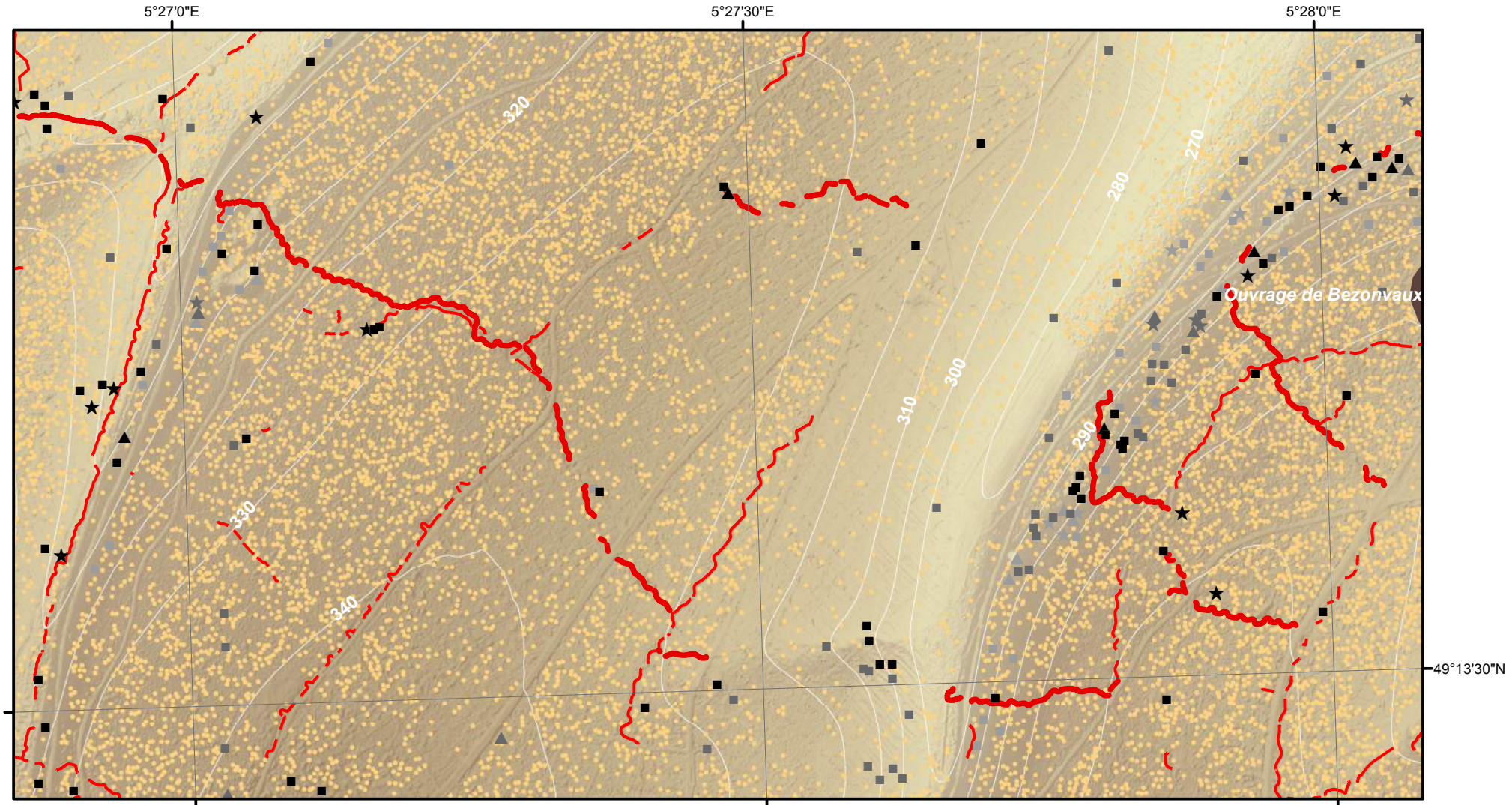
Dalle : **L6**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- 397,04
- 300
- 200
- 184,42

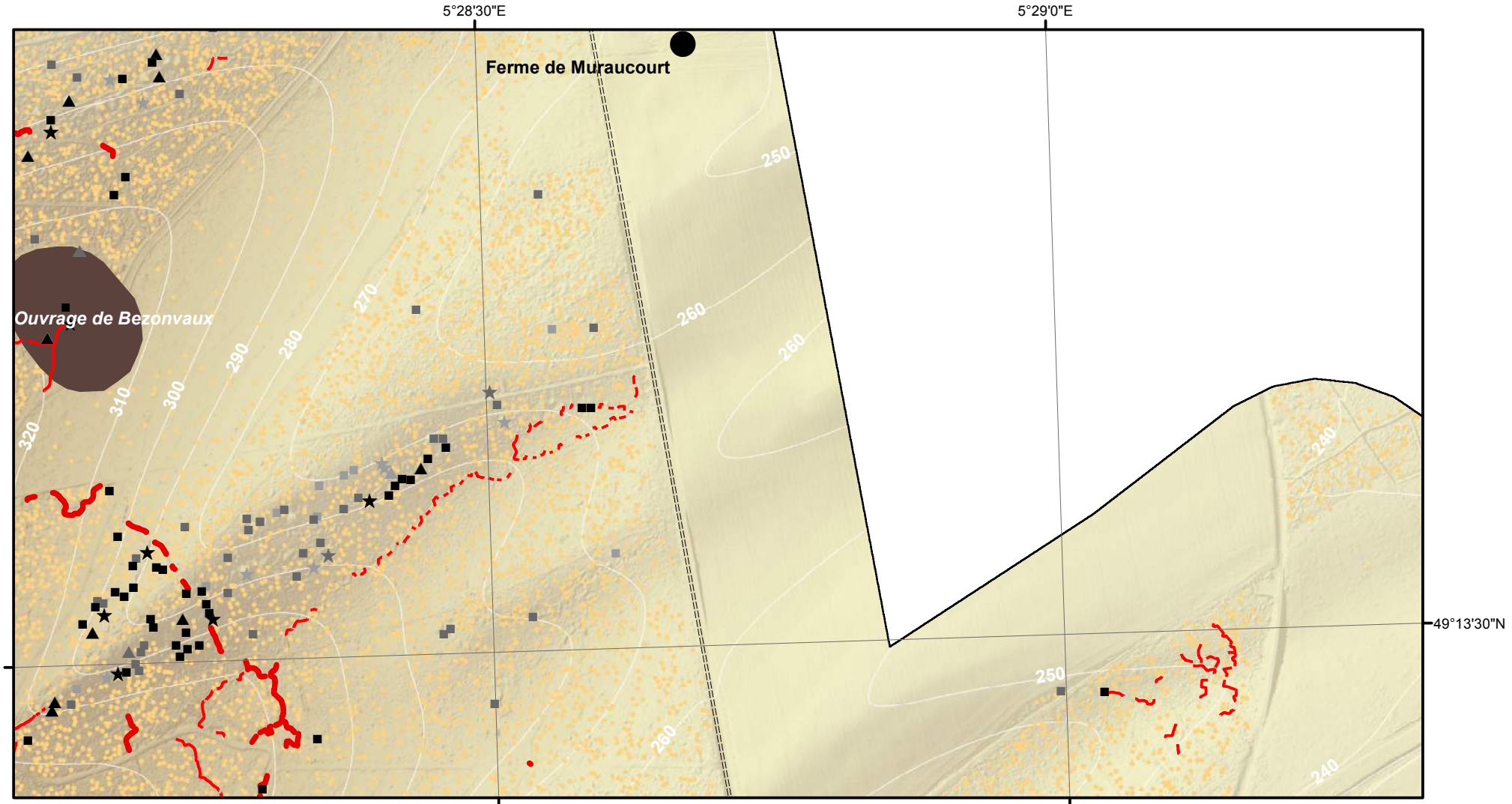
Dalle : **L7**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

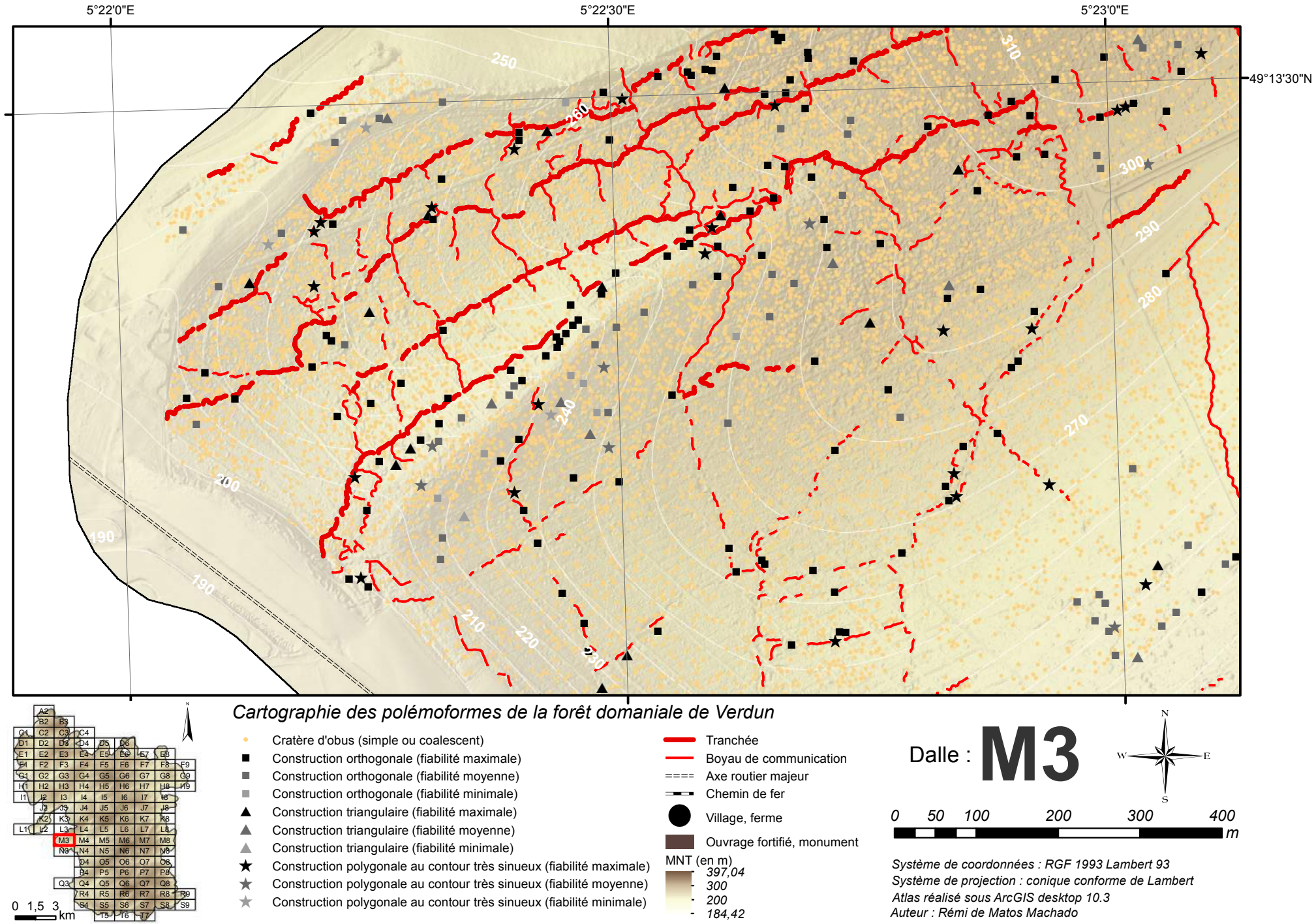
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

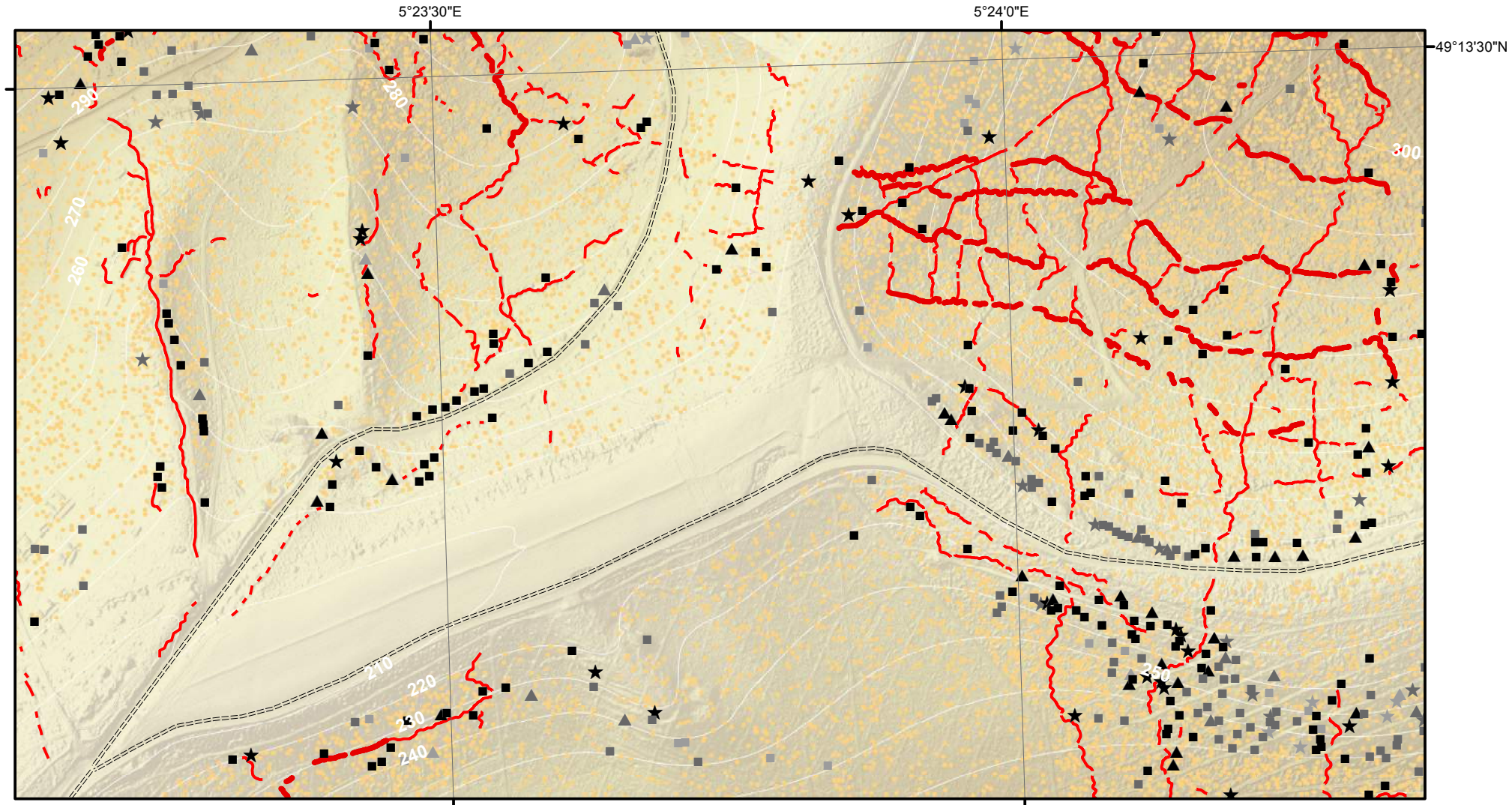
Dalle : **L8**

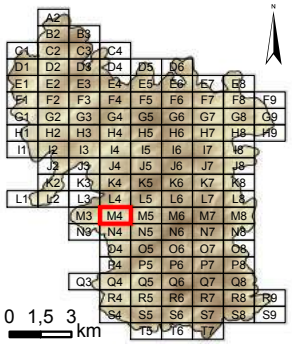
0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado


5°22'0"E
5°22'30"E
5°23'0"E
49°13'30"N
250
260
270
280
290
300
310
240
230
220
210
200
190
190
0 1,5 3 km
Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun
Cratère d'obus (simple ou coalescent)
Construction orthogonale (fiabilité maximale)
Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
Construction orthogonale (fiabilité minimale)
Construction triangulaire (fiabilité maximale)
Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
Construction triangulaire (fiabilité minimale)
Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)
Tranchée
Boyau de communication
Axe routier majeur
Chemin de fer
Village, ferme
Ouvrage fortifié, monument
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42
Dalle : M3
N
W
E
S
0 50 100 200 300 400 m
Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

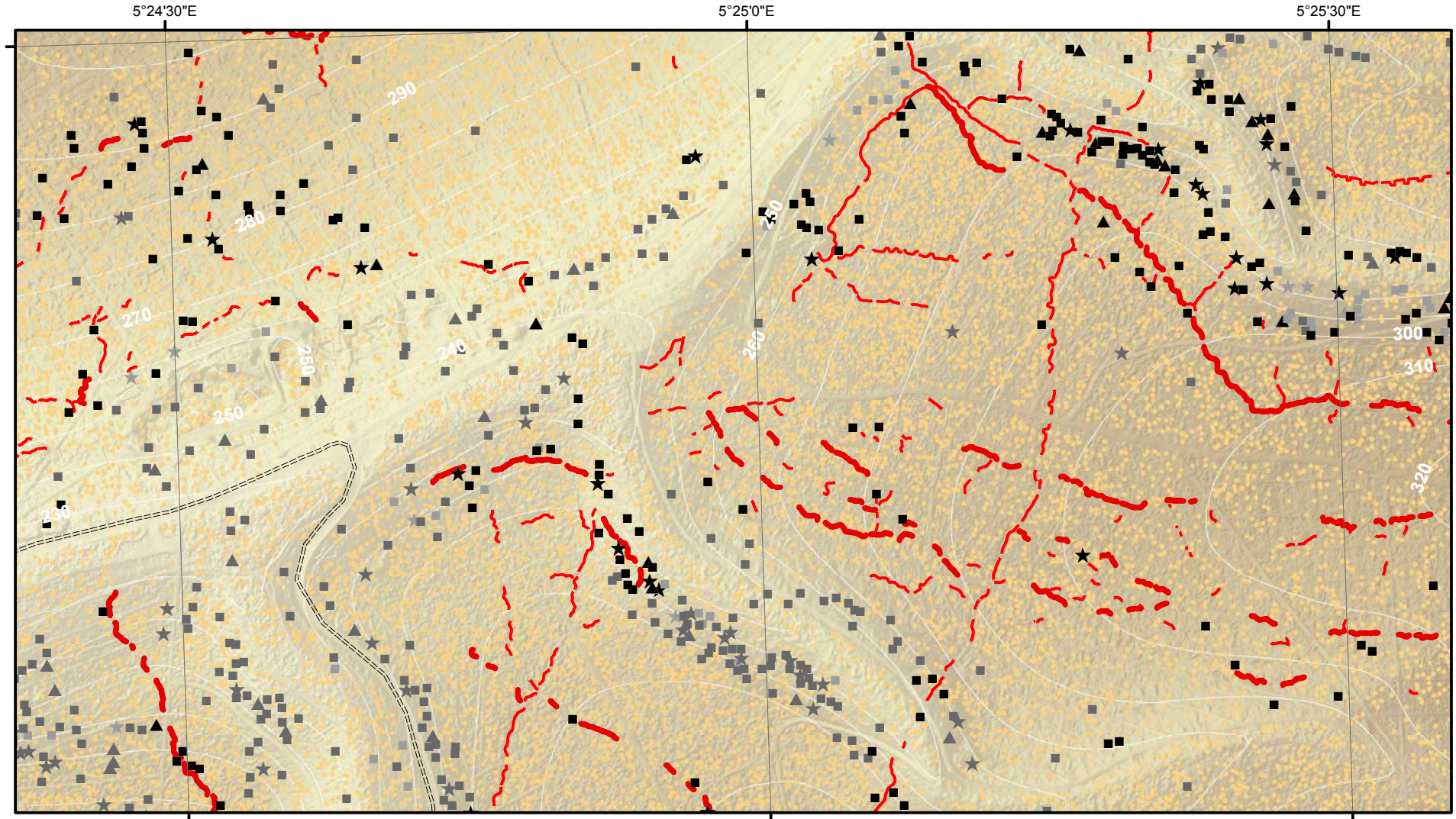
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **M4**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

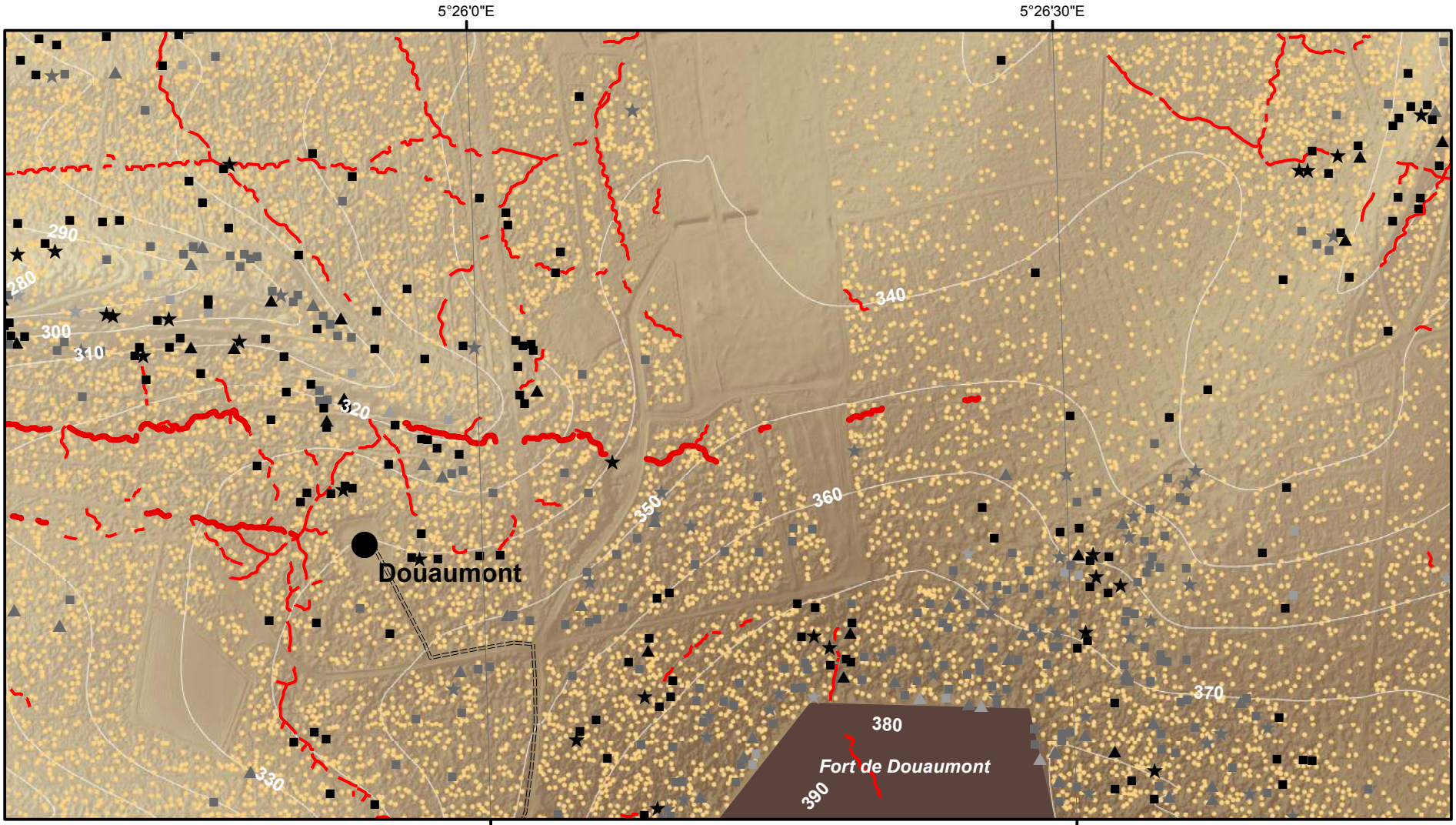
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

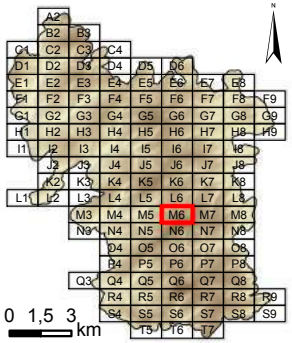
Dalle : **M5**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

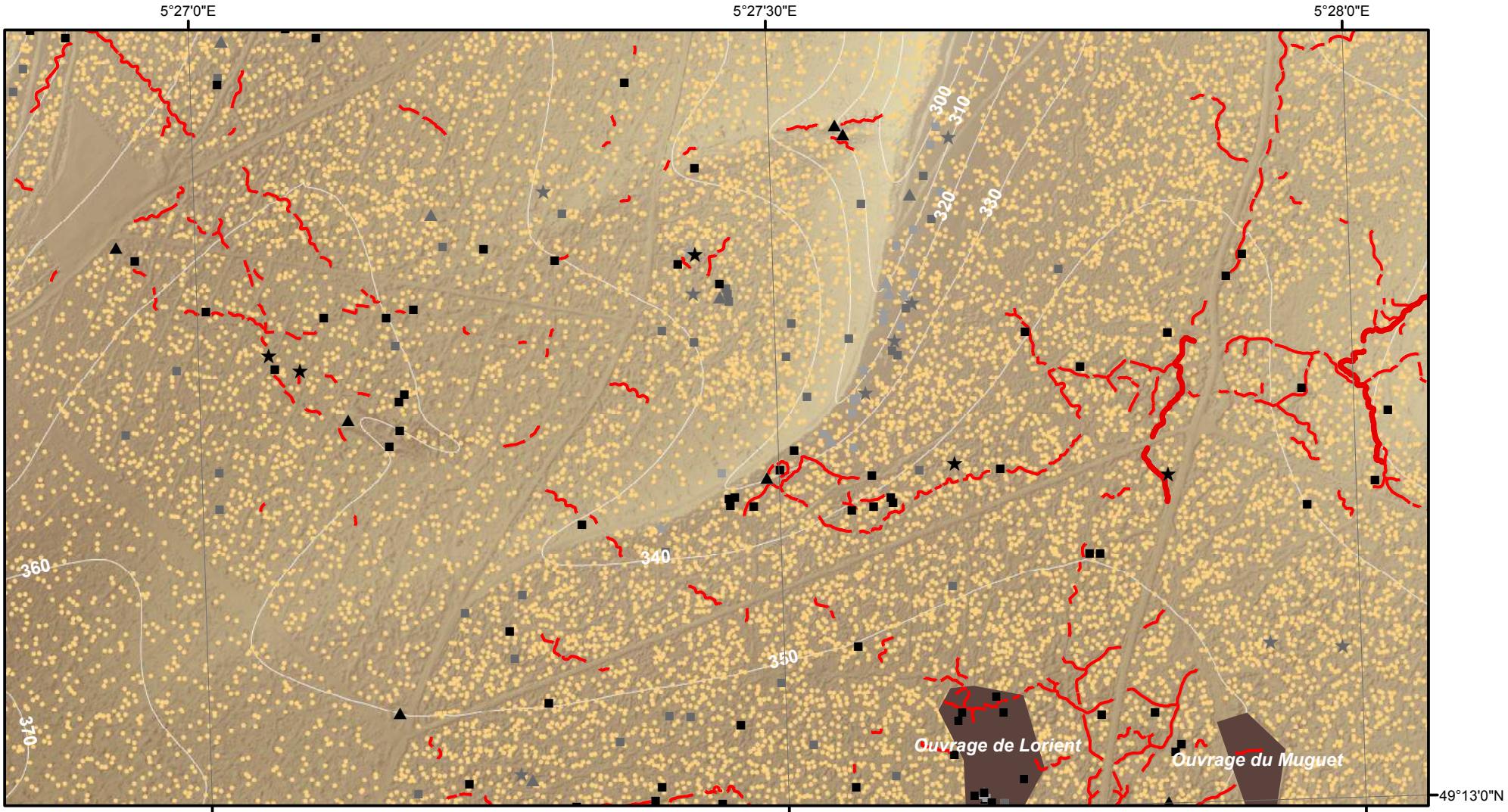
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

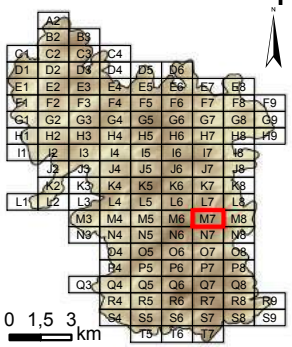
Dalle : **M6**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

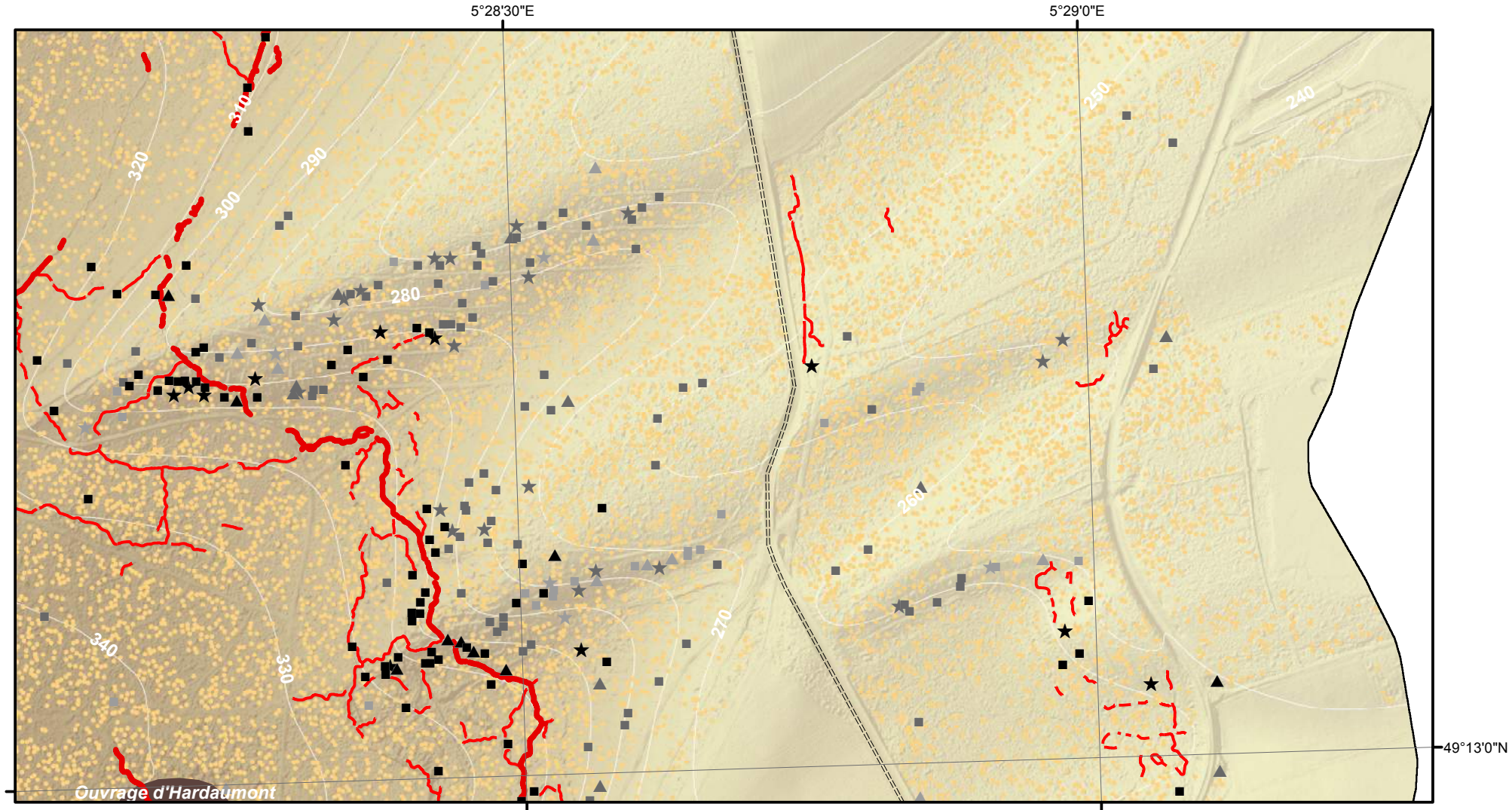
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

