



HAL
open science

Les conditions géographiques et l'organisation spatiale du front de la Grande Guerre : application à l'évaluation environnementale post-conflit en Champagne-Ardenne (France)

Pierre Taborelli

► **To cite this version:**

Pierre Taborelli. Les conditions géographiques et l'organisation spatiale du front de la Grande Guerre : application à l'évaluation environnementale post-conflit en Champagne-Ardenne (France). Géographie. Université de Reims Champagne-Ardenne, 2018. Français. NNT : 2018REIML004 . tel-03080350

HAL Id: tel-03080350

<https://hal.science/tel-03080350>

Submitted on 12 Nov 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'HOMME ET DE LA SOCIÉTÉ (555)

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Discipline : GEOGRAPHIE

Spécialité Géographie physique, humaine, économique et régionale

Présentée et soutenue publiquement par

Pierre Taborelli

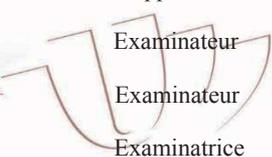
Le 2 juillet 2018

Thèse dirigée par **ALAIN DEVOS**

Les conditions géographiques et l'organisation spatiale du front de la Grande Guerre – Application à l'évaluation environnementale post-conflit en Champagne-Ardenne (France)

JURY

M. Jean-Paul DEROIN	Professeur,	Université de Reims Champagne-Ardenne,	Président
M. Alain DEVOS,	Professeur,	Université de Reims Champagne-Ardenne,	Directeur de thèse
M. Jérôme BURIDANT,	Professeur,	Université de Picardie Jules Verne,	Rapporteur
M. Pierre-Gil SALVADOR,	Professeur,	Université de Lille 1,	Rapporteur
M. Jean POESEN,	Professeur,	Université KU Leuven (Belgique),	Examinateur
M. Philippe BOULANGER,	Professeur,	Université Paris VIII,	Examinateur
Mme Nathalie VANARA,	Maître de Conférences,	Université Paris 1, Panthéon, Sorbonne	Examinatrice
M. Yves DESFOSES,	Conservateur,	DRAC Grand Est,	Invité



UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'HOMME ET DE LA SOCIÉTÉ (555)

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Discipline : GEOGRAPHIE

Spécialité Géographie physique, humaine, économique et régionale

Présentée et soutenue publiquement par

Pierre Tadorelli

Le 2 juillet 2018

Thèse dirigée par **ALAIN DEVOS**

Les conditions géographiques et l'organisation spatiale du front de la Grande Guerre – Application à l'évaluation environnementale post-conflit en Champagne-Ardenne (France)

JURY

M. Jean-Paul DEROIN,	Professeur,	Université de Reims Champagne-Ardenne,	Président
M. Alain DEVOS,	Professeur,	Université de Reims Champagne-Ardenne,	Directeur de thèse
M. Jérôme BURIDANT,	Professeur,	Université de Picardie Jules Verne,	Rapporteur
M. Pierre-Gil SALVADOR,	Professeur,	Université de Lille 1,	Rapporteur
M. Jean POESEN,	Professeur,	Université KU Leuven (Belgique),	Examinateur
M. Philippe BOULANGER,	Professeur,	Université Paris VIII,	Examinateur
Mme Nathalie VANARA,	Maître de Conférences,	Université Paris 1, Panthéon, Sorbonne,	Examinatrice
M. Yves DESFOSES,	Conservateur,	DRAC Grand Est,	Invité

Remerciements

L'étude de l'organisation spatiale du front de la grande Guerre et de son application à l'évaluation environnementale s'intègre dans un programme de recherche financé par la région Grand-Est. Je tiens donc à la remercier de son appui financier. Que **Patrick** et **Jean-Paul** trouve ici, ma profonde gratitude, intégrés à leur manière dans ces travaux de thèse.

Je tiens tout d'abord à remercier **Alain Devos**, mon directeur de thèse, qui m'a permis de réaliser ce travail. Je le remercie de tout ce temps passé à mes côtés, me soutenir, me guider, à toutes ces heures passées dans nos bureaux respectifs à discuter et débattre afin de mener à terme cette thèse. Un grand merci à lui pour sa patience, son ouverture d'esprit, sa rigueur pour améliorer, corriger cette recherche, commencée en février 2015.

Je remercie également les membres du jury pour l'évaluation de mes travaux de recherche. J'adresse mes remerciements aux deux rapporteurs, **Pierre-Gil Salvador**, professeur à l'Université de Lille 1 et **Jérôme Buridant**, professeur à l'Université d'Amiens, pour leurs commentaires intéressants et constructifs.

J'adresse mes remerciements à toute l'équipe du GEGENAA, et particulièrement à **Vincent Barbin**, professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardenne et directeur du laboratoire. Un grand merci également à **Gilles Fronteau**, maître de conférences HDR, à **Benjamin Cancès** et **Jessy Jaunat**, maîtres de conférences et **Dominique Pargny**, ingénieur d'études pour leur implication dans ce programme de recherche. J'aimerais également remercier pour leur professionnalisme **Alexandra Conreux**, qui a su gérer tous l'aspect administratif de mes recherches et **Sébastien Laratte** pour les heures passés à traiter les données Lidar. Je remercie évidemment **Olivier Lejeune**, maître de conférences et directeur du département de Géographie, **Guillaume Pierre**, professeur à l'université de Reims, **Nicolas Bollot**, maître de conférences et **Laurent Chalumeau**, maîtres de conférences à l'Université d'Amiens pour toutes ces discussions scientifiques, mais également de bonne humeur pendant ces trois années de recherches. Une pensée va également à **Dorothée Escotte**, secrétaire du département de géographie pour son accueil convivial du midi.

J'aimerais avoir également une attention toute particulière pour **Thibaud Damien**, qui est devenu, depuis notre licence en 2012, notre master en 2014, et nos années de doctorat, un véritable ami. Nous nous souviendrons longtemps de ce nuage de pollution au colloque de New-Dehli, de l'eau froide de la rivière de Trépail ou des heures à cartographier les carrières souterraines ...

Pendant ces trois années de recherches, nous avons eu la chance d'encadrer des stagiaires pour l'obtention de leur diplôme de master. Je remercie donc **Mylène Dodici** pour son excellent travail de SIG en 2015, **Clément Chabert** pour son étude sur les ETM en 2016, **Alexandre Wauthier** pour l'étude historique de la Cote 108 en 2017, **Alexis Carlu** en collaboration avec le programme de recherche PERCHL'EAU RIGINE, ainsi que **Marine Clément** et **Ophélie Petiot** pour leur travail sur les noms de tranchées.

Merci à l'ensemble de l'équipe INRAP Reims et particulièrement à sa directrice **Agnès Balmelle**, aux archéologues **Yoann Rabasté**, **Bruno Duchêne** et **Frédéric Adam**, ainsi que **Patrick Huard**, topographe. Leur collaboration a été une chance dans ces travaux de thèse

pour intégrer les observations de terrains en fouilles archéologiques. Je remercie également la directrice des musées historiques de Reims, **Bénédictte Hernu** pour sa collaboration dans ce programme de recherche, et **Salvatore Grippi** pour son accueil au Fort de la Pompelle.

Des rencontres et des collaborations se sont suivies pendant cette thèse. Je pense évidemment à ce projet de livre avec l'AGBP, de l'organisation d'un colloque en 2016 avec **Jean-Claude Porchier, Edouard Heisch, Françoise Bergerat** et **Jean-Pierre Gély**, qui nous a permis de discuter et partager sur ce thème de la Grande Guerre.

J'aimerais également remercier particulièrement 4 personnes, archéologues ou passionnés de la Grande Guerre. Mes pensées vont alors à **Yves Desfossés**, chargé de missions archéologique des conflits contemporains, qui nous a notamment fourni les plans directeurs, documents sources essentielles à ces travaux de thèse. J'aimerai aussi remercier **Jérôme Brenot**, archéologue à EVEHA, pour son accueil en fouille archéologique en Argonne, ces moments de discussions sur le terrain entourés de moustiques et son étroite collaboration pour l'écrit des articles scientifiques. Enfin, je pense à **Mickaël Embry** et **Franck Lesjean** pour les connaissances historiques de la Grande Guerre, mais surtout de terrain.

Le programme de recherche s'est également associé à des associations de valorisation et de patrimonialisation qui nous ont largement aidés dans nos recherches historiques et archivistiques. Je remercie l'association Correspondance Cote 108 présidée par **Caroline Guerner**, l'Association du Souvenir de Sommepey-Tahure animée par **Brigitte Guyot, David Varnerot** et **Jean-Pierre Thirion**, l'association de la Main de Massiges qui réalise un travail formidable, sous la commande de **Pierre Labat** et **Éric Marchal**. Je remercie également **Michel Godin** de nous permettre d'utiliser ses magnifiques photographies aériennes à basse altitude et **Michel Coistia**, personnalité passionnée et passionnante, notamment sur les chemins de fer d'Argonne.

Merci également à mes amis, qui ont partagé parfois mes recherches, ou qui ont contribué à m'évader les week-ends dans la nature de Meuse et d'Argonne. J'ai donc une pensée amicale pour Yann, Gwen, Benjamin, Maxime, Baptiste, Cédric, Ludo, Rodolph, Brigitte, Pépère et bien sûr à Sébastien pour ces longues approches matinales dans les plaines tarnaises. Je souhaite également remercier chaleureusement Christine pour son aide durant ces quatre derniers mois de rédaction pour ses corrections et conseils avisés.

Je n'oublie évidemment pas mes proches qui m'ont aidé à tenir devant ce lourd travail, si passionnant mais tellement prenant. Je pense donc à ma maman, mon papa et ma petite sœur, à Cédric et Marcelle, mon grand-père si fier d'apercevoir son petit-fils sur France 3. Je n'oublie pas ma mémère de Grandpré et ma mamie de Reims, mes tatas Corinne et Sylvie et mon tonton Panès. Pour terminer, comment oublier le soutien moral de **Marie Dubois**, ma compagne, qui a su me soutenir et m'aider dans les moments délicats, d'avoir supporté mes humeurs. Ton appui fut l'un des piliers de ce travail et je te remercie du plus profond de mon cœur.

Enfin, ces travaux de thèse sont une source d'épanouissement professionnel et personnel, de rencontres. Mes dernières pensées vont à **Jean Martin**, géographe historien canadien, rencontré lors d'un colloque en Afrique du Sud, passionné de la Grande Guerre, et amateur de bonne bière. Jean nous a quittés en avril et devait faire partie de ce jury de thèse. Ce travail lui est dédié.

Les poilus

Que pouvaient-ils bien penser
Nos pauvres diables poilus
Blottis au fond de leurs tranchées
A leurs belles qu'ils ne verraient plus ?

Leur dose de rhum engloutie
Ils astiquent leur baïonnette
Espérant mettre au tapis
Quelques boches obsolètes !

Ils savent leur avenir incertain
Se battent pour leur survie
Se ruent, courent, tirent d'instinct
Hurlant à tue-tête « à bas l'ennemi »

Je les imagine écrivant aux proches
Leur espoir malgré tout de survivre
Que la fin de cette guerre approche
Qu'ils veulent être libre et vivre

Qu'ils veulent retrouver leur belle Argonne
Boisée, fière, verte et vallonnée
Qu'ils ne veulent plus de jours mornes
Qu'ils veulent rentrer au Pays, se fiancer...

Tout près les obus pleuvent, ça mitraille
En ce jour de janvier 17, il fait moins de zéro
Cent ans après, mon style, la feuille entaille
Rend hommage à ces poilus, à ces héros !

Bubune, le 18 janvier 2017

Résumé

L'objectif de la thèse, réalisée dans le cadre du programme IMPACT14-18 (2015-2018), est de cartographier et de mesurer les impacts environnementaux de la Première Guerre Mondiale en Champagne-Ardenne. Le projet propose une nouvelle approche de la Grande Guerre par une analyse spatiale des réseaux de défense sur 115 km de front (13 000 km de tranchées et de boyaux) réalisée sous SIG à partir des plans directeurs au 1/20 000 de 1918 des Groupes de Canevas de Tirs des Armées. Le traitement de la banque de données spatiales permet non seulement de déterminer le potentiel de « polémo-paysages » de la Grande Guerre mais aussi de comprendre les facteurs militaires et géographiques (géomorphologie, géologie, hydrographie) structurant les réseaux. Les morphologies associées (tranchées, boyaux, entonnoirs de mines, trous d'obus), intégralement nivelées en grande culture mais recoupées par l'approche archéologique, sont étudiées de manière sectorielle, sous forêt à l'aide du Lidar aéroporté pour déterminer leur taux de conservation, sous la commande des pratiques sylvicoles. L'application opérationnelle des résultats s'intègre dans l'évaluation environnementale et les problématiques territoriales post-conflit de la Grande Guerre (aléa « cavités », bombturbation, contamination des sols et des nappes souterraines) mais révèle également un potentiel de valorisation patrimoniale.

Mots clés : Géographie, plans directeurs, SIG, Lidar, archéométrie, Grande Guerre, impacts post-conflit, « polémo-formes », Champagne-Ardenne.

Laboratoire GEGENAA – EA 3795

UFR Lettres et Sciences Humaines

Département de Géographie

57, rue Pierre Taittinger

51096 REIMS cedex – France

Geographical conditions and spatial organization of the front in World War I: Applications to post-war environmental evaluation in Champagne-Ardenne region (France).

Abstract

The purpose of the thesis, carried out under the IMPACT14-18 program (2015-2018), is to map and measure the environmental impact of the First World War in Champagne-Ardenne. The project offers a new approach of the Great War by a spatial analysis of the defense networks on the 115 km of front (13 000 km of trenches and communication trenches) achieved under GIS from the 1/20 000 of 1918 trenches maps of the “Groupes de Canevas de Tirs des Armées”. The treatment of spatial database not only helps us to determine the potential of "Polemo Landscapes" of the Great War but also to understand the military and geographical factors (geomorphology, geology, hydrography) structuring the networks. Associated morphologies (trenches, communications trenches, mine craters, shells craters), fully leveled in the field but highlighted by the archaeological approach, are studied sectorally under the forest thanks to the airborne Lidar, in order to define their conservation rates, according to the silvicultural practices. The operational application of the results fits the environmental assessment and the post-conflict territorial issues of the Great War ("cavities" hazard, bombturbation, soil and groundwater contamination) but also reveals a potential for heritage enhancement.

Key-words: Géography, Trenches maps, GIS, Lidar, archaeometry, Great War, post-conflict impacts, « polémo-forms », Champagne-Ardenne region.

Laboratoire GEGENAA – EA 3795

UFR Lettres et Sciences Humaines

Département de Géographie

57, rue Pierre Taittinger

51096 REIMS cedex – France

Table des matières

Remerciements	3
Résumé.....	7
Abstract	9
Table des matières.....	11
Introduction générale	19
Partie 1: Structuration du front et état initial des réseaux de défense de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.....	
31	
Chapitre 1 : Les innovations cartographiques:les plans directeurs.....	33
Introduction du chapitre 1	33
1.1. Cartographie militaire antérieure (De Naudin à la carte d'État-Major).....	34
1.2. Les services cartographiques de l'Armée française.....	36
1.3. Des innovations cartographiques.....	41
1.3.1. La projection.....	41
1.3.2. Les coordonnées géographiques	42
1.4. La construction des plans directeurs.....	44
1.4.1. Des levés en temps de guerre	45
1.4.2. La photographie aérienne	49
1.4.3. Les interrogatoires de prisonniers.....	55
1.5. Présentation des plans directeurs.....	56
1.5.1. Planimétrie et cartographie.....	56
1.5.2. Des échelles adaptées pour différents usages.	60
1.5.3. L'assemblage.....	62
1.5.4. Tirage, distribution et utilisation.....	65
1.5.5. La couleur comme sémiologie.....	68
1.5.6. La légende	68
1.5.7. Les toponymes et noms de tranchées	75
1.6. L'hébergement des plans directeurs	79
1.7. Des plans directeurs à la carte IGN actuelle.	79
Conclusion du chapitre 1	81
Chapitre 2 : Evolution de la structuration du front de 1914 à 1918.....	85

Introduction du chapitre 2	85
2.1. Evolution de l'organisation spatiale des réseaux de défense durant la Grande Guerre	86
2.1.1. Évolution des réseaux de défense de 1914 à 1918.....	86
2.1.2. En septembre et octobre 1914	86
2.1.3. Novembre 1914-1916 : organisation ternaire et continue	90
2.1.4. Approfondissement du dispositif : 1916-1917	93
2.1.5. Structure cellulaire et profonde : 1917-1918.....	95
2.2. Défenses accessoires.....	97
2.3. Les principes de la structuration spatiale	100
2.3.1. Réseau de défense et le rôle de la géomorphologie.	100
2.3.2. Réseau de défense et le rôle de la géologie.	103
2.3.3. Les moyens de creusement.....	105
2.3.3.1. Pelle, pioche, sinuosité	105
2.3.3.2. Machines à creuser.....	107
2.3.4. Archéologie pendant le conflit	109
2.4. Le front : une structure fonctionnelle et opérationnelle profonde	113
2.4.1. A l'échelle du front de l'Ouest	113
2.4.2. À l'échelle de la Champagne-Ardenne	117
2.4.3. À l'échelle d'un secteur	119
Conclusion du chapitre 2.....	121
Chapitre 3 : Organisation spatiale du front à partir des plans directeurs de 1918.....	123
Introduction du chapitre 3	123
3.1. Structure des réseaux de défense : le rôle de la géomorphologie	124
3.1.1. Méthodologie et sites ateliers	124
3.1.2. Sur le front champardennais : 115 km de front	127
3.1.3. La cote 108 à Berry-au-Bac.....	131
3.1.4. Le secteur de Reims : le rôle des entonnoirs de percée cataclinale	132
3.1.5. Les Monts de Champagne : le rôle de la topographie.....	137
3.1.6. Combat près d'un village et d'une source : exemple de Tahure.....	141
3.1.7. Front de côte de Champagne : la Main de Massiges.....	142
3.1.8. Champagne sèche, Champagne humide et Argonne : le rôle de la géologie.....	144
3.2. Rôle du bâti, de l'hydrographie et de la couverture végétale dans la structuration du front	150
3.2.1. Rôle des villages, des villes et des forts.	150
3.2.2. Le rôle des zones humides, des rivières, des inondations et des canaux.	157
3.2.3. Le rôle de la végétation.....	161

3.3.	Les noms de tranchées	164
3.3.1.	Les noms de tranchées dans les manuels d'instructions militaires.	164
3.3.2.	Les noms de tranchées dans la signalétique.	165
3.3.3.	Les noms de tranchées dans la banque de données des réseaux de défense.	166
3.3.4.	Distribution statistique des noms de tranchées.	168
3.3.5.	Organisation spatiale.....	169
3.4.	Positions des observatoires et des batteries d'artillerie.....	171
3.5.	Les voies ferrées.....	176
3.6.	Camps : cantonnements et camps d'instruction.	179
3.7.	L'alimentation en eau	180
3.7.1.	La ressource.....	180
3.7.2.	Adduction et approvisionnement	182
3.8.	Valeur opérationnelle de la base de données	185
	Conclusion du chapitre 3.....	191
	Conclusion de la partie 1.....	193

Partie 2: Polémo-morphologie de la Grande Guerre.....197

Chapitre 4 : Impacts morphologiques de surface sous forêt.....	199
Introduction du chapitre 4	199
4.1. Typologie des « polémo-formes » en Lidar	202
4.1.1. Fortifications Séré de Rivières.....	205
4.1.2. Les cratères de mines	210
4.1.3. Les réseaux de défense.....	211
4.1.4. Positions d'artillerie	213
4.1.5. Trous d'obus	214
4.1.6. Transport et communication	223
4.1.7. Cantonnements et camps militaires.....	224
4.1.8. Carrière souterraine.....	227
4.1.9. Morphologies de la Grande Guerre post-conflit.	227
4.2. Organisation spatiale des formes	229
Conclusion du chapitre 4.....	234

Chapitre 5 : Conservation des tracés et des formes	235
Introduction du chapitre 5	235
5.1. Zone rouge	236
5.2. En zone cultivée : le remplissage des « polémo-formes »	238
5.2.1. Evolution diachronique : exemple de Massiges	240
5.2.2. En fouille archéologique : exemple de la Croix Blandin	242
5.3. En zone forestière : Taux de conservation	249
5.3.1. Détection visuelle et manuelle à Berry-au-Bac	250
5.3.2. Détection automatique à Servon	251
5.3.2.1. Le site d'étude	251
5.3.2.2. La méthodologie de la détection automatique	253
5.3.2.3. Résultats de la détection automatique	255
5.3.3. Détection et caractérisation morphométrique automatiques en Argonne	259
5.3.3.1. Le site d'étude	259
5.3.3.2. Méthodologie de la détection automatique et caractérisation morphométrique	261
5.3.3.3. Résultats de la détection automatique et de la caractérisation morphométrique	262
Conclusion du chapitre 5	269
Conclusion de la Partie 2	271

Partie 3: Impacts souterrains, pédologiques, hydrogéologiques et écologiques de la Grande Guerre

Chapitre 6 : Impacts souterrains	277
Introduction du chapitre 6	277
6.1. La guerre des mines	277
6.1.1. Principes de la guerre des mines	279
6.1.2. Vauquois en Argonne	290
6.1.3. Cote 108 à Berry-au-Bac	292
6.2. Les abris	297
6.2.1. Les creutes	297
6.2.1.1. État initial avant-guerre, carrière de pierre, puis champignonnière	297
6.2.1.2. Organisation spatiale dans les réseaux de défense	300
6.2.1.3. La carrière, objectif d'artillerie de l'armée adverse	302
6.2.1.4. La Caverne du Dragon	304
6.2.1.5. Aménagement des creutes	305
6.2.1.6. Graffitis de poilus	311

6.2.2.	Les abris des réseaux de défense.....	317
6.2.2.1.	Typologie des abris	318
6.2.2.2.	Les conditions de creusement	320
6.2.2.3.	Aléa « cavités » et abris de la Grande Guerre	321
6.2.3.	Les cavités de Reims	324
6.2.3.1.	Les crayères.....	324
6.2.3.2.	Les galeries souterraines ou souterrains de la Marne.....	326
6.2.3.3.	Les caves privatives	327
6.2.3.4.	Conditions géomorphologiques et piézométriques	327
6.2.3.5.	Les cavités de Reims durant la Grande Guerre et les graffitis.	329
	Conclusion du chapitre 6.....	331
	Chapitre 7 : Contamination, pollution et impacts écologiques	333
	Introduction du chapitre 7	333
7.1.	Les impacts pédologiques	334
7.1.1.	La déstructuration physique des sols.....	334
7.1.2.	Perturbations chimiques des sols	338
7.1.2.1.	Échantillonnages et outils analytiques	340
7.1.2.2.	Résultats	341
7.2.	Contamination métallique solide.....	345
7.3.	Les impacts sur les eaux souterraines	347
7.3.1.	Leurs origines et l'utilisation des perchlorates.....	347
7.3.2.	Les perchlorates dans le Nord-Est de la France	348
7.3.3.	Les contaminations d'origine militaire	351
7.4.	Les impacts sur la faune et la flore dans la zone de front	355
7.4.1.	Les plantes obsidionales.....	355
7.4.2.	Le vignoble	356
7.4.3.	Les forêts, recolonisation forestière	357
7.4.4.	Les différentiels de pousse végétale en grande culture : l'indice phytographique.....	359
7.4.5.	Faune et flore aquatiques dans les polémo-formes	360
	Conclusion du chapitre 7.....	362
	Conclusion de la Partie 3	364
	Conclusion générale	367
	Références bibliographiques	373
	Tables des figures.....	395
	Liste des tableaux.....	405
	Annexes.....	407

Introduction générale

• Cadre réglementaire et institutionnel

L'ensemble des investigations menées durant cette thèse s'intègre dans un programme de recherche IMPACT 14-18, porté par l'EA 3795 du GEGENAA et dirigé par le professeur Alain Devos. D'une durée de 4 ans (2015-2018), le financement de la région Grand-Est est de 250k€. Il prend en charge la masse salariale d'une thèse et de 4 stages de master 2, ainsi qu'un budget de fonctionnement et d'investissement. Ce programme de recherche, labellisé par la mission Centenaire en 2017, regroupe un consortium d'universitaires de Reims (GEGENAA, CERHIC), d'Amiens (EDYSAN) et de Beauvais (La Salle Beauvais), de collectivités locales (Reims Métropole), d'établissements publics faisant l'objet de convention (INRAP, Musée de Meaux) et d'associations (Main de Massiges, Correspondance Cote 108, Le Souvenir de Sommepey-Tahure, GEACA). Les différentes études ont été valorisées par 8 articles scientifiques, 1 article à paraître, 10 interventions en colloques, en France (Paris, Chambéry, Versailles, Verdun) et à l'étranger (New-Dehli en Inde et Stellenbosch en Afrique du Sud), 15 communications grand public, la présentation de 11 posters et de 3 interventions radiophoniques ou télévisuelles. Une exposition de 19 roll up et d'une frise de 13 m de long (Organisation spatiale du front durant la Grande Guerre en Champagne-Ardenne d'après l'assemblage des Plans directeurs au 1/20 000 des Groupes de Canevas de Tirs des Armées (GCTA)) permet de présenter les travaux du programme de recherche lors de manifestations culturelles. Alors qu'un colloque scientifique doit clôturer ce programme de recherche les 20 et 21 septembre 2018, le GEGENAA a également organisé deux colloques en octobre 2015 (Journées du karst AFK) et en octobre 2016 (Journées d'Automne de l'AGBP), où des interventions ont été réalisées sur le terrain. Enfin, IMPACT 14-18 participe au financement d'un livre *La Terre et le Feu, Géologie et géologues sur le front occidental*, dans lequel 7 chapitres d'ouvrage ont été écrits, porté par un groupe de travail associant l'Association des Géologues du Bassin de Paris (AGBP), la Société Géologique du Nord (SGN) et le Comité Français pour l'Histoire de la Géologie (*COFRIGEO*).

Ce programme de recherche fédérateur a également fait naître une dynamique scientifique autour de la Grande Guerre sur les impacts environnementaux. Des projets, dont le GEGENAA était le porteur ou un simple partenaire, n'ont pas reçu le soutien financier comme POLEMOFOR (EDYSAN) sur les conséquences écologiques de la Grande Guerre, le projet CRATER MSH sur la comparaison des cratères de mines en Champagne et en Lorraine et un projet ANR SPACE WW1 pour étudier les conditions géographiques sur l'ensemble du front. Cependant, un programme de recherche PERCHL'EAURIGINE (2017-2019) sur la cartographie de la contamination de la nappe de craie en Champagne en ions perchlorates est géré par le GEGENAA, en collaboration avec le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), L'ARS (Agence Régionale de Santé), l'AESN (Agence de l'Eau Seine-Normandie) et Reims-Métropole qui intègre les résultats du programme IMPACT 14-18.

- **Etat des connaissances : les différentes approches de la Grande Guerre**

La Grande Guerre est un marqueur essentiel de l'Histoire de France par rapport à ses voisins européens ou dans le monde, qui résulte de son intégration dans la conscience collective et dans les sols du Nord et l'Est de la France (Julien, 2004 ; Becker, 2006 ; Maurin, 2014). L'historiographie française de la Première Guerre Mondiale n'a cessé d'évoluer, marquée en trois temps :

- En premier lieu du début de la guerre aux années soixante, les études portent principalement sur des événements, le déroulement des batailles et des combats (Dubail et Fayolle, 1921) où n'apparaissent pas ou peu les combattants. Elles s'orientent également vers les causes du déclenchement et les responsabilités de cette guerre.
- Dans un second temps jusqu'aux années quatre-vingts, elle ouvre des thématiques plus larges, notamment sur l'intervention des États-Unis dans le conflit et la révolution russe.
- Depuis les années quatre-vingts, la troisième étape ouvre de larges champs d'investigations aux Sciences Humaines, à la perception des conditions de la vie au front, remplaçant le combattant au centre des études. Les historiens, associés à des anthropologues, sociologues ou psychologues, tentent d'appréhender cette « culture de guerre », l'idée de « Nation » et de Guerre Totale dans l'atrocité des combats.

L'ensemble de ces analyses historiques n'intègre pas d'aspect spatial. Les atlas représentent seulement le tracé du front et son évolution, sans décrire sa structure et son organisation (Dubail et Fayolle, 1921). Le front est donc perçu comme un dédale, un labyrinthe, notamment relaté par les combattants.

Depuis une trentaine d'années, l'intérêt porté à la Grande Guerre connaît une recrudescence, notamment par les Sciences Humaines. Des études sont menées en musicologie (Audouin-Rouzeau *et al.*, 2009), en sociologie (Colas *et al.*, 2012), ou inspirent de nombreux romans, bandes dessinées, œuvres poétiques ou pièces de théâtre. En sciences médicales, d'autres investigations s'intéressent notamment aux névroses et syndromes de guerre en psychologie (Auxéméry, 2013) ou aux pathologies de tranchées (Kahn, 2014).

L'aspect spatial de la Grande Guerre est abordé par le Commandant Villate en 1925 qui présente les conditions géographiques de la guerre sur le front français. Depuis cet écrit, la notion d'espace dans le premier conflit mondial n'est plus abordée, ce que cette thèse présente longuement comme un pilier du manuscrit. L'espace militaire est défini selon trois échelles spatiales différentes (Boulanger, 2002, 2006) :

- Le terrain est l'échelle géographique tactique, qui prend en compte l'environnement comme potentialités et contraintes (reliefs, masques végétaux, obstacles, voies de circulation) qui aident ou contraignent la manœuvre pour le chef des unités. La répétition des mêmes lieux de bataille constitue, non pas une fatalité géographique mais une preuve du déterminisme géographique (Villate, 1925). Certains lieux ont vu durant les siècles se dérouler de grandes batailles : en 1917, les offensives de Nivelles près de Berry au Bac et Craonne ont déjà été le lieu de combats des armées de César et de Napoléon. L'État-Major choisit l'endroit de la bataille, car il estime que c'est le

lieu propice au combat, où il pourra diriger son armée et la manœuvrer (Villate, 1925). Des lieux ont été le théâtre de combats avec parfois des siècles d'écart, mais la physionomie du terrain (bois, cours d'eau, crête) impose aux armées de livrer bataille au même endroit.

- La seconde échelle est stratégique et concerne de plus grands espaces comme « théâtre d'opération » ou « théâtre de guerre » pour plusieurs Corps d'Armée. Le front de la Grande Guerre en France et Belgique est un « théâtre d'opération du front Ouest » sur environ 750 km des Flandres à l'Alsace.
- La troisième échelle est conceptuelle et abstraite et concerne la géostratégie et la géopolitique. Elle peut s'étendre sur plusieurs « théâtres d'opérations » ou sur de nouveaux espaces de guerre (cyberespace).

La pensée géographique militaire française est une discipline née de la méconnaissance cartographique (Carte d'État-Major) et de la défaite de 1870-1871 face à l'Allemagne. Ces mêmes cartes deviennent inappropriées (1/80 000) pour la Grande Guerre et cette guerre de position à l'échelle du terrain. Un renouveau de la pensée géographique militaire émerge pendant la Grande Guerre, pour connaître et exploiter les disciplines de la géographie (géomorphologie, hydrologie, géologie, climatologie) à des fins militaires (Boulanger, 2006). Au sein du service géographique de l'Armée française, les géographes civils participent à l'effort de guerre dans une commission d'études. Après la Seconde Guerre Mondiale, la géographie militaire décline au profit des analyses mondiales de géographie politique. Une véritable scission apparaît alors entre la géographie universitaire et la géographie militaire. Seules quelques personnalités universitaires continuent de croiser les approches militaires et géographiques (Boulanger, 2006 ; Régnier 2008) alors qu'elles restent marquées et reconnues chez les anglo-saxons, structurées par des académies militaires.

Pendant le conflit, les géographes français (De Martonne, Demangeon) sont au service des militaires pour les différentes études géologiques et hydrologiques (De Martonne, 1925). Les manuels d'instructions militaires posent les bases des grands principes des ressources en hydrologie du type de nappe et de puits (Cazenave, 1920) alors que des cartes de traficabilité sont réalisées, notamment pour les tanks de fin de conflit.

Pour l'armée allemande, les travaux en géologie sont considérables mais tardifs (après 1916). Les géologues sont incorporés sans distinction particulière dans les troupes de combats. Les cartes élaborées par le service de géologie (*Kriegsgeologen*) intégré aux services topographiques de guerre sont dédiées aux besoins des troupes sur le terrain. Différentes cartes sont alors éditées pour la prospection en eau, la traficabilité, la pénétrabilité des obus, pour le creusement des réseaux de défense et pour la guerre des mines (Hubé, 2018). Très sensible à la protection de la ressource en eau, l'armée allemande tente d'éviter toute propagation des épidémies d'origine hydrique dans ses manuels d'instructions (Kranz, 1920).

Au Royaume-Uni, les travaux du Lieutenant-Colonel d'Artillerie Charles Cooper King et du Major Général Portlock avant-guerre ne sont pas suivis en tant qu'enseignement dans la thématique géologique militaire anglaise. En premier lieu, les cartes géologiques sont basées sur des travaux belges pour l'aptitude au creusement (guerre des mines). Des cartes de ressource et d'adduction en indiquant la qualité et la quantité par un zonage au 1/250 000 sont élaborées et distribuées (carte hydrogéologique opérationnelle).

Même si les Américains entrent tardivement en guerre, ils éditent des cartes géologiques au 1/80 000 nécessaires aux ingénieurs militaires et des cartes de sources au 1/50 000 par interprétation de photographies aériennes en territoire ennemi.

La paternité de la géologie militaire est attribuée au visionnaire allemand Walter Kranz, mais depuis ce temps, la production scientifique en sciences militaires est entretenue par les académies militaires anglo-saxonnes qui perpétuent le lien entre les géosciences et l'aspect militaire sur la Grande Guerre ou d'autres conflits (Caldwell *et al.*, 2004 ; Rose et Mather, 2012).

Depuis environ une trentaine d'années, la Grande Guerre est également abordée par l'archéologie. L'archéologie de la Première Guerre Mondiale cherche pendant longtemps son identité d'une « archéologie du passé récent » (Olivier, 2000 ; Rolland, 2008). Des colloques sont organisés à Péronne en 1997 et à Suippes en 2007 sur la réflexion de la place de la Grande Guerre dans l'archéologie. Est-ce un conflit trop contemporain ? Elle émerge véritablement lors des grands travaux dans le Nord de la France et la découverte du Char Tank IV à Flesquière en 1998 mais également lors de la découverte de la tombe d'Alain Fournier en 1991 près des Épargnes en Meuse. Les premières fouilles archéologiques de la Grande Guerre sont limitées aux tombes (Adam, 1991 ; Flucher, 2011) et soulèvent le « grand transfert des corps » où la trace textuelle ne valide pas obligatoirement les observations archéologiques. Les structures de la Grande Guerre sont intégrées petit à petit aux rapports de fouilles et ne sont plus perçues comme des artefacts. L'archéologie de la Grande Guerre est depuis considérée comme une discipline à part entière (Desfossés *et al.*, 2000, 2007 ; Desfossés, 2008, Saunders, 2007), avec des fouilles et travaux archéologiques portant sur les nécropoles (Desfossés, 2009 ; Flucher, 2011), le patrimoine militaire (Benoistel et Desserrières, 2003), les traces archéologiques de la nourriture des combattants (Landolt et Lesjean, 2009 ; Landolt *et al.*, 2013 ; Lesjean, 2011 ; Devevey, 2014), le monde souterrain (Laforgerie et Weiss, 2013) et les graffitis (Hardier, 2010 ; Buttet, 2012, 2013). Des travaux s'intéressent également aux découvertes archéologiques réalisées par les combattants durant le conflit en Artois (Viré, 1920), en Champagne (Trassagnac, 1915 ; Charpy, 2017) et en Alsace (Musso, 2005 ; Landolt *et al.*, 2009 ; Landolt et Schnitzler, 2014).

En archéométrie, les chercheurs de l'université belge de Ghent combinent une approche de télédétection, de géophysique et d'archéologie (Van Hollebeeke *et al.*, 2014). Ils étudient les systèmes de défense et leurs traces à l'échelle régionale par interprétation des photographies aériennes de l'époque, avec des analyses diachroniques (Stichelbaut *et al.*, 2009 ; Stichelbaut, 2011 ; Stichelbaut *et al.*, 2016 ; Gheyle *et al.*, 2018). Depuis une dizaine d'années, la forte dynamique de publications dans les revues anglo-saxonnes (*Applied, Geoderma, Geoarcheology, archeological prospection*) sur le saillant d'Ypres (30 km de front) fait émerger une nouvelle approche spatio-temporelle de la Grande Guerre.

Les conséquences environnementales mises en évidence par l'approche des géosciences, bien qu'importantes, restent peu étudiées ou tardives alors que les paysages, les sols et les eaux souterraines portent encore la marque du conflit (Masson-Loodts, 2014 ; Keller, 2016). Ces impacts se manifestent par une modification de la structure physique des sols ou « bombturbation » (Hupy et Schaetzl, 2006 ; Certini *et al.*, 2013), par la contamination métallique et la pollution des sols (Bausinger *et al.*, 2007 ; Meerschman *et al.*, 2011 ; Thouin *et al.*, 2015), l'apport de composés nitro-aromatiques (essentiellement des perchlorates) vers la zone noyée des aquifères (Hubé, 2013, 2016) mais aussi par des effets morphologiques (Hesse, 2014).

En France et depuis les années 1990, la Grande Guerre est étudiée en géographie historique par l'approche forestière et biogéographique, (Amat, 1987, 1993, 2001, 2015 ; Le Borgne, 1990, Durup de Baleine, 1998 ; Buridant, 2003, Puyo, 2004). L'approche environnementale arrive tardivement par le monde de l'écologie politique qui s'empare des questions de sécurité civile et de contamination des eaux souterraines et des sols liées à la Grande Guerre (Association Robin des Bois, 2016). Ces récents travaux ont des approches diversifiées (pluridisciplinaires) mais n'intègrent pas les dimensions multi-scalaires, ni la localisation dans les réseaux de défense. Tous les travaux sur les impacts environnementaux sont sectoriels, sans connaissance de la représentativité spatiale. L'étude de la Place à Gaz à Verdun (parcelle de quelques hectares sur un site de destruction de munitions) n'est pas représentative de l'ensemble de la zone de front. Alors que les cartes des tranchées anglaises sont en ligne sur internet, sous SIG et vendues pour des applications sur téléphone, les plans directeurs qui permettent l'intégration des sites dans le réseau de défense, notamment en Champagne-Ardenne, ne sont ni centralisés, ni facilement consultables. L'un des objectifs est donc de comprendre l'organisation spatiale des réseaux de défense (géomorphologie, géologie, hydrogéologie, hydrographie, couverture végétale) pour pouvoir intégrer, interpréter et surtout relativiser des mesures environnementales qui restent sectorielles.

Alors que l'intégralité des formes de la Grande Guerre est nivelée en grande culture, quelles sont les traces morphologiques subsistantes ? Cette question est appréhendée à l'aide de l'outil Lidar pour mesurer un taux de conservation sous forêt (Brenot *et al.*, 2017 ; Taborelli *et al.*, 2017a). Cet outil est utilisé en géosciences pour l'études des terrasses marines (Eilertsen *et al.*, 2015), des dynamiques littorales (Le Mauff, 2018) pour l'hydrodynamique fluviale (Vayssière *et al.*, 2015), en domaine karstique (Bernardini, 2013), des mouvements de terrain (Van den Eeckhaut, 2011). L'Office National des Forêts est sensibilisé par cette technologie, ayant déjà réalisé des vols près de Nancy en forêt de Haye (Georges-Leroy *et al.*, 2009, 2011), à Verdun qui fait l'objet d'une thèse (Rémy De Matos Machado) ou ayant programmé le survol d'autres zones forestières (Montagne de Reims). Ce travail de thèse s'intègre dans le programme de recherche IMPACT 14-18 qui a permis de disposer d'un budget d'investissement et de fonctionnement pour assurer les dépenses d'une commande de vol Lidar de 70 000 euros pour 40 km² près de Reims.

Les objectifs de cette thèse sont de comprendre l'organisation du front à grande et petite échelle syn-conflit (Partie 1), de déterminer le degré de conservation des traces morphologiques post-conflit (Partie 2) afin de relativiser les résultats des évaluations environnementales dans un contexte spatio-temporel au sein des réseaux de défense (Partie 3). Dans cette dernière partie, il ne s'agit pas de faire un inventaire exhaustif des impacts environnementaux de la Grande Guerre, mais de les intégrer dans la zone de front pour aider à l'interprétation. L'objectif de ce travail est ambitieux car pluridisciplinaire, multi-sectoriel et multiscalair. Il faut percevoir cette contribution comme un travail fédérateur autour de la dimension spatiale. Avant tout, il propose de reconsidérer la Grande Guerre comme un espace expérimental d'études en géosciences portant sur l'impact environnemental des conflits. De plus, ce travail est multi-approche par les textes (récits de combattants) ou par les archives cartographiques (plans directeurs) ou historiques (Journal de Marches des Opérations). Des études en télédétection (photographies aériennes et Lidar) ont été menées pour constituer des banques de données sous SIG. Des relevés topographiques de surface, souterrains, de coupes en fouille archéologique dans des fosses pédologiques et d'étude géophysique (PANDA) ont

été réalisés sur le terrain. En laboratoire, les prélèvements de terrain sont analysés en Fluo X pour déterminer et mesurer la concentration des éléments traces métalliques dans le sol.

- **Cadre géographique et historique**

L'étincelle qui va enflammer le monde de 1914 à 1918 est l'assassinat le 28 juin 1914 de l'Archiduc François-Ferdinand par Gavrilo Princip, un jeune nationaliste serbe de Bosnie. Par le biais des alliances, les Empires centraux (Allemagne, Autriche-Hongrie ...) déclarent la guerre à la Triple Entente (France, Empire Britannique, Russie ...). La mobilisation générale en France est proclamée le 1^{er} août 1914 mais l'armée française (Annexe, 0.1) est rapidement débordée par la rapidité et l'efficacité de l'armée allemande. Helmut Von Moltke, chef d'État-Major allemand applique le plan *Schlieffen* en envahissant la Belgique et le Luxembourg pour contourner le système Séré de Rivières par le Nord. À la veille de la Grande Guerre, plus de 200 ouvrages fortifiés, des Flandres à la frontière italienne, s'organisent le long des frontières de l'Est, en 3 rideaux de régions fortifiées, canalisant l'ennemi vers 4 ouvertures ou trouées (Chimay, Stenay, Charmes et Belfort) où les troupes sont concentrées. Ces 3 rideaux de fortification (en comptant celui de Paris) s'arc-boutent sur les auréoles de reliefs en gradins que l'ennemi doit franchir alternativement d'Est en Ouest pour atteindre la capitale. Le plan stratégique allemand de contournement s'adapte aux fortifications, elles-mêmes liées au relief. L'armée allemande profite des larges plaines et plateaux du Nord n'offrant que peu de difficultés à la progression des troupes et les Alliés ne cessent de reculer. Cette guerre de mouvement est meurtrière, attesté par la seule journée du 22 août 1914 où 27 000 soldats français perdent la vie, journée la plus sanglante de l'Histoire de France. L'attaque de la capitale est imminente et le gouvernement français est déplacé à Bordeaux.

L'un des faits marquants de ce début de guerre se déroule en Champagne-Ardenne dans les Marais de Saint-Gond. Cette bataille, dirigée par le Général Foch, a pour objectif de stopper l'ennemi de manière définitive et de contribuer à mettre un terme au plan *Schlieffen*. Les armées vont s'affronter pendant quatre jours à la fois sur le plateau de Brie et sur la plaine champenoise de la Champagne crayeuse. Entre ces deux régions se trouve la région des Marais de Saint-Gond, certains l'évoquent comme « l'obstacle des Marais de Saint-Gond ». Cette zone marécageuse est située dans l'entonnoir de percée cataclinale du Petit-Morin et constitue l'interface entre trois « régions » : la Brie Champenoise, la cuesta d'Ile-de-France et la plaine Champenoise. Les Marais de Saint-Gond, vaste zone humide de 3 400 hectares en 1914 (contre 2 200 en 2012, Damien *et al.*, 2015), constituent une « barrière naturelle » ou un « obstacle à la manœuvre », un facteur géographique efficacement utilisé par le commandement français (Villate, 1925). Ce site des Marais de Saint-Gond offre également des « points hauts » tels que le front de la cuesta d'Ile-de-France et quelques buttes témoins : le Mont-Aimé et la Butte de Vert-Toulon au nord des marais et le Mont-Août au Sud. L'objectif est de déployer une ligne défensive au sud de la zone marécageuse qui permettra, d'une part de défendre les débouchés Sud des Marais de Saint-Gond, mais également de permettre aux troupes françaises de se déplacer en fonction des besoins. Les renforts français à l'Est et à l'Ouest des Marais de Saint-Gond n'ont été possibles que grâce à la présence de la zone humide qui a empêché l'ennemi d'attaquer sur l'ensemble de la zone, mais seulement sur les extrémités Est et Ouest (Fig. 0.1). Alors que les Allemands débordent à l'Ouest des

marais (8 septembre), par des mouvements de rocadés, l'armée française le 9 septembre lance une contre-offensive, prémices de la retraite allemande en direction de la Marne.

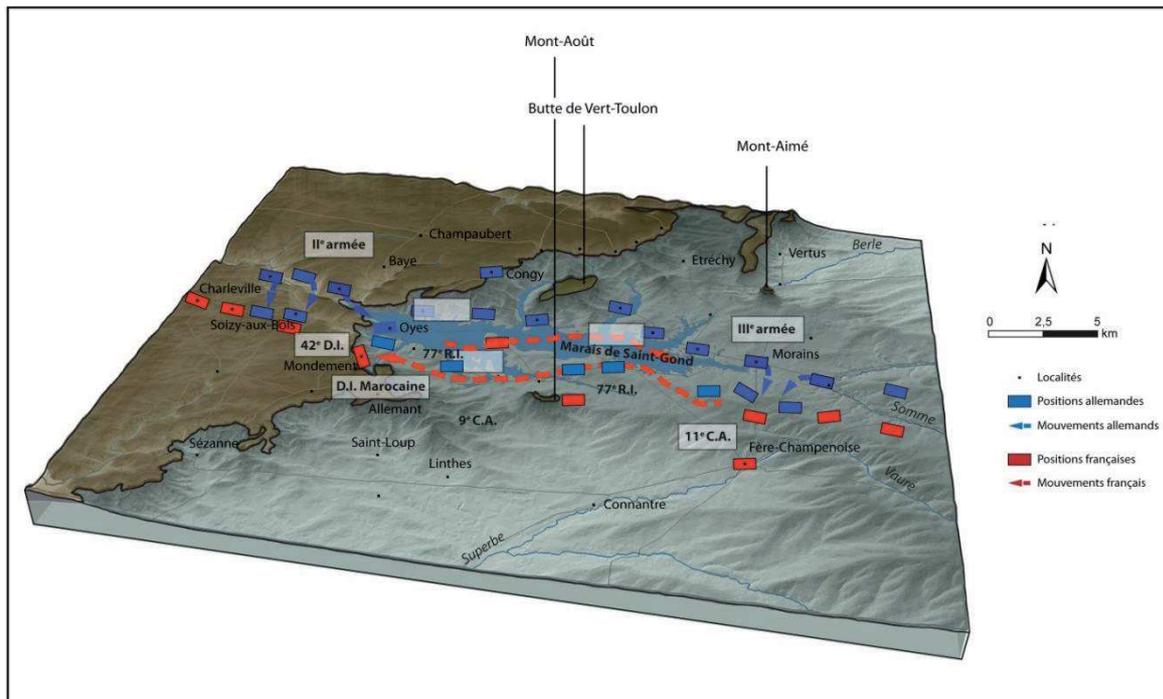


Fig.0. 1: Cartographie des mouvements de rocadés français entre le 5 et le 7 septembre 1914 dans les Marais de Saint-Gond (Source : Damien et al., à paraître).

La guerre de mouvements se poursuit par une volonté de débordement par le Nord, plus connue sous le nom de « course à la mer » jusqu'à ce qu'une ligne de feu continue s'établisse sur environ 750 km. C'est durant cette guerre de mouvements au début du conflit, mais également lors de sa reprise à la fin, que les pertes humaines sont les plus fortes. L'Artillerie s'est développée à outrance depuis la guerre de 1870, et les hommes sont exposés aux éclats d'obus, provoquant un taux de mortalité accru pendant ces périodes. Le nombre moyen mensuel de soldats français morts sur l'ensemble du conflit est de 20 273, alors qu'il atteint 91 750 sur les deux premiers mois. Cependant, les pics observés sur les courbes de mortalité mensuelle sont liés aux grandes offensives (Champagne, Argonne, Artois en 1915, Verdun et Somme en 1916, Chemin des Dames en 1917), où les hommes sortent des réseaux de défense, et sont ainsi exposés (Fig. 0.2).

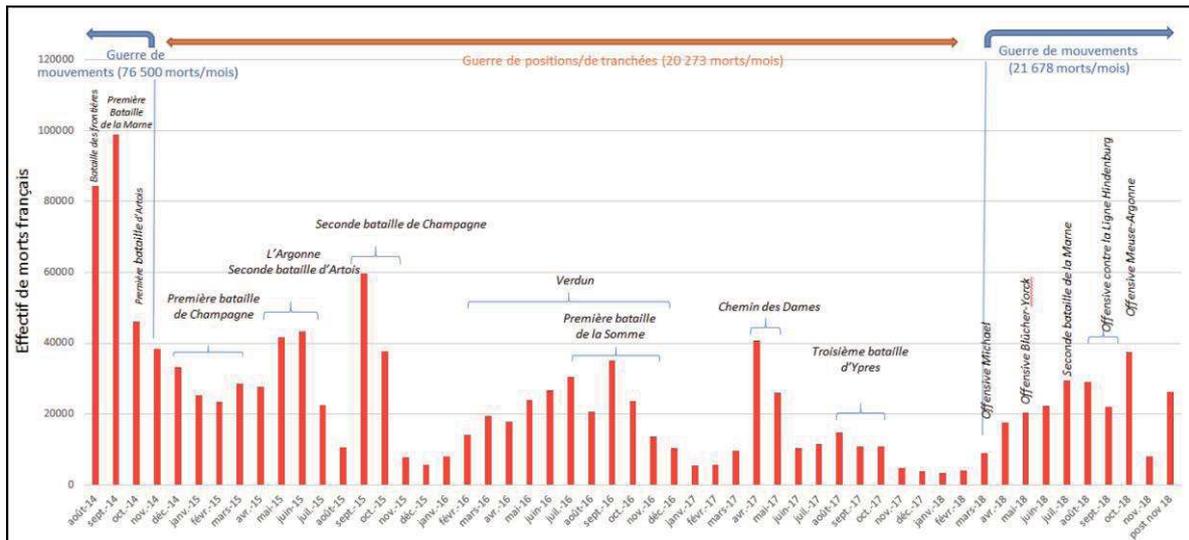


Fig.0. 2: Nombre de morts français par mois pendant la Grande Guerre.

La zone de front traverse différents pays, coupe des cuestas, s'établit de part et d'autre de grands cours d'eau, héritage de la guerre de mouvements de l'automne 1914. Cependant, sur les 750 km, la zone de front traverse les sables, argiles et formations maritimes flamandes (sable de l'Yprésien), la craie de Picardie et du Noyonnais, puis les formations tertiaires du Soissonnais, à la craie du secteur de Reims et de la Champagne sèche, les argiles du Crétacé inférieur de la Champagne humide et la gaize d'Argonne. Elle continue dans les calcaires oxfordiens de Verdun des Hauts de Meuse, les argiles calloviennes de la Woëvre, les plateaux des calcaires bajociens de Meurthe et Moselle, puis dans les argiles et grès du plateau lorrain jusqu'aux grès du Buntsandstein avant le granite des Vosges. Les soldats vont alors adapter leurs travaux (traficabilité, pénétrabilité, creusement des réseaux de défense et de mines, ressources en eau) en fonction de cette grande diversité géologique que la zone de front traverse (Fig. 0.3).

Les différentes grandes offensives pendant la Grande Guerre de 1915 à 1917 n'auront que des impacts locaux sur les premières positions de chaque camp, par des avancées de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Par contre, les retraits stratégiques comme le retrait *Alberich* va faire reculer l'armée allemande sur la ligne *Siegfried*. Ce retrait programmé va alors démultiplier la densité des réseaux de défense dans le Noyonnais.

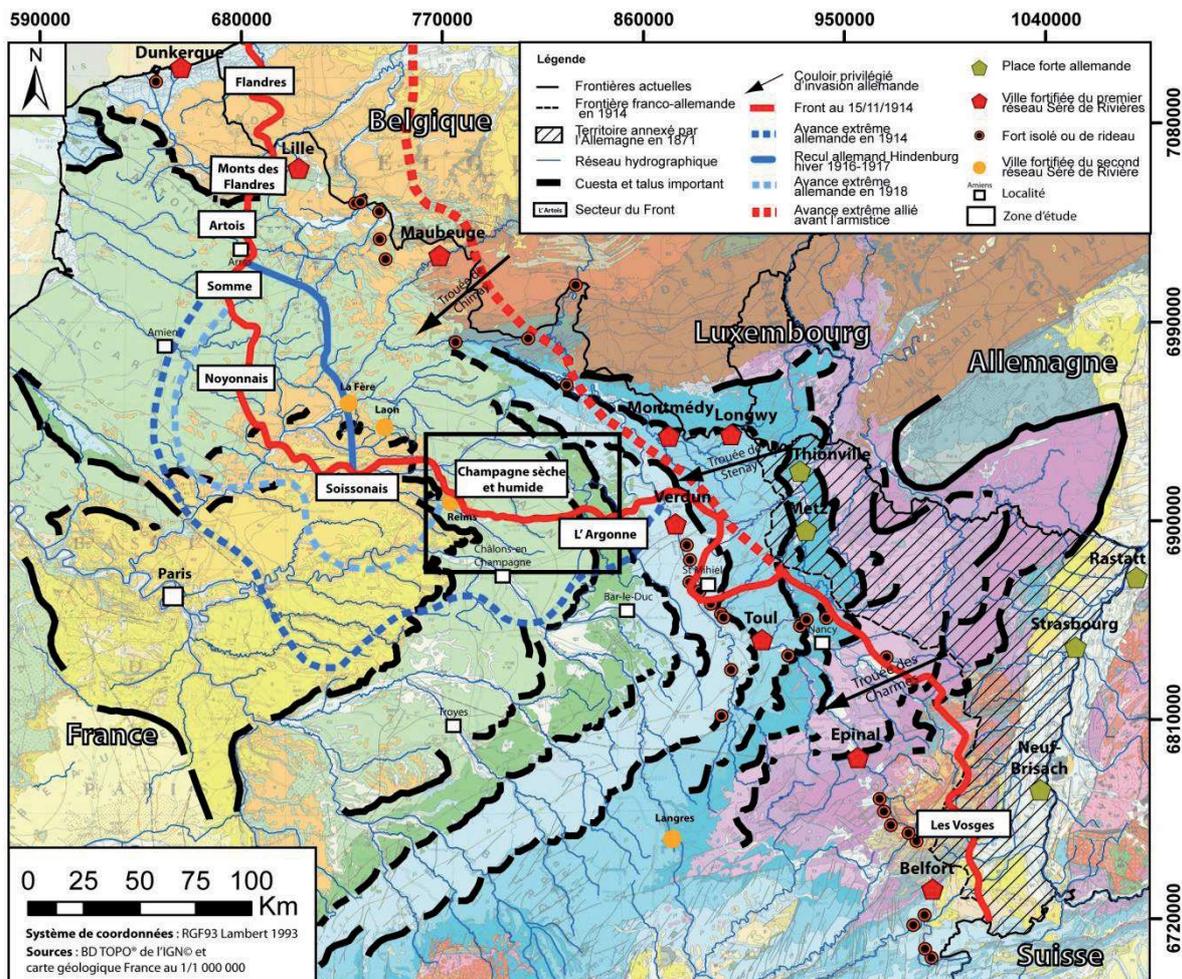


Fig.0. 3: Les différentes lignes de front de la Grande Guerre en fonction de la géologie dans le Nord et l'Est de la France.

La zone d'étude de cette contribution s'étend sur l'ancienne région Champagne-Ardenne de Berry au Bac à Varennes en Argonne (Fig. 0.4). De plus, elle est caractérisée par une grande diversité géologique qui présente, d'Ouest en Est, 4 milieux (Fig. 0.4).

A l'Ouest, le front s'intègre dans le Pays rémois, dominé par la cote d'Île-de-France (formations calcaires tertiaires du Lutétien et sables/argiles de l'Yprésien). Il se caractérise par deux entonnoirs de percée cataclinale de l'Aisne au Nord et de la Vesle plus au Sud. La plaine de Reims est jonchée d'avant-buttes et de buttes témoins, fortifiées par le système Séré de Rivières, alors que le fond de la vallée de la Vesle est marécageux. L'originalité de ce secteur est la présence d'une ville intégrée dans les réseaux de défense, comme peuvent l'être également Ypres, Arras, Saint-Quentin, Soissons ou Verdun. Cette zone reste stable pendant la guerre de mouvements, mais sera largement enfoncée par l'armée allemande le 27 mai 1918, n'affectant que l'Ouest immédiat de Reims. Deux verrous à l'Ouest et à l'Est vont résister et empêcher la prise de la ville par l'armée allemande. Alors que des forêts sont retrouvées sur les plateaux tertiaires, ce sont essentiellement des cultures et des bois de pinèdes qui caractérisent le paysage d'avant-guerre autour de Reims.

Plus à l'Est, les Monts de Champagne sont des croupes de craie d'altitude comprise entre 200 et 250 m sur le revers de la Côte de Champagne. À la terminaison orientale du plateau

crayeux, la Côte de Champagne présente un tracé digité par des ravins délimitant des croupes, qui a servi à la fixation du front (Massiges). Le front s'installe sur ces Monts de Champagne qui constituent d'excellents sites d'observations, notamment disputés durant les grandes offensives de 1915, de 1917 et de 1918, mais pour des gains de terrains insignifiants de quelques dizaines de mètres. Alors que cette zone est caractérisée par de grandes cultures aujourd'hui, elle était définie en 1914 par des savarts pour l'élevage ovin et des bois de pinèdes.

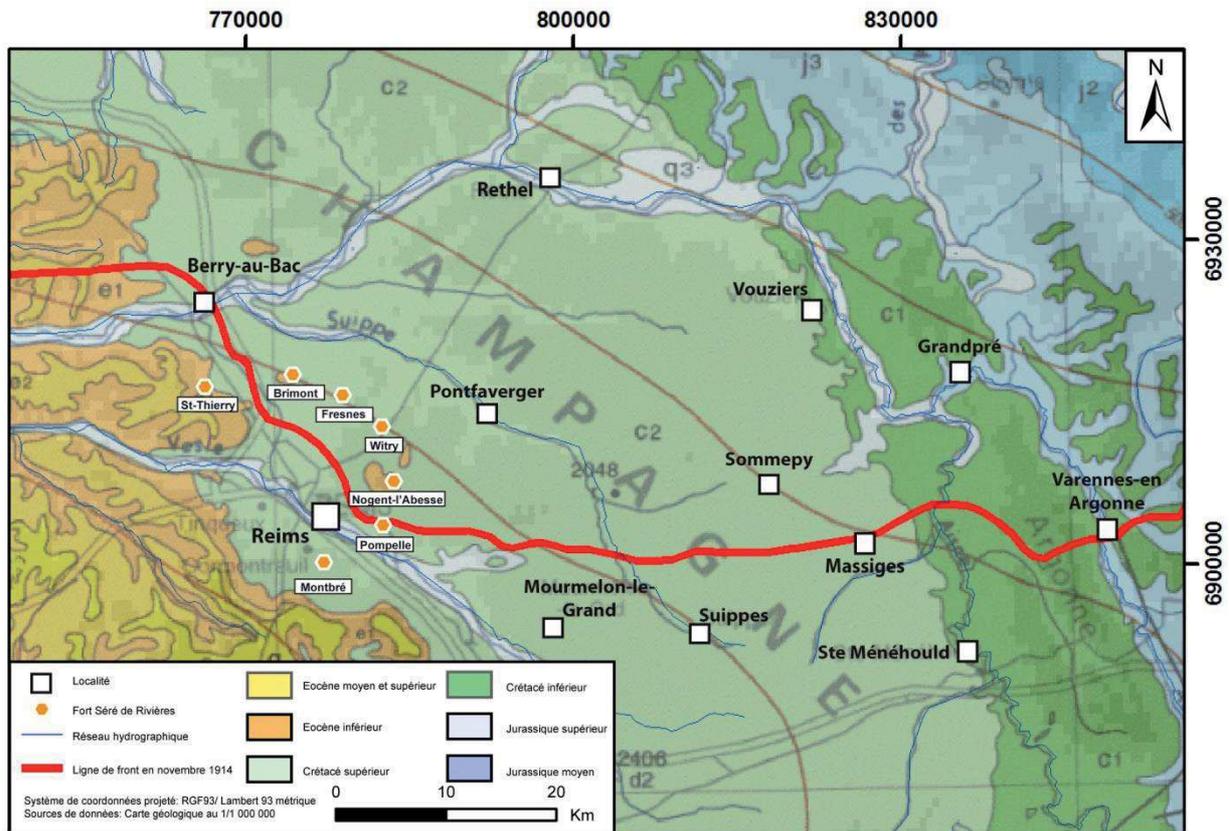


Fig.0. 4: Ligne de front de la Grande Guerre en fonction de la géologie en Champagne-Ardenne.

Entre la Côte de Champagne et l'Argonne, le Vallage d'Aisne ou la Champagne humide forme une dépression dans le Crétacé inférieur (craie marneuse) et les argiles du Gault. Cette zone, au sol hydromorphe, se caractérise par des plans d'eau, des zones humides, des bosquets et de petits bois de quelques hectares. Elle restera calme pendant le conflit, peu propice ni à la défense, ni à l'attaque.

Enfin, le massif forestier d'Argonne, formant une marche forestière pour le conquérant venant de l'Est, est traversé par la zone de front. Ce massif Nord-Sud, découpé par les barribans (Léry, 1916) et caractérisé par la gaize, est perpendiculaire à la ligne de front Ouest-Est, peu propice à l'offensive. Les attaques allemandes de 1915 ne provoqueront qu'un recul d'environ 1 kilomètre et il restera un secteur relativement calme aux attaques d'Infanterie, mais très actif aux explosions de mines.

Cette hétérogénéité des milieux (plaines, plateaux, buttes, craie, gaize, ravins ...) permet de mesurer dans cette contribution le rôle des milieux naturels sur l'organisation spatiale des réseaux de défense.

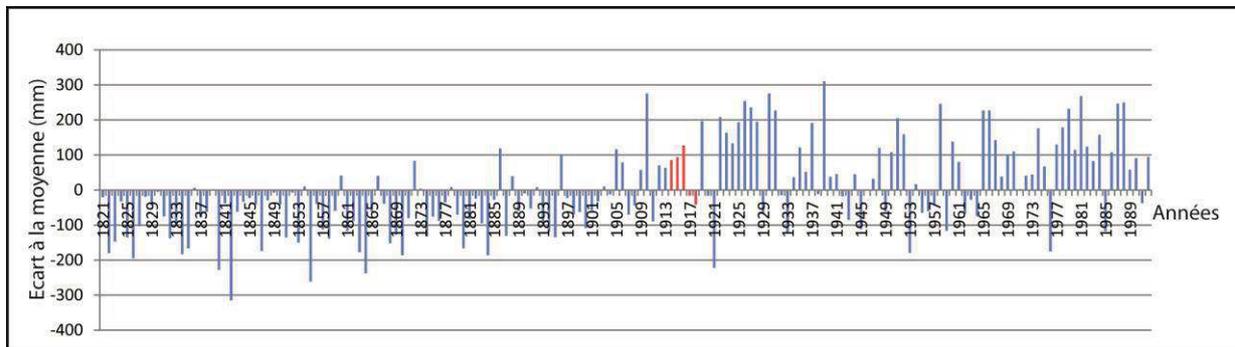


Fig.0. 5: Écart à la moyenne (604 mm) des précipitations à Épernay de 1821 à 1992.

La Grande Guerre s'intègre dans un contexte climatique de transition, marqué par des données moyennes pluviométriques supérieures à la moyenne en 1914, 1915 et 1916 (Fig. 0.5). Ce conflit est particulièrement humide car sur les 1563 jours, 648 sont pluvieux ou neigeux. Compte tenu des différences de comportement hydrogéologique des formations géologiques, les hommes doivent s'adapter régionalement aux problématiques d'inondations des réseaux de défense, de leur stabilité et durabilité, ce qui provoque une spatialisation des pathologies de tranchées (constipation, fièvre, diarrhée, rhumatisme, néphrite, héméralopie, pied ou main de tranchées, Morillon, 2015). Même à l'échelle de la zone d'étude, les moyennes annuelles pluviométriques présentent des contrastes saisissants, de 700 mm à Reims jusque 1200 en Argonne. Ce climat océanique est fortement influencé par l'orographie avec des effets d'abri et d'exposition.

Cependant, ces moyennes cachent des épisodes de calamités climatiques pendant le conflit. Les guerres de mouvements s'intègrent dans des périodes de fortes chaleurs en août 1914, et juillet-août 1918 (Annexe 0.2). Alors que l'année 1916 est particulièrement pluvieuse (1000 mm en Argonne à Sainte-Ménéhould, 890 mm en Champagne sèche à Sommesous), l'hiver 1917 se caractérise par une longue période de froid de 42 jours sans dégel que les combattants décrivent longuement dans leurs lettres aux familles (Dupré, 2013) :

« Il fait encore plus froid qu'hier. On nous distribue du camembert, mais c'est du marbre, impossible de le manger. Le cuir des chaussures est dur comme du bois, et malheur à celui qui enlèverait ses « godasses », car il ne pourrait plus les remettre. [...] on ne peut plus se mettre de l'eau sur la tête pour se peigner, deux secondes après on a des glaçons dans les cheveux ».

Le climat champardennais se caractérise par sa grande versatilité, car de fortes chaleurs sont observées en mai 1917 après la longue période de froid de l'hiver 1917 (Pédelaborde, 1957). Il va donc impacter de manière saisonnière la pénétrabilité, la traficabilité et le creusement des réseaux de défense et de mines en Champagne-Ardenne.

Partie 1 : Structuration du front et état initial des réseaux de défense de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne



Chapitre 1 : Les innovations cartographiques:

les plans directeurs

Introduction du chapitre 1

Plébiscitée par les historiens, la Grande Guerre n'en demeure pas moins un sujet de géographie, pour la compréhension de la spatialité du front liée au relief et pour les connaissances des ressources naturelles situées à proximité (Villate, 1925). Et pourtant, les conditions géographiques de la guerre sont rarement étudiées, voire anecdotiques dans les écrits. Cette antinomie se retrouve pendant la guerre elle-même, alors que la connaissance de l'environnement, que ce soient la topographie, l'hydrographie, la géomorphologie, l'hydrogéologie ou l'occupation de l'espace, est fondamentale pour les militaires durant cette guerre de position (Boulangier, 2001a).

Au lendemain de la déclaration de guerre et de la mobilisation générale, le Service Géographique aux Armées (SGA) existe déjà mais démuné de tous ses effectifs, ceux-ci ayant été envoyés dans leurs différentes affectations. De plus, l'avancée rapide allemande entraîne la délocalisation de nombreux services dont le Service Géographique aux Armées à Bordeaux. Pendant cette guerre de mouvement, aucuns travaux ne furent réalisés par le SGA mais, dès le mois de septembre 1914, de nouveaux besoins apparaissent et vont élargir le champ d'action de ce service. Au commencement de la Grande Guerre, les cartes existantes pour les zones de fronts ou batailles sont à trop petite échelle et avec des projections ne respectant ni les angles ni les longueurs (SGA, 1936). Dans un premier temps, ces différents plans seront replacés dans un contexte historique de la cartographie. C'est donc dans une situation de nécessité mais surtout d'urgence que les services géographiques vont travailler. Le SGA est alors obligé de réaliser et fournir rapidement des cartes précises, pour lesquelles tout doit être construit dans un seul objectif : permettre à l'Artillerie de tirer sur des objectifs non visibles. Ces cartes sont nommées les « plans directeurs de tir » (Combaud *et al.*, 2016). Pour ce faire, l'Armée affine le canevas d'ensemble de la France, et donc reprend les levés sur le terrain. Or le contexte de guerre impose de nouveaux modes de levés topographiques, favorisés avec le développement de l'aéronautique et de la photo-interprétation. Après avoir présenté en détail les plans directeurs, une légende a été réalisée pour comprendre l'ensemble des annotations présentes sur ceux-ci. Ce premier chapitre repose sur l'examen de nombreux ouvrages, notamment des manuels d'instructions (Challéat J., 1914), ou des manuels de pratique du tir (Bouchon R., 1918), des instructions relatives à l'organisation et au fonctionnement des Groupes de Canevas de Tir des Armées (GCTA) et à des instructions sur les plans directeurs (SGA, 1936). Ces sources documentaires permettent d'appréhender les instructions réglementaires relatives aux plans directeurs et d'inscrire ces derniers dans la cartographie militaire. Enfin, l'étude de nombreux plans directeurs (environ 350 recensés et archivés) permet de travailler sur des situations précises et de valider une légende à la fois réglementaire mais aussi opérationnelle pour un futur travail réalisé sous SIG (Système d'Information Géographique).

1.1. Cartographie militaire antérieure (De Naudin à la carte d'État-Major)

Les cartes de la Grande Guerre s'inscrivent dans l'essor que la cartographie connaît depuis le XVIII^{ème} siècle. Jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle, la carte demeure la prérogative des militaires. L'évolution de la cartographie reflète alors non seulement les mutations guerrières associées aux armes utilisées mais aussi l'évolution de la perception de l'espace par les militaires ou les dirigeants.

Les cartes des Naudin concernent les zones frontières du XVIII^{ème} siècle du nord et de l'est de la France. Levées entre 1728 et 1739 à des fins militaires, leur échelle est grande, au 1/28 800. La topographie fait part d'une attention particulière ; les couleurs, qui rehaussent les cartes manuscrites, permettent notamment la distinction entre les routes facilement accessibles aux armées et les chemins qui ne font que mener d'un village à l'autre (Pelletier, 2002). Néanmoins, elles ne conservent ni les distances ni les formes et sont sans nivellement. Elles sont adaptées aux guerres des Princes, guerres de sièges de citadelles ou de mouvements. Le tableau d'assemblage des travaux des Naudin sur les frontières nord-est montre bien la difficulté d'assembler ces levés (Pelletier, 2002, Combaud *et al.*, 2016). Les cartes des Naudin peuvent être visualisées à haute résolution sur le site du Comité d'Histoire Régionale de Lorraine (propriété de la Médiathèque de Metz, du Service Historique de la Défense ou de l'Institut Géographique National).

Les atlas des routes de France, dits atlas de Trudaine, sont réalisés entre 1745 et 1780 et sont composés de 3000 planches non seulement cartographiques mais concernant également les ouvrages d'art (Fig. 1.1A). L'objectif est de dresser une carte générale des routes royales de France avant leur réfection. Les cartes sont manuscrites et aquarellées en couleurs. Elles ne se limitent pas à la représentation du tracé de la route car les abords immédiats figurent également sur une largeur d'environ 600 toises (1 170 mètres). L'habitat, les lieux remarquables, la végétation ou encore le relief sont cartographiés (Blond, 2007). Elles sont orientées, pourvues d'une très grande échelle (environ 1/8 600) ; le relief est représenté en ombrage mais elles sont toujours sans nivellement. Par ailleurs, la qualité est variable selon les généralités, même si Trudaine tente d'homogénéiser certaines étapes grâce notamment au bureau des dessinateurs créé en 1744 (Grandidier, 1918 ; Blond, 2007 ; Combaud *et al.*, 2016). Enfin, du fait de l'extension étatique de l'époque, toutes les zones de front de la Grande Guerre ne sont pas concernées par les Atlas de Trudaine. Les cartes sont téléchargeables sur le site des Archives Nationales, avec une consultation par généralité de l'Ancien Régime puis par volume (base Archim).

La carte de Cassini, levée entre 1753 et 1789, est publiée en 181 feuilles entre 1756 et 1815 (Fig. 1.1B). A l'échelle de 1/86 400, soit 1 pouce pour 100 toises, elle constitue la plus ancienne carte du royaume. Cette « Carte de l'Académie » subit l'opposition des ingénieurs cartographes militaires qui ne souhaitent pas que les ingénieurs de Cassini, des civils, s'occupent des frontières. Mais les cartes militaires n'ont pas l'ambition de couvrir tout le royaume, contrairement à la Carte de l'Académie dont la vocation est avant tout de fournir un canevas géométrique qui peut être enrichi par les usagers et non une carte topographique précise (Corvisier de Villèle et Ponnou, 2001). En d'autres termes, son objectif est le positionnement des lieux les uns par rapport aux autres, avec mention des toponymes, mais n'est pas de lever les paramètres topographiques du paysage (Pelletier, 2002). Elle est la première carte française à s'appuyer sur une triangulation géodésique, finalisée en 1744 et dont l'établissement prit plus d'une cinquantaine d'années (Corvisier de Villèle et Ponnou, 2001). Son mode de relevé implique des coordonnées calculées pour les éléments hauts, bâtis ou naturels, mais des dessins, voire de simples ébauches, d'après les notes des ingénieurs pour

les réseaux viaires, les cours d'eau, les marais et les cultures pérennes (Pelletier, 2002). Par ailleurs, la projection utilisée (Cassini-Soldner) est cylindrique transverse, non conforme et non équivalente. Elle conserve l'échelle sur les méridiens avec une distorsion qui augmente en s'éloignant du méridien origine de Paris. Enfin, sans nivellement, elle ne représente que les grandes lignes du relief faisant obstacles aux armées en ordre de marche (Combaud *et al.*, 2016). La carte originelle est monochrome, mais des versions ultérieures sont colorisées, dont la version dite de « Marie-Antoinette » disponible sur le portail cartographique Géoportail de l'IGN (Institut Géographique National).

La préoccupation de l'homogénéité des cartes est présente dès 1802 avec la convocation d'une commission de topographie, chargée d'uniformiser et de codifier les signes et conventions en usage dans les divers services publics. Mais celle-ci édicte uniquement des recommandations qui ne seront pas toujours mises en œuvre. Pourtant, les principes établis créent l'armature de la carte topographique moderne. En effet, la commission recommande l'adoption de l'échelle métrique, qui conduit théoriquement à n'employer que des échelles décimales, et du niveau de la mer comme niveau de référence unique couplé à l'indication de points cotés. Par ailleurs, le relief doit être représenté par des hachures, selon les lignes de plus grande pente, appuyées sur des courbes de niveau non figurées sur la carte. Les signes conventionnels sont normalisés, et tous les objets planimétriques représentés par leur projection horizontale. Des tableaux très complets de ces signes sont élaborés pour l'hydrographie, la minéralogie, les armées de terre et de mer modernes (Corvisier de Villèle et Ponnou, 2001).

Les cartes des batailles napoléoniennes sont dressées entre 1794 et 1815, à partir de levés topographiques effectués avant, pendant ou après les combats, pour la préparation des attaques ou le récit des batailles. Réalisées par des ingénieurs géographes militaires, leurs échelles et formats sont variables et, pour les cartes postérieures à 1802, les représentations ne suivent pas toujours les recommandations de la commission. Néanmoins, les différentes batailles européennes de Napoléon permettent aux ingénieurs géographes d'acquérir une grande connaissance au contact des cartes étrangères. Ainsi, une fois la paix revenue, ils sont aptes à réaliser une nouvelle carte topographique pour l'ensemble du territoire français (Corvisier de Villèle et Ponnou, 2001, Combaud *et al.*, 2016).

C'est pourquoi il faut attendre la carte d'État-Major en hachures (Fig. 1.1C), levée entre 1817 et 1866, pour avoir une refonte totale de la carte de Cassini sur l'ensemble du territoire français. La commission royale de la carte de France, formée en 1817, propose tout d'abord des levés au 1/10 000, qui passeront, faute de moyens, au 1/20 000 pour les zones urbaines et les frontières et au 1/40 000 pour le reste du pays (Corvisier de Villèle et Ponnou, 2001). L'échelle de publication est au 1/80 000, limitant le nombre de feuilles à 273. Chaque feuille porte un nom, un numéro, l'année de publication, mais aussi des levés, et couvre un secteur de 64 x 40 km. Les cartes sont révisées une première fois de 1889 à 1907 puis une seconde fois de 1908 à 1958 et un agrandissement au 1/50 000 est effectué dès 1899. Le nivellement, les altitudes et de nombreux signes conventionnels sont présents. Mais bien que nombreux et diversifiés, ces signes conventionnels sont confondants car la carte originelle est monochrome. La Projection de Bonne, équivalente et non conforme, ne conserve que les surfaces pour la France. Le point origine est au croisement entre le parallèle 50 gr N et le méridien de Paris. La déformation atteint 18 minutes pour les angles et 1/380 (0,3 %) pour les longueurs aux frontières (Boulanger, 2001b). Cette carte de tacticien ou de stratège s'avère plus pratique dans le cadre d'une guerre de mouvement que dans celui d'une guerre de position. Durant la guerre de 1870 et l'avancée inattendue de l'armée allemande, aucune carte ne fut éditée car l'employé du dépôt de Guerre avait envoyé les planches de cuivres à Brest sans en informer quiconque. Même si 15 000 cartes furent imprimées à la fin du conflit, le

manque de cartes est une des explications de la défaite. Le service géographique est donc un membre incontournable d'une armée qui prétend à son bon fonctionnement (Lévy, 1926). De même que pour la carte de Cassini, des variantes en couleur sont publiées, dont celle disponible sur le portail cartographique [Géoportail de l'IGN \(Institut Géographique National\)](#).

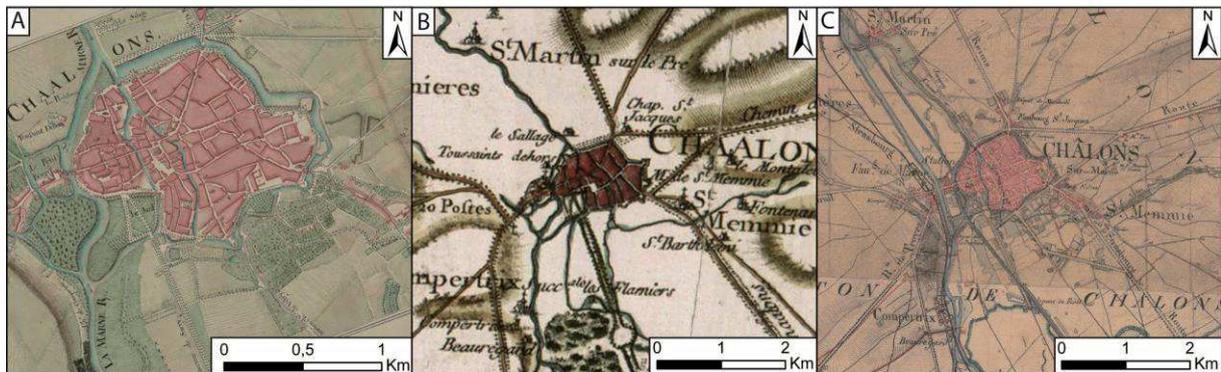


Fig.1.1: Carte du secteur de Châlons-en-Champagne de Trudaine, Cassini et d'État-Major

1.2. Les services cartographiques de l'Armée française

Depuis la guerre de 1870, les consciences évoluent et la carte est pensée comme un instrument à utiliser par le plus grand nombre, convenant non plus uniquement au commandement des Armées, mais répondant aux besoins stratégiques et tactiques (Boulangier, 2001b). C'est pourquoi en 1914, tous les lots de cartes sont présents en quantité suffisante dans les stocks du Service Géographique des Armées (Levy, 1926). Au début du conflit, les cartes de mobilisation suffisent aux besoins de l'Artillerie de campagne. Le service des cartes de mobilisation assure le ravitaillement des troupes et des États-Majors par chemin de fer. Ces lots sont composés uniquement de cartes au 1/80 000 et au 1/200 000. Outre cette distribution, les officiers cartographes du SGA doivent tenir à jour la carte des opérations et assurer l'exécution des croquis topographiques (SGA, 1936).

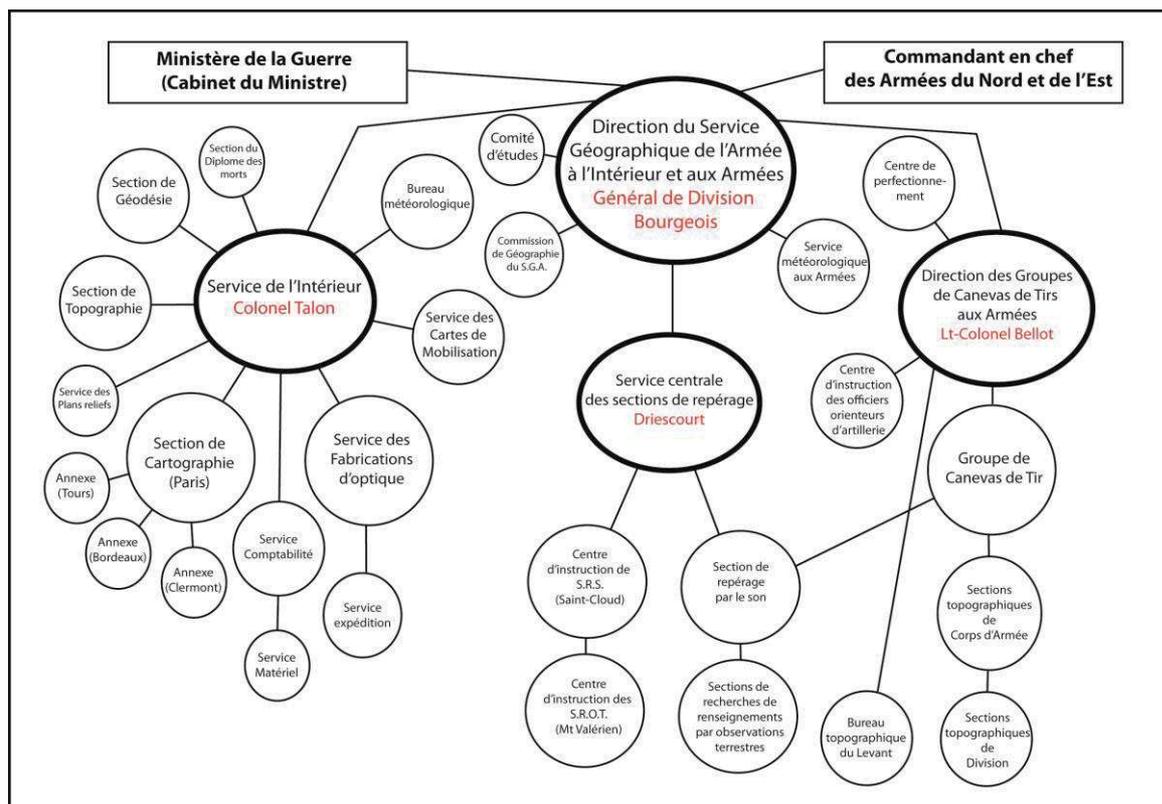


Fig.1.2: Organisation du service géographique de l'Armée en 1918 (SGA, 1936)

Si ces cartes et ce fonctionnement suffisent en début de conflit, la fixation du front dans les tranchées et le besoin nécessaire et urgent de cartes bouleversent les logiques de production cartographique. Dans un premier temps, au 1^{er} novembre 1914, le SGA, dirigé par le Général Bourgeois pendant tout le conflit (Fig. 1.2), recrute des officiers parmi ses propres rangs et des ingénieurs des services hydrographiques de la Marine pour constituer les Groupes de Canevas de Tir d'Armée (GCTA) dont le statut est officiellement édicté en janvier 1915 (GQGA, 1915). Le nom de ces groupes vient du « canevas de tir », guide topographique du tir indirect sur des objets dissimulés, conçu pour expliquer comment, en cas de siège, les tirs peuvent être effectués à partir de plans exécutés par des officiers spécialisés (Lévy, 1926). Le recrutement du personnel est réalisé dans les différents Corps d'Armée (CA) : géomètres, géographes, architectes habitués aux dessins et à la topographie. Les GCTA recrutent également des dessinateurs industriels, des artistes peintres ou des sculpteurs. Afin d'assurer une meilleure rapidité de l'exécution des cartes, un GCTA est prévu pour chaque Armée (SGA, 1936), rattaché à l'État-Major et placé directement sous les ordres du chef d'État-Major (GQGA-EM, 1918b). Au cours des mois suivants, le nombre de GCTA va s'accroître ; alors que trois GCTA sont créés en novembre 1914, ils sont dix en avril 1915 et treize sur l'ensemble du conflit (SGA, 1936, Combaud *et al.*, 2016).

Dès le 20 novembre 1914, il apparaît qu'en complément des levés, les GCTA devront établir en totalité le plan directeur de tir. En effet, cette carte précise nécessite la mise en œuvre de nombreux documents cartographiques et mobilise des compétences spécifiques. Par ailleurs, les GCTA prévoient rapidement que le plan doit être largement et rapidement distribué dans les Armées, impliquant des moyens de reproduction lourds que gèrera le SGA. Enfin, pour maintenir lors des mouvements la possibilité aux batteries de continuer les tirs repérés, une instruction prévoit, dès avril 1915, une décomposition en deux échelons des GCTA. Le premier doit être sur le front pendant les combats pour permettre la continuité des tirs au péril de leur vie, vérifié par une liste d'officiers, de sous-officiers et d'homme de troupe morts pour

la France au nombre de 85 (SGA, 1936). Le second reste au quartier général et assure la préparation continue des planchettes de tir nécessaires aux batteries et l'établissement du plan directeur de tir (GQGA-EM, 1918b).

Dans cette prise de conscience du rôle stratégique de la carte, de novembre 1914 à la fin du conflit, les missions des GCTA vont considérablement s'étendre, notamment suite au rapport Bellot, après l'offensive de Champagne. Ce dernier stipule la nécessité d'unifier les plans directeurs entre toutes les Armées et la formation des officiers de batterie pour qu'ils déterminent eux-mêmes les positions des pièces directrices et des repères sans faire appel aux GCTA. Par ailleurs, ces derniers doivent fournir aux commandements des cartes de direction des opérations. Ce rapport mène à l'instruction du 23 décembre 1915 sur les attributions et l'organisation des GCTA (GQGA, 1915), abrogée par celle du 14 mai 1918 (GQGA-EM, 1918b). Cette restructuration des Armées implique une centralisation du commandement cartographique au SGA et entraîne la création du service central des sections de repérage, commandé par Driescourt (Lévy, 1926) : les Sections Topographiques de Corps d'Armée (STCA), les Sections Topographiques de Division (STDI), les Sections de Repérage par le Son (SRS), les Sections de Repérage par Observation Terrestre (SROT), mais aussi le centre de perfectionnement des deux services de repérage, à Saint Cloud et au Mont Valérien. C'est pourquoi les attributions des GCTA sont considérables (GQGA, 1915 ; GQGA-EM, 1918b ; SGA, 1936) (Fig. 1.2) :

- l'exécution du canevas d'ensemble mais aussi toute détermination sur le terrain et ses levés demandés par l'Artillerie pour l'organisation du tir et l'observation des positions ennemies. Ce canevas d'ensemble sert de base à la préparation topographique du tir de l'Artillerie et à l'exécution précise des assemblages de tous les levés, fragments de cartes et plans, cadastres utilisés pour former le fond planimétrique et altimétrique des plans directeurs ;
- l'établissement des plans directeurs aux diverses échelles, à l'aide des documents cartographiques existants, dont les photographies aériennes, ou de nouveaux levés exécutés. Mais aussi l'établissement et le tirage des cartes et plans spéciaux notamment des plans en relief et, de manière générale, tout type de document ou schéma commandité par le Chef d'État-Major de l'Armée ;
- la distribution des plans directeurs, cartes et plans spéciaux, incluant la distribution de tout le matériel topographique et d'observation que le SGA fournit aux Armées et le contrôle de ces distributions aux échelons inférieurs de l'Armée;
- la direction technique des Sections de Repérage par le Son, des Sections de Repérage par Observation Terrestre et des Sections Topographiques de Corps d'Armée et de Division ;
- l'instruction topographique des officiers de toutes armes et, d'une façon générale, l'instruction technique du personnel appelé à utiliser les instruments topographiques et d'observation fournis par le SGA. Le chef du GCTA s'assurera des conditions d'emploi et d'entretien de ces instruments dans les unités.

Cette évolution s'accompagne nécessairement d'un accroissement du nombre de militaires travaillant pour les GCTA et d'une formation spécifique. Après notamment la bataille de

Champagne de 1915, des cours spéciaux sont donnés aux officiers orienteurs d'artillerie sur les procédés de tirs d'artillerie afin d'améliorer leur efficacité. Durant le conflit, plus de mille officiers sont formés à interpréter les travaux topographiques et à déterminer les éléments de tir. Si au début du conflit, par armée, les officiers du SGA ne sont que deux, à l'armistice, ils seront jusqu'à 70 officiers et 1100 sous-officiers ou soldats, soit 450 officiers et 7000 hommes de troupe pour toutes les armées, presque tous spécialistes (Lévy, 1926, Combaud *et al.*, 2016).

Dès décembre 1914, le SGA se dote d'un Comité d'Études pour élaborer des notices statistiques et descriptives de secteurs du front (Fig. 1.2). Le Général Bourgeois se met en relation avec le Président de la section de Géographie du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques du Ministère de l'Instruction Publique. Les géographes parisiens vont participer à ce vaste travail au sein de la Commission de Géographie du Service Géographique de l'Armée, pour les plus connus, Paul Vidal de la Blache, Albert Demangeon, Emmanuel De Martonne, Emmanuel De Margerie ou Lucien Gallois.

Le SGA dirige également une autre branche, le Service de l'Intérieur, commandé par le colonel Tallon (Fig. 1.2). Ce service, créé pendant les hostilités, regroupe le service de fabrication d'optique et d'expéditions pour l'approvisionnement de matériel topographique aux hommes sur le front. Plus de 340 000 boussoles, 557 000 jumelles de Galilée et 373 000 jumelles à prisme notamment furent fabriquées et acheminées aux Armées.

Alors que le SGA possède son service météorologique, le service de l'intérieur crée un bureau météorologique (Fig. 1.2). Les tâches sont multiples et vont se diversifier pendant le conflit, pour mesurer le vent et faire voler les ballons captifs ou diriger vers l'ennemi des nappes de gaz, connaître la météo à quelques jours pour préparer une vaste et massive attaque, étudier la pression de l'air pour optimiser les tirs d'artillerie lourde à longue portée. De plus, ce service va développer au cours de la guerre des compétences nouvelles sur la vitesse et le sens du vent par une méthode basée sur le repérage par le son. En mars 1918, le service et le bureau météorologique fusionnent en un seul, commandé exclusivement par le SGA.

La section de géodésie et le bureau des calculs (Fig. 1.2) dirigé par M. Hasse, exécutent différentes tâches comme la réalisation des tables de projection Lambert, les tables de logarithmes adaptées aux besoins de l'Artillerie, les cartes magnétiques ou de repérage des dirigeables.

La section de topographie doit fournir des éditions révisées et actualisées de plans directeurs aux Groupes de Canevas de Tirs (Fig. 1.2). En se basant sur des travaux antérieurs ou la carte d'État-Major, le personnel des dessinateurs et dessinatrices de la section assemble, révise et édite la planimétrie des plans directeurs.

La section de cartographie est en réalité le service de reproduction, de tirage et de distribution des cartes militaires (Fig. 1.2). Le principal site est à Paris mais trois annexes ont été construites à Tours, Bordeaux et Clermont-Ferrand. La mission principale est d'apporter à chaque Corps d'Armée l'ensemble des documents nécessaires pour son commandement. Cette section de cartographie s'est considérablement développée pour répondre à cette problématique d'approvisionnement, à la fois dans le matériel d'imprimerie et dans la papeterie. Environ 55 000 coups de presse peuvent être donnés par jour seulement à Paris (SGA, 1936).

Le service des Plans-Reliefs ne fonctionne pas en 1914 et 1915. En 1916, l'atelier reprend du service aux Invalides pour construire au 1/20 000, 1/10 000 et 1/5 000 des plans-reliefs, une maquette en trois dimensions des secteurs les plus animés du front. La maquette en carton est drapée du plan directeur pour son habillage à l'aide d'un papier spécial et extensible (fig

1.3A). L'échelle des hauteurs est exagérée (doublée, triplée, voire quadruplée) pour une meilleur lisibilité. La maquette est parfois amenée au plus près du front pour comprendre au mieux l'organisation du terrain (fig 1.3B). Environ 12 000 plans-reliefs sont élaborés pour la région de Verdun, la plus représentée avec 150 maquettes.

Le Service des cartes de mobilisation était chargé, avant le début du conflit, d'entretenir et de garantir l'acheminement des stocks de cartes au 1/80 000 et 1/200 000. A partir du mois de septembre 1914, l'acheminement des plans doit être le plus rapide possible, c'est pourquoi six automobiles sont affrétées pour le transport des cartes vers le front. Durant tout le conflit, même si les commandes et le nombre de cartes sont importants, la livraison devait être réalisée dans les quarante-huit heures.

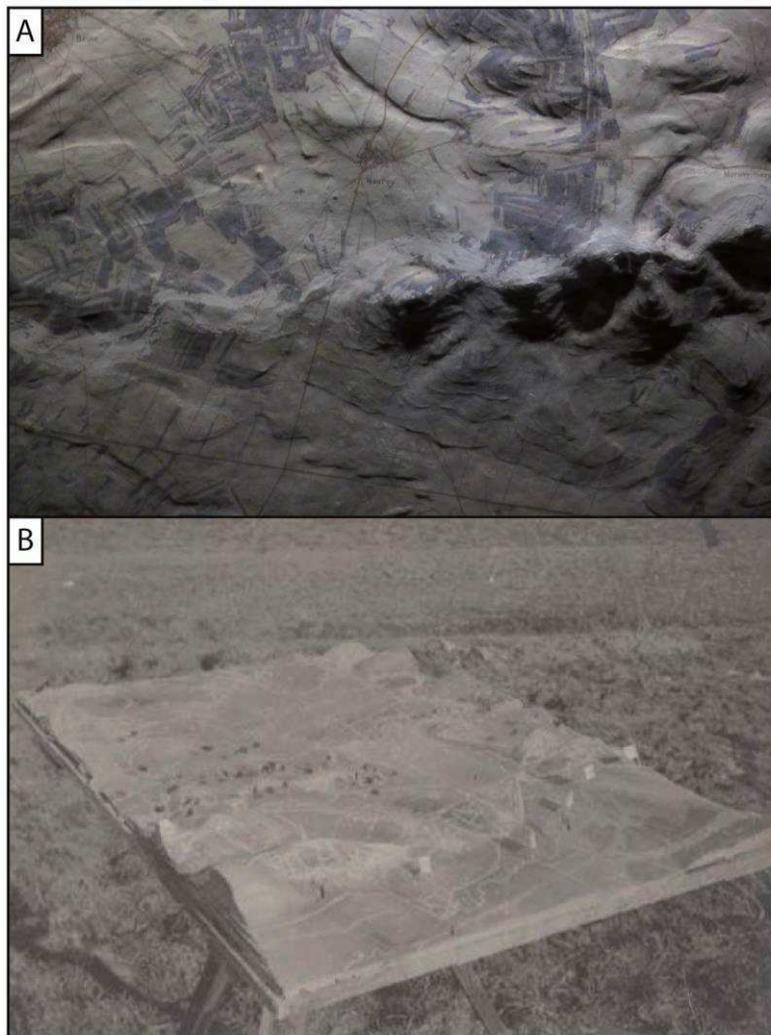


Fig.1.3: A - Extrait du plan-relief du secteur de Beine, Nauroy et Moronvilliers (Photo : Devos A., Musée de la Grande Guerre de Meaux). B – Plan-relief de la région de Cernay-en-Dormois sur la zone de front (Source : BDIC VAL 111/040).

1.3. Des innovations cartographiques

1.3.1. La projection

La constitution des plans directeurs a nécessité une coordination de tous les documents cartographiques et topographiques existants (GQGA-EM, 1917a). Or ces cartes-sources peuvent être dans des systèmes de projection divers. Pour l'exécution des plans directeurs, le Général Bourgeois, directeur du SGA, décide que les plans doivent être réalisés dans un unique système de coordonnées.

Il demande, dès avril 1915, aux GCTA leur avis sur le choix de la projection à adopter pour l'ensemble du front. La projection utilisée était celle de Bonne mais s'avère être non conforme, conservant seulement les surfaces, mais inutile pour un tir d'artillerie. Des calculs réalisés près de Saint-Dié des Vosges montrent un décalage de 17 m pour une distance de tir de 10 000 m. La proposition du GCTA de la 1^{ère} Armée consistant à adopter la projection conforme dite de Lambert est retenue et, par décision du 18 juin 1915, le système de projection Lambert zone Nord de Guerre est adopté. Cette projection a l'avantage de conserver les longueurs et les angles, deux paramètres nécessaires pour les tirs de l'artillerie. Par ailleurs, cette projection permet de représenter tout le front occidental (France – Belgique – Allemagne) avec une faible distorsion (GQGA-EM, 1916). En 1916, la projection de Bonne de la carte d'État-Major est toujours conservée par certaines Armées (détachement de l'Armée de Belgique) mais est vouée à disparaître, compte-tenu des déformations angulaires non négligeables entraînant des tirs à longue portée imprécis dans l'Allemagne occidentale (GQGA-EM, 1916). A la fin de la guerre, tous les plans sont réalisés avec la projection Lambert (GQGA-EM, 1917a, Combaud *et al.*, 2016).

La projection Lambert zone Nord de Guerre est conique et conforme avec une faible distorsion vers l'est, en adéquation avec un souhait de progression des armées dans cette direction. A l'inverse, l'augmentation des déformations corrélativement à l'éloignement du parallèle de référence est plus forte mais reste faible, vu que la zone de guerre s'inscrit dans la zone 1 du Lambert NTF. Son origine est située proche de la ville de Trêves en Allemagne, à l'intersection du méridien 6 gr E du méridien de référence, soit le méridien de Paris, et du parallèle 55 gr N. Pour limiter les erreurs, le cône sécant suivant les parallèles 53 gr N et 57 gr N est choisi (SGA, 1936). Enfin, pour éviter les coordonnées négatives par rapport au front de l'époque, dans un premier temps 500 km ont été ajoutés aux abscisses et 300 km aux ordonnées, dans un secteur situé à l'est de la longitude 1,5 gr E (Fig. 1.4). Pour cette zone, une première table de correspondance est réalisée. Puis, du fait du déplacement du front à l'ouest de cette première limite occidentale, 100 kilomètres supplémentaires sont ajoutés entre les longitudes 2,4 gr W et 1,5 gr E (Fig. 1.4). Une deuxième table de correspondance est alors effectuée spécifiquement pour cette zone (SGA, 1936).

Des flèches de direction du Nord géographique et du Nord magnétique sont figurées (Fig. 1.4). L'orle de la carte suit le Nord géographique, induisant un angle avec le carroyage du système de projection Lambert. Cette convergence de 2,11 gr n'est pas toujours figurée. La déclinaison, angle entre le Nord géographique et le Nord magnétique, est indiquée en grades et peut être représentée plusieurs fois sur une carte.

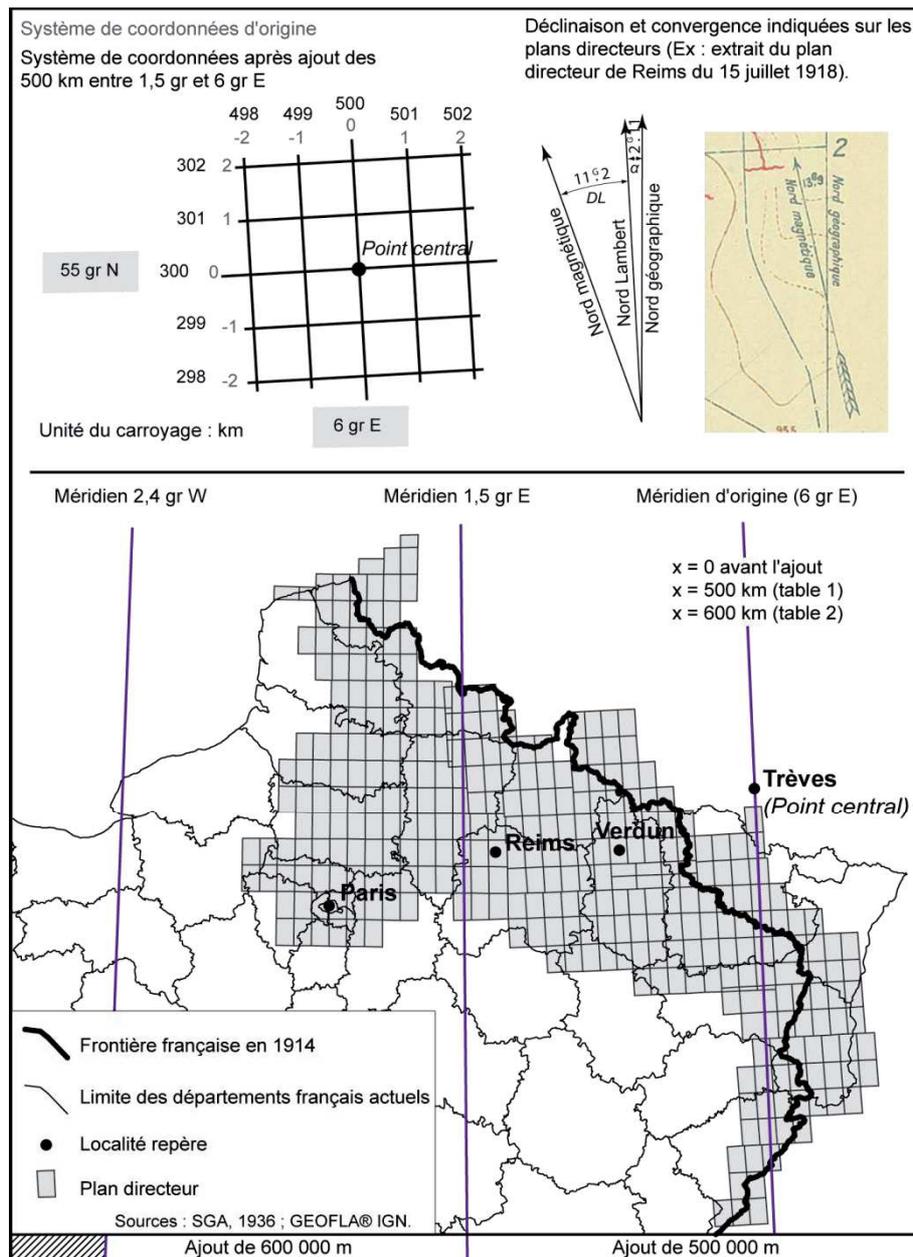


Fig.1.4: Tableau d'assemblage des plans directeurs et explication du système de coordonnées (extrait du plan directeur de Reims – 15 juillet 1918 ; SGA, 1936, Combaud et al., 2016)

1.3.2. Les coordonnées géographiques

Toutes les cartes doivent être quadrillées kilométriquement avec le même quadrillage que les planchettes et autres documents fournis à l'Artillerie. Ce carroyage kilométrique est tracé parallèlement au méridien et au parallèle d'origine (GQGA-EM, 1916). Les coordonnées kilométriques des lignes du carroyage figurent en chiffres arabes à l'extérieur de l'orle de manière très apparente (GQGA-EM, 1917a). Les coordonnées des quatre coins de l'orle sont parfois renseignées dans un système géographique.

Pour éviter de surcharger le document, les coordonnées d'un point sur un plan directeur sont à 4 chiffres dont les deux premiers définissent l'abscisse et les deux derniers l'ordonnée en hectomètres. Pour déterminer ces deux couples de valeurs, seul le dernier chiffre kilométrique de la maille considérée (en gras et de plus grande police de caractère, ex : $x=271$

et $y=301$) suivi de sa valeur hectométrique (valeur après la virgule) sont pris en compte (Fig. 1.5). Ainsi un objet (Ex : point B) situé à 851 m à l'est de la coordonnée $x=271$ et à 625 m au nord de la coordonnée $y=301$, aura les coordonnées **1816** (d'après GQGA-EM, 1916 ; 1917a ; Bouchon, 1917 ; 1918). Chaque coordonnée a donc une résolution hectométrique. Si deux objectifs sont affectés du même numéro, la distinction se fait par un indice avec une lettre (Combaud *et al.*, 2016).

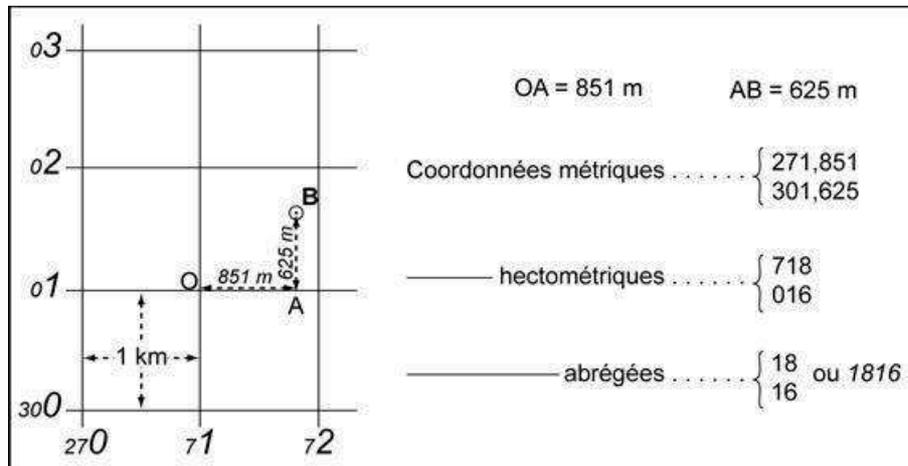


Fig.1.5: Détermination des coordonnées hectométriques d'un lieu sur un plan directeur (Ex : point B ; d'après GQGA-EM, 1916 ; 1917 ; Bouchon, 1917 ; 1918, Combaud *et al.*, 2016)

En principe, toutes les batteries ennemies et leurs épaulements correspondant à des emplacements possibles de batteries reçoivent un numéro en coordonnées hectométriques. Dans les secteurs où un grand nombre d'épaulements actifs ou préparés à l'avance sont visibles, seules les batteries reconnues récemment en action sont numérotées. De même, il est nécessaire d'attribuer un numéro aux batteries existantes, mais dont les positions précises sont encore inconnues. Ce numéro leur reste affecté jusqu'au moment où le GCTA a déterminé les coordonnées. Il peut alors être modifié après accord avec le SGA qui signale aussitôt cette modification aux unités d'Artillerie intéressées (GQGA-EM, 1917a). Les batteries ennemies ne sont pas les seuls objectifs d'artillerie à recevoir des coordonnées hectométriques. Les nœuds ferroviaires proches du front et pouvant être atteints par l'Artillerie reçoivent également des coordonnées, ainsi que les nœuds de tranchées, croisements importants entre une tranchée et un boyau de communication (Fig. 1.6).

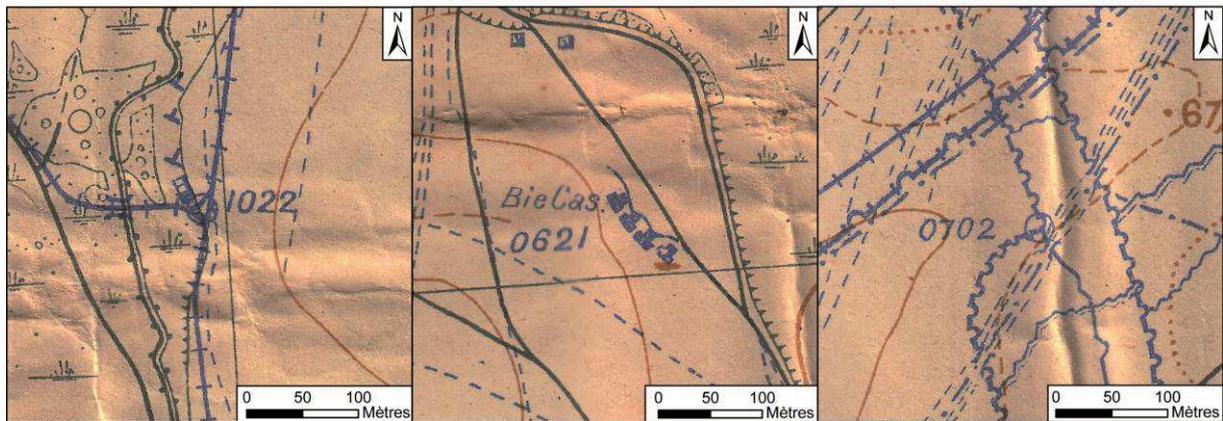


Fig.1.6: Objectifs d'artillerie de nœud ferroviaire (1022), de batterie casematée (0621) et de nœud de tranchées (0702), extrait du plan directeur de Berry-au-Bac du 26 mars 1917.

1.4. La construction des plans directeurs

Dès le 10 novembre 1914, une première instruction de l'établissement des plans directeurs paraît, tenant compte de la nécessité d'aboutir rapidement (GQGA, 1915). Tout d'abord, un effort considérable est porté sur la constitution du canevas d'ensemble. En effet, le réseau de triangulation général n'est pas assez dense et la réfection du réseau géodésique n'a pas encore eu lieu dans la totalité du secteur du front (SGA, 1936). Ainsi, ce réseau doit être resserré sur tout le front, soit plus de 750 km, avec une position des repères précise à un ou deux mètres. Pour obtenir cette précision, des méthodes de géodésie sont utilisées, avec des levés par théodolite des points géodésiques. Cette phase de terrain, périlleuse, est néanmoins nécessaire pour constituer ou compléter le canevas d'ensemble (GQGA-EM, 1917a). Elle est d'autant plus longue que les exemplaires des seuls plans à grande échelle, le cadastre, sur lesquels figurent les éléments primordiaux servant de repère, se trouvent en territoire ennemi (Lévy, 1926). Les vérifications des différentes mesures et la détermination des coordonnées rectangulaires de chaque signal sont réalisées par la méthode dite du point approché. Cette méthode, auparavant utilisée par le service hydrographique pour la triangulation des côtes (SGA, 1936), est apportée par les ingénieurs des services hydrographiques de la Marine recrutés dans les GCTA. Cette première phase de terrain est complétée par des cheminements au tachéomètre dès la fin de 1915. Durant l'année 1915, la guerre se stabilisant, les GCTA perfectionnent leurs travaux et se consacrent à la réalisation des plans directeurs (GQGA-EM, 1917a) mais la cartographie des organisations alliées nécessite des opérations topographiques en continu (GQG, 1915).

Les pièces directrices des batteries, les repères de position et les objectifs doivent aussi être levés de manière précise. Après de nombreuses tentatives au sein des Armées, les procédés recommandés pour la cartographie des objectifs sont au nombre de trois (GQGA, 1915 ; SGA, 1936) :

- en observation direct avec des dessins et des croquis perspectifs
- par photographies aériennes
- par interrogatoires de prisonniers.

1.4.1. Des levés en temps de guerre

L'observation géodésique directe par dessin ou croquis perspectif n'est pas comme certains pouvaient le penser, un travail d'art de paysagiste dépendant de l'habileté du dessinateur. Avant le premier conflit mondial, l'armée française utilise les croquis perspectifs pour comprendre et tirer les leçons de la défaite de 1870. Certains cours de tactique sont par conséquent illustrés par des cartes mais également par des dessins et croquis (Dosse, 1913). Ces derniers ne sont donc pas une invention pour la Grande Guerre.

Ces documents militaires clairs et nets permettent à l'État-Major de comprendre et de mettre en évidence l'importance d'une position, d'un site. Ils ont l'avantage d'imaginer rapidement et intuitivement le contexte et l'organisation topographique du secteur. De son site d'observation, le dessinateur doit représenter le terrain tel qu'il apparaît à ses yeux pour donner une vue d'ensemble de la position, en faisant ressortir les zones surveillées de celles qui échappent à la surveillance. Ces croquis ou dessins perspectifs peuvent être réalisés à différents endroits du front, soit près du no man's land (croquis à vues rapprochées), soit éloignés du front (croquis à vues éloignées).

Dans les premières lignes, le dessinateur ne peut pas se munir d'un matériel lourd et encombrant. Il utilise alors un double décimètre, une feuille de papier et un crayon. Il reporte alors sur sa feuille, chaque mesure réalisée à l'aide de sa règle graduée qu'il porte à bout de bras. Cette distance œil-règle doit être invariable pendant la réalisation du dessin. L'astuce est d'attacher à la règle une cordelette à un bouton de chemise pour garder la même longueur pendant toute la durée de l'opération (Philippot, 1918). Ces dessins sont accompagnés d'un rapport explicatif du site pour donner un maximum d'informations à l'État-Major (Fig. 1.7).



Fig.1.7: Réalisation d'un relevé topographique avec une planchette topographique près de Regniéville-en-Haye en Avril 1917 (Source : BDIC VAL 167/018)

Les croquis à vues éloignées permettent à l'observateur d'observer un plan panoramique du paysage, sans la dangerosité du croquis à vues rapprochés dans les premières lignes sous le

feu ennemi. Aussi habile que soit l'artiste qui réalise le panorama d'un paysage, il comporte des erreurs inévitablement. Or, ces croquis doivent être les plus précis possibles pour être réutilisables par l'État-Major. Le matériel utilisé est une planchette ordinaire de levés topographiques qui peut-être rétractable pour faciliter son transport. L'opérateur doit pouvoir transporter la planchette et un tabouret pliant pour son confort. Le croquis peut être réalisé debout mais il est de préférence réalisé en position assise. L'opérateur pourra également transporter et adapter à la planchette une jumelle à graduation micrométrique pour le grossissement des vues lointaines. Une fois montée, la planchette se compose d'une planche accueillant les quatre pieds à coulisse. Devant l'opérateur, le paysage est quadrillé en carreaux de 20 cm par 20 cm et un œilleton est utilisé pour la visée. Enfin, la feuille de papier est posée sur la table afin d'y apposer annotations et relevés topographiques (Philippot, 1918).

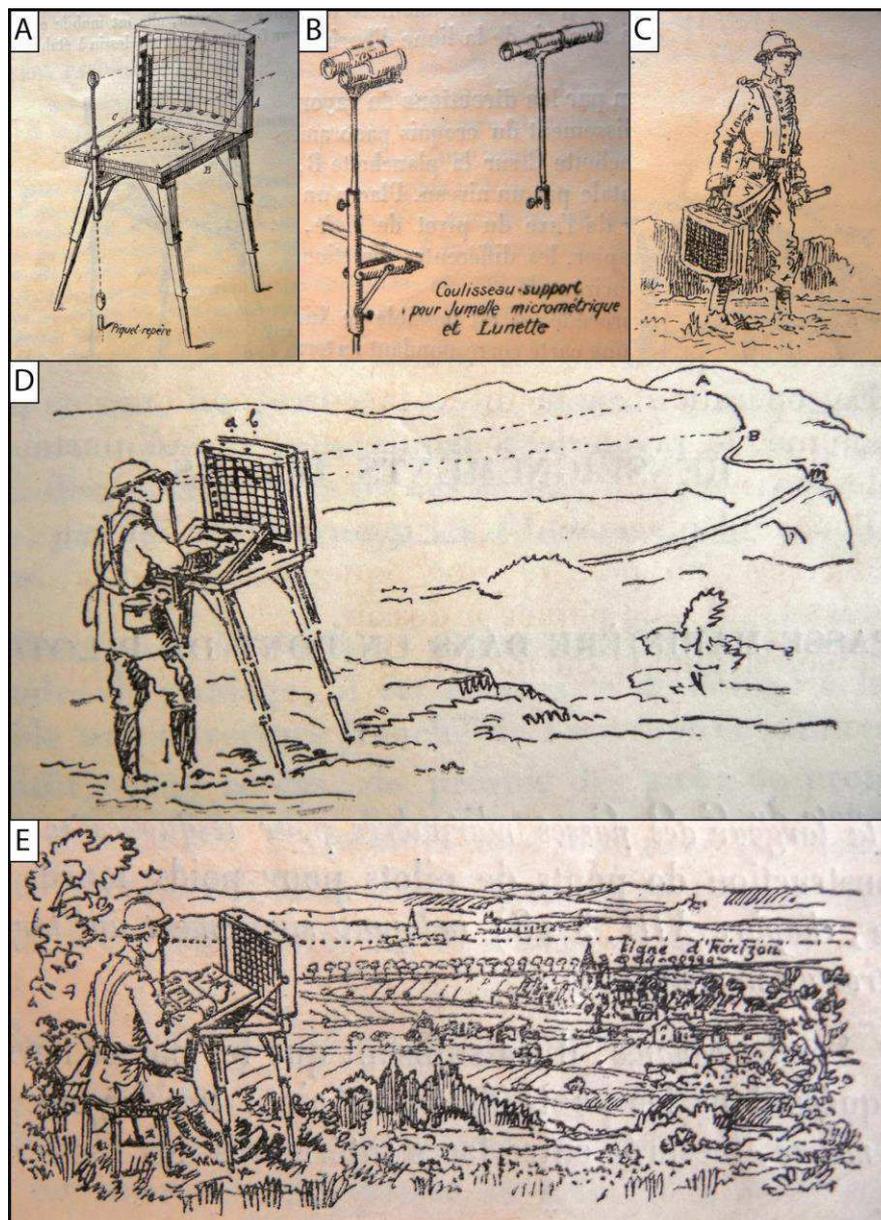


Fig.1.8: A – Planchette pour la réalisation de croquis perspectifs. B – Jumelle à graduation micrométrique. C – Transport de la planchette par un topographe. D – Réalisation d'un croquis perspectif en position debout. E - Réalisation d'un croquis perspectif en position assise (Source : Philippot, 1918).

Après l'installation confortable de l'opérateur, celui-ci doit examiner le paysage attentivement pour ignorer les détails inutiles et dégager les lignes caractéristiques, points géodésiques et remarquables de la zone d'étude. Des arbres ou maisons isolés, des clochers d'église, des croisements de chemins sont les premières annotations à apporter au dessin, assez régulièrement espacés (Fig. 1.9A). Le quadrillage aide nettement le report de ces points sur le croquis. Ensuite, il doit placer, parmi les grandes lignes de relief, celles qui structurent le paysage, à savoir les lignes de force correspondant à la ligne d'horizon et aux principales lignes de crête et talweg (Fig. 1.9B). Ensuite, le croquis est habillé de quelques détails ainsi que par les lignes de relief secondaires (Fig. 1.9C). Il doit également repérer les points invisibles intéressants masqués par une crête. Enfin, l'opérateur apporte au dessin les différentes textures et ombrages, d'autant plus accentués que l'objet est proche. Il dépose les toponymes et coordonnées géographiques ainsi que les structures de défense en couleurs (tranchées et boyaux). Les noms et numéros ne doivent pas surcharger le dessin et sont intégrés dans la partie supérieure du croquis, d'autant plus basse que l'objet est proche (Fig. 1.9D). Enfin, le croquis est désigné par un toponyme (exemple : *entre Nannincourt et Bligny*) accompagné des coordonnées géographiques de l'endroit de la réalisation du croquis (OAA, 1918).

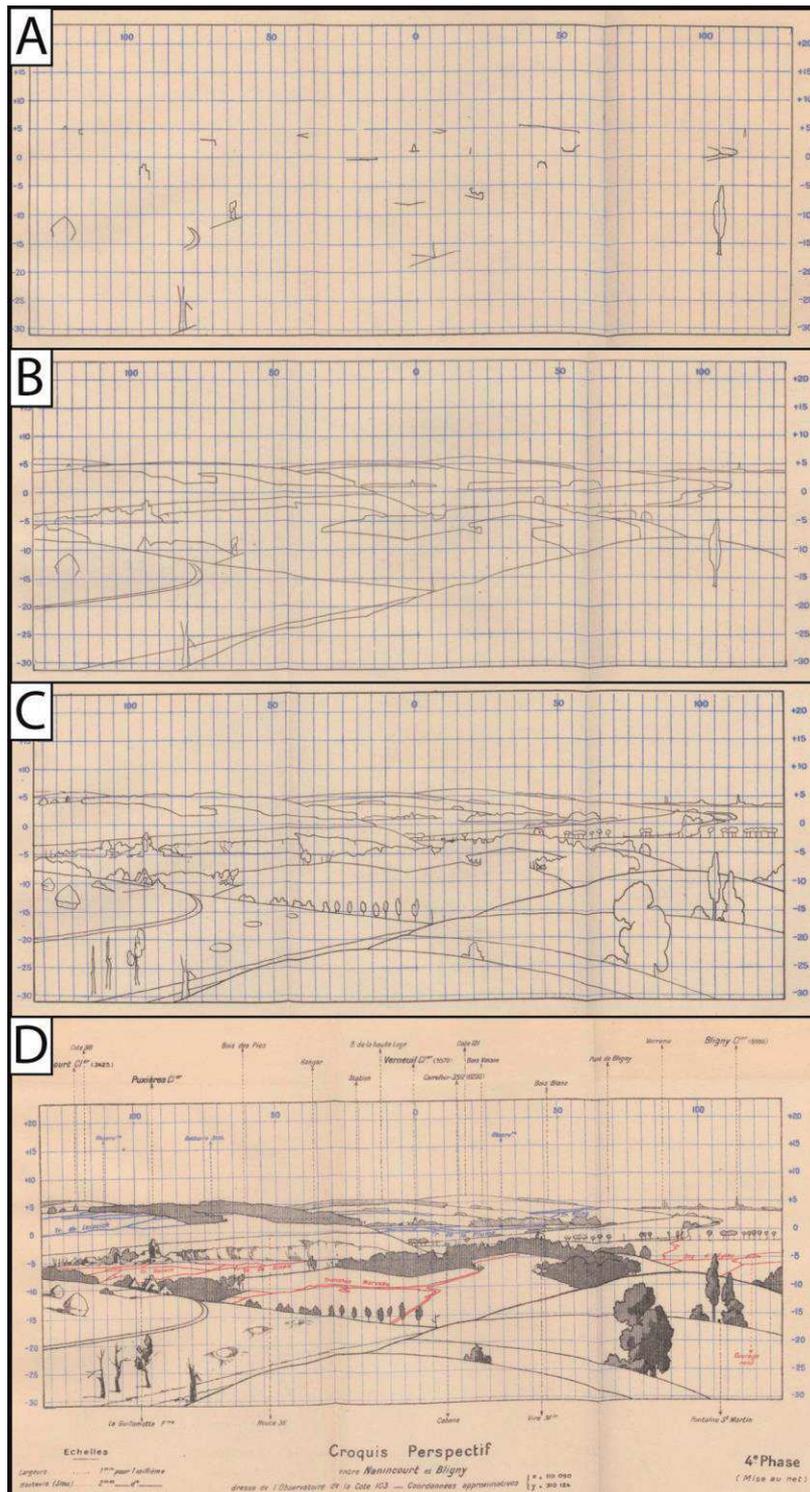


Fig.1.9: Les différentes phases de construction du croquis perspectif (Source : OAA, 1918)

Ces croquis perspectifs sont réalisés par le SROT. Ce service est épaulé par le Service de Renseignements par le Son (SRS). Ils vont également déterminer avec la plus grande précision l'emplacement des batteries d'artillerie ennemies. Au minimum, deux observateurs tentent de relever l'angle formé entre un point géodésique commun (église, arbre isolé...) et la lueur du canon ennemi. Le report des angles formés entre la lueur et le point géodésique en commun sur une carte permet de déterminer l'emplacement de la batterie d'artillerie ennemie. De plus, le SRS peut repérer l'emplacement d'une pièce d'artillerie en se basant sur le son

produit au départ du coup, enregistré par des postes d'écoute (réseau de microphones) préalablement géoréférencés sur le plan directeur. Ce système de localisation utilisant les lois de propagation des ondes sonores, inféodée aux conditions météorologiques (vent, pluie, hygrométrie...) et aux types de projectiles utilisés par l'ennemi, a lourdement contribué au développement de l'étude des dynamiques des ondes dans le domaine militaire.

1.4.2. La photographie aérienne

Depuis la fin du XVIII^{ème} siècle et le vol des premiers ballons, mais surtout durant le XIX^{ème} siècle, des progrès considérables ont été réalisés dans le domaine des airs. Les vols de Henry Farman et la traversée de la Manche de Louis Blériot le 25 juillet 1909 finissent par convaincre l'armée française de se lancer dans un vaste programme d'acquisition et de modernisation d'appareils. Cette volonté se concrétise par la création du Service du Matériel Aéronautique Militaire à Chalais-Meudon, le 19 avril 1910, dirigé par le commandant Bouttieux. L'aviation travaille alors en relation avec le Génie et l'Artillerie notamment dans le réglage des tirs des canons de 75. En septembre 1910, des études sont menées sur la réalisation de photographies dans des appareils « plus lourds que l'air » mais sans volonté de poursuivre les recherches. Ces avancées dans l'aviation s'accompagnent également de progrès dans l'observation et dans les photographies aériennes. Depuis Nadar en 1858, par la première vue aérienne, les techniques se sont développées jusqu'à la naissance de la photographie aérienne en 1909 avec les frères Whright. Une prise de vue à bord d'un avion au-dessus du site de Centocelle est réalisée à Rome le 24 avril 1909 par Wilbur Whright. De plus, la technique de prise de vue s'accompagne du développement rapide des plaques photographiques. Avant-guerre, l'armée française se dote petit à petit d'avions de reconnaissance et d'appareils photographiques sans penser qu'ils vont jouer un rôle très important durant la Grande Guerre.

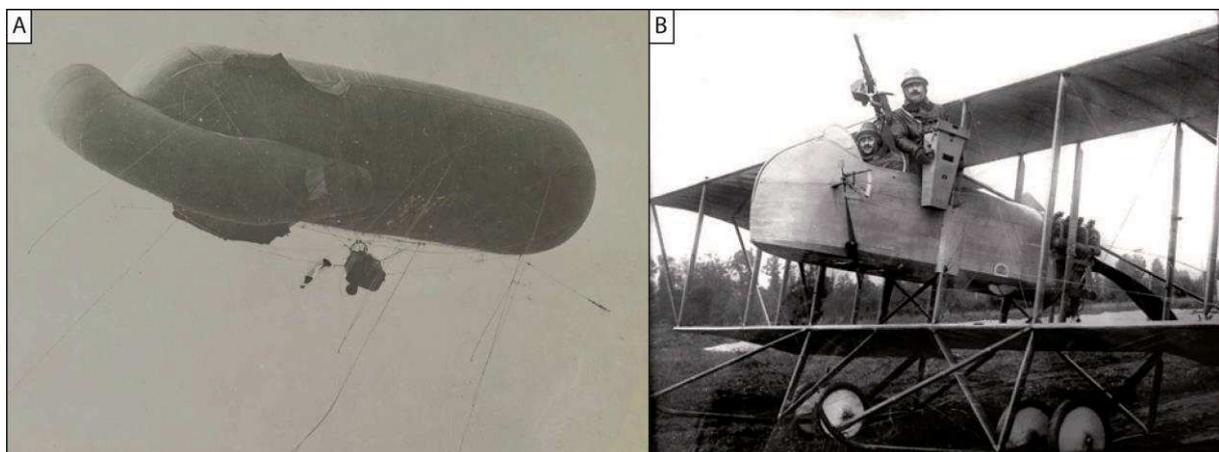


Fig.1.10: A – Ballon captif gonflé à l'hélium à Bellemagny en 1916 (Source BDIC : VAL 321/098). B – Avion de reconnaissance Brault MF 11 équipé d'un appareil photographique et d'une mitrailleuse (Source : Photo de Marie Yvonne Bigeon-Gatelet).

L'aéronautique militaire regroupe l'aérostation « plus léger que l'air » (ballon captif, cerf-volant) et l'aviation « plus lourd que l'air » (avion) et va participer à l'observation du front. Quand la guerre est déclarée, l'armée française peut compter sur 138 avions de reconnaissance contre 230 appareils pour l'armée allemande (sur deux fronts). Dès le 17 novembre 1914, une note du Général en chef demande une étroite relation entre les services aéronautiques et les Groupes de Canevas de Tirs. En 1915, les premiers avions de combat seront fabriqués et vont s'illustrer pendant la bataille de Verdun en 1916 où l'aviation

allemande va détruire de nombreux avions de reconnaissance et des ballons captifs français. L'observation aérienne est réalisée à partir des aérostats et ballons captifs (aérostation) à environ 1000 m d'altitude (Fig. 1.10A). Leur emplacement doit permettre la bonne visibilité des réseaux de défenses ennemies à quelques kilomètres du front, près d'un aérodrome car il doit être défendu par des avions de combat. L'opérateur transmet en direct les informations par téléphone mais ces engins s'avèrent vulnérables aux attaques aériennes et aux accidents (gonflage à l'hydrogène). Alors que l'État-Major n'envisageait que des prises de vue à partir de ballons, la photographie aérienne va se développer de manière exponentielle, même si les premiers clichés sont pris de manière non officielle, par des pionniers convaincus de l'efficacité de la méthode. Les avions de reconnaissance, non munis d'armement, sont alors équipés d'appareils photographiques, notamment le Douhet-Zollinger, appareil donnant la possibilité de prendre 300 photographies, contre 12 pour les premiers appareils du début de guerre. En fonction de leur altitude de vol, les avions sont munis d'appareils photographiques d'une focale de 26 cm pour les vues d'ensemble, de 50 cm pour des vols à moyenne altitude et de 120 cm pour une analyse précise du dispositif adverse à basse altitude (Fig. 1.10B). L'avantage est d'avoir une vue d'ensemble du dispositif de défense, parfois jusque 30 à 40 kilomètres dans la zone ennemie. De plus, la prise de vue régulière (oblique ou verticale) du même secteur permet une vision diachronique et l'analyse des travaux entrepris par l'ennemi (Stichelbaut, 2011). En août et septembre 1917, 5680 clichés furent pris pour une vision diachronique des secteurs du Mort-Homme et de la Cote 308 en Meuse (Lévy, 1926). Les photographies sont prises à haute altitude (4 000 m) pour une vue d'ensemble, ou à très basse altitude (150 m). Au début du conflit, les photographies aériennes sont trop précises par rapport aux cartes d'État-Major, les objectifs ne pouvant être reportés. Ces prises de vue aérienne vont alors participer à l'élaboration des plans directeurs. Le développement de l'aviation militaire s'accompagne forcément de la formation de pilotes. En 1916, les élèves sont envoyés en école préparatoire à Dijon, puis affectés selon leurs compétences. Ils rejoignent Pau (Pyrénées-Atlantiques) pour le pilotage, Avord (Cher) pour le bombardement et vol de nuit, Châteauroux (Indre) pour l'observation aérienne ou Cazaux (Gironde) pour les pilotes de chasse ou mitrailleurs. L'aviation participe donc à la prise de vue aérienne, aux combats sur l'aviation ennemie, aux bombardements, aux réglages des tirs de l'artillerie lourde à longue distance mais également à l'accompagnement de l'avancée de l'Infanterie lors d'attaques.



Fig.1.11: A – Atelier de photographie et séchage des tirages (Source : Carnet de Charles Hallo). B – Photographie aérienne oblique du secteur de Souain (Source : Collection personnelle).

Après chaque vol de reconnaissance, les photos sont tirées le plus rapidement possible et interprétées (Fig. 1.11A). C'est le début de la photo-interprétation de la zone de front pour repérer les dispositifs de défense ennemis, les travaux entrepris par les belligérants, l'efficacité des tirs de réglage et de destruction d'artillerie, ou les préparations d'une offensive ennemie (construction d'hôpitaux de campagne, de tranchées de première ligne, de pistes d'accès aux réseaux de défense, multiplication des batteries d'artillerie). Les opérateurs utilisent notamment la stéréoscopie. Le tirage et l'interprétation des photographies sont souvent réalisés près de l'aérodrome. Ces photographies renseignent sur le lieu de la prise de vue, la date et parfois l'altitude, et reçoivent des annotations sur la photo, l'interprétation des opérateurs (Fig. 1.11B). Elles sont ensuite transmises à l'État-Major et au SGA au plus vite. Le SGA peut alors construire ou améliorer les plans directeurs à partir des informations des photographies aériennes. La figure 1.12 compare le plan directeur et la photographie aérienne du secteur du fort de la Pompelle, près de Reims, où les structures de défense sont visibles sur les deux supports.

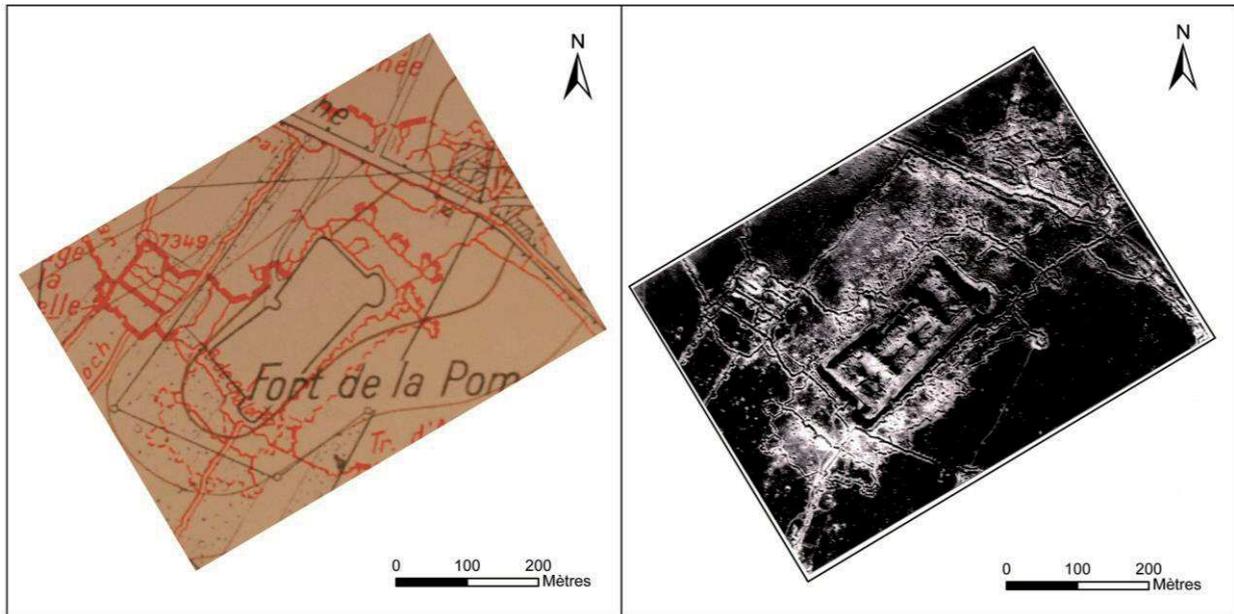


Fig.1.12: Comparaison d'un extrait de plan directeur de Reims en Juillet 1918 et de la photographie aérienne du secteur du fort de la Pompelle (collection Musée de la Pompelle, ville de Reims).

L'interprétation des photographies est facilitée ou dégradée selon différents critères :

- La date de la prise de vue :

Le plan de vol des missions aériennes est défini en fonction des données météorologiques. La lisibilité de la photographie dépend étroitement des conditions de vol. Un temps brumeux, nuageux ou de brouillard ne donnait pas autant de détails qu'en temps dégagé. En hiver, un sol recouvert de neige facilitait particulièrement le travail d'interprétation. En effet, le signal entre une tranchée fortement piétinée et le manteau neigeux intact environnant est saisissant. De plus, la canopée est absente et permet la visibilité des organisations défensives à travers la forêt. Cette observation est évidemment difficile, voire impossible, au printemps et en été pour les structures défensives sous couverture forestière.

- Le lieu de la prise de vue :

Sous forêt au printemps ou en été, l'interprétation est possible au niveau du no man's land car la végétation est hachée et déchiquetée, mais très difficile plus à l'arrière, où les arbres sont intacts et camouflent naturellement l'organisation défensive ennemie. Le rôle de la géologie pour l'interprétation des photographies aériennes est également primordial. Par exemple, en Champagne sèche, la blancheur de la craie des déblais contraste nettement avec un sol brun avoisinant et souligne le tracé des tranchées. Dans ces zones, l'augmentation accrue des volumes extraits (déblais et verses) témoignent d'importants travaux souterrains (creusement d'abris ou de tunnels, guerre souterraine). Ces derniers sont judicieusement utilisés, dissimulés ou camouflés pour ne pas éveiller de soupçons. Le travail interprétatif est plus compliqué dans des zones argileuses (Flandres, fond de vallée...) où le contraste est moins lisible et distinct.

Les États-Majors comprennent donc rapidement que leurs organisations de défense, d'artillerie ou de préparation d'attaque sont observées par les airs et la photographie aérienne. Il est donc nécessaire et essentiel de dissimuler (camouflage défensif), voire de leurrer l'ennemi (camouflage offensif), pour compliquer son travail interprétatif (Coutin, 2012). Des

positions fixes de batteries d'artillerie sont dissimulées avec du feuillage (Fig. 1.13A) ou semi-enterrées (Fig. 1.13B) alors que des canons installés sur rail de l'artillerie lourde sur voie ferrée (ALVF) sont camouflés avec un treillage, ancêtre du filet de camouflage actuel (Fig. 1.13C). D'importants travaux sont également réalisés sur les voies ferrées (Fig. 1.13D), routes (Fig. 1.13E) et ponts (Fig. 1.13F) en installant des claies végétales ou des treillages (parfois reportés sur les plans directeurs). Les soldats tentent d'occulter les déblais des tranchées en y semant de l'herbe ou de la moutarde (Crosnier de Varigny, 1915).

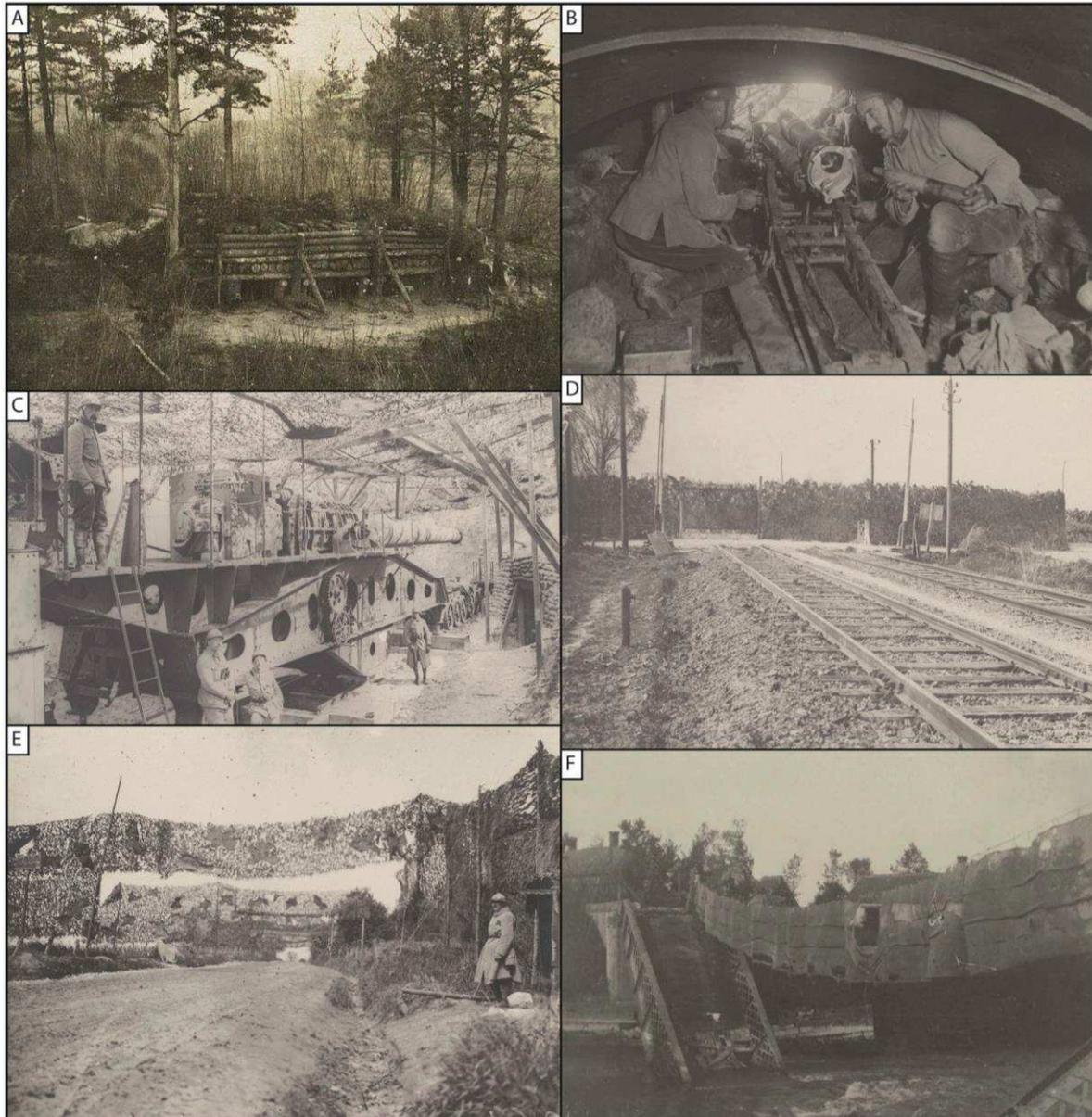


Fig.1.13: A – Abri camouflé d'artillerie dans le secteur d'Hermonville. B – Abri casematé d'un canon de 65 mm près de Vienne-le-Château en Argonne en 1916 (Source : BDIC VAL 130). C : Canon de 340 mm lourd sur voie ferrée camouflé à Châlons-sur-Vesle en 1917 (So Source : BDIC VAL 065). D – Voie ferrée masquée par une haie artificielle à Sept-Saulx en 1916 (Source : BDIC VAL 081). E – Route camouflée à Merfy en 1917 (Source : BDIC VAL 075). F – Pont camouflé sur la rivière Aisne à Pont-Arcy en 1917 (Source : BDIC VAL 018).

Pendant la Seconde Guerre Mondiale, l'opération « Fortitude » voulait tromper l'armée allemande par désinformation et diversion d'un débarquement en Norvège ou dans le Pas-de-Calais. L'une des activités était de leurrer l'ennemi par la création d'unités fantômes, de faux chars, faux canons ou faux avions. Cette diversion n'est pas une invention de la Seconde Guerre Mondiale car déjà, durant la Grande Guerre, les deux armées se leurrent en installant de fausses installations. Fabriqués en bois, des chars (Fig. 1.14A), des canons (Fig. 1.14B), des avions dans de faux camps d'aviation (Fig. 1.14C) ou des voies ferrées (Fig. 1.14D) sont disposés afin que l'ennemi les détecte et tente de détruire des objectifs factices, révélant ainsi sa position d'artillerie. D'ailleurs, la fabrique la plus connue durant le conflit se situe à Châlons-en-Champagne (anciennement Châlons-sur-Marne) dans le cirque de la ville (Fig. 1.14E). Pour compliquer et embrouiller l'interprétation des photographies aériennes, l'État-Major demande également de construire des tranchées qui ne seront pas utilisées par l'Infanterie. Ces « fausses tranchées » vont noyer le véritable dispositif de défense, afin de contraindre l'ennemi à ne pas savoir où sont réellement les soldats de l'Infanterie dans ce dédale de tranchées. De plus, lorsque le terrain le permet, des tunnels sont creusés pour rejoindre des tranchées entre elles, absolument invisibles, sauf si le traitement des versées est mal effectué et décelé par l'étude des photographies aériennes.



Fig.1. 14: A – Char d’assaut en bois à Pontfaverger en 1918 (Source : BDIC VAL 078/099). B – Faux canons de bois de 155 mm près de la ferme des Wacques à Souain en 1916 (Source : ECPAD). C : Faux camp d’aviation et avion factice en bois à Lunéville en 1916 (Source : BDIC VAL 150/006). D – Fausse ligne de chemin de fer en bois à Chenay en 1917 (Source : BDIC VAL 065/165). E – Atelier de camouflage militaire dans le cirque de Châlons-sur-Marne en 1916 (Source : BDIC VAL 090/115).

1.4.3. Les interrogatoires de prisonniers

La capture de prisonniers lors de grandes attaques ou de petits coups de main par irruption rapide dans les lignes ennemies permet à l’État-Major de compléter les plans directeurs. Pendant le conflit, l’armée française capture 400 000 soldats allemands (Verchot, 2013), alors

que 600 000 français sont détenus en Allemagne. Très rapidement après leur capture, les prisonniers subissent des interrogatoires par des officiers du renseignement (Fig. 1.15A). Les questions sont multiples et abordent dans un premier temps l'identité du prisonnier et son histoire dans son régiment. Elles portent également sur les intentions d'attaque, sur la vie de tranchées (nourriture, santé, ravitaillement, relève, lumière), sur l'emplacement de leur armement (mitrailleuse, Artillerie), sur l'organisation de leur défense (abris, protection au gaz), sur le moral des troupes. Certains interrogatoires sont menés devant un plan directeur pour corroborer les informations du prisonnier sur la carte (Fig. 1.15B). Les toponymes allemands retrouvés sur les plans directeurs, notamment des camps de repos, proviennent assurément d'interrogatoires de prisonniers.

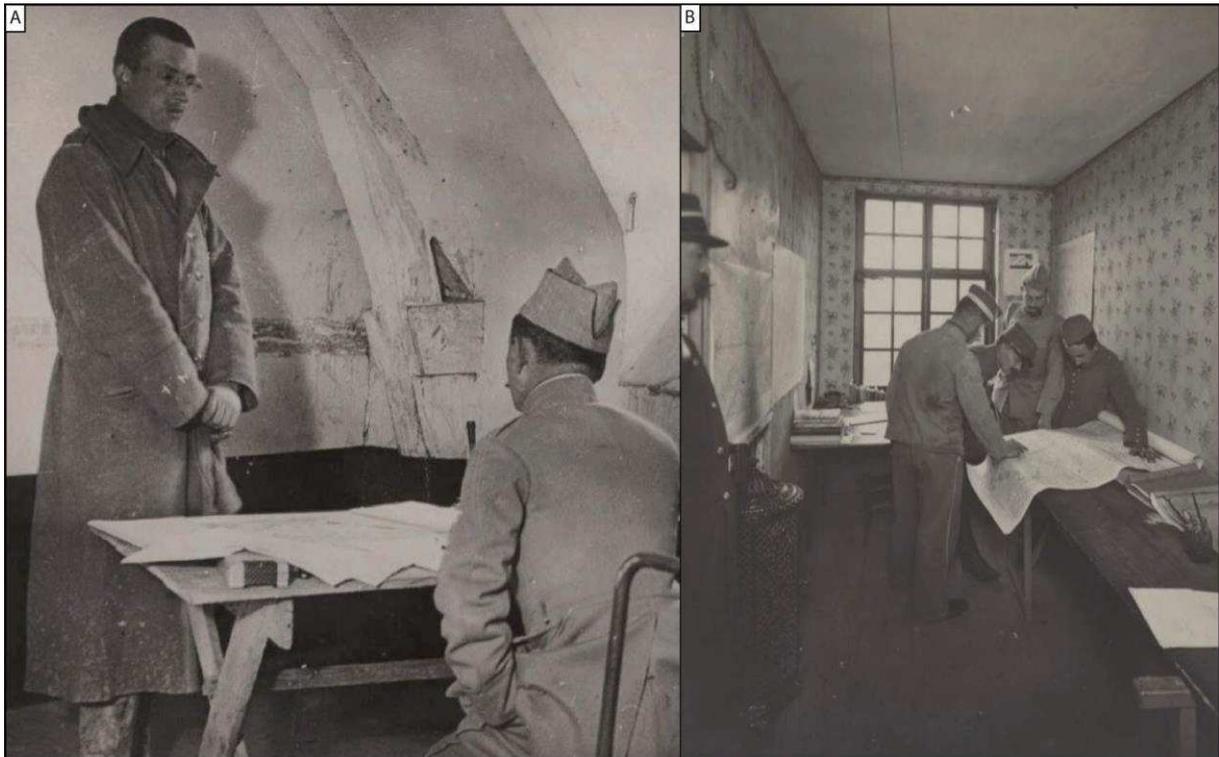


Fig.1.15: A - Photographie d'interrogatoire d'un officier allemand à Clermont-en-Argonne en Avril 1918 (Source BDIC : VAL 275/082). B – Photographie d'interrogatoire de prisonnier devant un plan directeur à Roesbrugge en novembre 1915 (Source BDIC : VAL 498/108).

1.5. Présentation des plans directeurs

1.5.1. Planimétrie et cartographie

Le croisement des croquis et dessins perspectifs, des photographies aériennes et des interrogatoires permet donc la production des plans directeurs par le SGA. Ces documents papiers sont en constante évolution. Il faut renseigner les dernières observations aériennes, interrogatoires de prisonniers ou constatations des espions pour mettre à jour les plans. Ce travail de jour comme de nuit sera ininterrompu pendant les quatre années du conflit.

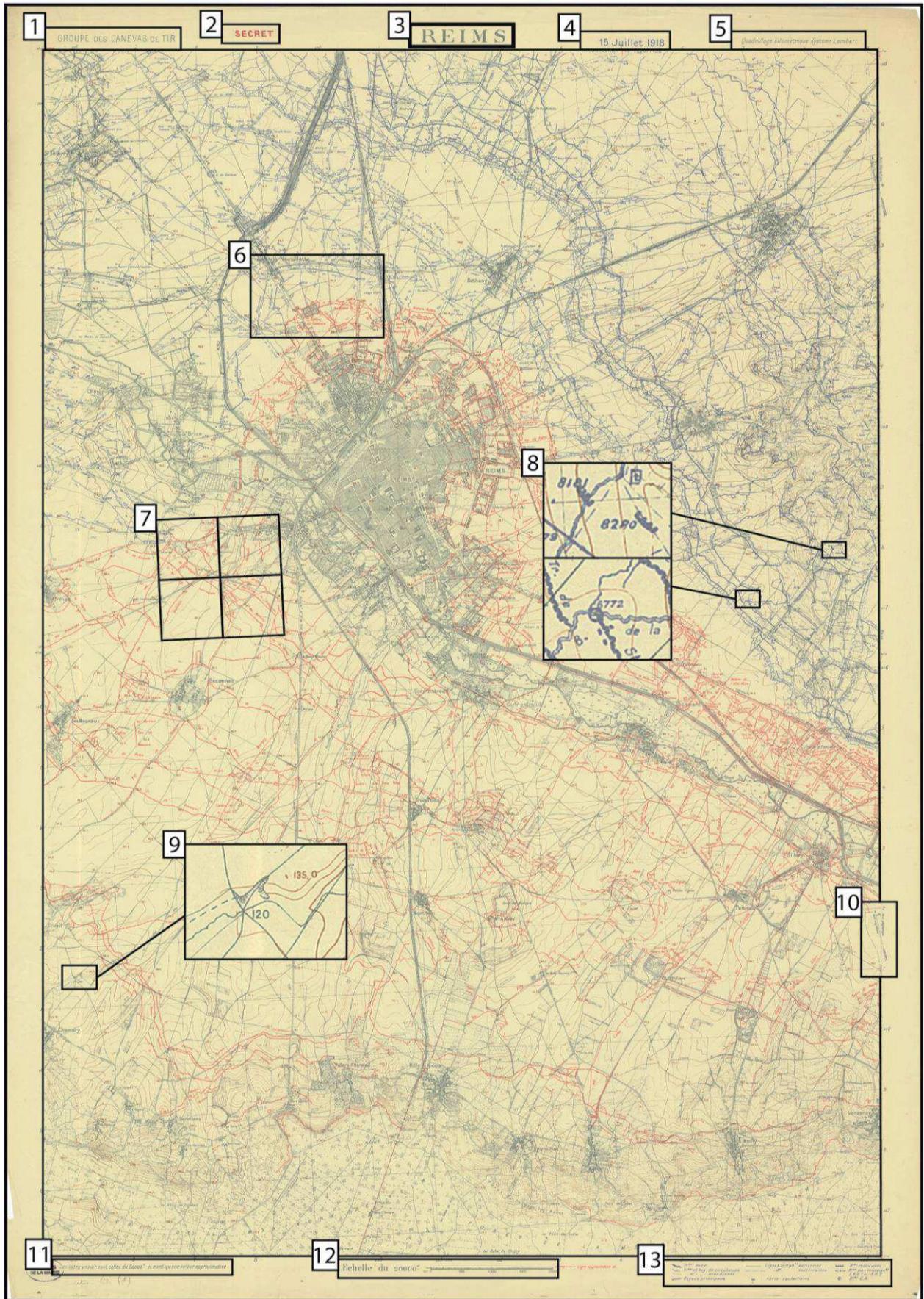


Fig.1.16: Plan directeur de Reims du 15 juillet 1918.

La dimension des feuilles ne doit pas dépasser 1,02m x 0,70m (format grand-aigle) pour les plans directeurs au 1/20 000 et 1/10 000 et 0,70m x 0,50m pour les plans au 1/5 000. Pour faciliter leur lecture et leur compréhension, ils sont présentés de manière similaire (Fig. 1.16) :

Les plans directeurs sont réalisés par les Groupes de Canevas de Tirs des Armées (GCTA). Cette indication est mentionnée sur chaque plan (Fig. 1.16), mais le numéro de l'armée ne doit pas y figurer [1].

Les plans directeurs sont des documents classés «Secret Défense». En aucun cas, ils ne doivent être récupérés par l'ennemi. Il est recommandé de les brûler en cas de reddition et d'obsolescence. La prise par l'ennemi d'un plan lui fournirait des informations sur ce qui est connu dans son dispositif. De plus, cela fournirait des renseignements précieux sur la topographie du secteur (contour des bois, route, chemin) qui aiderait l'ennemi dans de futures attaques ou dans le réglage de ses tirs d'artillerie [2].

Chaque feuille porte un titre [3]; ce titre est un nom de lieu (ville, village, bois, lieu-dit) se rapportant, en principe, à l'endroit le plus important de la région cartographiée.

La date mentionnée [4] est celle à laquelle remontent les derniers renseignements exploités pour l'établissement du plan. Une seconde date est indiquée et correspond à l'édition précédente.

La projection adoptée est rappelée sur chaque plan [5] ; la projection Lambert avec laquelle on peut représenter toute la zone de front (France, Belgique, Allemagne) sans déformation sensible, soit sur les angles ou les longueurs.

Les dispositifs défensifs (tranchées, boyaux, abris), offensifs (batteries d'artillerie) et logistiques (pistes, gares, chemins de fer, campements...) sont représentés sur la carte [6]. Les dispositifs français sont moins renseignés pour ne pas divulguer trop d'informations si la carte était prise par l'ennemi.

Les plans aux diverses échelles portent un quadrillage kilométrique, établi dans le système de projection Lambert [7]. Ces quadrillages reçoivent un numéro apparent à l'extérieur de l'orle et participent à la dénomination d'objectif.

Toutes les batteries ennemies et tous les épaulements probables de batteries reçoivent un numéro en coordonnées hectométriques à 4 chiffres [8]. Les points importants des parallèles et boyaux (croisement) sont également désignés par des numéros à 4 chiffres.

Le relief est représenté en courbes de niveau (en couleur bistre) dont l'équidistance est de 10 m sur le 1/20 000, et de 5 m pour le 1/10 000 et le 1/5 000 [9]. Les courbes sont renforcées de 50 à 50 mètres (courbes maîtresses). L'équidistance est modifiable selon l'énergie des reliefs.

Des flèches de direction du Nord géographique et du Nord magnétique sont figurées avec l'indication de la valeur de la déclinaison [10].

De couleur noire, les cotes d'altitude de la carte d'État-Major sont reportées, même si elles sont reconnues comme erronées avec une valeur d'altitude approximative [11]. Cette indication est cependant utile pour la désignation de lieux relatifs à l'altitude du terrain. En bistre, de nouvelles cotes d'altitude sont reportées d'après les derniers calculs sur le terrain avec une résolution métrique, voire décimétrique. Les noms et appellations du paysage sont multipliés au maximum. Tous les éléments importants (bois, relief, vallée...) reçoivent un

nom, notamment dans les lignes ennemies. Lorsque les bois sont trop petits et nombreux, un numéro à deux chiffres ou une lettre et deux chiffres leur est attribué. Ces toponymes viennent du cadastre, de la carte d'État-Major mais peuvent être également arbitraires.

Les échelles numériques et graphiques sont indiquées sous le plan directeur [12].

Une légende se situe dans le coin droit du plan, volontairement incomplète car le document risque de tomber dans les mains de l'ennemi [13].

Les plans directeurs présentent plusieurs variantes. En effet, les GCTA s'adaptent à la demande et génèrent des séries de cartes en fonction des utilisations par les États-Majors. Par ailleurs, compte tenu du contexte de guerre, et donc du secret associé, les plans directeurs ordinaires positionnant uniquement les organisations ennemies sont à distinguer des plans avec les organisations françaises (GQGA-EM, 1917a). La défense alliée est simplement matérialisée par une ligne continue pour le plan directeur ordinaire (Fig. 1.17A) alors que l'ensemble des dispositifs alliés et ennemis est dessiné pour le plan directeur avec organisations alliées (Fig. 1.17B).

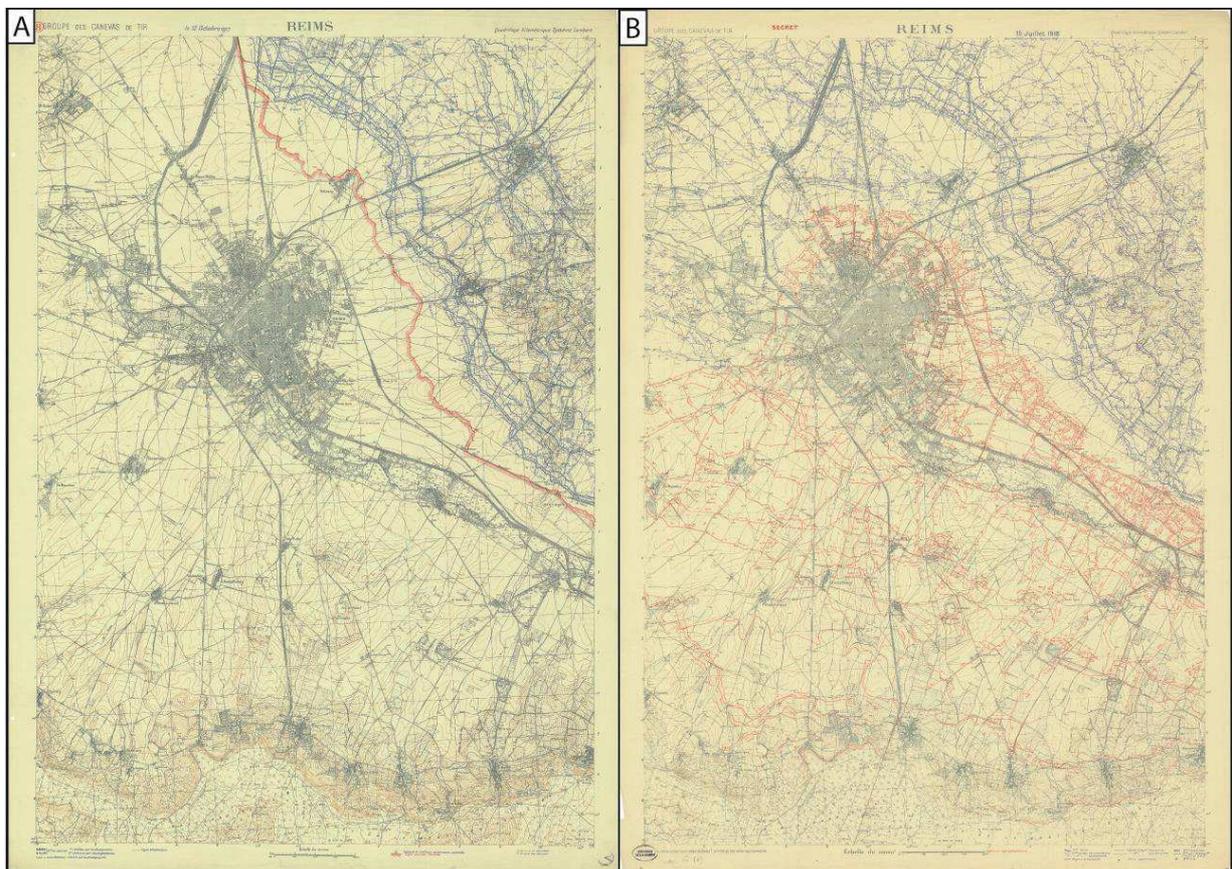


Fig.1.17: A - Plan directeur ordinaire au 1/20 000 de Reims du 12/10/1917. B – Plan directeur avec organisations alliées au 1/20 000 de Reims du 15/07/1918.

1.5.2. Des échelles adaptées pour différents usages.

Sur ce front nouveau, en constante évolution, le travail doit être conduit progressivement d'après les principes suivants : le plan au 1/20 000 est dressé en première urgence. Puis, les plans au 1/10 000 et au 1/5 000 sont établis en suivant l'ordre d'importance des différents secteurs. Le 1/5 000 doit être distribué aux troupes avant l'exécution d'attaques afin qu'il soit étudié et complété sur le terrain (GQGA-EM, 1916). Le premier plan directeur est édité et distribué en décembre 1914 pour préparer l'attaque du village de Mametz dans la Somme le 17 décembre. Le plan au 1/20 000 est rapidement adopté mais la complexité du réseau de défense ennemi mérite une représentation plus fine et précise. C'est pourquoi, le premier plan directeur au 1/10 000 est édité le 25 avril 1915 du secteur de Lihons dans la Somme. Au même moment, l'Infanterie réclame des cartes encore plus précises pour la préparation d'attaque. En avril 1915, le plan directeur au 1/5 000 de Neuville-Saint-Vaast dans le Pas-de-Calais et de la ferme de Toutvent dans l'Aisne sont édités et distribués par la X^{ème} Armée. Ces plans à différentes échelles n'ont jamais un caractère définitif, établi une fois pour toutes, mais sont en constante révision. Ils sont améliorés en suivant les transformations sur le terrain de l'ennemi et ne sont que véritablement utiles et efficaces s'ils sont constamment mis à jour (SGA, 1936).

Les éléments à représenter sont nombreux (parallèles, boyaux, fils de fer, postes optiques, chemins de fer...) mais une sélection doit être effectuée selon leur ordre d'importance pour ne pas nuire à la clarté du document.

Le plan directeur au 1/20 000 ordinaire (sans les réseaux de défense alliés) est destiné en priorité à l'Artillerie pour la désignation des objectifs et l'exécution des mesures préparatoires aux tirs. Il possède une profondeur d'environ 10 km pour que l'ensemble du dispositif ennemi soit représenté et peut être prolongé au-delà par de nouvelles feuilles pour cartographier les objectifs lointains de l'Artillerie (GQGA-EM, 1916) (Tab 1.1). Les parallèles, boyaux, abris, pistes, chemins de fer, gares et quais de débarquement, campements, batteries d'artillerie, centres téléphoniques, réseaux de fils de fer importants sont renseignés sur ce plan.

Le plan directeur au 1/10 000 constitue une carte plus détaillée des organisations ennemies. Il est utilisé tout particulièrement par le Commandement et les États-Majors. Ainsi, la profondeur de 6 km permet de cartographier l'ensemble des premiers dispositifs de défense ennemis (Tab 1.1). L'Artillerie l'emploie également pour ses tirs sur les tranchées, boyaux et ouvrages divers des premières lignes de l'ennemi (GQGA-EM, 1916). Tout ce qui est représenté sur le 1/20 000 est figuré sur le 1/10 000. De plus, tous les réseaux de fils de fer, toutes les pistes, les points de passage sur les parallèles et boyaux, les lignes téléphoniques, les postes optiques et de commandement, les observatoires sont indiqués sur le 1/10 000.

Le plan directeur au 1/5 000, quant à lui, est un croquis d'attaque strictement limité aux premières lignes ennemies. Il s'étend sur 2 à 3 km et fournit une image expressive du terrain et une représentation complète de tous les détails connus de l'organisation ennemie (Tab 1.1). Il est avant tout destiné à l'Infanterie pour étudier ses cheminements et dans le cadre des « coups de main ». Ainsi, tous les détails de la défense ennemie, les tranchées, boyaux, ouvrages et obstacles divers de la première ligne avec le dispositif des engins de défense, les flanquements organisés, doivent figurer sur le plan. L'Artillerie emploie également ce plan pour assurer sa liaison avec l'Infanterie, et ajuster les tirs d'après ses besoins (GQGA-EM, 1916, Combaud *et al.*, 2016).

Echelles	1/20 000	1/10 000	1/5 000
Lignes alliées	≥ 6	6	0,5 à 2
Lignes ennemies	10	Jusqu'à 6	2 à 3
Extension cartographique possible	Lignes ennemies pour les objectifs lointains	Lignes alliées	
Utilisateur cible	Artillerie	Commandement État-Major	Infanterie Artillerie

Tab 1.1 : Profondeur cartographiée en kilomètres des plans directeurs en fonction de l'échelle (Sources : GQGA-EM, 1916 ; GQGA-EM, 1917a, Combaud *et al.*, 2016).