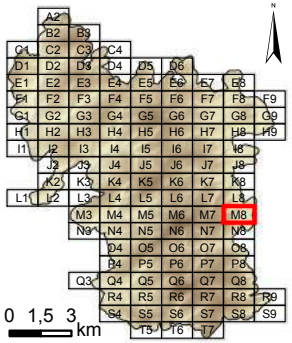
Dalle : **M7**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

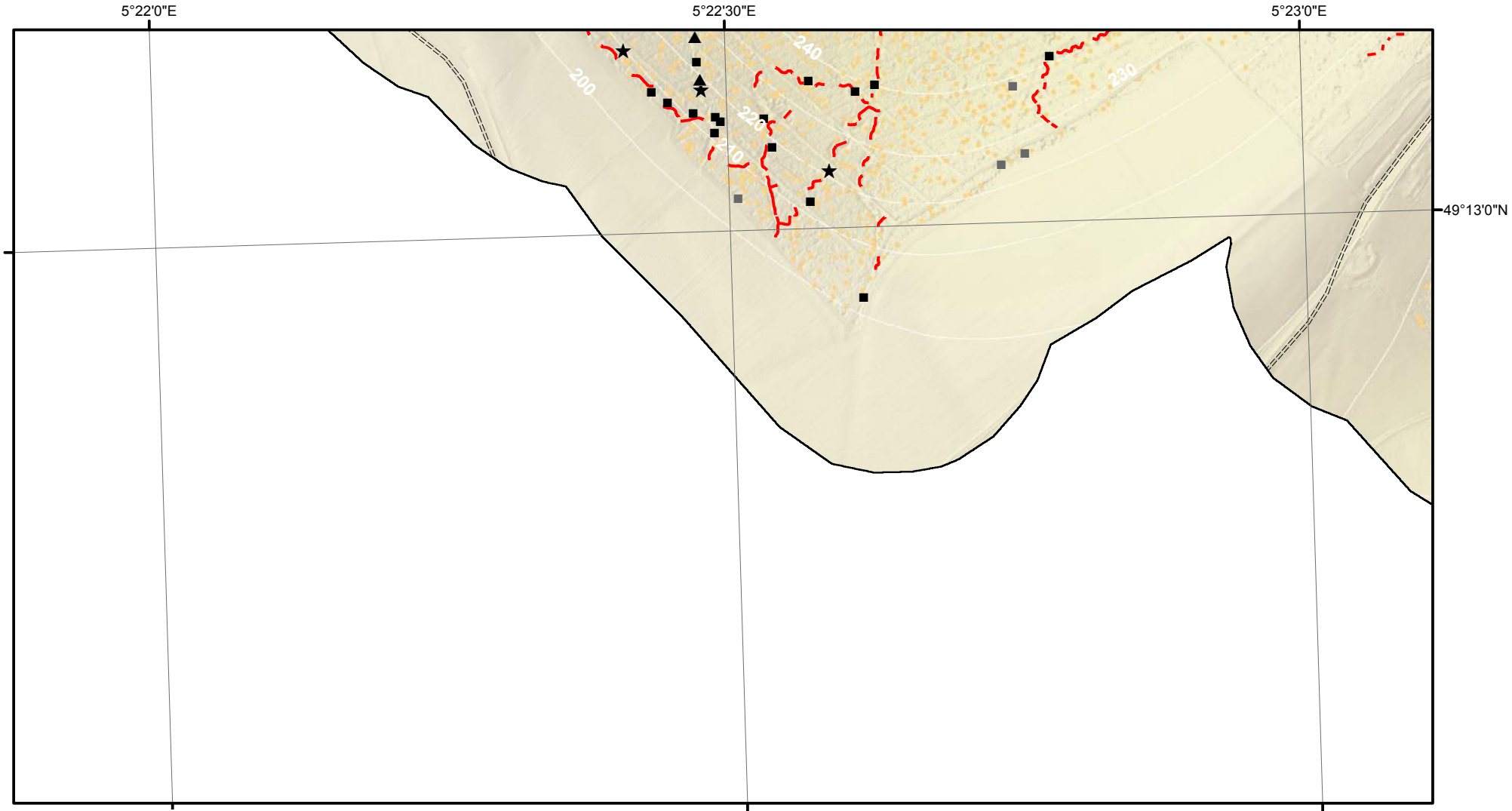
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

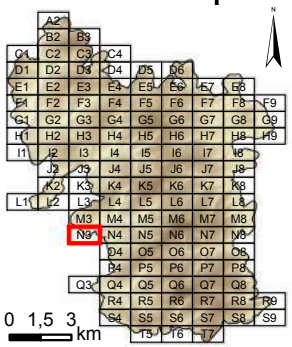
Dalle : **M8**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

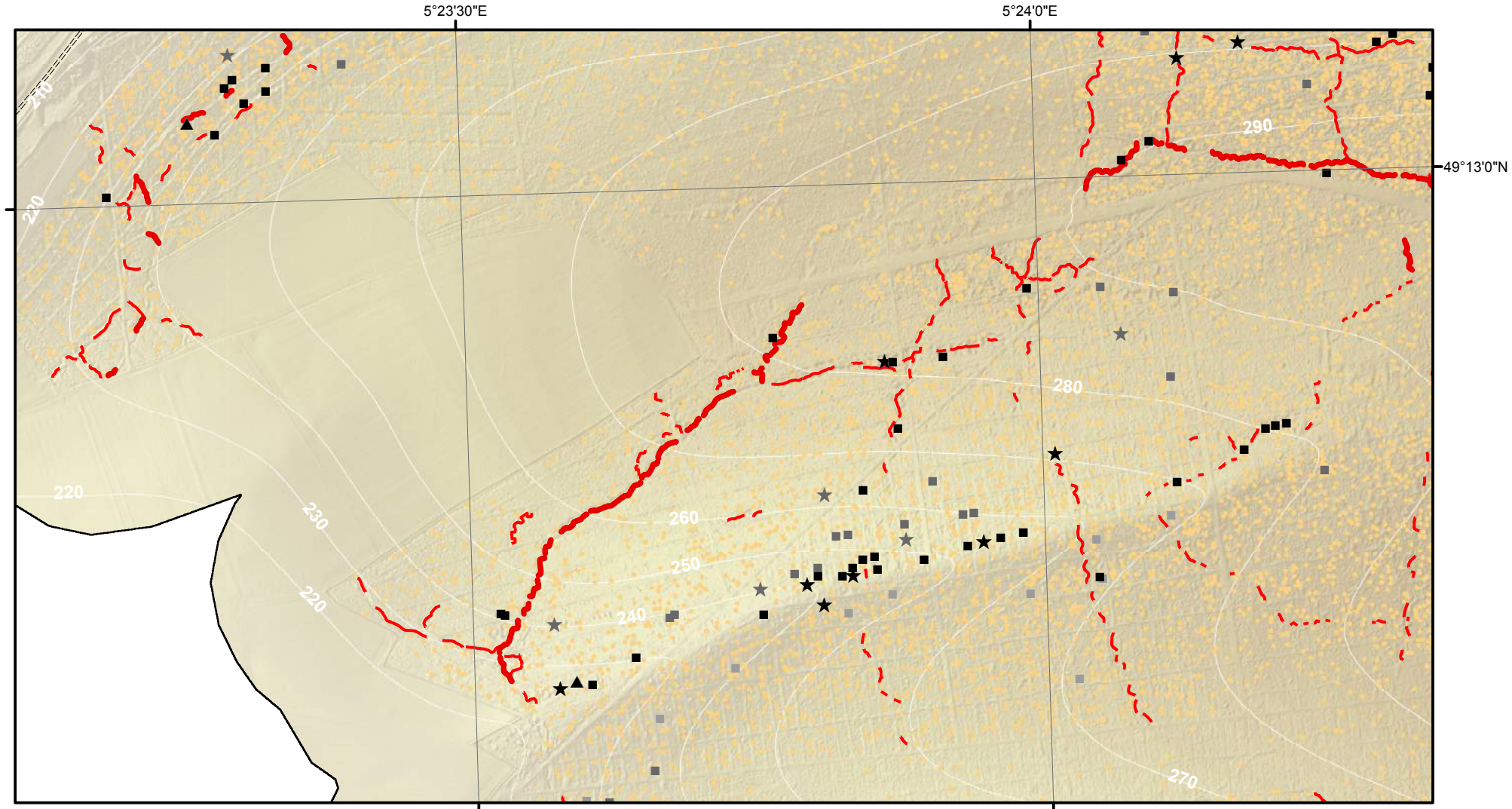
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **N3**

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

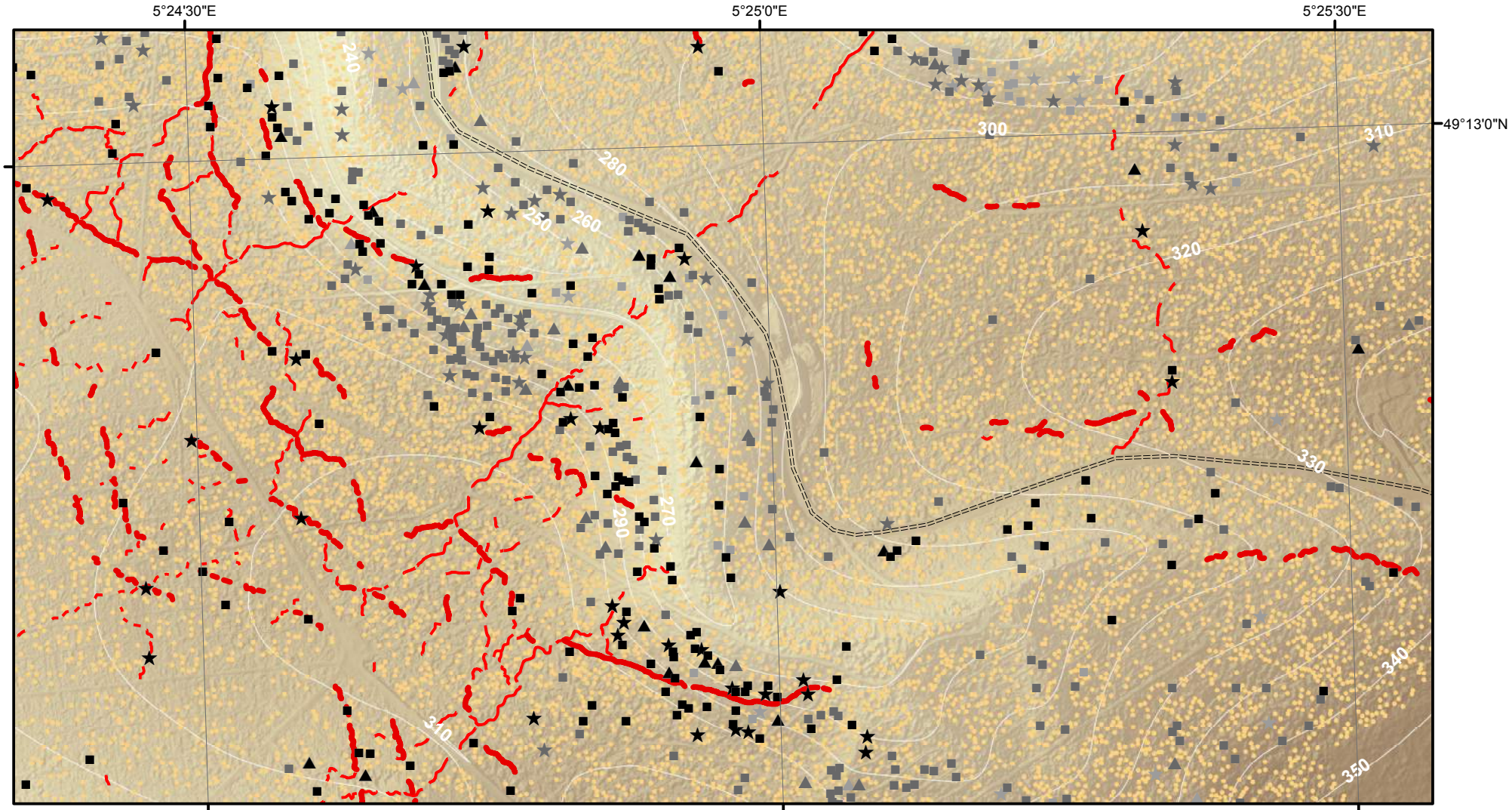
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **N4**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

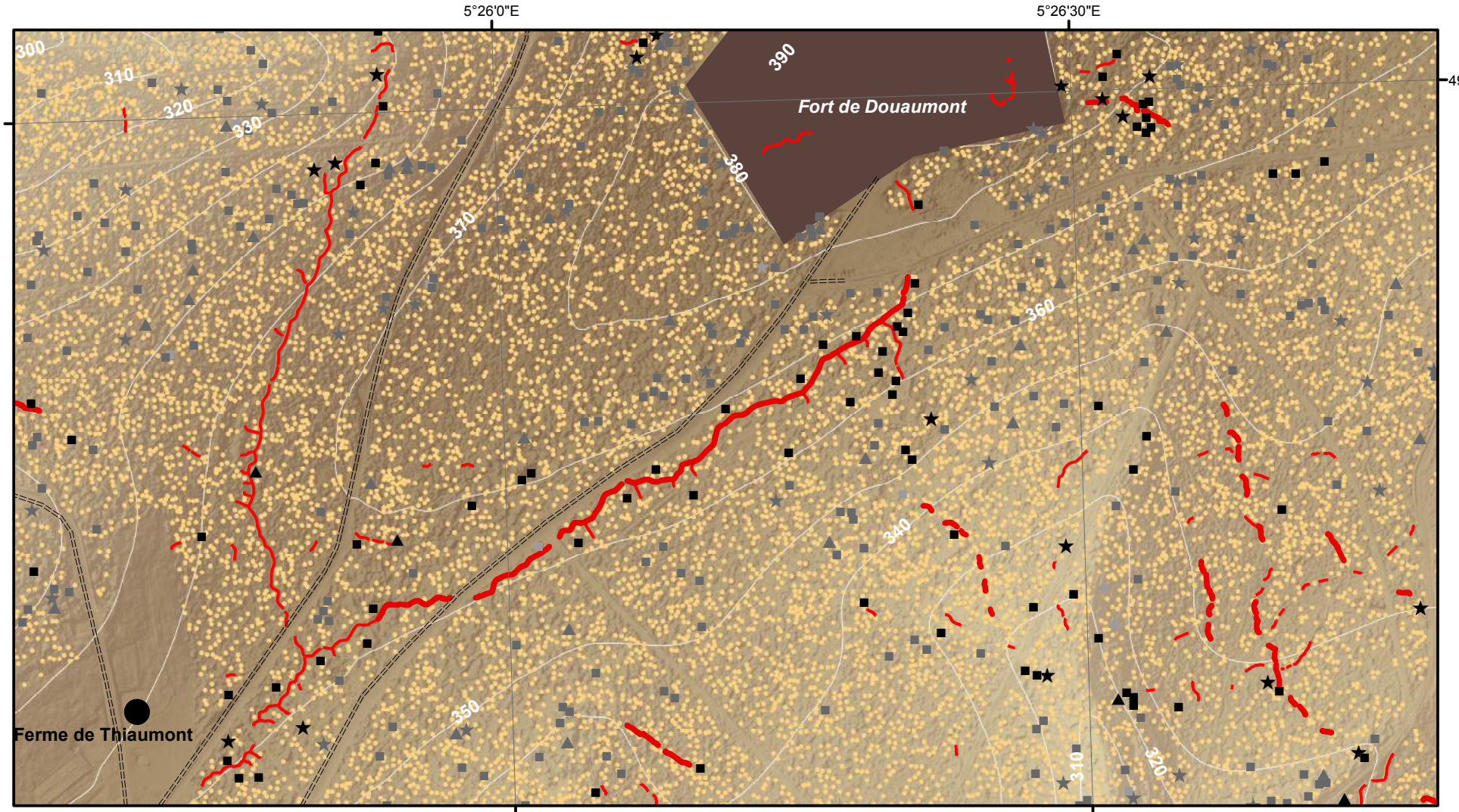
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

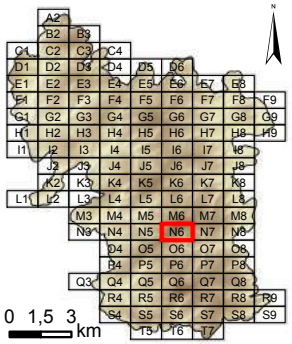
Dalle : **N5**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

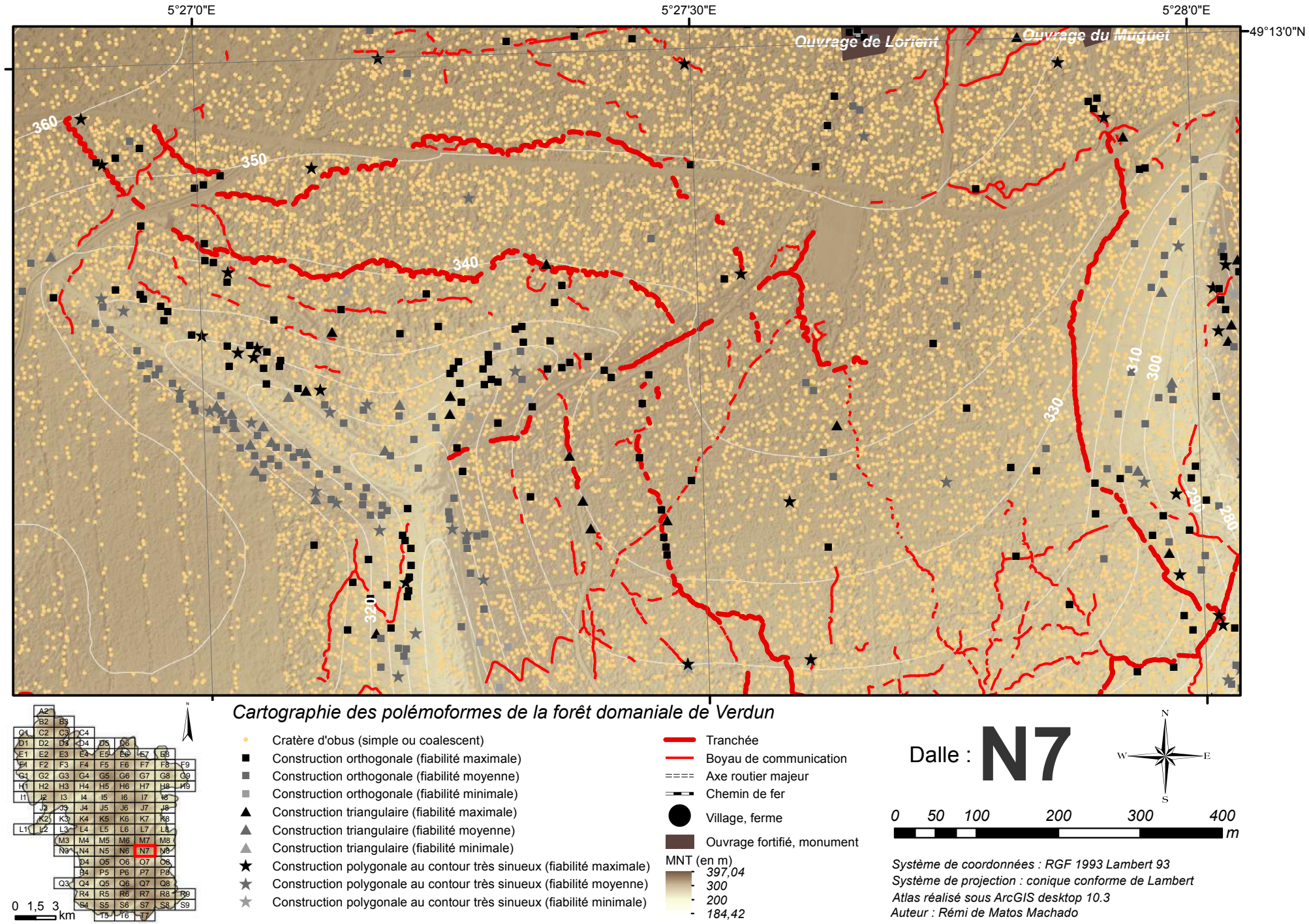
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

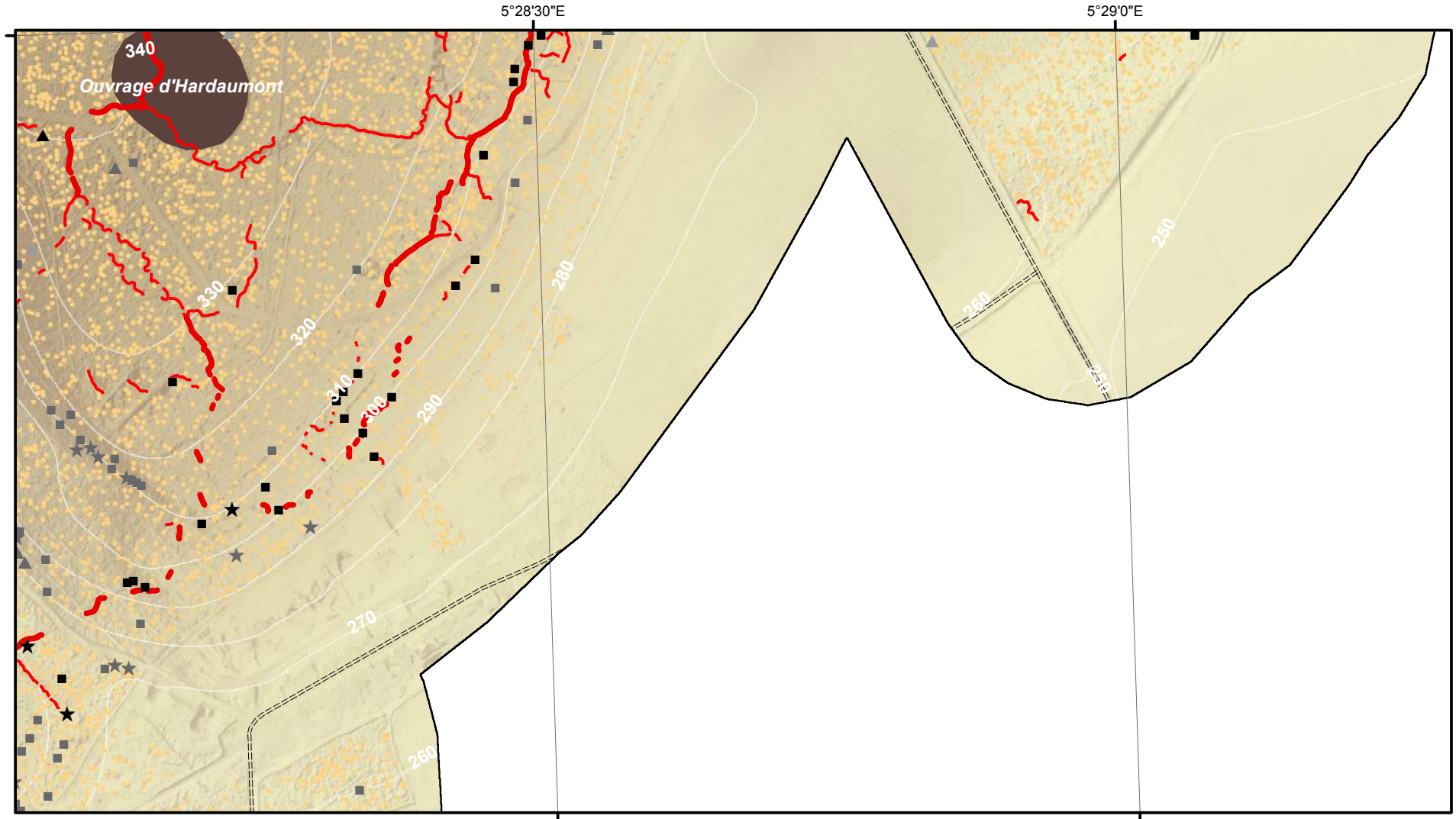
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

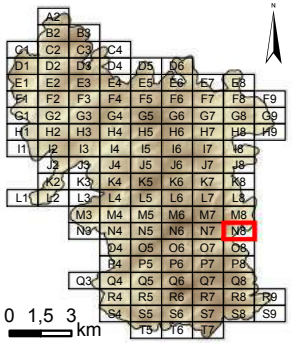
Dalle : **N6**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado


5°27'0"E
5°27'30"E
5°28'0"E
49°13'0"N
Ouvrage de Lorient
Ouvrage du Muguet
360
350
340
330
320
310
300
290
280
A2 B2 B3
C1 C2 C3 C4
D1 D2 D3 D4 D5 D6
E1 E2 E3 E4 E5 E6 E7 E8
F1 F2 F3 F4 F5 F6 F7 F8 F9
G1 G2 G3 G4 G5 G6 G7 G8 G9
H1 H2 H3 H4 H5 H6 H7 H8 H9
I1 I2 I3 I4 I5 I6 I7 I8
J2 J3 J4 J5 J6 J7 J8
K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8
L1 L2 L3 L4 L5 L6 L7 L8
M3 M4 M5 M6 M7 M8
N3 N4 N5 N6 N7 N8
O4 O5 O6 O7 O8
P4 P5 P6 P7 P8
Q3 Q4 Q5 Q6 Q7 Q8
R4 R5 R6 R7 R8 R9
S4 S5 S6 S7 S8 S9
T5 T6 T7
N
0 1,5 3 km
Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun
Cratère d'obus (simple ou coalescent)
Construction orthogonale (fiabilité maximale)
Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
Construction orthogonale (fiabilité minimale)
Construction triangulaire (fiabilité maximale)
Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
Construction triangulaire (fiabilité minimale)
Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)
Tranchée
Boyau de communication
Axe routier majeur
Chemin de fer
Village, ferme
Ouvrage fortifié, monument
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42
Dalle : N7
N
W
E
S
0 50 100 200 300 400 m
Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

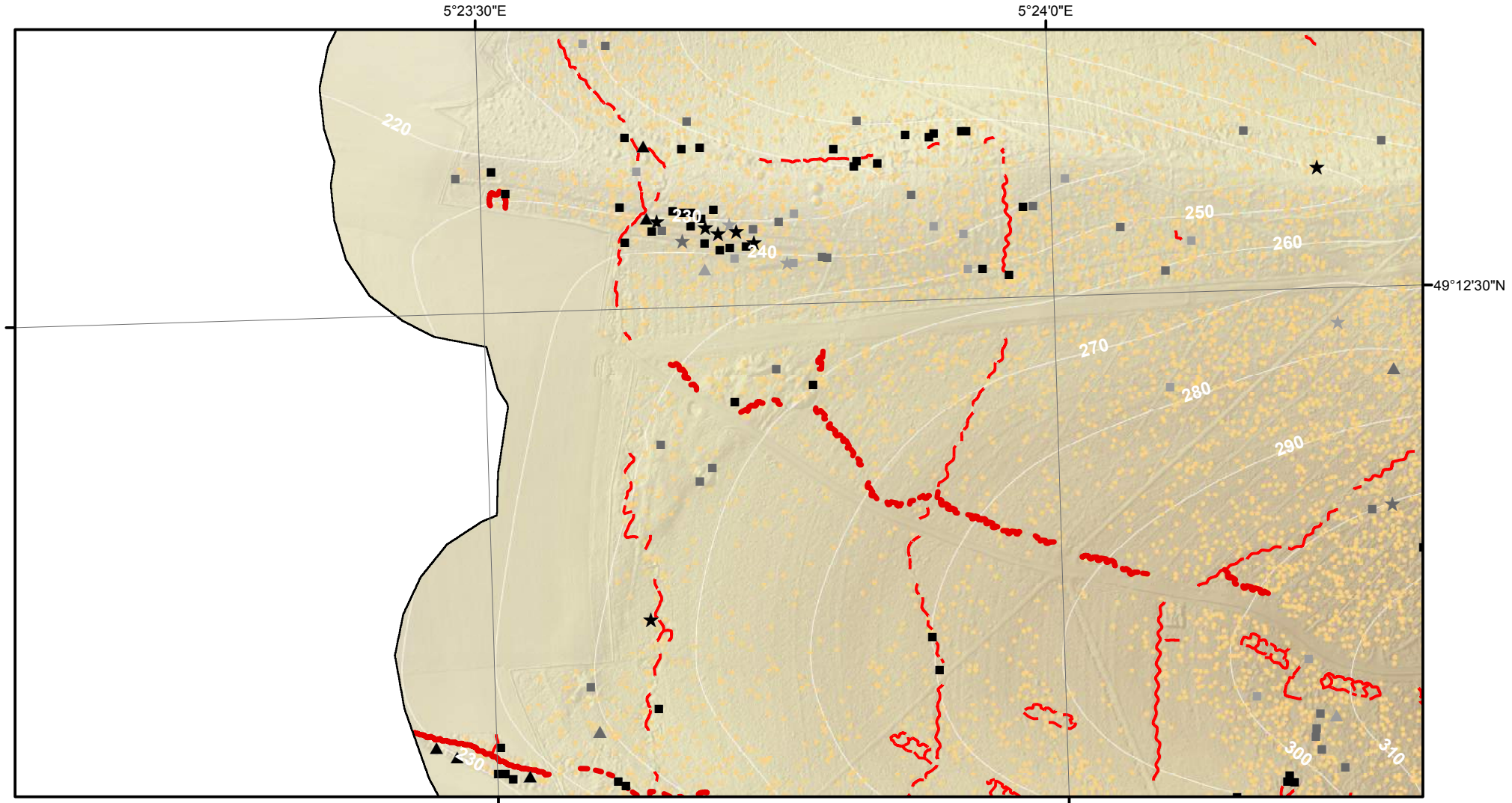
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

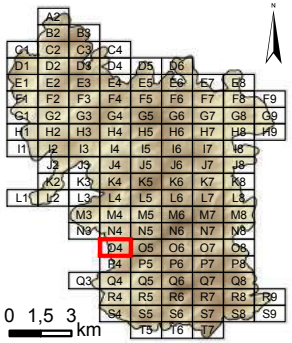
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **N8**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

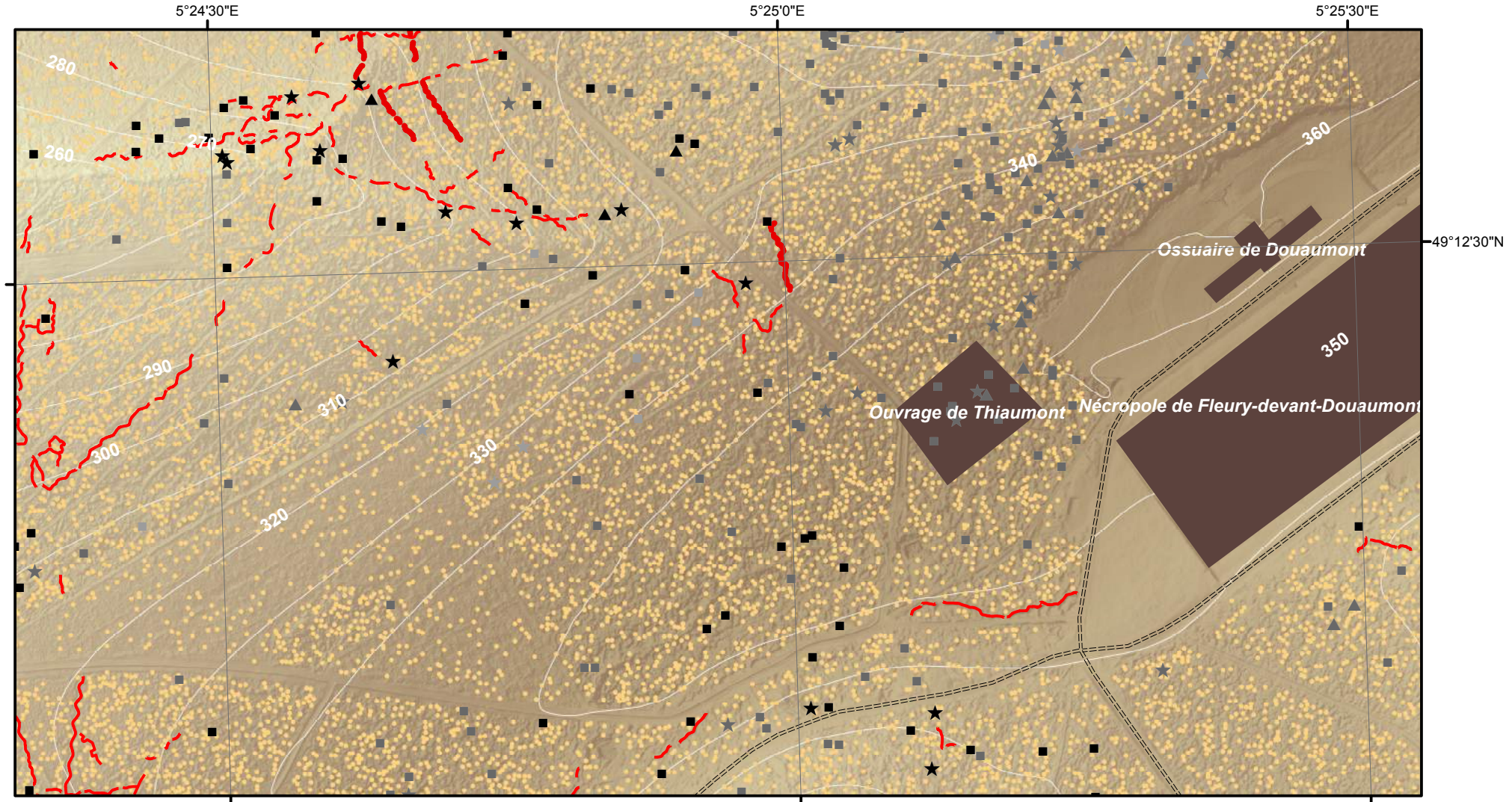
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