Sur les plans directeurs avec organisations françaises au 1/20 000, le plan a une profondeur de 6 km pour les lignes alliées, permettant aux batteries de campagne et à la plupart des batteries lourdes de reporter leur propre position (GQGA-EM, 1917a). Les parallèles et boyaux alliés, les points de passage, les ouvrages, chemins de fer sont indiqués sur le plan au 1/20 000 (Fig. 1.18A).

À l'échelle du 1/10 000, les plans doivent fournir au Commandement une image exacte et complète des positions alliées (GQGA-EM, 1917a). Son utilisation est dédiée notamment à l'amélioration des positions, à l'élaboration des ordres relatifs à l'occupation des différents secteurs et au commandement des opérations en cours ou en préparation. Par ailleurs, ces plans servent à guider les régiments devant s'engager dans des secteurs pour lesquels ils n'ont pas pu faire de reconnaissance approfondie des positions à occuper. Ce plan doit s'étendre sur 10 km dans les zones ennemies et sur 6 km dans les zones alliées, complété par des feuilles additionnelles en arrière si besoin (Fig. 1.18B).

Pour les plans au 1/5 000, ils s'étendent de 500 m à 2 km de manière à comprendre les positions de départ des attaques et les points de repère indispensables pour l'emploi du plan sur le terrain (GQGA-EM, 1917a). Ces plans sont surtout réalisés pour l'Infanterie mais l'Artillerie va également les utiliser pour régler au mieux ses tirs (Fig. 1.18C). Sur le 1/20 000, les objectifs d'artillerie sont désignés par des numéros à 4 chiffres donc de résolution hectométrique. L'objectif d'artillerie se situe donc dans une aire ou polygone de tir de 1 hectare. L'Artillerie utilise ainsi les objectifs désignés sur les cartes au 1/5 000 pour augmenter la précision de ses tirs.

Sur les plans directeurs avec organisations françaises, aucune indication ne doit renseigner sur la position des batteries d'artillerie française, les fils de fer ainsi que les centres de commandement et centres téléphoniques. Ces indications peuvent être ajoutées à la main sur le plan mais sous la responsabilité de son détenteur. La profondeur cartographiée ennemie/alliée est en relation avec les différents reculs ou avancées de chaque armée.



Fig.1.18: A - Extrait du plan directeur de Cernay-en-Dormois au 1/20 000 du 19 septembre 1918. B - Extrait du plan directeur de Ripont au 1/10 000 du 6 janvier 1918. C - Extrait du plan directeur de Maisons de Champagne au 1/5 000 du 8 mars 1918.

1.5.3. L'assemblage

Les limites des différents plans directeurs sont fixées suivant un tableau d'assemblage arrêté en juin 1917. Les plans directeurs au 1/20 000 présentent généralement un format de 65 cm sur 1 m et couvrent 260 km². 312 plans directeurs français sont recensés des Flandres à l'Alsace (Fig. 1.19) ; 94 % ont un format « portrait » (13 km x 20 km). Les plans au 1/20 000 de Nieuport et Zeebrugge dans les Flandres, Ambonnay et Saint Gibrien dans la Marne, Clermont D et C, Vigneulles A et B en Meuse, Chambley (1 à 2, 3 à 4 et 5 à 6), Pont à Mousson, Nomeny, Nancy, Parroy, Baccarat, Senones, Saint-Dié, Le Donon ont un format « paysage » mais couvrent des surfaces différentes (Annexe 1.1).

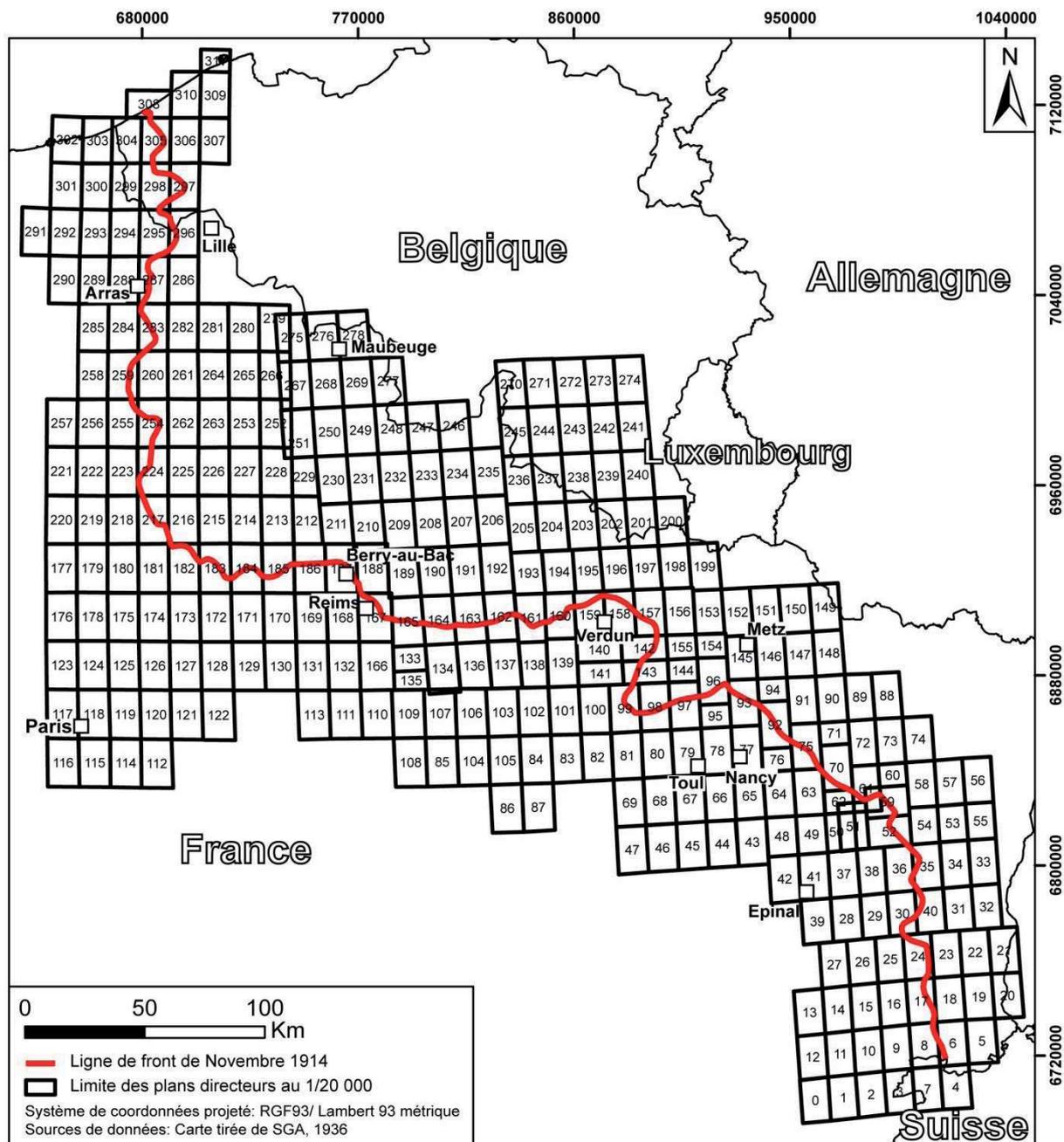


Fig.1.19: Tableau d'assemblage des plans directeurs au 1/20 000 sur le front occidental d'après le tableau d'assemblage des plans directeurs du 15 mars 1919. Les numéros correspondent aux noms des feuilles en annexe 1.1.

Les plans au 1/10 000 sont au format « portrait » et couvrent en moyenne 65 km² (6.5 km x 10 km). Leur nom est issu du plan au 1/20 000 avec une indication géographique (Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est ou Sud-Ouest) ou un toponyme important du secteur cartographié. Les plans au 1/5 000 ont un format « paysage » (70 cm x 50 cm) et couvrent en moyenne moins de 10 km². Les feuilles des plans aux différentes échelles sont en principe arrêtées aux mêmes limites latérales ou intercalées régulièrement entre ces limites (SGA, 1936). Cependant, les plans au 1/5 000 tentent d'épouser au mieux la ligne de front avec les saillants et rentrants qu'elle peut dessiner.

Pour ce travail de thèse, 128 plans directeurs ou extraits français ont été numérisés puis étudiés sous SIG sur le front champardennais de Berry-au-Bac à la forêt d'Argonne (Annexe

1.2). Parmi eux, 20 sont au 1/5 000, 44 au 1/10 000 et 64 au 1/20 000. Les plans au 1/5 000 et au 1/10 000 se concentrent au niveau du front alors que les plans au 1/20 000 peuvent cartographier des zones jusqu'à 40 km à l'arrière des deux camps (Fig. 1.20).

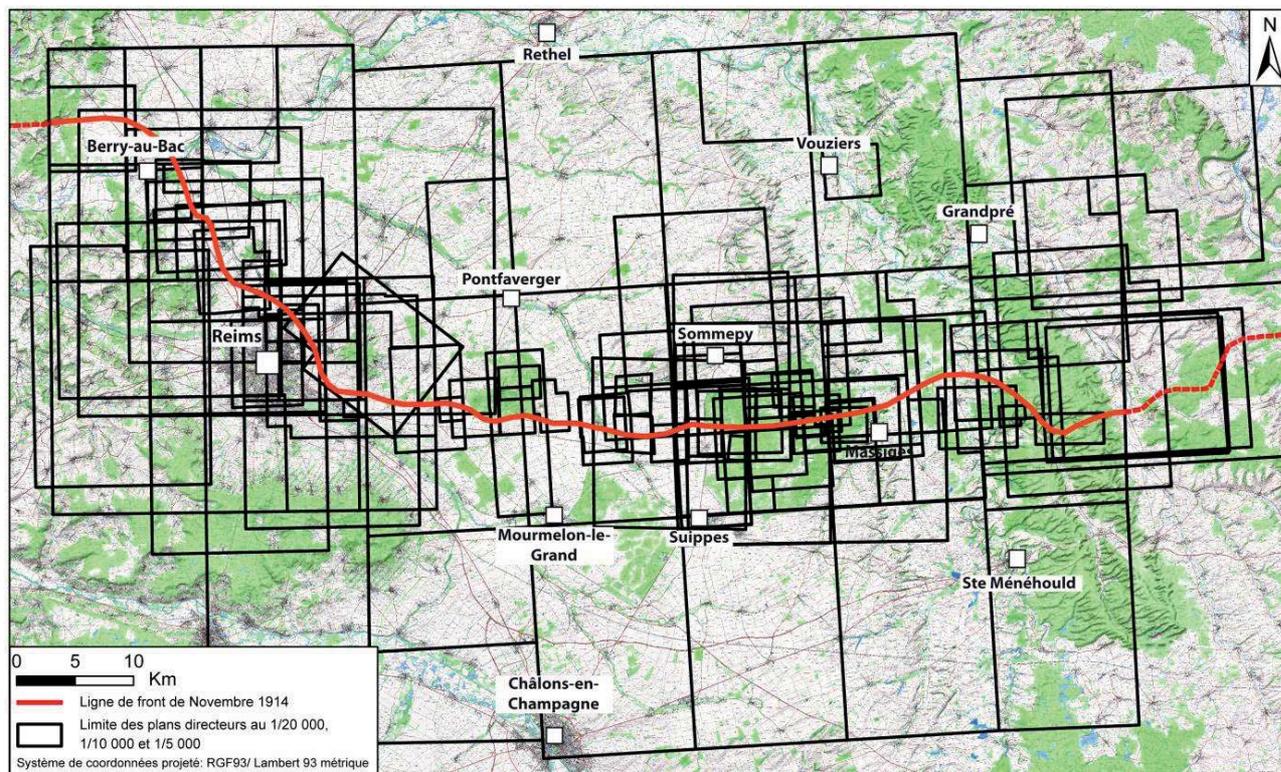


Fig.1.20: Tableau d'assemblage des plans directeurs au 1/20 000, 1/10 000 et 1/5 000 en Champagne-Ardenne, numérisés et utilisés dans la thèse.

Sur les 128 plans français, un plan date de 1914, 9 de 1915, 4 de 1916, 44 de 1917, 51 de 1918 et 19 ne sont pas datés (Fig. 1.21A). Ces plans à différentes échelles peuvent cartographier soit exclusivement le réseau de défense allemand, soit exclusivement le réseau de défense français, soit les réseaux de défense allemand et français. Pour ces derniers, les plans au 1/5 000 sont traversés par 1,7 à 7,5 km de linéaire de front, au 1/10 000 de 1 à 9,7 km de linéaire de front et au 1/20 000 de 7 à 18,5 km de linéaire de front (Fig. 1.21B).

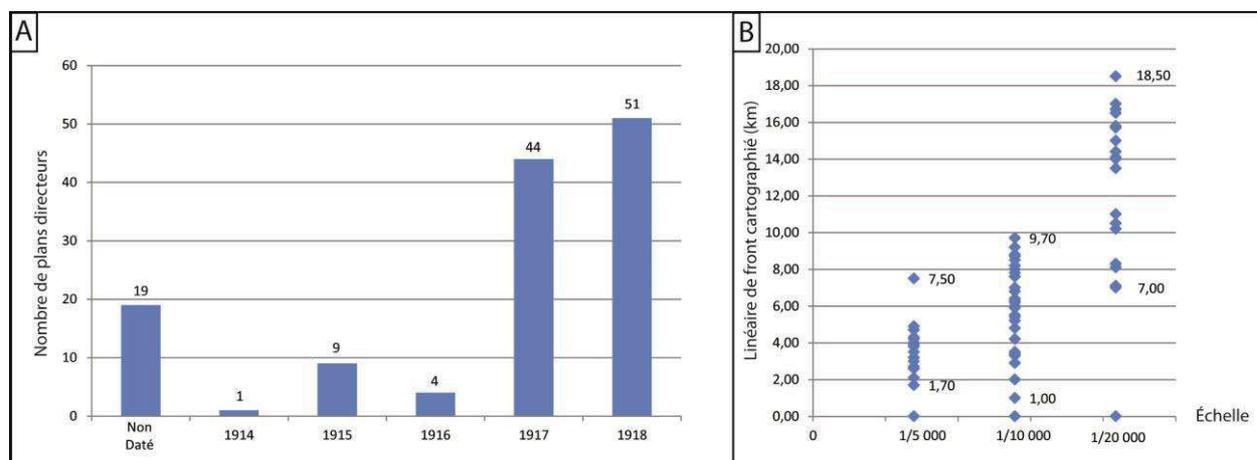


Fig.1.21: A – Distribution par date d'édition des plans directeurs numérisés. B - Distribution du linéaire de front cartographié selon l'échelle des plans directeurs numérisés.

1.5.4. Tirage, distribution et utilisation

Le croisement des croquis et dessins perspectifs, des photographies aériennes et des interrogatoires permet donc la production des plans directeurs par le SGA. Ces documents papiers sont en constante évolution. Il faut renseigner les dernières observations aériennes, interrogatoires de prisonniers ou constatations des espions pour mettre à jour les plans. Ce travail de jour comme de nuit sera ininterrompu pendant les quatre années du conflit.

Dès le début du conflit, le service géographie devient une entreprise à la fois du tirage des plans mais également de leur distribution sur le front. L'imprimerie principale se situe à Paris et est composée de 6 presses plates et 12 presses rotatives. En 8 et 11 heures, ce service d'imprimerie peut produire respectivement 40 000 et 55 000 exemplaires. L'imprimerie centrale parisienne est épaulée par des annexes en province. L'annexe de Tours est opérationnelle dès la fin août 1914, Clermont-Ferrand en septembre 1914 et Bordeaux en janvier 1915. Les besoins sont tels que le service géographique signe des contrats avec des imprimeries privées de Paris pour répondre à la demande grandissante des armées sur le front. Les imprimeries Champenois, Dufrénoy, Minot, Delaporte, Noirfontaine, Jenin, Gamichon Erhard, l'imprimerie de la Bourse et de l'école de Saint-Cyr, et même le journal « l'Illustration » participent aux tirages des plans directeurs. Le service géographique doit également gérer la matière première de toute imprimerie : le papier. Environ 6 000 tonnes de papier sont utilisées de 1914 à 1918 par le service d'imprimerie de Paris. L'éloignement de Paris pour certaines zones de front ne permet pas à l'imprimerie de Paris de fournir les plans assez rapidement. Dans ces secteurs, l'armée signe des contrats avec des imprimeries privées ou peut avoir recours à des trains-imprimeries. Deux trains seront alors équipés à l'automne 1917 et stationneront notamment sur le front belge, en Meuse, mais également sur le front italien (SGA, 1936). Tout est réfléchi pour gagner en rapidité et donc en efficacité sur le front. Pour l'édition, le quadrillage kilométrique est porté sur la planche de planimétrie. Ensuite, pour les positions des différents éléments, une planche de zinc est nécessaire pour chaque couleur (de 4 à 5 quand les bois et forêts sont figurés en vert). Au minimum, trois planches de zinc doivent être élaborées par les GCTA pour imprimer un plan directeur. (SGA, 1936). Le magasin des zincs du service géographique de l'imprimerie de Paris possède à la fin du conflit :

- 25 000 zincs de plans au 1/20 000 pour 6 000 éditions différentes.
- 15 000 zincs de plans au 1/10 000 pour 4 000 éditions différentes.
- 15 000 zincs de plans au 1/5 000 pour 4 000 éditions différentes.

Durant la Grande Guerre, plus de 13 500 000 plans directeurs sont imprimés, surtout par l'imprimerie de Paris (Fig. 1.22). Les services d'imprimerie éditent également d'autres plans à des échelles plus petites (1/50 000, 1/200 000) sur le front occidental ou sur d'autres fronts comme les Balkans ou le front italien par exemple.

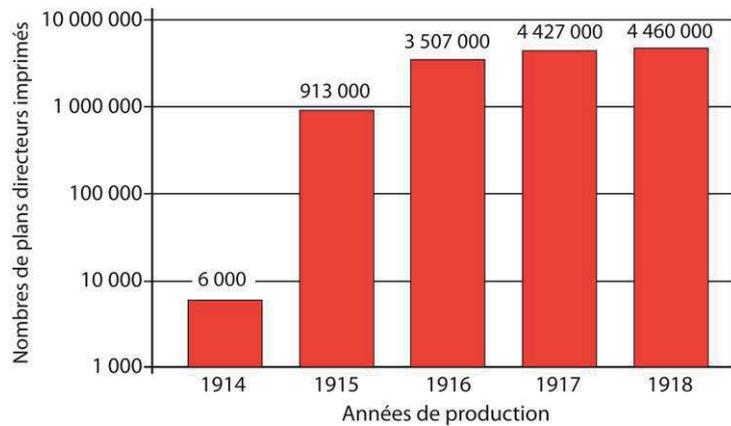


Fig.1.22: Nombre annuel des plans directeurs imprimés (d'après le SGA, 1936)

À la fin de la Grande Guerre, le SGA a produit plus de 55 millions d'exemplaires de cartes dont les plans directeurs, qui traduisent la prise de conscience militaire de l'apport des cartes durant ce conflit. Ces plans, aux échelles diverses et souvent polychromes, sont répartis quotidiennement dans les corps de troupe (Lévy, 1926). Si ce nombre semble énorme, c'est que certaines cartes, dont les plans directeurs, sont rectifiées quotidiennement lors des grandes phases offensives. Après l'analyse et le traitement des croquis et dessins perspectifs, les interrogatoires des prisonniers et les photographies aériennes, un agent de liaison doit se rendre au plus vite au service géographique de Paris pour donner les modifications à apporter aux plans directeurs. De 12 à 18 h après son arrivée à Paris, il peut rejoindre son secteur avec en moyenne 3 000 exemplaires du plan directeur rectifié et les distribuer aux États-majors des unités. Chaque réédition est imprimée à environ 3 000 exemplaires mais certaines peuvent l'être davantage, comme le plan directeur de Lassigny (Oise) au 1/20 000 à 9 000 exemplaires ou le plan directeur au 1/10 000 de Solente (Oise) à 10 000 exemplaires. Pour chaque plan, plusieurs rééditions ont été publiées selon les demandes de l'État-Major. En Champagne-Ardenne, au 1/20 000, le plan de Beine a connu 21 éditions, Berry-au-Bac 21 éditions et Tahure 26 éditions. Ces éditions ne sont pas réparties uniformément dans le temps, en fonction de l'activité des opérations du secteur. Pour exemple, dans le secteur de Verdun en 1916 pendant l'attaque allemande, le plan directeur au 1/20 000 d'Etain a été édité 22 fois (11 mars, 16 mars, 29 mars, 8 avril, 19 avril, 2 mai, 17 mai, 23 mai, 3 juin, 12 juin, 25 juin, 9 juillet, 25 juillet, 9 août, 9 septembre, 30 septembre, 12 octobre, 25 octobre, 4 novembre, 23 novembre, 1^{er} décembre et 18 décembre) (SGA, 1936).

	Echelle	Distribution jusqu'au	
		Infanterie	Artillerie
Plans directeurs ordinaires	1/20 000	Chef de bataillon	Commandant de batterie
	1/10 000	Commandant de compagnie	
	1/5 000	Chef de section	
Plans directeurs avec organisations alliées	1/20 000	Commandant de sous-secteur	
	1/10 000	Chef de bataillon	Commandant de groupe*
	1/5 000	Commandant de compagnies en période de stabilisation ; Chef de demi-section** en période d'opération	Commandant de batterie

Tab. 1.2 : Distribution des plans directeurs selon les échelles (Combaud *et al.*, 2016)

Quand l'État-Major a reçu la nouvelle édition des plans directeurs, chaque échelon doit transmettre ces plans aux unités concernées selon leur usage opérationnel au sein de l'Infanterie et de l'Artillerie (GQGA-EM, 1917). En effet, un « coup de main » réalisé localement par une section de 60 hommes dans les lignes ennemies pour la prise de prisonniers (Fig. 1.23A) et les grandes offensives concernant davantage de troupes (bataillons et divisions regroupant des milliers d'hommes) sur plus d'espace (Fig. 1.23B) nécessitent respectivement des plans directeurs à grande échelle sur le terrain (1/5 000) et à plus petite échelle à l'arrière (1/20 000) (Tab.1.2).

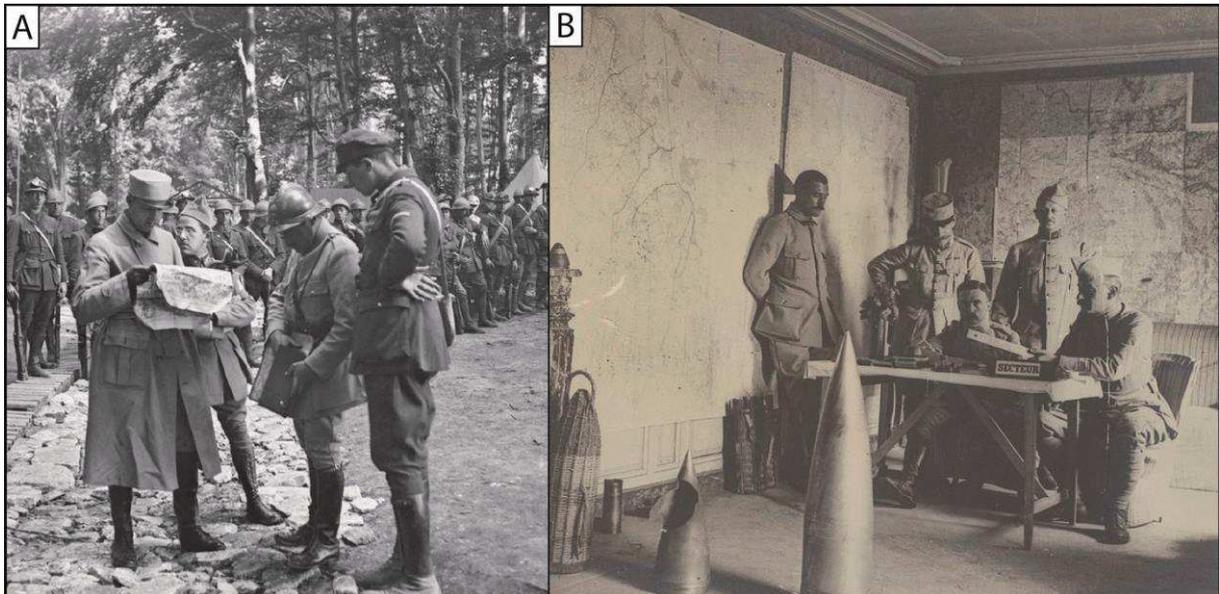


Fig.1.23: A - Utilisation d'un plan directeur à grande échelle lors de l'interrogatoire d'un prisonnier allemand (Source : ECPAD France, Maurice Boulay). B - Plans directeurs affichés aux murs du quartier général de la 14ème Division d'Infanterie à Chenay (Marne) en juin 1917 (Source : BDIC VAL 065/139).

1.5.5. La couleur comme sémiologie

Contrairement aux cartes d'État-Major du XIX^{ème} siècle, les plans directeurs sont pensés dès le départ en couleur. Pour preuve, le premier plan polychrome en quatre couleurs est publié le 12 février 1915 et servira de modèle par la suite (SGA, 1936). Le choix des couleurs répond à la praticité de la lecture de la carte, et donc à la facilité d'utilisation sur le terrain (Fig.1.24A). Ainsi, la topographie est représentée en courbes de niveau de couleur bistre ainsi que les indications d'altitude. Les autres informations planimétriques sont en noir (hydrographie, occupation du sol, voies de communication, bâtis) ainsi que les cotes d'altitude de la carte au 1/80 000 n'ayant qu'une valeur approximative. Ce choix permet de faire ressortir les structures militaires défensives représentées en bleu pour l'ennemi et en rouge pour les forces alliées (Fig.1.24B). Déjà pour les croquis perspectifs de la guerre de 1870, les structures de défense et canons étaient matérialisés en bleu pour l'armée allemande et en rouge pour l'armée française. Sur certains plans, les courbes de niveau sont en noir comme l'ensemble de la planimétrie. Dans un souci de lisibilité, les armées se succédant dans les Vosges, emploient, pour représenter les forêts, la couleur verte au lieu de la trame noire prescrite par l'instruction.



Fig.1.24: A – Crayon rouge-bleu pour annoter les plans directeurs (Photo A. Devos, Mémorial de Verdun). B – Extrait du plan directeur au 1/10 000 de Sommepy (Marne) du 10 mars 1917.

1.5.6. La légende

Même si une légende homogène est définie par l'État-Major, dont une partie provient de cartes militaires antérieures (CTEM, 1913), elle est souvent absente des plans directeurs ou reste partielle. Par ailleurs, conformément à l'instruction du 14 février 1916 (GQGA-EM, 1916), les plans édités ne doivent en aucun cas porter d'indications sur l'armement, les défenses accessoires, l'organisation du commandement ou sur l'ordre de bataille des troupes alliées occupant le secteur. Toutes ces indications sont à ajouter à la main par chaque détenteur de plan pour la partie dont il a la responsabilité. L'étape préalable à l'étude des plans directeurs fut de construire une légende, disséminée dans les manuels d'instructions militaires, que ce soit pour les éléments présents sur les plans édités ou pour ceux ajoutés à la main. Elle n'a pas vocation à commenter les choix sémiologiques ou à justifier les décisions militaires, mais à mettre à disposition de tous une légende qui tend vers l'exhaustivité. L'organisation de la légende n'est pas bouleversée par rapport aux cartes antérieures. Ainsi, pour les signes repris des légendes antérieures à la Grande Guerre (CTEM, 1913), la structure de présentation des signes est globalement la même. L'organisation est souvent dichotomique, structurée selon les organisations alliées d'une part, et ennemies d'autre part, en distinguant

les éléments linéaires ou les réseaux des éléments ponctuels. Les signes conventionnels réglementaires observés dans les guides et manuels militaires et dans l'instruction du 14 février 1916 (GQGA-EM, 1916) sont organisés en trois parties distinctes. La première partie porte sur les signes conventionnels, sur la planimétrie, et la topographie (Fig. 1.25).

La planimétrie ou toute information ordinairement figurée sur les cartes d'État-Major rassemble les points géodésiques, les voies de communication, les cours d'eau, le bâti, les cultures pérennes... Pour les plans directeurs au 1/1 000 et 1/5 000, des limites de cultures peuvent être signalées comme repères pour l'Artillerie ou les postes d'observation. Ces informations sont d'une fiabilité variable selon l'ampleur des destructions liées à la guerre (Combaud *et al.*, 2016).

La topographie est représentée sans ombrage, en courbes de niveau de couleur bistre. Toujours dans un souci de rapidité de lecture des cartes sur le terrain, les valeurs des altitudes ne sont pas orientées systématiquement dans le sens de la pente positive, comme à l'usage sur les actuelles cartes topographiques, mais vers le Nord. Les cotes d'altitudes sont très nombreuses comparativement aux cartes d'État-Major, et peuvent avoir une précision décimétrique. Les cotes d'altitudes nivelées de la carte d'État-Major, et non encore corrigées par les topographes sur le terrain, sont considérées comme « approximatives ». Afin de l'indiquer à l'utilisateur de la carte, ces cotes sont précédées du mot « cote » en noir (SGA, 1936).

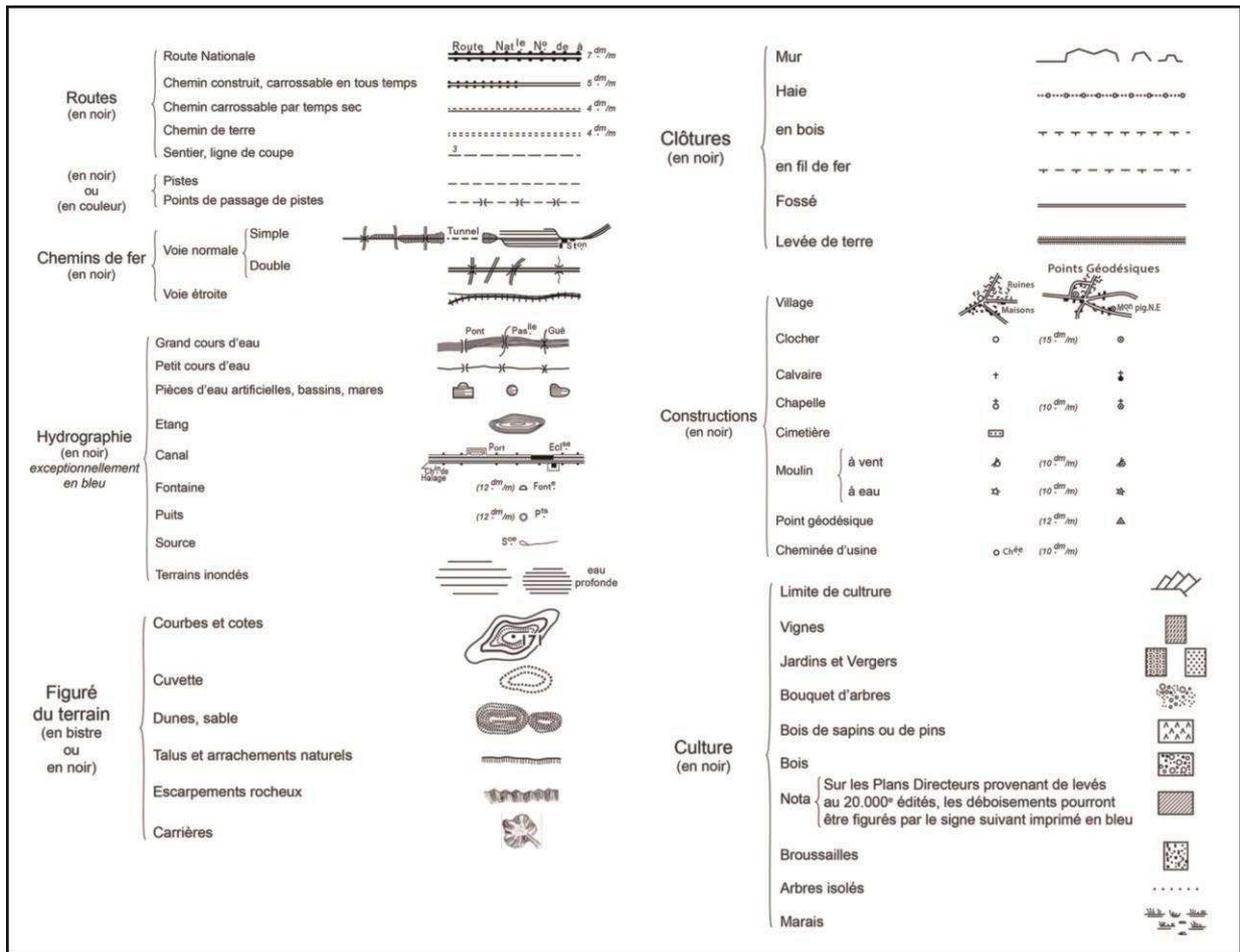


Fig.1.25: Légende des signes conventionnels des plans directeurs (GQGA-EM, 1918a, Combaud et al., 2016)

La seconde partie porte sur les travaux de défense représentés selon les 3 échelles (1/20 000, 1/10 000 et 1/5 000) des travaux allemands et des travaux français (Fig. 1.26). Les travaux de défense alliés et allemands sont similaires, quelle que soit l'échelle du plan. Ainsi, durant le conflit et suite aux grandes offensives, l'organisation spatiale des réseaux de défense étant inchangée, seule la couleur de représentation change. Une différenciation est faite entre les structures défensives probables obtenues par interrogation de prisonniers (tracés en pointillés) et celles vérifiées par restitution photographique ou relevés de terrain (tracé continu). Il en est de même pour l'état des structures de défense avec une distinction entre celles en « fonctionnement », représentées par des traits continus, de celles abandonnées, mais toujours présentes et qui pourraient être réutilisées, en tiretés (Combaud *et al.*, 2016).

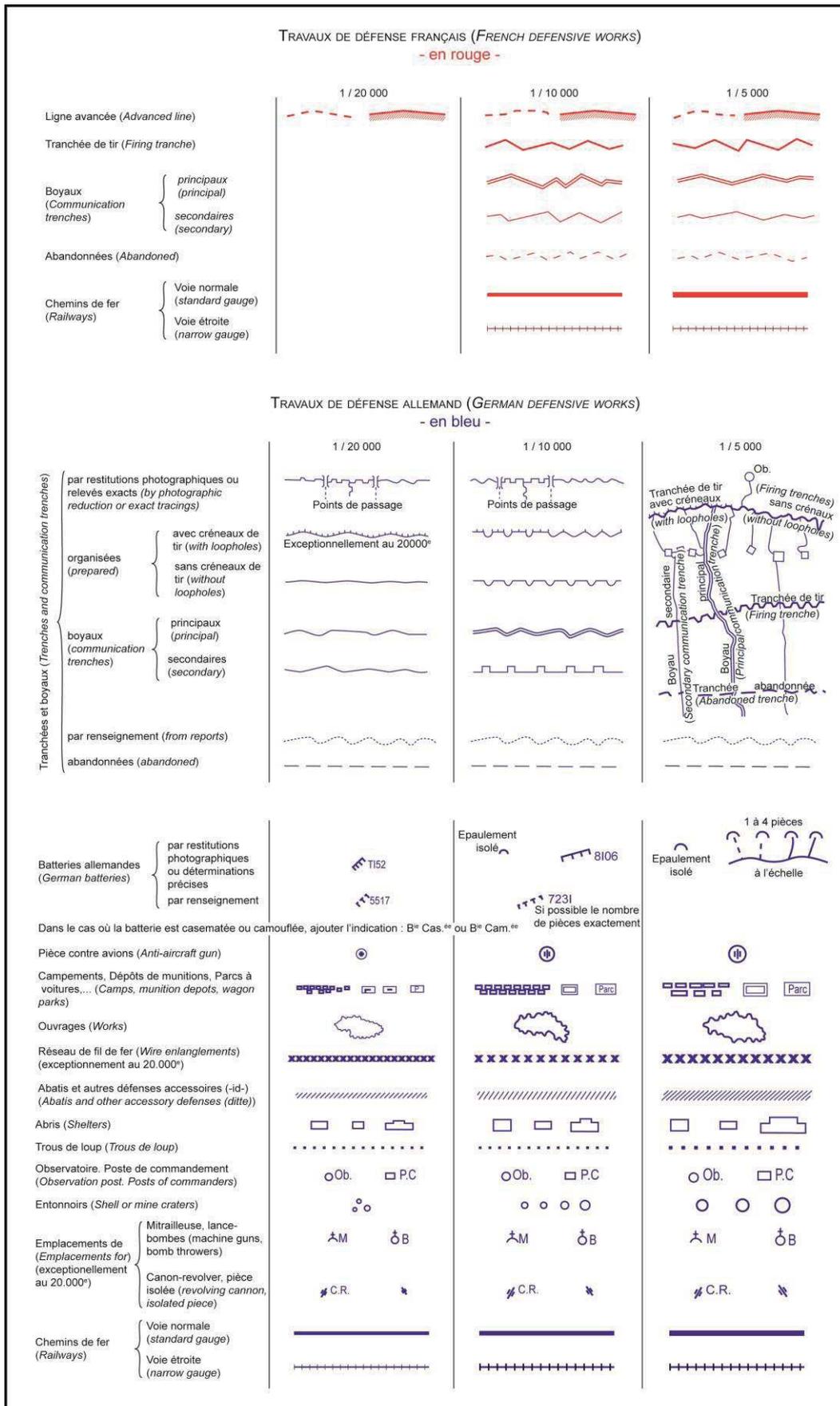


Fig.1.26: Légende des travaux de défense français et allemands (sources : US Army, 1918 ; Army War College, 1917 ; GQGA-EM, 1916, Combaud et al., 2016)

Les organisations allemandes figurent en bleu mais leur degré de précision dépend de l'échelle. Au 1/20 000 les principales structures de défense ennemies sont représentées : tranchées, boyaux, abris, pistes importantes, chemins de fer, gares, quais de débarquement, campements, batteries, centraux téléphoniques, réseaux de fil de fer (isolés ou en arrière de la première ligne). Au 1/10 000, sont ajoutés les réseaux de fil de fer complétés, pistes, croisements des pistes et des réseaux de tranchées et boyaux, lignes téléphoniques, postes optiques, postes de commandement (PC), et observatoires. Au 1/5 000, le plan directeur est le plus complet, notamment au niveau de la première ligne ennemie avec l'intégralité des renseignements fournis au sol par photo-interprétation et les postes d'observation, en y figurant les fils de fer au complet, chevaux de frise, mitrailleuses, lance-bombes, abris, postes d'écoute, etc...

Les organisations alliées sont représentées en rouge et présentes sur les plans 1/20 000 et au 1/10 000. Elles regroupent les réseaux de défense (tranchées boyaux), les pistes et voies ferrées, cantonnements, points d'eau, etc... Sur les plans au 1/5 000, les points de repère visuels sont davantage représentés. Par contre, en théorie, ces plans ne fournissent pas d'informations sur l'armement, les réseaux d'obstacles (fils de fer, réseau brun), sur les postes de commandement et téléphoniques car ces informations sont en réalité ajoutées de manière manuscrite par les utilisateurs (Combaud *et al.*, 2016).

La troisième partie représente les signes conventionnels complémentaires à employer pour toutes les inscriptions manuscrites à porter sur les plans directeurs utilisés par les États-Majors (Fig.1.27). Ces signes conventionnels sont structurés en onze catégories : 1) travaux et organes divers d'un terrain aménagé, 2) quartier généraux et États-Majors, 3) infanterie, 4) cavalerie, 5) artillerie, 6) génie, 7) aéronautique, 8) service automobile, 9) service de l'intendance, 10) service de santé, 11) divers.



Fig.1.27: Signes conventionnels complémentaires à employer pour toutes les inscriptions manuscrites à porter sur les plans directeurs ou cartes diverses utilisés dans les États-Majors (sources : US Army, 1918 ; Army War College, 1917 ; GQGA-EM, 1916, Combaud *et al.*, 2016)

5) Artillerie (Artillery)				7) Aéronautique (Aviation)	
Groupe au repos (Group in park)				Escadrille (Squadron)	
Emplacement (Emplacement) :	occupé (occupied)	préparé (prepared)		Parc d'aviation (Aviation park)	
- de batterie de campagne (of battery 155 C. (short))				Groupe de bombardement (Bombing group)	
- de batterie de 95				Parc du groupe de bombardement (Park of bombing group)	
- de batterie de 100				Terrain d'atterrissage (Landing field)	
- de batterie de 105				Ballon captif (Captive balloon)	
- de batterie de 120 l.					
- de batterie de 155 l.					
- de batterie de 120 C.					
- de batterie de 155 C.					
- de batterie de 220 (of battery 220)					
- de batterie de 270 (of battery 270)					
- de batterie de 370 (of battery 370)					
Matériels spéciaux (avec l'indication du calibre en centimètres) (Special types (with indication of caliber in centimeters))					
Station contre avions (Antiaircraft station)					
Section de munitions d'infanterie (Infantry munition section)		S M I			
Section de munitions d'artillerie (Artillery munition section)		S M A			
Section de Parc (Section of Park)		S P			
P.A. C.A. (1 ^{er} échelon) (Artillery park, army corps (1st échelon))					
P.A. C.A. (2 ^e échelon) (Artillery park, army corps (2d échelon))					
Echelon de G. P. A. (Echelon of main artillery park)					
Echelon sur route (Echelon along the road)					
En cas mobile (When movable)					
Dépôt intermédiaire (A.I.) (Intermediate depot (Heavy artillery))	D I				
Parc (A.I.) (Park (Heavy artillery))	P				
6) Génie (Engineers)				8) Service automobile (Automobile service)	
Compagny du Génie (Compagny of Engineers)				Section H. V. F. (Section supplying fresh meal)	
Section de projecteurs (Searchlight section)				Section sanitaire automobile (Sanitary section automobile)	
Détachement télégraphique de C.A. (Telegraph detachment of army corps)				Section de transport de matériel (Section for transportation of matériel)	
Section télégraphique (Armée) (Telegraph section (Army))				Section de transport de personnel (Section for transportation of personnel)	
Section télégraphique de 2e ligne (Telegraph section of 2d line)				Section de parc automobile (Section of automobile park)	
Poste de T.S.F. de campagne (Field radio station)					
Equipage de pont (Bridge equipage)					
Parc du Génie de C.A. (Army corps engineer park)					
Parc du Génie d'Armée (Army engineer park)					
				9) Service de l'Intendance (Service of administration and supply)	
				Section du C. V. A. D. (Section of subsistence supply train)	
				Section de C. V. A. X. (Section of auxiliary subsistence supply train)	
				Parc de bétail (Cattle park)	
				B. O. A. (Army field bakery)	
				10) Service de Santé (Medical service)	
				Ambulance (Ambulance)	
				Section d'hospitalisation (Hospital section)	
				Groupe de brancardiers (Group of stretcher bearers)	
				Hôpital d'évacuation (Evacuation hospital)	
				Section d'hôpital d'évacuation (Section of evacuation hospital)	
				Réserve de personnel (Reserve personnel)	
				Réserve de matériel (Reserve matériel)	
				Infirmierie de gare (Hospital in railroad station)	
				Train sanitaire (Sanitary train)	
				11) Divers (Miscellaneous)	
				Train régimentaire (Regimental train)	
				Dépôt de remonte mobile (Field remount depot)	
				Commandement d'étapes (Headquarters of advanced base beyond real-head)	

Fig.1.28: Suite

1.5.7. Les toponymes et noms de tranchées

La désignation des lieux et points militaires remarquables (carrefours de tranchées, intersections avec une voie de communication ou postes avancés) est faite grâce à ses coordonnées hectométriques à 4 chiffres. Dans les faits, ces coordonnées deviennent les matricules des objectifs (GQGA-EM, 1917a). Les éléments linéaires, tels que les tranchées ou les boyaux, sont désignés soit par un repère à 3 chiffres selon un ordre vraisemblablement chronologique (566, 567), soit par une toponymie utilisée par les combattants, en évitant les noms trop génériques (tranchée de première ligne, de résistance, de soutien). Cela induit une grande diversité toponymique au sein d'une même feuille d'un plan directeur (les exemples mentionnés ci-après sont pris sur le seul plan directeur au 1/20 000 de Reims du 15 juillet 1918). Ainsi, les noms des tranchées peuvent porter la marque du terrain (Parallèle du Canal), d'un toponyme (tranchée du Mont Saint Pierre), des villages et localités proches (tranchée de Sillery, tranchée de Champigny) ou éloignés (tranchée d'York), de la région d'origine géographique régimentaire (tranchée de Bayonne), des corps d'armées de la Grande Guerre (tranchée du Génie, tranchée des Dragons), de patronymes des combattants (tranchée Roussel, tranchée Gillet), de personnes célèbres (pour exemple des tranchées portant le nom des personnes illustres du Premier Empire : tranchée Bonaparte, Davout, Junot, Ney) ou de prénoms communs (boyau Serge) et plus rarement fantaisistes (tranchée des Eunuques, tranchée des Centaures). Les ouvrages de défense (ouvrages, bastions, centres, éléments et groupes de tranchées) peuvent également faire l'objet d'une désignation numérique précédée ou non d'une lettre de secteur (ex : Tr.12 ; Centre de la Cote 122) (Combaud *et al.*, 2016). Ces noms de tranchées et de boyaux feront l'objet d'une analyse spatiale et statistique dans le chapitre 3.

Pour la désignation des ouvrages ennemis, les noms sont empruntés au vocabulaire allemand à partir des renseignements fournis par les prisonniers ou un plan ennemi subtilisé lors d'un coup de main et la prise de prisonniers en évitant de nouveau les termes trop génériques (*graben, stellung, weg, zug*). Les batteries d'artillerie font l'objet d'une numérotation à quatre chiffres correspondant à leurs coordonnées hectométriques, devenant leur matricule. Sur la même logique, les points suspects difficilement interprétés sur les campagnes de repérages aériens (trou organisé, cheminée, mitrailleuse, obusier, etc...) peuvent également faire l'objet d'un code à quatre chiffres.

Normalement, tous les noms et numéros portés sur les plans directeurs au 1/20 000 figurent sur les plans au 1/10 000 et au 1/5 000, et tous ceux portés sur les plans au 1/10 000 figurent sur les plans au 1/5 000. Les appellations inscrites sur les plans au 1/20 000 et au 1/10 000 sont sélectionnées, suivant l'échelle, d'après leur ordre d'importance.

La désignation ne s'arrête pas au réseau de défense et aux batteries d'artillerie mais également à tous les éléments de la planimétrie et du relief (bois, vallées, ravins...). Les noms sont empruntés à la carte d'État-Major ou au cadastre mais aussi inventés de manière arbitraire ou selon les conditions géographiques. Les buttes importantes sont dénommées et matérialisées sur les plans directeurs par la cote approximative de la carte d'État-Major. En Champagne-Ardenne, la cote 108 près de Berry-au-Bac, la cote 193 près de Tahure ou la cote 285 en forêt d'Argonne sont des lieux emblématiques de la Grande Guerre. Ces noms deviennent alors courants et répercutés sur les plans directeurs ultérieurs. Dans le même secteur, sur le plan directeur de Tahure au 1/20 000 du 16 septembre 1918, les bois des Fouines, des Lièvres, des Lapins, des Écureuils, des Belettes au nord du village de Perthes-les-Hurlus reçoivent un nom de mammifères (Fig. 1.29A). La même dénomination pour des oiseaux est retrouvée au nord du village de Tahure (Bois du Pinson, du Merle, du Rossignol, du Geai, du Corbeau, du Moineau, de la Buse, du Coucou ou de la Tourterelle). D'autres termes sont liés à la présence

de troupes coloniales près de Souain comme le Grand Bois du Togoland ou du Cameroun (Fig. 1.29B). Lorsque les bois sont trop petits et nombreux (pinèdes de Champagne sèche), ils reçoivent une dénomination avec un numéro à deux chiffres ou une lettre suivie d'un numéro à deux chiffres (Fig. 1.29B). Cette terminologie militaire se perpétue dans la toponymie des cartes topographiques de l'IGN comme le bois du Pinson, du Rossignol ou du Corbeau dans le camp militaire de Suippes.

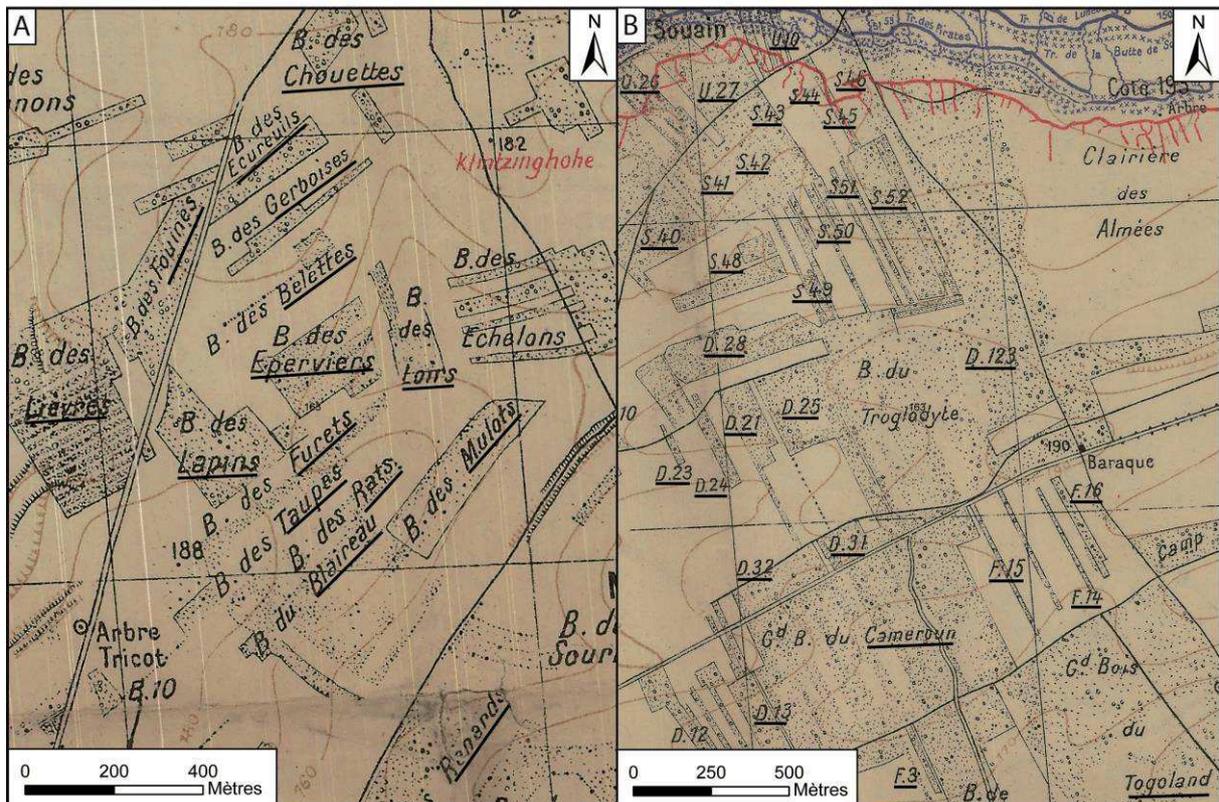


Fig.1.29: A – Toponyme de mammifères sur l'extrait du plan directeur ordinaire au 1/20 000 de Tahure du 29 mars 1917. B – Toponymes liés aux troupes coloniales et de petits bois sur l'extrait du plan directeur ordinaire au 1/20 000 de Tahure du 29 mars 1917.

1.2 Les cartes allemandes et britanniques

Alors que le SGA élabore dès le début de guerre les plans directeurs par les Groupes de Canevas de Tirs des Armées, l'armée allemande se lance également dans de vastes travaux d'élaboration et de distribution de cartes (Fig. 1.30A). Les cartes allemandes peuvent être synthétiques (*Kruppenkarte*) comme les plans directeurs français. Les Allemands créent également des plans pour l'Infanterie avec le tracé des réseaux de défense (*Stellungkarte*), des plans des positions d'artillerie et objectifs d'artillerie adverse (*Artilleriekarte*) et des destructions (*zerstörtekte*). Ces cartes reçoivent le nom de la ville ou village principal du secteur, la date des dernières modifications et une légende incomplète y est intégrée comme pour les plans directeurs. Ces documents sont évidemment classés « secret défense » (*Geheim !*) indiqué par la mention dans un des coins. Le service géographique allemand a cependant choisi une échelle moins précise que les plans directeurs français au 1/20 000 (Fig. 1.30B) car ces cartes sont au 1/25 000 (Fig. 1.30A) mais des plans sont édités au 1/10 000 et au 1/5 000 pour des attaques localisées. La couleur est utilisée de manière similaire aux plans

directeurs car les réseaux de défense alliés sont en rouge et les réseaux allemands en bleu mais la couleur des toponymes, numéros d'objectif et tracés des chemins de fer sont inversés ; bleu côté français et rouge côté allemand. Les batteries alliées reçoivent comme dénomination une lettre (Fig. 1.30B), alors que les tranchées ou nœuds de tranchée sont matérialisés par un numéro à 4 chiffres. De plus, une hiérarchisation dans l'épaisseur du tracé des réseaux de défense différencie les tranchées en gras des boyaux de communication. L'armée allemande aurait fait imprimer 800 millions de cartes de 1914 à 1918 (Porte, 2014b) ce qui s'explique par sa présence sur deux fronts et l'élaboration de cartes synthétiques mais également thématiques.

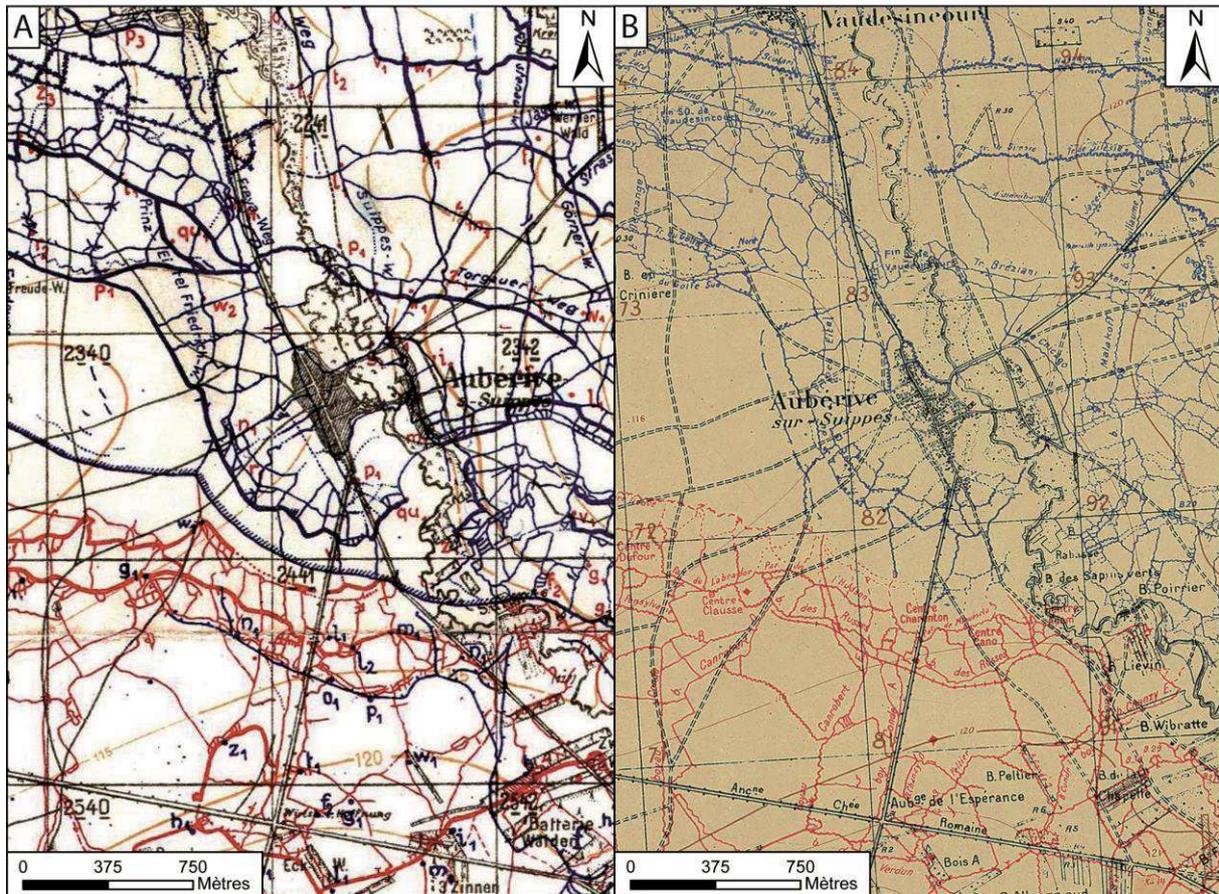


Fig.1.30: A – Extrait de carte allemande (Stellungskarte) au 1/25 000 du secteur d'Auberville. B – Extrait du plan directeur au 1/20 000 de Sainte-Marie-à-Py du 16 septembre 1918.

L'armée belge, qui ne quittera pas le front des Flandres, utilise des plans réalisés par le service géographique français et adoptera les mêmes règles et caractéristiques pour les plans qu'elle élaborera tout au long du conflit. Il en est de même pour l'armée américaine, qui entre assez tardivement en guerre et utilisera les plans directeurs français dans un premier temps. Elle réalisera l'élaboration de ses propres plans selon les méthodes des plans français.

L'armée britannique stationnée principalement sur le front de la Somme utilise au début du conflit des plans élaborés par le service géographique français. Jusqu'au début de l'année 1918, elle va combattre dans une zone bien distincte et s'est donc dotée d'un service géographique pour réaliser des plans précis de sa zone de combat. Ces plans britanniques ressemblent par la forme et le fond aux plans directeurs français avec trois échelles différentes

(1/20 000, 1/10 000 et 1/5 000), un nom et une date des dernières modifications. Les différences sont tout de même importantes car l'unité est bien-sûr le yard ; le plan est quadrillé et chaque carré est numéroté par un chiffre et noté dans le plan. De plus, la différence la plus importante est la couleur des réseaux de défense : bleu pour les alliés et rouge pour l'armée allemande (Fig. 1.31).

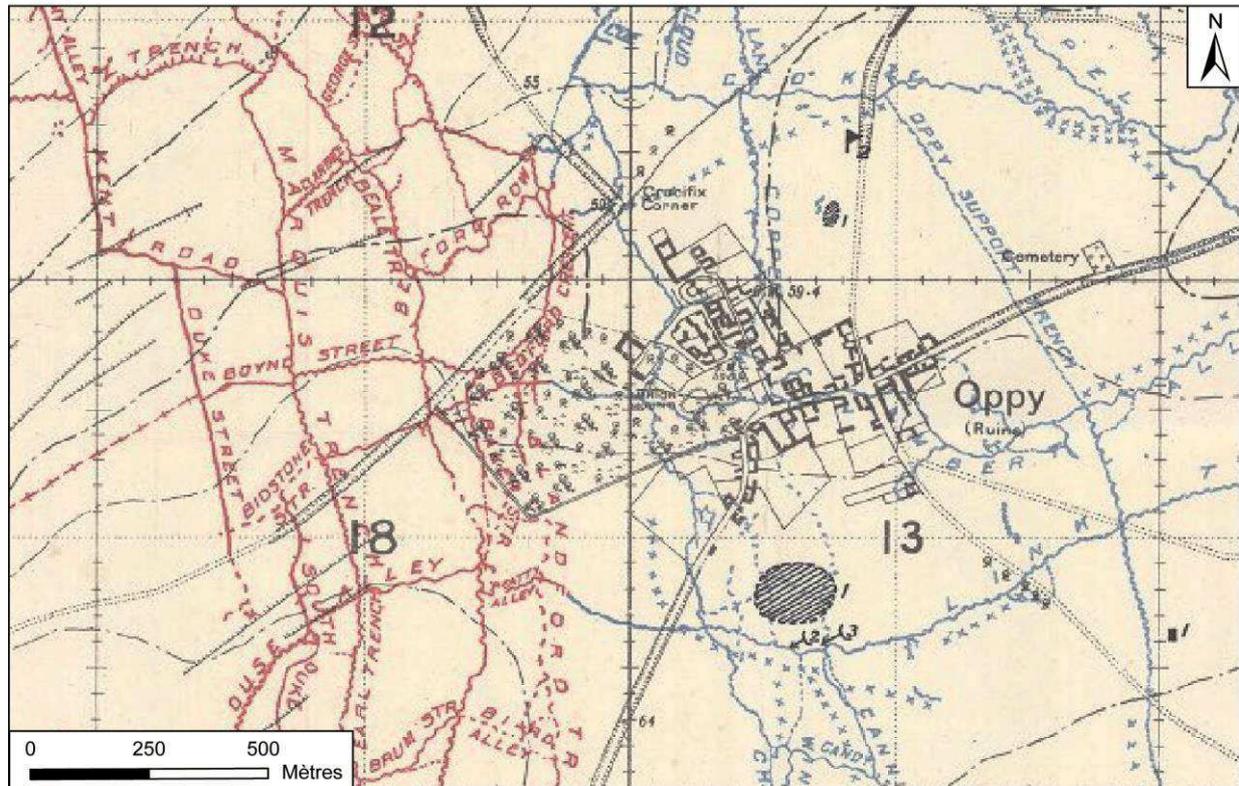


Fig.1.31: Extrait de carte britannique au 1/20 000 de Lony Tree du 22 août 1918 (Source : Mac Master University).

Sur l'initiative du Général Bourgeois, directeur du Service Géographique français, une conférence interalliée est organisée pour uniformiser les plans de toutes les armées sur l'ensemble du front. Au début de l'année 1918, chaque armée peut être amenée à combattre sur l'ensemble du front donc l'uniformisation des plans semble primordiale pour assurer la relève et le lien avec les unités voisines. Le 13 juin à Paris, une conférence regroupe le Général Bourgeois, le Lieutenant-Colonel Bellot, le Lieutenant-Colonel Picot pour l'armée française, le Colonel Alexander pour l'armée américaine, le Capitaine Commandant du secteur de Béthune pour l'armée belge, le Brigadier-Général Pritchard et le Lieutenant-Colonel Jack pour l'armée britannique, et le colonel Malvani et le Lieutenant-Colonel Gargiulo pour l'armée italienne (SGA, 1936). Les principales décisions et améliorations sont les suivantes :

- La projection Lambert est adoptée pour tous les plans
- Une échelle graphique en yards sera intégrée sur chaque plan
- Tous les objectifs seront désignés par quatre chiffres
- Les règles de signes conventionnelles seront respectées au maximum.
- Chaque carré de 10 km sera matérialisé par une lettre et intégré dans le plan

1.6. L'hébergement des plans directeurs

Cent ans après le conflit, ces cartes demeurent une source de données cartographiques importantes pour diverses disciplines, mais mal connues, car dispersées et partiellement numérisées. L'un des premiers travaux de cette thèse fut la récolte de ces plans directeurs en Champagne-Ardenne. Ces plans sont dispersés à la fois dans les archives départementales (Marne, Ardennes, Aisne) ou dans les archives de musées (Musée de la Grande Guerre de Meaux, Musée du Fort de la Pompelle). Ils peuvent également être la propriété d'associations (association du Souvenir de Sommepey-Tahure, association de la Main de Massiges) ou de passionnés de la Grande Guerre. Il n'est pas rare également de retrouver certains plans directeurs dans les brocantes ou encore en vente sur internet. La collection la plus importante est à Vincennes au Service Historique de la Défense (SHD) avec un exemplaire pratiquement de chaque plan directeur, soit environ 600 000 pour le front occidental, 20 000 pour le front italien et 1 000 pour l'armée d'Orient (SGA, 1936). Ces plans peuvent également être retrouvés dans les Journaux des Marches et Opérations (JMO), mis à disposition sur le site Mémoire des hommes depuis 2008. Cependant, il s'agit toujours d'extraits de cartes, soulevant des problèmes dans leur localisation exacte. Certains plans directeurs complets sont intégrés aux annexes de l'ouvrage en 107 volumes publiés entre 1922 à 1939 (« *Les armées françaises de la Grande Guerre* » (AFGG)) édités par le Service Historique de l'Armée créé spécialement en 1919 pour sa rédaction. Ils sont disponibles sur la BNF (Bibliothèque Nationale de France). En Champagne-Ardenne, il n'existe aucun site internet recensant les plans directeurs de cette partie du front. Les Britanniques sur le site [Mc Master University](#) ont géoréférencé les plans directeurs des Flandres à la Somme. Ces cartes militaires peuvent être consultées et téléchargées à but non lucratif, ou achetées sur CD ROM (Western Front 1915-1918). Ce travail a également été réalisé sur le site internet [Cigale](#) où les plans sont mis en ligne pour le secteur du front des Vosges et d'Alsace. Depuis 2016, un partenariat a été créé entre l'Institut Géographique National et le GEGENAA pour faire découvrir ces plans directeurs. Un projet de mise en ligne des 312 plans directeurs vierges (sans les réseaux de défense) est en cours d'élaboration.

1.7. Des plans directeurs à la carte IGN actuelle.

Les plans directeurs au 1/20 000, 1/10 000 et au 1/5 000 sont donc indispensables pour mener cette guerre de position. Cependant, le service géographique élabore d'autres plans dits « spéciaux » pour des besoins particuliers. Des plans de destruction de ville ou de village, des plans de l'activité des batteries ennemies ainsi que leurs objectifs, plans des travaux de défense à grande échelle ont aussi été édités et distribués avec de faibles tirages pendant le conflit. A l'armistice, les travaux du service géographique n'ont pas été stoppés car des plans de destruction, d'emplacements de cimetières provisoires, de démographie, notamment ont été réalisés pour les futurs dommages de guerre demandés à l'Allemagne.

Les plans directeurs contribuent largement à l'héritage cartographique français à la fois de manière institutionnelle et de manière opérationnelle. Le Service Historique de l'Armée (SHA) devient le Service Historique de la Défense (SHD) en 2005 et le Service Géographique de l'Armée (SGA) créé par décret en 1887 devient l'Institut Géographique National (IGN) en 1940 pour que le service cartographique national soit dissocié des Armées, afin d'éviter la mobilisation de ce service par l'Allemagne. De manière opérationnelle, ces plans directeurs ont notamment apporté à la cartographie la polychromie, la courbe de niveau, le fond

planimétrique, les calques d'information spatiale, les coordonnées Lambert, et un nivellement précis que l'on retrouve aujourd'hui sur les cartes de l'IGN actuelles.

Conclusion du chapitre 1

Si le début de la guerre s'inscrit dans le cadre d'une guerre de mouvement, parfois rapides, la Première Bataille de la Marne marque l'adoption par les Allemands, puis par les forces alliées, de la guerre de position. Cette position spatiale stratégique des Allemands gêne l'Artillerie française qui ne peut pas tirer à vue et qui souhaite alors recourir au « tir d'après la carte ». Cette solution est possible avec une parfaite connaissance du modelé du terrain et une situation précise de l'objectif par rapport à sa propre position. Or, au début de la guerre de tranchées, la qualité des cartes existantes n'est pas suffisante et les tirs guidés par avion ne sont pas encore réalisables. La seule possibilité pour les pilotes est le repositionnement sur la carte d'État-Major qui semble théorique, à trop petite échelle et dont les levés sont obsolètes (SGA, 1936). Des cartes locales existent, mais aucune mission n'a encore couvert le territoire français à une échelle suffisamment précise pour fournir les cartes homogènes sur l'ensemble du front dont l'Artillerie, puis les États-Majors, ont besoin pour mener cette guerre. Le service géographique se lance donc dans l'élaboration des plans directeurs pour donner à l'Artillerie, la possibilité de tirer d'après la carte. Des travaux sur le terrain (croquis et dessins perspectifs), aériens (photographies aériennes) sont corrélés aux interrogatoires de prisonniers pour apporter un maximum d'informations et de renseignements précis à ces cartes militaires. Ces plans au 1/20 000, au 1/10 000 et au 1/5 000 deviennent des documents nécessaires à la fois pour les tirs de l'artillerie toujours plus lointains mais également pour l'Infanterie avant toute attaque.

La Grande Guerre marque ainsi un tournant décisif dans l'histoire de la cartographie française (Combaud et al., 2016). C'est parce qu'un nouveau besoin se crée que sous l'impulsion du Général Bourgeois et du SGA que tous les services cartographiques de l'armée sont revus et que les premiers exemplaires de la carte moderne émergent. Celle-ci pose les bases d'une nouvelle représentation spatiale et multiscalaire, fondatrice de la cartographie moderne, et propose de nouveaux outils dans la connaissance géographique. Cette sémiologie se retrouve aujourd'hui dans les cartes de l'IGN depuis 1940, ancêtre du SGA. Concernant le système de coordonnées, après-guerre la projection Lambert est adoptée et appliquée à l'ensemble de la France métropolitaine avec 4 zones Lambert NTF, pour lesquelles de nouvelles coordonnées d'origine sont définies. Le système français officiel actuel n'est que la prolongation moderne du Lambert zone Nord de Guerre. A ce titre, la cartographie française a été marquée par des choix inhérents à la Grande Guerre. Pourtant le divorce entre géographie militaire et civile est consommé après la seconde guerre mondiale. Alors qu'en France la géographie générale se transforme lentement en une science culturelle et sociale, les anglo-saxons développent une véritable école de pensée géographique à des fins militaires (Boulangier, 2002) où la géographie physique et les géosciences trouvent une place importante. En France, les concepts récents de géostratégie et de géopolitique semblent renouveler la géographie militaire, mais se détournent à la fois de l'échelle locale ou régionale mais aussi des géosciences. Ce contexte explique l'indigence d'études universitaires sur les plans directeurs et les impacts environnementaux des conflits armés légitimant ces travaux de thèse.

L'étape préalable à l'étude du front en Champagne-Ardenne fut la récupération de ces plans directeurs dans les différentes institutions administratives ou associations, par des personnes passionnées pour les numériser à haute résolution. Dans le cadre du centenaire du premier conflit mondial, du développement de l'archéologie de la Grande Guerre et de la mise en ligne des JMO depuis 2008, les plans directeurs et leurs extraits sont abondamment consultés. Pourtant, ils souffrent d'une dispersion de leur hébergement et restent mal connus des géographes. La légende proposée dans ce chapitre sur les signes conventionnels, les réseaux

de défense et les signes à employer par manuscrit mais surtout l'absence d'analyse spatiale justifient l'étude de ces plans directeurs champardennais par le SIG (Système d'Information Géographique) afin de comprendre les logiques qui concourent à l'organisation spatiale des réseaux de défense de la Grande Guerre.

Chapitre 2 : Evolution de la structuration du front de 1914 à 1918

Introduction du chapitre 2

Le premier chapitre de cette première partie rappelait l'apport fondamental des plans directeurs de la Grande Guerre dans le domaine cartographique. Ce second chapitre mène une étude pour comprendre l'évolution de la structuration du front depuis 1914 jusqu'à 1918. Cette délimitation spatiale du « front » est trop souvent perçue comme une entité linéaire sous la forme d'une ligne étroite dans les ouvrages historiques (Dubail et Fayolle, 1921) ou dans les atlas historiques (Neiberg, 2015) qui ne présentent que la fluctuation de la ligne de front avec une vision multisectorielle des grandes offensives ou retraits stratégiques. Cette « ligne de front » est décrite comme une ligne de feu continue sur 750 km de la mer du Nord à la Suisse. Non voulue dans les plans tactiques des belligérants (plan Schlieffen, plan XVII), elle est l'expression d'une « surprise improvisée » (Verney, 2003), d'un « blocage militaire » (Horne, 2014). C'est pourquoi, avant 1914, on ne retrouve pas dans la terminologie militaire, le « front » désignant l'ensemble du dispositif de défense. À aucun moment de l'Histoire, un tel front sur plus de 700 km n'a été connu. L'État-Major des deux Armées n'aura qu'une obsession pendant 4 ans, celle de créer une brèche dans ce réseau de défense, suffisamment large, pour retrouver la guerre de mouvement et repousser l'ennemi (Porte, 2016). Ce front va alors se structurer différemment et évoluer de 1914 à 1918, du trou d'homme individuel au réseau de défense composé de tranchées et de boyaux.

L'objectif de ce chapitre est, d'une part de présenter l'évolution temporelle de la structure de la zone de front, en réalité complexe et profonde, et d'autre part de comprendre les logiques militaires, environnementales et opérationnelles qui expliquent cette organisation spatiale à la fois longitudinale et transversale. Pour répondre à cet objectif, nous disposons de plus de 300 plans directeurs qui sont non seulement à différentes échelles sur de multiples secteurs, mais de surcroît à des dates différentes. À ce titre, l'analyse spatiale doit, dans un premier temps, reposer sur les grands principes fondateurs de la structuration du front par une étude des manuels d'instructions militaires illustrée par une approche multisectorielle sur des extraits de plans directeurs.

2.1. Evolution de l'organisation spatiale des réseaux de défense durant la Grande Guerre

2.1.1. Évolution des réseaux de défense de 1914 à 1918

L'organisation spatiale des réseaux de défense observée en 1918 découle d'une évolution analysée d'un retour d'expérience par Solard en 1935, Capitaine dans le Génie. Cette évolution non planifiée peut être appréhendée par la lecture des manuels d'instructions militaires (GQG, 1915), des Journaux de Marche et Opérations (JMO) et des mémoires des combattants (Marre, 1915). Elle est surtout conditionnée par les instructions sur l'utilisation de la fortification au cours des opérations de novembre 1914 (Ministère de la Guerre, 1914), sur les travaux de campagne à l'usage des troupes de toutes les Armes du 21 décembre 1915, sur l'organisation du terrain à l'usage des troupes de toutes les Armes du 22 août 1917 (GQG, 1917b), et sur la directive n°4 du 22 décembre 1917 (Goya, 2014).

2.1.2. En septembre et octobre 1914

Le passage de la guerre de mouvement à la guerre de position n'était prévu par aucune armée. Personne n'avait pronostiqué, à aucun moment, un enlisement aussi important et long pendant 4 ans. En août 1914, les hommes pensaient être revenus pour la vendange, au pire pour Noël. Ce seront quatre Noëls qu'ils passeront dans les tranchées. Côté allemand, dans le cadre de la guerre de siège, une instruction de 1913 sur plus de 200 pages prévoit une organisation rationalisée des dispositifs de défense (boyaux, tranchées, postes de tirs, sapes blindées, etc...) (Fig. 2.1).

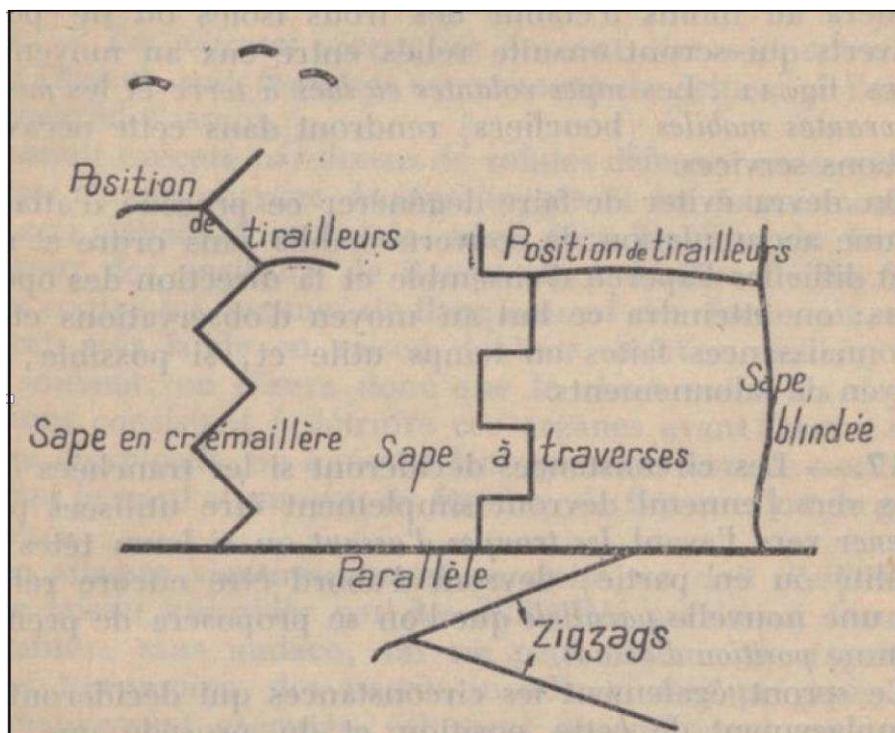


Fig. 2.1: Dispositifs de défense allemands tirés d'une instruction sur le service du pionnier dans la guerre de siège en 1913 (sources : Ministère de la Guerre, 1915).

Dans le cadre de la guerre de mouvement, les manuels d'instructions militaires (GQG, 1915) mais surtout l'instruction sur l'utilisation de la fortification au cours des opérations, de novembre 1914 (Ministère de la Guerre, 1914) proposent de s'abriter du feu de l'ennemi en utilisant les masques naturels proposant une protection suffisante contre les balles (talus de route, fossés, troncs d'arbre couché, amas de pierres). Dès 1914, les manuels d'instructions militaires prévoient uniquement en rase campagne et à découvert, pour renforcer le masque, le creusement de « trous individuels » ou « trous d'homme » à effectuer par le fantassin à la pelle de campagne, abrité derrière son sac à dos servant de premier masque temporaire et couvert par son binôme tirailleur (Fig. 2.2A). Les deux tirailleurs travaillent et tirent alternativement, pour se redresser au fur et à mesure de la fouille et du surhaussement du masque produit par l'accumulation des remblais. L'unité creuse en formant une ligne de défense, non jointive mais temporaire (Fig. 2.2B-C).

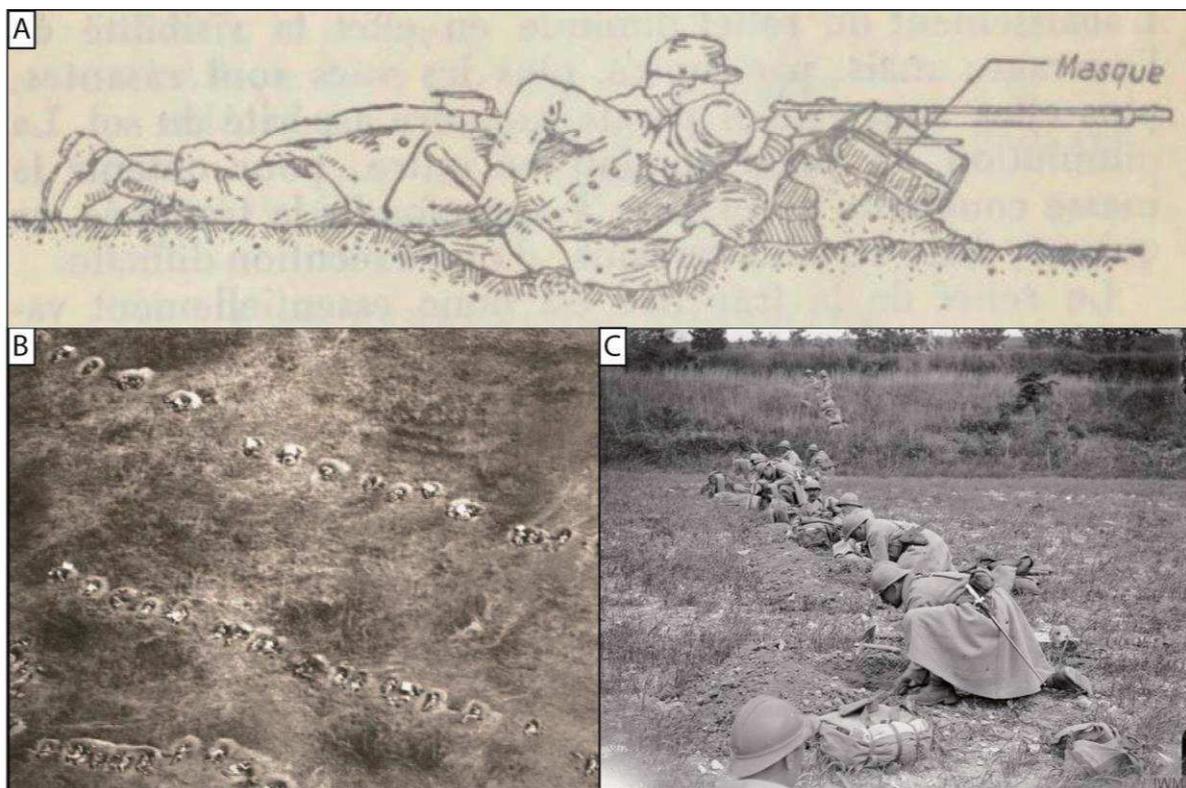


Fig. 2.2: A - Creusement d'un « trou d'homme » et d'élément de tranchée par deux tirailleurs (Source : GQG, 1915). B – Photographie aérienne de trous d'hommes en Champagne (Source : L'illustration). C – Soldats creusant leur trou individuel dans l'Aisne en 1918 (Source : IWM q6667).

Le déplacement latéral des tirailleurs et de la fouille induit la coalescence de trous constituant des « éléments de tranchées » (Fig. 2.3A). Ces derniers se caractérisent par des tranchées peu profondes (60 cm) avec fossé pour jambe droite du tireur, étroites (1 m) et discontinues avec des « intervalles » couverts par les tirs de flanquement des mitrailleuses (Fig. 2.3B) et les prémices des réseaux de barbelés ponctuels, comme on peut le voir dans le JMO de la Cie 16/1 du 2^{ème} régiment du Génie en début septembre 1914 (Fig. 2.3C).

C'est durant les périodes de guerres de mouvement que la France a connu le jour le plus meurtrier de son histoire militaire avec 27 000 soldats tués le 22 août 1914, soit 4 fois plus qu'à Waterloo ou autant que pendant la guerre d'Algérie (Steg, 2013). La seule véritable

protection aux tirs de mitrailleuses et aux éclats d'obus est de creuser plus profondément (Jünger, 1920) :

« L'important, ce n'est pas la masse des retranchements mais le courage et le mordant des hommes qui les garnissent. L'approfondissement progressif des tranchées a peut-être permis d'éviter bien des balles dans la tête, mais il a créé la manie de s'accrocher au dispositif de défense, un besoin de sécurité auquel on eut ensuite du mal à renoncer ».

Ces éléments protègent mal les hommes comme on le constate lors de fouilles archéologiques dans la banlieue de Reims (Fig. 2.3D) où plusieurs soldats allemands victimes du souffle des obus sont retrouvés dans des éléments de tranchées peu profondes d'août 1914 (Desfossés, 2009). La terre déplacée est versée sur l'obstacle pour le surélever et pour éviter les éclats produits par le choc des balles sur la roche déstructurée, constituant les prémices d'une « crête de feu » ou « parapet ». Les trous d'obus sont logiquement exploités. Cette technique est réutilisée en 1918 durant la reprise de la guerre de mouvement, marquée par ces trous individuels et éléments de tranchées.

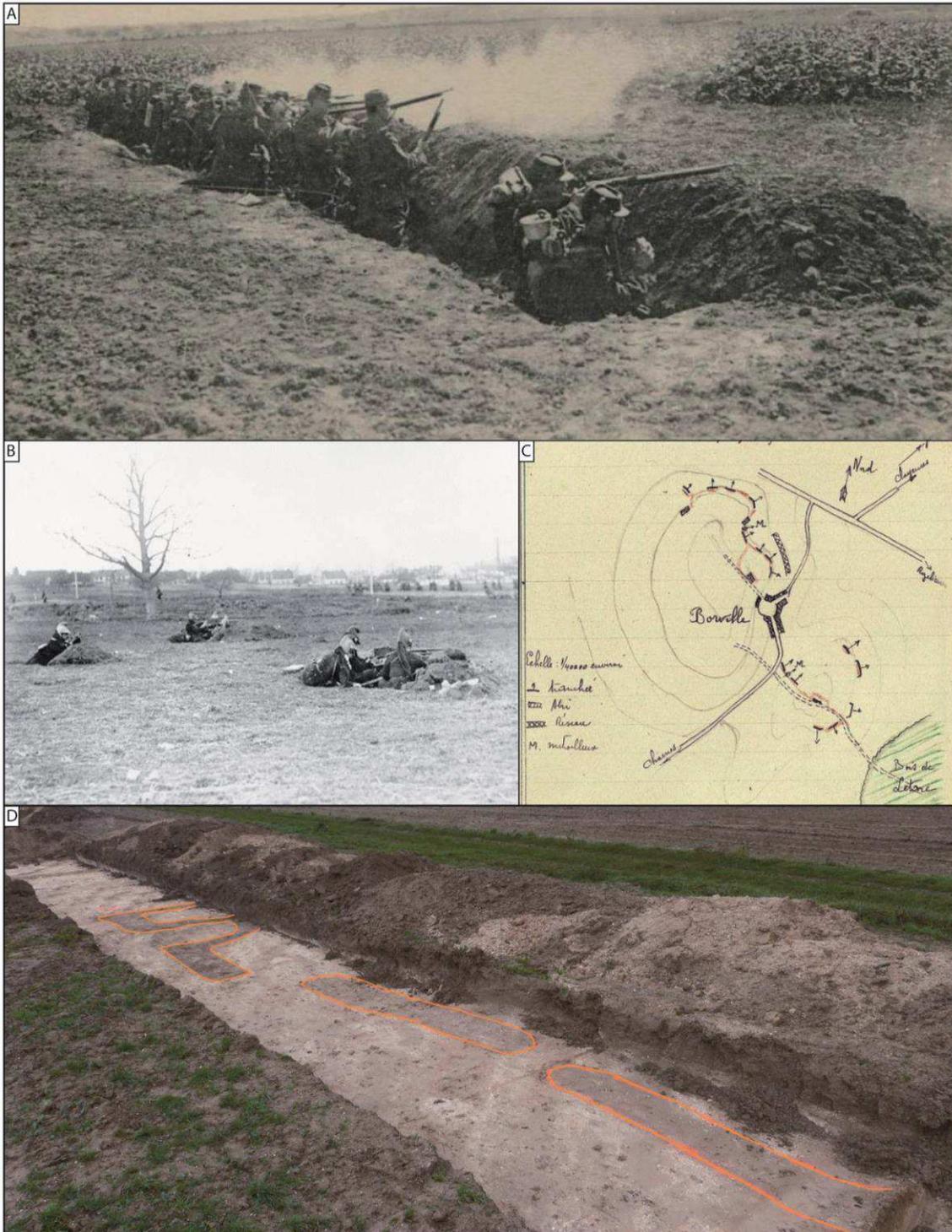


Fig. 2.3: A – Éléments de tranchées pendant la Première Bataille de la Marne dans l’Aisne (Source : Phot-express). B – Mitrailleuses installées par une unité de dragons dans des éléments de tranchées (Source : BNF). C - Eléments de tranchées sur crête militaire à Borville en Lorraine (Source : extrait du JMO 26N 012 063 1). D – Photographie d’éléments de tranchées allemands de septembre 1914 en diagnostic archéologique INRAP à Champigny (51). (Cliché : Taborelli P.).

2.1.3. Novembre 1914-1916 : organisation ternaire et continue

Vers novembre 1914, la « continuité » est recherchée. Les éléments de tranchées sont rejoints « par le bout » et constituent une ligne de feu, ou première ligne de défense continue. Les tranchées sont en 1914 prévues pour tireurs allongés (Fig 2.4A-B), accroupis (Fig. 2.4C), assis (Fig. 2.4D), à genoux (Fig. 2.4E) puis debout (Fig. 2.4F). Les masques naturels linéaires (fossés, ruisseaux, talus routiers, voies navigables) adossent souvent les tranchées dont le tracé à redans, sinueux, en traverses (lunettes ordinaires et aplaties) ou en crémaillère pour éviter les tirs en enfilade, épouse ces obstacles. Des lignes de tranchées ou « parallèles » permettant le tir (banquettes, créneaux), sont creusées en arrière dans des conditions de sécurité plus acceptables et reliées entre elles par des boyaux de communications perpendiculaires à la ligne de front, sans possibilité de tir. Généralement une seule position de défense existe avec trois lignes de tranchées qui annoncent le principe de « profondeur ». La « ligne de résistance » ou « première ligne » se caractérise par un chevelu de boyaux d'accès aux postes d'écoute, petits postes avancés et postes d'observation, situés quelques dizaines de mètres vers les lignes ennemies. La « seconde ligne » ou « ligne de soutien » située 100 à 200 m en arrière est une position d'attente pour les renforts et de départ pour les contre-attaques. La « troisième ligne » plus discontinue, ou « ligne de couverture d'artillerie », ou « ligne de réserve », située 400 à 800 m en arrière, est équipée d'abris, de postes médicaux, dépôts de munition et de postes de commandement (Solard, 1935).

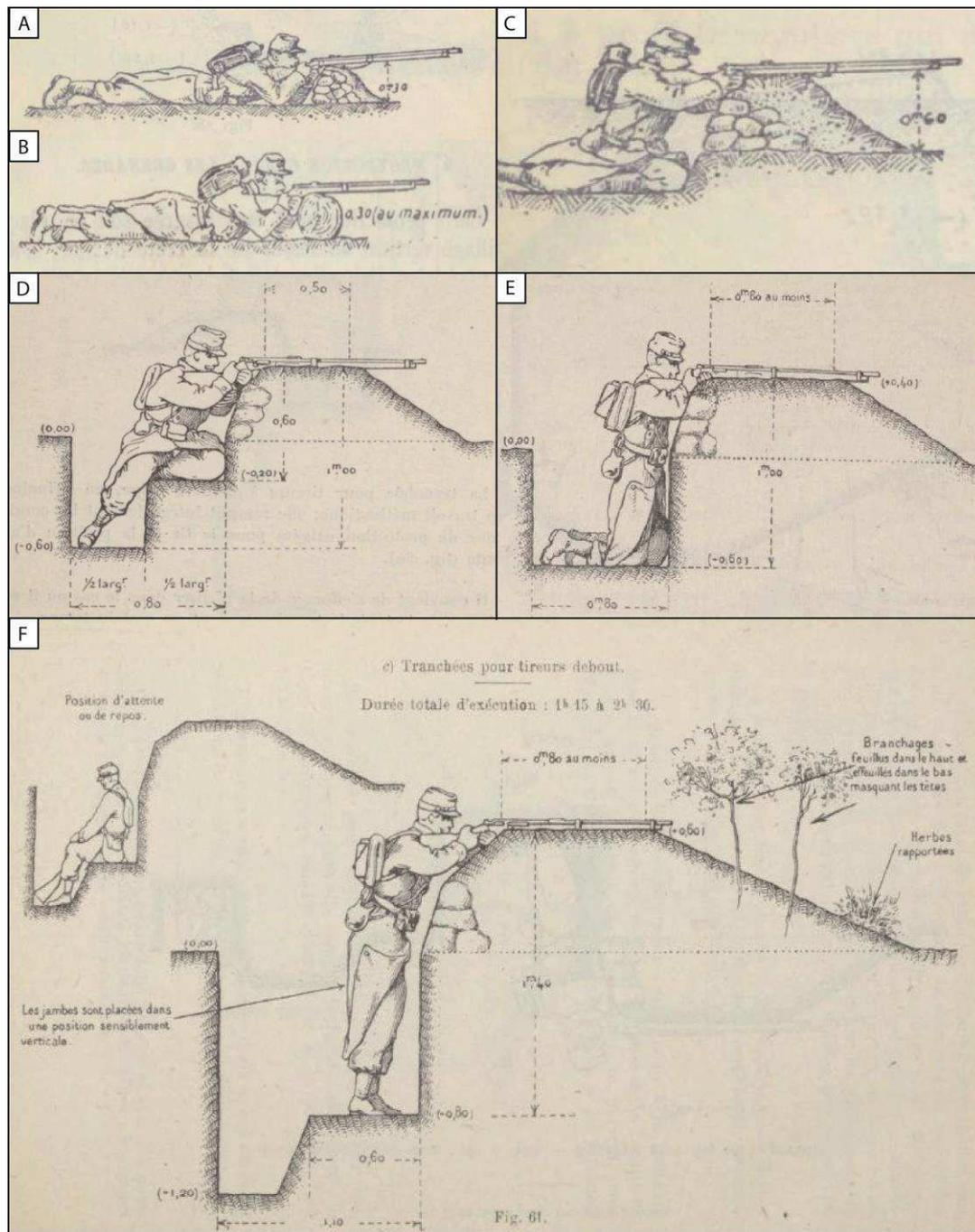


Fig. 2.4: Utilisation des masques naturels, tas de pierres (A), arbre (B), surhaussement du parapet (C), profils réglementaires de tranchées pour tireur assis (D), à genoux (E) et debout (F) en 1914. (Sources : Ecole du Génie 1914).

Les profils transversaux réglementaires des tranchées et boyaux retrouvés dans les manuels d'instructions militaires sont largement respectés mais dépendent de la nature du terrain. En effet, si le profil idéal proposé incise les terrains de 1,7 m comprenant les talus (de revers, intérieurs), les bermes, la banquette de tir et le fond, la profondeur atteinte est de 2 m avec la crête de feu et le parados ce qui impacte non seulement les sols, les formations superficielles indigènes (altérites), et allogènes (loess, alluvions, colluvions) mais aussi le matériau parental (Fig. 2.5A). L'examen des JMO du Génie montre que les cotes réglementaires sont respectées au mieux dans la phase de creusement. Mais, ce n'est qu'en terrain tendre mais cohérent

(craie, gaize) que ces profils sont obtenus sans gros travaux de confortation ou de parachèvement (Fig. 2.5B). Les photographies de tranchées et boyaux de l'époque montrent effectivement des talus verticaux sans aménagements particuliers dans la craie du Nord de la France, alors que ceux réalisés dans les argiles sont généralement plus larges et très aménagés (clayonnage, fascines, gabions) (Fig. 2.5C). Ces claies, fascines et gabions sont fabriqués en bois souple (noisetiers, bouleaux...) à l'arrière et apportées dans les tranchées. La fascine est un long fagot de bois, de petits branchages, pesant jusque 20 kilos alors que la claie est à surface plane. Le gabion est un panier cylindrique sans fond entrelacé et enroulé autour de piquets. Les fascines et claies sont installées pour maintenir la terre des tranchées alors que le gabion sert à la surélever lorsque le creusement est impossible (nappe sub-affleurante).

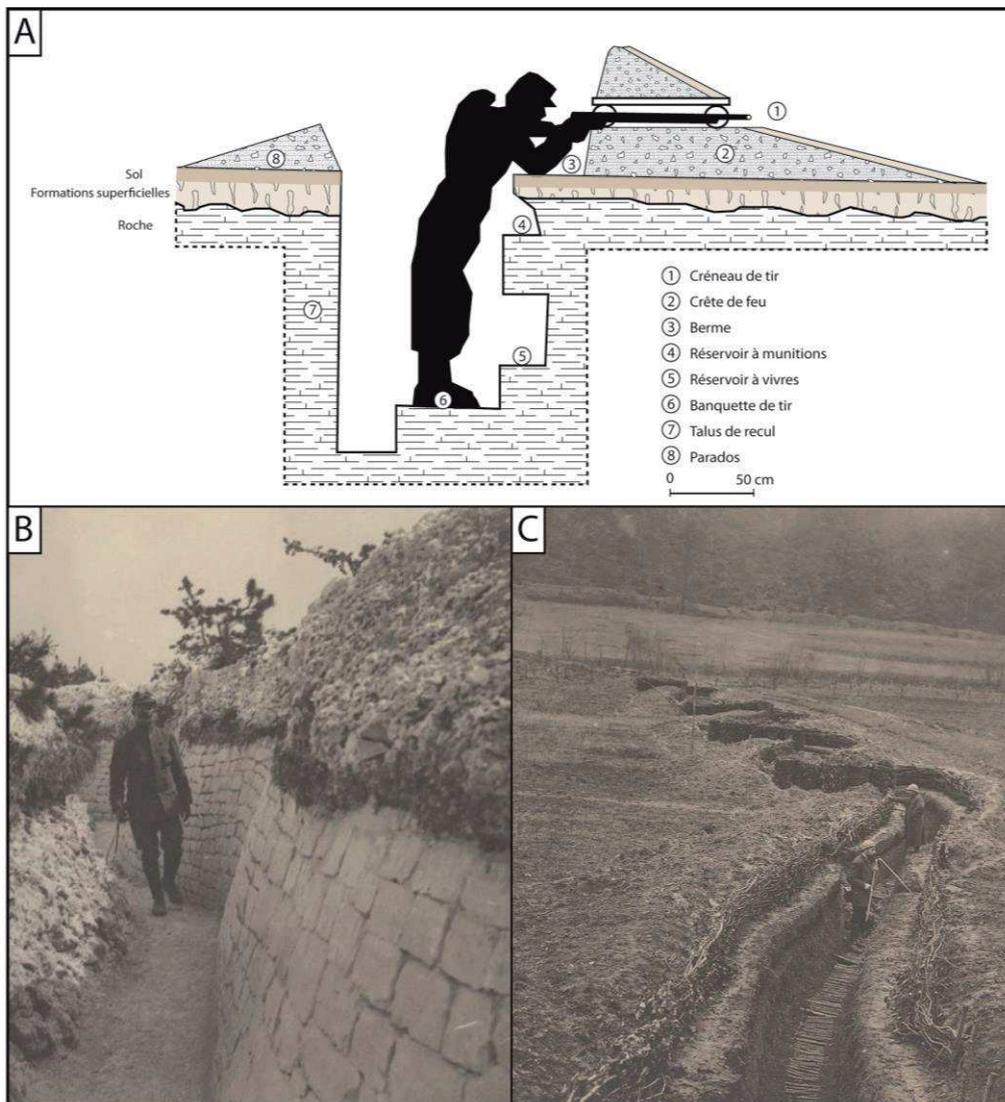


Fig. 2.5: A - Profil réglementaire d'une tranchée en terrain ordinaire vers 1915. B – Photographie d'un boyau de circulation dans la craie de Champagne à Courcy en 1915 (Source : VAL 066/072). C – Tranchée en fascines et en gabions à la Harazée en 1915 (Source : VAL 013/051).

Au début du conflit, une grande différence est repérée entre les tranchées allemandes et françaises. L'armée allemande vient de conquérir plus de 100 km en terrain ennemi qu'elle

compte bien conserver et fortifier. L'État-Major veut les défendre et les installations sont rapidement spacieuses et bien équipées (Léry, 1916) :

« Nous rentrons dans la tranchée allemande que nous venons d'enlever. Cette tranchée est profonde, étroite au sommet, évasée au fond, précédée d'un parapet très bas face à nos lignes, mais surélevé d'autre part vers l'arrière, ce qui empêche les nôtres de tirer sur les lignes allemandes, et qui permet à l'ennemi de s'abriter sur le bord même de la tranchée, au cours des contre-attaques. »

Du côté français, le terrain perdu doit être reconquis. L'esprit offensif et l'aptitude au mouvement sont primordiaux et la fortification, originellement temporaire, n'est qu'un moyen mais en aucun cas un but à rechercher. La fortification doit favoriser la marche vers l'ennemi et non stopper les troupes. En 1914 et en 1915, les tranchées restent donc sommaires, sans confort. De plus, la « noria » des unités ne leur donne pas l'envie de s'investir dans un secteur qu'elles pourraient quitter rapidement. Cette « noria » n'existe pas pour l'armée allemande. Les mouvements de troupe sont réalisés lors d'attaques massives ou de renfort. Certaines unités allemandes se sont battues du début à la fin de guerre dans le même secteur du front. Cette affectation spatiale entraîne une volonté de travaux de confort et de commodité des Allemands dans leur secteur dès le début du conflit.

2.1.4. Approfondissement du dispositif : 1916-1917

L'instruction sur les travaux de campagne à l'usage des troupes de toutes les Armes du 21 décembre 1915 est souvent considérée comme fondatrice des principes de fortification du front (Solard, 1935 ; Geagea, 2015 ; Tadorelli *et al*, 2016b).

La structure linéaire se métamorphose vers une structure en points d'appui conformément à l'instruction de 1915 sur les travaux de campagne et le système des centres de résistance. Les premières positions de résistance et de soutien sont généralement conservées, alors qu'en troisième position (dite « des réduits »), le réseau de défense s'arcoute sur des points d'appui (sommets d'interfluve, villages, ouvrages de franchissement et voies de communication). Ils sont fortifiés par un réseau de défense fermé appelé centre, réduit, bastion ou ouvrage abritant un poste de commandement. Cette structure permet le soutien d'Artillerie entre les réduits. L'ensemble du dispositif est relié par un réseau dense de boyaux desservant chaque position et ligne de défense.

Progressivement, la structure linéaire en bandes parallèles (Fig. 2.6A) laisse place à une structure discontinue créant des intervalles où le flanquement est soigné (Fig 2.6B). La structure de défense devient cellulaire. Par exemple, sur le front de Champagne, (fig 2.6C) les centres M, L, K et E en première ligne couvrent de tirs flanquants, les intervalles équipés de défenses accessoires (barbelés) alors que les ouvrages Morel et Davoust adossés sur la Voie Romaine servent de ligne de soutien. Seuls des boyaux de communication desservent les centres des ouvrages, sans tranchées intermédiaires.

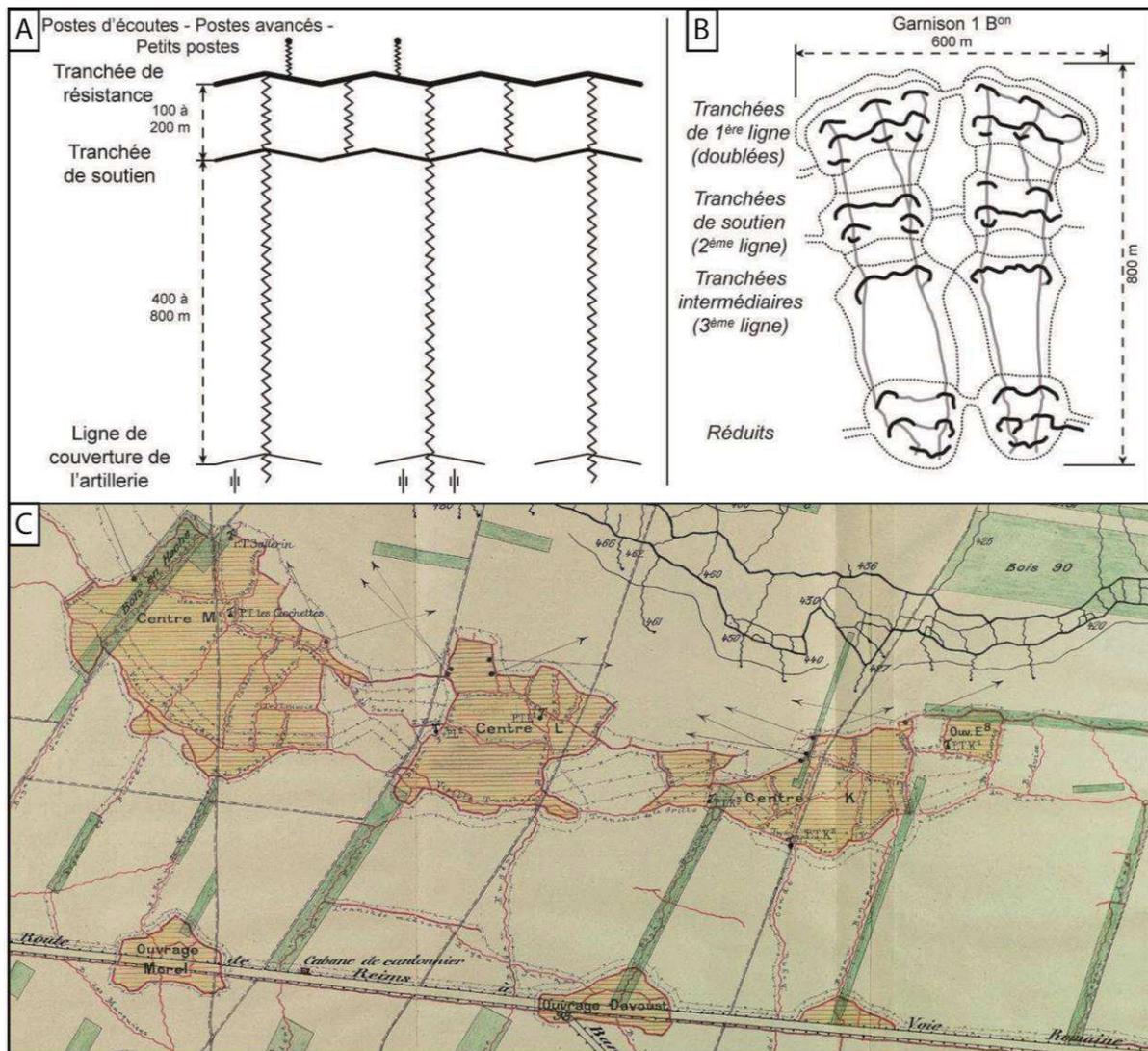


Fig. 2.6: A - Organisation ternaire et linéaire du réseau de défense. B – Organisation ternaire et cellulaire du réseau de défense (Source : Solard, 1935). C – Extrait d'un plan directeur au 1/5 000 avec réseau de défense cellulaire de 1916 (Centre M, L, K, E, O uvrage Morel et Davoust) (Source : Mémoires des Hommes : 26 N 528 010 7)

De 1916 à 1917, la lecture des plans directeurs et le retour d'expérience (Solard, 1935 ; Villate, 1925) montre clairement un épaississement du dispositif de défense sur 10, voire 15 km, qui se structure idéalement en 3 à 4 positions ou rideaux, composés au minimum de 3 lignes de tranchées se couvrant mutuellement (structure ternaire). La distance entre chaque position est donc fonction de la portée de l'artillerie de campagne (5 à 7 km). Cette profondeur du front s'accompagne de la multiplication des lignes de tranchées dans le premier rideau défensif, pouvant atteindre 14 parallèles du côté allemand en Argonne (Taborelli *et al.*, 2016b ; Villate, 1925) ce qui se traduit par des densités impressionnantes de tranchées et boyaux. L'analyse diachronique sous SIG du secteur de Souain permet de mettre en évidence les positions et l'épaississement du front de 1915 à 1918 (Fig. 2.7). En mars 1915, les Français établissent leur première position devant le village de Souain, alors que les Allemands ont déjà 3 positions, la première au contact du no man's land, la seconde 4 kilomètres en arrière et la troisième derrière le village de Sommepey. Après les deux batailles de Champagne de 1915, l'armée française reprend la première position allemande sur environ

4 kilomètres mais l'attaque sera stoppée par la seconde position allemande. Ce front reste statique mais sa densification est illustrée par la carte de mai 1918 avant le retour des attaques allemandes. Les allemands densifient leur structure de défense et creusent une quatrième position 6 kilomètres au nord de Sommepey. L'armée française établit également 4 positions, au contact du no man's land, devant et derrière Souain ainsi qu'au sud de Somme-Suippe. Les nombreuses attaques allemandes au printemps 1918 sont stoppées par la seconde position française, comme un retour à l'état initial de mars 1915. Cela illustre la faible portée stratégique des grandes offensives de la guerre de tranchées par la prise d'une seule position au sein d'un réseau de défense épais.

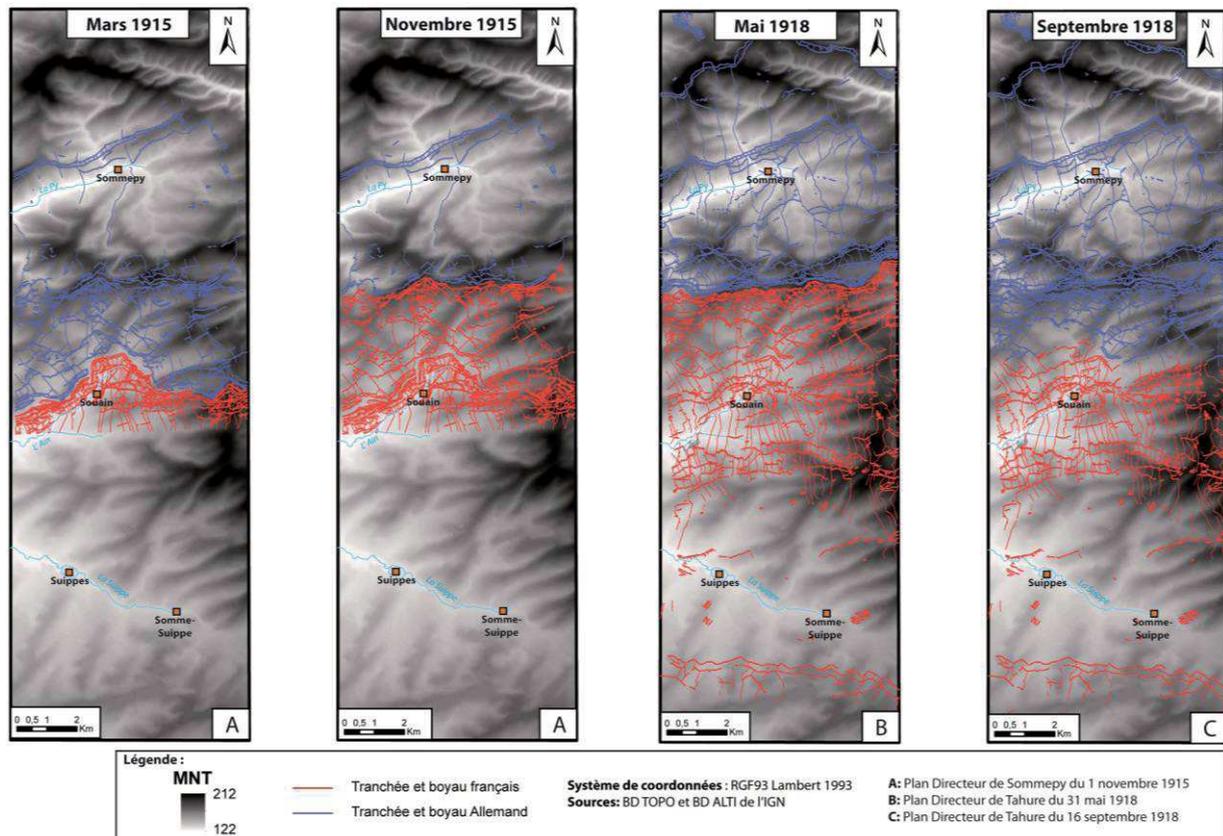


Fig. 2.7: Évolution de l'organisation du front de mars 1915 à septembre 1918 dans le secteur de Souain (Marne) d'après les plans directeurs de Sommepey du 1 novembre 1915 et de Tahure du 31 mai 1918 et du 16 septembre 1918.

2.1.5. Structure cellulaire et profonde : 1917-1918

Les offensives du Chemin des Dames et de Verdun, montrent que les premiers rideaux défensifs ne sont pas infranchissables, étant peu défendus suite au déluge de feu corrélatif aux concentrations d'artillerie. Par contre, les réduits, centres et ouvrages fermés résistent et permettent le tir de flanquement sur une percée de l'ennemi. Cette dernière est souvent bloquée par le manque de soutien des troupes de réserves. La densité d'occupation des premières lignes est diminuée au profit des points d'appui improvisés. De nombreux boyaux de communication sont reconvertis en « tranchées en bretelles » perpendiculaires au front, permettant le flanquement dans les intervalles. L'instruction sur l'organisation du terrain à l'usage des troupes de toutes les Armes du 22 août 1917 préconise le flanquement, la profondeur dans le dispositif où la première position joue non plus le rôle de résistance mais un rôle de protection (Solard, 1935). La résistance s'effectue alors à 6 ou 8 km, à partir de

tranchées arrière intactes que l'ennemi ne doit pas pouvoir attaquer et qui doivent être libérées au moment voulu avec une forte concentration de moyens. Le champ de bataille et les dispositifs de défense sont quadrillés ou cellulaires où le zonage opérationnel, en profondeur des troupes combattantes peut s'exprimer davantage, du Corps d'Armée aux groupes de combat.

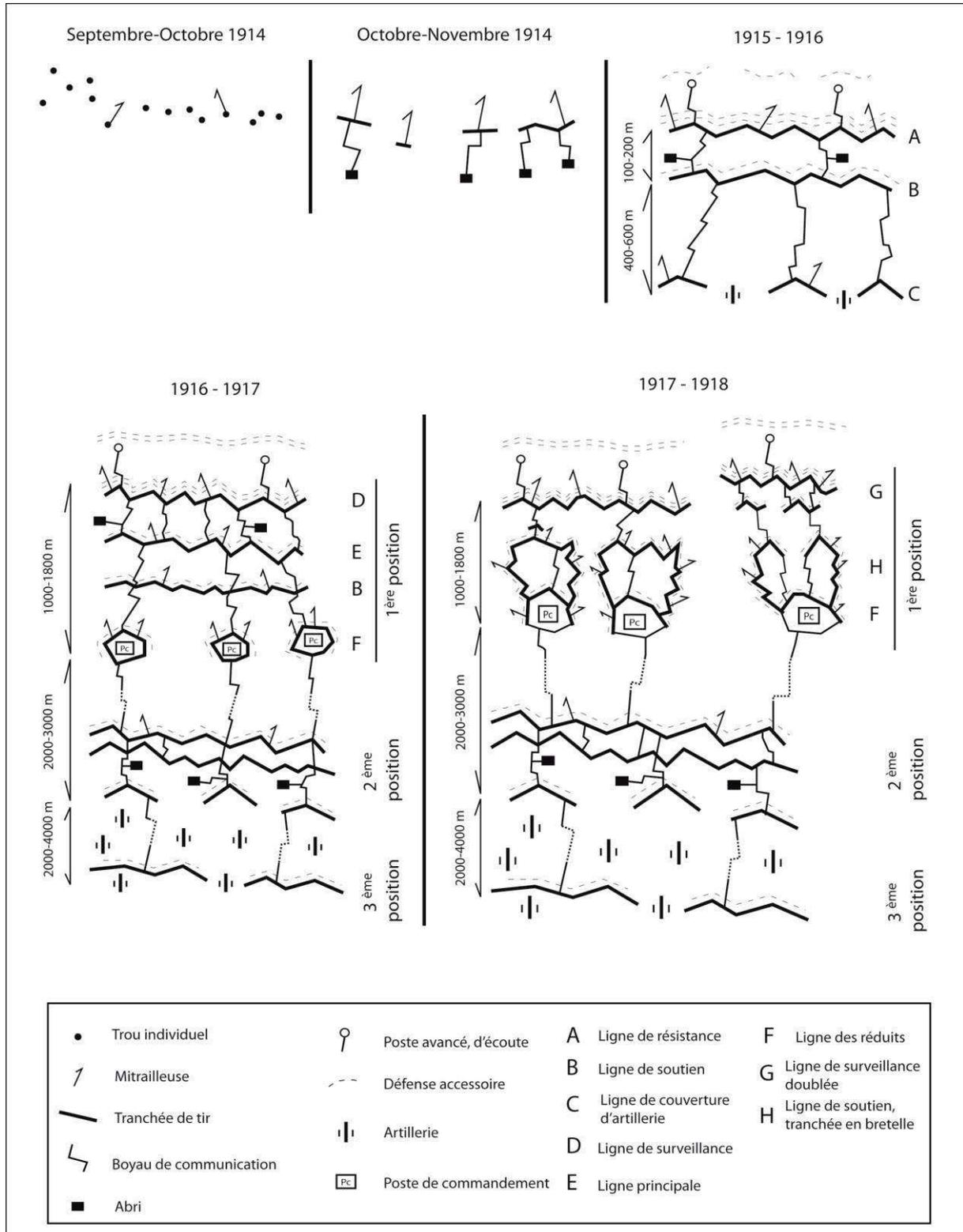


Fig. 2.8: Evolution des réseaux de défense de 1914 à 1918 (Source : Solard, 1935).

En résumé, 5 phases se distinguent correspondant chacune grossièrement à une année du conflit (Fig. 2.8). Les hommes, pendant la guerre de mouvement d'août à octobre 1914, se battent dans des trous individuels pour se protéger mais toujours prêts à attaquer. Les trous individuels se rejoignent et forment des éléments de tranchées en y installant des mitrailleuses couvrant les intervalles. À l'hiver 1914-1915, les éléments de tranchées se rejoignent pour former une ligne de défense constituée d'au moins 3 lignes de tranchées parallèles et reliées par des boyaux de communication. En 1916 et 1917, ce réseau de défense s'épaissit. Une ligne de réduits et d'ouvrages est installée à l'arrière des 3 premières lignes de défense et l'épaississement du front se poursuit sur environ 10 km. Enfin, de 1917 à 1918, les centres, réduits et ouvrages deviennent de véritables points d'appui, se protégeant l'un avec l'autre par des tirs de flanquement. Cette notion de centre de résistance permet une économie de forces mais une continuité du feu (Solard, 1935).

2.2. Défenses accessoires

À l'avant des tranchées, les soldats de chaque camp doivent se protéger d'une attaque de l'Infanterie ennemie. De redoutables obstacles naturels devant les réseaux de défense ou dans leurs intervalles, réalisés en bois ou en métal, ont pour but de retenir l'Infanterie ennemie sous le feu du défenseur.

Dès le creusement des tranchées, les arbres sont abattus en direction de l'ennemi formant des abattis, à la fois pour créer un obstacle, mais également pour dégager le champ de tir. Cette défense n'est possible qu'en lisière de bois ou à proximité. Elle est rapidement déchiquetée et détruite, voire incendiée, par l'Artillerie ennemie.

Inventé en 1874 aux États-Unis, le barbelé, ronce artificielle ou fil hérissé de pointes métalliques reste encore un symbole du premier conflit mondial, présent dans la mémoire collective. Il peut être décliné sous différentes sortes et reste la meilleure des défenses accessoires. Le réseau normal de fil de fer est constitué de piquets de fer plantés dans le sol, reliés par un entrelacement de fil de fer. Ces piquets peuvent être remplacés par des pieux à vis en T ou à fer rond, plus connus sous le terme de « queue de cochon » (Fig. 2.9A). Le fil barbelé doit être apposé sur chaque piquet, de manière assez lâche pour ne pas céder sous le souffle des obus (GQGA, 1915). François Baizet est stationné en Belgique en 1915 (Barou, 2015) :

« Je me mets au travail, pose des réseaux de fil de fer en avant de la nouvelle tranchée, en arrière de la nôtre, l'ancienne. Le terrain est trempé et boueux. On patauge et on tend les fils de fer barbelés sur les pieux. On entremêle cela à plaisir. Si les Boches viennent à se fourrer dedans, nous aurons la partie belle. Mais quel vilain et sale travail à faire! »

Les chevaux de frise sont des dispositifs mobiles, formés d'une armature légère et de barbelés emmêlés (Fig. 2.9B). Ils peuvent être rapidement portés dans le no man's land pour colmater une brèche dans le dispositif, ou quand le sol trop dur ne permet pas l'enfoncement de piquets. Les hérissons, en forme d'étoile, sont des baguettes de fer, reliées en leur milieu, entourées de fils de fer (Fig. 2.9C). Le réseau brun est une bobine de fer, éventuellement hérissée de pointes, qui se déplie facilement sur une trentaine de mètres (Fig. 2.9D). Son transport est facilité par sa rétractabilité sous la forme d'une couronne d'environ 1,30 m de diamètre. Ces obstacles doivent constituer une bande de 30 m de large, ou deux bandes de 15

m séparées par un couloir de 5 m. Même si ces structures défensives doivent ralentir l'attaque de l'ennemi, elles ne doivent ni freiner, ni diminuer la vitesse de marche lors d'attaque de son Infanterie. Les différents passages et trouées doivent être connus par les soldats pour l'attaque ou la contre-attaque (GQGA, 1915).

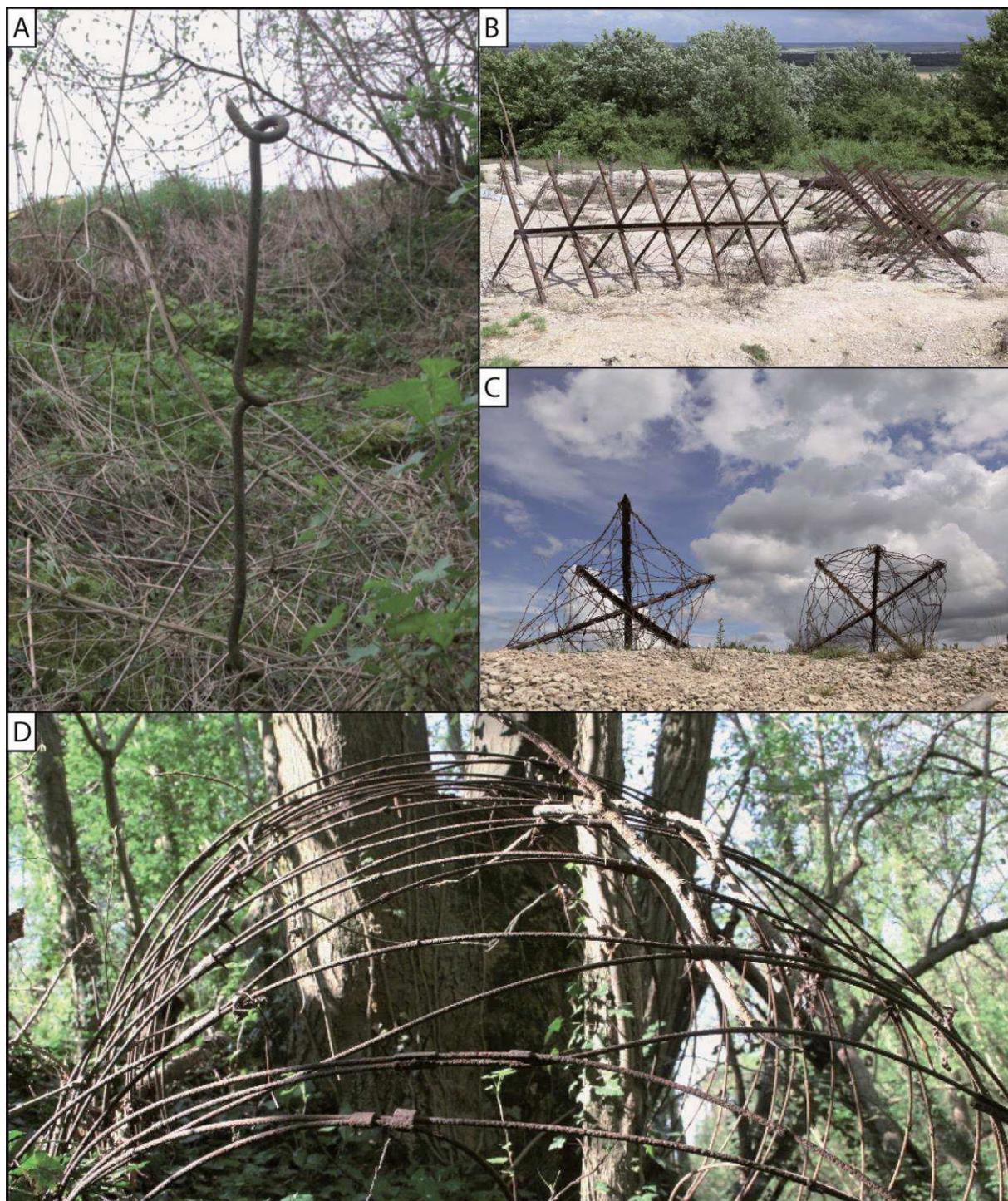


Fig. 2.9: A – Photographie d'une queue de cochon (Cliché : Devos A.). B – Chevaux de frise sur le site de la Main de Massiges (Cliché : Taborelli P.). C – Hérisson sur le site de la Main de Massiges (Cliché : Devos A.). D – Photographie des restes d'un réseau brun (Cliché : Devos A.).

Associés aux obstacles pour ralentir l'Infanterie, des dispositifs sont placés dans le no man's land pour blesser, voire tuer les soldats ennemis. Les blessures concernent les pieds ou les mollets, causées par des pieux aiguisés ou des planches à clous (Fig. 2.10A). Apparues dès l'Antiquité, des chausse-trapes (ou pied de corbeau) sont également retrouvées dans le no man's land (Fig. 2.10B). Ce piège métallique est constitué de pointes en forme de tétraèdre, *de facto* une pointe est toujours orientée vers le haut. Le lacet ressemble au collet du piégeur et va serrer le pied du soldat lorsque celui-ci l'engage dans l'une des boucles (Fig. 2.10C). Un « piège à loup » à dimension humaine (environ 40 cm de diamètre) peut également piéger le soldat, et blesser son pied ou son mollet comme celui retrouvé lors d'un diagnostic archéologique à Champigny en décembre 2017 près de Reims par l'INRAP (Fig. 2.10D). Enfin, la fougasse est l'ancêtre de la mine anti-personnel. Une charge explosive (poudre ou mélinite) est placée dans le fond d'un trou. La détonation se produit quand un soldat ennemi touche le fond. La fougasse-pierrier est réalisée de la même façon avec un remblai de pierres. Lors de l'explosion, les pierres peuvent être projetées jusque 60 m aux alentours (GQGA, 1915) (Fig. 2.10E).

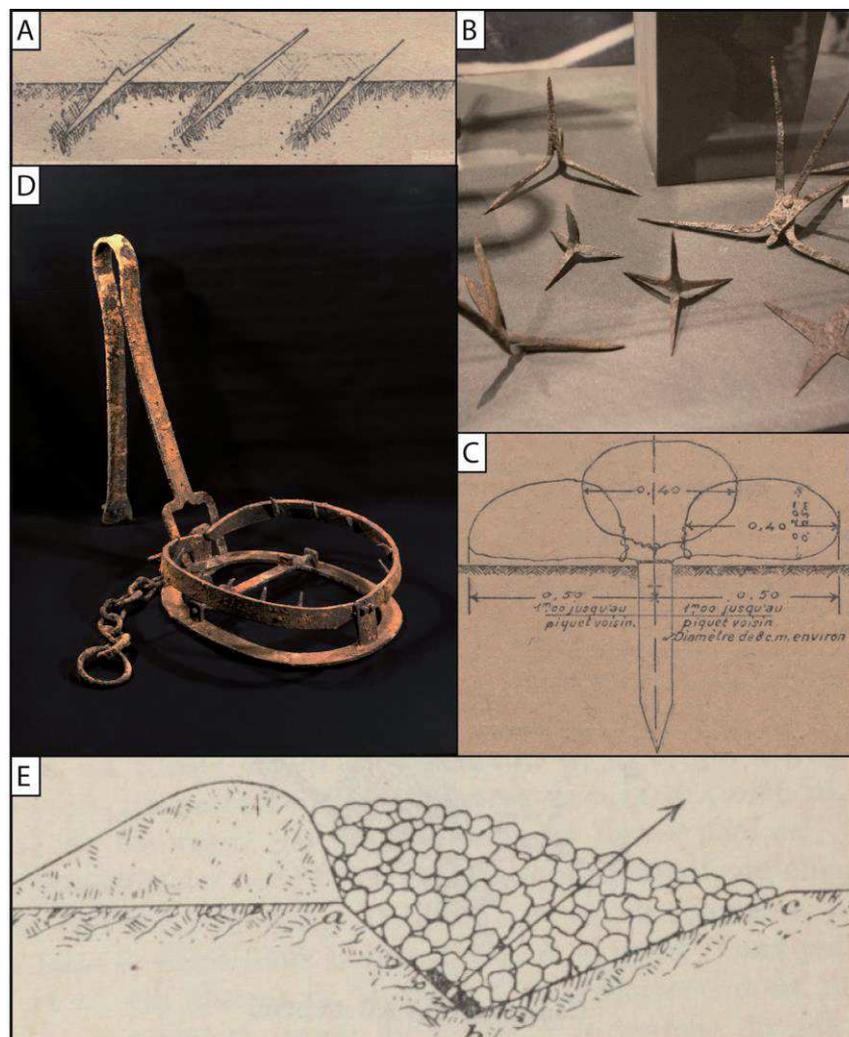


Fig. 2.10: A – Pieux aiguisés (GQGA, 1915). B – Photographie de chausse-trape au musée de Meaux (Cliché : Devos A.). C – Piège en lacet (GQGA, 1915). D – Photographie d'un « piège à loup » (Cliché : Bigot JJ, INRAP). E –Fougasse-pierrier chargée à la mélinite (GQGA, 1915).

Ces obstacles et pièges doivent être détruits et neutralisés avant toute attaque de l'Infanterie. Pendant les nuits antérieures à l'attaque, les soldats doivent sectionner à l'aide de pinces les différents réseaux de fils de fer pour créer des brèches et des ouvertures. La préparation de l'Artillerie doit également affaiblir au maximum les défenses accessoires de l'ennemi pour ainsi faciliter la prise de leur tranchée. Des obus spéciaux, à fusée allongée, sont utilisés pour éclater à la surface du sol (et non dans le sol) et démanteler les réseaux de fils de fer. Les défenses accessoires ennemies sont matérialisées avec précision sur les plans directeurs à grande échelle (1/5 000 ou 1/10 000) avec un figuré hachuré alors que les défenses accessoires alliées n'y sont pas retranscrites (Fig. 2.11). Ce report permet d'augmenter l'efficacité des tirs avec un meilleur réglage de l'Artillerie et l'étude fine de l'Infanterie pour connaître parfaitement les trouées et ouvertures dans le dispositif de défense. Une mauvaise préparation de l'Artillerie et une méconnaissance du secteur peuvent transformer ces réseaux de fils de fer en un « étendoir à cadavres », décrit ou représenté dans la littérature de guerre et les gravures, dessins et aquarelles des combattants.

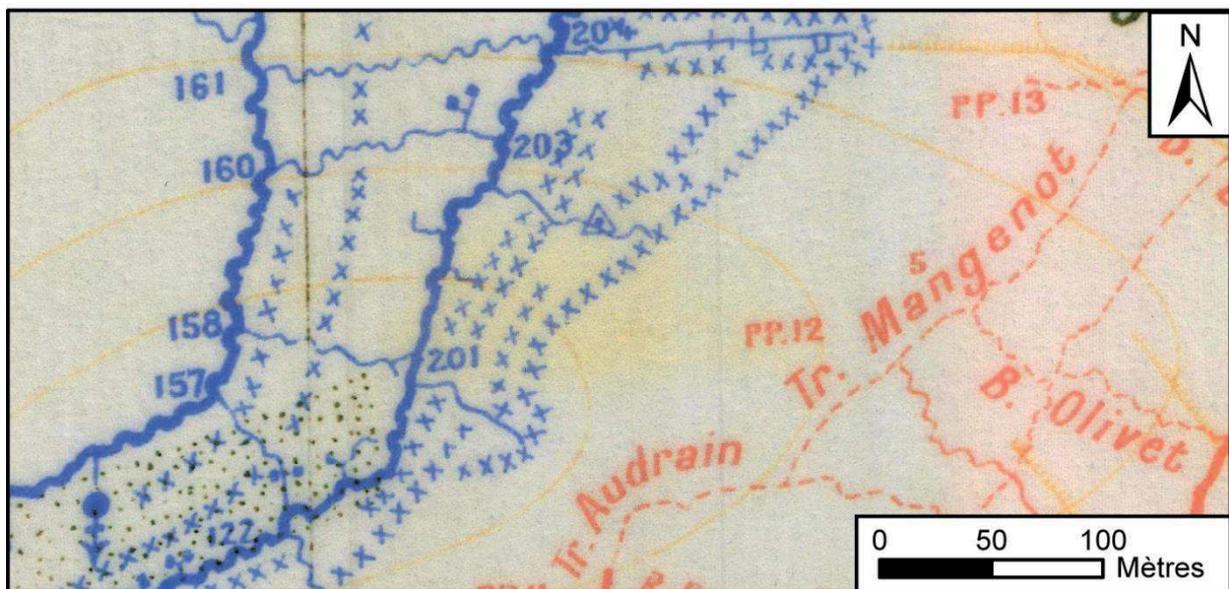


Fig. 2.11: Réseaux de fils de fer allemands (figurés avec des croix bleues) sur l'extrait du plan directeur au 1/5 000 de la Cote 193 du 23 avril 1917.

2.3. Les principes de la structuration spatiale

L'étude qualitative des réseaux de défense, à la lecture des plans directeurs et des manuels d'instructions militaires témoigne d'une organisation spatiale qui obéit à des logiques de sites d'ordre naturel (topographie, géomorphologie, hydrographie, géologique) et à des principes militaires (crête de tir, portée d'artillerie, site d'observation).

2.3.1. Réseau de défense et le rôle de la géomorphologie.

Le tracé du front sur 750 km découle des plans successifs et des batailles de la guerre de mouvement de 1914 qui contourne le premier réseau de défense des forts Séré de Rivières utilisant les fronts de côte. L'organisation spatiale des lignes de tranchées obéit principalement aux potentialités du terrain, et plus spécifiquement aux reliefs locaux et

régionaux (croupes, mamelons, buttes, et talus), offerts aux combattants. L'importance du relief est davantage développée dès le début du conflit par les Allemands que par les Français. Dans *Les Conditions Géographiques de la Guerre*, le capitaine Villate en 1925 écrit :

« On pourrait croire à cette action en voyant l'entrain des troupes allemandes à courir vers l'observatoire, tandis que nous allions dans les villages et les bois, points d'appui naturels de moindre importance que les hauteurs d'où on voit ».

Cette course aux observatoires par l'armée allemande à la fin de la guerre de mouvement lui permet de s'établir sur des sites privilégiés : Les Épargnes près de Verdun, Montfaucon et Vaucquois en Meuse, les Monts de Champagne en Champagne sèche, les buttes-témoins de Berru et Brimont près de Reims, ainsi que la rive droite de la vallée de l'Aisne. Cette situation est obsédante et dangereuse pour les Français car elle ne permet pas ou très peu de mouvement durant le jour. De plus, ces positions hautes sont d'autant plus importantes si le terrain est plat. Ces positions feront l'objet d'attaques ardentes et meurtrières pendant les 4 années du conflit. Ce manque d'observatoire peut être remplacé en partie par l'observation aérienne, cependant celle-ci est fonction de beaucoup de paramètres (climatiques principalement) alors que l'observatoire terrestre est permanent et précis (Villate, 1925).

Les secteurs de plaine sont des zones privilégiées d'attaques de grande envergure. La Première et la Seconde Bataille de Champagne (1915), l'offensive Ludendorff (mai 1918) ou la *Friendensturm* (juillet 1918) sont des attaques lancées dans des secteurs de plaine. L'Infanterie peut marcher facilement, l'Artillerie peut tirer loin, vérifier l'efficacité des tirs et se déplacer rapidement. Cependant, ces secteurs seront également les plus fortifiés du front, craignant toujours l'attaque de l'adversaire.

Dans les secteurs à reliefs plus prononcés (Argonne, plateaux jurassiques et tertiaires) les ravins, formes d'incisions fluviales et de raccordement entre la surface des plateaux et les fonds de vallées appelés Barribans dans la gaize d'Argonne, Creuses en Picardie (Taborelli *et al.*, 2016a), Grouards dans le Soissonnais peuvent jouer un rôle de protection lors du cheminement des troupes ou de barrière naturelle (versants abrupts) à l'attaque. Le ravin peut également accueillir l'Artillerie, afin de masquer la lueur du canon lors du tir, ou abriter les ballons-captifs. Ces tirs ne peuvent être effectués que d'après le plan directeur, sans visibilité sur l'objectif à atteindre. Les dépressions ou vallonnements présentent des caractères sécuritaires pour trouver du repos ou du calme pour les soldats. Cependant, l'Artillerie et les tirs courbes peuvent atteindre ces zones, de surcroît vulnérables à l'accumulation des gaz de combat (Villate, 1925).

Enfin, le front s'établit dans un secteur de montagne, le massif des Vosges. Ce sont des régions peu propices aux combats, mais excellentes pour les lignes défensives par l'escarpement des versants à gravir et la couverture forestière qui masque les structures de défense. Le rôle de l'Artillerie est secondaire et n'aura que des missions sur des objectifs précis. En position de surplomb, la défense est facilitée par la mitrailleuse ainsi que par le jet et le roulement de grenades sur le versant (Villate, 1925).

La structure ternaire de chaque position permet d'exploiter toutes les potentialités de ces formes de reliefs (Fig.2.12). Au pied de ces formes (A), la ligne de feu bénéficie d'un feu rasant, et d'une bonne couverture de l'Artillerie qui exploite les observations faites en B ou C.

Mais les potentialités de creusement d'abris est faible car la nappe phréatique est proche de la surface (abris légers peu profonds, niches). La partie supérieure des pentes ou « crête militaire » (B) offre toujours de bons champs de tirs et de bonnes vues mais, étant exposée aux vues de l'ennemi, va être plus facilement battue par son Artillerie alors que la couverture de l'Artillerie amie sera plus difficile entre A et B. Sur ce site de crête militaire, la zone non saturée plus épaisse va permettre le creusement d'abris profonds et vastes (abris cavernes, *stollen*). La crête topographique (C) ne permettra que l'observation lointaine (observatoires) mais avec des angles morts locaux et un champ de tir limité. La contre-pente (D) permet de se soustraire aux yeux de l'ennemi dont l'Artillerie restera inefficace garantissant la pérennité du système de défense, son renforcement en toute sécurité. Ce site n'offrant qu'un champ de tir court, est donc propice à l'abri. De plus il bénéficie d'une bonne couverture d'Artillerie dont les impacts sont visibles au loin. Dans les dépressions (E), on observe facilement l'ennemi franchissant les crêtes, on bénéficie d'un champ de tir fichant et d'un bon appui d'Artillerie qui sera très efficace grâce aux sites d'observation de l'arrière mais l'ennemi découvre les positions et les tranchées doivent être surélevées pour éviter l'inondation alors que le creusement est proscrit. On comprend ici l'intérêt tactique des fronts de côte, des buttes, des croupes et mamelons dont le flanc exposé à l'ennemi est favorable au tir, alors que le sommet permet l'observation lointaine ; le flanc non exposé est davantage utilisé dans le cadre de la guerre de position régie par l'artillerie lourde pour l'abri et les tranchées de réserves. L'avantage de la multiplication des lignes de tranchées est d'exploiter toutes ces potentialités dans un seul rideau de défense. La position regroupant plusieurs lignes de tranchées effectue en réalité la continuité entre des points d'appui ancrés sur le relief.

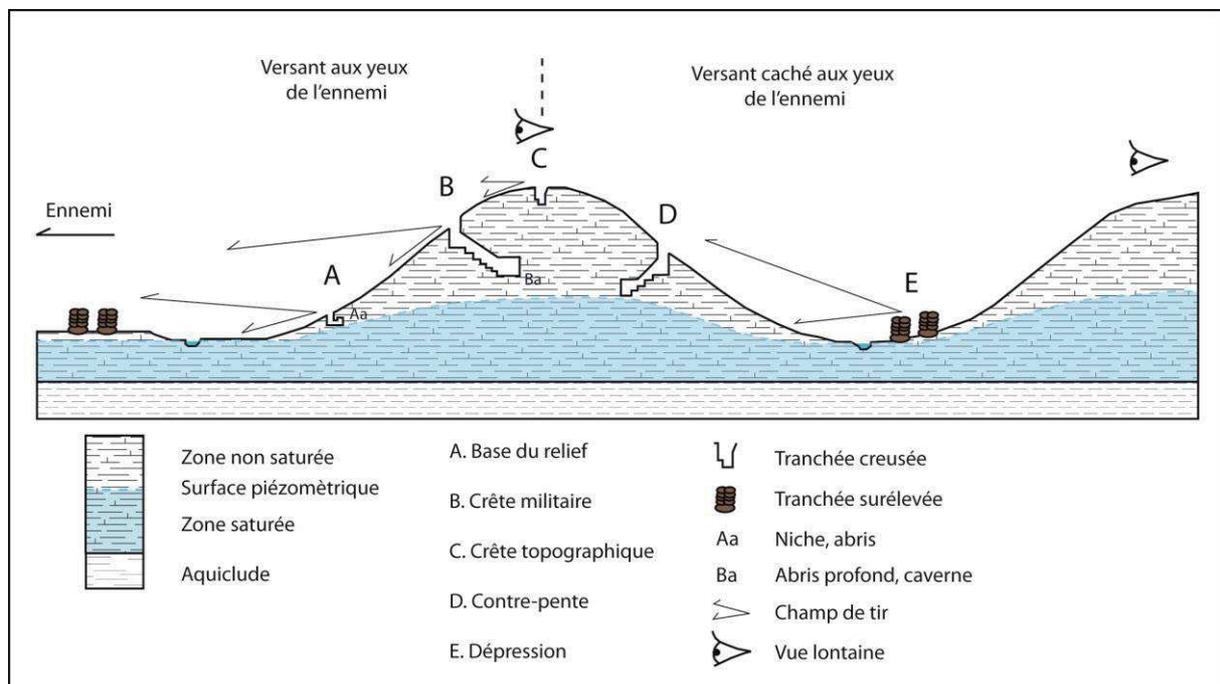


Fig. 2.12: Potentialités militaires d'une croupe topographique face à l'ennemi (d'après le GQG, 1915, et Brooks, 1920).

2.3.2. Réseau de défense et le rôle de la géologie.

À l'échelle du site, la géologie est incontestablement déterminante sur le champ de bataille (Hanot et Simien, 2017), comme le relief, l'hydrographie et la géomorphologie locale. Même si, pour les militaires, les conditions tactiques prévalent sur les conditions géologiques, le terrain, et notamment la nature des roches, constitue la première donnée du combat notamment dans la guerre de position. La victoire est souvent assimilée à l'exploitation de toutes les potentialités tactiques du terrain (Villate, 1925). La nature des terrains conditionne non seulement la praticabilité des armées (en saison sèche, en saison humide), l'aptitude au creusement des tranchées, des boyaux et des souterrains, mais aussi la pénétrabilité des obus, la résistance des cavités creusées (abris, creutes, rameaux de mine) à l'obusage, les ressources en eau, le degré de conservation des structures de défense, leur visibilité, les potentialités de faisabilité des bases aériennes, etc... La résistance des géomatériaux induit clairement la facilité de creusement des réseaux de tranchées. Les calcaires du Lutétien mais surtout du Jurassique (Oxfordien, Bajocien, Bathonien) difficiles à creuser s'opposent aux craies tendres du Crétacé ce qui peut expliquer l'hétérogénéité spatiale des densités de tranchées.

Les consignes réglementaires sont respectées au mieux dans la phase de creusement dans des terrains cohérents (craie) sans confortation de claies ou de fascines pour la tranchée de tir (Fig 2.13A) ou des boyaux de communication (Fig 2.13B). En terrain humide (Fig. 2.13C), ou lorsque la nappe est sub-affleurante, le creusement est proscrit, les communications sont difficiles, inondées et nécessitent un linéaire impressionnant de caillebotis, une forte consommation en bois et en hommes et un dispositif d'exhaure (pompes, puisards, drains). La tranchée est surélevée et le masque est donc intégralement assuré par des digues de remblais dont les talus intérieurs sont clayonnés, revêtus de bois et de fascines. Les zones humides sont donc généralement moins fortifiées et moins dotées de boyaux de communication au profit des pistes. En terrain rocheux difficile à creuser (fig.15D-E), le profil réglementaire diminue l'incision à 1,2 m au profit du parados et de la crête de feu plus épais, de même sa largeur est réduite à 1 mètre au lieu de 1,3 m.

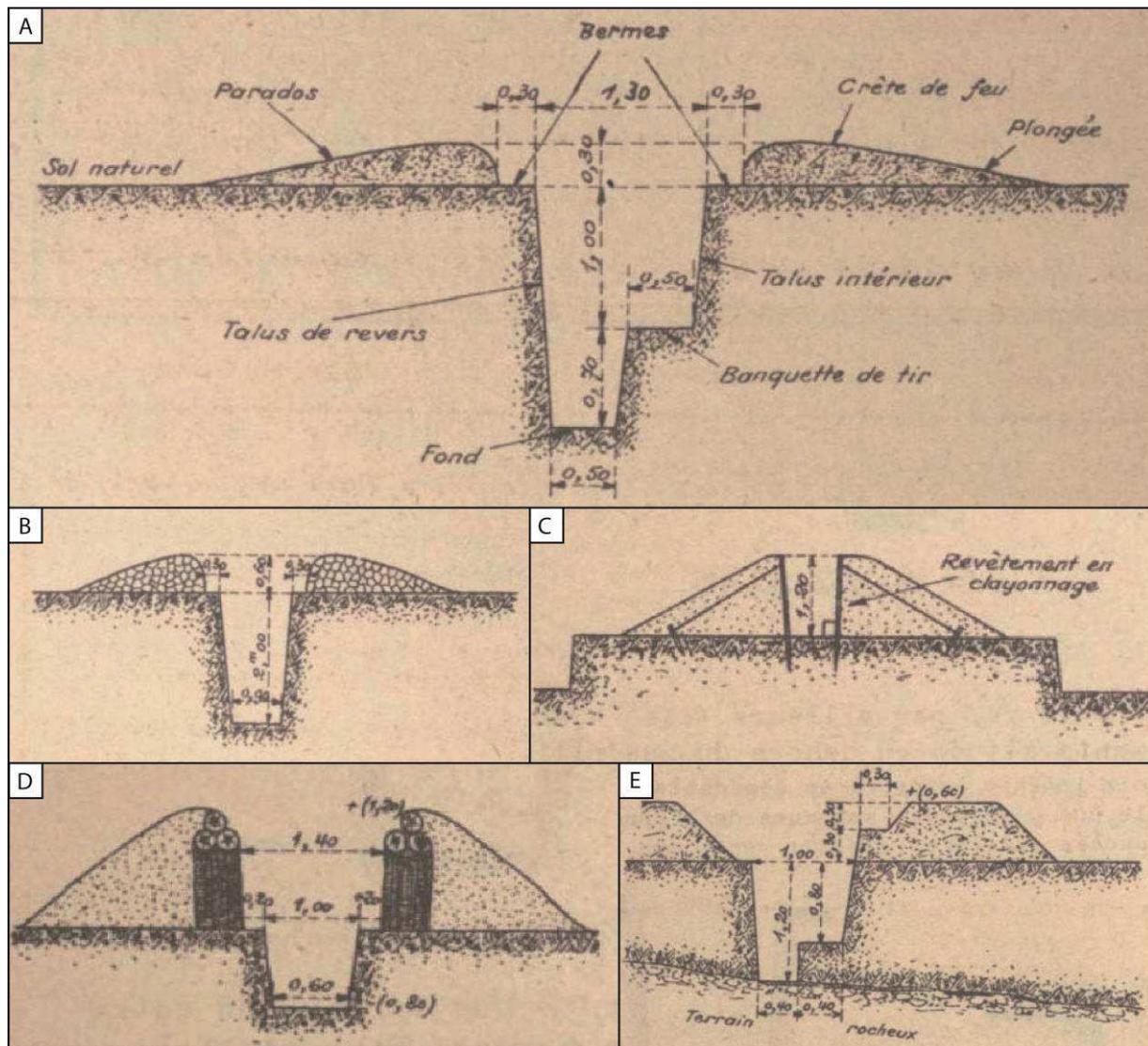


Fig. 2.13: Profils transversaux réglementaires de tranchée (A), de boyau (B) en terrain ordinaire, de boyau en terrain humide (C) et rocheux (D), et de tranchée en terrain rocheux (E) (sources : Solard 1935).

Le roulement des troupes dans l'armée française va contribuer à développer chez les poilus une culture commune des « terroirs géologiques ». Dans les écrits des combattants, cette perception de contrastes spatiaux relatifs à la nature des sols est retrouvée de manière récurrente, comme pour Gabriel Chevallier stationné en Champagne (Chevallier, 1930) :

« Sur notre droite, on découvre au loin une étendue verdoyante qui contraste avec la région nue et grise, comme saharienne, que nous avons sous les yeux. On nous dit que c'est l'Argonne ».

Jean Léry note la différence entre les deux pays de Champagne et d'Argonne (Léry, 1916) :

« Le sol y est sec. Au lieu de l'Argonne fangeuse et boueuse, c'est déjà le terrain crayeux de Champagne ».

Rarement dans les écrits de combattants, la nature du sol est abondamment décrite. Seuls principalement les officiers ou médecins avec une culture générale, et surtout géologique,

développée, analysent et décrivent lors du creusement des tranchées la géologie du secteur. Le lieutenant Ernst Jünger est stationné à Regniéville en Meurthe-et-Moselle sur les calcaires du Bajocien (Jünger, 1920) :

« Un géologue aurait été ravi par cette position. Les boyaux d'approche passaient successivement à travers six couches, du calcaire corallin à la « marne de Gravelotte », où était creusée la tranchée de combat. La roche d'un brun jaune, grouillait de fossiles : le plus fréquent était un oursin plat, en forme de petit pain, dont le test saillait par milliers aux parois de tranchée. Je ne pouvais traverser le secteur sans en rapporter dans mon abri plein mes poches de coquilles, d'oursins et d'ammonites ».

Stationné dans la craie de Champagne, il observe des marcassites composées de disulfure de fer (Jünger, 1920) :

« L'énorme couche de craie, dont les pelles de tranchées brisaient sans peine la texture lâche. Des étincelles vertes jaillissaient quelquefois, quand l'acier heurtait l'une des boules de pyrite, grosses comme le poing, dont la pierre était parsemée. Elles étaient faites de nombreux cristaux carrés, rassemblés en sphère, et avaient, une fois ouvertes, un éclat rayonnant et doré ».

Cette culture de diversité des conditions géologiques du front est cristallisée sur des secteurs incontournables et identitaires dans la conscience collective des combattants et des civils par voie de presse, comme Verdun, la Main de Massiges, le Chemin des Dames ou la Pompelle, qui deviendront après-guerre des sites mémoriels d'intérêt national. Les guides illustrés Michelin des champs de bataille (1914-1918) contribuent également à l'entretien de cette conscience collective des « terroirs géologiques » avec leur encart « aperçu géographique ».

2.3.3. Les moyens de creusement

2.3.3.1. Pelle, pioche, sinuosité

La tranchée, longue et étroite, plus profonde que large est devenue le symbole de ce premier conflit mondial. Son creusement a nécessité des travaux considérables par les deux armées et longuement décrites dans les manuels d'instructions militaires. Les conditions de creusement varient selon la résistance des matériaux. Dans les Calcaires jurassiques et les Calcaires grossiers du Lutétien, l'emploi de marteaux-piqueurs, de pistolets de mine s'impose alors que dans les terrains tendres mais cohérents (craie, gaize), la pioche, le pic et la pelle suffisent. Les manuels militaires du Génie prévoient outils et ressources humaines différents selon la nature des terrains. Sur des terres ordinaires, l'équipe d'un piocheur pour deux pelleteurs passe, sur des terrains lourds ou terres fortes, à un piocheur pour un pelleteur (Ecole du Génie, 1914). En moyenne les prévisions de matériel sont de 12 000 pelles, 12 000 pioches, un million de sacs à terre, parmi les 8000 tonnes de matériel à transporter pour 8 km de front (soit une tonne par mètre linéaire) uniquement dans le cadre de la préparation d'une offensive (GQG 1918). Ces chiffres sont modulés selon la résistance des matériaux. Le travail peut être effectué soit en ligne, soit en sape (ou par le bout) quand le travail en ligne est impossible. Le travail en ligne permet un meilleur rendement, jusqu'à 4 m³ par homme et par jour soit une

longueur de tranchée de 2 m par 2 m de profondeur. La main d'œuvre (soldats de toutes Armes) est présente en très grand nombre et le creusement des réseaux de défense est très rapide, surtout caché des yeux de l'ennemi. Les travaux près du no man's land sont plus périlleux, réalisés « par le bout » et souvent la nuit.

Le tracé des tranchées et des boyaux de communications est toujours sinueux, à la fois pour dissiper le souffle et stopper les éclats de l'obus projetés dans la tranchée mais aussi pour empêcher le tir d'enfilade si l'ennemi s'y installe. A ce titre, il est difficile de connaître le développement total des réseaux de tranchées de la Grande Guerre sans l'apport des plans directeurs où leur tracé est souvent stylisé. On peut néanmoins proposer un indice de sinuosité de 1,36 pour les tranchées et de 1,1 pour les boyaux de communications (Devos *et al.*, 2015b). Ce tracé est jalonné avant le début du creusement et peut être à crémaillère, sinueux ou à traverses (Fig. 2.14A-B). Ce dernier, le plus répandu, requiert des travaux plus longs mais est particulièrement recommandé contre les tirs d'enfilade avec des traverses espacées de 12 à 15 m (Fig. 2.14A). Lorsque la traverse n'a pas été conçue lors du creusement initial, elle peut être constituée par clayonnage, par gabion, par sacs à terre ou par coffrage rempli de terre rapportée. De fausses tranchées peuvent également être creusées, non destinées à être occupées mais pour tromper les observateurs ennemis. Elles peuvent également servir de pièges, avec un tracé rectiligne, protégées par une mitrailleuse à leur extrémité (Fig. 2.14C).

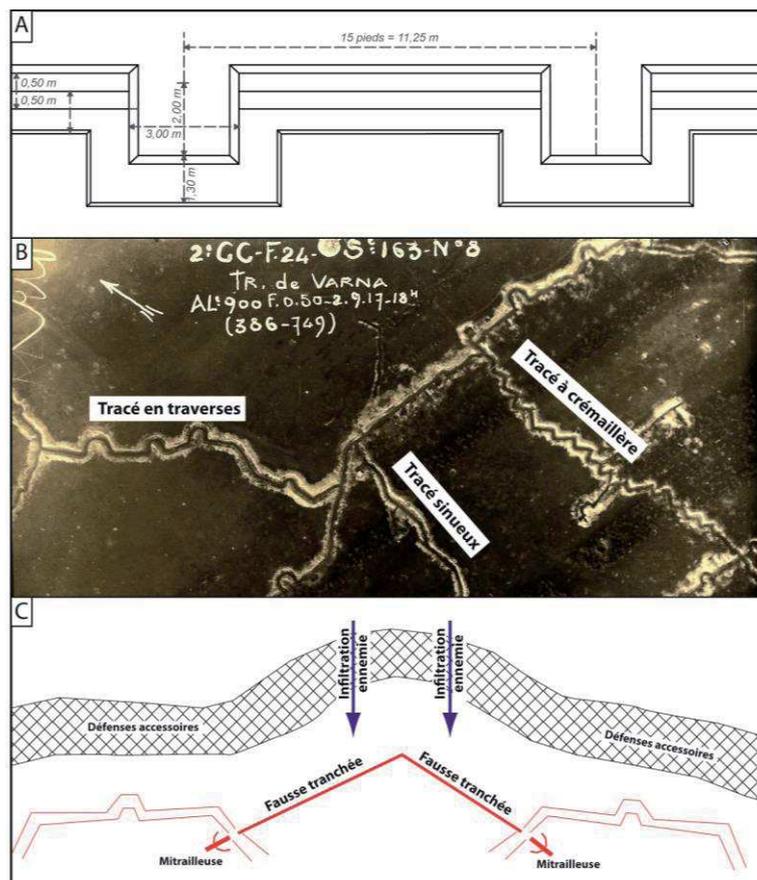


Fig. 2.14: A : Plan d'une tranchée en traverses (source : GQGA-EM, 1917). B – Photographie aérienne du secteur de la Pompelle des différents tracés de tranchées dans la craie de Champagne (Source : Collection fort de la Pompelle, Musée de Reims). C – Dispositif de fausses tranchées lors d'attaques ennemies (Source : GQGA, 1915).

2.3.3.2. Machines à creuser

Des machines à creuser les tranchées, excavatrices ou « loco-fouilleuses » sont testées et utilisées dans la craie (Fig. 2.15A). Ce sont des excavateurs automobiles à godets (Fig. 2.15B) ou électriques (système Legrand-Normand et d'Haille, systèmes américains) (Fig. 2.15C-D) ou à chenilles creusant à 2,25 m de profondeur sur une largeur de 0,6 à 1,2 m (Crosnier de Varigny, 1915 ; Lugard 1917). Les terres extraites déposées sur les bords de la tranchée constituent la crête de feu et le parados, ce qui détermine peu de travaux de parachèvement. Ces machines sont adoptées par la section technique du Génie dès novembre 1914 mais doivent s'adapter aux conditions de guerre, à savoir travailler sur le sol en seconde et troisième position mais aussi dans la tranchée, donc à proximité de l'ennemi (terrassier automobile de tranchées).

Dix excavatrices électriques sont mises en chantier et les premiers essais sont réalisés en septembre 1915 en Champagne (Berzieux) dans la craie (Fig. 2.15E) où les premiers rendements furent peu concluants (réalisation d'un boyau de 80 m de long à raison de 2 m/h, Legrand, 1920). Dans les sables cuisiens, les rendements atteignent localement 4 m/h aux environs de Soissons et de Lizy-sur-Ourcq. En juin 1916, l'utilisation des machines est confrontée aux silex de la craie qui nécessitent de remplacer un godet sur deux par des pioches et provoquent une baisse de rendement à 1,6 m/h. Les tests effectués montrent que l'utilisation des machines est réservée à la craie (sans silex) et à la gaize où les rendements moyens atteignent 5 m/h après les modifications alors que pour les autres roches plus dures il faut renoncer à la mécanisation (Legrand, 1920). Compte-tenu de la résistance mécanique de la craie, la plupart des travaux mécanisés sont donc effectués en Champagne dans la région des Petites Loges en avril 1916, (2-3 m/h), à Mourmelon, à la ferme d'Alger en mars 1918, au Mont sans Nom en 1917 (Anonyme, 1922). Avec la montée en puissance de l'Artillerie, l'enterrement des réseaux téléphoniques s'impose également, concernant les services téléphoniques des armées qui en commandent une vingtaine d'exemplaire. L'utilisation d'un nouvel excavateur automobile sur châssis de camion, souvent camouflé, révolutionne le creusement avec des rendements de l'ordre de 25 m/h en terrain « ordinaire », 16 à 20 m/h dans la craie de Champagne et 18 m/h en terrain marneux. Le succès fut tel que la IV^{ème} Armée a réalisé avec 20 excavateurs 600 km de tranchées creusé de manière mécanique pour la défense et l'enterrement des communications. Mais les courbes larges du tracé limitent ces engins aux boyaux de communication et aux services téléphoniques. Ils furent utilisés dans les camps retranchés de Paris, de Toul et de Besançon jusqu'en Russie.

Dans le cadre de diagnostics ou fouilles archéologiques autour de Reims, nous retrouvons quasi systématiquement des tranchées de communications téléphoniques étroites, remarquablement rectilignes, manifestement creusées par des excavatrices (Fig. 2.15F). Leur recoupement en fouille met en évidence une section transversale de 50 cm de largeur avec des câbles téléphoniques. Le tracé de ces réseaux enterrés est représenté de manière aléatoire sous la forme de tirets sur les plans directeurs.

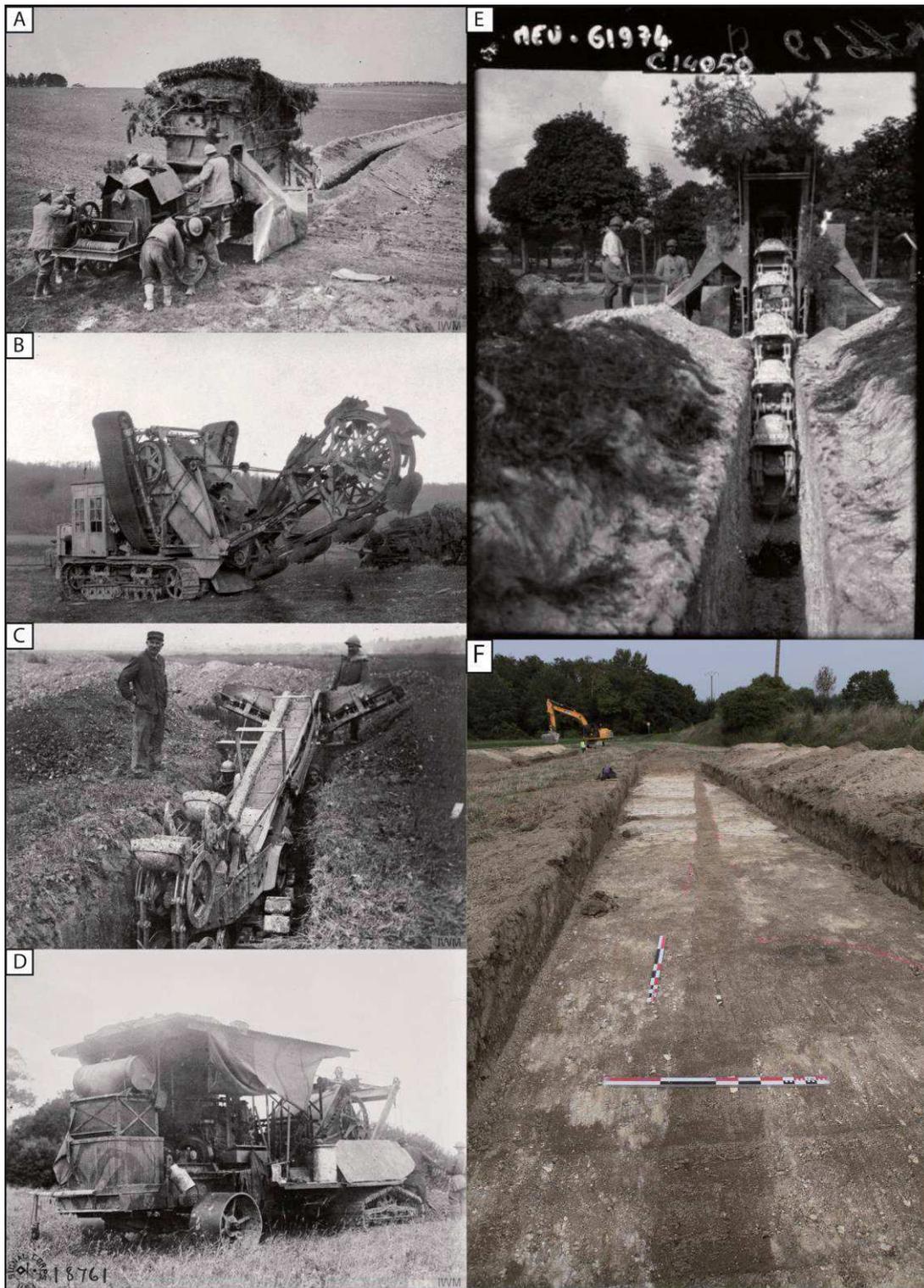


Fig. 2. 15: Machines à creuser les tranchées, excaveuses, ou locofouilleuses, A - Vue avant de l'excavatrice automobile dans la craie de Champagne (Source : IWM). B - Machine allemande à godets (San Diego Museum). C - Excavatrice électrique Legrand. D - Excavatrice américaine à chenilles (Source : IWM), E - Vue arrière de l'excavatrice française dans la craie en action et entreposée dans un village (Source : BNF gallica). F - Photographie d'une tranchée de communication téléphonique en diagnostic archéologique INRAP à Sillery (51), (Cliché : Devos A.).

2.3.4. Archéologie pendant le conflit

L'archéologie française avant le conflit, notamment en Champagne, est une activité individuelle de collectionneurs, une passion ni structurée, ni organisée. La découverte la plus connue se trouve sur les versants de Marais de Saint-Gond par le Baron de Baye, où une centaine d'hypogées néolithiques ont été fouillées, une partie servant de refuges précaires aux habitants du 5 au 6 septembre 1914. En 1907, la création de la société archéologique champenoise tente de réunir les différents collectionneurs pour le partage d'informations et la publication de 4 bulletins annuels. La guerre de mouvement de début du conflit entraîne le pillage des collections qui ne peuvent être mises à l'abri. Des collections seront entièrement détruites par les bombardements de l'Artillerie comme la collection de Jules Dupuis à Sommepey (51) ou du Palais du Tau de Reims. À Courtémont, la collection de Georges Goury est mélangée aux gravats de sa ferme et sert de remblai aux chemins avoisinants. La collection Gillet à Reims fut détruite puis reconstituée pendant l'entre-deux guerres mais pillée dès 1940 par l'armée allemande. À Hauviné, l'armée allemande occupe le village pendant 4 ans et pille la collection de Louis Simonet. La collection du Baron de Baye a été envoyée avant le début de la Guerre à Saint-Germain-en-Laye et quelques pièces restées à son château sont également volées (Charpy, 2017).

Dans le cadre de la guerre de position, le creusement, la confortation des réseaux de défense et le grand remuement des terres s'accompagnent potentiellement de nombreux recoupements fortuits avec des structures archéologiques préalables dont l'enchevêtrement apparaît nettement aujourd'hui en photographie aérienne par des indices phytographiques ou dans le cadre des opérations archéologiques (Fig. 2.16).