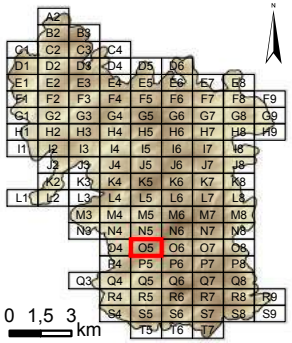
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **O4**

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

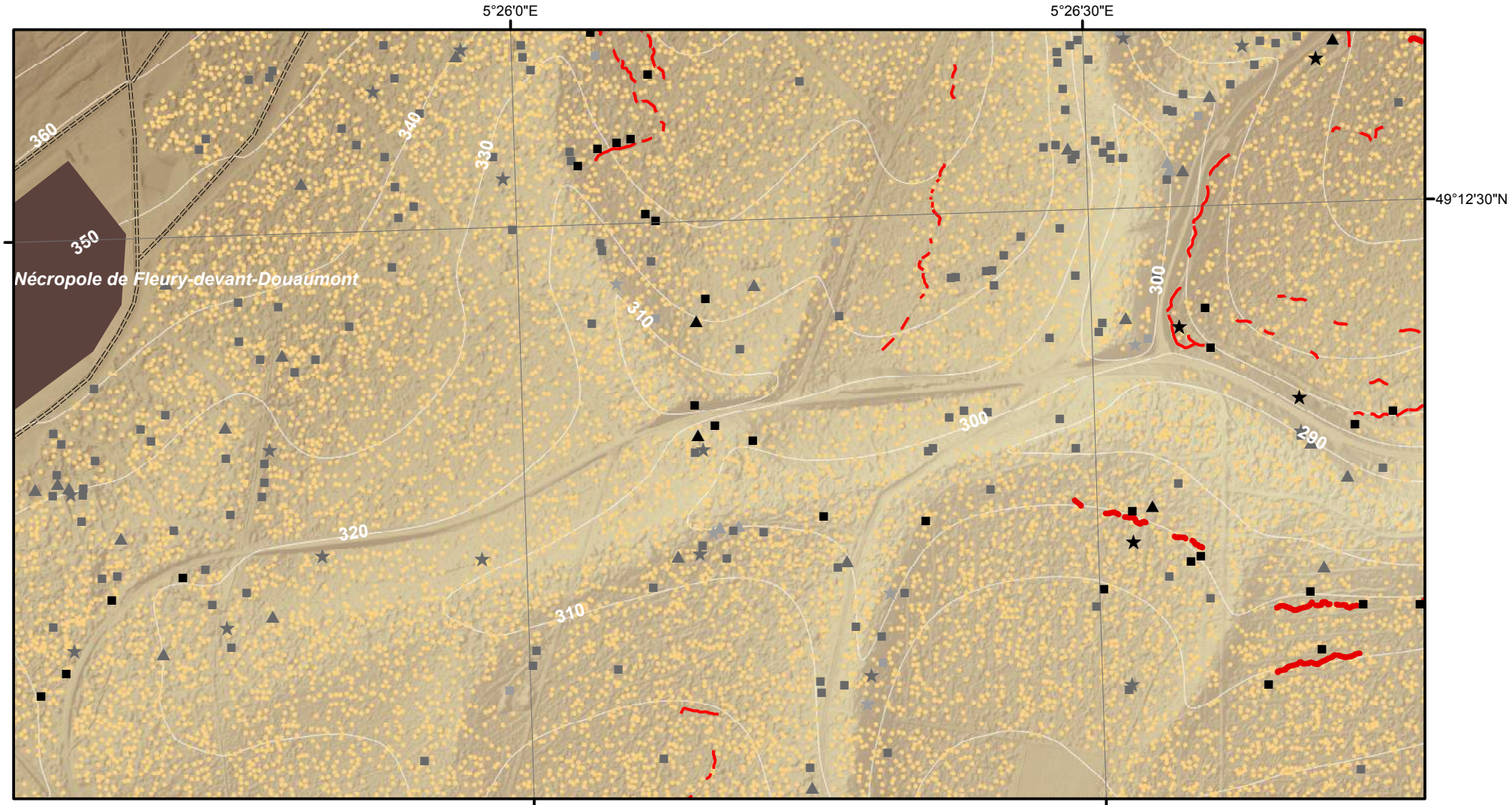
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

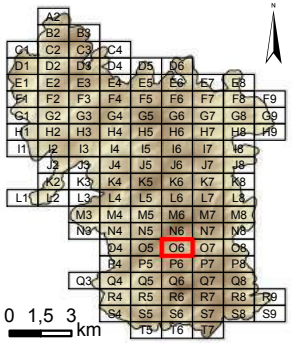
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **O5**

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

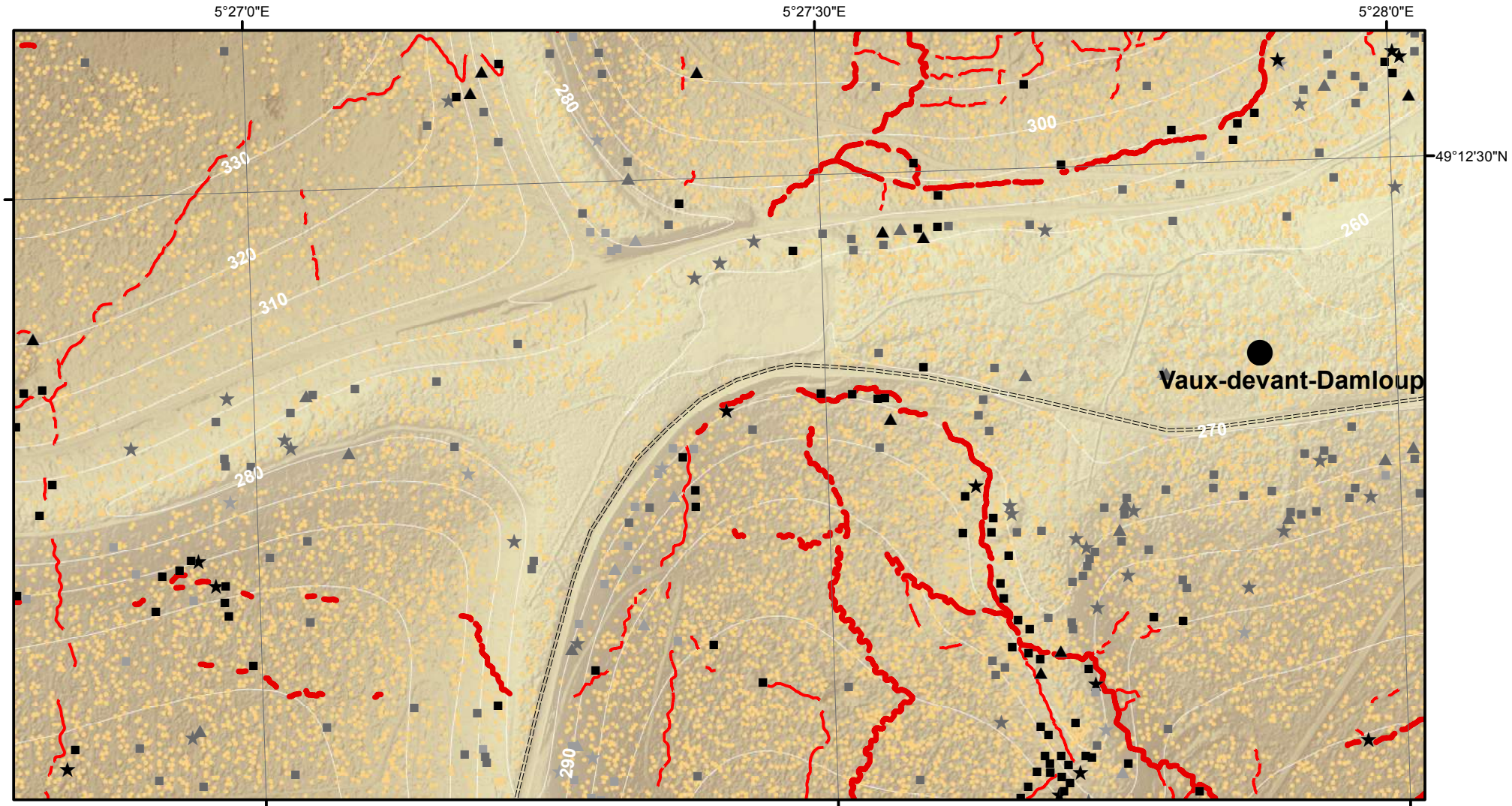
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **O6**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

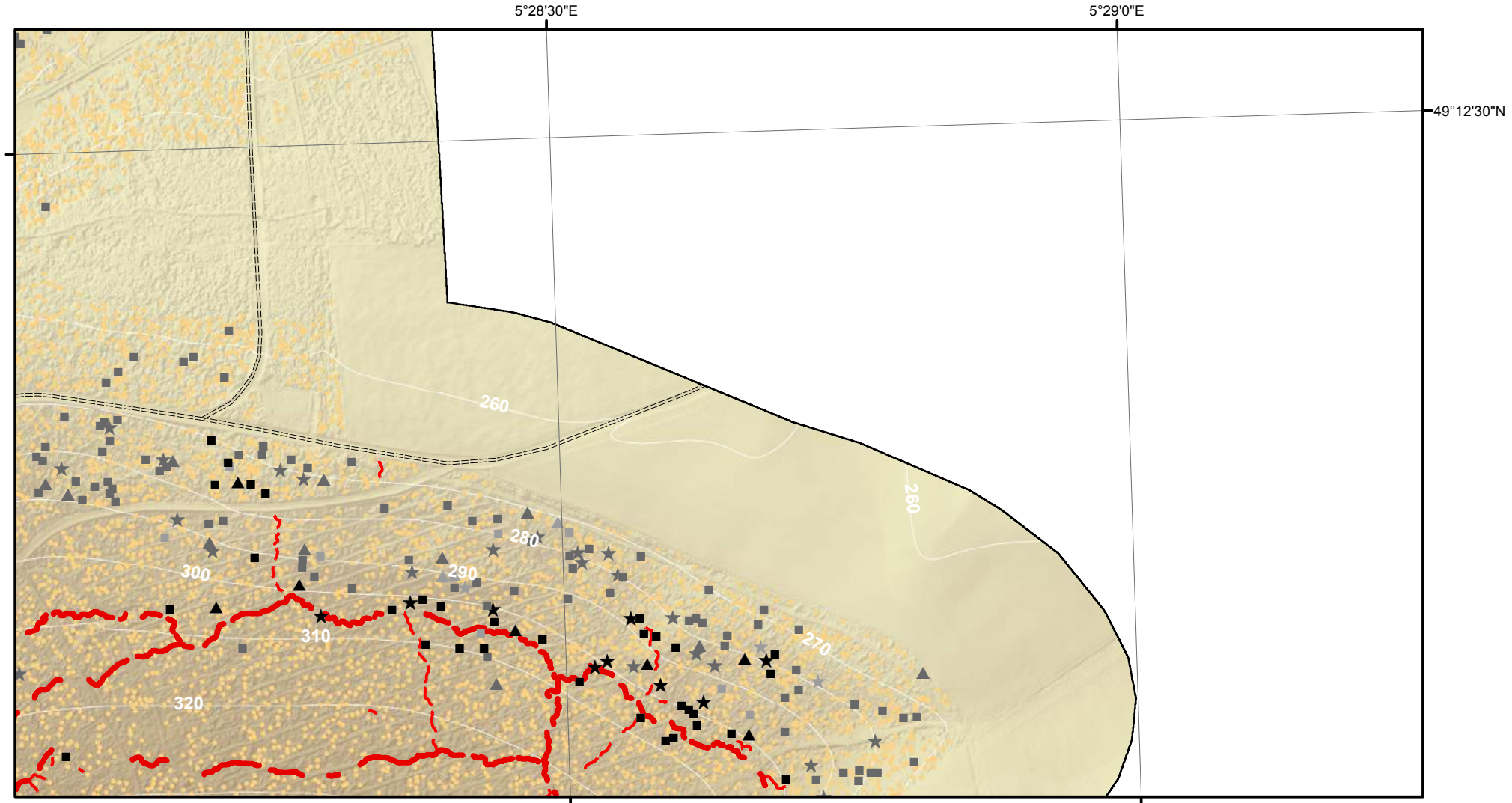
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

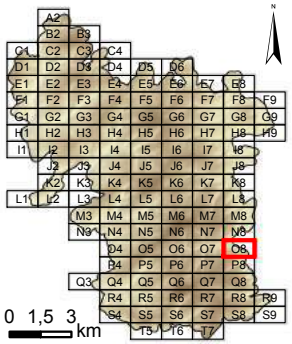
Dalle : **O7**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado

0 1,5 3 km





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

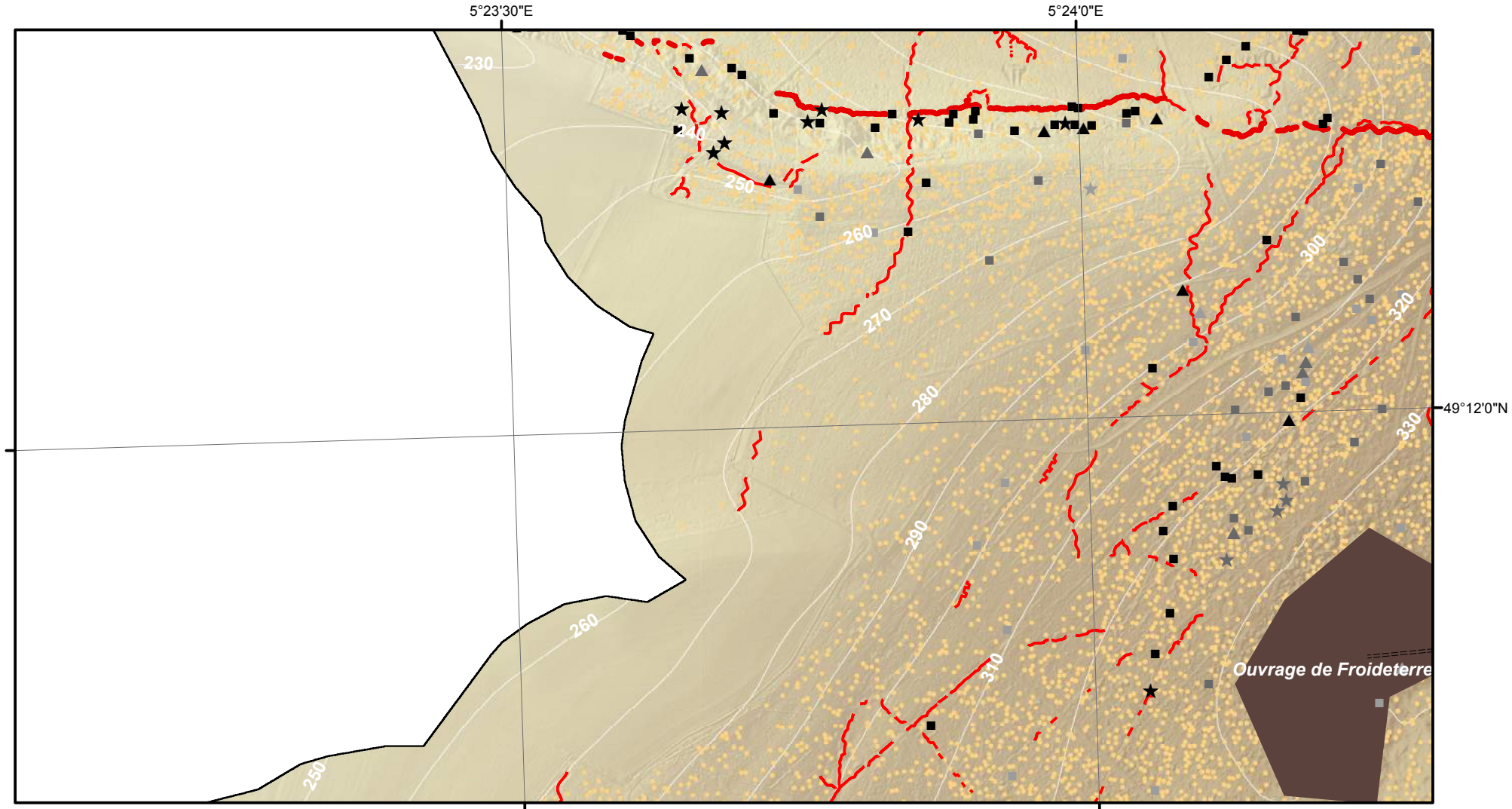
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

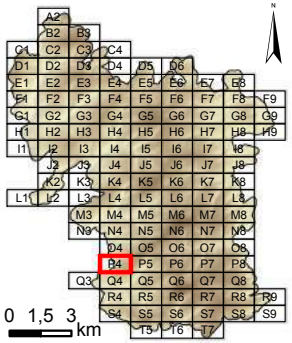
Dalle : **O8**

N
W E
S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

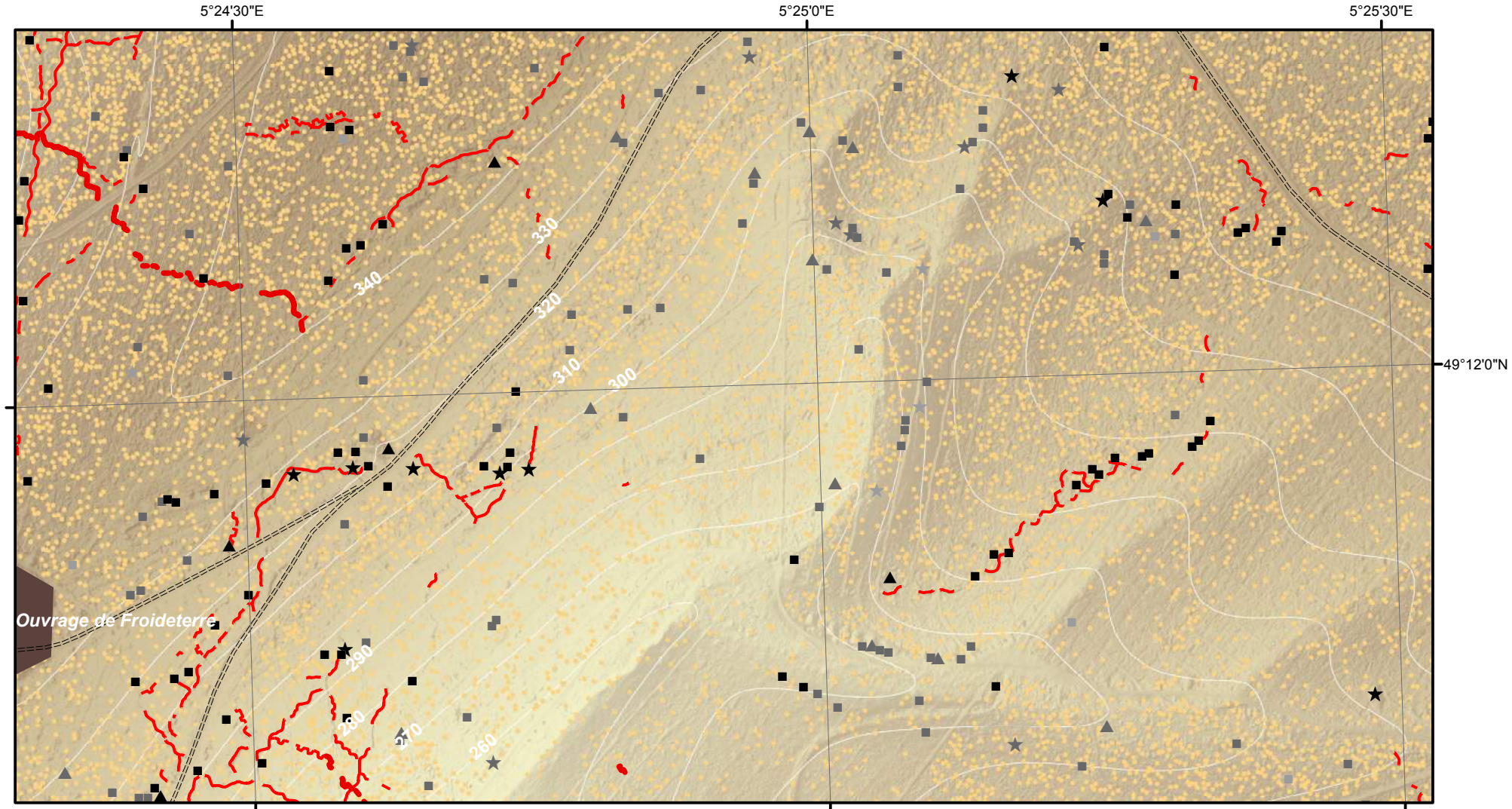
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

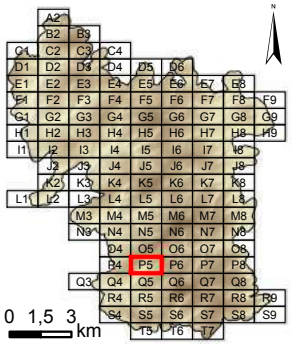
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **P4**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

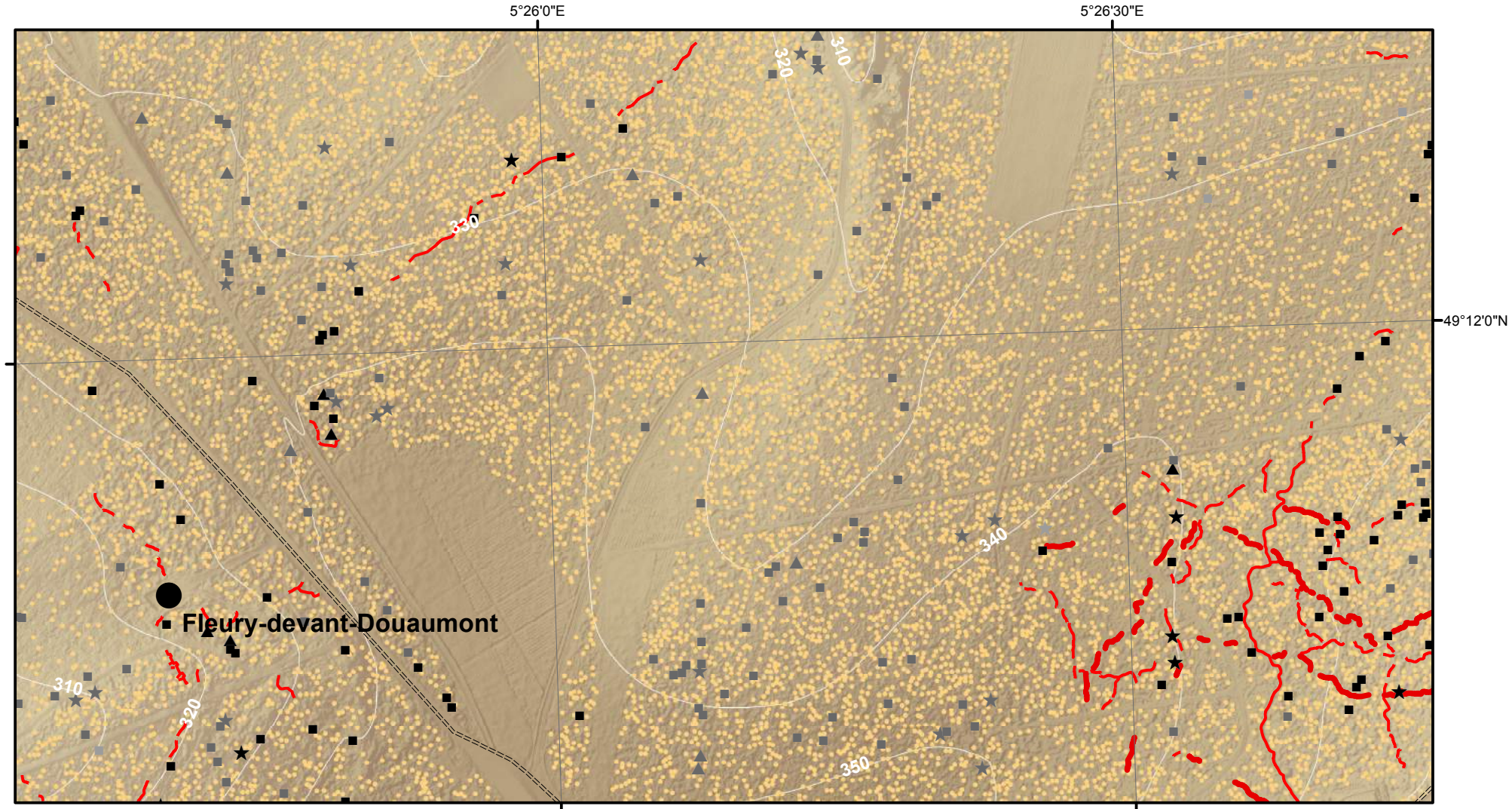
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **P5**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

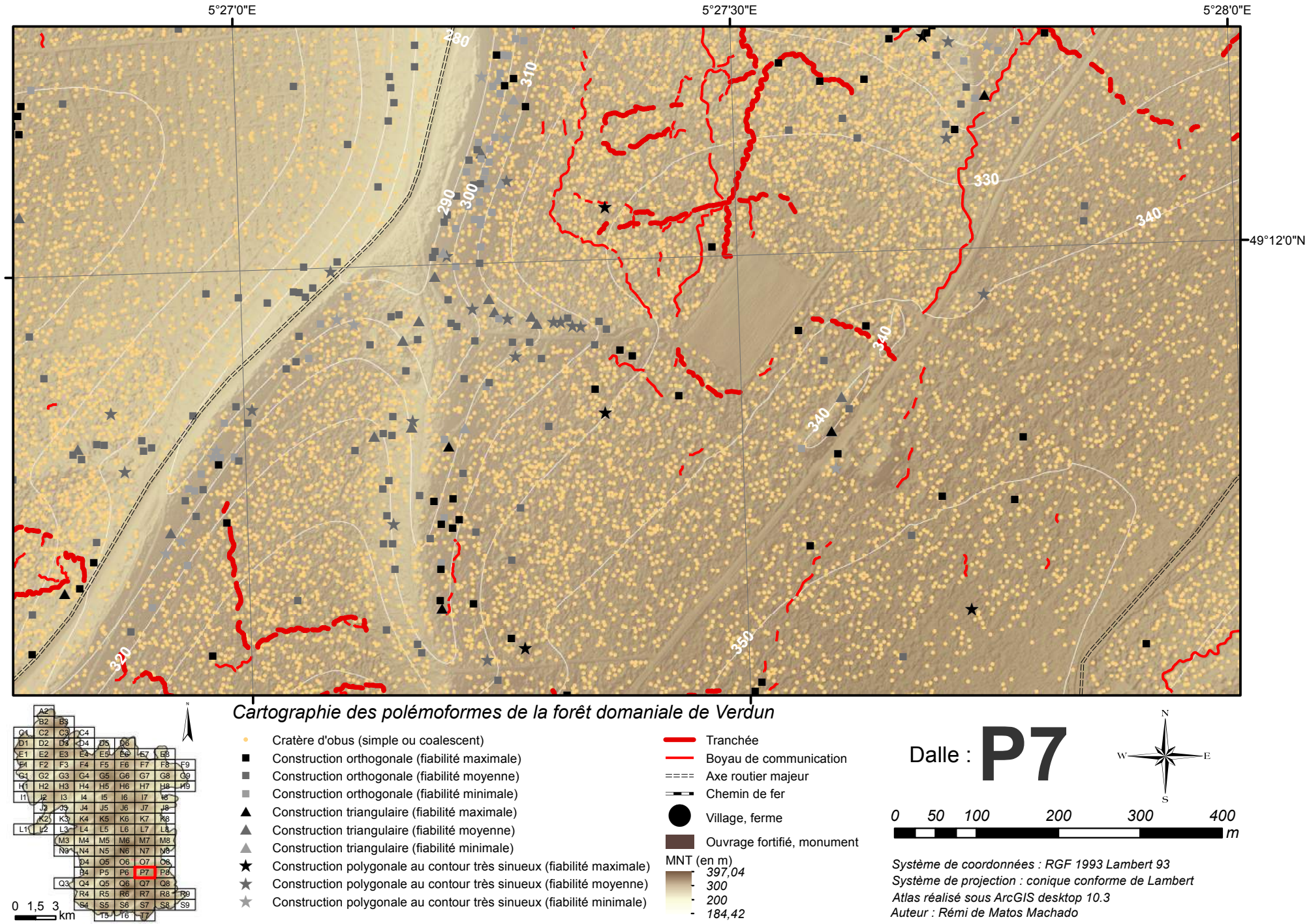
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **P6**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

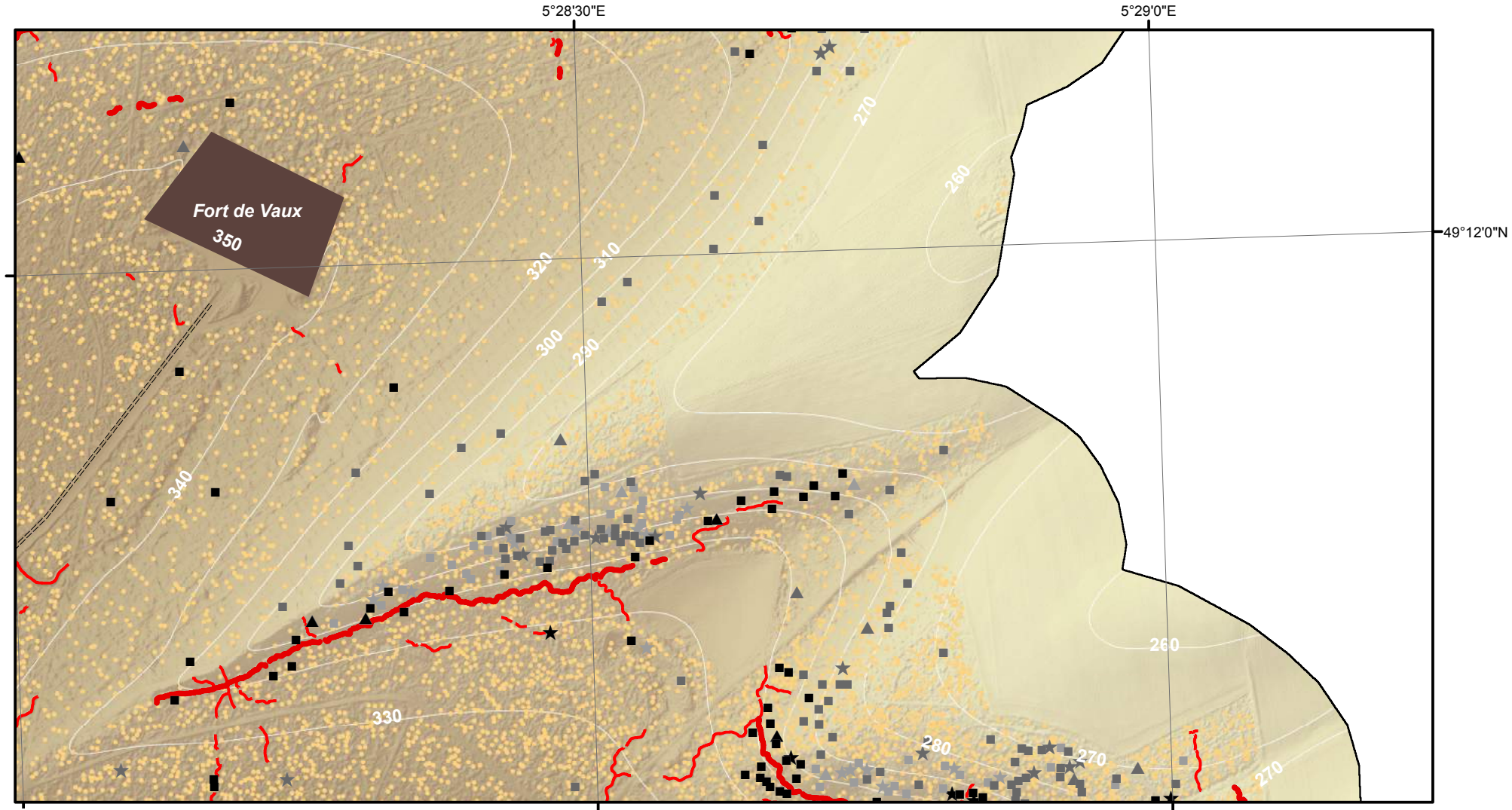
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