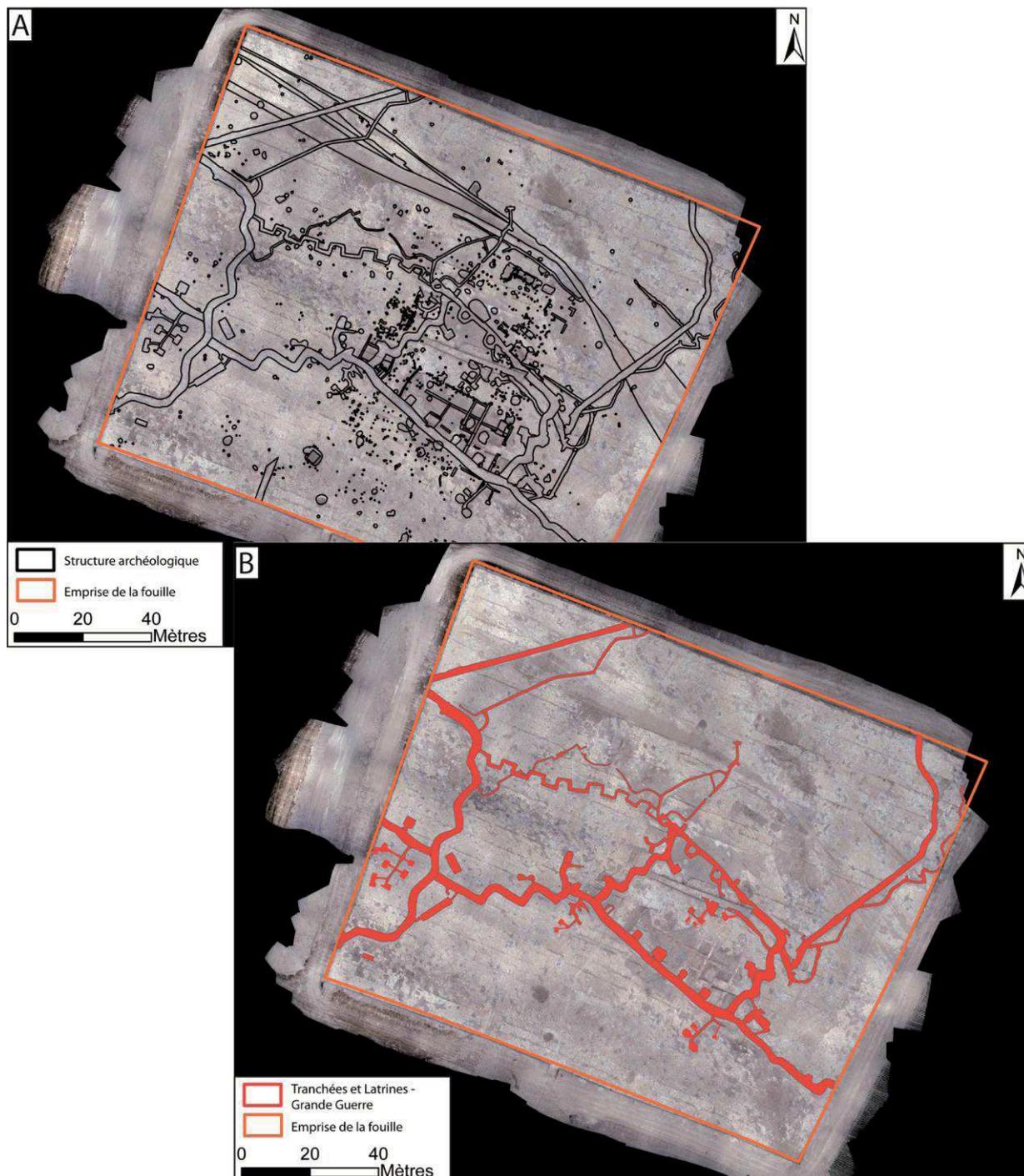


Fig. 2.16: A – Prise de vue aérienne par drone de la fouille de Cernay-les-Reims du « secteur 10 » et structures archéologiques. B – Prise de vue aérienne par drone de la fouille de Cernay-les-Reims du « secteur 10 » et réseaux de défense français (tranchées, boyaux et latrines).

L'opération archéologique menée par l'INRAP (n°7971), qui s'est déroulée sur la commune de Cernay-lès-Reims durant les mois d'octobre à décembre 2016, préalablement à la construction d'un parc logistique, portait sur un secteur (n°10) d'une surface de 20 000 m². Elle a permis de mettre en évidence 1172 faits (Fig. 2.16A), dont 556 correspondaient finalement à des unités naturelles (petites dépressions de terrain, chablis, etc.). Hormis les 37 fosses de plantation dont la chronologie n'a pu être définie actuellement, les vestiges mis au jour caractérisaient une occupation de la période de l'Antiquité tardive. Il s'agit d'une importante

occupation des III^{ème} et IV^{ème} siècles de notre ère, caractérisée par un établissement agro-pastoral. Celui-ci, de forme quadrangulaire, possède une partie résidentielle sur le tiers sud de l'emprise, avec un bâtiment sur fondations en pierres et en craie compactée, et plusieurs annexes en matériaux périssables (bois et torchis) sur les deux tiers nord. Plusieurs unités d'activité rurale (fumoir, fours, etc.) témoignent d'un édifice relativement aisé implanté le long d'un chemin antique, dont ne subsistent que les traces d'ornières qui entament le substrat crayeux.

Les réseaux de défense français sur ce « secteur 10 » recourent les structures archéologiques plus anciennes et s'y superposent. La première position française présente sa tranchée de tir sur 176 m ainsi que sa tranchée de soutien sur 158 m environ 30 m en retrait, reliées par des boyaux de communications pour le ravitaillement en vivres, en munitions et la circulation des hommes sur 827 m (Fig. 2.16B).

Le traitement de ces structures et découvertes est bien contrasté selon les belligérants.

Côté français, anglais ou belge, l'État-Major se désintéresse de l'archéologie sur le front ouest. Dans les nombreux récits de combattants, rares sont les mentions de découvertes archéologiques, qui restent anecdotiques. Dans « le Feu, journal d'une escouade », Henri Barbusse relate un épisode dans une tranchée du nord de la France, durant lequel son ami Tulacque (Barbusse, 1917) :

« Brandit sa hache d'homme quaternaire et semble lui-même un pithécantrope affublé d'oripeaux, embusqué dans les entrailles de la terre ».

Des trésors monétaires sont trouvés dans les tranchées près d'Etaples sur le front d'Artois, en Meuse entre Etain et Fresnes-en-Woevre (Landolt *et al.*, 2009 ; Landolt et Schnitzler, 2014).

Les rapports, croquis, récupérations d'objets ne sont que le fruit d'initiatives personnelles (Baudoin, 1915, Hemmery, 1915, Trassagnac, 1915). En Champagne sèche, près de Perthes-les-Hurlus (51), des sépultures gauloises ont été fouillées par Georges Bonneau. Ce dernier envoie les objets et ses rapports au musée Saint-Raymond de Toulouse, d'où il est originaire. Cependant, la proximité du front et la dangerosité des tirs d'artillerie ne permettent pas aux soldats de soigner ce travail de fouille. Entre Cormicy et Cauroy-les-Hermonville, une fouille est organisée sur une sépulture de l'âge du fer près du boyau d'Esternay par le sous-lieutenant de Traverse. De plus, les archéologues français mobilisés vont trouver la mort au front. C'est le cas de Joseph Déchelette, spécialiste de l'époque celtique, qui publie avant-guerre le Manuel Archéologique Préhistorique et Celtique. Capitaine dans l'Infanterie, il est tué le 4 octobre 1914 à Vingré dans le département de l'Aisne. Léon Henri Louis Bérard fouille également au sud de la zone de front près de Sarry (51) et constitue de remarquables levés archéologiques métrés et planches, mais trouvera la mort en 1918 dans l'Aisne à Rosières (Charpy, 2017).

Côté allemand, le Kunstschutz est un service de protection des œuvres d'art (mobilier, peintures, sculptures...) mais également de collections archéologiques. De plus, ce rapatriement des œuvres en Allemagne ou dans le musée de Metz pourra servir de « gages », de monnaie d'échanges après l'armistice. Dans les réseaux de défense, les fouilles sont autorisées et appuyées par l'État-Major, avec des moyens plus importants que côté allié, et appuyées par les Musées allemands. Des experts artistiques comme Johann-Batist Keune, Georg Weise ou Heribert Reiners sont mandatés dans différents secteurs du front. Une

conférence est organisée par le Dr Hans Lehner, le 29 juin 1916, sur les découvertes archéologiques sur le front ouest. Dans les secteurs occupés, mais loin de la zone de front, des nombreuses fouilles programmées sont réalisées notamment en Alsace (région fortifiée de Strasbourg, sanctuaire du Donon) et en Lorraine (Châtel Saint Germain, Norroy-les-Pont à Mousson, Varvinay, Senon,). En Argonne près d'Avocourt (55), dans « le bois de Cheppy », une fouille méthodique (coupe stratigraphique et description) est organisée sur un site riche en sigillées de l'Antiquité tardive découvert par le 125^e régiment d'Infanterie de *Landwehr* dans le cadre d'aménagement d'une position (Landolt et schnitzler, 2014 ; Chenet, 1938).

En Champagne sèche, le docteur Wolff fouille à Aubérive (51) une nécropole mérovingienne, découverte après le creusement de tranchées, vraisemblablement dans une terrasse alluviale de rive gauche de la Suipe. La proximité des tranchées françaises ne permet pas à Wolff un travail minutieux et exhaustif, effectué exclusivement le matin, quand les troupes françaises ont le soleil de face. Dans l'Aisne, à Bucy-le-Long, après l'inspection d'un officier des tranchées de premières lignes (tranchée de Hesse et tranchée du Nord) en rive droite de l'Aisne, un torque en Bronze est découvert et des fouilles sont immédiatement prescrites. Un étudiant en archéologie, Hans Niggeman, dirige ce travail d'excavation pendant deux mois. Il exhume alors 32 sépultures d'une nécropole celte et consigne ses observations, croquis et plans dans un journal de fouille (Fig. 2.17). Quatre mois après le début de la fouille, les objets sont envoyés à la section de préhistoire du musée de Berlin, accompagnés par le soldat Niggeman (Demoule, 2009).

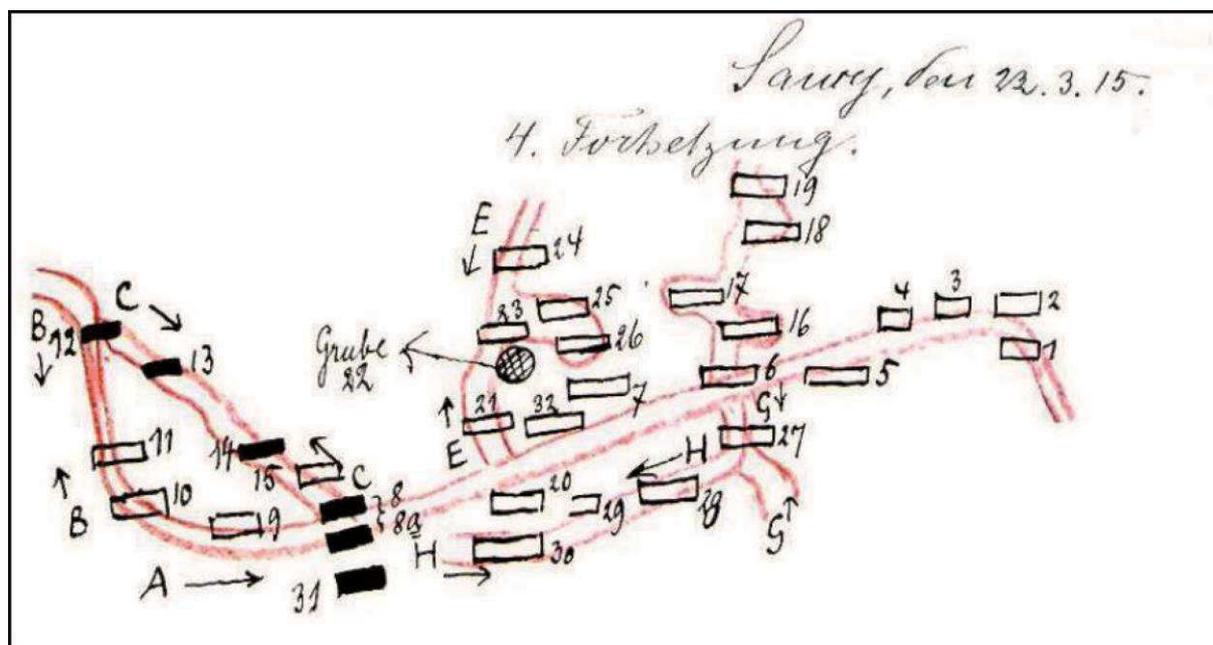


Fig. 2.17: Plan des fouilles allemandes de 1915 et du tracé des tranchées allemandes dans le secteur de « la Héronnière » à Bucy-le-Long (Source : Demoule, 2009).

Le retard dans l'archéologie française et la défense d'un territoire qui est le leur peuvent expliquer le détachement et la quasi-indifférence des fouilles archéologiques pendant le creusement des tranchées. Cette dichotomie de prise en compte différente de l'archéologie dans les réseaux de défense du front ouest, s'explique d'une part, côté français, par le désir de reconquérir les terres perdues mais, d'autre part, par la dimension politique. En effet, sur le

front oriental, et notamment dans la région de Salonique, les Français mènent des fouilles de sauvetage rigoureuses et créent en 1915 le service archéologique de l'Armée d'Orient au sein duquel des spécialistes de l'Antiquité officient. Cela illustre l'instrumentalisation de l'archéologie à des fins politiques comme la volonté affichée des belligérants de respecter le patrimoine des pays occupés, de valoriser le savoir-faire national et surtout de légitimer l'annexion. La germanisation des territoires conquis est alors justifiée par l'archéologie qui doit démontrer qu'ils appartiennent historiquement au peuple germanique. Côté français, on oppose les racines antiques gréco-romaines de notre civilisation aux « Huns barbares de Germanie ». Ainsi, un paradoxe surgit de la guerre de position : comparativement au volume de terres extrait pour le creusement des réseaux de défense, accompagnés d'innombrables abris souterrains, les observations scientifiques restent rares, trop ponctuelles, voire anecdotiques et souvent entachées d'absence de géoréférencement, de levés topographiques et stratigraphiques pourtant si précieux en géosciences. Les découvertes fortuites paraissent bien maigres face aux destructions probables de structures archéologiques par le creusement des réseaux de défense et surtout par l'Artillerie.

2.4. Le front : une structure fonctionnelle et opérationnelle profonde

2.4.1. A l'échelle du front de l'Ouest

Cette représentation spatiale du front d'ordre stratégique, linéaire et continue, cache en réalité un espace complexe inféodé à un zonage réglementant la circulation des civils et militaires pour limiter les encombrements, déceler les suspects et indésirables conformément à la loi sur l'Etat de siège du 9 août 1849. À ce titre, une approche multiscalaire s'impose pour mieux comprendre l'organisation spatiale du front, où les conditions géologiques et géographiques s'expriment de différentes manières selon l'échelle utilisée.

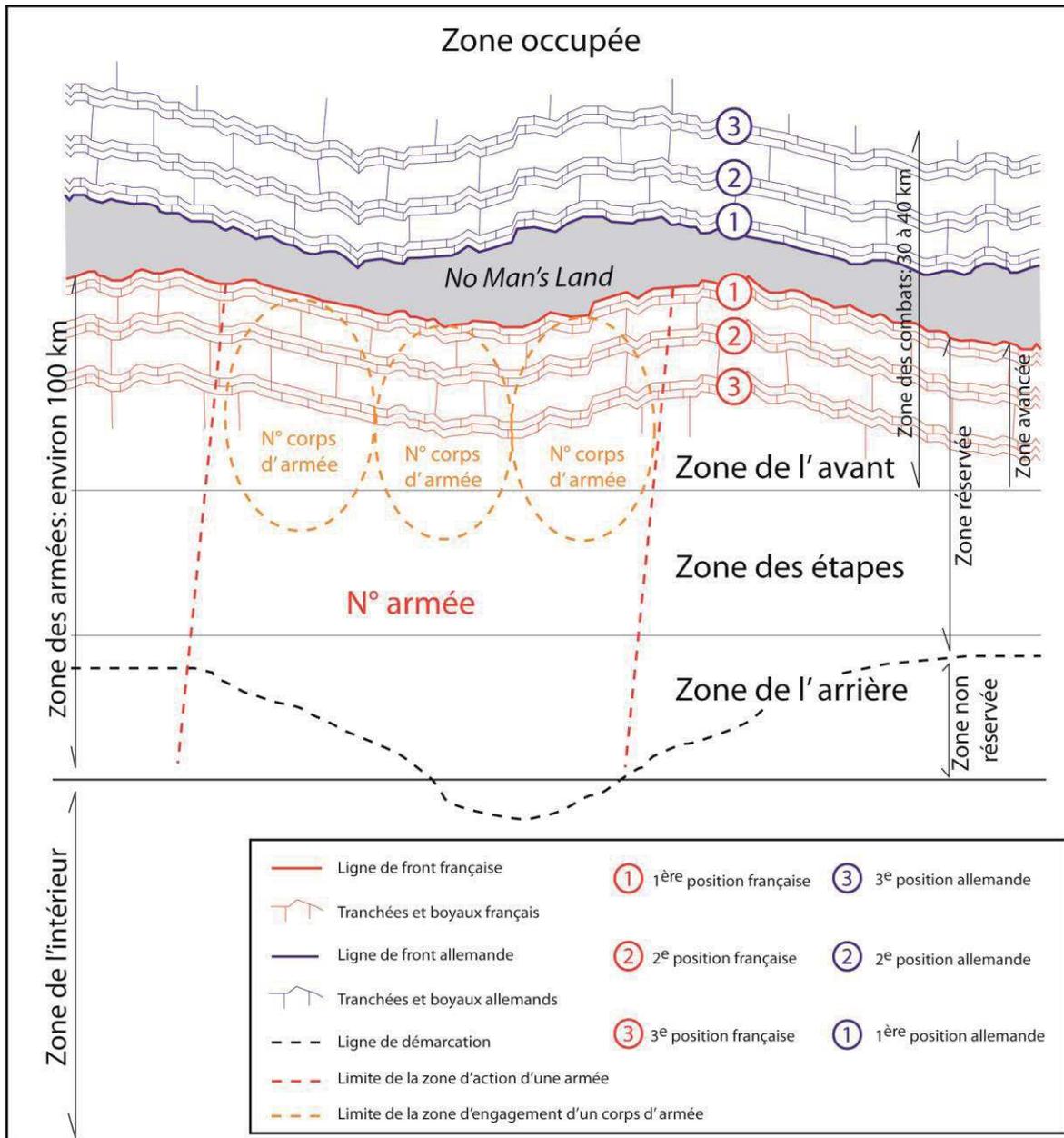


Fig. 2.18: Principe de zonage du front durant la Grande Guerre d'après l'arrêté du 1er janvier 1916 et l'arrêté du 15 mars 1917 ; Troussaint, 1917 et Amat, 2015.

Ce zonage de l'espace durant le conflit, calé sur la ligne de front, est fonction d'un découpage administratif en profondeur (départements, cantons et communes) sans limites naturelles (Fig. 2.18).

La « zone des régions envahies » ou « zone occupée » se situe au-delà de la ligne de front, du côté allemand. Elle concerne l'intégralité des Ardennes et la partie septentrionale des auréoles géologiques du Cénozoïque (buttes témoins et lambeaux de plateaux éocènes du Noyonnais, du Laonnois) et du Mésozoïque (plateaux crayeux de Thiérache, de Champagne sèche, Crêtes pré-ardennaises et plateaux jurassiques du Dogger lorrain). À ce titre, les bassins industriels du Nord et de l'Est (bassin houiller, bassin ferrifère nord lorrain, bassin salin) sont occupés tout comme la plaine d'Alsace annexée au Reich depuis 1871 avec la Moselle.

Du côté français, l'espace est découpé entre la « zone des Armées » sous les ordres du général commandant en chef et la « zone de l'intérieur » sous l'autorité ministérielle.

La « zone des Armées », épaisse d'une centaine de kilomètres, est découpée en 3 zones : la « zone de l'avant » occupée par les troupes d'opération, la « zone des étapes » et la « zone de l'arrière », située en arrière des précédentes (Fig.2.19).

La « zone de l'avant », sous l'autorité du général du Corps d'Armée (CA), regroupe les corps d'armées au combat et leurs ressources propres (trains de combat, groupes des parcs et groupes des convois). Elle est limitée en avant, par la « ligne de front » où les réseaux de défense de chaque adversaire se regardent. Ces réseaux constitués des tranchées, de boyaux et de défenses accessoires (barbelés, abattis, trous de loups, etc..) profonds de 10 à 20 km constituent le dispositif de défense pouvant être confondu au front ou « zone de front ».

Le « no man's land », terme issu d'une dépêche du 21 décembre 1914 écrite par Ernest Swinton, militaire et correspondant de guerre anglais, ou plus vulgairement le « bled », détermine l'espace entre les premières lignes adverses. Il présente une épaisseur très variable d'une trentaine de mètres (un jet de grenade) à une centaine de mètres, voire plus d'un kilomètre, et s'inscrit dans la zone des combats ou zone de front. Cette bande de terrain, régulièrement marmitée, est partiellement ou totalement traversée par les grandes offensives.

Le front se caractérise donc par une zone (appelée « zone de front » ou « zone des combats ») comprenant le no man's land et l'ensemble des dispositifs de défense de part et d'autre de la ligne de front. À ce titre, son épaisseur est comprise entre 20 à 40 km.

La « zone des étapes » est la zone sous les ordres des généraux commandant les groupes d'armées qui disposent chacun d'une direction des étapes (DE) organisant la police, les cantonnements et l'exploitation des ressources.

La « zone de l'arrière » commune à toutes les armées sous l'autorité de la Direction de l'Arrière (DA) ou du directeur de l'arrière (général de division), secondé par un directeur des chemins de fer, concentre les communications, transports, évacuations et ravitaillements.

Dans la « zone des Armées », la circulation est contrainte selon une « ligne de démarcation » qui sépare la « zone réservée » (comprenant une « zone avancée » proche du front où la pénétration des civils est interdite) de la « zone non réservée » sous l'autorité civile. Dans la « zone avancée », les civils sont rares, voire absents après un exode de masse.

La « zone de l'intérieur » est à l'inverse de la zone des Armées, sous l'autorité du Ministre. Elle regroupe les organes de ravitaillement (entrepôts, arsenaux, magasins).

L'organisation des services médicaux dépend également de ce zonage. Les militaires évacués en « zone de l'intérieur » font l'objet d'une « campagne simple » alors que ceux moins grièvement blessés qui restent en « zone des Armées » sont déclarés en « campagne double » (Troussaint, 1917). Même la récupération des morts par les familles après le conflit est réglementée selon ce zonage jusqu'en 1921.

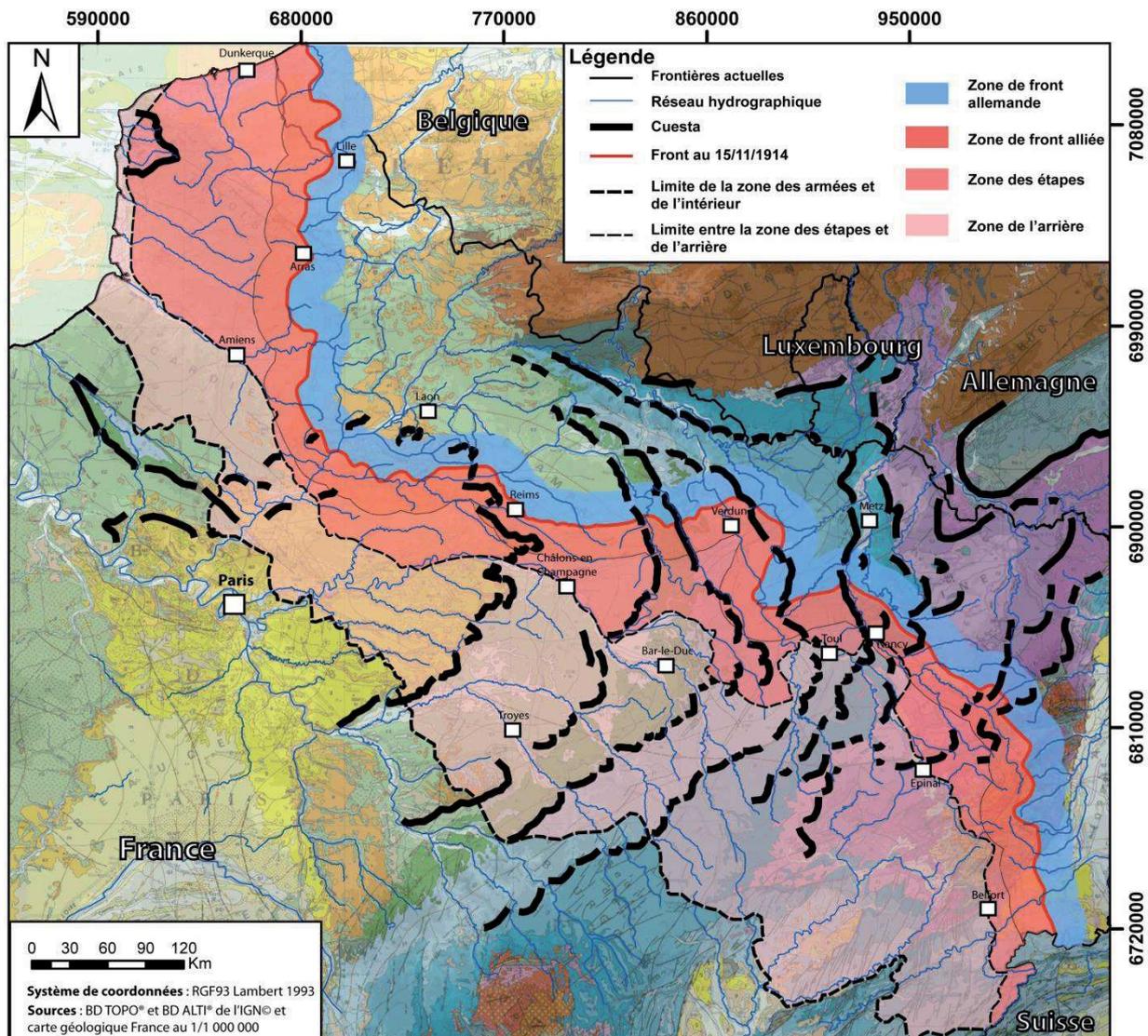


Fig. 2.19: Zonage du front occidental au 15/11/1914

À ce zonage parallèle à la ligne de front, réglementant l'autorité militaire et civile ainsi que la circulation, se rajoute une organisation opérationnelle perpendiculaire au front qui détermine une organisation cellulaire à la zone de front. En effet, chaque secteur de la zone des armées relève d'une Armée (« zone d'action »). Chaque « Armée » affecte une « zone d'engagement » par « Corps d'armée », un « secteur d'engagement » par « Division », un « sous-secteur d'engagement » pour un ou plusieurs « régiments » ou « brigade d'infanterie » dans les réduits, un « quartier d'engagement » pour un « bataillon » ou un seul régiment, un « sous quartier d'engagement » pour une « compagnie » dans un point d'appui ou un réduit et enfin un « groupe de combat » pour une « section ». Sur les 750 km de linéaire de front, la France aligne généralement 93 à 119 divisions qui contrôlent chacune un tronçon moyen compris entre 6 et 8 km de front. Par exemple, d'août à novembre 1916, alors que l'Armée belge et la II^{ème} Armée britannique sont dans les argiles des Flandres, la IV^{ème} Armée française basée en Champagne fait face à la III^{ème} Armée allemande. La région de Verdun est occupée par la II^{ème} Armée française et la V^{ème} Armée allemande (Fig. 2.20).

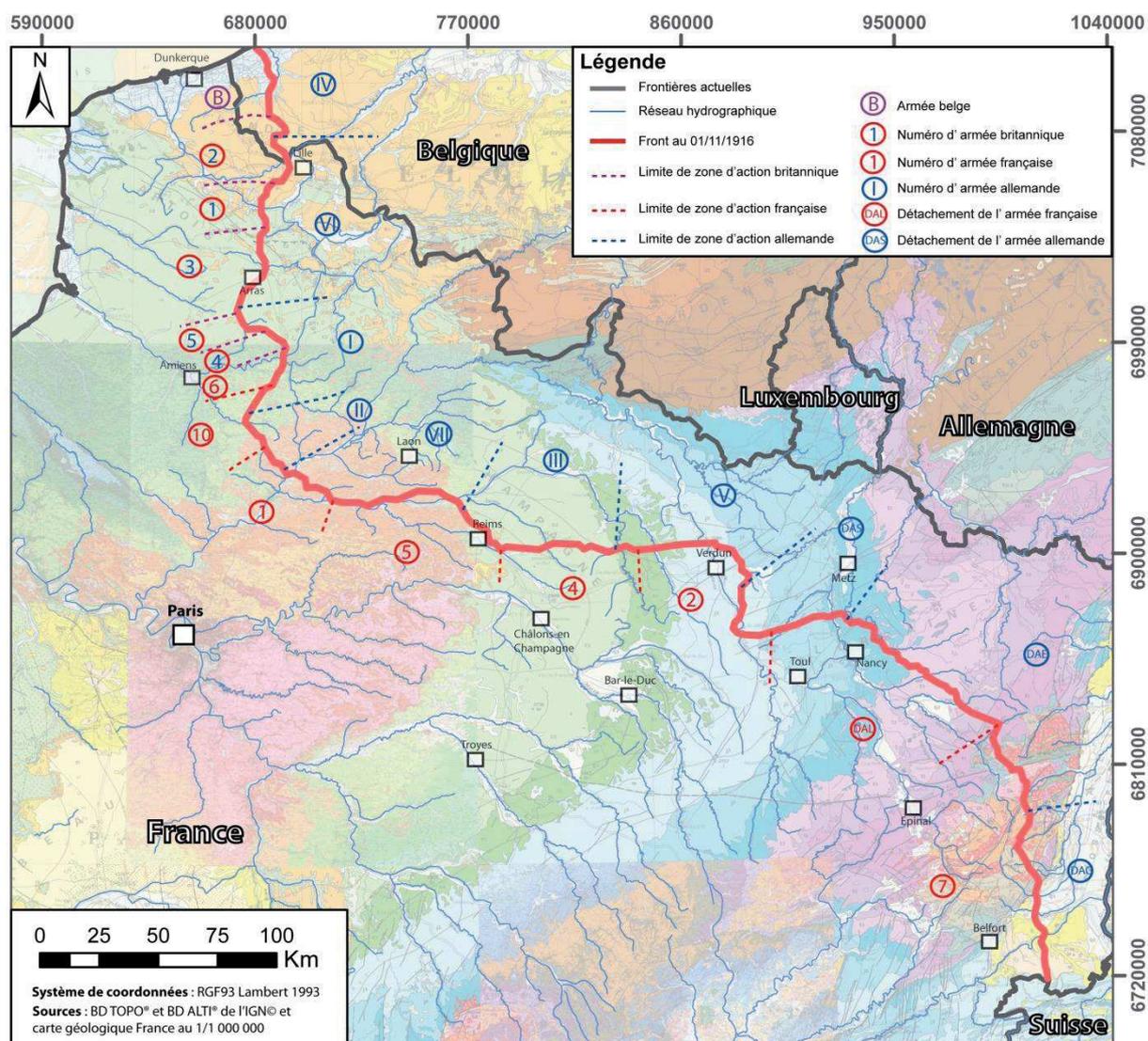


Fig. 2.20: zones d'action des Armées belge, britannique, française et allemande au 1er novembre 1916.

2.4.2. À l'échelle de la Champagne-Ardenne

D'après la figure 2.21, un zoom est réalisé sur le secteur de Champagne du fort de la Pompelle à l'Argonne à différentes dates, le 15 novembre 1914, le 16 septembre 1915 et le 17 octobre 1916. Le 15 novembre 1914, peu de temps après l'enlèvement du conflit et la construction des réseaux de défense, la IV^{ème} Armée française est présente du fort de la Pompelle à l'Argonne sur 61km (Fig. 2.21A). Elle est constituée par 4 Corps d'Armée, eux-mêmes formés de 9 divisions, soit 6,7 km par division. L'armée allemande sur ce même linéaire aligne deux armées composées de 6 Corps d'Armée, soit 10 kilomètres par Corps d'Armée. Le 16 septembre 1915, soit 9 jours avant la Seconde Bataille de Champagne, la IV^{ème} Armée partage la zone avec la II^{ème} Armée (Fig. 2.21B). Elle aligne 8 Corps d'Armée, composés de 21 divisions soit 2,9 km de front par division. L'armée allemande occupe le secteur toujours par la III^{ème} et la IV^{ème} Armée. Le 17 octobre 1916, le secteur est calme et coïncide avec la fin de la bataille de Verdun plus à l'Est (Fig. 2.21C). Seule la IV^{ème} Armée française occupe les 60 km de front alors que la III^{ème} Armée et une partie de la V^{ème} Armée allemande lui font face. La IV^{ème} Armée allemande est envoyée dans les Flandres Belges.

Ce découpage opérationnel du front parallèle et perpendiculaire doit donc toujours être mis en relation avec le secteur d'étude et sa date. Des concentrations d'unités sont observées lors d'attaques massives (Fig. 2.21B) ou chaque division (environ 16 000 hommes) occupe approximativement 3 km de front. Dans des secteurs calmes (Fig. 2.21A et Fig. 2.21C), les divisions s'installent sur 6 à 8 km.

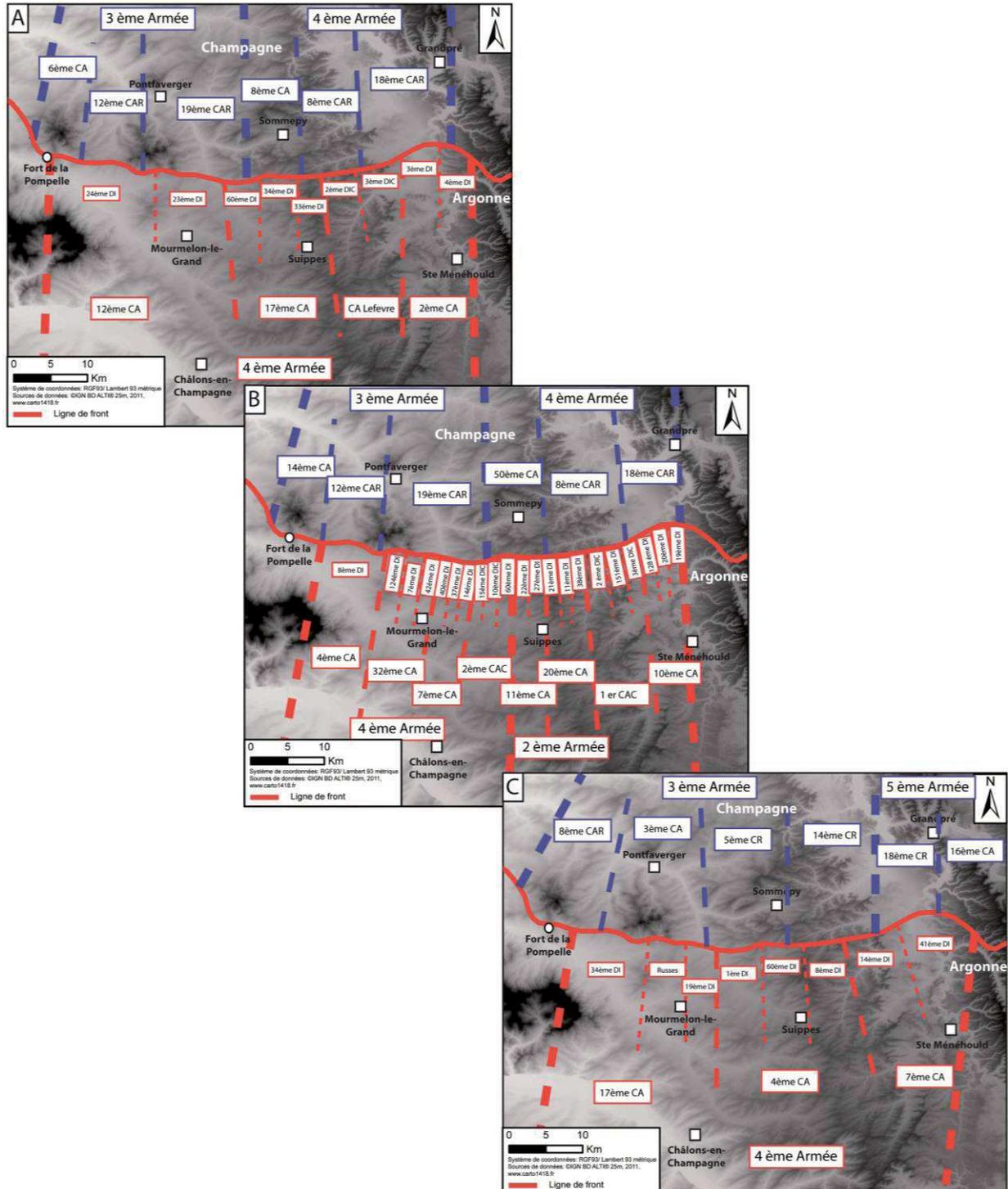


Fig. 2.21: A – Organisation des unités en Champagne le 15 novembre 1914. B – Organisation des unités en Champagne le 16 septembre 1915. C – Organisation des unités en Champagne le 17 octobre 1916.

2.4.3. À l'échelle d'un secteur

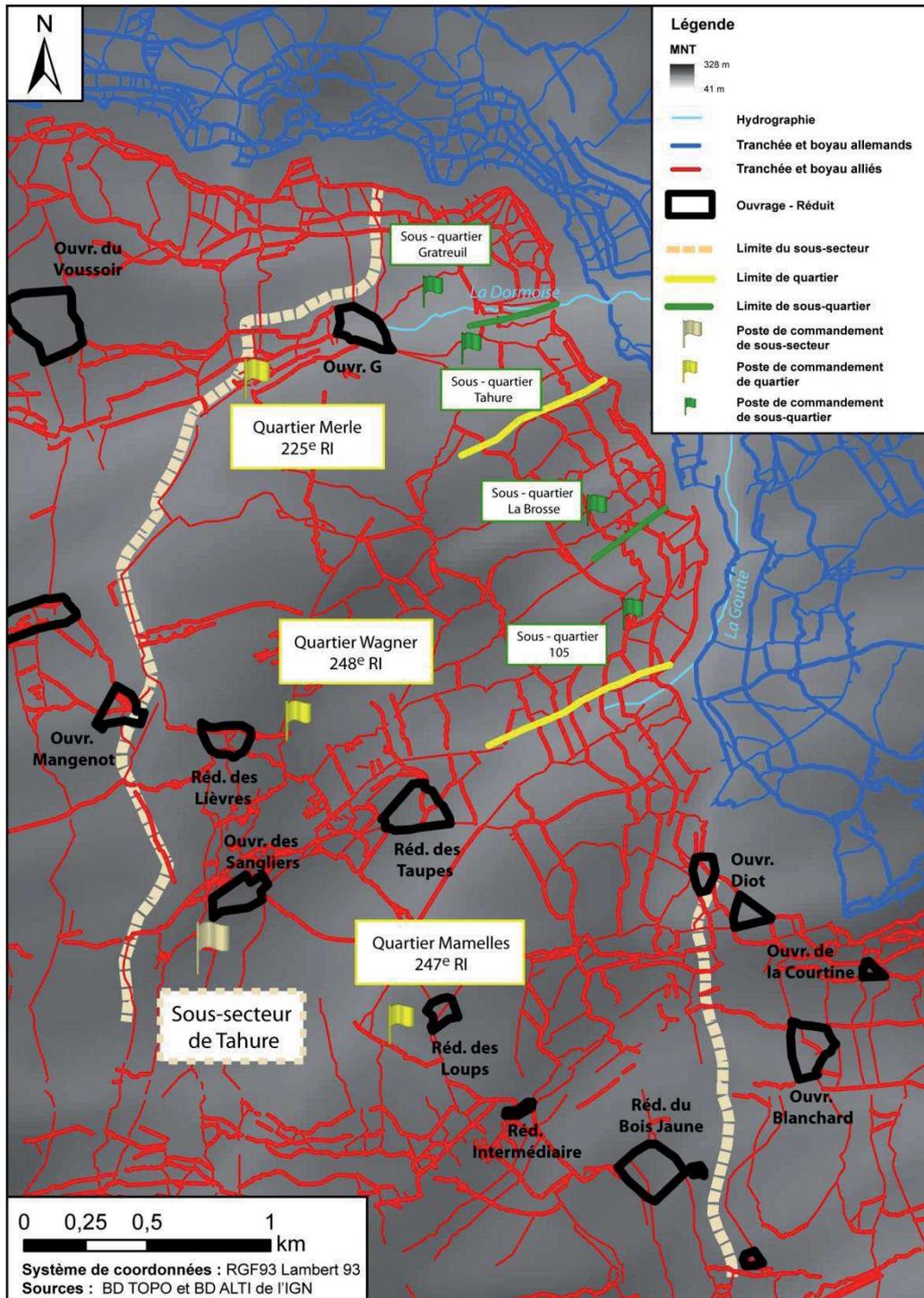


Fig. 2.22: Carte du « sous-secteur » de Tahure de la 119^{ème} brigade, d'après le plan directeur de Tahure au 1/20 000 et le JMO du 1^{er} octobre 1915 au 14 mars 1917 (26 N010 0076).

L'organisation spatiale du front s'inscrit donc dans un espace quadrillé, à la fois structuré en profondeur par rapport à la ligne de front et aussi latéralement de manière opérationnelle par les troupes qui sont responsables de l'entretien et de la défense du réseau défensif. Le saillant de Tahure (Fig. 2.22) a été repris par l'armée française pendant la Seconde Bataille de la

Marne en 1915. Ce saillant occupé par le 9^{ème} Corps d'Armée regroupe notamment la 60^{ème} Division composée en partie par la 119^{ème} brigade. Cette brigade contrôle un sous-secteur (« Sous-secteur de Tahure ») de 4 km de large avec un poste de commandement en arrière des réduits (tranchée circulaire) des Lièvres, des Taupes et du Sanglier. Chaque régiment est affecté à son quartier, le 247^{ème} RI au quartier « Mamelles », le 248^{ème} RI au quartier « Wagner » et le 225^{ème} RI au quartier « Merle » et dispose de son « PC colonel ». Enfin les deux derniers quartiers sont découpés en sous-quartiers (« 105 », « La Brosse », « Tahure » et « Grateuil ») dirigés par un PC bataillon (Fig. 2.22). Les tronçons de tranchées sont répartis aux compagnies (sections, demi-sections et escouades).

À ce titre, la guerre de position apparaît dévoreuse d'hommes. La ligne de front doit rester rectiligne (sans saillant ni rentrant) pour économiser le nombre d'unités qui occupent le terrain, ce qui peut se concrétiser par des reculs stratégiques (Opération Alberich entre Arras et Soissons) pour lisser le tracé de la zone de front et ainsi reporter les troupes vers des secteurs à grandes offensives susceptibles de la percer. Chaque unité combat dans des conditions géographiques et géologiques différentes de l'une à l'autre sur la ligne de front au même moment. Les États-Majors doivent effectuer une ventilation de ces unités selon leurs spécificités au combat et leurs conditions de repos mais doivent diversifier les espaces afin d'éviter la morosité au front qui conduit à la mutinerie. Le site de Verdun est généralement évocateur de ce renouvellement des troupes puisque plus de 70% des divisions françaises disponibles du front ouest combattent sur les plateaux oxfordiens.

L'organisation spatiale des réseaux de défense structurés en lignes et en positions mais aussi de manière cellulaire répond essentiellement à des logiques naturelles de sites. Manifestement, la récurrence spatiale des centres, réduits le long de la zone de front, rappelle la hiérarchisation organisationnelle des Armées.

Conclusion du chapitre 2

À l'automne 1914, après la guerre de mouvement, les deux armées creusent et s'enterrent ; l'armée allemande pour protéger un terrain vainement conquis tandis que l'armée française tente de reconquérir le territoire national perdu. Le trou individuel puis l'élément de tranchée se transforme en un réseau de tranchées continu et profond sur 20 à 40 km, organisé en positions composées chacune de 4 à 14 lignes de tranchées (Devos *et al.*, 2015b ; Taborelli *et al.*, 2016b).

À l'échelle stratégique (petite échelle et grands espaces), les lignes de relief et les vallées semblent peu influencer le tracé de la ligne de front qui les traverse. Ce dernier serait issu des plans (*Schlieffen* et plan XVII) des belligérants. En réalité, l'organisation spatiale des cuestas avec leurs escarpements dressés face à l'Est, remarquablement utilisés par les fortifications du système Séré de Rivières a lourdement conditionné le plan *Schlieffen* (par leur contournement), les batailles des frontières puis l'installation de la ligne de front.

À l'échelle tactique (échelle moyenne), ce front, trop souvent représenté comme une ligne est en réalité un espace hiérarchisé et organisé mais surtout conditionné par le cadre morphostructural. L'organisation spatiale des réseaux de défense obéit aux logiques d'exploitation judicieuse du terrain, offrant les meilleurs sites d'observations, crêtes de tirs, potentialités de défense et de soutien d'artillerie.

Enfin à l'échelle locale ou opérationnelle, la nature des formations géologiques est pleinement ressentie par les combattants qui s'enterrent dans les formations superficielles (limons de plateaux, colluvions, alluvions) et le matériau parental dont les caractéristiques géotechniques déterminent les ressources ou contraintes au creusement des réseaux de défense.

C'est dans ce contexte que pendant 4 ans, les deux armées se lancent dans de grandes offensives bénéficiant de l'effet de surprise et du surnombre numérique pour créer la trouée, l'ouverture salvatrice dans le dispositif adverse et repartir en avant, dans une nouvelle guerre de mouvement (Porte, 2016).

Dans ces deux premiers chapitres, la démarche qualitative et conceptuelle se base sur l'étude des manuels d'instructions militaires et la lecture des plans directeurs à l'échelle sectorielle. Ce réseau de tranchées est perçu comme un labyrinthe et évolue de manière spatiale et temporelle. Ces analyses ne permettent ni de connaître, ni de quantifier le développement des réseaux de défense, ni de mesurer des densités ou de déduire des quantités de terres remuées. Seule l'analyse spatiale des plans directeurs peut tendre vers cette étude quantitative, jamais réalisée et justifie un travail sous SIG pour obtenir une vision globale des réseaux de défense de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.

Chapitre 3 : Organisation spatiale du front à partir des plans directeurs de 1918

Introduction du chapitre 3

La Grande Guerre s'enterra dans une guerre de position sous la forme de réseaux de défense (tranchées et boyaux) sur les 750 km de ligne de front de la mer du Nord à l'Alsace, dès novembre 1914. Ces fortifications imprévues (Verney, 2003), dont l'organisation spatiale est peu étudiée, sont difficilement franchissables puisque la guerre de position dure 40 mois sur les 51 mois du conflit. Ces réseaux de défense sont difficilement lisibles et très complexes.

L'objectif de ce chapitre est de comprendre non seulement l'organisation spatiale des réseaux de défense à partir des plans directeurs, mais également de créer une banque de données spatialisée, susceptible d'être croisée à d'autres calques de l'information spatiale (MNT, Géologie, occupation du sol...). Pour obtenir une vision globale des réseaux de défense, le choix du site d'étude, la Champagne-Ardenne, ainsi que la date, avant mai 1918, coïncident avec une zone de front calme avant le retour de la guerre de mouvement. De plus, après récupération et numérisation de plus de 300 plans, l'ensemble de la zone d'étude, en 1918, est couverte par des plans directeurs en notre possession. Les approches qualitatives et conceptuelles des chapitres précédents justifient ce choix de date et de zone d'étude pour une analyse spatiale et globale des réseaux de défense sous SIG, enfin quantitative. Une approche multi-sectorielle par grands milieux naturels permet de nuancer le rôle de la topographie et de l'occupation du sol selon les secteurs du front champardennais. Enfin, la valeur opérationnelle de la base de données est testée en la croisant à des fouilles et découvertes archéologiques.

3.1. Structure des réseaux de défense : le rôle de la géomorphologie

L'objectif est de comprendre les critères de l'organisation spatiale des réseaux de défense sur le front champardennais. Après avoir présenté brièvement la méthodologie et les sites ateliers, ce chapitre permettra, dans un premier temps, de confronter les résultats aux contextes géomorphologiques, géologiques, hydrographiques, biogéographiques et aux bâtis (villages, villes et forts) avant de d'initier une réflexion sur le nom des tranchées. Dans un deuxième temps, il présentera de présenter les résultats de l'analyse spatiale concernant les batteries d'artillerie, les observatoires, les voies ferrées, les camps et les forages. Enfin, il tentera de valider de manière opérationnelle la banque de données par l'approche archéologique.

3.1.1. Méthodologie et sites ateliers

L'analyse quantitative se base sur les plans directeurs de la fin de l'année 1917 et du début 1918. Cette période coïncide avec une zone de front relativement calme, avant le retour de la guerre de mouvement de mai 1918. Ces documents numérisés sont intégrés dans un Système d'Information Géographique (SIG) par géoréférencement via la méthode dite « des points amers » en s'appuyant sur les SCAN 25® 2010 de l'IGN. Ainsi, le système de coordonnées utilisé est le RGF 1993 Lambert 93 (système projeté) et non le système projeté Lambert zone Nord de Guerre adopté pour la réalisation des plans directeurs. Ce choix est contraint par l'utilisation des logiciels de SIG qui ne proposent pas tous le système de Lambert Nord zone de Guerre. Si certains le proposent, comme ArcGIS depuis la version 10, le méridien d'origine est le méridien officiel actuel, soit Greenwich, et non le méridien d'origine réel du système de coordonnées ce qui engendre un décalage des données. Les plans directeurs géoréférencés servent de support et sont regroupés au sein d'une géodatabase. Les aménagements liés au conflit sont digitalisés (redessinés manuellement) de façon ordonnée en fonction de leur type. Ainsi sont distingués les objets de type points (ponts, observatoires et batteries d'artillerie.), lignes (tranchées, boyaux et chemins de fer) et polygones (centres, ouvrages, camps et bastions). Pour cela, il est nécessaire de s'appuyer sur la légende des plans directeurs du premier chapitre. Pour ces éléments, des précisions sur l'utilisation et la nature des ouvrages sont renseignées dans la table attributaire (date et nom du plan directeur, entité allemande ou française). Il en est de même pour leur toponyme (tranchées, boyaux, camps et centres) même si ces informations présentent des lacunes du fait de l'échelle des plans utilisés alors que les données de longueur ou de surface sont automatiquement renseignées. (Tab. 3.1). Ce travail long et fastidieux, réalisé par interprétation visuelle, n'aurait pas pu être effectué par un traitement automatique. Il aura demandé un an de travail. La banque de données constituée comprend effectivement 47 212 polygones pour les réseaux de défense et 1 952 pour les chemins de fer. 680 polygones ont été digitalisés pour les camps, centres, ouvrages et bastions ainsi que 1 209 points pour les ponts et observatoires et 7 360 pour représenter les batteries d'artillerie.

Inventaire des objets digitalisés	Caractéristique des entités sous SIG	Type	Effectif	Linéaire (km)	Exemples de toponymie	Appartenance	Source (plan directeur)	Date
	Ligne	Tranchée Boyau Chemin de fer	21135 26077 1952	5157 5495 2223	Tranchée Napoléon Boyau du cratère -	Alliée/ennemie Alliée/ennemie Alliée/ennemie	Berry-au-Bac Brimont Warmeriville Jonchery-sur-Vesle Reims Beine Ambonnay Ste Marie à Py Attigny Tahure Châlons-sur-Marne Somme-Suippe Vouziers Cernay-en-Dormois Valmy Buzancy Forêt d'Argonne Ste Ménéhould	28/09/1918 20/04/1918 23/08/1918 23/09/1918 15/07/1918 06/07/1917 28/06/1918 31/01/1918 17/08/1918 31/05/1918 31/05/1918 14/06/1918 17/05/1918 12/09/1918 07/07/1918 16/09/1918 23/07/1918 02/06/1918
Polygone	Camp Bastion Centre Ouvrage	451 229	-	Camp Victoria Bastion Valmy Centre Colbert Ouvrage de Belgrade	Ennemie Alliée/ennemie Alliée/ennemie Alliée/ennemie			
Point	Observatoire Pont Batterie d'artillerie	474 735 7360	-	- - 4312	Ennemie Alliée/ennemie Ennemie			

Tab. 3.1 : Caractéristiques, typologie des structures de réseaux de défense digitalisées à partir des plans directeurs en Champagne-Ardenne.

Dans un premier temps, les tranchées considérées comme parallèles à la ligne de front sont digitalisées. Les tranchées possèdent un début et une fin matérialisés par des boyaux de communication à leur extrémité. Elles sont reliées aux tranchées voisines pour un continuum. Elles reçoivent un nom, intégré à la géodatabase quand celui-ci est renseigné sur le plan directeur (Fig. 3.1A). Son commandement est donné à un officier, ou un sous-officier plus rarement. Tout comme les boyaux, leur tracé est stylisé et un indice de sinuosité leur sera attribué. Les boyaux de communication relient les différentes tranchées entre elles, perpendiculaires au no man's land. Les boyaux principaux reçoivent également un nom, intégré à la géodatabase (Fig. 3.1B). Enfin, les chemins de fer ne sont renseignés dans cette étude que côté allemand, sans information sur le type de chemin de fer (voie large, étroite...). Aucune indication sur les chemins de fer français n'est précisée dans les plans directeurs (Fig. 3.1C).

Les camps, objets de type polygone, sont essentiellement allemands. Peu d'informations sont retrouvées sur les campements français. Le nom allemand, quand il est présent, est intégré à la base de données (Fig. 3.1D). Les bastions, ouvrages et centres, points d'appui en tranchées circulaires, sont matérialisés par un polygone. Leur nom peut également être intégré à la géodatabase (Fig. 3.1E).

Les observatoires, exclusivement côté allemand, sont renseignés par une entité de type point (Fig. 3.1F). Les ponts et passerelles pour traverser les différents cours d'eau (Suippe, Vesle, Tourbe ...) sont renseignés pour les deux camps. Enfin, les batteries d'artillerie, exclusivement côté allemand, sont digitalisées par 2, 3 ou 4 points (nombre de canons) (Fig. 3.1G).

Les dépôts de munition et de matériel, les DCA (défense contre avion), les cimetières et les postes optiques, intégrés dans la base de données ne sont pas traités spatialement et statistiquement car leur renseignement sur les plans directeurs est trop aléatoire.

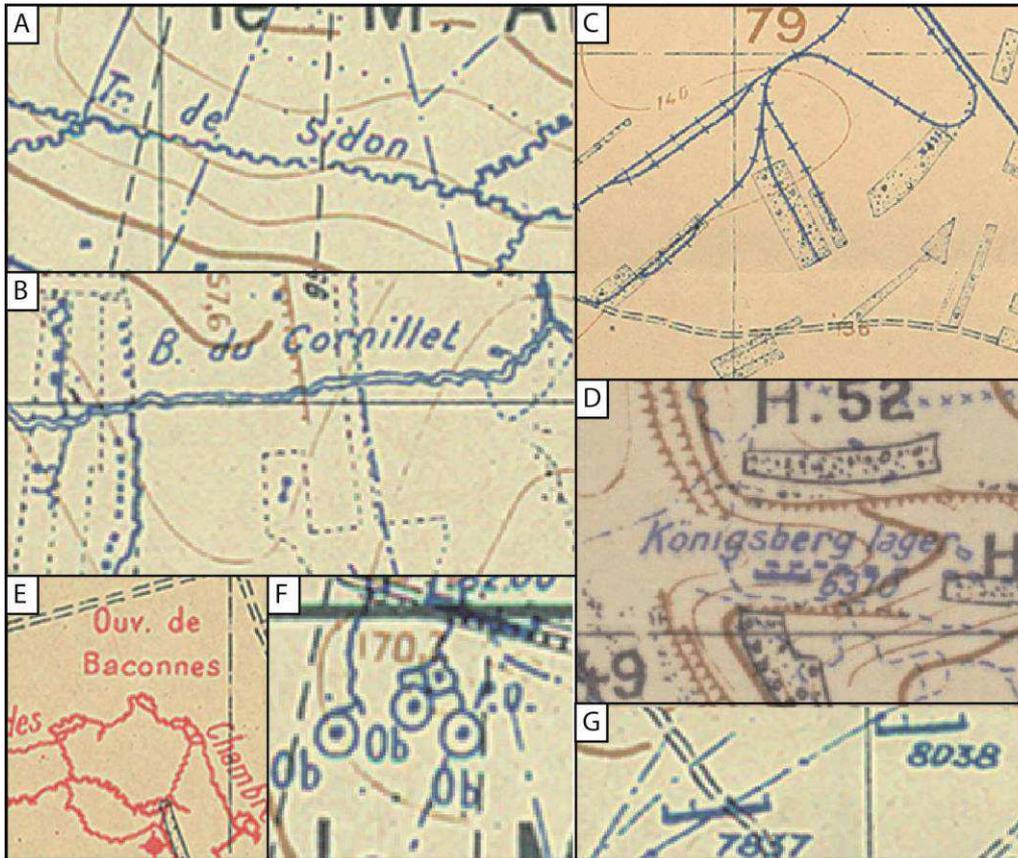


Fig.3.1: Extrait de plan directeur des entités digitalisées : A – Tranchée. B – Boyau. C – Chemin de fer. D – Camp. E – Ouvrage. F – Observatoire. G – Batterie d’artillerie.

Dans la continuité du Chemin des Dames, le front passe par la Cote 108 près de Berry-au-Bac, longe le canal de l’Aisne à la Marne jusqu’aux faubourgs de Reims. Ensuite, son orientation devient Ouest-Est et traverse les différents Monts de Champagne dans la craie jusque la Côte de Champagne. Il traverse enfin la vallée de l’Aisne et de la Tourbe (Champagne humide) pour atteindre les contreforts de l’Argonne forestière. Cette zone de front nécessite l’utilisation de 19 plans directeurs français pour le travail de digitalisation (Fig. 3.2).

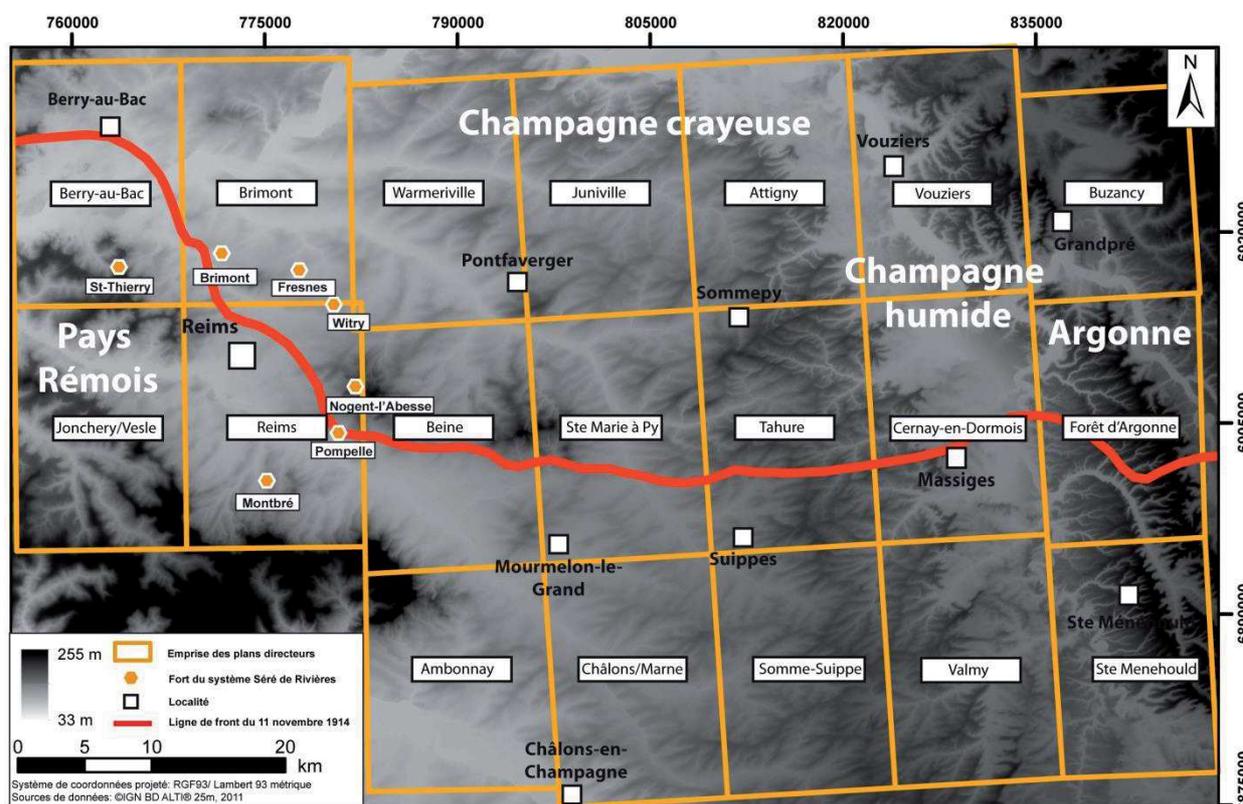


Fig.3.2: Canevas des plans directeurs sur la zone de front de Champagne-Ardenne.

Dans un premier temps, le traitement SIG est réalisé sur l'ensemble du front champardennais mais des zooms sont ensuite réalisés sur différents secteurs (Cote 108, Reims, Monts de Champagne, Vallée de l'Aisne et Argonne) pour nuancer le rôle des conditions géographiques sur l'organisation spatiale des réseaux de défense.

3.1.2. Sur le front champardennais : 115 km de front

Ce travail de digitalisation de chaque entité sur l'ensemble du front champardennais a nécessité une année de travail. L'outil SIG (logiciel ArcGis 10.3.1) ne doit en aucun cas rester un moyen visuel à la réalisation de cartes, mais doit servir à la production de données, croisé aux bases de données existantes. Si pour la majeure partie des combattants et surtout les civils, la zone de front est perçue comme un labyrinthe inextricable de tranchées et de boyaux, en réalité les réseaux de défense s'organisent en profondeur. Ils sont structurés de manière ternaire en positions et points d'appui et s'adaptent aux conditions du milieu qui diffèrent par Pays. Le rôle des conditions géomorphologiques sur l'organisation spatiale des réseaux de défense est mis en valeur via l'outil SIG qui fait apparaître l'importance des reliefs et de la nature du sol (Devos *et al.*, 2015b ; Taborelli *et al.*, 2017a). Cependant, il doit être nuancé par la couverture végétale, les conditions hydriques qui diffèrent selon les Pays traversés par la ligne de front (Fig. 3.3).

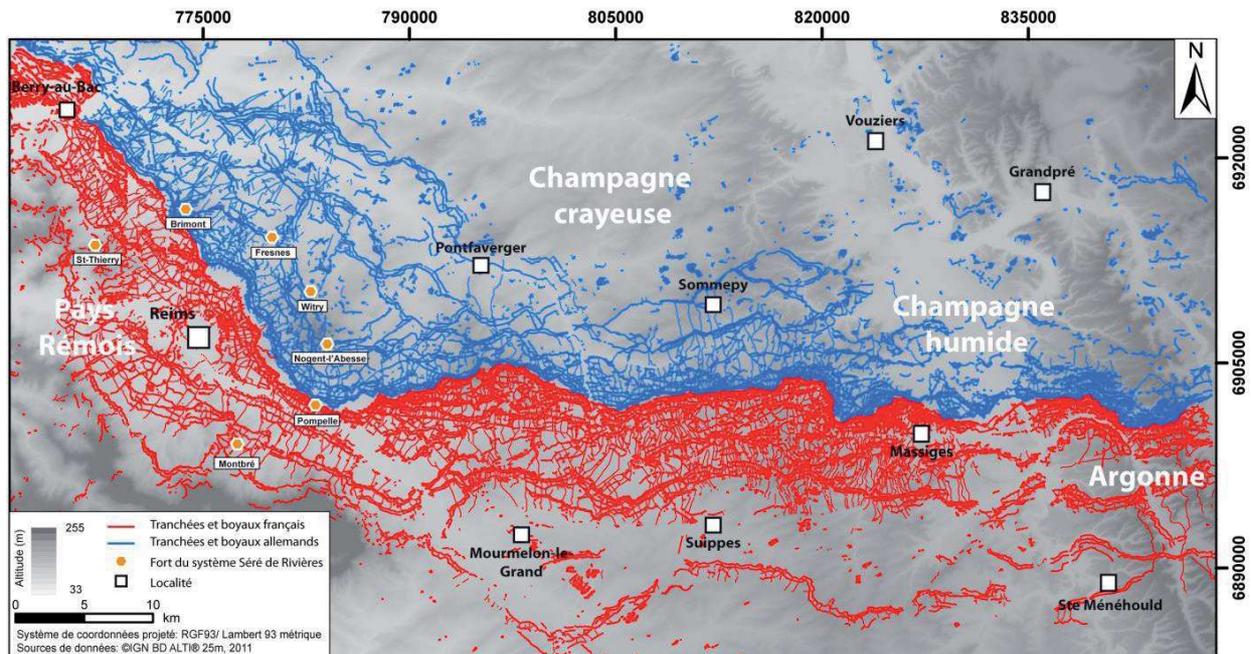


Fig.3.3: Cartographie des réseaux de défense alliés et allemand en Champagne-Ardenne en 1918

Les tranchées et boyaux sont digitalisés de manière stylisée et représentent respectivement 47212 objets sur 5157,5 km et 5495,6 km. Multipliés par les indices de sinuosité (1,36 et 1,1), de Berry-au-Bac à l'Argonne, les réseaux de défense représentent 13 000 km de tranchées et de boyaux sur les 115 km de front de la Champagne-Ardenne (Tab. 3.2). Le rapport entre le linéaire du réseau de défense et le nombre d'objets détermine la distance élémentaire d'une tranchée ou d'un boyau à 275 m. Cependant, cette moyenne, lourdement influencée par le mode opératoire, l'orle et le canevas des plans directeurs, cache de très fortes disparités spatiales. Ces chiffres impressionnants restent cependant *a minima* car au 1/20 000, il a été déjà constaté (chapitre 1) de moindre densité de tranchée que sur une échelle plus grande (1/10 000, 1/5 000). De surcroît, certaines tranchées ont totalement disparu, conséquence de bombardements d'artillerie trop intenses au niveau du no man's land. Certaines tranchées conquises par l'ennemi ont été rebouchées et n'apparaissent plus sur les plans directeurs. Le ratio tranchée/boyau de 1,16 montre la faible prédominance des tranchées (Tab. 3.2). La densité peut être calculée de deux manières, soit surfacique (km/km^2) entre les dernières positions allemandes et françaises (zone de front), soit linéaire (km/km de front) par rapport au linéaire de la ligne de front. En moyenne, sur l'ensemble de la Champagne-Ardenne, la densité surfacique correspond à $4,87 \text{ km}/\text{km}^2$ mais cache de plus fortes disparités spatiales selon la structure hiérarchisée du réseau de défense (Tab. 3.2). En effet, le réseau de défense s'organise en positions ou rideaux généralement structurés de manière ternaire en 3 lignes de tranchées parallèles à la ligne de front et reliés par des boyaux ce qui détermine des densités très élevées comprises entre 6 et $14 \text{ km}/\text{km}^2$ au sein des rideaux. Par contre entre chaque position, ces densités sont faibles (de 2 à $4 \text{ km}/\text{km}^2$) car essentiellement représentées par des boyaux de communication. La densité linéaire moyenne de $113 \text{ km}/\text{km}$ de front permet de mettre en évidence les disparités entre pays traversés puisqu'elle est comprise entre 89 (Argonne) et $127 \text{ km}/\text{km}$ de front (Pays rémois). Ces 13 000 km de tranchées et boyaux représentent un volume de terres remuées de plus de 27 millions de m^3 calculé par le produit des surfaces transversales réglementaires d'une tranchée ($2,40 \text{ m}^2$) et d'un boyau ($1,72 \text{ m}^2$)

(Dodici, 2015). Le volume extrait ramené à la surface de la zone de front détermine une ablation de 11 mm. (Tab. 3.1). Ce grand remuement des terres associé au creusement des réseaux de défense a déjà été signalé par les combattants qui considèrent même le réseau de tranchées comme une des merveilles du monde (Marre, 1915) :

« Si le canal de Panama est la huitième merveille du monde, les tranchées du front en sont la neuvième. »

Extrapolés à l'échelle du front ouest (750 km de front), les réseaux de défense creusés durant la Grande Guerre s'élèveraient à 85 167 km de développement, ce qui représente plus de 170 millions de m³ de terres, valeur très proche de celle proposé par Marre en 1915 (150 millions de m³). L'extrapolation à la zone du front ouest, est néanmoins hasardeuse puisque à la lecture des plans directeurs de l'ensemble du front, les résultats champardennais semblent à la fois surestimés par rapport au massif des Vosges à la Flandres mais sous-estimés sur le front de la Somme, marqué par le retrait *Alberich* stratégique qui multiplie le linéaire des réseaux de défense.

Il est tentant de comparer ce grand remuement des terres sur la zone de front ouest corrélative à la Grande Guerre à une crise rhexistasique d'origine anthropique, auquel il faudrait en réalité rajouter les effets de la guerre des mines, de l'Artillerie (bombturbation) et du creusement des abris.

Les densités linéaires et surfaciques moyennes cachent de fortes disparités spatiales selon les grands ensembles naturels ou pays traversés en Champagne-Ardenne (Pays rémois, Champagne sèche et humide, Argonne).

	Linéaire de front (km)	Linéaire tranchées (km)	Linéaire boyaux (km)	Ratio linéaire Tranchées/boyaux	Linéaire tranchées et boyaux (km)	Densité surfacique (km/km ²)	Densité linéaire (km/km de front)	Volume terre remué (m ³)	Ablation mm
Pays rémois craie	40.5	2507.3	2618	0.96	5125.3	5.58	126.6	10 796 333	11.75
Champagne sèche craie	50.4	3172.1	2536.9	1.25	5709	5.55	113.3	11 798 347	11.47
Champagne humide argile	7.8	432.2	296.8	1.46	729	2.65	93.5	1 490 246	8.10
Argonne gaize	16.8	902.6	593.4	1.52	1496	3.27	89.1	3 049 018	11.28
total	115.5	7014.2	6045.2	1.16	13059.3	4.87	113.1	27 133 944	11.30

Tab. 3.2 : Indices morphométriques des réseaux de défenses de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne par milieu naturel traversé.

Les densités linéaires et surfaciques sont les plus importantes dans le Pays rémois, de Berry-au-Bac au fort de la Pompelle avec 5,58 km/km² ou 126,6 km/km de front sur 40,5 km de front. La Cote 108 à Berry-au-Bac sert de point d'appui et contrôle l'entonnoir de percée cataclinale de l'Aisne. Dans la région de Reims, le rôle du relief est nuancé par l'ambiance urbaine, le couvert végétal et la bonne visibilité sur le front qui induisent une profondeur des réseaux de défense plus importante sur 30 km et davantage de boyaux de circulation pour alimenter la première position avec un ratio tranchée/boyau inférieur à 1. En effet, le front de

la côte d'Île-de-France et les buttes témoins offrent de belles vues sur l'ennemi pour l'Artillerie, qui peut vérifier l'efficacité de ses tirs sur la plaine de Reims, dont la blancheur de la craie trahit le tracé des tranchées. Le manque de couvert induit également l'éloignement des cantonnements en 4^{ème} position en carrières souterraines creusées dans les calcaires grossiers du Lutétien. Conscient de la difficulté de fortifier la ville, les premières positions s'organisent à l'extérieur de celle-ci.

En Champagne sèche, recouverte par les pinèdes typiques, les points culminants (Monts de Champagne) font l'objet d'âpres combats pour la lutte des observatoires et cristallisent la ligne de front. La vue sur le dispositif de défense ennemi s'inscrit dans les premières positions qui se renforcent. En l'absence de soutien aérien, l'Artillerie reste aveugle au-delà des Monts de Champagne. Sur le plateau crayeux dégagé, sans points d'appui solides, les premières positions de défense sont hypertrophiées pour résister à une offensive ennemie ce qui explique les densités importantes de tranchées et de boyaux très proches de celles observées dans le Pays rémois (113,3 km/km de front). L'absence de couvert végétal (clarté des forêts de pinèdes) induit davantage de creusement de boyaux de communication entre les positions.

Dans la traversée des fonds de vallée (Tourbe, Suippes, Vesle, Aisne), dans les plaines argileuses et plus particulièrement en Champagne humide sur 7,8 km de front, les réseaux de défense restent peu développés (93,5 km/km de front) car l'hydromorphie des sols empêche le creusement et la fortification de campagne (tranchées surélevées en gabions, drainage forcé). Ces secteurs constituant des ruptures dans le réseau de défense sont généralement couverts par le feu croisé des mitrailleuses disposées sur les versants et les points d'appuis qui les dominent ainsi que par la multiplication des défenses accessoires (réseaux de fils barbelés).

Sur près de 17 km, dans l'Argonne incisée de nombreux ravins (baribans), sous couverture forestière, la forêt limite la visibilité et l'efficacité des tirs d'artillerie (Taborelli *et al.*, 2016b). Les réseaux de défense s'adaptent en creusant davantage les premières positions notamment du côté allemand avec une première position hypertrophiée alors que les autres positions sont quasi inexistantes (volonté de défendre le terrain). Côté français, la multiplication des positions jusque Sainte-Menehould dénote une tactique de soutien de l'arrière pour de nouvelles offensives.

3.1.3. La cote 108 à Berry-au-Bac

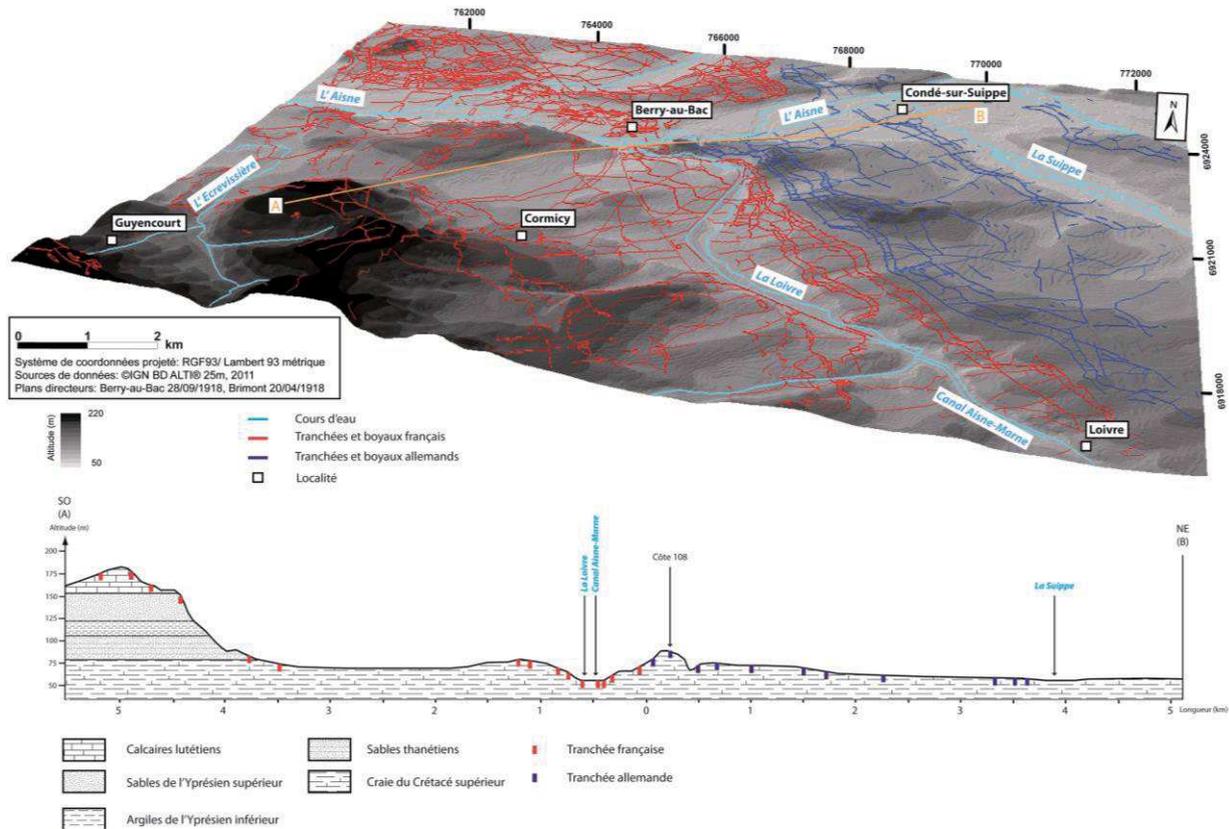


Fig.3.4: Organisation des réseaux de défense alliés et allemands à l'hiver 1918 et coupe géologique dans le secteur de Berry-au-Bac.

Le site atelier du secteur de la Cote 108 est étudié avec l'analyse spatiale des plans directeurs de Berry-au-Bac du 28 septembre 1918 et de Brimont du 20 avril 1918 au 1/20 000. Ce site incontournable de la Grande Guerre s'intègre aux parcours touristiques de l'après-guerre des guides Michelin. Il fait l'objet d'une abondante iconographie (cartes postales), décrit dans les ouvrages (Laforgerie et Weiss, 2013 ; Weiss, 2016) et journaux de marche des opérations (JMO). Il constitue un site d'interfluve entre l'Aisne au Nord et la Loire, son affluent direct au Sud (Fig. 3.4). Ce site s'inscrit au nord du Pays rémois qui constitue la partie occidentale du revers de la côte de Champagne, dominée par les formations tertiaires, délimitées par la côte d'Île-de-France. Cette dernière constitue la terminaison orientale de la crête tristement célèbre du Chemin des Dames entre l'Aisne et l'Ailette, armée par les calcaires lutétiens de l'Eocène. Comme la plupart des sites d'entonnoir de percée cataclinale dans la cuesta d'Île-de-France, des croupes de craie jalonnent le paysage dont la Cote 108 (qui culmine à 89,5 m) et le Mont de Sapigneul (93 m) dans le secteur de Berry-au-Bac. Elles sont sculptées dans la craie blanche du Sénonien (Crétacé supérieur) sans silex, fracturée en subsurface et massive en profondeur au-delà d'une trentaine de mètres (Le Roux et Allouc, 1988). Ces reliefs servent de points d'appui aux réseaux de défense du front de 1914 à 1918. La nappe de la craie est une nappe libre, drainée par les cours d'eau (rabattement piézométrique à faible gradient hydraulique) dont la surface piézométrique connaît de faibles amplitudes en fond de vallée (50 cm à 1 m) contrastant avec les interfluves (10 m). Au sein de l'entonnoir cataclinal, la nappe de la craie est en limite de nappe captive car à l'Ouest, les formations tertiaires, dont

les argiles de l'Yprésien inférieur, la recouvrent. Cette limite de conditions hydrogéologiques contrastées se manifeste par des zones humides caractéristiques des entonnoirs de percées cataclinales, drapées de formations alluviales grossières (graveluches alluviales) et recouvertes de niveaux argilo- tourbeux et de limons. Compte tenu de l'hydromorphie des sols, les fonds de vallées sont difficiles à fortifier dans le cadre de la guerre de position.

Le secteur de Berry-au-Bac est un carrefour de navigation fluviale entre le canal de l'Aisne à la Marne empruntant la vallée de la Loivre et le canal latéral à l'Aisne. Côté français, l'omniprésence des cours d'eau dans ce secteur ainsi que la proximité de la côte d'Île-de-France réduit les distances entre positions. La première et la seconde, respectivement en rive droite et gauche de la Loivre, la troisième au pied de la côte, creusée dans la craie et la quatrième dans les calcaires du Lutétien à son sommet fortifient le secteur. Seulement, 5 kilomètres séparent la première position française de la dernière. Cependant, cette quatrième position permet une bonne observation de la plaine sous-jacente et de bons réglages des tirs d'artillerie. Les Allemands, dès leur recul en septembre 1914, connaissent l'importance du site de la Cote 108 et défendent ce secteur avec beaucoup d'ardeur. La première ligne de leur premier rideau est établie en position de crête militaire, lieu d'où l'on voit et d'où l'on peut tirer. Elle permet également une surveillance rapprochée des deux premières positions françaises. Leurs deuxième et troisième positions sont établies en rive gauche et droite de la Suippe. Ce secteur est un de ces sites emblématiques de la guerre des mines sur l'ensemble du front ouest par sa position de crête et la présence de carrières à ciel ouvert, facilitant le creusement. Cependant, les différentes explosions et attaques de l'Infanterie, notamment celle d'avril 1917 de l'armée française, n'apportent qu'un recul localisé du front. Ce n'est que le 27 mai 1918 que l'armée allemande transperce le dispositif allié en quelques heures, prémices du retour à la guerre de mouvement.

3.1.4. Le secteur de Reims : le rôle des entonnoirs de percée cataclinale

Reims est une ville martyre et s'inscrit dans un secteur calme sans grande offensive durant la guerre de position et sans modification importante de la ligne de front (Cochet, 2002). En effet, depuis le 15 novembre 1914, le front est stabilisé de la mer du Nord aux Vosges et traverse la Champagne en passant par les faubourgs septentrionaux de la ville de Reims. L'intérêt stratégique de Reims repose sur sa situation géographique (Fig. 3.5). En effet, Reims s'inscrit dans l'entonnoir de percée cataclinale de la Vesle à travers la côte d'Île-de-France et contrôle donc un corridor d'accès au Bassin de Paris utilisé par la route nationale 44. La cuesta délimite deux plateaux étagés : la Champagne sèche ou crayeuse à l'Est, et les plateaux tertiaires à l'Ouest (représentés par la Montagne de Reims dans la partie méridionale de la carte et le Massif de Saint-Thierry au Nord-Ouest). L'entonnoir est jalonné par des buttes témoins (Mont de Berru ou de Nogent-l'Abbesse) et des avant-buttes de craie (Mont-Saint-Pierre à l'ouest de Tinquieux, Butte de Montbré au Sud de Reims). Ces reliefs servent d'assise au système fortifié Séré de Rivières du XIX^{ème} siècle qui ceinture la ville avec les forts de Saint-Thierry, de Brimont, de Fresnes, de Witry-lès-Reims, de Nogent-l'Abbesse, de la Pompelle et de Montbré). La ville historique est, quant à elle, installée en rive droite de la Vesle sur des terrasses alluviales étagées. Elle domine un lit majeur marécageux (tourbières), alimenté par la nappe de la craie (Devos *et al.*, 2007), qui est aménagé dans la traversée urbaine (anciens hortillonnages, canal de navigation de l'Aisne à la Marne) (Fig. 3.5).

Dans le cadre de la grande offensive allemande du printemps 1918, le front est profondément enfoncé le 27 mai au Chemin des Dames. Il traverse alors la Vesle le 28 mai à l'Ouest de Reims et se stabilise dans la vallée de la Marne vers Château-Thierry suite à la seconde bataille de la Marne du 15 au 17 juillet 1918. La ville de Reims, le 15 juillet 1918, au moment de l'avancée maximale allemande, se présente donc en situation critique, formant un saillant ou une poche de résistance que les Allemands essaient de déborder en vain à l'Est et à l'Ouest.

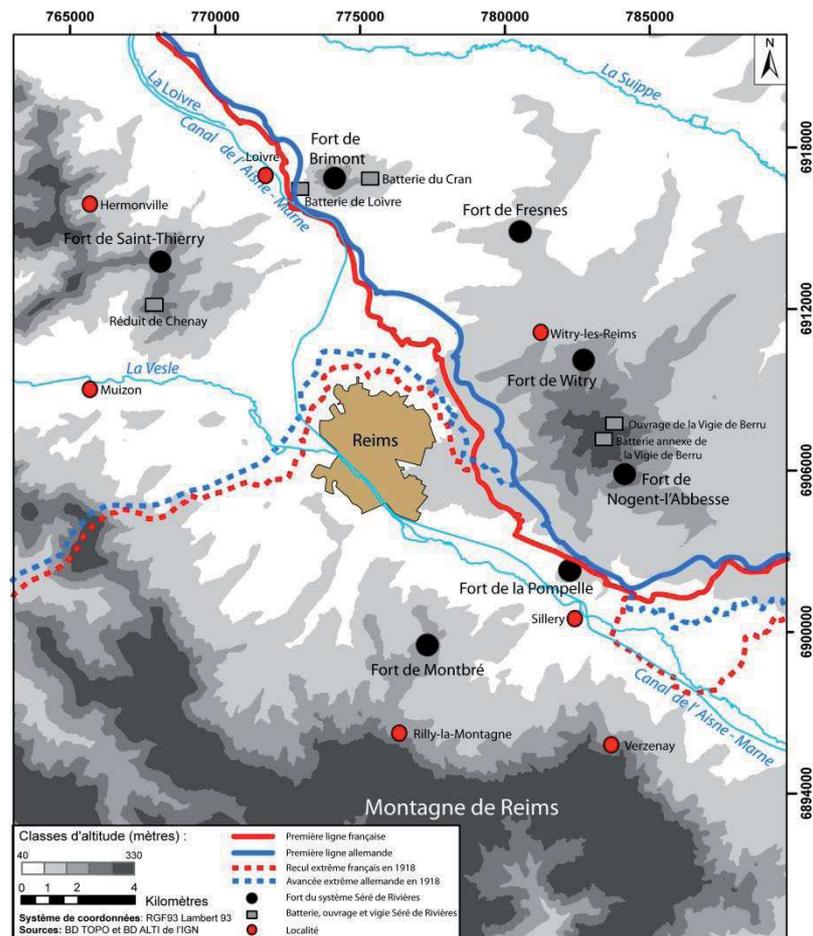


Fig.3.5: Situation géologique et géomorphologique de Reims et ses environs.

La digitalisation des réseaux de défense permet de proposer des indices de mesures de l'impact environnemental de la guerre de position. Les tranchées et boyaux constituent respectivement un réseau de 2507 km et 2618 km linéaires sur les 582 km² de cette zone étudiée, entre le fort de la Pompelle et Berry-au-Bac, déterminant ainsi une densité moyenne de 5,58 km/km². Le long des 40,5 km de front étudiés, les réseaux de défense présentent un développement moyen de 5125 km soit 126 km/km de front. Ce tracé du front nord-ouest sud-est emprunte la vallée de la Loire et longe le canal de l'Aisne à la Marne, pour passer au nord-est de Reims puis rejoindre le fort de la Pompelle. L'armée allemande occupe 3 sites importants de ce secteur, la Cote 108, la butte de Brimont et le mont de Berru, observatoire privilégié sur l'armée française. Elle y établit sa première position, reliée par des boyaux de communication au fort de Brimont et de Nogent l'Abbesse. La seconde position passe à l'arrière des deux buttes témoins, par le fort de Witry et de Fresnes. Les troisième et

quatrième positions se situent respectivement en rive gauche et droite de la Suippe. En septembre 1914, l'armée française reprend le fort de la Pompelle à l'est de Reims et installe son premier rideau défensif qui se poursuit devant la ville et emprunte la vallée de la Loivre jusque Berry-au-Bac. La seconde position, en rive gauche de la Vesle, se structure le long de la route nationale 44 Cambrai-Châlons. La troisième position s'établit au pied de la Montagne de Reims alors que la quatrième, à son sommet, permet une très bonne visibilité sur les dispositifs de défense des deux camps (Fig. 3.6).

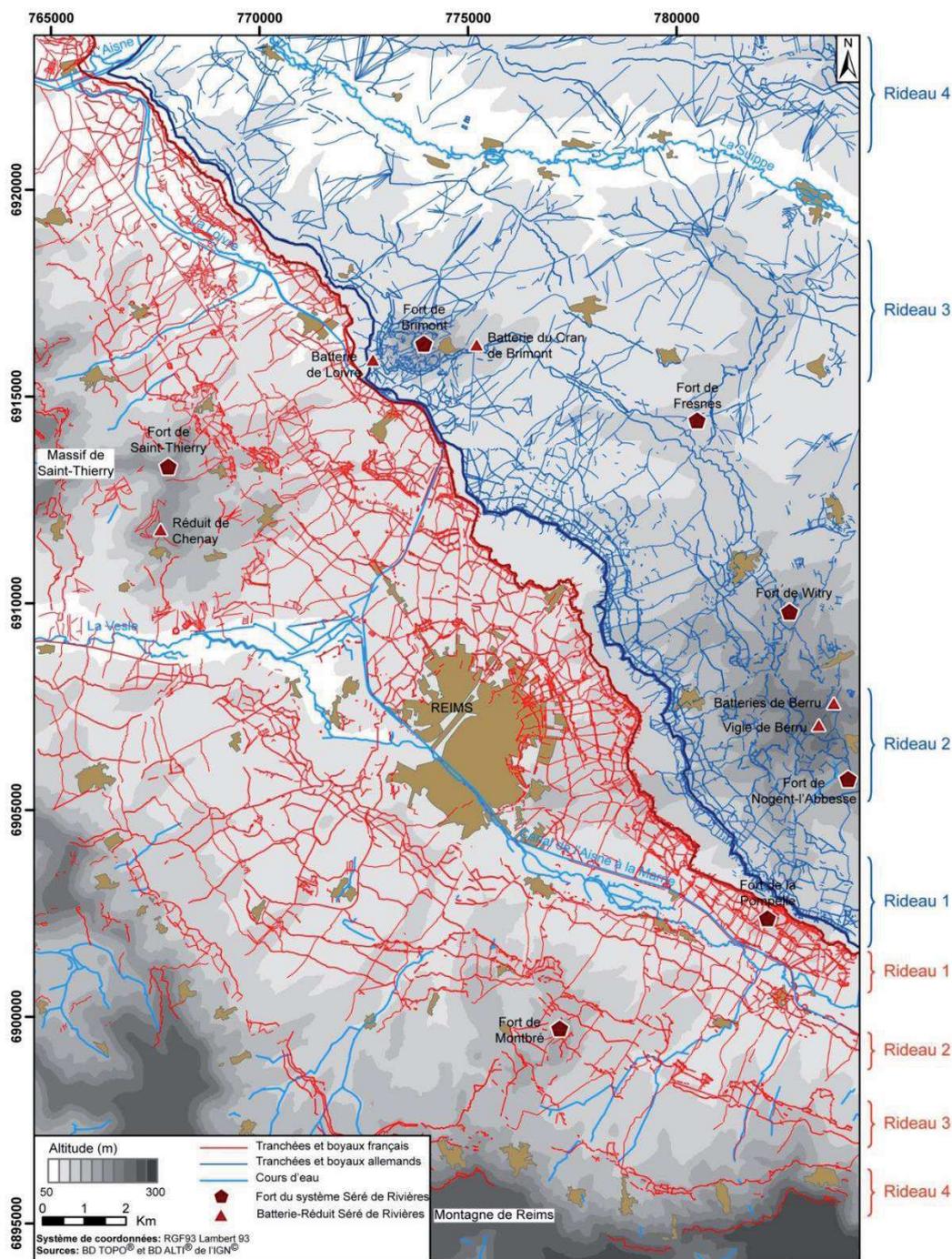


Fig.3.6: Carte des réseaux de défense de la région de Reims en 1918 (avant l'offensive allemande du 27 mai).

En outre, cette densité moyenne de 5,58 km/km² cache de fortes disparités spatiales selon les rideaux, les échelles et les belligérants. En effet, le premier rideau défensif concentre les plus fortes densités (13,6 km/km²) ce qui s'explique par le chevelu des petits postes avancés et le dédoublement des lignes de résistance et de soutien alors que pour les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} rideaux la densité diminue sensiblement (respectivement 8,4, 5,7 et 4 km/km²). Cette densité est également fonction des échelles spatiales car à l'échelle locale, du terrain ou d'un site au cœur d'un réseau de défense (surface en ha), elle est logiquement supérieure à celle mesurée à l'échelle régionale (surface en km²). Enfin, pour des raisons militaires et de confidentialité des informations, la densité est 1,5 à 2,6 fois plus faible du côté allié moins renseigné, que du côté allemand pour les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} rideaux (Fig. 3.7).

La densité des réseaux de défense induit un grand remuement de terres lié au creusement des tranchées. À partir des profils réglementaires des tranchées et boyaux (GQG-EM, 1917b), une surface intérieure transversale moyenne est calculée. Cette dernière, respectivement de 2,40 m² pour les tranchées et 1,72 m² pour les boyaux, affectée au développement de ces travaux de défense, permet d'estimer à 3,56 millions de m³ de terre remuée sur la zone d'étude, soit un volume spécifique de 58 m³/ha. Ces volumes sont logiquement variables selon les rideaux et la situation géomorphologique des tranchées puisqu'ils sont compris entre 60 m³/ha en quatrième rideau français et dépassent 200 m³/ha pour les premiers rideaux défensifs. L'organisation spatiale des densités de tranchées induites par les rideaux de défense et les échelles spatiales utilisées détermine des volumes très hétérogènes de terres déplacées par le creusement des tranchées. Elle sont comprises entre 130 et 220 m³/ha au Chemin des Dames (Arnould *et al.*, 1992), entre 80 et 140 m³/ha dans les forêts de Saint-Gobain et de Coucy-Basse (Arnould et Simon, 1994), et de l'ordre de 34 m³/ha en forêt communale de Varennes-en-Argonne (Amat, 1987).

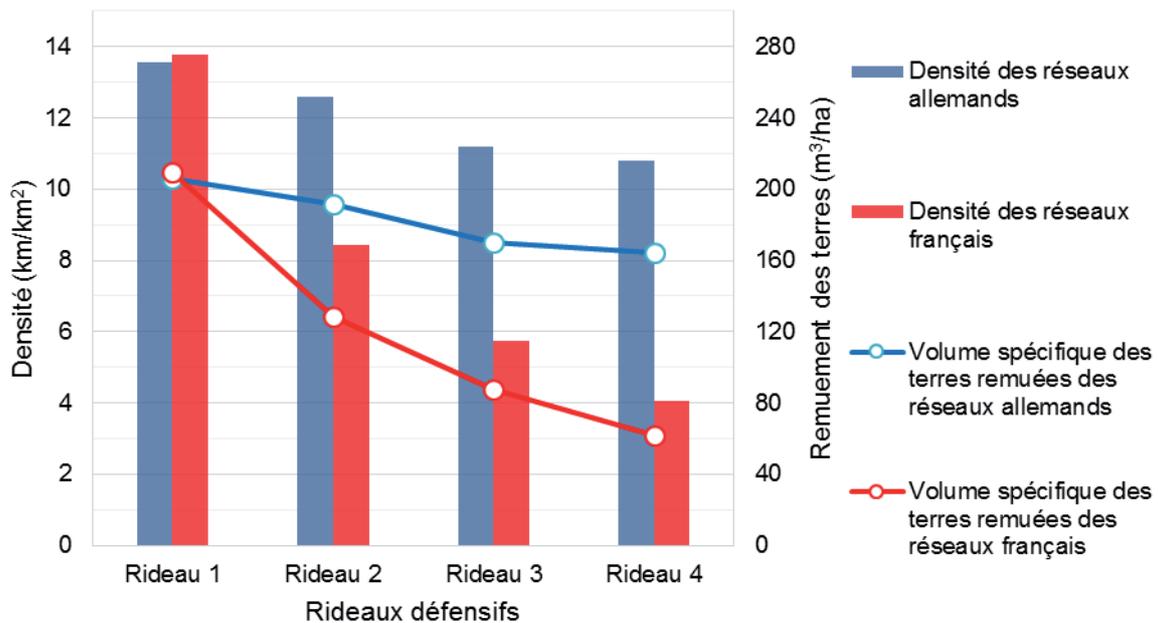


Fig.3.7: Carte des réseaux de défense de la région de Reims en 1918 (avant l'offensive allemande du 27 mai).

La lecture et le traitement sous SIG des plans directeurs réalisés par les Groupes de Canevas de Tir des Armées, croisés au modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN, permettent de mettre en évidence le rôle majeur des conditions géomorphologiques locales du terrain sur l'organisation spatiale du réseau de défense de la zone de front (Fig. 3.8A).

Côté français, les points culminants ou les plus hautes crêtes topographiques régionales (sommet du front de côte) sont utilisés comme postes d'observation intégrés au dernier rideau défensif (arrière lignes du 4^{ème} rideau de tranchées). En effet, sur ces sites, la vue est lointaine, permettant d'observer l'intégralité du dispositif défensif. Ces sites sont donc fondamentaux dans le cadre de combats d'artillerie. En effet, compte tenu des portées de tir et de leur position abritée, les batteries sont aveugles, sans observatoire ni appui aérien. En revanche, l'ensemble de ce 4^{ème} rideau étant en contrebas de la Montagne de Reims, l'appui de l'Artillerie y est difficile si celui-ci vient à être attaqué (Fig. 3.8B).

Les reliefs secondaires ou croupes de craie correspondent à des points d'appui fortifiés (centres, ouvrages, réduits ou fort de Montbré) dans l'organisation spatiale du front (3^{ème} rideau de tranchées). Les mamelons garantissent de multiples avantages avec des sites d'observation sur leur sommet, de bons champs de tir au niveau des crêtes militaires vers la zone de front et sur leurs flancs (tirs de flanquement). Ils offrent également de nombreux angles morts pour l'artillerie ennemie sur leur contre-pente. Mais l'appui d'artillerie est difficile en contrebas de ces reliefs (Fig. 3.8B).

Les talus de petite taille comme les rebords des terrasses alluviales et les remblais des voies de communication (routes, canal de l'Aisne à la Marne) sont utilisés par les tranchées (2^{ème} rideau de tranchées et dernière ligne du premier rideau de tranchées). Le talus exposé au front constitue une « crête militaire » garantissant un bon champ de tir avec une vue lointaine (parallèles de 1^{ère} ligne), mais difficile d'accès pour un soutien d'artillerie. Par contre, le talus en contre-pente (arrière lignes du 1^{er} et du 2^{ème} rideau de tranchées), protégé des tirs d'Artillerie (angle mort pour l'ennemi) et n'offrant qu'un champ de tir très limité, adosse de nombreux abris (Fig. 3.8B).

Ainsi, les glacis de bas de pente du versant sud de la Vesle (2^{ème} ligne du 2^{ème} rideau de tranchées), bénéficient d'un champ de tir étendu sur un terrain découvert (1^{er} rideau et le no man's land) permettant un bon appui d'artillerie. Si l'ennemi déborde le premier réseau de défense, il sera donc exposé au feu de l'Artillerie tout en se concentrant sur les points de passage au-dessus du canal de l'Aisne à la Marne avant de se mouvoir difficilement dans le fond alluvial de la Vesle.

Les zones humides du fond de vallée de la Vesle, entre le 1^{er} et le 2^{ème} rideau de tranchées sont peu fortifiées compte tenu de la proximité de la nappe de la craie et de l'hydromorphie des sols (lourds travaux de gabionnage et de clayonnage des tranchées en surplomb protégées par des digues). Mais la ripisylve et les marais arborés (saulaies-frênaies) jouent le rôle d'écran visuel ou de masque, camouflant le second rideau, et de frange tampon rendant difficile l'accès entre les deux premiers réseaux défensifs (Fig. 3.8B).

Les contre-pentes, situées sur le flanc méridional des croupes de craie et des talus, sont hors d'atteinte de l'Artillerie et protégées de l'observation de l'ennemi (angle mort). Elles sont creusées de boyaux permettant la communication entre tous les réseaux de défense. Ces boyaux perpendiculaires à la zone de front se concentrent au niveau de points de passage permettant non seulement d'accéder aux réseaux de tranchées mais aussi de franchir la Vesle et le canal de l'Aisne à la Marne au niveau des ponts. Ainsi, ces boyaux ne sont pas observables par l'ennemi sans appui aérien, ce qui limite l'efficacité des tirs d'artillerie (Fig. 3.8B).

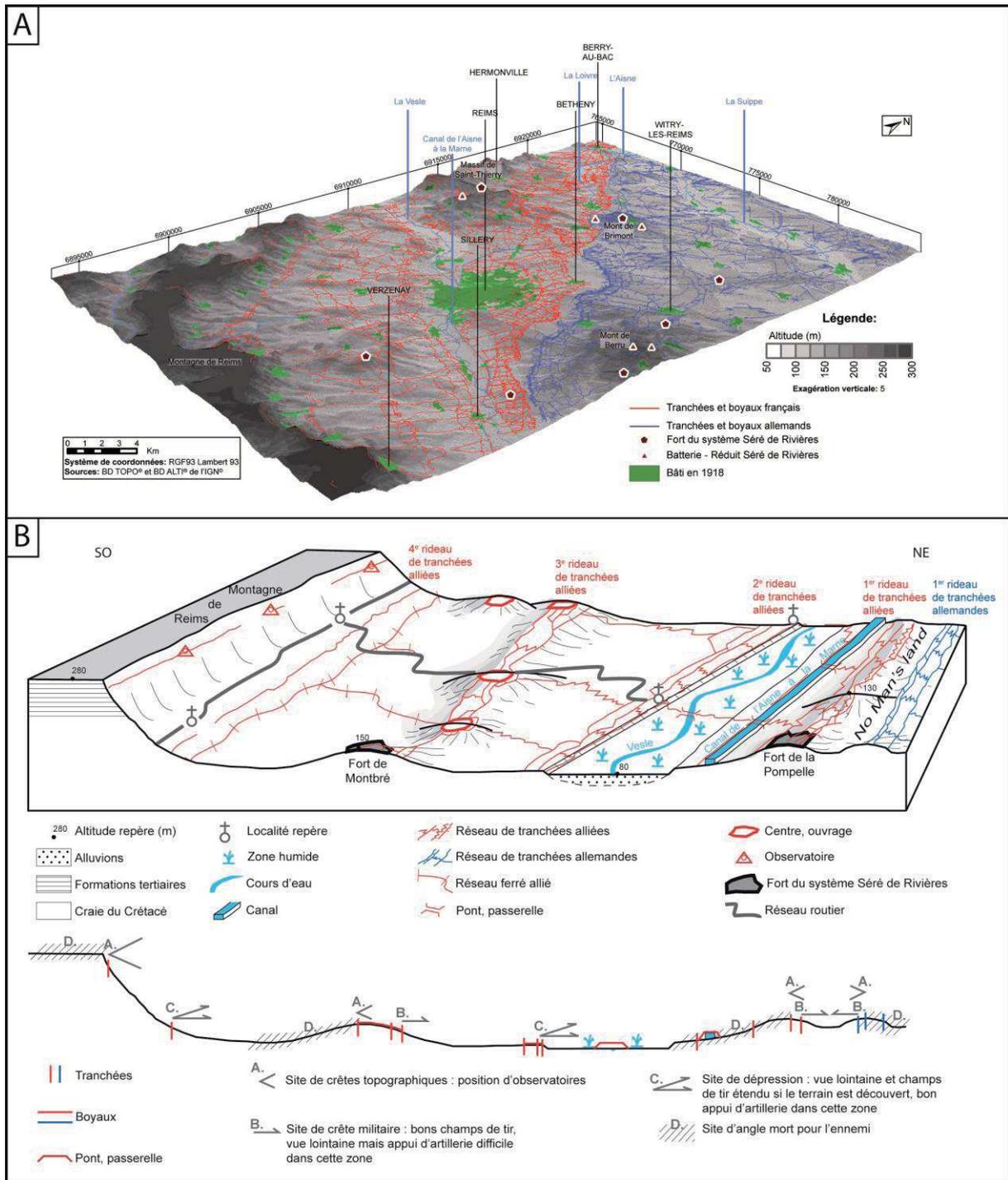


Fig.3.8: A - Vue en relief des réseaux de défense dans le secteur de Reims en juillet 1918. B - Rôle des conditions topographiques sur le réseau de défense à l'est de Reims en juillet 1918.

3.1.5. Les Monts de Champagne : le rôle de la topographie

Dans cette partie de la Champagne sèche où règne la « Craie blanche » du Crétacé supérieur (du Turonien supérieur au Sénonien) et ses formations superficielles dérivées (graveluches), le relief se limite généralement à de molles ondulations qui ne prennent vigueur qu'aux abords immédiats de la côte de l'Île de France à l'Ouest (avant-buttes), et à l'approche de la

côte de Champagne à l'Est. Sur son revers, les très modestes élévations champenoises, regroupées sous l'appellation de « buttes » et de « Monts » correspondent à des avant-buttes dans l'entonnoir de percée cataclinale de la Vesle et à des croupes crayeuses, faisant l'objet de durs combats pendant la Grande Guerre. La notoriété historique de certains de ces sites a dépassé le cercle des spécialistes : quelques-uns sont devenus des lieux de mémoire dont la valeur symbolique s'approche de celle de Verdun (Monts de Champagne, Main de Massiges, Mont Cornillet). La désignation « Monts de Champagne » a parfois été donnée aux hauteurs de la Côte de Champagne, laquelle constitue la limite orientale des grandes plaines crayeuses, qui dominent les zones déprimées du Perthois et du Vallage d'Aisne (Millet, 1960). Dans le sens plus restreint et plus actuel, les « Monts de Champagne » correspondent aux avant-buttes d'altitude comprise entre 200 et 250 m situées entre Reims et la Côte de Champagne.

Depuis Reims, et en se dirigeant vers l'Est (Fig. 3.9), le Mont de Berru (270 m), butte témoin de la côte de l'Île-de-France, et les Monts de Champagne du Massif de Moronvilliers (interfluve Suipe-Vesle) : Mont Cornillet (207 m), Mont Blond (221 m), Mont Haut (257 m), le Casque (246 m), Mont sans Nom (210 m) sont des positions fortifiées dès l'automne 1914 où les Allemands s'établirent.

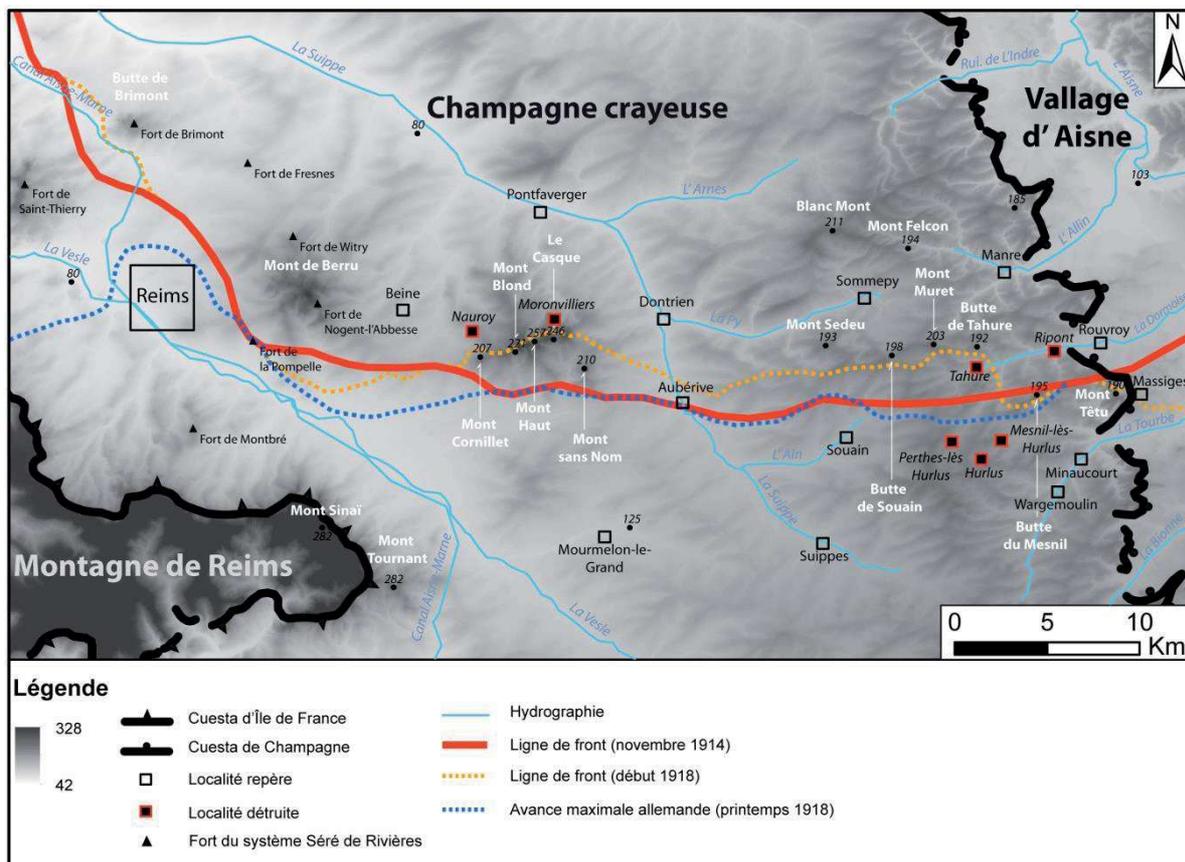


Fig.3.9: Carte de situation des Monts de Champagne

Plus à l'Est, ces hauteurs constituent les interfluvés entre les affluents cataclinaux de rive droite de la Suipe (Arnes, Py, Ain) et ceux anaclinaux de rive gauche de l'Aisne (Allin, Dormoise, Tourbe). Elles forment le Blanc-Mont (211 m), le Mont Felcon (194 m) et le Mont Sedeu (193 m). Enfin, à l'extrême sud-est de cette région nord-marnaise, en se rapprochant du Vallage d'Aisne qui sépare la Champagne sèche de l'Argonne, les vallonnements s'organisent autour de plusieurs modestes élévations, notamment le Mont Muret (203 m) et les « Buttes »

de Souain (198 m), de Tahure (192 m) et du Mesnil (195 m). Cinq villages (Perthes-les-Hurlus, Hurlus, Tahure, Mesnil-les-Hurlus et Ripont) sont complètement détruits durant les batailles de Champagne de 1915 et ne seront jamais reconstruits, réduits à quelques vestiges souvent plus ou moins perdus dans la végétation. La législation française spécifiant qu'aucun nom de commune ne peut disparaître, le nom de ces villages est accolé à celui de communes voisines (d'où les appellations actuelles : Sommepy- -Tahure, Souain - - Perthes-lès-Hurlus, par exemple). Deux autres villages, plus à l'Ouest entre Reims et Suippes, connaissent le même sort durant la bataille des Monts de Champagne du printemps 1917 : Nauroy et Moronvilliers, rattachés aujourd'hui à Beine--Nauroy et Pontfaverger--Moronvilliers.

Certains lieux-dits de la zone des combats sont inattendus en Champagne crayeuse comme le Grand Bois du Togoland ou le Bahr El Gazal qui témoignent de l'engagement très important des troupes d'infanterie coloniale. Enfin, dans les terminaisons orientales du plateau crayeux, le tracé de la Côte de Champagne est fortement découpé par des ravins délimitant des croupes oblongues ou des promontoires et éperons. Ces reliefs dominant le Vallage d'Aisne constituent des sites d'observation d'intérêt stratégique majeur et servent de points d'appui et de liaison entre les dispositifs de défense de Champagne et d'Argonne. La partie Est du dispositif (région de Sommepy-Tahure) est principalement concernée par les attaques françaises répétées de février à mars 1915 et les combats de septembre - octobre 1915 (offensive Joffre), tandis que la partie Ouest (les Monts de Champagne) l'est surtout par les combats de mai 1917 qui sont contemporains de ceux du Chemin des Dames (offensive Nivelle) et dont l'objectif principal était la prise des sommets transformés en centres de résistance par les Allemands. En 1918, consécutivement à la deuxième bataille de la Marne et à la percée allemande de la fin du mois de mai entre Château-Thierry et Dormans, l'ensemble de la zone allant de Reims à Massiges et qui s'étend vers le Nord jusqu'à l'Aisne, fut à nouveau le théâtre de violents combats. L'une des visées de l'État-Major allemand était Reims mais les armées germaniques furent arrêtées par les troupes du Général Gouraud qui résistèrent jusqu'au 9 juin, notamment au fort de la Pompelle. Inquiets de l'arrivée imminente des renforts américains, les Allemands lancèrent alors le « *Friedensturm* » (l'assaut pour la paix) le 15 juillet 1918. Les assauts allemands se brisèrent à l'est de Reims sur les troupes du Général Gouraud. En effet, renseignées la veille grâce à un coup de main très audacieux d'un petit groupe de grenadiers emmenés par le sergent Joseph Darnand (le futur chef de la milice de Vichy) dans les lignes allemandes au nord-est du « Mont sans Nom », les troupes françaises s'étaient repliées et reformées en deuxième position. Les tirs d'artillerie allemands sur la première position furent donc sans effet et les Français purent opposer une résistance victorieuse. Cet échec allemand de la « dernière bataille » constitua un tournant de la guerre en Champagne mais les combats durèrent jusqu'à fin septembre, début octobre 1918, lorsque le Maréchal Foch (le Général de Corps d'armée est devenu Maréchal le 06 août 1918) déclencha une offensive générale qui eut pour conséquence le reflux définitif des troupes allemandes et leur repli sur l'Aisne. Le village de Sommepy est libéré le 28 septembre, le Blanc-Mont le 2 octobre (avec l'appui déterminant du Corps des Marines américains), Rethel le 5 octobre.

L'analyse des plans directeurs de Beine, Ste Marie à Py, Tahure et Cernay-en-Dormois sous SIG permet de comprendre l'organisation spatiale du front de ce secteur (Fig. 3.10). Les deux armées se sont installées sur les hauteurs des monts de Champagne pour la première position. Les Allemands possèdent un second rideau passant par les villages de Beine, Dontrien et Sommepy, ainsi qu'un troisième à environ 4 kilomètres en arrière. Quant aux Français, leur

second rideau correspond à leur première position avant leurs différentes avancées d'avril 1917 (partie occidentale) et septembre 1915 (partie orientale). Une troisième et une quatrième position se retrouvent devant et derrière les villages de Mourmelon et Suippes. Du fort de la Pompelle à la Main de Massiges, le front s'étend sur 52 kilomètres et concentre plus de 6 000 kilomètres de réseaux de défense, correspondant à une densité linéaire moyenne de 116 kilomètres de tranchées et de boyaux par kilomètre de front ou à une densité surfacique de 555 m/ha (Tab. 3.2). Ces chiffres cachent cependant de fortes disparités : les densités peuvent atteindre 900 mètres par hectare au sein d'une position mais entre les positions il n'y a que peu ou pas de tranchées. La Champagne crayeuse présente une des plus fortes densités de tranchées de Champagne-Ardenne et, plus particulièrement, un réseau de boyaux très développé. Cette spécificité s'explique par l'exploitation des contre-pentes offertes par les nombreux talwegs secs mais également par la mobilité de la ligne de front. En effet, à la différence du secteur de Reims où les verrous de Vrigny et de la Pompelle ont résisté aux assauts allemands, déterminant une ligne de front stable durant 3 ans, dans les Monts de Champagne, les offensives de 1915 et de 1917 impactant les premières positions, induisent le creusement de nouveaux boyaux pour desservir les parallèles. À la différence du secteur de Reims, les combats des Monts de Champagne s'inscrivent dans une guerre d'observatoires situés sur les sommets, permettant de régler les tirs d'artillerie mais dénués de sites de crêtes de tirs et s'inscrivent également dans la guerre des mines dans la partie orientale de la Champagne crayeuse. Ici, la géologie homogène n'est pas discriminante dans la structuration des réseaux de défense.

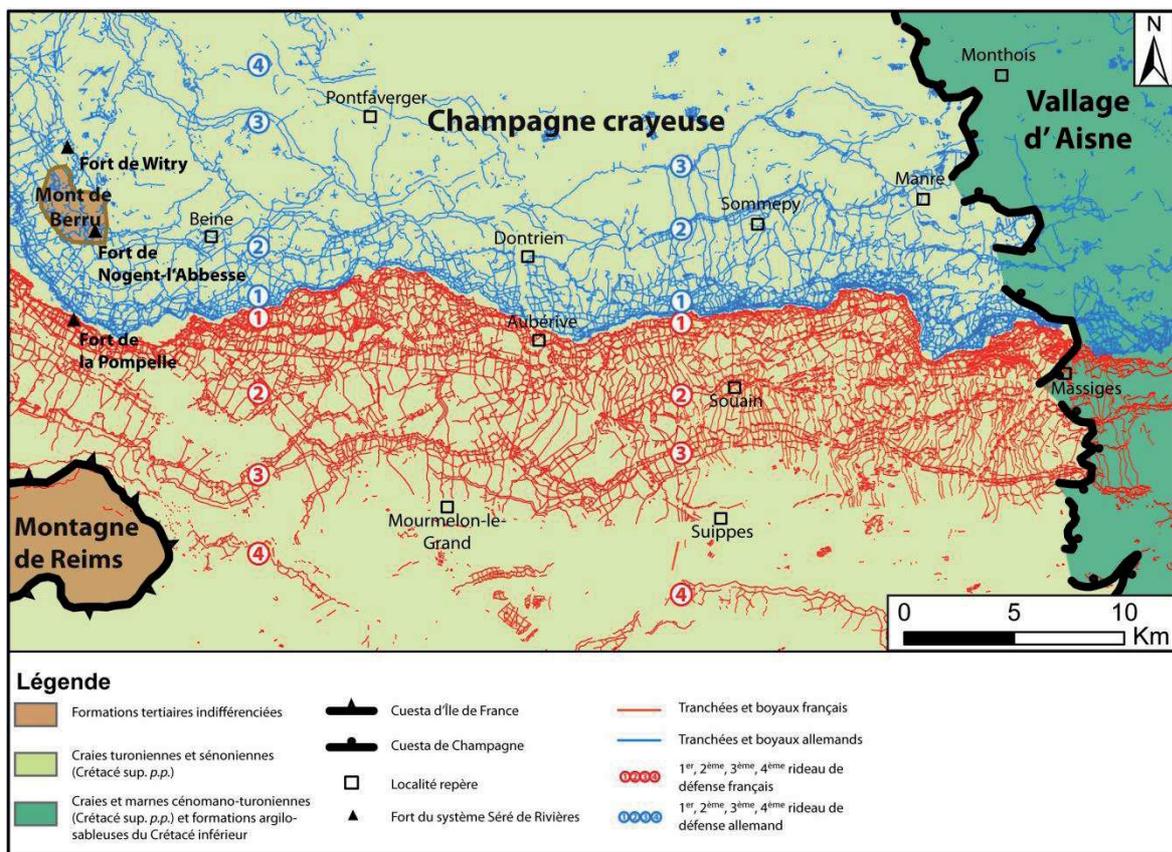


Fig.3.10: Carte des réseaux de défense dans les Monts de Champagne en 1918.

3.1.6. Combat près d'un village et d'une source : exemple de Tahure

Tahure était un village construit sur la craie de Champagne et vivait notamment de l'élevage de moutons dans les savarts avoisinants. À l'aube de la guerre, il comptait 185 habitants (les Tahuras), une mairie, une école et une église. Le village sera occupé par les Allemands de septembre 1914 à octobre 1915, le front étant installé à 4 km plus au sud matérialisé par les cratères de mines de l'ancien no man's land (Fig. 3.11) sur une croupe de craie vulnérable car dominée par les Monts de Champagne (Butte de Tahure, Mont Muret) servant d'observatoires aux Allemands. Le village va subir d'importants dégâts pendant la Seconde Bataille de Champagne, objectif d'artillerie de l'armée française. Les Allemands, organisés dans les ruines des maisons et dans les caves ne reculent qu'en octobre 1915 sur les hauteurs de la Butte de Tahure et du Mont Muret, 1,5 km au nord du village et bénéficient toujours de l'observation mais également de la crête de tirs. Le tracé du front forme alors un saillant au niveau de Tahure et un rentrant dans le dispositif plus à l'Est. Les ruines du village constituent un point d'appui pour l'armée française, largement fortifié lors de sa reprise. De plus, en reprenant ce secteur, la source de la Dormoise, petit cours d'eau anaclinal de rive gauche de l'Aisne, permet un approvisionnement rapide et direct des hommes en première position dans un contexte de sécheresse généralisée inhérente à la perméabilité de la craie. Le village et la source sont abandonnés en juillet 1918 pour un repositionnement des troupes en seconde position, comme un retour à l'état initial des deux armées du début 1915. Sur les plans actuels de l'IGN au 1/25 000, les tracés des tranchées sont reportés de manière aléatoire ainsi que quelques entonnoirs de mines. Seuls les plans directeurs des GCTA permettent de représenter l'ensemble des dispositifs de défense de la guerre de position de 1918 avant le recul français. (Fig. 3.11). Des associations œuvrent pour conserver la mémoire de ce qu'était la vie quotidienne dans ces villages champenois, généralement de moins d'une centaine d'âmes. Aujourd'hui, le village détruit de Tahure est englobé dans le camp militaire de Suippes de 13 500 ha. Cependant, l'association du souvenir de Sommepey-Tahure, en collaboration avec les militaires, aménage et entretient les ruines du village.

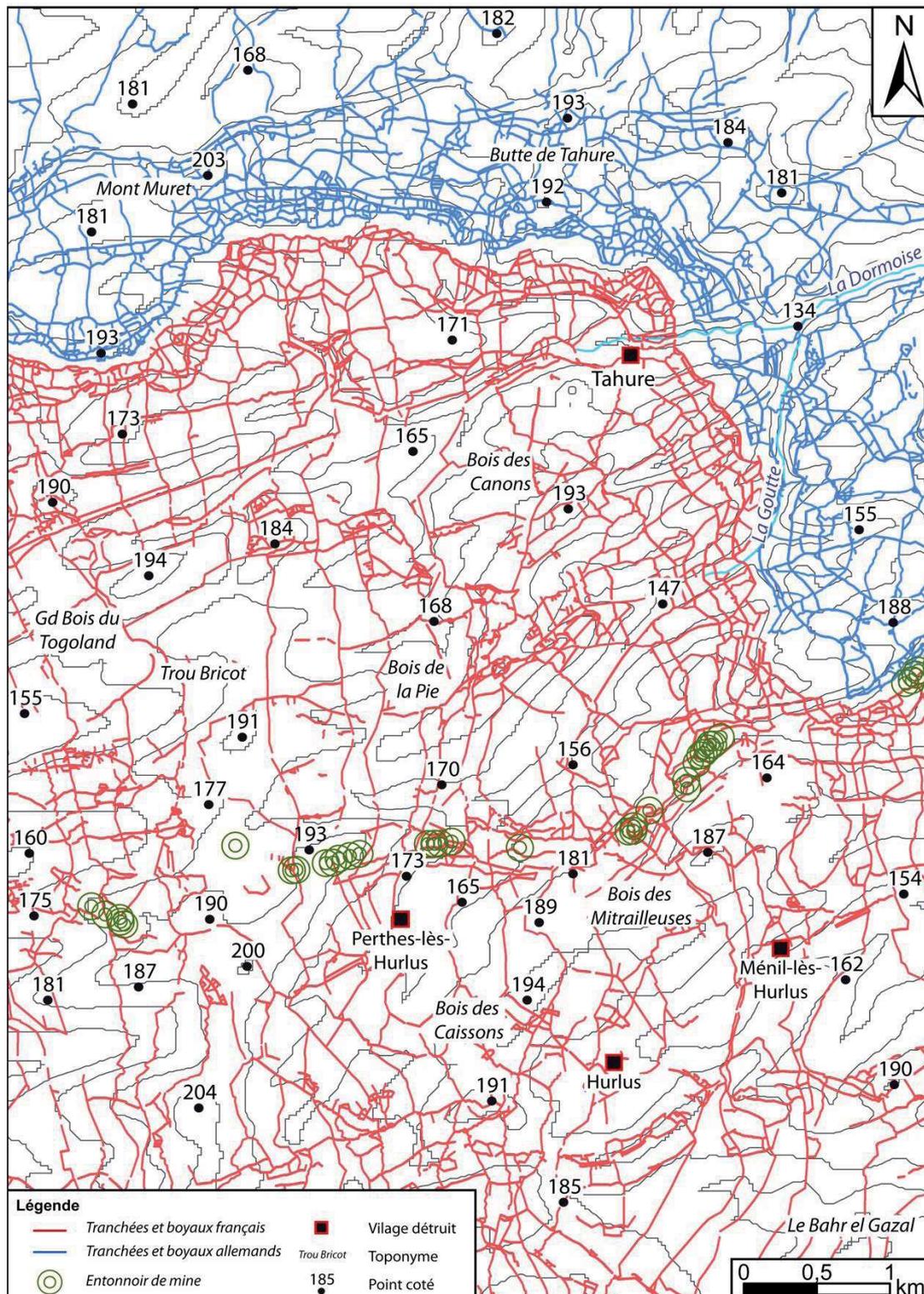


Fig.3.11: Carte des réseaux de défense autour de Tahure en 1918.

3.1.7. Front de côte de Champagne : la Main de Massiges

La côte de Champagne délimite deux surfaces étagées. D'une part, la Champagne crayeuse ou pouilleuse appelée également Champagne sèche qui constitue son revers à

l'Ouest dans les craies du Crétacé supérieur (Turonien au Campanien), et d'autre part, la Champagne humide ou Vallage d'Aisne qui forme sa dépression orthoclinale à l'Est dans les formations tendres du Crétacé inférieur. La côte présente un tracé particulièrement découpé ou digité par les affluents anaclinaux de rive gauche de l'Aisne (Bionne, Dormoise, Tourbe, Muette) et les vallons tributaires généralement secs car périglaciaires. Ces « ravins » séparent des promontoires, éperons ou saillants ou « Monts » dont la forme évoque les doigts d'une main au nord du village de Massiges (d'où le nom de la « Main de Massiges »), ou une « Tête de vipère » plus au nord qui culmine à 199 m au Mont Têtu. La côte de Champagne est une cuesta double marquée par un replat structural qui sépare la côte du Turonien (craie blanche sur les « dièvres » ou craies marneuses) de la côte du Cénomaniens (craies marneuses sur argiles) à l'Est. Les éperons de la côte de Champagne constituent ainsi de nombreux sites d'observation d'intérêt stratégique majeur, servant de points d'appui aux dispositifs de défense et de liaison entre les fronts allemands de Champagne et d'Argonne. Ce site a fait l'objet de violents combats durant la deuxième offensive de Champagne (septembre-octobre 1915) avec une ligne de front initiale positionnée près du village de Massiges. La « Main de Massiges », dominant le Vallage d'Aisne de 70 m, est située à la terminaison orientale de la cuesta. Comme de nombreux sites de la Grande Guerre, la toponymie actuelle est héritée du conflit. Ceux sont les « Marsouins » (régiment d'infanterie de marine) qui désignèrent ce site « la Main de Massiges » dont chaque éperon correspond à un doigt de la main avec d'Ouest en Est, le Faux Pouce, le Pouce, l'Index, le Médius et l'Annulaire (Fig. 3.12). Si les éperons sont fortifiés par plusieurs lignes de tranchées, les ravins, sous le feu, restent peu équipés en tranchées et boyaux et leurs versants sont creusés de galeries souterraines permettant de circuler sous les doigts de la « Main de Massiges ». Sur ses pentes, le Corps d'Armée Coloniale (dont l'équivalent actuel le plus proche serait l'Infanterie de Marine) perdit des milliers d'hommes pour des gains insignifiants de quelques dizaines de mètres en 1915, ceci en vain car cette position ne fut finalement dégagée entièrement que fin septembre 1918. Le site de la « Main de Massige » illustre le rôle fondamental des fronts de côte dans l'organisation spatiale des réseaux de défense, stratégiquement gommé à petite échelle compte tenu de leur tracé croisé respectif (ligne de relief nord-sud et ligne de front ouest-est). En effet, à l'échelle tactique, la digitation du front de côte offre de multiples sites de défense et d'observations, à la fois locales et régionales sur le dispositif de défense adverse.

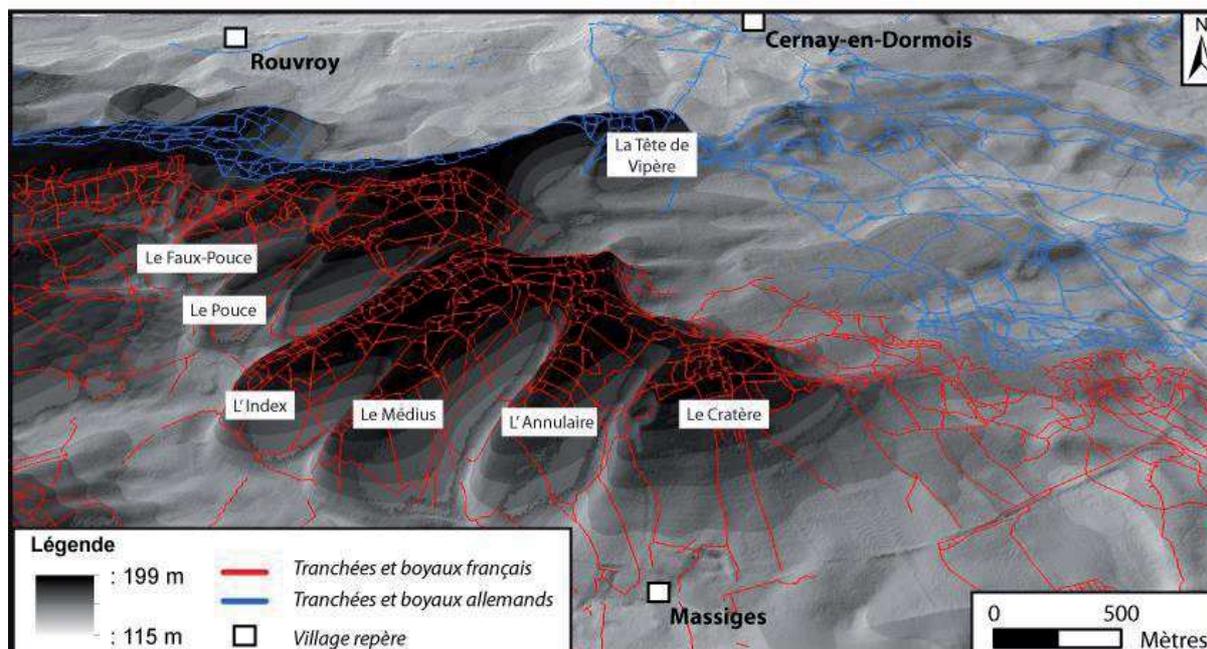


Fig.3.12: Carte des réseaux de défense en relief sur la « Main de Massiges » après les combats de Septembre 1915.

3.1.8. Champagne sèche, Champagne humide et Argonne : le rôle de la géologie.

Si l'approche sectorielle (Reims et Monts de Champagne) témoigne de l'importance des lignes de relief au sein d'un même contexte géologique, l'analyse synthétique des indices morphométriques des réseaux de défense sur l'ensemble du front champardennais montre le rôle fondamental des formations géologiques dans leur organisation (Tab 3.1). Une comparaison est réalisée entre trois régions naturelles : la Champagne sèche, la Champagne humide et l'Argonne sur 45 km de front (Fig. 3.13).

Sur 21,5 km, la Champagne crayeuse ou pouilleuse appelée également Champagne sèche constitue le revers de la Côte de Champagne à l'Ouest dans les craies du Crétacé supérieur (Turonien supérieur au Campanien). Du village de Souain à Massiges, le front évolue après la reprise de 4 km vers le Nord lors des Batailles de Champagne de 1915, perdus pendant les attaques allemandes de juillet 1918.

La Champagne humide ou Vallage d'Aisne sur 7,8 km constitue la dépression orthoclinale de la Côte de Champagne, à l'Est dans les formations tendres du Turonien inférieur ou « dièves » (craie marneuse). Les sols hydromorphes caractérisent cette plaine sans reliefs, drainée par l'Aisne et ses affluents de rive gauche (Bionne, Tourbe, Dormoise). Dénuée de grands massifs forestiers, elle est cultivée, pâturée et ponctuée de bois isolés. Cette large dépression argileuse à découvert peu propice aux grandes offensives constitue un secteur calme de la Grande Guerre.

L'Argonne forme le revers de la côte du Cénomanién (ou côte d'Argonne) armé par la gaize albo-cénomaniénne, un grès poreux, gris-vert, siliceux, relativement tendre et léger (densité comprise entre 1,4 et 1,54) reposant sur des argiles imperméables de l'Albien (Argiles du Gault) (Guérin et Laurain, 1982). L'Argonne est enclavée entre l'Aisne à l'Ouest, et son affluent l'Aire à l'Est qui présente un cours méridional dont de nombreux vallons et ravins tributaires, nommé « barribans » par Léry en 1916 :

« De tous les côtés, en tous sens, s'ouvrent des ravins très étroits, aux flancs abrupts. Les gens du pays les appellent des barribans. Ils offrent un obstacle insurmontable à quiconque veut, en dehors des sentiers, cheminer dans les bois. ».

Ces ravins incisent la surface de l'Argonne en recoupant la gaize et les argiles sous-jacentes. Ils drainent de nombreux cours d'eau alimentés par des lignes de sources, et sont barrés par des plans d'eau. L'humidité est entretenue par des fortes précipitations annuelles (jusqu'à 1200 mm à Châtel-Chéhéry). Cette côte, orientée globalement nord-sud, forme une barrière naturelle ou marche forestière (Laurent, 1948) avec un commandement d'environ 100 m. La couverture forestière, l'absence de voies larges de communication et la segmentation du revers de la côte par les ravins constituent un véritable frein à la progression des troupes dans cette forêt. Après l'avancée de l'armée allemande en août 1914, puis sa retraite sur des points hauts, celle-ci entre dans la forêt d'Argonne à la fin septembre 1914 pour faire le lien entre le front de Champagne et la Butte de Vauquois avant Verdun. L'armée française est déjà installée en forêt et repousse les avancées allemandes, fixant le front à la mi-octobre. Même si ce front est secondaire, l'armée française doit contenir l'ennemi pour éviter un débordement par l'ouest de Verdun ainsi que pour protéger la ligne de chemin de fer entre Châlons-sur-Marne et Verdun. Les opérations allemandes en Argonne, de fin septembre 1914 à fin juillet 1915, ne provoquent qu'un recul localisé du front de 1 km dans le bois de la Gruerie, la Haute-Chevauchée et dans le secteur de la Fille Morte. Cette retraite française se visualise par la présence de cratères de mines dans le secteur de la Harazée, illustrant l'ancienne ligne de front du secteur. Il faudra attendre les offensives des mois de septembre et octobre 1918 pour que le front d'Argonne soit de nouveau actif. L'armée française à l'Ouest sur les terrains crayeux et l'armée américaine à l'Est dans la vallée de l'Aire avancent plus rapidement que les deux divisions engagées dans le massif forestier d'Argonne. Les Allemands tendent de nombreuses embuscades et le front dessine alors un saillant vers le Sud. Environ 150 000 soldats périssent sur ces 20 kilomètres de front pendant ces quatre années de guerre.

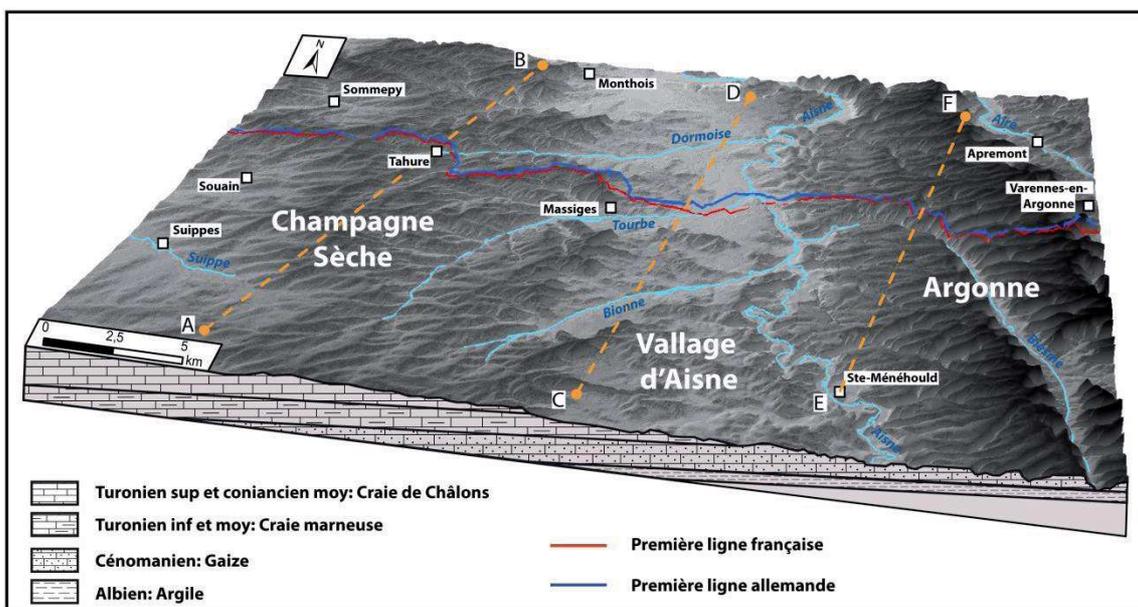


Fig.3.13: Inscription géomorphologique des lignes de front en Champagne sèche, Vallage d'Aisne et en Argonne.

A l'échelle de ces trois pays, le front s'égrène sur 45 km, soit 6 % du front occidental avec 4 303 km de tranchées et boyaux digitalisés traduisant une densité linéaire de 95 km de tranchées et de boyaux pour 1 km de front, chiffre légèrement inférieur à la moyenne champardennaise (113 km/km de front). Cependant, ce chiffre cache de fortes disparités régionales. Alors que la « Champagne humide » et « l'Argonne » ont respectivement une moyenne de 74 et 78 km de tranchées et boyaux par km de front, la « Champagne sèche » est densément plus fortifiée avec 116 km de tranchées et boyaux par km de front. Cette densification s'explique à la fois par la mobilité de la ligne de front (1^{ère} et 2^{ème} batailles de Champagne), et également par l'intérêt stratégique de ce plateau dégagé, propices à la guerre des observatoires (Fig. 3.14). L'Argonne, par son ambiance forestière et le Vallage d'Aisne, avec des sols hydromorphes à découvert nécessitant de lourds travaux de gabionnage (tranchées surélevées) restent plus difficiles à défendre et ne correspondent pas à des secteurs où l'attaque de grande ampleur est envisageable.

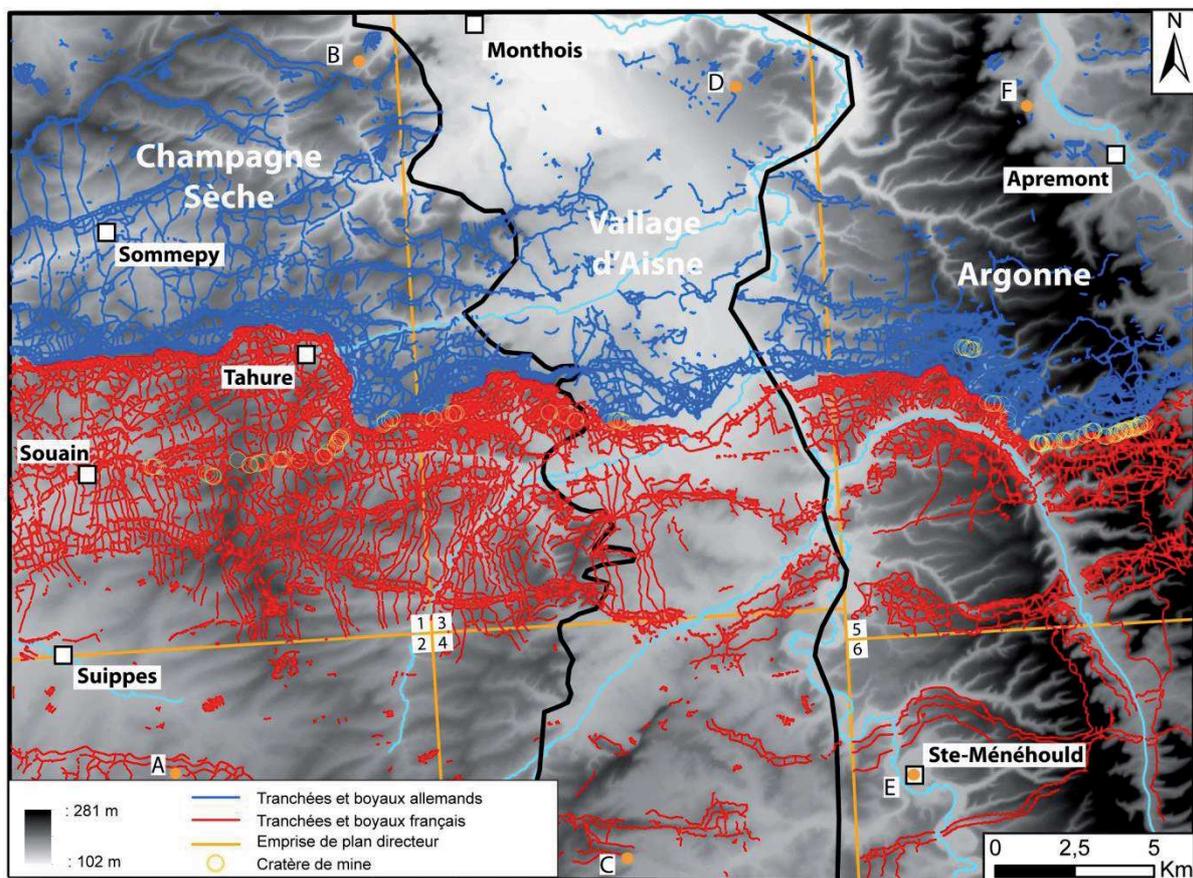


Fig.3.14: Réseaux de défense en Champagne sèche, Vallage d'Aisne et Argonne. Plan directeur : (1) Tahure, (2) Somme-Suippe, (3) Cernay-en-Dormois, (4) Valmy, (5) Forêt d'Argonne et (6) Sainte-Ménéhould.

Ces réseaux de défense (tranchées et boyaux) s'organisent en positions, chacune constituée de plusieurs lignes de tranchées. En Champagne sèche, chaque camp possède 4 positions. Les secteurs du Vallage d'Aisne et d'Argonne sont davantage fortifiés par les Français avec 5 positions, alors que les Allemands en ont seulement 3 et 2 (Tab 3.3). La largeur moyenne du no man's land entre les premières lignes de chaque armée (230 m) reste plus faible en « Champagne sèche » et en « Argonne » (158 m) permettant le développement de la guerre des mines (59 cratères recensés en « Champagne sèche » et 91 cratères en « Argonne »). En

effet, pour chacun de ces sites de guerre souterraine, la valeur minimale et maximale de la largeur du no man's land est respectivement de 37 et de 125 m (Tab 3.3). Dans le Vallage d'Aisne, la ligne de front est cristallisée dans la vallée de la Tourbe dont les formations alluviales entretiennent des zones humides exacerbant l'hydromorphie des sols sur dièves. La faible densité linéaire de réseau de défense (74 km/km de front) s'explique, d'une part par l'état hydrique des sols peu propice à la traficabilité et à la défense (inondations des tranchées et boyaux), et d'autre part, par l'absence de masque au sein d'une dépression sous le feu de l'Argonne et de la Champagne. C'est dans ce secteur que la largeur du no man's land atteint son maximum (1 320 m).

Indice	Total			Champagne sèche			Vallage d'Aisne			Argonne		
	Français	Allemand	Total	Français	Allemand	Total	Français	Allemand	Total	Français	Allemand	Total
Longueur de front (km)			45,1			21,5			7,8			15,8
Aire no man's land / Longueur de front (m)			230,6			158,1			576,9			158,2
Largeur minimum du no man's land (m)			37			63			57			37
Largeur maximum du no man's land (m)			1320			432			1320			692
Nombre de cratères de mine (plan directeur)			161			59			11			91
Nombre de positions				4	4	8	5	3	8	5	2	7
Largeur du front (km)				14,8	10,1	24,9	12,7	7,4	20,1	14,8	6,8	21,6
Longueur de tranchée (km)	1352,2	961,3	2313,6	773,1	503,3	1276,4	188,3	145,8	334,2	390,7	312,1	702,9
Longueur de boyau de communication (km)	1292,8	697,0	1989,9	850,0	368,1	1218,2	138,7	104,0	242,7	304,0	224,8	528,8
Longueur de tranchée et boyau (km)	2645	1658,4	4303,5	1623	871,5	2494,7	327,0	249,9	577	694,8	536,9	1231,7
Densité linéaire de tranchée (km/km de front)	29,9	21,3	51,3	36,0	23,4	59,4	24,2	18,7	42,9	24,7	19,8	44,5
Densité linéaire de boyau (km/km de front)	28,6	15,4	44,1	39,5	17,1	56,7	17,8	13,3	31,1	19,2	14,2	33,5
Densité linéaire de tranchée et boyau (km/km de front)	58,6	36,7	95,4	75,5	40,5	116	41,9	32	74	44	34	78

Tab 3.3 : Résultats de l'analyse spatiale des réseaux de défense de Champagne sèche, du vallage d'Aisne et d'Argonne

Des coupes géologiques d'orientation SSO-NNE sont réalisées à travers l'ensemble des réseaux de défense français puis allemand (A-B en Champagne sèche, C-D dans le Vallage et E-F en Argonne), matérialisé par un sigle rouge ou bleu pour chaque tranchée recoupée (Fig. 3.15). Les densités surfaciques sont calculées par des bandes de 500 m parallèles au no man's land ainsi que le ratio linéaire boyau/tranchée (Rb/t) pour chaque camp.

En « Champagne sèche », le paysage est découvert, les tranchées sont creusées dans les croupes de craie à l'abri des yeux de l'ennemi, ne permettant pas un échelonnement des positions bien distinctes. Les armées françaises et allemandes creusent jusqu'à 16 km/km² de tranchées et boyaux dans les 500 premiers mètres au contact du no man's land, soit 1,6 km à l'hectare. Les deux premières positions de chaque camp se confondent dans les 5 premiers kilomètres, déterminant un Rb/t proche de 1, tant par la crainte d'une attaque ennemie et le renforcement des positions, mais également par l'héritage de la reprise de terrain par l'armée française des deux batailles de Champagne en 1915 (Fig. 3.15). Le dispositif de défense s'organise donc bien autour des parallèles de résistance qui doivent tenir à tout prix les sites d'observation.

Dans le Vallage d'Aisne, les trois positions à découvert s'étalent davantage pour l'armée

française, ce qui détermine plus de boyaux dans le dispositif de défense et qui se traduit par un fort Rb/t et une plus faible densité de tranchées (74 km/km de front). La première position s'établit sur les berges de la rivière Tourbe (barrière hydrographique). La seconde et la troisième sont en position de promontoire (site d'observation) dans la craie marneuse à l'est de la rivière Bionne. Par contre, l'armée allemande située dans la plaine, établit ses trois positions, non pas au sommet des interfluves mais en crête de tir, et en lisière sud des Bois de Ville, de Cernay et d'Autry (effet de masque végétal) (Fig. 3.15).

En Argonne sous couvert forestier, l'armée française édifie 4 positions bien distinctes et espacées de 4 à 5 kilomètres chacune. La première au contact du no man's land en rive droite de la Biesme s'inscrit sur l'interfluve entre la rivière éponyme et le ruisseau de Charmes, alors que les trois autres s'établissent en position de promontoire en rive gauche de la Biesme (seconde position), du ruisseau de la Fontaine Le Prêtre (3^{ème} position) et du Sougniat (4^{ème} position). Par contre, l'armée allemande édifie une principale position extraordinairement dense voire hypertrophiée, en alignant jusque 14 lignes de tranchées parallèles sur environ 4 kilomètres de profondeur (16 km/km²). Ce premier rideau représente approximativement 300 km de tranchées et de boyaux sur les 15 km de ligne de front étudiés soit 82 % des réseaux de défense allemands en Argonne. Une seconde position discontinue est retrouvée au sommet de l'interfluve de la rivière Bâtons et Charlevaux à 4,2 km du no man's land (Villate, 1925 ; Taborelli *et al.*, 2016b) (Fig. 3.15). Un troisième rideau très disparate et non visible sur la figure est retrouvé sur la rive droite de l'Aire près de Grandpré. Que ce soit dans les réseaux de défense français ou allemands, les barribans ne sont pas fortifiés car difficilement défendables (argile du Gault, zone humide et ligne de source) et sous le feu croisé des tranchées.

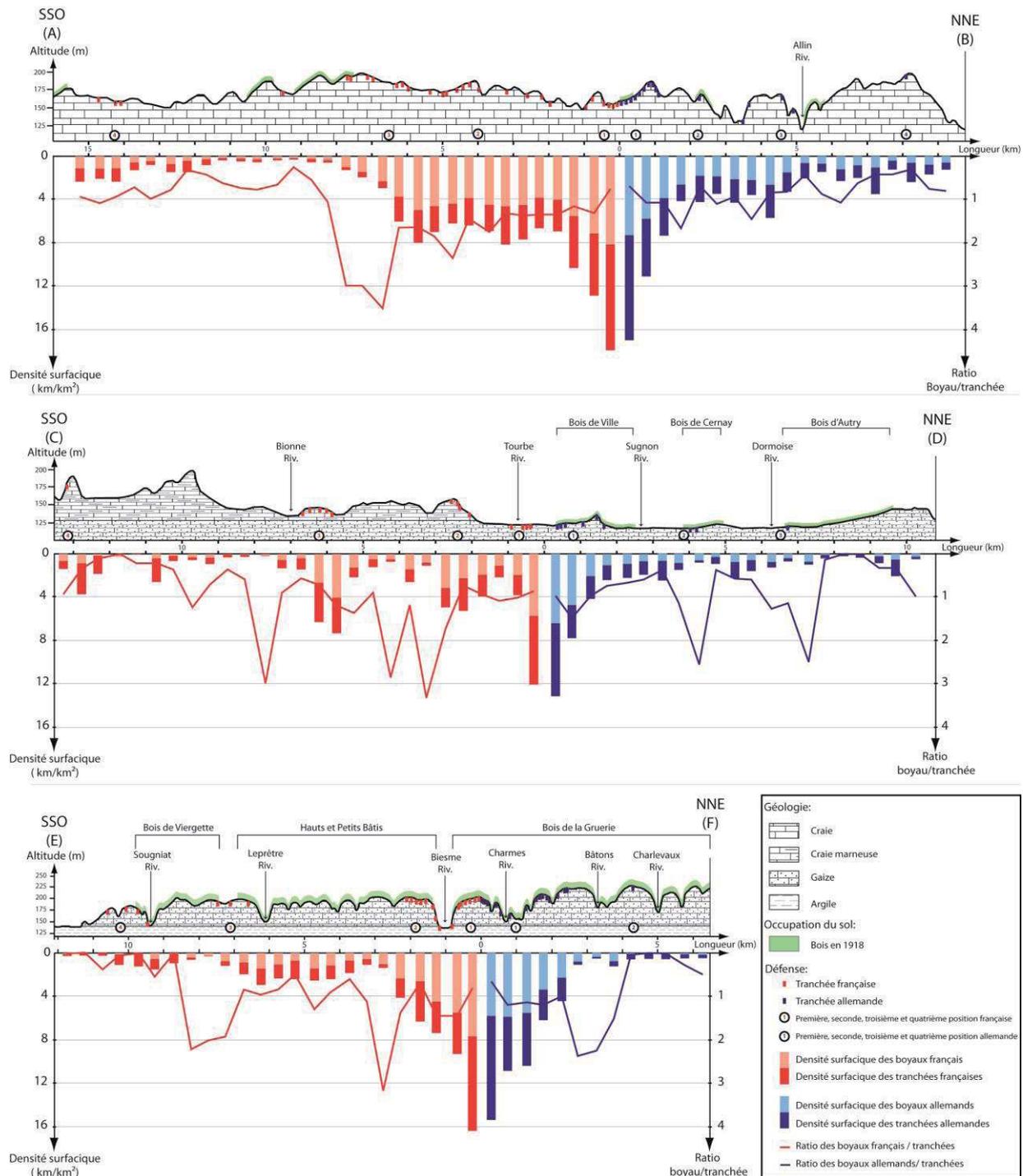


Fig.3. 15: Coupe géologique à travers les réseaux de défense de Champagne sèche (A-B), Vallage d'Aisne (C-D) et d'Argonne (E-F) avec densité surfacique et ratio boyau/tranchée.

En conclusion, les réseaux de défense s'adaptent remarquablement bien aux conditions géomorphologiques, hydrodynamiques et au couvert forestier. En plaine découverte (secteur de Reims), les réseaux de défense doivent s'étaler pour se soustraire de l'Artillerie ennemie qui règle facilement ses tirs grâce à des sites d'observation généralement disposés en arrière, au niveau des buttes témoins ou du front de côte. L'organisation spatiale reste linéaire mais s'arcoute sur des centres de résistance (croupes, buttes témoins) qui structurent de manière cellulaire les réseaux de défense qui sont à ce titre, plus perméables. Sur les plateaux ondulés,

le réseau de défense s'organise autour des principales lignes de crête fortifiées, imperméable, avec une position de résistance hypertrophiée propice à l'observation, à la défense et à la guerre des mines. Enfin, les plaines humides, enclavées sous le feu des fronts de côte et des revers, restent difficiles à défendre et peu praticables.

3.2. Rôle du bâti, de l'hydrographie et de la couverture végétale dans la structuration du front

Si les rôles de la géomorphologie, de la nature et des modelés de terrain présentent des potentialités de défense, d'observations et de tirs aux réseaux de défense, ces-derniers restent vulnérables à la visibilité de leur dispositif en l'absence de masque ou de camouflage ce que le bâti (villages, villes et forts), la végétation et les cours d'eau peuvent assurer.

3.2.1. Rôle des villages, des villes et des forts.

- Le rôle des villages

À l'automne 1914, alors que les Français se précipitent dans les villages, les Allemands s'installent sur les hauteurs. Ce sont ces mêmes positions que l'armée française tente de reprendre pendant les 4 années du conflit. Pendant la guerre de position, le village peut servir de point d'appui, comme une forteresse aménagée et fortifiée. Cependant, il peut être réduit en ruines par l'Artillerie comme le village de Tahure pendant les Batailles de Champagne de 1915 ou celui de Vauquois en Meuse (Pézard, 2016) :

« On ne sait même pas si on est dans le village ou non. Ce terrain informe, est-ce la fameuse rue des Juifs ?. Ces éboulements noirs qui s'entrecoupent et s'entassent, est-ce des ruines, ou de la terre bouleversée ? Et l'église, à quelle distance est-elle ? Peut-on reconnaître ses ruines des ruines voisines ? »

Le degré de ces destructions est fonction non seulement de l'intensité des bombardements mais également de la nature des géomatériaux du bâti (pierre de taille, torchis, pans de bois). L'Infanterie tente de rester dans le village, même en ruines en se protégeant des bombardements dans les caves privatives et réintègre sa position pour défendre le village (Pézard, 2016) :

« J'arrive à voir, par-dessus tout le monde, le plateau où s'accrochent et s'écrasent des masses de nuit, dans l'air gris, les Boches sortent des caves par deux ou par quatre. »

Les pertes militaires lors de la reprise de ces villages dépassent largement les âmes civiles d'avant-guerre qui y habitaient. Cette reprise s'effectue en empêchant les ravitaillements et relèves, en encerclant le village. Cependant, le défenseur se sent en sécurité dans les décombres, comme un fantôme ou une ombre lorsqu'il tire (Villate, 1925). Des aménagements sont réalisés pour consolider des décombres, *des blocs de béton renforcent les maisons et les caves voûtées protègent les défenseurs* (Villate, 1925). La fortification du

village est réalisée en périphérie par des éléments de tranchées (en rouge) protégeant les entrées du village, des centres (en jaune) et de nombreuses mitrailleuses (flèche rouge) pour un tir de flanquement (Fig 3.16). Quelques mitrailleuses protègent le centre du village par des tirs d'enfilade dans les rues. À ce titre, les villages constituent de véritables centres de résistance en s'inscrivant dans un réseau de défense cellulaire comme observé dans le secteur de Reims (Fig. 3.6). Sur le plan directeur au 1/2 500 du village de Cormicy près de Reims, la fortification du point d'appui utilise l'ancienne enceinte médiévale sur le pourtour du village pour le protéger (Fig. 3.16). Cette guérilla urbaine peut durer de quelques jours à une dizaine de jours car les villages sont généralement équipés d'une adduction d'eau, de lavoirs et fontaines communaux et de nombreux puits privatifs assurant l'alimentation en eau des défenseurs.

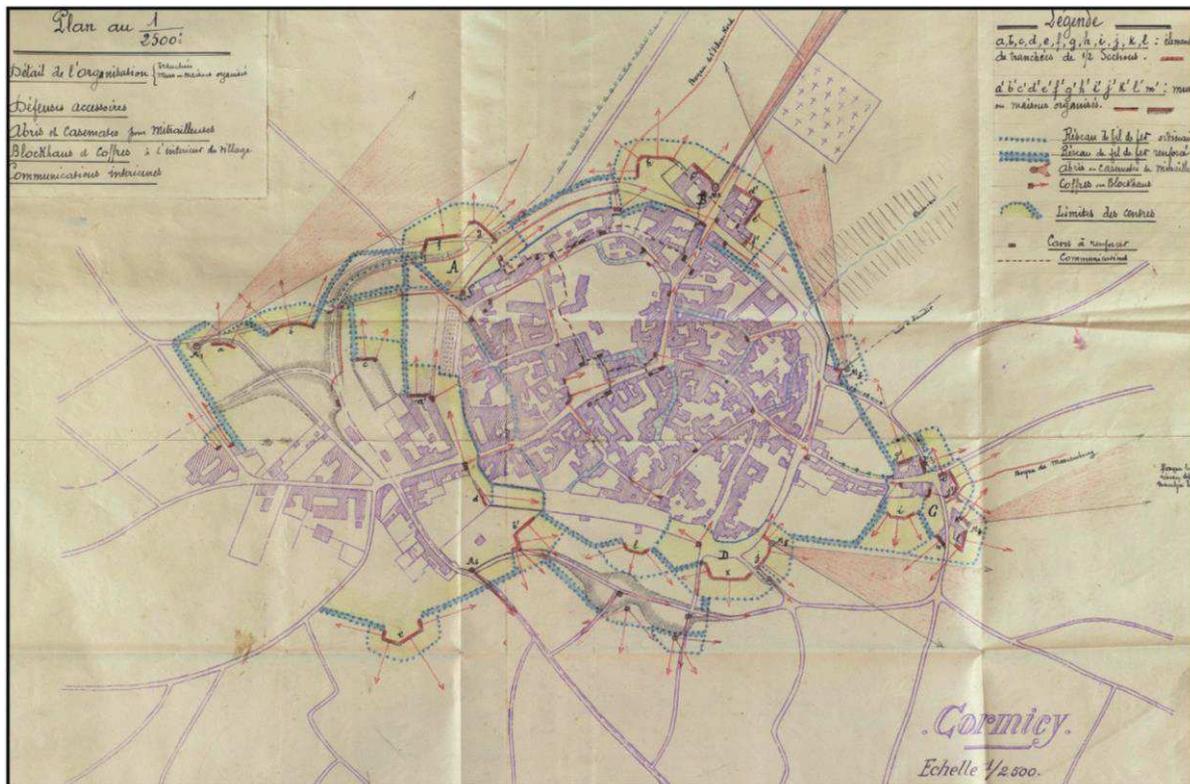


Fig.3.16: Extrait du plan de défense au 1/2 500 du village de Cormicy .

Pendant la guerre de mouvement, les deux armées en recul (mai-juillet 1918 pour l'armée française et septembre-novembre 1918 pour l'armée allemande) vont s'accrocher à ces villages, afin de ralentir au maximum l'avancée ennemie. Si l'Artillerie avance à la même vitesse que l'Infanterie, elle s'efforce de détruire les villages servant de points d'appui aux défenseurs. Par contre, si l'Infanterie avance plus rapidement, elle rencontre une défense ennemie intacte et davantage de difficultés à déloger les belligérants (guérilla urbaine). Les destructions dans les villages marnais et ardennais éloignés du front sont la conséquence non seulement des tirs d'artillerie mais également du minage par le Génie des infrastructures pouvant servir de point d'appui aux belligérants. L'église fortifiée du village de Saint-Juvin dans les Ardennes, occupé pendant 4 ans par l'armée allemande (Fig 3.17A), est largement détruite par l'artillerie française lors du recul allemand à l'automne 1918 (Fig. 3.17B).

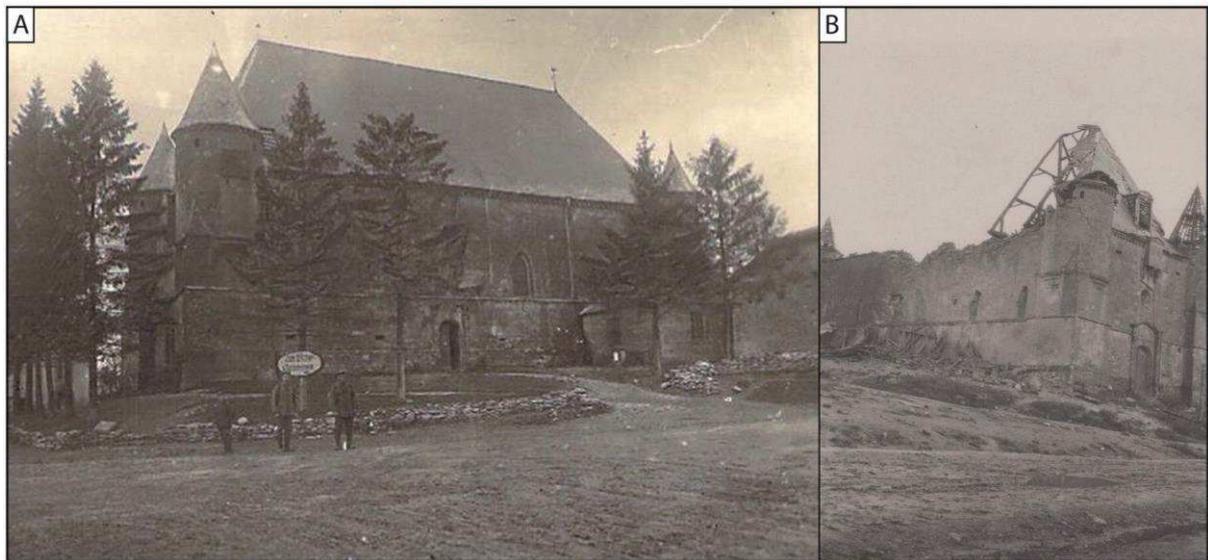


Fig.3.17: A - Carte postale allemande de l'occupation du village de Saint-Juvin devant son église (08) (Source : collection personnelle). B – Église de Saint-Juvin bombardée en automne 1918 (Source : VAL 048/033).

- Le rôle des villes

Quatre grandes villes françaises ont subi les bombardements et destructions pendant la guerre de position : Reims, Saint Quentin, Arras et Soissons. La ville de Lille sera déclarée ouverte, sans combat de défense, pour éviter sa destruction. Les réseaux de défense sont disposés à l'extérieur des villes mais pas en leur sein. L'ennemi doit être stoppé avant et après la ville. La défense de Reims se structure avec une première position passant par le village de Bétheny jusqu'au fort de la Pompelle dans la plaine de Reims. Une seconde position s'appuie sur les premières maisons de la ville alors que la troisième ferme les débouchés au sud de Reims (Fig. 3.6). L'attaque de la ville de Reims par l'armée allemande en mai 1918 est une tactique d'encerclement mais pas d'attaque de front. Deux divisions coloniales au 15 juillet 1918 sont abritées dans les caves de la ville, prêtes à surgir pour la défendre (Villate, 1925) :

« La ville se présente comme la forêt ; c'est un môle, un repoussoir contre lesquels viennent mourir les vagues d'assaut qui se ruent sur des objectifs moins formidables. On ne se bat pas dans les villes. »

Reims, de mai à juillet 1918, forme un saillant dans le dispositif français mais restera aux mains de l'armée française grâce à deux verrous, Vrigny et le fort de la Pompelle, qui empêche un encerclement total de la ville (Fig. 3.18). Le retour à la guerre de mouvement d'août et septembre 1918 délivre Reims.

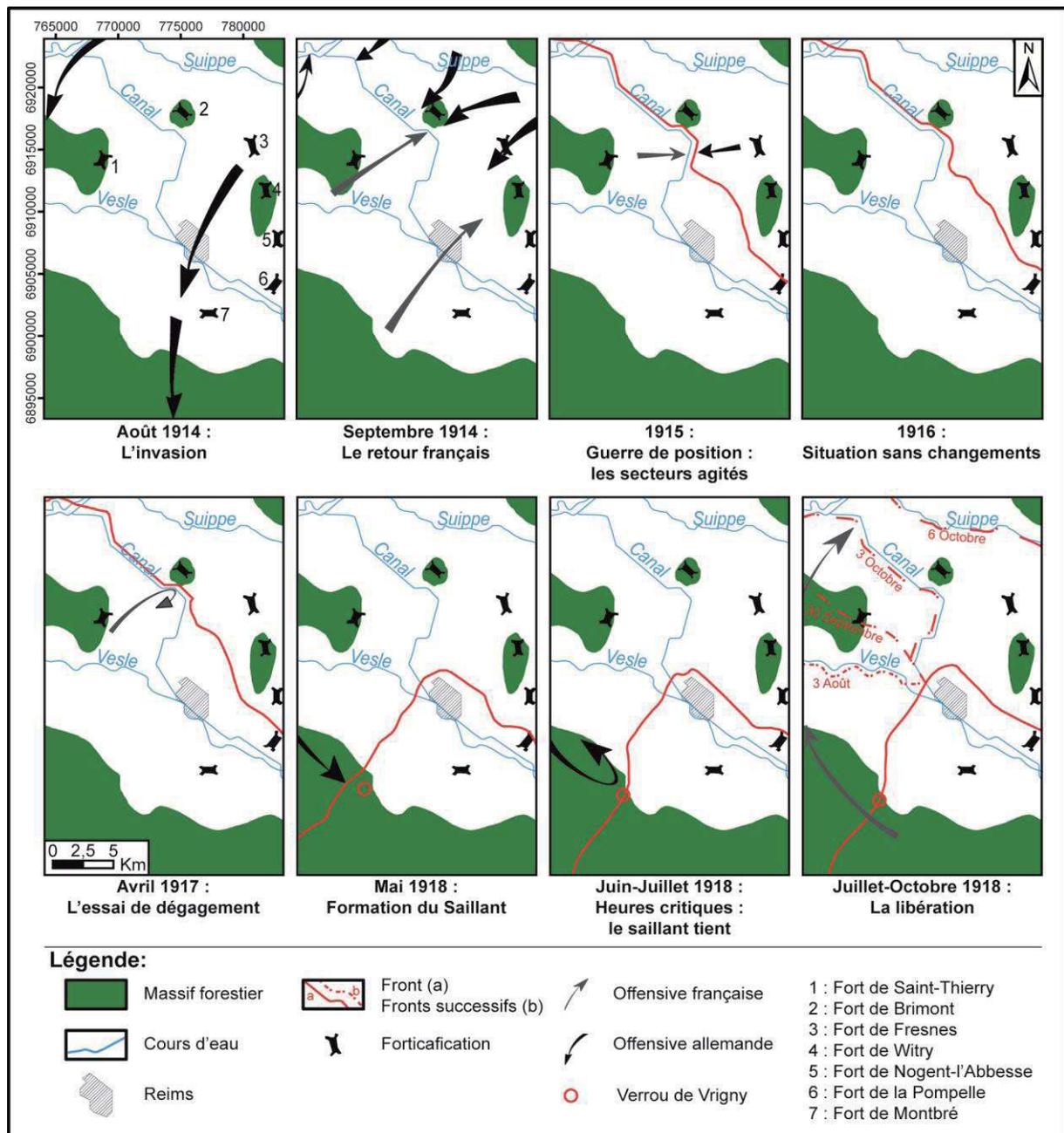


Fig.3.18: Position chronologique du front de la Grande Guerre dans le secteur de Reims (Dodici, 2015 d'après Guides illustrés Michelin, 1919).

- Le rôle des forts Séré de Rivières

Après la défaite de la guerre de 1870 et la perte de l'Alsace-Lorraine, la France se dote d'un Comité de Défense et entreprend des travaux considérables de 1874 à 1914 pour un système de fortifications appelé « système Séré de Rivières ». Ce concept défensif s'inspire des fortifications bastionnées mises en place par Vauban, modernisées par Montalembert (Le Hallé, 2004). À la veille de la Grande Guerre, plus de 200 ouvrages fortifiés, des Flandres à la frontière italienne, s'organisent le long des frontières de l'est, en trois rideaux. Quatre trouées ou ouvertures (Belfort, Charmes, Stenay et Chimay) existent dans le système défensif pour canaliser et concentrer les troupes ennemies. Ces 3 rideaux de fortifications (en comptant celui de Paris) s'arcbutent sur les auréoles de reliefs en gradins que l'ennemi doit franchir

alternativement d'Est en Ouest pour atteindre la capitale. Le premier rideau est constitué de forts d'arrêt exploitant les côtes du Bundsandstein (Épinal), du Bajocien (ou de Moselle) et de l'Oxfordien (ou de Meuse) à Toul et Verdun alors que le second contrôle la côte d'Île-de-France (Tertiaire) par les places de manœuvres, de Reims, Laon et de La Fère destinées à la contre-attaque. Les rideaux sont structurés par des places fortifiées ceinturées par des forts (dits « forts de ceinture »), des forts alignés sur la zone frontière ou « forts de liaison » dits également « forts de rideau » et des forts isolés ou « forts d'arrêt » défendant généralement des passages ou des vallées. Dans ce vaste dispositif, le général Séré de Rivières présente Reims comme une ville protégée par les hauteurs de Brimont (Fig. 3.6 et 3.19A), Berru et Verzy, distantes de 10 km. L'occupation des buttes témoins de Brimont et Berru empêche le bombardement de la ville ; les positions de Chenay, Brimont, Witry et de la Pompelle bloquent les entrées dans la ville et protègent les voies ferrées. Les travaux pour la construction de l'ensemble des sept forts s'étalent de 1875 à 1885 pour un budget estimé à 14 millions de francs (Barros, 1997). Originellement ce sont des forts détachés, polygonaux, « à cavalier » ou « à massif central » où l'Artillerie (généralement dotée des calibres de 90, 120, 138 et 155 mm) est exposée à l'air libre entre des « traverses-abris » et dont la portée permet une couverture entre les forts (Fig. 3.19C). Chaque fort est protégé par un fossé maçonné (escarpe et contre-escarpe) défendu par des caponnières et s'inscrit dans une zone de servitudes (ou « glacis militaire ») dégagant une vue lointaine (déforestation). Alors que les travaux de construction étaient terminés depuis un an, des expériences aux forts de la Malmaison montrent que les forts résistent mal aux obus et aux nouveaux explosifs chimiques. C'est pourquoi des places présentent des ceintures de forts incomplètes (Reims). Si certains forts du premier rideau sont modernisés par l'enfouissement, la construction de tourelles et cloches cuirassées, des coffres de contre-escarpe, et de nouveaux revêtements (blindage de béton et d'acier), d'autres sont déclassés à la veille de la Grande Guerre ou désarmés au début du conflit pour alimenter le front en Artillerie lourde. Dans leurs glacis dénudés et disposés sur les sommets, ils sont trop exposés à l'Artillerie ennemie et feront l'objet d'un marmitage impressionnant durant la Grande Guerre (Douaumont, Vaux, Pompelle, Fig. 3.19B). Mais englobés dans les réseaux de défense (tranchées et boyaux), ils constituent des centres de résistance, voire de véritables verrous (forts de Verdun, Pompelle), riches en observatoires, et tendent à un développement à la fois linéaire mais aussi cellulaire de la zone de front. À ce titre, au sortir de la Grande Guerre, le système Séré de Rivières porte les principes de la ligne Maginot (Soudagne et Mansuy, 2009).

L'exemple du fort de Brimont, situé dans la ceinture fortifiée de Reims, est éloquent. Au sommet d'une butte-témoin, il contrôle le secteur au nord de Reims, et s'inscrit dans le réseau de défense allemand en hébergeant de nombreux postes d'observations (Fig. 3.19D). Mais il expose au front, situé au Sud, ses casernements non protégés qui feront l'objet de tirs de destruction dont l'efficacité est vérifiée sur les photographies aériennes (Fig. 3.19A et B).

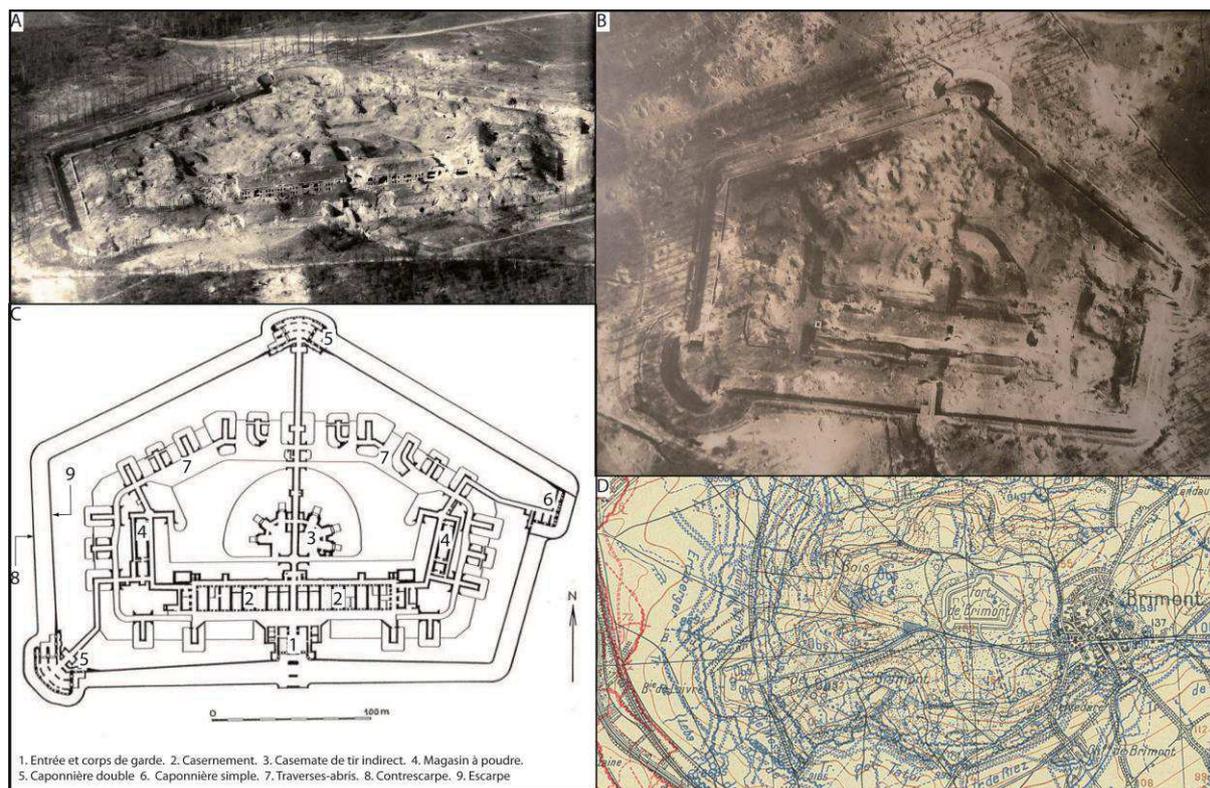


Fig.3.19: Exemple du fort de Brimont du système Séré de Rivières : A - Photographie aérienne oblique (Source : collection du Fort de la Pompelle – Ville de Reims), B - Photographie aérienne (Source : collection du Fort de la Pompelle – Ville de Reims), C - Plan du fort (d'après Barros, 1997), D - Extrait de plan directeur (Source : plan directeur de Brimont du 20/04/1918).

Le fort de la Pompelle, comme celui de Fresnes, est un fort à massif central, pouvant accueillir six canons de 155 mm long et quatre de 138 mm ainsi qu'une garnison d'environ 300 hommes. A l'origine dénommé « fort Herbillon », du nom d'un général français né à Châlons-en-Champagne, le fort est installé sur une croupe de craie culminant à 132 m à l'est de la ville. À la veille de la Grande Guerre, les forts de Reims sont quasiment désarmés, dépourvus de troupes ce qui explique notamment la facilité de l'Armée allemande à conquérir ce Pays rémois début septembre 1914. Après la première Bataille de la Marne, les Allemands se sont installés sur l'ensemble des forts autour de Reims. Selon Foch, même si les forts sont désuets, la position est quant à elle primordiale. Le fort de la Pompelle fut repris dans la nuit du 23 au 24 septembre 1914 par la 5^{ème} Compagnie du 138^{ème} Régiment d'Infanterie. Alors que les buttes de Brimont et Berru sont définitivement perdues, le front va se stabiliser dans cette région de Reims (Devos *et al.*, 2015). Ce fort s'inscrit dans la première position française, les tranchées cheminent de manière circulaire autour de l'ouvrage (Fig. 3.20). Cependant son orientation vers l'Est par rapport au front est-ouest expose notamment ses casernements qui feront l'objet de tirs de destruction. Il sera pilonné à la fois par l'Artillerie allemande positionnée sur le Mont de Berru et par l'Artillerie de tranchées de la première position allemande ce qui explique son état actuel (maçonnerie détruite et éventrée, craie affleurante). Pendant le printemps et l'été 1918, le fort de la Pompelle va subir différentes attaques mais va résister comme un véritable verrou, empêchant le contournement et l'encercllement de la ville de Reims. Classé monument historique depuis 1922, ce site fait aujourd'hui l'objet de commémorations patriotiques, de prises d'armes militaires et est

restauré en musée ; il accueille notamment la plus importante collection de coiffures de l'armée impériale allemande.

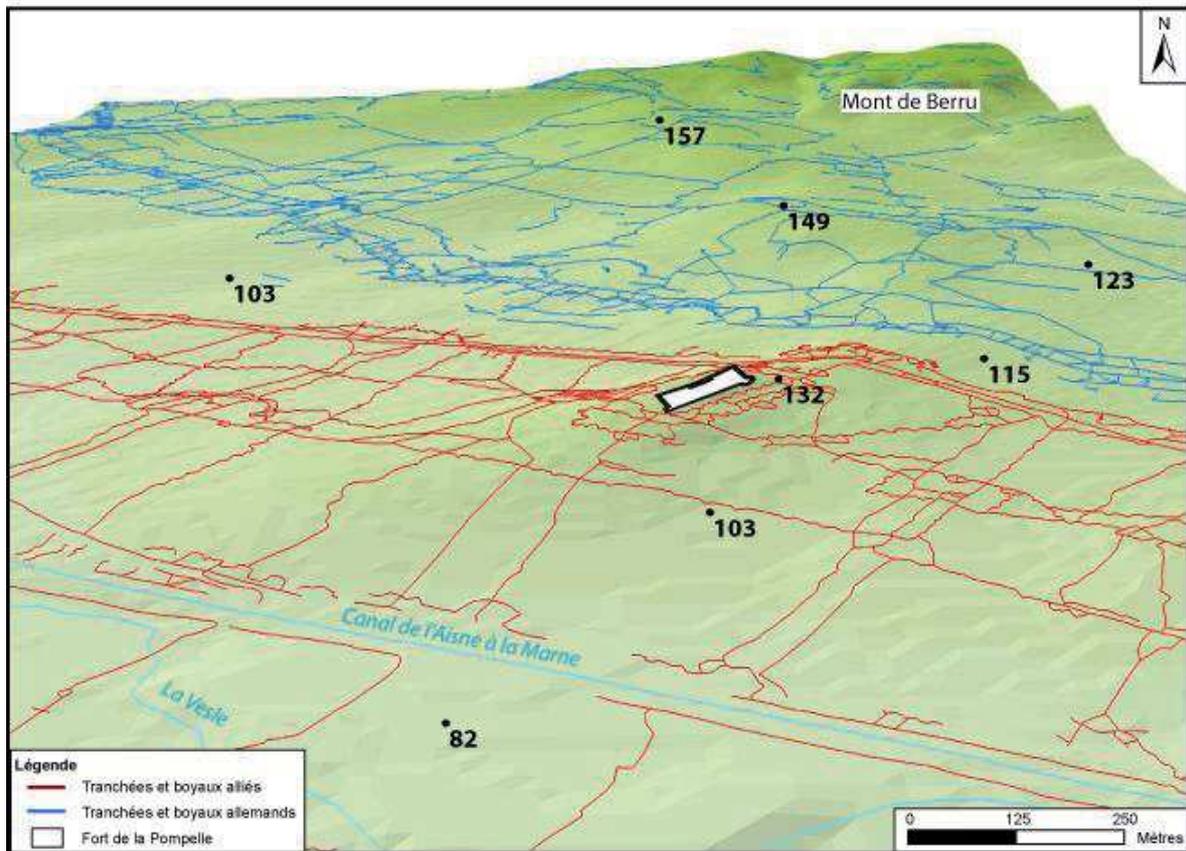


Fig.3.20: Le Fort de la Pompelle dans le réseau de défense.

Les forts Séré de Rivières ne jouent pas le rôle attribué initialement dans la défense des villes. En effet, désarmés, vulnérables à l'Artillerie et surtout mal orientés par rapport à la ligne de front, ils exposent leur casernement et leur unique entrée (pont levis) à l'ennemi. Leur intégration au réseau de défense nécessite de lourds travaux d'aménagement. Des boyaux d'accès, voire des tunnels (« le métro » au fort de la Pompelle) sont donc creusés à travers le fossé, l'escarpe et la contre escarpe pour accéder au fort. Des tunnels sont également creusés entre le fort et les batteries détachées (Brimont) (Coutant *et al.*, 2017). De plus, au sein de leur glacis militaire dénué d'arbres, ils restent exposés à l'observation aérienne sans masque végétal. Néanmoins, ils constituent de bons points d'appui en déterminant de solides cellules autonomes dans le réseau de défense en abritant des postes de commandement. Situés généralement sur des points hauts, ils sont surtout utilisés pour l'observation et le réglage d'artillerie (poste d'optique). Le réseau de défense s'organise par contre sur le flanc forestier des croupes de craie et des buttes témoins pour bénéficier de l'effet de masque végétal alors que le fort reste exposé dans son glacis. Généralement, la première ligne de tranchée est établie en lisière des bois pour l'observation du no man's land.

3.2.2. Le rôle des zones humides, des rivières, des inondations et des canaux.

L'eau est un rempart à l'envahisseur, un obstacle difficilement franchissable, comme une barrière face à l'attaquant. La rivière se dresse devant l'avancée de l'Infanterie alors que la portée des canons de l'Artillerie permet de pilonner l'ennemi à distance. Le franchissement de la difficulté est fonction de plusieurs critères morphologiques (largeur, profondeur, courant, berges), mais également temporels selon la saison, et logistiques par la présence de ponts ou de passerelles. Pendant la guerre de mouvement, l'armée doit s'arrêter et écouler l'ensemble des troupes par le pont par un petit filet d'hommes d'Infanterie. À ce titre, la rivière est considérée comme un obstacle à la manœuvre. Ce pont peut parfois être détruit par l'armée en retraite et ainsi ralentir l'avancée adverse. En 1914, les Allemands lors de leurs replis ne sont pas très méthodiques, laissant la Vesle, préférant se replier derrière l'Aisne. En 1918, les Allemands se replient de manière plus méthodique, s'établissant devant chaque cours d'eau, ce qui leur permet de gagner du temps.

Pendant la guerre de position en Champagne-Ardenne, la rivière ou canal de navigation peut jouer le rôle du no man's land, où chaque première ligne de chaque camp fortifie une berge. Le front au nord de Reims, dans le secteur des cavaliers de Courcy, s'installe de part et d'autre du canal de l'Aisne à la Marne ; les Français au sud et les Allemands au nord (Fig. 3.21A). En eau, le canal joue le rôle de frontière et il est très compliqué de recourir à l'attaque dans ce genre de situation. Si le canal est percé et vidé de son eau, il devient plus aisé de se lancer dans une offensive tout en constituant encore un large fossé à franchir. Le combat avec une rivière derrière soi est inconfortable. La crainte d'être acculé à la voie d'eau lors d'une attaque est forte et obsédante pour l'armée française qui occupe le secteur de Loivre, accrochée à la route nationale dans ses premières lignes mais coincée par le canal de l'Aisne à la Marne (Fig. 3.21B). Il est donc impératif dans cette situation de multiplier les passerelles et les ponts en cas de retraite.



Fig.3.21: A – Extrait du plan directeur de Berry-au-Bac Sud-Est au 1/10 000 au 1er avril 1918 du secteur de Courcy. B - Extrait du plan directeur de Berry-au-Bac Sud-Est au 1/10 000 au 1er avril 1918 du secteur de Loivre.

Le passage de la rivière est toujours possible mais doit être étudié. Les cours d'eau ne sont pas infranchissables mais imposent des procédés de manœuvre. Il faut donc différencier des ponts qui peuvent accueillir le passage de pièces d'artillerie, de voitures légères et des charges de plus en plus lourdes au fil du conflit. Ces infrastructures, éloignées du front, sont construites ou réparées par le Génie. Près du front, dans le réseau de défense, les ponts sont remplacés par des passerelles pour le ravitaillement en vivres et en munitions. L'analyse sous SIG des plans directeurs permet de quantifier le nombre et l'amplitude des passerelles dans les réseaux de défense. 735 ponts ou passerelles ont été recensés sur l'ensemble du front champardennais (Fig. 3.22). De nombreuses lacunes sont à noter dans les réseaux de défense français dans la Champagne humide et dans l'Argonne et ne peuvent faire l'objet de calculs. Un continuum de ponts est observé sur la Vesle, dans la traversée de Reims, puis sur le canal de l'Aisne à la Marne jusque Berry-au-Bac. Sur ce tracé de 33 km, 321 ponts sont recensés, déterminant une récurrence spatiale de 100 m. Ce même continuum se retrouve dans les lignes allemandes sur la Suippe et ses trois affluents de rive droite. Sur ce tracé de 53 km, 162 ponts et passerelles sont digitalisés, soit 1 pour 330 m. Enfin, sur la Dormoise, sur un linéaire de 14 km côté allemand, on dénombre 77 ponts correspondant à une récurrence spatiale de 182 m. Louis Barthas dans ses carnets de guerre décrit ces passerelles dans la vallée de la Tourbe à 2 km de Massiges (Barthas, 1997) :

« Le village n'était qu'à un kilomètre de la première ligne, traversé par une rivière, la Tourbe, qui coulait ses eaux troubles et boueuses à travers des marécages qu'il fallait traverser pour aller aux tranchées. Sur une longueur de quatre cents mètres on passait sur des passerelles montées sur des pilotis entre deux rangées de gabions remplis de terre pour se protéger de la vue et des balles, mais ces gabions s'étaient peu à peu tous effondrés dans l'eau sur presque toute la longueur ».

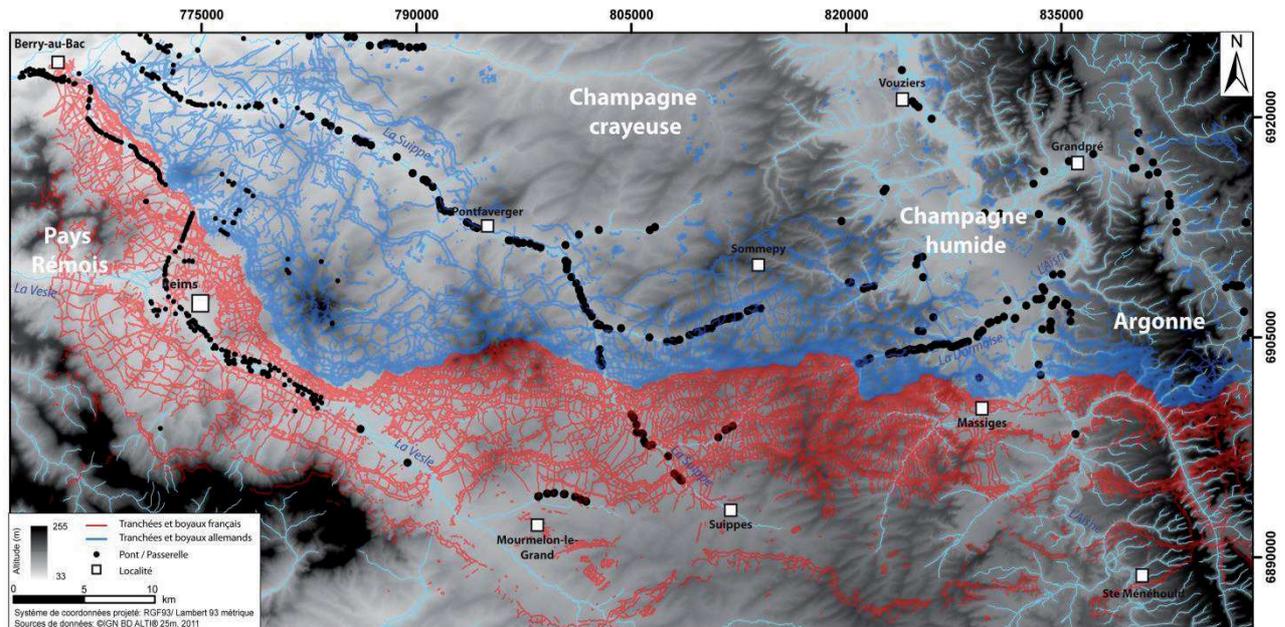


Fig.3.22: Ponts et passerelles dans les réseaux de défense de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.

La rivière ou le canal peut jouer le rôle d'obstacle de franchissement mais l'armée peut également provoquer l'inondation. Celle-ci est vue ici comme un moyen de défense. Le 27 octobre 1914, les polders flamands sont volontairement noyés par les Belges dans la région de Nieuport (Baulu, 1918). L'inondation des polders fixe la ligne de front et le réseau de défense durant 4 ans. Au retour de la guerre de mouvement en 1918, les Allemands construisent des barrages sur l'Aisne dans le secteur d'Attigny à l'aval (Fig. 3.23A) ou plus en amont à Vouziers (Fig. 3.23B) et inondent son lit majeur pour freiner l'avancée franco-américaine.

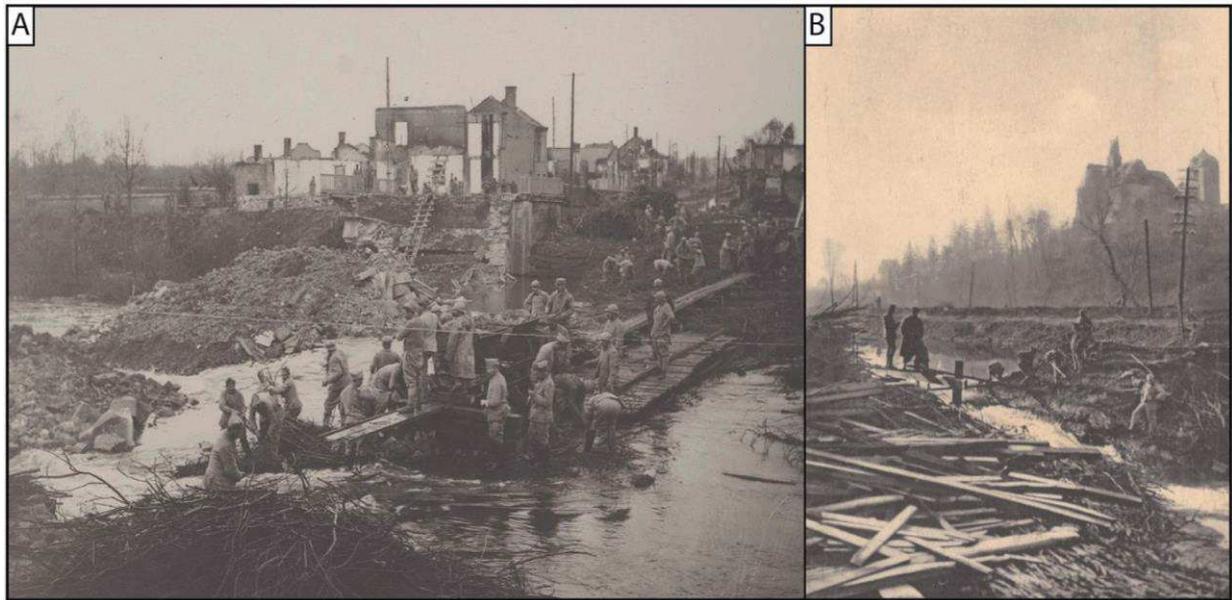


Fig.3.23: Barrage construit par les allemands pour inonder la plaine près d'Attigny (A) et Vouziers (B).

La voie d'eau ne constitue pas obligatoirement un obstacle mais peut servir au ravitaillement et soulager le trafic sur les routes. Les canaux ont été largement utilisés dans ce sens pour le transport de matériaux lourds et encombrants (charbon, bois de chauffage, sable et cailloux pour la confection du béton, foin...). La navigation sur ces voies était trop lente pour le transport de munitions, de vivres ou encore des blessés à l'exception des blessés de la tête. En 1918, sur l'ensemble du front, l'Allemagne disposait d'une véritable flotte avec 464 vapeurs, 15 barcasses, 79 remorqueurs, 2835 canots et 326 péniches, remplaçant mensuellement le chargement de 973 trains. Pour l'attaque de 1918, ils ont transporté l'équivalent de 1795 trains. En 15 mois, 297 000 hommes et 378 000 tonnes furent acheminés à proximité du front (Villate, 1925). En Champagne-Ardenne côté français, le canal de l'Aisne à la Marne permet la mise en circulation de matériel de l'arrière vers le front au niveau de Reims (Fig. 3.24A). Il accueille également, de juillet 1915 à décembre 1917, trois batteries de 4 canonnières désignées par une lettre (A, B, C, D, F, G, H, I et K, L, M, O). Ces péniches sont équipées de canons de 100, 140 (canonnières), ou de canons de 190 ou 240 mm (péniches-canon) avec des portées de tirs de 12 500 à 13 500 m (Fig. 3.24B et C). En communication avec les trois observatoires de la 4^{ème} position établie sur la côte d'Île-de-France (Mont Grippé, Mont Sinaï et Moulin de Verzenay), les canonnières (sans canon sur tourelle) peuvent pilonner les deux premières positions allemandes du fort de Nogent-l'Abbesse aux Monts de Champagne (Fig. 3.24A). Même avec une vitesse de 10 nœuds (19 km/h), les canonnières sont rapidement mises à l'abri dans le tunnel du Mont de Billy à proximité sur 2,3 km pour échapper aux tirs de l'Artillerie allemande. Du 15 juillet 1915 à novembre 1917, 40 524 coups de 140 mm et 16 626 coups de 100 mm sont portés dans les premières lignes avec une forte concentration en avril 1917 lors des offensives françaises sur les Monts de Champagne (Rousseau, 1931) (Fig. 3.24B et C). Ce canal est également la cible de l'Artillerie des deux camps et certains biefs de Reims à Berry-au-Bac sont complètement vidangés par la destruction des berges ou des écluses.

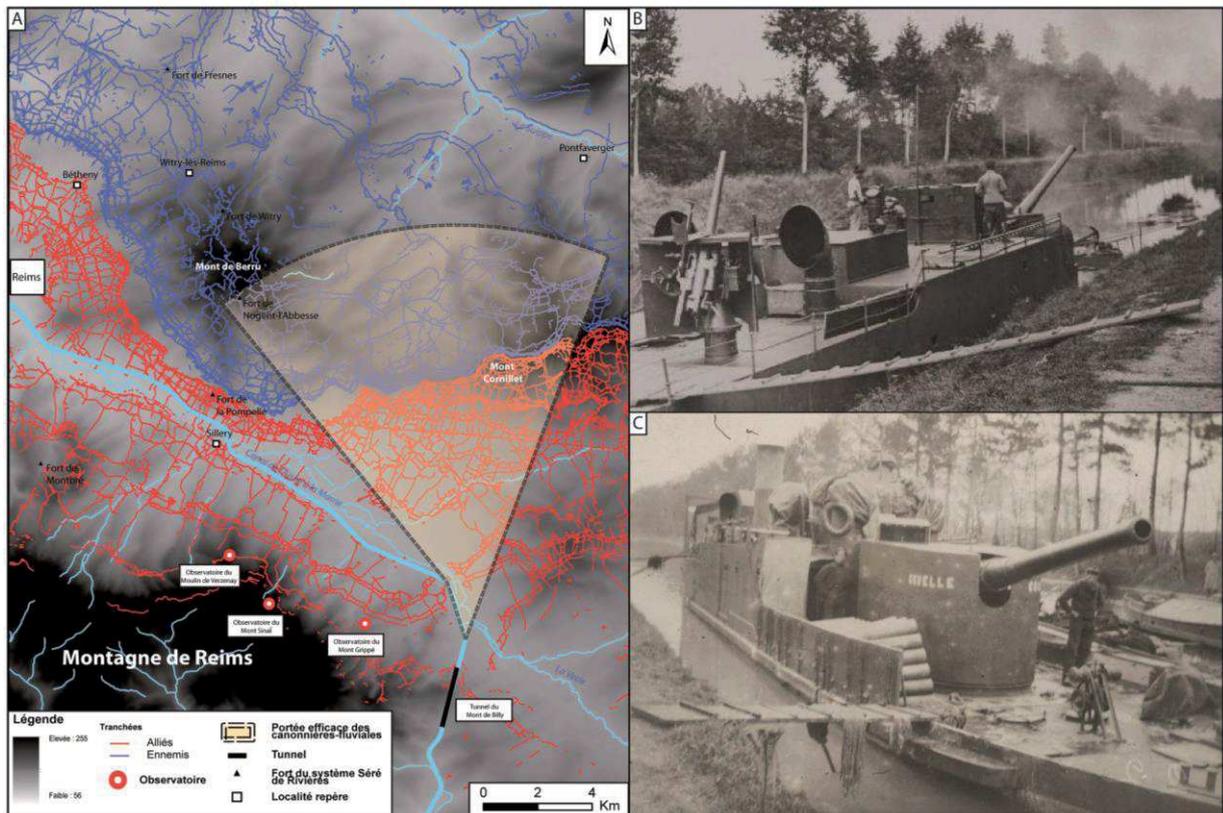


Fig.3.24: A : Zone de tir des canonniers sur le canal de l'Aisne à la Marne. Canonniers en action sur le canal latéral à l'Oise (VAL : 272/048). C – Canonniers sur le canal de l'Aisne à la Marne (VAL : 081/082).

Les voies d'eau peuvent donc à la fois cristalliser les lignes de défense au sein des positions par l'obstacle mais également être utilisées dans le soutien d'artillerie. Néanmoins, le rôle de l'hydrographie dans l'organisation spatiale des réseaux de défense s'exprime davantage par le contexte hydrogéomorphologique de fond de vallée que par l'obstacle du chenal plein bord. En effet, la suppression de l'obstacle est facilement assurée par la construction de passerelles, de ponts de bateaux qui manifestement ne conditionnent pas l'organisation spatiale des structures de défense. Par contre, les fonds de vallons et les corridors fluviaux difficilement défendables (sols hydromorphes) sont peu fortifiés (faible densité de tranchées et boyaux).

3.2.3. Le rôle de la végétation

Alors que les combats et les grandes offensives se livrent principalement dans la plaine, le front s'installe dans des bois, des forêts, et traverse de grands massifs forestiers. Pendant la guerre de mouvement, les combats sous-bois sont sanglants et meurtriers. Pour exemple en Argonne, en 1918, l'armée française à l'Ouest sur les terrains crayeux et l'armée américaine à l'Est dans la vallée de l'Aire avancent plus rapidement que les deux divisions engagées dans le massif forestier d'Argonne. Les Allemands tendent de nombreuses embuscades et le front dessine alors un saillant vers le Sud. Les commandants hésitent donc toujours devant une forêt, ne sachant pas ce qu'ils vont trouver à l'intérieur, connaissant les difficultés à communiquer avec leurs hommes et les unités voisines.

Lors du recul allemand en 1914, le massif d'Argonne fut dans un premier temps inoccupé, préférant les hauteurs de la côte de Champagne à l'Ouest et les reliefs orientaux de l'Argonne à Vauquois. Lors des rencontres entre les armées française et allemande dans le massif, les combats sont rudes, meurtriers et le creusement des tranchées est délicat compte tenu du système racinaire. Ce front d'Argonne devient secondaire après une avancée d'environ 1 km dans le secteur de la Harazée, tout comme le front des Vosges où il est trop dangereux d'envisager de grandes attaques. Le bois, la forêt constituent un véritable obstacle à l'attaque (Amat, 1993, 2015). Les abattis, déchiquetés par l'Artillerie et mélangés aux réseaux de barbelés limitent la pénétrabilité du massif forestier. La forêt offre un couvert parfait aux batteries d'artillerie, camouflant leur présence, les dépôts de munitions ainsi que la lueur du canon lors du tir. Cependant, le tir vers des positions ennemies sous forêt est très aléatoire, avec peu d'efficacité surtout sans observatoire. La réalisation des plans directeurs pour les tirs d'artillerie ont nécessité un travail titanesque pour le renseignement des lignes défensives ennemies car le terrain est boisé, dense et vallonné. La canopée en été constitue une véritable barrière naturelle à l'observation. Il a fallu de nombreux interrogatoires de prisonniers, des photographies aériennes, des reconnaissances d'avions pour obtenir les renseignements sur ce réseau. Jean Léry se bat en Argonne et décrit la forêt devant lui (Léry, 1916) :

« C'est là que, depuis plusieurs mois, jour et nuit, on se bat avec un acharnement incroyable. Les obus et les balles finissent, à la longue, par déchiqueter les arbres, par hacher, une par une, les branches. Les troncs prennent, par endroit, l'aspect de moignons. »

Enfin la forêt joue le rôle de masque pour structurer les réseaux de défense. La seconde position française près de Reims est établie en rive gauche de la Vesle sur le rebord de terrasses alluviales dominant les marais de la Vesle et bénéficiant de l'effet de masque derrière la ripisylve du cours d'eau. Ce dernier joue le rôle d'obstacle alors que la forêt alluviale, non fortifiée, cache des yeux de l'ennemi la position française (Fig. 3.25).

Les tranchées de tir ou les boyaux de communication sont préférentiellement établis dans un bois ou en lisière, plutôt qu'à découvert dans les prés ou champs avoisinants. Le massif boisé peut être utilisé pour concentrer des hommes et du matériel en prévision d'une attaque. Du 11 juin 1918 au 18 juillet 1918, le Général Mangin prévoit une attaque massive. En 3 nuits, il entasse ses troupes dans la forêt de Villers-Cotterêts (onze divisions d'infanterie, deux de cavalerie, trois bataillons de chars légers, quatre groupements de chars lourds et des groupes d'artillerie) (Villate, 1925).

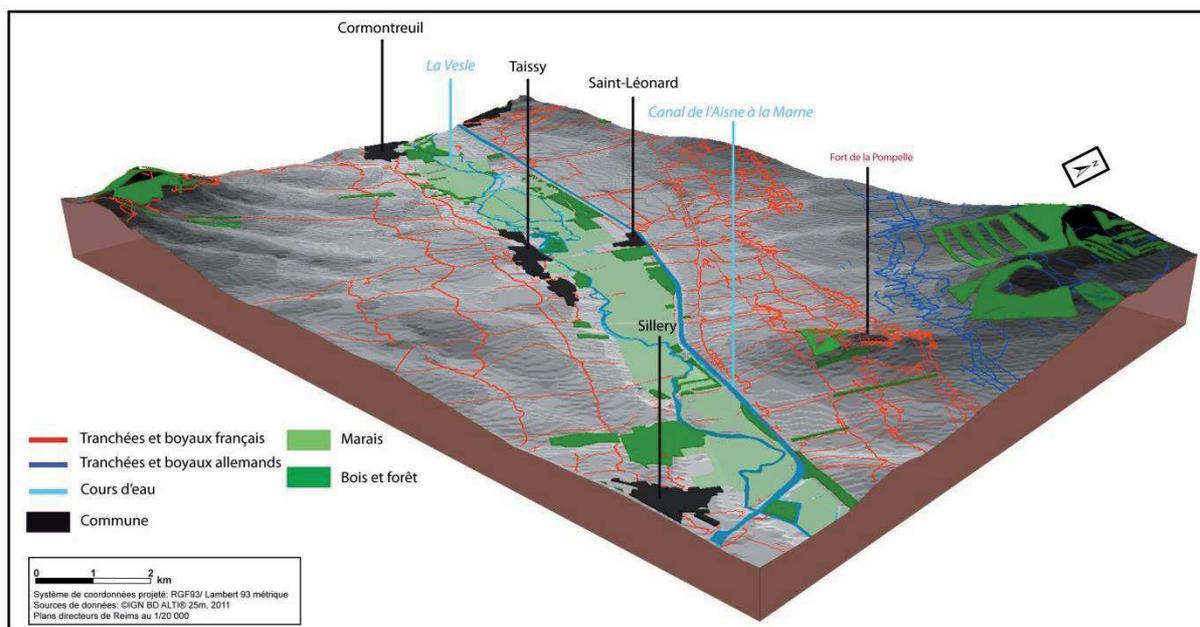


Fig.3.25: Structuration du front à Sillery dans la ripisylve de la Vesle.

Le rôle de la végétation sur le réseau de défense est patent en Champagne sèche, recouverte par des boqueteaux de pins dont la forme géométrique polygonale conditionne le tracé des réseaux de défense (Fig. 3.26). En effet, le tracé des boyaux paraphrase l'orientation des parcelles boisées qui les camouflent alors que les tranchées s'installent en lisière pour battre le secteur découvert. Seul le croisement de la planimétrie des plans directeurs et du réseau de défense apporte cette information car ces pinèdes sont, depuis, victimes de la grande culture.



Fig.3. 26: Tranchées et boyaux dans les pinèdes de Champagne sèche sur l'extrait du plan directeur de Ste-Marie-à-Py du 13 juillet 1918 au 1/20 000.

3.3. Les noms de tranchées

Après avoir expliqué le rôle des conditions géographiques sur l'organisation spatiale des réseaux de défense et de leur équipement, il s'agit d'étudier le nom des tranchées et boyaux dont la détermination reste à ce jour inconnue. Dans la conscience collective des civils, les tranchées, boyaux, et réseaux de défense en général, sont perçus comme un dédale, un labyrinthe. L'organisation de ce réseau peut se confondre avec un « tissu urbain », où chaque tranchée ou boyau doit recevoir un nom pour éviter de se perdre. La ventilation des troupes, les conditions climatiques ainsi que le feu de l'ennemi peuvent expliquer le manque de soutien, voire la perte d'unités mal orientées par leur officier (Chevallier, 1930) :

« Le système de tranchées s'étendait sur une profondeur de huit à dix kilomètres, mais nous y errâmes toute la nuit, nos sacs sur le dos, la tête de la colonne s'égarant constamment aux innombrables bifurcations qui s'ouvraient devant nos guides ».

Dans ce labyrinthe de 13 000 km de tranchées et boyaux en Champagne-Ardenne, pour assurer la communication des agents de liaison, pour diriger les troupes de soutien, l'emploi de signalisation et la dénomination de tranchées et boyaux s'imposent. Le travail de digitalisation des réseaux de défense a permis de constituer une banque de données géoréférencées de 2683 toponymes.

3.3.1. Les noms de tranchées dans les manuels d'instructions militaires.

Pour améliorer l'emploi des plans directeurs, les manuels d'instructions militaires proposent de multiplier à outrance les noms, appellations et désignations (SGA, 1936). Les éléments importants de la planimétrie et les bois reçoivent un nom provenant du cadastre, de la carte d'État-Major ou encore un nom arbitraire. Il en est de même pour les tranchées, boyaux, centres et ouvrages. Les réseaux de défense reçoivent le nom utilisé par les unités sur le terrain ainsi reporté sur le plan directeur et approuvé par les GCTA. Ces noms doivent éviter d'être trop généraux comme parallèle de résistance ou avancée, boyau central. Ces dénominations peuvent se référer à un lieu (Fig. 3.27A), parfois à proximité, une personnalité militaire de l'unité (commandante ou décédée) (Fig. 3.27A) mais également des noms totalement arbitraires (Fig. 3.27B). Elles peuvent aussi être affublées de numéros et de lettres. Cependant, dans ces manuels d'instructions militaires, aucune logique d'organisation spatiale n'apparaît.

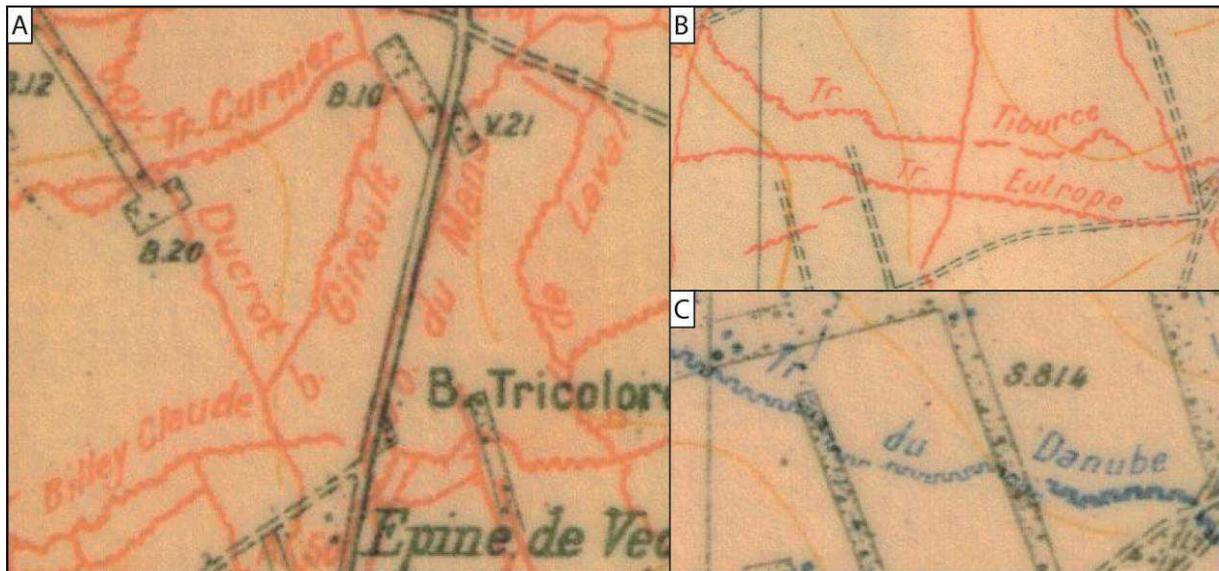


Fig.3. 27: Extrait de plan directeur au 1/20 000 de Sainte-Marie-à-Py du 1/06/1918 de noms de tranchées et boyaux: A – Nom de soldat (Girault, Claude, Ducrot) et nom de lieu (Mans, Laval). B – Nom arbitraire (Tiburce, Eutrope). C – Nom de tranchée allemande arbitraire (Danube).

Les organisations ennemies reçoivent également un nom emprunté à partir de leurs plans subtilisés ou obtenus après interrogatoires de prisonniers. Si ces données sont absentes, les tranchées et boyaux reçoivent également un toponyme arbitraire (Fig. 3.27C). Comme pour les organisations alliées, les termes *graben*, *linie*, *zug* ou *weg* doivent être évités. L'ensemble de ces toponymes facilite la disposition des unités dans les réseaux de défense ainsi que les ordres qui leur sont donnés. Alors que le Corps d'Armée (40 000 hommes) occupe une « zone d'engagement », la demi-section (30 hommes) ou escouade (15 hommes) occupe une tranchée. Malgré un continuum dans les réseaux de défense, la tranchée a un début et une fin matérialisés par des boyaux de circulation et possède un nom. Les tranchées et boyaux ne sont donc pas les seules entités à être désignées par un toponyme. Les centres, ouvrages et bastions ou abris peuvent l'être aussi. Tous les noms portés sur les plans directeurs au 1/20 000 figurent sur les plans au 1/10 000 et au 1/5 000, tous ceux sur le 1/10 000 le sont sur le 1/5 000. Les toponymes sur les plans directeurs au 1/20 000 et au 1/10 000 sont sélectionnés suivant l'échelle et d'après leur ordre d'importance. L'étude spatiale et statistique des noms de tranchées reprend l'ensemble des toponymes digitalisés sur les plans directeurs au 1/20 000 de 1918.

3.3.2. Les noms de tranchées dans la signalétique.

Pour faciliter l'utilisation des plans, les points de repère doivent être nombreux pour se situer avec précision. Lorsque que les points de repère ne peuvent pas être assez nombreux, des pancartes indiquent le nom de la tranchée ou des flèches sa direction (Fig. 3.28). L'approche archéologique (Desfossés *et al.*, 2008) et l'étude des photographies d'archives témoignent de l'existence de panneaux signalétiques aux carrefours de tranchées et boyaux, à l'entrée des réseaux de défense et au niveau de la première ligne de résistance (Chasseaud, 2006). Cette approche ne permet pas d'appréhender de manière exhaustive et spatiale les noms de tranchées.

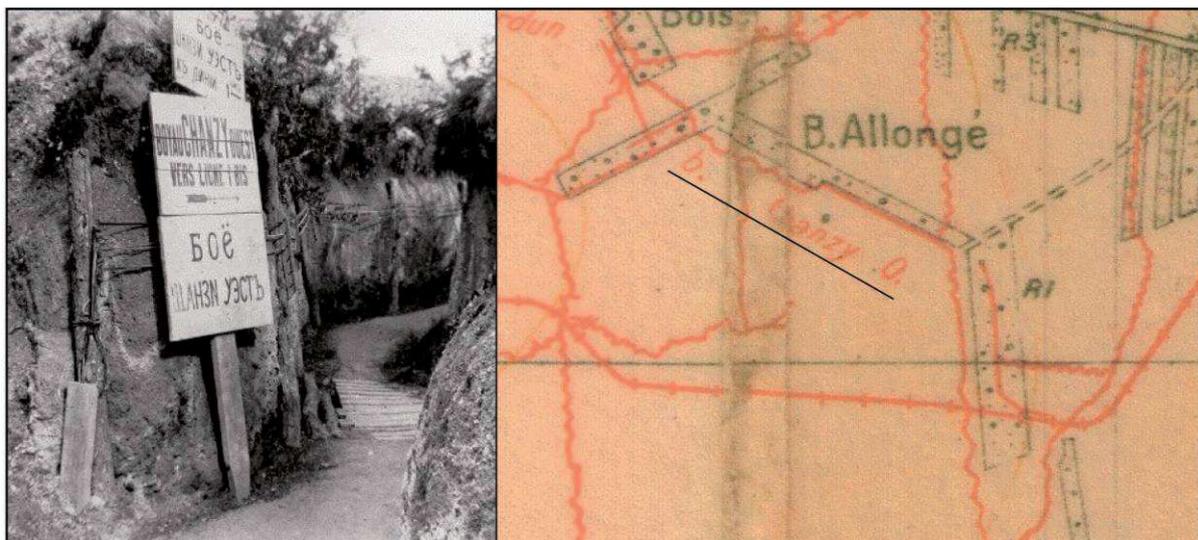


Fig.3.28: Photographie (IWM) et extrait du plan directeur de Ste-Marie-à-Py au 1/20 000 du 1/06/1918 du boyau Chanzy Ouest.

3.3.3. Les noms de tranchées dans la banque de données des réseaux de défense.

Lors de la digitalisation des tranchées et boyaux sur les plans au 1/20 000, leur nom a été intégré à la géodatabase. Ces noms concernent les réseaux de défense français et allemands, donnés uniquement par l'armée française. En effet, la comparaison des plans directeurs et des *stellungskartes* témoignent de différences de dénomination pour une même tranchée. Ces noms font l'objet d'un traitement statistique mais également spatial car chaque tranchée est géoréférencée. Cette étude unique et originale débute par la création d'une typologie en groupes, sous-groupes et particularités (Fig. 3.29). Les groupes sont au nombre de 9 (phénonymes, anthroponymes, toponymes, etc), nommés par une lettre majuscule alors que les sous-groupes au nombre de 24 reçoivent la lettre du groupe ainsi qu'un numéro. Enfin, 19 particularités permettent d'affiner le traitement statistique, dénommées par la lettre et le chiffre du sous-groupe et un chiffre supplémentaire. Après le traitement de l'ensemble des tranchées et boyaux et leur rangement en groupes, sous-groupes, voire particularités, l'initiale est intégrée à la géodatabase pour croiser l'étude statistique et spatiale.

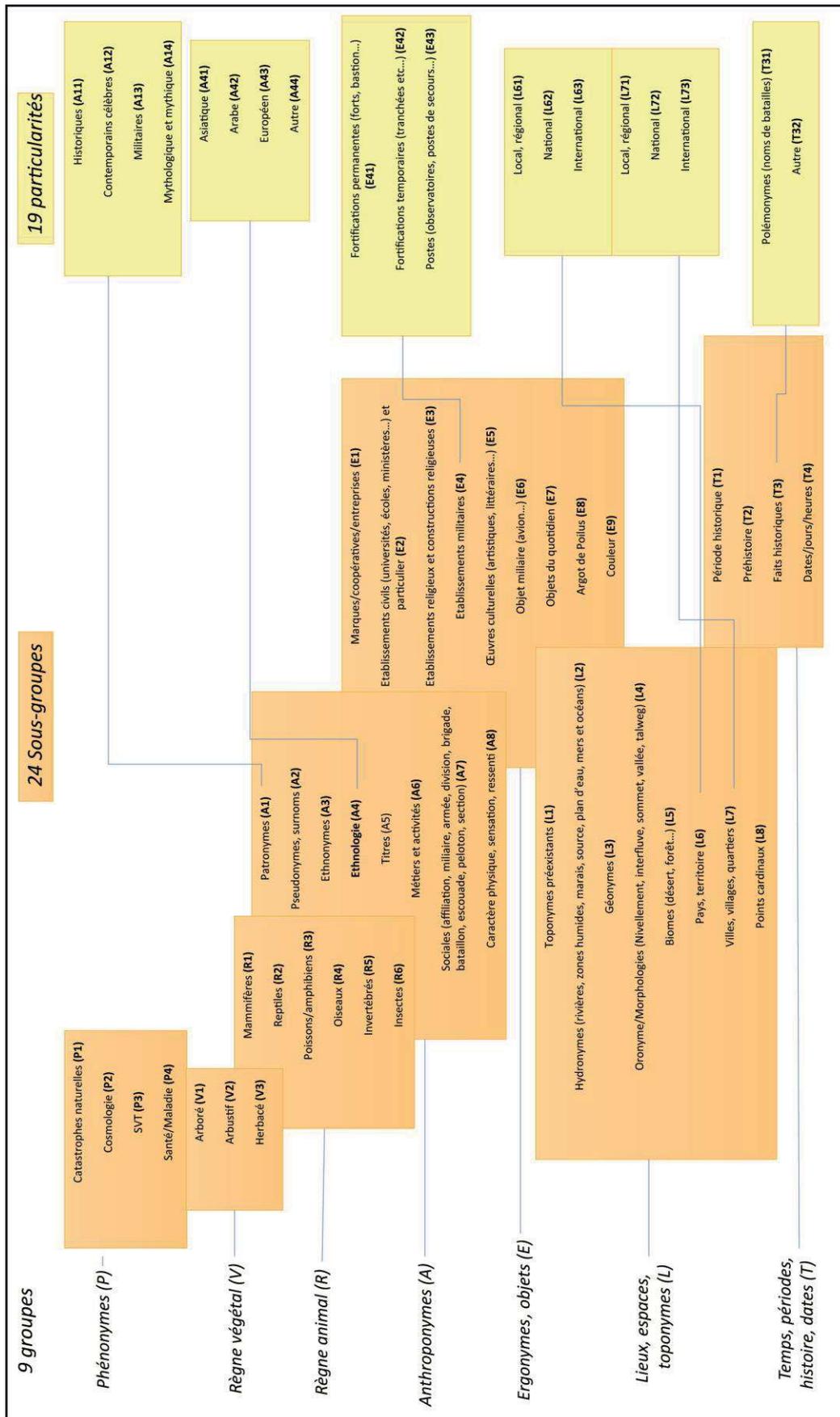


Fig.3.29: Typologie des noms de tranchées et boyaux de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.

3.3.4. Distribution statistique des noms de tranchées.

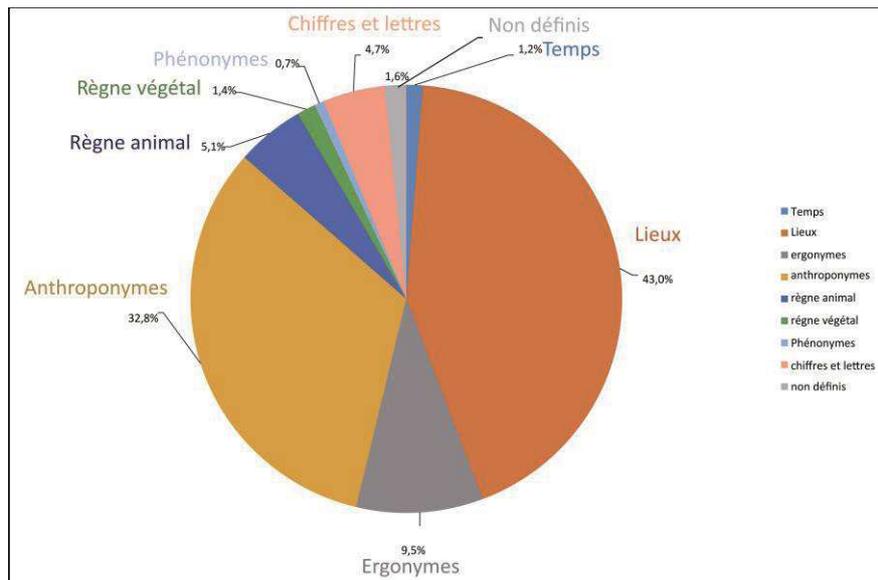


Fig.3. 30: Distribution statistique de la typologie en groupes des noms de tranchées de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.

Ce travail de traitement toponymique nécessite beaucoup de temps. Alors que des noms sont absolument transparents (tranchée de Reims, boyau Foch), d'autres nécessitent une culture géographique du secteur (boyau du Mont Sans Nom,), nationale (Tranchée de Troyon, petit village meusien) et mondiale (tranchée de Bombay) ou historique (tranchée Marengo, bataille napoléonienne) poussée, ainsi que l'argot de tranchée (tranchée Lebel, boyau des batteries) (Sainéan, 1915). Sans surprise, le groupe le plus représenté est « lieu, espace et toponyme » avec 43% alors que le second regroupe 32,8% avec tous les anthroponymes (Fig. 3.30). Ces deux groupes représentent plus de 75% des 2683 noms de tranchées et boyaux de la géodatabase. Les sous-groupes et particularités sont créés pour notamment approfondir et subdiviser ces deux groupes importants.

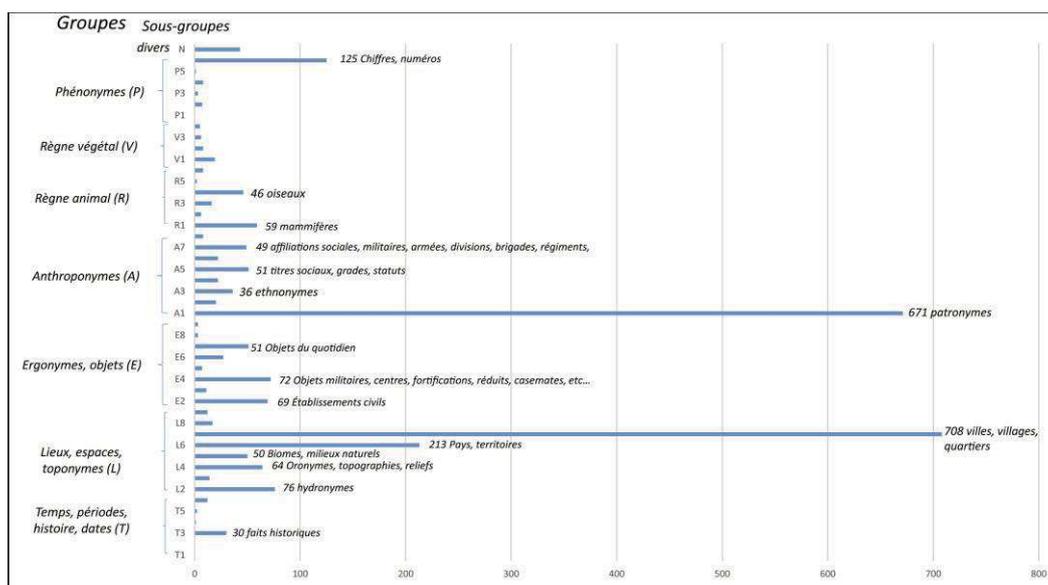


Fig.3.31: Distribution statistique de la typologie en sous-groupes des noms de tranchées de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.

manuels d'instructions militaires, les tranchées désignées par une lettre suivie d'un chiffre obéissent à des logiques cartographiques selon le carroyage Lambert (A5, A6, A7...). La rythmicité spatiale des noms de tranchées semble s'inscrire dans une amplitude comprise entre 2 et 10 km à l'échelle du groupe. Une distinction en sous-groupes, voire en particularités, permettrait de dégager des secteurs de noms de tranchées homogènes.

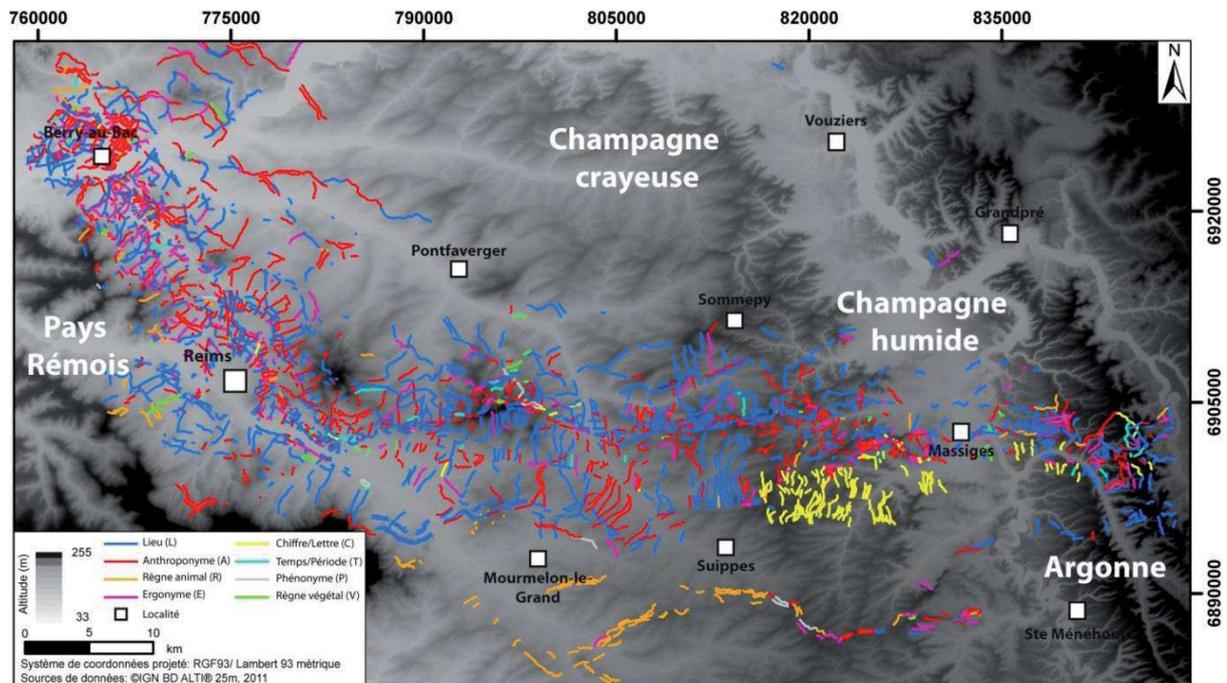


Fig.3.33: Carte des tranchées en Champagne-Ardenne selon leur typologie.

Un secteur avec des noms de tranchées et boyaux homogènes (sous-groupe ou particularité) correspond approximativement à un secteur tenu par un régiment (moins d'un kilomètre de front), voire une compagnie (200 m de front). Le nom de tranchée n'est vraisemblablement pas désigné à l'échelle d'une division ou d'une brigade mais semble être l'apanage des troupes occupant le terrain. À ce titre, celles-ci désignent les tranchées et boyaux qu'elles occupent portant la marque de l'histoire régimentaire, de leur ville de garnison, de leur culture militaire ou du secteur fortifié. La désignation des noms de tranchées permet également aux troupes de s'approprier le terrain dont la connaissance s'avère salvatrice dans la guerre de position.

Près de Saint-Hilaire-le-Grand, des tranchées et parallèles portent le nom d'hydronymes mondiaux (Gange, Euphrate, Tigre, Ontario). Au sud du fort de la Pompelle près de Reims, des boyaux portent le nom d'officiers français (Joffre, Mangin, Nivelles, Pétain, Foch, Franchet d'Espérey, Petit). À l'est du fort de la Pompelle, le nom des tranchées rappelle l'occupation russe du secteur (Baltique, Sibérie, Oural, Pétrograd, Crimée, Caucase, Lodz ou Kovel). Manifestement, le nom des tranchées et boyaux est déterminé au moment de leur creusement et inchangé ultérieurement, car certains portent le nom des officiers morts au combat comme celui de la tranchée du Commandant Cano. Sur le plan directeur du Bois Sabot du 14 septembre 1915 au 1/5 000, la tranchée du Commandant Cano est retrouvée à la lisière sud du Grand Bois de Bouleaux (Fig. 3.34A). Ce nom vient du commandant Cano du 247^{ème} Régiment d'Infanterie, qui occupe ce secteur à l'automne 1915. Il sera tué à l'ennemi,

sur la commune de Souain, près du Bois des Bouleaux, le 25 Août 1915 (Fig. 3.34B). Dans le JMO du 247^{ème} RI, le récit de sa mort est commenté :

« Dans un feu violent de mitrailleuses, malgré la violence du feu ennemi, le travail continue et à 2h30, la tranchée est terminée. Pendant ce travail, le commandant Cano a été tué et 15 sous-officier, caporaux et soldats. Deux capitaines ont été blessés et 71 sous-officiers, caporaux et soldats. »

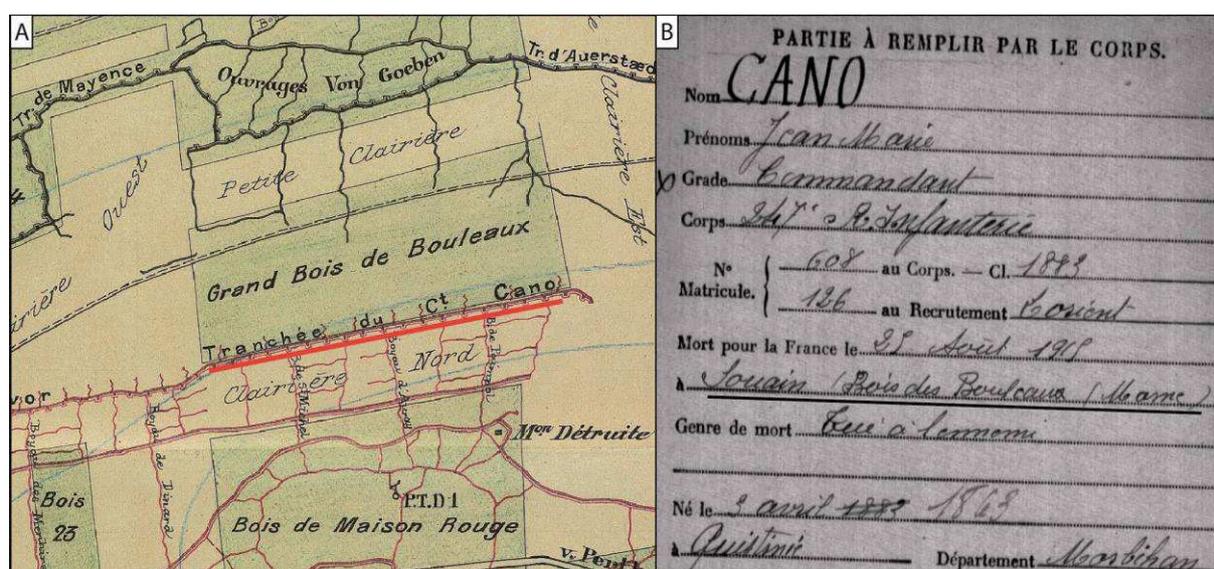


Fig.3.34: A : Extrait du plan directeur du Bois Sabot du 14 septembre 1915 au 1/5 000. B – Fiche du soldat Cano du 247^{ème} Régiment d'Infanterie.

Un centre de résistance est également retrouvé « Centre Cano » en rive gauche de la Suippe, près d'Aubérive, sur un extrait du plan directeur de la 119^{ème} brigade, de la 60^{ème} DI du 15 décembre 1915, nom donné en hommage au Commandant mort 4 mois auparavant au Bois Sabot.

3.4. Positions des observatoires et des batteries d'artillerie

Si l'apport de l'aviation et de la photographie aérienne a largement été rappelé dans le chapitre 1 dans le cadre de la réalisation des plans directeurs, la surveillance de l'ennemi au sol s'impose également dans la première et seconde position par des postes d'observation, parfois fortifiés, voire blindés, afin d'écouter et de comprendre ses volontés. Ces installations servent également de lien pendant l'attaque, entre l'Infanterie et l'État-Major à l'arrière par liaisons téléphoniques (Léry, 1916) :

« Et cependant, presque toujours, ces admirables virtuoses que sont nos artilleurs viennent à bout de ces difficultés. (...) Les observateurs d'artillerie restent en permanence dans les tranchées de première ligne. Au moindre mouvement, à la moindre agitation remarqués dans les lignes ennemies, un coup de téléphone ; quelques secondes après, une pluie d'obus s'abat sur ces lignes. Les Allemands, qui commençaient à montrer leurs casques à pointe, s'empressent de rentrer dans leurs trous. »

À partir des plans directeurs, la digitalisation recense 474 postes d'observations allemands sur 115 km de front champardennais, déterminant une amplitude spatiale moyenne de 4 postes par kilomètre. Les observatoires français ne sont pas renseignés sur les plans directeurs. La majeure partie (407), soit 86%, s'inscrit dans les première et seconde positions au contact du no man's land ou sur des hauteurs pour dominer le secteur. Ils sont essentiellement regroupés sur les buttes témoins (Brimont, Berru, Fig. 3.35), les avant-buttes et les Monts de Champagne, là où le front s'installe sur les reliefs (conjonction de postes de guetteurs de premières lignes et d'observatoires du SROT). Ces postes d'observations allemands sont quasi-inexistants en Argonne à la fois par manque de visibilité dans la forêt, mais également par la difficulté de détecter ces installations par photographie aérienne lors de la réalisation des plans directeurs. Au début de la guerre, des tirs d'obus normaux sont réalisés pour aveugler les observatoires fortifiés lors d'attaques. Les obus fumigènes et les obus à gaz vont rapidement les supplanter. Cet aveuglement est nécessaire pour annihiler ou au moins ralentir la réaction d'artillerie ennemie. Cependant, ceci nécessite une présence de batteries d'Artillerie très forte car la plupart sont réservées au soutien d'Infanterie avant et pendant leur attaque (tirs de barrage, feu roulant) (Villate, 1925).

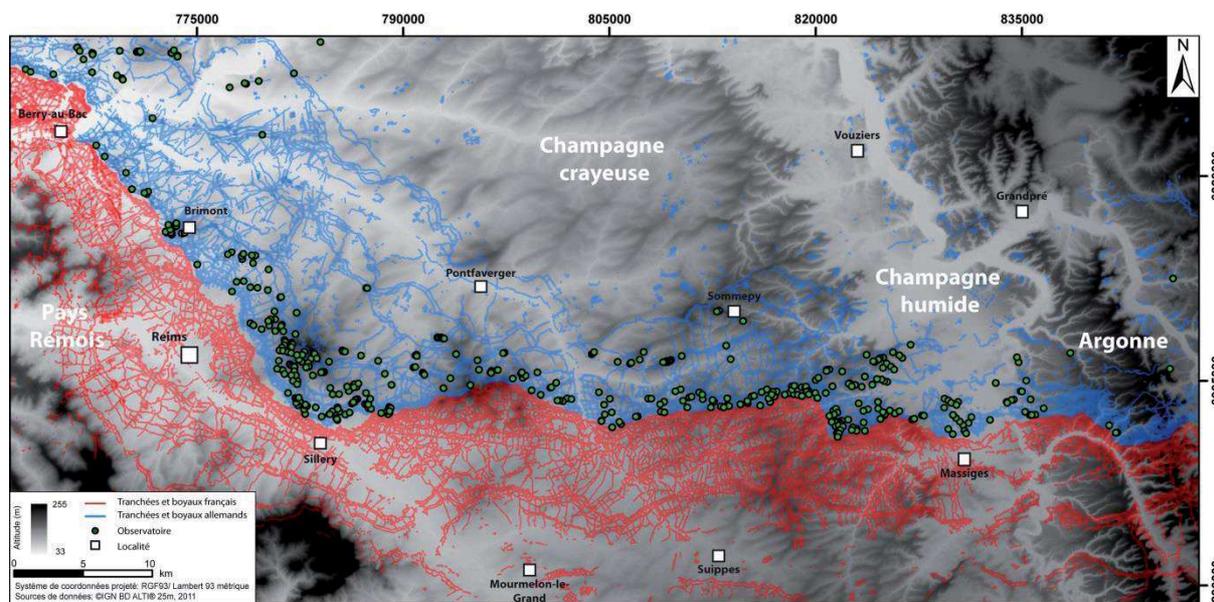


Fig.3.35: Carte de l'emplacement des observatoires allemands en Champagne-Ardenne.

Les postes d'observations servent aux réglages de l'Artillerie dont les batteries sont repérées sur les plans directeurs. Ils permettent ainsi de renseigner sur la localisation et l'organisation spatiale des pièces d'artillerie dans le cadre d'une offensive comme celles de mai 1918 (Ludendorff) et du 15 juillet 1918 (*Friedensturm*). Sur les 115 km du front champardennais, 7 360 canons allemands sont recensés, déterminant une densité linéaire de 64 canons/km de front, correspondant à une amplitude d'un canon tous les 15 m (Fig. 3.36). Ces canons allemands sont installés dans les seconde et troisième positions, laissant l'Artillerie de tranchée (non recensée) dans la première position. Cependant, ces chiffres cachent de fortes disparités spatiales sur le front qui dépendent des offensives. En effet, la densité linéaire de canons en Argonne (secteur calme), et dans le secteur de Berry-au-Bac jusqu'Aubérive (offensive Ludendorff et *Friedensturm*) est respectivement de 39 et de 85 canons/km de front.

Cette concentration d'artillerie particulièrement impressionnante surpasse celle de l'offensive française de Champagne du 24 au 30 septembre 1915 (44 pièces/km de front) et avoisine le déluge de feu de la préparation de l'attaque allemande de Verdun du 21 au 22 février 1916 (102 pièces/km de front, Pommier, 2015).

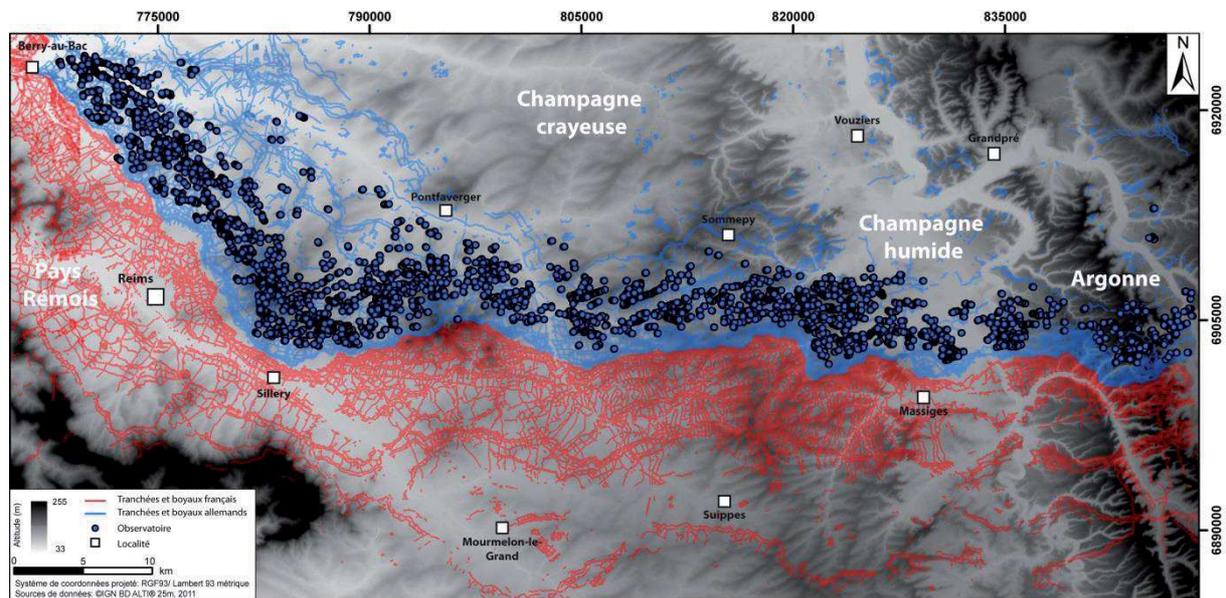


Fig.3.36: Carte de l'emplacement des batteries d'artillerie allemandes avant l'attaque de mai 1918.

Ces batteries d'artillerie allemande, composées de 2 à 4 canons matérialisés sur les plans directeurs, ne comprennent que l'Artillerie de campagne, canons de 77, 105 ou 150 mm, absente de la première position où des mortiers (*Minenwerfer*) sont installés dans les tranchées et permettent par des tirs courbes, de pilonner la première position adverse. Des obusiers dans la 2^{ème} position, par des tirs bombés, pilonnent les deux premières positions ennemies, avec des obus plus imposants, davantage d'explosifs que les mortiers. Enfin, des canons sont installés en 3^{ème} ou 4^{ème} position avec des portées de tirs de 20 à 40 km et des obus de plus de 200 mm. Cette artillerie à longue portée peut être aménagée sur des postes fixes, bétonnés (artillerie lourde sur affût) ou plus mobiles sur voie ferrée (artillerie lourde sur voie ferrée : ALVF). Cette dernière est cependant détectée par des voies ferrées courbes pour permettre au canon sans tourelle de pivoter en fonction de l'objectif à atteindre (épi de tir) (Fig. 3.37A). De plus, le recul de ces canons est absorbé par la voie de chemin de fer (Fig. 3.37B) mais ne permet pas une cadence de tir rapide (1 à 2 coups à la minute) par rapport à la vitesse de tir des canons de campagne (12 coups à la minute pour le 77 mm allemand et 15 coups à la minute pour le 75 mm français).

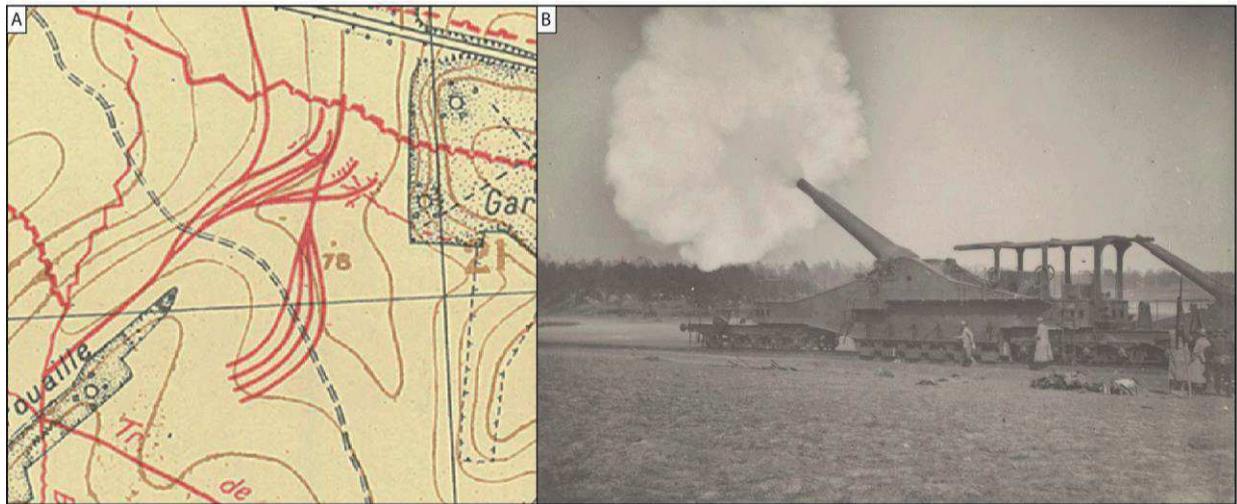


Fig.3.37: A – Épis de tir sur l'extrait du plan directeur de Jonchery-sur-Vesle au 1/20 000 du 23 septembre 1918. B – Artillerie lourde sur voie ferrée en action à Muizon (Source : VAL 082/052).

Très rarement, les plans directeurs français renseignent le calibre concerné, l'objectif du tir et le mode de repérage. Les batteries allemandes sont nommées par leurs coordonnées géographiques à 4 chiffres, un figuré différent selon leur activité (batterie certaine, douteuse, active les deux dernières semaines...) et leur mode de repérage (repérées par le son, par observation terrestre, par avion...). La batterie d'artillerie, dénommée 7727 sur le plan directeur thématique français de la forêt d'Argonne, est composée de canons 77 mm et utilisée pour des tirs de barrage lors d'attaques d'infanterie avec une activité d'au moins une journée. Cette batterie peut tirer sur le village de Vauquois, le lieu-dit la Maize, butte d'altitude de 238 m ainsi que les Côtes de Forimont (253 m d'altitude), sur la Ferme des Alleux et un objectif plus à l'Est (Fig. 3.38).

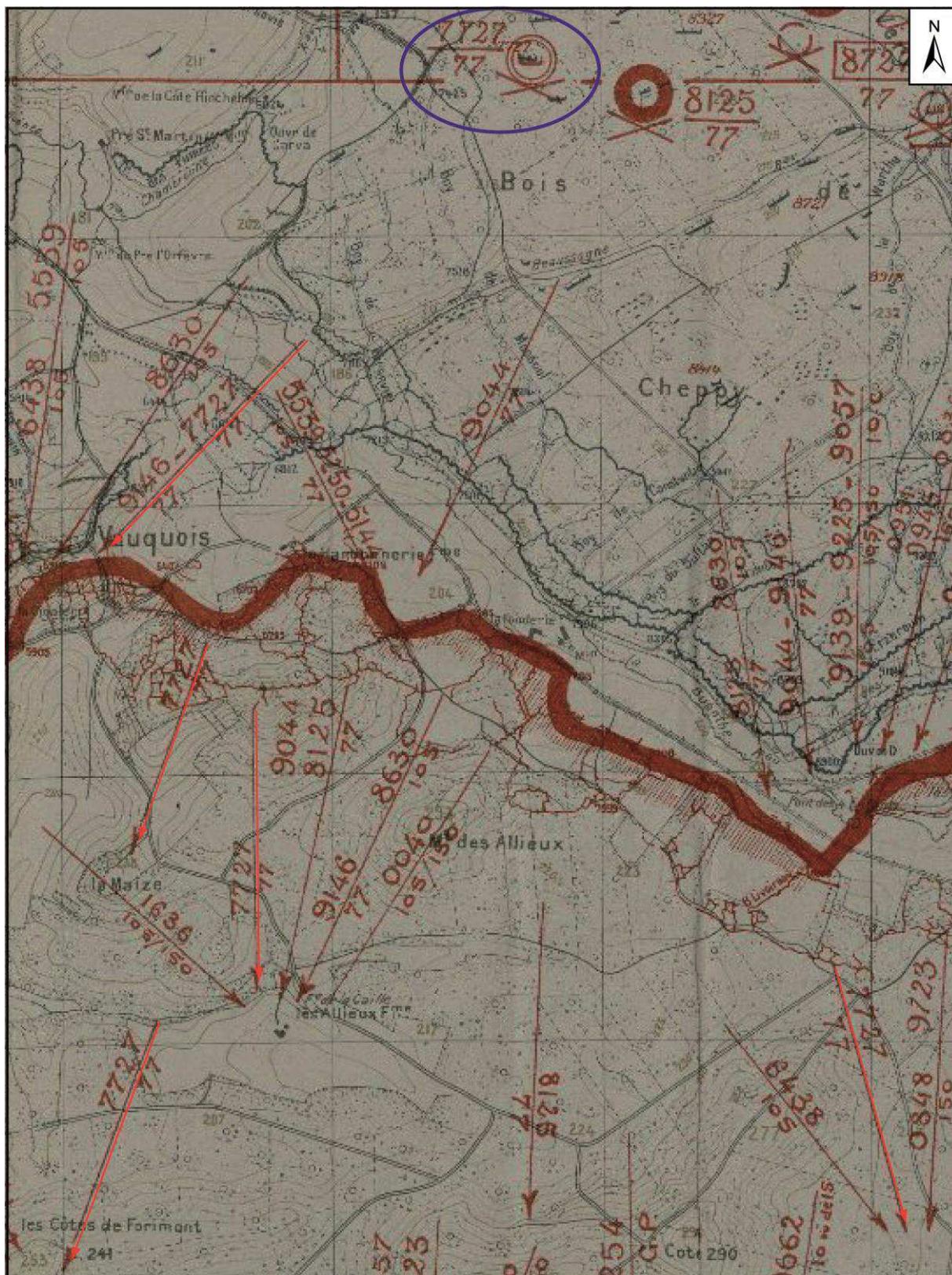


Fig.3.38: Extrait du plan directeur de la forêt d'Argonne du 1^{er} mars 1918 des emplacements de batteries d'artillerie allemandes et leurs objectifs.

3.5. Les voies ferrées

Le plan *Shlieffen* allemand prévoit une guerre de mouvement rapide vers Paris, mais la mobilité des troupes et du ravitaillement constitue la condition de sa mise en place. Helmuth Von Moltke, chef du Grand État-Major de l'armée allemande de 1906 à 1914, proclamait : « *Ne construisez pas de forteresses, construisez des chemins de fer* ». Cette grande mobilité ne sera possible qu'avec un réseau ferré dense, opérationnel reliant les territoires français, belge et allemand. À l'aube de la Grande Guerre, un réseau à voies normales (écartement de 1,44 m) dessert le territoire champardennais. Trois artères Nord-Sud traversent l'espace de Berry-au-Bac à Reims, Rethel-Reims, Vouziers-Sainte-Menehould. Trois lignes quadrillent la zone de Vouziers à Berry-au-Bac, Grandpré-Sommepy-Ponfaverger-Berry-au-Bac et la ligne Sainte-Menehould-Suippes-Mourmelon jusque Reims (Fig. 3.39). Ce réseau d'environ 500 km sera largement utilisé pendant le conflit par les deux armées, objectif récurrent de l'Artillerie. Cependant, ce tissu ferroviaire est développé à outrance pour le ravitaillement des hommes, des vivres et des munitions. La culture ferroviaire allemande est bien plus développée avec 28 362 locomotives (13 959 pour la France), 62 749 voitures à voyageurs (48 662 pour la France) et 703 545 wagons de marchandises (371 047 pour la France) et lui confère une supériorité matérielle et personnelle indéniable (Peschaud, 1927).

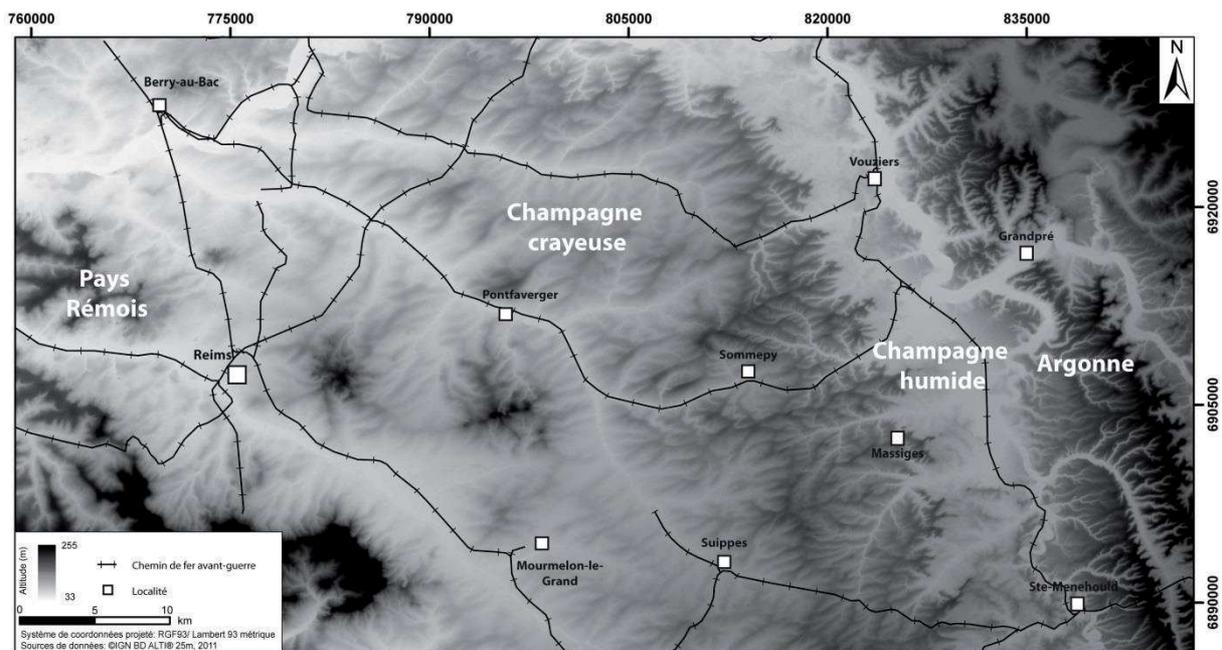


Fig.3.39: Carte des voies ferrées avant le début du conflit en Champagne-Ardenne d'après la carte d'État-Major.

Après la stabilisation du front côté allemand, le premier chantier est de relier le réseau ferroviaire français au réseau belge pour faire le lien avec les ravitaillements venus d'Allemagne. Il reste un tronçon de 4 km à construire pour la liaison. Six compagnies du Génie pendant quinze jours s'affairent à ce travail et le premier train peut y circuler le 19 septembre 1914. Pendant l'hiver 1914-1915, le Génie allemand répare les voies ferrées endommagées pendant les combats de l'automne ou détruites lors de la retraite française. Pour alimenter le front, la logistique allemande utilise les lignes Nord-Sud pour amener le matériel en Champagne-Ardenne puis les lignes Ouest-Est pour le distribuer. À l'hiver 1918, 1 280 km de chemins de fer allemands ont été digitalisés sur ce front champardennais de 115 km (Fig.

3.40). Dans le Pays rémois et en Champagne crayeuse, le réseau allemand se greffe sur la ligne Sommepey-Pontfaverger mais le recul du front en Septembre 1915 menace celle-ci. Cette ligne est surveillée par l'aviation française, parfois bombardée par l'Artillerie lourde. Dans ce contexte d'insécurité de l'alimentation de leur front, les Allemands entreprennent la construction de deux lignes, l'une orientée Nord-Sud dans la vallée de l'Aire en Argonne, et l'autre reliant Vouziers vers Berry-au-Bac plus éloignée du front de Champagne. Cette seconde, construite à proximité de la voie précédente à voie normale de 1,44 m, tisse également des liens avec les villages à proximité à l'aide de voies étroites (0,60 m). Ces petites voies sont des tronçons préfabriqués de traverses métalliques, démontables si nécessaire. Des bifurcations dans le réseau peuvent également alimenter les canons lourds d'artillerie sur affût fixe (canon de Marine).

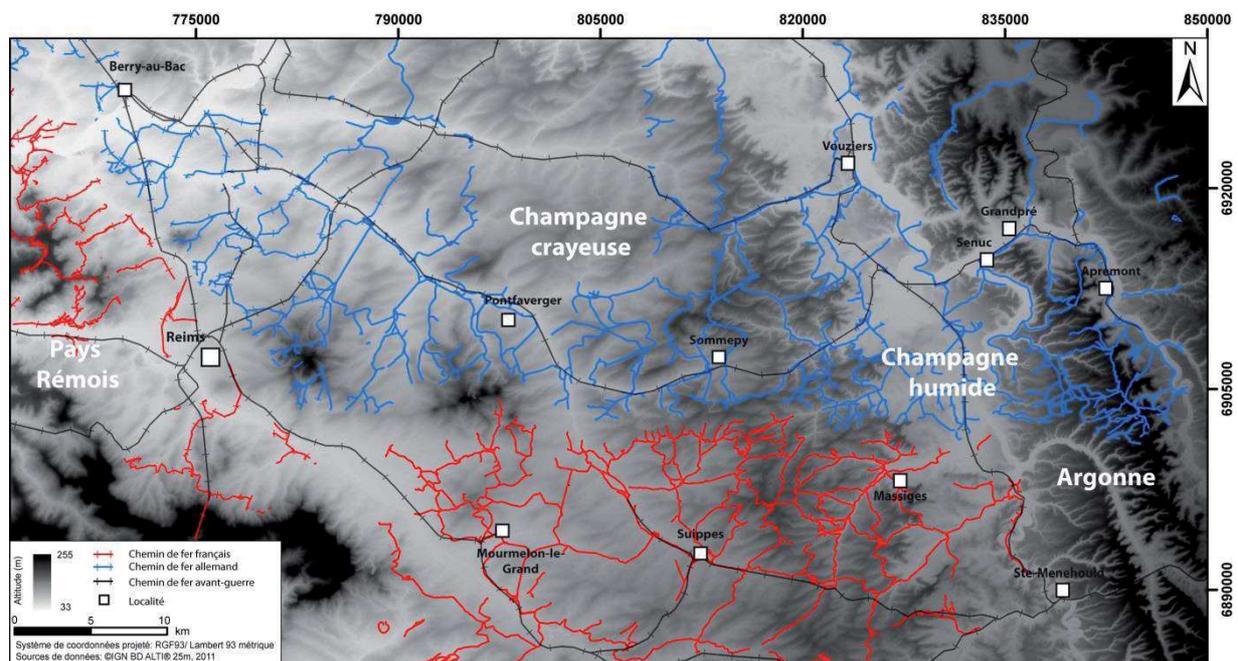


Fig.3.40: Carte des voies ferrées allemandes et françaises construites pendant le conflit.

En Argonne, la jonction est établie avec la gare d'Autrecourt, puis Buzancy et Grandpré. Cette ligne va se scinder en trois en empruntant la vallée de l'Aisne par Senuc, la vallée de l'Aire par Marcq et Apremont, la vallée de la Besogne dans le massif forestier (Fig. 3.40). Ces travaux réalisés en trois mois avec un effectif maximal de travailleurs de 14 000 hommes permettent une liaison ferroviaire pour desservir l'Argonne. Ces trois voies connectent ensuite une véritable toile d'araignée, l'Argonnenbahn, pour desservir en vivres, en munitions et en hommes le front d'Argonne (Fig. 3.41A) (Ehret, 2011). Les Allemands tissent alors un réseau dense d'environ 300 km dans le massif forestier de voie de 0,60 m, parcourues par des locomotives à vapeur, à benzol, à traction animale ou humaine. Les locomotives à vapeur sont plutôt utilisées loin du front pour éviter d'être repérées par l'observation aérienne ennemie alors que la locomotive à benzol ne dégage pas de vapeur. Près du front, les wagons sont tractés par les chevaux ou poussés par les soldats (Fig. 3.41B). Les voies de 0,60 m parcourent l'arrière du front jusque dans les camps de repos (Fig. 3.41C). Le ballast pour la construction de ces lignes de chemin de fer est directement extrait sur place, d'où la création de nombreuses carrières pour extraire la gaize, ou des calcaires tithoniens (carrière de Champigneulle). Tous les 5 km environ, une station ou une gare est construite pour le

ravitaillement des locomotives, afin qu'elles puissent se doubler ou se croiser (Fig. 3.41D). L'alimentation par locomotive du front en munitions est toujours prioritaire sur une locomotive chargée de vivres ou de blessés (Léry, 1916) :

« Chaque armée, comme on sait, possède sa gare régulatrice qui joue à son égard le rôle du cœur dans l'organisme humain. La gare régulatrice est aspirante et foulante. Elle est le trait d'union indispensable entre l'arrière et l'avant. Elle reçoit de l'arrière les hommes, les armes, les munitions, les vivres, les effets d'habillement et d'équipement, les colis pour les soldats, les lettres ; elle répartit tout cela sur le front. Elle renvoie du front vers l'arrière les permissionnaires, les blessés, les malades, les armes et les effets inutilisables, en un mot tout ce dont les unités combattantes doivent se débarrasser. (...) Que le moindre désordre se produise et ce désordre se répercute aussitôt dans la zone de l'avant où les combattants manquent de ce qui leur est indispensable, en vivres, habillement ou munitions. »

Côté français, le cordon ombilical de l'armée est la ligne Mourmelon, Suippe à Sainte-Menehould. Cette ligne reçoit les ravitaillements venant de l'Est en traversant l'Argonne, ou du Sud de Châlons-sur-Marne. 915 km de chemins de fer sont construits pour le ravitaillement du front de Champagne-Ardenne. Ce chiffre est sous-estimé par notamment la lacune en Argonne ; aucun plan directeur ne renseigne sur ce tissu ferroviaire dans le massif boisé. En Champagne crayeuse, les voies se greffent à cette ligne principale pour partir vers le front puis un réseau dendritique prend le relais pour desservir au plus près la première position. À travers les côtes (pente abrupte) ou des versants très raides, le ravitaillement est possible par des funiculaires.

L'approche cartographique par les plans directeurs permet de montrer que le réseau de défense est associé au développement du réseau ferroviaire. En effet, celui-ci, dans la zone de front, passe de 500 km de développement en 1914 à 2 395 km en 1918, traduisant une multiplication par 4,8 du linéaire. Il s'organise selon un réseau dendritique perpendiculaire à la ligne de front desservant les premières positions et s'intègre à un réseau souvent préexistant mais parallèle aux positions de l'arrière.

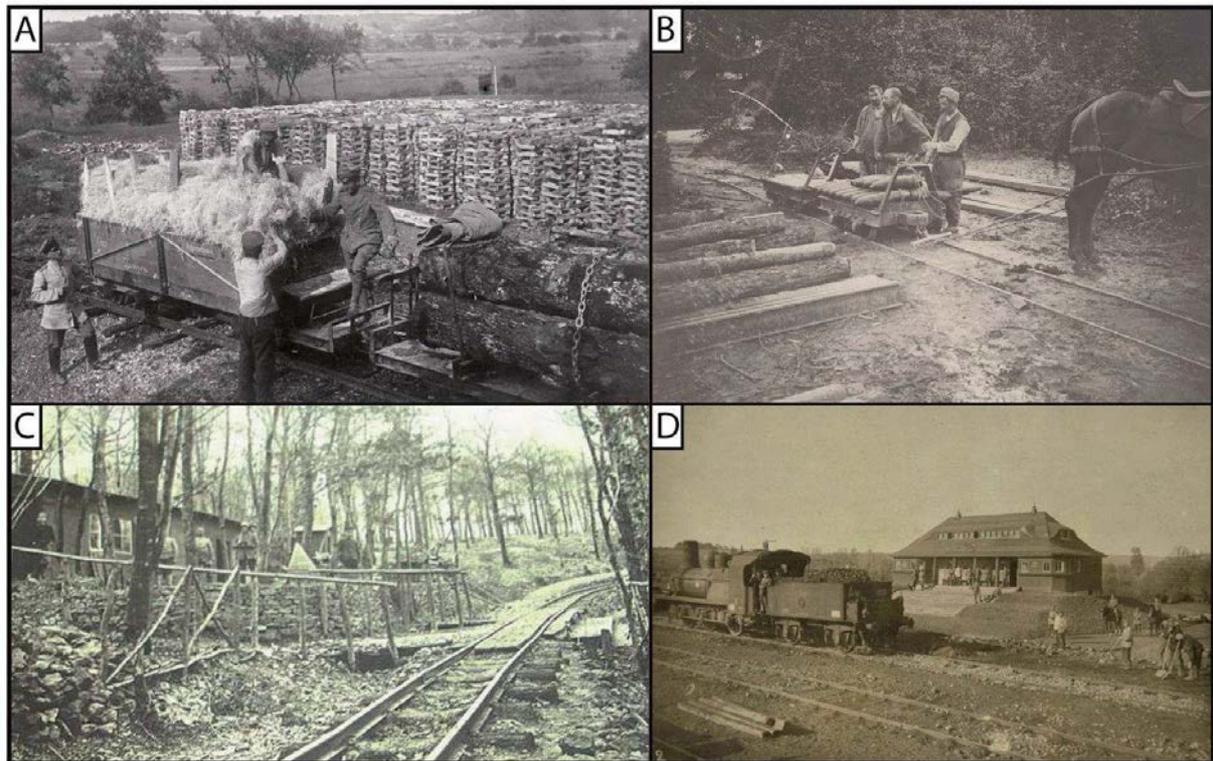


Fig.3.41: A – Acheminement du fourrage et bois par voie de 0,60 m à Senuc en Argonne (Source : collection personnelle). B - Ravitaillement en munitions par traction équine à Verzy en juillet 1916 (Source : BDIC VAL 083/074). C – Voie de 0,60 dans le camp du Borrieswald en Argonne (Source : collection personnelle). D – Locomotive devant la gare de Saint-Juvin en Argonne (Source : collection M. Coistia).

3.6. Camps : cantonnements et camps d'instruction.

Après la fixation du front, les troupes établissent des camps de repos à l'arrière. Ces zones de repos peuvent se retrouver dans les villages, évacués de leurs civils. Une véritable organisation logistique s'opère à l'arrière pour approvisionner le front. Pour exemple, les maisons mitoyennes du village d'Authe sous occupation allemande sont éventrées pour créer un long bâtiment abritant une chaîne industrielle d'abattage d'animaux. Environ 100 chevaux et bovins sont traités par jour, ainsi envoyés, *via* le chemin de fer, vers le front (Knipping, 2004). De véritables cités naissent également dans les campagnes ou les forêts, si possible à contre-pente de toute atteinte de l'Artillerie ennemie. La digitalisation des camps allemands en Champagne-Ardenne recense 135 camps. Ces installations participent au repos des hommes ou se trouvent à proximité des sites d'aviation. Cependant, ce chiffre semble largement sous-estimé, à la fois par le manque de renseignements sur les plans directeurs et par des campements de quelques structures ou baraquements non répertoriés (villages noirs). Leur proximité au front varie de 1,5 km (camps de la Vallée Moreau en Argonne) à l'arrière de la première position, à plus de 30 km. De petits réseaux de tranchées et de boyaux sont également retrouvés à l'arrière du front, et souvent à proximité d'un camp de repos. Ces éléments sont interprétés comme des sites d'entraînement pour la formation de la guerre de tranchées des recrues, arrivées récemment dans le secteur. Sur l'extrait du plan directeur d'Attigny du 17 août 1918, une ligne de chemin de fer dessert le village de Semide et un cantonnement important à l'ouest du village. À l'ouest du campement, de petits réseaux de défense (éléments de tranchées) sont creusés dans la craie pour l'entraînement et l'instruction

des soldats du secteur qui iront se battre sur le front de Champagne plus au Sud (Fig 3.42). À ce titre, les camps participent au réseau de défense par les tranchées d'instruction.

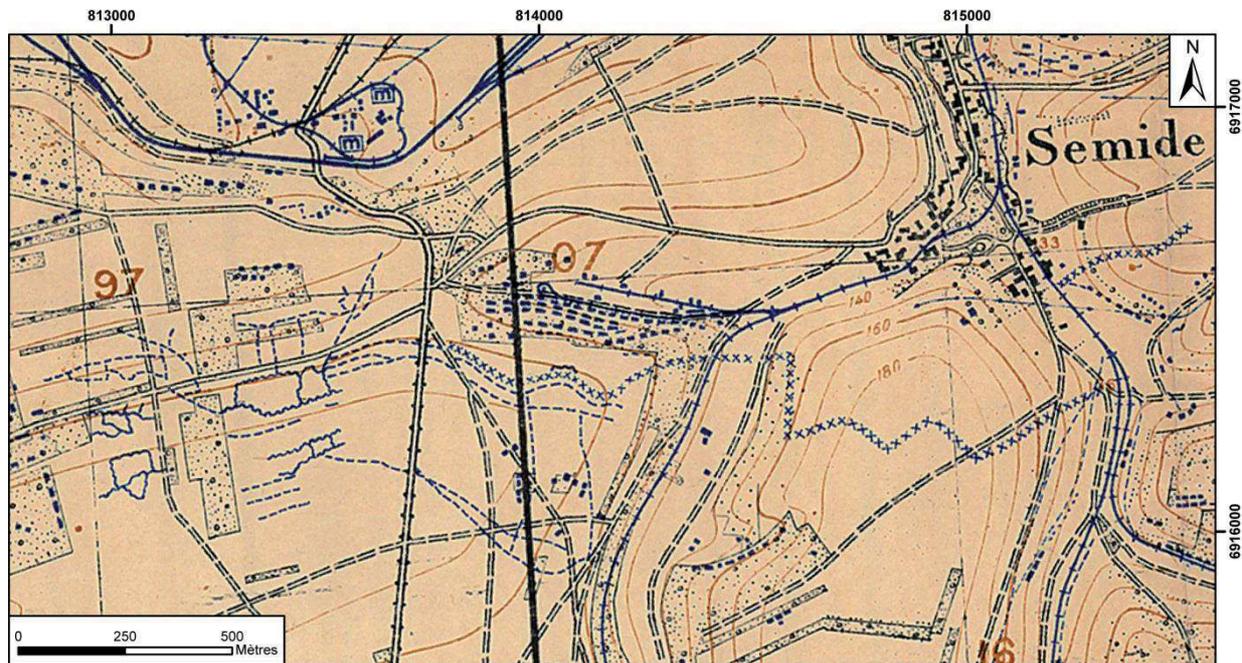


Fig.3.42: Campement et centre d'instruction près de Semide sur un extrait du plan directeur d'Attigny au 1/20 000 du 17 août 1918.

3.7. L'alimentation en eau

L'alimentation en eau est primordiale et reste un problème de taille. L'Armée doit s'assurer à la fois de bonnes ressources en eau dans la zone de front durant la guerre de position (avec son cortège d'offensives), mais aussi de son approvisionnement ou de sa distribution, ainsi que dans la guerre de mouvement.

D'une part, elle doit garantir des volumes considérables de l'ordre de 7 500 m³/j (75 m³/jour/division, soit 3 à 5 l/jour/homme au minimum, Villate, 1925). Les manuels d'instructions militaires préconisent 10 litres par jour pour un fantassin et 50 litres par jour pour un cavalier et son cheval (Ecole du Génie, 1914).

D'autre part, l'eau consommée doit présenter une qualité suffisamment acceptable pour éviter les épidémies dans un contexte de calamités climatiques (Savouret *et al.*, 2011) et de conditions sanitaires déplorables au front. Pour répondre à cette demande, les ressources en eau de la zone de front sont exploitées comme le montrent les documents d'archives, les plans directeurs mais aussi les écrits des combattants et les traces archéologiques. L'alimentation en eau est largement complétée par les eaux minérales (notamment du côté allemand), la bière, et bien évidemment le vin ou « pinard » des poilus qui font l'objet de nombreuses études historiques (Lucand, 2015).

3.7.1. La ressource

La zone de front traversant les auréoles géologiques du Bassin de Paris bénéficie de bonnes ressources en eaux souterraines pour l'alimentation en eau des troupes et des chevaux sous la forme de 3 modes d'alimentation :

- Les sources captées issues des aquifères de surface sont nombreuses. Les fort contrastes verticaux de perméabilité des formations géologiques du Bassin de Paris déterminent de multiples lignes de sources de trop plein et de débordement sur le front des cuestas et dans les vallées également pourvues de sources de déversement et de dépression. Les manuels militaires préconisent les eaux de sources à l'exception de celles situées dans « les terrains salés, gypseux, anthraciteux, pyriteux ou trop riches en humus » (Ecole du Génie, 1914).
- Les cours d'eau drainant les zones saturées des aquifères, notamment en Champagne, assurent également l'alimentation en eau mais, plus sensibles à la pollution, sont considérés comme fournissant des eaux de qualité moyenne, voire médiocre.
- Les forages en nappes profondes et de sub-surface ou libres, réalisés par l'Armée et les puits creusés loin des habitations, fournissent généralement des eaux de bonne qualité. Les puits artésiens des nappes captives sont recherchés.

La compréhension des masses d'eau souterraines est bien assimilée par les militaires. « Avant l'analyse bactériologique, une étude géologique peut à priori fournir une première appréciation du niveau d'eau et de sa valeur » (Villate, 1925). Au sortir de la guerre, les manuels militaires sont pétris de culture hydro-géologique pour la recherche en eau (Cazenave, 1920) notamment pour les sources et les puits.

En Champagne-Ardenne, sur le revers de la côte d'Île-de-France les formations tertiaires constituent des aquifères multicouches à faible rendement (Marnes et Caillasses du Lutétien supérieur, sables grésifiés du Thanétien) fournissant de nombreux niveaux de sources captées sur le front de la Côte dans la région de Reims. En Champagne, l'infiltration domine dans la craie blanche, les cours d'eau sont rares et la soif est particulièrement perceptible; les forages sont nécessaires. Dans l'Argonne, la Gaize perchée au-dessus des argiles du Gault constitue un bon réservoir vidangé par de nombreuses sources captées mais très turbides en période de crue. À l'hétérogénéité spatiale des ressources en eau s'ajoute la vulnérabilité à la pollution de surface notamment bactériologique, inhérente à la surface libre des zones saturées et aux conditions d'hygiène au front (200 à 300 cadavres d'hommes et animaux recensés sur un kilomètre carré, Médard, 2016). Cela se traduit par un risque élevé de contamination, de diphtéries chroniques dans la zone de front, bien connues des militaires qui dans le courant hygiéniste de la fin du XX^{ème} siècle vont s'armer d'un « service des eaux » dépendant du Génie, de préconisations dans les manuels d'instructions, d'adductions et de distributions d'eau, surveillées par des laboratoires de toxicologie. À la différence du front des Balkans, les affections d'origine hydriques (fièvres typhoïdes) restent cantonnées aux régions argileuses du front ouest et en début du conflit. La soif est particulièrement ressentie puisque c'est précisément dans les phases de chaleur caniculaire et de sécheresse que s'inscrit la guerre de mouvement (août 1914, juillet 1918) davantage demandeuse en eau potable (Savouret *et al.*, 2011).

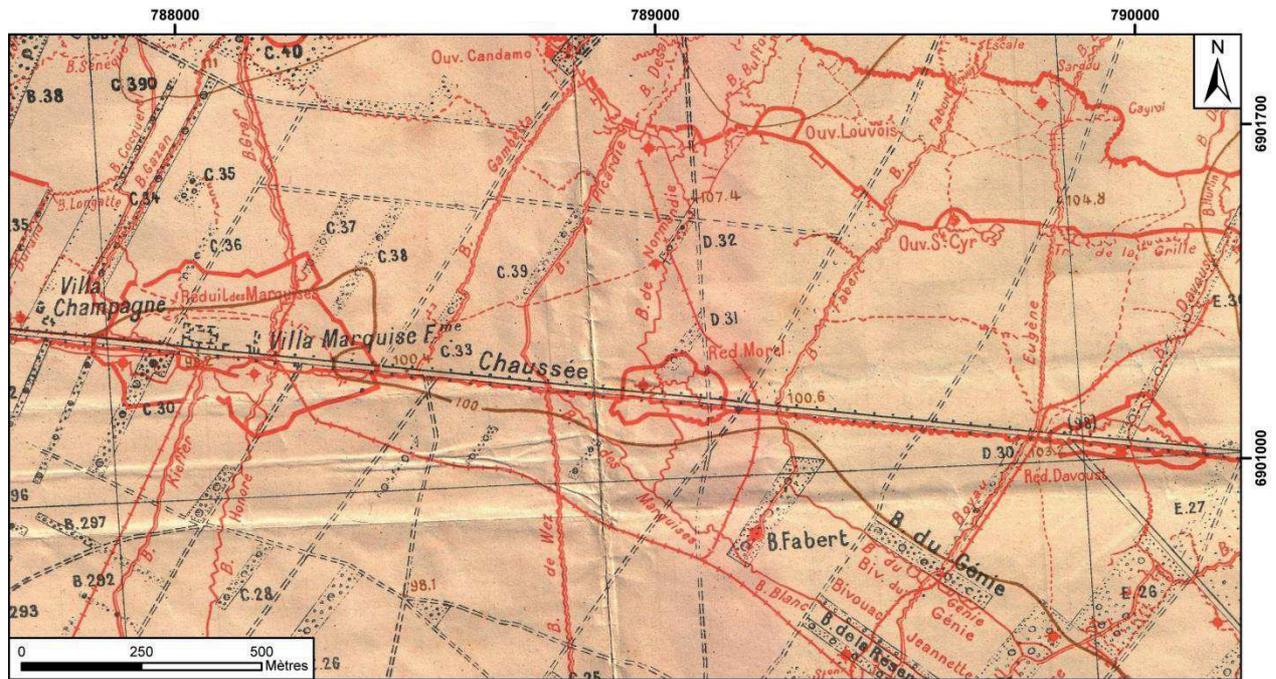


Fig.3. 43: Exemple de forages (rond rouge) au centre de réduits de résistance en Champagne crayeuse (secteur de Prunay, plan directeur de Prunay du 6 juillet 1917).

L'examen des plans directeurs en Champagne crayeuse témoigne d'un réseau de forages français relativement dense (1 forage/ 2 km²) dans la zone de front notamment dans le deuxième et le troisième rideau défensifs (secteur de Prunay). En effet, chaque « centre de résistance », « réduit » ou « ouvrage » fortifié (Saint Cyr), comme les « réduits » Marquise, Morel, et Davoust est équipé de puits lui assurant une alimentation en eau *in situ* et peut résister à des offensives sans corvées de distribution en eau (Fig. 3.43).

3.7.2. Adduction et approvisionnement

Dans les camps de l'arrière (nord de Somme-Suippe), un véritable réseau de distribution est nécessaire pour acheminer l'eau avec des canalisations alimentées par des puits avec pompes à main, voire des motopompes (Fig. 3.44A). Pour le cantonnement, les aide-mémoires de l'officier du Génie préconisent 10 l/j/homme dont 1,5 l pour la boisson, ainsi que les travaux d'aménagement des sources, des puits, des forages (Fig. 3.44B) et le traitement des eaux par filtration (sable, charbon de bois) (Fig. 3.44C-D), javellisation ou adjonction de permanganate de potasse (Ministère de la Guerre, 1915), d'alun en poudre (1 kg/ 3 à 4 m³). Des postes de javellisation jalonnent la zone de front à raison de 33 postes pour une armée déployée sur 500 km² en 1917, ainsi que 200 laboratoires de toxicologie au sein des divisions (Médard, 2016).

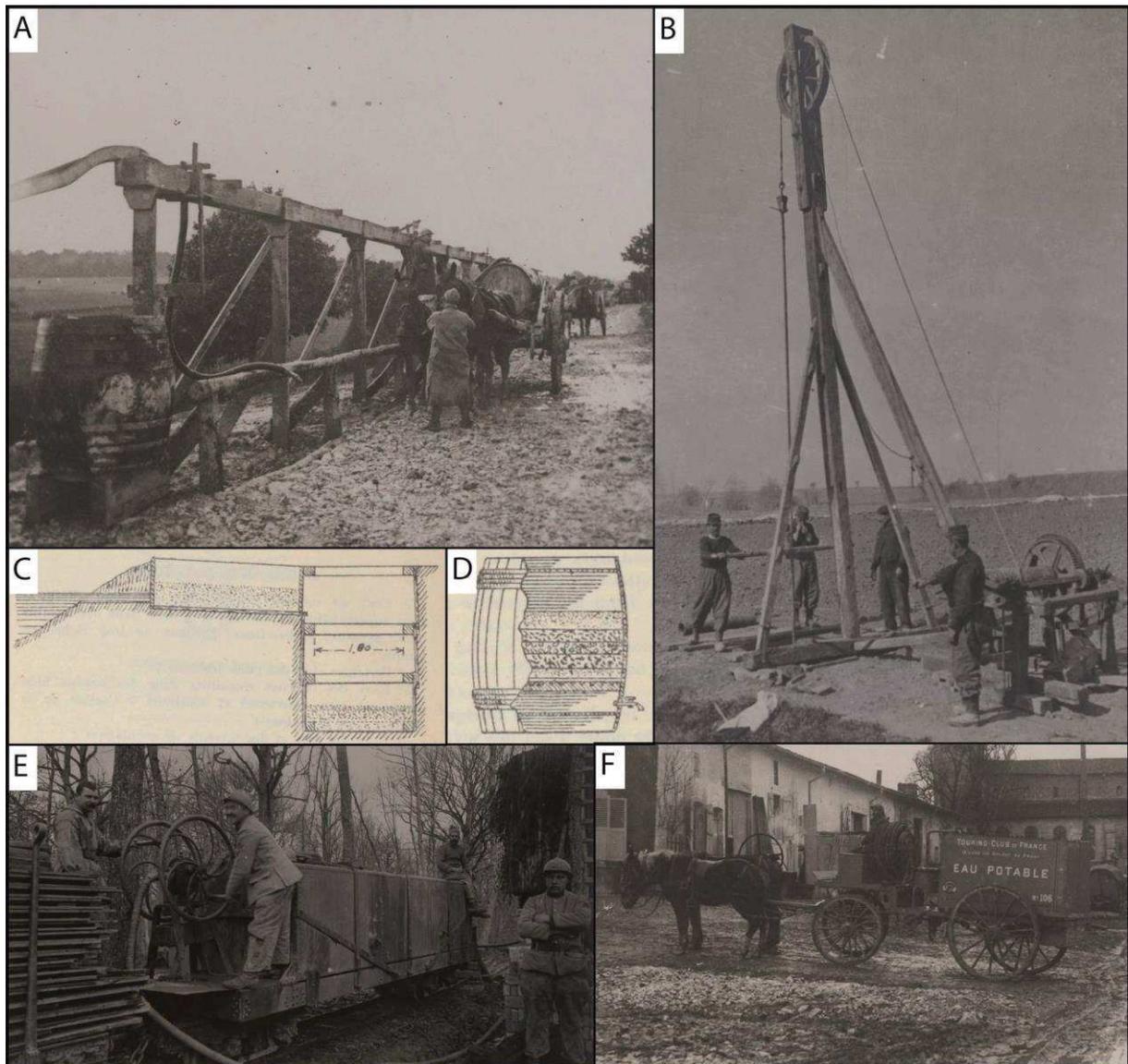


Fig.3.44: A - Poste de service des eaux près de Baleycourt (55) (Source : BDIC VAL 182/009). B - Forage d'un puits artésien par des sapeurs du Génie près de Monchiet (62) (Source : BDIC VAL 294/197). C et D - Utilisation de sable de rivière pour filtration des eaux d'un cours d'eau et de tonneaux remplis de graviers, sable fin et charbon de bois pour leur purification (Ecole du Génie, 1914). E - Wagon citerne en forêt de Parroy (55) (Source : BDIC VAL 155/074). F - Voiture filtre du Touring Club de France à Dugny (55) en 1916 (Source : BDIC VAL 190/024).

L'adduction d'eau est assurée par wagons-citernes (Fig. 3.44E), voitures d'eau potable ou « voitures-filtres » du Touring Club de France (Fig. 3.44F, Médard, 2016), charrois de tonneaux et enfin les « corvées d'eau » assurées au mieux par les prisonniers dans les positions intérieures et par les combattants au front.

La digitalisation du plan directeur de Prunay au 1/10 000 du 6 juillet 1917 permet de quantifier ces infrastructures liées à l'approvisionnement en eau. Sur les 65 km de front en Champagne crayeuse, humide et en Argonne, 515 puits à main et 146 motopompes, soit 661 forages, sont recensés ce qui détermine une amplitude d'un forage pour 100 m de front. Les

puits à main peuvent être installés dans les premières positions alors que les motopompes plutôt en seconde, troisième et quatrième position (Fig. 3.45).

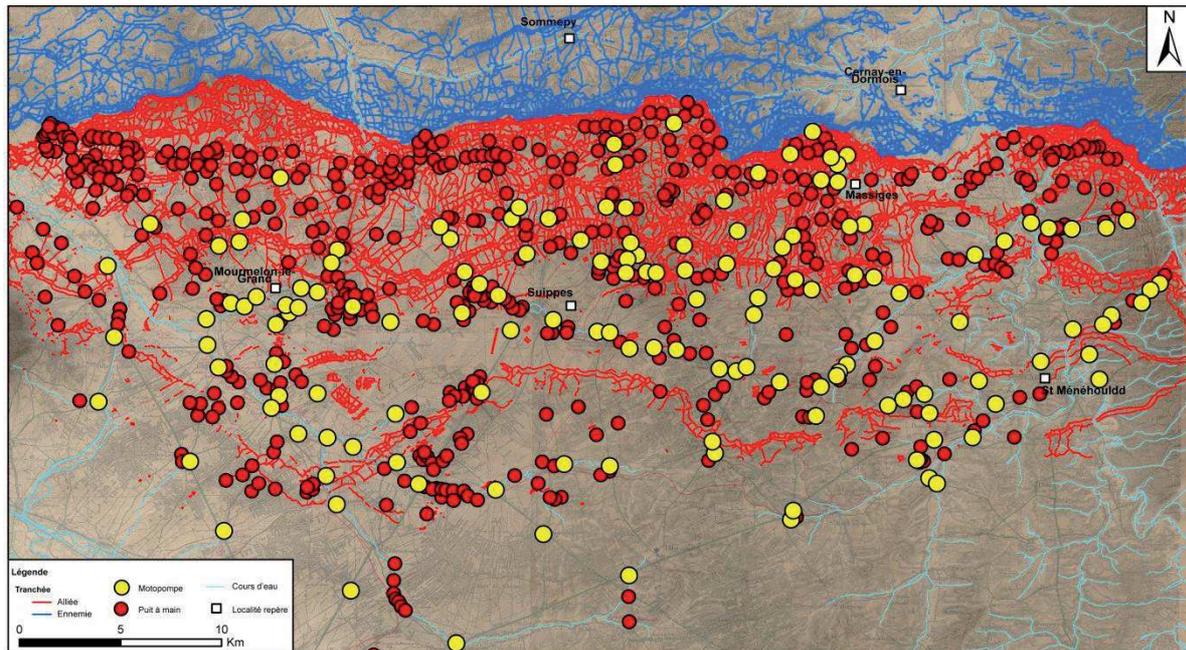


Fig.3.45: Carte des forages (motopompe et pompe à main) en Champagne crayeuse, humide et en Argonne d'après le plan directeur de Prunay du 6 juillet 1917.

Si l'eau, en termes de boisson, fait l'objet d'une attention toute particulière dans la zone des armées, sa gestion collective préfigure les équipements de traitement et d'écoulement connus aujourd'hui (stations de pompage et d'épuration, réseaux d'adduction, aseptisation...). Mais la peur du manque d'eau, la soif hanteront tous les combattants. En Champagne, l'éloignement d'un pompage ou d'une réserve à eau n'offre pas un accès aisé à l'eau. Cette situation nécessite de longues norias quotidiennes (corvées d'eau) comme le souligne le soldat Louis Barthas, en position à la cote 193, qui illustre bien les difficultés d'approvisionnement en eau sur le front de Champagne (Barthas, 1997) :

« Il faut aussi chaque nuit une corvée d'eau pour le PC du capitaine, si ce n'est du commandant. Il n'y a pas de fontaine « Wallace » dans les tranchées et il faut parfois faire des kilomètres pour aller jusqu'au point terminus du tacot qui amène l'eau dans les fûts ».

Le stockage de l'eau à proximité de la 1^{ère} ligne est assez élémentaire et ne semble pas suffire aux besoins des hommes :

« Au fond de ce ravin, je vis sous un hangar recouvert de feuillage une rangée de demi-muids avec chacun un gros robinet en bois. Etait-ce un marchand de pinard installé à portée des obus ? Non, c'était un poste d'eau et ces fûts étaient bien plus souvent vides que pleins. On ne donnait pas de l'eau à tout venant, seule une corvée régulière, avec un gradé muni d'un ordre écrit pouvait venir s'approvisionner. »

Malgré des conditions sanitaires effroyables et marquées par des épidémies hydriques durant les conflits antérieurs, les armées se dotent d'un arsenal de traitement, d'adduction et de préconisation limitant considérablement la mortalité contractée par maladies typhoïdiques sur

le front ouest. En effet, les infections d'origine hydrique n'affectent que les premiers mois de guerre puisque 88% des cas sur les 125 000 recensés s'inscrivent en 1914 et 1915 (Morillon, 2015). L'analyse spatiale des plans directeurs sous SIG témoigne effectivement de nombreux aménagements de captages (forages) et d'adduction (réseau ferré dendritique) inscrits dans les réseaux de défense à l'inverse de certains écrits récents affirmant le contraire (Hanot et Simien, 2017).

3.8. Valeur opérationnelle de la base de données

La base de données, créée en 2016 à partir des plans directeurs, est devenue un outil pour les archéologues du secteur de Reims dans le cadre d'une convention entre l'Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (INRAP) et l'Équipe d'Accueil (EA3795) du GEGENAA. Une collaboration étroite avec les archéologues de ce service permet, dans un premier temps, de replacer la zone de diagnostic ou de fouilles archéologiques avant l'intervention sur le terrain des équipes de l'INRAP. Cette contextualisation entre l'emprise de la fouille et la base de données permet d'anticiper le recoupement potentiel de vestiges archéologiques de la Grande Guerre mais également d'évaluer le risque pyrotechnique (munitions non explosées) nécessitant l'intervention du Service de Déminage de la Marne.

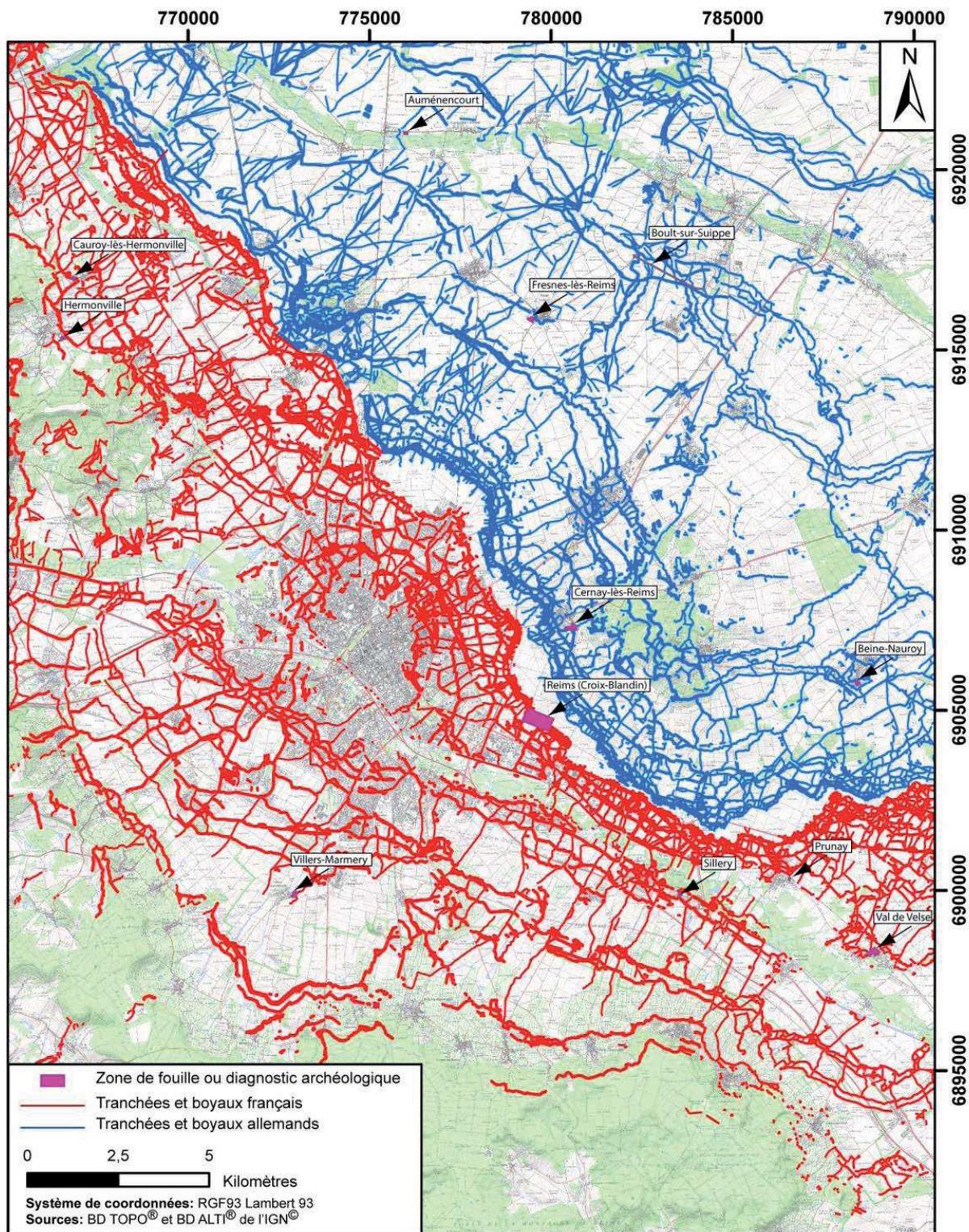


Fig.3.46: Emprise des fouilles et diagnostics archéologiques INRAP dans les réseaux de défense autour de Reims.

Douze emprises dans les communes autour de Reims (Auménencourt, Beine-Nauroy, Cauroy-lès-Hermonville, Cernay-lès-Reims, Reims, Prunay, Sillery, Fresnes-lès-Reims, Boulton-sur-Suippe, Val de Velse et Villers Marmery) ont été replacées dans les réseaux de défense (Fig 3.46). Pour chaque emprise, un rapport de quelques pages, envoyé à l'INRAP, présente le site de fouilles ou de diagnostic intégré dans la base de données des réseaux de défense. Par

exemple, le site de fouilles archéologiques, au lieu-dit « Le bas de la Noue Saint-Rémi » à l'est de Reims, s'étend sur 177 ha. Cette fouille, menée par l'INRAP à l'automne 2016, fut préalablement replacée dans son contexte. La zone recoupe les tranchées de premières lignes de la première position française, des tranchées détruites ou provisoires allemandes au nord-est et le no man's land, l'un des plus larges sur le front champardennais sur près d'un kilomètre (Fig. 3.47). Ce secteur, relativement calme devant Reims, subit néanmoins les offensives allemandes de 1914 et de 1918.

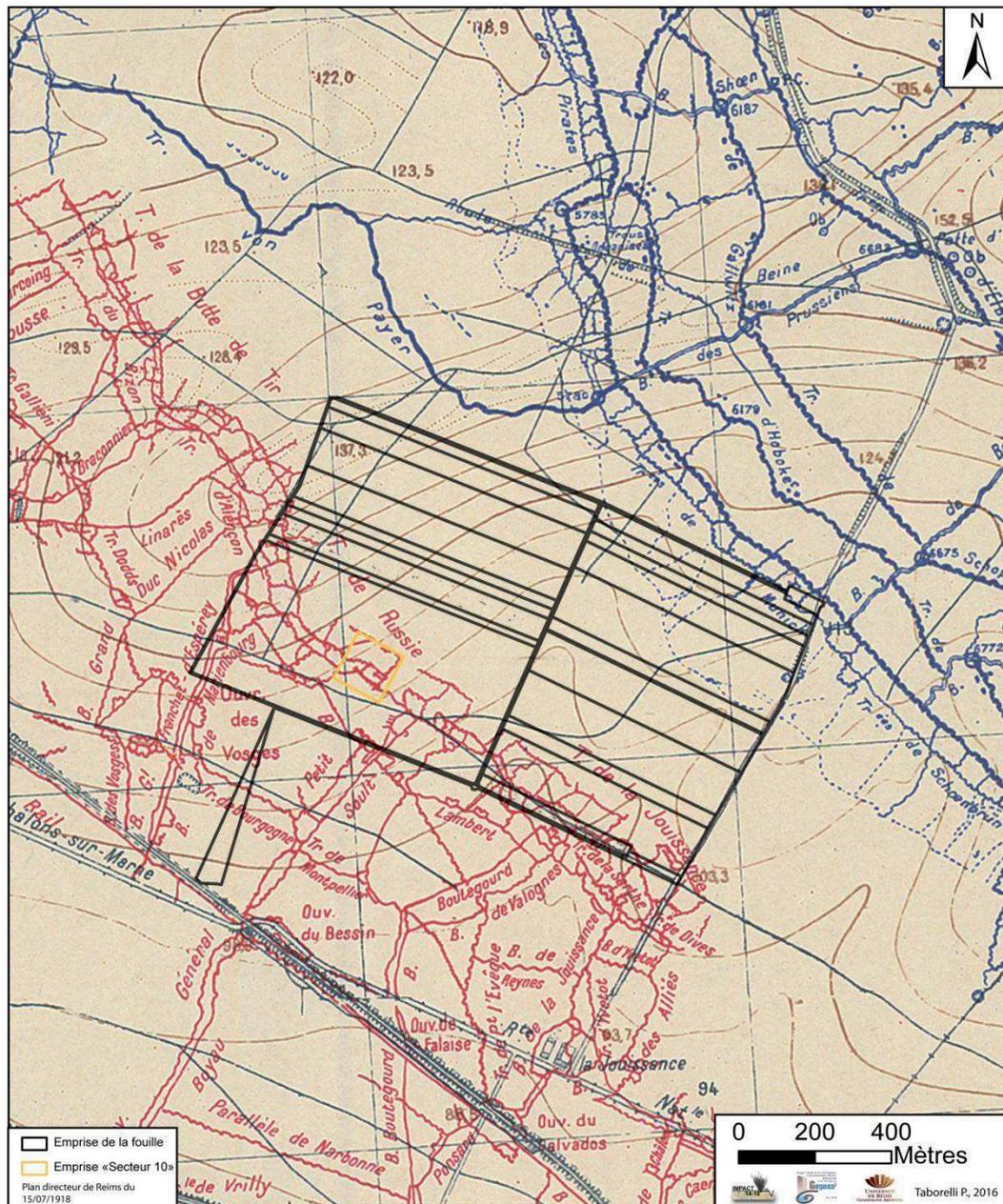


Fig.3. 47: Emprise de la fouille archéologique « Le bas de la Noue Saint-Rémi » à partir de la base de données digitalisées et de l'extrait du plan directeur de Reims du 15 juillet 1918.

Dans un second temps, lors de la fouille, le service archéologique de l'INRAP nous donne la possibilité d'accompagner les archéologues dans leur travail. Ces visites de terrain permettent de vérifier les investigations menées en amont de la fouille ainsi que la véracité et la précision de la base de données. Le décalage entre le tracé des tranchées, digitalisé à partir des plans

directeurs, et les tranchées et boyaux recoupés en fouille archéologique du « secteur 10 » de la zone « Le bas de la Noue Saint-Rémi » est de 2 à 13 m (Fig. 3.48) et s'explique par la précision des plans directeurs lors de leur réalisation, notamment au 1/20 000, par le géoréférencement par point qui peut apporter une légère imprécision, mais également par la qualité du document source et de sa numérisation. Malgré une digitalisation réalisée au 1/20 000 en stylisant le tracé des réseaux, l'approche multiscalaire témoigne de la bonne validité opérationnelle de la banque de données avec un artefact spatial inférieur à 15 m.



Fig.3.48: Croisement entre les tranchées digitalisées à partir des plans directeurs et les tranchées recoupées lors de la fouille archéologique de « Le bas de la Noue Saint-Rémi ».

Une étroite collaboration pendant ce programme s'est tissée avec l'ancien directeur adjoint de la DRAC (Direction Régionale des Affaires Culturelles), Yves Desfossés. Aujourd'hui Conservateur Général du Patrimoine, chargé de mission archéologique des conflits contemporains des Hauts de France et la région Grand Est, il intervient lors de la découverte de corps de soldats de la Grande Guerre. À l'automne 2017, deux corps de soldats sont retrouvés près du village de Cormicy, au nord de Reims. Après l'envoi des coordonnées GPS de leur emplacement dans la base de données des réseaux de défense, ces deux hommes sont replacés dans la première ligne allemande de la première position au contact du no man's land. La première hypothèse est donc d'attribuer ces deux corps à l'armée allemande (Fig. 3.49).

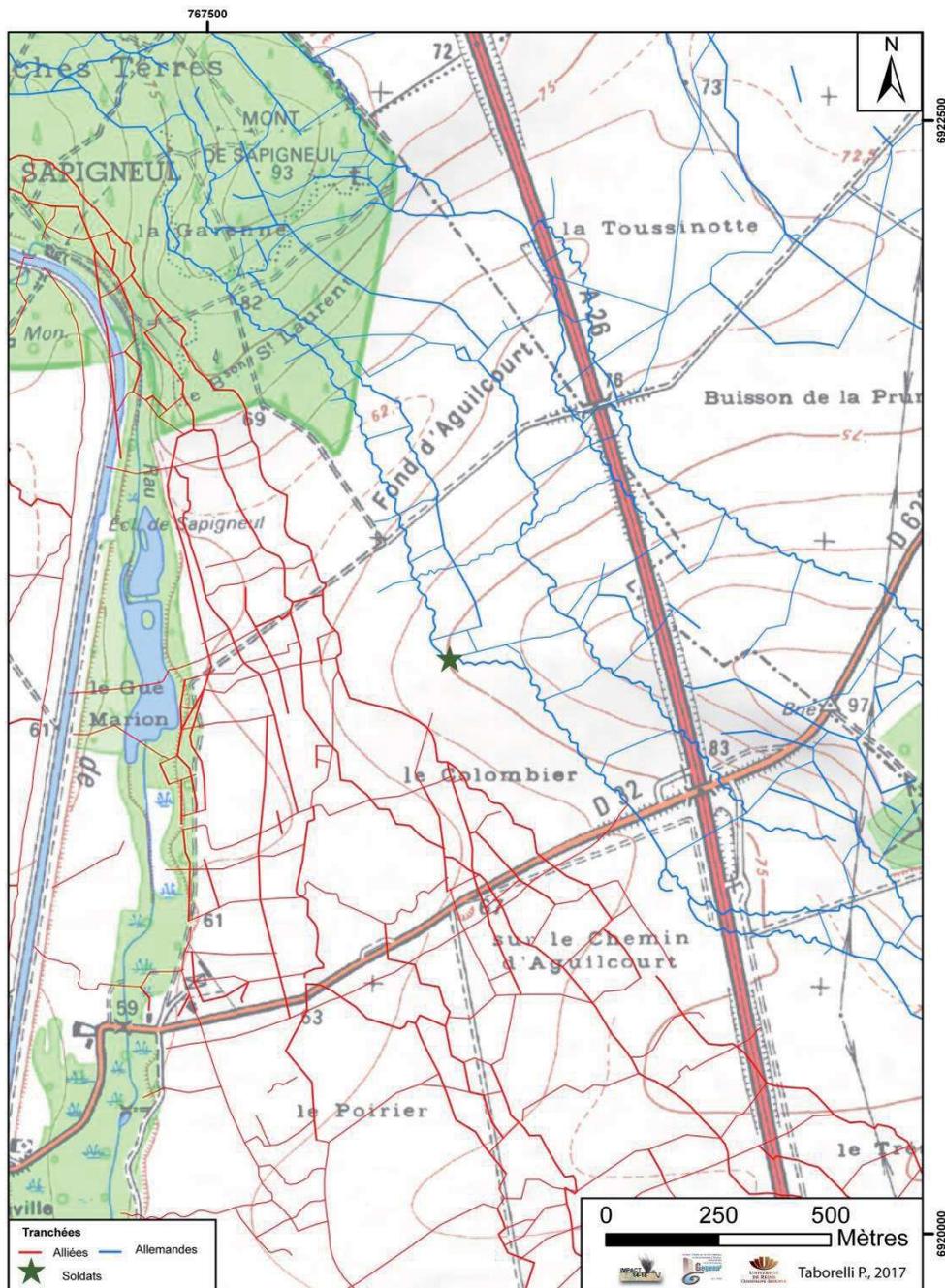


Fig.3. 49: Emplacement de la découverte des deux soldats russes dans les réseaux près de la commune de Cormicy.

Les investigations menées sur les vêtements et objets personnels donnent un avis contraire à cette hypothèse car les deux soldats sont de nationalité russe (boutons et croix orthodoxes) (Fig. 3.50A). La collaboration sur cette fouille archéologique permet alors de déterminer la nationalité des soldats (approche archéologique), le lieu exact de leur mort dans les réseaux de défense (approche géographique) mais également la date de leur décès (approche historique). Ces deux russes tombent le 19 avril 1917, durant l'offensive Nivelle sur le Chemin des Dames. Ils s'élancent à l'assaut et tombent sous le feu ennemi dans la première ligne allemande de la première position (Fig. 3.50B). L'absence de plaque matricule ne permet pas d'identifier ces deux hommes. L'un d'eux est aujourd'hui inhumé dans la nécropole nationale russe de Saint-Hilaire-le-Grand.

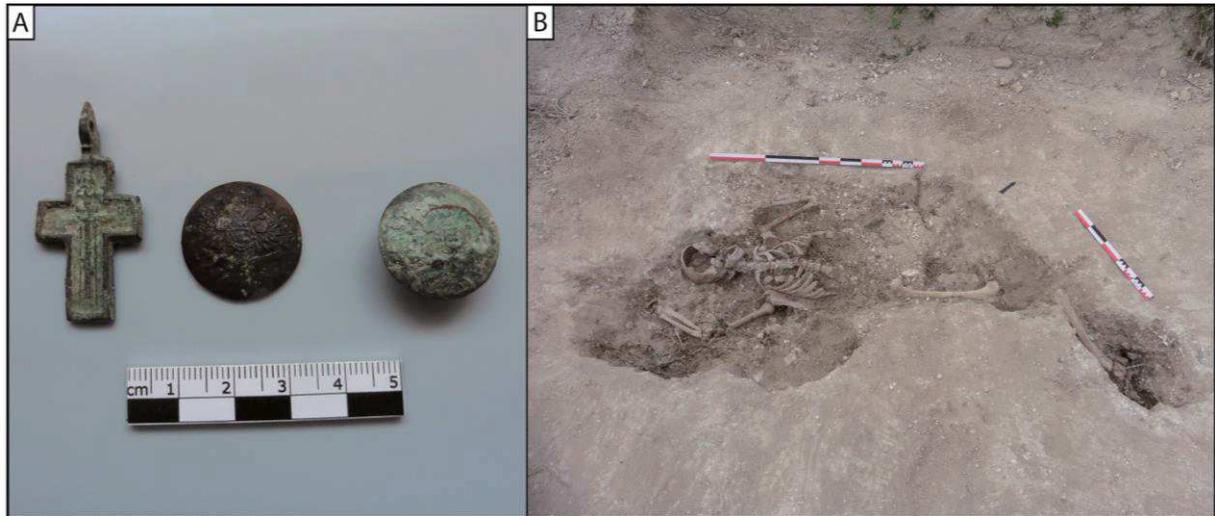


Fig.3. 50: A – Photographie de la croix orthodoxe et des boutons des soldats russes de la fouille de Cormicy (Cliché : Desfossés Y.). B – Sépulture d'un des soldats russes de la fouille de Cormicy (Cliché : Desfossés Y.).

Les plans directeurs, prémices de la carte IGN actuelle, restent très peu connus, même des géographes contemporains. L'un des objectifs du programme de recherche Impact 14-18 est de faire découvrir au plus grand nombre (géographes, historiens, passionnés, civils ou militaires) ces cartes militaires. Depuis 2017, une collaboration en cours avec l'IGN sur Géoportail a pour objectif d'intégrer au site internet deux nouvelles couches d'informations spatiales, la planimétrie des plans directeurs (sans structures militaires) et les réseaux de défense digitalisés en Champagne-Ardenne (Fig. 3.51).

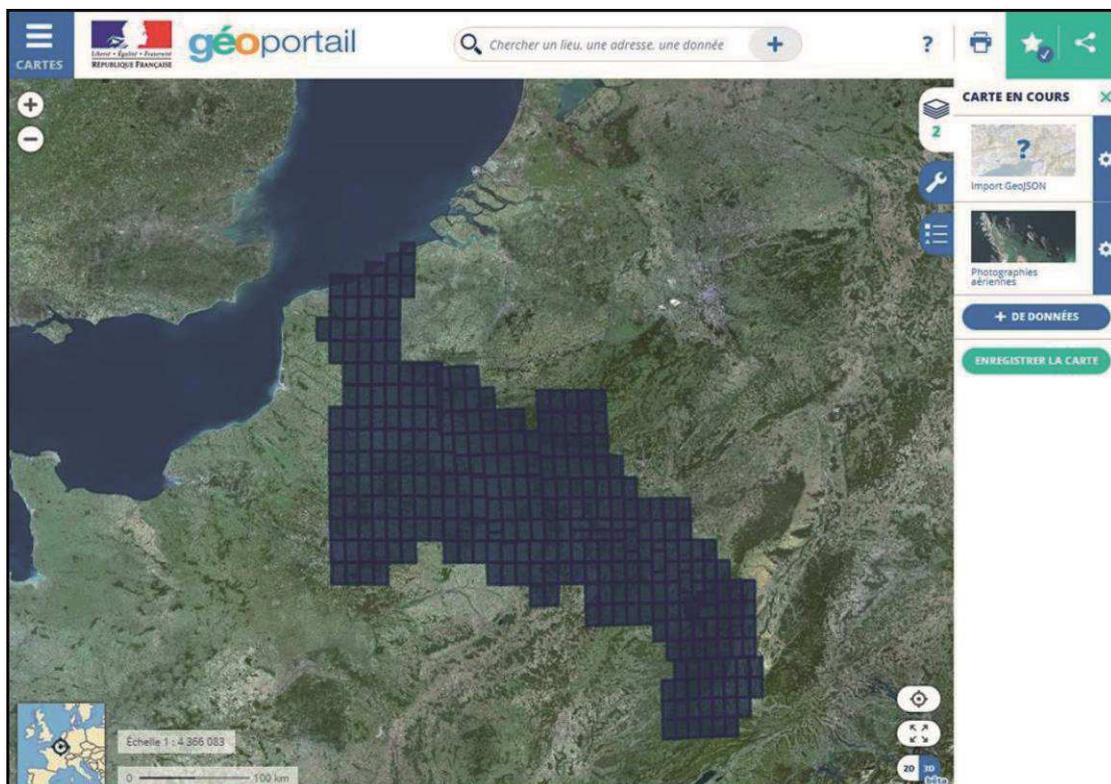


Fig.3.51: Tableau d'assemblage des plans directeurs du front ouest intégré au site internet Géoportail.

Conclusion du chapitre 3

Le front de la Grande Guerre est souvent représenté comme une entité linéaire à trop petite échelle et uniquement expliqué par les replis stratégiques et les batailles successives. L'approche spatiale, basée sur la digitalisation longue et fastidieuse des plans directeurs sous SIG (une année de travail), montre que l'organisation est profonde, complexe et obéit aux conditions géographiques locales du terrain, fondamentales dans la guerre de position.

Sa structuration en rideaux et en lignes de tranchées est le résultat de la combinaison de la couverture végétale, du relief et de la portée de l'Artillerie dont l'efficacité est fonction de la visibilité. En plaine dégagée (Pays rémois, Champagne crayeuse) propice à de grandes attaques d'Infanterie, la hiérarchisation du relief structure incontestablement les rideaux de défense de manière ternaire et cellulaire (points d'appuis sur les sommets). Leur amplitude spatiale relativement importante (5 km) répond aux portées d'Artillerie dont l'efficacité est vérifiée grâce à de bons sites d'observations situés sur la cuesta d'Île-de-France et sur les buttes témoins. Le front s'étire alors sur près de 40 km de large, avec des densités de tranchées et de boyaux très hétérogènes allant jusqu'à 127 km/km de front.

Dans les Monts de Champagne, la guerre des observatoires détermine des premières positions très denses pour défendre les buttes ou monts, sites d'observations privilégiés pour le réglage des tirs d'artillerie. En effet, les positions arrière restent aveugles sur le dispositif ennemi en l'absence d'informations provenant des postes avancés de première ligne.

En terrain humide (Champagne humide) et sous forêt dans le plateau d'Argonne, l'hydromorphie des sols et la couverture forestière lissent considérablement l'effet des reliefs et constituent une contrainte majeure à la progression des troupes. Cela se traduit par une densité plus faible des réseaux de défense, un rapprochement des rideaux propices à l'utilisation de l'Artillerie de tranchée à tirs courbes.

L'apport de l'analyse spatiale est prometteur car celle-ci permet enfin de quantifier par des indices morphométriques (linéaire, densité, épaisseur) cette zone de front encore méconnue. Elle permet également de contextualiser dans l'espace, les écrits, constituant ainsi un formidable outil pour les historiens de la Grande Guerre.

Cette approche spatiale de la Grande Guerre n'est légitime qu'en respectant la validité scalaire des résultats et nécessite l'inscription de toute zone d'étude dans l'organisation des réseaux de défense révélée sous SIG à partir des plans directeurs. À ce titre, tous les indicateurs morphométriques doivent être replacés dans leur contexte spatio-temporel. Cette base de données, opérationnelle, fait naître depuis sa création des collaborations étroites avec les archéologues pour replacer les secteurs de diagnostics et de fouilles archéologiques afin d'anticiper des recoupements avec des vestiges de la Grande Guerre ou les aider à affirmer ou infirmer certaines hypothèses.

Conclusion de la partie 1

Après la guerre de mouvement, le front de la Grande Guerre s'installe pendant 4 ans sur 750 km, des Flandres à l'Alsace. Après les trous individuels et les éléments de tranchée, un véritable labyrinthe de réseaux de défense se crée en Champagne-Ardenne, dans le Pays rémois, devant les faubourgs de la Ville des Sacres, les Monts de Champagne, le Vallage d'Aisne jusque l'Argonne sur 115 km. Ce réseau de tranchées et de boyaux continu s'organise en positions (de 3 à 5) composée chacune de 4 à 14 lignes de tranchées. Alors que ce réseau obéit à des logiques topographiques, géomorphologiques, hydrogéologiques et militaires en exploitant au mieux le terrain offert aux combattants, ces derniers perçoivent pleinement la géologie dans la vie quotidienne en s'enterrant dans le matériel parental.

Tant pour la logistique que pour le combat, chaque espace du front est structuré et hiérarchisé. Parallèlement au front, 3 zones (zones de l'avant, zone des étapes et zone de l'arrière) permettent de limiter la circulation civile et d'organiser la logistique pour l'approvisionnement du front. Perpendiculairement, un agencement opérationnel organise le front en cellules, de l'Armée (200 000 hommes) dans sa « zone d'action », jusqu'à la section (60 hommes) dans sa tranchée. Comme un tissu urbain fait de rues et d'avenues, le réseau de tranchées et de boyaux est matérialisé par des noms (43% de noms de lieux, 33% de patronymes) et une signalétique pour éviter de perdre des hommes dans ce véritable dédale.

Comme dans de nombreux domaines, la Grande Guerre marque aussi un tournant décisif dans l'histoire de la cartographie française. Cette guerre de position nécessite une adaptation de la cartographie militaire. La carte d'État-Major devient rapidement obsolète (échelle trop petite) et est remplacée par les plans directeurs, conçus et distribués par les Groupes de Canevas de Tir des Armées (GCTA). L'Artillerie a besoin de ces documents pour tirer vers des objectifs qu'elle ne voit pas (tirs d'après la carte) alors que l'Infanterie étudie le réseau ennemi avant chaque attaque. Le SGA pose les bases d'une nouvelle représentation spatiale et multiscalaire, fondatrice de la cartographie, reprise par l'IGN aujourd'hui pour l'édition de ces cartes. Ces plans constituent une formidable banque de données cartographiques, qu'il est nécessaire d'intégrer dans un SIG pour une analyse spatiale et statistique.

Alors que les chapitres 1 et 2 se basent sur des analyses conceptuelles à partir des manuels d'instruction et la lecture des plans directeurs, ces derniers, intégrés dans une géodatabase permettent une étude quantitative des réseaux de défense. Au minimum, 13 000 kilomètres de tranchées et de boyaux ont été creusés par les soldats en Champagne-Ardenne. Cette densité linéaire extrapolée sur les 750 km de front représente plus de 80 000 km soit 170 millions de m³ de terre remuée pour le creusement. Des indices morphométriques (densité, linéaire) permettent une analyse statistique et spatiale par Pays traversé en Champagne-Ardenne, du Pays rémois à l'Argonne. La région de Reims et les Monts de Champagne accueillent les plus fortes densités de tranchées et boyaux dans la craie, régions propices à de grandes et massives attaques de l'Infanterie. En Champagne humide dans la vallée de l'Aisne, l'hydromorphie des sols ne permet pas de vastes travaux de fortification et reste un secteur très calme sur le front champardennais. En Argonne forestière, une forte dichotomie est retrouvée entre les réseaux de défense des deux armées. L'armée allemande consolide sa première position avec 14 lignes de tranchées alors que l'armée française, de manière plus conventionnelle, en établit 4.

Dans le cadre du Centenaire du premier conflit mondial, du développement de l'archéologie de la Grande Guerre et de la mise en ligne des JMO, les plans directeurs et leurs extraits sont abondamment consultés. Pourtant, ils souffrent d'une dispersion de leur hébergement et

restent mal connus des géographes. Des partenariats avec l'INRAP et l'IGN pour la diffusion des plans directeurs (IGN) ont été signés pendant les trois années du programme de recherche.

L'objectif de cette partie était de déterminer l'organisation spatiale des réseaux de défense de la Grande Guerre et plus particulièrement celle de 1918 qui constitue l'état achevé des structures de défense dans la zone de front. Il s'agit, maintenant dans la partie suivante, de mesurer leurs traces ou vestiges morphologiques qui participent au « polémo-paysages » de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.

Partie 2 : Polémo-morphologies de la Grande Guerre



Cratère de mine, Argonne



Cratère de mine, Argonne

Chapitre 4 : Impacts morphologiques

de surface sous forêt

Introduction du chapitre 4

La Grande Guerre a fortement marqué la conscience collective par les corps des soldats mutilés mais également par les paysages de la zone de front. Ces morphologies ou « polémo-formes » restent peu étudiées et appréhendées généralement sous couvert forestier, sans analyse spatiale (Burridant, 2003 ; Amat, 2015). Cette dernière est récemment utilisée par l’outil Lidar aéroporté (Hesse, 2014 ; Gheyle *et al.*, 2018), en premières lignes de défense dans le secteur de Verdun (De Matos Machado *et al.*, 2016), sur les sites de guerre des mines à Berry-au-Bac (Taborelli *et al.*, 2017a), par l’approche archéologique dans le no man’s land (Brenot *et al.*, 2017) et dans le cadre de prospections géophysiques (De Smedt *et al.*, 2013).

L’objectif de ce chapitre est de proposer des clés de lecture des « polémo-formes » observées en image Lidar (typologie, empreinte morphologique), de les hiérarchiser selon plusieurs critères et de comprendre leur organisation spatiale au sein des réseaux de défense, du no man’s land aux positions arrière (Taborelli *et al.*, 2017b). Les formes de la Grande Guerre subsistent sous forêt mais sont intégralement nivelées en zone cultivée. C’est pourquoi, à partir de 5 missions aériennes en Argonne et dans la région de Reims, intégralement sous forêt, le Lidar permet de réaliser une typologie des « polémo-formes ». Cette dernière, traitée dans le présent chapitre, est le préalable d’une proposition de traitement automatique et de détermination du degré de conservation de ces morphologies (Chapitre 5).

Pour appréhender ces traces, vestiges, morphologies associés à la Grande Guerre en 2016, l’imagerie LiDAR (Light Detection And Ranging) est bien adaptée et préférée à la photographie aérienne (Stichelbaut, 2011). Elle est utilisée pour la première fois en 2003 en Forêt de Bade en Allemagne (Sittler & Hauger, 2007) et en France près de Nancy en forêt domaniale de Haye (Georges-Leroy *et al.*, 2011). Cette technique est largement utilisée en archéologie (Devereux *et al.*, 2008 ; Hesse, 2010) mais également dans de nombreux autres domaines scientifiques. Sur le thème de la Grande Guerre, elle permet de mettre en évidence des structures archéologiques sous couvert forestier, révélées par une approche aéroportée, (avions, hélicoptères, drones), constamment géoréférencés par GPS (Fig. 4.1). Les sites choisis sont forestiers, et si possible accessibles d’accès pour une investigation de terrain. Les camps militaires de Suippes (13 500 ha), Moronvilliers (2 660 ha) et Mourmelon (920 ha) sont de véritables conservatoires de « polémo-formes » mais les tirs actuels et journaliers sur ces camps fausseraient la détection des formes « Grande Guerre » mélangées aux formes « contemporaines ». De plus, la vérification sur le terrain en serait difficile. Actuellement, les zones cultivées n’ont aucun intérêt à être survolées en Lidar (Hesse, 2014 ; Taborelli *et al.*, 2017b). Aucune micro-forme ne subsiste, intégralement nivelée par les machines agricoles.

Seule l'analyse de photographies aériennes à très basse altitude permet de mettre en évidence un différentiel de pousse végétale, étudié ultérieurement dans le chapitre 7.

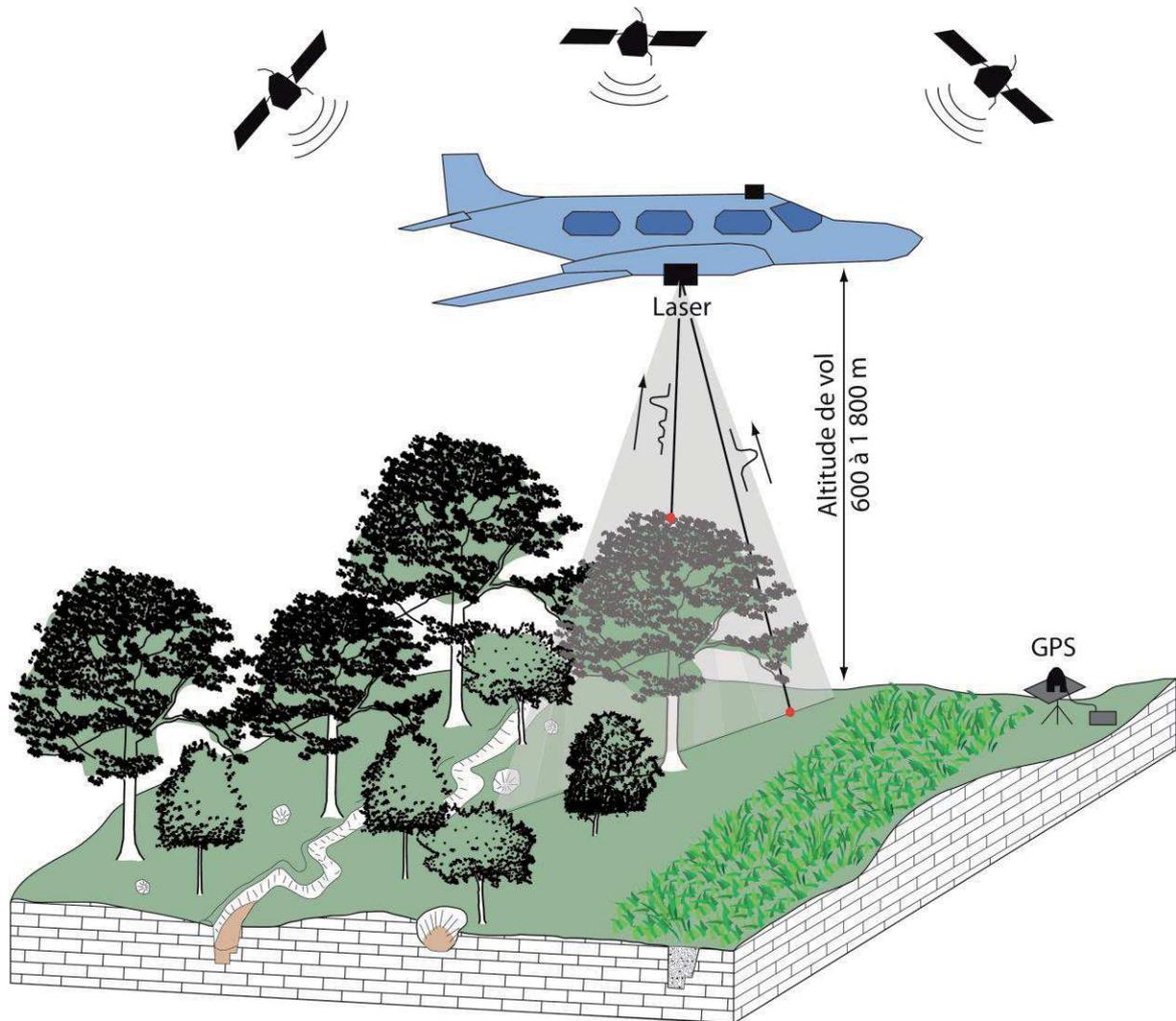


Fig.4.1: Schéma de fonctionnement de l'outil Lidar.

Cette technologie non intrusive est utilisée en Argonne entre 2012 et 2015 et dans le cadre du programme de recherche Impact 14-18 durant l'hiver 2015-2016 dans le secteur de Reims.

En Argonne, les missions aériennes sont commandées par la DRAC Champagne-Ardenne, dirigée par Yves Desfossés et par Éveha (bureau privé d'étude archéologique), représenté par Jérôme Brenot. Elles couvrent un fuseau Nord/Sud de 60 km² de surface qui traverse l'intégralité des réseaux de défense et permet la mise en évidence de l'ensemble des structures, du no man's land jusqu'à l'arrière des positions. Notre collaboration avec ces deux organismes a permis de récupérer ces données et de les traiter.

Le survol près de Reims est quant à lui multisectoriel sur une surface cumulée de 40 km². Les zones ateliers dans le secteur de Reims couvrent la première position allemande, sur les buttes témoins de Brimont et de Nogent-l'Abbesse, sur une avant-butte entre l'Aisne et la Loire (Cote 108 au sud de Berry-au-Bac, véritable conservatoire de la guerre des mines) et enfin la quatrième position française sur la côte d'Île-de-France dans le massif forestier de Saint-Thierry (Fig. 4.2). Le croisement des dalles Lidar avec les plans directeurs permet non

seulement d'inscrire les morphologies de la Grande Guerre dans l'organisation spatiale des réseaux de défense mais également de déterminer leur degré de conservation (chapitre 5).

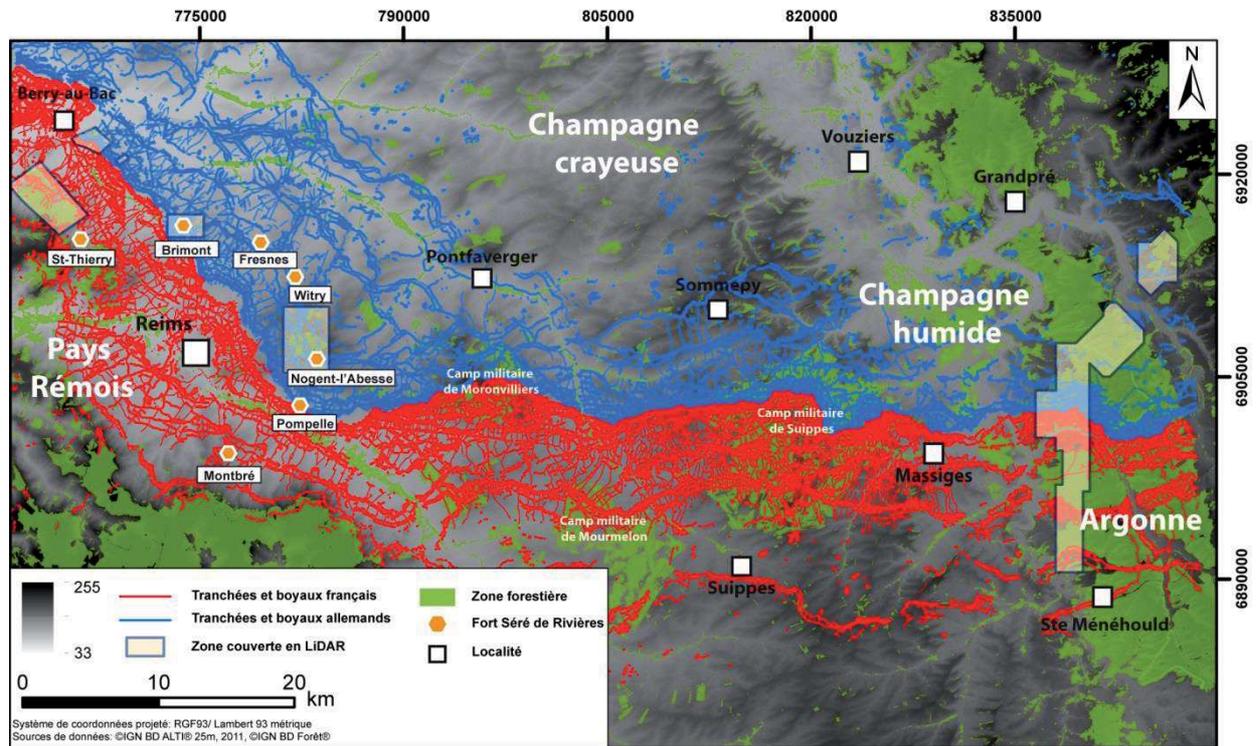


Fig.4.2: Réseaux de défense en Champagne-Ardenne et emprise des prospections Lidar.

Un laser émet des impulsions à une fréquence de 125 à 400 kHz vers le sol et l'analyse du temps de retour des ondes permet de mesurer l'altitude de chaque retour. Les vols sont réalisés en hiver (sans couverture neigeuse), avec un minimum de végétation pour améliorer l'efficacité de la détection. Après un travail de filtrage des données et la classification des objets détectés (sol, végétation, bâti, eau et autres), les prestataires (Guelle et Fuchs, Aerodata) fournissent un MNT (modèle numérique de terrain) et un MNS (modèle numérique de surface) à haute résolution (12 points/m² en moyenne selon les dalles). Ces banques de données sont traitées sous GlobalMapper Module V17. Seul le MNT à haute résolution est utilisé dans ce programme de recherche, mais des partenariats sont envisagés notamment avec l'Office National des Forêts (ONF) pour traiter le MNS.

	Argonne	Zone de Reims
Date	2012-2015	Décembre 2015
Entreprise	Guelles et Fuchs	Aerodata
Outil	Pilatus PC6 D FGPG	LMS 680i
Altitude	900 m	650 m
Vitesse de vol	120 nœuds	130 nœuds
Fréquence	125 kHz	400 kHz
Angle	14,1°	-
Recouvrement	55 %	65 %
Nbre de point/m ²	11,3	12
Densité au sol	8	4,8
Résolution latérale et d'altitude	30 cm et 6,5 cm	30 cm et 3 cm

Tab. 4.1 : Paramètres des vols Lidar en Argonne et dans le secteur de Reims.