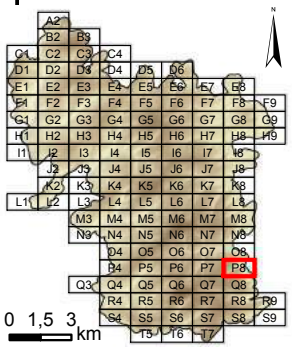
Dalle : **P7**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





0 1,5 3 km

Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

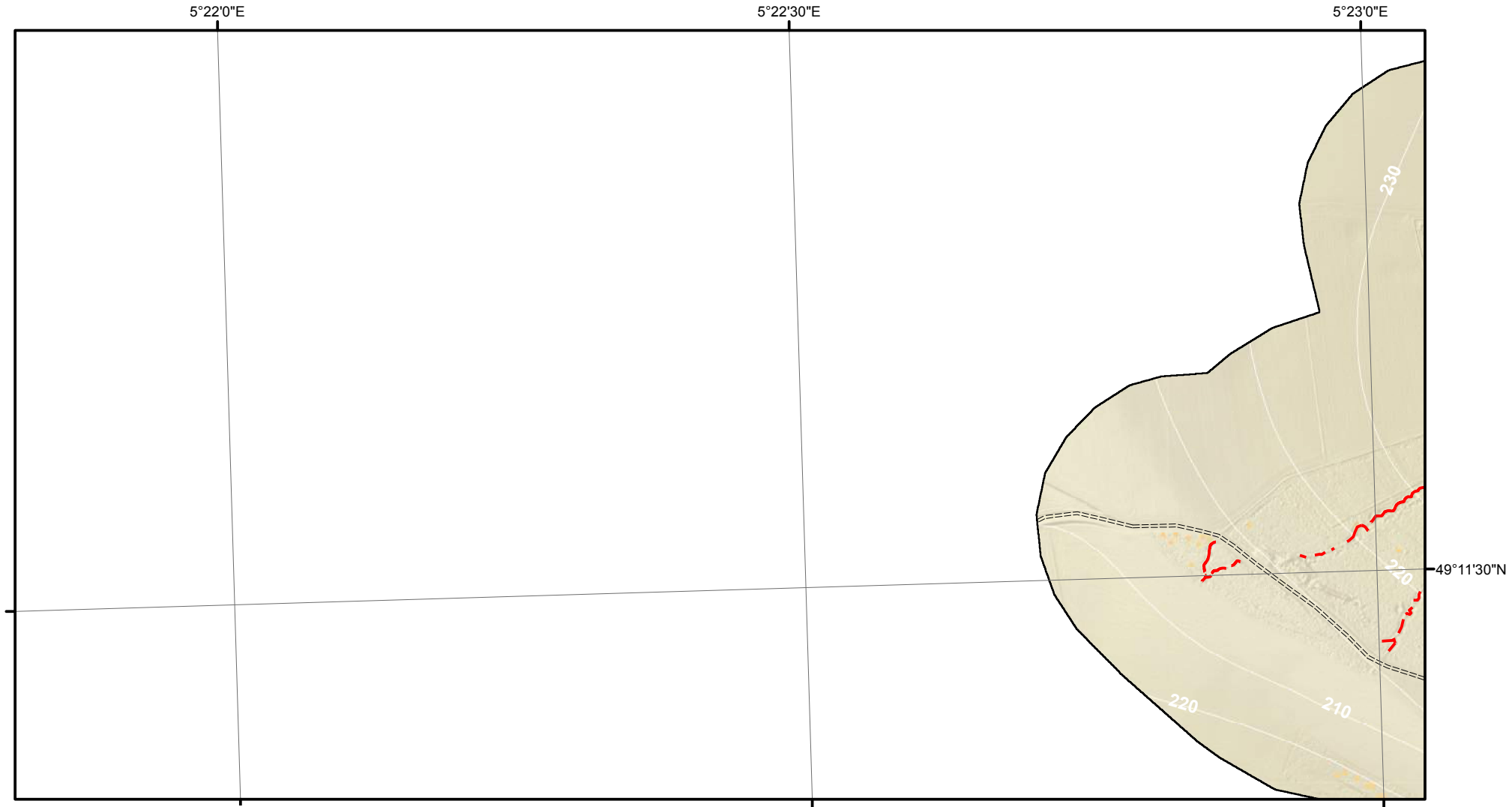
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

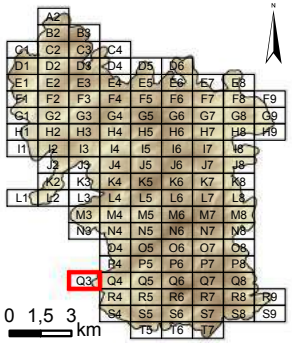
Dalle : **P8**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

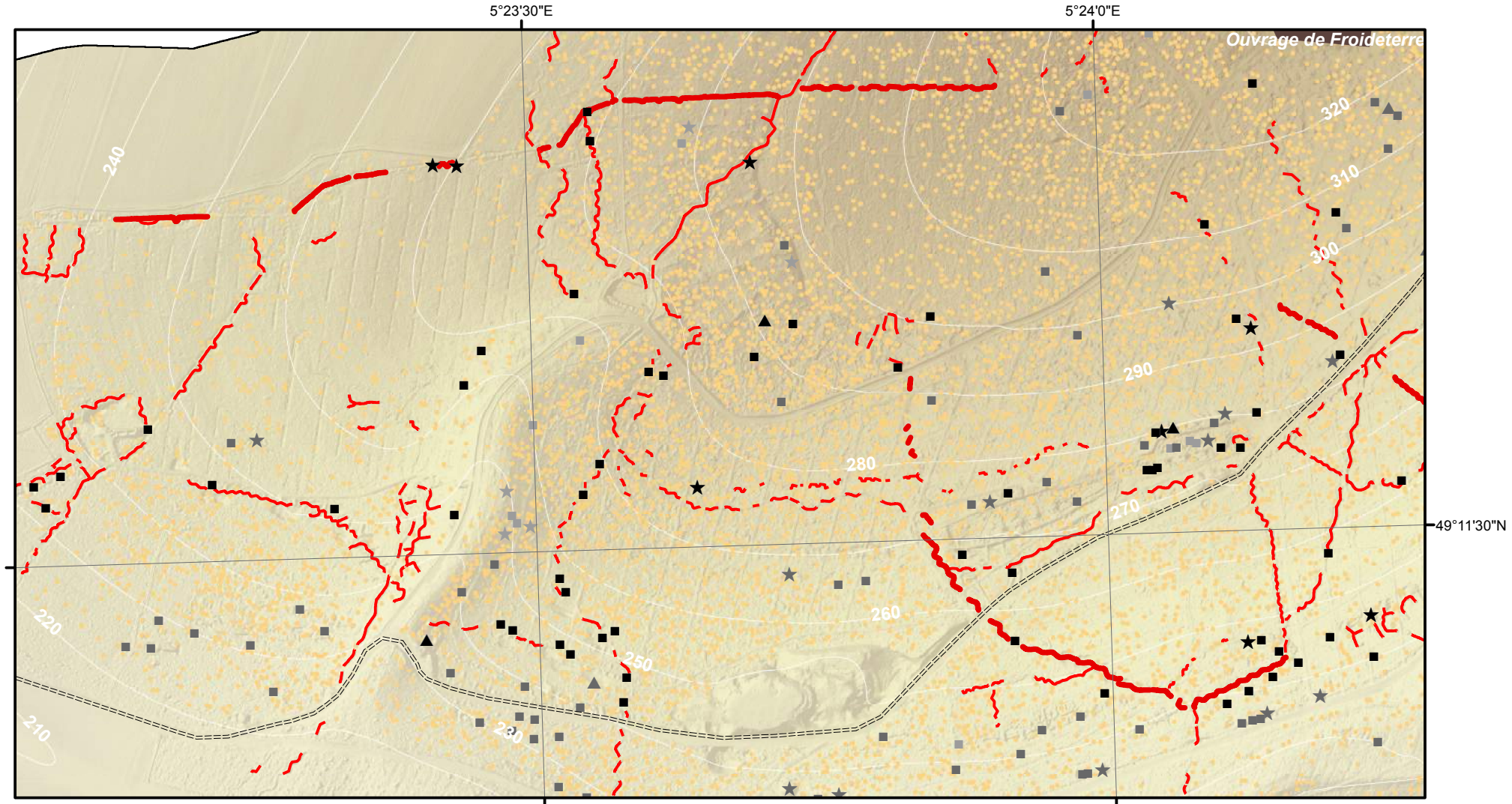
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

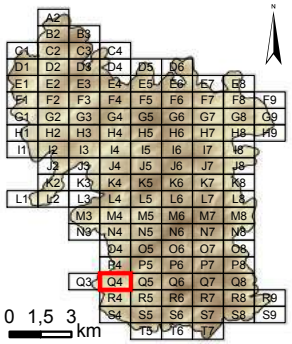
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **Q3**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

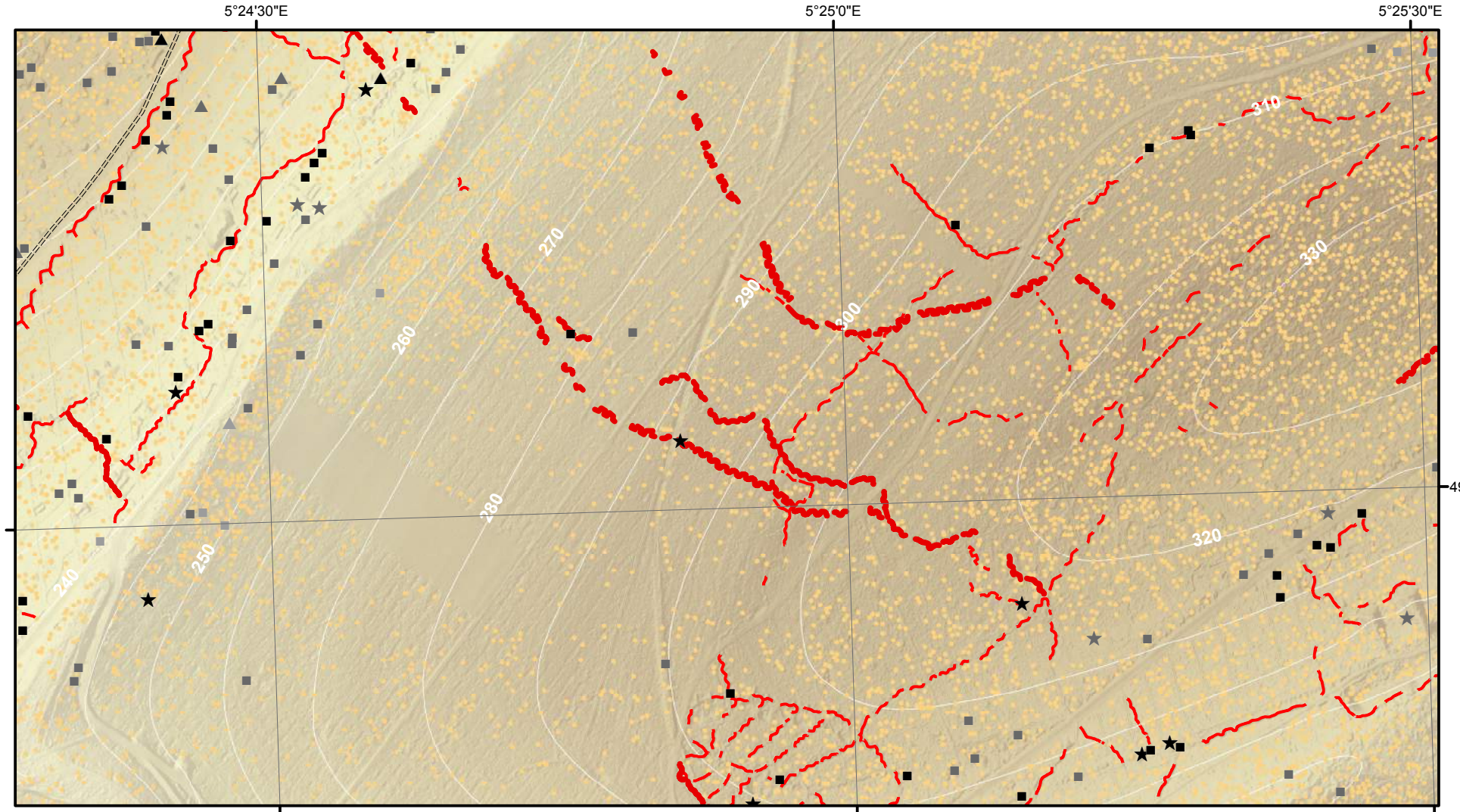
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **Q4**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

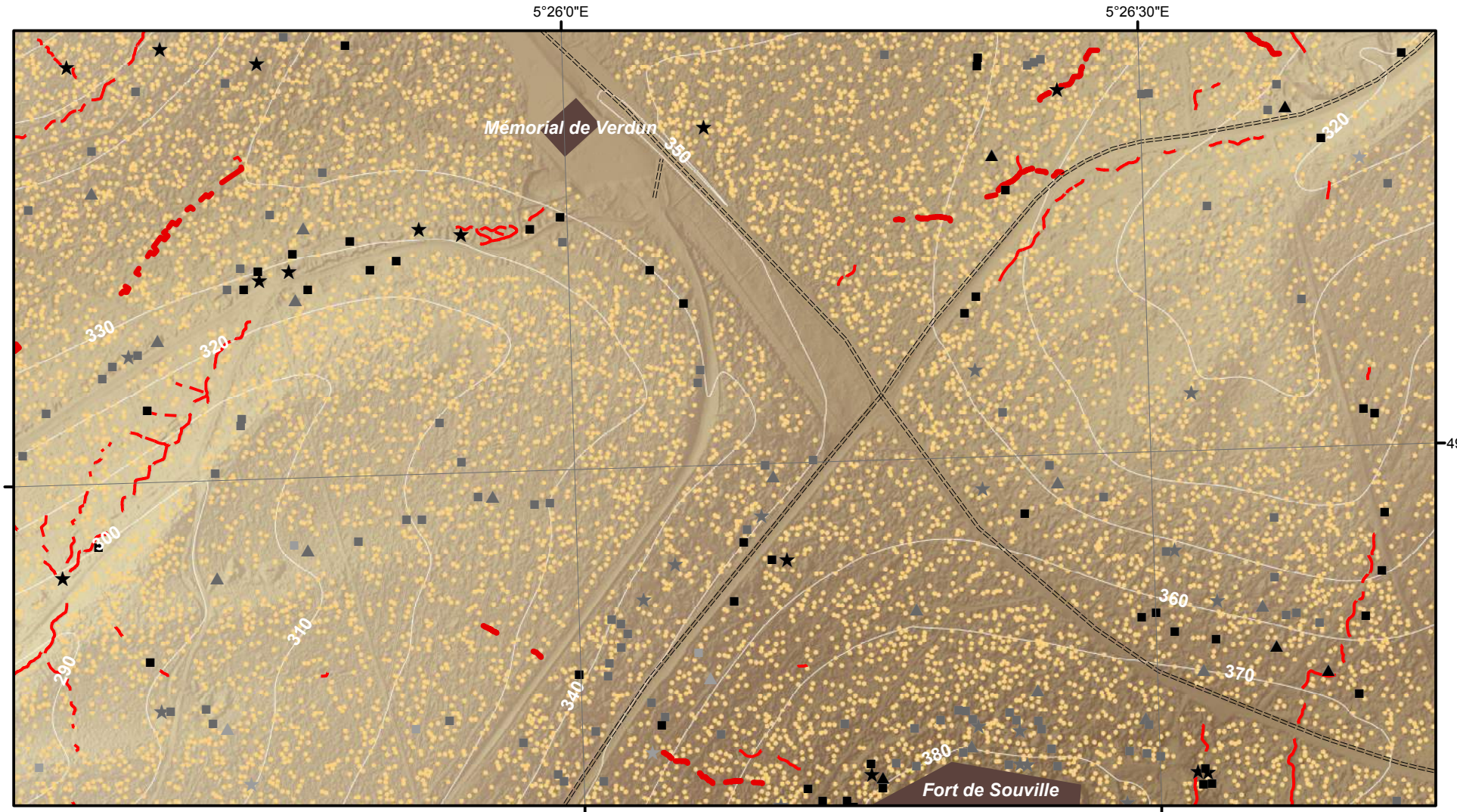
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

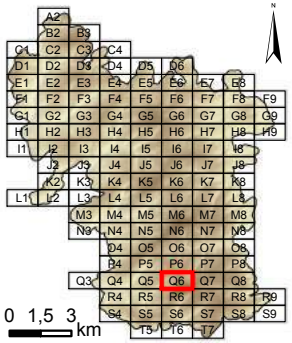
Dalle : **Q5**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

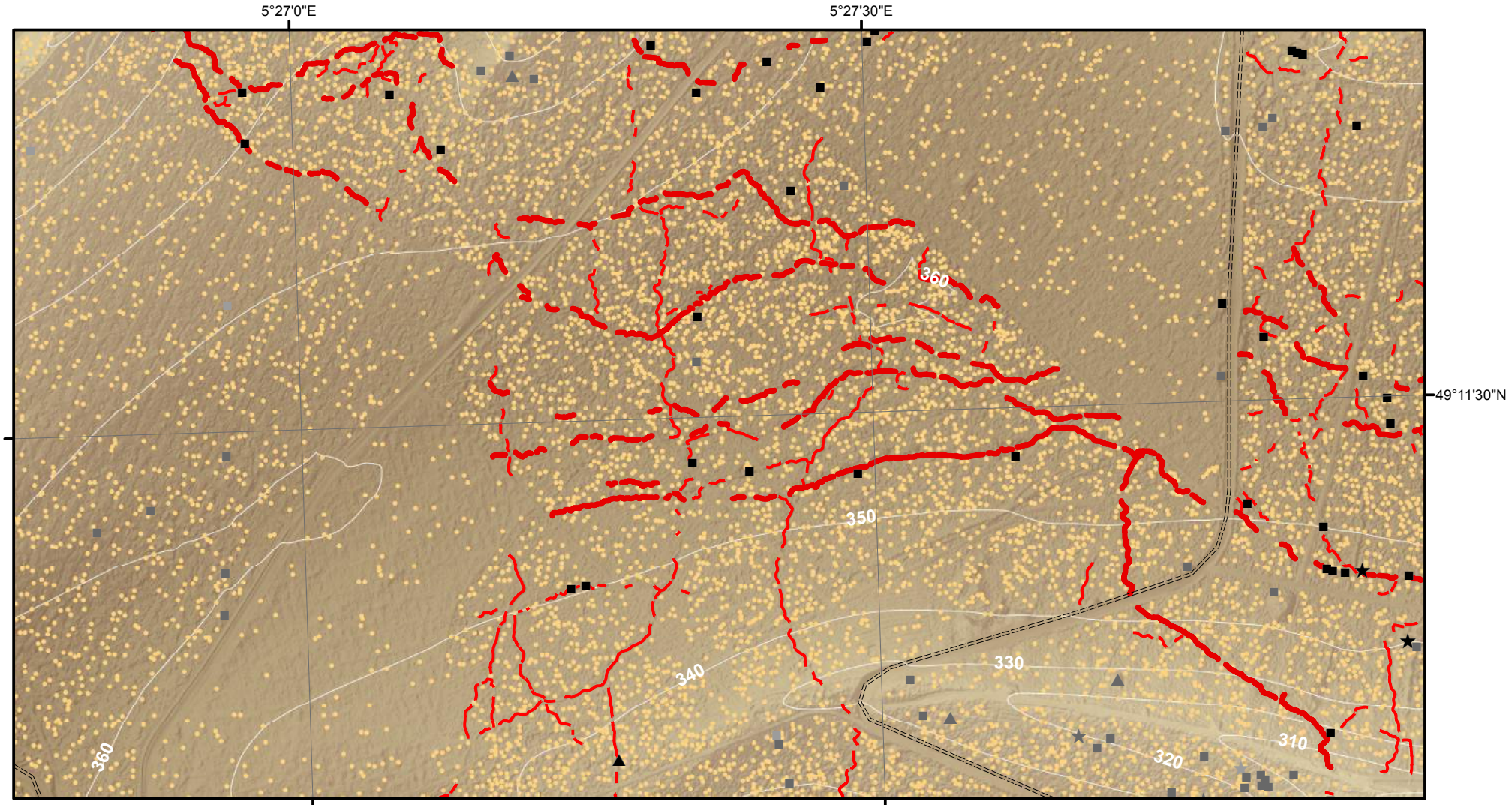
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **Q6**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

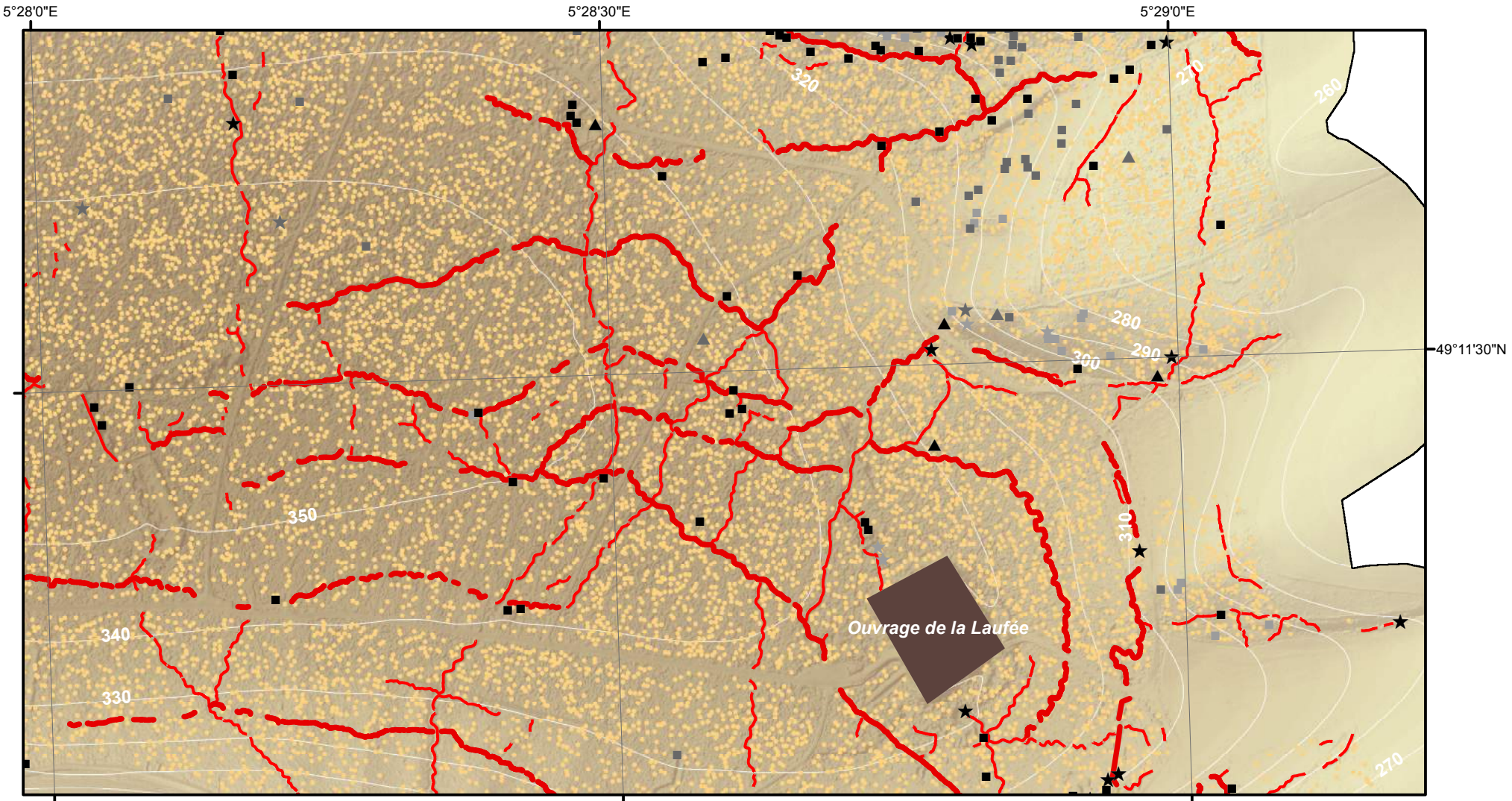
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **Q7**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

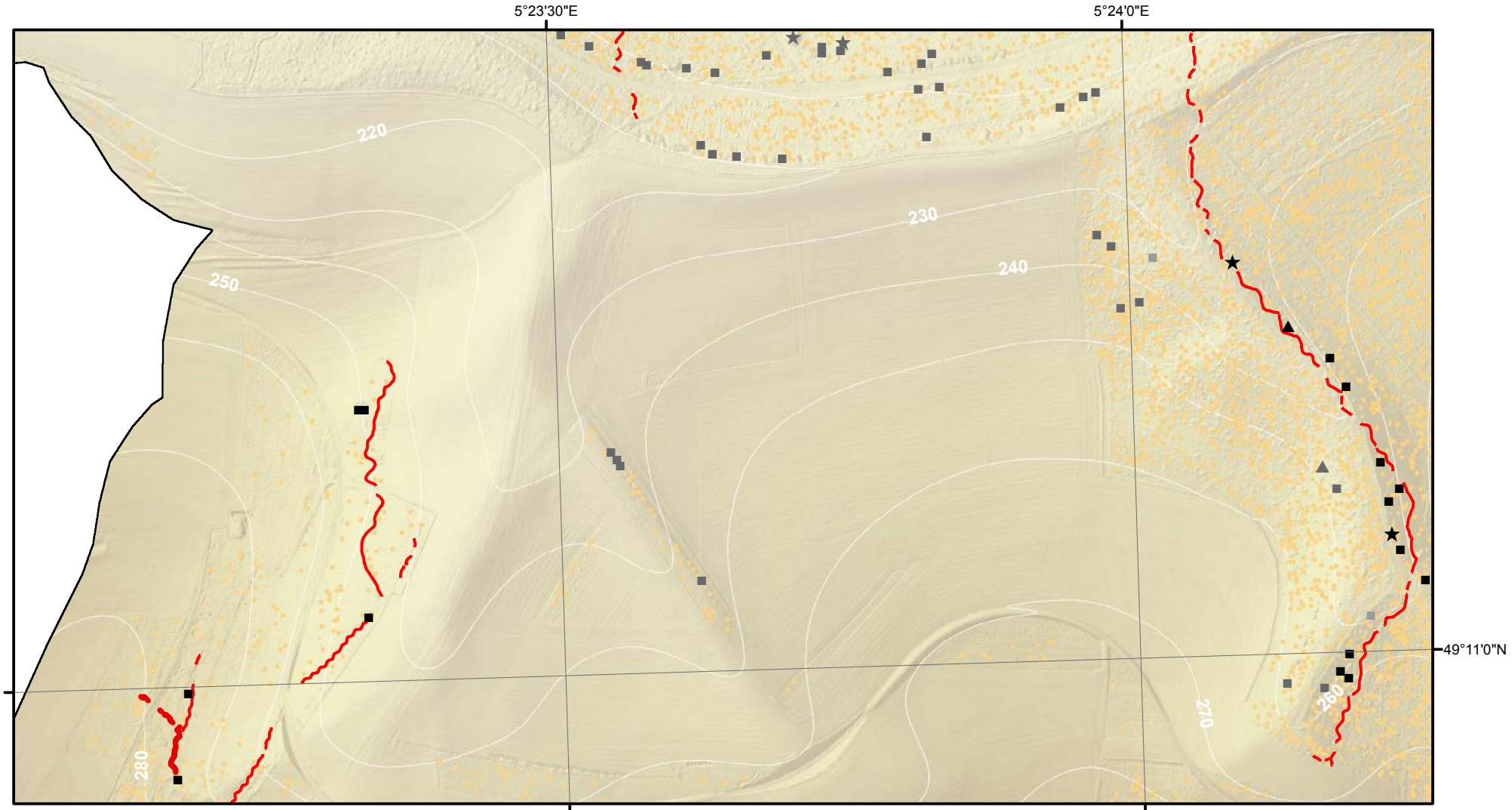
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

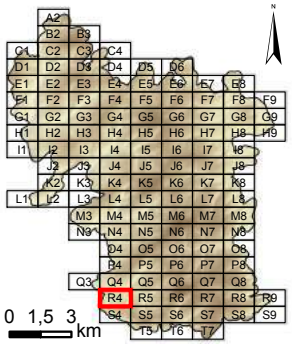
Dalle : **Q8**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

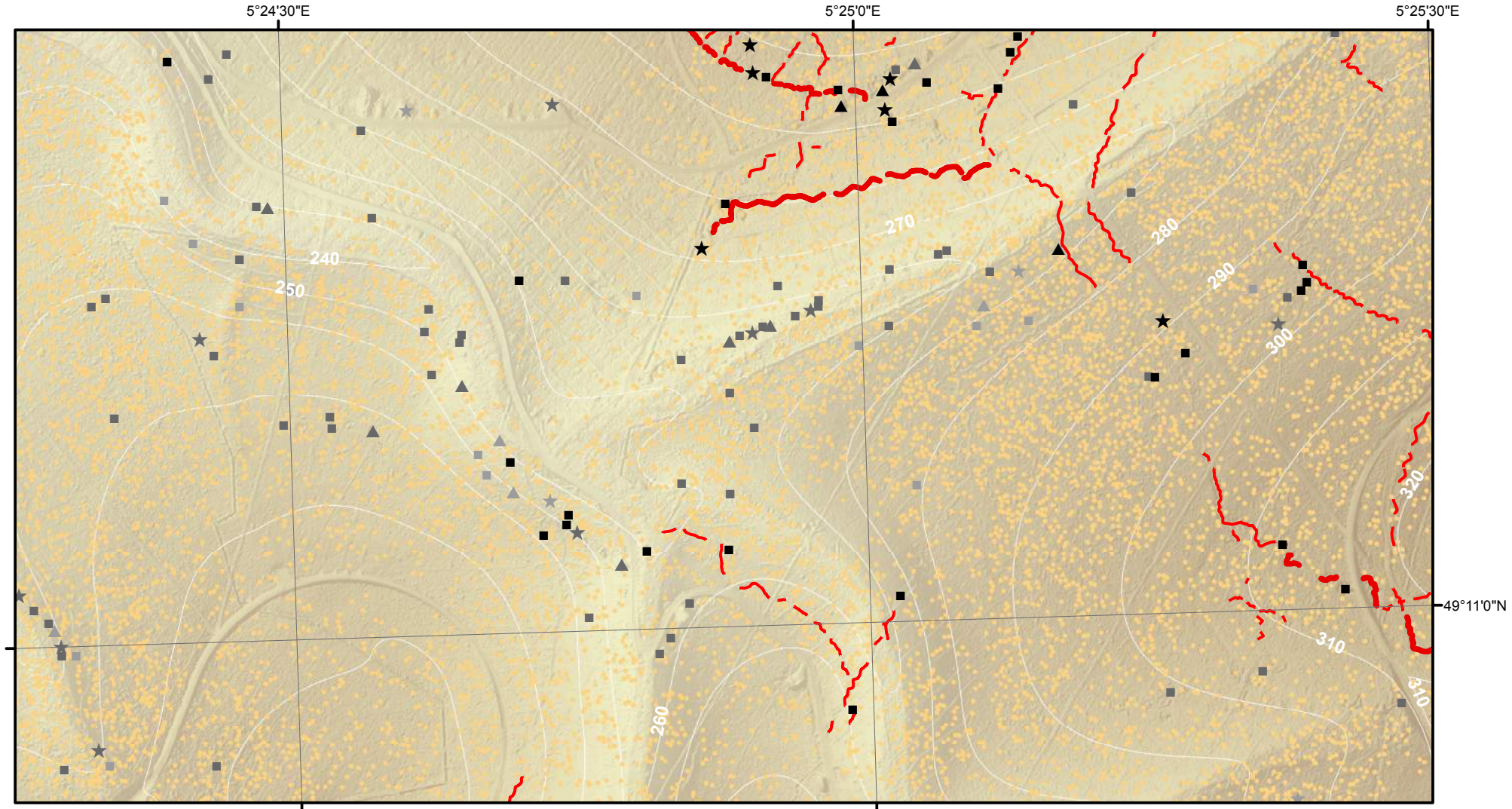
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