L'examen visuel des différentes dalles réalisées montre d'une part l'absence de formes en zone cultivée et la persistance de morphologies sous forêt. Dans l'objectif de déterminer des taux de conservation des structures de défense, il convient dans un premier temps de dégager une typologie des formes probables pour ensuite appliquer une méthode de détection automatique et de caractérisation morphométrique. Ces dernières permettent ainsi de réaliser un inventaire exhaustif des formes qui, comparées aux réseaux de défense appréhendés sous SIG à partir des plans directeurs, nous permettra enfin de connaître leur degré de conservation.

4.1. Typologie des « polémo-formes » en Lidar

La typologie des « polémo-formes » ou traces morphologiques de la Grande Guerre (Fig. 4.3) peut être basée sur une analyse multi-critères selon les paramètres typologiques suivants :

- La taille ou l'échelle scalaire : de la « macro-forme » hectométrique, « méso-forme » décamétrique et « micro-forme » métrique
- La forme : ponctuelle (abris, sites), linéaire (tranchées, boyaux), de surface (exo-forme) ou souterraine (endo-forme)
- L'agent morphogène : guerre des mines, Artillerie, réseaux de défense, vie militaire, transport...
- L'usage ou la fonction : poste d'observation, abris-dépôts pour le personnel, munitions...
- L'âge : « anté » (structures archéologiques et fortifications Séré de Rivières), « syn » (contemporaines à la guerre) ou « post-conflit » (désobusage, déminage, exhumation des corps)
- L'organisation spatiale (densité, structure)
- La Situation et le site (inscription dans les réseaux de défense et dans le relief)

- L'armée (alliée, allemande)

Dans ce chapitre, la typologie proposée, sans être exhaustive, s'organise selon la taille des formes tout en caractérisant les autres critères présentés ci-dessus.

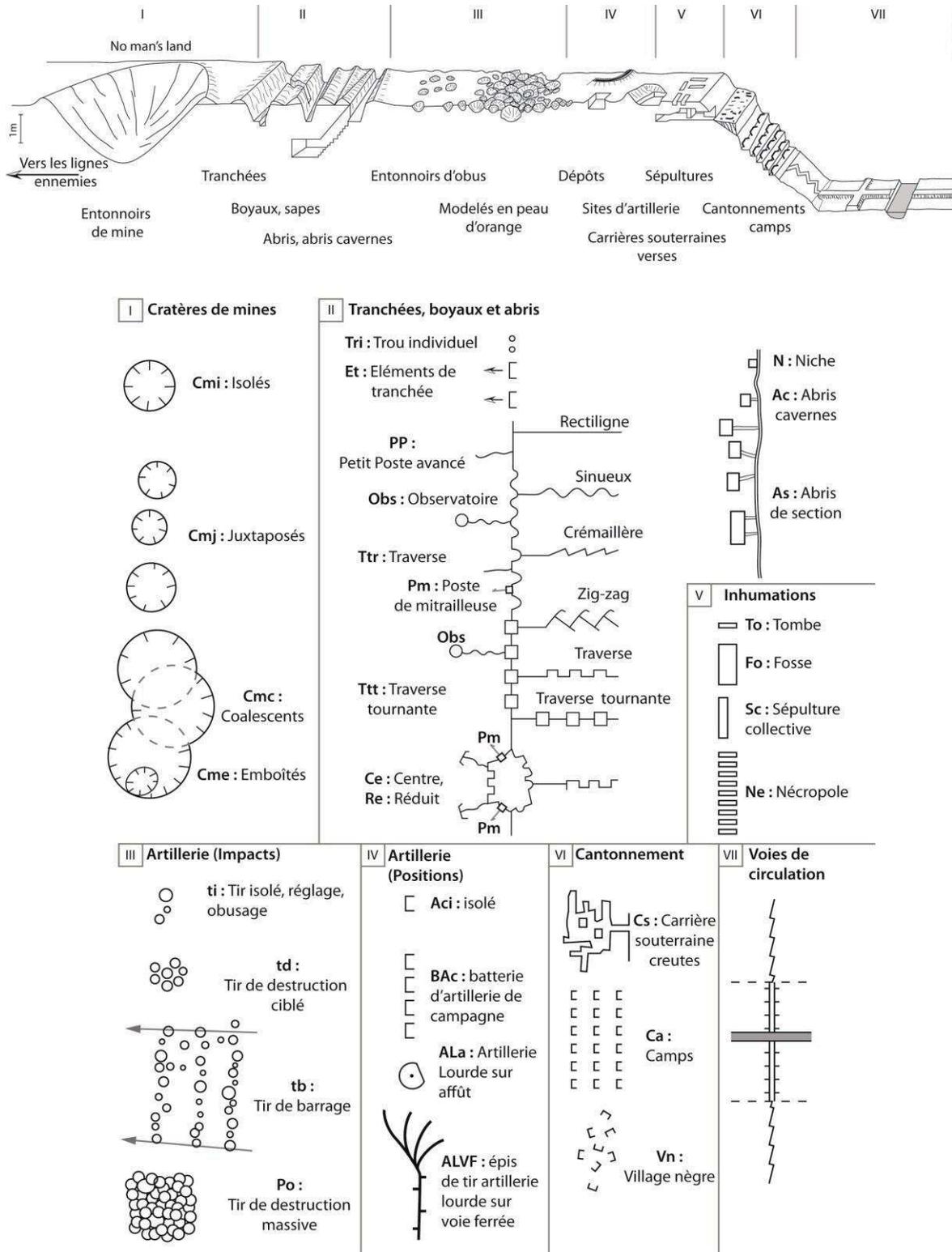


Fig.4.3: Typologie des « polémo-formes » de la Grande Guerre.

4.1.1. Fortifications Séré de Rivières

Les morphologies les plus importantes ou « méga-formes » sont des « polémo-formes » héritées du système de fortification « Séré de Rivières ». Il est constitué de rideaux et de ceintures de forts détachés, construits et modernisés entre 1874 à 1914 (Le Hallé, 2004). Ces forts s'arcbutent sur les cuestas de l'Est du Bassin de Paris (forts de rideaux et d'arrêt) et ceinturent des places fortifiées ou des villes (forts de ceintures) comme Verdun, Toul ou Reims.

La marche forestière argonnaise n'est pas fortifiée par ce type de forts, à l'inverse de la ville de Reims, entourée par une ceinture de 7 forts. La campagne rémoise de vol Lidar a permis de survoler le fort de Nogent l'Abbesse (Fig. 4.4A) avec sa batterie dite de « Berru » (Fig. 4.4B) et sa vigie (Fig. 4.4C). Plus au Nord, ce sont les forts de Witry-lès-Reims (Fig. 4.4D), de Brimont (Fig. 4.4E) et ses batteries (de Loivre à l'Ouest et du Cran de Brimont à l'Est) (Fig. 4.4F) qui seront détectés sous couvert forestier.

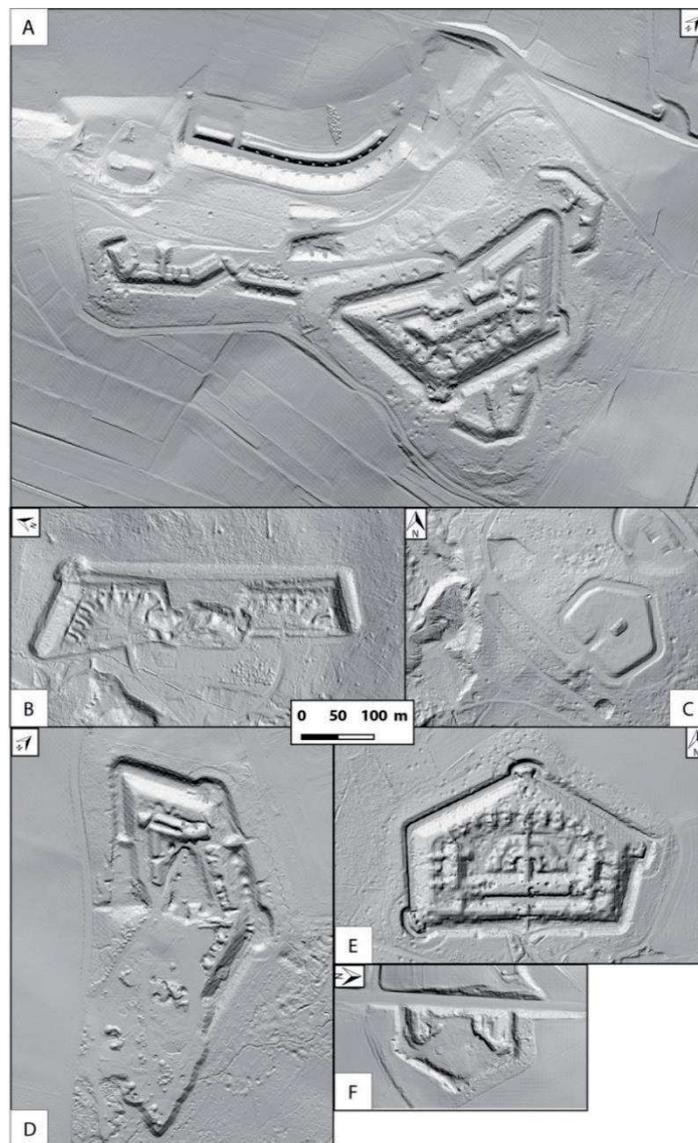


Fig.4. 4: A – Image Lidar du fort de Nogent l'Abbesse. B – Image Lidar de la batterie de Berru. C – Image Lidar de la vigie de Berru. D – Image Lidar du fort de Witry. E – Image Lidar du fort de Brimont. F – Image Lidar du cran de Brimont.

Ces forts sont largement utilisés dans la guerre de position car ils constituent des centres de résistance, des réduits, voire de véritables verrous. Ils sont riches en observatoires comme à Verdun (forts de Douaumont, de Vaux, de Tavannes) ou à Reims (forts de la Pompelle, de Brimont, de Nogent). Les images Lidar et les plans directeurs soulignent clairement une organisation cellulaire des tranchées et boyaux autour des forts qui s'inscrivent dans les réseaux de défense à structure ternaire mais essentiellement linéaire (Devos *et al.*, 2015b) (Fig. 3.27D). Ces centres de résistance présente un réseau de tranchées périphériques, sous forêt, sur le flanc des buttes bénéficiant ainsi d'une bonne potentialité de crêtes militaires et d'un effet de lisière dominant le no man's land alors que le fort trop exposé est généralement peu fortifié en surface. L'image Lidar permet d'observer les structures remarquablement conservées de ces forts polygonaux à « cavalier » ou à « massif central » protégés par un fossé maçonné (escarpe et contre-escarpe) et défendu par des caponnières entourant le casernement non protégé tout comme les pièces d'artillerie (Fig. 4.5).

Cependant, ils sont exposés à l'ennemi au sein de glacis militaires dégageant une vue lointaine (déforestation, réseaux de défense accessoires). Ils sont mal orientés par rapport à la ligne de front car inscrits dans le réseau de défense allemand. Ainsi, leur front de tête qui normalement fait face à l'attaque regarde vers les lignes arrière allemandes alors que le front de gorge, défendant l'entrée est tourné vers le dispositif de défense français. En conséquence, on aperçoit nettement de nombreux aménagements pour pallier à cette mauvaise orientation. Des boyaux d'accès sont creusés à travers le fossé, l'escarpe et la contre escarpe dans le front de tête, pour intégrer le fort au réseau de défense (Fig. 4.5 et 4.7). Ils feront l'objet de tirs de destruction dont l'efficacité est vérifiée sur les images Lidar. De nombreux impacts d'artillerie sont observés sur les ouvrages de gorge (effondrements de voûtes, entonnoirs de soutirage, Fig. 4.5). Toutes les structures de surface abritant les canons et leurs traverses abris sont fortement impactées ainsi que les caponnières, et plus particulièrement l'entrée, le casernement et les magasins à munitions exposés à l'ennemi. Pour la plupart des forts, les entrées sont généralement davantage détruites par l'armée française, lors du déclassement ou de l'évacuation de l'ouvrage et pendant la guerre par l'Artillerie. Enfin, un examen détaillé des fossés témoigne de remblaiements ponctuels, notamment au niveau des caponnières et de la Batterie sud du Fort de Nogent-l'Abbesse, provenant de travaux de creusement d'ouvrages souterrains allemands et d'une volonté de les camoufler (Coutant *et al.*, 2017). Le fort de la Pompelle, non couvert par le Lidar, a également fait l'objet de creusement de galeries souterraines permettant d'intégrer le fort au réseau de défense, comme déjà signalé dans le chapitre 3.

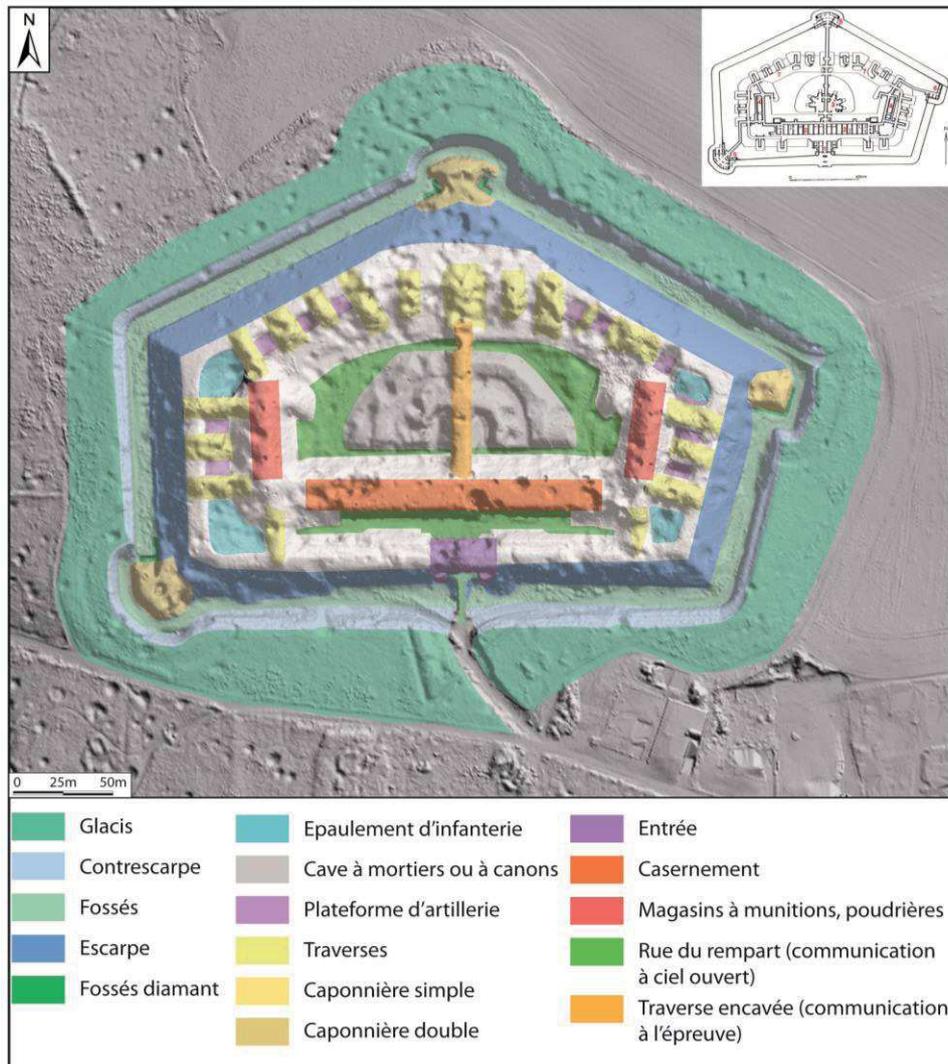


Fig.4. 5: Interprétation de l'image Lidar du fort de Brimont.

L'abandon de ces forts au sortir de la guerre a conduit à une lente colonisation forestière (masque végétal sur les structures maçonnées, friches) et à de faibles retouches morphologiques (mouvements de masse sur l'escarpe et contre-escarpe, effondrements de voûtes), sans grande pression agricole. Les ouvrages sont ainsi figés dans leur format originel (Durup de Baleine, 1998) ce qui explique la forte lisibilité morphologique sur les images Lidar. La Grande Guerre a certes atténué, par remblaiement, les fossés et a moutonné la surface par les impacts d'artillerie sans toutefois oblitérer les formes, conservant la structure polygonale de l'ouvrage et les principales morphologies. Ainsi, un siècle après le conflit, le « polémo-paysage » de la Grande Guerre est structuré par l'enveloppe fortifiée du système « Séré de Rivières ». Alors que le fort de la Pompelle accueille un musée et le fort de Nogent est entretenu par une association, à l'inverse, le fort de Witry, en terrain privé, est constamment remblayé sur sa partie sud perturbant même la structure pentagonale de l'ouvrage. Son front de tête est traversé par une piste et des rampes remblayant le fossé au sein d'un parc de loisir (Karting, Paint Ball). Aucune volonté de sauvegarde n'est entreprise pour cette structure militaire construite à la fin du XIX^{ème} siècle (Fig. 4.6). À ce titre, il est difficile d'interpréter les formes liées à la Grande Guerre, hormis les réseaux de défense dans le bois à l'Ouest.

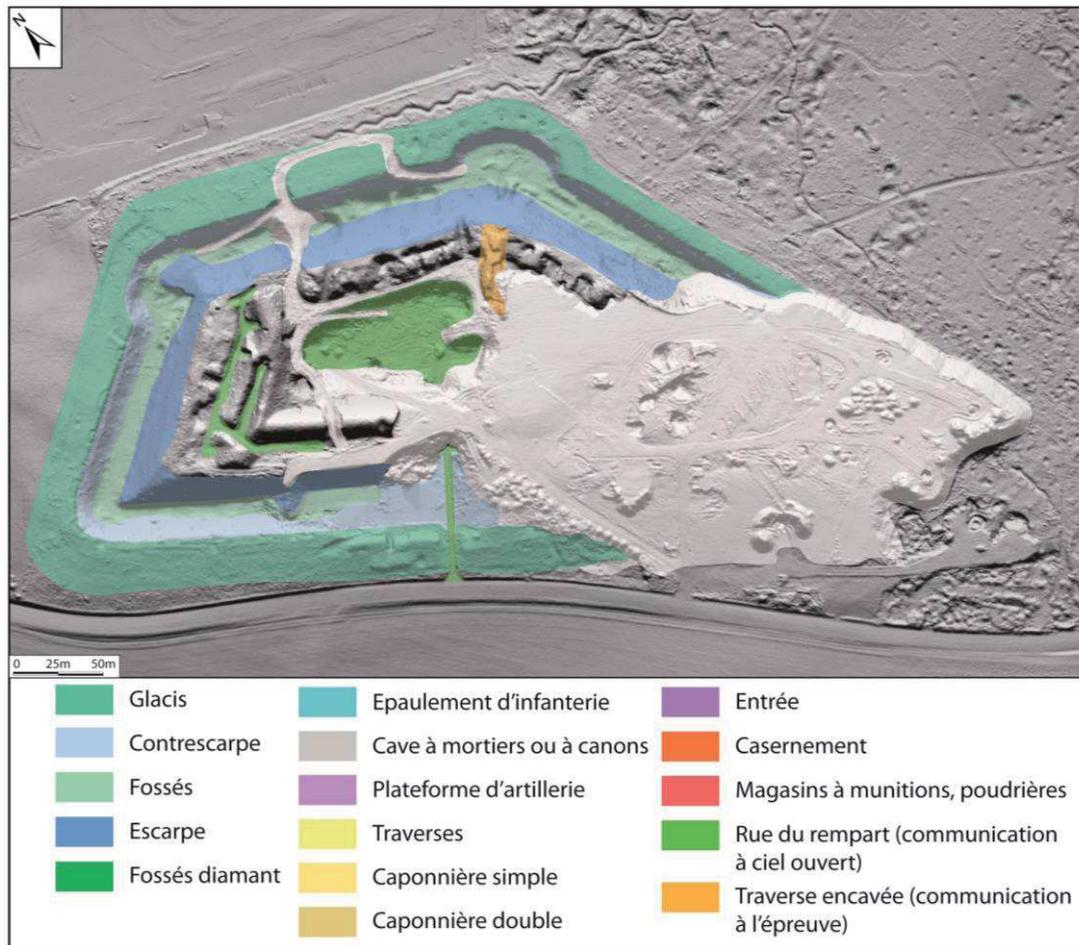


Fig.4.6: Interprétation de l'image Lidar du fort de Witry.

Abandonné par les militaires en 2004 puis acheté en 2012 par la coopérative vinicole de Nogent-l'Abbesse et de Cernay-lès-Reims, le fort de Nogent-l'Abbesse fait l'objet de restauration et d'entretien par une association. La construction du fort et de ses annexes commence en 1876 et se termine en 1889 avec un coût total des travaux qui approche les 2,3 millions de francs (Coutant et *al.*, 2017). Sa construction nécessite un approvisionnement de pierres calcaires provenant de Meuse (Euville, Lérouville et Savonnière-en-Perthois), du nord des Ardennes (Givet) ou de provenance voisine (Montagne de Reims, vallée de l'Ardre). À la fin du XIX^{ème} siècle, l'acheminement est réalisé par les chemins de fer ou par voie fluviale (Canal de l'Aisne à la Marne). Le fort se compose d'un fort central, ainsi que d'une lunette gauche (Nord), une lunette de tête, faisant face à l'Est et une batterie Sud, détachée. Ce fort, occupé par l'armée allemande dès septembre 1914, fera l'objet de tirs d'artillerie incessants par l'armée française (Fig. 4.7). Des tirs préparatoires à l'offensive du 17 avril sur le Mont Cornillet vont impacter le fort central et sa façade. Ces tirs proviennent d'artillerie lourde sur voie ferrée, basée à Rilly-la Montagne sur la Montagne de Reims ainsi que des canonnières du Canal de l'Aisne à la Marne (Fig. 3.32). Les dégâts sont encore visibles aujourd'hui sur l'image Lidar avec des trous d'obus avoisinant les 15 m de diamètre. Pendant l'entre-deux-guerres, l'armée française construit un dépôt semi-enterré de 27 cellules pour le stockage de munitions. L'armée allemande occupera le site jusqu'en 1944 et détruit 12 cellules, avant sa retraite. Un gigantesque cratère béant est encore visible aujourd'hui mais se comble petit à petit (Coutant et *al.*, 2017). On aperçoit nettement les entrées des 15 cellules de stockage de

munitions, ainsi que leur route d'accès, récemment restaurée par l'association pour y stocker les bouteilles de Champagne de la coopérative viticole (Fig. 4.7).

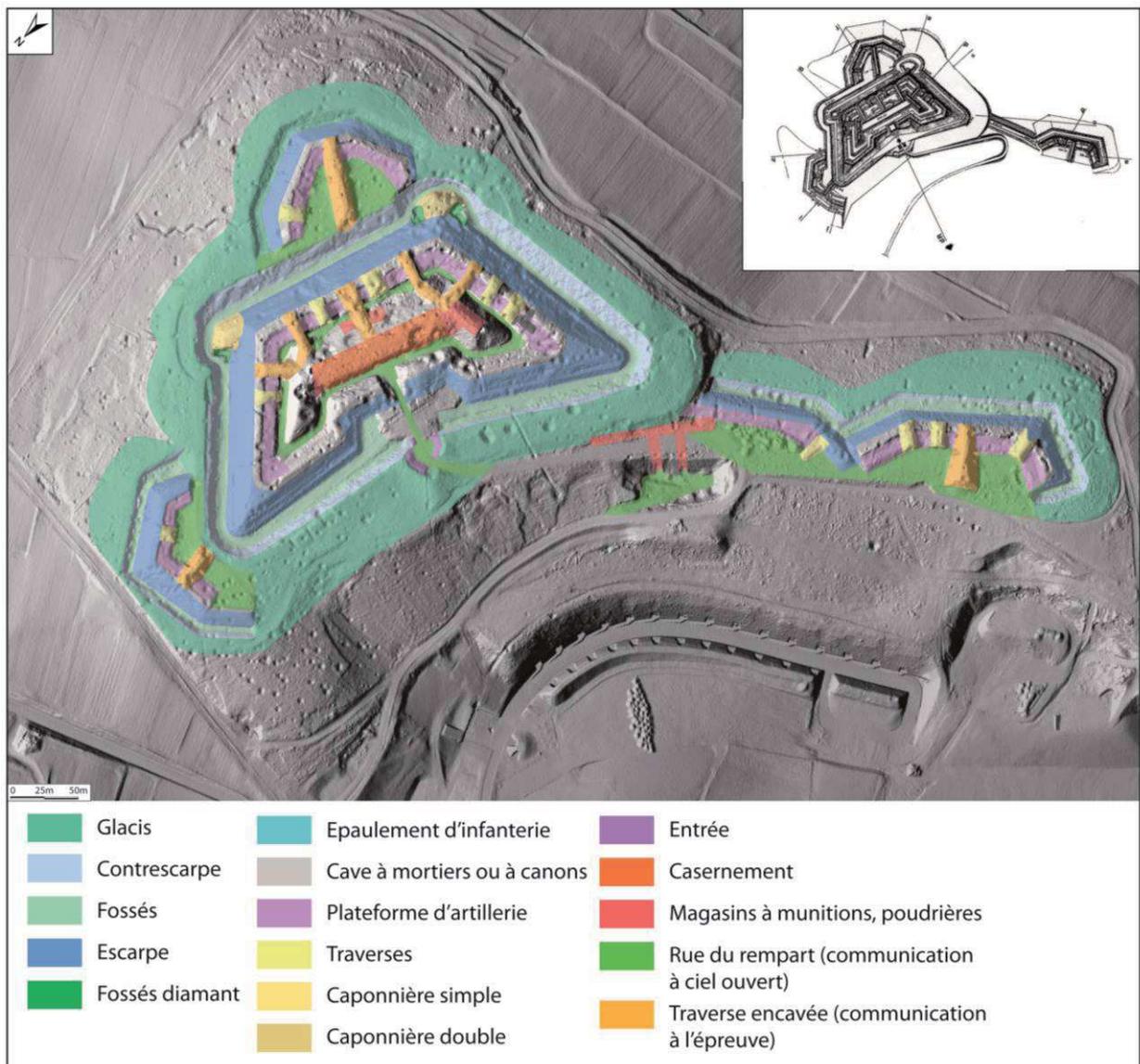


Fig.4.7: Interprétation de l'image Lidar du fort de Nogent-l'Abbesse

Les forts Séré de Rivières intégrés au réseau de défense conservent remarquablement leur structure polygonale mais, mal orientés, trop exposés (glacis de déforestation) et désarmés, ils font l'objet de travaux d'intégration au réseau de défense (boyaux et tunnels d'accès) et sont victimes des tirs de destruction ciblés (en l'absence de grande offensive) mais pas généralisés comme à Verdun (Forts de Douaumont, de Vaux). L'interprétation de ces « polémo-formes » est d'autant plus difficile que ces forts portent la marque de réhabilitations contrastées après-guerre.

4.1.2. Les cratères de mines

Inscrite dans le principe de grignotage du front (Buffetaux, 2011a), la guerre des mines est une technique souterraine à la fois offensive (synchrone à un début d'attaque) mais aussi défensive (coupure des communications de l'ennemi) qui ne produit qu'un faible effet tactique. Utilisée depuis l'Antiquité dans le cadre de la guerre de siège (Triolet et Triolet, 2011), elle consiste à ouvrir une brèche dans la première position de l'ennemi par l'explosion de grandes quantités d'explosifs disposés sous terre (creusement de galeries ou rameaux de combat assimilés à des endo-formes non révélées par le Lidar). L'explosion peut, soit produire un cratère ou entonnoir de grande taille (fourneau ordinaire et surchargé) destiné à être fortifié dans les lignes ennemies, soit détruire une mine adverse en cours de creusement (camouflet ou fourneau sous-chargé) ne générant pas de cratère. L'image Lidar couvre ici le site de la Cote 108 à Berry-au-Bac en Champagne crayeuse (Fig. 4.8). Les cratères subsistent nettement et constituent des méga-formes qui marquent fortement le « polémo-paysage » (profondeurs comprises entre 10 et 22 m, diamètres compris entre 10 m et 89 m). Inscrits dans le no man's land ou dans les premières lignes, en position de crête topographique, les cratères présentent quatre types d'organisation spatiale. Ils sont soit isolés (Cmi), soit alignés ou juxtaposés (Cmj) soit emboîtés (Cme) ou coalescents (Cmc) avec une densité très variable. Pour ces derniers, leur lisibilité est plus difficile.

À ce titre, la guerre des mines peut être considérée comme l'agent le plus morphogène de la Grande Guerre et a cristallisé la mémoire collective dans les Flandres (Messines), dans la Somme (Lochnagar Crater), en Meuse (aux Éparges), en Champagne (Perthes-les-Hurlus, Berry-au-Bac), en Argonne (Vauquois, Fille Morte, La Harazée) ou dans les Vosges gréseuses (Col de la Chapelotte). Ces impacts de surface, liés aux souterrains et à la guerre souterraine, sont largement développés dans le chapitre 6.

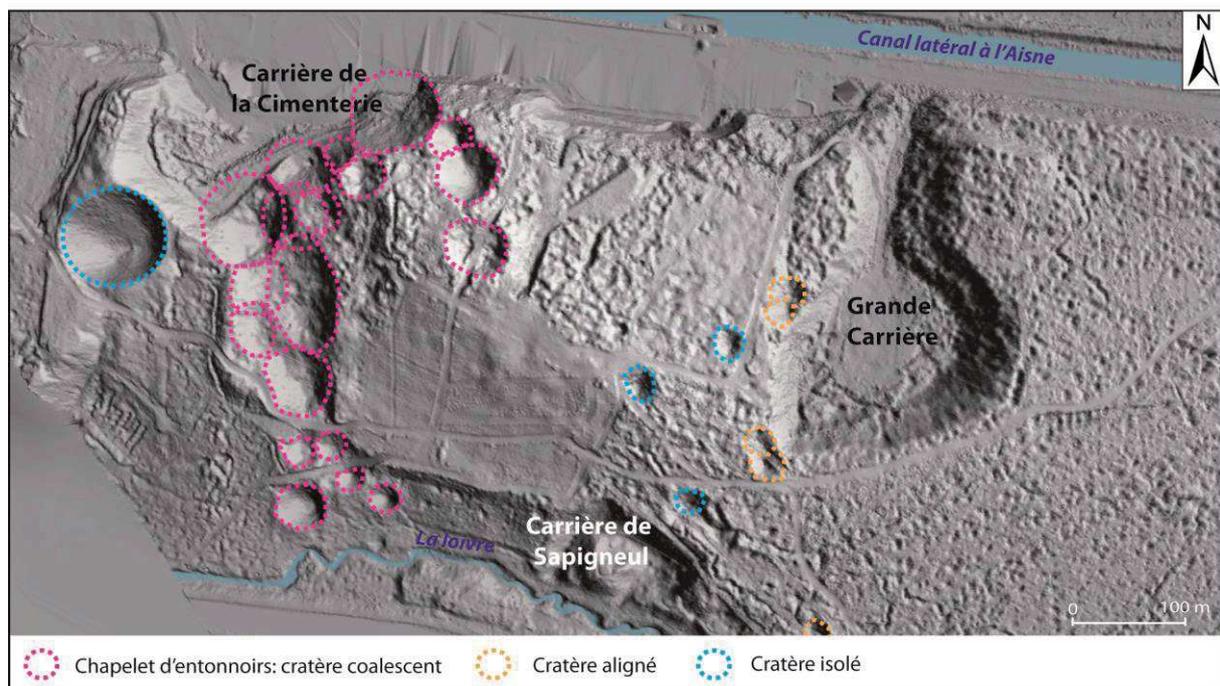


Fig.4.8: Image Lidar des cratères de mines coalescents, alignés et isolés de la Cote 108 à Berry-au-Bac.

4.1.3. Les réseaux de défense

Les images Lidar révèlent remarquablement bien le tracé des réseaux de défense sous forêt, que ce soit dans les calcaires du Lutétien (Massif de Saint-Thierry), dans les sables grésifiés du Tanéthien (Buttes de Brimont et de Berru), dans la craie (Cote 108) et dans la gaize (Argonne). Le tracé des tranchées sinueuses à traverses (Ttr), à traverses en U ou tournantes (Tt), pour éviter des tirs en enfilade et la dissipation du souffle de l'obus est facilement repérable en Lidar comme une dentelle tissée dans la forêt (Fig. 4.9). Le tracé des boyaux de communication à traverses, à crémaillères, en zig-zag, à tracé sinueux régulier ou irrégulier est légèrement plus rectiligne afin de faciliter la circulation (Fig. 4.9). Ce tracé est souligné par un fossé bordé de bourrelets latéraux caractérisant le parapet et le parados. Néanmoins, sur les plans directeurs, ce tracé est généralement stylisé comparativement à celui révélé par le Lidar. Cette remarque légitime le choix de digitaliser les réseaux de défense par un tracé stylisé. Pour davantage de précision sur les types de tracé de tranchées, une approche scalaire plus détaillée à l'échelle de la parcelle et associée à la télédétection (photographie aérienne d'époque) s'impose (Stichelbaut, 2011).

Ces formes linéaires s'accompagnent de formes plus petites, reliées au réseau de tranchées pour la vie quotidienne des soldats (latrines et feuillets, niches individuelles (N), abris cavernes (Ac) ou de section (As)), de surveillance de l'ennemi (petit poste avancé (PP), poste d'écoute, d'observation (Obs), poste de mitrailleuse (Pm)), de commandement (Pc), et s'organisent selon la distance au front. Ces micro-formes, accrochées au réseau de défense, nécessitent une approche de terrain ou un croisement avec les plans directeurs pour déterminer avec précision leur utilisation.

	Plan directeur	Schéma de principe	LIDAR
Tranchée à traverses			
Tranchée à traverses en U			
Tranchée à traverses tournantes			

	Plan directeur	Schéma de principe	LIDAR
Boyau à traverse			
Boyau en crémaillère			
Boyau en zigzag			
Boyau à tracé sinueux régulier			
Boyau à tracé sinueux irrégulier			

Fig.4. 9: Typologie des réseaux de défense (tranchées et boyaux).

4.1.4. Positions d'artillerie

Si les installations rapides et temporaires de l'Artillerie de campagne dans la guerre de mouvement a moins généré de formes, dans le cadre de la guerre de position, celle-ci s'inscrit dans les réseaux de défense en premières lignes du front pour l'Artillerie dite de tranchées (mortiers, crapouillots, et *Minenwerfer*). Dans ces cas, les plateformes de tir sont intégrées aux tranchées dans des abris, voire des casemates, rendant leur lisibilité morphologique plus tenue, très difficile d'interprétation sans une investigation de terrain (De Matos Machado *et al.*, 2016).

Ce n'est qu'avec une résolution fine du Lidar que les installations des batteries d'artillerie sont révélées. Les canons à tirs tendus s'expriment surtout entre les 3^{ème} et 4^{ème} positions dites « d'artillerie ». Leur site porte une signature morphologique caractéristique avec une plateforme de tir avec une rampe, un bourrelet de terre pare-éclat ou épaulement accompagné d'abris pour les servants de la pièce et pour les munitions (Aci) (Fig. 4.10). Les batteries d'artillerie de deux ou cinq canons (Ac) sont bien marquées dans le paysage par l'alignement des pièces et les éléments de tranchées qui les rejoignent, observées dans le Massif de Saint-Thierry (Fig. 4.10). Les talus ou fronts de taille de carrières aériennes peuvent être utilisés pour le creusement des abris des servants des batteries. Aux abords de ces batteries d'artillerie, il est parfois retrouvé des abris à munitions, alignés, profonds de 0,5 à 1 m et long d'une dizaine de mètres. Plus en arrière, l'Artillerie Lourde sur Voie Ferrée (ALVF) à longue portée prend le relais et seuls les épis de tirs sont visibles sur les images Lidar (remblais de la voie ferrée) ainsi que les canons sur affûts fixes (ALa) dont la forme d'amphithéâtre terminal en tête de voie ferrée, permettant l'approvisionnement de la pièce lourde, est visible, comme dans le Bois de Muzeray près de Verdun (Ehret, 2012).

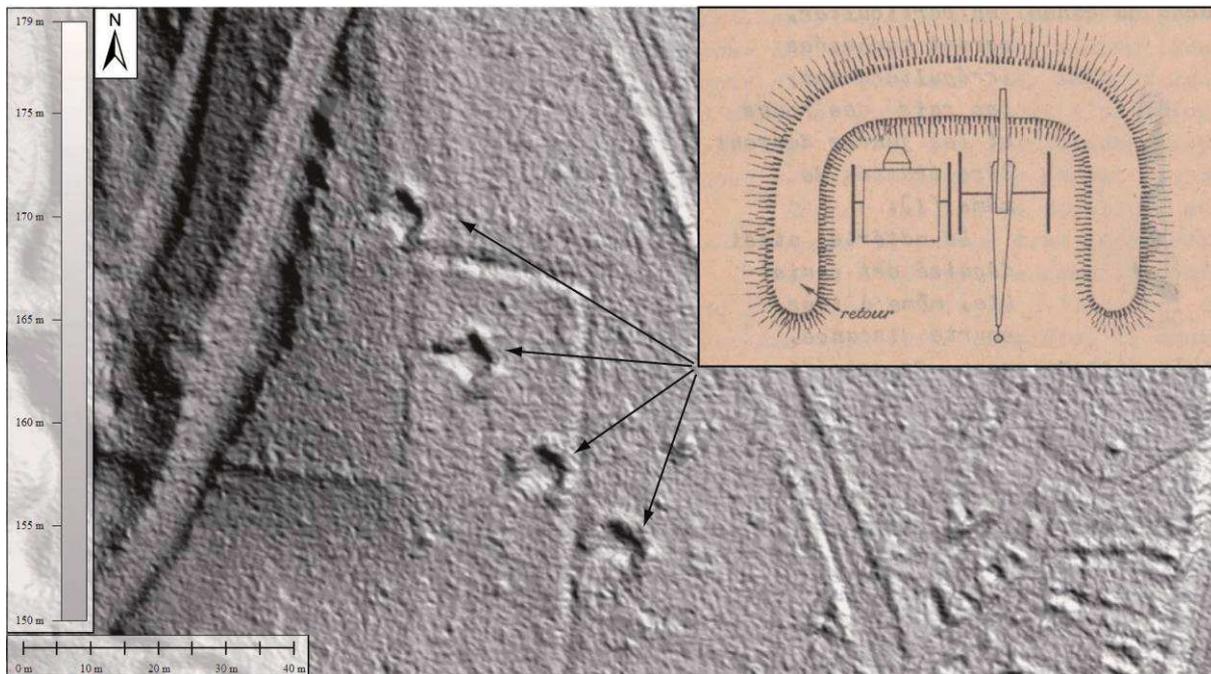


Fig.4. 10: Emplacement d'une batterie d'artillerie de 4 canons dans le Massif de Saint-Thierry (Source : Ministère de la Guerre, 1915).

4.1.5. Trous d'obus

La Grande Guerre a été marquée par le rôle de l'Artillerie qui a déversé sur le front 856 millions (Linnenkohl, 1996), à 1,4 milliard d'obus conventionnels (Prentiss, 1937) ainsi que 66 millions d'obus chimiques (Pommier, 2014). C'est donc une moyenne de 600 000 obus tirés par jour, 27 000 par heure, 400 par minute durant ces 4 ans de conflit sur l'ensemble du front Ouest. Ces inventaires ne prennent pas en compte les bombes de mortier, de *minenwerfer* et lance bombes utilisés dans les premiers rideaux défensifs. L'impact morphologique des obus a lourdement marqué les paysages du front et l'inconscient collectif. Le front est représenté comme un paysage lunaire, buriné par des entonnoirs, trous d'obus coalescents. L'effet morphologique des obus dépend de multiples paramètres.

L'obus se compose de trois parties (Fig. 4.11) :

- Une douille contenant un explosif, mis à feu par une amorce. La charge de cette douille permet d'expulser et d'envoyer la seconde partie de l'obus (charge propulsive).
- L'ogive contient également un explosif (charge explosive). Elle sera guidée dans le fût strié du canon, par une ceinture en cuivre mou qui lui donne un mouvement de rotation pour une meilleure pénétrabilité dans l'air. Selon son utilisation, l'ogive peut contenir plus ou moins d'explosifs et peut véhiculer différents objets létaux, gaz ou liquides.
- La fusée de l'obus peut prendre différentes formes selon l'application recherchée. Elle permet de mettre à feu la charge explosive de l'ogive.

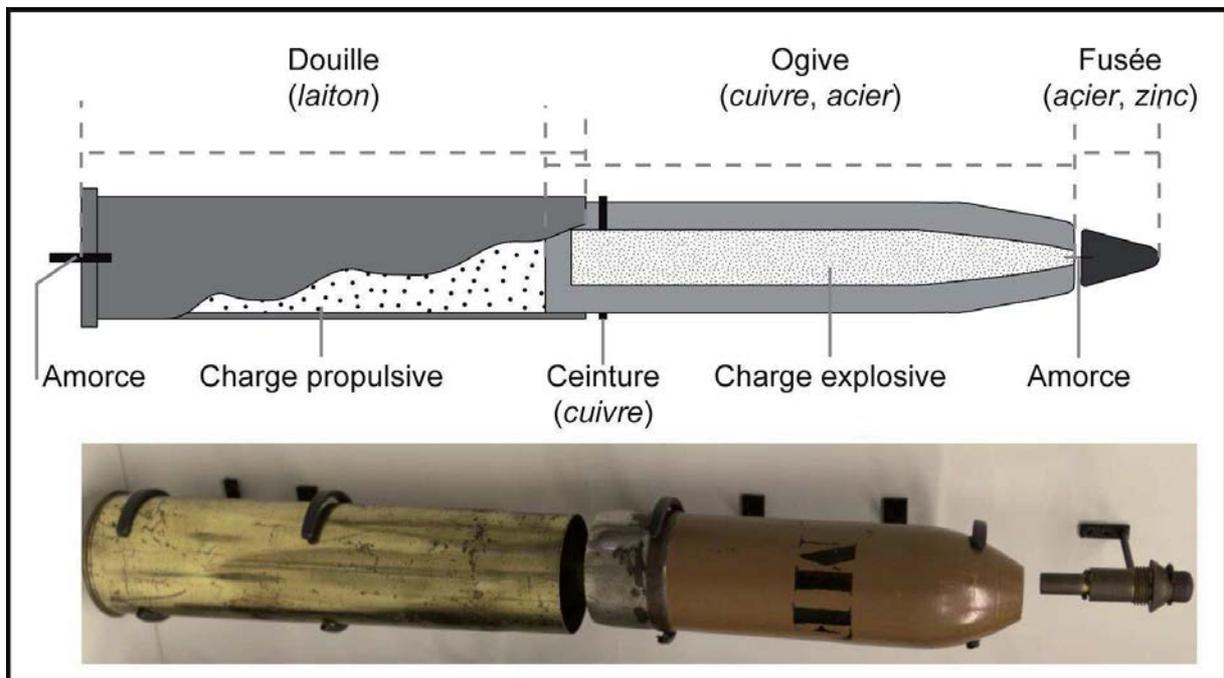


Fig.4.11: Anatomie de l'obus (cliché : Devos A. – Musée de la Grande Guerre à Meaux).

4.1.5.1. Les paramètres du tir et les trous d'obus

Les obus utilisés sont très diversifiés, et tous ne sont pas morphogènes. Cette grande variété permet de remplir un objectif précis, des obus à balles (shrapnell) contre une offensive

d'Infanterie ennemie, fumigènes pour un effet de masque, à gaz et explosifs. Alors que les obus fusants ne provoquent aucune forme car explosent en l'air, les obus percutants et obus à double effet explosent au contact du sol ou après une légère pénétration (obus à double effet avec retardateur) formant des dépressions fermées et désignées sous l'appellation de trous, entonnoirs ou cratères d'obus. Leur forme et leur diamètre dépendent des paramètres du tir, du poids des projectiles, de leur calibre, de la charge explosive, de l'angle, de la vitesse de pénétration et de la nature du terrain (Fig. 4.12).

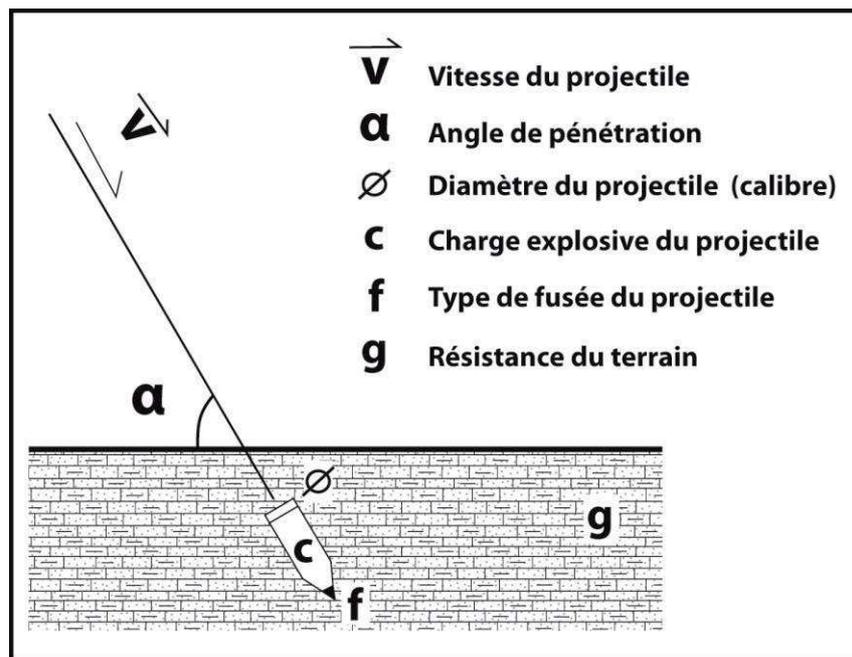


Fig.4. 12: Paramètres de formation d'un trou d'obus.

Le trou d'obus est devenu, avec la tranchée, le symbole morphologique de la Grande Guerre (gravures d'Otto Dix), bien connu des soldats qui le décrivent longuement dans leurs écrits (Guéno et Laplume, 1998) :

« Tu veux savoir le poids des obus, je le savais bien au juste, mais maintenant je ne me rappelle pas bien de tous, le 77 pèse 20 à 25 kg et la pièce 25 quintaux ; le 105 pèse 30 à 35 kg et la pièce 45 quintaux ; le 220 pèse 80 kg et la pièce 80 quintaux ; le 320 pèse 150 kg et la pièce 150 quintaux. Ils ont aussi des canons monstrueux de 420 qui pèsent 450 quintaux et les obus pèsent 1000 kg. Ceux-là sont traînés par des tracteurs automobiles et l'obus est placé dans la pièce par l'électricité, car c'est impossible aux hommes de remuer un obus ».

L'angle formé par l'obus et le terrain est l'un des paramètres les plus importants dans la formation du trou d'obus. Si l'angle est inférieur à 15°, l'obus ricoche sur le sol et explose en l'air ou au contact du sol, formant une très légère dépression. Même avec un obus percutant, l'artilleur peut décider de tirer en tir tendu vers une attaque de l'Infanterie ennemie pour faire éclater l'obus et disperser les éclats à la surface du sol. Il transforme un obus percutant en obus fusant, provoquant davantage de dégâts sur l'Infanterie ennemie, cette technique étant largement utilisée pendant la guerre de mouvement. Entre 15 et 25°, l'obus pénètre d'une longueur de projectile et provoque une dépression hémisphérique déblayée, sans bourrelet

(projection de l'éjecta à l'extérieur de l'entonnoir). Entre 25 et 40°, en fonction de la profondeur de pénétration, la dépression peut être déblayée ou remblayée par retombée des déblais avec la présence d'un bourrelet périphérique. Enfin, avec une pénétration supérieure à 40°, l'obus explose mais trop profondément pour provoquer un cratère générant un camouflet (Fig. 4.13). Le globe de décompression provoque par dilatance un renflement du sol.

Il est donc important de différencier le nombre de coups tirés par l'Artillerie pour la préparation d'une offensive et le nombre de cratères d'obus sur le terrain. La préparation des grandes attaques de la Grande Guerre (Verdun, Somme, Champagne) relate des chiffres dépassant le million d'obus. Cependant, tous ces obus ne sont pas morphogènes, ne créant pas obligatoirement une forme. Les paramètres de tir, le type d'obus et de fusée, les conditions de terrain sont autant de conditions à la formation d'un cratère d'obus.

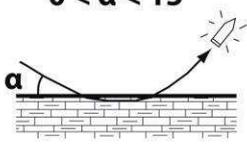
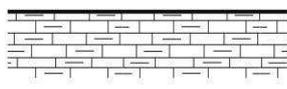
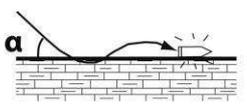
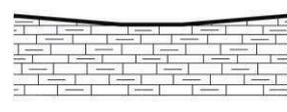
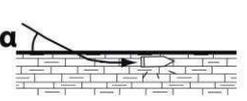
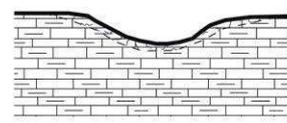
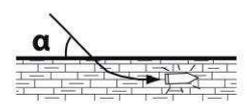
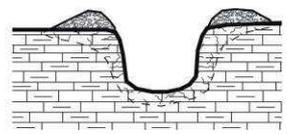
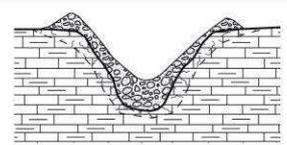
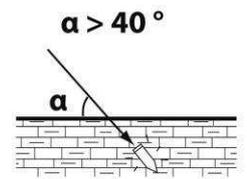
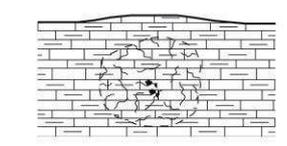
Angle de pénétration	Profondeur de pénétration	Effets	Effets morphogènes
$0 < \alpha < 15^\circ$ 	Nulle	Ricochet Effet fusant	
$0^\circ < \alpha < 15^\circ$ 	Nulle	Ricochet Légère dépression	
$15^\circ < \alpha < 25^\circ$ 	Une longueur de projectile	Dépression hémisphérique déblayée	
$25^\circ < \alpha < 40^\circ$ 	1-2 longueurs de projectile	Dépression hémisphérique déblayée avec bourellet extérieur	
	3-4 longueurs de projectile	Entonnoir conique par retombée des déblais et bourellet	
$\alpha > 40^\circ$ 	> 4 longueurs de projectile	Camouflet Globe de décompression	

Fig.4. 13: Paramètres de formation d'un trou d'obus en fonction de l'angle de pénétration du projectile.

4.1.5.2. Les diamètres des trous d'obus, les calibres et la charge explosive.

Outre l'angle formé entre le terrain et le projectile, le calibre de l'obus est étroitement lié au diamètre du trou et son enfoncement dans le sol. Plus le calibre est important, plus le cratère d'obus est imposant. Un obus de 75 mm français avec un angle de 25° s'enfonce d'un mètre alors qu'un obus de 370 mm peut s'enfoncer jusque 6 m de profondeur (jusque 10 m avec un obus de 370 allongé). Ces obus de 370 mm peuvent donc créer un entonnoir de 6 m et déblayer 36 m^3 alors qu'un obus de 120 mm forme un cratère de 2,5 m et déblaye $2,6 \text{ m}^3$ de terre (Fig. 4.14).

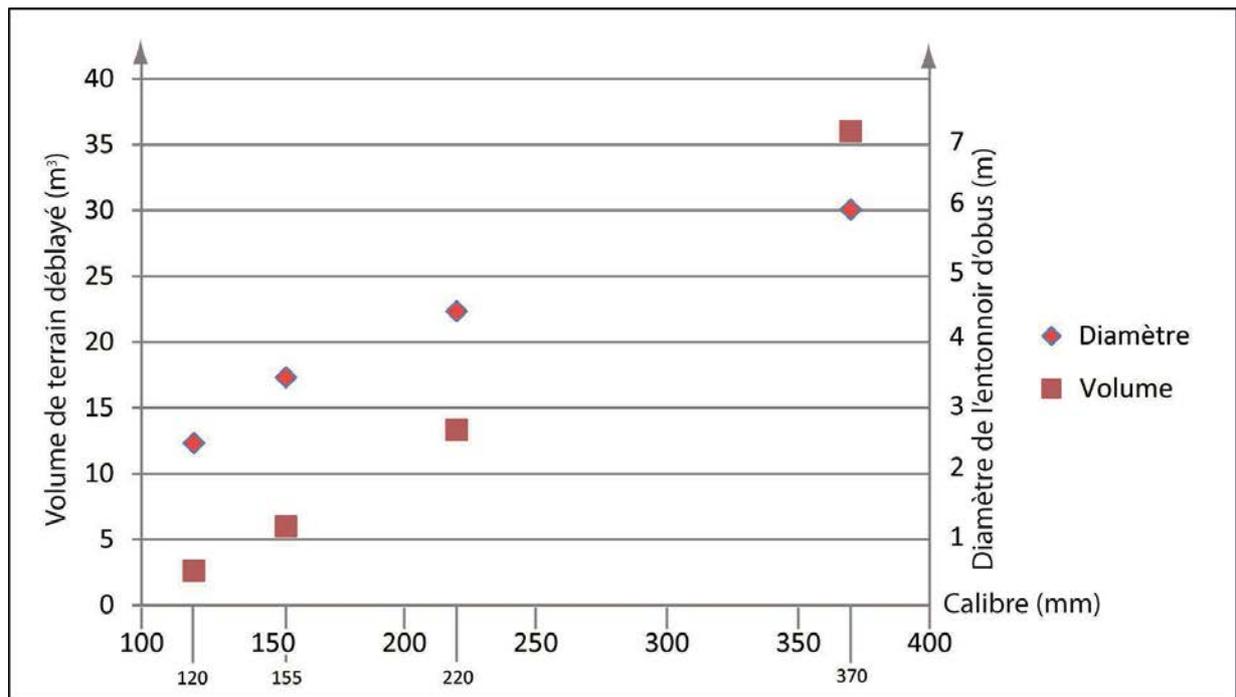


Fig.4.14: Graphique du diamètre des trous d'obus et des terres déblayées en fonction du calibre (d'après Ministère de la Guerre, 1917).

Si l'enfoncement de l'obus est plus important dans le sol (vitesse plus forte, terre plus meuble), une partie de la terre retombe dans le cratère d'obus formant un cratère plus grand mais moins profond. Enfin, si l'obus pénètre le sol trop profondément, la charge explosive ne forme qu'un petit dôme à la surface du sol. Cette explosion est un camouflet mais peut provoquer des dégâts importants souterrains (abris, tunnels) en propageant le choc de l'explosion vers les couches sous-jacentes, jusque 2 m sous la pénétration finale du projectile (Guéno et Laplume, 1998) :

« Un planton nous avertit que la première ligne attaque... Une trombe formidable, l'obus s'abat sur nous... Je compte 16 obus de 210 en dix minutes, le dix-septième tombe sur notre abri, le plafond en gros pins de Norvège commence à céder et à se disloquer. Je ne sais plus... tout s'écroule, explosion indicible, gaz suffocants puis plus rien. [...] Un obus de 340 est tombé à six mètres de nous, tuant vingt hommes et creusant un trou de trois mètres de profondeur. Nous l'avons échappé belle... »

4.1.5.3. Typologie des tirs d'Artillerie en imagerie Lidar

L'augmentation de la puissance de tir de l'Artillerie pendant la Grande Guerre s'accompagne également de l'évolution considérable des procédés de tirs. Les instructions de tirs sont nombreuses et très diversifiées, et peuvent ainsi être détectées par l'imagerie Lidar.

Les tirs de réglages (ti) permettent de déterminer les conditions de tir d'efficacité (réglage des hausses et des directions). Le tir d'essai tente de coiffer la zone de dispersion (polygone de dispersion) de coups sur l'objectif et le tir d'amélioration rapproche cette zone de dispersion

vers la cible. Ces salves de réglage génèrent des trous d'obus épars mais proches de l'objectif qui sera détruit par un tir de destruction.

Les tirs de destruction (td) « à hausse unique » visent des espaces restreints, ou un objectif clairement identifié comme une batterie ennemie, un nœud de tranchée, un abri, une place d'arme dans un système de défense, un abri ou un carrefour de routes, une portion de tranchée d'une centaine de mètres pour préparer un coup de main, etc... Ces points sont généralement géolocalisés sur les plans directeurs des GCTA. L'effet des tirs de destruction de contre-batteries se remarque nettement sur des sites d'Artillerie avec un polygone de tir rassemblant plusieurs dépressions juxtaposées dans le Massif de Saint-Thierry (Fig. 4.15). Les deux canons de la batterie les plus à l'Ouest ont été victimes d'un tir de contre-batteries, probablement détruits lors des tirs allemands.

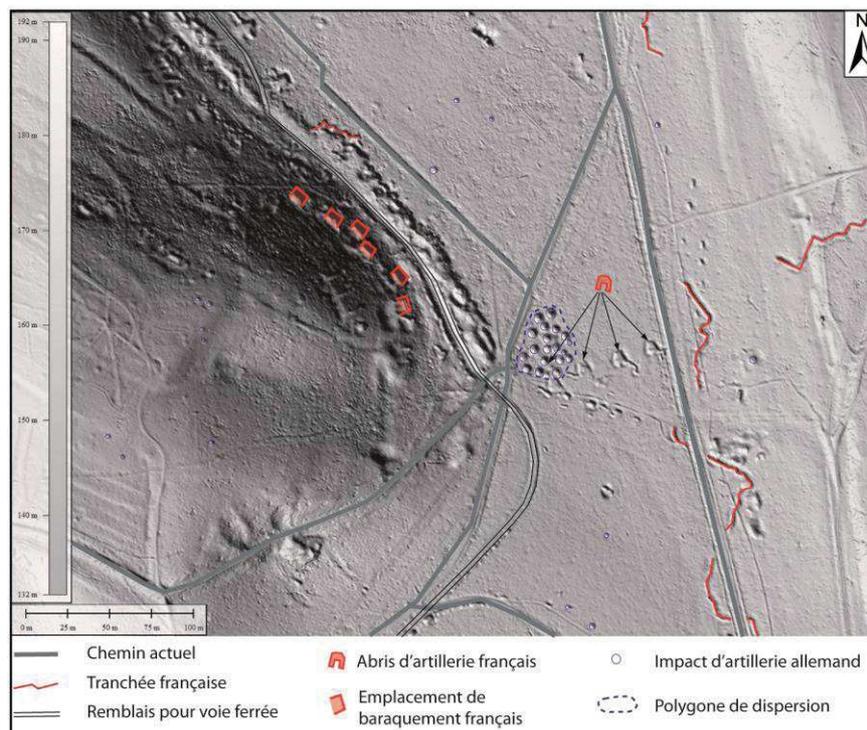


Fig.4.15: Image Lidar d'un tir de destruction sur une batterie d'Artillerie française dans le Massif de Saint-Thierry.

L'organisation spatiale des trous d'obus est différente dans le cas des tirs de barrage et du « feu roulant ». Un tir de barrage fixe ou de couverture (tb) consiste à protéger les troupes d'assaut (tir offensif) ou se protéger d'une attaque ennemie (tir défensif) par un effet de masque dissuasif d'explosions simultanées d'Artillerie. Les batteries effectuant un tir de barrage sont généralement proches et alignées parallèlement au front d'attaque, tirant par salves et produisant des entonnoirs nombreux, rapprochés et remarquablement alignés en rideaux parallèles corrélativement au déplacement de l'objectif ou des troupes à protéger. Ce tir n'ayant pas vocation à détruire, les conditions de tirs des coups de réglage proches de l'objectif sont exploitées (bombardement indifférencié mais linéaire). Pour la protection des centres de résistance, bastions et ouvrages isolés, des tirs « d'encagement » sur trois côtés sont organisés pour isoler une partie du dispositif de défense. Lors de coups de main ou de cibles localisées, la méthode du tir « d'encagement » peut également être utilisée de manière offensive sur un objectif en l'isolant par le tir sur les trois côtés pour éviter tout ravitaillement ou relève. Près de Lacroix-sur-Meuse, le tir « d'encagement » (en rouge) isole la tranchée

allemande de Vienne (en bleu) pour une attaque localisée dans cette zone (Fig. 4.16). L'Artillerie lourde est utilisée pour détruire les boyaux de soutien alors que l'Artillerie de campagne couvre la zone engagée. Dans ce cas, l'impact morphologique de l'obusage sera moins lisible car intégré dans le réseau de défense.

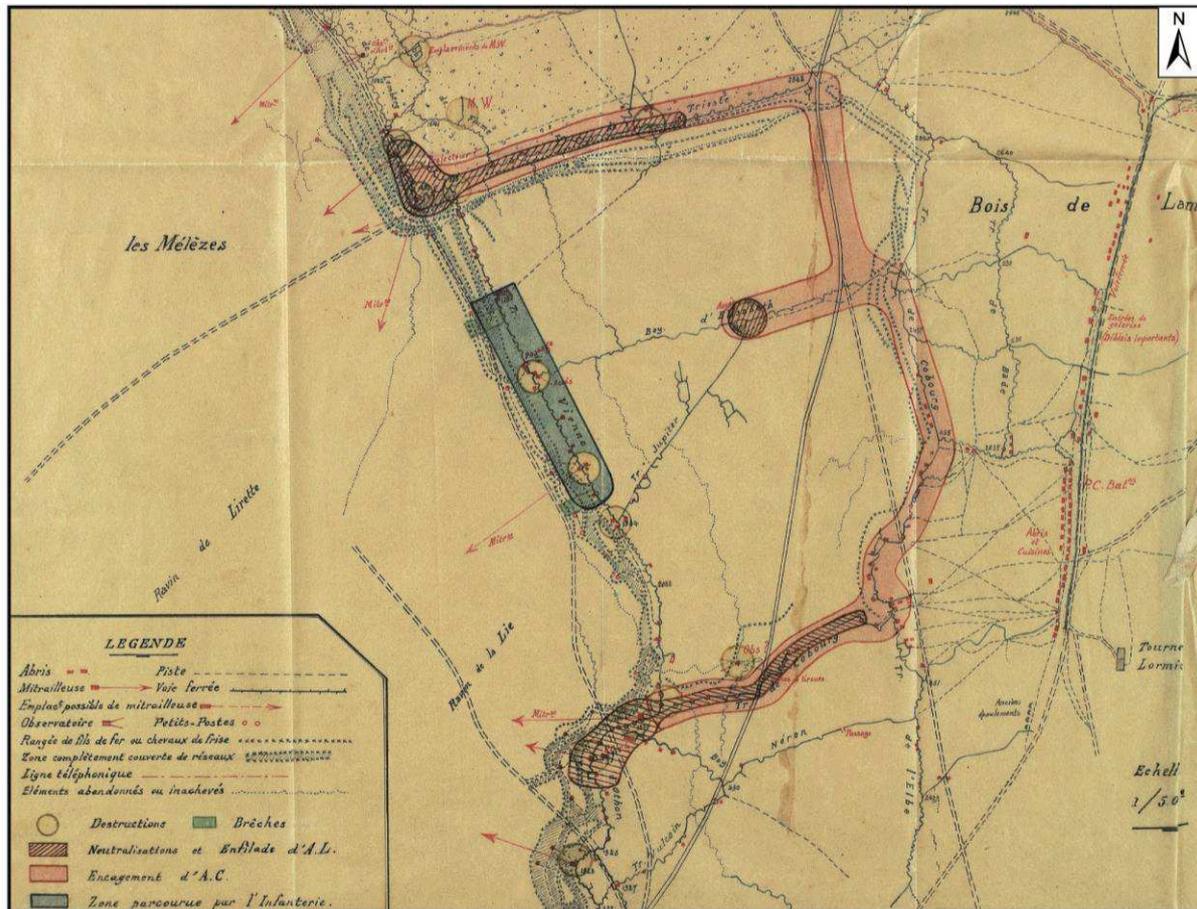


Fig.4.16: Extrait de plan directeur d'un tir « d'encagement » près de Lacroix-sur-Meuse (Source : Mémoires des Hommes du 83ème Régiment d'Infanterie, 26N665008053).

La technique du « feu roulant » ou du tir de barrage mobile ou « barrage roulant » ou « tir progressif » associe l'amplitude des rideaux d'explosion à la vitesse de déplacement des troupes offensives par un allongement du tir (une centaine de mètres pour quelques minutes) lié à des hausses croissantes par des salves interrompues (Fig. 4.17).

Associés à la technique du feu roulant pour l'attaque, des tirs de destruction des réseaux de défense permettent de créer une brèche pour l'Infanterie. Avec une batterie de 4 pièces de 75 mm, la brèche de 25 m de largeur sur 20 m de profondeur est formée par 600 obus à 2,5 km, 800 obus à 4 km et jusque 1200 obus à 7 km.

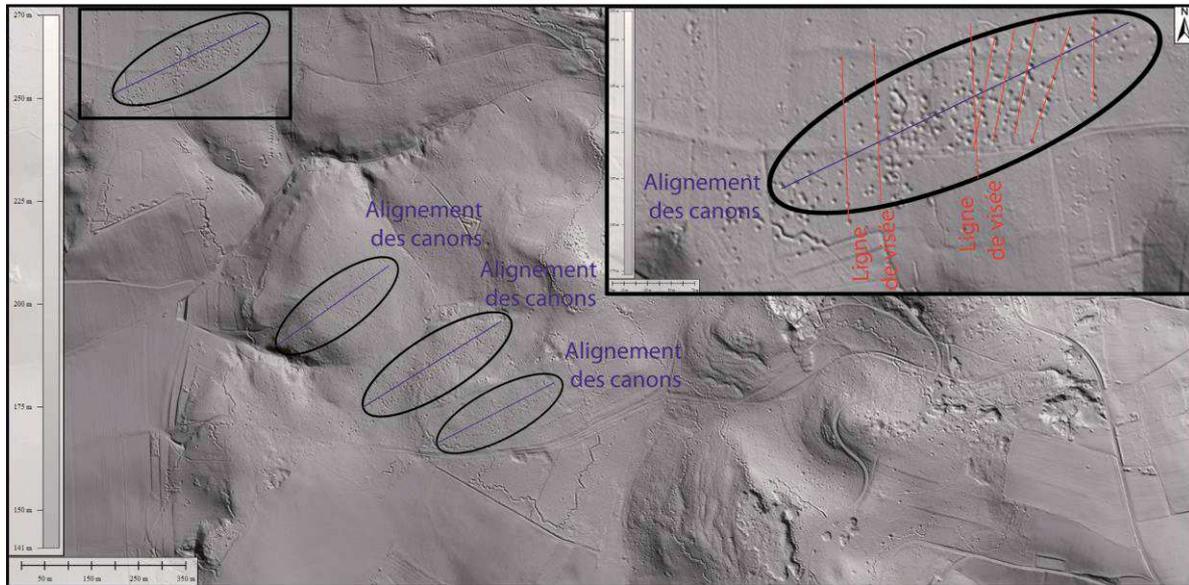


Fig.4.17: Image Lidar de l'organisation de cratères d'obus associés à un tir de barrage.

Le tir sur zone consiste à balayer une zone dans laquelle se situe l'objectif avec des coups plus ou moins réguliers et répartis. Lorsque l'objectif est mal identifié, difficile à observer ou sous couvert forestier, le tir sur zone s'impose, mais reste très consommateur en munitions sans être très efficace. Répété plusieurs fois et longtemps, il génère un « modelé en peau d'orange » (Po) qui a marqué la symbolique de la Grande Guerre. Cette signature morphologique du tir sur zone détruit les autres formes, notamment celles des réseaux de défense et perturbe donc fortement leur lisibilité comme à Verdun ou à Berry-au-Bac (Fig. 4.18).

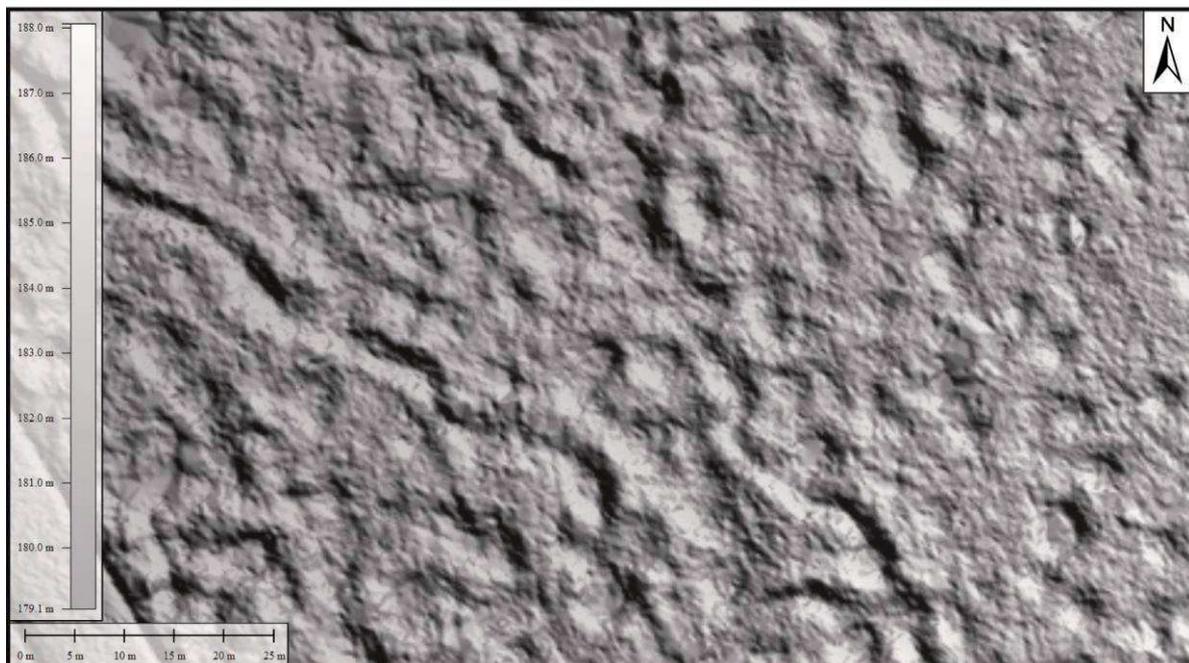


Fig.4.18: Image Lidar d'un modelé en peau d'orange sur la Cote 108 de Berry-au-Bac.

La préparation des grandes offensives de la Grande Guerre s'accompagne d'une augmentation exponentielle du nombre de pièces d'artillerie et de projectiles tirés de 1915 à 1918. Les

concentrations d'artillerie passent de 1 000 pièces en 1915, durant l'offensive française de Champagne, à 1 250 pièces allemandes à Verdun, pour atteindre 6 000 au printemps 1918 durant les offensives Ludendorff. Cette concentration est associée à une densification des pièces d'artillerie par kilomètre linéaire de front de l'ordre de 40 pièces/km en 1915 (Champagne) à 177 pièces/km durant l'offensive d'avril 1917 au Chemin des Dames. Jean Léry, stationné à l'arrière en Argonne, décrit la préparation d'artillerie avant la seconde Bataille de Champagne en Septembre 1915 :

« La préparation d'artillerie commence le 22 au matin. Il s'agit de détruire les réseaux de fils de fer, d'ensevelir les défenseurs dans les abris-cavernes, d'écraser les tranchées, de démolir les créneaux, de fermer les boyaux de communication. Le tir couvre la première et la deuxième ligne. (...) Il y a une hauteur d'où l'on découvre le bois de la Grurie, de Servon, les collines de Massiges. J'ai assisté de là ; pendant des heures, à ce bombardement. On ne peut rien imaginer d'aussi formidable. Les éclatements des projectiles sont si denses, que toutes les crêtes sont recouvertes de fumées blanches qui finissent par se rejoindre. (...)Le bombardement paraît aussi intense et aussi efficace que possible. »

La brutalité des offensives s'exprime également par la diminution de la durée de la préparation d'artillerie pour accentuer l'effet de surprise. L'offensive allemande devant Verdun déverse 2 millions d'obus en 2 jours et une nuit du 21 au 23 février 1916. Celle du printemps 1918 passe à 3,5 millions de projectiles en seulement 5 heures (Pommier, 2014). Les règlements militaires de 1918 annoncent un nombre de coups pour un jour de feu par pièce, de 150 coups pour les calibres de 95, 105 et 155 mm, de 120 coups pour les 120 L, 155 C et logiquement moins, 80 coups pour les calibres supérieurs (220 mm).

4.1.5.4. Effet de la géologie.

La mise à feu de la charge explosive de l'obus est déclenchée par la fusée, soit par le refoulement à l'impact du percuteur au contact du sol, soit par un retardateur (déclenchement horloger). Cependant, il est estimé à 200 millions le nombre d'obus non explosés sur les champs de bataille. Ces objets qui jonchent le terrain restent potentiellement actifs et ne doivent pas être manipulés. Les causes du non fonctionnement de ces engins sont multiples. Tout d'abord certains n'ont pas été tirés, visibles par une ceinture de cuivre intacte, sans rayures. Le projectile peut également être défectueux, envoyé dans les réseaux de défense ennemis sans exploser. Les paramètres du terrain sont la condition principale au disfonctionnement des obus. Dans un terrain meuble, argileux ou fortement malaxé par des tirs antérieurs, le sol ne joue pas son rôle de percussion et absorbe l'obus sans déclencher la mise à feu. Sur la Butte de Brimont coiffée de sables tanéthiens, la densité d'obus « foirés » est impressionnante alors que l'image Lidar signale une faible densité d'entonnoirs. (Fig. 4.19).



Fig.4.19: Photographie d'obus « foirés » dans les sables de la butte de Brimont (Cliché : Devos A.).

Roland Dorgelès dans les Croix de Bois connaît les sons de chaque obus, même ceux qui n'explosent pas :

« Les oreilles s'habituent vite à ce roulant fracas. On les reconnaît tous, rien qu'à leur voix : le soixante-quinze qui claque rageur, file en miaulant et passe si vite qu'on le voit éclater quand on entend le départ ; le cent vingt essoufflé qu'on croirait trop las pour achever sa course ; le cent cinquante-cinq qui semble patiner sur des rails et les gros noirs, qui passent très haut, avec un bruit tranquille d'eau qu'on agite. Le vent, en dénouant les tourbillons épais, apportait jusqu'à nous une haleine de soufre, une forte odeur de poudre. Gilbert la respirait, à s'en saouler. Parfois, on entendait bien l'obus siffler, mais, cinq, dix secondes s'écoulaient, et il n'éclatait pas, tombé on ne sait où. Un murmure de déception s'élevait, un grognement de badauds trompés. Il a foiré... »

4.1.6. Transport et communication

Les chemins de fer présentent une signature morphologique linéaire étroite (supérieure à 2 m pour voie large et inférieure à 2 m pour une voie étroite) par la trace de leurs remblais surhaussés d'une trentaine de centimètres par rapport au sol. Leurs tracés sont amples et suivent les courbes de niveau avec une structure hiérarchisée ou arborescente pour desservir en matériel, en munitions et en hommes chaque position du réseau de défense, notamment au niveau des réduits ou centres de résistance (Ce, Re). Ils dessinent également des « épis de tir » rectilignes, courbes, et « en tenaille » permettant à plusieurs wagons portant l'Artillerie Lourde

à Longue Portée sur Voie Ferrée (ALVF) de s'orienter, puisque l'affût de la pièce est parallèle aux rails, et de bénéficier d'un bon champ de tir. Chaque pièce d'artillerie lourde sur affût fixe est également desservie par une voie ferrée pour l'alimenter en munitions. Enfin, en 4^{ème} position, voire en arrière, des parcs ou dépôts (Pvf, Dvf) (munitions, vivres, eau, matériel) sont révélés morphologiquement par des faisceaux de voies. Le rehaussement des voies ferrées de la Grande Guerre est encore présent entièrement ou partiellement dans certains prés pour l'élevage, nécessitant trop de travaux pour le nivellement. Les camps militaires et carrières souterraines (Cs) hébergeant des troupes (« Creutes ») sont également desservis par des voies. La surélévation est également visible dans les barribans d'Argonne entre deux tranchées. Ce passage est périlleux au fond des ravins car le soldat n'est plus protégé par sa tranchée mais circule à découvert. Cette circulation nécessite un surhaussement, notamment en hiver lors de la crue des petits ruisseaux qui circulent dans les ravins (Fig. 4.20).

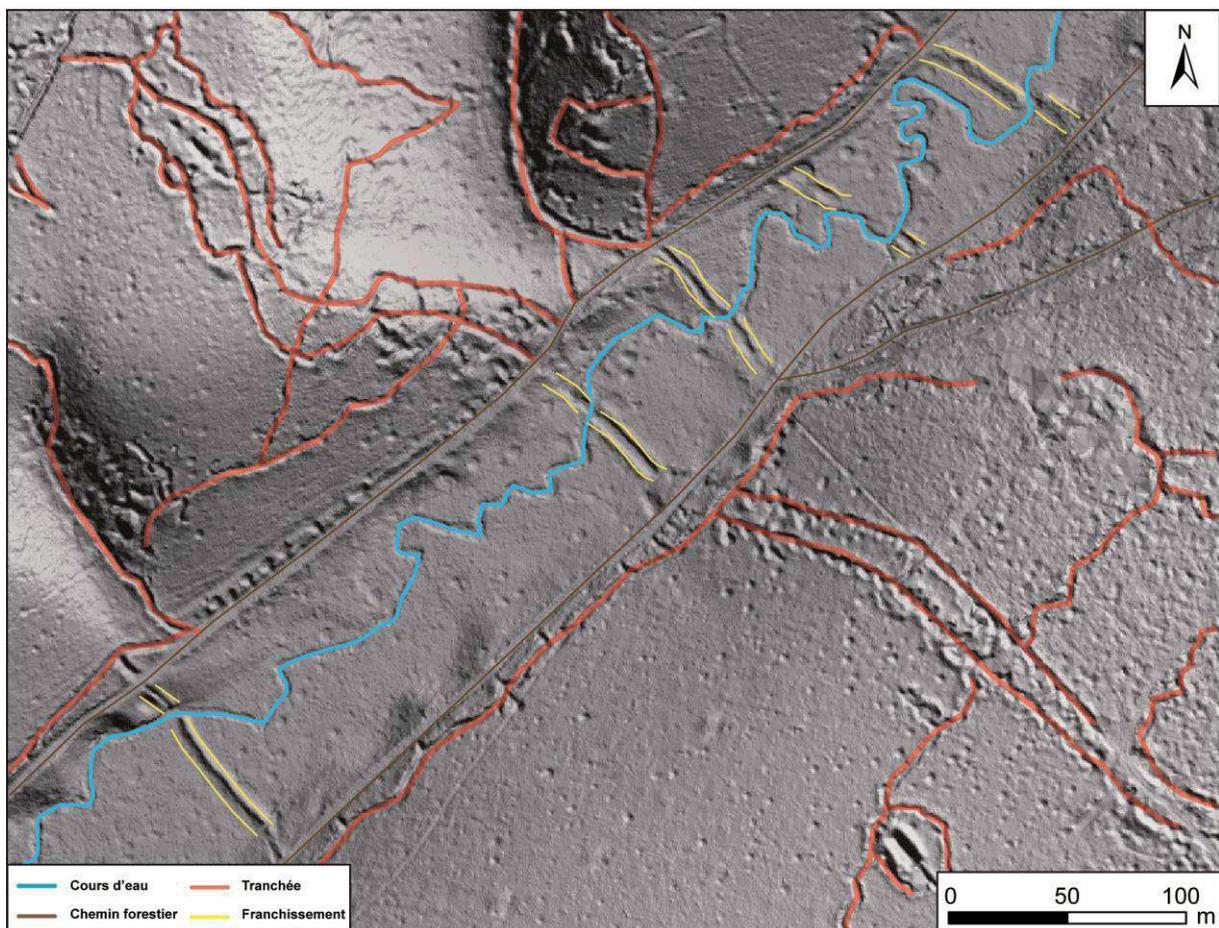


Fig.4.20: Trace morphologique des passerelles dans un barriban d'Argonne.

4.1.7. Cantonnements et camps militaires

Les camps militaires (Ca) s'organisent en arrière des 3^{èmes}, voire des 4^{èmes} positions de défense sous couvert forestier ou sur un versant non exposés à l'ennemi. Ils sont organisés selon un schéma rationnel avec un étagement des baraquements métriques adossés au versant, sur plusieurs niveaux conformément aux manuels d'instructions militaires. Chaque niveau peut être ainsi desservi par des voies étroites. Les sites géomorphologiques favorables sont les sites de méandres comme dans la vallée de la Biesme en Argonne (Fig. 4.21A) et de « cuves »

ou « amphithéâtres » naturels équipés de sources pour l'alimentation en eau potable (AEP) comme au Borrieswald (Fig. 4.21B).

Le camp du Borrieswald à Apremont-sur-Aire a fait l'objet d'investigations archéologiques et met en évidence un véritable village dans la forêt (Fig. 4.21B) Pouvant accueillir jusque 2 500 hommes, ce camp est construit sur trois paliers pour les officiers et les troupes équipés de douches, de cuisines, des réservoirs à eau pour les locomotives, d'un cinéma et d'un cabinet dentaire (Desfossés, 2015). Le camp se love dans une « cuve » ou un amphithéâtre creusé dans la gaize sur un versant orienté vers le Nord à l'abri des bombardements ennemis autour d'une source (source de la Croisette) au contact gaize – argile de l'Albien alimentant les troupes et les chevaux.

La même organisation est observée près du village de la Harazée dans le camp du Génie, ou « camp Guyard », en souvenir du Sous-Lieutenant Guyard, tombé à Morhange pendant la guerre de mouvement le 21 août 1914. Ce camp français à environ 1 km du front fut construit sur les pentes orientées au Sud en rive droite de la Biesme pour se protéger des tirs d'artillerie allemands (Fig. 4.21A). Comme le Borrieswald, une source au contact gaize- argile de l'Albien permet aux hommes de s'alimenter.

Les « villages nègres » (Vn) ou camps improvisés et mal organisés sont des cagnas, gourbis dont la trace morphologique est plus ténue que les camps militaires réglementaires.

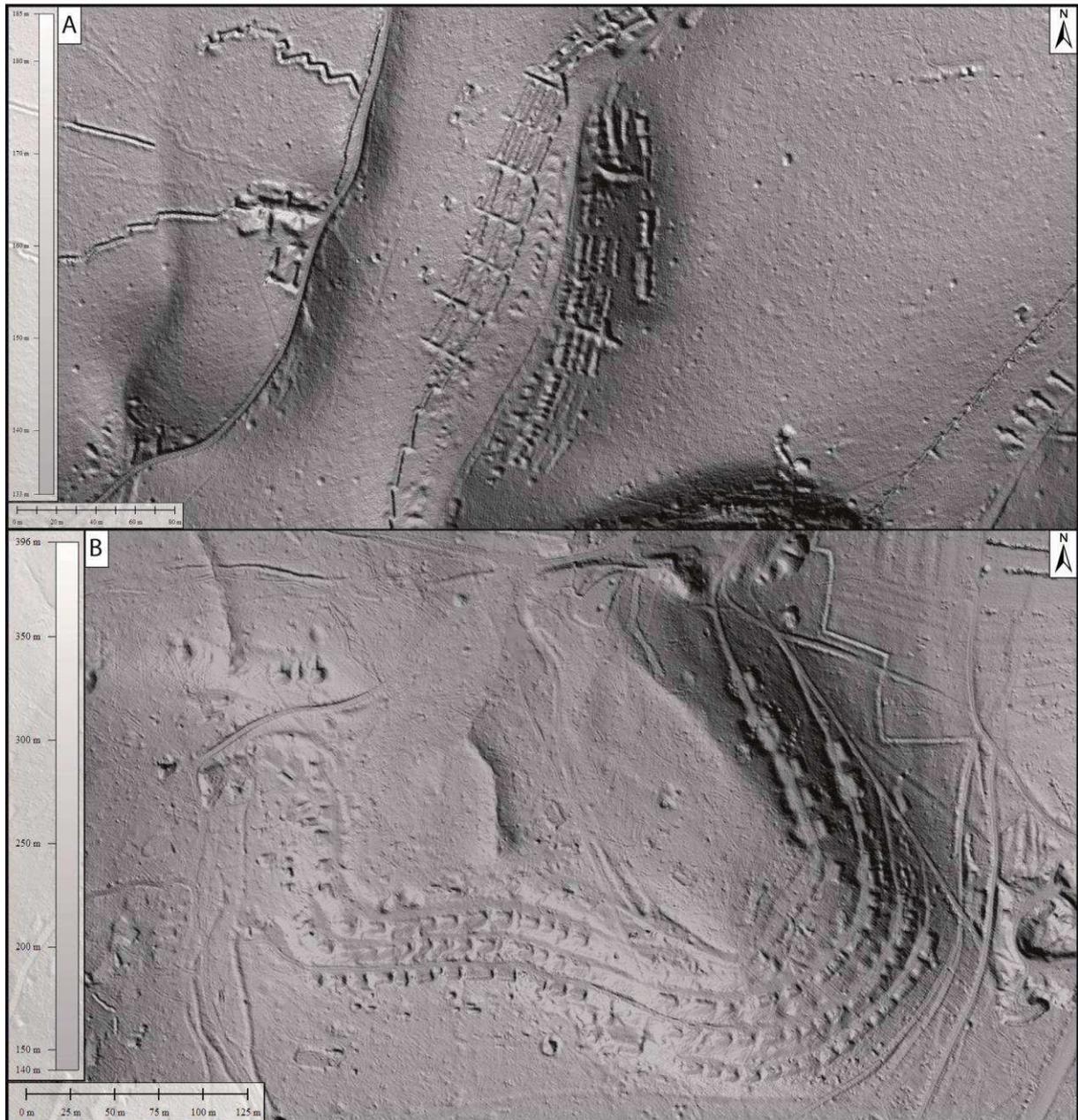


Fig.4. 21: A - Image Lidar du camp militaire français « Guyard » près du village de La Harazée en Argonne ; B - Image Lidar du camp militaire allemand du Borrieswald près d'Apremont-sur-Aire en Argonne.

4.1.8. Carrière souterraine

Dans le secteur de Reims, de nombreuses carrières souterraines (Cs) appelées « Creutes » (Devos *et al.*, 2012) s'inscrivent au sommet de la côte d'Île-de-France dans les Calcaires grossiers du Lutétien. Ces endo-formes sont réhabilitées en abris de bataillon par le Génie (Compagnies MD) pour un cantonnement durable en 4^{ème} position de défense. Leur signature morphologique en surface est caractérisée par un front de taille aérien percé d'une entrée en bouche de cavage à partir de laquelle les verses ou remblais de carrière sont déversés sur le versant (Fig. 4.22). Localement, des dépressions fermées corrélatives à un soutirage des carrières jalonnent les plateaux. Dans le secteur d'Hermonville, les données Lidar montrent des boyaux de communication desservant les entrées des Creutes ouvertes sur les flancs du front de côte.

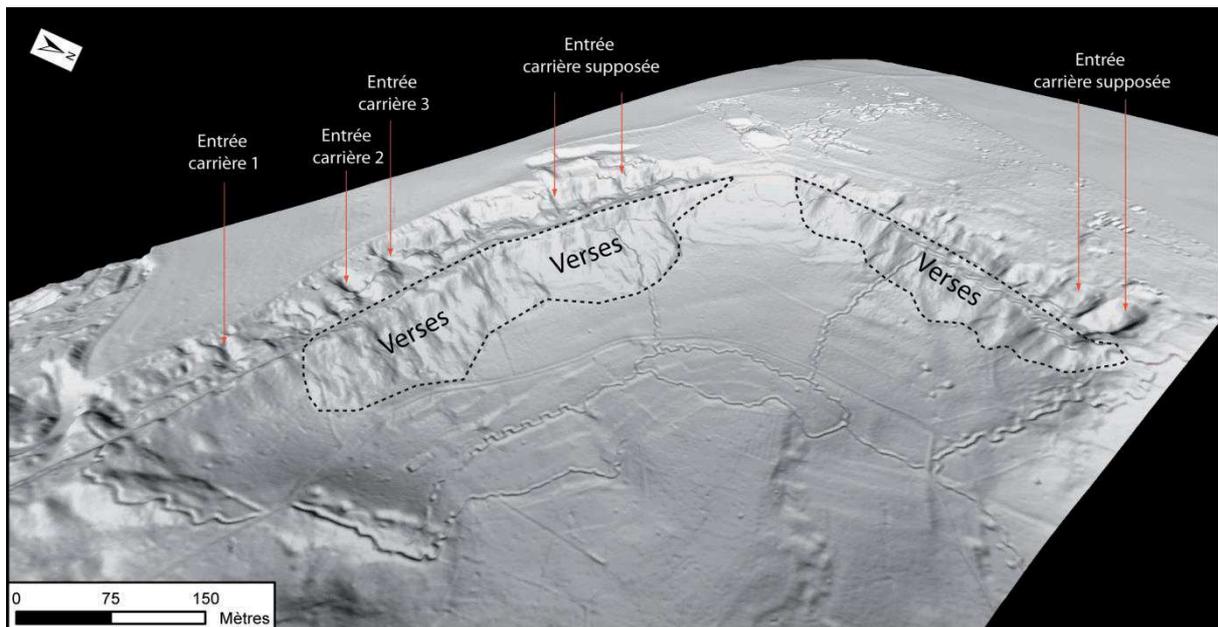


Fig.4.22: Image Lidar des tranchées et des boyaux reliés aux carrières souterraines dont les verses drapent le front de la côte d'Île-de-France (Hermonville-Mont Chatté).

4.1.9. Morphologies de la Grande Guerre post-conflit.

Après-guerre, la remise en culture des terres dévastées passe par une période de dépollution des champs de bataille (Laval, 1927), constituant à déminer ou à désobuser et à récupérer des métaux et déchets militaires divers (« épaves de guerre inertes »). Près de 200 millions obus tirés n'ayant pas explosé sont alors à traiter, nécessitant des sondages, leur récupération, leur destruction *in situ* ou dans des centres de désobusage. S'ajoutent à ces déchets, les surplus des dépôts de munitions estimés à 1 700 000 tonnes dont 1 100 000 tonnes destinées à la destruction entre les deux guerres (Hubé, 2016). Les signatures morphologiques du désobusage s'observent sous la forme de cratères coalescents alignés dans des champs d'éclatement d'obus (Vaudoncourt-Loison en Meuse), fourneaux de désobusage (rond rouge sur la cote 108) (Fig. 4.23), tranchées de brûlage d'obus, et entonnoirs de déminage observés en image Lidar en Wallonie (cratères de Bellefontaine) souvent accompagnés de zones de dépôts et de voies d'accès. Outre le désobusage, d'autres cratères d'explosion peuvent être

générés dans des zones d'essais militaires inscrits dans les paysages dévastés comme en 1919 à Tahure (explosion de 49 tonnes de mélinite) et à la Courtine en 1924 (charge de 10 tonnes).

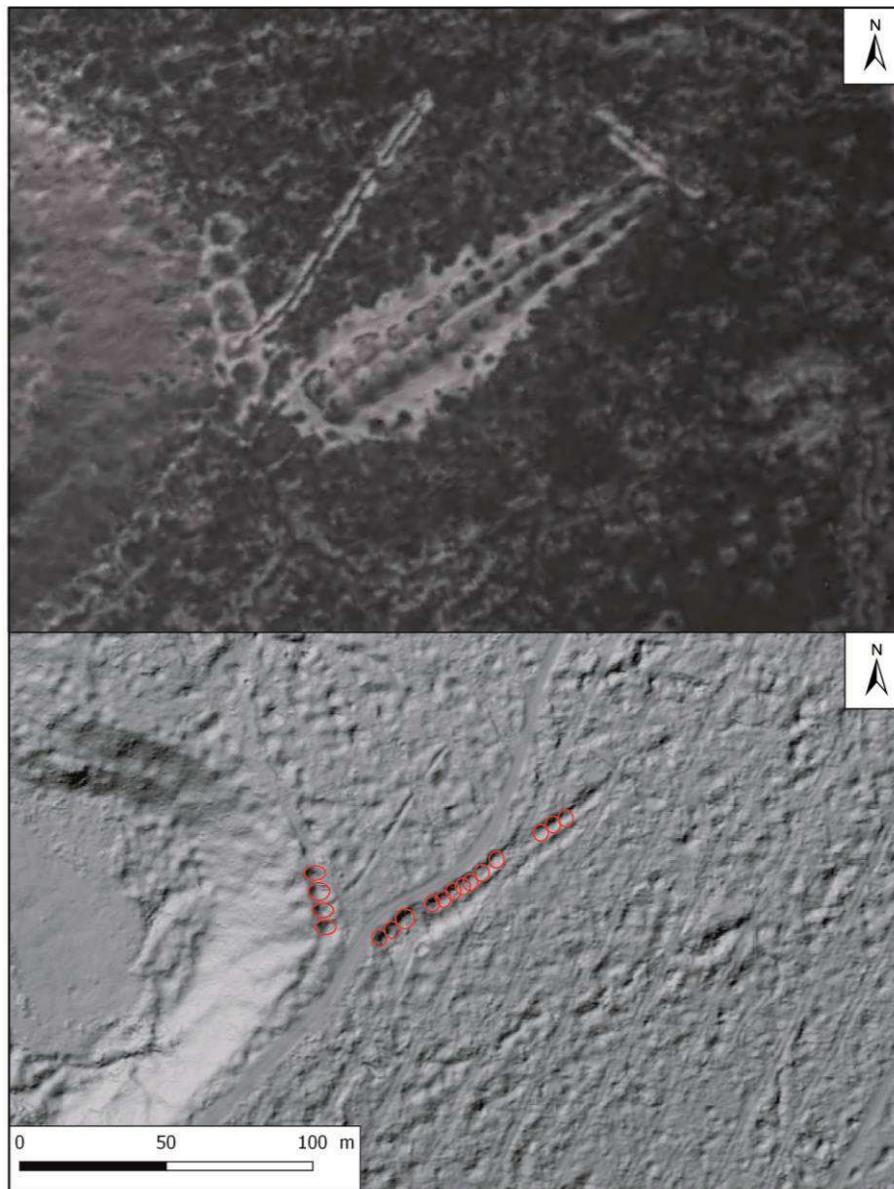


Fig.4.23: Site de désobusage sur la Cote 108 en photographie aérienne de 1929 et en image Lidar.

L'observation de dépressions alignées de 2 m de longueur est interprétée comme des sépultures exhumées non remblayées (To, Fo, Sc et Ne). La note du 19 novembre 1914 du général Joffre interdit l'exhumation et le transfert des morts dans la zone des Armées. Mais suite à la loi du 29 décembre 1915 par laquelle l'État accorde aux « Morts pour la France » une concession individuelle et perpétuelle, et à la loi du 31 juillet 1920 instaurant la création de nécropoles nationales et autorisant enfin dans la zone des Armées, la récupération des corps (article 106), de nombreuses sépultures simples (To) et multiples (dont les fosses communes (Fo)) isolées ou groupées dans des cimetières provisoires sont exhumées pour être concentrées dans les nécropoles (Ne) (Pau, 2016). Ce grand remuement des corps (Flucher, 2011) induit une exhumation et un transfert de masse confiés à des entreprises privées, qui pour des raisons mercantiles, voire malhonnêtes, ont bâclé le travail (paiement forfaitaire,

cercueils inappropriés) ce que l'approche archéologique montre nettement (récupération très partielle des ossements).

L'outil Lidar permet donc de détecter visuellement les polémo-formes anté, syn et post conflit mais ne renseigne pas sur leur utilisation ainsi que sur leur position dans les réseaux de défense. L'étude de la zone de front par les plans directeurs permet alors de replacer ces formes dans leur organisation spatiale.

4.2. Organisation spatiale des formes

L'impossibilité de visualiser à la même échelle toutes les formes de la Grande Guerre conditionne la vision multiscalaire des morphologies de la zone de front, de la « macro-forme » hectométrique à la « micro-forme » métrique. Les micro-formes ne se révèlent à une échelle importante qu'avec une résolution suffisamment bonne (plus de 10 points/m²) sans pour autant révéler des formes souterraines (abris-cavernes). Le repérage des types de formes à l'échelle d'une ligne de défense (De Matos Machado *et al.*, 2016) permet de montrer leur diversité avec un usage opérationnel, notamment pour les archéologues.

Pour, d'une part appréhender l'organisation spatiale des morphologies par des indices de densités surfaciques ou linéaires (Devos *et al.*, 2015b ; Taborelli *et al.*, 2017b), et d'autre part pour relativiser les résultats, il est nécessaire d'inscrire ces formes dans la structuration spatiale de la zone de front. Cette inscription est faite en indiquant sa situation au sein des positions et des lignes de défense, ce que l'analyse sous SIG des plans directeurs au 1/20 000, au 1/10 000 et au 1/5 000 permet. En effet, chaque rideau ou position de défense présente non seulement ses propres morphologies, mais aussi sa propre structure spatiale (Fig. 4.24).

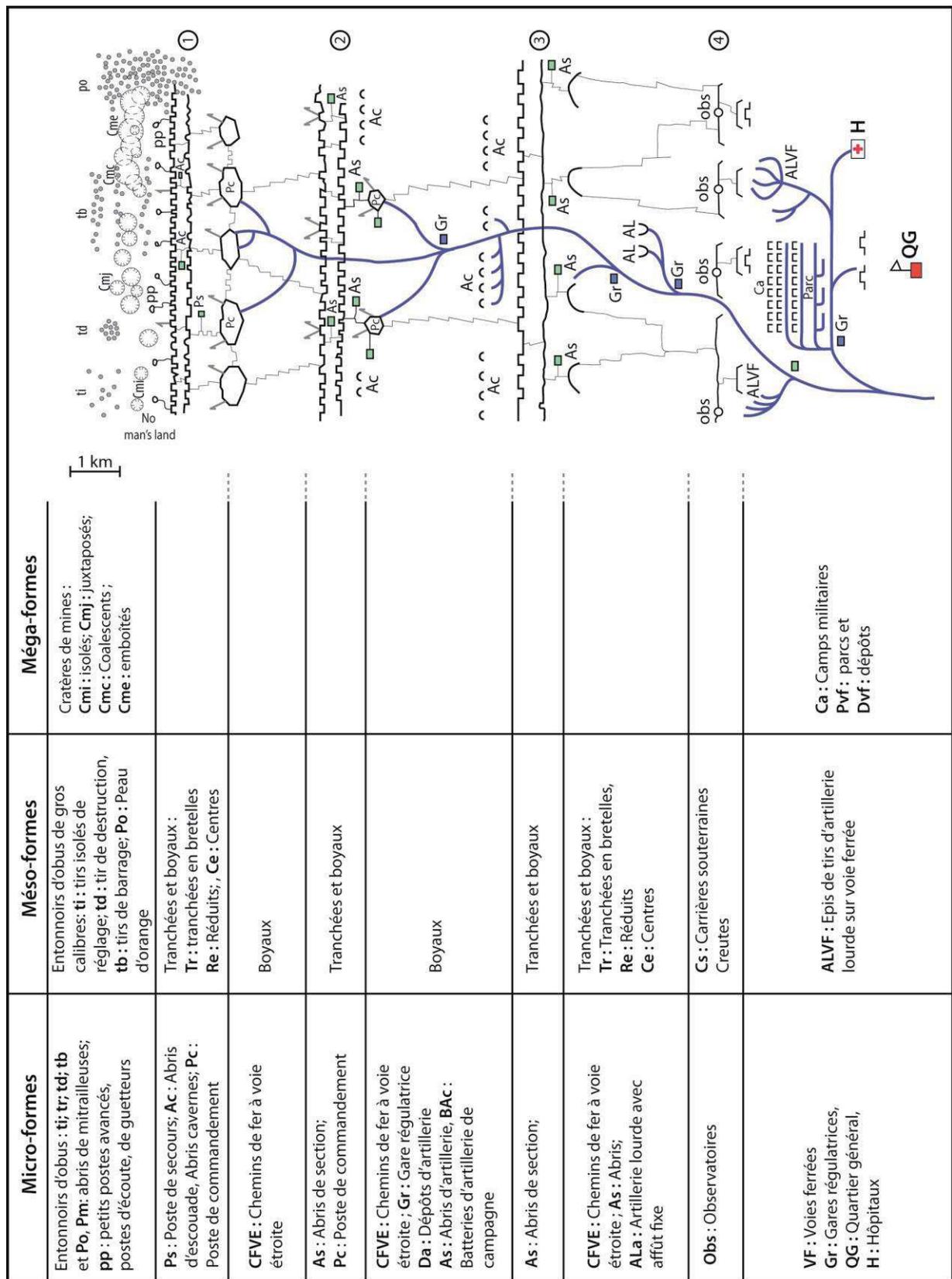


Fig.4. 24: Organisation spatiale des formes de la Grande Guerre dans la géographie de la zone de front.

Le no man's land concentre les cratères de mines, de nombreux impacts d'artillerie et un chevelu de petits postes avancés, postes d'écoutes, postes de guetteurs dans les réseaux de

défense accessoires (trous de loups, fossés d'abattis, fougasses en tranchées). Le premier rideau, ou position, est le plus dense en tranchées (170 m/ha) (Devos *et al.*, 2015b) et peut même présenter quatorze lignes de défense comme en Argonne (Taborelli *et al.*, 2016b) avec de nombreux abris pour mitrailleurs et abris individuels. Les boyaux sont en proportion moins nombreux et desservent des abris-cavernes de demi-section, postes de premiers secours et abris-dépôts d'artillerie de tranchées. En troisième, voire en quatrième ligne de tranchées, une structure cellulaire autour de centres de résistance ou de réduits apparaît nettement avec des postes de commandement et des abris d'artillerie. Dans ce rideau de défense, les abris d'artillerie de mortier à tirs courbes avec une portée d'environ 1 km sont difficilement repérables car intégrés aux tranchées (Fig. 4.25).

Les secteurs de liaison entre les positions sont davantage représentés par des boyaux de communication que par des tranchées de tirs surtout avant 1918. Quelques « tranchées en bretelles » permettent le tir de flanquement sur d'éventuelles percées aménagées. Des places d'armes sont retrouvées permettant la concentration de troupes pour des contre-offensives. En arrière immédiat de la ligne des réduits, un réseau dendritique de voies ferrées à voies étroites (VFVE) dessert les positions avec des gares régulatrices (Gr).

La seconde position défensive reste renforcée par des lignes de tranchées avec davantage d'abris de section pour le repos et des abris d'artillerie de campagne. Elles s'implantent à 6 km des lignes ennemies, permettant des tirs de barrage dans le no man's land et des tirs de destruction dans le premier (voire second) rideau ennemi compte tenu de la portée des canons de campagne. Ces canons de campagne (de 75 mm à 105 mm) ont des portées maximales d'environ 15 km (Fig. 4.25). Les objectifs plus lointains dans les lignes ennemies nécessitent une Artillerie lourde avec des portées dépassant les 20 km. En arrière de la position, les emplacements de batteries d'artillerie de plus gros calibre desservies par voies ferrées sont révélés.

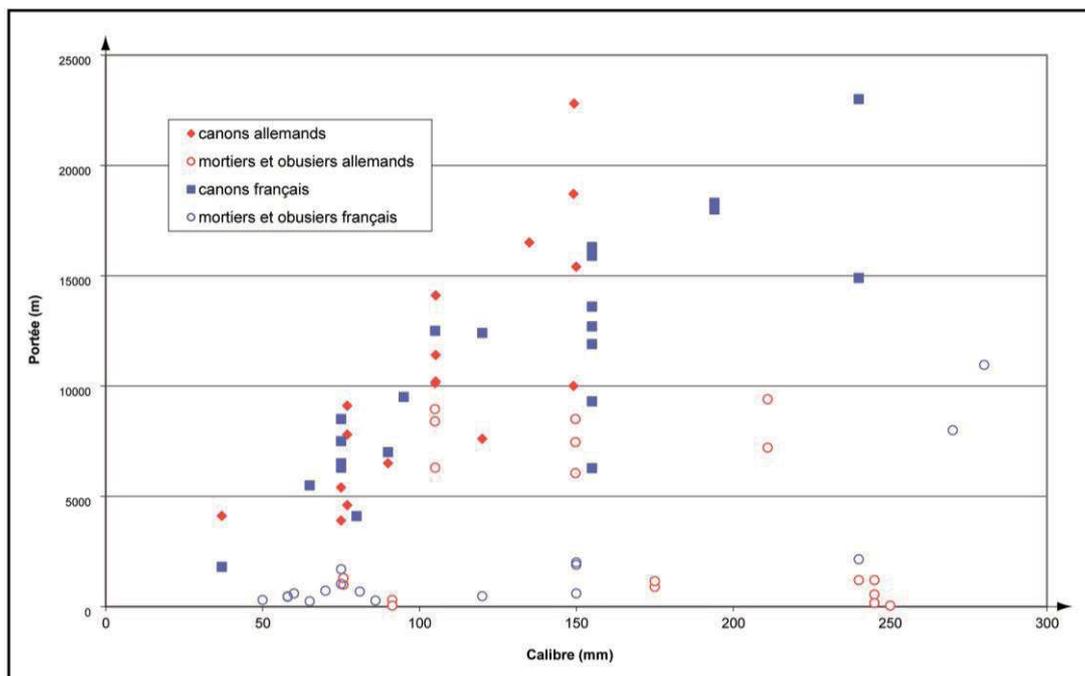


Fig.4. 25: Corrélation des calibres en fonction des portées de canons, mortiers et obusiers d'artillerie français et allemands.

Le troisième rideau est plus lâche ou moins dense en réseaux de tranchées et de boyaux avec des abris de section (As). Le quatrième rideau est une position d'observation et de cantonnement avec des tranchées de défense linéaires équipées d'observatoires du SROT, d'éléments de tranchées d'exercice, reliées aux Creutes (Région de Reims) ou aux camps militaires (Argonne). Le réseau ferré est très développé, car il assure non seulement le cheminement des troupes, du matériel, des munitions (parc du train, hôpitaux), mais porte aussi l'Artillerie lourde à longue portée (épis de tirs, ALVF) pour envoyer des obus de 340 à 400 mm avec une portée maximale de 25 km (Fig. 4.25). L'analyse spatiale des voies ferrées sur les plans directeurs a montré, d'une part la densification du réseau (Fig. 3.40) de 1914 à 1918, et d'autre part une structure dendritique à voie étroite perpendiculaire à la ligne de front et desservie par des lignes à voie large parallèles à cette dernière. Néanmoins, l'analyse des images Lidar témoigne de remblais résiduels dont les traces restent ténues, voire imperceptibles notamment sur un substratum cohérent (craie, gaize) ou intégrés à des pistes d'exploitation forestière. L'absence de marqueur morphologique illustre également le procédé standardisé, pré-assemblé de modules à rails, en travées courbes ou droites suffisamment solides pour absorber l'irrégularité des terrains, sans remblais morphogène. De plus, ces réseaux sont intégralement démontés pour un usage agricole (culture de la betterave) et l'exploitation de carrières.

Cette géographie des morphologies du front est en outre évolutive selon les conditions géomorphologiques, la couverture végétale, le réseau hydrographique, les stratégies des belligérants et la stabilité locale du front. L'analyse sous SIG des plans directeurs de Champagne-Ardenne montre clairement une adaptation structurelle des réseaux de défense au modelé, aux conditions de tirs, d'observation et de couverture (Devos *et al.*, 2015b, Taborelli *et al.*, 2016b, Taborelli *et al.*, 2017b) tout en conservant le schéma synthétique (Fig. 4.24). Cette adaptation passe par un approfondissement du dispositif en zone de plaine dégagée avec une exploitation exacerbée des masques (végétaux et talus), par une densification ou une concentration et une exploitation des ravins en plateau incisé (Argonne). À l'inverse, des ruptures ou des lignes de défense discontinues sont constatées en plaine humide ou marécageuse en Champagne humide. Dans les Monts de Champagne, la multiplication des boyaux entre les positions répond à l'exploitation du premier rideau de défense allemand occupé par les Français suite aux offensives de 1915.

- Si l'agent morphogène (guerre des mines, Artillerie, réseaux de défense, vie militaire, transport) est facilement identifiable dans les secteurs calmes, il est moins patent pour les secteurs des grandes offensives. Dans un « modelé en peau d'orange », l'emboîtement des trous d'obus, des cratères de mine perturbe fortement la lisibilité des réseaux de défense. Les cratères de petits fourneaux de mine peuvent se confondre avec les entonnoirs d'obus allongés et brisants de gros calibres (220, 280, 370 mm).
- La détermination de l'usage ou de la fonction des formes (PC, Poste d'observation, abris-dépôts pour le personnel, munitions, etc.) ne peut pas reposer uniquement sur les morphologies ou coupes transversales, mais doit être associée aux documents d'archives (plans directeurs, JMO, manuels d'instructions) et à des campagnes de reconnaissance de terrain.
- La signature morphologique et l'organisation spatiale des formes sont certes des indicateurs temporels pour leur datation anté, syn ou post conflit. Cependant, elle reste également contrainte à la bonne connaissance de l'état initial, de l'histoire des combats et

des pratiques agricoles ou sylvicoles et à la pression agricole (Buridant, 2003 ; Amat, 2015).

- L'appartenance à l'armée (française, anglaise, allemande) d'une forme identifiée est contrainte à l'inscription de cette dernière dans le réseau de défense, mais aussi à la vision diachronique fournie par l'analyse des plans directeurs à différentes dates et des Journaux de Marche des Opérations (JMO). En effet, durant les grandes offensives de Champagne ou d'Argonne de 1915 ou celles du Chemin des Dames à Berry-au-Bac en 1917, seules les premières positions allemandes ou françaises sont prises et réorganisées pour être englobées aux réseaux de défense. Cette détermination d'appartenance est également assujettie au manque d'informations, notamment sur les plans directeurs français ordinaires, conformément aux cahiers des charges de leur élaboration (Combaud *et al.*, 2016). Ainsi compte tenu de l'emboîtement des formes, dans le no man's land, il est souvent difficile d'attribuer une morphologie à l'un des belligérants.

Conclusion du chapitre 4

L'outil Lidar révèle de nombreuses exo-formes permettant de les inventorier et de les cartographier. Les signatures morphologiques sont très diversifiées et sujettes à discussion nécessitant des recherches annexes dans les documents d'archives (manuels d'instruction militaire, JMO) ou dans les plans directeurs pour contextualiser la forme.

À l'image de « paysages palimpsestes », les « polémo-formes » sont surimposées à d'autres, antérieures à la Grande Guerre (fortifications du système « Séré de Rivières ») qui ont conditionné leur organisation spatiale, mais sont aussi postérieures au conflit (désobusage, expérimentations militaires, exhumations). L'organisation spatiale et typologique des formes répond à la structure des réseaux de défense selon les positions. Sur le no man's land et dans les premières positions, les formes sont emboîtées et juxtaposées (cratères de mine décamétriques, tranchées, boyaux et impacts d'artillerie métriques). Par contre, dans les positions arrière, d'autres formes sont mises en évidence (cantonnements, abris, sites d'artillerie) et s'adaptent aux conditions géographiques locales (exposition, alimentation en eau, couvert végétal). Ces « polémo-formes » sont multi-formes (linéaires, ponctuelles) encore marquées en surface mais mal connues en profondeur (endo-formes). L'étude des traces morphologiques semble donc indissociable de leur situation au sein du dispositif de défense, ce que la numérisation et le traitement sous SIG des plans directeurs permettent.

Se pose alors un problème de la conservation de ces formes dans une vision géoprospective, même si des associations (Sommepy-Tahure, Cote 108, Main de Massiges, Vauquois) contribuent à l'entretien et à la valorisation de ces paysages. La détermination du degré de conservation des formes des réseaux de défense passe par une comparaison de l'état initial en 1918 sur les plans directeurs avec une détection automatique sur l'image Lidar permettant un inventaire exhaustif justifiant ainsi une typologie préalable.

Chapitre 5 : Conservation des tracés

et des formes

Introduction du chapitre 5

L'armistice signé en novembre 1918 laisse place à des hectares de terres dévastées, des villages détruits, des forêts complètement décimées par l'Artillerie. L'Etat français délimite alors des zones sur le front en fonction des dégâts occasionnés, la zone rouge étant la plus impactée et trop coûteuse à remettre en état. Les soldats encore mobilisés et les civils veulent retrouver leur terre et commencent, dans les zones les moins impactées, un nivellement général des « polémo-formes » (Fig. 5.1A). Ces vestiges nivelés après le conflit pour la remise en culture des terres dévastées sont aujourd'hui exhumés lors de fouilles ou diagnostics archéologiques. L'un des objectifs de ce chapitre est d'étudier le remplissage des « polémo-formes » de la Grande Guerre, tranchées et cratères d'obus. Le site de la Main de Massiges est utilisé pour appréhender l'évolution des « polémo-paysages » après-guerre jusqu'au faciès de grande culture d'aujourd'hui (étude diachronique). La zone de fouille archéologique de Cernay-lès-Reims à l'Est de la « Cité des Sacres », ville martyre de ce conflit, est utilisée pour analyser les remplissages des différentes formes par la pénétrométrie dynamique et les coupes mécaniques à travers les structures (tranchées, boyaux de communication et trous d'obus).

Alors que dans les plaines agricoles, aucune structure ne subsiste, momifiées depuis 100 ans, les forêts sont de véritables conservatoires des vestiges de la Grande Guerre (Fig. 5.1A et B). Ces traces morphologiques concernent les modifications de reliefs induites par les réseaux de défense (Devos *et al.*, 2015b ; Tadorelli *et al.*, 2016b), la guerre des mines (Stichelbaut *et al.*, 2016 ; Tadorelli *et al.*, 2017a), l'obusage et la vie militaire (Desfossés, 2015). Le second objectif de ce chapitre est de combiner une analyse spatiale sous SIG des plans directeurs et l'imagerie Lidar pour quantifier le taux de conservation des « polémo-formes » de la Grande Guerre sous couvert forestier. Les données Lidar sont étudiées de manière automatique par un algorithme de traitement associé à la caractérisation morphométrique pour faciliter ce travail de détection.

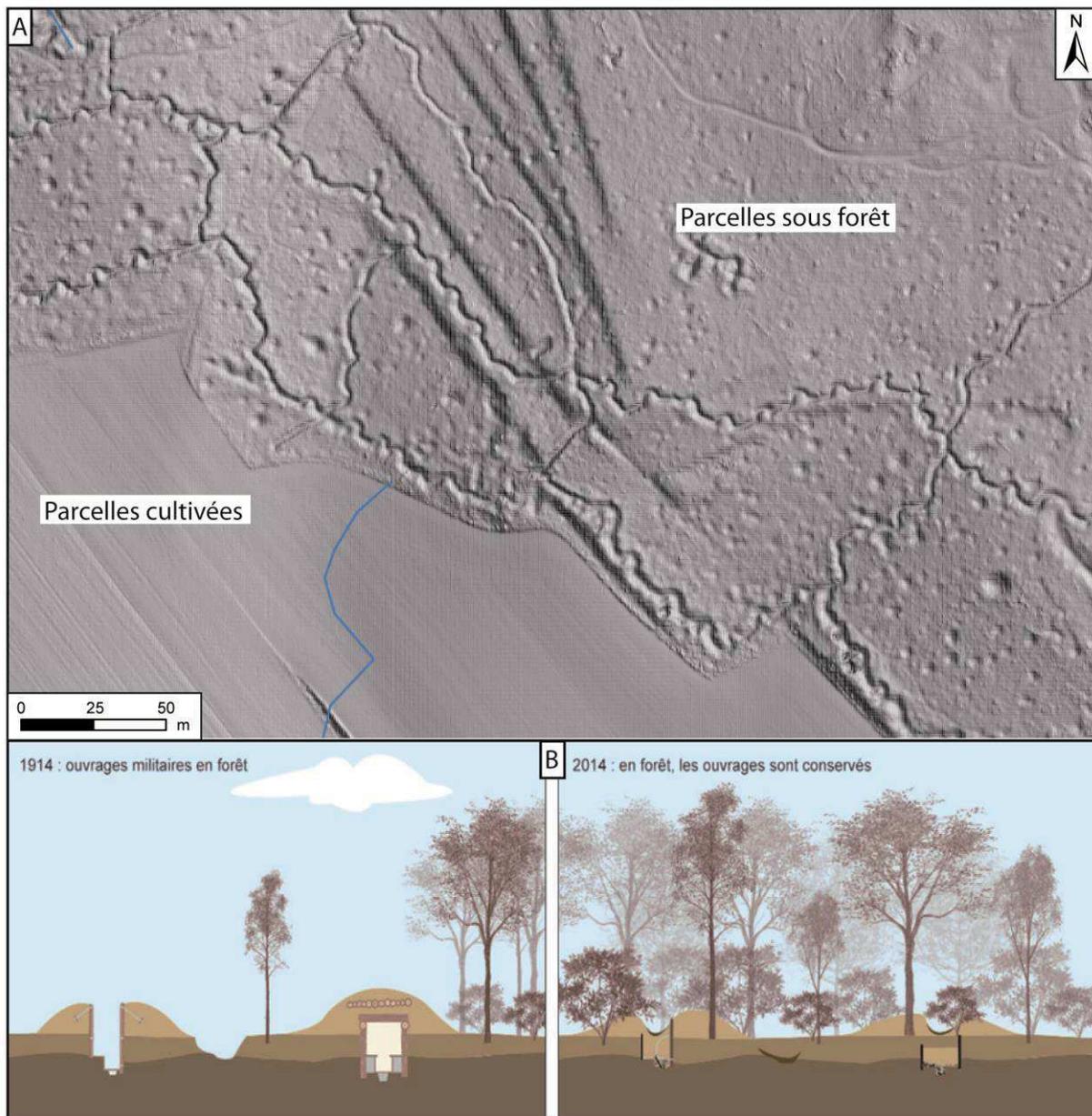


Fig.5.1: A - Dualité des parcelles forestières et cultivées en image Lidar près de Brimont. B - Schéma de la conservation des « polémo-formes » de la Grande Guerre sous forêt (Source : ONF, 2014).

5.1. Zone rouge

Les différentes « polémo-formes », tranchées, boyaux de communication et trous d'obus, ont largement bouleversé les 750 km du front des Flandres à l'Alsace et ont marqué l'imaginaire collectif. Sur les 3,3 millions d'hectares impactés par le conflit (Cadoux, 1926), 1,9 millions d'hectares sont dévastés. Le Ministère des Régions Libérées de l'État français délimite rapidement trois zones (verte, jaune et rouge) en fonction du degré de destruction, reportées sur des plans directeurs de destruction produits par les GCTA aujourd'hui édités par l'IGN. L'État s'engage à racheter les terrains où les frais de remise en culture excèdent le prix du terrain. La zone rouge discontinue, de 116 794 ha sur 10 départements, s'apparente à des

taches isolées (Vosges, Soissonnais) et forme également une bande d'environ 4 km de largeur en Champagne de Reims à l'Argonne, jusque dans les zones très disputées près de Verdun en rives gauche et droite de la Meuse (Fig. 5.2).

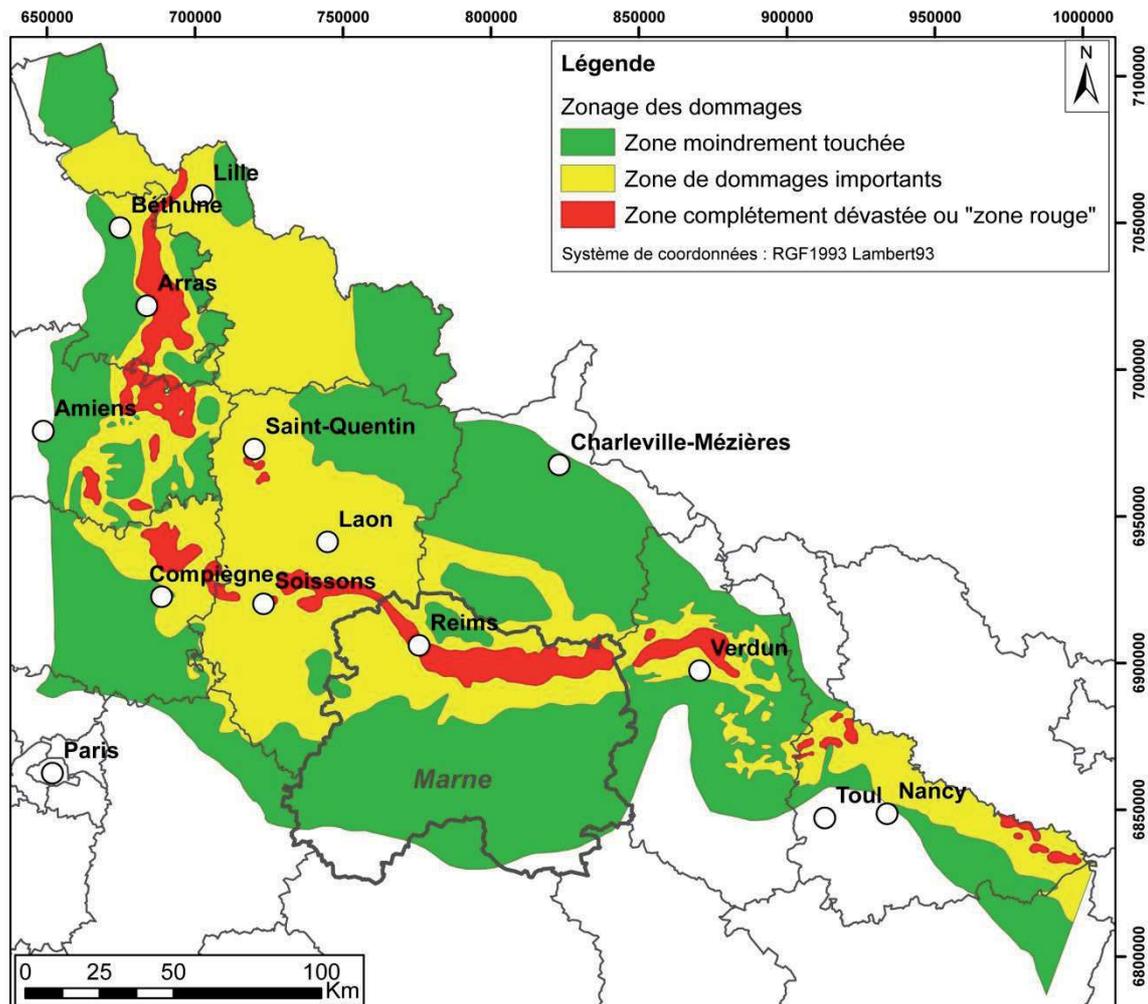


Fig.5.2: Carte de la zone rouge sur le front Ouest (Source : d'après Michel, 1932).

Cependant, cette zone rouge se résorbe très rapidement car elle passe de 116 794 ha en 1919, à 48 800 ha en 1926 et 42 304 en 1927 (Laval, 1927). Certains départements voient cette zone se réduire (19 000 à 750 ha dans l'Aisne), voire complètement disparaître (Pas-de-Calais, Nord). Seuls deux départements conservent nettement ce classement, la Marne qui passe de 23 300 à 16 993 ha, et la Meuse qui augmente sa superficie de 20 000 à 21 242 ha (Fig. 5.3). À partir de 1923, ces terrains appartenant à l'État depuis 1919 peuvent être mis aux enchères aux particuliers après des travaux de désobusage, de destruction des projectiles et d'enlèvement des réseaux de fils de fer. Ils peuvent également être destinés au boisement pour devenir des forêts domaniales. Enfin, certains terrains deviennent des camps d'instructions militaires (camps de Suippes, de Mourmelon, de Moronvilliers dans la Marne) ou être classés comme sites de mémoire dans un objectif de patrimonialisation.

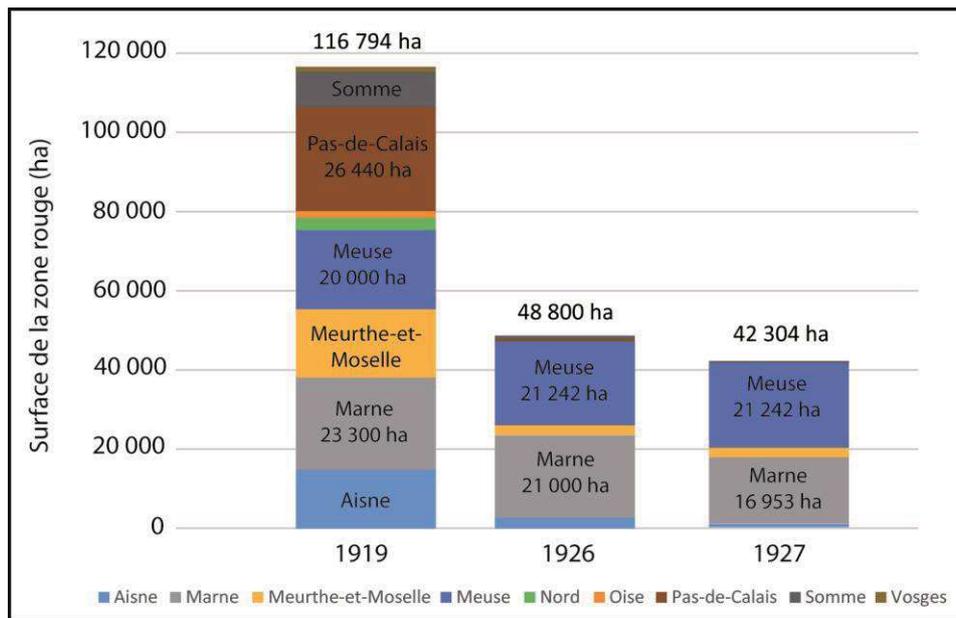


Fig.5.3: Graphique de l'évolution de la zone rouge

5.2. En zone cultivée : le remplissage des « polémo-formes »

C'est dans un contexte de grandes destructions d'infrastructures mais également naturelles et pédologiques que les habitants retrouvent petit à petit les terrains dévastés de la Grande Guerre. Par le biais de la zone rouge, l'État français exproprie des terres trop dévastées et trop coûteuses à remettre en état. Cependant, comme l'atteste la diminution exponentielle de la zone rouge en 8 ans, des terres agricoles sont rendues aux fermiers et aux paysans pour remettre rapidement ces terrains en culture. Les travaux consistent à nettoyer les terres jonchées d'objets métalliques sur les champs de bataille. D'ailleurs, l'économie de la récupération métallique dans les bourgs ruraux le long du front est très développée pour ramasser l'acier et le cuivre des obus afin de les revendre à des ferrailleurs. Les défenses accessoires, et plus particulièrement les réseaux de fils de fer, sont également enlevés et vendues, mais parfois poussées puis enterrées dans les tranchées, retrouvées en fouille archéologique. Environ 230 000 km² seront nettoyés de 1920 à 1927 sur le front occidental et 2 361 km² de réseaux de fils fer enlevés (Laval, 1927 ; Fig. 5.4).

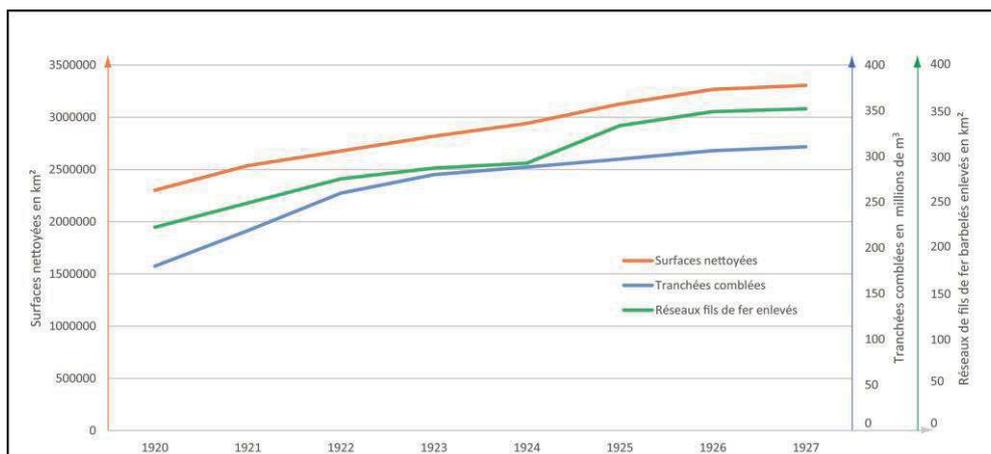


Fig.5.4: Graphique de l'évolution des surfaces nettoyées, des tranchées comblées et des réseaux de fil de fer enlevés de 1920 à 1927 (Laval, 1927).

Enfin, les réseaux de défense (tranchées et boyaux) doivent être comblés pour permettre de cultiver les parcelles agricoles. Le Ministère des Régions Libérées crée par arrêté du 13 décembre 1918, le Service des Travaux de Première Urgence (STPU) qui devient en août 1919, le Service des Travaux de l'Etat pour entreprendre les travaux de nivellement généralisé des sols impactés par les combats. Ces services sont composés de 60 000 civils, de 200 000 prisonniers de guerre (Fig. 5.4A) ainsi que des troupes coloniales, encore mobilisées pour l'armée française. Alors que les armées ont développé pendant le conflit des machines à creuser, locofouilleuses ou excavatrices (Fig. 2.15), elles créent après le conflit des machines pour reboucher les réseaux de défense. Combinés aux travaux manuels des STPU de 1920 à 1927, plus de 2 milliards de m³ de terres sont nécessaires à la remise en état des terrains agricoles (Fig. 5.4B). Le comblement des « réseaux de tranchées » aurait engagé plus de 300 millions de m³ (Laval, 1927) alors que l'extrapolation sur l'ensemble du front des calculs réalisés en Champagne-Ardenne à partir des plans directeurs a été estimée à 170 millions de m³. Ce volume n'intègre pas le comblement des trous d'obus, des entonnoirs de mines, des abris souterrains ce qui explique la différence constatée. De surcroît, l'extrapolation reste à *minima* car la zone de front en Champagne-Ardenne reste bien plus étroite que sur d'autres secteurs du front caractérisé par le retrait *Alberich*, responsable de la multiplication des réseaux de défense.

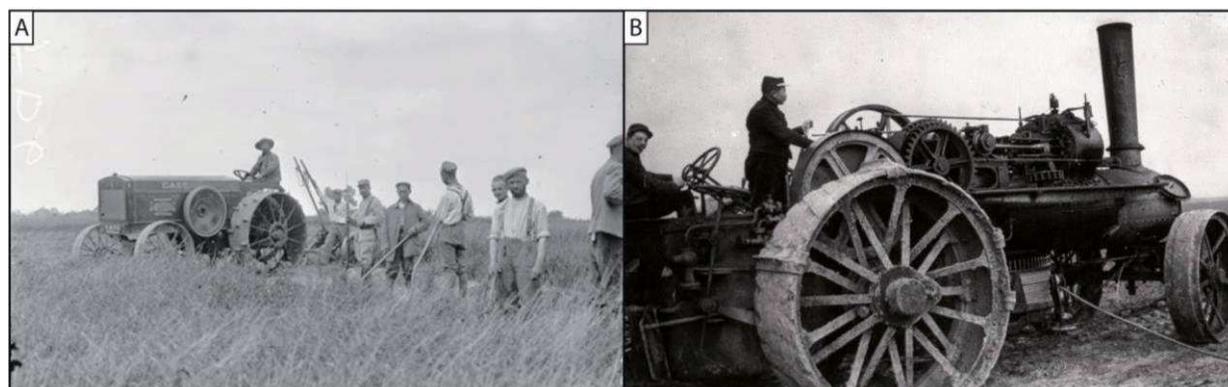


Fig.5.5: A - Photographie du remblaiement des tranchées par des prisonniers de guerre (Source : ECPAD). B - Photographie de la mécanisation du comblement des réseaux de défense (Source : BNF Gallica).

5.2.1. Evolution diachronique : exemple de Massiges

Ce comblement généralisé des « polémo-formes » n'est réalisé que progressivement sur la zone de front. À partir des plans directeurs (état initial) et de photographies aériennes pour l'investigation diachronique, une étude est réalisée sur le site de la Main de Massiges. Sur les 205 ha du site, 42 km de tranchées et de boyaux de 1918 sont digitalisés, traduisant une densité surfacique de 205 m/ha (Fig. 5.6A). Le site bouleversé, où la craie blanche affleure suite à la bombturbation et à la guerre des mines, est intégré à la zone rouge de 1919 (Hupy et Schaeztl, 2006). Cependant, avec la pression agricole, les tranchées et boyaux sont progressivement bouchés et nivelés. En effet, à partir de 8 photographies aériennes de 1936 à 2001 (Fig. 5.6B), la décroissance exponentielle du linéaire de tranchées témoigne bien de la remise en culture progressive (Fig. 5.6C). Cependant, au sortir de la Seconde Guerre Mondiale (1949), 30% des réseaux de défense sont encore présents sur le site. Sur les 42 km initiaux ne subsiste qu'un seul kilomètre en 2001. Depuis 2008, 500 m de tranchées rebouchées sont exhumées de leurs remblais par l'association de la Main de Massiges qui restaure et valorise le site, provoquant ainsi une légère inversion de la courbe. L'exemple de la Main de Massiges illustre le changement radical de paysage que connaît la Champagne sèche de 1918 à nos jours. En effet, aux paysages de savarts à moutons antérieurs au XVIII^{ème} siècle succède un boisement généralisé de pins qui sera intégralement défriché après la Seconde Guerre Mondiale pour une vocation de grandes cultures céréalières. Aujourd'hui, ces plaines crayeuses représentent une des trois régions nationales françaises les plus productrices de céréales et de betteraves sucrières, ainsi que l'industrie agroalimentaire associée.

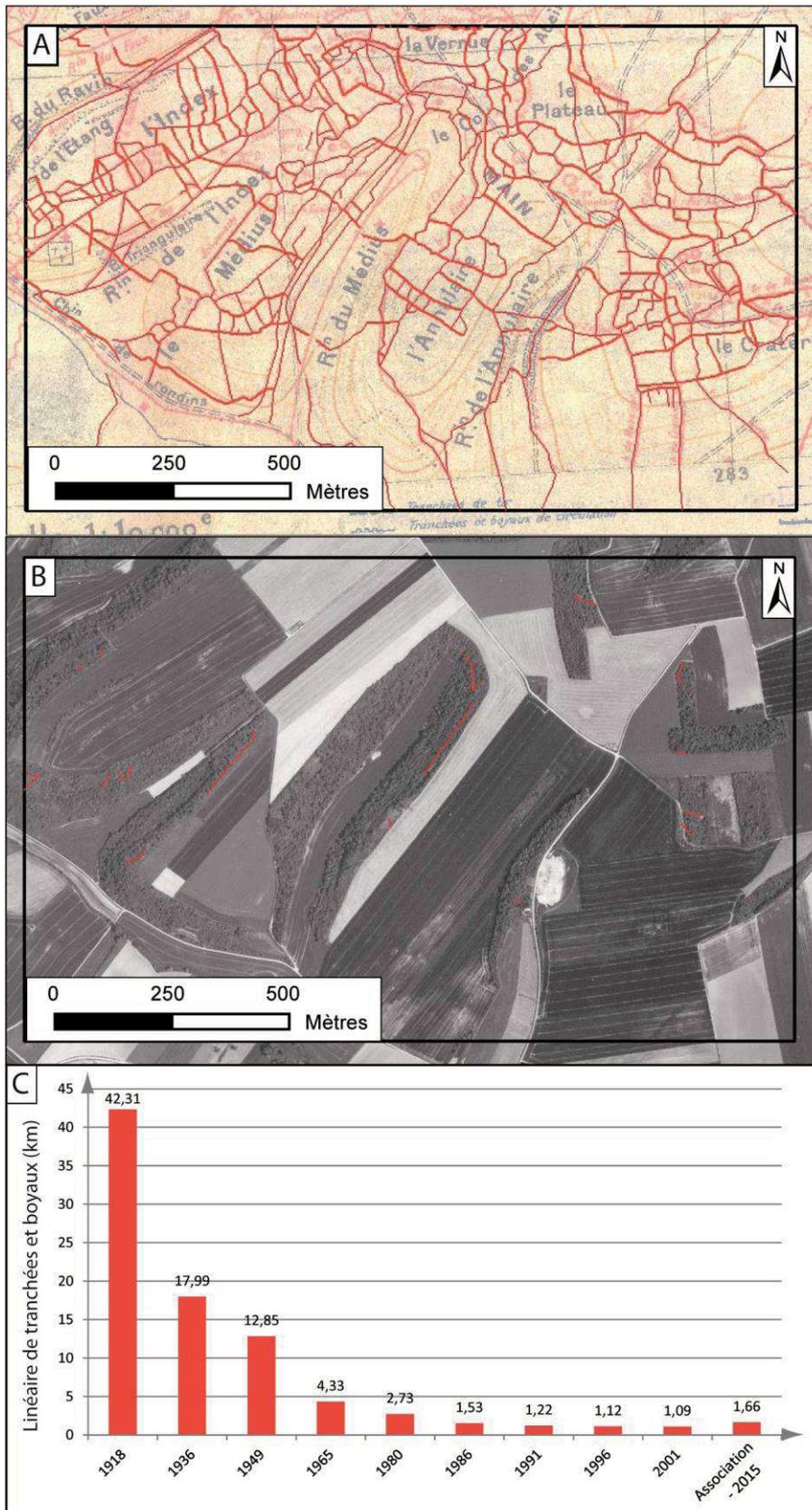


Fig.5.6: Évolution du linéaire de tranchées sur le site de la Main de Massiges depuis 1918. A - Linéaire de tranchées visible sur le plan directeur de Ripont du 6 janvier 1918. B - Linéaire de tranchées visible sur photographie aérienne en 2001. C - Évolution du linéaire de tranchées de 1918 à 2015.

versant sous le vent. Cette association de sols périglaciaires typique des craies de Champagne (Laurain *et al.*, 1995, 1997 ; Dutil et Ballif, 1968 ; Fig. 5.8A) explique des contrastes naturels de pénétrabilité. Le secteur de prospection s'intègre dans le no man's land à l'est de Reims, intégrant les premières positions françaises et allemandes. Les travaux de fouilles préventives sont réalisés dans le cadre d'un projet d'aménagement qui illustre l'expansion urbaine de Reims. Cette dernière passe de 13 km² d'emprise urbaine en 1918 de la seconde position française, à 43 km² en 2016 dans la première position. La surface d'investigation géophysique (2 ha) concerne le « secteur 10 » du secteur de fouille. Sur ce secteur intégralement inscrit en zone cultivée, aucune « polémo-forme » ne subsiste. L'objectif de cette démarche archéologique et géophysique est, d'une part de déterminer le volume de remplissage unitaire par hectare nécessaire au nivellement général des réseaux de défense et des autres « polémo-formes » de la Grande Guerre, d'autre part, il s'agit de connaître la nature des matériaux de remplissage.

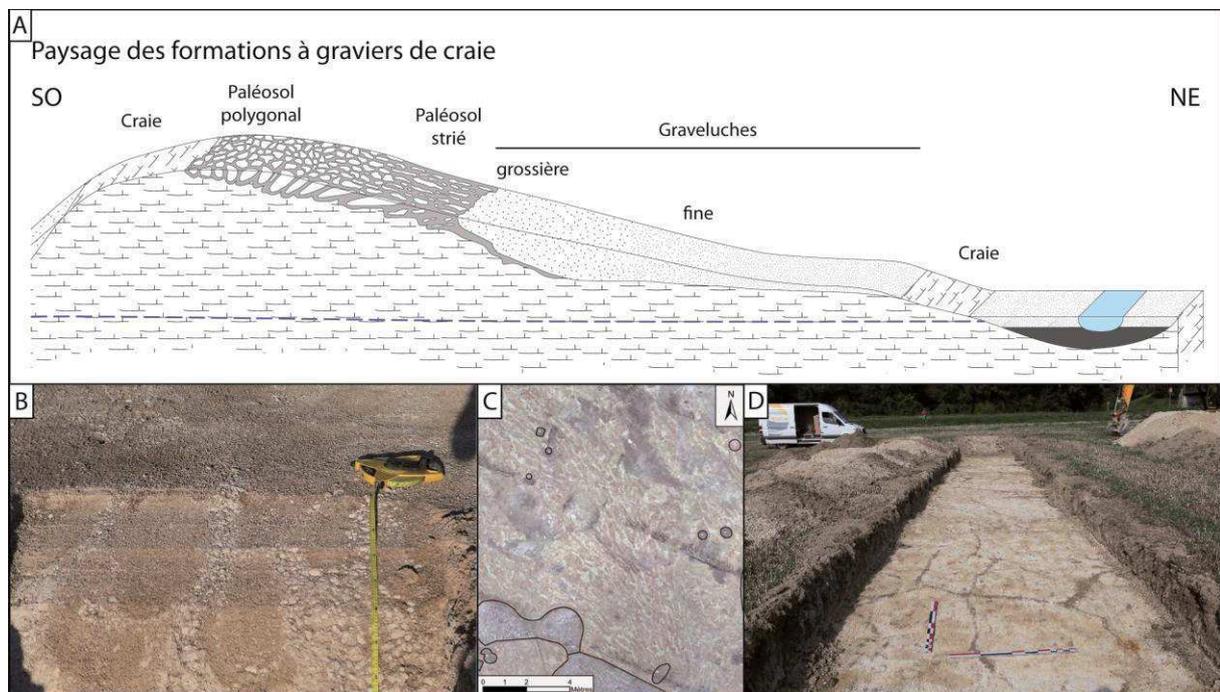


Fig.5. 8: A - Bloc diagramme des paysages à graviers de craie (d'après Laurain, 1995). B – Photographie de poche de cryoturbation sur le « secteur 10 » (Source : Cliché : Taborelli P.). C – Sol strié en vue drone sur le « secteur 10 ». D – Sol strié en diagnostic archéologique à Puislieux (Source : Cliché Devos A.).

L'étude géophysique est réalisée par pénétrométrie dynamique à énergie variable (Fig. 5.9). Cet outil est un système portable permettant d'identifier, par la variation de résistance à l'enfoncement, l'épaisseur des différents remplissages des structures. Pour chaque coup de marteau, l'appareil mesure automatiquement l'enfoncement et la résistance du matériau traversé par la « formule des Hollandais » (Maquaire et al, 2002). Chaque sondage s'accompagne d'un sondage d'étalonnage à proximité de la structure archéologique testée pour l'interprétation des pénétrogrammes. Un profil vertical de résistance est réalisé ainsi qu'une coupe à la pelle mécanique faisant l'objet d'un levé. Trois profils verticaux et leur profil d'étalonnage ont été réalisés dans trois « polémo-formes » différentes : tranchée de tir, boyau de communication et trou d'obus.

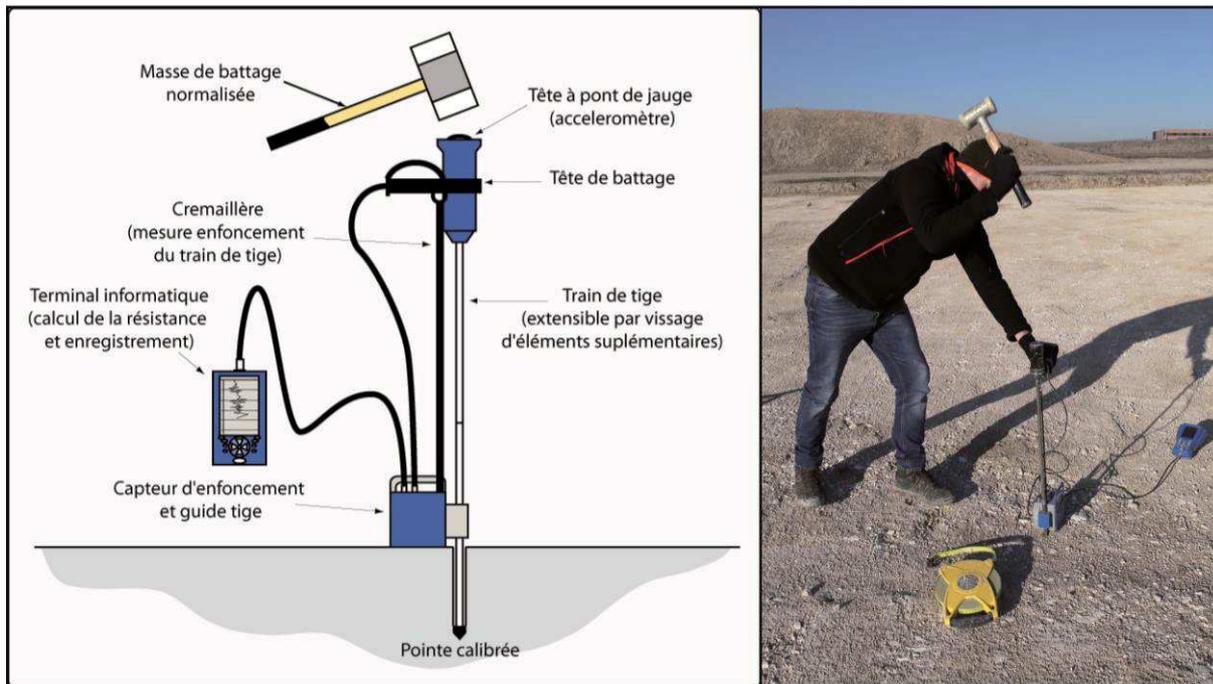


Fig.5.9: Principe de la pénétrométrie dynamique (d'après Maquaire et al., 2002) en zone de fouille archéologique sur le « secteur 10 » du « Bas de la Noue Saint-Rémi » (Source : Cliché Devos A.).

Les réseaux de défense français sur le « secteur 10 » recoupent les structures archéologiques plus anciennes et s'y superposent (Fig. 2.16). Le tracé des réseaux de défense est souligné par un remblai hétérométrique de blocs de craie mélangés avec une matrice limono-argileuse bien marquée dans un encaissant crayeux remarquablement blanc. La première position française avec sa tranchée de tir et de soutien est reliée par des boyaux de communications pour le ravitaillement en vivres, en munitions et la circulation des hommes. Associés à la tranchée de tir, des boyaux de communications partent vers le Nord-Est et aboutissent à des petits postes avancés ou postes d'écoute dans le no man's land (Fig. 5.10).

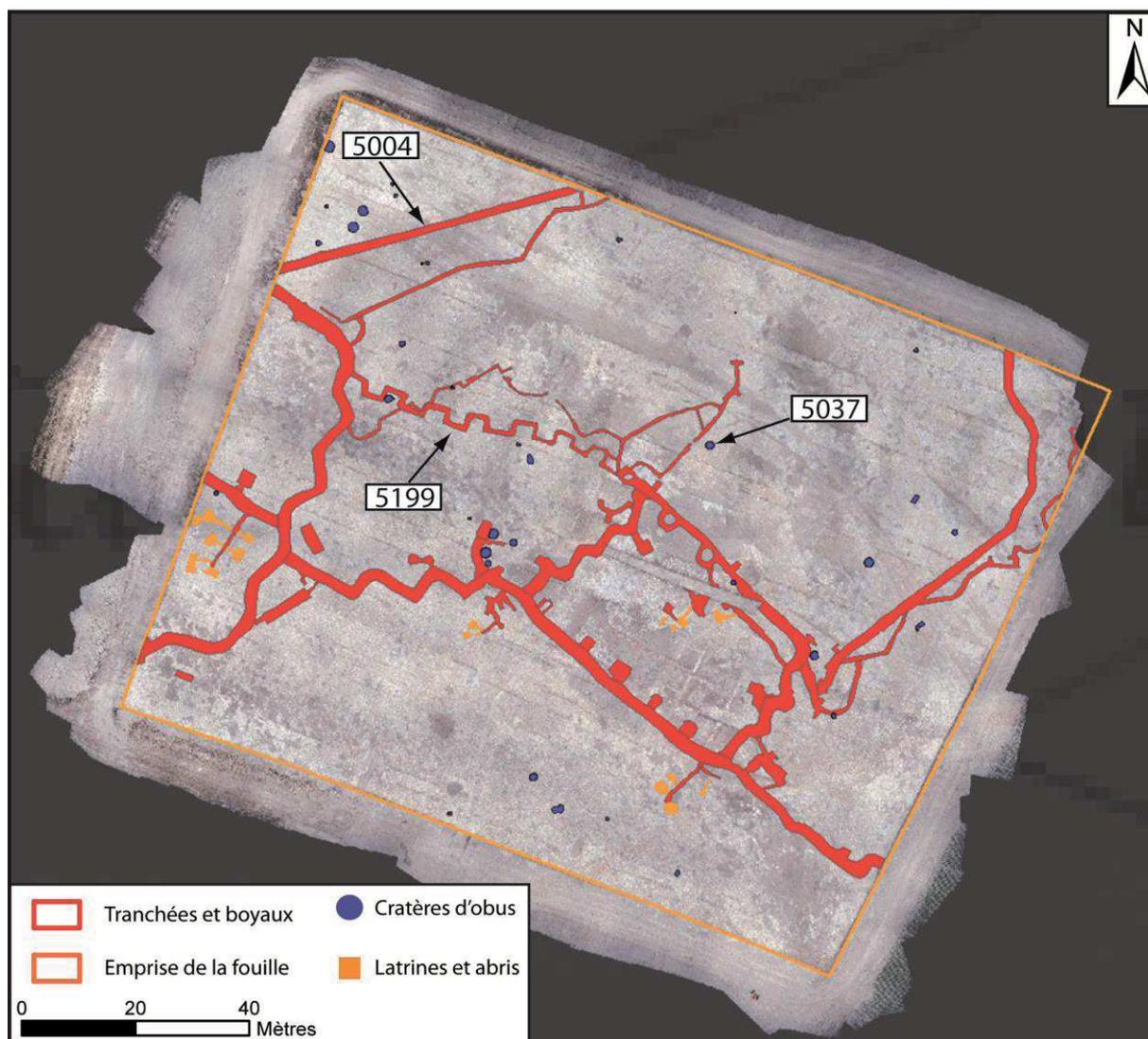


Fig.5.10: Prise de vue aérienne par drone de la fouille de Cernay-les-Reims du « secteur 10 » et réseaux de défense français (tranchées, boyaux, latrines et trous d'obus).

Avec un linéaire de tranchées et de boyaux de 1 161 m sur 2 hectares, la densité surfacique (580 m/ha) calculée par l'approche archéologique est 3 fois supérieure à celle calculée à partir des plans directeurs qui semblent donc styliser, voire simplifier la réalité. Cette observation souligne le problème scalaire de détermination des volumes remblayés qui concerne à la fois les réseaux de défense, leurs objets connexes (abris, latrines, petits postes...) et les entonnoirs d'obus. Cela permet d'expliquer le différentiel de volume nécessaire au remblaiement des « polémo-formes » de la Grande Guerre calculé à partir des plans directeurs (170 millions de m³) et celui du rapport Laval de 1927 (300 millions de m³).

En effet, sur la zone prospectée, 27 structures (latrines et abris) sont retrouvées sur le site, déterminant une densité surfacique de 13,5 objets/ha. La discrimination des cratères d'obus par rapport aux autres objets archéologiques (silos, trous de poteau) passe par la présence d'éclats tapissant les parois des entonnoirs, voire la conservation de la fusée de l'obus.

Trente-sept impacts d'un mètre de profondeur en moyenne traduisent une densité moyenne surfacique de 18,5 trous d'obus/ha (Tab. 5.1). Ce chiffre est synonyme d'un secteur calme du

front, sans offensive durant 4 années de conflit, par rapport à des sites plus disputés comme avec 54 impacts/ha à Berry-au-Bac (Taborelli *et al.*, 2017a), 51 impacts/ha à Servon en Argonne (Brenot *et al.*, 2017), 300 obus/ha dans la Somme (Keegan, 2013) ou 3 000 obus/ha lors de la bataille de Verdun (Hupy and Schaetzl, 2006). Les cratères d’obus du pilonnage allemand sont le résultat d’obus percutants et morphogènes pour la destruction des réseaux de défense français.

Cette terre remuée pour le nivellement des réseaux de défense, des infrastructures de vie (abris et latrines) ou des entonnoirs d’obus représente un volume de 1 142 m³/ha, similaire aux études sur la gaize d’Argonne avec 1 000 m³/ha, réalisées également dans un secteur calme du front (Tab. 5.1). Sur les 2 ha du « secteur 10 », 1 825 m² constituent un « polémo-paysage » remblayé traduisant une densité surfacique de 912 m²/ha de structures archéologiques de la Grande Guerre qui a nécessité *a minima* un remblaiement de 1 142 m³/ha, correspondant approximativement aux mêmes résultats calculés à partir de l’approche Lidar (Brenot *et al.*, 2017).

Entités	Longueur (L)	Aire (A)	Nombre (N)	Volume (V)	Ratio A/S	Ratio N/S
Structure archéologique	-	1623 m ²	474	-	8,12%	-
Tranchée française	334 m	669 m ²	12	734,80 m ³	3,35%	-
Boyau français	827 m	1003 m ²	39	1405,90 m ³	5,02%	-
Latrines et abris	-	107 m ²	27	128,40 m ³	0,54%	13,5
Cratères d’obus	-	46 m ²	37	15,33 m ³	0,23%	18,5
Total	1161 m	3448 m ²	616	2284,43 m ³	17,24%	-

Tab. 5.1 : Indices morphométriques des structures archéologiques du « secteur 10 ».

L’analyse des remplissages des trois « polémo-formes » consiste à traverser la structure avec un pénétromètre dynamique pour atteindre le matériel parental (craie saine fracturée) puis de corroborer les résultats par un sondage réalisé avec une pelle mécanique. La tranchée de tir (5199) présente un pénétrogramme à quatre niveaux (entre la surface et 0,10 m de profondeur, les résultats ne sont pas considérés car cet horizon correspond au sol tassé par les engins de terrassement) alors que la pénétrabilité en terrain naturel (à l’extérieur de la tranchée) diminue corrélativement au degré d’altération de la craie (Fig. 5.11) :

- Dans la majorité du remplissage, de 0,10 m à 1,05 m (niveau 1), la résistance à l’enfoncement est relativement constante et comprise entre 2 Mpa et 5 Mpa avec des remblais hétérométriques crayeux.
- De 1,05 m à 1,55 m (niveau 2), la résistance diminue entre 2 Mpa et 3 Mpa, correspondant à une couche de remblais limono-argileux
- De 1,55 m à 1,60 m (niveau 3), le passage d’une résistance de 2 Mpa à 10 Mpa traduit une fine couche de craie tassée.
- Au-delà de 1,60 m, la résistance à l’enfoncement atteint celle de l’encaissant crayeux, fracturé avec une résistance de 5 à 9 Mpa.

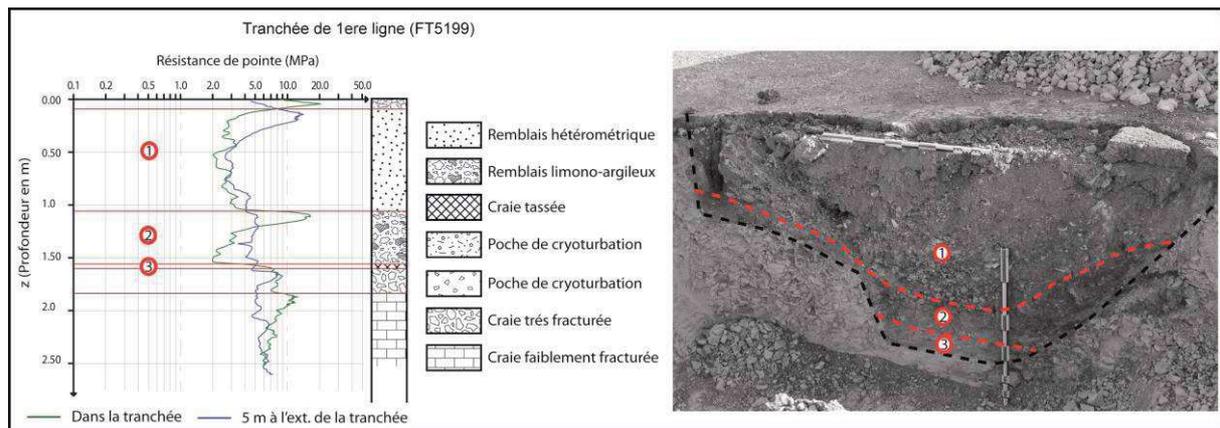


Fig.5. 11: Profils pénétrométriques à travers la tranchée 5199.

Le pénétrogramme du boyau (5004) présente seulement deux niveaux, (sans niveau limono-argileux), avec un remblaiement hétérométrique crayeux dans les mêmes gammes de pénétrabilité que dans la tranchée (niveau 1) qui repose sur un niveau de craie tassée, plus épais d'environ 20 cm (Fig. 5.12).

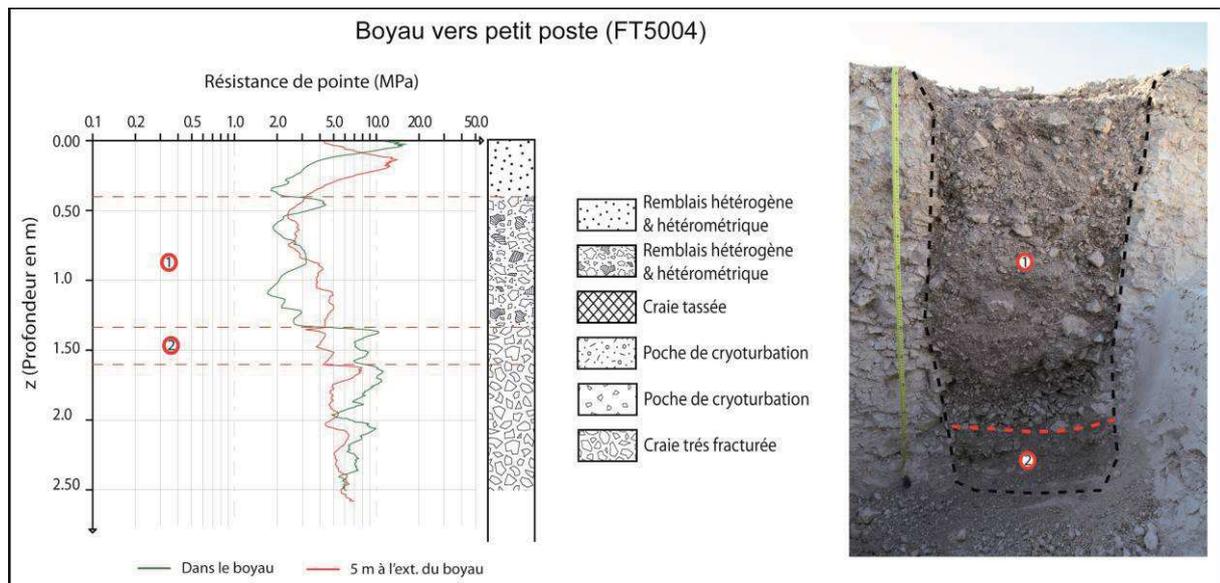


Fig.5.12: Profils pénétrométriques à travers le boyau 5004.

Le trou d'obus (5037) au Nord-Ouest de la fouille de 2 m de diamètre et de 0,60 m de profondeur présente les mêmes séquences de remplissage. On retrouve le niveau hétérométrique (niveau 1) et le niveau limono-argileux (niveau 2). Par contre, en dessous, que ce soit sur les bordures ou au fond de l'entonnoir, les valeurs de pénétrabilité se rejoignent entre 4 et 7 MPa, correspondant à une auréole de craie fracturée (Fig. 5.13).

La transition entre le fond du cratère et la craie saine fracturée s'observe de 0,60 à 0,70.

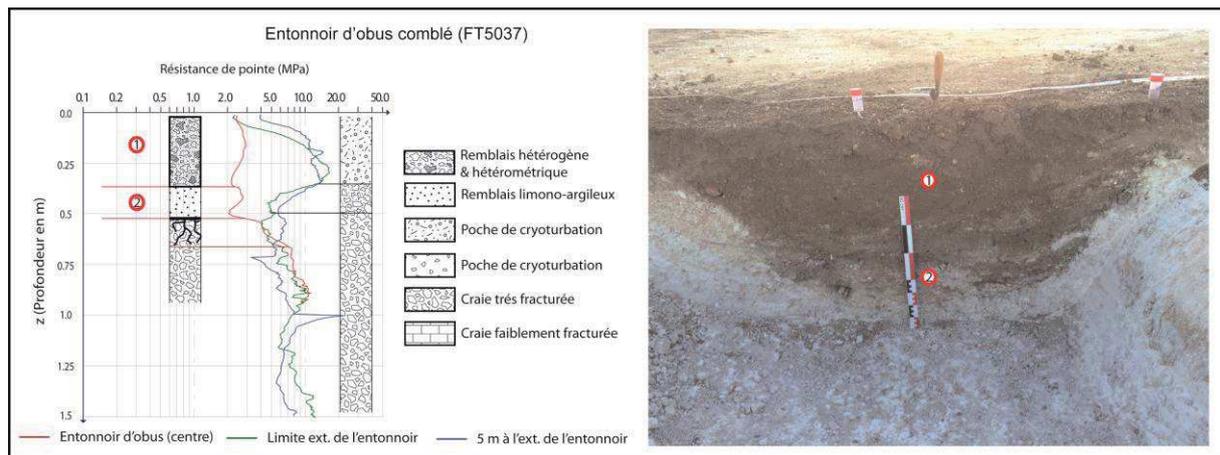


Fig.5.13: Profils pénétrométriques à travers le cratère d'obus 5037.

Dans la tranchée (5199) et le boyau de communication (5004), une couche peu épaisse de craie dure et résistante (niveau 3) s'explique par un tassement au fond de la structure avec la circulation des soldats (banc de marche). Le remblaiement limono-argileux sus-jacent dans la tranchée provient de l'atterrissement naturel des particules fines post-conflits (niveau 2) puis d'un remblaiement hétérométrique et crayeux venant du parados et de la crête de feu avec divers objets métalliques d'origine anthropique (niveau 3). Cette tranchée a donc subsisté un court moment après le conflit, pour être finalement comblée avec les déblais de la tranchée ainsi que les objets et déchets militaires avoisinants. Le boyau ne présente pas de couche limono-argileuse post-conflit. Soit le boyau fut comblé pendant le conflit, pour enterrer des fils téléphoniques et électriques ou par volonté de l'État-Major de réduire le linéaire de tranchée dans ce secteur, soit très rapidement après le conflit, ne permettant pas un comblement naturel de la forme. Le trou d'obus avec son tapissage des parois par des éclats est remblayé par une couche limono-argileuse et crayeuse *syn* et post-conflit puis par un remblaiement limono-argileux de terre probablement apportée. Le remblaiement post-conflit est d'autant plus important pour un entonnoir d'obus déblayé, sans bourrelet périphérique. En effet, pour l'entonnoir remblayé, son comblement partiellement réalisé par la retombée de la gerbe est facilité par la présence d'un bourrelet périphérique qui sera nivelé pour la remise en culture. Une résistance plus faible sous le trou d'obus que le pénétrogramme test met en valeur le globe de fracturation créé par le choc et l'énergie délivrée par l'obus sur 0,10 m.

L'approche archéologique en zone cultivée montre que les « polémo-formes » de la Grande Guerre fossilisées par leur remplissage sont bien plus nombreuses et diversifiées que celles déterminées à partir de l'analyse spatiale des plans directeurs. La remise en culture s'accompagne donc d'un grand remuement des terres qui commence par un nivellement généralisé en utilisant les déblais indigènes au réseau de défense (crête de feu et parados) déterminant une déstructuration physique des sols et des anomalies stratigraphiques.

5.3. En zone forestière : Taux de conservation

Le nivellement généralisé en milieu de grandes cultures diffère nettement des zones forestières, véritables conservatoires des "polémo-formes" (Fig. 5.1A). Ces modifications topographiques induisent des changements des conditions géomorphologiques contrastées dans l'espace selon l'échelle considérée. En effet, si à petite échelle les reliefs restent inchangés, à grande échelle, les impacts sont tels que la Grande Guerre est considérée comme « morphogène » ou s'intègre pleinement dans le système anthropo-morphogénétique des sociétés (Hupy et Koehler, 2012). À ce titre, elle a généré des polémo-paysages de champs de bataille qui ont lourdement marqué la conscience collective (Amat, 2015) sans pour autant avoir fait l'objet d'analyse spatiale. C'est pourquoi ces études menées sur ces « polémo-formes » de la Grande Guerre ont connu un développement important depuis les premiers vols Lidar, permettant de prospecter virtuellement les champs de batailles. Dans un contexte scientifique et quantitatif, non plus conceptuel et visuel (chapitre 4), le recours à la télédétection aéroportée permet de mesurer la résilience des polémo-formes non nivelées sous couvert forestier. L'emploi du Lidar comme méthode quantitative s'intègre dans la mouvance pluri-disciplinaire autour de la Grande Guerre en archéologie (Saey *et al.*, 2013 ; Stichelbaut *et al.*, 2016 ; Gheyle *et al.*, 2016, Brenot *et al.*, 2017)), dans le domaine environnemental (Bausinger *et al.*, 2007 ; Hupy and Schaeztl, 2008 ; Hupy and Koehler, 2012) ou géomorphologique (Taborelli *et al.*, 2017a). À l'aide du Lidar, ces études mettent en évidence, à la fois l'effet anthropique du grand remuement des terres pendant le conflit, mais également celui du nivellement naturel et programmé du comblement des structures ou impacts de la Grande Guerre. Les plans directeurs et l'outil Lidar permettent alors de contextualiser de la meilleure des façons un site d'étude pour comprendre et déterminer les différentes positions et réseaux de défense alliés et allemands (Gheyle *et al.*, 2012 ; Brenot *et al.*, 2017).

Trois méthodes se sont succédées pendant ces trois années de recherche. La première consiste à interpréter de manière visuelle et manuelle les images Lidar en digitalisant les « polémo-formes ». Cette méthode ne peut être réalisée que sur de petites zones d'étude (Berry-au-Bac) car cette digitalisation est longue et fastidieuse. La seconde méthode permet de mettre en évidence les « polémo-formes » par un traitement automatique puis un filtrage manuel des résultats, testée en Argonne à Servon. Enfin, ce même traitement est associé à une caractérisation morphométrique des formes (troisième méthode) afin d'obtenir une cartographie précise des « polémo-formes » détectées et interprétées automatiquement en Argonne sur une bande Nord-Sud, traversant l'ensemble des réseaux français et allemands. Comparées à la digitalisation des plans directeurs, ces trois méthodes permettent de calculer un taux de conservation des réseaux de défense de la Grande Guerre, de quantifier des densités d'impacts d'obus et de replacer ces formes dans l'organisation du front.

5.3.1. Détection visuelle et manuelle à Berry-au-Bac

La Cote 108 s'inscrit dans le premier rideau défensif occupé par les Allemands dès 1914, alors que les Français occupent son flanc Ouest. À ce titre, elle contrôle la percée cataclinale de l'Aisne ce qui explique l'âpreté des combats dans ce secteur pour la lutte de cet observatoire (Fig. 3.4). Sur ce site de la Cote 108, l'image Lidar (Fig. 5.14A) met en évidence trois types de morphologies associées à la Grande Guerre : les tranchées et boyaux, les entonnoirs d'obus, les cratères de mine (détaillés dans le chapitre 6).

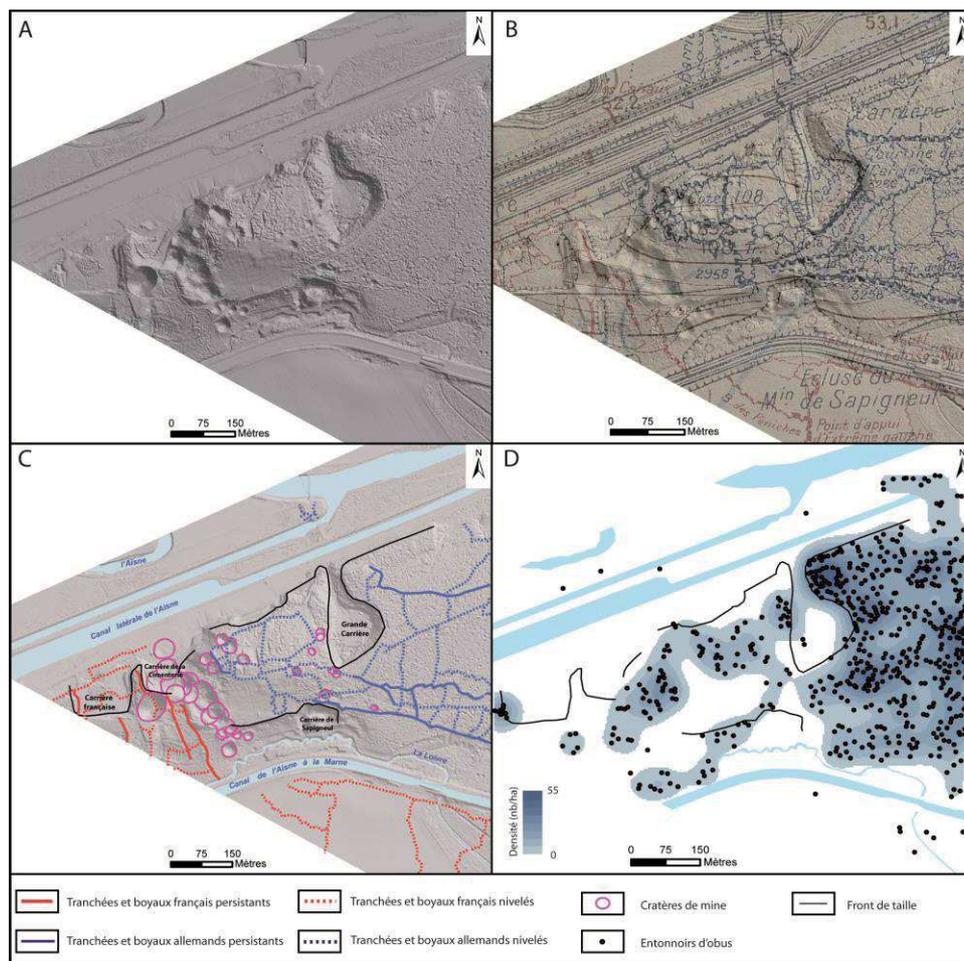


Fig.5.14: Situation et interprétation du secteur de la Cote 108. A - Image Lidar brute. B - Plan directeur et image Lidar brute. C - Formes (Tranchées, boyaux, cratères de mines) nivelées et persistantes. D - Densité des entonnoirs d'obus.

Après leur digitalisation, les tranchées et boyaux constituent un développement de 1,87 km en image Lidar sur les 8,5 km recensés sur les plans directeurs (Fig. 5.14B) déterminant un taux de conservation de 22% (Tab. 5.2). Cependant, ce dernier cache de fortes disparités spatiales puisqu'en zone cultivée aucune tranchée ne subsiste (comblement ou nivellement généralisé) alors que sous forêt, ce taux est dépendant de la gestion sylvicole (nivellement généralisé dans les parcelles de repeuplement entre la Carrière de Sapigneul et la Carrière de la Cimenterie, creusement de layons forestiers) et du degré de l'obusage (Fig. 5.14C). Leur profondeur moyenne comprise entre 0,5 et 1 m induit un comblement par sédimentation de moitié en un siècle.

Surface totale= 79 ha	Plan Directeur	LiDAR	Taux conservation %
Tranchées-boyaux (km)	8,50 D=108 m/ha	1,87 D=24 m/ha	22
Tranchées-boyaux (Densité moyenne)	108 m/ha	24 m/ha	/
Cratères de mine (effectif)	11	48	>100%
Entonnoirs d'obus (effectif)	Non renseigné	607 impacts/57ha	/
Entonnoirs d'obus (densité maximale)	Non renseigné	54 impacts /ha	/

Tab. 5.2 : Formes de la Grande Guerre sur le site de la Cote 108.

Sur la zone d'étude de la Cote 108, 607 impacts d'obus sont recensés sur l'image Lidar, ce qui traduit une densité moyenne de 8 impacts/km². Mais cette densité moyenne fausse une réalité plus complexe car sur les 79 ha couverts par le Lidar, 6,8 ha sont en eau (cours d'eau, canaux de navigation, plans d'eau), et 15 ha ont fait l'objet d'un nivellement généralisé. La cartographie des densités d'impacts (Fig. 5.14D) témoigne d'une grande hétérogénéité spatiale (de 0 à 54 impacts/ha) inhérente, non pas aux conditions de tirs d'artillerie, mais au couvert végétal et aux pratiques agricoles et sylvicoles. En culture, aucun impact ne subsiste (nivellement). Par contre sous forêt, la densité est bien plus forte notamment à l'Est de la Grande Carrière dans la forêt domaniale de Sapigneul.

Grâce à l'image Lidar, la densité maximale de 54 impacts/ha à la Cote 108 rejoint la valeur moyenne de 61 obus/ha observée en Argonne à Servon (Brenot *et al.*, 2017) et celle de 69 obus/ha à Verdun (Hupy et Schaetzel, 2006). Cependant, ces densités sont rarement calculées sur des surfaces identiques. Le comptage légitime donc l'utilisation d'un algorithme d'automatisation de détermination des entonnoirs d'obus. Lorsque le marmitage est trop intense, un modelé en « peau d'orange » lié à la coalescence des entonnoirs d'obus (Amat, 2015) ne permet pas de distinguer les entonnoirs comme à Verdun ou à l'Est de la Grande carrière sur le site de la Cote 108.

5.3.2. Détection automatique à Servon

Dans cette étude, une approche quantitative par détection automatique des données Lidar du réseau de première ligne des premières positions allemandes et françaises est proposée en forêt d'Argonne. Une exploration archéologique et le survol permettent d'étudier les volumes sédimentaires de trois entités superficielles : les tranchées, les déblais du parapet et parados et les cratères d'obus. Croisé à la digitalisation des plans directeurs, un taux de conservation est présenté pour cette zone d'étude.

5.3.2.1. Le site d'étude

Le site de l'étude est situé sur la commune de Servon-Melzicourt (Marne, France), dans les Bois de la Gruerie qui constituent la lisière occidentale de la forêt d'Argonne (Fig. 5.15). La ligne de front s'établit sur les crêtes et ravins du massif argonnais à partir de l'automne 1914, fluctuant au gré des combats qui perdurent jusqu'à l'été 1915 (Buffetaut, 2011 ; Bernède, 2015). Dans le secteur d'étude, la ligne de front se fige jusqu'en septembre 1918. Les unités françaises occupent alors une position topographique dominante sur les positions allemandes. L'occupation du bas de versant par les Allemands leur permet d'y établir plusieurs ouvrages

souterrains (bunkers) à l'abri de l'Artillerie française. Après trois années de face-à-face, les régiments américains franchissent le 26 octobre 1918, pour la première et dernière fois, le no man's land durant l'offensive Meuse-Argonne (Lengel, 2014).

Les trois années d'occupation du site ont permis à chacun des camps, allemand et français d'établir une première position articulée autour de 3 lignes principales de tranchées. Sur la zone de l'étude, les plans directeurs permettent de constater que ce réseau est déjà constitué au moins depuis la fin de l'année 1915, autour du no man's land, large dans la zone d'étude de 35 à 70 m (GQGA, 1916). Sa cartographie est achevée au cours du printemps/été 1916. Dans les années suivantes, le réseau se fortifie et s'enrichit en aménagements secondaires, conduisant à une anthropisation extrême de la surface topographique encore perceptible aujourd'hui sur la quasi-totalité de la forêt d'Argonne (Desfossés, 2015).

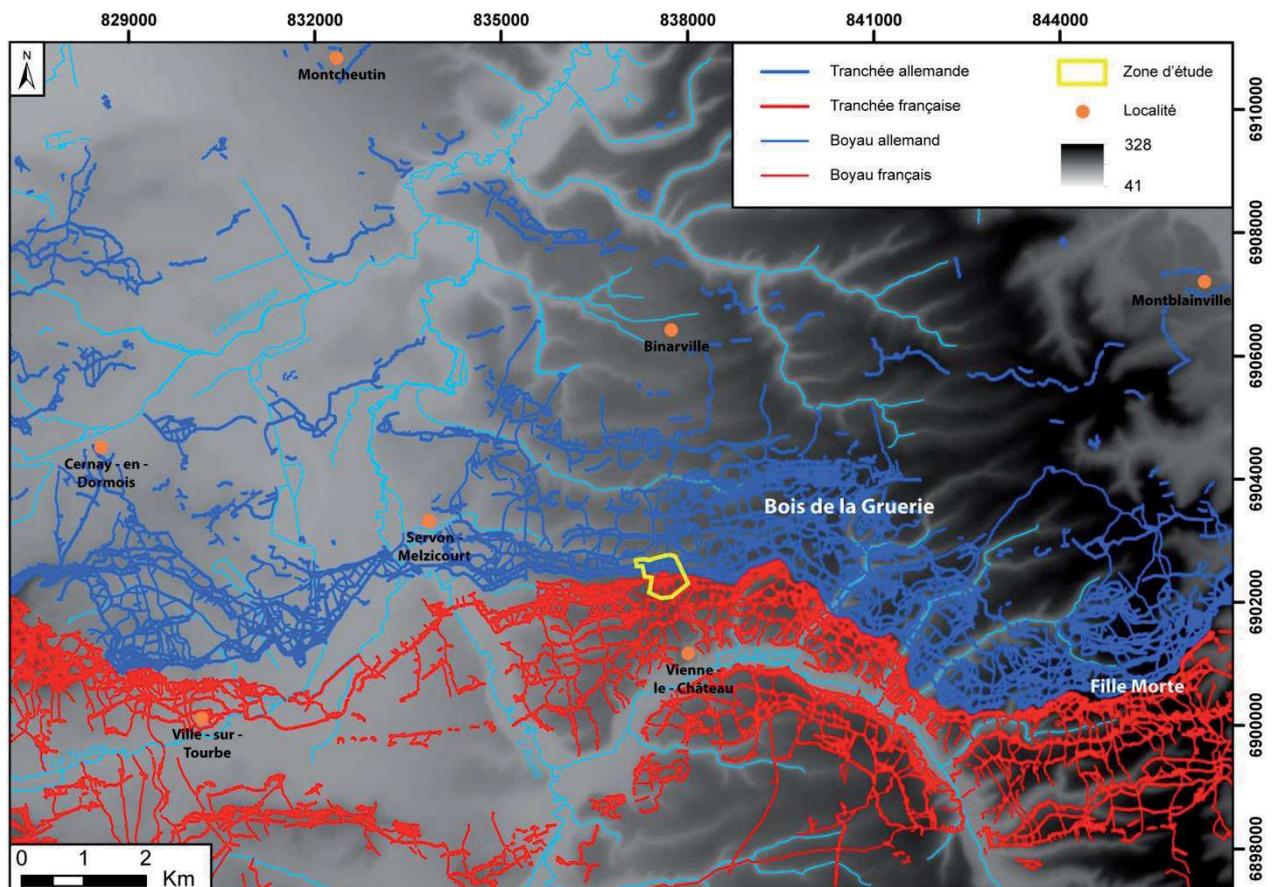


Fig.5.15: Carte de situation de la zone de fouille dans le réseau de défense (Brenot et al., 2017)

L'aire considérée pour cette étude s'inscrit dans les premiers rideaux défensifs français et allemands. Elle est bornée au Nord par la troisième ligne allemande qui suit un talweg (vallée Dieusson) situé entre 150 et 200 mètres du no man's land ; au Sud, la troisième ligne française est située entre 200 et 350 m du no man's land, le long d'une ligne de crête. À l'Ouest, la limite correspond à l'ancienne lisière des Bois de la Gruerie de 1914. À l'Est, une délimitation de la zone d'étude a été tracée afin de la circonscrire dans un polygone large de 500 m environ. La forêt ayant été replantée à partir des années 1925, le champ de bataille a été totalement fossilisé sous une épaisse couverture de taillis-futaies, exception faite de travaux forestiers et routiers qui ponctuellement ont arasé les vestiges. À l'ouest de la zone, le sol a subi des opérations de nivellement qui ont engendré une disparition quasi-complète des

tranchées.

Considérant la fenêtre d'étude et la répartition du réseau en fonction de sa nationalité, la surface totale est de 29,88 ha, en excluant la route reliant les villages de Binarville à Vienne-le-Château (Route Départementale 63), traversant et oblitérant le site du Nord-Ouest au Sud-Est. La surface du réseau étudié est plus grande côté français (15,59 ha) que côté allemand (11,37 ha). Le no man's land occupe 2,97 ha, soit 10 % du terrain. L'intégralité du secteur d'étude s'inscrit dans la « gaize d'Argonne », dénuée de formes karstiques (dolines) susceptibles de perturber la lisibilité des structures archéologiques (Brenot *et al.*, 2014, 2017).

5.3.2.2. La méthodologie de la détection automatique

Une opération de survol de la zone d'étude avec acquisition Lidar a été réalisée au début du printemps 2015, avec une résolution de 8 points/m², par le cabinet de géomètres-experts Guelle&Fuchs (Forbach, France). Cette cartographie a permis d'établir grâce au logiciel *CloudCompare* un MNT (modèle numérique de terrain) d'une résolution de 1 m²/pixel du réseau conservé sous le couvert forestier, un siècle après l'abandon du site.

Afin de pouvoir étudier et quantifier le réseau des trois premières lignes du front, le MNT obtenu par Lidar a été numériquement traité sous *QuantumGIS* en utilisant le système de projection RGF 93 Lambert 1993. L'objectif de ce traitement est de distinguer les « polémoformes » de 1914-1918 des autres reliefs : topographie naturelle, routes et chemins, talus, nivellement, agriculture, indépendamment de leur longueur d'onde spatiale. Cette distinction est facilitée par la forte résilience des vestiges dans la topographie actuelle. Cette procédure permet aussi de s'affranchir du signal lié à la topographie naturelle (rugosité naturelle du terrain) et à l'erreur de l'enregistrement Lidar, dont l'amplitude demeure inférieure à celles des vestiges de la Grande Guerre.

Pour ce traitement, la méthode choisie s'est appuyée sur le calcul d'un index de position topographique (TPI) pour mettre en évidence la rugosité d'origine anthropique du terrain (Hesse, 2010 ; De Reu *et al.*, 2011). Ce traitement par un algorithme prédéfini est adapté à cette zone d'étude car les micro-reliefs de la Grande Guerre sont bien marqués dans la topographie et ce calcul reste indépendant des modes d'éclairage du MNT (Bennett *et al.*, 2012).

Dans un premier temps, le MNT a été analysé selon l'algorithme TPI de GDAL (Geospatial Data Abstraction Library : <http://www.gdal.org/>) qui permet de soustraire à la valeur d'élévation de chaque pixel celle des 8 pixels adjacents. Cette étape permet non seulement de mettre en évidence le relief local selon un pas d'analyse déterminé, ici d'un mètre, mais également de s'affranchir du signal topographique de plus grande longueur d'onde correspondant à la topographie géomorphologique. L'objectif est de repérer les objets en creux (tranchées, trous d'obus) et en élévation (parapets, parados).

Suivant la classification établie par le TPI, des courbes de niveau (isoplèthes d'altitude) sont établies tous les 5 cm, mettant en évidence sous forme de polygones tous les micro-reliefs donnés par le DEM. Le fichier *ShapeFile* obtenu permet de sélectionner les courbes dont les altitudes sont significativement différentes du signal topographique moyen. Cette procédure permet de souligner les reliefs positifs et négatifs, dont les bornes ou seuils sont ajustés aussi par visualisation du résultat cartographique. Ici, seules les courbes d'une élévation de +10 cm et de -5 cm ont été retenues afin d'obtenir un détournement de tous les reliefs positifs ou négatifs remarquables, indépendamment de la rugosité naturelle du terrain. Les fichiers *shape* polygones sont transformés ensuite en *shape* polygones (Brenot *et al.*, 2017).

En calculant l'aire de chacune des entités ainsi créées (calculatrice de champ), les entités inférieures à 1 m² sont supprimées afin de ne conserver que le relief spatialement significatif. Cette étape permet de dresser une carte générale des artefacts présents sur la zone de travail.

Le filtrage manuel intervient en dernière étape afin de supprimer les artefacts anthropiques ou naturels identifiés sur le terrain (chemins forestiers, ravines, chablis) par une cartographie de terrain de la totalité des artefacts identifiés sur le Lidar. Cette prospection de terrain permet de confirmer ou non l'origine naturelle (doline, entonnoir de fontis) ou anthropique des reliefs (charbonnière...), mais également de distinguer les reliefs 14-18 des reliefs antérieurs ou postérieurs. Chaque entité est déterminée par une hauteur (m) ou profondeur (m), une aire (m²) et un périmètre (m).

En plus des données Lidar de cette zone d'étude, des campagnes estivales de fouilles archéologiques ont été menées entre 2014 et 2016 dans le but d'observer les conditions d'édification, d'entretien, d'enfouissement et de préservation des tranchées françaises et allemandes en Argonne (Blondeau *et al.*, 2014). L'approche géoarchéologique s'est basée sur un maillage de sondages sur le réseau fossile des tranchées, afin de mesurer l'évolution sédimentaire du réseau de tranchées et d'abris construit à partir de 1914, abandonné en 1918 et recouvert par une forêt dense depuis (Brenot *et al.*, 2017).

Les observations menées sur le réseau allemand de troisième ligne mettent en évidence une stratégie d'édification des lignes où domine l'emploi de boisage basal et latéral des tranchées avec un vide-sanitaire sous le tracé des lignes. En s'approchant des premières lignes, le béton se substitue progressivement au bois : le plancher est alors constitué de dalles de béton régulières coulées *in-situ*, pourvues d'une fine rigole d'évacuation des eaux météoriques. En première ligne, les parois sont renforcées de béton coulé derrière les coffrages. Côté français, le fond des tranchées est pourvu d'un complexe de caillebotis à typologie très hétérogène (de la branche à la planche) avec présence non-systématique de caniveaux. Les indices de renfort des parois sont en revanche inexistantes ou non-significatifs. Dans les deux cas, l'érosion post-conflictuelle des bords a conduit à la disparition des architectures latérales, seuls les niveaux architecturaux basaux sont encore très bien conservés, en particulier dans le substrat argileux.

À l'exception d'une mince couche de ruissellement/piétinement sur le fond des tranchées, l'ensemble des observations montre l'absence de séquence colluviale syn-conflictuelle 1915-1918 conservée dans les stratigraphies de comblement. Cette absence est corrélée au processus continu de l'entretien du réseau pendant les trois années de conflit. Bien que les architectures et les matériaux employés soient contrastés d'un camp à l'autre, reflétant des stratégies militaires d'occupation du terrain totalement opposées, l'entretien nécessaire du réseau face au ruissellement et au colluvionnement est manifeste, tant dans un camp que dans l'autre (Brenot *et al.*, 2017).



Fig.5.16: Coupe transversale dans une tranchée comblée partiellement en Argonne (Cliché : Brenot J.).

L'approche de terrain permet également de mettre en évidence le comblement naturel des réseaux de défense par fluage du parados et parapet dans le fond de la tranchée (Fig. 5.16). Le substrat argileux et l'ambiance humide de ce secteur permettent une très bonne conservation du boisage, notamment dans le fond de la tranchée (caillebotis). À l'inverse, toutes pièces métalliques sont intégralement corrodées. Le remblaiement naturel limono-argileux post-conflit et le sol qui s'y développe depuis 100 ans comblent les réseaux de défense de moitié. Couplés aux travaux forestiers, se pose alors le problème de la conservation de ces « polémoformes » au cours du prochain siècle.

5.3.2.3. Résultats de la détection automatique

- Les tranchées

La première catégorie d'entités à être quantifiée concerne le réseau de tranchées et de boyaux (Fig. 5.17). Les entités allemandes et françaises sont aisément distinguées, fidèles aux plans directeurs réalisés par les GCTA (Fig. 5.17A). En revanche, plusieurs tranchées apparaissent au milieu du no man's land, et ont donc été traitées indépendamment dans la quantification. Ce réseau coïncide avec d'anciennes tranchées françaises de 1914 avant l'avancée allemande dans ce secteur, abandonnées en 1915 (Fig. 5.17B).

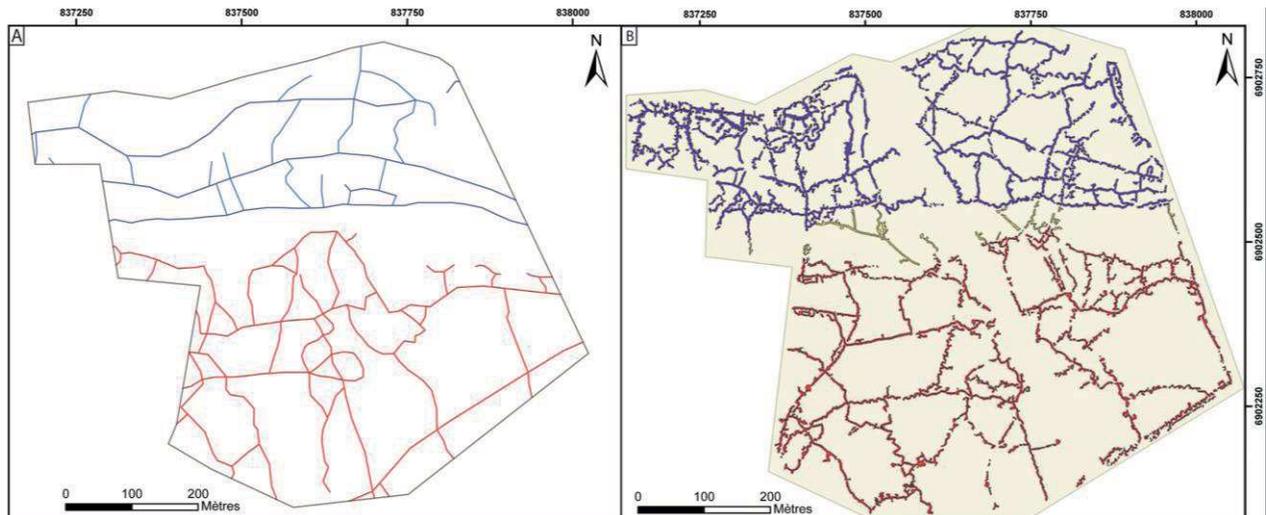


Fig.5.17: A - Carte du réseau de tranchées à partir de la digitalisation des plans directeurs. B – Carte des tranchées à partir du traitement automatique du Lidar (Brenot *et al.*, 2017).

Le réseau allemand, organisé entre le talweg et le milieu de versant, s'organise selon des tranchées globalement orientées est-ouest, avec des boyaux globalement orientés nord-sud. Le réseau français est moins dense, mais suit la même structure autour du no man's land, que le réseau allemand, ce qui confirme les observations faites à partir des plans directeurs (Taborelli *et al.*, 2016b). De manière générale, les tranchées sont plus linéaires que les lignes allemandes, plus espacées. Les lignes sont souvent interrompues en raison des nombreux chemins forestiers qui se sont développés grâce à une topographie de plateau, à l'inverse du secteur allemand développé sur pente et où l'entretien de la forêt est rendu plus difficile depuis 1918.

D'après les estimations, il apparaît que les volumes creusés varient entre 777 et 1 200 m³/ha (français et allemand respectivement). Ces chiffres sont d'un ordre de grandeur supérieur aux chiffres estimés en différents lieux de la ligne de front (Devos *et al.*, 2015b), globalement compris entre 50 et 200 m³/ha mais rejoignent l'étude en fouille archéologique près de Reims (Fig. 5.9). Cependant, ce remuement des terres constitue un *minima* car le volume induit par le réseau souterrain n'est pas intégré à ce chiffre, d'autant plus que les déblais de galeries et de tranchées étaient mélangés, puis répartis sur le réseau, de manière à ne pas trahir l'existence de souterrains (Brenot *et al.*, 2017).

Le secteur allemand est plus densément occupé par un ratio de 14,2 % de la surface totale contre 7,9 % côté français (Tab. 5.3). Ramené à un ratio de longueur/surface, ces valeurs oscillent entre 25 (no-man's land), 51 (français) et 80 km/km² (allemand). Encore ici, ces valeurs sont très supérieures aux valeurs estimées d'après les plans directeurs, qui oscillent entre 5 et 20 km/km² (Devos *et al.*, 2015b) mais calculées sur de plus vastes surfaces (à l'échelle d'un rideau à l'épaisseur totale du dispositif de défense).

Entités	Longueur (L)	Aire (A)	Volume (V)	Surface (S)	Ratio L/S	Ratio A/S	Ratio V/S
Tranchées allemandes	9107 m	16,14 m ²	13,66 m ³	113,775 m ²	8%	14,2%	12 cm
Tranchées dans No man's land	745 m	1,04 m ²	1,118 m ³	29,730 m ²	2,5%	3,5%	3.8 cm
Tranchées françaises	8080 m	12,34 m ²	12,120 m ³	155,930 m ²	5,2%	7,9%	7.8 cm

Tab. 5.3 : Indices morphométriques du traitement automatique des tranchées dans chaque zone (Brenot *et al.*, 2017).

Enfin, l'étude réalisée sous SIG à partir des plans directeurs recense un linéaire de tranchées et boyaux de 22,69 km dans la zone d'étude mais seulement 17,19 km révélés par le Lidar (Tab. 5.3). Ces chiffres traduisent un taux de conservation de 75 %, synonyme d'une très bonne conservation dans cette forêt d'Argonne, par rapport à l'étude précédente à Berry-au-Bac de 22 %. Cette bonne conservation coïncide avec une zone très peu impactée par les travaux forestiers par rapport à d'autres parcelles à proximité plus à l'Ouest où l'intégralité des « polémo-formes » a disparu.

- Les trous d'obus

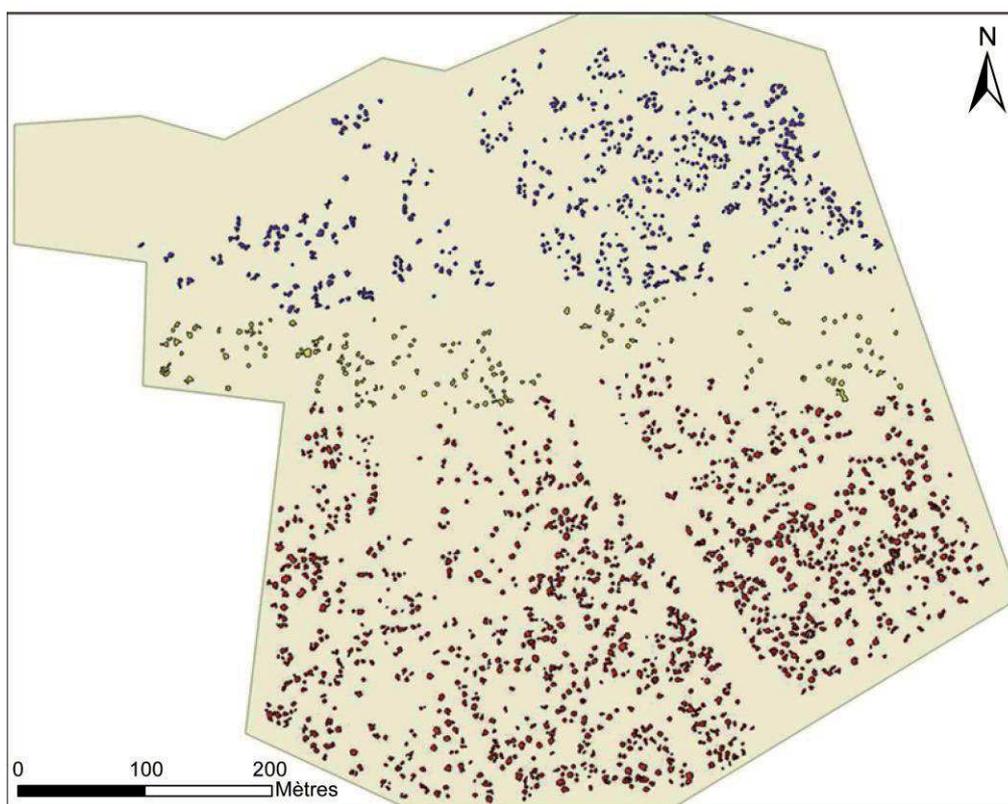


Fig.5.18: Distribution spatiale des trous d'obus sur la zone d'étude (Brenot *et al.*, 2017).

Les formes créées par les impacts d'obus ont été quantifiées en considérant toutes les entités identifiées en trous d'obus sur la zone de l'étude (Fig. 5.18) compte tenu de l'absence de phénomènes karstiques et de guerre de mines (entonnoirs). Sur les 1837 cratères identifiés, le diamètre médian est égal à 3,16 m, variant entre 1,13 et 7,61 m. Il est possible d'observer une

concentration des obus sur les positions hautes françaises (2^{ème} et 3^{ème} ligne). Les premières lignes et le no man's land ne sont pas particulièrement atteints par les tirs : l'incertitude inhérente au tir de l'Artillerie explique peut-être ce fait, évitant ainsi de bombarder ses propres lignes et un no man's land très réduit (Fig. 5.16). En outre, la grande majorité des cratères d'obus ont un rayon compris entre 1 et 2 m. Cette caractéristique implique l'emploi préférentiel d'une Artillerie de tranchée (obus de mortiers), dont la précision et la courte portée semblent plus adaptées dans le cas du site étudié avec des premières lignes très rapprochées (Fig. 4.13).

Le nombre d'obus est deux fois plus important en ligne française (n = 1142) qu'en ligne allemande (n = 526), pour un volume théorique soufflé quatre fois plus grand. Le réseau allemand, abrité sur le versant Nord est plus difficile à atteindre par l'Artillerie française et explique en partie cette différence. Entre les différents secteurs, le volume médian des cratères d'obus varie entre 3,32 et 5,79 m³ (no man's land), 3,13 et 5,46 m³ (allemand) et 4,96 à 8,67 m³ (français). Ces chiffres sont comparables aux données fournies dans le secteur de Verdun (Hupy, 2006) où la moyenne des diamètres de cratères oscille entre 4 et 11,2 m² pour des surfaces d'étude de 250 m². La densité varie entre 46 obus/ha (allemand) à 73 obus/ha (français). Ce nombre rejoint celui de la zone de fouille près de Reims (18,5) mais reste relativement faible en comparaison avec d'autres secteurs de la ligne de front : de 300 obus/ha dans la Somme (Keegan, 2013) jusqu'à 3 000/ha lors de la bataille de Verdun (Hupy and Schaeztl, 2006).

Entités	Nb	Aire (A)	Surface (S)	Volume (V)	Nb/ha	Ratio A/S	Ratio V/S (cm)
Trous allemands	526	3751 m ²	113,775 m ²	2503–4369 m ³	46	3,3%	2,1–3,8
Trous No man's land	169	120,5 m ²	29,725 m ²	813–1419 m ³	57	4%	2,7–4,8
Trous français	1142	1149,5 m ²	155,930 m ²	9346–16,309 m ³	73	7,3%	5,9–10,4

Tab. 5.4 : Indices morphométriques du traitement automatique des trous d'obus dans chaque zone (Brenot *et al.*, 2017).

Considérant un volume théorique normalisé à la surface de chaque secteur, l'épaisseur de sol remanié est maximale dans le secteur français (5,9 à 10,4 cm) et minimale côté allemand (2,1 à 3,8 cm). Ces volumes sont inférieurs en ordre de grandeur, en comparaison avec les données de la littérature qui fournissent des estimations moyennes autour de 2500 m³/ha (Devos *et al.*, 2015b). Ici, les volumes impliqués varient entre 219 à 386 m³/ha (allemand), 273 à 477 m³/ha (no man's land) et 599 à 1052 m³/ha (français). Cette différence, bien que relativement réduite, témoigne sans doute d'une activité relativement faible de l'Artillerie et des combats durant la période 1915-1918, contrairement à d'autres secteurs proches en forêt d'Argonne (La Harazée, Le Four de Paris, Bagatelle, etc...).

Cette étude, menée à l'aide du Lidar et d'une investigation de terrain, donne des ordres de grandeur de quantification sédimentaire et de densité linéaire et surfacique compatibles avec les estimations ultérieures (Puyo, 2004 ; Devos *et al.*, 2015b). Elles divergent cependant avec les estimations faites à partir des données cartographiques militaires. Cette différence s'explique d'une part selon un effet d'échelle, où l'augmentation de la surface considérée diminue nécessairement la densité d'occupation ; d'autre part, les quantifications menées à partir des cartes militaires intègrent une simplification du réseau expliquée par le manque

d'informations détaillées sur l'organisation des lignes ennemies et une nécessité de confidentialité sur le tracé des lignes alliées. Dans cette zone d'étude sans grande offensive ni préparation d'artillerie de grande ampleur, le remuement des terres est davantage associé au creusement des réseaux de défense qu'au marmitage à la différence de Verdun en 1916, du Chemin des Dames en 1917 (Marival et Buridant, 2006) ou de la guerre des mines (Brenot *et al.*, 2017).

Après ce traitement automatique des « polémo-formes », un filtrage manuel de caractérisation des formes doit être réalisé. Ce filtrage n'est possible que sur une petite zone d'étude (environ 30 ha) mais trop long à réaliser sur une zone plus vaste. Une caractérisation morphométrique des polygones obtenus par traitement automatique est donc nécessaire pour travailler sur une zone d'étude plus grande.

5.3.3. Détection et caractérisation morphométrique automatiques en Argonne

Dans cette étude, l'approche quantitative associe la même détection automatique à une caractérisation morphométrique des polygones obtenus sur une bande Nord/Sud en Argonne traversant l'ensemble des réseaux français et allemands alors que les études précédentes restant sectorielles et en première position (Berry-au-Bac, Servon), posent le problème de la représentativité des résultats. L'approche automatique à travers l'intégralité des réseaux de défense d'Argonne permet ainsi de relativiser les résultats précédents et de mettre en évidence les tranchées et boyaux, les trous d'obus, les parapets et parados ainsi que d'autres formes lors du traitement des artefacts (batteries d'artillerie, camps ...).

5.3.3.1. Le site d'étude

Cette étude s'inscrit en forêt d'Argonne sur 21,3 km². Elle est délimitée au Nord par la seconde position allemande (ravin de Charlevaux) à 4,8 km du no man's land et au Sud par la 4^{ème} position française au nord de Sainte-Menehould à 11 km de la ligne de front (Fig. 5.19). Le choix d'une bande de 1,2 km de largeur est conditionné par la lisibilité des réseaux à traverser mais également par une quantité de données raisonnable à traiter. Sur les 2 127 ha de la zone d'étude, 1 714 ha sont sous couvert forestier (80,5 %) qui, potentiellement, conserve les « polémo-formes ».

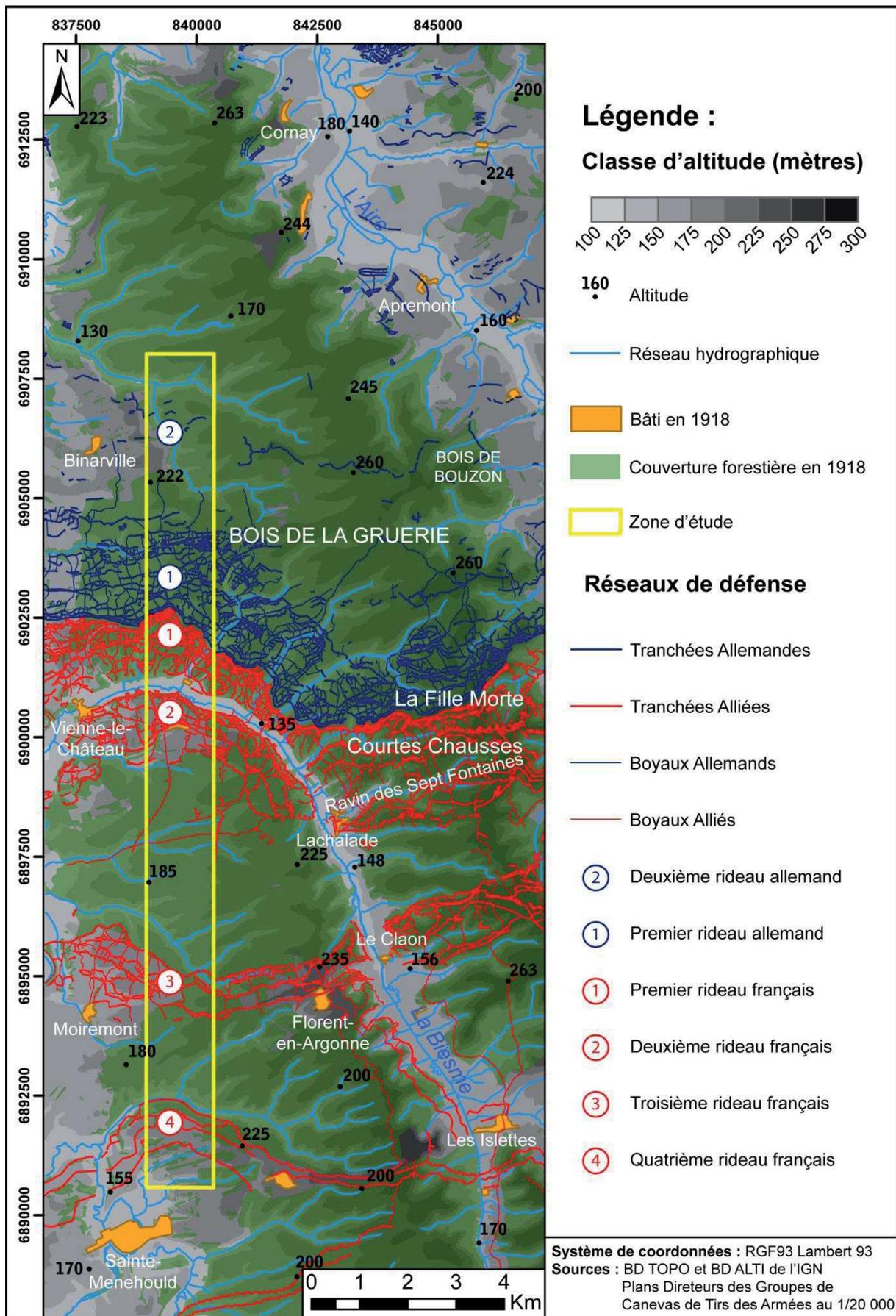


Fig.5. 19: Carte de situation de la zone d'étude dans le réseau de défense

5.3.3.2. Méthodologie de la détection automatique et de la caractérisation morphométrique

Cette étude se base sur une acquisition Lidar de 2014, commandée par la DRAC Champagne-Ardenne avec une résolution de 8 points/m². Le MNT à haute résolution est dégradé à 1 m²/pixel pour ce traitement, réalisé sous *QuantumGIS* en utilisant le système de projection RGF 93 Lambert 1993 (Fig. 5.21B).

La méthode du traitement automatique est la même que précédemment. L'index de position topographique (TPI) est traité selon l'algorithme GDAL pour déterminer localement les microreliefs en élévations et en creux (Fig. 5.21D). La traduction du TPI en courbes de niveaux s'établit selon un pas de 5 cm. Les courbes de niveaux (polylignes) de -10 cm, - 5cm et + 5 cm sont retenues puis transformées en polygones (Fig. 5.21E). Ce temps de traitement est inversement proportionnel à la résolution du MNT, mais nécessite une grande puissance de traitement et des heures (voire des jours) de calcul.

Les indices morphométriques des polygones sont alors calculés (aire en m² et périmètre en m). Une filtration par table attributaire permet de supprimer les polygones avec une aire inférieure à 1 m².

La caractérisation morphométrique se base sur 3 requêtes et permet d'identifier un polygone comme une tranchée, un cratère d'obus ou le parapet et parados de la tranchée. La première requête trie les polygones selon le niveau obtenu par TPI (-10, -5 ou +5 cm). La seconde requête est réalisée à partir d'un indice de forme, l'IPQ (Osserman, 1978).

$$\text{IPQ} = (4\pi A) / P^2$$

Cet indice de compacité est utilisé pour différencier les polygones « cratères d'obus ». Plus l'indice est proche de 1, plus la forme est compacte et s'approche d'un cercle parfait. Enfin le troisième paramètre concerne le périmètre (Fig. 5.20).

- La tranchée se caractérise par un niveau TPI de -10 cm, un IPQ inférieur à 0,5 et un périmètre supérieur à 10 m.
- Le cratère d'obus a un niveau de TPI de -5 cm, un IPQ supérieur à 0,7 et un périmètre compris entre 3,5 m et 20 m.
- Le parapet et parados se définit par un niveau TPI de + 5cm, un IPQ inférieur à 0,5 et un périmètre supérieur à 10 m.

Sur les 2,3 millions de polygones créés à partir des polylignes de courbes de niveaux, 1,3 millions sont retenus et traités par la méthode de caractérisation morphométrique. Les polygones qui n'intègrent pas l'une de ces trois identifications morphométriques deviennent des reliquats. Par observation visuelle du polygone reliquat, une classification manuelle peut cependant les intégrer à 5 groupes différents : cratères de mine, nécropoles, cantonnements, batteries d'artillerie ou autres objets (Fig. 5.20). Seuls les résultats sur les tranchées et impacts d'obus sont présentés dans cette étude.

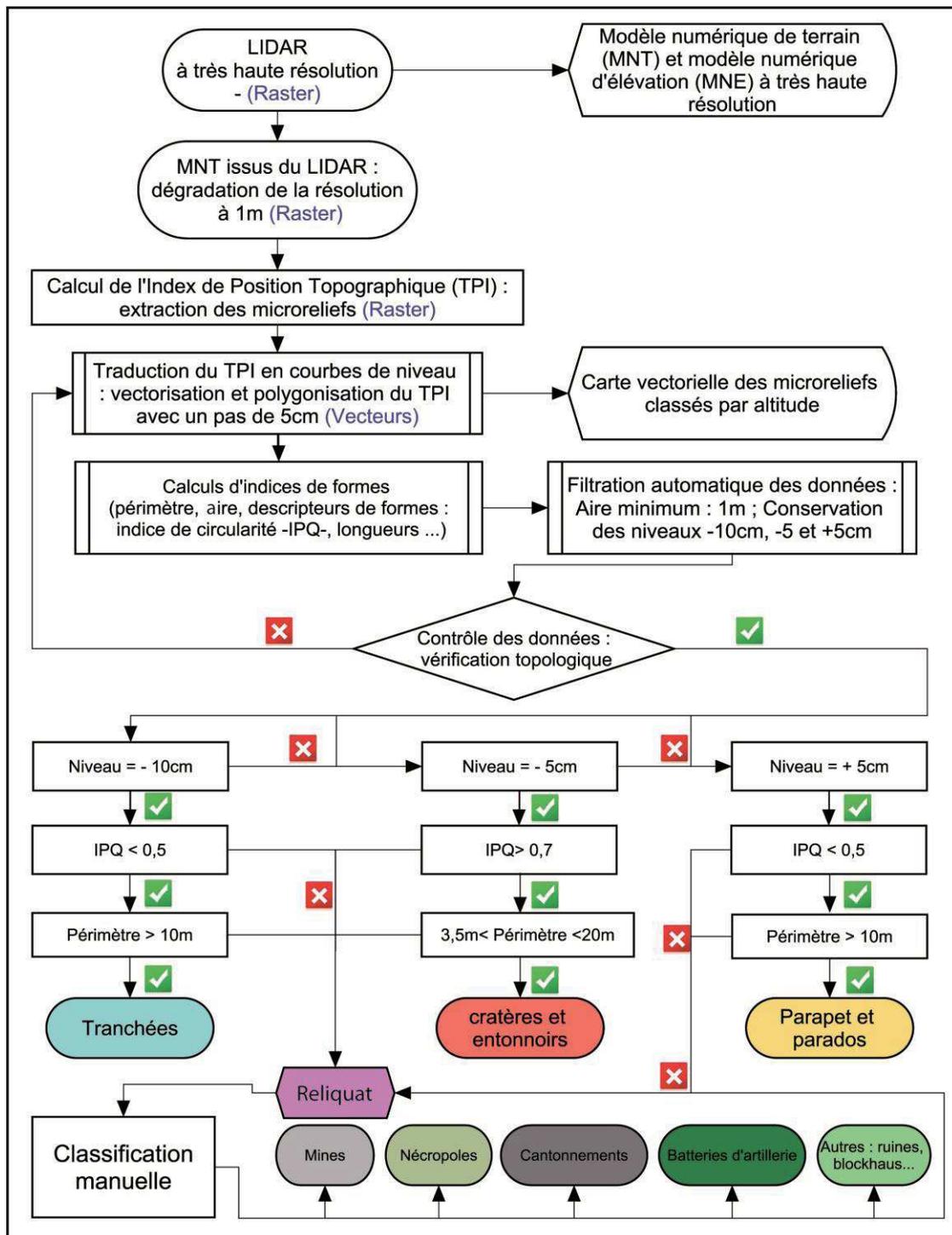


Fig.5.20: Méthodologie de la détection automatique et de la caractérisation morphométrique

5.3.3.3. Résultats de la détection automatique et de la caractérisation morphométrique

L'étude menée sur cette bande Nord/Sud en Argonne permet, par le Lidar, de mettre en évidence les réseaux de défense allemands et alliés par détection automatique et caractérisation morphométrique. Croisée aux résultats de la digitalisation par les plans

directeurs, elle permet de calculer un taux de conservation des tranchées et boyaux dans ce secteur. La localisation des impacts d'obus est mise en relation avec l'emplacement des batteries d'artillerie du secteur.

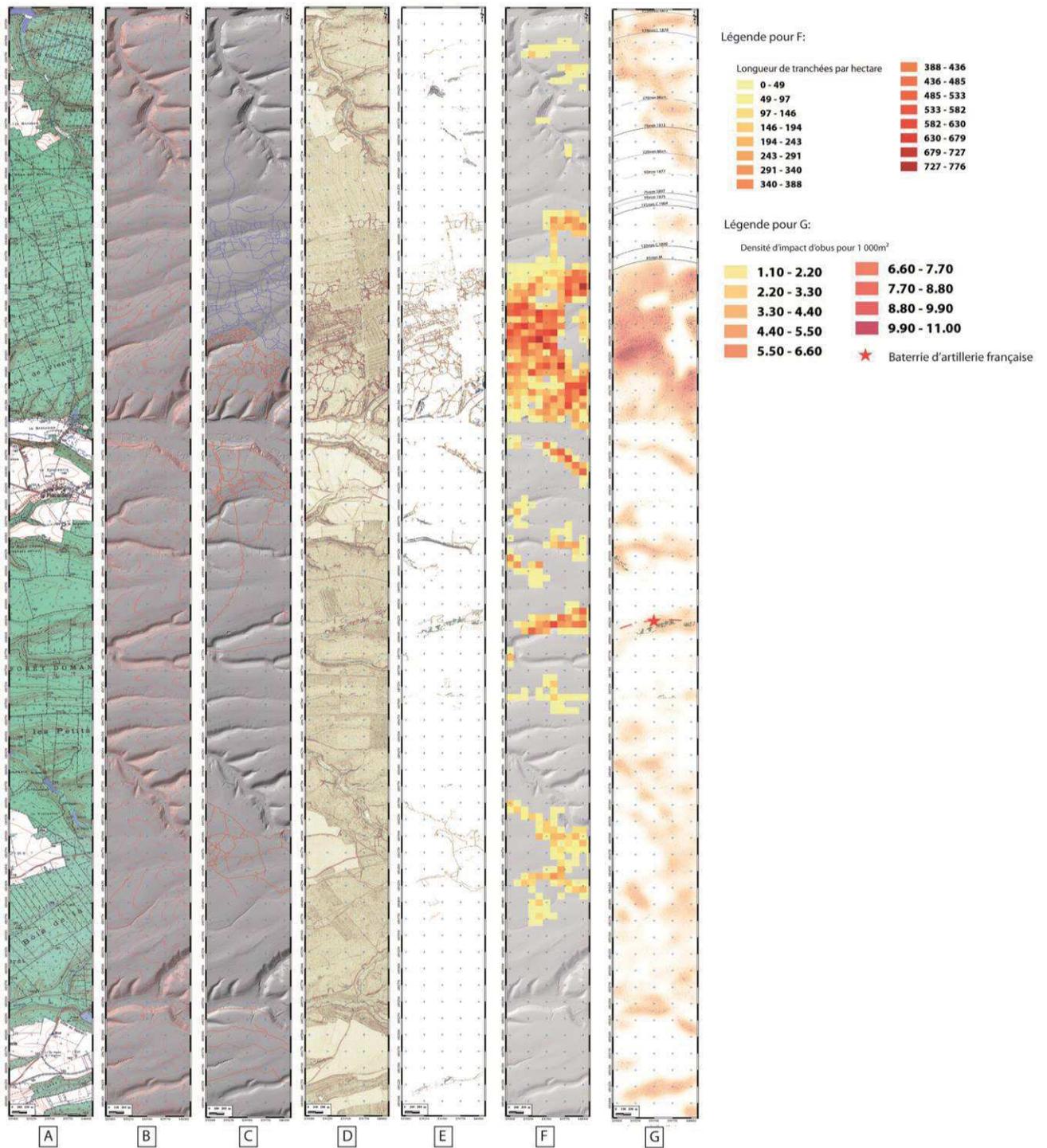


Fig.5. 21: A – Carte topographique de l'IGN. B – Image Lidar brute. C – Résultat de la digitalisation à partir des plans directeurs. D – Carte des anomalies topographiques (TPI). E – Carte des tranchées, positions d'artillerie et cantonnements. F – Densité de tranchées préservées. G – Densité des impacts et portées des canons français à partir d'une position reconnue.

- Les tranchées

La digitalisation des réseaux de défense à partir des plans directeurs permet d'analyser la structure du front dans ce secteur. La zone d'étude sur 2 127 ha se divise sur 660 ha côté allemand et 1 467 ha côté français. La largeur moyenne du no man's land est de 74,6 m mais n'accueille pas dans ce secteur, une guerre de mines. L'hypertrophie du réseau allemand se retrouve nettement avec un alignement de 14 lignes de tranchées dans sa première position et une seconde position disparate et peu fortifiée à 4 km du no man's land. Côté français, 4 positions s'étalent dans la forêt d'Argonne en rive droite et gauche de la Biesme, la troisième devant le village de Moiremont et la quatrième au nord de Sainte-Menehould (Fig. 5.21C).

Cette organisation spatiale est retrouvée par la détection automatique et la caractérisation morphométrique (Fig. 5.22). À l'échelle de la zone d'étude, certains espaces sont complètement dénués de tranchées et boyaux entre les positions. À l'échelle des premières positions allemandes et françaises (3 km), les densités atteignent 750 m/ha de réseaux de défense, rejoignant les résultats de la zone d'étude de Servon (Fig. 5.17). La répartition spatiale des réseaux de défense conservés se cale parfaitement à la digitalisation des plans directeurs. La lacune principale est la disparition de la 4^{ème} position française au Nord de Sainte-Menehould, nivelée depuis 100 ans.

À partir des plans directeurs, la digitalisation recense 193,49 km de réseaux de défense composés par 124,85 km de tranchées et 68,64 km de boyaux (Fig. 5.21C). Le traitement de la dalle Lidar met en évidence 114,29 km de tranchées et boyaux conservés, occupant 1,9 ha de terrain, ou 8,5 % de la zone d'étude. Ces résultats permettent de calculer un taux de conservation de 59 %. Des lacunes apparaissent nettement dans les réseaux et correspondent à des parcelles de régénération, entièrement nivelées par les travaux forestiers, notamment dans les premières positions de chaque camp.

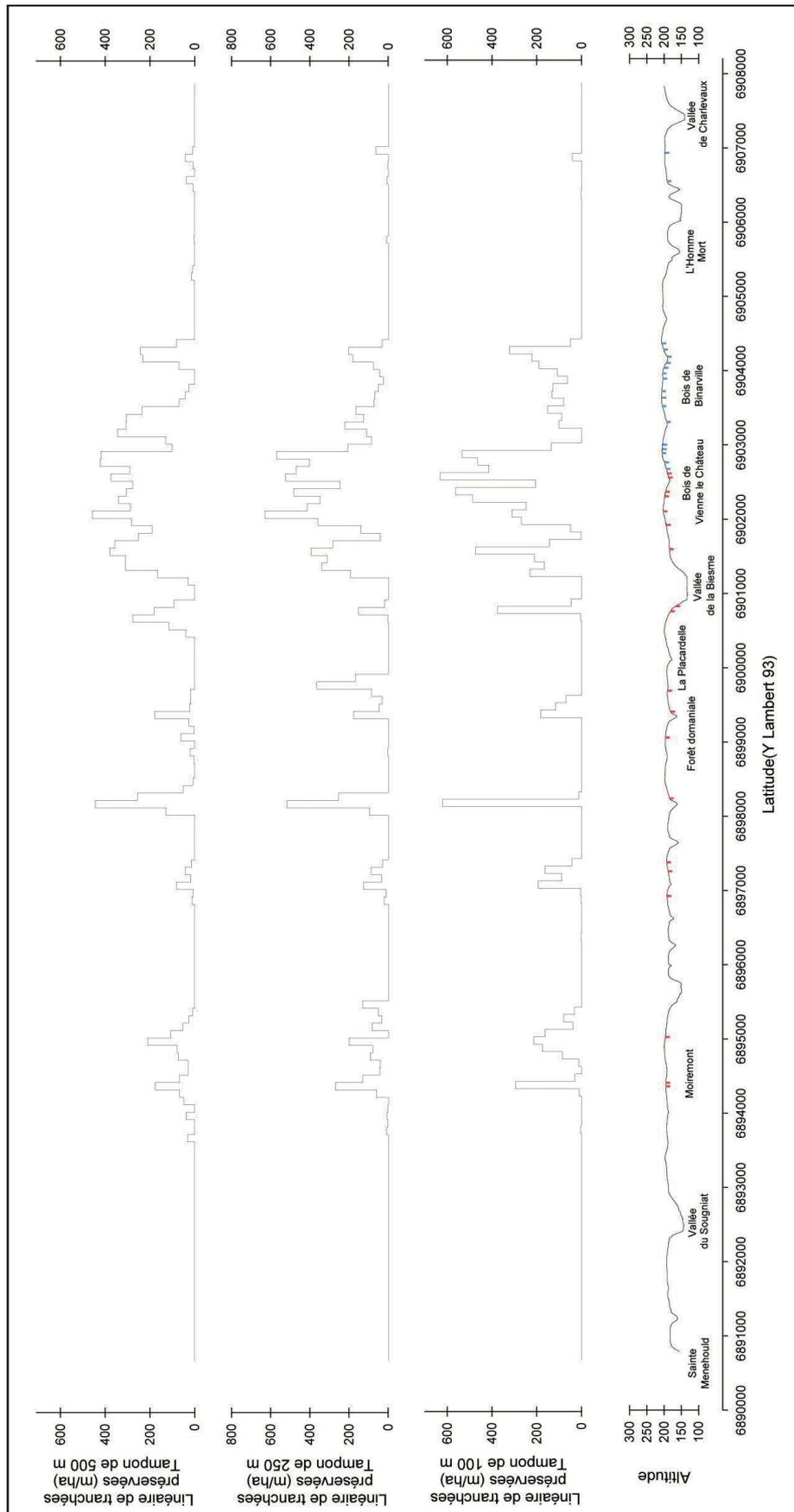


Fig.5. 22: Répartition spatiale des tranchées et longueur linéaire préservée selon plusieurs zones tampons (100, 200 et 500 m, exprimée en m/ha).

- Les trous d'obus

Le nombre d'impacts d'obus sur l'ensemble de cette bande Nord/Sud est de 30 715. Cependant, ce chiffre est deux fois plus important en ligne française (19 976) qu'en ligne allemande (10 739). Le réseau d'impacts allemands se concentre essentiellement sur 4 km dans sa première position, alors que les impacts dans les positions françaises s'étalent sur près de 9 km (Fig. 5.23). La surface impactée par les trous d'obus est de 83 636 m² (50 864 m² côté français et 32 772 m² côté allemand) se traduisant par 4% de la zone d'étude. En moyenne sur l'ensemble du secteur, la densité est de 9,49 impacts/ha. Cependant, ce chiffre cache de fortes disparités car la densité peut atteindre 90 impacts/ha dans les premières positions. Ce secteur, davantage disputé que la zone de Servon, reste relativement calme par rapport à d'autres secteurs de la zone de front. Enfin, le diamètre moyen des entonnoirs d'obus est de 1,74 m avec un diamètre maximal de 7,97 m (Fig. 5.24).

Dans cette zone d'étude sans grande offensive ni préparation d'Artillerie de grande ampleur comme la zone d'étude de Servon, le remuement des terres est davantage associé au creusement des réseaux de défense impactant 8,5% de la zone qu'au marmitage (4%).

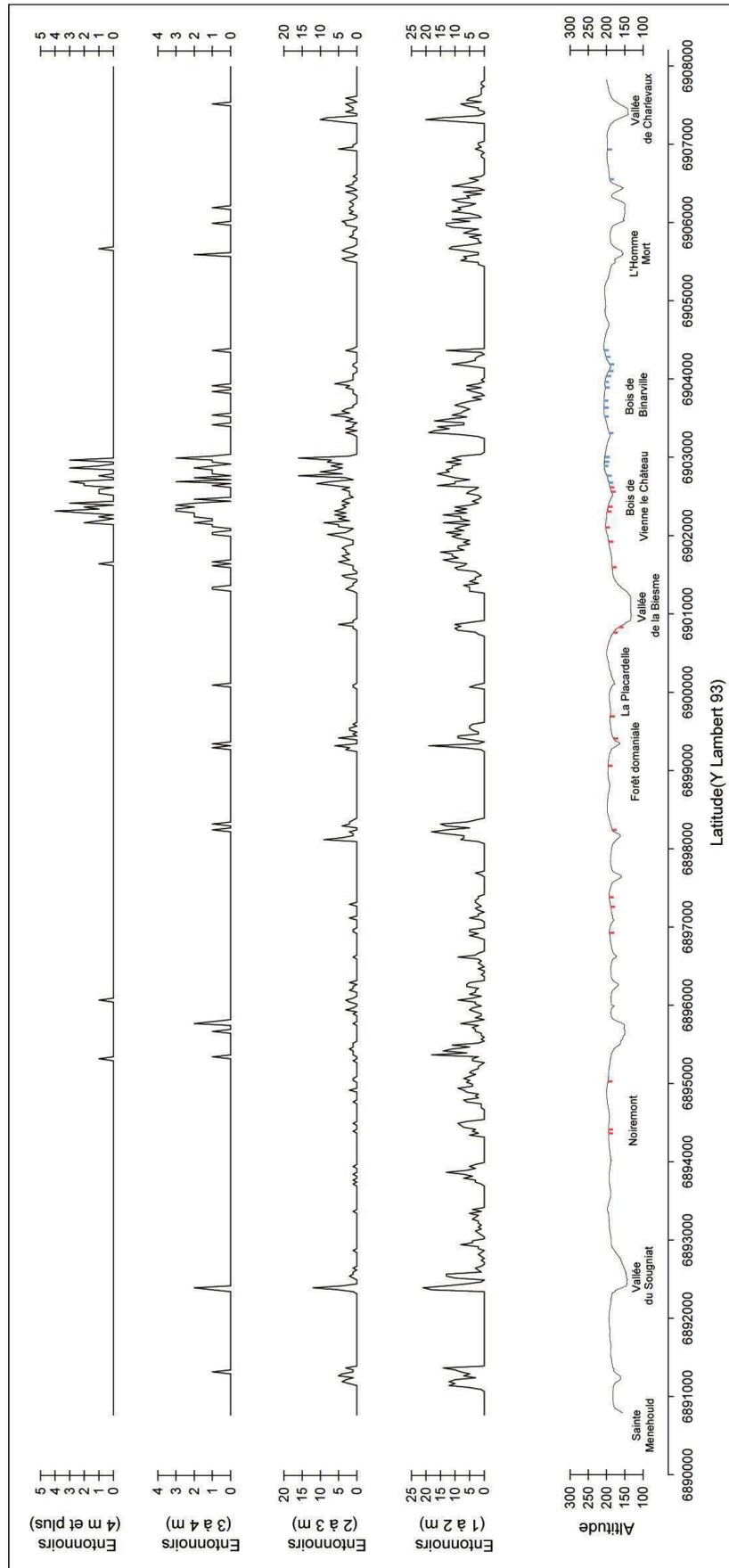


Fig.5.23: Répartition spatiale des impacts d'obus préservés à partir d'une zone tampon de 100 m.

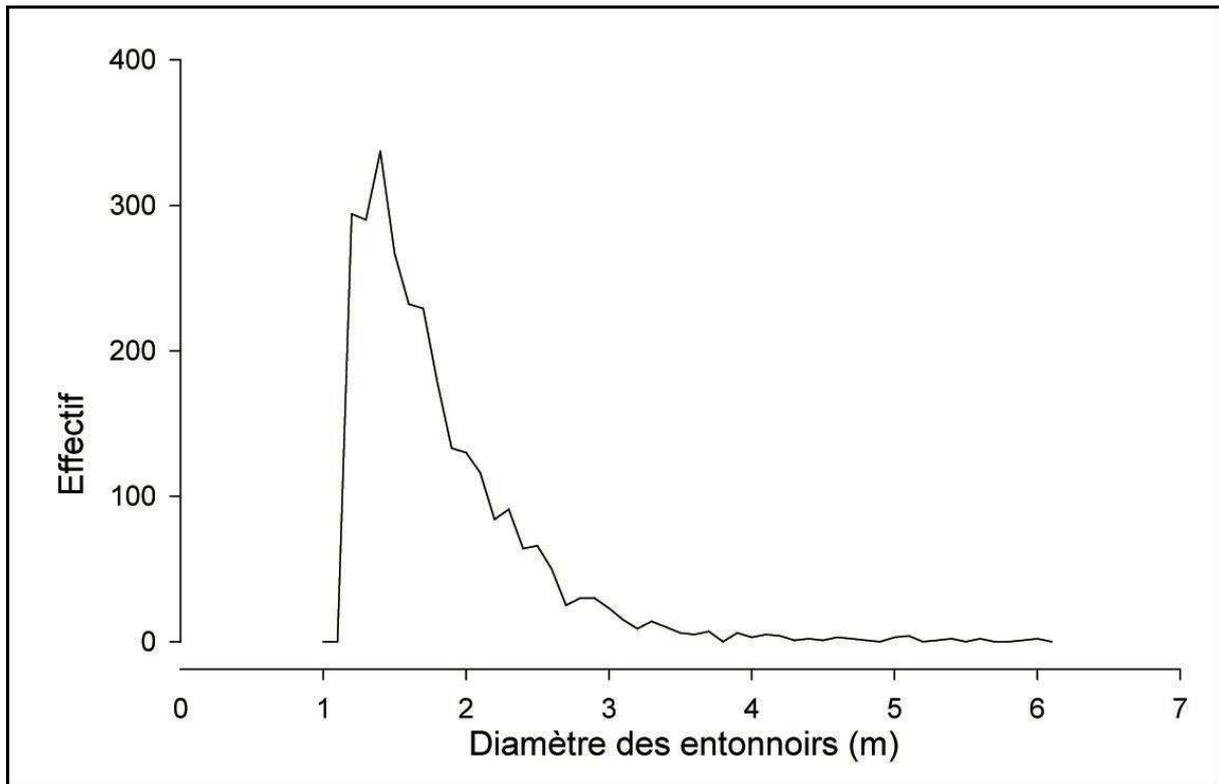


Fig.5.24: Distribution statistique des entonnoirs d'obus en fonction de leur diamètre.

Cet algorithme de détection et de caractérisation permet de mettre en évidence les tranchées et trous d'obus puis de traiter les reliquats manuellement. Ce secteur d'étude n'est pas impacté par la guerre des mines mais traverse une zone de campement français, le camp Guyart (Fig. 4.19B) à 1,5 km de la ligne de front. L'interprétation de batteries d'artillerie permet d'y reporter les portées maximales des pièces françaises, potentiellement utilisées dans ce secteur boisé. La position, située dans un barriban du Bois des Hauts Bâtis à 4,5 km du front, permet d'atteindre sans difficulté l'ensemble de la première position allemande. Les tirs sur la seconde position à 8,3 km ne sont possibles qu'avec des pièces plus lourdes (155 mm long, 120 mm long ou 270 mm mortier, Fig. 5.21G).

Conclusion du chapitre 5

Les paysages dévastés sur l'ensemble du front constituent une gêne au retour de la population rurale et à la remise en culture. Certaines zones retrouvent rapidement leur aspect d'avant-guerre, tandis qu'il faudra attendre les années 60 ou 70 pour remettre en culture d'autres secteurs. En milieu de grandes cultures, les réseaux de défense sont exhumés lors de fouilles archéologiques et permettent l'étude des remplissages de ces « polémo-formes ».

Par contre, ces formes, liées à la Grande Guerre, sont mieux conservées sous forêt (Amat, 1987 ; Buridant, 2003 ; Desfossés, 2015) et révélées grâce au Lidar. L'analyse visuelle et manuelle de la détection de formes est réalisée sur de petits secteurs, mais reste peu fiable et non exhaustive. La détection automatique, accompagnée par la caractérisation morphométrique, permet de travailler sur des zones d'étude plus grandes et de tendre vers l'exhaustivité du repérage des formes. Cependant, ce travail nécessite une puissance informatique et un temps de traitement très importants.

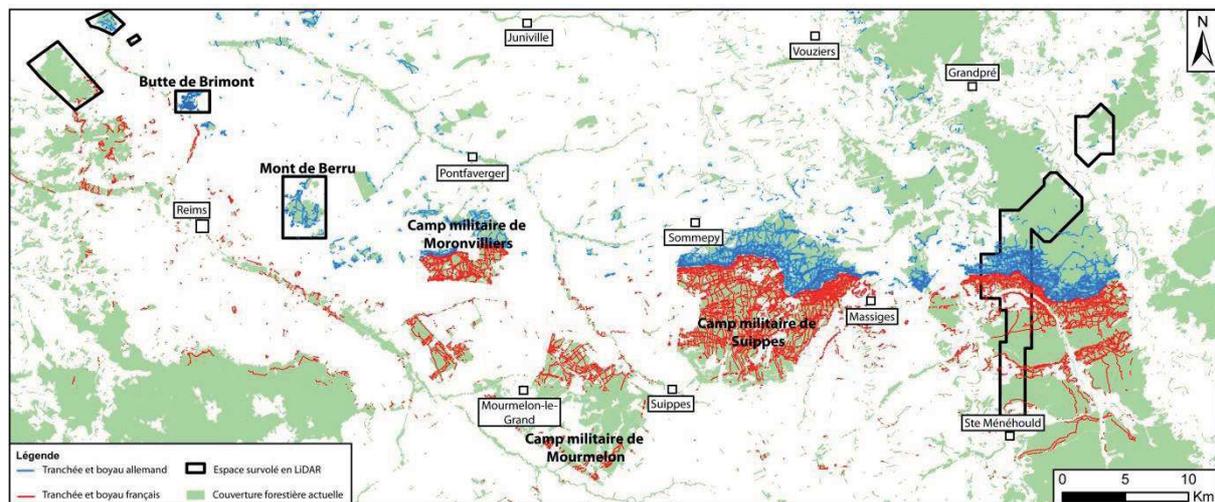


Fig.5.25: Croisement de la banque de données des réseaux de défense et du couvert forestier actuel.

Ces méthodes de détection des « polémo-formes » permettent de calculer des taux de conservation variant de 22% sur la Cote 108 à 60, voire 75% en Argonne (Brenot *et al.*, 2017). Cette conservation reste dépendante de l'échelle de travail. Des taux de conservation peuvent avoisiner les 100 % sur de petites parcelles d'étude (quelques hectares) mais tendre vers un comblement généralisé dans des secteurs ayant été sujets à de lourds travaux de nivellement.

La conservation sous forêt n'est donc pas systématique car sous la dépendance des travaux forestiers depuis 100 ans. Le croisement de la banque de données des réseaux de défense sous SIG à partir des plans directeurs et de la banque de données Forêt actuelle de l'IGN montre que 43% des réseaux de défense s'inscrivent aujourd'hui sous couvert forestier, essentiellement en Argonne et dans les savarts des camps militaires (Fig. 5.25). Ce pourcentage subit depuis 100 ans un comblement naturel par atterrissement des terres avoisinantes, mais également de travaux programmés de nivellement. Ces comblements

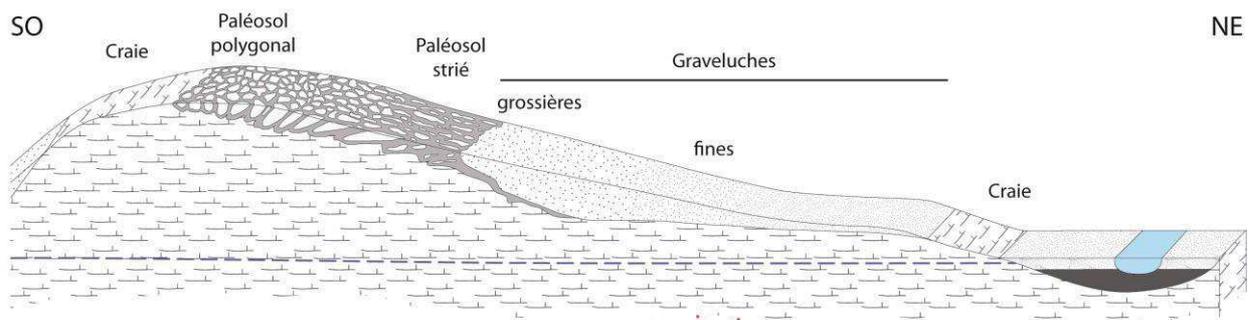
naturels mais également anthropiques soulèvent alors le problème de leur conservation au cours du prochain siècle.

Conclusion de la Partie 2

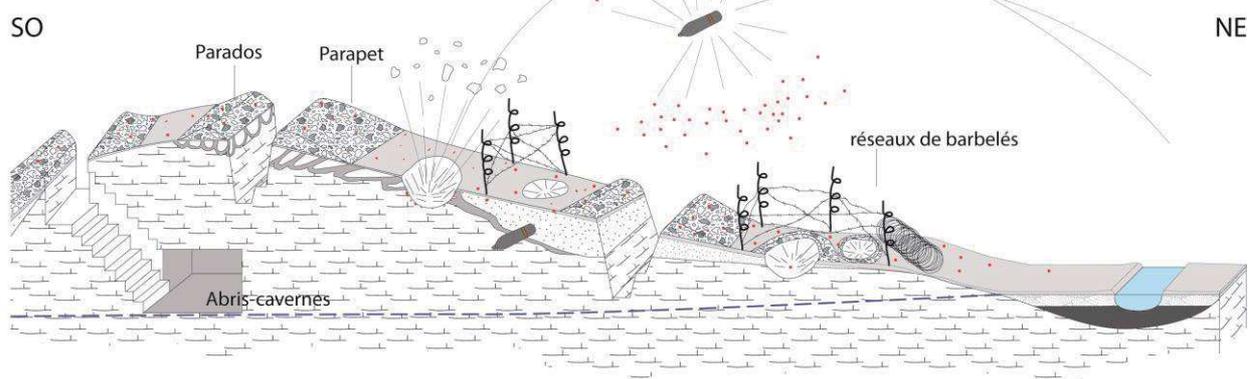
L'outil Lidar, utilisé pour la première fois en France près de Nancy en forêt de Haye, connaît un véritable essor dans de nombreux domaines d'étude (Georges-Leroy *et al.*, 2011). L'utilisation de données Lidar nécessite une connaissance préalable des exo-formes liées à la Grande Guerre pour les inventorier avant de les cartographier. L'étude de ces traces est donc indissociable de la digitalisation des plans directeurs sous SIG pour appréhender leur organisation spatiale et typologique, répondant à la structuration des réseaux de défense et aux conditions géographiques locales.

La Grande Guerre a généré des formes liées aux réseaux de défense (tranchées et boyaux), à la guerre des mines (cratères), à la bombturbation (entonnoirs d'obus) et à la vie militaire (cantonnement, abris). Ces formes mises en évidence par l'outil Lidar présentent un degré de conservation très hétérogène dans l'espace en fonction des pratiques agricoles et sylvicoles (Fig. 5.24).

Paysage des formations à graviers de craie



Polémo-paysage de 1914-1918



Modifié d'après Laurain *et al.*, 1995

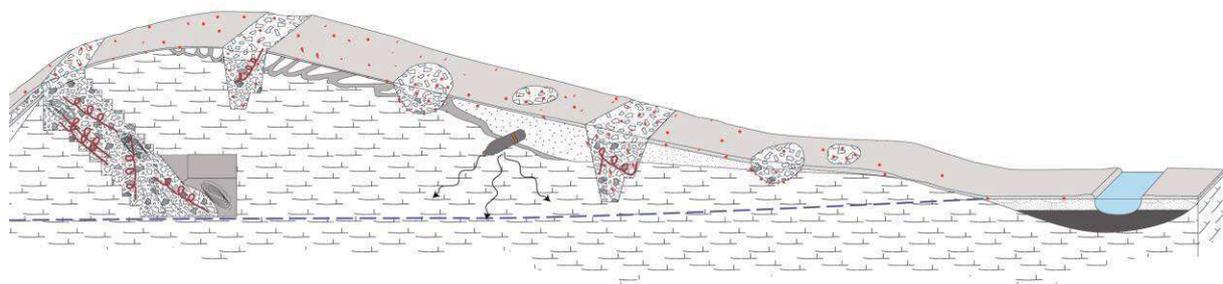
Fig. 5. 26: « Polémo-paysages » de la Grande Guerre sur formations crayeuses à gravier de craie.

Intégralement nivelées dans les plaines de Champagne pour la remise en culture, les « polémo-formes » ont disparu, fossilisées depuis 100 ans corrélativement aux pratiques agricoles des années 1950 à 1970 marquées par la mécanisation, l'amendement des terres et les agro-ressources. En surface, seuls les indices phytographiques, pédographiques et hydrographiques utilisés en télédétection, malheureusement décelables de manière saisonnière, voire cantonnés à des épisodes climatiques exceptionnels (sécheresse), permettent de retrouver le tracé des « polémo-formes ». L'approche archéologique montre une réalité bien plus complexe que les résultats de l'analyse spatiale réalisée sous SIG à partir des plans directeurs au 1/20 000 qui, bien qu'opérationnels, stylisent le tracé des réseaux de défense sans pour autant nous renseigner sur les abris, latrines, petits postes d'écoute, postes avancés... L'approche archéologique de la Grande Guerre, discipline récente, s'avère novatrice et enrichissante dans la compréhension de l'organisation spatiale des réseaux de défense. Les sondages archéologiques renseignent sur la nature des remplissages anthropiques post-conflit, essentiellement constitués par les matériaux de la crête de feu, du parados et des bourrelets périphériques des entonnoirs d'obus. Ces remplissages sont caractérisés par de nombreux déchets métalliques (réseaux barbelés, chevaux de frise, munitions, éclats d'obus et projectiles, Fig. 5.25). En outre, ils sont loin d'être homogènes et restent incomplets car ils ne concernent pas l'intégralité des réseaux d'abris, déterminant ainsi des aléas « cavités souterraines » particulièrement présents dans les réseaux de défense développés dans le chapitre suivant.

Polémo-paysage fossilisé après 1919

SO

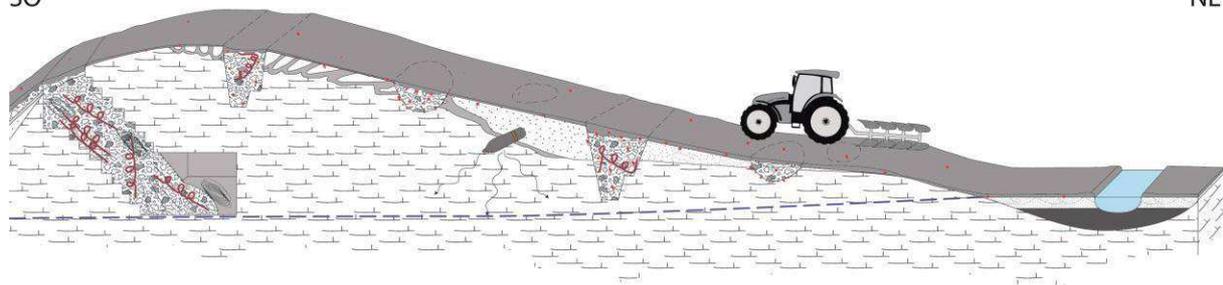
NE



Polémo-paysage fossilisé aujourd'hui

SO

NE



Craie en place	Gravelles	Poches de cryoturbation	Terres végétales (rendosol naturel)
Alluvions anciennes	Fragments métalliques	Remblais hétérométriques	Terres végétales rapportées
Alluvions récentes	Surface piézométrique		

Modifié d'après Laurain et al., 1995

Fig.5. 27: « Polémo-paysage » fossilisé de 1919 à aujourd'hui.

Ces formes, liées à la Grande Guerre, sont bien conservées sous forêt et révélées par le Lidar. Les différentes méthodes de détection et de caractérisation permettent de proposer des taux de conservation de 22 à 75 % sur les trois zones ateliers de ce travail de thèse. Ce taux de conservation est étroitement lié à la dimension scalaire et aux pratiques sylvicoles. En effet, à l'échelle de la parcelle, les densités surfaciques de « polémo-formes » résultent de son intégration dans le réseau de défense (positions, lignes) et sont essentiellement dépendantes de la gestion forestière (nivellement, parcelle de régénération) qui mériterait une étude plus aboutie. À cette échelle, l'approche archéologique montre que si le tracé des formes des réseaux de défense subsiste, elles sont néanmoins atténuées par érosion des crêtes de feu et parados et par atténuation sédimentaire. À ce titre, tous les indicateurs morphométriques qui caractérisent les polémo-paysages (taille et densité de formes) doivent être replacés dans leur contexte spatio-temporel. Par contre à l'échelle locale et régionale, les morphologies héritées de la Grande Guerre sont sous la commande davantage de la dimension scalaire et de leur positionnement dans le réseau de défense.

Si la Grande Guerre a effectivement laissé de nombreuses traces morphologiques révélées par l'outil Lidar et l'approche archéologique, elle a également impacté le sous-sol, les sols, les eaux souterraines, les eaux de surface et les paysages. Cette approche environnementale et pluri-disciplinaire de la Grande Guerre s'avère indissociable de la dimension spatiale et multiscalaire par intégration des sites d'étude dans les réseaux de défense. Si la première partie a pour objectif de connaître l'état initial des réseaux de défense en 1918, la seconde mesure le degré de conservation des morphologies associées. Enfin, la partie suivante sert d'application aux problématiques environnementales héritées de la Grande Guerre.

Partie 3 : Impacts souterrains, pédologiques, hydrogéologiques et écologiques de la Grande Guerre



Chapitre 6 : Impacts souterrains

Introduction du chapitre 6

La Grande Guerre a lourdement impacté les sociétés par les pertes humaines, les dégâts matériels colossaux (Michel, 1932), les changements géopolitiques et les innovations technologiques associées (Hartcup, 1988). Les batailles ont été décryptées dès la fin du conflit (Dubail et Fayolle, 1921) puis ont marqué l'imaginaire collectif que les sciences humaines s'attachent à étudier (Cazals et Loez, 2012 ; Becker, 2014). Les conséquences environnementales mises en évidence par l'approche des géosciences, bien qu'importantes, restent peu étudiées ou tardivement alors que les paysages, les sols et les eaux souterraines portent encore la marque du conflit (Masson-Loodts, 2014 ; Keller, 2016). Ces impacts se manifestent par une modification de la structure physique des sols ou « bombturbation » (Hupy et Schaetzl, 2006), par la contamination métallique et la pollution des sols (Bausinger et al., 2007 ; Meerschman *et al.*, 2011 ; Thouin *et al.*, 2015), l'apport de composés nitro-aromatiques (essentiellement des perchlorates) vers la zone noyée des aquifères (Hubé, 2016), mais aussi par des effets morphologiques (Hesse, 2014, Taborelli *et al.*, 2017a).

Dans ce contexte de guerre de position, les fortifications imprévues (Verney, 2003) sont difficilement franchissables car cette guerre dure 40 mois sur les 51 mois du conflit. Pour se protéger des balles et des obus adverses, les combattants doivent être abrités. Ils peuvent utiliser des cavités déjà construites (creutes, caves privatives) et les aménager, mais creusent également, au sein des réseaux de défense, des abris en fonction des conditions géomorphologiques et piézométriques du secteur. Le creusement peut également être offensif dans le cadre de la guerre de mines pour créer une brèche dans le dispositif adverse afin de l'occuper. La difficulté d'accès de l'ensemble de ces cavités explique la méconnaissance actuelle dans ce domaine, même si elles peuvent constituer, encore aujourd'hui, une dangerosité importante lors d'affaissements. L'objectif de ce chapitre est applicatif. La connaissance sous SIG des réseaux de défense ainsi que les héritages morphologiques révélés par le Lidar permettent d'appréhender la susceptibilité des secteurs étudiés à l'aléa cavités.

6.1. La guerre des mines

La guerre des mines est une technique souterraine offensive et défensive qui consiste à ouvrir une brèche dans un dispositif fortifié par le creusement de galeries. Utilisée depuis l'Antiquité, dans le cadre de la guerre de siège (Triolet et Triolet, 2011), elle trouve son paroxysme durant la Grande Guerre pendant laquelle de nombreuses galeries ou rameaux de combat sont creusés, desservant des chambres explosives ou fourneaux. Les secteurs du front concernés par la guerre des mines constituent des « systèmes de mines » ou « sites de mines ». L'analyse des plans directeurs de la mer du Nord à l'Alsace sur l'intégralité du front Ouest nous permet d'en recenser 69 (Annexe 6.1) sur le front Ouest. Cet inventaire est complété par

une synthèse bibliographique (Villate, 1925 ; Weiss, 2016, Fig. 6.1). Cependant, l'activité souterraine est très hétérogène dans l'espace car le nombre d'explosions par site varie d'une à plus de 500 (entonnoirs et camouflets). Le recensement des sites concernés sur l'ensemble du front montre que les formations géologiques sont très diversifiées. En effet, la guerre des mines se retrouve dans l'argile et sables des Flandres (Messines, Doyle *et al.*, 2002), dans les craies à silex picardes (La Boisselle), les craies de Champagne (Ferme d'Alger, Monts de Champagne), la gaize d'Argonne (Fille Morte, La Harazée), les calcaires oxfordiens (les Eparges), bajociens (Flirey), et les grès vosgiens (Chapelotte, Fig. 6.1). L'Argonne est incontestablement l'une des régions les plus propices à la guerre des mines car elle offre de multiples crêtes et ravins, sous couvert forestier (Taborelli *et al.*, 2016b) et la gaize reste tendre et cohérente à creuser.

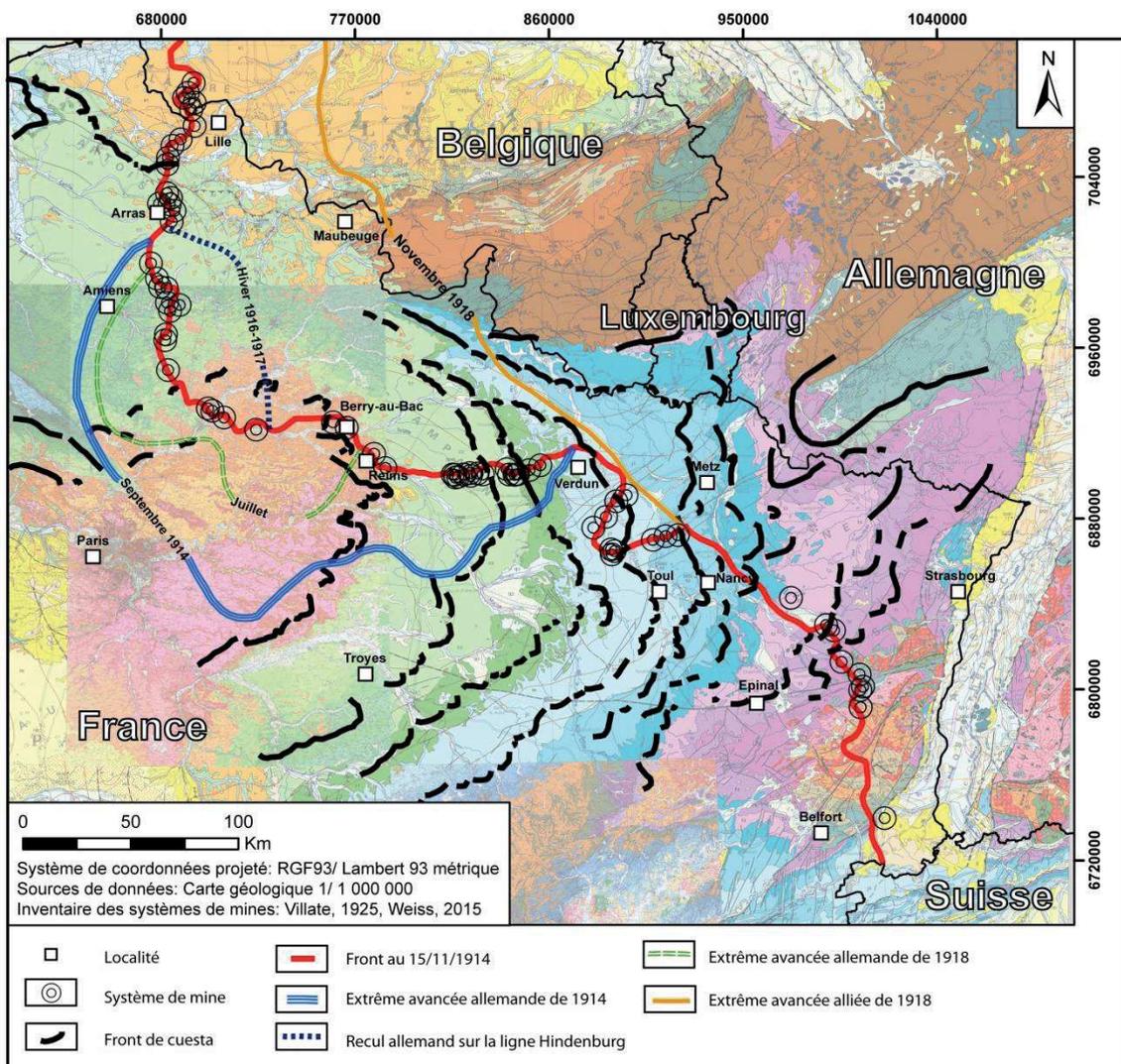


Fig.6.1: Cartographie des systèmes de mines sur le front ouest de la Grande Guerre

6.1.1. Principes de la guerre des mines

- Le site

La guerre des mines se limite généralement là où les lignes adverses sont proches d'une centaine de mètres, voire moins. Elle impacte peu l'organisation spatiale du front et ne concerne que les premières lignes de défense lorsque le cratère est occupé et fortifié (petite hernie dans la ligne de résistance). Mais généralement, sur les plans directeurs, les entonnoirs de mine restent dans le no man's land, et sont même représentés en deux couleurs, une moitié rouge et l'autre bleue, témoignant du faible effet tactique de la guerre des mines (Fig. 6.2A). Néanmoins, dans les secteurs qui ont connu des offensives, on retrouve des alignements de cratères monochromes, soulignant l'ancien tracé de la ligne de front (Fig. 6.2B).

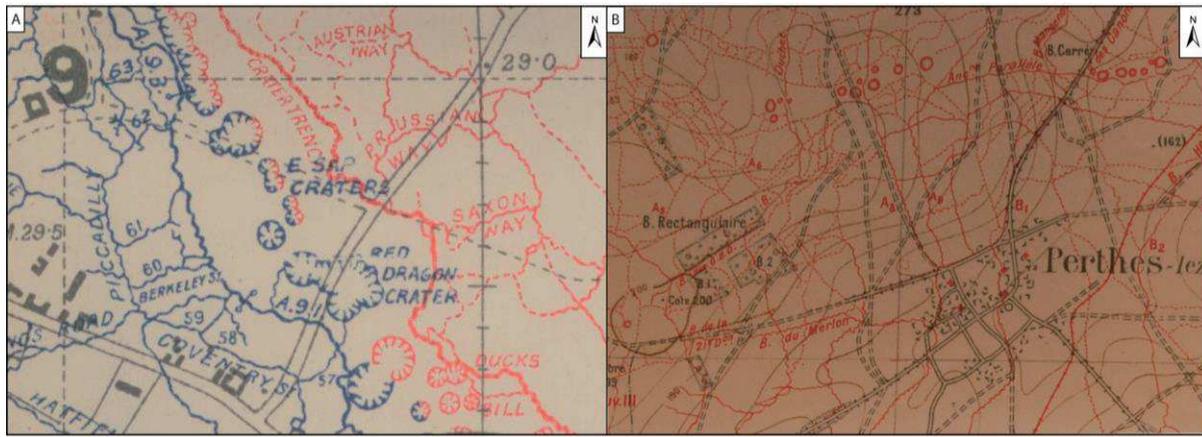


Fig.6. 2: A - Entonnoirs de mines dans le no man's land, extrait de plan directeur anglo-saxon, secteur de Givenchy. B – Entonnoirs de mines sur l'ancien tracé de la ligne de front au Nord de Perthes-lez-Hurlus (Extrait du plan directeur de Tahure de 1918).

La géologie conditionne non seulement la propagation du son, la quantité d'explosif, mais aussi les potentialités de creusement des rameaux, du fourneau et l'évacuation des eaux souterraines, alors que la géomorphologie détermine le site favorable à la guerre des mines (butte, crête étroite).

- Le creusement

Après une analyse du site et de la géologie du terrain, l'État-Major donne l'ordre de se lancer dans des travaux de mines dans un secteur bien déterminé. La guerre des mines est davantage utilisée lorsque le général de corps d'Armée est issu du Génie (Von Mudra en Argonne). L'entrée, point de départ des galeries, peut être matérialisée par une descenderie, ou par un puits vertical notamment en plaine (Flandres), alors que dans les plateaux, des entrées en bouche de cavage sont creusées sur les versants ou dans les fronts de taille des carrières aériennes (Cote 108). Cette entrée n'est jamais localisée dans la première ligne de défense mais se retrouve en seconde ligne, ou dans les boyaux adjacents. La « tête de galerie » ou partie terminale accueillant le fourneau d'explosion se situe sous la première position ennemie. Les galeries de petites dimensions sont désignées sous le nom de rameaux. Une galerie majeure peut mesurer une hauteur de 2 m, un grand rameau de 1 m et un rameau de

combat, seulement de 0,70 m. Le travail souterrain est continu pour une avancée rapide et augmenter l'effet de surprise (Fig. 6.3A) mais dépend étroitement de la nature géologique du terrain. En Champagne et en Argonne, les vitesses de creusement sont respectivement de 2,5 m/jour dans la craie avec perforateur électrique et 1 m dans la gaize alors qu'elles dépassent 4 m/jour dans les sables des Flandres (Willig *et al.*, 2016). Les sapeurs, côté français, ou les pionniers, côté allemand, se relayent pour creuser et évacuer les déblais du réseau souterrain. Leurs outils restent rudimentaires (pioche, drague de mine (Fig. 6.3C), pic à tête, pointe de mineur, barre à mine) dans une ambiance sombre et humide, mais laissent place aussi à l'ingéniosité des hommes. Certains mineurs, adossés à une planche de bois, abattent le front de taille à l'aide de leurs pieds avec une bêche dans les terrains argileux des Flandres (Fig. 6.3B). Ces travaux souterrains sont rarement mécanisés, pour éviter à l'ennemi de les détecter. Les mineurs utilisent également un niveau de maçon (Fig. 6.3D), un niveau en demi-cercle, et une boussole pour s'orienter dans le réseau souterrain (Fig. 6.3E). Ce dernier est éclairé à la bougie (chandelier du mineur) ou par des lanternes, et aéré par des ventilateurs. Dans la mesure du possible et selon la nature du terrain, ces travaux de creusement sont sécurisés par un coffrage en bois. Le terrain est désigné par trois classes :

- Terrain ordinaire ou bon quand le travail d'un intervalle de galerie peut être effectué avant le coffrage
- Mauvais terrain dont le coffrage doit être réalisé au fur et à mesure du creusement
- Terrain coulant qui exige des procédés particuliers pour son creusement (École des Mines, 1914).

La quantité importante de déblais que génèrent ces travaux doit être évacuée par des paniers de mines, des baluchons, des chariots ou des wagonnets sur voie étroite à l'extérieur des galeries (Fig. 6.3F). Cette gestion est primordiale car elle ne doit pas permettre à l'ennemi de détecter les travaux de creusement dans le secteur. Les déblais sont souvent évacués la nuit et entreposés dans des zones camouflées de la vue de l'ennemi.

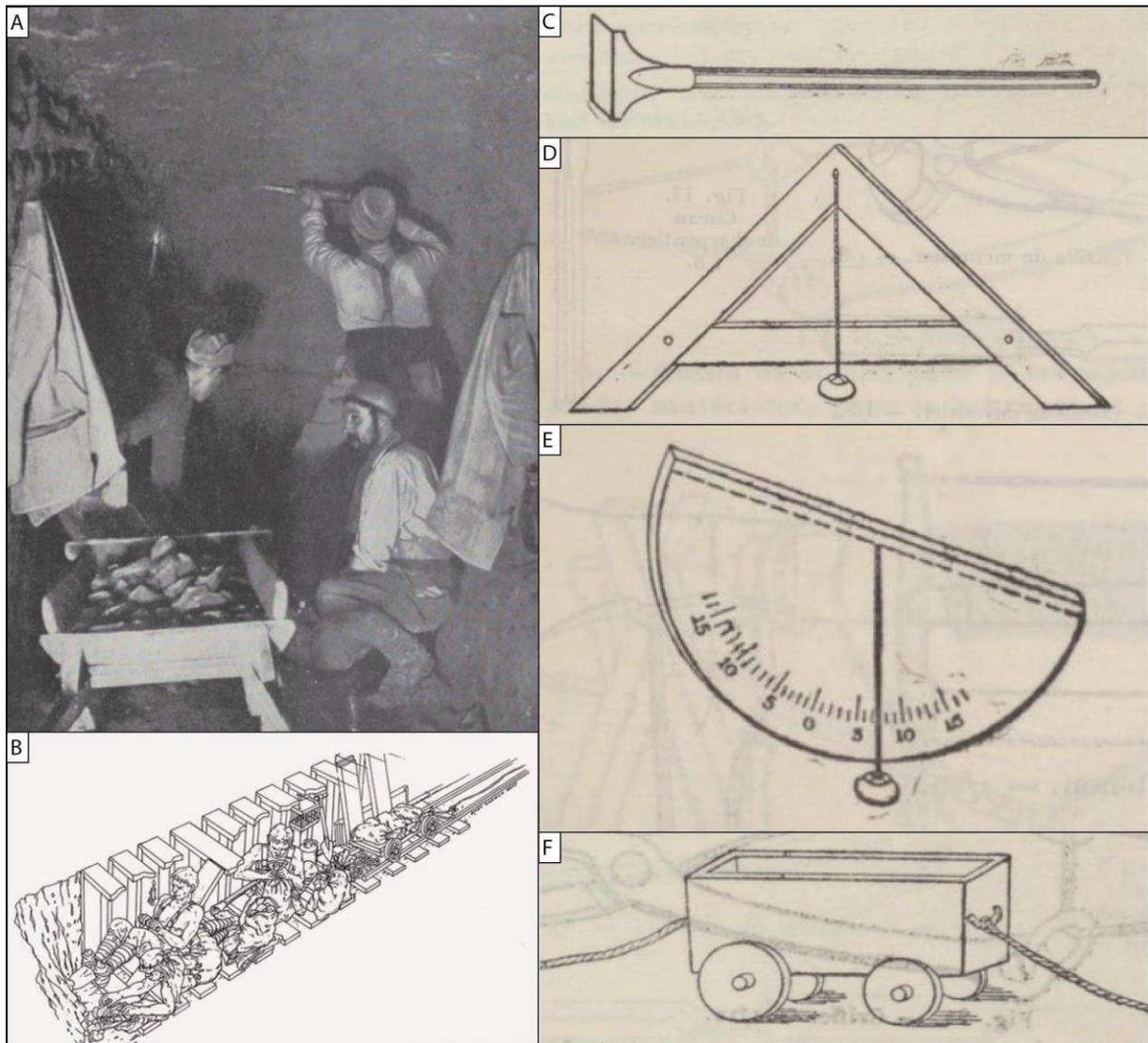


Fig.6. 3: A – Creusement d’une galerie de mine en Argonne B – Creusement d’un rameau de combat par les pieds (Source : Dessin de Andy Gammon). C – Drague de mine. D – Niveau de maçon. E – Niveau en demi-cercle. F – Chariot de mine (École des mines, 1914).

Certains plans directeurs français ou cartes allemandes à grande échelle (1/1 000) renseignent précisément sur l’emprise des cratères de mines, mais également sur le réseau souterrain des rameaux et des fourneaux. En Argonne, la cote 285 constitue un système de mines. Côté allemand, le réseau est dense, les entrées de galeries sont localisées dans la seconde ligne, ou dans les boyaux entre la première et la deuxième ligne (Fig. 6.4A). Sous terre, l’organisation des galeries se structure autour d’une transversale parallèle à la ligne de front, reliant chaque entrée, et dessert, vers le no man’s land, des rameaux de combats. Sur ce linéaire de front de 800 m, les galeries allemandes s’étendent sur 4 160 m, traduisant une densité linéaire de 5 200 m pour un kilomètre de front. Côté français, l’organisation est différente, car elle se structure par des galeries dendritiques mais desservies par une seule entrée (Fig. 6.4B). Sur un linéaire de front de 613 m, le réseau français s’établit sur 1 520 m, soit une densité linéaire de 1 631 m pour un kilomètre de front.

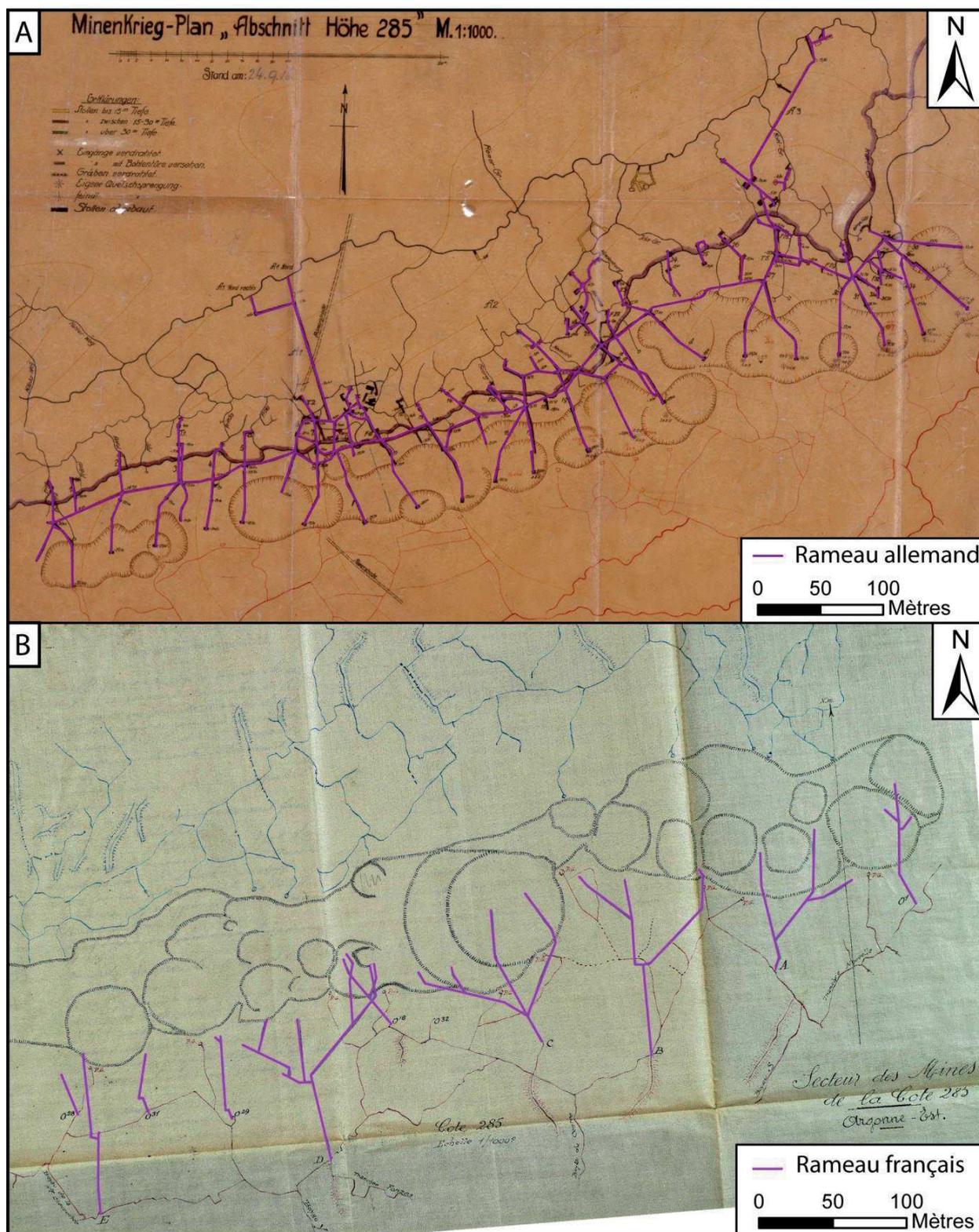


Fig.6. 4: A – Carte allemande au 1/1 000 du 24 septembre 1918 des réseaux souterrains dans le secteur de la Cote 285 en Argonne (Source : Association Deutsches Erinnerungskomitee Argonnerwald 14-18). B – Plan directeur au 1/1 000 du 23 septembre 1917 des réseaux souterrains dans le secteur de la Cote 285 en Argonne (Source : Association Deutsches Erinnerungskomitee Argonnerwald 14-18).

- Creusement du fourneau, bourrage et explosion

Inscrit dans le principe de grignotage du front, l'objectif de la guerre des mines est double : détruire les premières lignes ennemies par une explosion puis occuper le cratère pour le fortifier (Porte, 2014a). A la partie terminale du rameau de combat, une chambre est creusée (fourneau) pour entreposer l'explosif. Ce dernier se présente sous différentes formes (poudre noire, mélinite pulvérulente ou fondue) et dans différents contenants (barils, caisses, bouteilles).

La forme de la chambre explosive dépend de la quantité d'explosif. La chambre est perpendiculaire au rameau de combat pour une charge inférieure à 5 tonnes, et forme un « Y » ou un « V » pour une charge supérieure à 15 tonnes. Après avoir entreposé la charge d'explosif dans la chambre, un bourrage compact doit être réalisé pour supprimer le vide dans son voisinage et ainsi propulser l'énergie de l'explosion vers la surface du sol (Fig. 6.5A). Ce vide est comblé par de la terre damée, des sacs à terre, du gazon ou des briques maçonnées. La longueur dépend de la quantité d'explosif : 4,5 m pour 50 kg de poudre noire mais 16,5 m pour 2 tonnes (École des Mines, 1914). Quelle que soit la charge de la mélinite, une barricade et un remplissage de terre ou de sable sur 1 m de longueur suffisent à constituer le bourrage. La mise à feu est réalisée par mèche lente (Fig. 6.5B), cordeau détonant ou par impulsion électrique en fonction des longueurs de galeries et de la charge (École des Mines, 1914). La surveillance des travaux ennemis par écoute (Fig. 6.5C) est également continue et de petites explosions peuvent être générées pour détruire des galeries adverses en cours de creusement. Cette explosion, ou camouflet, est réalisée par un fourneau sous-chargé et ne génère pas de cratère. Après chaque explosion, une importante ventilation des galeries doit être effectuée car le gaz stagne longtemps dans les différentes fissures de la roche, afin d'éviter toute asphyxie des mineurs.



Fig.6. 5: A – Bourrage par sacs à terre d'un fourneau de mine en Argonne (Source : BDIC VAL 113/103). B – Allumage de la mèche lente du fourneau en Argonne (Source : BDIC VAL 113/104). C – Ecoute des travaux de mines de l'ennemi par un officier du génie en Argonne (Source : BDIC VAL 113/099).

La taille ou le rayon (r en mètres) de l'entonnoir dépend de la résistance des géomatériaux (g), de la profondeur du fourneau (h), de la quantité et du type d'explosif (charge en kg) selon l'équation suivante pour les fourneaux ordinaires ($h=r$) :

$$\text{Charge} = g \cdot h^3$$

Roches	Valeurs de « g »
Terre légère	1,2
Sable fort	1,75
Terre mêlée de pierres, argiles à silex	2-2,25
Argile mêlée de tuf	2,25
Maçonnerie médiocre	2,5
Roc, calcaires, bonne maçonnerie	3-3,4 (calcaires) à 4,5
Roc très dur (grès, granites, quartzites) et compact, béton, ciment	4,5 à 7

Tab 6.1 : Valeur de g selon la nature de l'encaissant (d'après Villate, 1925).

La valeur de g dépend de la résistance des matériaux et passe de 1,2 pour les terres légères à 7 pour les roches très dures et les ouvrages bétonnés (Tab. 6.1). La guerre des mines est morphogène car elle produit des cratères ou entonnoirs de grande taille (métriques à décamétriques) associés aux fourneaux ordinaires et surchargés, mais aussi des renflements du sol liés à la dilatance des matériaux déstructurés par l'explosion pour les fourneaux sous-chargés ou camouflets. Pour les fourneaux ordinaires, le rayon de l'entonnoir est égal à la profondeur du fourneau (Fig. 6.6A). Sur l'ensemble du front, les conditions géologiques, les types d'explosifs et les profondeurs des fourneaux déterminent une grande diversité de charges utilisées puisqu'elles s'échelonnent de quelques kilos à plusieurs dizaines de tonnes (Fig. 6.6B). Sur le site de Messines entre 1916 et 1917, parmi les 20 explosions qui ont nécessité 425 tonnes d'explosifs, les charges minimales et maximales sont respectivement de 6,8 à 44,4 tonnes.

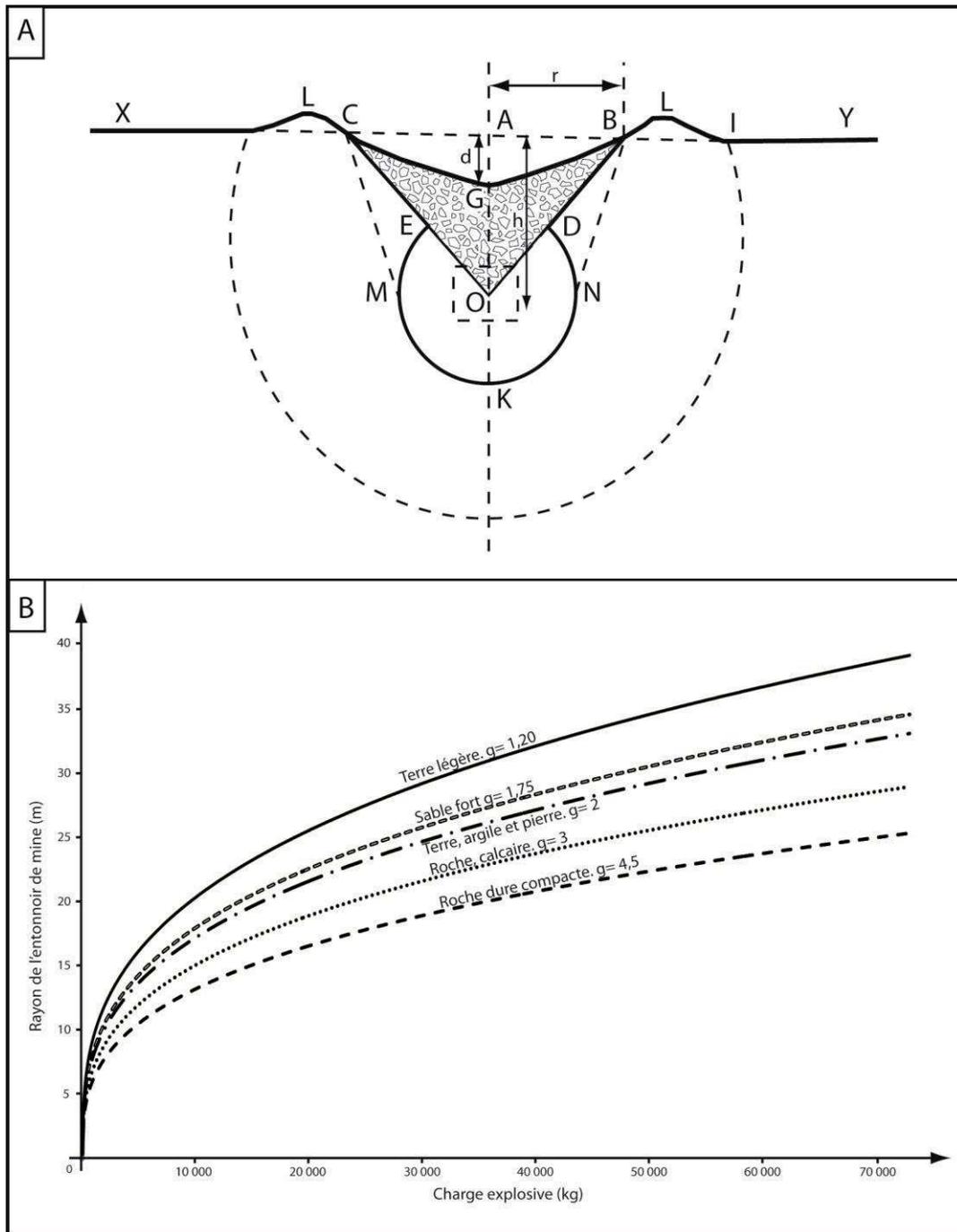


Fig.6. 6: A - Indices morphométriques d'un cratère de mines (d'après le Ministère de la Guerre, 1938). B - Relation entre la charge explosive du fourneau et le rayon de l'entonnoir de mine selon la nature du sol.

Pour obtenir un entonnoir de mine, les « fourneaux à charges concentrées dans la terre » (Ministère de la Guerre, 1938) sont creusés à la profondeur $OA = h$ sous la surface du sol (XY) (Fig. 6.6A). Pour les fourneaux ordinaires, h est égal au rayon de l'entonnoir (r), le rapport r/h est donc égal à 1 alors qu'il est respectivement supérieur et inférieur pour les fourneaux surchargés et les camouflets. La profondeur (d) du cratère est alors réduite à AG . Dans les terrains consistants, la cavité sous les remblais décrit le profil CEMKNDB alors que dans les terrains friables, celui-ci décrit un contour parabolique CKB. La déstructuration des

terrains s'effectue dans un cercle de friabilité. Dans les terrains consistants, la cavité sous les remblais décrit un profil d'entonnoir profond alors que dans les terrains friables celui-ci décrit un contour parabolique.

L'explosion produit une chambre de décompression qui se propage vers le haut, soulevant le sol et un globe de friabilité de rayon OI dans lequel la roche est fracturée, détendue et la surface du sol déformée par dilatance sous la forme d'un léger boursoufflement ou « extumescence » composant les lèvres de l'entonnoir (L) qui se surhaussent lors de la chute de la gerbe. Les gaz générés par l'explosion percent la surface boursouflée et connaissent une expansion soulevant une gerbe de projections (éjectas) qui atteint une ascension maximale (Fig. 6.8C). Pour les fourneaux ordinaires, la majeure partie de la gerbe retombe à l'intérieur du cratère (bombes), réduisant sa profondeur, alors qu'une autre partie est expulsée à l'extérieur constituant le bourrelet périphérique. La retombée des particules fines, formant un panache de poussières, à l'intérieur et à l'extérieur du cratère, recouvre les éjectas grossiers déterminant un granulo-classement positif et d'une inversion stratigraphique au niveau du bourrelet BLI. Ce dernier présente une coupe transversale dissymétrique avec un front interne à pente raide et un revers externe à plus faible pente. La gélivité et la dureté de la roche encaissante conditionnent la conservation des bombes d'éjectas à l'extérieur du cratère. Que ce soit dans la craie ou dans la gaize, roches très gélives, aucun bloc résiduel et périphérique de cette gerbe sur le terrain n'est décelé. Par contre, dans les formations calcaires du Jurassique et plus particulièrement aux Eparges, on observe des blocs métriques, résiduels de calcaires oxfordiens qui tapissent le cratère (Fig. 6.7A) et le bourrelet (Fig. 6.7B). L'onde de choc au sein du globe de friabilité accentue la fracturation de la roche, sa perméabilité de fissure et sa vulnérabilité à l'infiltration des eaux. Ces caractéristiques concernent plus particulièrement les sites où les cratères sont coalescents ou emboîtés.



Fig.6. 7: A – Blocs décimétriques dans le fond et sur les flancs d'un cratère aux Eparges (Source : cliché Taborelli P.). B – Blocs décimétriques sur le bourrelet d'un cratère aux Eparges (Source : cliché Taborelli P.).

L'impact géomorphologique des cratères de mines présente les mêmes caractéristiques (cratère, bourrelet périphérique, éjectas) que les astroblèmes (Hodge, 1994 ; Salomon et Auly, 2010) et mériterait des investigations géophysiques pour mesurer l'importance des remblais associés à la retombée de la gerbe et le degré de fracturation.



Fig.6. 8: Planche photographique diachronique de l'explosion d'une mine à Beaumont-Hamel dans la Somme en 1916 (ECPAD) et d'une mine en Syrie en 2014 (You Tube). A - Avant l'explosion. B - Explosion soulèvement du sol. C - Gerbe verticale avec trainées d'éjectas blocs projetés ou « bombes ». D - Ascension maximale de la gerbe de terre et de roche. E - Retombées des éjectas et particules fines avec panache de poussières au sol.

Cette technique antique est encore utilisée de nos jours dans des conflits contemporains, notamment dans des combats urbains (Syrie). Les combattants utilisent les réseaux souterrains préexistants sous la ville (égouts) ou creusent des galeries avec des micro-tunneliers afin de garnir un fourneau d'explosif sous l'objectif à détruire (Fig. 6.8). Ces actes de guerre sont filmés et largement utilisés par la propagande, comme en Syrie.



Fig.6. 9: Planche panoramique de cratères de mines en 2015 en Champagne-Ardenne. A : Cratère de mine en Argonne (cliché : Devos A.) ; B : Cratère de mine à Massiges (cliché : Devos A.) ; C : Cratère de mine dans le camp militaire de Suippes (cliché : Taborelli P.).

Ailleurs, la guerre des mines peut affecter un même secteur durant plusieurs années comme à Vauquois, aux Eparges ou à Berry-au-Bac (Cote 108). Dans ce cas, plusieurs cratères de mines s'organisent sous la forme d'un chapelet d'entonnoirs non jointifs, voire coalescents ou emboîtés ce qui limite fortement leur lisibilité dans le paysage (Chapitre 4). D'autres sites ont connu des cratères isolés moins nombreux, voire un seul comme à Bétheny près de Reims. Ces méga-cratères peuvent être comblés intégralement après-guerre (Ferme d'Alger près du fort de la Pompelle), mais généralement, ils subsistent encore sous forêt (Fig. 6.9), occupés par des plans d'eau dans les argiles des Flandres (Lone Tree Crater à Messines, Saint-Eloi),

colonisés par la végétation ou réhabilités par des associations (Vauquois, Cote 108, Main de Massiges, La Boisselle).

Pour mieux appréhender cet impact souterrain, deux sites sont choisis sur ce front champardennais à ses deux extrêmes Est et Ouest : en Argonne à Vauquois et sur la Cote 108 près de Berry-au-Bac.

6.1.2. Vauquois en Argonne

Dans un contexte peu propice aux grandes offensives dans le massif forestier argonnais, la guerre des mines se développe à outrance sur les crêtes et buttes du secteur. Six « systèmes de mines » sont mis en évidence en Argonne (Fig. 6.1) : la Harazée, site de mine de début 1915, le Four de Paris, Bolante, la Fille-Morte, la Haute-Chevauchée et Vauquois.

La butte de Vauquois, occupée par l'armée allemande pour régler ses tirs d'artillerie sur la voie ferrée entre Châlons-sur-Marne et Verdun, est attaquée sans relâche par l'armée française. En mars 1915, les deux armées se partagent la crête et ce site va devenir un haut-lieu de la guerre des mines. Les Français vont établir 5 km de galeries alors que les Allemands iront jusque 17 km. La particularité du site réside également dans la profondeur recherchée par les deux camps, traversant la gaize entre 290 m et 220 m, mais traversant les argiles du Gault et les sables verts sous-jacents pour atteindre les calcaires jurassiques, nécessitant un dispositif d'exhaure (Fig. 6.10). Sur ces 500 m de front, 519 explosions sont recensées (199 allemandes et 320 françaises) avec la plus importante, le 14 mai 1916, lors de laquelle 108 soldats français seront tués, avec une mine chargée de 60 tonnes d'explosifs et un cratère béant de 70 m de diamètre (Amis de Vauquois, 2004). Jean Léry fait référence à la butte dans ses écrits (Léry, 1916) :

« À cause du caractère accidenté du terrain, et surtout du voisinage des tranchées adverses, la guerre de sapes et de mines a pris en Argonne un développement sans cesse grandissant. (...) Dans un coin les plus difficiles de l'Argonne, les Allemands tenaient, il y a quelques temps, une crête d'où ils dominaient nos positions, rendant la situation de nos troupes aussi périlleuse que possible. Pour rétablir l'équilibre et faire cesser notre infériorité, un de nos officiers du Génie se mit en tête de détruire à coups de mine cette crête, de changer en quelque sorte la configuration du sol. Grâce à une dizaine au moins de galeries profondes qui, partant de nos tranchées, allaient aboutir jusqu'au-dessous des tranchées allemandes, il fit exploser, à point nommé, tout autant de fourneaux qui creusèrent de vastes entonnoirs, enterrèrent les tranchées allemandes, bouleversèrent de fond en comble le terrain et firent disparaître cette crête si gênante pour nous. »

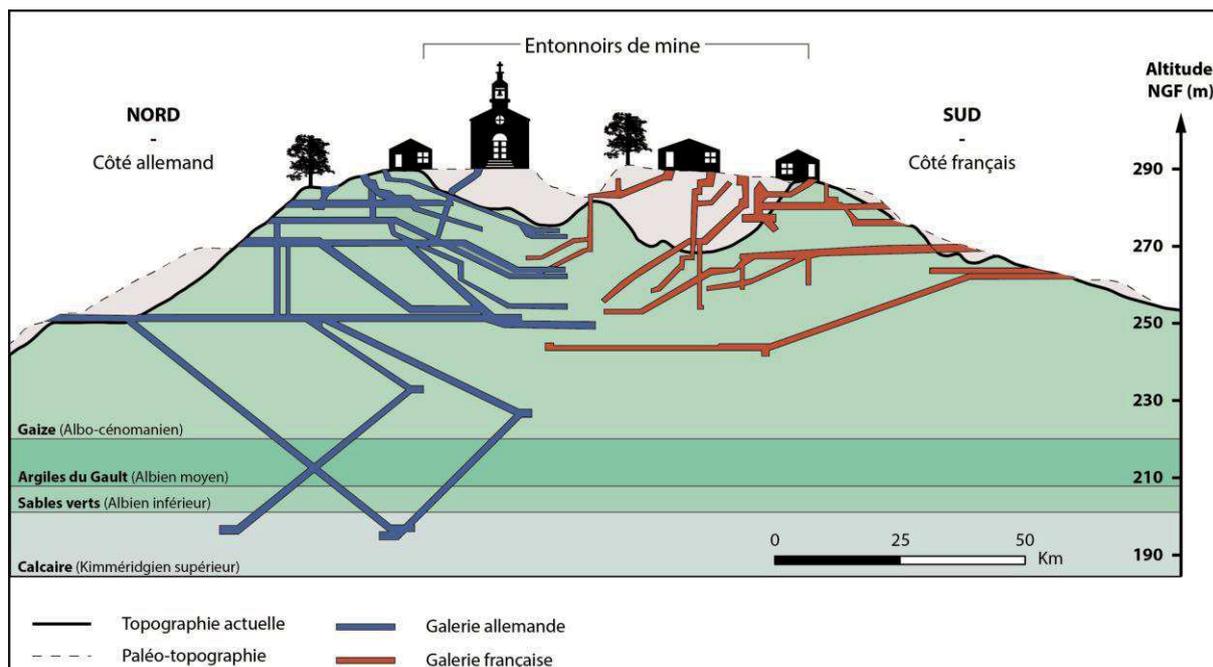


Fig.6. 10: Coupe de la butte de Vauquois (d'après les Amis de Vauquois, 2004).

La topographie est bouleversée et la crête est balafnée par des entonnoirs de mines coalescents et profonds d'une vingtaine de mètres dans la gaize alors que les flancs sont recouverts par les verses ou « stériles » issus des travaux de creusement des galeries. Aujourd'hui, le site est valorisé par l'association des Amis de Vauquois en surface par l'entretien des cratères mais également par des visites dans le premier étage des galeries souterraines (Fig. 6.11).



Fig.6. 11: Vue panoramique de cratères de mines coalescents à Vauquois (Cliché : Sinet E.).

6.1.3. Cote 108 à Berry-au-Bac.

- Le site

Le site de la Cote 108 à Berry-au-Bac est révélateur des polémopaysages de la guerre des mines et de l'impact souterrain. La « Montagne de Sapigneul », devenue depuis 1914 la « Cote 108 », est un site incontournable de la Grande Guerre qui s'intègre aux parcours touristiques de l'après-guerre des guides Michelin. Elle constitue un site d'interfluve entre l'Aisne au Nord et la Loivre, son affluent direct, au Sud (Fig. 6.12). Comme la plupart des sites d'entonnoir de percée cataclinale dans la cuesta d'Île-de-France, des croupes de craie jalonnent le paysage dont la Cote 108 (qui culmine à 89,5 m) et le Mont de Sapigneul (93 m) dans le secteur de Berry-au-Bac. Elles sont sculptées dans la craie blanche du Sénonien (Crétacé supérieur) sans silex, fracturée en subsurface et massive en profondeur au-delà d'une trentaine de mètres (Le Roux et Allouc, 1988). La nappe de la craie est une nappe libre, drainée par les cours d'eau (rabattement piézométrique à faible gradient hydraulique) dont la surface piézométrique connaît de faibles amplitudes en fond de vallée (50 cm à 1 m) contrastant avec les interfluves (10 m). Cette limite de conditions hydrogéologiques contrastées se manifeste par des zones humides caractéristiques des entonnoirs de percées cataclinales, drapées de formations alluviales grossières (graveluches alluviales) et recouvertes de niveaux argilo- tourbeux et de limons. Compte tenu de l'hydromorphie des sols, les fonds de vallées sont difficiles à fortifier dans le cadre de la guerre de position. La craie tendre, sans couverture géologique, facile à creuser et la navigabilité du site constituent un site propice à l'extraction en géomatériaux. Le site est largement entaillé de crayères et de carrières à chaux (Carrière française à l'Ouest, Carrière de la Cimenterie au centre, Grande Carrière à l'Est et Carrière de Sapigneul au Sud en rive droite de la Loivre). Ces carrières offrent de nombreux fronts de taille propices au creusement des galeries et rameaux de combat sur les flancs de la croupe en zone non saturée de l'aquifère crayeux (Fig. 6.12).

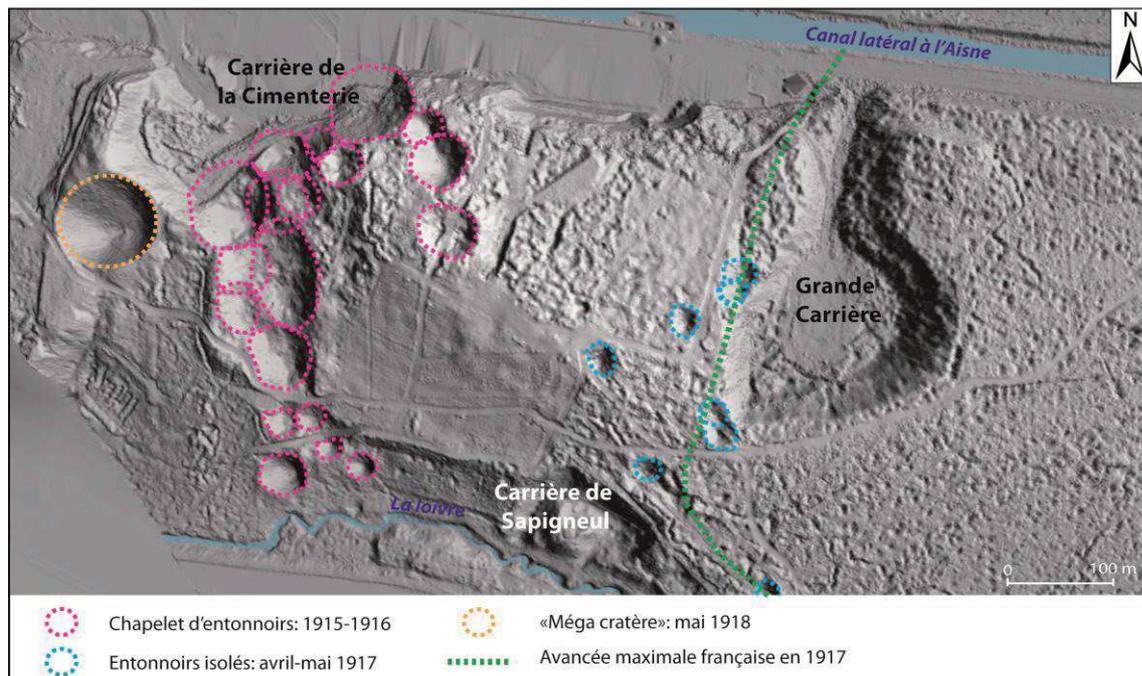


Fig.6.12: Image Lidar de la Cote 108 et des différents stades de formation des cratères de mines.

La Cote 108 a fait l'objet d'une abondante iconographie (cartes postales), décrite dans les ouvrages (Laforgerie et Weiss, 2013 ; Weiss, 2016) et journaux de marche des opérations (JMO). Après-guerre, le paysage est si dévasté par les entonnoirs de mines et la bombturbation (Lateuile, 1920), que la Cote 108 est classée en zone rouge et fait l'objet d'un classement aux Monuments Historiques en 1937 (Viltart, 2014). Le site, aujourd'hui végétalisé par des arbustes et épineux (cornouillers sanguins), est pratiquement inextricable à l'exception de sa partie orientale gérée par l'ONF (parcelles de replantations) et du plus gros cratère qui fait l'objet d'une remise en valeur patrimoniale (Association de la Cote 108).

- La guerre des mines sur la Cote 108

Dès l'hiver 1914-15, la Cote 108 est traversée par la ligne de front du Nord (de la Carrière de la Cimenterie) au Sud (Carrière de Sapigneul). Elle connaît une guerre souterraine intense en 3 phases (Fig. 6.13):

- De décembre 1914 à décembre 1916 (Hemez, 2011 ; Laforgerie et Weiss, 2013 ; Weiss, 2016). Durant le conflit, 198 explosions souterraines sont dénombrées dont 132 camouflets utilisant plus de 200 tonnes d'explosifs côté français (De Fonclare, 1928 ; Winkler, 1929 ; Cussenot, 1929) sur une ligne de front de 1 km qui reste fixée près de 3 ans sans modification significative de tracé. Cette phase est incontestablement la plus morphogène car elle a généré le chapelet d'entonnoirs de mines qui traverse l'interfluve entre l'Aisne et la Loire. Cette coalescence pose un problème d'identification automatique des formes en Lidar (chapitre 5).
- En 1917, la Cote 108 s'inscrit dans l'offensive Nivelle au Chemin des Dames (avril-mai 1917) et enregistre une avancée française de 400 mètres en limite Ouest de la Grande Carrière qui ne durera que 2 mois. Fin mai 1917, la ligne de front retrouve sa situation initiale suite à un nouveau regain de l'activité souterraine allemande affectant la partie Est du site près de la Grande Carrière. Pour cette seconde phase, subsistent 8 entonnoirs isolés à l'Ouest de la Grande Carrière.
- L'offensive Ludendorff dès le 27 mai 1918 se traduit vraisemblablement par des explosions allemandes à la Cote 108. Un entonnoir unique de taille imposante (78 m de diamètre et 22 m de profondeur) date vraisemblablement de cette période, dénommé depuis nos investigations, le « méga-cratère ». Il est isolé à l'Ouest du site poinçonnant l'éperon entre la Carrière française et la Carrière de la Cimenterie. Une percée rapide et profonde du front jusque dans la vallée de la Marne marque le retour à la guerre de mouvements sans guerre des mines. La Cote 108 reste allemande et ne sera libérée que le 8-9 octobre 1918.

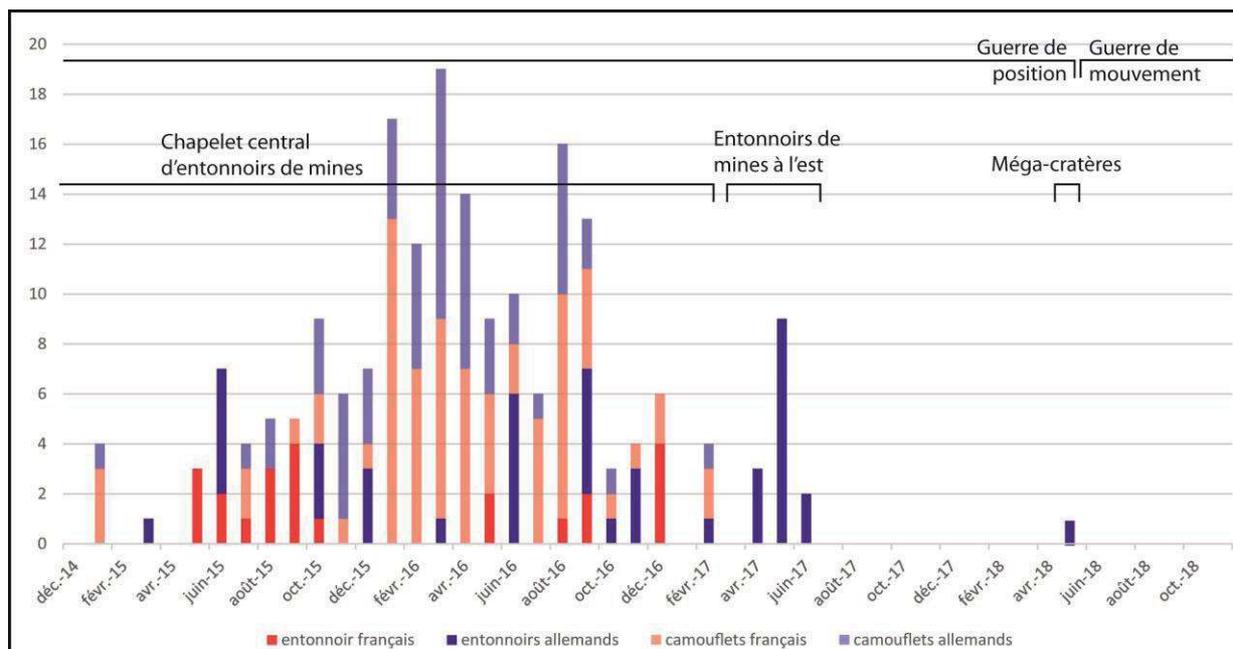


Fig.6. 13: Distribution temporelle des explosions de mines et camouflets sur le site de la Cote 108 (Winkler, 1929 ; Laforgerie et Weiss, 2013).

- Le méga cratère de la Cote 108

En comparant 33 sources historiques (plans directeurs et photographies aériennes), la date de l'explosion du méga-cratère peut être déduite avec précision. Sur les plans directeurs, sa présence est repérée le 28 septembre 1918 (Fig. 6.14A) (absence en mai 1918, Fig. 6.14B). Il n'est pas décelé sur la photographie aérienne du 27 mai 1918 (Fig. 6.14C) mais son existence est révélée le 31 mai 1918 (Fig. 6.14D). Il apparaît nettement que ce cratère se soit formé entre le 27 et le 31 mai 1918 (phase 3). Or, dès le 27 mai, l'offensive Ludendorff permet le retour à la guerre de mouvements en perçant le front au Chemin des Dames, formant à l'Ouest de Reims, la poche de Château-Thierry. Il est donc probable que le méga-cratère soit du 27 mai 1918 et synchrone au déluge de feu qui s'abat sur le site défendu par l'armée anglaise (62^{ème} Brigade, 12/13^{ème} Northumberland Fusiliers) durant l'offensive allemande.

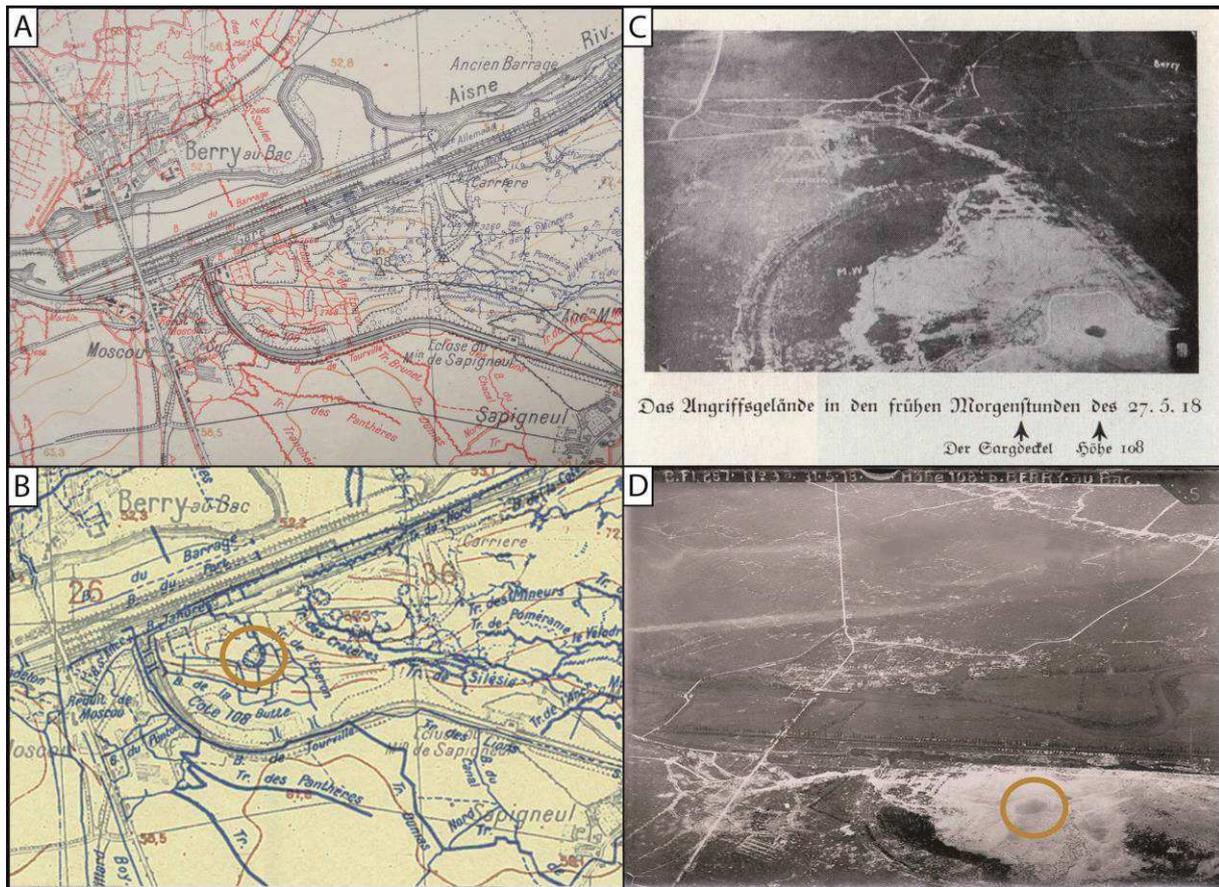


Fig.6. 14: A - Plan directeur du 1er mai 1918 sans le méga-cratère. B - Plan directeur du 28 septembre 1918 avec le méga-cratère. C - Photographie aérienne oblique du 27 mai 1918 sans le méga-cratère (Collection Schneider). D - Photographie aérienne du 31 mai 1918 avec le méga-cratère (Source : Collection Viltart).

Le traitement des images Lidar permet de déterminer sa profondeur (d) qui est de 22 m et son diamètre compris entre 61 et 76 m (forme d'ellipse) pour un volume calculé sous une surface topographique de référence de $79\,755\text{ m}^3$, soit plus de 150 000 tonnes. Son profil transversal détermine des pentes fortes (moyenne de 45° , maximum de 49°) qui rendent difficile l'accès. D'après les caractéristiques morphométriques de ce cratère, la charge explosive est estimée à 70 tonnes (Fig. 6.6B), une profondeur OA de 32 m, ce qui permet de déterminer une épaisseur des remblais de la gerbe à une dizaine de mètres (Fig. 6.15). À la différence des autres entonnoirs de mines, ce méga-cratère n'est pas affecté par les impacts d'obus en Lidar, ce qui confirme son explosion relativement tardive (27 mai 1918).

À la différence d'autres systèmes de mines valorisés par des associations, les galeries souterraines associées à ces cratères sont mal connues et mériteraient des investigations géophysiques et subterranologiques pour confirmer la structure interne des cratères de mines. Les impacts pédologiques et géomorphologiques de sub-surface seront traités dans le chapitre 7.

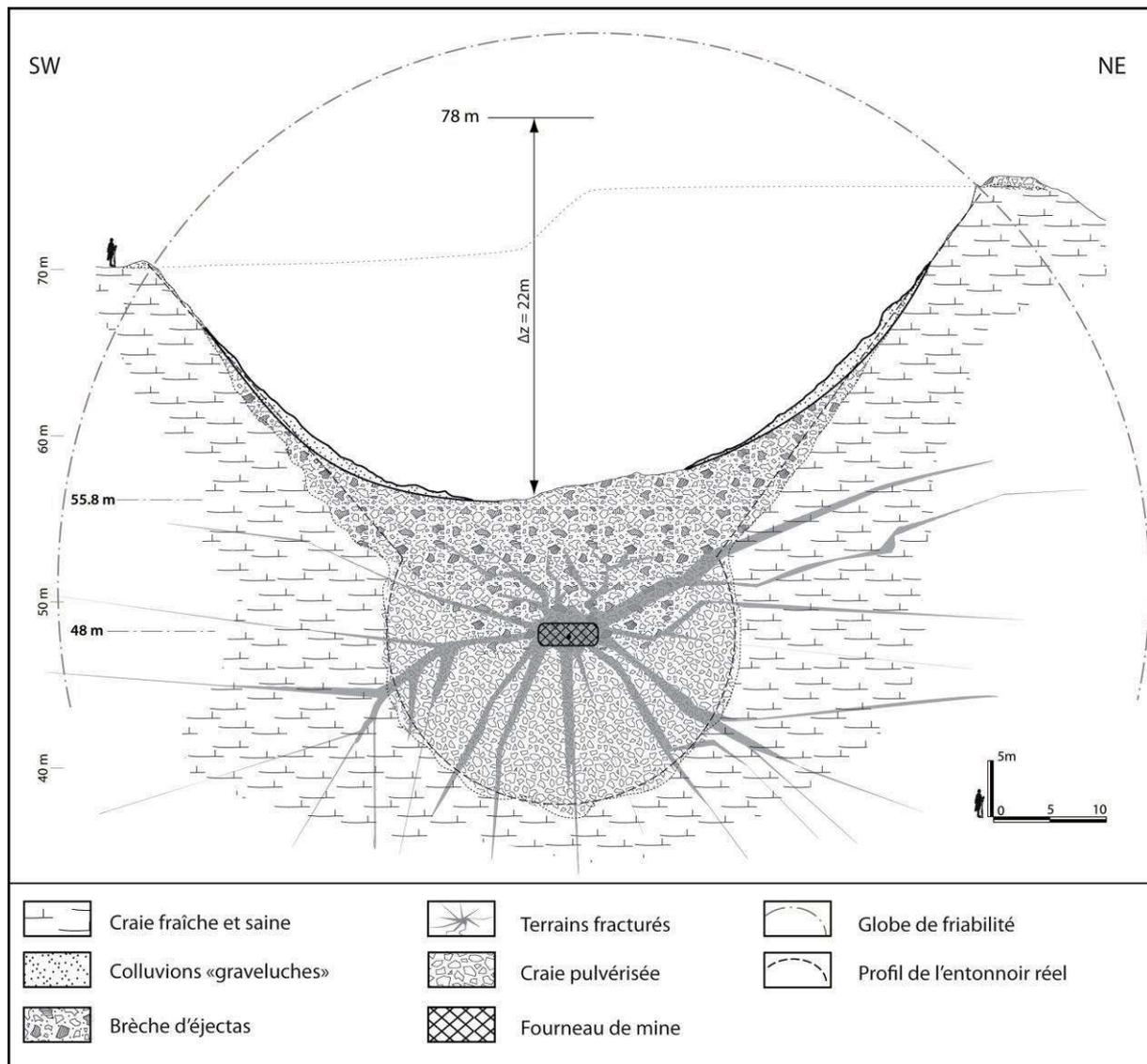


Fig.6. 15: Morphométrie et interprétation des conséquences de l'explosion du « méga-cratère » de la Cote 108.

La guerre des mines, essentiellement offensive, n'a provoqué que des gains de terrain insignifiants par rapport aux travaux fournis par les hommes sous terre. Cependant, ce principe a aussi des répercussions psychologiques pour les soldats occupant les tranchées. Savoir que l'ennemi creuse sous vos pieds et qu'à tout moment, vous pouvez être soufflé et enseveli à jamais est très traumatisant. Entendre l'ennemi creuser est rassurant, mais ne plus l'entendre est synonyme du chargement du fourneau et d'une explosion imminente.

6.2. Les abris

Le développement de l'Artillerie tout au long du conflit, l'ingéniosité des hommes dans les progrès de la puissance de feu fait naître une adaptation permanente pour la protection des soldats. Dans les réseaux de défense, en fonction des conditions géologiques et hydrologiques, les hommes creusent des abris pour se protéger des bombardements de l'Artillerie ennemie. Plus à l'arrière, ce sont des cavités déjà creusées (creutes, caves privatives, crayères) qui seront occupées pour leur protection.

6.2.1. Les creutes

Dans le secteur de Reims, le front suit le tracé du Canal de l'Aisne à la Marne jusque Berry-au-Bac puis son tracé traverse la Côte d'Île-de-France jusqu'au Chemin des Dames, tristement célèbre par les attaques d'avril 1917. Le Chemin des Dames qui parcourt sur 22 km la crête, de la Malmaison à l'Ouest jusqu'à Craonne à l'extrémité orientale du plateau, est un ancien chemin antique, médiéval et moderne. Il porte son nom, emprunté aux « Dames de Proisy » au Moyen-Âge puis aux « Dames de France », filles de Louis XV.

Au sommet de ce plateau, reposant sur le soubassement d'argiles sparnaciennes (Yprésien inférieur) et de sables cuisien (Yprésien supérieur), l'entablement des calcaires du Lutétien moyen est creusé de très nombreuses carrières, souvent encore en activité à la veille de la guerre, dénommées localement creutte ou creute (Devos *et al.*, 2008). Ce terme est typique de la Picardie, notamment autour du Chemin des Dames près de Soissons. Ces creutes sont des carrières exploitées durant le Moyen-Âge pour leurs pierres calcaires sur une hauteur de 3 à 4 mètres. À partir du XIX^{ème} siècle, les exploitations dans ces carrières sont réactivées pour la construction de maisons en pierre de taille afin de limiter les incendies (Ortega et Taborelli, 2012).

6.2.1.1. État initial avant-guerre, carrière de pierre, puis champignonnière

De très nombreuses carrières souterraines dans le Lutétien existent avant-guerre et sont reconverties en champignonnières. À l'origine décrites comme des troglodytes, des abris néolithiques, ces « creutes » ou « boves » sont d'anciennes carrières souterraines exploitées depuis l'Antiquité (Triolet et Triolet, 2011 ; Fronteau *et al.*, 2014). Elles s'ouvrent sur un front de taille perché sur le versant, formant une corniche rocheuse dans le Lutétien moyen, sur laquelle s'adosent les villages (villages balcons) dont l'alimentation en eau est originellement assurée par les sources tufeuses issues des Marnes et Caillasses du Lutétien supérieur (Devos *et al.*, 2009). Très nombreuses (plus de 400 reconnues dans le Soissonnais), les creutes présentent des morphologies et des développements très hétérogènes, de la remise accolée à la maison de moins de 100 m², à des carrières souterraines plus ou moins importante (Fig. 6.16B) sur plusieurs hectares (Vassens, Colligis) et plusieurs niveaux comme à Ciry-Salsogne (Sosson *et al.*, 2006 ; 2008, Fig. 6.16B).

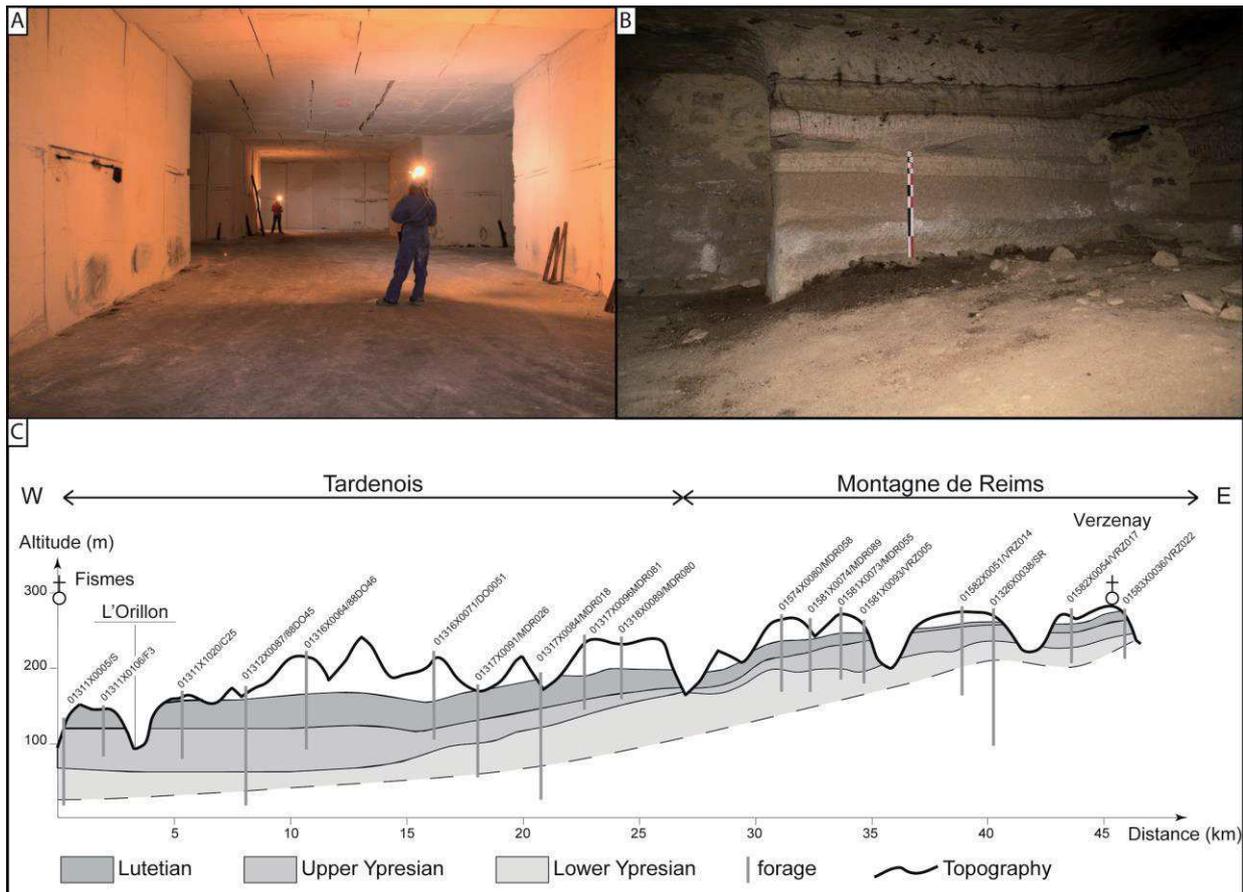


Fig.6.16: A - Carrière de Acy-le-Haut (Source : Cliché Sosson C.). B - Carrière d’Hermonville (Source : Cliché Devos A.). C – Évolution de l’épaisseur du Lutétien d’Ouest en Est (d’après Devos et al., 2015a).

Le mode d’exploitation varie d’Est en Ouest en fonction de l’épaisseur des calcaires lutétiens, de leurs variations verticales et latérales de faciès (Fronteau *et al.*, 2002 ; 2010) et de leur degré de fracturation (Devos *et al.*, 2010, 2012) qui soulignent les conditions de dépôts du Lutétien respectivement littoraux à marins (Gély, 1996, 2009 ; Gély *et al.*, 2009 ; Fig. 6.17).

Cette variation de faciès (Fig. 6.16C) met en évidence des carrières plus grandes à l’Ouest qu’à l’Est et conditionnera leur occupation. De petites carrières à l’Est seront occupées par une section ou une compagnie, alors que les grandes carrières à l’Ouest peuvent accueillir un régiment, voire un bataillon.

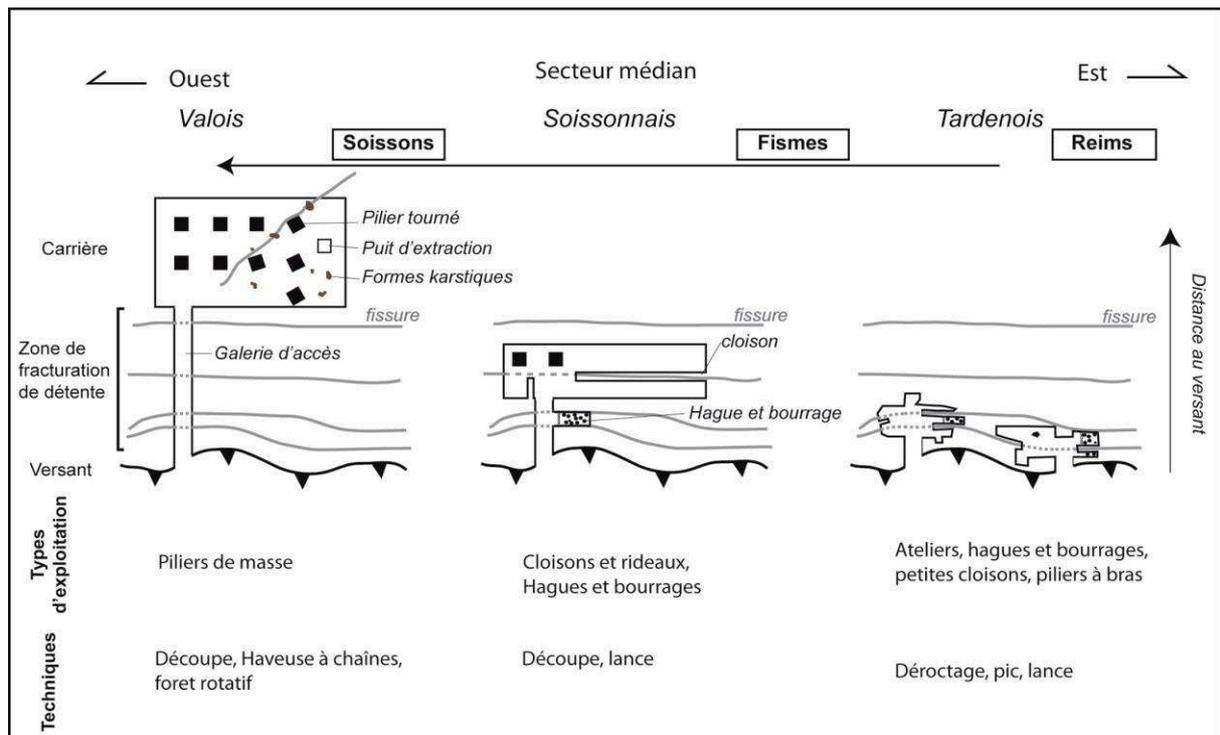


Fig.6. 17: Evolution de l'exploitation souterraine du Lutétien d'Est en Ouest du Pays rémois au Soissonnais et Valois (Devos et al., 2010).

Le déroctage exploitant le réseau de fissures de détente de versant est davantage utilisé à l'Est (région de Reims, Fismois) où les Calcaires grossiers sont moins épais (puissance inférieure à 15 m) mais surtout hétérogènes avec des bancs décimétriques séparés par de nombreux interbancs perméables (bousins). L'exploitation reste proche des versants soumis à la cambrure cassante (Bollot *et al.*, 2014). Elle est mixte, car s'exprime en rideaux ou cloisons résiduels parallèles aux réseaux de fissures, en galeries et en piliers à bras et en hagues et bourrages (Fig. 6.17). À l'inverse, plus à l'Ouest (Soissonnais, Valois), l'homogénéité lithologique domine (bancs à vérins, métriques et à forte porosité) mais la karstification héritée s'observe (Devos *et al.*, 2011) et perturbe localement l'exploitation. Celle-ci s'effectue par découpe, en piliers tournés au centre des plateaux pour éviter la détente de versant. Les bouches de cavage subsistent sur les versants mais s'accompagnent de descenderies et de puits d'extraction.

Après leur abandon pour l'extraction de la pierre, certaines carrières font l'objet d'une reconversion pour la culture du champignon. L'ambiance humide et la température constante sont idéales pour le faire pousser, mais nécessitent quelques aménagements dans les cavités. La sécurisation des secteurs les plus dangereux des carrières est réalisée en construisant de nouveaux piliers pour un meilleur soutien du toit (ouvrages de confortation). Des hagues ou cloisons sont érigées de manière à faire circuler l'air dans l'ensemble de la carrière, même dans les parties les plus en retrait. Le blanchissage est l'étape de désinfection de l'ensemble de la carrière et consiste à enduire les murs de lait de chaux. Ensuite, les champignonnistes vont apporter un fumier froid dans la carrière (chaînage, Fig. 6.18A), disposé en lignes parallèles aux parois appelées meules, dont la forme est encore visible aujourd'hui (Fig. 6.18B). Ce fumier peut alors être lardé (ensemencé) avec du mycélium de champignons (Fig. 6.18C). Un apport de terres et de calcaire recouvre ces meules (gobetage) pour maintenir une humidité élevée autour du mycélium (Fig. 6.18D). L'eau des fissures est captée et stockée

dans des réservoirs pour arroser régulièrement les jeunes pousses (Fig. 6.18E). Arrivé à maturité, le champignon peut être cueilli et commercialisé (Fig. 6.18F).



Fig.6. 18: A – Chaïnage du fumier froid. B – Traces des meules dans la carrière de Marzilly (Source : Cliché Devos A.). C – Montage des meules et lardage. D – Gobetage des meules avec de la terre et du calcaire. E – Réservoir pour l’arrosage des meules dans la carrière de Roucy (Source : Cliché Devos A.). F – Cueillette des champignons.

6.2.1.2. Organisation spatiale dans les réseaux de défense

Des cavités préexistent donc avant le début du conflit et constituent des refuges pour soldats dans les boves près d’Arras ou les carrières souterraines dans le Soissonnais. En fonction de la ligne de front, ces creutes peuvent donc être situées dans les premières positions, voire se situer dans le no man’s land (carrière du Dragon). Elles sont largement englobées dans les dispositifs de défense dans le Soissonnais et dans le Noyonnais (Alcaix, 2012 ; Laforgerie et

Weiss, 2013 ; Weiss, 2016) et s'inscrivent au sein des positions (carrière inter position : carrière Saint Victor à Autrêches dans l'Oise). Mais la plupart sont utilisées pour le cantonnement en 4^{ème} rideau (positions de réserves) où l'organisation souterraine des creutes est à son maximum profitant de l'épaisseur accrue des Calcaires grossiers et des expositions à l'abri des yeux de l'ennemi (Fig. 6.19). Les carrières sont organisées en quartiers, aménagées, recoupées par des tunnels de liaison, reliées aux tranchées par des escaliers et des descenderies. À ce titre, elles conditionnent le tracé des boyaux des réseaux de défense au sein d'une position, comme le montrent les plans directeurs et les images Lidar.

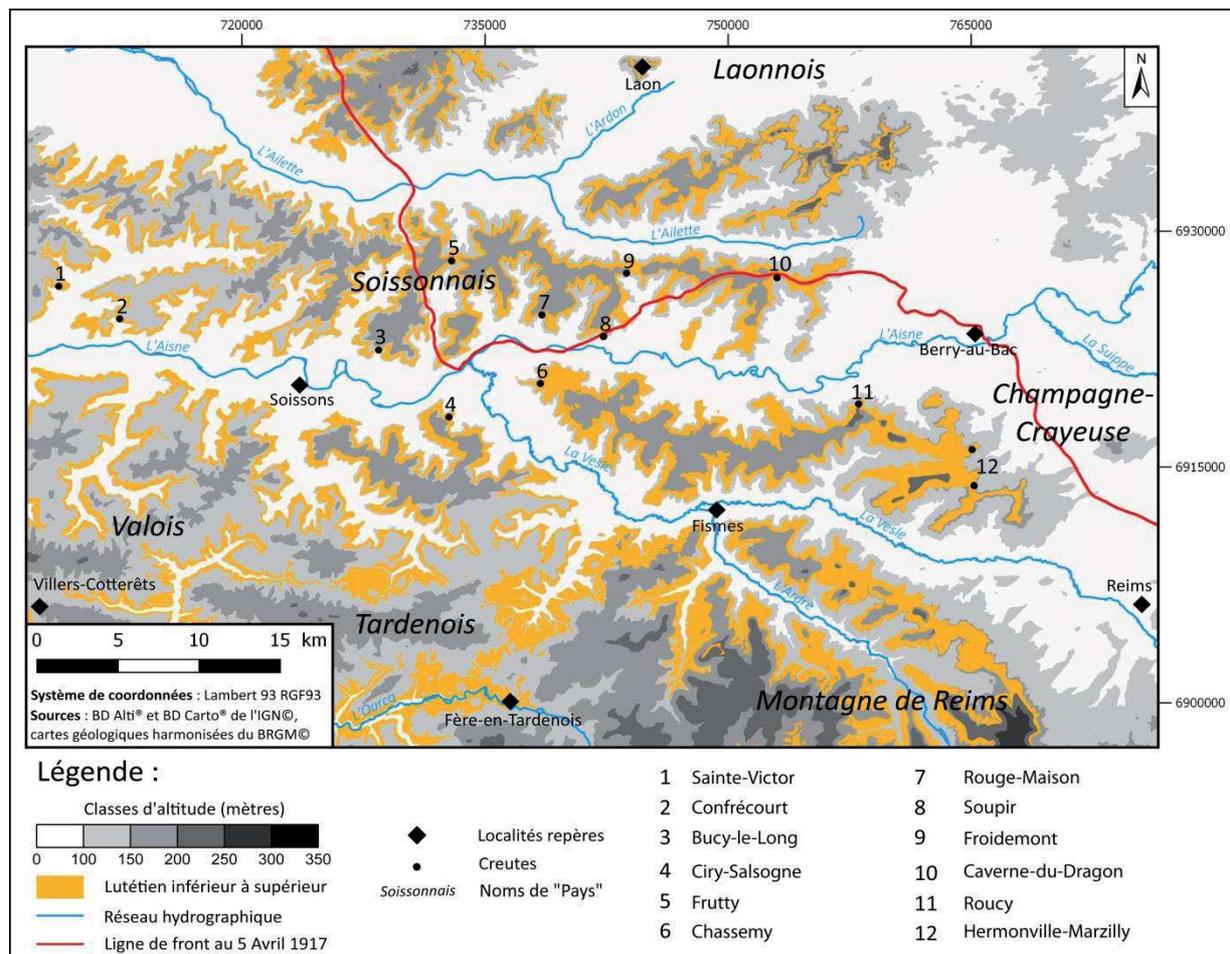


Fig.6. 19: Localisation des carrières dans la zone de front du 5 avril 1917.

Dans notre zone d'étude, les potentialités d'utilisation des carrières par les militaires sont nombreuses mais l'affleurement lutétien ne concerne que la 4^{ème} position. Les sommets des interfluves, inscrits dans le Lutétien supérieur, servent de sites d'observations et d'artillerie sous couvert forestier. Les creutes réhabilitées par les militaires abritent des abris de réserves et les postes de commandement sur le versant aux yeux de l'ennemi, donc vulnérables à l'Artillerie. Elles sont inscrites dans le réseau de défense et desservies par des boyaux révélés en image Lidar (Fig. 4.20). Sur les versants non exposés, les carrières souterraines servent davantage de cantonnement desservi par des pistes, routes et chemins de fer, voire des funiculaires (Chemin des Dames), compte tenu de la valeur des pentes. Les verses des carrières forment des plateformes accueillant les voies de communications. Les carrières aériennes abritent des sites de ballons d'observations, facilement camouflables (Fig. 6.20).