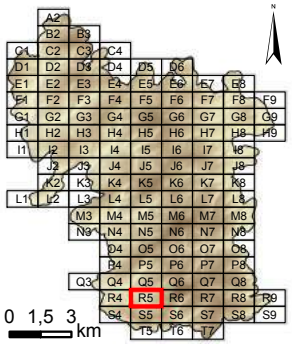
Dalle : **R4**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

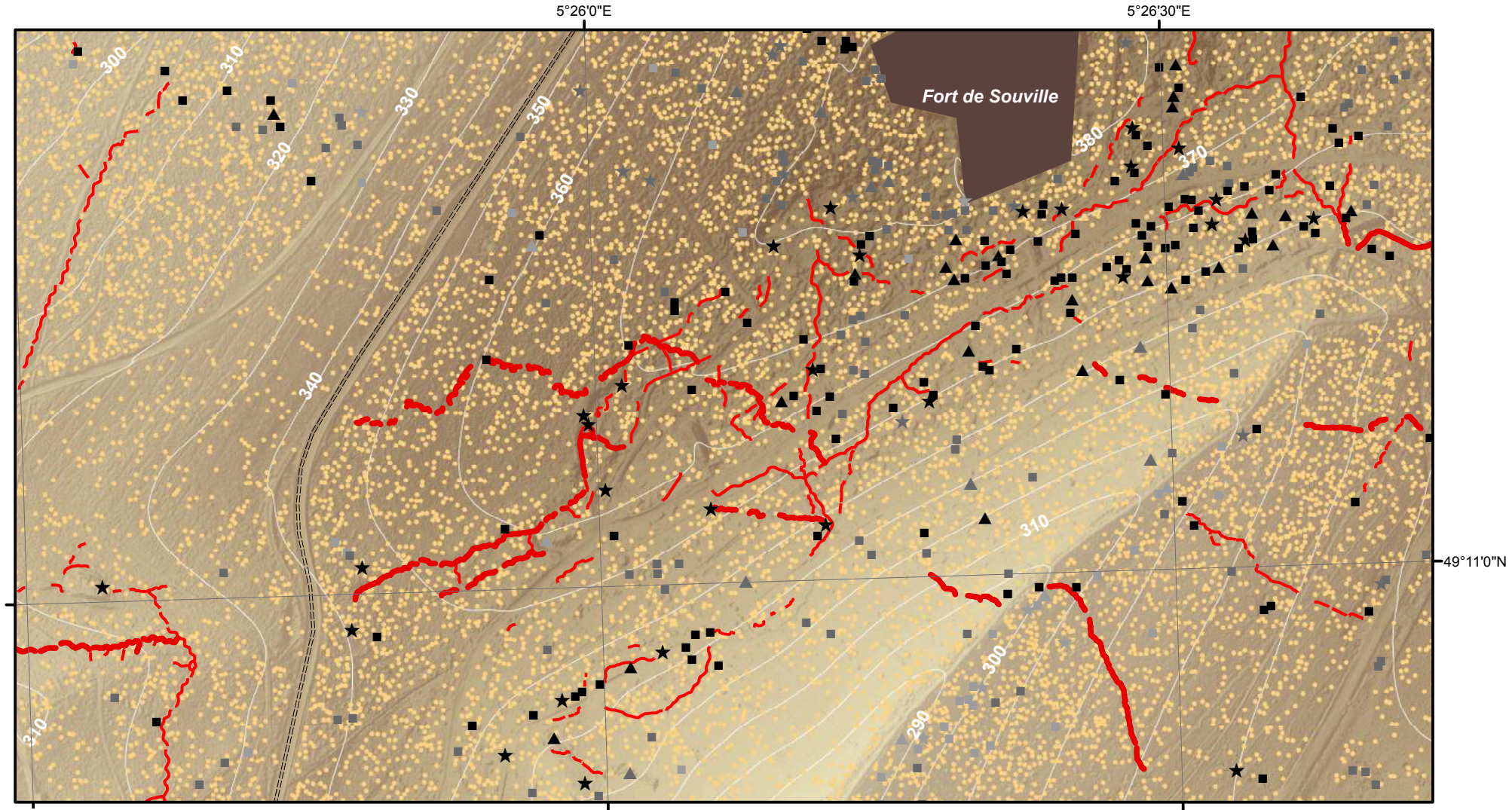
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

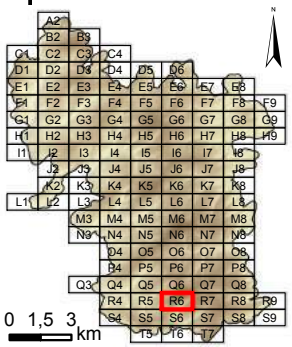
Dalle : **R5**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

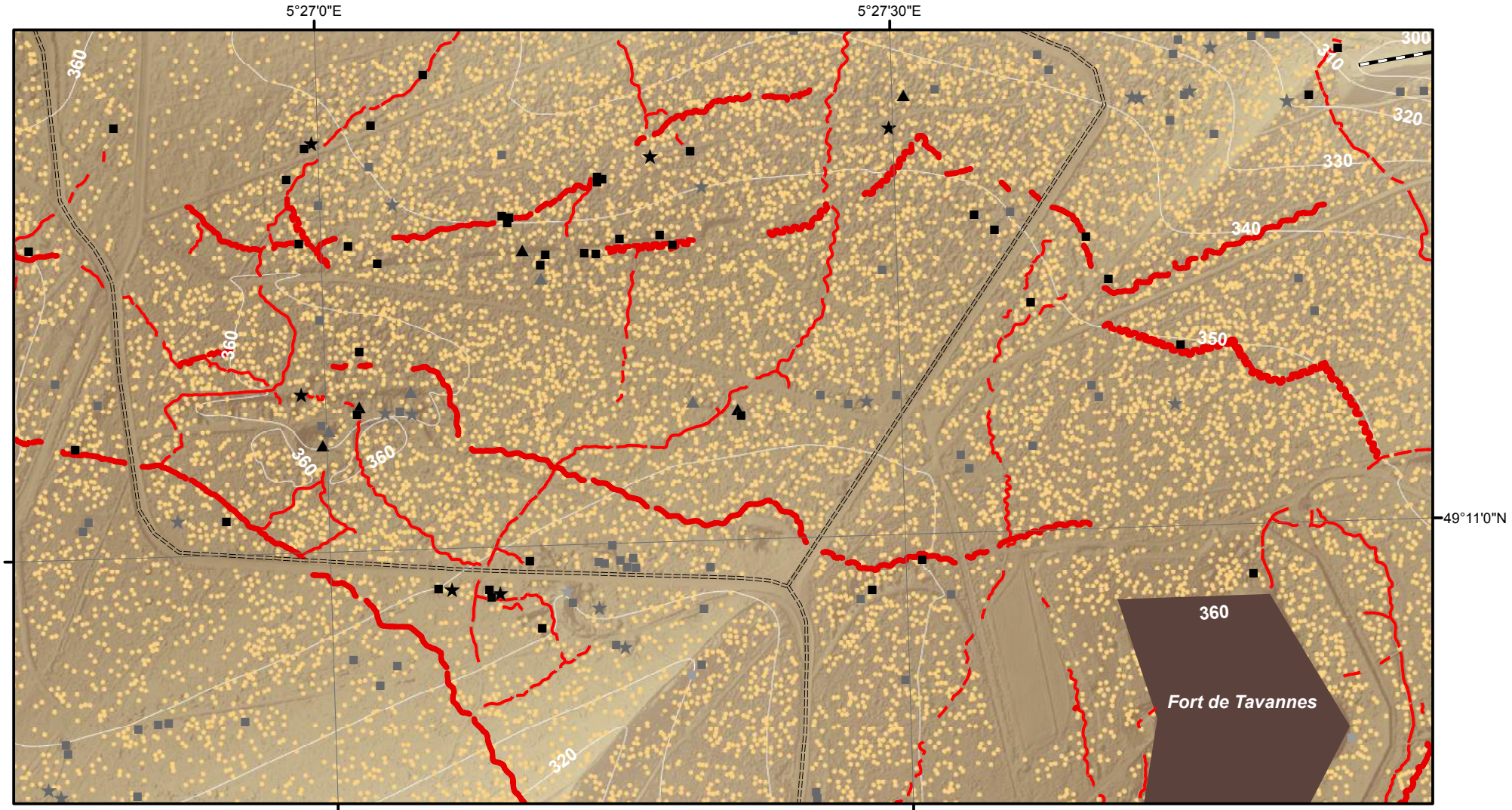
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **R6**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

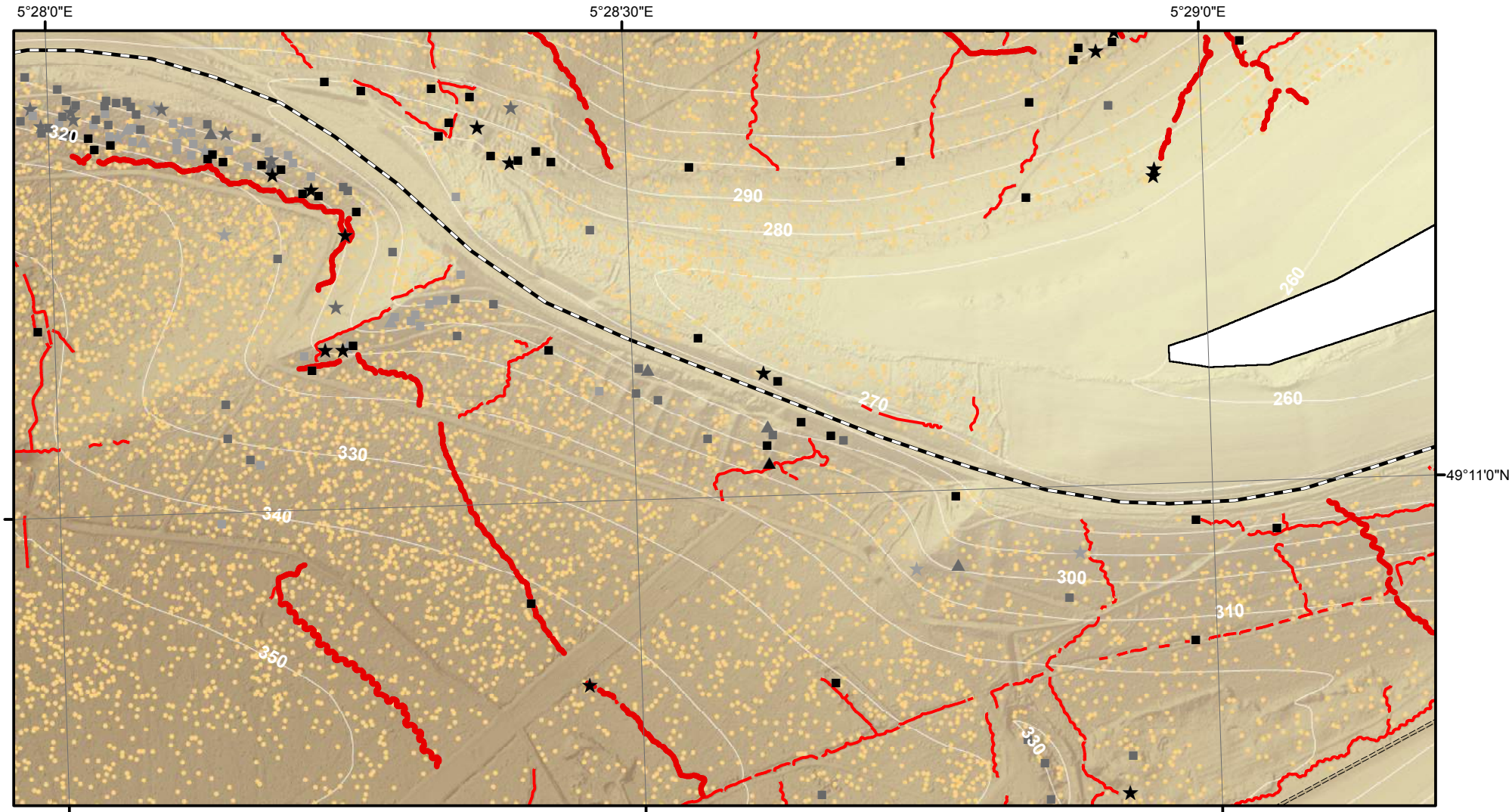
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

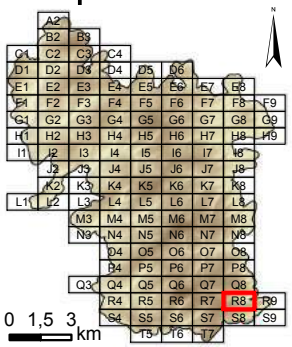
Dalle : **R7**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

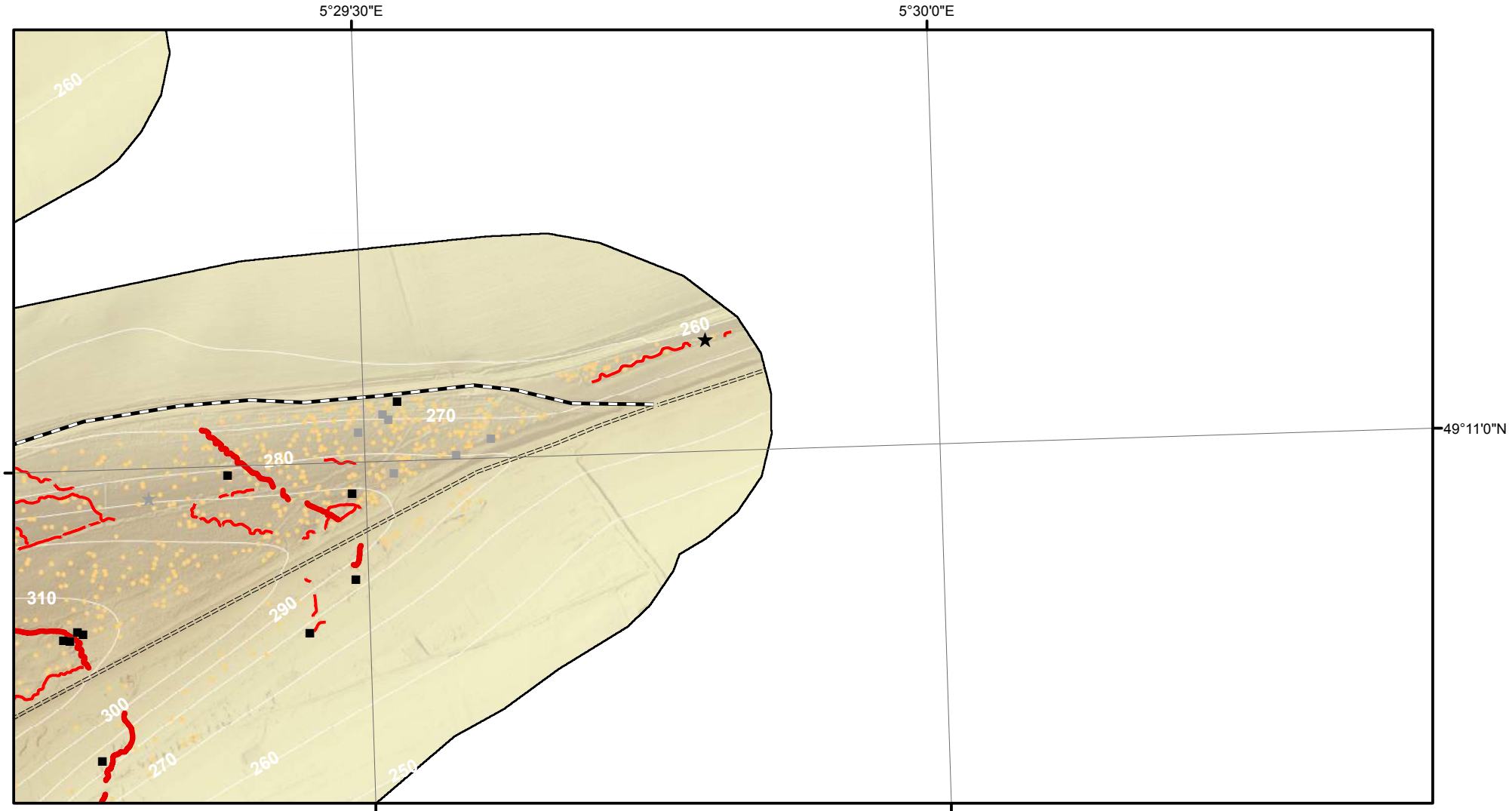
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

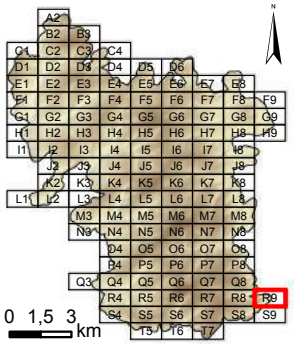
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **R8**

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

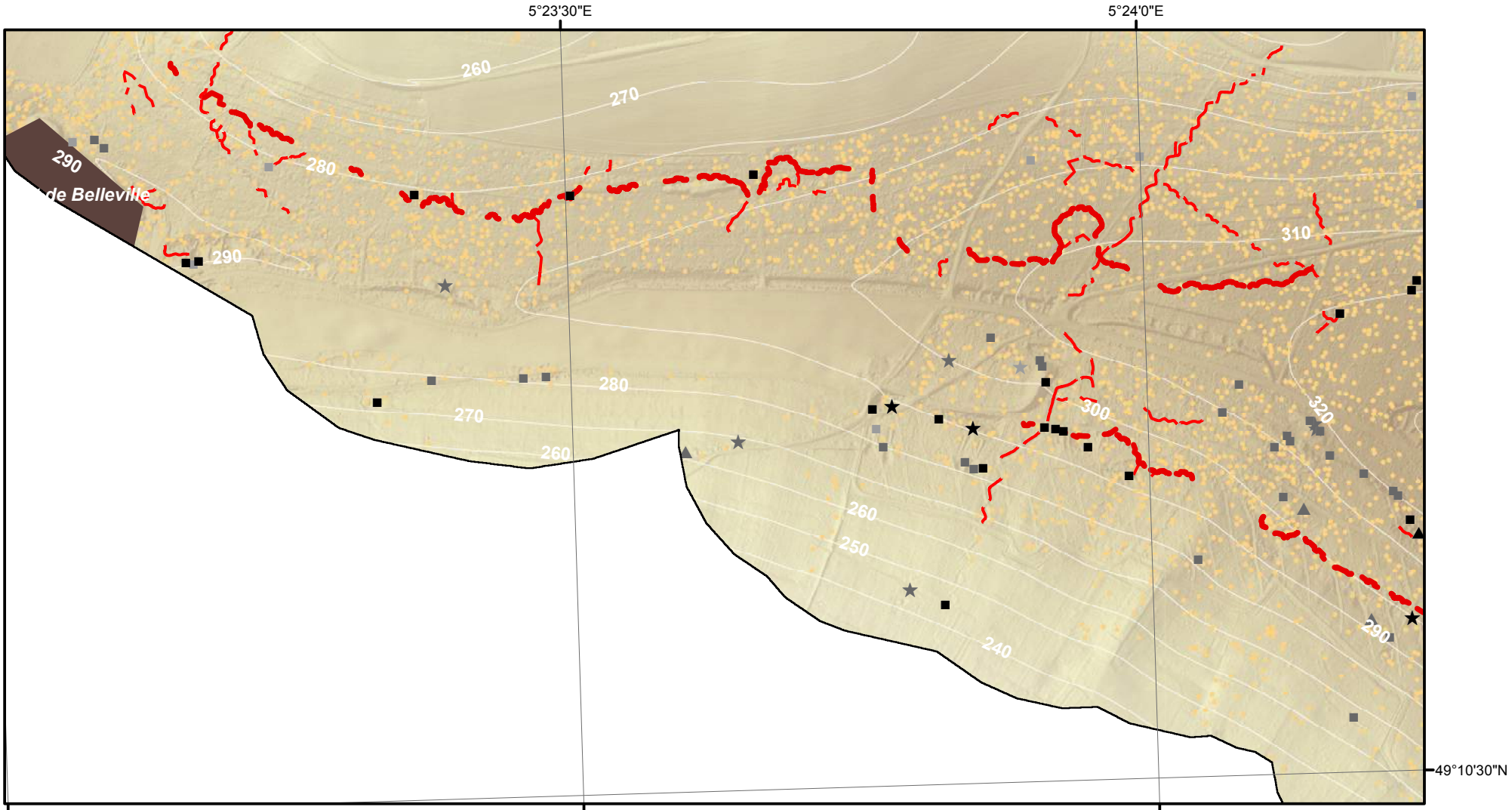
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

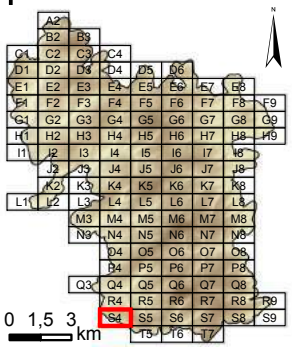
Dalle : **R9**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

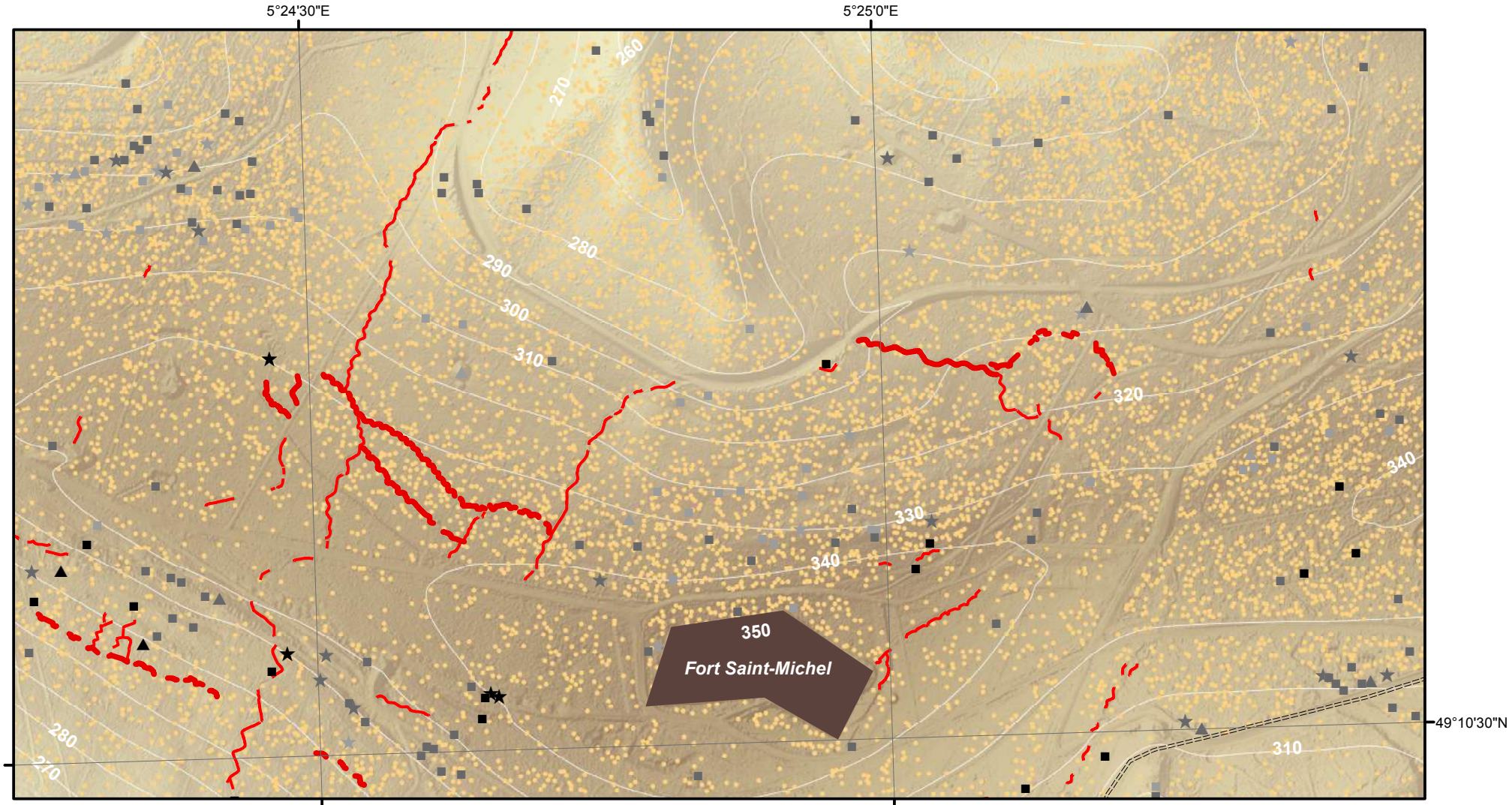
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

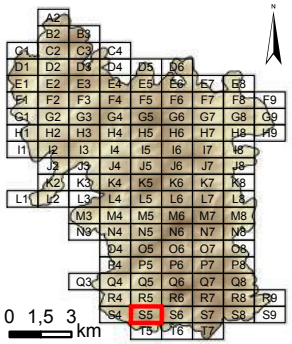
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **S4**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

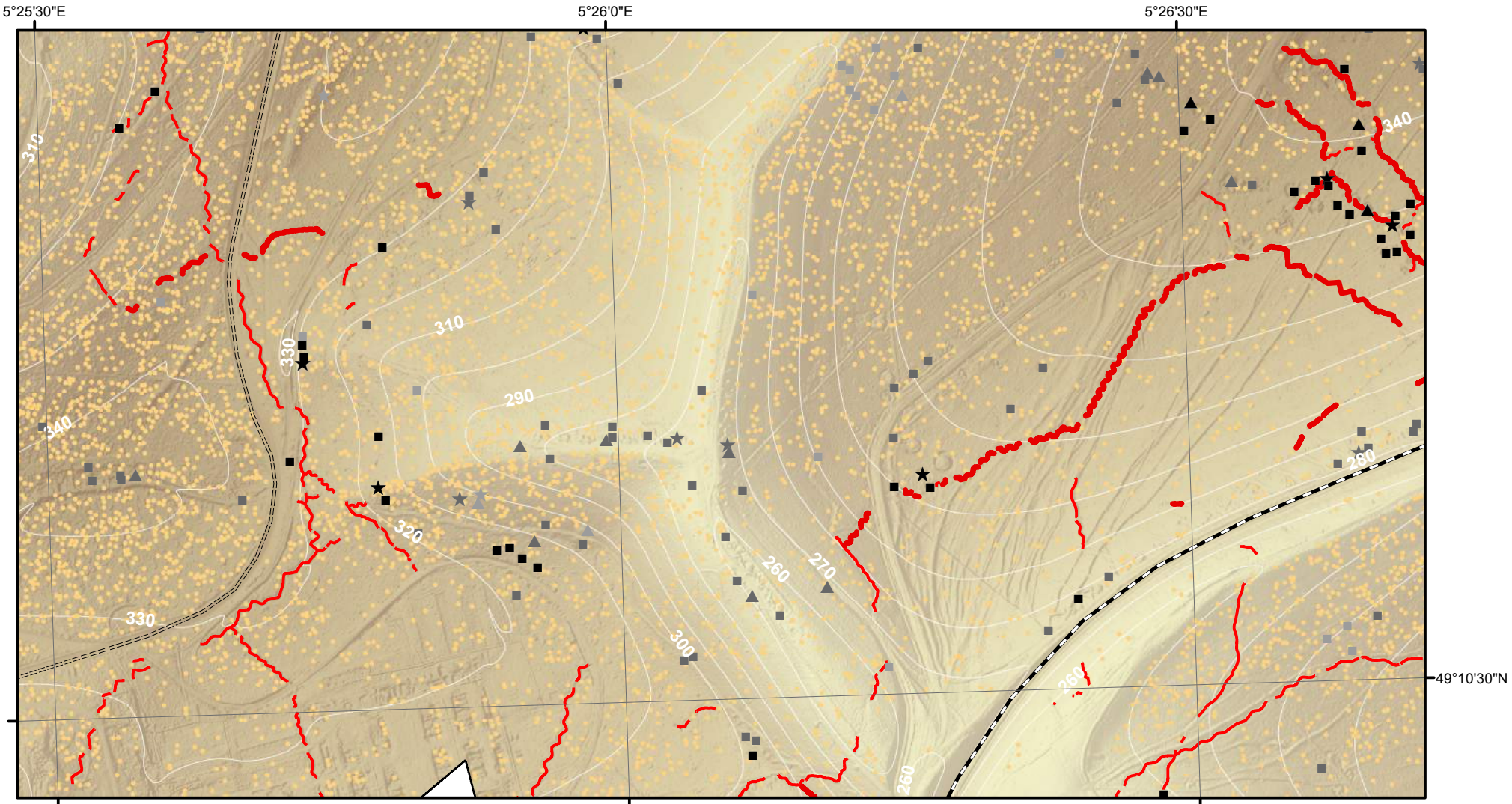
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

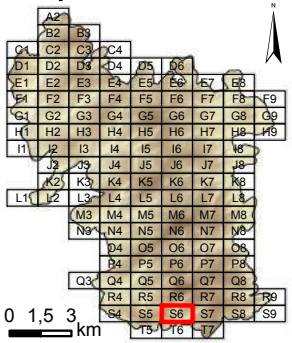
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **S5**