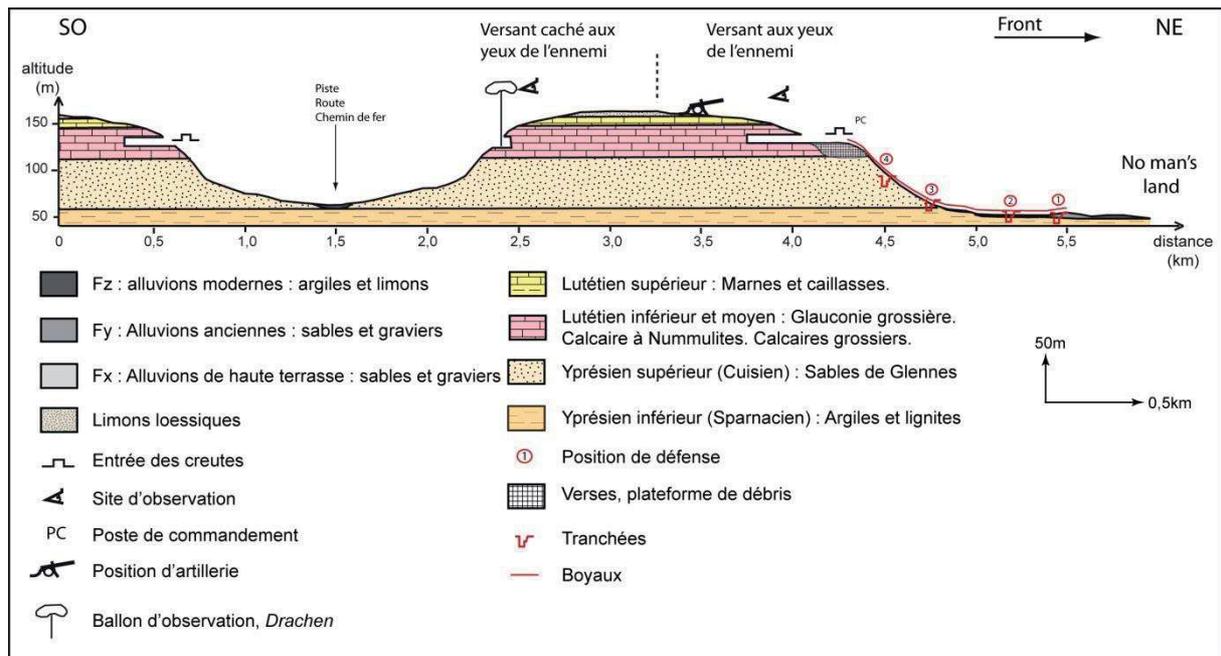


Fig.6. 20: Coupe schématique de l'intégration des carrières souterraines dans les réseaux de défense

À l'Est, du Soissonnais, dans le Massif de Saint-Thierry, à Hermonville, la 4^{ème} position de défense française occupe le front de côte d'Île-de-France avec ses nombreuses carrières. Celles-ci sont utilisées dès 1914 pour le logement des chevaux d'artillerie et le cantonnement des troupes, mais exposées à l'ennemi, elles font l'objet d'un marmitage imprécis compte tenu de la couverture boisée et de leur éloignement des batteries d'artillerie allemandes. Charles Hanin, officier dans un régiment de zouaves, stationne dans les carrières d'Hermonville Hanin, 2014) :

« Creusées dans les profondeurs de la montagne, sinueuses comme des entrailles, se nouant, se dénouant, se confondant en de vastes places, pullulantes de zouaves accrochés en grappes sur les bas-flancs, sur les couchettes disparaissant dans les hauteurs des parois, les champignonnières d'Hermonville constituaient un abri absolument remarquable contre les bombardements de l'ennemi ; on n'y pouvait craindre sans doute que les gaz à condition toutefois que l'obus frappât de plein fouet en un point sensible car autrement les gaz, plus denses que l'air, eussent roulé sur le flanc de colline. »

Les calcaires y sont non karstifiés mais fissurés par la détente mécanique. L'imagerie Lidar permet de mettre en évidence leur présence révélée par les verses étalées sur le front de côte d'Île-de-France ainsi que les tracés des tranchées et boyaux associés (Fig. 4.20).

6.2.1.3. La carrière, objectif d'artillerie de l'armée adverse

Si le rôle des creutes est largement discuté par les historiens, ces cavités constituent des abris remarquables pour le cantonnement puisque certaines offrent plus de 10 000 m² de surface habitable et peuvent héberger un régiment (carrière Saint Victor à Autrêches, carrière Montparnasse) constituant de véritables organisations souterraines. Mais la garnison la plus

courante est un bataillon (Villate, 1925) ; « *il faut en pratique 400 à 500 m² de surface de creute pour loger convenablement une compagnie (180 couchettes et chambres correspondantes)* » (GQGA, 1918). Outre le cantonnement, les creutes sont également utilisées comme abris d'artillerie. Des râteliers à obus sont creusés dans la roche et des entrées de carrières sont équipées de canons légers, généralement des canons de campagne (75 mm). Une organisation souterraine affecte des parties de carrières en Postes de Commandement (PC), en ambulances souterraines, en postes téléphoniques, en dortoirs, en chapelles souterraines (Confrécourt, Rouge Maison, Grotte de l'Eléphant à Soupir, etc...).

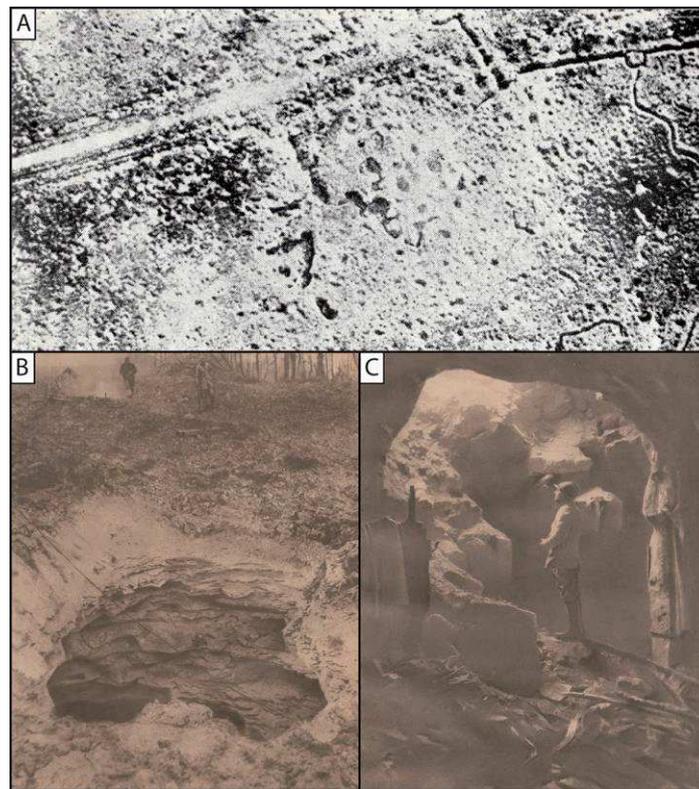


Fig.6. 21: Effondrement de ciels des creutes du Lutétien suite à l'obusage par un obus de 400 mm. A : en vue aérienne à Fruty (in Villate, 1925), B : en surface (Le Miroir n°208, 18 novembre 1917, p.7) et C : au fond de la carrière (Le Miroir n°212, 16 décembre 1917, p.14).

Outre l'abri aux intempéries, l'habitabilité des creutes est également assurée par la protection contre le marmitage, sous réserve que l'épaisseur de la couverture soit suffisante pour résister aux obus, avec un recouvrement de la formation des Marnes et Caillasses du Lutétien supérieur pouvant atteindre 20 mètres. Sinon, elles subissent des effondrements de toit et des crevaisons de fontis comme dans les carrières de Fruty et de Nanteuil-la-Fosse (carrière Sainte-Blaise). Cependant leurs entrées sont vulnérables aux tirs d'Artillerie c'est pourquoi les déblais ne doivent pas trahir leur présence par photographies aériennes. Leur vulnérabilité est bien comprise par les belligérants car, dans le cadre des préparations de grandes offensives, les entrées des creutes sont la cible de l'Artillerie lourde qui envoie de fréquentes rafales d'obus spéciaux. Durant l'offensive de 1917, les carrières de Montparnasse et leurs abords ont reçu par minute durant 4 heures, 20 coups de 75 mm, 10 coups de 155 long et ½ coup de 400 ou de 370 (Corda, 1920) soit un total de 7 320 impacts provoquant des effondrements partiels et la démolition de leurs entrées ; par exemple, les creutes de Fruty, toutes proches, photographiée en reconnaissance aérienne (Villate, 1925 ; Fig. 6.21A) puis au

sol après leur prise par les français dont le journal « Le Miroir » n°208 et 212 présente des crevaisons de toit importantes témoignant de l'intensité du bombardement (Fig. 6.21B et C).

Les troupes sont alors piégées dans les creutes effondrées. C'est le cas du 52^e RI dont la 3^e compagnie abritée dans une creute de Cuisy avec 39 hommes ensevelis, le 16 juin 1917. Le déblaiement se poursuit jusqu'au 18 juin où le bilan fait état de 38 tués, 42 blessés, 2 chevaux tués, 2 cuisines roulantes hors d'usage, une voiture médicale, etc... (JMO du 52 RI, 16 juin 1917). Le 60^e RI dont l'État-Major s'est réfugié dans la « grotte du Petit Bois » à la cote 132, le 12 janvier 1915 durant la bataille de Crouy, est également affecté par l'effondrement du ciel des carrières. La creute est atteinte par deux fois, provoquant l'effondrement du toit ensevelissant plus de 60 hommes. Perdue puis reprise par les Français, elle fait l'objet de fouilles en septembre 1917, suivies d'une cérémonie le 17 septembre. Le JMO de la 36 DI du 26 janvier 1915 relate le même type d'aléa, dans le secteur de la creute d'Hurtebise. Suite à l'effondrement de la creute, deux compagnies du 18 RI ont été anéanties ou ensevelies et mises dans l'impossibilité de sortir.

Les carrières souterraines ont, dans leur ensemble, résisté aux plus violents bombardements. Le plus souvent, l'ébranlement des explosions n'a provoqué que le décollement du ciel de carrière, pouvant être évité par des ouvrages de confortation. L'une des plus célèbres de ces carrières dans le Soissonnais est la Caverne du Dragon. Elle s'inscrit dans les premières positions et traverse le no man's land avec des bombardements incessants pendant le conflit.

6.2.1.4. La Caverne du Dragon

La Caverne du Dragon s'inscrit sur le Chemin des Dames qui constitue l'interfluve entre l'Aisne au Sud et l'Ailette au Nord. Les affluents de ces cours d'eau découpent l'interfluve en une crête étroite d'une centaine de mètres, d'orientation Est-Ouest formant l'isthme d'Hurtebise entre le plateau de Californie à l'Est (Montagne de Craonne) et le plateau du Poteau D'Ailles à l'Ouest. La carrière, vraisemblablement du XVI^{ème} siècle, aurait été utilisée pour la construction de l'abbaye de Vauclair et désaffectée depuis le XIX^{ème} siècle.

Comme beaucoup de creutes, elle sert de remise pour le matériel agricole de la ferme attenante (Ferme d'Hurtebise dite Ferme de la Creute) et aménagée durant la Grande Guerre (puits à eau, latrines, cuisines, couchage, sépultures, tunnels) où elle est baptisée Drachenhöhle en 1915 par les Allemands qui la fortifient (nids de mitrailleuses). À la différence des autres creutes, la Caverne du Dragon s'inscrit dans le no man's land dès juin 1917 (Fig.6.22B) avec des murs intérieurs délimitant les secteurs des belligérants cohabitant sous terre dans la même carrière (Malinowski, 2004). À ce titre, elle est reliée aux premières lignes de tranchées par un tunnel allemand au Nord et 3 entrées françaises au Sud (Ortega et Taborelli, 2012). L'intégration du plan de la carrière sous SIG a permis de repérer l'entrée Sud allemande à 10 m des coordonnées GPS (Fig. 6.22C). Visité durant les années 1920, le site s'équipe d'un véritable musée inauguré en 1969 sous l'égide du Souvenir Français (30 000 visiteurs/an) puis devient un espace muséographique du département de l'Aisne « musée du Chemin des Dames » en 2007. Les Calcaires grossiers du Lutétien moyen décoiffés de leur couverture érodée des Marnes et Caillasses (Lutétien supérieur) sont affectés par une importante décompression associée à une détente mécanique de versant qui se

manifeste par un réseau de 7 diaclases parallèles aux 2 vallées orientées N100-110°. L'exploitation souterraine s'effectuant 14 m sous la surface du plateau sur 3 822 m² laissant 17 rideaux et piliers de masse résiduels (taux de défrètement de 85%), ainsi que l'obusage, ont également produit un réseau secondaire de fissures (Fig.6.22A).

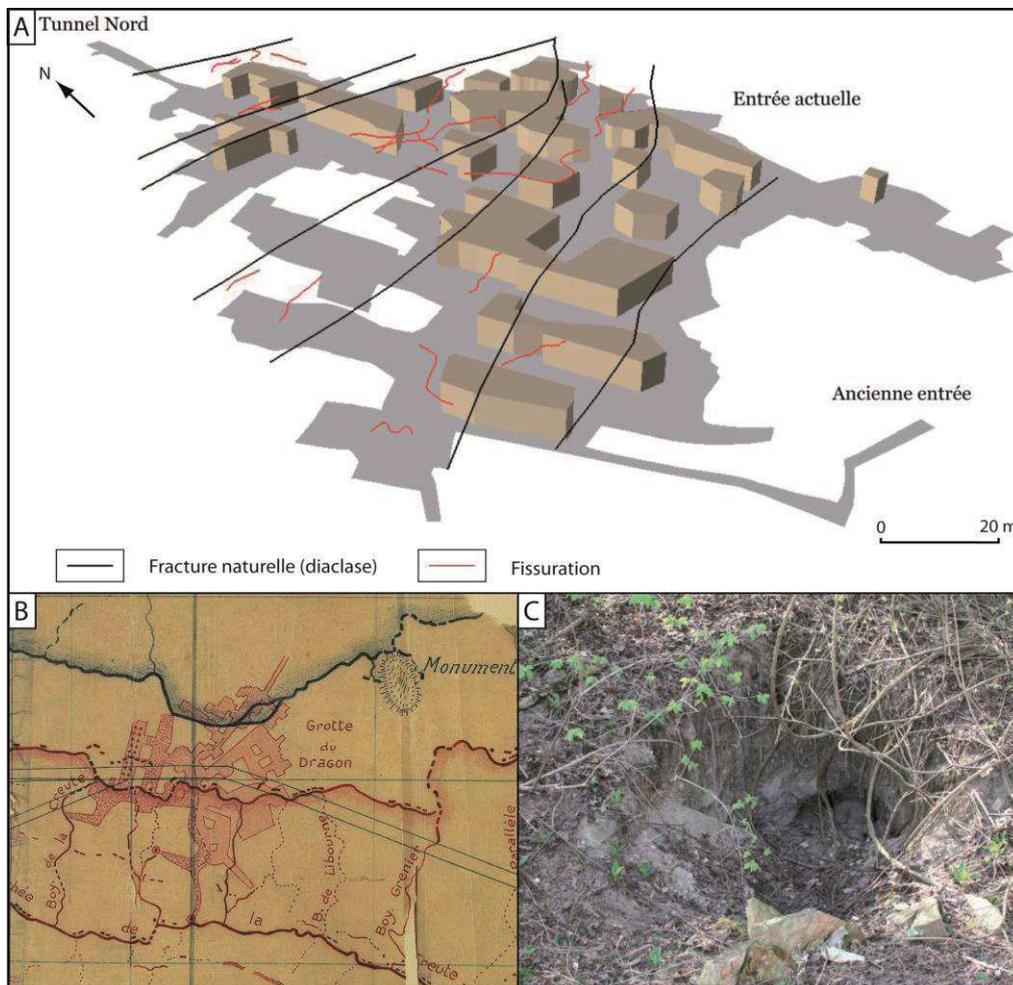


Fig.6. 22: A : Plan 3D de la Caverne du Dragon avec son réseau de fracturation (Source : Ortega et Taborelli, 2012). B - Emprise de la Creute du Dragon en hachuré rouge entre les premières lignes françaises (rouge) et allemandes (en bleu) (JMO du 403ème RI, 26N766025). C – Photographie de l'entrée sud allemande effondrée (Cliché : Trimoreau A.).

6.2.1.5. Aménagement des creutes

Devant l'intérêt militaire des cavités, l'Armée crée en 1916 les bataillons M.D. (Mascart-Dessoliers) du Génie pour aménager les creutes avec six bataillons de trois compagnies chacun (deux bataillons par groupe d'armées) et, le cas échéant, d'un 7^e bataillon à diriger sur les points du front où un renforcement de moyens serait reconnu nécessaire, soit, au total 21 Compagnies (Ordre n°96M, du 12 juin 1916, portant Instructions provisoires sur la constitution et le fonctionnement du groupe des bataillons du Génie M. D., et rectificatif du 14 juillet). Le regroupement des bataillons M.D. est décidé le 30 mai 1917 après l'offensive

Nivelle pour l'aménagement des creutes du Soissonnais situées dans le voisinage des lignes et un programme d'abris. Les abris creusés par les C^{ie} MD représentent 193 000 m² de surface habitable sur l'ensemble du front, selon l'arrêté du 1^{er} juillet 1918 (Protard, 1923). Dès le 25 septembre 1917, entre Laffaux et Braye-en-Laonnois, l'Armée dispose d'abris aménagés pouvant héberger plus de 15 000 hommes (Coeurdevey, 2011).

« De vieilles connaissances qu'on aménage enfin. Lumière électrique, bouches d'aération, couchettes, déblaiement des ordures et matériaux ; enfin nous nous installons dans la guerre ; encore un peu, il n'y aura pas de raison pour qu'elle finisse. »

Afin d'assurer de larges conditions de confort et de sécurité aux troupes à l'abri de ces souterrains, des problèmes techniques souvent compliqués par l'obligation de travailler à la vue de l'ennemi, devaient être résolus.

Après des levés topographiques, les premiers aménagements des creutes portent sur les ouvrages de consolidation, de confortation par piliers construits, le purgeage des galeries en faisant tomber les blocs instables du ciel et des parois, le déblaiement des terres pour dégager les voies de roulage assuré manuellement et par des engins d'éjection, d'élévation et de transport des déblais nécessitant l'utilisation du chemin de fer à voie étroite (Decauville).

L'effort porte plus particulièrement sur les entrées en bouche de cavage des carrières touchées par la détente de versant et l'obusage. Il faut creuser de nouveaux accès en rampe douce, judicieusement situés à contre-pente et camouflés pour échapper à la vue et aux tirs de l'adversaire. Pour les creutes exposées au bombardement, la construction de descenderies de la surface au fond est difficile. Le travail s'effectue alors de bas en haut au toit de la creute pour rejoindre la surface et les réseaux de tranchées. Une chambre est isolée du reste de la creute et fermée par des cloisons et une porte en planches. Dans cette chambre et dans l'axe de la descente, un forage oblique (pente de 1/1 ou 45°) de 80 mm (bancs durs) à 150 mm de diamètre (bancs tendres) est creusé au moyen du « Perforateur Guillat Génie renforcé » (bancs durs, Fig. 6.23A), de « Sondeuses Bornet » à main ou à moteur électrique (bancs tendres). Une cheminée verticale d'aération de 150 mm de diamètre est forée dans la chambre pour évacuer les fumées produites par l'abattage de la mine (gaz d'explosion). Des tunnels sont creusés pour assurer la jonction entre carrières. A la différence des travaux des carriers, l'abattage est généralement réalisé par détonations successives laissant des traces de poudre caractéristiques sur les parois des creutes. Marteau-piqueur pour l'attaque des calcaires durs, marteau-perforateur, attaque à l'explosif par perforatrice pour tout calcaire permettaient un avancement en roche dure, d'un mètre par jour, en montant à trois postes, en grande galerie. Dans les calcaires du Lutétien moyen, l'avancement atteignait de 3 à 4 mètres par jour dans un chantier bien équipé et bien conduit. Les déblais des travaux servent à remblayer les galeries inutiles ou dangereuses, les déblais évacués à l'extérieur pouvant trahir la présence du nouvel accès.

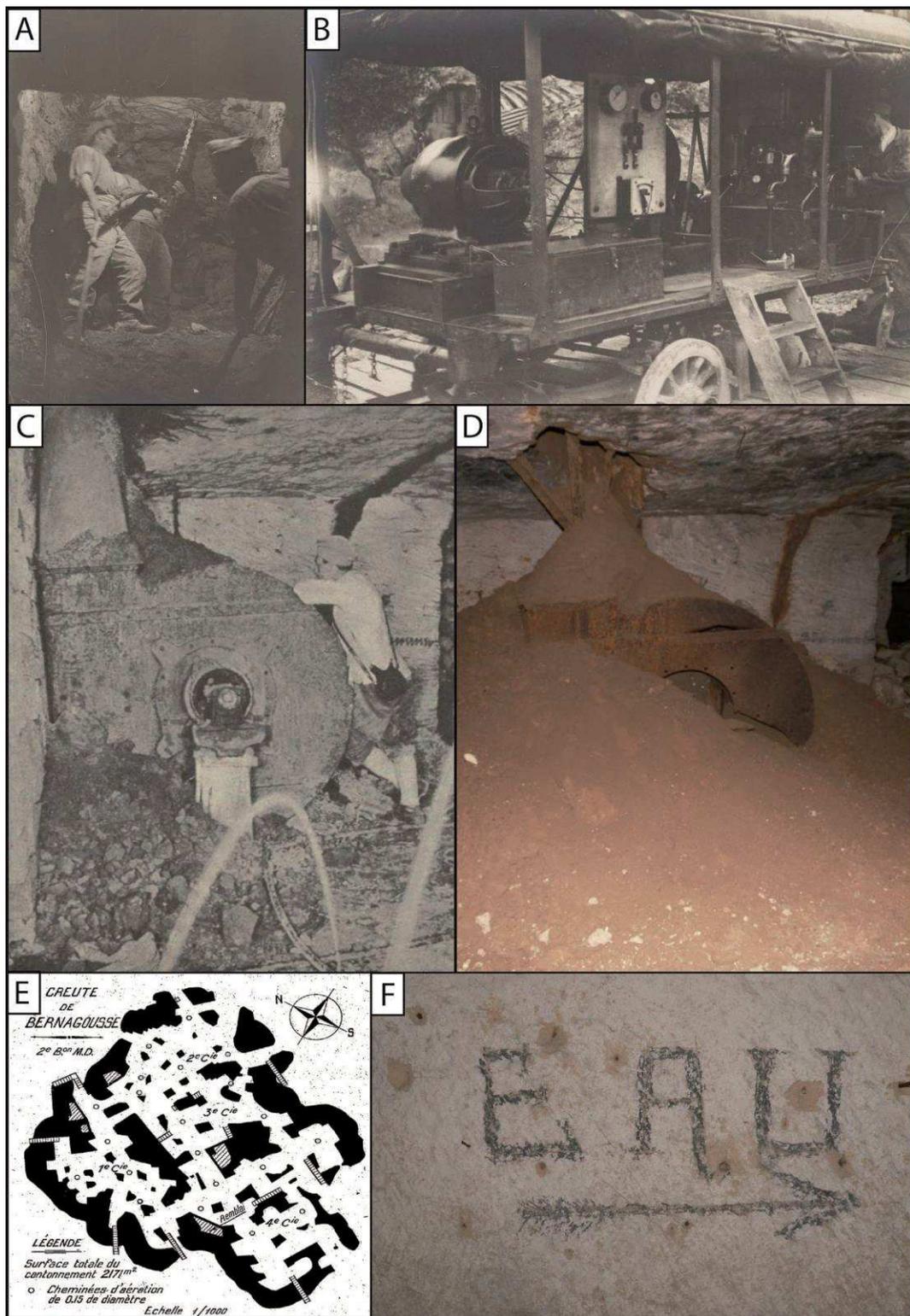


Fig.6. 23: A : Creusement au marteau-perforateur d'une galerie d'accès à Hermonville (sources : BDIC VAL 072055), B : Groupe électrogène fournissant l'électricité aux carrières d'Hermonville (sources BDIC VAL 072049), C : Ventilateur central de la carrière Saint-Victor situé à l'aplomb d'un puisard vers 1918 (source : Bulletin du renseignement du génie, 1918), D : Le même ventilateur sous un cône de soutirage des limons de plateaux en 2011 (Cliché : Devos A.), E : Localisation des cheminées d'aération forcées dans la creute de Bernagousse, (source : anonyme, 1923).F : Signalétique dans la carrière de Marzilly.

Dans la creute de Chassemy, 12 escaliers d'accès d'une longueur moyenne de 13,5 m sont réalisés pour une surface habitable de 8 000 m², soit une échelle pour 667 m².

Les galeries utilisées par la troupe, comme les issues, devaient être consolidées. Il fallait renforcer non seulement tout ciel décollé et pilier fissuré ou épaufré, mais encore étayer les parties du ciel dont la portée dépasse 4 à 5 mètres, quelle que soit la garantie apparente offerte par le ciel de carrière et l'homogénéité du calcaire en paroi. De simples étaçons constituaient une préservation efficace contre une rupture possible du ciel. La reconnaissance du ciel de carrière par sondage permettait de dimensionner la confortation. Un ciel parfaitement sain d'une portée n'excédant pas 3 mètres, mais stratifié en bancs décimétriques, se décollait à la suite de vibrations même minimales. L'ensemble du ciel des galeries devait être étayé en plaçant, tous les 2 mètres, des fers profilés ou des madriers reposant sur des étais de 15 à 20 centimètres de diamètre.

Les creutes font l'objet d'une électrification fournie par des groupes électrogènes (Fig. 6.23B) leur assurant un éclairage dont subsistent encore de nombreux isolateurs en bois, en verre et en porcelaine au ciel des galeries.

Cependant la fissuration de détente mécanique, l'extension latérale et la karstification des calcaires lutétiens rendent les creutes plus vulnérables aux obus brisants. Leur vulnérabilité est particulièrement sensible aux gaz de combat qui, compte tenu de leur masse volumique (gaz lourds), tendent à envahir les carrières. Si le soutirage des Marnes et Caillasses du Lutétien supérieur dans les fissures contribue au colmatage de ces vides (Devos *et al.*, 2012), l'occlusion totale des creutes reste illusoire, sans aménagements de la part des militaires. Comme on le constate sous terre encore aujourd'hui à Hermonville-Marzilly, de nombreuses fissures sont volontairement colmatées par de l'argile verte prélevée dans les Marnes et Caillasses, et armées de grillages. Les entrées des creutes sont équipées de portes étanches constituant des sas dont subsistent encore les feuillures creusées dans la roche, avec des cadres en bois et des bâches bituminées (Froidmont, Roucy, Hermonville) qui en cas d'incendie dégagent malheureusement des fumées toxiques pour les troupes. La mise en surpression des carrières leur confère davantage de protection contre les gaz et un renouvellement de l'air. Elle est assurée par la ventilation motorisée. La karstification du Lutétien moyen qui se manifeste par des orgues ou tubes verticaux (« pipes ») traversant le toit des creutes (Devos *et al.*, 2011) permet une économie de forage; en effet, après dégorgeage des altérites, les « pipes » sont utilisées et tubées. Parmi les formes karstiques, les gouffres ou « puisards » sont recherchés car leur diamètre plus important que les « pipes » ou « tuyaux d'orgues » permettent une extraction plus efficace. Ces formes karstiques héritées (fantômes, primokarst et paléokarst) nombreuses dans le Soissonnais et le Valois, sont également utilisées pour l'évacuation des fumées ou de l'air vicié, une fois vidées de leurs remplissages. Des cheminées et fours à pain sont aménagés proches des puisards comme on peut l'observer à Nanteuil-la-Fosse ainsi que des ventilateurs, comme dans la carrière Saint-Victor aménagée par les Allemands (Fig. 6.23C et D). En absence de karst réutilisé comme ouvrage de ventilation, le renouvellement d'air naturel ou forcé devait atteindre toutes les galeries utilisées par la troupe à l'aide de forages de puits d'aération en ciel de carrière. L'attaque d'un puits en remontant était une opération difficile, tant pour la préparation des coups de mines que pour la ventilation, quand le tubage n'avait pas pu être pratiqué. Certaines perforatrices avaient le plus grand mal à traverser les calcaires froids et les accidents siliceux des Marnes et Caillasses. A trois postes, l'avancement ne dépassait pas 1 mètre par jour. Les

puits étaient difficilement obstrués par les tirs mais ils étaient très vulnérables aux gaz toxiques, plus lourds que l'air, et étaient malaisés comme issues de secours.

À défaut de ventilation motorisée, des feux ou poêles installés à l'aplomb des forages et « pipes » génèrent une dépression efficace. À ce titre, les cheminées retrouvées sous terre en carrières sont davantage utilisées pour la ventilation que pour le chauffage.

Pour ventiler davantage les creutes, les militaires creusent des cheminées verticales, forages ou gaines d'aération avec des tarières mécaniques à leviers et à cliquets pour 4 hommes permettant de forer des trous de 20 cm de diamètre de 1 à 2 m en une heure (perforatrice Guillaud). Leur nombre est variable selon les conditions naturelles de ventilation par les fissures et les nombres d'entrées. Pour la creute de Bernagousse (Fig. 6.23E), aménagée pour un bataillon et offrant une surface habitable de 6 000 m² dont 2 171 m² pour le cantonnement, 21 cheminées d'aération de 15 cm de diamètre sont creusées, soit 1 forage pour 103 m² cantonnés. Pour la creute de Chassemy, 62 cheminées d'aération forées de diamètres de 150 à 250 mm et d'une hauteur de 6 à 10 m sont creusées pour une surface habitable de 8 000 m², soit un forage pour 129 m². Les cheminées sont prolongées à l'extérieur par un tuyau camouflé évitant les infiltrations de la surface. Elles sont préconisées dans les chambres formant cul de sac et ne sont pas nécessaires dans les galeries de circulation. Elles sont généralement équipées de tuyaux de poêle, braseros, à charbon, brûleurs d'alcool solidifié ou lampes à essence. La ventilation est contrôlée de manière journalière par une surveillance des températures de la creute. Des thermomètres sont mis à disposition des bataillons. Les résultats des travaux de ventilation débutés le 1^{er} août 1917 dans le but d'améliorer l'habitabilité de la creute de Bernagousse sont largement perceptibles sur les thermogrammes puisque la température intérieure est passée de 6° à 15°C (Anonyme, 1923).

L'alimentation en eau des creutes peut être assurée par le captage de sources issues du Lutétien supérieur comme à Roucy où le Poste de commandement du 5^e Corps d'Armée s'installe proche de la source de la Cascade, sur un éperon du plateau, creusé par la creute du Moulin du Bois Monsieur (Weiss, 2016) aménagée par les militaires. Ces sources qui ont l'avantage de se situer au-dessus des carrières garantissant une alimentation gravitaire sont très minéralisées (conductivités électriques supérieures à 900 µS/cm) constituant des édifices tufeux ou tufières de sources à Roucy, Baslieux-les-Fismes, Paissy, Saint-Gilles, etc... (Devos *et al.*, 2009). Ces eaux saturées en carbonate de calcium, sont peu agressives pour les Calcaires grossiers sous-jacents ce qui explique leur faible karstification actuelle. Mais lorsque les Marnes et Caillasses sont érodées, l'aquifère fissural des Calcaires grossiers peut être exploité mais constitue un aquifère perché peu productif (Devos *et al.*, 2015a). Les infiltrations fissurales et les écoulements des puisards évidés de leurs altérites garantissent l'alimentation en eau des troupes qui atteint, pour certaines creutes 3 m³ par jour (Capitaine P., 1918). Les eaux sont collectées par des gouttières en tôle, en fibro-ciment, dans des fûts, des bassins et des réservoirs bétonnés souterrains. Le trop plein est desservi vers des lavabos, des abreuvoirs pour chevaux avant d'être évacué dans les fissures qui le restituent aux sables cuisiers quand les Argiles de Laon sont discontinues ou peu épaisses. Ces diaclases sont également utilisées pour l'évacuation des eaux usées des feuillets. Dans quelques cas, des sondages permettaient de capter la nappe perchée de la Glauconie grossière du Lutétien inférieur dont le mur est formé par les Argiles de Laon du Cuisien supérieur. Généralement, les points d'eau font l'objet d'une signalétique sous terre (Fig. 6.23F).

Après la mise en sécurité et les aménagements pour améliorer l'habitabilité des creutes, le Génie mine leurs entrées dans l'éventualité d'un repli (GQGA, 1918). On retrouve de

nombreux fourneaux de mines amorcés électriquement, reconnaissables à leur petite taille de section carrée (20x20 cm), creusés dans les piliers et sur le front de taille à l'entrée des creutes (Nanteuil-la-Fosse, Grotte de l'Ours à Bucy-le-Long).

L'aménagement de creutes est tel que la corniche rocheuse du Lutétien est largement travaillée par un front de taille aérien quasi continu, percée de très nombreuses entrées en bouches de cavage murées avec leurs cortèges de tuyaux de poêles. L'agitation domine sur ces sites de cantonnements, où règnent les roulantes, les dépôts en tout genre, sur une plateforme de déblais généralement desservie par un chemin de fer à voie étroite, voire des funiculaires en réponse à la raideur des pentes. Malgré l'électrification, la ventilation et l'aménagement de creutes, la vie reste difficile et éprouvante pour les hommes confrontés à l'humidité, au pourrissement des litières paillées, à la promiscuité, au risque d'enfermement et aux gaz (Coeurdevey, 2011):

« Journée où il bruine. Les couloirs souterrains pleurent, il fait froid, il fait triste : impossible d'aller dehors prendre l'air, la lumière, se promener ou lire ou écrire. Dans la carrière l'obscurité, la froide humidité empâtent le cerveau et le cœur. Une atmosphère funèbre aggravée par le spectacle répété ce matin de l'inhumation des cadavres du cimetière devant l'entrée des carrières ».

Enfin, lors de sorties de terrain dans les carrières d'Hermonville, l'entrée de l'une d'elles est criblée de balles, figées dans les calcaires. Un traitement statistique est alors mené sur les ogives de ces balles afin de les dater et de comprendre l'intérêt de tirs à l'entrée d'une carrière. Le culot de l'ogive renseigne sur la cartoucherie (Annexe 6.2), sur le fournisseur de métaux (Annexe 6.3) et la date de fabrication en trimestre (Fig. 6.24). Cette dernière peut alors donner une date approximative du tir, méthode très utilisée en fouille archéologique.



Fig.6. 24: Etude balistique sur les ogives dans l'entrée de la carrière d'Hermonville (Source : Cliché Barbin V.).

Au contact des murs de la carrière, les balles sont déformées, cassées traduisant de nombreux ricochets (Fig. 6.25). Sur 150 ogives, toutes les dates de fabrication sont antérieures au second trimestre 1916. Cette datation permet d'écarter les combats potentiels des guerres de mouvements (août-septembre 1914 et mai-octobre 1918) et d'interpréter ces tirs comme un site d'entraînement de nettoyage des creutes dans le cadre de la préparation d'une offensive.

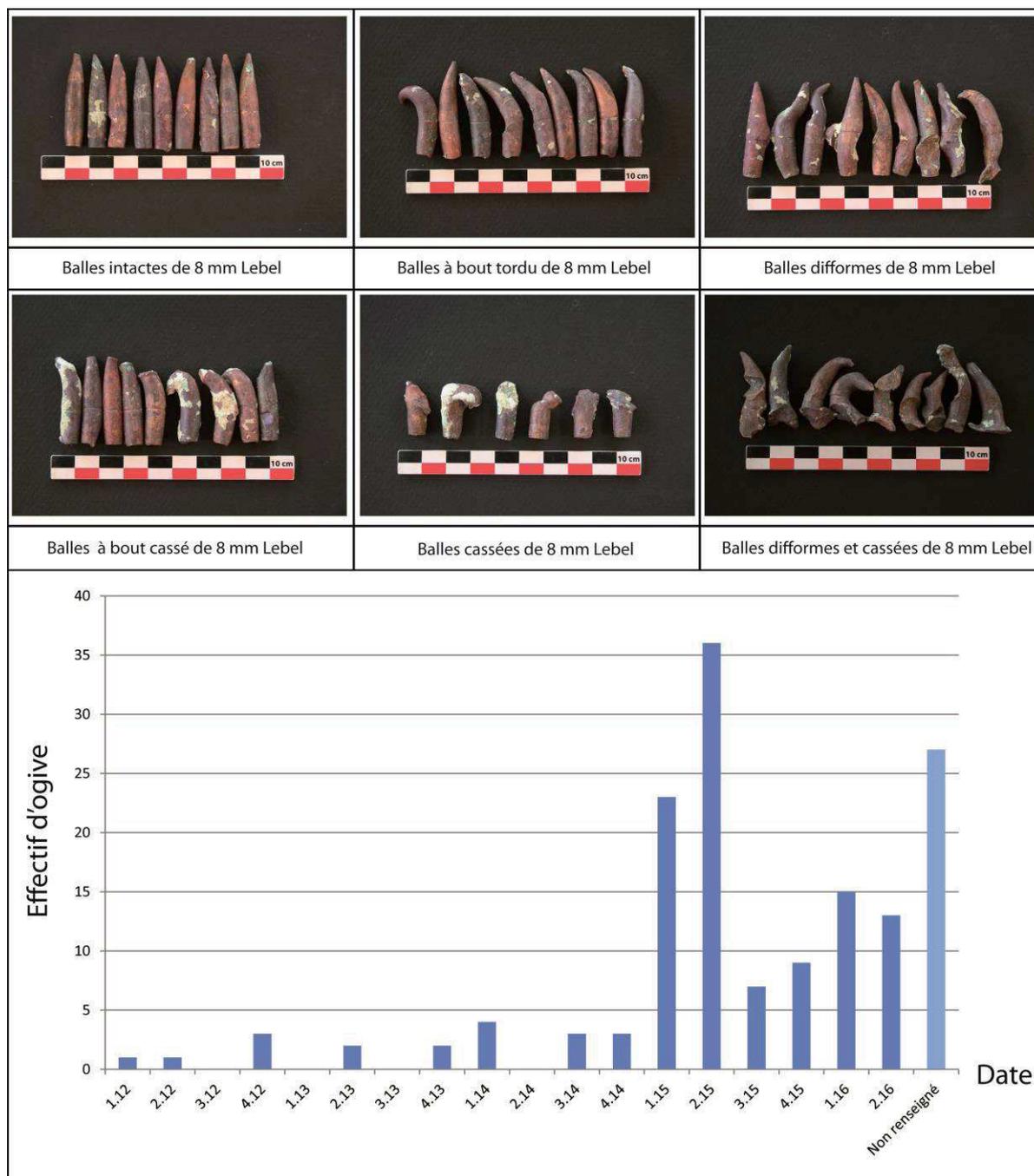


Fig.6. 25: Photographies des ogives déformées et étude statistique selon leur date trimestrielle de fabrication.

6.2.1.6. Graffitis de poilus

L'occupation militaire des creutes du Soissonnais a laissé de très nombreuses traces pariétales regroupées sous la terminologie de « graffitis de poilus » dont l'abondance impressionnante s'explique par la diversité régimentaire des troupes occupantes issues des armées françaises, allemandes, anglaises et américaines. Mais les calcaires tendres du Lutétien moyen se prêtent, il est vrai, à la gravure, aux bas-reliefs, hauts reliefs, voire à la sculpture (Fig. 6.26). Leurs parois et leurs ciels préalablement lissés, de couleur blanche à beige servent de supports à

l'écriture au crayon de bois, au crayon à encre violette, à la peinture, au bitume, et surtout au noir de fumée.

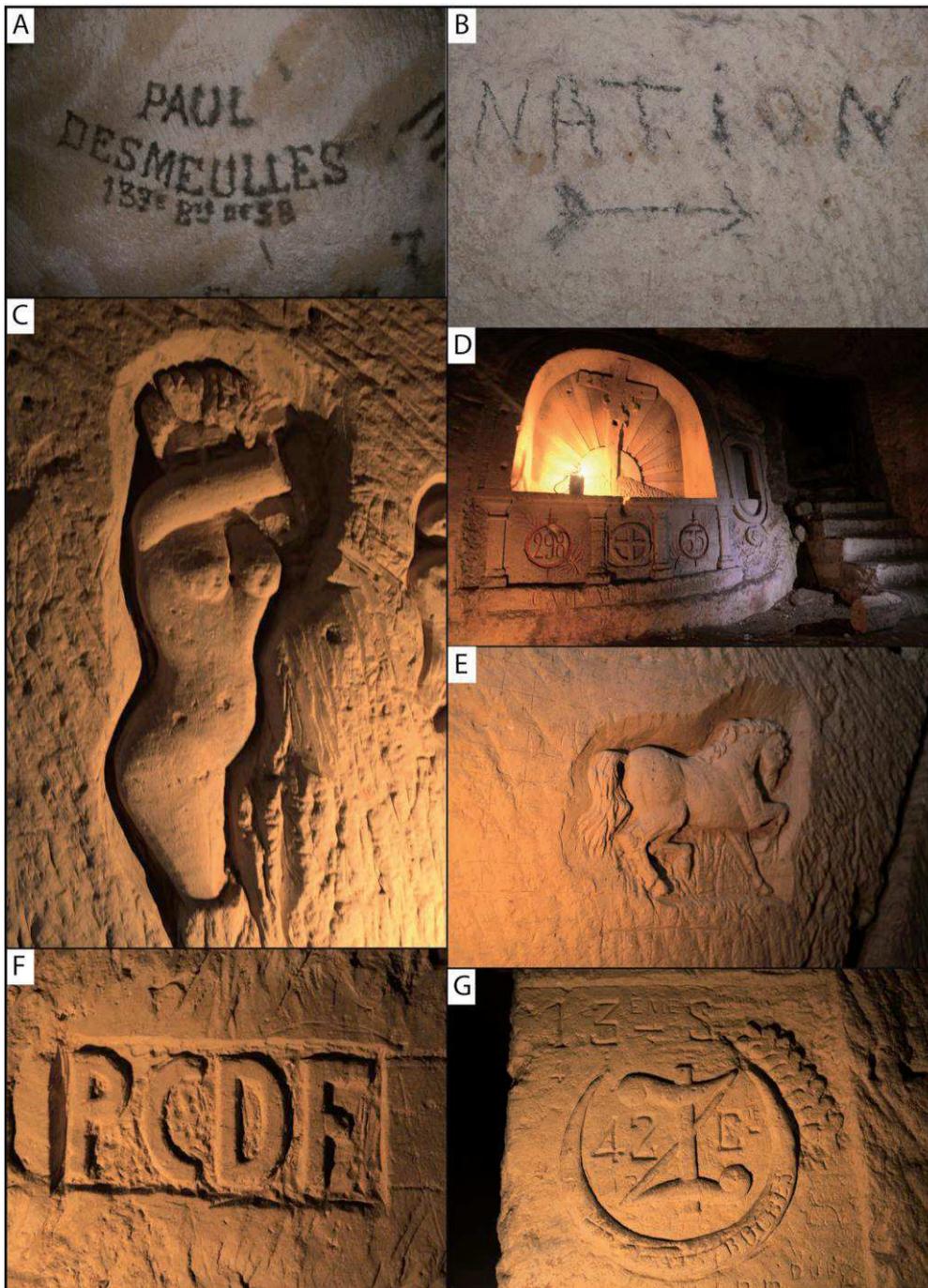


Fig.6. 26: Graffiti et sculptures de soldats dans les carrières de Marzilly, Roucy, Confrécourt et Bray-en-Laonnois. (Cliché : Devos A. et Taborelli P.)

Même si l'enduit de chaux (lardage) effectué par les champignonnistes après-guerre a sans doute recouvert des graffitis, il en subsiste une telle quantité que leur étude s'avère longue, difficile, et surtout tardive (Devos *et al.*, 2008 ; Thomas, 2009 ; Buttet, 2012). Les études réalisées portent essentiellement sur une analyse typologique (Vatel et Boittiaux, 2008) en fonction des techniques typographiques utilisées (encre, noir de fumée (Fig. 6.26A), gravure, sculpture, etc...), de la caractéristique (signalétique (Fig. 6.26B), textes, iconographie), des

thèmes comme l'esprit de corps (Fig. 6.26G), le combat, les patronymes (Fig. 6.26A), la vie militaire, le culte (Fig. 6.26D), les femmes et l'érotisme (Fig. 6.26C), les animaux (Fig. 6.26E), etc...) sans approche spatiale ni géologique. Pourtant, une organisation récurrente est constatée avec des entrées généralement blasonnées et des inscriptions régimentaires alors que les graffitis personnels, voire de révolte (Fig. 6.26F), concernent davantage les profondeurs ou les plafonds des creutes, comme les récurrents « PCDF » pour « Pauvres Cons Du Front » et « MAV » pour « Mort Aux Vaches ». Si des creutes sont classées au titre des Monuments Historiques (Confrécourt) ou reconverties en musée commémoratif (Creute du Dragon), des associations comme « l'Association Chemin des Dames » (creute de Froidmont), ou « Soissonnais 14-18 » (creute de Confrécourt), préservent ce patrimoine de la Grande Guerre, ailleurs malheureusement dégradé, vandalisé ou volé comme dans la carrière de Roucy, où la sculpture d'un soldat (Fig.6.27A) a été sciée et emportée (Fig.6.27B).

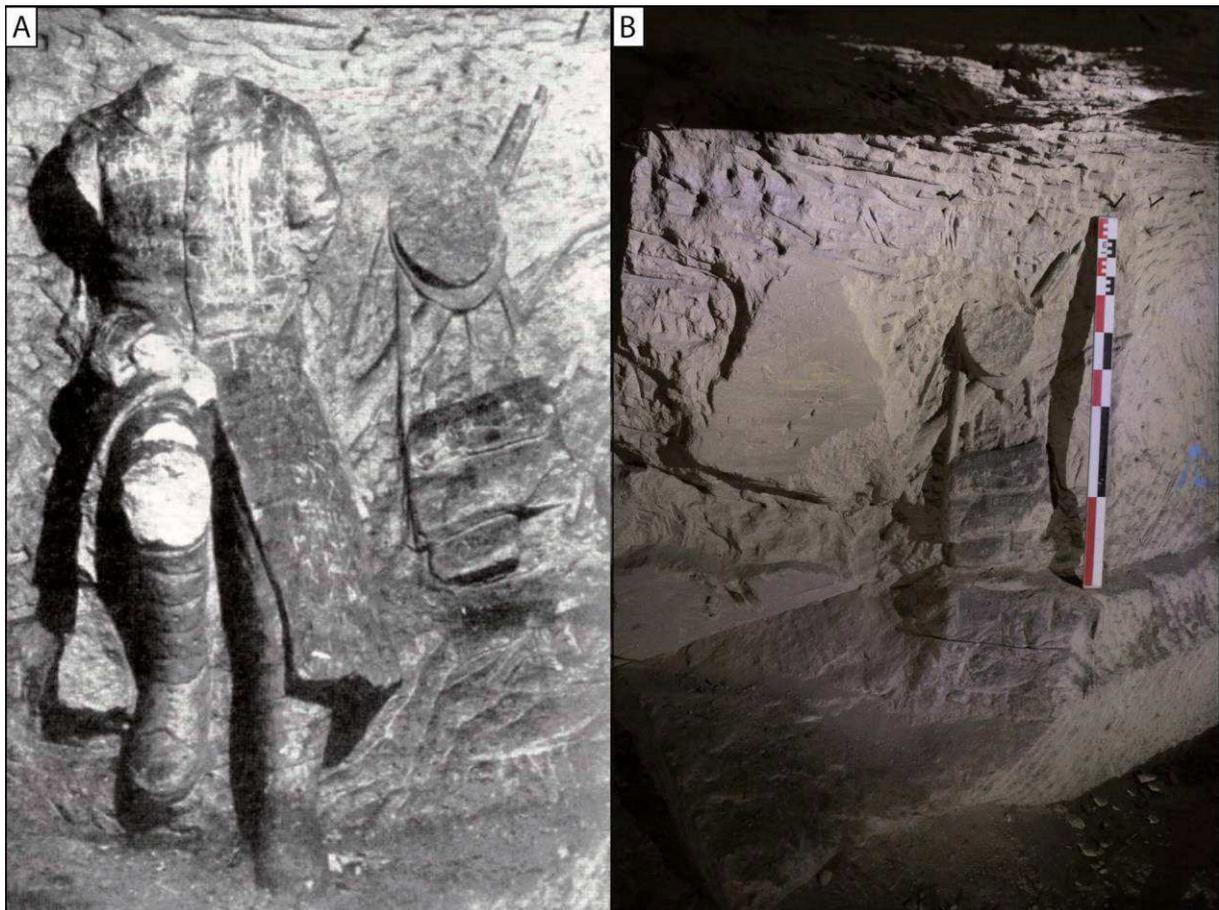


Fig.6. 27: Photographie de la sculpture d'un soldat français (A) dans la carrière de Roucy dans les années 1980 avant sa dégradation (Lachaux, 2005) et son vol (B, cliché Devos A.).

Si ces graffitis font l'objet de nombreuses publications (Vatel et Boittiaux, 2008 ; Malinowski, 2004 ; Barousse, 2007 ; Buttet, 2012), leur organisation spatiale dans les cavités n'est pas renseignée. Dans le cadre du programme de recherche Impact 14-18, 3 carrières souterraines (Bucy-le-Long, Marzilly et Roucy) ont fait l'objet d'une cartographie à l'aide de boussoles et de laser-mètre, et d'une localisation précise des graffitis.

À Bucy-le-Long, La Grotte de l'Ours recèle 37 inscriptions pariétales qui présentent une organisation clairement dichotomique. En effet, l'entrée de la carrière, et plus particulièrement le pilier central, est ornée de blasonnements régimentaires, pour marquer

durablement le passage des troupes françaises, anglaises et allemandes. (Fig. 6.28). Par contre, en profondeur, on retrouve davantage de niches d'éclairage et de graffitis personnels (patronymes et dessins) Cette petite carrière sans travaux de valorisation (Fig. 6.28B) reçoit la visite ponctuelle d'associations de reconstitution de la Grande Guerre (Fig. 6.28C).

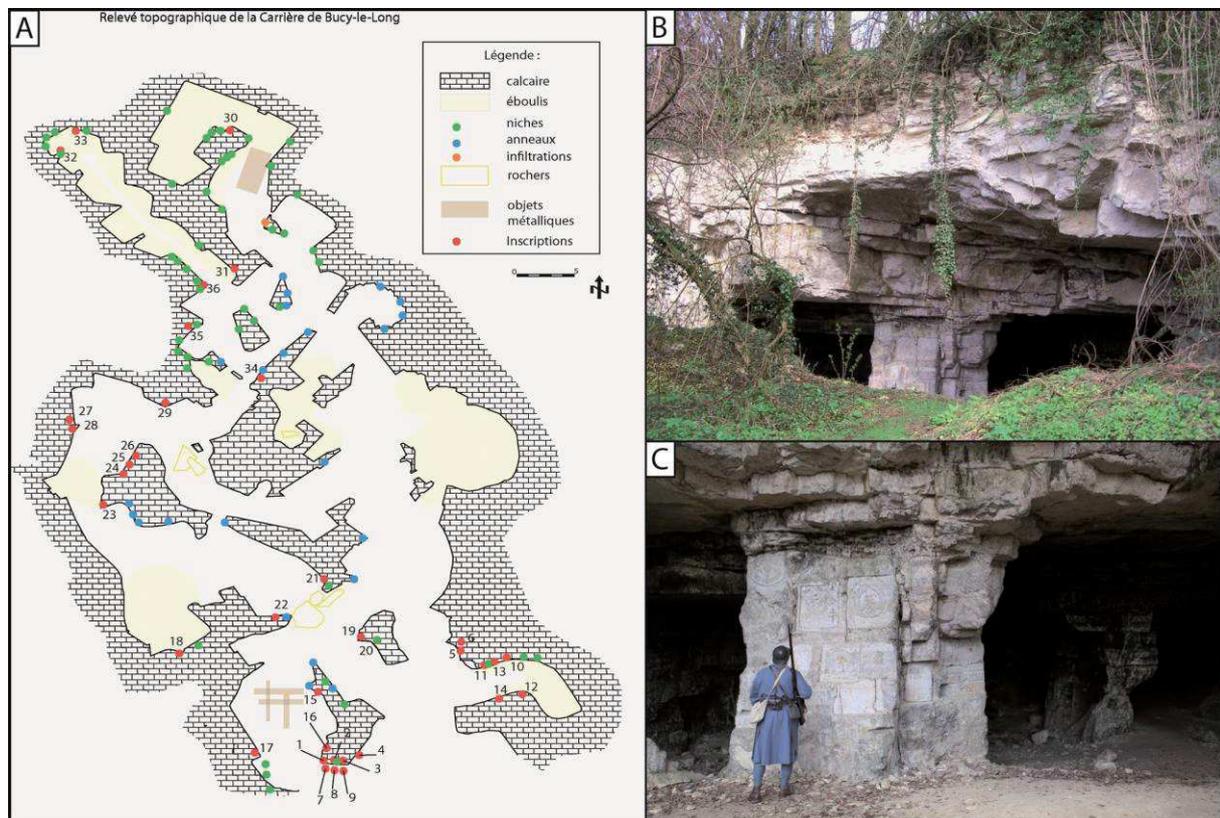


Fig.6. 28: A - Plan de la carrière de la Grotte de l'Ours et localisation des graffiti. B – Photographie de l'entrée de la carrière de la Grotte de l'Ours (Cliché : Devos A.). C – Blasonnements à l'entrée de la carrière de la Grotte de l'Ours (Cliché : Devos A.).

Avec un enfoncement maximal dans le versant de 90 m, l'accès de la carrière de Marzilly est possible par deux entrées en bouche de cavage dont une est effondrée à l'Est (Fig. 6.29). C'est une carrière organisée en rideaux et en hagues et bourrages. Cette partie à l'Est de la carrière a été reliée par un tunnel (A) par creusement à l'explosif par les militaires afin de la relier à une autre carrière souterraine adjacente mais malheureusement aujourd'hui inaccessible par le front de taille. Une étude statistique est réalisée sur les graffitis selon leur description (signalétique, dessin, chiffre, patronyme, date, phrase, lettre) et leur type opératoire (noir de fumée, gravure...). Sur les 117 graffitis recensés, 70 % sont réalisés avec du noir de fumée, 36% sont liés à la signalétique, et 18 % sont des patronymes retrouvés essentiellement dans le fond de la carrière.

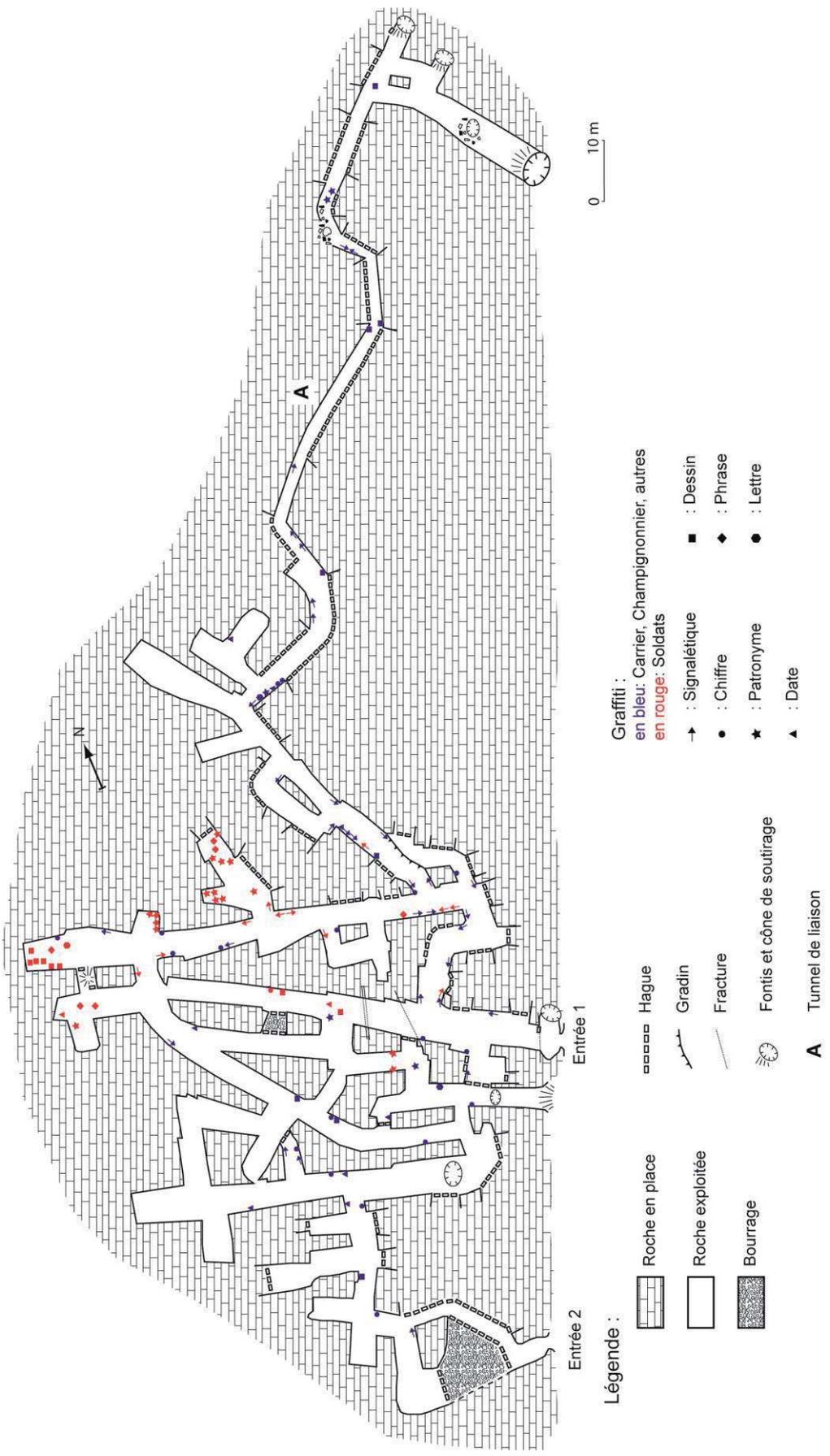


Fig.6. 29: Plan de la carrière de Marzilly et localisation des graffitis.

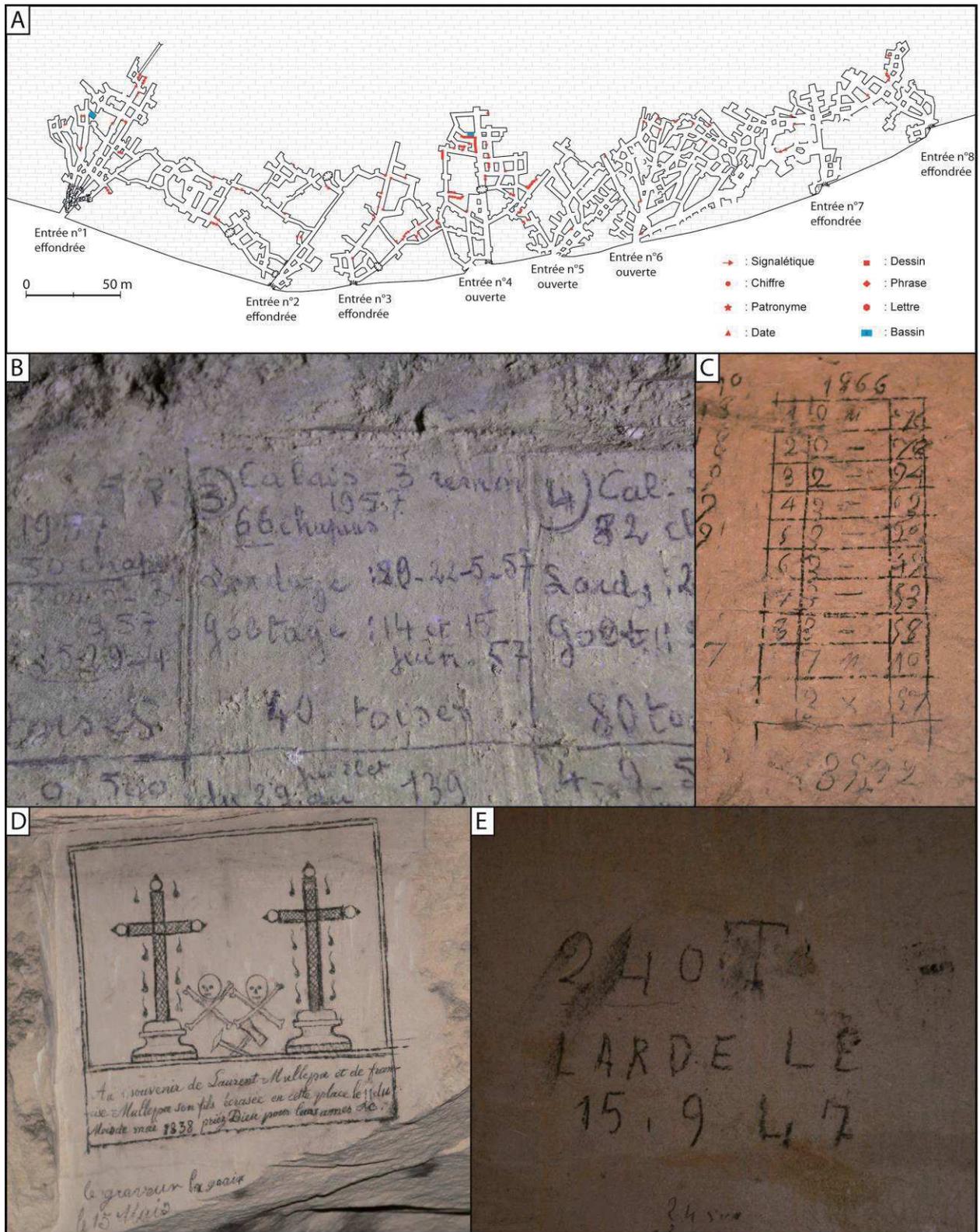


Fig.6. 30: A - Plan de la carrière de Roucy et localisation des graffitis. B – Photographie des inscriptions de champignonnistes (Cliché : Devos A.). C – Table de carrier (Cliché : Taborelli P.). D – Graffiti en mémoire de carriers tués par accident (Cliché : Dev

Dans le secteur de la carrière de Roucy, l'État-Major français avait établi de nombreux observatoires pour le réglage des tirs dans la plaine de Reims jusque Berry-au-Bac. Cette carrière en 4^{ème} position de défense, inscrite dans l'entonnoir de percée cataclinale de l'Aisne, est la plus grande cartographiée des trois creutes mais s'appuie sur des plans réalisés pendant le conflit (Weiss, 2016). Cette carrière s'organise en quartiers aménagés, exploitée en rideaux (Fig. 6.30A). Elle est desservie par 8 entrées à partir d'un front de taille aérien. Elle est utilisée pour le cantonnement dont les lits sont remarquablement conservés. La carrière est ornée de 142 graffitis (Grande Guerre), localisés principalement devant les entrées 1 et 4. Contrairement à la carrière de Marzilly, les gravures et bas-reliefs sont les plus représentés (67%) pour le type opératoire. Seulement 4 graffitis indiquent une signalisation, 30 % sont des patronymes et 50 % sont des dessins.

Enfin, ces graffitis de la Grande Guerre se surimposent à des graffitis antérieurs des carriers ou postérieurs des champignonnistes. Des tables de carrier indiquent au crayon l'avancée des travaux par année et les blocs taillés et extraits (Fig. 6.30C). Certains relatent également des accidents dramatiques comme à Froidement (Fig. 6.30D) :

« Au souvenir de Laurent Mullepa et de Francis Mullepa son fils, écrasés en cette place du mois de mai 1838. Priez Dieu pour leurs âmes ».

Les champignonnistes laissent également de nombreuses traces pariétales, essentiellement pour se rappeler de la date du lardage et gobetage des meules ((Fig. 6.30B et E).

Si l'importance patrimoniale est largement démontrée, l'impact des travaux souterrains dans les creutes reste peu étudié. Leur réhabilitation durant la Grande Guerre a accentué l'aléa cavités dans les calcaires du Lutétien. En effet, les nombreux aménagements pour leur intégration dans le réseau de défense (puits d'accès, débouillage, tunnels) ont exacerbé le soutirage des marnes et caillasses du Lutétien supérieur, ce qui se manifeste, en surface par de nombreuses dolines de soutirage, la crevaison de fontis (révélés en Lidar et observés sur le terrain), et en profondeur par des effondrements et cônes obstruant les cavités. Le traitement sous SIG des plans directeurs permet d'inscrire les creutes dans les réseaux de défense qui malheureusement souffrent de l'absence d'une banque de données exhaustive de ces cavités.

6.2.2. Les abris des réseaux de défense

Les abris, intégrés dans les réseaux de défense, sont des cavités creusées *ex nihilo* pour la protection des hommes ou du matériel. Alors que la tranchée protège des tirs de l'Infanterie ennemie, l'abri sert de refuge en position d'attente sous le feu de l'Artillerie. L'intérêt de multiplier et de disperser ces abris doit assurer la mise en sécurité de la totalité du personnel mais lui permettre également de regagner au plus vite sa position de tir. En première position, les abris se localisent dans la seconde ligne pour rapidement gagner leur poste de combat, laissant un maximum d'aisance de tir dans la première ligne (GQGA, 1915). Au Nord du village de Ville-sur-Tourbe, le plan directeur au 1/5 000 renseigne sur l'absence d'abris en première ligne française dans cette première position. La digitalisation de 86 abris sur 1,7 km de front traduit une amplitude de 50 abris/km de front, seulement dans la première position (Fig. 6.31).

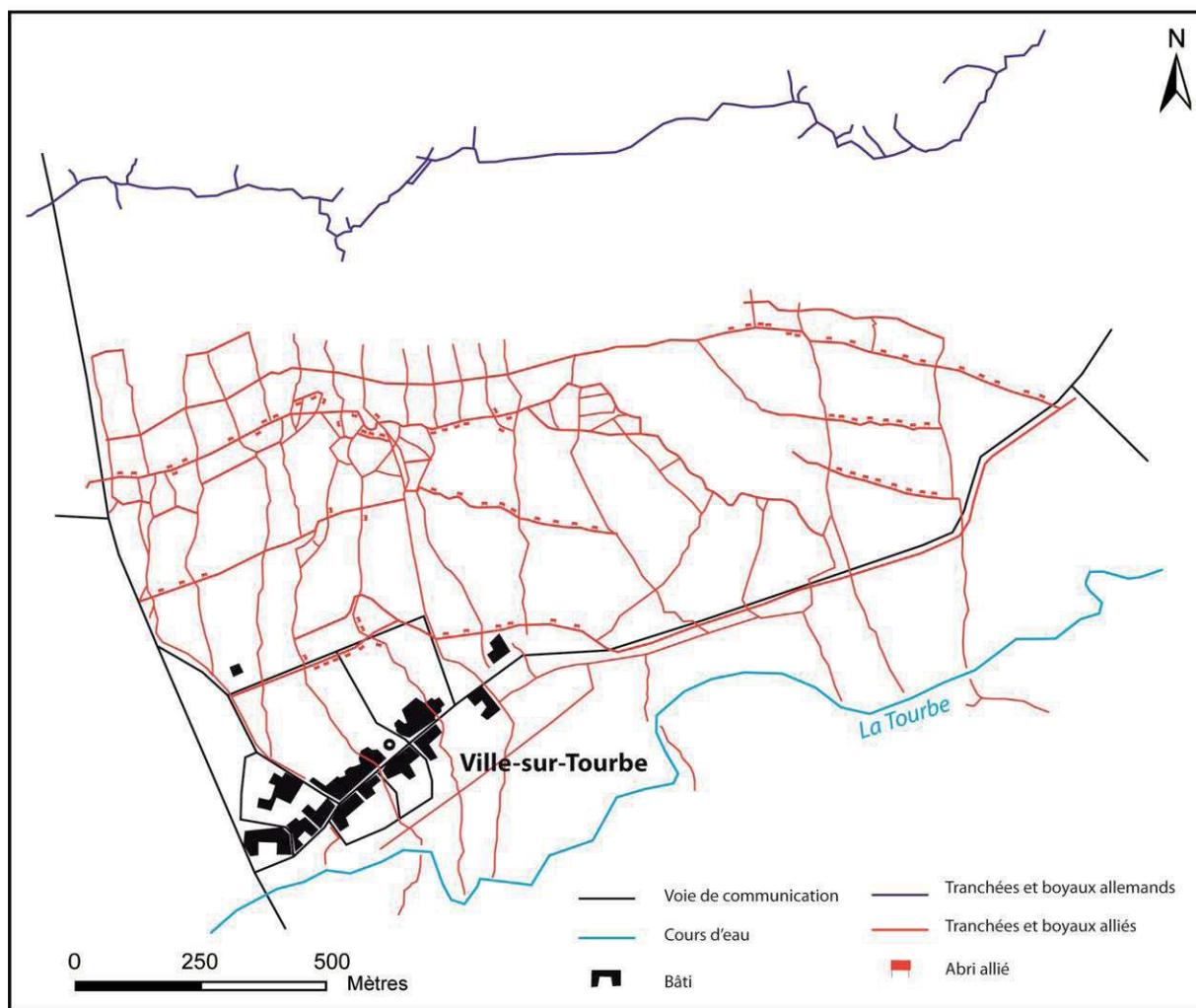


Fig.6. 31: Carte des densités d’abris dans le secteur de Ville-sur-Tourbe

6.2.2.1. Typologie des abris

En fonction de leur localisation dans le réseau de défense, de leur capacité d’accueil et de leur consolidation, les abris peuvent être classés selon différents critères. Tout d’abord, ils peuvent être considérés comme actifs (abris de tirs, observatoires, postes de guetteur, d’écoute, optique) parfois bétonnés (Fig.6.32A), ou passifs pour la protection et le repos (cantonnements, postes de secours ou de commandement). Ils sont, soit creusés dans le matériel parental (abris souterrains), soit superficiels ou de surface (Fig.6.32B). Selon la durée d’occupation et du renforcement, les abris atteignent des degrés de résistance plus ou moins avancés. Les abris légers assurent la protection contre les balles de l’ennemi et les balles de *shrapnells*. Les abris renforcés résistent aux projectiles de 77 à 150 mm alors que les « abris à l’épreuve » sont capables de supporter des tirs isolés de l’Artillerie lourde (supérieurs à 210 mm). Lorsqu’ils sont intégrés dans les deux premières positions, la contenance des abris est généralement de 6 à 8 hommes (abri-caverne), mais des abris plus imposants existent pour y loger une demi-section (30 hommes). L’organisation des abris pour une section (60 hommes) au sein d’une tranchée compte 8 abris de 6 hommes, soit 48 hommes couchés et 12 de service (GQGA, 1915). Encore visibles aujourd’hui, les entrées sont doubles, orientées vers le parapet, pour garantir l’évacuation du souffle de l’obus ou l’effondrement d’une d’entre-elles, confortés dans la descenderie par un boisage (châssis coffrant, Fig.6.32C). Alors que de petits

abris sont conçus pour un ou deux soldats (abris niches, Fig.6.32D), des tunnels peuvent être creusés pour la protection d'un bataillon (1000 hommes), voire d'un régiment (3000 hommes).



Fig.6. 32: A – Poste de guetteur bétonné en forêt d’Argonne (Cliché : Taborelli P.) B – Reconstitution d’abris superficiels sur le site de la Main de Massige (Cliché : Devos A.). C – Entrée double d’un abri-caverne (Cliché : Taborelli P.). D – Abri de type niche (Source : Cliché IWM).

En Champagne-Ardenne, les tunnels les plus imposants ont été creusés dans la craie de Champagne, dans le Mont Cornillet par l’Armée allemande. Trois tunnels, long de 300 m, ont été creusés avec 3 entrées distantes de 50 m sur le versant Nord du Mont ainsi que des descenderies les reliant dans le réseau de défense (Fig. 6.33). Des cheminées d’aération crèvent la surface et des ventilateurs assurent la bonne circulation de l’air dans les cavités. Les verses de craie aux entrées trahissent leur présence, ainsi détectée par les observations aériennes. D’une profondeur maximale de 38 m (Fig.6.33 E3), les tunnels seront intensément bombardés en mai 1917 (600 coups de 270 mm et 97 coups de 400 mm) et environ 500 soldats allemands ont été piégés et sont morts asphyxiés. Deux entrées se sont effondrées et un obus de 400 mm est tombé dans l’une des cheminées d’aération. Les différentes reprises par les deux armées ne leur permettait plus de retrouver l’entrée des tunnels, tant la bombturbation avait été violente dans ce secteur. En 1974, une exploration réalisée dans les tunnels a permis d’exhumer 321 corps, puis de les enterrer dans le cimetière militaire de

Warmeriville. Trois tunnels, creusés dans les calcaires du Kimméridgien par l'Armée allemande dans la butte du Mort-Homme en Meuse, seront également impactés et détruits par des tirs de l'Artillerie lourde sur voie ferrée, située à Baleycourt à 12 km.

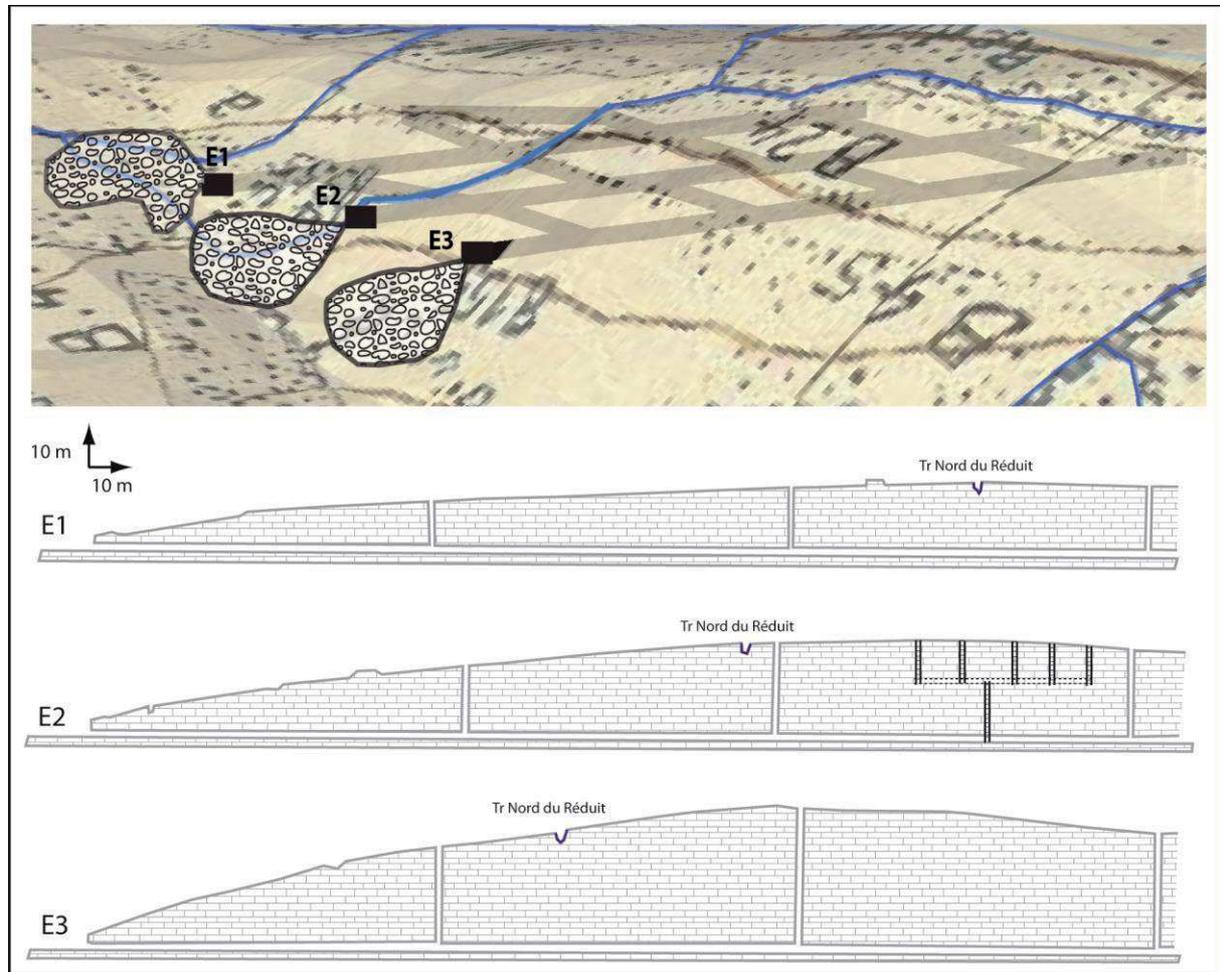


Fig.6. 33: Vue 3D et en coupe des 3 tunnels allemands du Mont Cornillet.

6.2.2.2. Les conditions de creusement

Le creusement des abris souterrains (abri-caverne) pour 6 à 8 hommes impacte le matériau parental sur 2 à 3 m de profondeur. La géologie joue donc un rôle important à la fois dans le creusement de l'abri mais également dans sa solidité et sa pérennité. Les calcaires du Lutétien, la craie de Champagne ou la gaize d'Argonne sont des roches suffisamment dures pour pallier aux effondrements lors de tirs d'Artillerie adverses. Davantage de travaux de confortation (coffrage, clayonnage...) sont entrepris dans des zones argileuses ou sableuses.

Les militaires creusent les abris des réseaux de défense en fonction des conditions hydrogéologiques locales renseignées par leur service géologique (Armée allemande) et sont conscients du rôle déterminant de l'épaisseur de la zone non saturée sur les potentialités de creusement (Brooks, 1920). La proximité de la nappe conditionne la forme et la profondeur des abris. Au niveau des nappes affleurantes ou sub-affleurantes en fond de vallée, les abris superficiels ou de type niche équipent un réseau de défense anorexique. En position

d'interfluve, les abris-cavernes ou des tunnels peuvent être creusés, pouvant accueillir davantage de services et d'hommes (Fig.6.34).

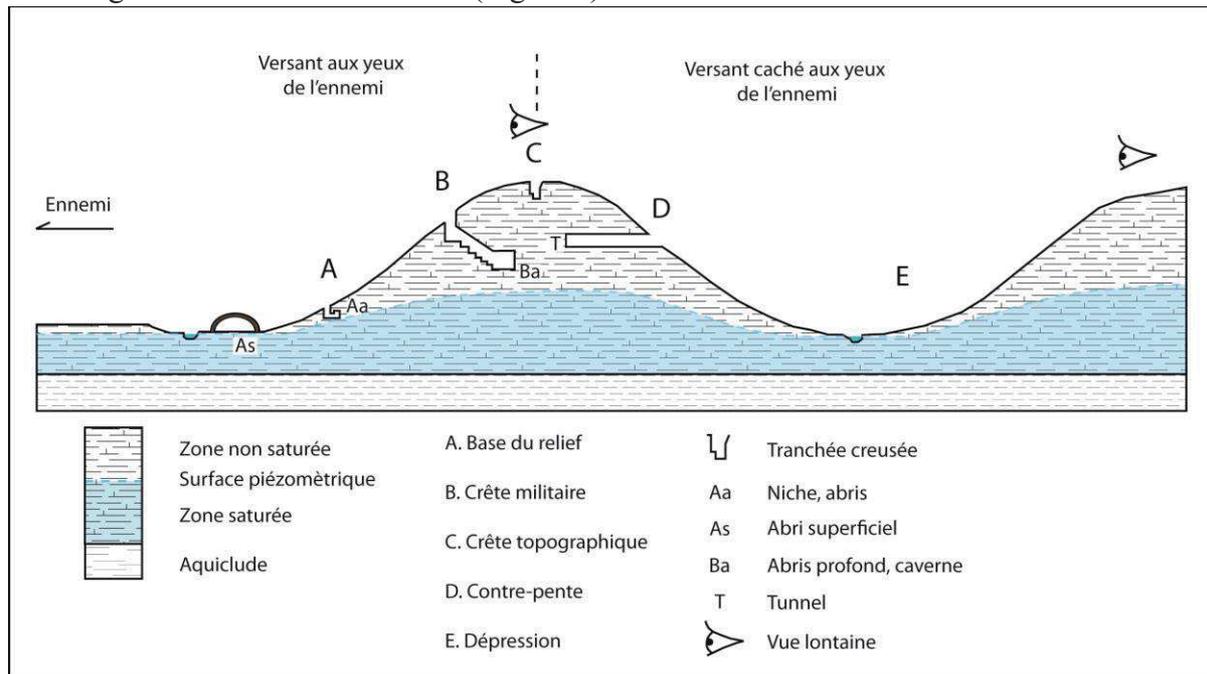


Fig.6. 34: Potentialité de creusement des abris.

6.2.2.3. Aléa « cavités » et abris de la Grande Guerre

L'étude des réseaux de défense à partir des plans directeurs au 1/20 000^{ème} ne permet pas de connaître l'emplacement de tous les types de cavités creusées au cours de la Première Guerre Mondiale. En effet, si l'existence des tranchées et boyaux n'est plus à démontrer avec un décalage de 2 à 13m, les cavités creusées pour se protéger n'y sont pas systématiquement renseignées. La principale vulnérabilité face à cet aléa reste l'extension urbaine de la ville de Reims et sa périphérie. Sa surface est multipliée par 3,6 car l'extension de l'agglomération depuis 1918 (calculée sous SIG en comparant les emprises urbaines sur le plan directeur de 1918 et celles de 2016) couvre une surface de 34 km² (13 km² en 1918 et 47 km² en 2016). La ville s'est également installée sur 220 km de tranchées et de boyaux soit 1,7 % des 13 000 km de Champagne-Ardenne (Fig. 6.35). En extrapolant la densité linéaire d'abris du secteur de Ville-sur-Tourbe à celui de Reims, le nombre d'abris dans la zone d'extension urbaine s'élèverait à 750.

Reims étant déjà fortement impactée par l'aléa cavités (crayères), le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) veut intégrer prochainement ces risques d'affaissement, d'effondrement et de crevaison de fontis, liés aux abris de la Grande Guerre dans le Plan de Prévention des Risques (PPR) « aléa-cavité ». A ce titre, la cartographie des réseaux de défense est un outil indispensable à la réalisation des cartes de susceptibilité engendrant des désordres géotechniques potentiels.

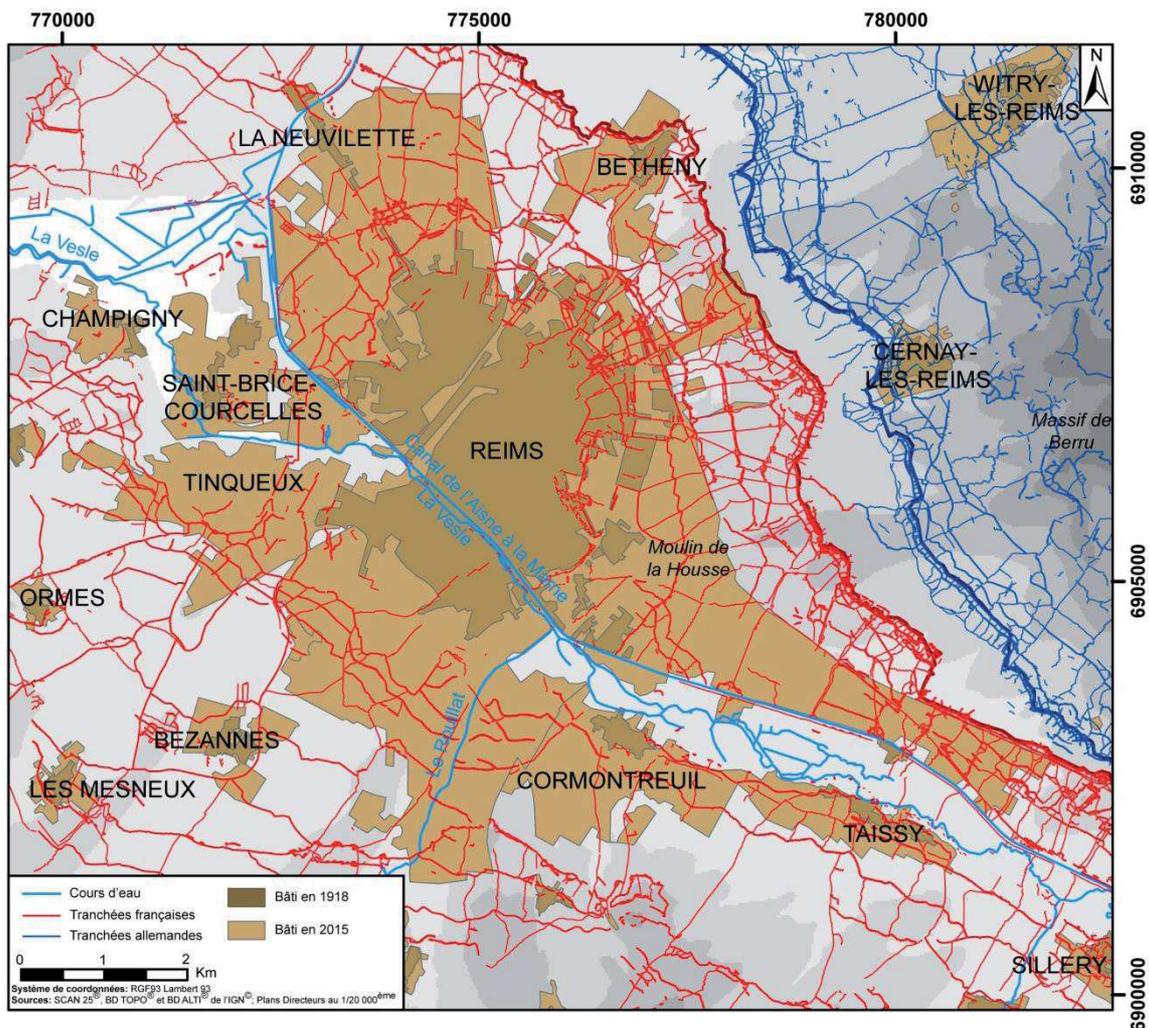


Fig.6. 35: Carte de l'extension de Reims de 1918 à 2016 et des réseaux de défense.

L'effondrement d'abris en milieu de grande culture reste problématique et potentiellement dangereux. La récurrence des pluies pendant l'hiver 2017/2018 a ouvert de nombreux abris, notamment près d'Aubérive-sur-Suippe à Vaudesincourt (Fig.6.36A) dans la craie de Champagne en rive gauche de la vallée de la Suippe.

L'effondrement qui correspond à la crevaison d'un fontis à l'aplomb d'un alignement d'abris représenté sur le plan directeur au sud de la tranchée des Uhlans, se manifeste par une dépression fermée à bords verticaux de 4 m de diamètre. Son exploration montre que 3 abris creusés face à l'ennemi sont desservis par une galerie de liaison étroite (1 m de large).

Chaque abri est de petite taille (3 x 6 m) vraisemblablement entièrement coffré avec du bois dont les restes de coffrage subsistent toujours sur les parois (Fig. 6.36B). Deux galeries impénétrables, très étroites et bouchées par le remblai semblent correspondre aux descenderies (en escalier sans doute) desservant la tranchée des Uhlans. Le plafond des abris est effondré partiellement (fontis avec cône de soutirage) ou totalement (fontis crevant la surface générant des dépressions fermées de 3 m de diamètre en surface). Au plafond des abris, une grève de graviers de craie (graveluches) vraisemblablement alluviaux (alluvions de la Suippe) affleure. Par contre sur les parois, la craie est fracturée, peu consolidée, blanche,

voire broyée en blocs de craie mêlés à une matrice argileuse également blanche. La majeure partie de la cavité est inondée par 30 à 40 cm d'eau par recouplement de la nappe de la craie.



Fig.6. 36: A – Effondrement d’un abri allemand près d’Aubérive-sur-Suipe (Cliché : Devos A.). B – Intérieur de l’abri allemand dans la craie près d’Aubérive-sur-Suipe (Cliché : Devos A.). C- Tranchée des Uhlans et abris associés sur l’extrait du plan directeur de Sainte-Marie à Py du 31 janvier 1918.

6.2.3. Les cavités de Reims

Outre les cavités construites de manière offensive pour la guerre des mines ou défensive pour s'abriter des bombardements de l'Artillerie ennemie, les hommes utilisent et aménagent des cavités préalablement creusées (creutes) en campagne ou dans les villes (crayères, galeries souterraines, caves privatives). La ville de Reims, intégrée dans les premières positions, est occupée par l'armée française pendant 4 ans. Chaque structure souterraine est ainsi aménagée pour garantir la sécurité des civils et des militaires.

6.2.3.1. Les crayères

Historiquement la ville de Reims s'est développée en rive droite de la Vesle située à 75 m d'altitude, sur une terrasse alluviale (altitude relative +10 m). Les phases d'extension de la ville, allant de l'oppidum gaulois jusqu'à l'enceinte du XIV^{ème} siècle n'ont jamais permis à la ville de s'étendre jusqu'aux reliefs les plus élevés situés au Sud-Est, plus particulièrement la Butte Saint-Nicaise qui culmine à 136 m (Pichard, 2014). Ces reliefs *extra-muros* étaient voués à l'extraction de la craie grâce à des carrières souterraines appelées « crayères ». Ce n'est qu'entre le XVIII^e et XIX^e siècle que la ville est sortie de ses limites pour étendre son emprise sur ces anciennes zones d'exploitation souterraines, qui, pour un certain nombre d'entre elles, vont disparaître de la mémoire des Hommes au fil du temps.

L'analyse de la banque de données du sous-sol du BRGM (BSS) et les observations faites sur le terrain montrent qu'il existe trois types de cavités souterraines dans le sous-sol rémois dont l'organisation spatiale est fonction des formations superficielles et de l'épaisseur de la zone non saturée de l'aquifère crayeux.

À la différence de l'extraction de craie en carrières souterraines en piliers tournés observées en Normandie (Dujardin, 1991), en région parisienne (Bouchon et Veyret, 2002) ou encore en Belgique (Caubergs, 1991), l'extraction de la craie en Champagne se fait sous la forme de cavités à développement vertical. Avec une morphologie en forme de bouteille appelée « catiche », ces carrières souterraines peuvent atteindre jusqu'à 30 mètres de hauteur et possèdent un puits d'entrée ou « essor » allant de 2 à 6 mètres de profondeur (Fig. 6.37). Ce type d'exploitation est également retrouvé en Anjou dans les faluns du Miocène (Cousins, 2002). Les essors permettent d'accéder rapidement à la craie saine exploitable dans laquelle la cavité s'évase, formant à la base une chambre de section carrée de l'ordre de 100 à 400 m² au sol (Lejeune *et al.*, 2008). Les crayères sont généralement regroupées en binômes, voire organisées en « chaînage » de plusieurs dizaines de catiches (plus de 60 pour les caves Pommery) reliées entre elles par des tunnels de liaison. Cela permet non seulement la communication entre les catiches mais aussi l'évacuation des déchets de taille, non pas en surface mais dans la crayère voisine (Fig. 6.37). La craie est exploitée et utilisée comme matériau de construction de l'Antiquité jusqu'au XIX^{ème} siècle sous forme de pierre de taille, de moellons, de carreaux de craie ou de chaux (Devos *et al.*, 2017).

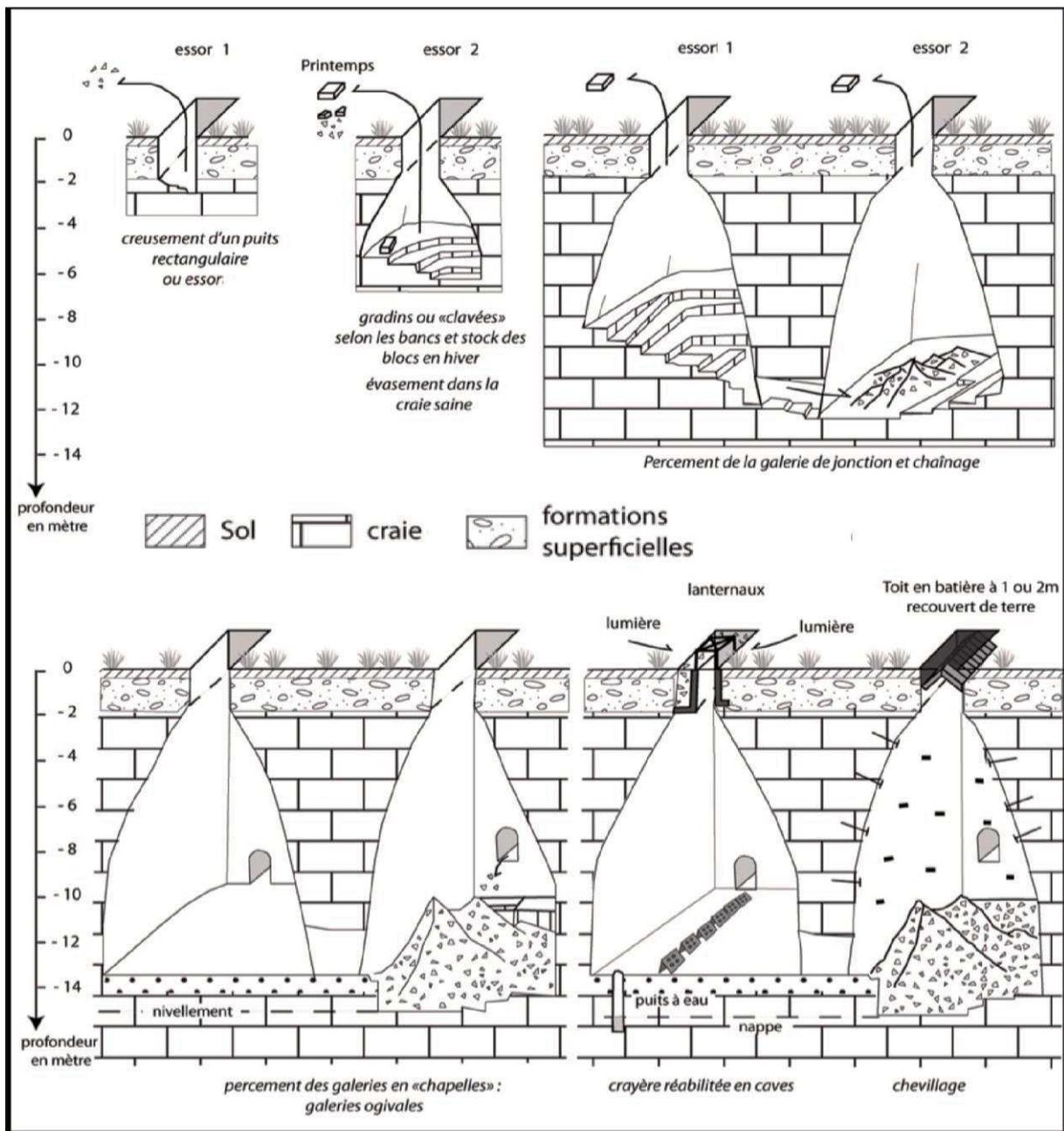


Fig.6. 37: Schéma des différentes phases de creusement et d'aménagement des crayères (Devos et al., 2017).

À partir de la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, de nombreuses crayères seront réhabilitées en caves par les maisons de Champagne ce qui induira de gros aménagements comme le nivellement du plancher des catiches, la création de galeries filantes parallèles de section rectangulaire et voûtées afin d'augmenter la capacité de stockage et permettre des opérations nécessaires à la conception du Champagne telles que le remuage. Les essors seront utilisés pour l'aération et/ou l'éclairage des caves grâce à l'installation de lanternaux et de carreaux de verre qui serviront de puits de lumière (Fig. 6.37). De par leur température fraîche, constante et leur faible luminosité, les crayères se sont révélées idéales pour le stockage du champagne. Grâce à leur passé millénaire et leur beauté architecturale les crayères de Champagne sont depuis le mois de juillet 2015 inscrites au Patrimoine Mondial de l'Unesco et bénéficient de nombreux parcours touristiques.

6.2.3.2. Les galeries souterraines ou souterrains de la Marne

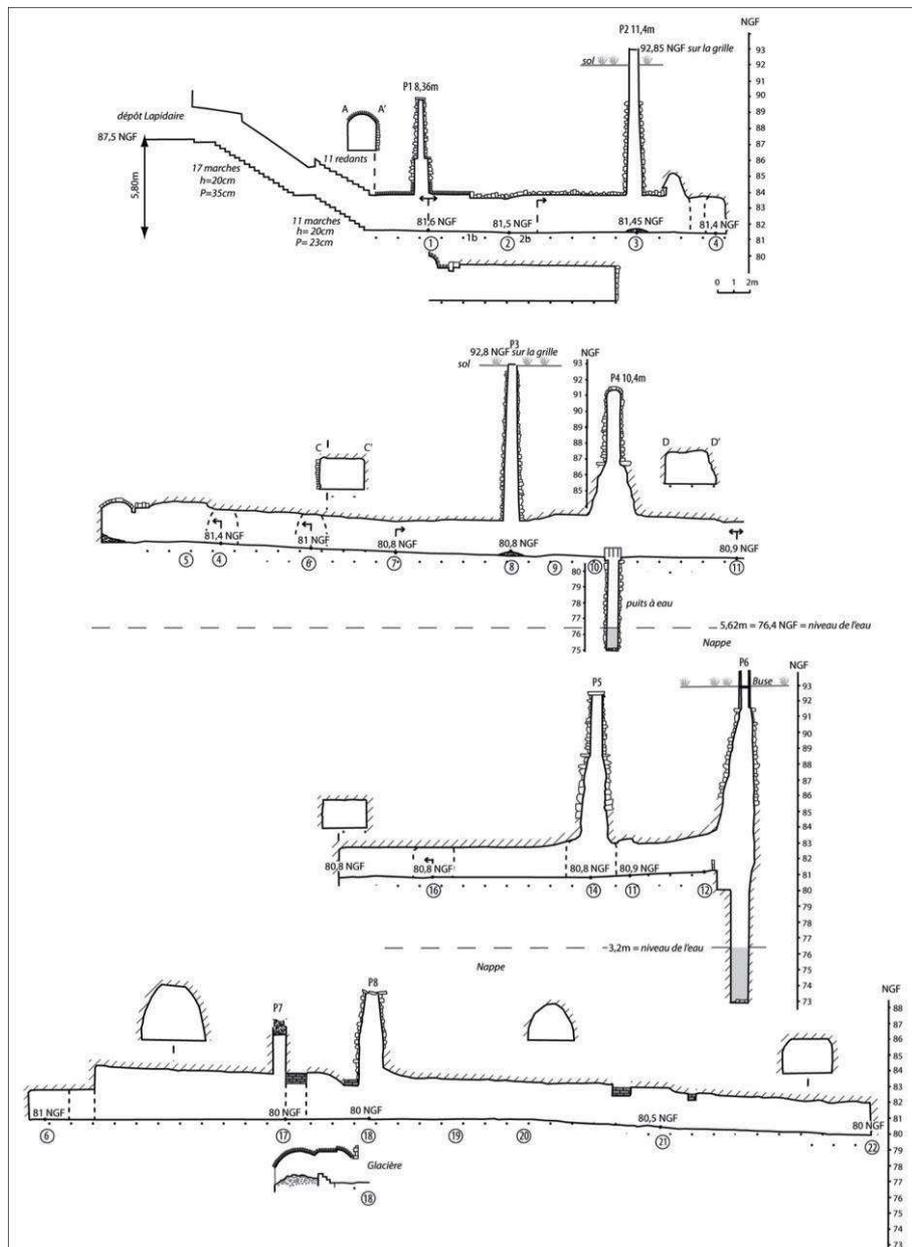


Fig.6. 38: Topographie du souterrain de Saint-Rémi (en coupe).

Ce type de souterrain est illustré par l'exemple du souterrain situé sous la Basilique Saint-Rémi (Fig. 6.38). Il se caractérise par une entrée dans un grand cellier accédant à un ensemble de galeries formant un développement horizontal de plusieurs centaines de mètres (dont un réseau de 226 m), calées à 12 m sous la surface topographique. À l'inverse des crayères, les souterrains de la Marne ne se développent pas ou très peu verticalement. Comme les autres galeries souterraines rémoises, le souterrain de Saint-Rémi est constitué de plusieurs puits (d'extraction, d'aération, à eau). Si l'usage de ces souterrains reste encore incertain, la présence à Saint-Rémi de petites chambres de quelques mètres carrés équipées de feuillures de portes, d'une glacière, et de puits à eau, témoigne d'un usage en cave ou en remise. Les galeries souterraines connues à ce jour se trouvent pour la plupart à proximité d'édifices religieux (basilique, église, collège des Jésuites) et pourraient constituer des abris sans pour

autant être considérées comme des souterrains refuges défensifs ou offensifs comme les Muches ou Boves de Picardie. Les nombreux ouvrages de confortation réalisés en briques à l'aplomb des structures du bâti (murs de soutènement, voûtes) rappellent que ces souterrains recourent plusieurs parcelles (Devos *et al.*, 2017).

6.2.3.3. Les caves privatives

De nombreuses maisons sont équipées de caves, généralement voûtées à 2, voire 3 niveaux dont l'emprise spatiale est contrainte par le parcellaire. Leur profondeur est variable suivant leur positionnement plus ou moins proche de la Vesle et donc de la surface piézométrique.

L'organisation spatiale de ces trois types de cavités est fonction des conditions géomorphologiques et hydrogéologiques du site.

6.2.3.4. Conditions géomorphologiques et piézométriques

En Champagne crayeuse, il est observé aux sommets des croupes de craie, telles que la Butte Saint-Nicaise à Reims, que le substrat crayeux est sub-affleurant ou recouvert d'une rendzine grise sur paléosols à poches de cryoturbation (Laurain, 1995, 1997). En revanche, sur le haut des versants et des croupes, les formations superficielles sont systématiquement absentes. La pente induit une déformation des poches de cryoturbation (sols à poches étirées) et forme plus bas des paléosols striés recouverts d'une rendzine brune. En bas de versant, les sols bruns calcaires typiques de la Champagne crayeuse reposent sur des formations superficielles plus ou moins grossières appelées localement des « graveluches ». Décrites dès 1938 par Radet et Mantelet en 1938, puis par Dutil et Ballif en 1968, ces formations sont associées à des graviers de craie provenant des paléosols cryoturbés puis transportés par solifluxion, gélifraction, reptation et déflation éolienne (Laurain *et al.*, 1995, 1997). Cette répartition spatiale des formations superficielles va permettre en partie de comprendre la répartition spatiale des ouvrages souterrains de la ville de Reims. En effet, les crayères sont essentiellement concentrées sur la Butte Saint Nicaise où la craie est sub-affleurante au sommet et peu recouverte de graveluches. Les essors creusés en surface traversent rapidement ces formations pour atteindre la craie saine dans laquelle la cavité s'évase en gradins, expliquant la morphologie en bouteille caractéristique des catiches. Sur la partie basale des croupes de craie recouverte de graveluches, notamment dans le quartier Saint-Rémi, les crayères sont rares et sont remplacées par les galeries associées aux édifices religieux. Enfin, sur les terrasses alluviales de la Vesle, des caves privatives et des puits à eau sont retrouvés dont la profondeur dépend des conditions piézométriques (Devos *et al.*, 2017).

Avec une porosité de l'ordre de 40%, une forte perméabilité et une transmissivité comprise entre 10^{-3} et 10^{-1} m²/s, la craie constitue l'aquifère principal en Champagne crayeuse (Rouxel *et al.*, 2002). Cette nappe d'eau souterraine ou zone saturée est alimentée principalement par l'infiltration généralisée et diffuse des précipitations en zone vadose ou non saturée. Le degré de fracturation, plus important en fond de vallée, détermine des secteurs plus productifs que les plateaux où la craie est peu fissurée, avec une porosité plus faible qui détermine des temps de résidence plus longs. L'analyse et le suivi piézométrique de 35 piézomètres situés dans Reims et ses alentours ont permis d'évaluer la différence de battement piézométrique dans les fonds de vallées (0,5 m) et les croupes de craie (20 m) de 1995 à 2014. Cette différence s'explique par le rabattement piézométrique plus important sur les reliefs dû à la vidange aquifère opérée par la Vesle (cours d'eau drainant) au niveau de Reims (Devos *et al.*, 2007).

Le développement vertical des cavités souterraines étant conditionné par l'épaisseur de la zone non saturée de la craie, deux corrélations entre l'altitude des piézomètres et la profondeur minimale (année 2001) et maximale (année 2004) de la zone saturée ont été réalisées. Le coefficient de détermination étant satisfaisant ($R^2 = 0,91$ et $R^2 = 0,72$), une cartographie précise de l'épaisseur « minimale » et « maximale » de la zone vadose a pu être réalisée sur le site de la ville de Reims (Fig. 6.39A et B).

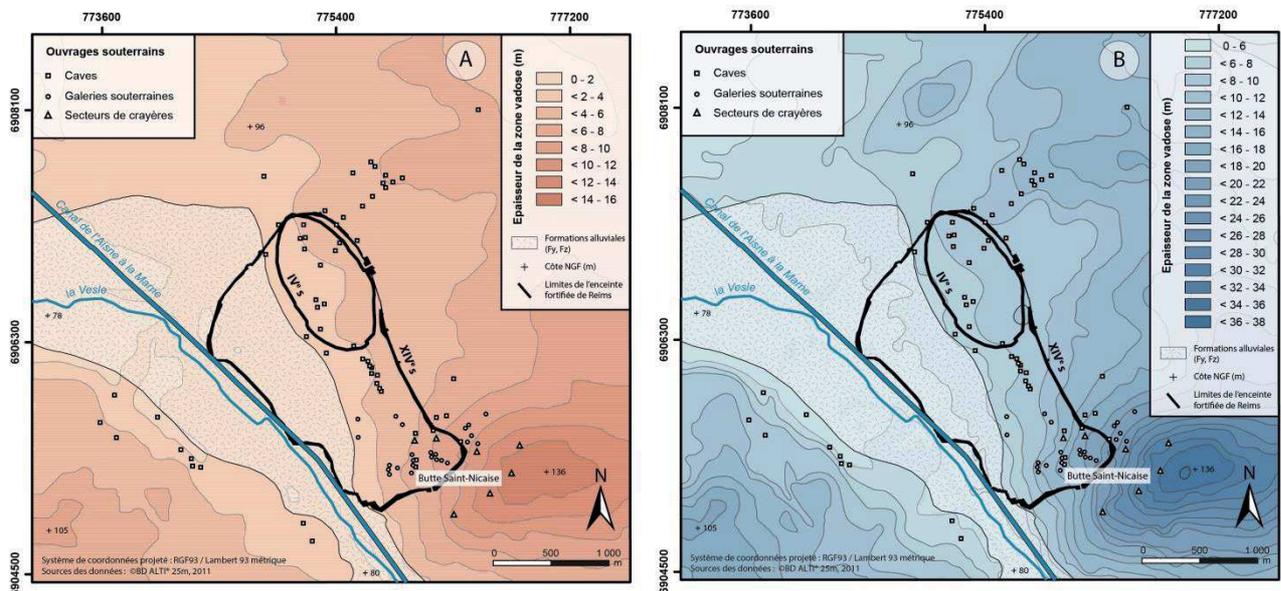


Fig.6. 39: Cartographie de l'épaisseur de la zone vadose sur le site de la ville de Reims. A : en hautes-eaux. B : en basses-eaux (Devos et al., 2017).

Les conditions piézométriques permettent également d'expliquer la répartition spatiale des cavités de la ville de Reims. Au sommet des croupes de craie (120 à 140 m), la nappe fluctue entre 14 m de profondeur en hautes-eaux et 34 m en basses-eaux (médiane = 24 m). C'est donc le seul secteur propice au creusement de crayères à développement vertical, compte tenu de l'épaisseur de la zone vadose. Il faut donc assimiler les puits à eau observés dans les crayères de Reims à des piézomètres ou regards sur le niveau de nappe de la craie permettant aux carriers de connaître la profondeur de la nappe. À l'inverse, le flanc des croupes de craie possède une potentialité de développement vertical plus faible (comprise entre 6 et 16 m de profondeur) ce qui explique la présence de cavités de type « galerie » comme celle de Saint-Rémi. En revanche, lorsque la profondeur de la zone vadose se situe entre 2 et 10 m de profondeur, seules les caves privatives se développent. Dans les fonds de vallée (78 m) et sur les anciennes terrasses alluviales de la Vesle, la présence de la nappe de craie sub-affleurante (moins de 2 m de profondeur) avec de faibles battements piézométriques explique l'absence de cavités et la présence de nombreux puits à eau (Fig. 6.40). Cependant, ce suivi piézométrique sur 20 ans cache des crues de nappe exceptionnelles qui provoquent l'inondation des cavités comme en 1844 et 1980 (Devos *et al.*, 2017).

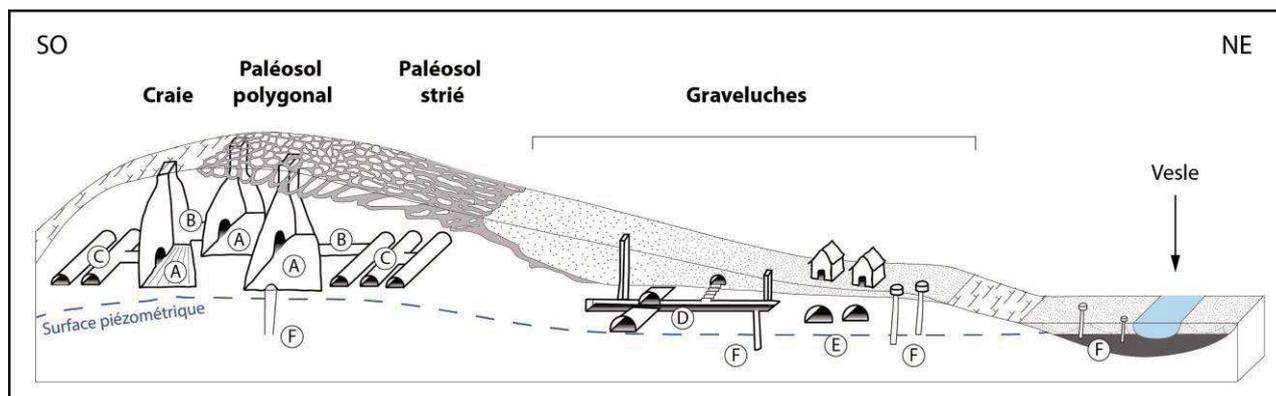


Fig.6. 40: Coupe schématique de la répartition spatiale des cavités souterraines dans leur contexte géomorphologique et piézométrique (d'après Laurain et al., 1995) . A : crayères. B : galeries de liaison. C : galeries filantes. D : souterrains de la Marne. E : caves privées. F : puits à eau.

6.2.3.5. Les cavités de Reims durant la Grande Guerre et les graffitis.

Les cavités de Reims sont réhabilitées en abris pour les civils et l'administration municipale dès la bataille de Reims le 12 septembre 1914. En effet, la ville s'inscrit dans les premières positions des réseaux de défense français. Les cavités des maisons de Champagne et plus spécifiquement les galeries filantes plus spacieuses, accueillent la population civile ainsi que les services municipaux (Etat Civil, police, eaux, ravitaillement de la ville, cabinet du Maire) et sont reconverties en écoles (école Maunoury dans les caves Pommery, école Dubail chez Taittinger) et lieux de culte (Cochet, 1993). Des galeries sont équipées temporairement en groupes électrogènes pour produire et fournir de l'électricité à ces abris. Le souterrain de Saint Rémi est réhabilité en hôpital. Avec l'évacuation des civils dès mars 1918 et l'intensification des combats dans le cadre des offensives Ludendorff, 41 000 000 bouteilles sont évacuées en train et seuls deux régiments résistent. Les militaires occupent les cavités (Poste de Commandement Bourges chez Pommery, cantonnement chez Taittinger). Au sortir de la guerre, la ville est détruite, la population exsangue (5 000 habitants en avril 1917 puis quelques dizaines en 1918) et ne retrouvera ses 115 000 habitants de 1915 qu'en 1931. Des cavités sont utilisées pour évacuer les remblais encore présents de nos jours et l'occupation civile et militaire se manifeste par de nombreux graffitis.

Les graffitis sont révélés et étudiés tardivement dans le cadre du Centenaire (Buttet, 2012), car les caves retrouvent rapidement leur fonction de stockage et de remuage après-guerre. Ainsi valorisés, ils font l'objet d'un parcours touristique spécifique depuis 2016 (« Reims la souterraine »).

La craie est un support propice aux graffitis par sa blancheur et sa faible dureté ce qui explique l'abondance de textes en lettres cursives, d'épigraphe, de figurations, gravures, et de bas-reliefs réalisés à la fois par des civils et des militaires ce qui est original (Fig. 6.41). Si les creutes du Soissonnais dans les calcaires plus durs du Lutétien (Devos *et al.*, 2008 ; Buttet, 2012) ou les carrières d'Arras (Bergerat *et al.*, 2015) regorgent de graffitis, ils sont essentiellement militaires. Cependant, leur lisibilité est souvent rendue difficile, d'une part par la faible profondeur des gravures souvent révélées en lumière rasante, et d'autre part par la présence de vermiculations liées à la porosité interstitielle et à la capillarité de la craie qui entretiennent l'eau pelliculaire de paroi et l'activité microbienne (Fauchet et Lauriol, 2016). De nombreux patronymes civils (témoignages) et militaires affectés de leur identité (dont l'année d'incorporation, Fig. 6.41C) sont retrouvés ainsi que des symboles de patriotisme

(Croix de Fer (Fig. 6.41A), drapeau, République Française (Fig. 6.41D)) ou de haine de l'Allemand (casque à pointe, Fig. 6.41B).



Fig.6. 41: Graffitis observés dans les caves Taittinger. A : Date et Croix de Guerre allemande. B : Casque à pointe. C : Date et patronyme. D : Inscription patriotique française.

Conclusion du chapitre 6

Les domaines d'applications à la connaissance des réseaux de défense de la Grande Guerre sont diversifiés et concernent les morphologies de surface (chapitre 4-5) mais également le monde souterrain. Le tracé des boyaux est largement influencé par l'organisation spatiale des cavités préexistantes (creutes, crayères, caves, etc...) qui sont réhabilitées par les militaires en abris. En effet, les images Lidar croisées aux plans directeurs témoignent de l'englobement de ces cavités dans les réseaux de défense.

Les aménagements des creutes dans les calcaires lutétiens participent à des réajustements morphologiques sur les versants (verses, stériles, plateformes), et accentuent l'aléa « cavités » des plateaux du Soissonnais (creusement de puits d'accès, de cheminées d'aération, de tunnels).

Mais c'est principalement au sein des réseaux de tranchées et de boyaux que les abris *ex nihilo* sont creusés. L'analyse spatiale sous SIG nous permet de proposer des densités linéaires d'abris en première position. Leur nombre dépend des conditions géomorphologiques et hydrologiques (épaisseur de la zone non saturée) mais aussi de leur intégration au sein des positions (absence d'abris de première ligne). Leur comblement partiel ou total après-guerre dans le cadre de la remise en culture engendre des désordres géotechniques liés au tassement des remblais, à l'altération des ouvrages de confortation, à l'affaissement, à l'effondrement, et à la crevaison de fontis associés à l'aléa « cavités ». Ce dernier concerne plus particulièrement l'extension urbaine de Reims qui s'inscrit entre les deux premières positions françaises entre 1918 et aujourd'hui.

L'approche spatiale des plans directeurs et du Lidar montre également les impacts majeurs de la guerre des mines sur l'encaissant rocheux. Elle laisse non seulement de lourds héritages morphologiques en surface (cratères) mais perturbe considérablement la structure physique du sous-sol par un accroissement de la fracturation et la dilatance des matériaux. Cela augmente la perméabilité du milieu et la vulnérabilité à la pollution de surface des eaux souterraines.

Enfin, l'héritage de la Grande Guerre sur le monde souterrain est d'ordre patrimonial (graffitis) mais reste menacé, peu connu, car cantonné à des études sectorielles d'associations, sans approche spatiale, et sans banques de données exhaustives.

Cependant, l'impact environnemental de la Grande Guerre ne se limite pas au relief, mais affecte également lourdement les sols (Hupy, 2006 ; Bausinger *et al.*, 2007 ; Hupy et Koeler, 2012), les eaux souterraines (Hubé, 2016) et la biocénose (Amat, 2015) ce qui légitime leurs études dans le prochain chapitre.

Chapitre 7 : Contamination, pollution

et impacts écologiques

Introduction du chapitre 7

La Grande Guerre a lourdement impacté les sociétés par les pertes humaines, les dégâts matériels colossaux, les changements géopolitiques et les innovations technologiques associées. Elle a marqué l'imaginaire collectif ce que les sciences humaines s'attachent à étudier depuis longtemps. Cependant les conséquences environnementales mises en évidence par l'approche des géosciences, bien qu'importantes, restent peu étudiées ou tardives, alors que les paysages, les sols et les eaux souterraines portent encore la marque du conflit.

L'objectif de ce chapitre applicatif ou d'ouverture est de montrer l'apport de l'approche spatiale des réseaux de défense dans la compréhension, notamment scalaire de problématiques environnementales de la Grande Guerre. Il s'agit d'appréhender les impacts pédologiques par déstructuration des sols et des perturbations chimiques associées au milliard d'obus tiré pendant le conflit. Ce dernier est également une source potentielle de contamination des eaux souterraines par des composés nitro-aromatiques. Enfin, les impacts écologiques sont présentés sur les plantes, les arbres et l'habitat créé par des « polémo-formes » pour la faune.

7.1. Les impacts pédologiques

Pendant les 4 années du conflit, les sols de la zone de front vont connaître un grand remuement des terres par le creusement des réseaux de défense, la bombturbation et la guerre des mines. Malaxé et buriné par les obus, le sol est impacté physiquement en profondeur jusqu'à l'encaissant rocheux. Cet apport d'acier, de cuivre, de plomb pour les principaux, fait l'objet d'une étude plus approfondie pour quantifier les perturbations chimiques des sols de la Grande Guerre.

7.1.1. La déstructuration physique des sols

En Champagne-Ardenne, la zone de front va traverser différents Pays et s'installe durablement dans la plaine de Reims sur des terrains cultivés, dans les pinèdes de la Champagne sèche jusqu'au massif forestier d'Argonne. Le creusement des tranchées, les tirs de l'Artillerie et les explosions de mines vont alors déstructurer le sol ou le recouvrir, notamment dans le no man's land et les deux premières positions, en faisant affleurer le matériel parental.

Avant le conflit, les pelouses sèches (savarts) caractéristiques des plaines champenoises s'établissent sur un rendosol, recouvrant les paléosols périglaciaires (sols polygonaux, striés et graveluches). Compte tenu de la faible épaisseur des rendosols, la craie et ses formations superficielles associées (graveluches alluviales, colluviales et éoliennes) sont impactées par le creusement des tranchées et boyaux de communication, produisant des remblais pour former le parados et le parapet. Sous ces bourrelets latéraux, un sol antérieur au conflit va être fossilisé (paléosol) sous un complexe de roches, de formations superficielles à faible fraction organique assimilé à une « inversion stratigraphique ». Pendant un siècle notamment sous forêt ou bois de pinède, la météorisation sur ces bourrelets nourrit une sédimentation organique dans ces dépressions linéaires dont l'approche archéologique a montré un comblement partiel. Un horizon humifère se crée davantage dans le fond de la tranchée et sur les remblais des réseaux de défense et peut accueillir, corrélativement à son épaisseur, une nouvelle pelouse sèche. Cette perturbation concerne une emprise au sol de l'ordre de 2 m de part et d'autre du tracé des réseaux de défense. À ce titre, le travail de digitalisation des réseaux de défense sous SIG qui a contribué, non seulement de déterminer leur tracé mais également leur densité surfacique, permet de proposer une cartographie de l'emprise de perturbations pédologiques à l'échelle parcellaire (Brenot *et al.*, 2017). Cependant, cet aspect mériterait une étude approfondie car la dynamique pédologique est conditionnée par les pratiques sylvicoles et la position des tranchées et boyaux dans les chaînes de sols (caténa) en Champagne sèche et humide, en Argonne et sur les plateaux tertiaires caractérisés par une grande diversité pédologique. En effet, chaque sol présente une résilience différente à cette perturbation physique. En zone cultivée, le remblaiement généralisé dans le cadre de la remise en culture provoque des différentiels de structure entre l'encaissant et la tranchée qui se traduisent essentiellement par des contrastes hydriques, traduits par des indices phytographiques et pédographiques observés en vue aérienne à basse altitude.

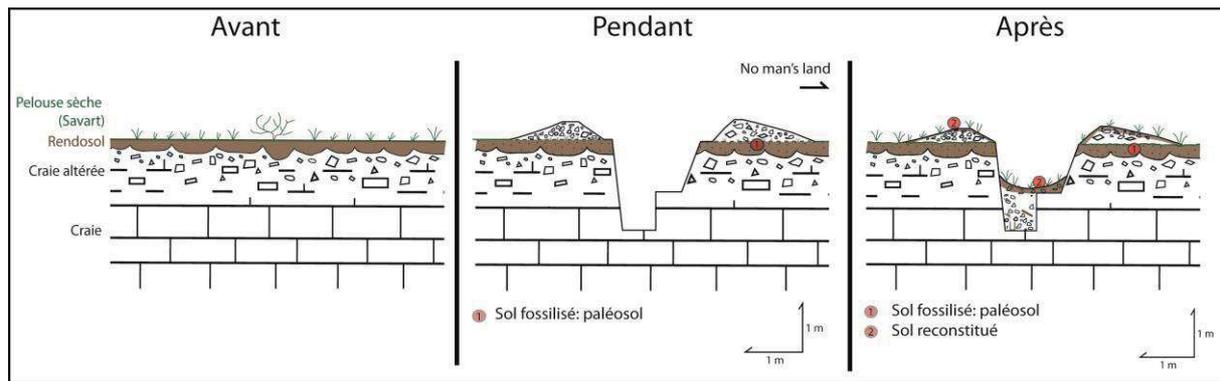


Fig.7. 1: Évolution des horizons pédologiques lors du creusement des réseaux de défense.

La destruction, voire la disparition des horizons pédologiques pendant le conflit, est à l'origine de la formation d'anthrosols. Cependant, cet impact environnemental est davantage dû au déluge d'obus de 856 millions à 1,4 milliard (Linnenkohl, 1996 ; Prentiss, 1937) et à la guerre des mines (Hutchinson *et al.*, 2008). En effet, alors que dans des secteurs calmes, la surface remuée (tranchées, boyaux, trous d'obus) est estimée à 9,12 % (« secteur 10 » de la fouille INRAP près de Reims), d'autres secteurs plus disputés sont affectés à 100 % dans les deux premières positions (Arnoult *et al.*, 1992).

L'un des rôles de l'Artillerie est de faciliter l'infiltration de son Infanterie en détruisant les défenses accessoires. Pour créer une brèche de 20 m par 25 m dans le réseau de défenses accessoires adverses, 1 200 obus sont nécessaires, se traduisant par 2,4 obus/m² (GQGA, 1918). Par des tirs épars ou très concentrés, la bombturbation déstructure le sol en place et met en affleurement le matériel parental. Sur certaines parcelles intensément obusées inscrites dans un modelé en peau d'orange, la détente mécanique naturelle des matériaux rocheux de sub-surface est exacerbée par un réseau de fracturation plus dense (coalescence des globes de friabilité des ondes de choc) mais surtout par un manteau de blocs hétérométriques provenant des retombées des gerbes d'artillerie (éjectas) mêlés dans une matrice minéralo-organique.

Le modelé naturel régularisé (versant réglé, glacis, forme lisse) enregistre une rugosité anthropique révélée en image Lidar qui conditionne les modalités d'écoulement (ruissellement, infiltration).

En effet, le cratère d'obus piège facilement la matière organique et facilite le développement d'un horizon humifère accentué par la présence préférentielle d'une micro et macrofaune. Les études menées à Verdun montrent un horizon organique de 20 cm dans le fond des cratères mais seulement 4 cm sur une zone non perturbée à proximité (Hupy et Schaeztl, 2008). Cependant, un sol à gley (sol hydromorphe) peut se former par gleyification en recoupant la nappe (gley d'eau souterraine) ou par stagnation d'eau dans le fond du cratère (stagnogley). Par contre, le caractère filtrant de la craie de Champagne détermine une infiltration généralisée limitant considérablement le ruissellement et l'atterrissement dans les entonnoirs d'obus.

Enfin, la guerre des mines va non seulement détruire le sol sus jacent à l'explosion mais aussi impacter profondément la roche par sur-fracturation et engendrer des dynamiques géomorphologiques atypiques. En effet, des processus originaux sont observés dans les cratères de mines depuis la Grande Guerre qui rassemblent de nombreuses similitudes avec les astroblèmes (Hodge, 1994 ; Salomon et Auly, 2010). L'explosion a produit un cercle de

friabilité autour du fourneau dans lequel la roche est fracturée, détendue, et la surface du sol déformée par dilatance sous la forme d'un léger boursoufflement ou « extumescence » composant les lèvres de l'entonnoir qui se surhaussent lors de la chute de la gerbe. Cette dernière a également projeté des éjectas rocheux hétérométriques à l'extérieur du cratère qui retombent sur le sol (inversion stratigraphique).

Pour comprendre les dynamiques géomorphologiques des cratères, et plus particulièrement du « méga-cratère » de Berry-au-Bac à l'Ouest de la Cote 108 (Fig. 7.2A et B), une campagne de huit sondages (fosses pédologiques) a été réalisée en 2016, sur un transect Nord-Est/ Sud-Ouest (Fig.7.2C). Le traitement des images Lidar permet de déterminer sa profondeur (d) de 22 m et son diamètre compris entre 61 et 76 m (forme d'ellipse) pour un volume calculé sous une surface topographique de référence de 79 755 m³, soit plus de 150 000 tonnes. Son profil transversal détermine des pentes fortes (moyenne de 45°, maximum de 49°) qui rendent difficile l'accès (descente sur cordes). D'après la formule des caractéristiques morphométriques du cratère, la charge explosive est estimée à 70 tonnes. Les sondages réalisés montrent clairement 3 types de formations au sein de l'entonnoir (Fig. 7.2E) : le fond de l'entonnoir est dénué de formations fines ce qui montre l'absence de ravinement dans cette formation crayeuse. Un rendosol, dont l'horizon organo-minéral humifère brun chargé en gravier de craie (horizon Aca) fait moins de 10 cm d'épaisseur et postérieur à la Grande Guerre, recouvre le fond de l'entonnoir (Fig. 7.2F) sur une craie fracturée en blocs décimétriques ou brèche d'éjectas (horizon BE). Les flancs de l'entonnoir sont tapissés d'un manteau de 10 à 30 cm d'épaisseur de cryoclastes de craie (Fig. 7.2D) représentés par des graviers de craie ou graveluches gravitaires (MC) (Laurain *et al.*, 1995) qui recouvrent un colluviosol (Fig. 7.2G). Enfin, une corniche de gélifraction en cours de végétalisation et clairement visible en photographie aérienne avant 1970 et sur les cartes postales anciennes sous la forme d'une auréole de craie blanche, bordant le cratère (Fig. 7.2A et B) avec un manteau de cryoclastes plus grossiers (MC) et un horizon humifère chargé davantage en éléments de craie (Aca/C) (Fig. 7.2H). À l'extérieur, aucun éjecta (blocs rocheux) ne subsiste soulignant la gélivité de la craie alors que les calcaires jurassiques, moins gélifs sont davantage conservés comme aux Eparges (Fig. 6.7). Ces observations témoignent d'une dynamique géomorphologique particulière dans les cratères de mines inscrits dans la craie depuis la Grande Guerre. La fracturation liée à l'explosion augmente la porosité et la perméabilité de la craie qui empêchent tout ruissellement dans l'impluvium (infiltration généralisée) et la migration de particules fines au fond que l'on retrouve pourtant, sur d'anciennes cartes postales, dans d'autres entonnoirs de mines en Champagne (Perthes-les-Hurlus, Tahure) et en Argonne (Fille Morte).

La mise en affleurement de la craie gélive produit des graveluches gravitaires récentes qui recouvrent les flancs des entonnoirs. En période de hautes-eaux et de crue de nappe, la profondeur du cratère recoupe la zone saturée de l'aquifère crayeux rabattue et drainée par l'Aisne et la Loire, générant un plan d'eau visible sur certaines cartes postales anciennes.

La Grande Guerre par ses perturbations morphologiques et pédologiques peut être considérée comme une phase rhexistatique mettant en affleurement les roches qui soumises à la météorisation tendent ensuite à une régularisation naturelle ou artificielle (nivellement généralisé par remblaiement). Elle a également lourdement impacté la structure physique du sol et conditionne ses caractéristiques hydriques (soulignées par des indices phytographiques

et pédographiques) et les conditions d'écoulement qui déterminent la vulnérabilité du milieu à la pollution de surface.

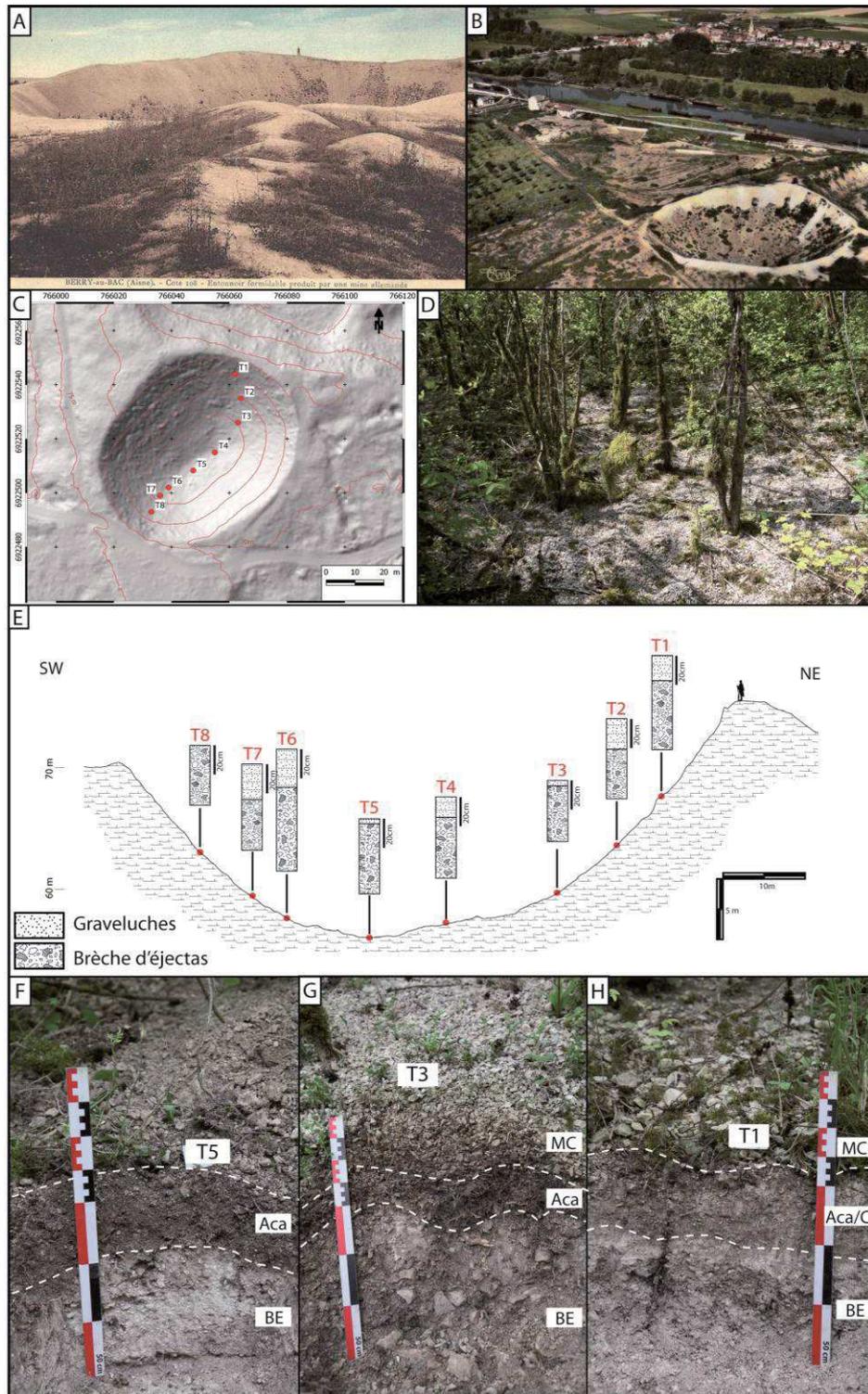


Fig.7. 2: A et B - Carte postale de la cote 108. C : Image Lidar et position des fosses pédologiques. D - Nappe de graveluches sur les pentes du cratère. E – Coupe du « méga-cratère » et emplacement des fosses pédologiques. F-H - Photographies de trois fosses pédologiques. F-H - Photographies de trois fosses pédologiques en fond, à mi-pente et sur le haut de versant du cratère (Cliché : Devos A.).

7.1.2. Perturbations chimiques des sols

Sur le milliard d'obus tirés pendant la Première Guerre Mondiale, leur utilisation et leur destruction après-guerre a pu engendrer des contaminations importantes par des résidus d'explosifs et des éléments métalliques. Les sols renfermant des éclats d'obus, *shrapnels* et projectiles divers ont pu être contaminés par les éléments traces métalliques (ETM ; Pb, Hg, Sb, As, Cd, Cu, Ni, Cr,...). L'objectif est donc d'identifier les ETM concernés présents dans les sites choisis et d'évaluer leur concentration.

Même si il existe une très grande diversité de munitions utilisées (explosifs, à gaz, fumigènes...), la structure des obus reste similaire. Une amorce sous la douille joue le rôle détonant pour la mise à feu de la charge propulsive. L'ogive contenant la charge explosive est coiffée d'une fusée pour sa mise à feu (Fig. 7.3A). Les composants métalliques de l'obus sont nombreux et très diversifiés mais visibles aujourd'hui en sub-surface pour les billes de *shrapnel* (Fig. 7.3B) ou retrouvés plaqués sur les parois des cratères d'obus en fouille archéologique pour les fragments métalliques (Fig. 7.3C). Le principal constituant des obus est le fer (sous forme d'acier, de fonte ou de fonte aciérée) qui constitue le corps de l'obus. D'autres métaux ou métalloïdes sont également utilisés dans de moindres proportions pour différentes pièces. La ceinture de guidage des obus est constituée de métaux mous comme le cuivre ou le laiton (un alliage de cuivre et de zinc). Le laiton est également employé pour les douilles d'obus. Le plomb est utilisé dans les obus à balles ou obus fusants (billes de plomb durcies d'arsenic ou d'antimoine) (Fig. 7.3B) et comme explosif primaire. L'arsenic rentre dans la composition de certains gaz de combat. L'amorce des munitions est constituée de fulminate de mercure.

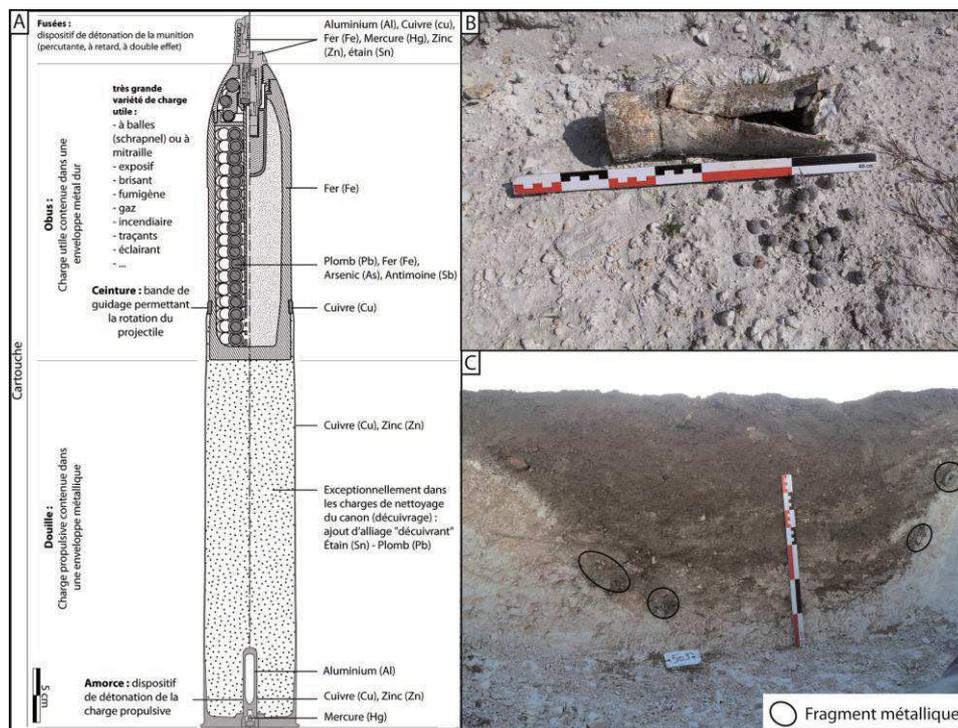


Fig.7. 3: A- Les composantes d'un obus. B - Photo d'un obus shrapnel (cliché : Devos A.). C - Photo d'une coupe d'un cratère d'obus en fouille archéologique (cliché : Devos A.).

Ces éléments sont des éléments traces métalliques (ETM) essentiels aux êtres vivants (oligoéléments), à l'exception du plomb et du mercure, mais qui peuvent devenir toxiques à partir d'une certaine concentration. Même s'il n'existe actuellement en France aucune valeur réglementaire concernant les teneurs en métaux dans les sols, leur occurrence en quantités

importantes dans les sols localisés le long de la ligne de front présente donc un risque environnemental potentiel. Ils peuvent éventuellement migrer vers les eaux de surface et les eaux souterraines ou être absorbés par les organismes vivants. Il est donc essentiel de connaître les teneurs et le comportement des ETM dans les sols impactés par la Première Guerre Mondiale.

À ce jour, seules quelques études se sont intéressées à cette problématique, mais de manière très locale ou sectorielle, ne permettant pas de connaître leur représentativité spatiale. En France, l'héritage métallique de la Grande Guerre a été essentiellement étudié sur le site de la « Place à Gaz » localisé au Nord-Est de Verdun (Bausinger *et al.*, 2007 et Thouin *et al.*, 2016). Dans les années 1920, environ 200 000 obus chimiques allemands ont été détruits sur ce site d'une surface de 2000 m². La contamination métallique concerne principalement l'horizon de surface (0-20 cm) de la zone avec de très fortes teneurs en arsenic ($[As]_{\max} = 17,6 \%$), zinc ($[Zn]_{\max} = 13,3 \%$), cuivre ($[Cu]_{\max} = 1,7 \%$) et plomb ($[Pb]_{\max} = 2,6 \%$). La mobilité des ETM a été évaluée par des expériences en batch avec du nitrate d'ammonium 1 M (Bausinger *et al.*, 2007) ou de l'eau ultra-pure (Thouin *et al.*, 2016). En fonction du réactif utilisé, les pourcentages extraits sont très différents : inférieurs à 2 % pour l'eau ultrapure et jusqu'à 80 % (pour le zinc) avec le nitrate d'ammonium. La mobilité du zinc, du cuivre et du plomb décroît lorsque le pH des sols augmente (Bausinger *et al.*, 2007) alors que celle de l'arsenic dépend du pH, du rapport As/Fe, des mécanismes de précipitation/dissolution du fer et de l'activité microbienne (Thouin *et al.*, 2016).

En Champagne-Ardenne et Picardie, quatre sites marqués par des perturbations liées à la Grande Guerre ont été étudiés afin de quantifier leurs teneurs en ETM (Chabert, 2016) : deux cratères d'obus, un localisé à Vienne-le-Château en Argonne et l'autre sur le « secteur 10 » du Bas de la Noue Saint-Rémi en Champagne crayeuse, un cratère de mine situé à Berry-au-Bac et une zone de destruction de munitions à Verzy dans la Montagne de Reims (Fig. 7.4).

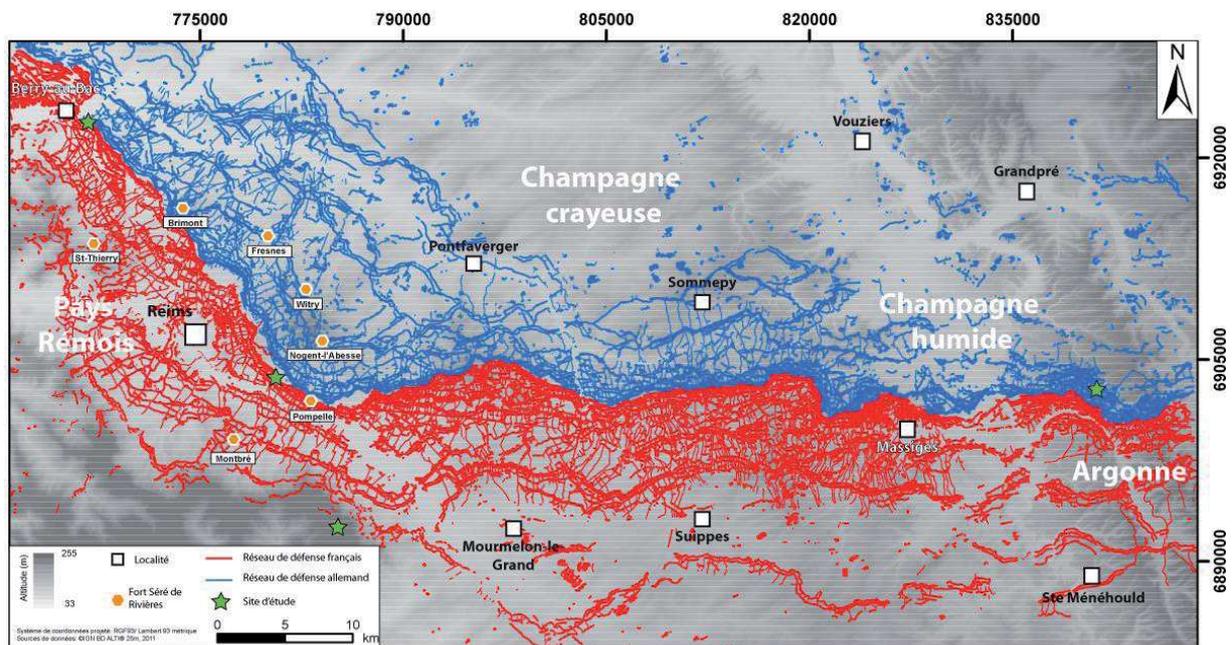


Fig.7. 4: Localisation des sites d'étude pour la mesure géochimique dans les réseaux de défense de Champagne-Ardenne.

À Berry-au-Bac, les prélèvements ont été effectués lors de l'étude dans le « méga-cratère » dans les différentes fosses pédologiques (Fig. 7.2C). La seconde prospection concerne uniquement un entonnoir d'obus sur le « secteur 10 » recoupé en fouille archéologique (.....)

dans la première position française dans la banlieue de Reims. Un troisième site est choisi dans le Parc Naturel Régional de la Montagne de Reims en forêt domaniale de Verzy en arrière immédiat de la 4^{ème} position française. En 1927, des munitions auraient été détruites sur ce site, creusant des cratères d'environ 5 m de diamètre, et aujourd'hui classé en tant que réserve biologique. Sur ces limons lœssiques qui recouvrent les argiles à meulière, ces cratères ennoyés accueillent une faune et flore hydrophiles particulières. Enfin, un cratère d'obus a fait l'objet de prélèvements dans la gaize d'Argonne dans le bois de la Gruerie. Ce site est localisé dans la première position allemande, largement marmitée par l'Artillerie française.

7.1.2.1. Échantillonnages et outils analytiques

En fonction de la proximité des sites, de leur histoire et des accords des propriétaires, des mesures *in situ* ont été réalisées ou des prélèvements pour être mesurés en laboratoire. Les teneurs en éléments chimiques ont été déterminées avec un analyseur X-Niton-XL3t-980 (FPXRF : Field Portable X-ray Fluorescence, Fig. 7.5A). Cette méthode d'analyse rapide et non destructive permet de mesurer un grand nombre d'éléments chimiques et de prélèvements (du magnésium à l'uranium). De plus, cet appareil portable peut être utilisé sur le terrain (Fig. 7.5B). Cependant, les analyses en terrain humide influent négativement sur les concentrations mesurées, et les prélèvements pour des mesures en laboratoire sont préférés (Fig. 7.5C).



Fig.7. 5: A - Analyseur par fluorescence X portable Niton XL3t 980 GOLDD+ (Source : Thermo Niton). B – Mesure sur le terrain par fluorescence X à Isle-sur-Suipe (Source : cliché Devos A.). C – Prélèvement d'échantillon à Isle-sur-Suipe (Source : cliché Devos A.)

Pour déterminer les concentrations en éléments, la FPXRF émet un rayonnement X, qui éjecte les électrons des couches profondes des atomes. Cette lacune électronique au sein des couches profondes des électrons entraîne une cascade électronique des couches supérieures. Ces transitions électroniques s'accompagnent de l'émission de rayons X. Les rayons X produits sont caractéristiques de chaque élément. La FPXRF analyse ce rayonnement émis qui est traduit par l'appareil en concentration pour chaque élément (Chabert, 2016).

En laboratoire, les échantillons sont mis à sécher à température ambiante après dissociation des agrégats à la main. Les éléments grossiers (>2 mm : cailloux, graviers, matériaux anthropiques, ...) sont séparés de la terre fine (<2 mm). Le tamisage se fait par voie sèche, à l'aide d'un tamis en inox à 2 mm de maillage. Ensuite, environ 50 g de sol sont soumis à un broyage fin pendant 10 minutes par un broyeur électrique pour obtenir des éléments de 100

μm . La fraction broyée est employée pour la mesure des concentrations en éléments chimiques. Environ 5 g d'échantillon sont tassés et placés dans une coupelle dont le fond est constitué d'un film en polypropylène pour éviter les interactions avec le rayonnement incident. L'échantillon est enfin placé dans le stand de mesure et analysé à l'aide de l'analyseur Niton XL3t 980.



Fig.7. 6: Dispositif de mesures de la fluorescence X au laboratoire (stand portable NIT-420-017).

Pour déterminer si un sol est pollué, il est impératif de le comparer aux valeurs du fond pédogéochimique local, c'est-à-dire la concentration naturelle en ETM du sol. Cette concentration est liée à la dégradation du matériau parental suite à différents processus d'altération. Ainsi un sol peut présenter naturellement de fortes concentrations en ETM mais ne pas être pollué.

7.1.2.2. Résultats

Sur le site de la Cote 108 à Berry-au-Bac, seul l'ETM mesuré est le plomb sur les flancs et le fond du méga-cratère. Les teneurs de surface sont assez variables (de 10 à 40 mg.kg^{-1}). Ces valeurs tendent ensuite à diminuer pour atteindre des valeurs entre 5 et 20 mg.kg^{-1} à 15 cm de profondeur et 10 mg.kg^{-1} à la base du profil. Ces teneurs sont proches du fond pédogéochimique. Ces résultats donnent un argument supplémentaire à la relative jeunesse de ce méga-cratère, explosion datée du 27 mai 1918. Ce cratère de mine n'a donc pas subi la bombturbation et aucun élément métallique n'a pu s'y déposer.

En Argonne, à Vienne-le-Château, les différents profils (P0, P1, P2, P3 et P4) correspondent à des analyses du centre (P0) vers l'extérieur du cratère (P4). Sur ce sol de type «ranker» sur gaize, les teneurs en plomb évoluent de 5 à 400 mg.kg^{-1} en surface et peuvent atteindre des valeurs de 400 à 600 mg.kg^{-1} entre 15 et 30 cm de profondeur. En surface, les teneurs en cuivre sont de 50 à 100 mg.kg^{-1} avec un maximum à 25 cm de profondeur de 140 mg.kg^{-1} (Fig. 7.7).

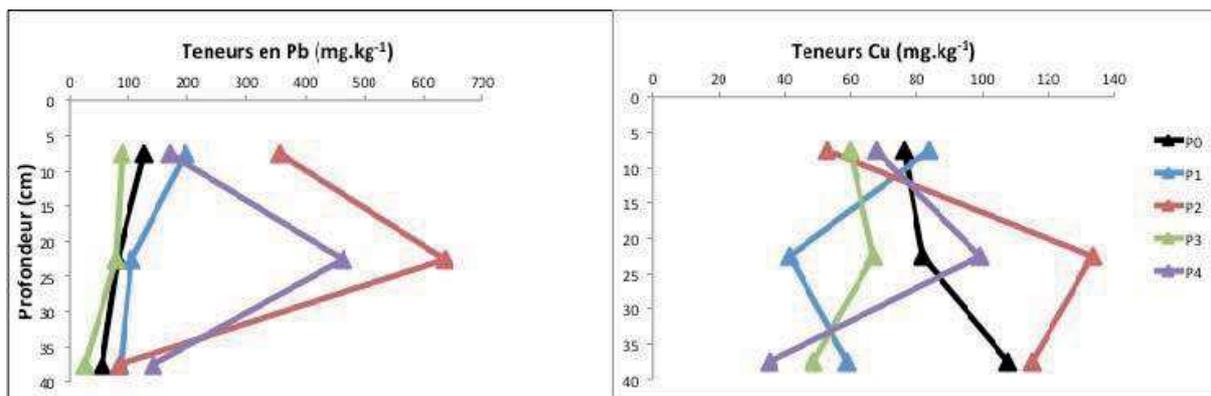


Fig.7. 7: Teneurs en plomb et en cuivre dans un cratère d’obus dans le bois de la Gruerie en Argonne.

Les résultats montrent que les concentrations maximales sont enregistrées à l’interface entre le sol et la gaize. Compte tenu de la géométrie des remplissages d’un entonnoir d’obus, la concentration des ETM serait cantonnée à l’entonnoir d’obus. Cet « effet pépite » est retrouvé dans la fouille du « secteur 10 » près de Reims où l’oxydation de la fusée de l’obus engendre un panache contaminant en aluminium, cuivre et zinc limité au remplissage car l’encaissant crayeux n’est pas affecté (Fig. 7.8).

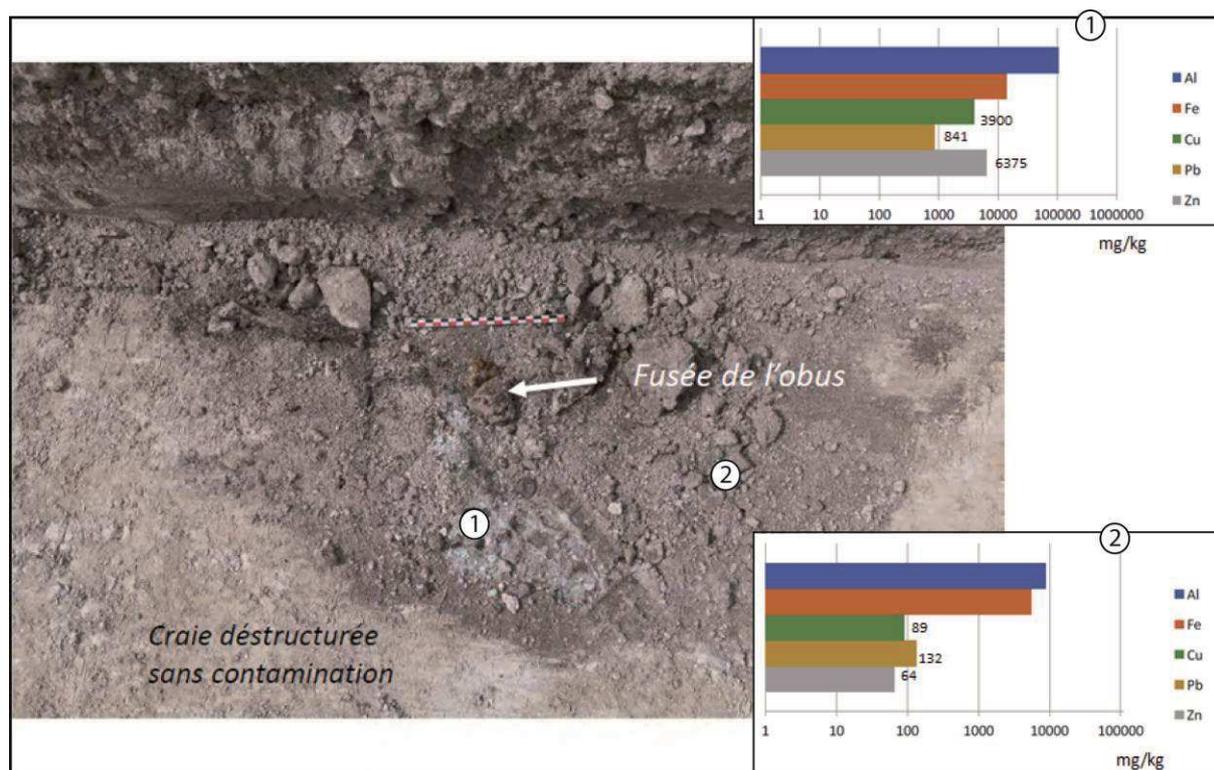


Fig.7. 8: Localisation des prélèvements dans un trou d’obus du « secteur 10 » et teneurs en ETM associées. (Cliché : Taborelli P.).

Dans la réserve biologique dirigée des mares de Verzy, des analyses par fluorescence X ont été réalisées le 23 juin 2016 selon un axe Est-Ouest et un axe Nord Sud. L’analyse a été réalisée immédiatement à la surface du sol après avoir enlevé un éventuel horizon de litière et également à environ 5 cm de profondeur dans certains cas. Il est à noter que toutes les

analyses ont été réalisées sur site sans préparation préalable (séchage, tamisage à 2 mm et broyage). Au total, 58 mesures ont été réalisées à vocation prospective (Annexe 7.1).

L'élément trace métallique le plus fréquemment rencontré à des teneurs relativement élevées est le plomb (Annexe 7.1). La teneur minimale mesurée pour cet élément est 10 mg.kg⁻¹ et la teneur maximale est 174 mg.kg⁻¹. Les valeurs les plus fortes mesurées correspondent le plus souvent aux mesures réalisées à 5 cm de profondeur, ce qui suggère une augmentation des teneurs avec la profondeur.

Le cuivre est également présent à des teneurs globalement inférieures à celles du plomb (Annexe 7.1). 25 analyses présentent des valeurs inférieures à la limite de détection de l'appareil (environ 15 mg.kg⁻¹) et la valeur maximale mesurée est 166 mg.kg⁻¹.

D'après la répartition spatiale des teneurs en plomb, seule la partie Sud-Est de la zone prospectée semble être impactée par cet élément et une tendance similaire semble apparaître pour le cuivre (Fig. 7.9). Ces résultats suggèrent donc que seuls quelques cratères (en jaune) auraient été utilisés pour détruire des munitions. Ces cratères semblent présenter une morphologie qui les distingue des autres avec des flancs très abrupts et relativement dépourvus de végétation. L'examen rapide de quelques échantillons de sols a révélé la présence de particules métalliques fortement corrodées. L'hypothèse que seuls quelques cratères soient impactés doit être confirmée par une analyse plus précise de la zone d'étude.

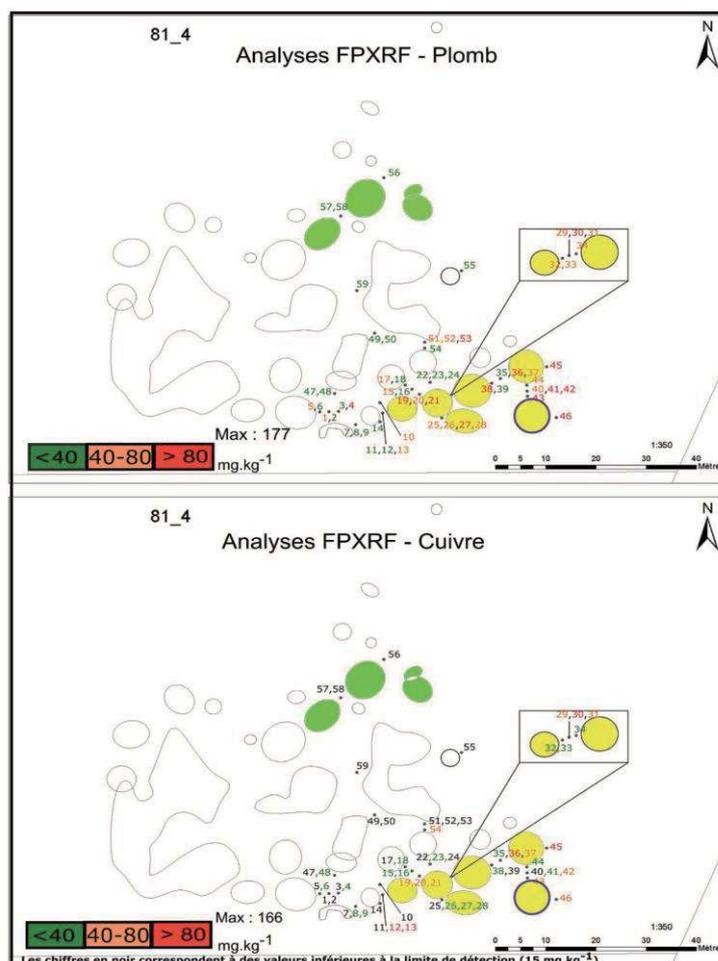


Fig.7. 9: Localisation des analyses FPXRF réalisées et gamme des teneurs en cuivre mesurées dans les horizons de surface en forêt de Verzy (Chabert, 2016).

Une étude plus précise porte donc sur la zone qui semble impactée par la destruction de munitions (partie Sud-Est du site, cratères jaunes) ainsi que sur une zone « témoin » uniquement impactée par l'activité supposée d'extraction de meulière (cratères en vert, Fig. 7.9). Les prélèvements sont réalisés dans le cratère le plus au Sud-Est (entouré en bleu, Fig. 7.9).

Les prélèvements tous les 5 cm montrent une concentration constante tout au long du profil (100 à 200 mg.kg⁻¹). Les teneurs en plomb augmentent fortement jusque 45 cm de profondeur (1 431 mg.kg⁻¹) puis diminuent (824 mg.kg⁻¹, Fig. 7.10).

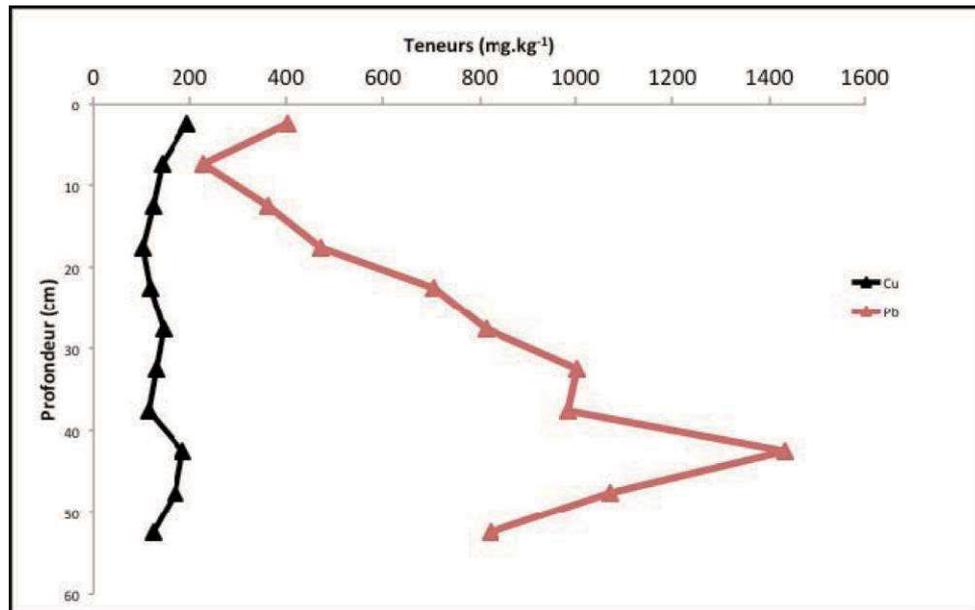


Fig.7. 10: Evolution des teneurs en cuivre et plomb dans le cratère Sud-Est à Verzy (Chabert, 2016).

Sur l'ensemble des sites étudiés, le plomb est l'ETM systématiquement retrouvé, souvent accompagné du cuivre. Le cratère de mine (Berry-au-Bac) étudié n'est pas impacté par les ETM à la différence des cratères d'obus dont les teneurs en cuivre et en plomb sont très hétérogènes (de 25 à 600 mg.kg⁻¹ pour Pb et de 20 à 100 mg.kg⁻¹ pour Cu). La zone de destruction de munitions étudiée (Verzy) présente logiquement les teneurs en plomb les plus importantes (jusqu'à 1500 mg.kg⁻¹). Ces résultats restent cohérents avec les différentes études menées en Belgique et en France (Bausinger *et al.*, 2007) mais restent très hétérogènes d'un site à l'autre. De plus, même si ces teneurs, notamment à Verzy, sont importantes (1 500 mg.kg⁻¹), elles restent en deçà des valeurs pouvant atteindre 9 000 mg.kg⁻¹ de cuivre et 8 000 mg.kg⁻¹ de plomb (Bausinger *et al.*, 2007 ; Thouin *et al.*, 2016). En conclusion, les concentrations les plus fortes sont observées dans la zone de destruction de munitions à Verzy dans les argiles à meulière. Le cratère d'obus dans la gaize présente des teneurs très hétérogènes comme dans l'entonnoir d'obus dans la craie (« effet pépite »). L'absence de contamination en ETM dans le « méga-cratère » dans la craie est une preuve supplémentaire d'une explosion en mai 1918 sans marmitage. L'acidité des sols semble également prédominante car les concentrations diminuent avec le pH. L'ensemble de ces mesures a été acquis à une échelle très locale et ne peut pas être extrapolé à l'ensemble du front. Il faudrait alors multiplier les analyses sur davantage de sites afin de déterminer avec précision l'enrichissement en ETM sur l'ensemble du front ce qui nécessiterait un travail titanesque de terrain et de laboratoire. La contamination en ETM semble inféodée à la dimension

multiscaleaire sans pollution régionale à la différence des argiles des Flandres dans la région d'Ypres (Meerschman *et al*, 2011).

7.2. Contamination métallique solide

La contamination des sols en ETM est étroitement liée à l'apport métallique solide au sol par les obus. Les boulets creux tirés dans des canons lisses et remplis de poudre noire forment 4 à 5 morceaux de métal à l'explosion. Avec le développement des explosifs, les armées veulent micromiser les éclats pour provoquer davantage de dégâts sur l'Infanterie adverse. Pour un maximum d'efficacité, un obus de 75 mm français doit se fragmenter en 300 éclats d'acier d'un poids moyen de 10 grammes et de 14 grammes pour un obus de 105 mm. (Fig. 7.11). Le plomb, retrouvé dans les sols de la zone de front, provient d'obus *shrapnel*, 313 billes de plomb de 12 gr dans l'obus de 75 mm, jusque 640 billes dans un obus de 120 mm. Un obus de 155 mm à mitraille est considéré comme particulièrement efficace avec 416 billes de plomb de 25 gr et 288 fragments provenant de son enveloppe (Farsac, 1911). L'effet létal de ces éclats et mitrailles dépend de leur vitesse (800 à 1 000 m/s), de leur distance à l'objectif et de la forme de la gerbe (gerbe de culot, latérale de l'enveloppe et gerbe de tête, Fig. 7.11). Le rayon moyen des éclats meurtriers des obus de 75 mm et 105 mm est respectivement de 35 m et 45 m. Cependant, les très gros éclats, lors d'une mauvaise explosion, peuvent être projetés à 700 m pour le 75 et 800 m pour le 105 mm (Farsac, 1911).

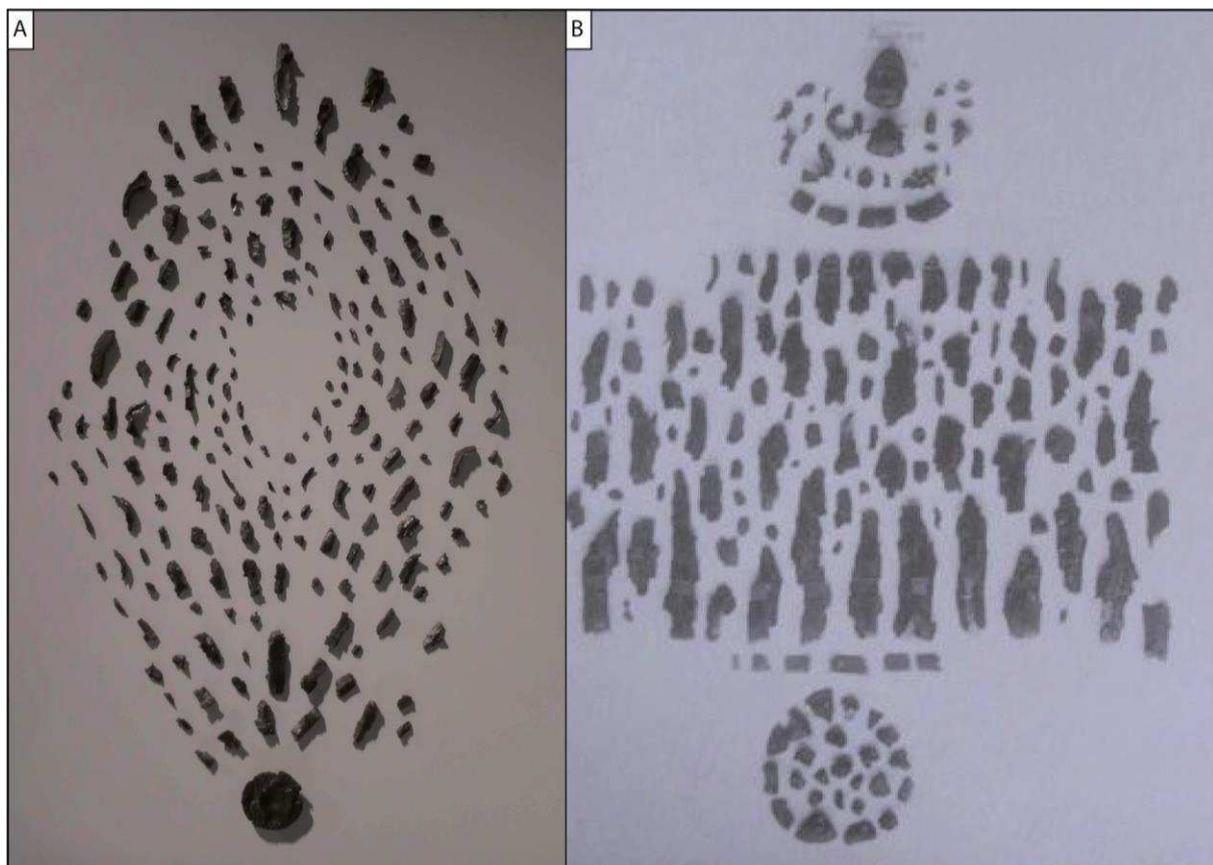


Fig.7. 11: A - Éclats d'un obus de 75 mm français (Source : Musée de la Grande Guerre de Meaux). B - Éclats d'un obus de 105 mm français (Source : Gervereau, 2001).