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

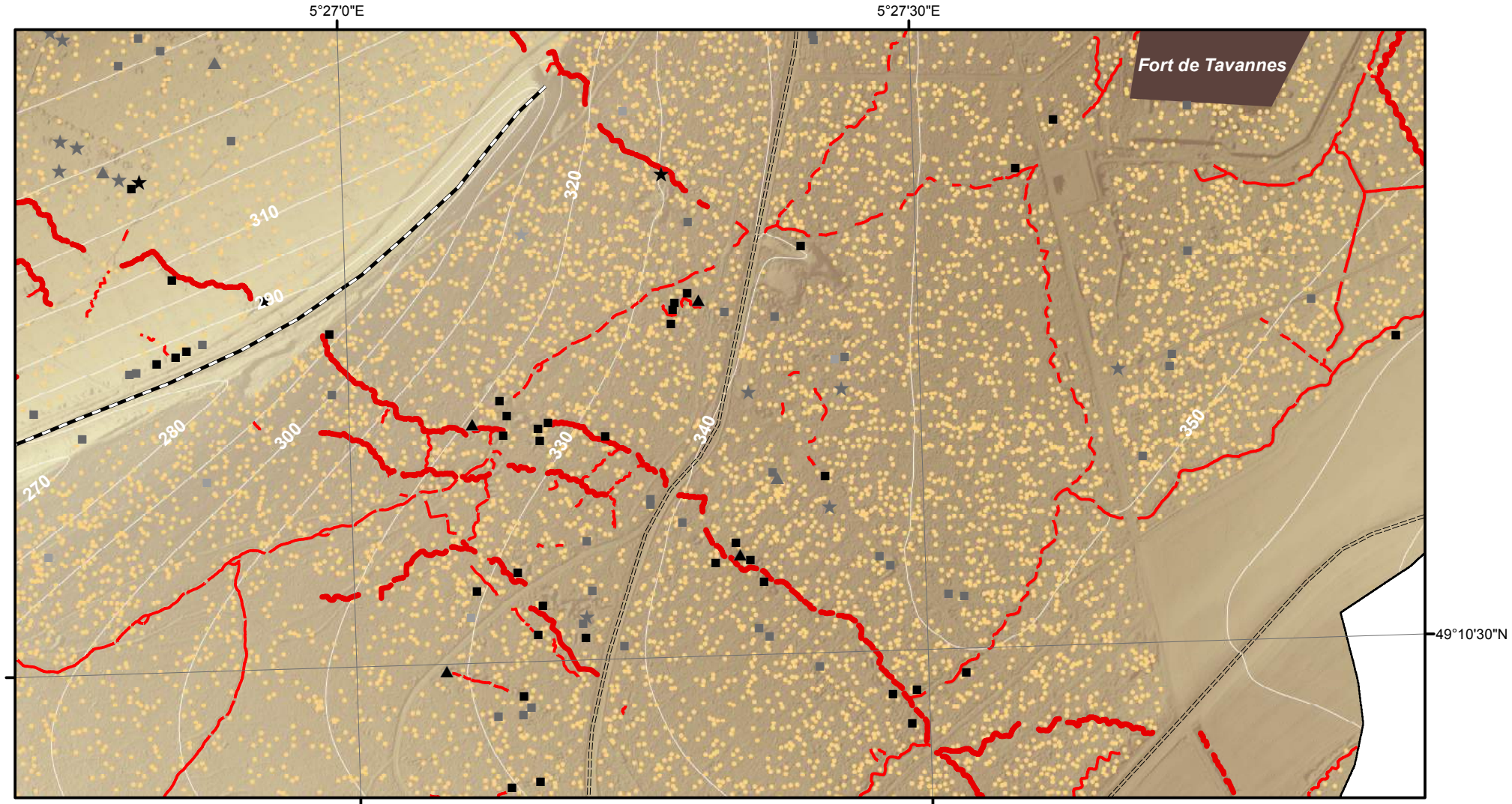
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **S6**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

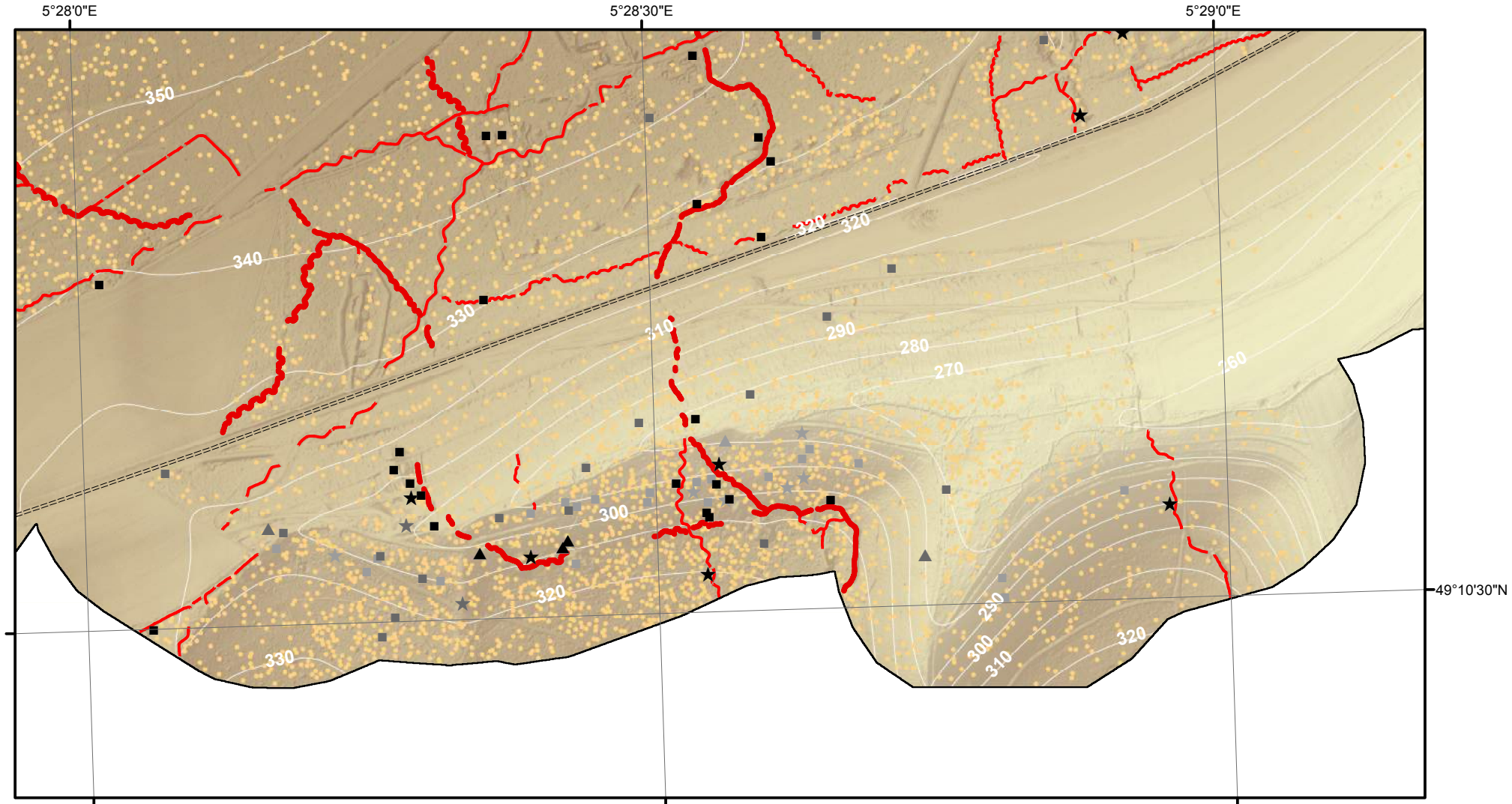
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

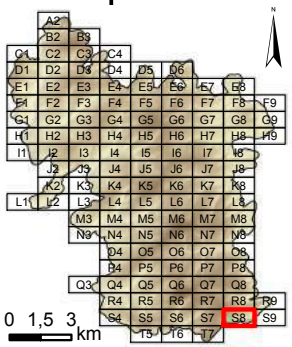
Dalle : **S7**

0 50 100 200 300 400 m

0 1,5 3 km

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

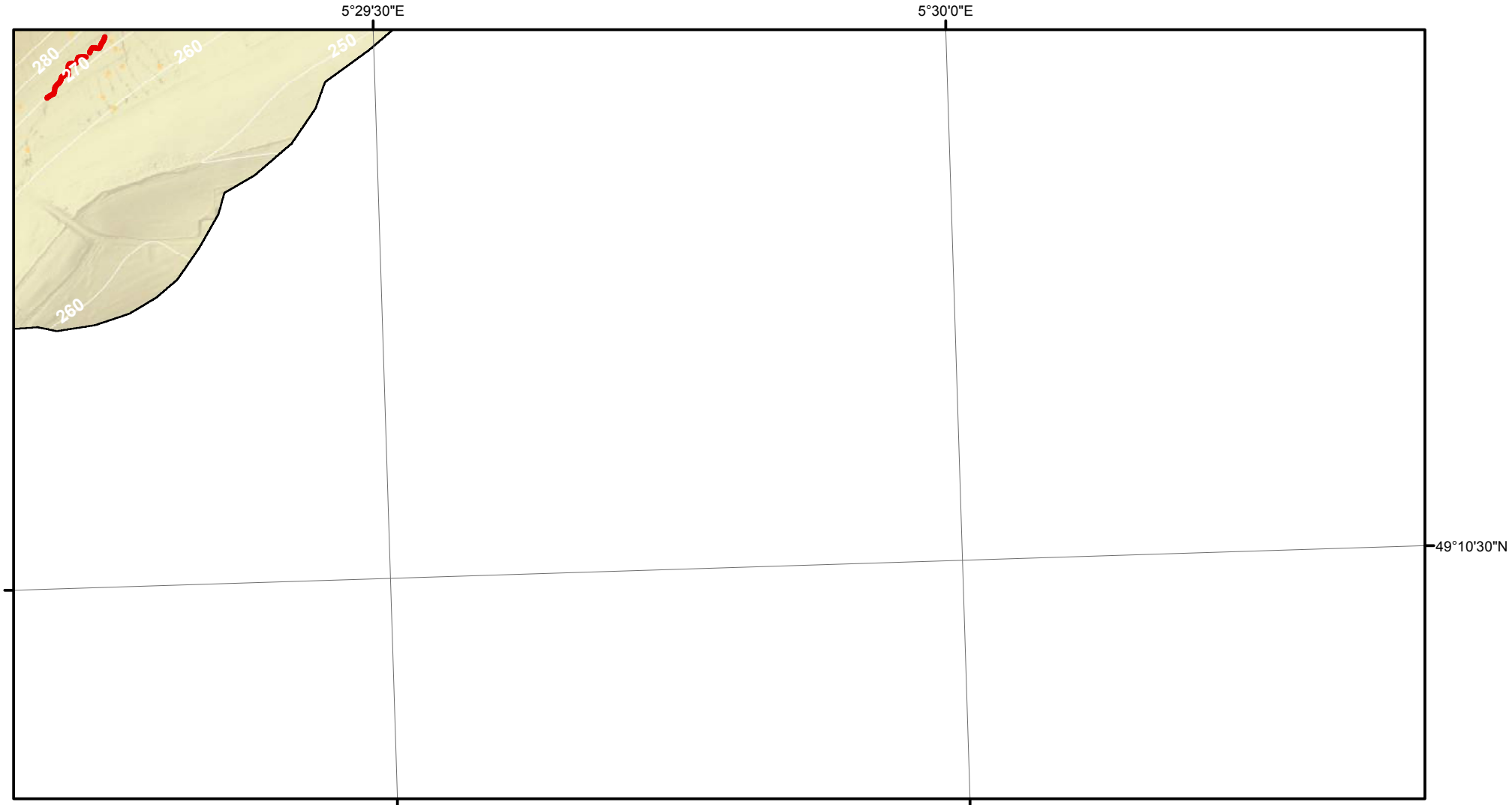
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

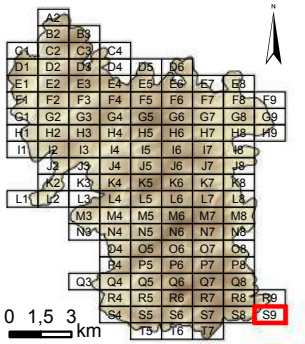
Dalle : **S8**

N W E S

0 50 100 200 300 400 m

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

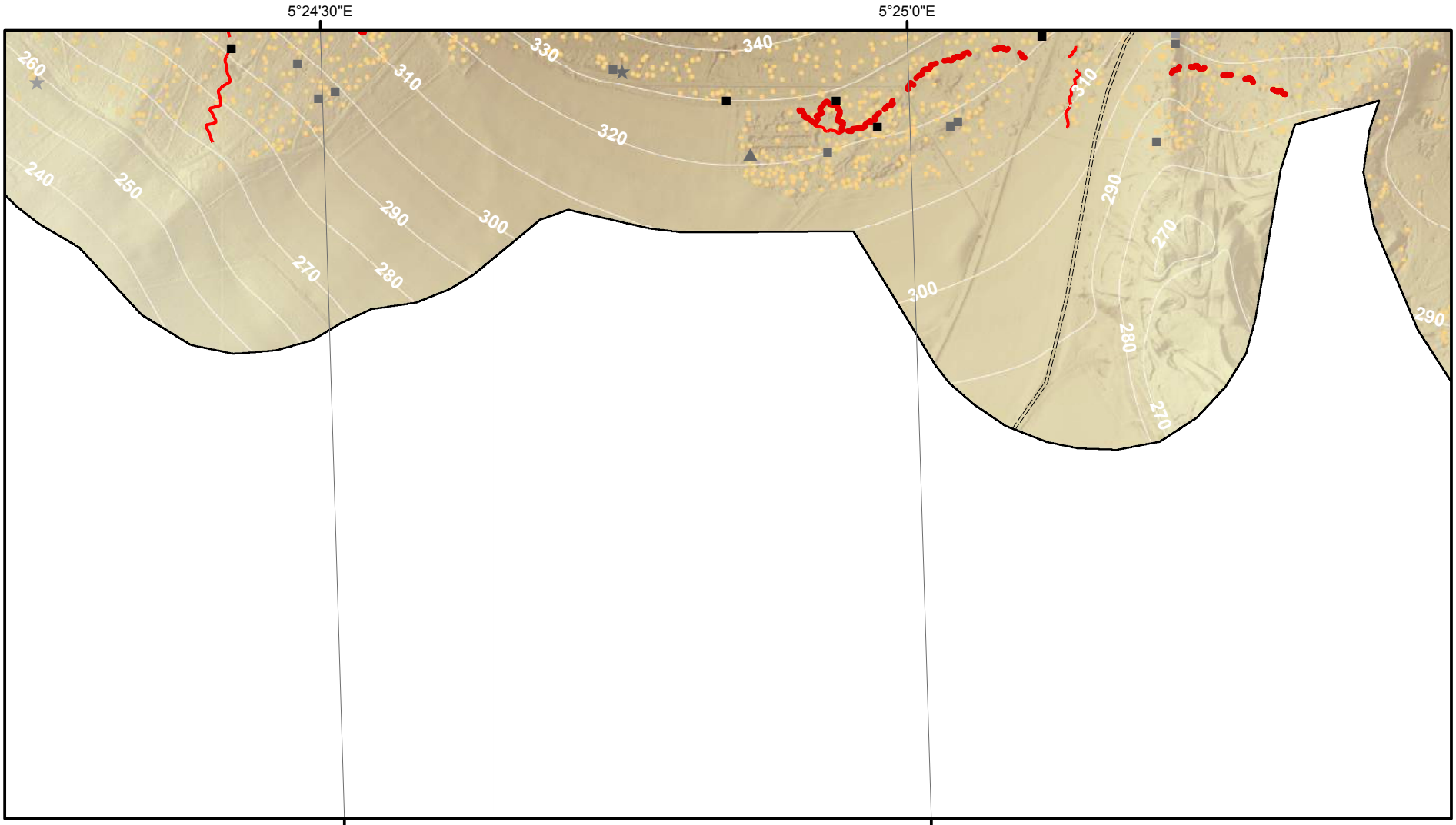
MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

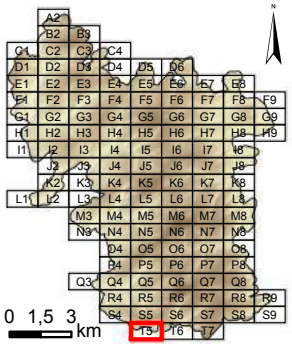
Dalle : **S9**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

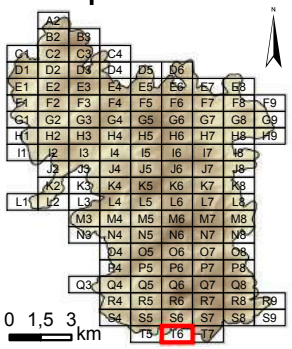
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **T5**

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado



Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

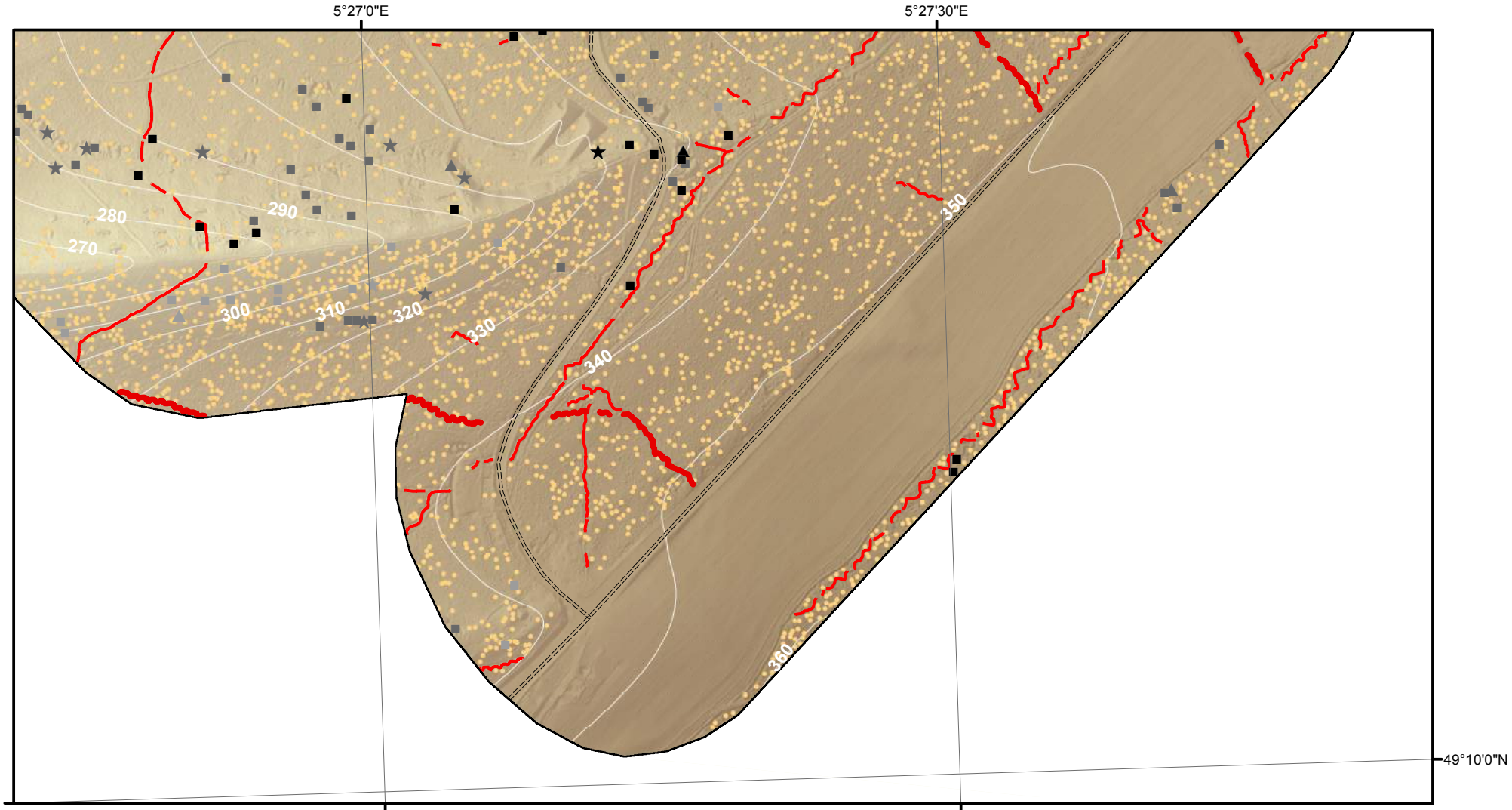
- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

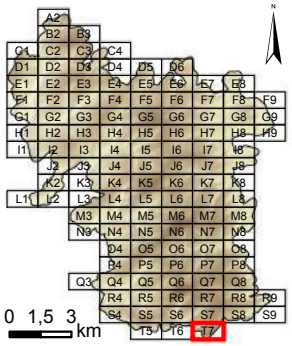
MNT (en m)
397,04
300
200
184,42

Dalle : **T6**

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado





Cartographie des polémoformes de la forêt domaniale de Verdun

- Cratère d'obus (simple ou coalescent)
- Construction orthogonale (fiabilité maximale)
- Construction orthogonale (fiabilité moyenne)
- Construction orthogonale (fiabilité minimale)
- Construction triangulaire (fiabilité maximale)
- Construction triangulaire (fiabilité moyenne)
- Construction triangulaire (fiabilité minimale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité maximale)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité moyenne)
- Construction polygonale au contour très sinueux (fiabilité minimale)

- Tranchée
- Boyau de communication
- Axe routier majeur
- Chemin de fer
- Village, ferme
- Ouvrage fortifié, monument

MNT (en m)
- *397,04*
- *300*
- *200*
- *184,42*

Dalle : **T7**

N W E S

0 50 100 200 300 400 *m*

Système de coordonnées : RGF 1993 Lambert 93
Système de projection : conique conforme de Lambert
Atlas réalisé sous ArcGIS desktop 10.3
Auteur : Rémi de Matos Machado

Annexe F – Cartes de densité de polémoformes par classe

Figure F.1 – *Carte de densité des cratères d'obus singuliers (D1)*

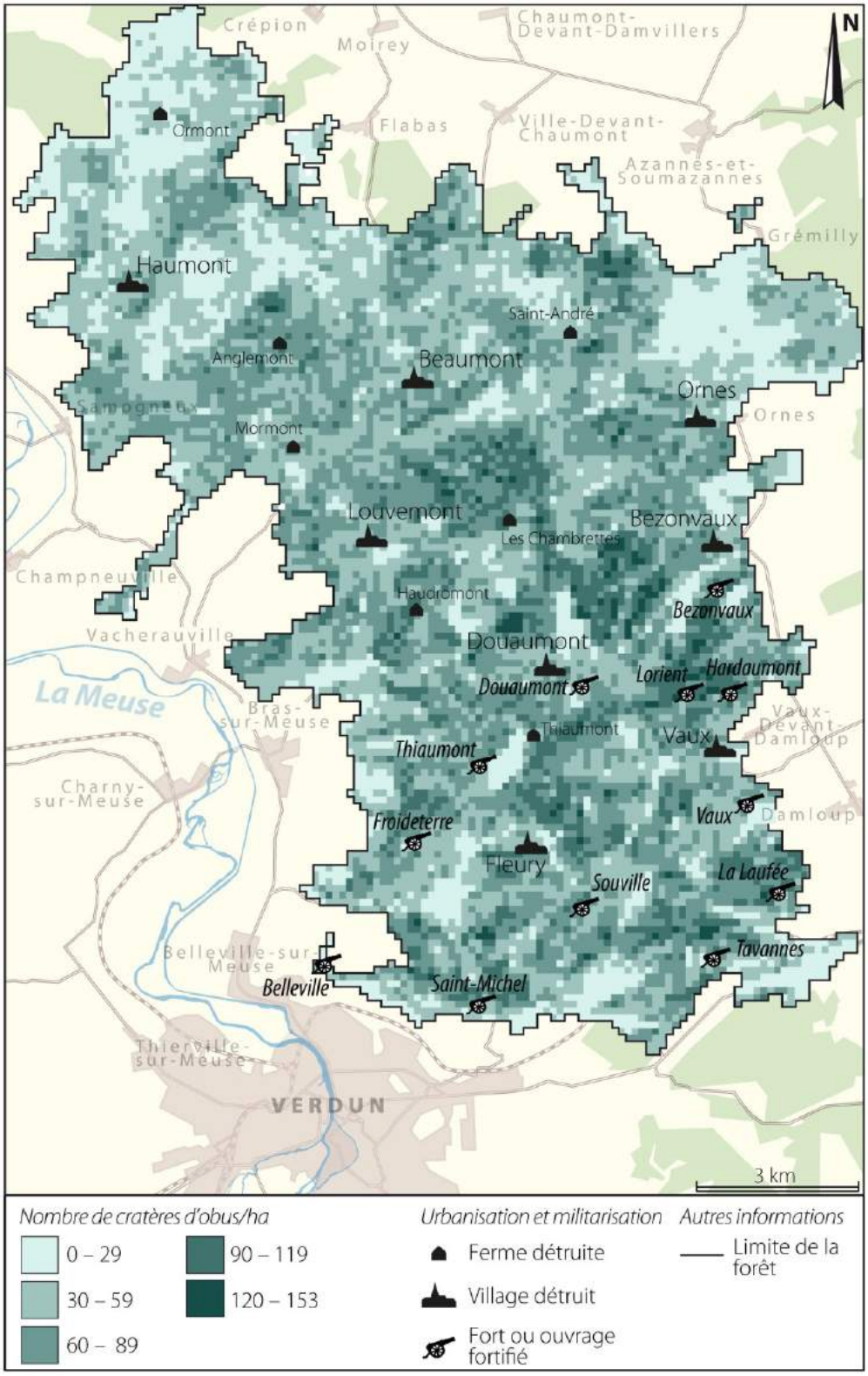


Figure F.2 – *Carte de densité des cratères d'obus à deux dépressions (D2)*

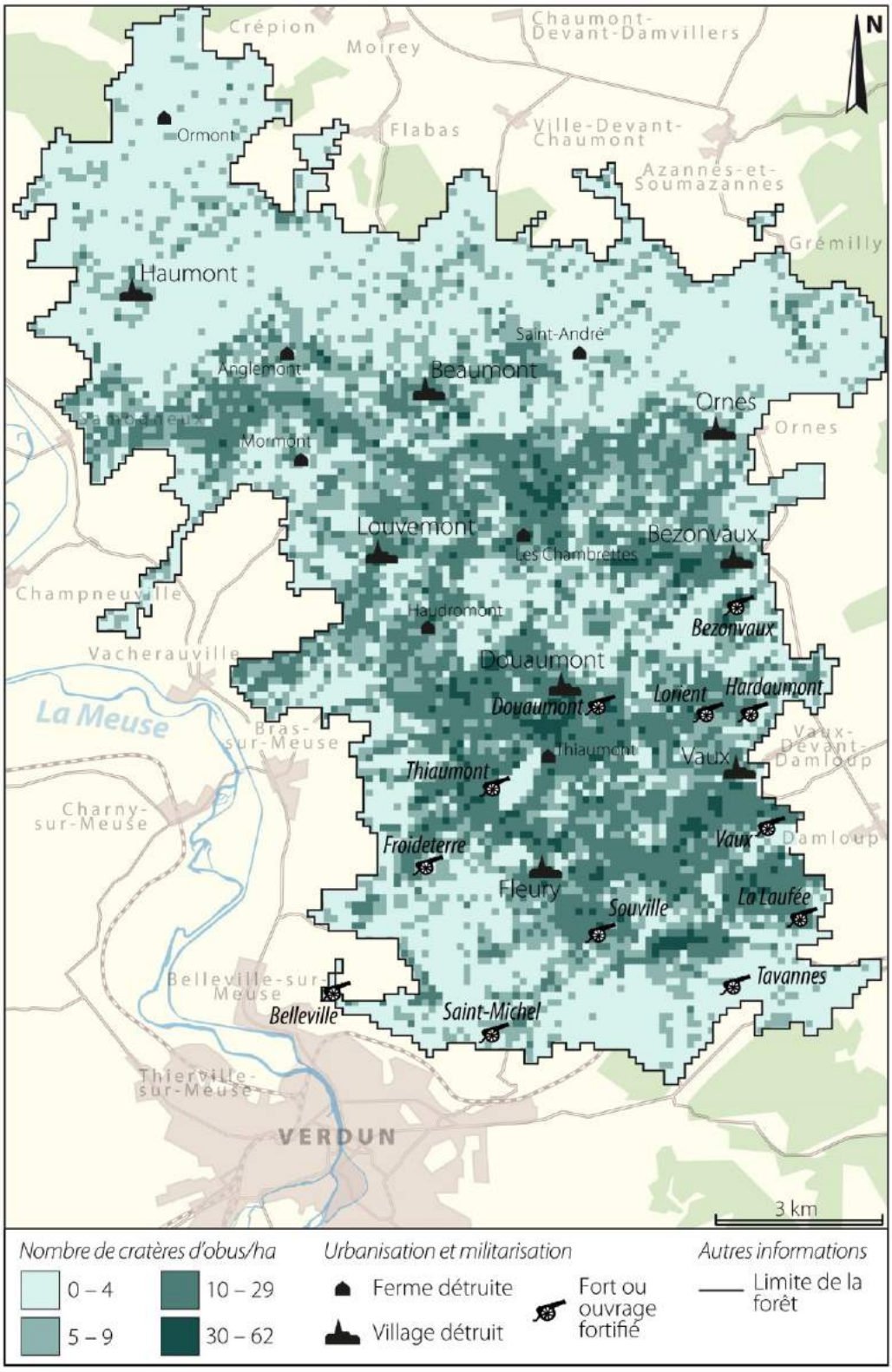


Figure F.3 – *Carte de densité des cratères d'obus à trois dépressions ou plus (D3)*

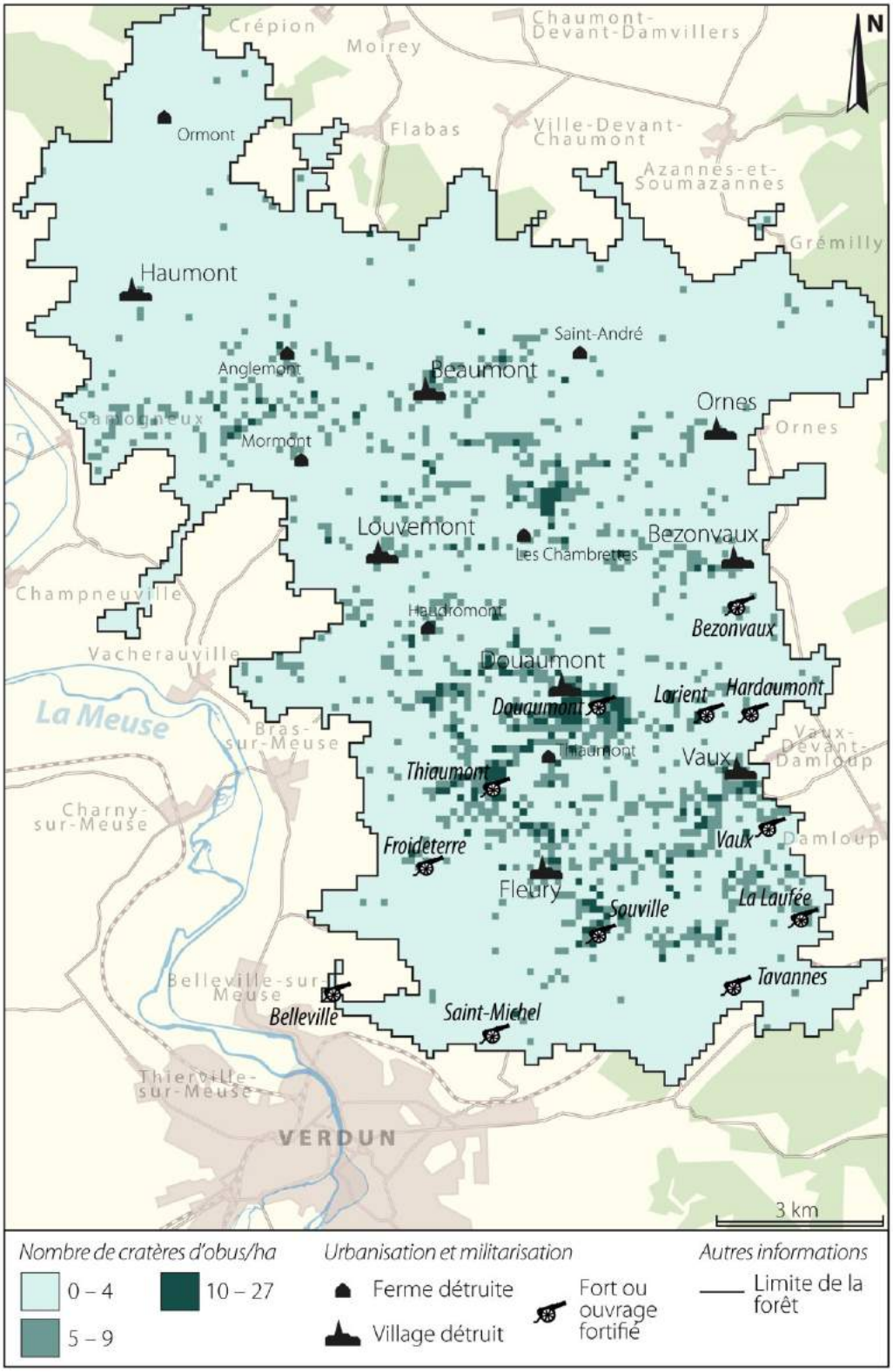


Figure F.4 – *Carte de densité des constructions orthogonales (D4)*

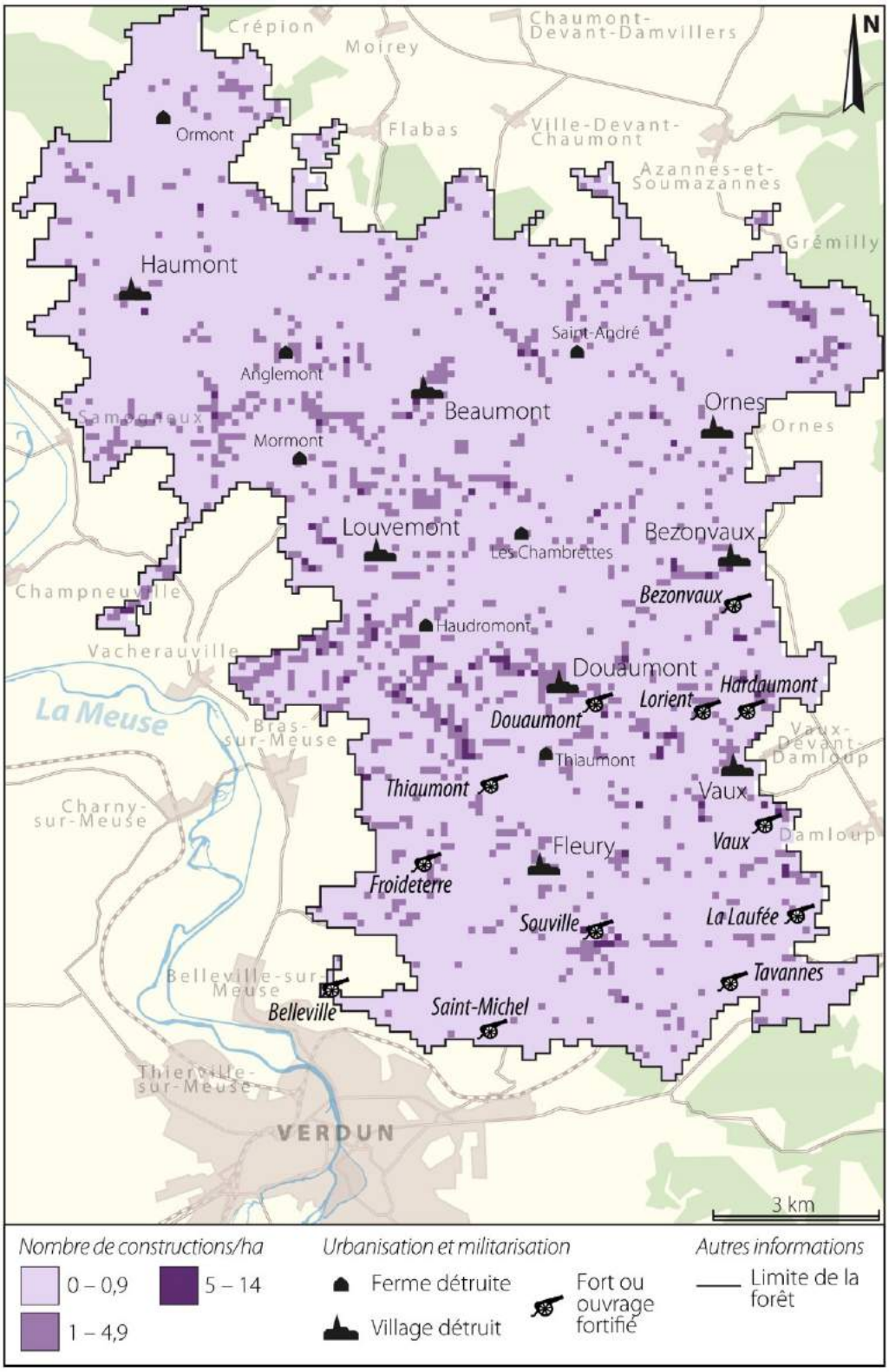


Figure F.5 – *Carte de densité des constructions triangulaires (D5)*

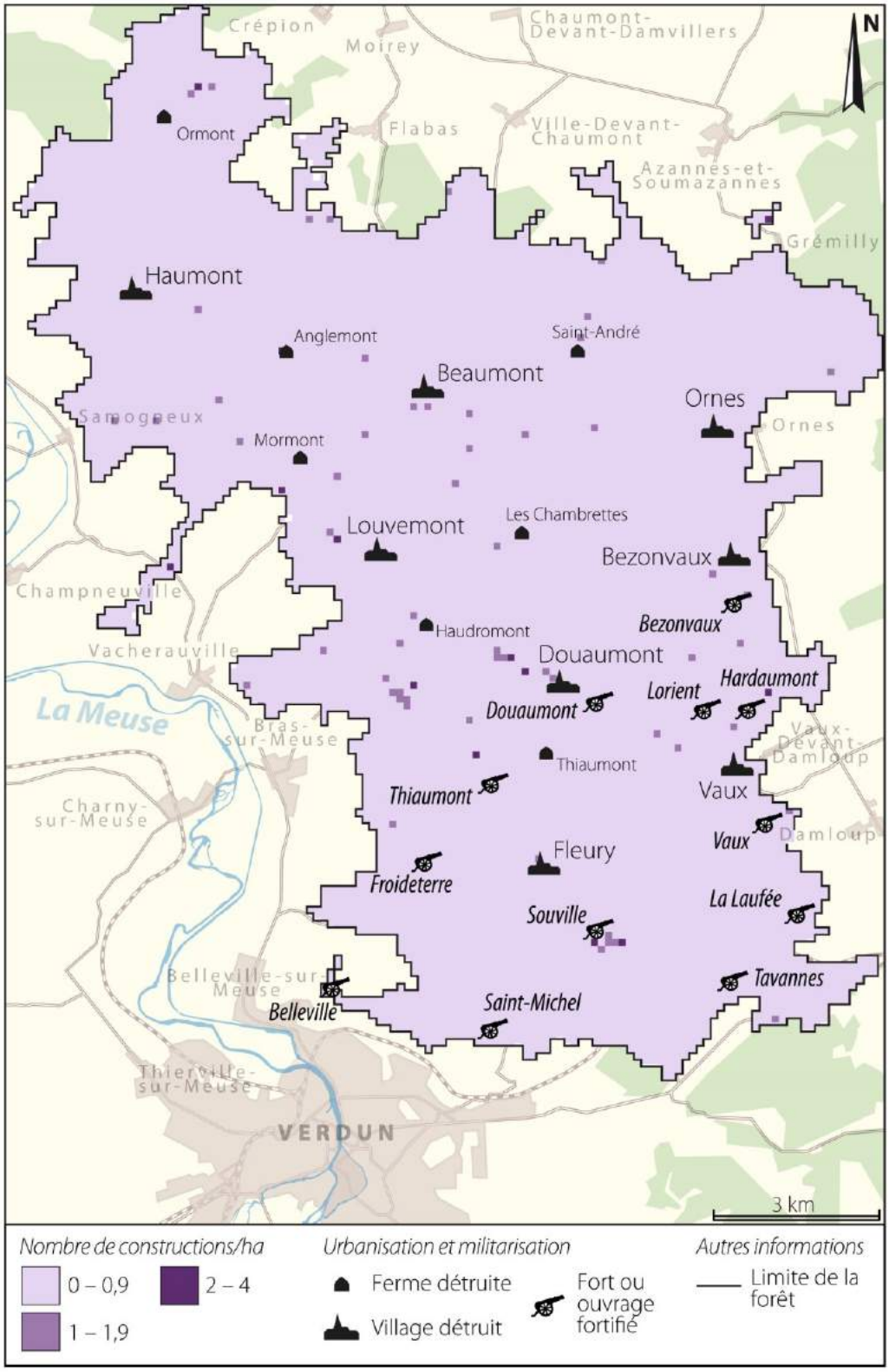


Figure F.6 – *Carte de densité des constructions polygonales au contour très sinueux (D6)*

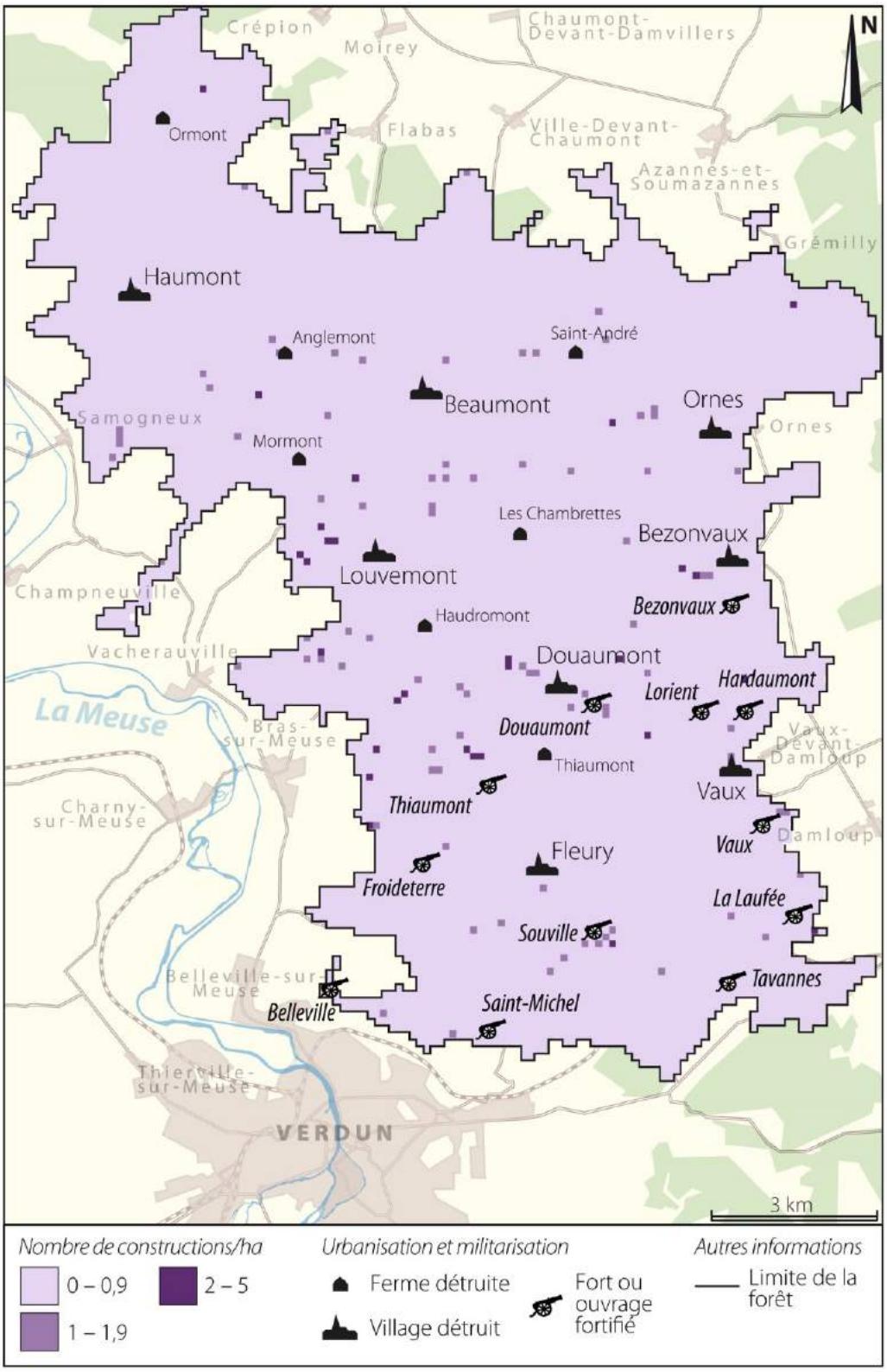


Figure F.7 – *Carte de densité des tranchées (D9)*

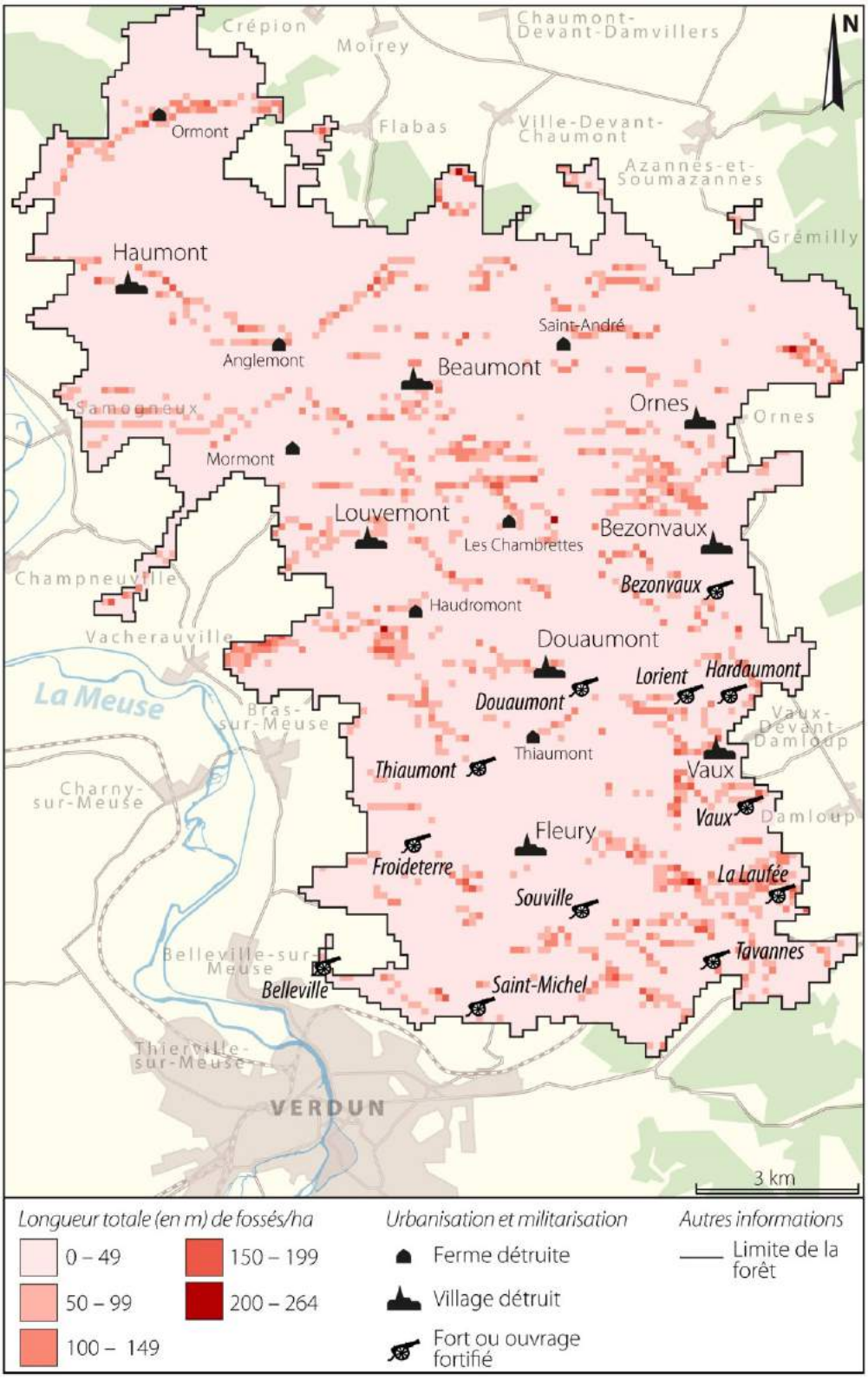
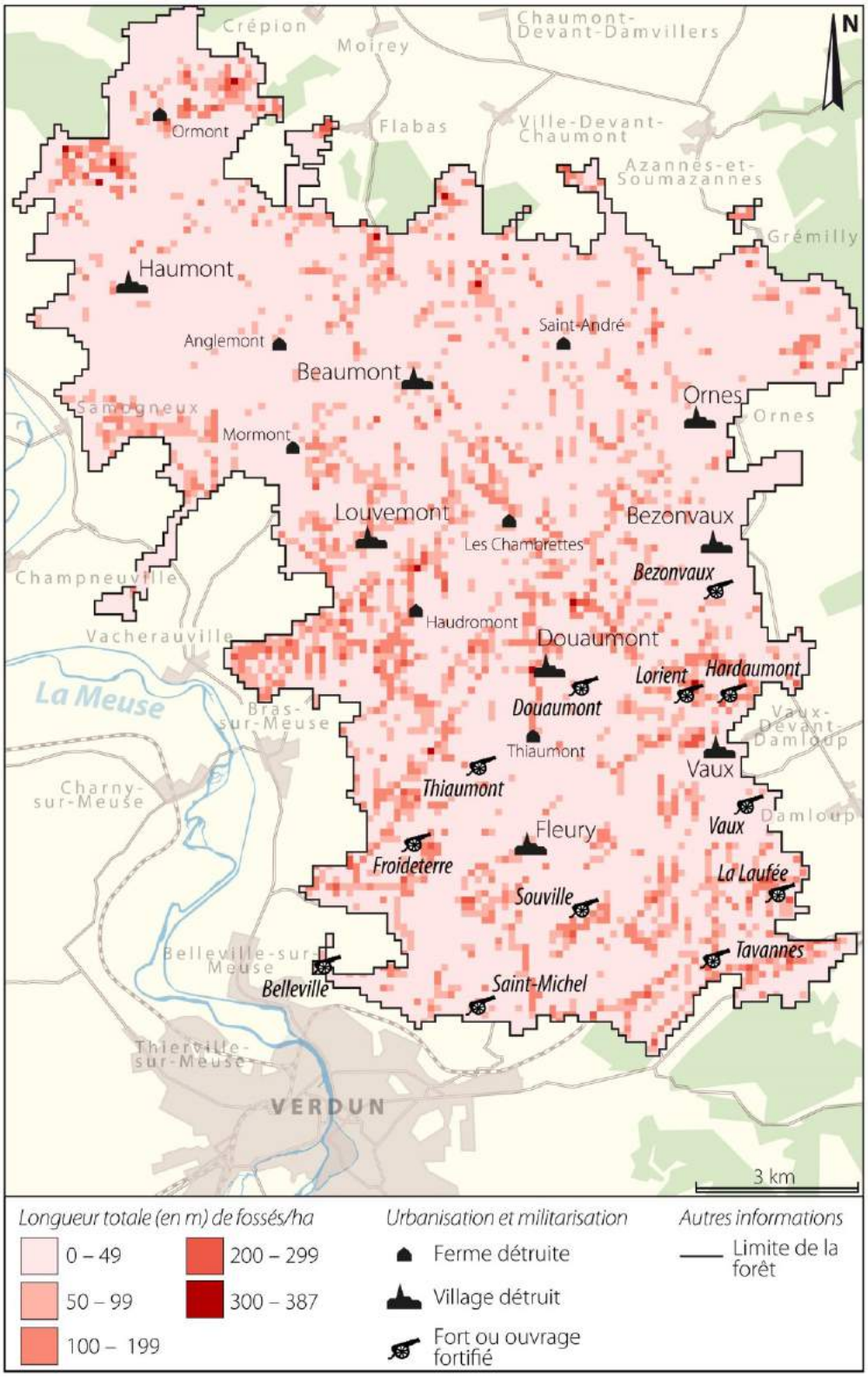
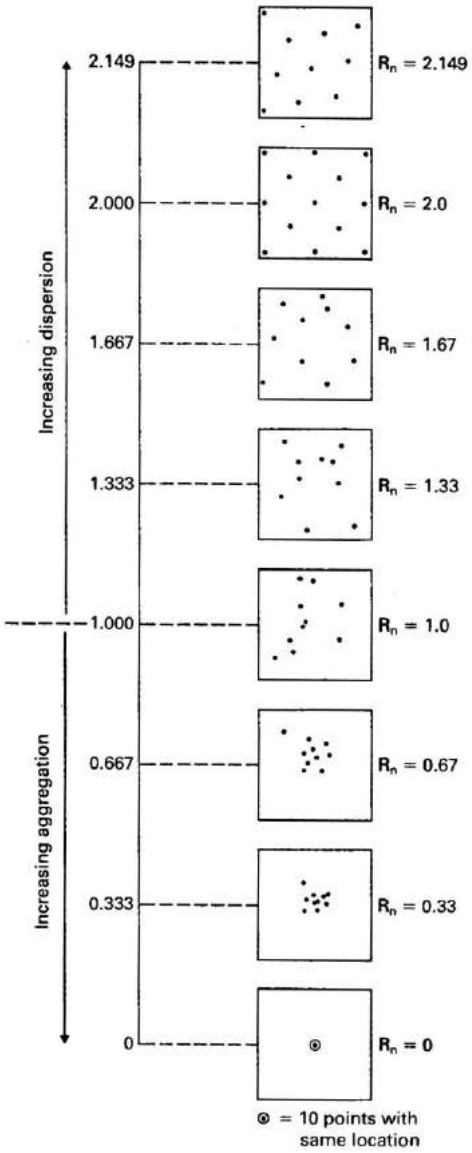


Figure F.8 – *Carte de densité des boyaux (D10)*



Annexe G – L'indice de dispersion de Taylor (1977)



Elle consiste à calculer pour chaque point du semis la distance au point le plus proche. L'opération est réalisée sur tous les points puis la moyenne des distances est calculée. Parallèlement, une distance théorique moyenne correspondant à une distribution aléatoire des points est évaluée. L'indice de dispersion s'obtient en faisant le rapport des deux moyennes. Un indice proche de 1 correspond à une distribution aléatoire. Un indice proche de 0 indique la présence d'une distribution agrégée. Un indice proche de 2 signifie que les points sont dispersés (Taylor, 1977).

Annexe H – Cartes diachroniques issues du mémoire de Master 2 (De Matos-Machado, 2014)

Figure H.1 *– Carte diachronique du bois des Caures*

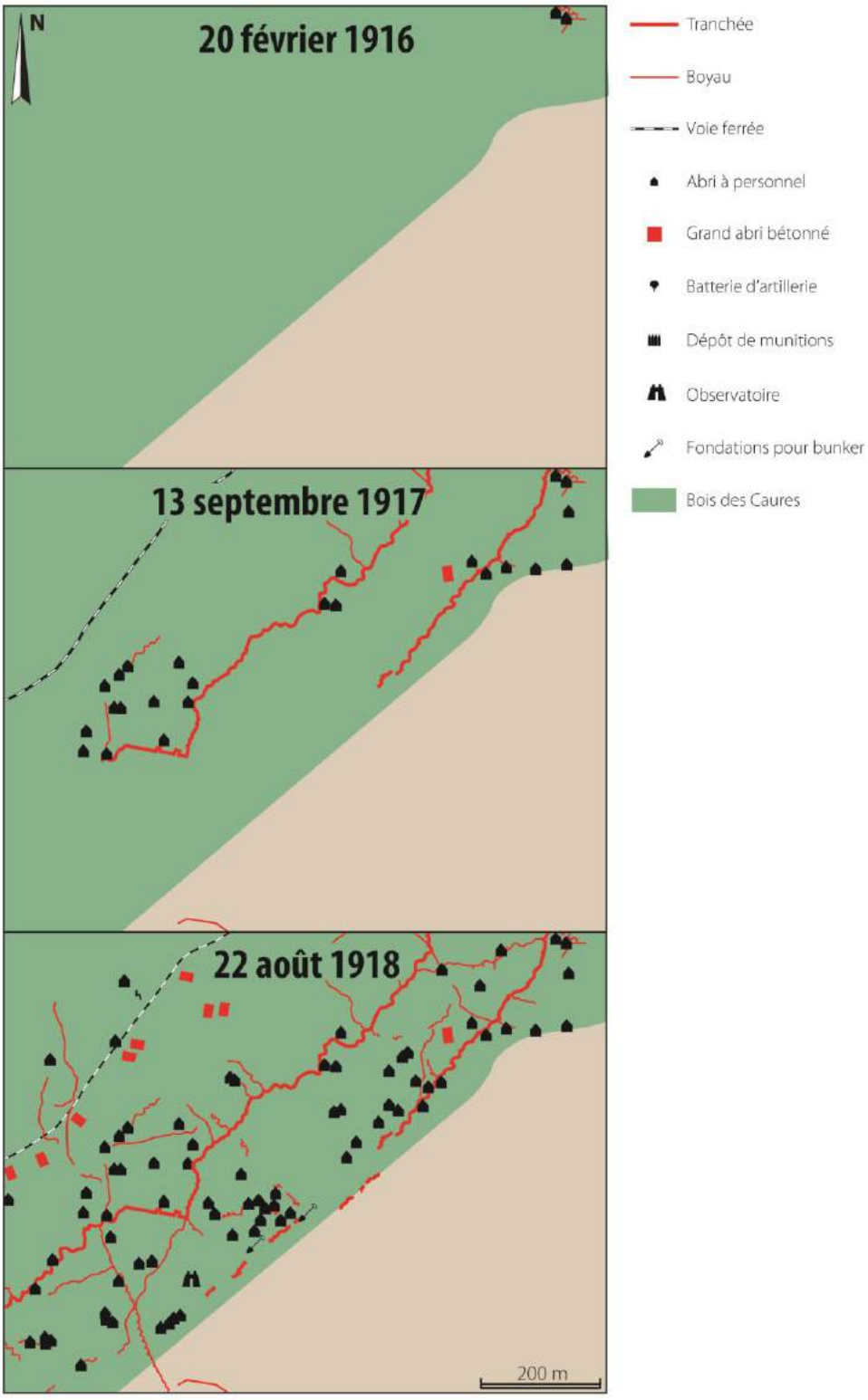


Figure H.2 *– Carte diachronique du bois d'Ormont*

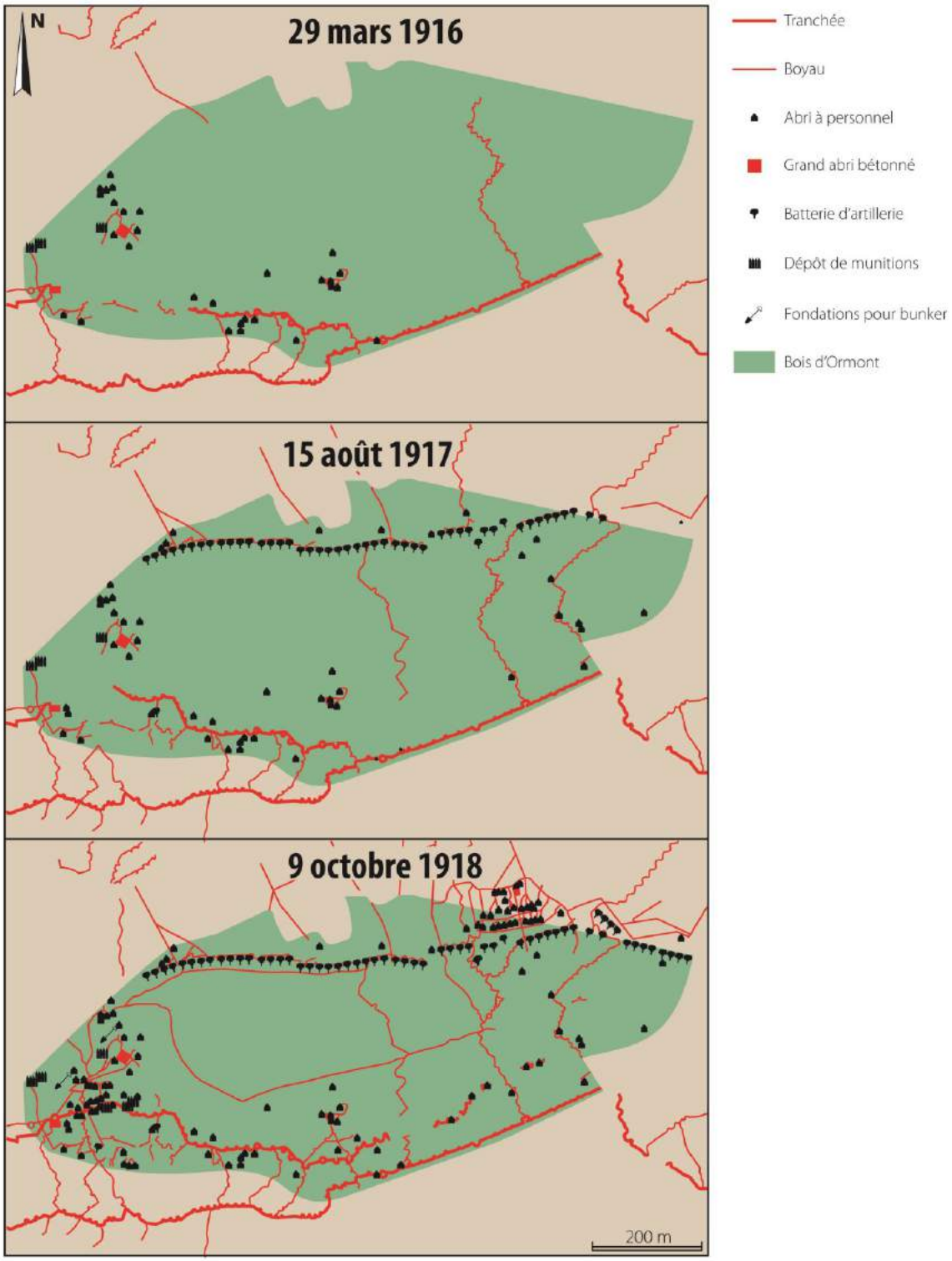
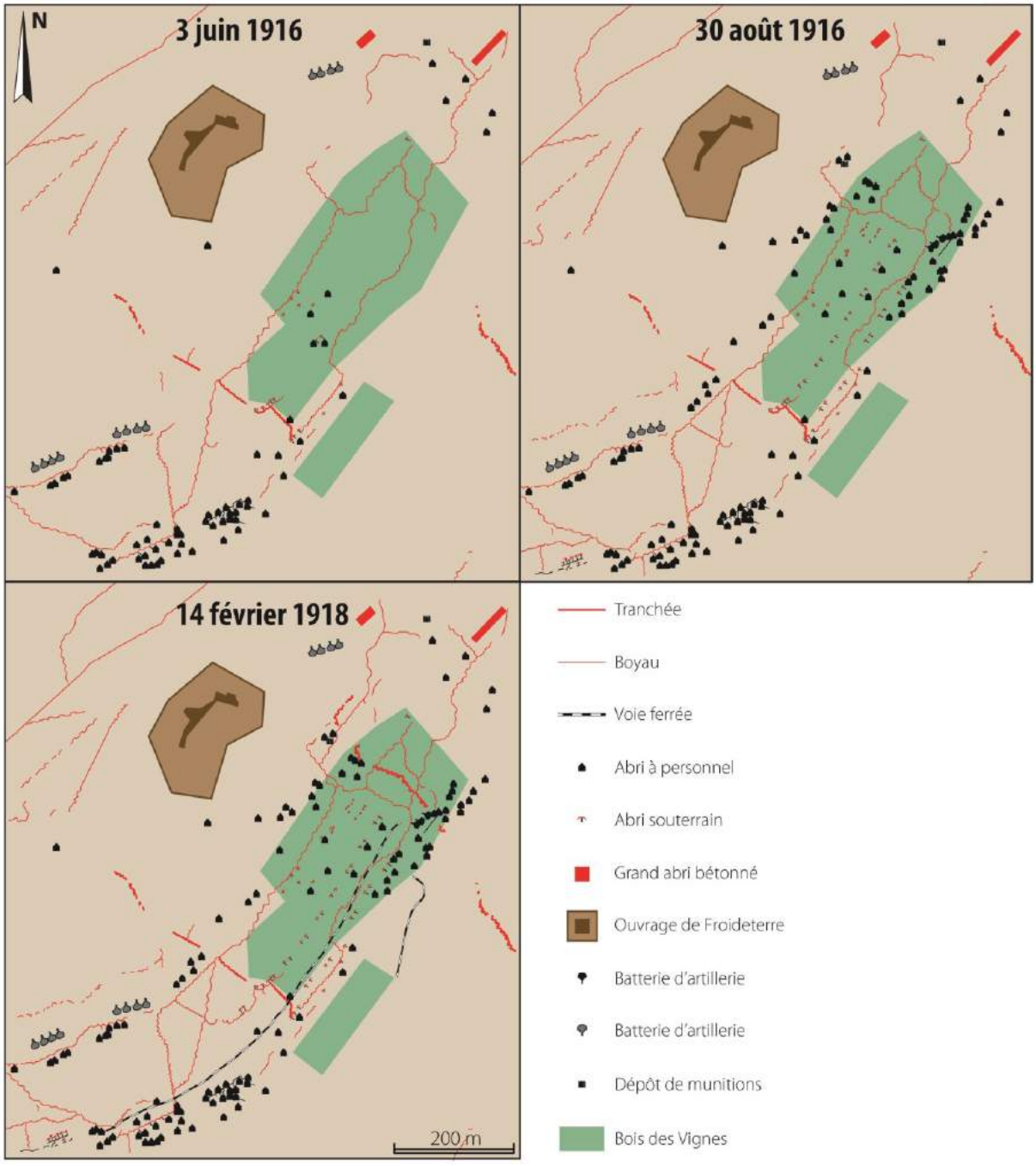


Figure H.3 – *Carte diachronique du secteur de l'ouvrage de Froideterre*



Sources : De Matos-Machado (2014)

Annexe I – Le comité de pilotage « *Forêt d'Exception* »

Liste des membres
Conseil régional du Grand Est
DRAC et DREAL du Grand Est
Préfecture du département de la Meuse
Conseil départemental de la Meuse
DDT de la Meuse
ONF de Verdun, de Lorraine et direction générale
Communauté de communes du Pays de Charny
Ville de Verdun
Fondation du patrimoine
Jean-Paul Amat, Professeur émérite de Sorbonne-Université (Paris IV)
Fédération des communes forestières de la Meuse
Fédération départementale des chasseurs de la Meuse
Association Meuse nature environnement
Associations patriotiques (Fédération Maginot, Souvenir français, Ceux de Verdun, On ne passe pas, Union nationale des combattants)

Liste des figures

Introduction

Figure 1 *– Localisation de la zone d'étude sur le front de l'Ouest* 16
Figure 2 *– La forêt domaniale de Verdun et ses paysages de guerre* 18
Figure 3 *– Démarche méthodologique de la thèse* 20
Figure 4 *– Organisation du manuscrit* 23

PARTIE 1

Chapitre 1

Figure 1.1 *– Naissance d'un polémofaciès forestier* 31
Figure 1.2 *– Les quatre stades de mutation du polémofaciès à travers l'exemple du fort de Douaumont (champ de bataille de Verdun)* 32
Figure 1.3 *– Les trois visions du paysage de guerre* 35
Figure 1.4 *– Position française camouflée (1914-1918) par un talus et un bois* 39
Figure 1.5 *– Conséquences de la Guerre du Viêt Nam sur les paysages ruraux.* 43
Figure 1.6 *– Une position d'artillerie lourde reconstituée sur le champ de bataille de Gettysburg (1863)* 46
Figure 1.7 *– Le cratère Lochnagar résultant de l'explosion d'une mine britannique durant la bataille de la Somme (1916)* 46
Figure 1.8 *– Visite d'un chantier archéologique près d'Ypres (Belgique) lors de la conférence Conflict landscapes (2014)* 51
Figure 1.9 *– Placement de l'archéogéomorphologie* 53
Figure 1.10 *– Exemples de vestiges de guerre visibles depuis le ciel* 54
Figure 1.11 *– Le polémofaciès du champ de bataille de Verdun* 58
Figure 1.12 *– Exemples de cratères d'obus de taille commune sur le front de l'Ouest, l'un en forêt domaniale de Verdun (à gauche), l'autre en forêt domaniale de Spincourt (à droite)* 60
Figure 1.13 *– Quelques faciès d'entonnoirs résultant de l'explosion de mines souterraines* 61
Figure 1.14 – Schéma théorique de l'organisation d'un système de tranchées 64
Figure 1.15 *– Vue d'un système de tranchées sur le champ de bataille de la Somme (Mémorial Terre-Neuvien de Beaumont-Hamel)* 65
Figure 1.16 – *La tranchée, le boyau et le tunnel : trois axes de communication de la guerre de position.* 66

Chapitre 2

Figure 2.1 *– Localisation du Pays de Verdun et de la zone d'étude 72*
Figure 2.2 *– Les rideaux défensifs du système fortifié dit « Séré de Rivières », 1873-1914 ..... 74*
Figure 2.3 – *Carte géomorphologique des Hauts de Meuse en rive droite 77*
Figure 2.4 *– Vue aérienne du village d'Ornes et de ses alentours au 11 octobre 1914 ..... 79*
Figure 2.5 *– Les Côtes de Meuse au sud-est du fort de Vaux le 9 juillet 1915 ..... 80*
Figure 2.6 *– Représentation artistique du bombardement du 21 février 1916 sur la ville de Verdun (Mémorial de Verdun) 82*
Figure 2.7 *– Présentation du champ de bataille de Verdun 83*
Figure 2.8 *– La lisière orientale du bois des Fosses le 2 juin 1918 ..... 83*
Figure 2.9 *– Le fort de Vaux avant et après le début de la bataille de Verdun (1916). 85*
Figure 2.10 *– Le zonage des terres dévastées sur le front de l'Ouest (Amat, 2015) 90*
Figure 2.11 *– L'attribution des terres sur le champ de bataille de Verdun rive droite 92*
Figure 2.12 *– Quatre stades de la métamorphose paysagère depuis le début du XXème siècle 94*
Figure 2.13 *– Vue vers le sud de la forêt domaniale de Verdun depuis l'abri 320. ..... 96*
Figure 2.14 *– Couples de photographies diachroniques sur le champ de bataille de Verdun 98*

PARTIE 2

Chapitre 3

Figure 3.1 *– Principe de fonctionnement du LiDAR aéroporté multi-écho 109*
Figure 3.2 – *La mission LiDAR aéroportée des 26 et 27 mars 2013 sur la forêt domaniale de Verdun 111*
Figure 3.3 *– Carte des points sol après filtrage sur la classe 2 ..... 112*
Figure 3.4 *– Une parcelle récemment plantée en hêtre près du bois d'Ormont 114*
Figure 3.5 *– Localisation des sites de contrôle et des échantillons 116*
Figure 3.6 *– Schéma du dispositif de mesure au télémètre laser 117*
Figure 3.7 *– Résultats du test de répétitivité des mesures effectuées au télémètre laser 118*
Figure 3.8 *– Acquisition des valeurs de profondeur sur le terrain et sur le nuage de points 120*
Figure 3.9 *– Analyse 3-D du nuage de points sous deux types de peuplements. 122*
Figure 3.10 *– Comportement des impulsions laser dans différents environnements 124*
Figure 3.11 *– Principe d'interpolation des points sol 126*
Figure 3.12 *– Fonctionnement de la méthode d'interpolation par voisins naturels sur un pixel 127*
Figure 3.13 *– Évolution du rendu d'un objet en fonction de la résolution choisie 130*
Figure 3.14 *– Aperçu des effets du filtre sur un extrait d'image LiDAR 130*

Chapitre 4

Figure 4.1 *– Synopsis des différentes méthodes de visualisation employées pour la détection des vestiges de guerre 139*
Figure 4.2 *– Dépression sur le terrain et sur un MNT 142*
Figure 4.3 *– Localisation des sites visités 148*
Figure 4.4 *– Chaîne de traitements décrivant la procédure d'inventaire des formes 150*
Figure 4.5 *– Suppression des structures post-conflit 151*
Figure 4.6 *– Aperçu des deux sites échantillons 152*
Figure 4.7 *– Application de l'algorithme du LRM sur un extrait du MNT LiDAR 154*
Figure 4.8 *– Tri des formes compactes et linéaires à partir de l'algorithme de Toumazet 155*
Figure 4.9 *– Aperçu des résultats du traitement par morphologie mathématique 156*
Figure 4.10 *– Aperçu des quatre catégories de formes 157*
Figure 4.11 *– Exemple de squelettisation sur un tronçon de tranchée. 159*
Figure 4.12 *– Calcul des paramètres morphométriques 2-D et 3-D 161*
Figure 4.13 *– Explication de la procédure d'analyse morphométrique et de classification des formes 170*
Figure 4.14 *– Interprétation d'une boîte de dispersion. Exemple d'une boîte de dispersion illustrant des concentrations journalières des taux de NO_2 ..... 172*
Figure 4.15 *– Exemple de calcul du volume d'un cratère d'obus 174*

Chapitre 5

Figure 5.1 *– Trois types de photographies aériennes tirées pendant la Grande Guerre 182*
Figure 5.2 *– Les cartographes des groupes de canevas de tir en action au QG de la place fortifiée de Verdun 185*
Figure 5.3 *– Extrait d'un plan directeur allemand au 1/10 000 du 10 mars 1917 ..... 185*
Figure 5.4 – *Vue des ruines du village d'Haumont-près-Samogneux depuis le nord-ouest (juin 1917) 186*
Figure 5.5 – *Carte postale illustrant les bombardements du 21 février 1916 dans le bois des Caures 186*
Figure 5.6 – *Extrait du JMO du 9ème régiment du génie le 22 août 1915. ..... 188*
Figure 5.7 *– Localisation des centres d'archives visités 189*
Figure 5.8 *– Effets d'une géo-rectification de photographie aérienne à partir des méthodes polynomiales 200*
Figure 5.9 *– Exemple de point de calage lors du géoréférencement d'une photographie aérienne. 201*
Figure 5.10 *– Aperçu des résultats du géoréférencement des photographies aériennes 204*
Figure 5.11 *– Aperçu des résultats du géoréférencement des plans directeurs 205*
Figure 5.12 *– Exemple d'anomalie constatée sur deux plans directeurs 209*

PARTIE 3

Chapitre 6

Figure 6.1 *– Histogrammes des variables de taille* 216
Figure 6.2 *– Histogrammes des variables de formes* 217
Figure 6.3 *– Histogrammes des variables 3-D* 218
Figure 6.4 *– Projection des variables morphométriques et identification des variables liées. Les variables opposées ou possédant des directions proches constituent les variables liées (redondantes).* 220
Figure 6.5 *– Résultats de la première classification* 223
Figure 6.6 *– Résultats de la deuxième classification* 224
Figure 6.7 *– Résultats de la troisième classification* 225
Figure 6.8 *– Extrait de l'atlas des polémoformes (dalle N6, fort de Douaumont)* 228
Figure 6.9 *– Confrontation des résultats de la détection avec les données in situ (bois d'Ormont)* ... 231
Figure 6.10 *– Confrontation des résultats de la classification avec les données in situ (bois d'Ormont)* 232
Figure 6.11 *– Comparaison des taux de détection de cratères d'obus entre la cartographie LiDAR et une photographie aérienne du fort de Douaumont* 236
Figure 6.12 *– Comparaison des taux de détection de cratères d'obus entre la cartographie LiDAR et une photographie aérienne dans le secteur du bois d'Haumont* 237
Figure 6.13 *– Boîtes de dispersion de deux variables renseignant sur la présence de cratères d'obus* 239
Figure 6.14 *– Principaux types de cratères d'obus* 242
Figure 6.15 *– Variation de la taille des cratères en fonction du poids de l'explosif* 245
Figure 6.16 *– Boîtes de dispersion de deux variables renseignant sur la présence d'abris et de positions d'artillerie* 248
Figure 6.17 *– Principaux types d'abris et de positions d'artillerie* 250
Figure 6.18 *– Comparaison d'abris et de batteries d'artillerie entre différents champs de bataille* 258
Figure 6.19 *– Boîtes de dispersion des variables morphométriques décrivant les réseaux de fossés* ... 260
Figure 6.20 *– Principaux types de fossés* 261
Figure 6.21 *– Tracé de la tranchée allemande du Taurus dans le bois des Caures* 265

Chapitre 7

Figure 7.1 *– Superficie occupée par les polémoformes* 271
Figure 7.2 *– Spatialisation des volumes de polémoformes* 274
Figure 7.3 *– Biais rencontré sur les fossés pentus lors du calcul de volume* 276
Figure 7.4 *– Indice de bouleversement géomorphologique* 280
Figure 7.5 *– Carte de densité des cratères d'obus (D1, D2 et D3)* 282
Figure 7.6 *– Carte de densité des abris et positions d'artillerie (D4, D5 et D6)* 285
Figure 7.7 *– Carte de densité des fossés (D9 et D10)* 288
Figure 7.8 – *Déplacement de la ligne de front entre 1916 et 1918* 290
Figure 7.9 *– Le gradient polémologique* 291
Figure 7.10 *– Le gradient topographique* 297

***Figure 7.11** – Évolution du kilométrage de fossés de février 1916 à novembre 1918 ..... 301*
***Figure 7.12** – Carte des fossés en février 1916 ..... 302*
***Figure 7.13** – Carte des fossés en juin 1916 ..... 303*
***Figure 7.14** – Carte des fossés en novembre 1916 ..... 304*
***Figure 7.15** – Carte des fossés en mars 1917 ..... 306*
***Figure 7.16** – Carte des fossés en juillet 1917 ..... 307*
***Figure 7.17** – Usage du béton sur le champ de bataille de Verdun 309*
***Figure 7.18** – Carte des fossés en janvier 1918 ..... 310*
***Figure 7.19** – Carte des fossés en novembre 1918 ..... 311*
***Figure 7.20** – Aménagement des cratères d'obus en position de défense. 312*
***Figure 7.21** – Carte diachronique du secteur du fort de Souville 314*
***Figure 7.22** – Carte diachronique de l'Herbebois 316*
***Figure 7.23** – Carte diachronique de la côte du Poivre 319*

PARTIE 4

Chapitre 8

***Figure 8.1** – Quelques exemples d'explosifs rencontrés durant les missions de terrain 329*
***Figure 8.2** – Carte des fossés en 1918 ..... 332*
***Figure 8.3** – Carte des fossés en 2013 ..... 333*
***Figure 8.4** – Taux de conservation des fossés par parcelle 334*
***Figure 8.5** – Carte de l'aménagement forestier 2006-2020 (ONF - Agence de Verdun) 337*
***Figure 8.6** – Aperçu de la topographie des parcelles sous différents types de peuplement 339*
***Figure 8.7** – Différences d'épaisseur de dépôts en milieu perturbé et non perturbé 342*
***Figure 8.8** – Conséquences des bombardements sur l'hydrologie de surface 343*
***Figure 8.9** – Carte de sensibilité patrimoniale 350*
***Figure 8.10** – Carte des zones prioritaires de conservation 351*
***Figure 8.11** – Deux exemples d'initiatives de valorisation. 353*
***Figure 8.12** – Le boyau de Londres, un fossé parmi tant d'autres 357*

Chapitre 9

***Figure 9.1** – Exemples d'agressions affligées aux arbres 364*
***Figure 9.2** – Situations à risque aux bois Chaufour et de Neuville 365*
***Figure 9.3** – La Place à gaz dans la forêt domaniale de Spincourt 367*
***Figure 9.4** – L'Herbe aux yeux bleus et le Cétérach officinal, deux espèces obsidionales 370*
***Figure 9.5** – Exemples de biotopes créés par la Première Guerre mondiale 371*
***Figure 9.6** – Le Sonneur à ventre jaune et le Grand rhinolophe, deux espèces présentes en forêt domaniale de Verdun 372*
***Figure 9.7** – Biodiversité aux abords de l'abri-caverne des quatre cheminées 374*
***Figure 9.8** – Cartes des zonages écologiques 376*
***Figure 9.9** – Extraits des images de densité de points sol et d'intensité du signal. 379*
***Figure 9.10** – Carte d'inventaire des zones humides potentielles 381*
***Figure 9.11** – Détection de trois abris bétonnés dans le bois de la Wavrille 383*

Figure 9.12 *– Carte d'inventaire des abris bétonnés..... 384*

Liste des tableaux

PARTIE 2

Chapitre 3

Tableau 3.1 *– Résultats de l'analyse des écarts observés et théoriques sur les 200 échantillons.* *119*

Chapitre 4

Tableau 4.1 *– Liste des sites visités entre 2013 et 2017* *147*
Tableau 4.2 *– Liste des variables morphométriques élémentaires et 3-D* *164*
Tableau 4.3 *– Liste des variables morphométriques dérivées* *165*

Chapitre5

Tableau 5.1 *– Inventaire des documents récoltés durant les recherches en archives* *196*

PARTIE 3

Chapitre 6

Tableau 6.1 *– Classification finale des formes compactes et creuses* *229*
Tableau 6.2 *– Classification finale des formes linéaires et creuses* *229*
Tableau 6.3 *– Définition des trois niveaux de fiabilité attribués aux formes compactes construites (D4, D5 et D6)* *233*
Tableau 6.4 *– Valeurs morphométriques obtenues pour les cratères d'obus (D1, D2 et D3)* *238*
Tableau 6.5 *– Taille des cratères causés par différents types de projectiles* *240*
Tableau 6.6 *– Taille moyenne des cratères d'obus dans différents contextes géologiques* *245*
Tableau 6.7 *– Valeurs morphométriques obtenues pour les abris et positions d'artillerie* *247*
Tableau 6.8 *– Typologie des abris et positions d'artillerie selon les instructions militaires françaises* *255*
Tableau 6.9 *– Valeurs morphométriques obtenues pour les réseaux de fossés (D9 et D10)* *259*
Tableau 6.10 *– Interprétation de l'indice de sinuosité* *260*
Tableau 6.11 *– Comparaison des réseaux de fossés allemand et français* *265*

Chapitre 7

Tableau 7.1 *– Superficie bouleversée par catégorie de polémoformes 270*
Tableau 7.2 *– Volumes déblayés par catégorie de polémoformes 273*
Tableau 7.3 *– Volumes déblayés par l'aménagement des abris et positions d'artillerie 275*
Tableau 7.4 *– Volumes déblayés par l'aménagement des réseaux de fossés 276*
Tableau 7.5 *– Bilan déblais/remblais des réseaux de fossés 278*
Tableau 7.6 *– Catégories de bouleversement géomorphologique 279*
Tableau 7.7 *– Statistiques de cratères d'obus obtenues sur d'autres champs de bataille 284*
Tableau 7.8 *– Statistiques de kilométrage de fossés par période 300*

PARTIE 4

Chapitre 8

Tableau 8.1 *– Nombre de parcelles par classe d'effacement des fossés 331*
Tableau 8.2 *– Taux d'effacement des fossés par type d'occupation du sol 338*
Tableau 8.3 *– Taux d'effacement des fossés par classe d'altitude 344*
Tableau 8.4 *– Taux d'effacement des fossés par classe de pente 345*

Chapitre 9

Tableau 9.1 *– Listes des plantes obsidionales de la forêt domaniale de Verdun 369*
Tableau 9.2 *– Listes des espèces de chiroptères de la forêt domaniale de Verdun et du Mort-Homme 373*

Table des matières

Remerciements *7*

Acronymes *11*

Introduction générale *15*

1. « Verdun 14-18, Forêt d'Exception » **16**

2. Objectifs scientifiques de la thèse **17**

3. Originalités de la démarche méthodologique **19**

4. Structuration de la thèse **22**

PARTIE 1 – PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE : CADRE THÉMATIQUE ET GÉOGRAPHIQUE **27**

Chapitre 1 – Les paysages de guerre, objets géographiques *27*

1. Du paysage ordinaire au paysage de guerre **28**

1.1. Quelques rappels sur la notion de *paysage* 28

1.2. L'émergence de la notion de *paysage de guerre* 30

1.3. Quelle définition retenir ? 34

2. L'évolution de la recherche sur les relations entre paysage et guerre **36**

2.1. Les paysages et leurs fonctions tactiques 37

2.2. Les paysages façonnés par la guerre 42

2.3. Le paysage de guerre et sa valeur archéologique 49

2.4. L'essor de la *géographie numérique* ou comment approcher les paysages de guerre grâce aux images 53

3. Focus sur les paysages de guerre du front de l'Ouest (1914-1918) **56**

3.1. Matérialités de la guerre dans les campagnes belges et françaises 56

3.2. Le LiDAR et l'archéogéomorphologie pour aborder les paysages de guerre de la forêt domaniale de Verdun 68

4. Conclusions **69**

Chapitre 2 – La forêt domaniale de Verdun : genèse et évolution d'un territoire forestier *71*

1. Histoire et paysages passés d'une région meurtrie **72**
1.1. Le Pays de Verdun, une terre de conflits 72
1.2. Les Côtes de Meuse, socle de la place fortifiée de Verdun 74
1.3. La Meuse agricole et industrielle du début du XXème 78

2. De l'agrofaciès au *polémofaciès* **80**
2.1. Le tournant de 1916, l'année de la bataille de Verdun 81
2.2. Combattre en rase campagne 84
2.3. La forêt meusienne et ses fonctions tactiques 86
2.4. S'adapter à la nature des sols 86
2.5. Le climat maussade des années 1914-1918 87

3. La « fabrique » de la forêt, ou comment restaurer les terres dévastées **88**
3.1. La *Décennie de la Reconstruction* (1919-1932) 88
3.2. Naissance d'une *forêt de guerre* 91
3.3. Le rôle protecteur de la canopée 93
3.4. La crise des années 1960 et la disparition partielle des vestiges de guerre 95
3.5. Un siècle après, un champ de bataille cicatrisé 95

4. Conclusions **99**

PARTIE 2 – DONNÉES ET DÉMARCHES MÉTHODOLOGIQUES **101**

Chapitre 3 – Le LiDAR : performances en milieu intra-forestier, contrôle-qualité et création du MNT *103*

1. Une technologie au service de la société **104**
1.1. Les différents types de LiDAR 104
1.2. Histoire et usages du LiDAR en sciences humaines 105
1.3. Le LiDAR aéroporté, une technique déployée sur la forêt domaniale de Verdun 107

2. Analyse du nuage de points et contrôle qualité **110**
2.1. Répartition des points enregistrés par le LiDAR 111
2.2. Facteurs limitants lors de l'acquisition de données LiDAR 114
2.3. Contrôle-qualité du nuage de points sous deux types de peuplements forestiers 115
2.4. Confrontation des relevés de terrain et du nuage de points 118

3. Construction du modèle numérique de terrain **125**
3.1. L'interpolation ou le passage du point à une surface continue 125
3.2. Les voisins naturels comme méthode privilégiée 128
3.3. Le choix d'une bonne résolution 129
3.4. Débruitage du MNT 131

4. Conclusions **132**

Chapitre 4 – Visualisation des données LiDAR et déploiement d'une méthode de cartographie des polémoformes 135

1. Analyse préliminaire à partir des méthodes de visualisation de données LiDAR 136

1.1. Approches par l'analyse de la lumière solaire 136

1.2. Approches par la topographie 140

1.3. Approches par la modélisation hydrologique 142

1.4. Méthodes alternatives non testées 143

1.5. Synthèse et choix des méthodes retenues pour l'inventaire et l'analyse morphométrique des formes 144

2. Appréciation des formes sur le terrain et acquisition d'une base de données de validation 145

2.1. Liste des sites visités entre 2013 et 2017 145

2.2. Présentation de la démarche archéo-géomorphologique conduite sur le terrain 146

3. Inventaire des formes et acquisition de leurs caractéristiques géométriques 149

3.1. Pré-traitement du MNT 149

3.2. Extraction des formes depuis le MNT 151

3.3. Obtention des caractéristiques géométriques des formes compactes et creuses 160

3.4. Obtention des caractéristiques géométriques des formes linéaires et creuses 167

4. Caractérisation morphométrique et classification des formes 168

4.1. Aperçu général de la variabilité morphométrique des formes au moyen des statistiques univariée et multivariée 168

4.2. Classification des formes compactes et creuses à partir d'une approche croisée d'analyses multivariées 169

4.3. Analyse des formes linéaires et creuses 172

5. Quantification de l'érosion d'origine militaire 173

5.1. Estimation de la superficie et du volume des polémoformes 173

5.2. Localisation des constructions en mou à partir de l'étude des volumes de remblais 174

6. Étude des relations de proximité entre les formes compactes et linéaires 175

7. Conclusions 176

Chapitre 5 – Enrichissement du LiDAR par les documents d'archives 179

1. Principales sources historiques utilisées 180

1.1. Les photographies aériennes de 1914-1918 180

1.2. Les plans directeurs 183

1.3. Les photographies *in situ* et les cartes postales 184

1.4. Les journaux de guerre 187

2. Localisation et inventaire des documents récoltés 188

2.1. Les ressources documentaires françaises 189

2.2. Les ressources documentaires allemandes 193

2.3. Les ressources documentaires américaines de la *National Archives and Records Administration* (NARA) 194

2.4. Documents obtenus par voie privée ... 195

3. Réalisation des cartes diachroniques du champ de bataille de Verdun ... 196

3.1. Construction de la base de données à incorporer au SIG ... 197

3.2. Importation et géoréférencement des documents ... 199

3.3. Analyses diachroniques ... 202

4. LiDAR et archives : quelles complémentarités ? ... 206

4.1. Les limites de la prospection par télédétection ... 206

4.2. Les plans directeurs et les photographies aériennes : une alternative pour cartographier les polémoformes ? ... 206

5. Conclusions ... 210

PARTIE 3 – RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION DE LA CARTOGRAPHIE DES POLÉMOFORMES ... 213

Chapitre 6 – Inventaire, classification et caractérisation morphométrique des polémoformes ... 215

1. Inventaire des polémoformes ... 216

1.1. Formes compactes et creuses ... 216

1.2. Formes linéaires et creuses ... 221

2. Classification des polémoformes ... 222

2.1. Classification des formes compactes et creuses sur la base des critères morphométriques ... 222

2.2. Classification finale des polémoformes ... 227

2.3. Évaluation de la qualité de classification et propositions d'amélioration ... 229

3. Proposition d'une typologie de référence des polémoformes ... 233

3.1. Les cratères d'obus ... 234

3.2. Les abris (à personnel ou à matériel) et les positions d'artillerie ... 246

3.3. Les réseaux de fossés ... 258

4. Conclusions ... 266

Chapitre 7 – Quantification de l'érosion et variabilité spatio-temporelle des polémoformes durant le conflit ... 269

1. Évaluation des bouleversements géomorphologiques causés par les combats ... 270

1.1. Calcul de la surface perturbée ... 270

1.2. Volumes de matériaux déplacés ... 273

1.3. Cartographie du bouleversement géomorphologique ... 278

2. Description et interprétation de la localisation des polémoformes ... 281

2.1. Analyse des densités ... 281

2.2. Facteurs de répartition ... 289

3. Cartographie diachronique à l'aide des documents d'archives 299
3.1. Évolution des réseaux de fossés à l'échelle de la forêt domaniale de Verdun 300
3.2. Analyse de la transformation du champ de bataille à l'échelle locale 312

4. Conclusions 320

PARTIE 4 – VALORISATION DE LA RECHERCHE ET CONSERVATION DES PAYSAGES DE GUERRE 323

Chapitre 8 – Diagnostic conservatoire du champ de bataille et initiatives de médiation et vulgarisation scientifique 325

1. État des polémoformes au moment du relevé LiDAR (2013) 326
1.1. Cratères d'obus, abris et positions d'artillerie : quel chiffrage en 1914-1918 ? 326
1.2. Cartographie du taux d'effacement des fossés entre 1918 et 2013 331
1.3. Les processus d'érosion post-guerre responsables de l'effacement des polémoformes ... 336

2. Enjeux de conservation et actions de médiation et vulgarisation 345
2.1. Les polémoformes, l'un des derniers témoignages physiques de la Grande Guerre 346
2.2. Cartographie des zones prioritaires de conservation 348
2.3. Porter à connaissance des apports du LiDAR à Verdun 352
2.4. Le champ de bataille de Verdun, un géomorphosite ? 354

3. Conclusions 358

Chapitre 9 – Le patrimoine naturel au filtre du LiDAR 361

1. Impacts écologiques de la Grande Guerre sur le champ de bataille de Verdun 362
1.1. Conséquences néfastes des combats 362
1.2. La guerre, facteur de biodiversité 367

2. De l'intérêt de cartographier les mares et bunkers grâce au LiDAR 377
2.1. Inventaire des zones humides 377
2.2. Identification des gîtes à chiroptères 382

3. Conclusions 385

Conclusion générale *387*

1. Apports scientifiques : rappel des résultats fondamentaux **388**
1.1. Enrichissement de l'inventaire archéogéomorphologique et écologique 388
1.2. Amélioration des connaissances relatives à l'histoire du champ de bataille 389
1.3. L'atteinte de la guerre sur la zone d'étude 389
1.4. État de conservation des vestiges de guerre 390

2. Apports méthodologiques : intérêt d'une cartographie automatisée **391**
2.1. Rapidité et exhaustivité de la méthode de cartographie 391
2.2. Une méthodologie d'inspirations multiples 392

3. Apports sociétaux : contribution à la conservation du champ de bataille **392**
3.1. Prise en compte des cartes dans le prochain plan d'aménagement forestier 392
3.2. Valorisation dans le cadre d'initiatives de médiation et de vulgarisation scientifique 393

4. Perspectives **394**
4.1. Application de la méthode de cartographie sur d'autres champs de bataille 394
4.2. Amélioration de la cartographie des polémoformes 394
4.3. Vers une géomorphologie dynamique et quantitative du champ de bataille 395

Bibliographie *397*

Annexes *432*

Liste des figures *577*

Liste des tableaux *583*

Table des matières *585*

Résumé

En 2013, l'utilisation de la technologie LiDAR en forêt domaniale de Verdun a mis au jour les stigmates géomorphologiques des combats de la Première Guerre mondiale, jusqu'alors masqués par un vaste manteau forestier de 10 000 ha. Vestiges du passé dans les paysages actuels, ces formes de relief, appelées *polémoformes*, possèdent une haute valeur archéologique. Il convient de les inventorier pour mieux les conserver dans une perspective de gestion durable du milieu forestier. À l'échelle de la forêt toute entière, ce travail n'est possible que si l'on développe une méthode de cartographie automatisée. Pour ce faire, la méthodologie présente trois volets : 1) analyser le modèle numérique de terrain et à en extraire les formes au moyen d'un algorithme semi-automatique ; 2) étudier la géométrie des formes inventoriées par une approche combinée d'analyses multivariées, qui permet le regroupement des polémoformes similaires ; 3) interpréter ces classes sur le terrain et grâce aux documents d'archives allemands et français. L'analyse cartographique révèle que plus de 600 000 polémoformes ont été conservées, auxquelles s'ajoutent plus de 400 km de restes de tranchées et boyaux de communication. La répartition et la diversité morphologique des polémoformes révèlent les pratiques d'aménagement du front, selon des logiques d'organisation telles que la distance au front et la configuration des paysages d'avant-guerre. Au-delà de la reproductibilité de la méthode, pouvant contribuer au développement de la recherche fondamentale sur d'autres champs de bataille, la thèse fournit des outils opérationnels pour la gestion et la conservation des patrimoines historiques, culturels et naturels de la forêt domaniale de Verdun. De ce fait, les ressources iconographiques produites seront exploitées dans la construction du prochain plan d'aménagement forestier, en vue d'optimiser la conservation des polémoformes et vestiges de guerre associés.

Mots-clés : paysages de guerre, archéogéomorphologie, polémoformes, LiDAR, morphométrie, cartes auto-organisatrices de Kohonen, classification ascendante hiérarchique, systèmes d'information géographique (SIG), cartographie, archives, patrimoines culturel et naturel, conservation

---

Abstract

In 2013, an airborne LiDAR mission conducted over the Verdun battlefield has brought to light landforms from the First World War. Concealed by a large forest cover of 10,000 ha, these landforms, called polemoforms, have a significant archaeological value because they constitute artefacts from the past. They should be inventoried to improve their conservation for the sustainable management of the forest. However, at the scale of the entire site, this work is only possible if an automatised mapping method is developed. To achieve this, the methodology used is threefold: (i) It consists in extracting landforms from the digital terrain model by means of a semi-automatic algorithm; (ii) Landforms geometry is studied using a combined approach of multivariate analyses, which allows to classify similar polemoforms; (iii) Classes interpretation is carried out on the field site and supplemented by historical documents collected in ten French and German archives centres. The resulting map reveals the presence of a huge number of remaining polemoforms, approximately 600,000, in addition to more than 400 km of fire and communication trenches. Their morphological signature is rich and due to the different ways of building facilities. Their location is determined by clearly defined spatial patterns such as distance to the frontline and pre-war landscapes parameters. Beyond the reproducible nature of the method, which may contribute to the fundamental research development on other battlefields, this thesis provides operational tools for management and conservation of the historical, cultural and natural heritage of the Verdun forest. As a result, the produced iconographic and cartographic corpus will be directly used in the next forest management plan, in order to optimise the safeguarding of polemoforms and associated remnants.

Keywords: conflict landscapes, archaeogeomorphology, polemoforms, LiDAR, morphometrics, Kohonen's self-organizing maps, hierarchical clustering, geographic information systems (GIS), mapping, archives, cultural and natural heritage, conservation