En Slovénie, un grand nombre de fragments métalliques, engendrés par les obus et les bombes, ont permis d'étudier la corrosion des métaux sur deux sites (Souvent et Pirc, 2001). Les auteurs décrivent que plus de 80 % des fragments retrouvés (billes *shrapnel*, fragments en laiton et en acier) se situent en sub-surface à des profondeurs maximales de 20 cm. Sur les différents sites d'étude, le plomb est l'élément présent en plus grandes quantités avec des valeurs moyennes de 120 mg.kg^{-1} et une valeur maximale de $1\ 005 \text{ mg.kg}^{-1}$. D'après les expériences réalisées, les fragments métalliques qui résistent le mieux à la corrosion sont ceux en laiton, suivis de ceux en fonte et en acier, enfin les fragments en plomb sont ceux qui présentent la plus grande vitesse de corrosion.

Dans la zone de front, et notamment entre les deux premières positions, l'apport métallique est potentiellement très important selon la densité de l'obusage. Une étude des archéologues de l'INRAP avant la construction du canal Seine-Nord-Europe a été réalisée près d'Allaines dans la Somme. Lors des opérations archéologiques, les appareils de détection ont permis de trouver, sur une surface de 80 hectares, 3 500 «anomalies» magnétiques de plus de 7,5 cm de diamètre. Ces fouilles archéologiques sur la zone de front sont donc réalisées en étroite collaboration avec les démineurs, appelés près de 150 fois sur cette zone de fouille.

En Belgique, les investigations menées par l'Université de Gand à l'échelle parcellaire, montrent des anomalies magnétiques concentrées, qui paraphrasent le tracé des tranchées. Les remblais sont chargés de métaux (éclats d'obus, chevaux de frise, fils barbelés), poussés dans les tranchées lors de leur comblement (Fig. 7.12) et observés en fouille archéologique dans la banlieue de Reims. D'autres anomalies éparées et diffuses correspondent manifestement aux éclats des gerbes d'explosion.

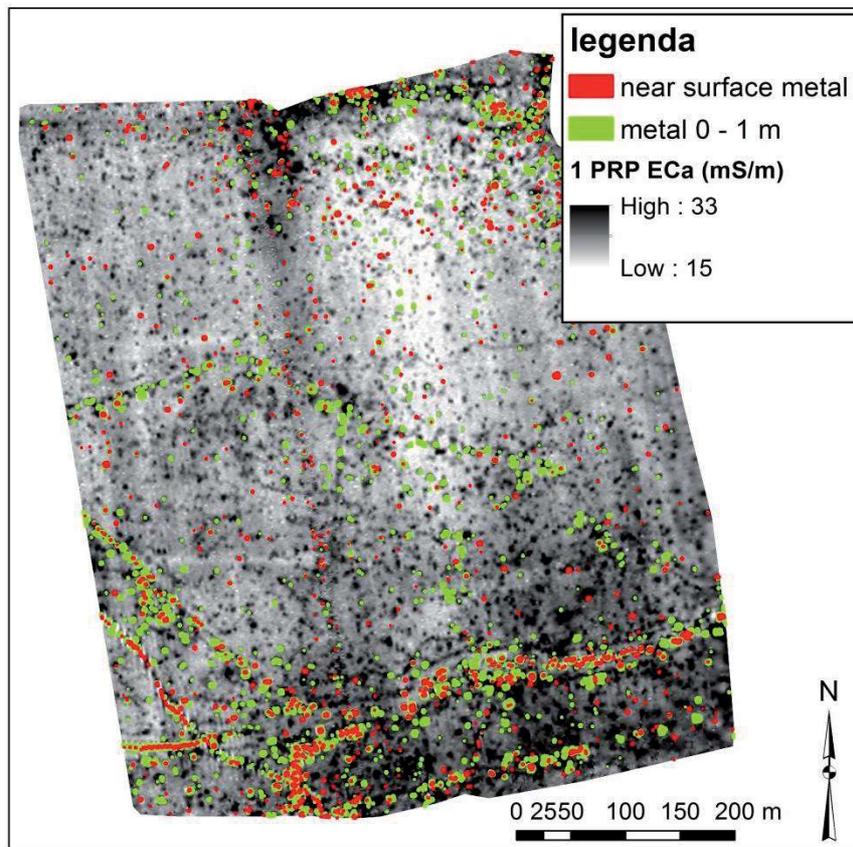


Fig.7. 12: Anomalies magnétiques en prospection géophysique (Source : Note, 2016).

Cette approche en géophysique montre l'apport du tracé des réseaux de défense sur la connaissance de l'organisation spatiale de la contamination métallique en phase solide. A ce titre, le travail sous SIG à partir des plans directeurs peut être considéré comme un outil préventif à la détermination des anomalies magnétiques révélées par la géophysique.

7.3. Les impacts sur les eaux souterraines

Suite à la mise en évidence d'une contamination en perchlorates (ClO_4^-) de certaines ressources en eau potable en 2009 et 2010 en Aquitaine et en Midi-Pyrénées, une campagne de mesure d'envergure nationale a été conduite en 2013 sur plus de 300 échantillons d'eaux brutes et traitées destinées à l'alimentation en eau potable. Les résultats (ANSES, 2013) ont permis de démontrer l'existence d'une contamination en ClO_4^- dans des eaux souterraines exploitées pour l'AEP (Alimentation en Eau Potable) dans le Nord-Est de la France, principalement dans la Marne, les Ardennes, l'Aisne, l'Oise, la Somme, le Nord et le Pas-de-Calais. Des analyses sont régulièrement réalisées depuis par les ARS (Agences Régionales de Santé) régionales.

La toxicité des ions perchlorates est actuellement débattue par la communauté scientifique spécialisée. Ils sont cependant reconnus comme étant un perturbateur endocrinien potentiel vis-à-vis de certaines populations sensibles. Faute de plus amples résultats toxicologiques et en application du principe de précaution, l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), dans un avis du 18 juillet 2011, a proposé une valeur limite dans l'eau de distribution de 15 $\mu\text{g/L}$ pour les adultes. Elle recommande par ailleurs de ne pas utiliser d'eau présentant des concentrations supérieures à 4 $\mu\text{g/L}$ pour la préparation de biberons et de ne pas consommer l'eau du robinet pour les femmes enceintes ou allaitantes au-delà de ce seuil.

Un lien entre les activités militaires de la Première Guerre Mondiale et la présence de cette molécule dans les eaux souterraines est suspecté, mais doit encore être clairement établi, notamment vis-à-vis des autres origines également probables. L'objectif est donc d'étudier l'origine de ces ions perchlorates et de déterminer les différents modes de contamination.

7.3.1. Leurs origines et l'utilisation des perchlorates

Les ions perchlorates peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. Les premiers sels de perchlorates d'origine naturelle ont été observés dans le désert d'Atacama au Chili. Les nitrates du Chili, également nommés salpêtres du Chili, contiennent en effet des quantités non négligeables de perchlorates. Des concentrations de 0,5 mg/g à 2 mg/g de ClO_4^- ont été mesurées sur des engrais à base de nitrate de sodium provenant de caliche chilien commercialisé aux États-Unis (Urbansky *et al.*, 2001). Les nitrates chiliens ont en effet été extraits et importés aux États-Unis pour produire des engrais dès les années 1800 (Ericksen, 1981). Au cours de la première moitié du XX^{ème} siècle, l'utilisation de salpêtre du Chili pour amender les sols se développe également en Europe avec un pic de production en 1930. Dans ces conditions, les perchlorates ne sont pas utilisés en tant que tels, mais la fabrication d'engrais à base de nitrates géogéniques conduira indirectement à la dissémination de ClO_4^- dans l'environnement. Entre 1875 et 1920, la France a importé d'importantes quantités de nitrates naturels du Chili pour amender les sols exploités, entre autres pour la culture du blé et de la betterave, particulièrement dans les grandes plaines du Bassin Parisien (Champagne,

Beauce...) et ce jusqu'à ce que l'industrie des nitrates de synthèse subvienne aux besoins de l'agriculture et de l'industrie (Jaunat *et al.*, à paraître).

En plus de cette utilisation agricole, les nitrates chiliens ont également été utilisés dans la fabrication de poudre noire bien avant la Première Guerre Mondiale et jusqu'au début du conflit. Mais c'est bien au cours de la Grande Guerre que l'utilisation de ClO_4^- dans les applications militaires et sa production industrielle connaîtront leur avènement. L'accès aux matières premières se faisant plus difficile et les besoins des armées croissant, des appoints ou des substituts aux explosifs habituels doivent être recherchés. La synthèse artificielle de perchlorates est connue depuis la fin du XIX^e siècle (Trumpolt *et al.* 2005), mais c'est au cours de la Première Guerre Mondiale qu'elle explosera (Lopez *et al.*, 2014). Ainsi, les perchlorates (géogéniques d'abord, puis synthétiques ensuite) ont rapidement été utilisés par l'ensemble des belligérants comme explosifs de substitution, notamment pour charger les engins d'artillerie de tranchées. À la fin de l'année 1916, la production d'explosifs perchloratés et chloratés atteint 180 T/j (Hubé, 2016). Cent ans plus tard, l'environnement, et notamment les sols et les eaux souterraines, est toujours marqué par ces innovations militaires, industrielles et chimiques (Jaunat *et al.*, à paraître).

7.3.2. Les perchlorates dans le Nord-Est de la France

Depuis les années 2000, des traces de perchlorates ont été mises en évidence dans des denrées alimentaires à travers le monde : lait de vache et laits infantiles en Chine (Shi *et al.*, 2007) et en France (Vigreux-Besret *et al.*, 2015), riz et viande de bœuf en Chine (Cheng *et al.*, 2004), et très récemment des récoltes ont dû être détruites dans le département de la Meuse (Boschiero, 2015), suite à la découverte d'une pollution aux perchlorates.

Les mesures réalisées en France ont mis en évidence la présence de perchlorates dans les ressources en eaux souterraines de plusieurs régions, notamment dans le Nord-Est de la France (principalement Nord-Pas-de-Calais, Picardie et Champagne-Ardenne). Des campagnes de mesures d'occurrences dans les eaux potables ont ainsi été menées par les ARS entre 2013 et 2014. En Champagne-Ardenne (Ardennes et Marne), 113 communes présentent un taux compris entre 4 $\mu\text{g/L}$ et 15 $\mu\text{g/L}$ et 6 communes et un hameau ont des taux supérieurs à 15 $\mu\text{g/L}$ (ARS Champagne-Ardenne, 2013). Dans le Nord-Pas-de-Calais, les eaux distribuées de 408 communes présentent des teneurs comprises entre 4 $\mu\text{g/L}$ et 15 $\mu\text{g/L}$ (environ 25 % des communes) et un taux supérieur à 15 $\mu\text{g/L}$ pour 119 communes (ARS Nord-Pas-De-Calais, 2014). En Picardie (Aisne, Oise et Somme), ce sont 623 communes qui présentent des taux compris entre 4 $\mu\text{g/L}$ et 15 $\mu\text{g/L}$, se traduisant par un pourcentage de communes impactées de 19 à 35 % et pour 44 supérieures à 15 $\mu\text{g/L}$ (ARS Picardie, 2013). Alors que l'Artillerie est omniprésente en Meuse près de Verdun notamment, le nombre de communes impactées par les perchlorates en Lorraine reste faible. Cependant, une petite proportion du territoire lorrain (40 % des communes) a été mesurée, 40 % des communes de Meuse, 19 % en Moselle (Tab. 7.1).

Département	Total	Analysé		[ClO ₄ ⁻] < 4µg/l		4µg/l < [ClO ₄ ⁻] < 15µg/l		15µg/l < [ClO ₄ ⁻]	
		n	%	n	%	n	%	n	%
Aisne (02)	817	817	100,00%	630	77,11%	156	19,09%	31	3,79%
Ardennes (08)	463	461	99,57%	427	92,22%	32	6,91%	2	0,43%
Marne (51)	621	621	100,00%	534	85,99%	81	13,04%	5	0,81%
Meurthe-et-Moselle (54)	592	390	65,88%	378	63,85%	3	0,51%	9	1,52%
Meuse (55)	501	203	40,52%	201	40,12%	1	0,20%	1	0,20%
Moselle (57)	727	138	18,98%	138	18,98%	0	0,00%	0	0,00%
Nord (59)	648	648	100,00%	456	70,37%	162	25,00%	30	4,63%
Oise (60)	687	687	100,00%	492	71,62%	189	27,51%	6	0,87%
Pas-de-Calais (62)	891	891	100,00%	556	62,40%	246	27,61%	89	9,99%
Bas-Rhin (67)	597	597	100,00%	597	100,00%	0	0,00%	0	0,00%
Haut-Rhin (68)	366	366	100,00%	363	99,18%	2	0,55%	1	0,27%
Somme (80)	784	784	100,00%	479	61,10%	278	35,46%	27	3,44%
Vosges (88)	507	94	18,54%	93	18,34%	1	0,20%	0	0,00%

Tab. 7.1 : Nombre de communes analysées par département avec leur gamme de concentration en perchlorates (données ARS).

Ces mesures ont été effectuées sur les eaux des réseaux AEP et pas directement sur les eaux brutes prélevées dans les aquifères. La spatialisation de ces résultats (Fig. 7.12) ne peut donc pas être considérée comme une cartographie de la contamination des eaux souterraines. Elle est notamment le reflet de la situation géographique des unités de prélèvements et de distribution et est marquée par les processus de dilution liés aux mélanges d'eaux provenant de différents points de prélèvements. En effet la connexion des réseaux d'adduction d'eau permet de diminuer la concentration par dilution. Ce mélange entre une eau présentant une faible concentration avec une eau plus fortement concentrée permet d'obtenir des teneurs inférieures à la limite préconisée, ce procédé étant actuellement le plus financièrement et techniquement soutenable pour proposer aux populations concernées une eau potable de qualité. Néanmoins, dans une première approche à l'échelle régionale, la précision de cette cartographie des concentrations en perchlorates permet d'établir certaines hypothèses concernant l'impact de la Grande Guerre sur la qualité de l'eau souterraine. Il apparaît nettement un lien géographique entre la localisation des communes concernées par cette pollution et la délimitation de la zone de front (Jaunat *et al.*, à paraître). Après recueil de l'ensemble des données départementales de l'ARS, une carte de synthèse des concentrations en perchlorates a été réalisée et croisée à la zone de front délimitée à partir des plans directeurs. Cependant, les mesures sont réalisées à différentes dates, donc à différentes situations hydrogéologiques dans les départements et ne permettent pas d'attribuer avec précision le rôle de l'Artillerie et de la guerre des mines sur ces teneurs en perchlorates.

Les premières observations témoigneraient d'une convergence entre les communes affectées par les contaminations et la zone de front. En effet, on observe un panache de contamination supérieur à 4 µg/L inscrit dans cette dernière. Néanmoins, l'organisation spatiale des concentrations de ce panache n'est pas homogène. En effet, si la Lorraine et l'Alsace semblent moins concernées (18 communes), la Marne, le Sud Ardennes et les Hauts de France (1 334 communes) sont lourdement affectés. Cette cartographie montre que l'aquifère de la craie est bien plus vulnérable à cette contamination que les aquifères jurassiques de Lorraine et des granites vosgiens. Cependant, les concentrations plus élevées en hautes eaux qu'en basses eaux paraphrasant les fluctuations piézométriques de la zone noyée soulèvent le problème de la représentativité des résultats (situations hydrogéologiques des campagnes de mesures non synchrones). Par ailleurs, à l'extérieur de la zone de front, des pollutions locales

sous forme de spots de contamination peuvent être assimilées à des centres de dépollution des champs de bataille, du traitement des obus ou des usines pyrotechniques (Hubé, 2016, 2018).

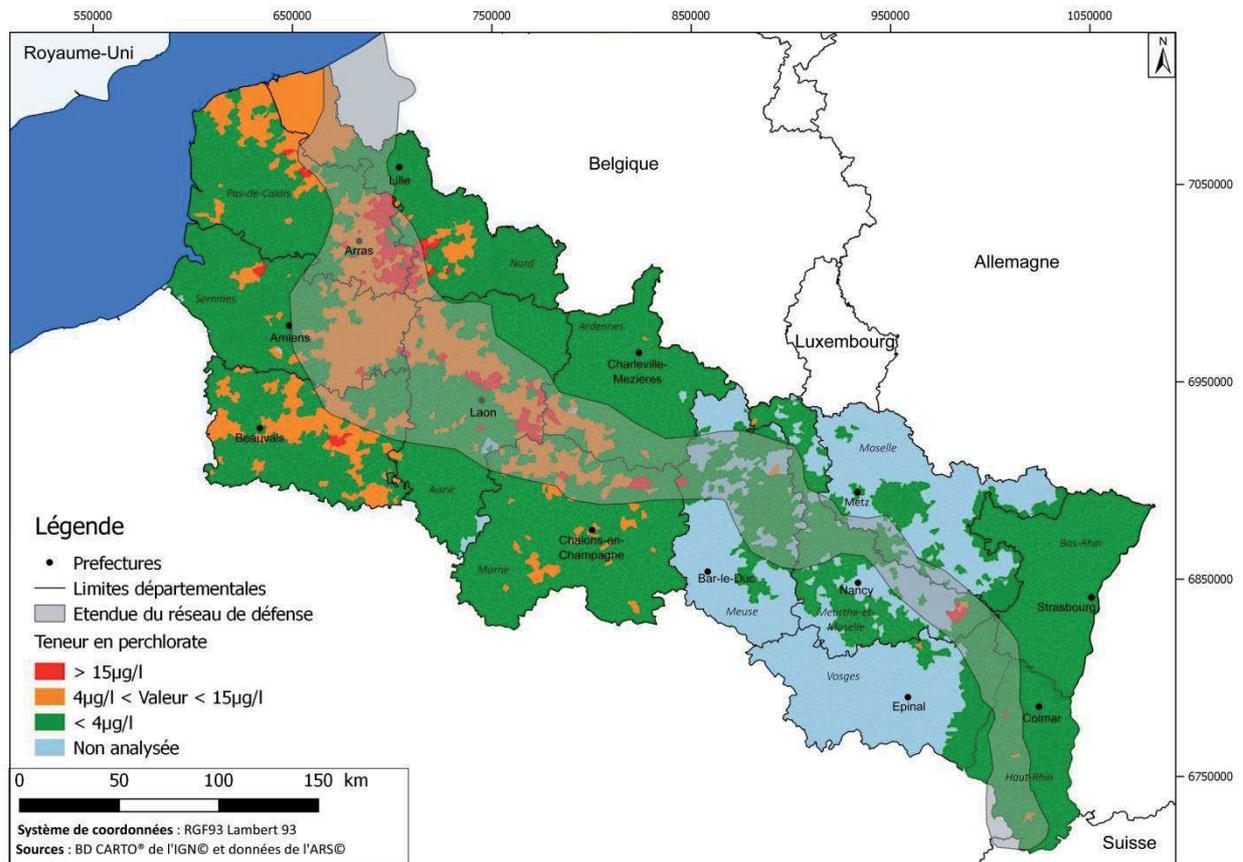


Fig.7. 13: Concentrations en perchlorates des eaux dans les réseaux de distribution (ARS Champagne-Ardenne, 2013 ; ARS Nord-Pas-De-Calais, 2014 ; ARS Picardie, 2013) et étendue des lignes de défense entre 1914 et 1918 (Carlu, 2018 à paraître).

En Champagne-Ardenne, la superposition des réseaux de défense et des concentrations communales en perchlorates présente la même organisation spatiale qu'à l'échelle du front. Les concentrations les plus fortes, supérieures à 15 µg/L, concernent les premières positions dans la nappe de la craie de Champagne, dans l'entonnoir de percée cataclinale de l'Aisne (secteur de Berry-au-Bac), dans la banlieue de Reims (Prunay), au niveau de la Côte de Champagne (Massiges), mais aussi dans la gaize d'Argonne (Lachalade). Par contre, dans le Vallage d'Aisne, les concentrations sont minimales. Les concentrations moyennes entre 4 et 15 µg/L soulignent le tracé de la Vesle où la craie est encore affleurante et s'intègre dans le dispositif du réseau de défense. Cependant, l'interprétation de cette carte reste aléatoire à l'échelle locale car les concentrations dépendent du comportement hydrodynamique des nappes, de la cinétique de dissolution et d'oxydation de l'enveloppe métallique des obus et des centres de pétardements aujourd'hui réalisés dans les camps militaires et des pratiques agricoles (Fig. 7.14).

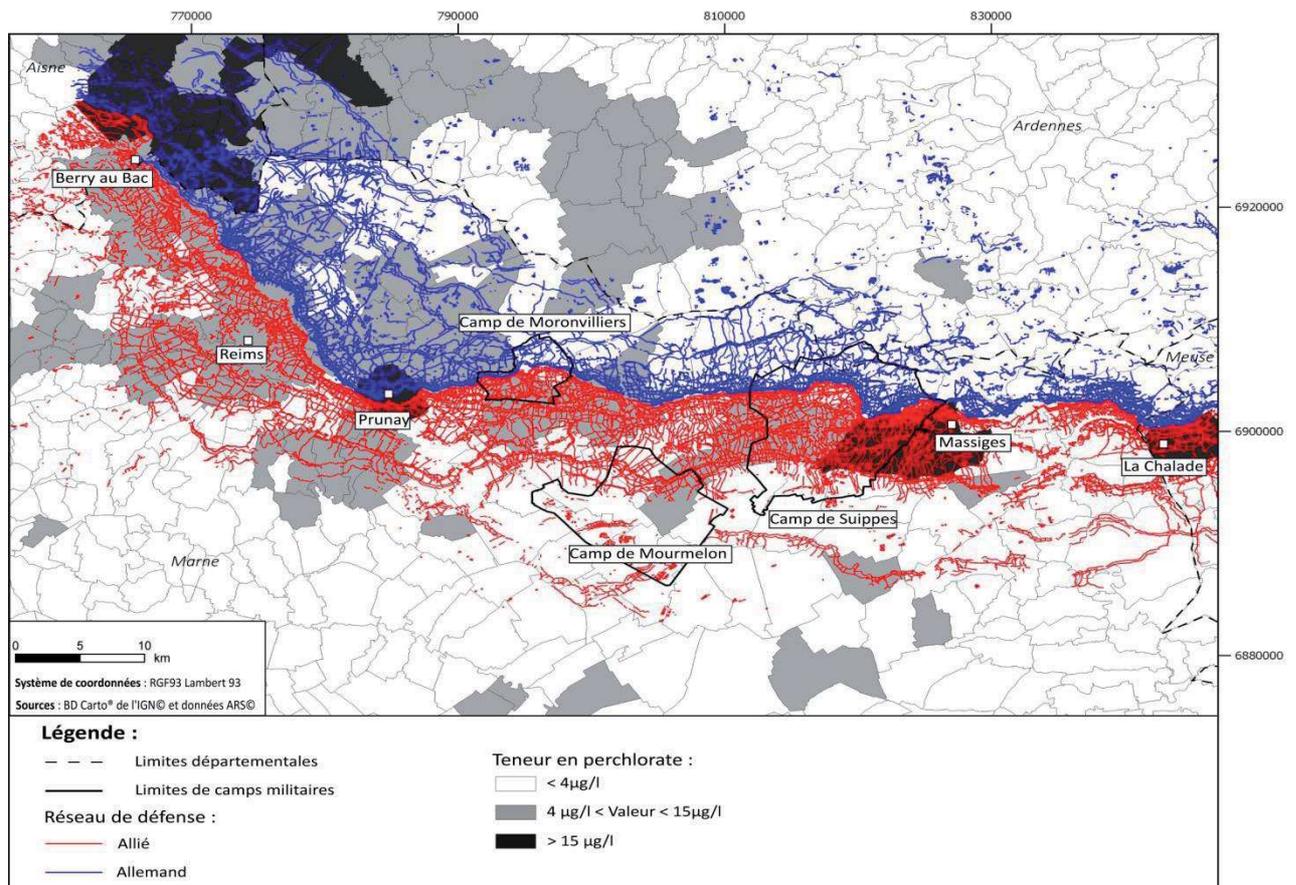


Fig.7. 14: Carte des réseaux de défense et des concentrations en perchlorate en Champagne-Ardenne (Carlu, 2018 à paraître).

7.3.3. Les contaminations d'origine militaire

Si une convergence spatiale entre la zone de front et la contamination des eaux souterraines semble se dessiner, les modalités de contaminations liées aux activités militaires sont multiples. Ainsi, si la dispersion des perchlorates (et autres molécules utilisées dans l'industrie militaire) dans l'environnement est en partie liée aux combats menés sur le territoire concerné entre 1914 et 1918, les décennies suivantes sont également témoins de cette contamination. En effet, la diffusion de ces molécules dans l'eau souterraine ne semble avoir lieu que pour une part limitée au moment même du conflit (Fig. 7.15).

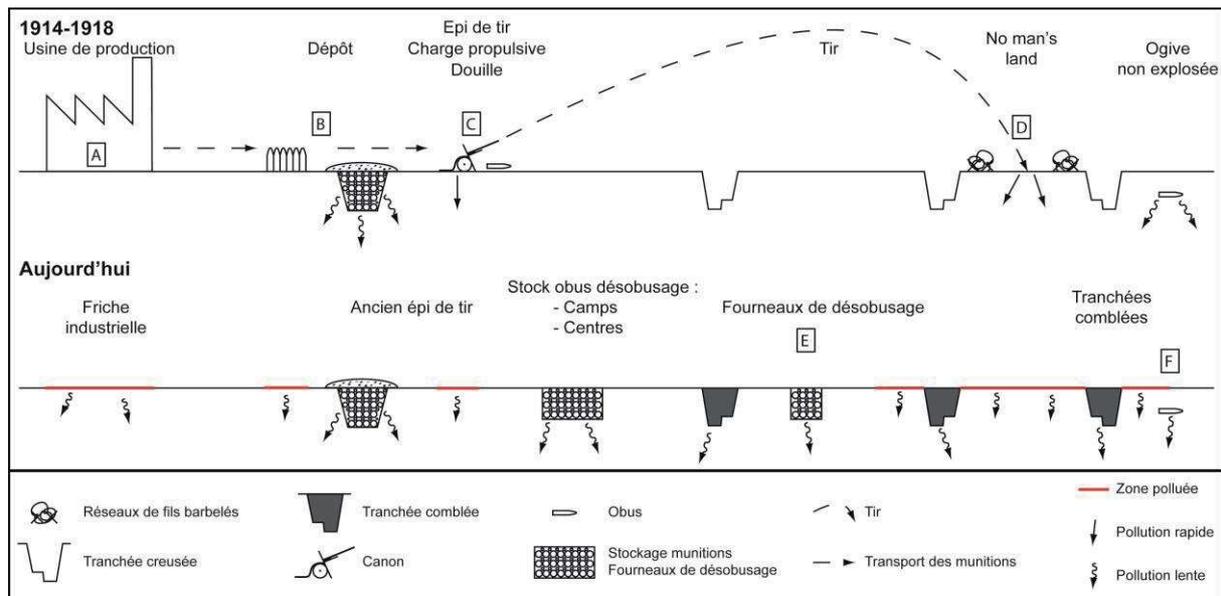


Fig.7. 15: Modèle conceptuel des différents modes de contamination de l'eau souterraine par les activités militaires de la Première Guerre Mondiale (Dodici, 2015).

La synthèse des chlorates et perchlorates est la première source potentielle de contamination dans les usines de fabrication des munitions. Des spots, à teneur forte, éloignés du front pourraient s'expliquer par la présence d'usines de fabrication de munitions (Fig. 7.16A). La diffusion de molécules est ensuite étroitement liée à l'utilisation des munitions (Fig. 7.16B). Il est aujourd'hui difficile d'évaluer l'impact direct de l'utilisation passée des engins perchloratés sur la qualité des eaux souterraines, mais des études menées sur des systèmes analogues permettent d'en avoir une estimation. Ainsi, des études conduites sur le Camp d'entraînement Edwards (réserve militaire du Massachusetts près de Falmouth, États-Unis) ont démontré que les quantités libérées lors du tir (Fig. 7.16C) et celles libérées par l'explosion lors de l'impact (Fig. 7.16D) sont suffisantes pour avoir des répercussions sur la qualité des eaux souterraines (Clausen *et al.*, 2004). En d'autres termes, l'utilisation d'engins perchloratés lors de la Première Guerre Mondiale est susceptible d'avoir entraîné une contamination contemporaine de l'environnement. Compte tenu de la solubilité de ces molécules, elles se seront retrouvées dans les eaux souterraines par infiltration très rapidement (Jaunat *et al.*, à paraître).

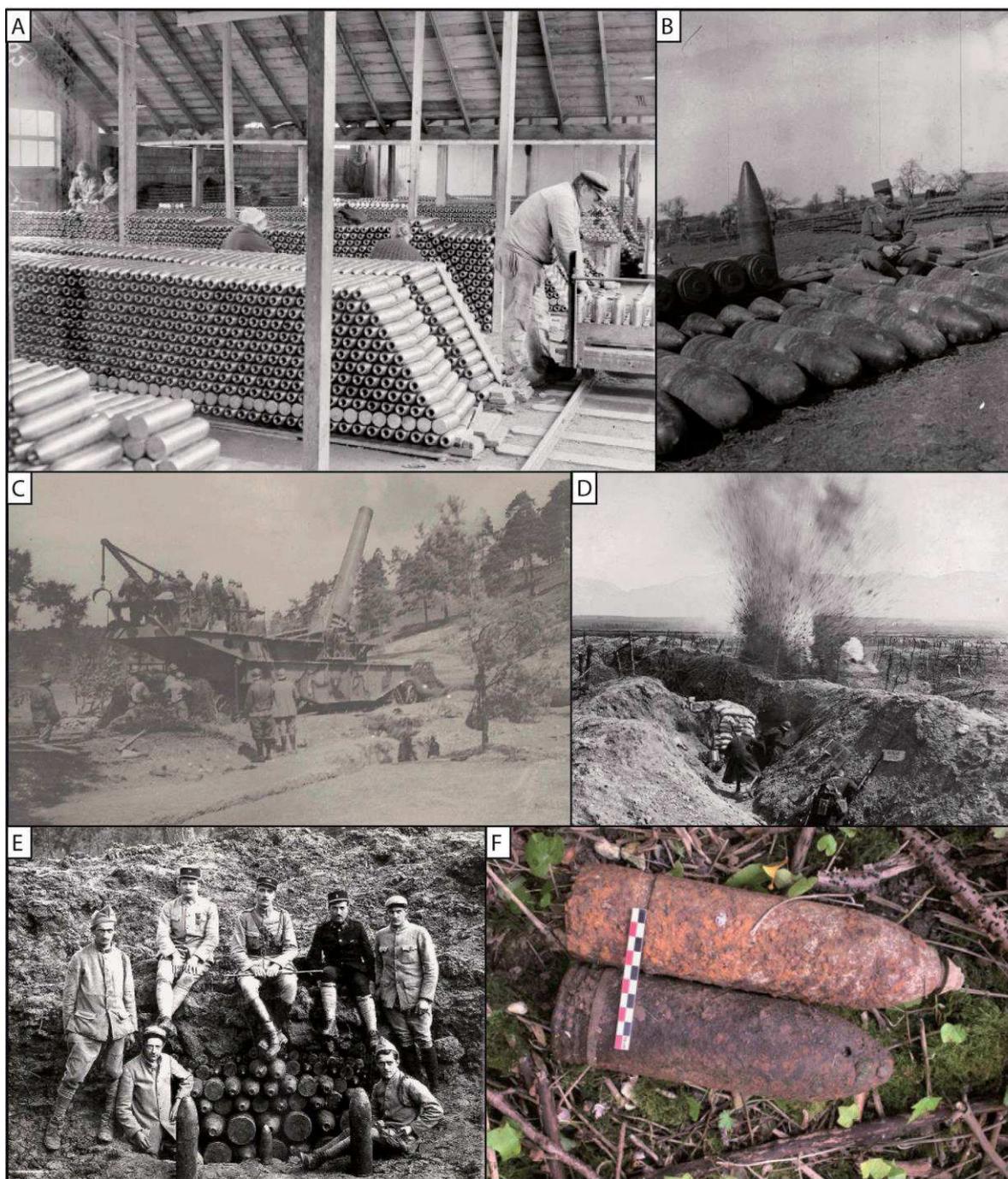


Fig.7. 16: A – Usine de fabrication d’obus (Source : ECPAD). B – Dépôts d’obus pour artillerie lourde (Source : ECPAD). C – Pièce d’artillerie lourde sur voie ferrée à Châlons-sur-Vesle (Source BDIC VAL 082/054). D – Explosion d’obus dans le réseau de défense dans la Somme (Source : RMN). E – Dépôt d’obus pour enfouissement ou pétardement (Source : ECPAD). F – Obus non explosé en Argonne (Source : Cliché Devos A.).

Le taux de raté des obus tirés durant la Grande Guerre est évalué autour de 20 % (Pommier, 2014). Ces obus non-explosés vont alors s’enfoncer parfois à plus de 10 m de profondeur. Ils restent enterrés et leur enveloppe subit une corrosion dont la vitesse dépend de l’oxydation du

milieu, celle-ci pouvant s'étaler sur plusieurs centaines d'années (Hubé, 2018). Cette corrosion de l'enveloppe entraîne la libération du contenu de l'explosif qui se retrouvera dissous et transporté avec les eaux d'infiltration jusqu'à atteindre les nappes d'eaux souterraines conduisant à une pollution diffuse des aquifères (Fig. 7.16F). À ce titre, la libération de la charge explosive sera plus rapide pour les bombes de tranchées avec une enveloppe plus fine. Pour les obus ayant partiellement fragmenté (munitions déflagrées) et encore chargés d'explosif, la dissolution est plus rapide.

Enfin, tout au long de la guerre et après l'Armistice, les champs de bataille ont été partiellement nettoyés. Les épaves de munitions récupérées le long de la ligne de front ainsi que les stocks inutilisés à la fin du conflit ont été stockés et/ou détruits ou démontés pour récupérer les matières valorisables (Hubé, 2016). Le procédé de destruction consistait à regrouper les engins dans des « fourneaux » puis de les faire exploser (Fig. 7.16E). Cette pratique de « pétardage » ou « pétardement », qui s'est poursuivie jusque dans les années 2000, ne détruisait que partiellement les déchets de guerre, conduisant à la libération dans les sols de contenus potentiellement toxiques. De nombreux sites de destruction sont aujourd'hui connus (par exemple Suippes, Mourmelon ou Beine-Nauroy dans la Marne) mais nombre d'entre eux restent à découvrir. Des recherches sont actuellement menées par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) pour localiser ces anciens sites de « désobusage ». Le désobusage a par ailleurs souvent été effectué *in situ*, de façon sauvage et artisanale (Hubé et Bausinger, 2013). Cette activité a entraîné des pollutions ponctuelles en perchlorates (et autres molécules) sous la forme de spots créant des panaches de pollution dans la direction des lignes d'écoulement préférentielles des eaux souterraines.

La contamination des ressources en eau liée à la Première Guerre Mondiale peut donc présenter des modalités de pollution spatialement diffuses (munitions enfouies, zones de lancement et d'explosion des engins) ou ponctuelles (principalement zones de destruction des munitions) mais toujours très étalées dans le temps (Jaunat *et al.*, à paraître).

Les eaux souterraines des secteurs concernés par cette contamination en perchlorates constituent la principale ressource utilisée pour l'alimentation en eau potable. De nombreux verrous doivent aujourd'hui être levés afin de répondre efficacement aux besoins des gestionnaires de l'AEP. Les technologies développées au cours des deux dernières décennies (progression des méthodes analytiques, abaissement de la limite de détection, mesure de la signature isotopique...) associées à une connaissance accrue des aquifères impliqués et à la poursuite de l'étude des archives historiques permettront de répondre aux nombreuses questions qui restent en suspens concernant cette problématique. De plus, la digitalisation des réseaux de défense à partir des plans directeurs et l'outil Lidar sont des applications à la détection de zone de pétardage (Cote 108) ou de l'intégration des aires d'études dans la zone de front. Les perchlorates font l'objet d'un programme de recherches « PERCHL'EAU RIGINE » (2017-2019) porté par le GEGENAA, en collaboration avec le BRGM, L'ARS, l'AESN (Agence de l'Eau Seine-Normandie) et Reims-métropole sur l'interfluve Vesle-Suippe qui intègre les résultats du programme « IMPACT 14-18 ».

Si les perchlorates ont permis de mettre en évidence un impact de la Grande Guerre sur la qualité des eaux souterraines, de nombreux autres composés sont associés aux ClO_4^- dans les engins pyrotechniques de la Première Guerre Mondiale. En effet, un cortège de plus de 200 composés chimiques (Hubé, 2016) a été répertorié dans les munitions de guerre (autres oxyanions comme les chlorates, sélénates, iodates... ; métaux de type mercure, arsenic, plomb ; composés nitroaromatiques comme par exemple le TNT...), ces composés étant considérés pour certains comme CMR (cancérogènes, mutagènes, reprotoxiques).

7.4. Les impacts sur la faune et la flore dans la zone de front

La Première Guerre Mondiale a marqué et bouleversé les paysages sur l'ensemble du front. En Champagne-Ardenne, cette mutation s'est manifesté après-guerre par un changement de paysage en Champagne crayeuse, des plantations de pins au faciès de grande culture, nivelant toutes les « polémo-formes » ou les fossilisant dans les forêts d'Argonne. Profondément remaniée depuis 1914, la nature garde encore les marques des combats, des empreintes inaltérables et permanentes mais l'œil avisé de l'écologue permet de les détecter.

7.4.1. Les plantes obsidionales

Les végétaux obsidionaux désignent les plantes propagées lors des conflits armés ou des occupations militaires prolongées. En Champagne-Ardenne, elles se remarquent notamment dans les bois épars du Vallage d'Aisne ou dans le massif forestier argonnais. La dispersion de ces plantes peut prendre des voies différentes. Elle peut être réalisée involontairement par importation du fourrage pour les chevaux. En 1917, l'armée américaine débarque à la fois avec ses chevaux mais également avec son alimentation, venue des États-Unis. Cette semence est également réalisée involontairement par les soldats qui dispersent les graines piégées sous leurs chaussures, la laine de leurs vêtements ou leur paquetage. Enfin, les armées étrangères qui s'installent sur le territoire français plantent volontairement des végétaux utilitaires à des fins alimentaires (pour les soldats ou les chevaux), médicinales (Vernier, 2015) ou pour le camouflage défensif (Coutin, 2012). La majorité de ces semences est véhiculée et disséminée par les soldats mais également par les trains, dont les graines transportées se retrouvent dans les gares ou le long de la voie ferrée, dont le développement a été démontré dans cette contribution à partir de l'analyse spatiale sous SIG des plans directeurs. Chaque armée apporte donc son lot de plantes obsidionales ; l'Armérite à tige allongée (*Armeria vulgaris*), la Laïche fausse brize (*Carex brizoides*) ou le Géranium des prés (*Geranium pratense*) pour l'armée allemande, la Bermudienne (*Sisyrinchium angustifolium*) ou la Fausse laïche des renards (*Carex vulpinoidea*) pour l'armée américaine, la Roquette d'Orient (*Conragia orientalis*) ou le Panicaut géant (*Eryngium giganteum*) pour l'armée russe (Vernier, 2015). Ces plantes seront donc plus facilement retrouvées près des camps de repos, le long des voies ferrées, ce qui est mis en évidence par la digitalisation des plans directeurs.

7.4.2. Le vignoble

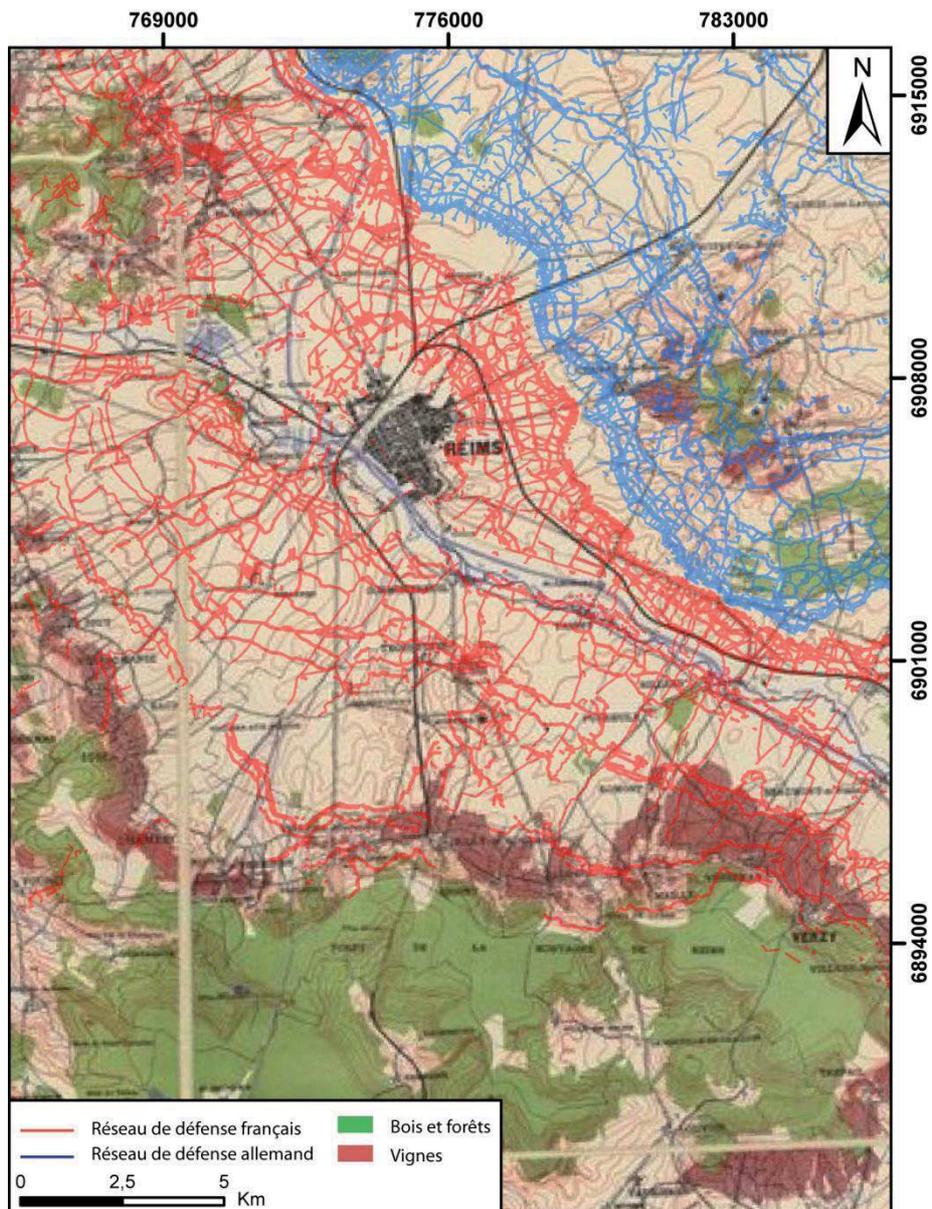


Fig.7. 17: Croisement de la carte viticole de Champagne de 1882 et des réseaux de défense près de Reims.

La Grande Guerre s'inscrit dans une période de tension liée à l'introduction frauduleuse de raisin et du phylloxéra qui prolifère dans les vignes champenoises depuis 1899, aux émeutes viticoles de 1911 et à l'instabilité des cours des vins (Desbois-Thibault, 2017). Les maisons de Champagne vont rapidement manquer de main d'œuvre à la fois dans les vignes mais également dans les caves. Ce manque sera pallié par les femmes, même si les expéditions de Champagne vont être réduites de 50 % passant de 30 millions de bouteilles en 1912 à 15 millions en 1918 (Moreau et Tesson, 2013). À noter que des maisons de Champagne rémoises ont été fondées par des Allemands, ou associées par le mariage. Ces maisons seront scellées et leur patrons emprisonnés comme Maurice Mumm pour la grande maison de Champagne Mumm, qui est l'une des plus grandes encore aujourd'hui. Près de Reims, les réseaux de tranchées et les bombardements s'inscrivent dans les vignes du Mont de Berru (2^{ème} position allemande), dans le Massif de Saint-Thierry ainsi que sur le versant Nord de la

côte d'Île-de-France (entre la 3^{ème} et 4^{ème} position française, Fig. 7.17) ce qui engendre de nombreuses destructions.

Même si le travail ne connaît aucune interruption à Reims dans les caves ou dans les vignes, Epernay, plus éloignée du front, devient alors la « capitale » du Champagne en détrônant Reims par ses expéditions de bouteilles. Au lendemain de la guerre, le bilan économique et écologique est lourd. Il reste 6 900 ha près de Reims, Epernay et dans l'arrondissement de Vertus, 60% de la surface du vignoble de Champagne ont été détruits, mais des communes proches du front voient leur surface viticole réduite, comme Verzenay de 87%, passant de 325 ha en 1913 à 75 ha en 1920 (Moreau et Tesson, 2013, Desbois-Thibault, 2017).

7.4.3. Les forêts, recolonisation forestière

Sur la zone de front, les forêts, bois ou bosquet ont payé un lourd tribut pendant ces quatre années de conflit (Buridant, 2003, Amat, 2015). Ils sont utiles pour se dissimuler (effet de masque), pour fortifier les réseaux de défense (caillebotis, fascines) mais l'Artillerie va s'efforcer de les détruire. Après-guerre, la forêt passe par une phase de cicatrisation, plus ou moins longue en fonction des destructions puis devient un sylvosystème polémologique ou polémo-sylvosystème, soumis à la colonisation naturelle ou programmée (Amat, 2015).

Dans certaines zones du front, la vie biologique repart d'un « stade zéro », le champ de bataille, jonché de matériels métalliques, de cadavres, attend le moment opportun pour lancer naturellement sa régénération. Même durant le conflit, les combattants comme Ernst Jünger dans la Somme, sont surpris de la reconquête végétale (Jünger, 1932) :

« On n'y voyait plus un brin d'herbe et cette bande de terrain était, dans toute sa profondeur, absolument comparable au Sahara. Mais d'innombrables obus avaient eu beau arracher et brûler jusqu'à la dernière racine, la vie persistait dans le sol grâce à des millions de graines ignorées et elle reprit immédiatement possession de la terre labourée par les artilleurs. Et lorsque la grande offensive du printemps 1918 dut s'arrêter ici même, les canons reprirent leur travail de destruction en bouleversant à nouveau, trou d'obus par trou d'obus, le tapis de verdure qui avait recouvert le sol. »

Vouée à une colonisation forestière naturelle, la Cote 108 connaît une lente régénération. La craie reste affleurante sur les photographies aériennes de 1929 et 1949 notamment au niveau du chapelet d'entonnoirs de mines et du « méga-cratère » (corniche crayeuse). Après un stade végétal herbacé de xéro-bromion, mésobromion puis pelouse sèche (Fig. 7.18), le site aujourd'hui végétalisé par des arbustes et épineux (cornouillers sanguins), est pratiquement inextricable à l'exception de sa partie orientale gérée par l'ONF (parcelles de replantations) et du plus gros cratère qui fait l'objet d'une remise en valeur patrimoniale (Association de la Cote 108).

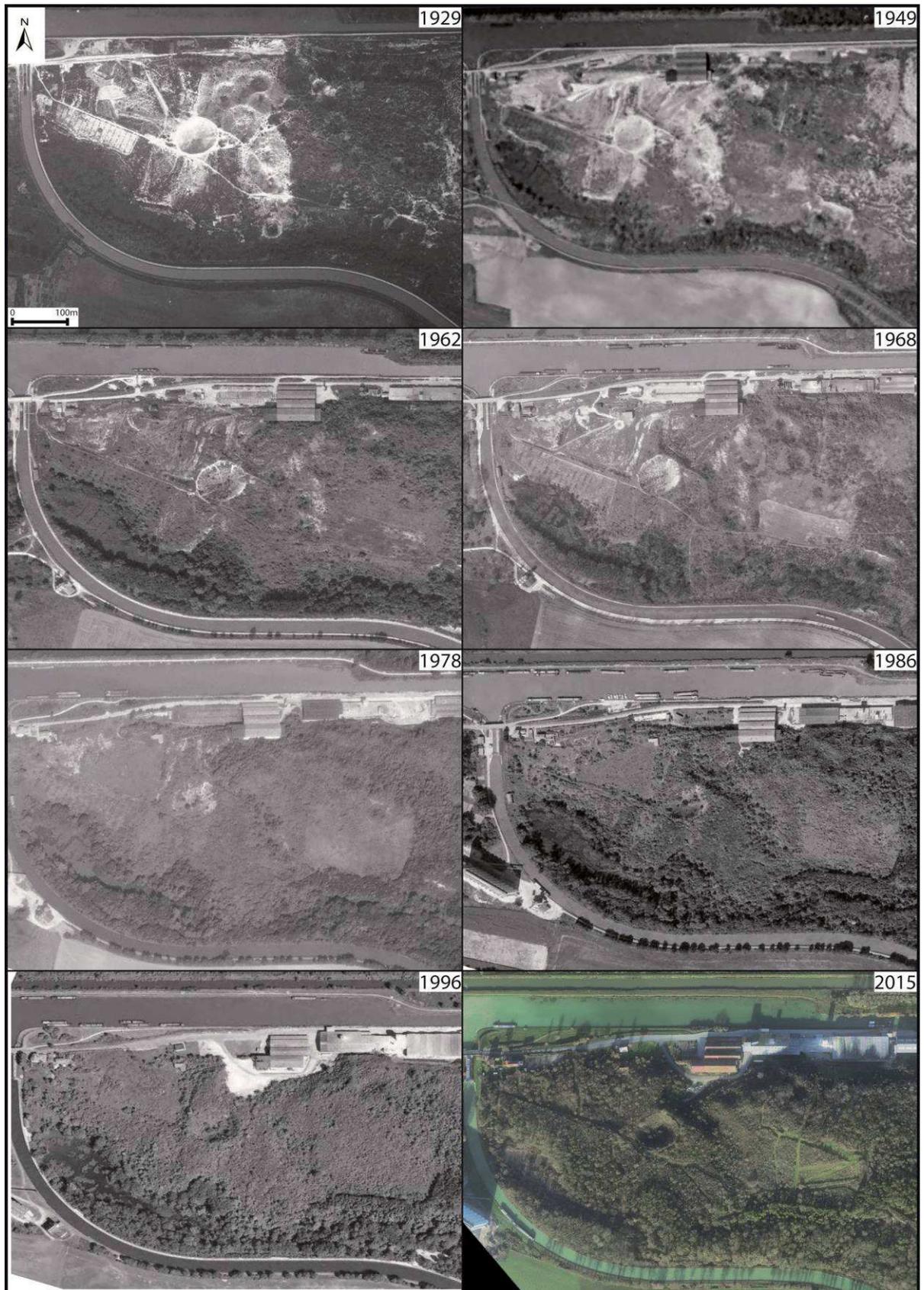


Fig.7. 18: Étude diachronique de la colonisation forestière de la Cote 108 de 1929 à 2015.

Dans les forêts d'Argonne ou de Verdun, il faudra attendre environ 10 ans pour que l'État lance une véritable politique de repeuplement de la forêt. De lourds travaux de bornage

parcellaires sont entrepris en 1923 jusque 1930 et les premiers peuplements débutent en 1931 (Amat, 2015). L'objectif est de reboiser cette zone rouge, de créer *ex nihilo* de nouvelles forêts (forêt domaniale de Malancourt) pour reconstituer la forêt dominée par le hêtre pour le bois d'œuvre, l'épicéa dans les zones argileuses, et le pin noir pour reconstituer un milieu forestier (Bournerias et Timbal, 1979 ; Amat, 2015).

Même si elle s'apparente de plus en plus à une forêt quelconque, ces polémo-sylvosystèmes restent marqués de manière topographique (conservatoire morphologique) mais aussi dans les arbres (bois mitraillés). Le tourisme de mémoire et le pèlerinage d'anciens combattants dès la fin de la guerre sont remplacés aujourd'hui par des visites scolaires, un public de passage, parfois étranger. Dans le cadre du centenaire et associées à des visites dans les musées, les forêts participent aujourd'hui à conserver et proposer à ce public, les « polémo-paysages » de la Grande Guerre. Ces forêts à fortes empreintes anthropiques peuvent bénéficier du label « Forêt d'Exception » comme celles de Verdun et de la Montagne de Reims qui ont fait l'objet d'une cartographie des réseaux de défense dans le cadre du montage de projet et d'un survol Lidar en mars 2018.

L'approche spatiale des plans directeurs montre que l'organisation spatiale des réseaux de défense dépend du couvert végétal (chapitre 3) qui détermine également son degré de conservation (chapitres 4-5) sous la commande des pratiques sylvicoles. Le traitement des données Lidar concernant le MNE et non plus le MNT permettrait de mettre en évidence le rôle des polémo-formes et des remblaiements sur les dynamiques forestières.

7.4.4. Les différentiels de pousse végétale en grande culture : l'indice phytographique

En zone rurale et cultivée, l'intégralité des réseaux est comblée dans le cadre de la remise en culture après-guerre. Ces remblais composés de roches, de formations superficielles et de sols déstructurés sont généralement hétérométriques et présentent des contrastes de rétention en eau par rapport à l'encaissant qui conditionnent la croissance des cultures (maturation plus ou moins précoce). L'examen des photographies aériennes permet de mettre en évidence des anomalies de contrastes de densité et de hauteurs végétales (indices phytographiques), de couleurs (indices pédographiques), d'humidité du sol (indices hygrographiques ou damp-marks) dans les cultures révélant les structures de défense. Si le tassement des remblais peut générer des dépressions localisées, généralement les tranchées et boyaux comblés ne sont pas morphologiquement perceptibles et seuls ces indices inhérents aux disparités de rétention hydrique révèlent leur existence comme on l'observe en vol à basse altitude (Fig. 7.19) ou en télédétection (Lasaponara et Masini, 2007). Mais ces indices sont plus ou moins révélateurs selon la prise de vue, selon les conditions atmosphériques, pédologiques, géologiques et géomorphologiques faisant apparaître au fil des saisons et de l'inclinaison du soleil, différentes anomalies (polymorphisme). La zone de front s'inscrit aujourd'hui surtout en Champagne et dans les Hauts de France, dans des régions à forts enjeux agricoles autour des agro-ressources, de la bio-économie et des biotechnologies. L'application de l'analyse spatiale des réseaux de défense peut être intégrée à des programmes de recherches à l'échelle parcellaire, notamment concernant les dynamiques de production de biomasse végétale.

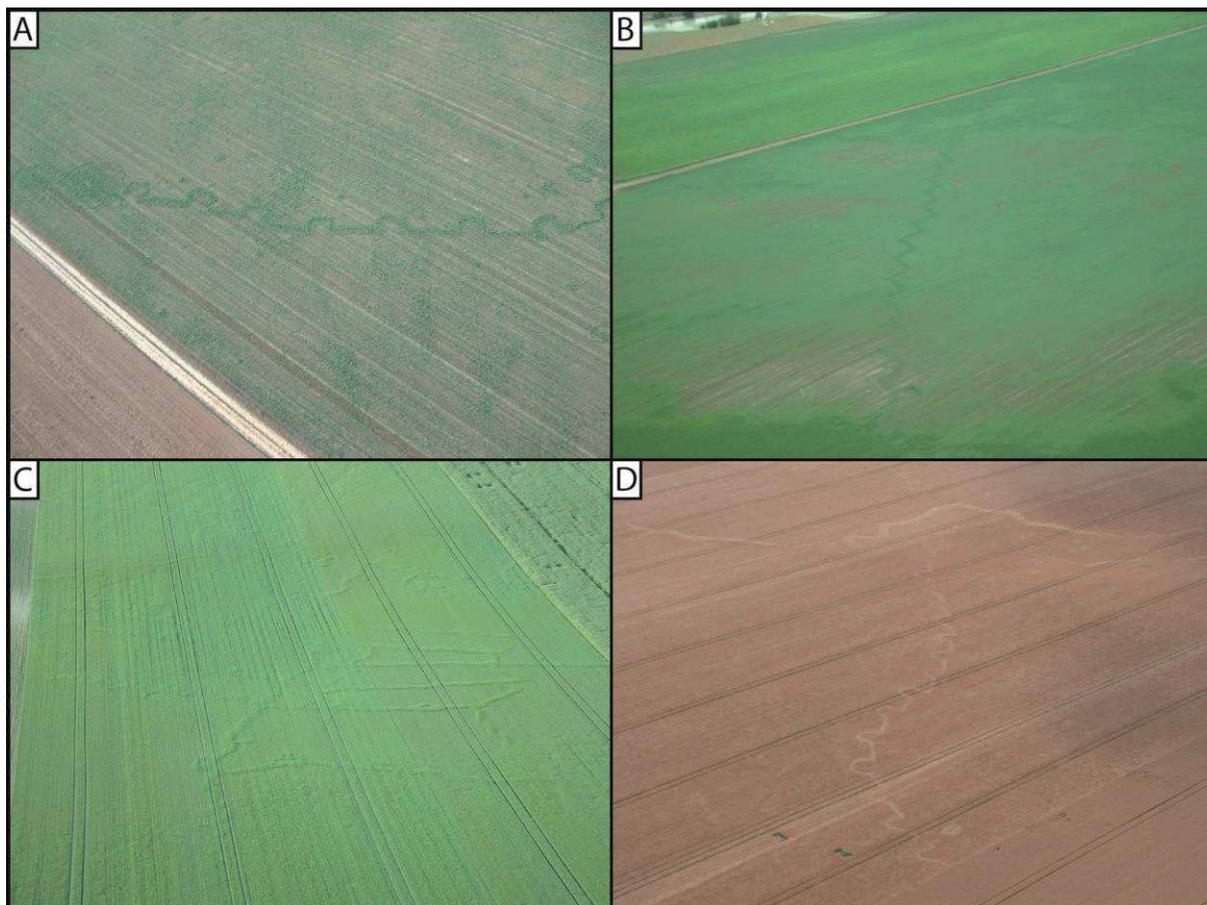


Fig.7. 19: Photographies aériennes obliques à basse altitude des réseaux de défenses remblayés mais révélés par le différentiel de pousse végétale en Champagne crayeuse. A- Tranchées à traverses simples. B - Boyaux en crémaillère. C - Tranchées de départ, boyaux et postes avancés. D - Tranchées à traverses simples et boyaux (Source : clichés Godin M.)

7.4.5. Faune et flore aquatiques dans les polémo-formes

Les polémo-paysages de la Grande Guerre, façonnés par le creusement des tranchées, les explosions de mines et la bombturbation, offrent actuellement à la faune et la flore des conditions particulières d'habitat. En effet, ces « micro-habitats » ont des caractéristiques physiques (en creux) et d'humidité différentes des conditions environnementales avoisinantes (Parent, 2004 ; Amat, 2015). Les trous d'obus ou cratères de mines constituent des mares forestières avec la présence d'eaux permanentes ou saisonnières et accueillent des plantes hydrophiles de Joncs (*Juncus effusus*), Renoncules (*Ranunculus trichophyllus*), Plantain d'eau (*Alisma lanceolatum*) et une faune spécifique de tritons palmés (*Triturus helveticus*) ou de crustacés (*Daphnia pulex, obtusa*). En image Lidar, les trous d'obus ou cratères de mines remplis d'eau se repèrent nettement par une surface plane dans leur fond (Fig. 7.20A), permettant ainsi de calculer des densités de dépression fermée en eau. En forêt d'Argonne, le « système de mine » de la Harazée de 1915, révélé par l'image Lidar, permet le développement d'une faune et flore particulières en milieux humides forestiers (Fig. 7.20B).

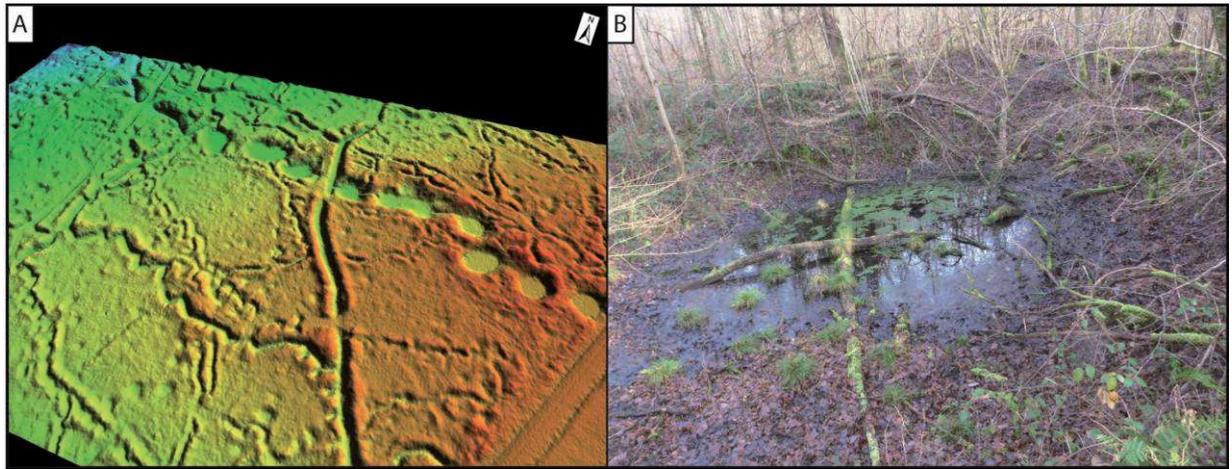


Fig.7. 20: A – Image Lidar des cratères de mines en Argonne près de la Harazée. B – Photographie d'une mare forestière dans les cratères de mines en Argonne de la Harazée (Source : Cliché Taborelli P.).

Conclusion du chapitre 7

Les impacts environnementaux de la Grande Guerre sont étudiés depuis une dizaine d'années dans différents domaines en géomorphologie (Taborelli *et al.*, 2017a ; De Matos Machado, 2016), en pédologie (Hupy, 2006 ; Bausinger *et al.*, 2007 ; Hupy et Koeler, 2012), en hydrogéologie (Hubé, 2016) ou en écologie (Amat, 2015). La conservation de ces morphologies constitue de véritables laboratoires de polémo-paysages à ciel ouvert, essentiellement sous forêt.

Les études menées dans ce programme de recherche en pédologie montrent la conservation de « paléosols », fossilisés sous les remblais des tranchées et sous les bourrelets périphériques de cratères de mines. La détection magnétique sur la zone de front témoigne de l'omniprésence métallique sur la zone et du remblaiement des tranchées par les différents objets métalliques (fils barbelés, chevaux de frise...). Comme le montrent les différentes investigations menées en France et en Belgique, la contamination chimique des sols n'est pas régionale mais très localisée, notamment dans les sites de désobusage d'après-guerre comme à Verzy. Les teneurs mesurées en cuivre et en plomb dépassent nettement le fond pédogéochimique du secteur.

Les perchlorates d'origine militaire provenant des charges propulsives et explosives des obus sont mesurés depuis 2013 sur le front. Ces perturbateurs endocriniens sont présents à une dose supérieure à 15 µg/L sur plus de 200 communes du Nord au Haut-Rhin. Même s'il reste des lacunes de mesures, un lien géographique apparaît nettement entre la localisation des communes concernées et la zone de front. Les premières constatations montrent une concentration supérieure en hautes-eaux, qui paraphrase les fluctuations piézométriques. Cependant, les mesures de l'ARS ne donnent pas de recul suffisant pour comprendre le comportement de ces molécules. Depuis 2016, un programme de recherche au sein de l'EA 3795 du GEGENAA tente d'appréhender cette pollution dans le bassin versant de la Suipe et de la Vesle en Champagne-Ardenne. Les concentrations mesurées sont intégrées au réseau de défense pour les interpréter.

Enfin, la création d'un nouvel horizon humifère est lente depuis 100 ans sur des terrains où le matériel parental affleure pendant le conflit. La colonisation herbacée puis forestière naturelle est longue dans des secteurs sans aménagement, mais donne de bons résultats dans les forêts domaniales, gérées par l'ONF. De plus, les « polémo-formes » sont des micro-habitats et accueillent une faune et flore particulières adaptées à ce milieu.

Ce chapitre applicatif à l'analyse spatiale des réseaux de défense et des « polémo-formes » révélées par le Lidar ouvre de multiples champs de recherches appliquées, en lien avec les enjeux agricoles, sylvicoles et économiques des régions Grand-Est et Hauts de France qui ont fait preuve d'une remarquable résilience durant le XX^{ème} siècle.

Conclusion de la Partie 3

Cette partie résolument applicative de l'approche spatiale sous SIG des réseaux de défense et de l'image Lidar montre la permanence des héritages environnementaux de la Grande Guerre. Elle a laissé de nombreuses traces morphologiques et a impacté les paysages, les sols, le sous-sol et les eaux souterraines. L'approche environnementale de la Grande Guerre est récente et pluridisciplinaire. La digitalisation des réseaux de défense à partir des plans directeurs permet d'appréhender chaque site d'étude avec une dimension spatiale et multiscalaire, par son intégration dans la zone de front. Cette dernière permet surtout de relativiser les résultats selon l'emboîtement d'échelle si cher aux géographes. En effet, les densités de tranchées, de boyaux, de trous d'obus, les perturbations physiques des sols, leurs concentrations en ETM, et leurs charges solides métalliques dépendent de la localisation des sites d'études dans les réseaux de défense, mais aussi de l'échelle d'analyse, de l'échelle géochimique à l'échelle régionale.

La Grande Guerre a généré des formes liées au creusement des tranchées et boyaux, à la guerre des mines, à la bombturbation mais également à la vie militaire dans le réseau de défense (abris cavernes, niches) ou réhabilités à l'arrière (creutes). Creusés pour la protection des hommes dans les premières positions, les abris engendrent aujourd'hui des désordres géotechniques, conséquences d'un remblaiement partiel lors de la remise en culture. Le risque principal dans les creutes, cavités existantes avant le conflit et aménagées pour le cantonnement, est la dégradation et la disparition d'un patrimoine culturel (graffitis), très difficile à protéger.

La guerre des mines a également impacté les paysages de la zone de front des Flandres aux Vosges par la création de cratères de plus de 60 m de diamètre. Les études menées, notamment sur le « méga-cratère » de la Cote 108, sont historiques (datation de l'explosion et de la quantité d'explosif), géomorphologiques par l'outil Lidar et pédologiques sur le terrain. Les explosions de mines perturbent donc la structure physique du sol et du sous-sol par une surfracturation de l'encaissant, vulnérable à la pollution. Cependant, l'étude géomorphologique de ces cratères de mines fait apparaître, notamment des manteaux de graveluches habituellement produits en phase périglaciaire, mais âgés seulement de 100 ans.

Les polémo-paysages constituent de véritables laboratoires à ciel ouvert, appréhendés récemment dans la mouvance pluridisciplinaire des études de l'empreinte environnementale de la Grande Guerre.

Alors que la contamination métallique en phase solide des sols, dans les premières positions, est généralisée et accrue dans les remblais des réseaux de défense, les études menées sur les contaminations chimiques se révèlent être locales, à l'échelle parcellaire, voire spatialement sporadique (effet pépite). Les sites de désobusage d'après-guerre en sont le parfait exemple, où les concentrations de plomb et de cuivre sont les plus fortes par rapport aux trous d'obus ou aux cratères de mines. Ces sites de pétardement participent également à une pollution des nappes en perchlorates, contenus dans les charges propulsives et explosives des obus. Cette contamination des eaux souterraines est appréhendée depuis 2 ans par un nouveau programme de recherche en Champagne crayeuse. Les points de mesures sont intégrés dans les réseaux de défense afin d'interpréter les résultats des concentrations.

L'approche écologique de ces « polémo-paysages » montre une adaptation et une colonisation herbacée puis forestière relativement rapide après-guerre. De plus, les « polémo-formes », par leur relief en creux, sont des zones plus humides que leur environnement proche et participent au développement d'une faune et flore particulières.

Cette partie pluridisciplinaire, sous la dépendance de la dimension multi-scalaire, ouvre de multiples champs de recherches appliquées, en lien avec les enjeux agricoles, sylvicoles et économiques des régions Grand-Est et Hauts de France qui ont fait preuve d'une remarquable résilience durant le XX^{ème} siècle. La cartographie des réseaux de défense peut être intégrée à l'élaboration de cartes de susceptibilité, aux aléas « cavités », notamment dans le cadre de l'extension urbaine des villes dans les positions de défense (Reims, Verdun, Arras, Péronne, Albert), aux risques pyrotechniques, aux risques de recoupements de structures archéologiques de la Grande Guerre, et aux risques de contaminations métalliques. Le croisement des plans directeurs et de l'image Lidar permet également de mesurer le degré de conservation des formes et leur potentiel de valorisation patrimoniale essentiellement assuré par les associations (Main de Massiges, Amis de Vauquois). Dans un contexte de production agricole assisté par l'irrigation (Champagne sèche), les ressources en eau constituent un enjeu majeur mais sont contaminées non seulement par les pratiques agricoles (nitrates et phytosanitaires) mais aussi par les composés nitro-aromatiques des engins pyrotechniques. La présence de perchlorates dans les sols reste peu, voire non étudiée ainsi que son impact sur les végétaux (suspensions de chloroses).

Conclusion générale

Les objectifs de cette thèse étaient multiples. D'une part, il s'agissait de comprendre l'organisation du front à grande et petite échelle syn-conflit (Partie 1) et d'autre part de déterminer le degré de conservation des traces morphologiques post-conflit (Partie 2) afin de relativiser les résultats des évaluations environnementales dans un contexte spatio-temporel au sein des réseaux de défense (Partie 3). L'approche géographique, initiée par Villate en 1925 cantonnée à la sphère militaire, pourtant originale, manque cruellement d'analyse spatiale globale sur la zone de front car elle n'utilise que des exemples sectoriels.

La banque de données spatiales, complètement ignorée par les géographes, des plans directeurs des GCTA, est enfin valorisée par l'analyse spatiale sous SIG. Les réseaux de défense sont complexes, denses, et la largeur du front est épaisse (de 20 à 40 km). L'organisation spatiale est structurée en 3 à 5 positions, composées de 4 à 14 lignes de tranchées, reliées par des boyaux de communication. Sur un linéaire de 115 km de front se traduisant par 15 % du front occidental, au minimum 13 000 km de tranchées et de boyaux sont recensés avec une densité moyenne de 116 km/km de front. Cependant ces chiffres cachent de fortes disparités spatiales inhérentes à l'anisotropie de l'espace (Pays rémois, Champagne sèche, humide et Argonne). Le creusement des réseaux est un grand remue-ménage de terres correspondant à 27 millions de m³ en Champagne Ardenne, extrapolé à 170 millions de m³ sur l'ensemble du front. Pour faire face à ce labyrinthe, une toponymie de tranchées et signalétique est créée dans les réseaux de défense mais reste peu étudiée à ce jour. Cette analyse montre qu'une dénomination aléatoire est donnée par les unités combattantes. Les 2683 noms de tranchées et de boyaux constituent une banque de données toponymique, traité par des analyses typologiques, spatiales et statistiques de 43% de noms de lieux et 33% de patronymes pour ne pas se perdre dans ce dédale.

Le passage d'un système linéaire à cellulaire pose les bases de la ligne Maginot, mais devient obsolète pour une guerre mobile, rapide et motorisée. Le réseau est organisé selon des logiques militaires (crêtes de tir, sites d'observations, portées de tirs des canons) qui déterminent l'espacement entre les positions alors que les crêtes et les sites d'observations déterminent leur emplacement. Le milieu offre des potentialités mais également des obstacles à la manœuvre. Le relief (sites d'observations, de tirs, de cantonnement, de masque), l'hydrographie et l'hydrogéologie (ponts, hydromorphie des sols, alimentation en eau potable, épaisseur de la zone vadose), la nature des sols (pénétrabilité, traficabilité, aptitude au creusement), la végétation (masque, effet de lisière, camouflage, marche forestière) sont autant de caractéristiques à connaître et utiliser pendant la guerre de position. Toutes ces données conditionnent la structure interne du front (épaisseur, densité) mais également le choix de la délimitation spatiale des grandes offensives. Le secteur calme d'Argonne diffère des grandes offensives de Champagne sur un terrain plat avec une bonne traficabilité et une excellente visibilité pour le réglage d'artillerie. Sur les formations tertiaires formant le revers de la côte d'Île-de-France, en Champagne sèche et humide et en Argonne, les conditions édaphiques sont différentes et présentent des réseaux de défense n'ayant pas la même structure à l'échelle du terrain opérationnel (Boulanger, 2006).

Ce travail de thèse est réalisé sur les plans directeurs au 1/20 000, qui correspond à l'échelle la plus petite des plans directeurs. La comparaison avec les autres plans (1/10 000 et 1/5 000)

et l'approche archéologie montrent une stylisation des tracés et les extrapolations sont toujours *a minima*. Même si ce tracé est stylisé sur les plans directeurs au 1/20 000, la valeur opérationnelle reste bonne (de 2 à 13 m), montrée par l'approche archéologique. Le croisement des approches archivistique, spatiale sous SIG, de télédétection (Lidar, photo aériennes) et archéologique valident donc les résultats. À ce titre, l'approche pluridisciplinaire s'avère nécessaire. La valorisation opérationnelle a également été démontrée dans le domaine de l'archéologie (potentialité de recoupement de structures archéologiques Grande Guerre), dans le domaine de la cartographie de la susceptibilité aléa « cavités », de l'intégration des sites d'études dans l'évaluation environnementale. Les projets en cours sont nombreux, notamment par la création d'une nouvelle couche SIG sous géoportail avec la planimétrie des plans directeurs et une couche tranchées-boyaux.

Le principal impact de la Grande Guerre est la morphogenèse des « polémo-formes » étudié par différentes approches (Lidar, photographies aériennes et archéologique). En zone cultivée, aucune forme ne subsiste, ayant subi un nivellement généralisé pour la remise en culture, associé à la disparition progressive mais rapide de la zone rouge. Les seuls vestiges de ces tracés sont appréhendés par des indices phytographiques, pédographiques, hydrographiques, observables dans des conditions particulières saisonnières, journalières, voire horaires en photographie aérienne oblique ou verticale à très basse altitude. L'approche archéologique a permis de montrer la nature des remplissages qui provient essentiellement d'une sédimentation naturelle *syn* et post-guerre, mais surtout des remblais de la crête de feu et parapet poussés dans les tranchées, avec une reconstitution de sols par apport de terre végétale. Les méthodes archéologiques et géophysiques par des profils transversaux montrent des remplissages marqués par une contamination métallique en phase solide (fil barbelés, chevaux de frise ...).

Sous forêt, le Lidar et l'approche archéologique montrent que le tracé des réseaux de défense est remarquablement conservé par une approche multisectorielle (25 à 65 %) sous la commande de la dimension multiscalaire et des pratiques sylvicoles. La détection automatique et la caractérisation morphométrique permet des analyses sur des zones d'études de plusieurs dizaines d'hectares, largement conditionnées par la puissance informatique à disposition. Cependant, l'atténuation des formes par sédimentation naturelle post-guerre, dont la vitesse d'accrétion n'est pas homogène, est plus rapide juste après-guerre par la disparition des sols, puis plus lente par la constitution d'un horizon humifère post-conflit et d'une litière qui protège de l'érosion. Par contre, la guerre des mines est bien plus morphogène dans des sites où les explosions sont nombreuses (Cote 108, Vauquois, secteur de Perthes-les-Hurlus...). La création de cratères coalescents, en ligne, isolés, métriques à hectométrique défigure le relief, décoiffe les buttes (Vauquois), balafre l'intégralité d'un interfluve (Cote 108) ou ponctue la surface par des cratères isolés. À l'image d'un astrolème, la guerre des mines déstructure la roche (globe de friabilité), et met en affleurement l'encaissant rocheux, soumis aux affres de la météorisation. À ce titre, cette dernière va générer des manteaux colluviaux gravitaires de type graveluches contemporaines. La retombée de la gerbe d'explosion atténue la profondeur du cratère et les éjectas sont plus ou moins bien conservés à l'intérieur et à l'extérieur du cratère en fonction de la géolité de la roche (craie sur la Cote 108, calcaires oxfordiens aux Eparges). La fracturation exacerbée et la dilatance des matériaux déterminent un accroissement à la vulnérabilité d'infiltration aux eaux ainsi qu'à la pollution de surface des eaux souterraines. Les impacts de l'Artillerie, analysés par l'image Lidar montrent une organisation spatiale des trous d'obus, isolés, coalescents, emboîtés et liés aux pratiques

militaires (tirs de barrage, tirs de destruction, polygone de tir, engagement pour un coup de main ou généralisés pour une préparation d'offensive. La densité d'obus reste très hétérogène entre des sites calmes et le paysage de peau d'orange, de 50 impact/ha sur la Cote 108 à 90 impacts/ha en Argonne. Cependant, cette approche par le Lidar n'est validée que par l'intégration de la zone d'étude dans les réseaux de défense pour relativiser les résultats, mais l'approche archéologique sur le terrain montre des dynamiques de sédimentation qui feutrent les formes (atténuation par sédimentation au fond des formes par érosion des bourrelets). À ce titre, l'outil Lidar s'avère indispensable pour déterminer des sites susceptibles de faire l'objet d'opérations archéologiques programmées.

L'application des résultats du traitement sous SIG des réseaux de défense et du Lidar peut s'inscrire dans des problématiques diverses, notamment de sécurité civile et de cindynique par l'aléa « cavités » (affaissements, effondrements, crevaisons de fontis associés aux abris militaires, hétérogénéité des remblais des réseaux de défense). Elle concerne également la contamination des sols en ETM (cuivre et plomb), observée régionalement près d'Ypres pour le cuivre. Elle reste en Champagne très locale sous la commande de l'acidité du milieu (pH), avec un effet « pépité », révélée à la fois par l'approche archéologique (trous d'obus) et géophysique (Saey, 2016). Cette contamination doit être relativisée au sein des réseaux de défense de manière spatiale qui montre que le croisement des méthodes s'avère nécessaire et salvatrice pour l'interprétation des résultats. Les études de la contamination solide en éclats d'obus restent ponctuelles et pourraient faire l'objet de programmes de recherche pour mesurer la quantité solide par unité de surface apportée au sol de la zone de front. Des études sur les impacts biologiques méritent également une attention particulière, notamment dans cette région champardennaise de grande culture. Cette contribution permet également de relativiser les résultats concernant les perturbations pédologiques (bombturbation, déstructuration physique des sols) en les inscrivant dans l'espace au sein des réseaux de défense, et dans un contexte morpho-dynamique local qui conditionne les écoulements et la pédogenèse. Cependant, les résultats doivent être nuancés par le traitement des obus et des munitions après-guerre (site de pétardement) qui par un effet de concentration forme des spots de contamination, retrouvés pour les perchlorates. Ce contaminant émergent, mesuré depuis 2012 par les ARS, traite d'une pollution régionale que la cartographie des réseaux de défense sous SIG paraphrase. Les communes supérieures à 4 µg/L s'inscrivent généralement dans la zone de front, hormis les spots de traitement des obus plus éloignés. L'organisation spatiale des concentrations communales ne respecte pas les réalités géographiques, notamment hydrogéologiques (bassin d'alimentation des captages) d'autant plus que les campagnes de mesures sont réalisées à des dates non synchrones, et donc lors de situations hydrologiques différentes. Le programme de recherche PERCHL'EAURIGINE cherche à répondre à ces problématiques par un suivi piézométrique et qualitatif des eaux de la nappe de la craie et des eaux de surface sur l'interfluve Suipe-Vesle en amont de Reims.

Après ces trois années de travail, l'évaluation de l'impact environnemental de la Grande Guerre se doit d'être pluridisciplinaire (géosciences, géographie, histoire, archéologie) multi-approche (SIG, Lidar, instrumentation de terrain et laboratoire, exploration souterraine) pour répondre aux nombreuses problématiques associées. L'étude de ces « polémo-systèmes » post-conflit nécessite la connaissance au préalable du milieu *ante*-conflit, des événements historiques et des dynamiques qui concourent à leur fonctionnement. Cependant, comme tout travail de recherche, cette contribution s'intègre dans une dimension exploratoire des secteurs de conflits armés particulièrement marqués dans le Nord et l'Est de la France.

Si les méthodes développées dans cette contribution présentent de multiples applications dans le monde du travail de la sécurité civile, de la valorisation patrimoniale, la méthodologie de travail concernant la digitalisation des plans directeurs est trop longue et souffre d'un manque d'automatisation. Cette dernière mériterait d'être développée afin de la rendre opérationnelle sur l'ensemble du front d'une part, et d'autre part de manière sectorielle à l'échelle des plans directeurs au 1/10 000 et 1/5 000. Par sa dimension exploratoire, ce travail en Champagne manque de relativité par rapport à l'ensemble de la zone de front, où les milieux naturels sont bien plus diversifiés qu'en Champagne (des polders flamands à la montagne vosgienne granitique). Cette approche comparative avait fait l'objet d'un projet de recherche ANR SPACE WW1 qui malheureusement n'a pas abouti. L'engouement autour des géosciences dans la Grande Guerre, dopé par le Centenaire, risque malheureusement de s'essouffler et ne constitue qu'une infime partie de la production scientifique, notamment historique, concernant le premier conflit mondial.

Cette relativité spatiale mériterait également d'être appréhendée par le taux de conservation des structures de défense en proposant d'autres missions en Lidar aéroporté. En effet, des vols réalisés sur des massifs forestiers dans d'autres secteurs de la zone de front et notamment des sites de guerre de mines à géologie contrastée (Vauquois, Les Épargnes, Flirey, Col de la Chapelotte) appréhenderaient le rôle de la géologie sur la résilience morphologique des « polémo-paysages ».

Pour harmoniser et homogénéiser les connaissances archéologiques de la Grande Guerre, une banque de données spatiales mériterait également d'être constituée à l'échelle de la zone de front à partir des rapports de fouilles programmées, préventives et de sauvetage.

À l'échelle sectorielle, des études géophysiques (résistivité et anomalies magnétiques) croisées à des approches archéologiques et géochimiques permettraient enfin d'évaluer la contamination métallique au sein des réseaux de défense et de discriminer également les entrants *syn* et post conflit (site de pétardement).

Si dans les pays anglo-saxons, les Sciences Militaires se nourrissent abondamment de géosciences valorisées par de nombreuses publications dans les académies militaires et dans des revues spécialisées, en France depuis 1945, la géostratégie propre aux grands espaces a remplacé l'approche tactique locale attachée à la géographie physique dans la géographie universitaire (Boulanger, 2002, 2006). Cela induit une lisibilité davantage internationale que nationale de la géographie militaire universitaire française qui gagnerait à se nourrir des géosciences et des sciences militaires (participation des militaires dans les programmes de recherche). Cette valorisation peut s'effectuer par l'évaluation environnementale post-conflits armés du passé ou actuels. En effet, malgré d'importantes mutations du fait militaire à l'échelle tactique ou locale, l'empreinte environnementale persiste et conditionne les ressources du milieu. À ce titre, elle doit être prise en compte dans le cadre de la reconstruction et du développement durable.

Références bibliographiques (303)

A

Adam F. (1991) - *La sépulture collective de Saint-Rémy-la-Calonne, « Quart en Réserve » (Meuse)*. Rapport de fouille. DRAC Lorraine, service régional de l'Archéologie, 221 p.

Adam F. (2006) - *Alain Fournier et ses compagnons d'arme. Une archéologie de la Grande Guerre*, Édit. Serpenoise, Metz, 219 p.

Alcaix G, (2012) - *Du Chemin des Dames à la Marne*, Louviers, Édit. Ysec, 176 p.

Amat J.P. (1987) - Guerre et milieux naturels : les forêts meurtries de l'Est de la France, 70 ans après Verdun, *Espace géographique*, 16, 3, 217-233.

Amat J.P. (1993) - Le rôle stratégique de la forêt, 1871-1914. Exemples dans les forêts lorraine, *revue historique des armées*, 1, 62-69.

Amat J.P. (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, 1 285 p.

Amat J.P. (2015) - *Les forêts de la Grande Guerre : histoire, mémoire, patrimoine*, Paris, Presses de l'Université Paris-Sorbonne, 548 p.

Amis de Vauquois (2004) - *La Butte meurtrie de Vauquois, la guerre des mines 1914-1918*, Édit. Les Amis de Vauquois et de sa région, 382 p.

Anonyme (1922) - Excavateurs (nouveau système d'un excavateur) et leurs applications au terrassement mécanique pendant la guerre, Les archives de la Grande Guerre et de l'histoire contemporaine, Édit. Etienne Chiron, 120-122.

Anonyme (1923) - *Instructions sur l'aménagement des creutes à exécuter par les unités M.D.*, *Revue du Génie Militaire*, Édit. Berger-Levrault, 600 p.

ANSES (2011) - *AVIS du 18 juillet 2011 relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés à la présence d'ions perchlorate dans les eaux destinées à la consommation humaine Saisine*, n° 2011-SA-0024, Édit ANSES scientifique, 43 p.

ANSES (2013) - *Campagne nationale d'occurrence de polluants émergents dans les eaux destinées à la consommation humaine - Perchlorates et Nitrosamines*, Édit ANSES scientifique, 56 p.

ARS Champagne-Ardenne (2013) - *Traces de perchlorates dans l'eau des départements de la Marne et des Ardennes : points de situation*, [en ligne] consulté le 28/09/2016. Disponible sur : <http://www.ars.alsace-champagne-ardenne-lorraine.sante.fr/Traces-de-perchlorates-dans-l.171860.0.html>.

ARS Nord-Pas-De-Calais (2014) - *Les ions de perchlorates - Restriction de la consommation de l'eau du robinet*, [en ligne] consulté le 28/09/2016. Disponible sur : <http://www.ars.nordpasdecalsais.sante.fr/Les-ions-de-perchlorates-Res.149363.0.html>.

ARS Picardie (2013). *Les perchlorates*, [en ligne] consulté le 28/09/2016. Disponible sur : <http://www.ars.picardie.sante.fr/Les-perchlorates.146890.0.html>.

Arnould P., Veyret Y., Wicherek S. (1992) - Guerre de 1914-1918 et remembrement. Leur incidence sur l'érosion des terres au Chemin des Dames, *Bulletin de l'Association de géographes français*, 69, 91-99.

Arnould P. et Simon L. (1994) - Forêts, guerre, après-guerre, autour du Chemin-des-Dames, 251-270, *Forêt et guerre*, (dir.) Corvol A. et Amat J.P., Coll. Alternatives rurales, Édit. L'Harmattan, 325 p.

Army War College (1917) - *Instructions concerning battle maps*, Washington, Government Printing Office, 62 p.

Association Robin des Bois (2016) – *Atlas de la France toxique*, Édit. Flammarion, 126 p.
Audouin-Rouzeau S., Buch E., Chimènes M., Durosoir G. (2009) – *La Grande Guerre des musiciens*, Édit. Symétrie, 256 p.

Auxéméry Y. (2013) – Le syndrome de la guerre du Golfe vingt ans après, *L'Encéphale*, 39, 332-338.

B

Barbusse H. (1917) – *Le Feu, journal d'une escouade*, Édit. Flammarion, Paris, 379 p.

Barou L. (2015) - *Mémoires de la Grande Guerre*, Tome 3 : 1916, Édit. Conseil départemental de la Loire, 516 p.

Barousse V. (2007) – Les carrières souterraines de l'Aisne : un patrimoine méconnu, *Subterranea*, 142, 34-40.

Barros M. et Barros J. (1997) - *La place de Reims 1874-1918*, Acte du colloque d'histoire militaire en octobre 1994, 2-42.

Barthas L. (1997) – *Les carnets de Louis Barthas, tonnelier, 1914-1918*, Édit. La Découverte/Poche, Paris, 568 p.

Baudouin M. (1915) - La Préhistoire dans les Tranchées, *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 12, 6, 275 p.

Bausinger T., Bonnaire E., Preuß J. (2007) - Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun, *Science of the Total Environment*, 382, 2-3, 259–271.

Becker A. (2014) - *Voir la Grande Guerre, un autre récit (1914-2014)*, Édit Collin, 256 p.

Becker J.J. (2006) – L'évolution de l'historiographie de la Première Guerre Mondiale, *Revue historique des armées*, [en ligne] 242, URL : <http://rha.revues.org/4152>.

Benoistel M. et Desserrières L. (2003) - *La guerre des tranchées*, Édit. Ouest-France, 127 p.

Bergerat F., Jacques A., Vandycke S., Amedro F., Robaszynski F., Faÿ O. (2015) – Les carrières souterraines d'Arras : géologie, archéologie et histoire, *Bulletin d'inf. Géol. Bass. Paris*, 52, 3, 3-26.

Bernardini F., Sgambati A., Montagnari Kokelj M., Zaccaria C., Micheli R., Fragiaco A., Tiussi C., Dreossi D., Tuniz C., De Min A. (2013) - Airborne LiDAR application to karstic areas: the example of Trieste province (north-eastern Italy) from prehistoric sites to Roman forts, *Journal of Archaeological Science*, 40, 4, 2152-2160.

Bernède A. (2015) - *Combats en Argonne 1914-1918*, Édit. Soteca, 290 p.

Blond S. (2007) - L'atlas des routes royales de Trudaine, *Siècles*, 25, 66-82.

Blondeau R., Brenot J., Léty C., Zélie B. (2014) – *Rapport final d'opération archéologique (sondages géoarchéologiques), Servon-Melzicourt (51), « Bois de la Gruerie »*, Evéha, Etudes et valorisations archéologiques, SRA Champagne-Ardenne, 109 p.

Bollot N., Devos A., Pierre G., Chalumeau L., Lejeune O. (2014) - Détente mécanique et dynamique de versant dans l'Eocène de l'est du bassin de Paris, France, *Geomorphologie* 2, 121-132.

Boschiero L. (2015) - *Terres polluées par 14-18 : cent ans après, la récolte 2015 détruite dans le Nord Meusien*, L'Est Républicain, édition du 17/09/2015. [En ligne], consulté le 28/09/2016. Disponible sur : <http://www.estrepublicain.fr/edition-de-verdun/2015/09/16/terres-polluees-par-14-18-la-recolte-2015-detruite-dans-le-nord-meusien>

Bouchon R. (1917) - *Centre d'instruction de l'artillerie de tranchée. Cours d'artillerie de tranchée*, Imprimerie Léon Renaud, Bourges, 97 p.

Bouchon R. (1918) - *Centre d'instruction de l'artillerie de tranchée. Cours d'artillerie de tranchée*, Imprimerie Léon Renault, Bourges, 122 p.

Bouchon S. et Veyret Y. (2002) - Les risques liés aux carrières souterraines. Diversité des réponses et aménagement en Île-de-France, *Annales de Géographie*, 111,626, 359-379.

Boulangier P. (2001a) - Le paysage de guerre dans le canton de Lassigny (Oise), *Ruralia*, 8, 2-21.

Boulangier P. (2001b) - La carte d'Etat-Major au service de la géographie militaire (début XIXe siècle - 1939), *Stratégie*, n°82/83, vol. 2-3.

Boulangier P. (2002) - *La géographie militaire française (1871-1939)*, Édit. Economica, 619 p.

Boulangier P. (2006) - *Géographie militaire*, Édit. ellipses, 384 p.

Bournerias M. et Timbal J. (1979) - Le hêtre et le problème du climax en champagne crayeuse, *Biologie et forêt*, 31, 209-223.

Brenot J., Saulière N., Léty C., Taborelli P., Zélie B., Blondeau R., Devos A. (2017) - How much did the soldiers dig? A quantification of WW1 remains in Argonne, France, *Geoarcheology*, 32, 534-548.

Brooks A.H. (1920) – The use of geology on the Western Front, *US Geological Survey Professional Paper*, 128, 85-124.

Buffetaut Y. (2011) - L'Argonne 1914-1915, *Tranchées - un regard nouveau sur la Grande Guerre*, Hors-série 2, 10-21.

Buffetaut Y. (2011a) - Le grignotage, une tactique qui n'en était pas une, *Tranchées, Un regard nouveau sur la Grande Guerre*, Hors-série 2, 5-9.

Buridant J. (2003) - La forêt mutilée – la reconstitution forestière dans l'Aisne après la Grande Guerre. *Graines d'Histoire, la mémoire de l'Aisne*, 17, 13-24.

Buttet J. (2012) - *Traces et témoignages lapidaires de la Grande Guerre. Graffiti et identités*, Mémoire de Master 2 de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 283 p.

Buttet J. (2013) - Graffitis de guerre dans les caves de Champagne, *Reims 14-18, de la guerre à la paix*, 106-109, BOULANGER J.F. (dir.), Édit. La Nuée Bleue, 221 p.

C

Caldwell D.R., Ehlen J., Harmon R.S. (2004) – *Studies in Military Geography and Geology*, Kluwer Academic Publishers, 348 p.

Carlu A. (2018) – *Impacts hydrologiques et hydrogéologiques de la Grande Guerre sur l'interfluve Vesle-Suippe*, Mémoire de stage Master 2 GéoRis GEGENAA, à paraître.

Caubergs M. (1991) - *Inventaire de quelques anciennes mines et carrières souterraines de Wallonie*, Essai d'archéologie minière, 313 p.

Cazals R. et Loez A. (2012) - *14-18, Vivre et mourir dans les tranchées*, Édit. Taillandier, 297 p.

Cazenave G. (1920) - *Alimentation en eau - évacuation des eaux, cours de construction (artillerie coloniale)*, lithographie de l'école militaire de l'artillerie, 51 p.

Certini G., Scalenghe R., Woods W.L. (2013) - The impact of warfare on the soil environment, *Earth-Science Reviews*, 127, 1-15.

Chabert C. (2016) – *Impact de la Grande Guerre sur les concentrations en ETM des sols de Champagne-Ardenne*, Mémoire de stage de master 2 Géoris, Université de Reims, 41 p.

Challéat J. (1915). *Artillerie de campagne ; la pratique du tir du canon de 75 mm de campagne. 2e Édition, mise à jour au 1er juillet 1914*, Édit. Berger-Levrault, Nancy, 196 p.

Charpy J.J. (2017) – *L'archéologie champenoise dans le contexte du premier conflit mondial*, 187-202, dans Nivet P. et Lewuillon S., *La Grande Guerre des archéologues*, Édit. Universitaires de Dijon, 326 p.

Chasseaud P. (2006) – *Rats Alley : Trench Names of the Western Front, 1914-1918*, Édit. History Press, 768 p.

Chenet G. (1938) - L'industrie céramique gallo-belge et gallo-romaine en Argonne, *Revue des Études Anciennes*, 40, 271-272.

Cheng Q., Perlmutter L., Smith P.N., McMurry S.T., Jackson W. A. et Anderson T. A. (2004) - A Study on Perchlorate Exposure and Absorption in Beef Cattle, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 3456-3461.

Chevallier G. (1930) - *La peur*, Édit. Stock, réédition 2008, Édit. Le Dilettante, Le Livre de Poche, 409 p.

Clausen J., Robb J., Curry D., et Korte N. (2004) - A case study of contaminants on military ranges: Camp Edwards, Massachusetts, USA, *Environmental Pollution*, 129, 13 - 21.

Cochet F. (1993) - *Rémois en guerre 1914-1918 : l'héroïsation au quotidien*, Presses universitaire de Nancy, 168 p.

Cochet F. (2002) - Reims bombardée : son martyr et ses symbolisations, *14-18, le Magazine de la Grande Guerre*, 6, 56-61.

Coeurdevey E. (2011) – *Carnets de guerre 1914-1918, un témoin lucide*, Terre humaine pocket, 1248 p.

Colas M.D., Benslama F., Daudin M. (2012) – Les “Gueules Cassées”, d’une génération à une autre: approche sociologique et psychopathologiques des blessures de guerre, *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique*, 170, 4, 238-243.

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*, 26, 3, 363-393.

Corda Lt Colonel (1920) – *La bataille et son évolution pendant la guerre 1914-1918 : cours de tactique, 1^{ère} et 2^{ème} divisions*, école militaire de l’artillerie, 124 p.

Corvisier de Villèle M.A., Ponnou C. (2001) - *La France vue par les militaires. Catalogue des cartes de France du dépôt de la guerre*, Service historique de l’Armée de terre, Château de Vincennes, 286 p.

Cousin M. (2002) - *Archéologie des carrières souterraines de Doué-la-Fontaine*, Édit Gal’Art , 110 p.

Coutant C., Tourtebatte P., Schmidt F., Quantinet D. (2017) – *Le fort de Nogent-l’Abbesse, quand la coopérative vinicole de Nogent-l’Abesse et Cernay-lès-Reims adopte un fort Séré de Rivières*, Édit.de l’Effervescence 2, 96 p.

Coutin C. (2012) – *Tromper l’ennemi. L’invention du camouflage moderne en 1914-1918*, Édit. Pierre de Taillac, Paris, 240 p.

CTEM - Comité Technique d’Etat-Major (1913) - *Aide-Mémoire de l’officier d’État-major en campagne*, Édit. Berger-Levrault, Nancy, 102 p.

Crosnier de Varigny H. (1915) - *Mines et tranchées, coll. pages d’histoire 1914-1915*, Librairie militaire Berger-Levrault, 81 p.

Cussenot Lt Colonel (1929) - *Travaux exécutés à la Cote 108 sous la direction du commandant de la compagnie M2T de novembre 1915 à octobre 1916, Quelques guerres de mines de 1914 à 1916*, Revue du Génie Militaire, 65, 268-272.

D

Damien, T., Briquet M., Bollot N., Devos A., Chalumeau L., Pierre G., Lejeune O. (2015) – Rôle des remplissages alluviaux sur le fonctionnement hydrodynamique d’un marais d’entonnoir de percée cataclinale : l’exemple des Marais de Saint-Gond (Marne, France), *Géomorphologie, relief, processus, environnement*, 21, 4, 331-342.

Damien T., Porchier J.C., Devos A., Taborelli P., La bataille des Marais de Saint-Gond, in *La terre et le feu – Géologie et géologues sur le front occidental*, Édit. AGBP, à paraître.

De Fonclare G^{al} (1928) - *A travers la Grande Guerre - La Cote 108 près de Berry-au-Bac et la guerre de mines (1915)*, Revue des Questions Historiques, 13, 60-80.

De Martonne E. (1925) - Compte rendu sur les conditions géographiques de la guerre sur le front français, *Annales de Géographie*, 34, 190, 361-365.

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 intraforestier (bois des Caures, forêt domaniale de Verdun, Meuse) », *EchoGéo* [En ligne], 38, disponible sur <https://journals.openedition.org/echogeo/14791>.

Demoule J.-P. (2009) – Commentaires sur les fouilles de Hans Niggemann, *Revue Archéologique de Picardie*, 26, 605-613.

De Reu J., Bourgeois J., De Smedt P., Zwertvaegher A., Antrop M., Bats M., De Maeyer P., Finke P., Van Meirvenne M., Verniers J., Crombé P. (2011) - Measuring the relative topographic position of archaeological sites in the landscape, a case study on the Bronze Age barrows in northwest Belgium. *Journal of Archaeological Science*, 38, 12, 3435-3446.

Desbois-Thibault C. (2017) – Le Champagne et la Grande Guerre des hommes et des femmes dans la tourmente, Champagne ! Un terroir et des hommes, *Travaux de l'Académie Nationale de Reims*, 184, 97-122.

Desfossés Y. (2009) - Archéologie de la Grande Guerre, les tranchés de tirailleurs de Bétheny (Marne), un exceptionnel instantané des derniers soubresauts de la bataille de la Marne, 17 au 19 septembre 1914, *Cahiers d'Etudes et de Recherches du Musée de l'Armée (CERMA)*, hors-série n°5, 147-182.

Desfossés Y. (2015) - Le camp de repos allemand du borrieswalde en forêt d'Argonne, *Culture et Recherche*, 131, 15-16.

Desfossés Y., Jacques A., Prilaux G. (2000) - Premières recherches sur la Grande Guerre dans le Nord-Pas-de-Calais, *Archéologia*, 367, 32-39.

Desfossés Y., Jacques A., Prilaux G. (2007) - *Archéologie en Champagne-Ardenne et en Nord-Pas-de-Calais. Quelle archéologie pour les traces de la Grande Guerre ?*, plaquette SRA Champagne-Ardenne/SRA Nord-Pas-de-Calais/Ville d'Arras/INRAP, 15 p.

Desfossés Y., Jacques A., Prilaux G. (2008) - *L'archéologie de la Grande Guerre*, Édité. Ouest-France/INRAP, Rennes, 127 p.

De Smedt P., Saey T., Lehouck A., Stichelbaut B., Meerschman E., Monirul Islam M. (2013) - Exploring the potential of multi-receiver EMI survey for geoarchaeological prospection : a 90 ha dataset, *Geoderma*, 199, 30-36.

Devereux B.J., Amable G.S., & Crow P. (2008) - Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection, *Antiquity*, 82, 316, 470-479.

Devevey F. (2014) - Archéologie de la Grande Guerre : les recherches archéologiques sur les gares régulatrices françaises et américaines de Marcilly-sur-Tille, 1914/1919 (Côte-d'Or), *In Situ*, 25, 26 p.

Devos A., Bollot N., Chalumeau L., Fronteau G., Lejeune O. (2015a) - Impact of lateral variations of geologic facies on water resources in homogeneous basins - Example of tertiary plateaus in the Paris Basin, *Geodinamica acta*, 27, 1, 15-24.

Devos A., Chalumeau L., Bollot N., Sosson C., Barre E., Lejeune O., Gobancé G. (2012) - Organisation spatiale de la fracturation de détente mécanique de versant en carrières souterraines. Application aux plateaux des calcaires éocènes du Bassin de Paris, *Physio-Géo*, 6, 1, 243-262.

Devos A., Chalumeau L., Sosson C., Fronteau G., Turmel A., Lejeune O. (2011) - La fantômisation des calcaires lutétiens du Bassin de Paris – Apport des carrières souterraines, *Karstologia*, 58, 15-28.

Devos A., Lejeune O., Chopin E. (2007) - Karstic infiltration dynamics and spatialisation of schalk aquifer drain, exemple of the upper Vesle basin (dry champagne, France), *European Journal of water quality (EJWQ)*, 38, Fasc.1, 23-38.

Devos A., Fronteau G., Lejeune O., Sosson C., Chopin E., Barbin V. (2010) - Influence of geomorphological constraints and exploitation techniques on stone quarry spatial organization. Example of Lutetian underground quarries in Reims, Laon and Soissons areas, *Engineering Geology*, 115, 268-275.

Devos A., Sosson C., Fronteau G., Lejeune O. (2009) - Les tufières du Vormy et des Fontinettes (Aisne-Marne-France) : marqueurs de la faible karstification des calcaires lutétiens de l'Est du Bassin parisien ?, *Karstologia*, 54, 37-48.

Devos A., Sosson C., Lejeune O. (2008) - Les carrières souterraines de Glennès (Aisne-02), *Subterranea*, 148, 110-118.

Devos A., Tadorelli P., Damien T., Bollot N., Blanc A., Fronteau G., Laratte S., Lejeune O., Desfossés Y., Embry M. (2017) – La Grande Guerre sur la Côte d'Île-de-France, en Champagne crayeuse et en Argonne, Journées d'Etudes d'Automne 8-9 octobre 2016, *Bulletin d'Informations Géologiques du Bassin de Paris*, 54,3, 3-19.

Devos A., Tadorelli P., Dodici M., Chalumeau L., Buridant J., Bollot N., Combaud A., Desfossés Y. (2015b) - 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*, 9, 157-174.

Dodici M. (2015) - *Organisation spatiale des réseaux de défense de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne – Application à la Région de Reims*, Mémoire de stage de Master 2 GéoRis, GEGENAA, Université de Reims Champagne-Ardenne, 72 p.

Dosse E. (1913) – *Ce que l'on peut voir des champs de batailles des 16 et 18 Août sans pénétrer en territoire annexé*, Ecole militaire de l'Artillerie, Paris, 122 p.

Doyle P., Barton P., Rosenbaum M.S., Vanderwall J., Jacobs K. (2002) - Geo-environmental implications of military mining in Flanders, Belgium, 1914-1918, *Environmental Geology*, 43, 57-71.

Dubail A. et Fayolle M.E. (1921) - *La guerre racontée par les généraux commandants de groupe d'armées*, Tome 1: de Liège à Verdun 1914-1916, Tome 2: de la Somme au Rhin 1916-1918, Paris, Schwarz, 326 p.

Dujardin L. (1991) - *Les carrières souterraines de Caen et du département du Calvados*, Actes de colloque du 2^{ème} symposium sur les carrières souterraines, Paris, 57-166.

Dupré L.A. (2013) – *Carnet de route d'un gosse des tranchées*, Édit Michel Lafon, 333 p.

Durup de Baleine A. (1998) - Paysages hérités de la fortification «Séré de Rivières » au sein des Côtes lorraines », *Revue Géographique de l'Est*, 38, 1-2, 57-84.

Dutil P. et Ballif J-L. (1968) - Sur la présence fréquente en Champagne crayeuse de rendzines développés sur paléosols cryoturbés, *Science du sol*, 2, 79-91.

E

École de Mines. (1914) – 2^{ème} édition mise à jour jusqu'au 30 avril 1909, Imprimerie Nationale, Paris, 254 p.

École du Génie. (1914) - *Instruction pratique - Ecole de fortification de campagne*, Édit. Bordeaux Imprimerie G. Delmas, 188 p.

Ehret T. (2011) - Argonnenbahn : une voie ferrée dans la forêt », *Tranchées un nouveau regard sur la Grande Guerre*, 5, 64-73.

Ehret T. (2012) - Le canon du bois de Muzeray», *Tranchées, un nouveau regard sur la Grande Guerre*, 10, 64-68.

Eilertsen R.S., Corner G.D., Hansen L. (2015) - Using LiDAR data to characterize and distinguish among different types of raised terraces in a fjord-valley setting, *Journal of the Geological Society of Sweden*, 137, 4, 353-361.

Ericksen G.E. (1981) - Geology and Origin of the Chilean Nitrate Deposits, *USGS Numbered Series*, 1188, 42 p.

F

Farsac P. (1911) – *Munitions d'artillerie et effets des projectiles*, École d'application de l'Artillerie et du Génie, Imprimerie Nationale, 108 p.

Faucher B. et Lauriol B. (2016) - Les vermiculations de la grotte Wilson (Lac la Pêche, Québec, Canada. Contexte morpho-climatique, analyses sédimentologiques et distribution spatiale, *Géomorphologie, relief, processus, environnement*, 22, 1, 95-103.

Flucher G. (2011) - *Le Chemin des Dames, du champ d'honneur...au champ des morts*, Édit. Ysec, 127 p.

Fronteau G., Pascal A., Barbin V. (2002) - Caractérisation de la Pierre de Courville (Lutétien, Marne, France) - Relations entre diagenèse et propriétés pétrophysiques, *Géologie de la France*, 4, 51-59.

Fronteau G., Moreau C., Thomachot C., et Barbin V. (2010) - Variability of some lutetian building stones from the Paris Basin, from characterisation to conservation, *Engineering Geology*, 115, 158–166.

Fronteau G., Turmel A., Pichard C., Decrock B., Devos A., Lejeune O., Menival D., Chalumeau L., Combaud A. (2014) - *Les approvisionnements en pierre de construction à Reims : des choix marqués par de fortes contraintes géologiques, géographiques et socio-économiques*, Édit. CTHS, 235-250, Actes du Colloque Tours, 2012.

G

Geagea M. (2015) - Quand la guerre s'enterre, les premières tranchées, *Tranchées un nouveau regard sur la Grande Guerre*, 20, 6-15.

Gély J.P. (1996) - Le Lutétien du Bassin Parisien: de l'analyse séquentielle haute résolution à la reconstitution paléogéographique, *Bulletin Information des Géologues du Bassin de Paris*, 34, 3-27.

Gély J.P. (2009) - Le Lutétien: une période charnière de l'histoire du Bassin parisien, *Saga Information*, 284, 6–24.

Gély J.P., Lorenz J., Merle D., Bergerat F., Blanc A., Cornée A., Vrielynck B. (2009) - Le Lutétien, *Géochronique*, 109, 15–47.

Georges-Leroy M., Bock J., Dambrine E., et Dupouey J.L. (2009) – Le massif forestier, objet pertinent pour la recherche archéologique. L'exemple du massif forestier de Haye (Meurthe-et-Moselle), *Revue Géographie de l'Est*, 49, 2-3.

Georges-Leroy M., Bock J., Dambrine E., et Dupouey J. L. (2011) - Apport du LIDAR à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye, *ArchéoSciences, revue Archéométrie*, 35, 117-129.

Gervereau L. (dir.) (2001) - *Voir/Ne pas voir la guerre, Histoire des représentations photographiques de la guerre*, Paris, BDIC/Somogy, 351 p.

Gheyle W., Dossche R., Bourgeois J., Stichelbaut B., Van Eetvelde V. (2012) - 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*, 39, 5, 502-522.

Gheyle W., Saey T., Van Hollebeeke Y., Verplaetse S., Note N., Bourgeois J., Van Meirvenne M., Van Eetvelde V., Stichelbaut B. (2016) - Historical Aerial Photography and Multi-receiver EMI Soil Sensing, Complementing Techniques for the Study of a Great War Conflict Landscape, *Archaeological prospection*, 23,3,149-164.

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*, 90, 55-68.
Goya M. (2014) - *L'invention de la guerre moderne. Du pantalon rouge au char d'assaut, 1871-1918*, Édit. Tallandier, 479 p.

Grandidier M.G. (1918) - Le Service Géographique de l'Armée et la cartographie militaire, *Bull. de la Société de Géographie*, 7, 32, 19, 491p.

Grand Quartier Général Des Armées – État-Major (1916) - *Instruction sur les plans directeurs*, Imprimerie nationale, Paris, 45 p.

Grand Quartier Général Des Armées – État-Major (1917a) - *Instruction sur les plans directeurs et les cartes et plans spéciaux : cette instruction abroge l'instruction sur les plans directeurs du 14 février 1916*, Imprimerie Nationale, Paris, 37 p.

Grand Quartier Général Des Armées – État-Major (1917b) - *Instruction sur l'Organisation du Terrain à l'usage des troupes de toutes armes, II^{ème} Partie*, Imprimerie Nationale, Paris, 238 p.

Grand Quartier Général Des Armées – État-Major - 1^{ER} et 3^{EME} Bureau (1915) - *Instruction sur les travaux de campagne à l'usage des troupes de toutes armes, approuvée le 21 décembre 1915*, Imprimerie Nationale, Paris, 277 p.

Grand Quartier Général Des Armées – État-Major - 3^{EME} Bureau (1918a) - *Manuel du chef de section d'infanterie*, Imprimerie Nationale, Paris, 512 p.

Grand Quartier Général Des Armées – État-Major (1918b) - *Instruction sur l'organisation et le fonctionnement des groupes de canevas de tir d'armée, sections topographiques de corps d'armée, sections topographiques de division*. Imprimerie du service géographique de l'Armée, Paris, 360 p.

Guérin H. et Laurain M. (1982) - Itinéraire géologiques et géomorphique en Argonne, *Annales scientifiques de l'université de Reims et de l'A.R.E.R.S*, 18, 25-36.

H

Hanin C. (2014) - *Souvenirs d'un officier de zouaves (1915-1918)*, Édit. Bernard Giovanangeli, 269 p.

Hanot F. et Simien F. (2017) – Sous les lignes de front – Regards géologiques sur la Grande Guerre, Édit BRGM, 176 p.

Hardier T. (dir.) (2010) - *Louis Leclabart (1876-1929), un artiste picard dans la Grande Guerre*, Noyon, Édit. Cap Régions, 163 p.

Hartcup G. (1988) - *The War of Invention; Scientific Developments, 1914-18*, Brassey's Defence Publishers, 1^e Édit., Londres, 226 p.

Hemmerly M. (1915) - Découvertes d'objets de l'époque gauloise à Tracy-le-Val (Oise), au cours de travaux militaires, *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 12, 10, 421-422.

Hemez R. (2011) - La guerre des mines à la Cote 108 du 22 novembre 1914 au 15 février 1916, *Tranchées un nouveau regard sur la Grande Guerre*, 5, 38-47.

Hesse R. (2010) - LIDAR-derived Local Relief Models (LRM) – a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 17, 67-72.

Hesse R. (2014) - Geomorphological traces of conflict in high-resolution elevation Models, *Applied Geography*, 46, 11-20.

Hodge P. (1994) – *Meteor craters and impact structures*. Cambridge University Press, Cambridge, 124 p.

Horne J. (2014) – Le front, c'est le blocage militaire, *Le monde*, [en ligne], URL : <http://www.lemonde.fr/centenaire-14-18/article/2014/10/29/john-horne>.

Hubé D. (2013) - *Potentialités d'un marquage des eaux souterraines par des substances pyrotechniques en relation avec les zones de combats de la première guerre mondiale – Le cas des perchlorates*, Rapport final, BRGM/RP-62008-FR, 26 p.

Hubé D. (2016) - *Sur les traces d'un secret enfoui – enquête sur l'héritage toxique de la Grande Guerre*, Édit. Michalon, 285 p.

Hubé D. (2018) – *14-18, Tremblements de guerre, les géologues au cœur de l'Histoire*, Édit. BRGM, 192 p.

Hubé D. et Bausinger T. (2013) - Marquage pyrotechnique : analyse de la problématique environnemental, Comparatif entre Allemagne et France, *Géologues*, 179, 32-36.

Hupy J.P. (2006) - The long-term effects of explosive munitions on the WWI battlefield surface of Verdun, France, *Scottish Geographical Journal*, 122, 167–184.

Hupy J.P. et Koehler T. (2012) - Modern warfare as a significant form of zoogeomorphic disturbance upon the landscape, *Geomorphology*, 157-158, 169-182.

Hupy J.P. et Schaetzl R. (2006) - Introduction "bombturbation", a singular type of soil disturbance and mixing, *Soil Science*, 171, 11, 823–836.

Hupy J.P. et Schaetzl R.A. (2008) - Soil development on the WWI battlefield of Verdun, France. *Geoderma*, 145, (1-2), 37-49.

Hutchinson J., Diederichs M., Pehme P., Sawyer P., Robinson P., Puxley A., Robichau H. (2008) - Geomechanics stability assessment of world War I military excavations at the Canadian National Vimy Memorial Site, France, *Mining Sciences*, 45, 59-77.

J

Jaunat J., Taborelli P., Devos A., Impacts de La Grande Guerre sur la qualité des eaux souterraines : le cas de perchlorates, in *La terre et le feu – Géologie et géologues sur le front occidental*, Édit. AGBP, à paraître.

Julien E. (2004) – À propos de l'historiographie française de la première guerre mondiale, *Labyrinthe*, 18, 53-68

Jünger E. (1920) - *Orages d'acier*. Édit. Livre de Poche (traduction française 2014).

Jünger E. (1932) - *Le Boqueteau 125, chronique des combats de tranchées, 1918*. Édit. Payot, 204 p.

K

Kahn M.F. (2014) – La « grande guerre » (1914-1918) et la rhumatologie, *Revue de Rhumatisme*, 81, 6, 453-454.

Keegan J. (2013) – *Anatomie de la bataille*, Paris, Édit. Perrin, 420 p.

Keller T. (2016) - Aux marges écologiques de la belligérance. Vers une histoire environnementale globale de la Première Guerre mondiale, traduction de Heudre A., *Annales Histoire, Sciences Sociales*, 1, 65-86.

Kranz W. (1920) – Beiträge zur entwicklung der kriegsgeologie, *Geologie Rundschau*, 11, 329-349.

L

Lachaux G. (2005) – *Les creutes – chemin des Dames et Soissonnais*, Édit. L'Encrier du Poilu, 292 p.

Laforgerie E. et Weiss J.F. (2013) - *Les souterrains de la Première Guerre mondiale – du creusement au témoignage*, tome 1, Édit Ysec, 223 p.

Landolt M., Decker E., Leprovost C., Lesjean F., Putelat O. (2009) - Aspach-Carspach Lerchenberg et Lerchenholz (Haut-Rhin) : découvertes archéologiques sur la première ligne de front allemande (1914-1918), *Annuaire de la Société d'Histoire du Sundgau*, 19-58.

Landolt M. et Lesjean F. (2009) - L'alimentation du soldat allemand sur les fronts d'Alsace et de Champagne à travers l'approche archéologique des dépotoirs de la Première Guerre Mondiale, *Cahiers Alsaciens d'Archéologie d'Art et d'Histoire*, 2, 139-159.

Landolt M., Lesjean F., Mellinger D. (2013) – Les objets liés à l'alimentation : les contenants en verre, 189-194, dans Schnitzler B., Landolt M., Jacquemot S., Legendre J-P., Laparra J-C., *À l'Est, du nouveau ! : Archéologie de la Grande Guerre en Alsace et en Lorraine*, Édit. des Musées de Strasbourg, 368 p.

Landolt M. et Schnitzler B. (2014) - A l'Est, du nouveau ! Archéologie de la Grande Guerre en Alsace et en Lorraine, *Archéologia*, 517, 58-67.

Lasaponara R. et Masini N. (2007) - Detection of archaeological crop marks by using satellite QuickBird multispectral imagery, *Journal of Archaeological Science*, 34, 2, 214-221.

Lateuile Y. (1920) - *La Cote 108 et la guerre des mines*, Le Monde Illustré, 3275, 57 p.

Laurain M., Guérin H., Marre A. et Richard J. (1995) - Processus génétiques à l'origine des formations de pente à graviers de craie en Champagne, *Permafrost and Periglacial Processes*, 6, 2, 103 -108.

Laurain M. Marre A., Guérin H. (1997) - La cryosuccion ; un des mécanismes de formation des poches de cryoturbation sur substrats crayeux, *Annales de la société géologique du Nord*, 5, 2, 373-379.

Laurent J. (1948) - *L'Argonne et ses bordures*, thèse d'état, Édit. s.ed, Paris, 307 p.

Laval P. (1927) - *Rapport de la commission des finances, chargée d'examiner le projet de loi, adopté par la Chambre des Députés, portant fixation du budget général de l'exercice 1928, Ministère des travaux publics, rapport n°680 du Sénat en session extraordinaire, annexe au procès-verbal de la séance du 13 décembre 1927.*

Le Bailly M., Landolt M., Mauchamp L., Dufour B. (2014) – Intestinal parasites in First World War German soldiers from « Kilianstollen » Carspach, France, *Public Library of Science*, 9, 10, [en ligne], disponible sur <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0109543>

Le Borgne A. (1990) - *La guerre de 1914-1918 et les forêts de l'Aisne. Recherches biogéographiques sur la guerre de 1914-1918, son impact et ses conséquences sur les forêts de l'Aisne*. Paris, 186 p.

Legrand (1920) - Nouveau système d'excavateur et leurs applications au terrassement mécanique pendant la guerre, *Bulletin officiel de la Direction des recherches scientifiques et industrielles et des inventions*, Ministère de l'instruction publique et des beaux-arts, 13, 11/1920, 725-764.

Le Hallé G. (2004) - *Précis de la fortification*, Édit Ysec, 192 p.

Lejeune O., Devos A., Sosson C. (2008) - Les crayères en milieu rural de la Marne (51), *Subterranea*, 145, 26-29.

Le Mauff B., Juigner M., Ba A., Robin M., Launeau P., Fattal P. (2018) - Coastal monitoring solutions of the geomorphological response of beach-dune systems using multi-temporal LiDAR datasets (Vendée coast, France), *Geomorphology*, 304, 121-140.

Lengel E.G. (2014) - *A companion to Meuse-Argonne Campaign*. Édit. Wiley Blackwell companions to American History, 552 p.

Le Roux J. et Allouc J. (1988) - Structure de la Champagne crayeuse occidentale et de la Côte champenoise : mise en évidence et analyse de déformations anté et post-thanésiennes, *Géologie de la France*, 4, 33-40.

Léry J. (1916) - *La bataille dans la forêt (Argonne 1915)*, *Impression d'un témoin*, Édit. Librairie Hachette, 127 p.

Lesjean F. (2011) - Les traces archéologiques de la nourriture des combattants du front de Champagne (1915-1918), *Études marnaises*, 126, 179-284.

Lévy A. (1926). *Le Service géographique de l'armée 1914-1918 : les coulisses de la guerre*. Édit. Berger-Levrault, Paris, 74 p.

Linnenkohl H. (1996) - *Vom Einzelschuss zur Feuerwalze. Der Wettlauf zwischen Technik und Taktik im Ersten Weltkrieg*, Édit Bernard et Graefe, 304 p.

Lopez B., Brugeron A., Devau N. et Ollivier P. (2014) - *Vulnérabilité des eaux souterraines de France métropolitaine vis-à-vis des ions perchlorates*, BRGM/RP-63270-FR – Rapport final, 108 p.

Lucand C. (2015) – *Le pinard des poilus : une histoire du vin en France durant la Grande Guerre (1914-1918)*, Édit. Universitaires de Dijon, 170 p.

Lugard G. (1917) - Le creusement mécanique des tranchées et des boyaux, *La Science et la vie*, 33, 16, 143-146.

M

Malinowski A. (2004) – *Le Chemin des Dames- La Caverne du Dragon*, Édit Ysec, 240 p.

- Maquaire O., Ritzenthaler A., Fabre D., Ambroise B., Thiery Y., Truchet E., Malet J.P., Monnet J. (2002) - Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrométrie dynamique à énergie variable : application aux marnes noires de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France), *C.R. Géoscience*, 334, 835-841.
- Marival G. et Buridant J. (2006) - Chemin des Dames, les arbres aussi se souviennent..., *La lettre du Chemin des Dames*, Hors-série 2, 8 p.
- Marre F. (1915) - *Dans les tranchées du front*, Édit. Bloub et Gay, Paris, 61 p.
- Masson-Loodts I. (2014) - *Paysages en bataille, les séquelles environnementales de la Grande Guerre*, Édit. Nevicata, Bruxelles (Belgique), 102 p.
- Moreau F. et Tesson Y. (2013) – Le champagne dans la tourmente, dans Boulanger J.F. (dir), *Reims 14-18, de la guerre à la paix*, Édit La Nuée Bleue, 240 p.
- Maurin J. (2014) – La Grande Guerre : approche historiographique, Acte de colloque des séances du 6 octobre 2014 à l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, 261-268.
- Médard F. (2016) - La Voirie au front, 14-18 *Le Magazine de la Grande Guerre*, 75, 8-21.
- Meerschman E., Cockx L., Monirul Islam 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*, 40, 417-424.
- Michel E. (1932) - *Les dommages de guerre de la France et leur réparation*, Édit. Berger-Levrault, Paris, 656 p.
- Millet E. (1960) – *Le département de la Marne*, Édit. Lorraines, Librairie Frémont, Verdun, 72 p.
- Ministère de la Guerre (1914) - *Instruction sur l'utilisation de la fortification au cours des opérations : novembre 1914*, Ministère de la Guerre-Génie, Bordeaux, 71 p.
- Ministère de la Guerre (1915) - *Aide-mémoire de l'officier du Génie en campagne*, Édit. Paris Imprimerie Nationale, 448 p.
- Ministère de la Guerre (1917) – *Instruction sur le tir d'artillerie*, Édit. Paris Imprimerie Nationale, 212 p.
- Ministère de la Guerre (1938) - *Vade-mecum de l'officier subalterne du génie (sapeur-mineur)* - approbation ministérielle n°7180-3/11-4 du 30 octobre 1934, Imprimerie nationale, Paris, 585 p.
- Morillon M. (2015) – Les épidémies dans les troupes françaises pendant la Grande Guerre, *Médecine et Armées*, 44, 1, 62-68.
- Musso A. (2005) - Des archéologues dans la Grande Guerre, *La Recherche*, 384, 46-48.

N

Neiberg M. (2015) - *Atlas de la première guerre mondiale*, Édit. Histoire et Collections, 176 p.

Note N., Saey T., Gheyle W., Stichelbaut B., Van den Berghe H., Van Eetvelde V., Bourgeois J., Van Meirvenne M. (2016) – *Belgium's World War I front zone today : a sleeping UXO problem characterized by frequency domain EMI*, conference paper EUROEM 2016, 3 p.

O

OOA : Officiers Orienteurs d'Artillerie (1918) – *Manuel de l'officier orienteur d'artillerie*, instruction complète l'instruction du 12 octobre 1916, Imprimerie Nationale, Paris, 276 p.

Olivier L. (2000) - Pour une archéologie de passé récent, *Archéologia*, 367, 24-31.

Ortega Q. et Taborelli P. (2012) – *Organisation spatiale, cadre géomorphologique et impacts géotechniques du réseau de tranchées de la Première Guerre Mondiale dans le secteur de la Caverne du Dragon, le Chemin des Dames, Aisne*, Mémoires de Licence de Géographie, Université de Reims Champagne-Ardenne, 51 p.

P

P. C^{pne} (1918) - Les grands abris souterrains, *Bull. de renseignements du génie*, 6, 3-56.

Parent G.H. (2004) - Trois études sur la Zone Rouge de Verdun, une zone totalement sinistrée. L'herpétofaune, la diversité floristique, les sites d'intérêt botanique et zoologique à protéger prioritairement, *Ferrantia*, 38, 288 p.

Pau B. (2016) - *Le ballet des morts –Etat, armées, familles : s'occuper des corps de la Grande Guerre*, Paris, Édit. Vuibert, 361 p.

Pédelaborde P. (1957) – *Le climat du Bassin Parisien – Essai d'une méthode rationnelle de climatologie physique*, Édit. Marie-Thérèse Génin, Paris, 539 p.

Peschaud M. (1927) - *Les chemins de fer allemands et la guerre*, Charles Lavauzelle & C^{ie}, Paris, 76 p.

Pelletier M. (2002) - *Cartographie de la France et du Monde, de la Renaissance au Siècle des Lumières*, Bibliothèque Nationale de France, Paris, 107 p.

Pézard A. (2016) - *Nous autres à Vauquois*, Édit. Table ronde, 550 p.

Philippot P. (1918) – *Topographie de campagne, croquis perspectifs et panoramiques*, Édit. Berger-Levrault, Paris, 90 p.

Pichard C. (2014) - *La construction de la forme urbaine : approche archéologique et archéogéographique du processus urbain de Reims du début du Moyen-Âge à la ville pré-industrielle*, Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 2 volumes, 480p.

Pommier C. (2014) - *Un milliard d'obus. Au cœur et aux marges de la Grande Guerre*, en écho à l'exposition "Vu du front. Représenter la Grande Guerre" (15 octobre 2014 - 25 janvier 2015), [en ligne], consulté le 15 janvier 2017. <https://www.youtube.com/watch?v=feMadT3g0m4>

Porte R. (2014a) - *Joffre*, Édit. Perrin, 432 p.

Porte R. (2014b) - L'état-major allemand aurait fait imprimer 800 millions de cartes !, *IGN Magazine*, 74, 14-15.

Porte R. (2016) – *Rompre le front ? Novembre 1914-mars 1918. Comment percer les lignes ennemies et retrouver la liberté de manœuvre*, Édit. Soteca, 208 p.

Prentiss A.M. (1937) - Chemicals in war, a treatise on chemical warfare, *Poor man's James Bond*, 2, 169-281.

Protard G^{al}, (1923) - *Les bataillons M.D.*, Revue du génie militaire 1923/01-1923/06, 52 Édit. Berger-Levrault, 309-358.

Puyo J.Y. (2004) - Les conséquences de la Première guerre mondiale sur les forêts et les forestiers français, *Revue Forestière Française*, 6, 573-584.

R

Régnier P.D. (2008) – *Dictionnaire de géographie militaire*, Édit. CNRS, 234 p.

Rolland D. (2008) – 14-18 : quelle archéologie ? *Matériaux pour l'histoire de notre temps*, 3, 91, 51-60.

Rose E.P.F. et Mather J.D. (2012) - *Military aspects of Hydrology*, Geological Society of London, 374 p.

Rousseau Lt de Vaisseau (1931) – *Le rôle des canonnières fluviales en France pendant la Guerre 1914-1918*, session 1930-1931, école de guerre navale, 58 p.

Rouxel-David E., Cordonnier G., Dachy S. (2002) - *Synthèse des études menées sur le bassin-versant du champ captant de Couraux (Marne)*, rapport BRGM, RP-51739-FR, 159 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* 20, 1, 39-44.

Sainéan L. (1915) - *L'argot des tranchées d'après les lettres des poilus et des journaux du front*, Édit. E. De Boccard, 163 p.

Savouret E., Amat J.P., Cantat O., Filippucci P. (2011) - Au temps météorologique de la Grande Guerre, *Climatologie*, 8, 59-77.

Salomon J.-N. et Auly T. (2010) – Impacteurs et astroblèmes : essai de classification et approche géographique, *géomorphologie, relief, processus, environnement*, 16, 1, 3-20.

Saunders N. 2002. Excavating memories: archaeology and the Great War, 1914-2001. *Antiquity* 76, 291, 101-108.

SGA – Service géographique de l'armée (1936) - *Rapport sur les travaux exécutés du 1er août 1914 au 31 décembre 1919. Historique du service géographique de l'armée pendant la guerre*. Imprimerie du Service Géographique de l'Armée, Paris, 431 p.

Shi Y., Zhang P., Wang Y., Shi J., Cai Y., Mou S. et Jiang G. (2007) - Perchlorate in sewage sludge, rice, bottled water and milk collected from different areas in China , *Environment International*, 33, 955 - 962.

Sittler B. et Hauger K. (2007) - Les apports du laser aéroporté à la documentation de parcelles anciens fossilisés par la forêt: l'exemple des champs bombés de Rastatt en Pays de Bade, dans Dupouey J.-L., Dambrine E., Dardignac C., Georges-Leroy M. (Eds): *La mémoire des forêts*, 155-161.

Solard Cpte (1935) - *Fortification : la fortification pendant la guerre 1914-1918*, Ecole d'application d'artillerie, tome 2, 148 p.

Sosson C., Devos A., Lejeune O., Fronteau G. (2006) - Les « creutes » : carrières souterraines entre Reims, Laon et Soissons, *Subterranea*, 138, 50-62.

Sosson C., Devos A., Lejeune O. (2008) - La carrière des Loups de Ciry-Salsogne - Un exemple de creute du Soissonnais, *Subterranea*, 167-168, 32-45.

Soudagne J.P. et Mansuy M. (2009) – *Comprendre la ligne Maginot : Nord, Ardennes, Lorraine, Alsace, Savoie, Dauphiné, Alpes-Maritimes*, Édit. Ouest-France, 140 p.

Souvent P. et Pirc S. (2001) - Pollution caused by metallic fragments introduced into soils because of World War I activities, *Environmental Geology*, 40, 3, 317-323.

Steg J.M. (2013) – *Le jour le plus meurtrier de l'histoire de France : 22 août 1914*, Édit. Fayard, Paris, 250 p.

Stichelbaut B. (2011) - The first thirty kilometers of the western front 1914-1918: an aerial archeological approach with historical remote sensing data, *Archeological Prospection*, 18, 1, 57-66.

Stichelbaut B., Bourgeois J., Saunders N., Chielens P. (2009) - *Images of conflict : Military Aerial Photography and Archeology*, Cambridge Scholars Publishing, Newcastle-Upon-Tyne, 302 p.

Stichelbaut B., Gheyle W., Saey T., Van Eetvelde V., Van Meirvenn M., Note N., Hanne Van den Bergh H., Bourgeois J. (2016) - The First World War from above and below. Historical aerial photographs and mine craters in the Ypres Salient, *Applied Geography*, 66, 64-72.

T

Taborelli P., Chalumeau L., Pierre G., Devos A., Lenoir J., Fronteau G., Lejeune O., Bollot N. (2016a) – Caractérisation et origine des « creuses » : approche sous SIG, exemple en Thiérache, *Physio-Géo*, 10, 135-151.

Taborelli P., Devos A., Dodici M., Desfosses Y., Bollot N., Brénot J. (2016b) - 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*, 8, [en ligne], disponible sur <http://rgh.univ-lorraine.fr/articles/view/66/>

Taborelli P., Devos A., Laratte S., Brenot J., Bollot N., Cancès B., Desfossés Y. (2017a) - 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*, 23, 2, 155-169.

Taborelli P., Devos A., Laratte S., Desfosses Y., Brénot J. (2017b) – Typologie et organisation spatiale des « polémo-formes » de la Grande Guerre révélées par l'outil Lidar et les plans directeur. Application à la Champagne et à l'Argonne, *Revue de Géographie Historique*, 10, [en ligne], disponible sur <http://rgh.univ-lorraine.fr/articles/view/88/>

Thomas G. (2009) - Quand le service de santé faisait « carrières ». La réutilisation des creutes de l'Aisne pour l'activité du Service de santé, pendant le premier conflit mondial, *Médecine et armées*, 37, 3, 283-288.

Thouin H., Le Forestier L., Gautret P., Hubé D., Laperche V., Duparçz S., Battaglia-Brunet F. (2016) - Characterization and mobility of arsenic and heavy metals in soils polluted by the destruction of arsenic-containing shells from the Great War, *Science of the Total Environment*, 550, 658-669.

Trassagnac Dr. (1915) - Notes sur quelques fouilles pratiquées dans les tranchées, *Bulletin de la Société Préhistorique de France*, 12, 7, 331-342.

Triolet J. et Triolet L. (2011) - *La guerre souterraine – sous terre, on se bat aussi*, Édit. Perrin, 337 p.

Trumpolt C. W., Crain M., Cullison G. D., Flanagan S. J. P., Siegel L. et Lathrop S. (2005) - Perchlorate: Sources, uses, and occurrences in the environment, *Remediation Journal*, 16, 65-89.

U

United States Army (1918) - *Conventional signs and abbreviations in use on french and german maps*. Central map reproduction plant, engineer school, 46 p.

Urbansky E., Brown S., Magnuson M., et Kelty C. (2001) - Perchlorate levels in samples of sodium nitrate fertilizer derived from Chilean caliche, *Environmental Pollution*, 112, 299 - 302.

V

Van Den Eeckhaut M., Poesen J., Gullentops F., Vandekerckhove L., Hervás J. (2011) - Regional mapping and characterisation of old landslides in hilly regions using *LiDAR*-based imagery in Southern Flanders, *Quaternary research*, 75, 3, 721-733.

Van Hollebeeke Y, Stichelbaut B, Bourgeois J. (2014) - From landscape of war to archaeological report : ten years of professional World War I archaeology in Flanders (Belgium), *European Journal of Archaeology*, 17, 4, 702–719.

Vatel H. et Boittiaux M. (2008) - *Le Graffiti des tranchées – graffitis, sculptures et autres traces de la Grande Guerre*, Édit. Soissonnais 14-18, 287 p.

Vayssière A., Depret T., Castanet C., Gauthier E., Virmoux C., Carcaud N., Garnier A., Brunstein D., Pinheiro D. (2015) - Etude des paléoméandres holocènes de la plaine alluviale du Cher (site de Bigny, moyenne vallée du Cher), *Géomorphologie, relief, processus, environnement*, 22, 2, 163-176.

Verchot M. (2013) – Le lent retour au pays des prisonniers allemands capturés par l'armée française (1918-1920), *Revue d'Alsace*, 139, 219-234.

Verney J.P. (2003) - La tranchée, une surprise imposée, *14-18 le Magazine de la Grande Guerre*, 14, 6-15.

Vernier F. (2015) – Ces plantes de la guerre que l'on nomme obsidionales, *Études Toulousaises*, 151, 7-19.

Vigreux-Besret C., Mahé A., Ledoux G., Garnier A., Rosin C., Baert A., Joyeux M., Badot P.M, Panetier P., Rivière G. (2015) - Perchlorate: water and infant formulae contamination in France and risk assessment in infants, *Food Additives & Contaminants*, Part A, 32,7, 1148-1155.

Villate R. (1925) - *Les conditions géographiques de la guerre, étude de géographie militaire sur le front français de 1914 à 1918*, Édit. Payot, Paris, 325 p.

Viltart F. (2014) - Berry au Bac : la Cote 108, entre mémoire et oubli, *La Lettre du Chemin des Dames*, 30, 9-19.

Viré A. (1920) - Notes de guerre - Préhistoire et archéologie dans les tranchées d'Artois en 1915, *Bulletin de la Société Préhistorique de France*, 17, 2, 57-64.

W

Weiss J.F. (2016) - *Les souterrains de la Première Guerre mondiale – du creusement au témoignage*, tome 2, Édit. AREESVS, 223 p.

Willig D., Allersmeier C., Dole P., Heyse E., Rose E.P.F. (2016) – Military historical – military geological guide to the Wytschaete/Messines Ridge Ypres (Belgium), *Schriftenreihe Geoinformationsdienst der Bundeswehr*, BGIC, 4 p.

Winkler G^{al}. (1929) - A la Cote 108 (près de Berry-au-Bac) de novembre 1914 à février 1916, *Revue du Génie Militaire*, 65, 249-268.

Tables des figures

Fig.0. 1: Cartographie des mouvements de rocares français entre le 5 et le 7 septembre 1914 dans les Marais de Saint-Gond (Source : Damien et al., à paraître).	25
Fig.0. 2: Nombre de morts français par mois pendant la Grande Guerre.	26
Fig.0. 3: Les différentes lignes de front de la Grande Guerre en fonction de la géologie dans le Nord et l'Est de la France.....	27
Fig.0. 4: Ligne de front de la Grande Guerre en fonction de la géologie en Champagne-Ardenne.....	28
Fig.0. 5: Écart à la moyenne (604 mm) des précipitations à Épernay de 1821 à 1992.	29
Fig.1.1: Carte du secteur de Châlons-en-Champagne de Trudaine, Cassini et d'État-Major	36
Fig.1.2: Organisation du service géographique de l'Armée en 1918 (SGA, 1936)	37
Fig.1.3: A - Extrait du plan-relief du secteur de Beine, Nauroy et Moronvilliers (Photo : Devos A., Musée de la Grande Guerre de Meaux). B – Plan-relief de la région de Cernay-en-Dormois sur la zone de front (Source : BDIC VAL 111/040).	40
Fig.1.4: Tableau d'assemblage des plans directeurs et explication du système de coordonnées (extrait du plan directeur de Reims – 15 juillet 1918 ; SGA, 1936, Combaud et al., 2016).....	42
Fig.1.5: Détermination des coordonnées hectométriques d'un lieu sur un plan directeur (Ex : point B ; d'après GQGA-EM, 1916 ; 1917 ; Bouchon, 1917 ; 1918, Combaud et al., 2016)	43
Fig.1.6: Objectifs d'artillerie de nœud ferroviaire (1022), de batterie casematée (0621) et de nœud de tranchées (0702), extrait du plan directeur de Berry-au-Bac du 26 mars 1917.....	44
Fig.1.7: Réalisation d'un relevé topographique avec une planchette topographique près de Regniéville-en-Haye en Avril 1917 (Source : BDIC VAL 167/018)	45
Fig.1.8: A – Planchette pour la réalisation de croquis perspectifs. B – Jumelle à graduation micrométrique. C – Transport de la planchette par un topographe. D – Réalisation d'un croquis perspectif en position debout. E - Réalisation d'un croquis perspectif en position assise (Source : Philippot, 1918).....	46
Fig.1.9: Les différentes phases de construction du croquis perspectif (Source : OAA, 1918)	48
Fig.1.10: A – Ballon captif gonflé à l'hélium à Bellemagny en 1916 (Source BDIC : VAL 321/098). B – Avion de reconnaissance Brault MF 11 équipé d'un appareil photographique et d'une mitrailleuse (Source : Photo de Marie Yvonne Bigeon-Gatelet).	49
Fig.1.11: A – Atelier de photographie et séchage des tirages (Source : Carnet de Charles Hallo). B – Photographie aérienne oblique du secteur de Souain (Source : Collection personnelle).	51
Fig.1.12: Comparaison d'un extrait de plan directeur de Reims en Juillet 1918 et de la photographie aérienne du secteur du fort de la Pompelle (collection Musée de la Pompelle, ville de Reims).....	52
Fig.1.13: A – Abri camouflé d'artillerie dans le secteur d'Hermonville. B – Abri casematé d'un canon de 65 mm près de Vienne-le-Château en Argonne en 1916 (Source : BDIC VAL 130). C : Canon de 340 mm lourd sur voie ferrée camouflé à Châlons-sur-Vesle en 1917 (So Source : BDIC VAL 065). D – Voie ferrée masquée par une haie artificielle à Sept-Saulx en 1916 (Source : BDIC VAL 081). E – Route camouflée à Merfy en 1917 (Source : BDIC VAL 075). F – Pont camouflé sur la rivière Aisne à Pont-Arcy en 1917 (Source : BDIC VAL 018).....	53
Fig.1. 14: A – Char d'assaut en bois à Pontfaverger en 1918 (Source : BDIC VAL 078/099). B – Faux canons de bois de 155 mm près de la ferme des Wacques à Souain en 1916 (Source : ECPAD). C : Faux camp d'aviation et avion factice en bois à Lunéville en 1916 (Source : BDIC VAL 150/006). D – Fausse ligne de chemin de fer en bois à Chenay en 1917 (Source : BDIC VAL 065/165). E – Atelier de camouflage militaire dans le cirque de Châlons-sur-Marne en 1916 (Source : BDIC VAL 090/115).	55

Fig.1.15: A - Photographie d'interrogatoire d'un officier allemand à Clermont-en-Argonne en Avril 1918 (Source BDIC : VAL 275/082). B – Photographie d'interrogatoire de prisonnier devant un plan directeur à Roesbrugge en novembre 1915 (Source BDIC : VAL 498/108).	56
Fig.1.16: Plan directeur de Reims du 15 juillet 1918.....	57
Fig.1.17: A - Plan directeur ordinaire au 1/20 000 de Reims du 12/10/1917. B – Plan directeur avec organisations alliées au 1/20 000 de Reims du 15/07/1918.	59
Fig.1.18: A - Extrait du plan directeur de Cernay-en-Dormois au 1/20 000 du 19 septembre 1918. B - Extrait du plan directeur de Ripont au 1/10 000 du 6 janvier 1918. C - Extrait du plan directeur de Maisons de Champagne au 1/5 000 du 8 mars 1918.....	62
Fig.1.19: Tableau d'assemblage des plans directeurs au 1/20 000 sur le front occidental d'après le tableau d'assemblage des plans directeurs du 15 mars 1919. Les numéros correspondent aux noms des feuilles en annexe 1.1.....	63
Fig.1.20: Tableau d'assemblage des plans directeurs au 1/20 000, 1/10 000 et 1/5 000 en Champagne-Ardenne, numérisés et utilisés dans la thèse.	64
Fig.1.21: A – Distribution par date d'édition des plans directeurs numérisés. B - Distribution du linéaire de front cartographié selon l'échelle des plans directeurs numérisés.	64
Fig.1.22: Nombre annuel des plans directeurs imprimés (d'après le SGA, 1936).....	66
Fig.1.23: A - Utilisation d'un plan directeur à grande échelle lors de l'interrogatoire d'un prisonnier allemand (Source : ECPAD France, Maurice Boulay). B - Plans directeurs affichés aux murs du quartier général de la 14ème Division d'Infanterie à Chenay (Marne) en juin 1917 (Source : BDIC VAL 065/139).	67
Fig.1.24: A – Crayon rouge-bleu pour annoter les plans directeurs (Photo A. Devos, Mémorial de Verdun). B – Extrait du plan directeur au 1/10 000 de Sommepy (Marne) du 10 mars 1917.	68
Fig.1.25: Légende des signes conventionnels des plans directeurs (GQGA-EM, 1918a, Combaud et al., 2016)	70
Fig.1.26: Légende des travaux de défense français et allemands (sources : US Army, 1918 ; Army War College, 1917 ; GQGA-EM, 1916, Combaud et al., 2016).....	71
Fig.1.27: Signes conventionnels complémentaires à employer pour toutes les inscriptions manuscrites à porter sur les plans directeurs ou cartes diverses utilisés dans les États-Majors (sources : US Army, 1918 ; Army War College, 1917 ; GQGA-EM, 1916, Combaud <i>et al.</i> , 2016)	73
Fig.1.28: Suite.....	74
Fig.1.29: A – Toponyme de mammifères sur l'extrait du plan directeur ordinaire au 1/20 000 de Tahure du 29 mars 1917. B – Toponymes liés aux troupes coloniales et de petits bois sur l'extrait du plan directeur ordinaire au 1/20 000 de Tahure du 29 mars 1917.....	76
Fig.1.30: A – Extrait de carte allemande (Stellungskarte) au 1/25 000 du secteur d'Aubérive. B – Extrait du plan directeur au 1/20 000 de Sainte-Marie-à-Py du 16 septembre 1918.	77
Fig.1. 31: Extrait de carte britannique au 1/20 000 de Lony Tree du 22 août 1918 (Source : Mac Master University).	78

Fig.2. 1: Dispositifs de défense allemands tirés d'une instruction sur le service du pionnier dans la guerre de siège en 1913 (sources : Ministère de la Guerre, 1915).	86
Fig.2. 2: A - Creusement d'un « trou d'homme » et d'élément de tranchée par deux tirailleurs (Source : GQG, 1915). B – Photographie aérienne de trous d'hommes en Champagne (Source : L'illustration). C – Soldats creusant leur trou individuel dans l'Aisne en 1918 ((Source : IWM q6667).	87
Fig.2. 3: A – Éléments de tranchées pendant la Première Bataille de la Marne dans l'Aisne (Source : Phot-express). B – Mitrailleuses installées par une unité de dragons dans des éléments de tranchées (Source : BNF). C - Eléments de tranchées sur crête militaire à Borville en Lorraine (Source : extrait du JMO 26N 012 063 1). D – Photographie d'éléments de tranchées allemands de septembre 1914 en diagnostic archéologique INRAP à Champigny (51). (Cliché : Taborelli P.).....	89

Fig.2. 4: Utilisation des masques naturels, tas de pierres (A), arbre (B), surhaussement du parapet (C), profils réglementaires de tranchées pour tireur assis (D), à genoux (E) et debout (F) en 1914. (Sources : Ecole du Génie 1914).....	91
Fig.2. 5: A - Profil réglementaire d'une tranchée en terrain ordinaire vers 1915. B – Photographie d'un boyau de circulation dans la craie de Champagne à Courcy en 1915 (Source : VAL 066/072). C – Tranchée en fascines et en gabions à la Harazée en 1915 (Source : VAL 013/051).....	92
Fig.2. 6: A - Organisation ternaire et linéaire du réseau de défense. B – Organisation ternaire et cellulaire du réseau de défense (Source : Solard, 1935). C – Extrait d'un plan directeur au 1/5 000 avec réseau de défense cellulaire de 1916 (Centre M, L, K, E, Ouvrage Morel et Davoust) (Source : Mémoires des Hommes : 26 N 528 010 7)	94
Fig.2. 7: Évolution de l'organisation du front de mars 1915 à septembre 1918 dans le secteur de Souain (Marne) d'après les plans directeurs de Sommepy du 1 novembre 1915 et de Tahure du 31 mai 1918 et du 16 septembre 1918.	95
Fig.2. 8: Evolution des réseaux de défense de 1914 à 1918 (Source : Solard, 1935).	96
Fig.2. 9: A – Photographie d'une queue de cochon (Cliché : Devos A.). B – Chevaux de frise sur le site de la Main de Massiges (Cliché : Taborelli P.). C – Hérisson sur le site de la Main de Massiges (Cliché : Devos A.). D – Photographie des restes d'un réseau brun (Cliché : Devos A.).....	98
Fig.2. 10: A – Pieux aiguisés (GQGA, 1915). B – Photographie de chausse-trape au musée de Meaux (Cliché : Devos A.). C – Piège en lacet (GQGA, 1915). D – Photographie d'un « piège à loup » (Cliché : Bigot JJ, INRAP). E –Fougasse-pierrier chargée à la mélinite (GQGA, 1915).....	99
Fig.2. 11: Réseaux de fils de fer allemands (figurés avec des croix bleues) sur l'extrait du plan directeur au 1/5 000 de la Cote 193 du 23 avril 1917.	100
Fig.2. 12: Potentialités militaires d'une croupe topographique face à l'ennemi (d'après le GQG, 1915, et Brooks, 1920).....	102
Fig.2. 13: Profils transversaux réglementaires de tranchée (A), de boyau (B) en terrain ordinaire, de boyau en terrain humide (C) et rocheux (D), et de tranchée en terrain rocheux (E) (sources : Solard 1935).	104
Fig.2. 14: A : Plan d'une tranchée en traverse (source : GQGA-EM, 1917). B – Photographie aérienne du secteur de la Pompelle des différents tracés de tranchées dans la craie de Champagne (Source : Collection fort de la Pompelle, Musée de Reims). C – Dispositif de fausses tranchées lors d'attaques ennemies (Source : GQGA, 1915).	106
Fig.2. 15: Machines à creuser les tranchées, excavieuses, ou locofouilleuses, A - Vue avant de l'excavatrice automobile dans la craie de Champagne (Source : IWM). B - Machine allemande à godets (San Diego Museum). C - Excavatrice électrique Legrand. D - Excavatrice américaine à chenilles (Source : IWM), E - Vue arrière de l'excavatrice française dans la craie en action et entreposée dans un village (Source : BNF gallica). F - Photographie d'une tranchée de communication téléphonique en diagnostic archéologique INRAP à Sillery (51), (Cliché : Devos A.).	108
Fig.2. 16: A – Prise de vue aérienne par drone de la fouille de Cernay-les-Reims du « secteur 10 » et structures archéologiques. B – Prise de vue aérienne par drone de la fouille de Cernay-les-Reims du « secteur 10 » et réseaux de défense français (tranchées, boyaux et latrines).....	110
Fig.2. 17: Plan des fouilles allemandes de 1915 et du tracé des tranchées allemandes dans le secteur de « la Héronnière » à Bucy-le-Long (Source : Demoule, 2009).	112
Fig.2. 18: Principe de zonage du front durant la Grande Guerre d'après l'arrêté du 1er janvier 1916 et l'arrêté du 15 mars 1917 ; Troussaint, 1917 et Amat, 2015.....	114
Fig.2. 19: Zonage du front occidental au 15/11/1914	116
Fig.2. 20: zones d'action des Armées belge, britannique, française et allemande au 1er novembre 1916.....	117
Fig.2. 21: A – Organisation des unités en Champagne le 15 novembre 1914. B – Organisation des unités en Champagne le 16 septembre 1915. C – Organisation des unités en Champagne le 17 octobre 1916.....	118

Fig.2. 22: Carte du « sous-secteur » de Tahure de la 119^{ème} brigade, d'après le plan directeur de Tahure au 1/20 000 et le JMO du 1^{er} octobre 1915 au 14 mars 1917 (26 N010 0076)..... 119

Fig.3.1: Extrait de plan directeur des entités digitalisées : A – Tranchée. B – Boyau. C – Chemin de fer. D – Camp. E – Ouvrage. F – Observatoire. G – Batterie d'artillerie.....	126
Fig.3.2: Canevas des plans directeurs sur la zone de front de Champagne-Ardenne.....	127
Fig.3.3: Cartographie des réseaux de défense alliés et allemand en Champagne-Ardenne en 1918 ...	128
Fig.3.4: Organisation des réseaux de défense alliés et allemands à l'hiver 1918 et coupe géologique dans le secteur de Berry-au-Bac.....	131
Fig.3.5: Situation géologique et géomorphologique de Reims et ses environs.....	133
Fig.3.6: Carte des réseaux de défense de la région de Reims en 1918 (avant l'offensive allemande du 27 mai).....	134
Fig.3.7: Carte des réseaux de défense de la région de Reims en 1918 (avant l'offensive allemande du 27 mai).....	135
Fig.3.8: A - Vue en relief des réseaux de défense dans le secteur de Reims en juillet 1918. B - Rôle des conditions topographiques sur le réseau de défense à l'est de Reims en juillet 1918.....	137
Fig.3.9: Carte de situation des Monts de Champagne.....	138
Fig.3.10: Carte des réseaux de défense dans les Monts de Champagne en 1918.....	140
Fig.3.11: Carte des réseaux de défense autour de Tahure en 1918.....	142
Fig.3.12: Carte des réseaux de défense en relief sur la « Main de Massiges » après les combats de Septembre 1915.....	144
Fig.3.13: Inscription géomorphologique des lignes de front en Champagne sèche, Vallage d'Aisne et en Argonne.....	145
Fig.3.14: Réseaux de défense en Champagne sèche, Vallage d'Aisne et Argonne. Plan directeur : (1) Tahure, (2) Somme-Suippe, (3) Cernay-en-Dormois, (4) Valmy, (5) Forêt d'Argonne et (6) Sainte-Ménéhould.....	146
Fig.3. 15: Coupe géologique à travers les réseaux de défense de Champagne sèche (A-B), Vallage d'Aisne (C-D) et d'Argonne (E-F) avec densité surfacique et ratio boyau/tranchée.....	149
Fig.3.16: Extrait du plan de défense au 1/2 500 du village de Cormicy	151
Fig.3.17: A - Carte postale allemande de l'occupation du village de Saint-Juvin devant son église (08) (Source : collection personnelle). B – Église de Saint-Juvin bombardée en automne 1918 (Source : VAL 048/033).....	152
Fig.3.18: Position chronologique du front de la Grande Guerre dans le secteur de Reims (Dodici, 2015 d'après Guides illustrés Michelin, 1919).....	153
Fig.3.19: Exemple du fort de Brimont du système Séré de Rivières : A - Photographie aérienne oblique (Source : collection du Fort de la Pompelle – Ville de Reims), B - Photographie aérienne (Source : collection du Fort de la Pompelle – Ville de Reims), C - Plan du fort (d'après Barros, 1997), D - Extrait de plan directeur (Source : plan directeur de Brimont du 20/04/1918).....	155
Fig.3.20: Le Fort de la Pompelle dans le réseau de défense.....	156
Fig.3.21: A – Extrait du plan directeur de Berry-au-Bac Sud-Est au 1/10 000 au 1 ^{er} avril 1918 du secteur de Courcy. B - Extrait du plan directeur de Berry-au-Bac Sud-Est au 1/10 000 au 1 ^{er} avril 1918 du secteur de Loivre.....	158
Fig.3.22: Ponts et passerelles dans les réseaux de défense de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.....	159
Fig.3.23: Barrage construit par les allemands pour inonder la plaine près d'Attigny (A) et Vouziers (B).....	160

Fig.3.24: A : Zone de tir des canonniers sur le canal de l'Aisne à la Marne. Canonnière en action sur le canal latéral à l'Oise (VAL : 272/048). C – Canonnière sur le canal de l'Aisne à la Marne (VAL : 081/082).	161
Fig.3.25: Structuration du front à Sillery dans la ripisylve de la Vesle.	163
Fig.3. 26: Tranchées et boyaux dans les pinèdes de Champagne sèche sur l'extrait du plan directeur de Ste-Marie-à-Py du 13 juillet 1918 au 1/20 000.	163
Fig.3. 27: Extrait de plan directeur au 1/20 000 de Sainte-Marie-à-Py du 1/06/1918 de noms de tranchées et boyaux: A – Nom de soldat (Girault, Claude, Ducrot) et nom de lieu (Mans, Laval). B – Nom arbitraire (Tiburce, Eutrope). C – Nom de tranchée allemande arbitraire (Danube).	165
Fig.3.28: Photographie (IWM) et extrait du plan directeur de Ste-Marie-à-Py au 1/20 000 du 1/06/1918 du boyau Chanzy Ouest.	166
Fig.3.29: Typologie des noms de tranchées et boyaux de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.	167
Fig.3. 30: Distribution statistique de la typologie en groupes des noms de tranchées de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.....	168
Fig.3.31: Distribution statistique de la typologie en sous-groupes des noms de tranchées de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.....	168
Fig.3.32: Distribution statistiques de la typologie en groupe, sous-groupe, particularité et sous-particularité des noms de tranchée et boyau de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne.	169
Fig.3.33: Carte des tranchées en Champagne-Ardenne selon leur typologie.....	170
Fig.3.34: A : Extrait du plan directeur du Bois Sabot du 14 septembre 1915 au 1/5 000. B – Fiche du soldat Cano du 247ème Régiment d'Infanterie.....	171
Fig.3.35: Carte de l'emplacement des observatoires allemands en Champagne-Ardenne.....	172
Fig.3.36: Carte de l'emplacement des batteries d'artillerie allemandes avant l'attaque de mai 1918.	173
Fig.3.37: A – Épis de tir sur l'extrait du plan directeur de Jonchery-sur-Vesle au 1/20 000 du 23 septembre 1918. B – Artillerie lourde sur voie ferrée en action à Muizon (Source : VAL 082/052)..	174
Fig.3.38: Extrait du plan directeur de la forêt d'Argonne du 1 ^{er} mars 1918 des emplacements de batteries d'artillerie allemandes et leurs objectifs.	175
Fig.3.39: Carte des voies ferrées avant le début du conflit en Champagne-Ardenne d'après la carte d'État-Major.....	176
Fig.3.40: Carte des voies ferrées allemandes et françaises construites pendant le conflit.	177
Fig.3.41: A – Acheminement du fourrage et bois par voie de 0,60 m à Senuc en Argonne (Source : collection personnelle). B - Ravitaillement en munitions par traction équine à Verzy en juillet 1916 (Source : BDIC VAL 083/074). C – Voie de 0,60 dans le camp du Borrieswald en Argonne (Source : collection personnelle). D – Locomotive devant la gare de Saint-Juvin en Argonne (Source : collection M. Coistia).	179
Fig.3.42: Campement et centre d'instruction près de Semide sur un extrait du plan directeur d'Attigny au 1/20 000 du 17 août 1918.	180
Fig.3. 43: Exemple de forages (rond rouge) au centre de réduits de résistance en Champagne crayeuse (secteur de Prunay, plan directeur de Prunay du 6 juillet 1917).	182
Fig.3.44: A - Poste de service des eaux près de Baleycourt (55) (Source : BDIC VAL 182/009). B - Forage d'un puits artésien par des sapeurs du Génie près de Monchiet (62) (Source : BDIC VAL 294/197). C et D - Utilisation de sable de rivière pour filtration des eaux d'un cours d'eau et de tonneaux remplis de graviers, sable fin et charbon de bois pour leur purification (Ecole du Génie, 1914). E - Wagon citerne en forêt de Parroy (55) (Source : BDIC VAL 155/074). F - Voiture filtre du Touring Club de France à Dugny (55) en 1916 (Source : BDIC VAL 190/024).....	183
Fig.3.45: Carte des forages (motopompe et pompe à main) en Champagne crayeuse, humide et en Argonne d'après le plan directeur de Prunay du 6 juillet 1917.....	184
Fig.3.46: Emprise des fouilles et diagnostics archéologiques INRAP dans les réseaux de défense autour de Reims.	186

<u>Fig.3. 47: Emprise de la fouille archéologique « Le bas de la Noue Saint-Rémi » à partir de la base de données digitalisées et de l'extrait du plan directeur de Reims du 15 juillet 1918.</u>	187
<u>Fig.3.48: Croisement entre les tranchées digitalisées à partir des plans directeurs et les tranchées recoupées lors de la fouille archéologique de « Le bas de la Noue Saint-Rémi ».</u>	188
<u>Fig.3. 49: Emplacement de la découverte des deux soldats russes dans les réseaux près de la commune de Cormicy.</u>	189
<u>Fig.3. 50: A – Photographie de la croix orthodoxe et des boutons des soldats russes de la fouille de Cormicy (Cliché : Desfossés Y.). B – Sépulture d'un des soldats russes de la fouille de Cormicy (Cliché : Desfossés Y.).</u>	190
<u>Fig.3. 51 Tableau d'assemblage des plans directeurs du front ouest intégré au site internet Géoportail.</u>	190
Fig.4.1: Schéma de fonctionnement de l'outil Lidar.....	200
Fig.4.2: Réseaux de défense en Champagne-Ardenne et emprise des prospections Lidar.	201
Fig.4.3: Typologie des « polémo-formes » de la Grande Guerre.....	204
Fig.4. 4: A – Image Lidar du fort de Nogent l'Abbesse. B – Image Lidar de la batterie de Berru. C – Image Lidar de la vigie de Berru. D – Image Lidar du fort de Witry. E – Image Lidar du fort de Brimont. F – Image Lidar du cran de Brimont.....	205
Fig.4. 5: Interprétation de l'image Lidar du fort de Brimont.	207
Fig.4.6: Interprétation de l'image Lidar du fort de Witry.	208
Fig.4.7: Interprétation de l'image Lidar du fort de Nogent-l'Abbesse	209
Fig.4.8: Image Lidar des cratères de mines coalescents, alignés et isolés de la Cote 108 à Berry-au-Bac.	210
Fig.4. 9: Typologie des réseaux de défense (tranchées et boyaux).	212
Fig.4. 10: Emplacement d'une batterie d'artillerie de 4 canons dans le Massif de Saint-Thierry (Source : Ministère de la Guerre, 1915).	213
Fig.4.11: Anatomie de l'obus (cliché : Devos A. – Musée de la Grande Guerre à Meaux).....	214
Fig.4. 12: Paramètres de formation d'un trou d'obus.	215
Fig.4. 13: Paramètres de formation d'un trou d'obus en fonction de l'angle de pénétration du projectile.	217
Fig.4.14: Graphique du diamètre des trous d'obus et des terres déblayées en fonction du calibre (d'après Ministère de la Guerre, 1917).	218
Fig.4.15: Image Lidar d'un tir de destruction sur une batterie d'Artillerie française dans le Massif de Saint-Thierry.	219
Fig.4.16: Extrait de plan directeur d'un tir « d'encagement » près de Lacroix-sur-Meuse (Source : Mémoires des Hommes du 83ème Régiment d'Infanterie, 26N665008053).....	220
Fig.4.17: Image Lidar de l'organisation de cratères d'obus associés à un tir de barrage.....	221
Fig.4.18: Image Lidar d'un modelé en peau d'orange sur la Cote 108 de Berry-au-Bac.	221
Fig.4.19: Photographie d'obus « foirés » dans les sables de la butte de Brimont (Cliché : Devos A.).	223
Fig.4.20: Trace morphologique des passerelles dans un barriban d'Argonne.	224
Fig.4. 21: A - Image Lidar du camp militaire français « Guyard » près du village de La Harazée en Argonne ; B - Image Lidar du camp militaire allemand du Borrieswald près d'Apremont-sur-Aire en Argonne.....	226
Fig.4.22: Image Lidar des tranchées et des boyaux reliés aux carrières souterraines dont les versets drapent le front de la côte d'Île-de-France (Hermonville-Mont Chatté).....	227
Fig.4.23: Site de désobusage sur la Cote 108 en photographie aérienne de 1929 et en image Lidar...228	
Fig.4. 24: Organisation spatiale des formes de la Grande Guerre dans la géographie de la zone de front.....	230

Fig.4. 25: Corrélation des calibres en fonction des portées de canons, mortiers et obusiers d'artillerie français et allemands.....	231
Fig.5.1: A - Dualité des parcelles forestières et cultivées en image Lidar près de Brimont. B - Schéma de la conservation des « polémo-formes » de la Grande Guerre sous forêt (Source : ONF, 2014).	236
Fig.5.2: Carte de la zone rouge sur le front Ouest (Source : d'après Michel, 1932).	237
Fig.5.3: Graphique de l'évolution de la zone rouge.....	238
Fig.5.4: Graphique de l'évolution des surfaces nettoyées, des tranchées comblées et des réseaux de fil de fer enlevés de 1920 à 1927 (Laval, 1927).	239
Fig.5.5: A - Photographie du remblaiement des tranchées par des prisonniers de guerre (Source : ECPAD). B - Photographie de la mécanisation du comblement des réseaux de défense (Source : BNF Gallica).....	239
Fig.5.6: Évolution du linéaire de tranchées sur le site de la Main de Massiges depuis 1918. A - Linéaire de tranchées visible sur le plan directeur de Ripont du 6 janvier 1918. B - Linéaire de tranchées visible sur photographie aérienne en 2001. C - Évolution du linéaire de tranchées de 1918 à 2015.....	241
Fig.5.7: Emplacement de la zone de fouille et du « secteur 10 » dans le réseau de défense autour de Reims.	242
Fig.5. 8: A - Bloc diagramme des paysages à graviers de craie (d'après Laurain, 1995). B – Photographie de poche de cryoturbation sur le « secteur 10 » (Source : Cliché : Taborelli P.). C – Sol strié en vue drone sur le « secteur 10 ». D – Sol strié en diagnostic archéologique à Puislieux (Source : Cliché Devos A.).....	243
Fig.5.9: Principe de la pénétrométrie dynamique (d'après Maquaire et al., 2002) en zone de fouille archéologique sur le « secteur 10 » du « Bas de la Noue Saint-Rémi » (Source : Cliché Devos A.). .	244
Fig.5.10: Prise de vue aérienne par drone de la fouille de Cernay-les-Reims du « secteur 10 » et réseaux de défense français (tranchées, boyaux, latrines et trous d'obus).	245
Fig.5. 11: Profils pénétrométriques à travers la tranchée 5199.....	247
Fig.5.12: Profils pénétrométriques à travers le boyau 5004.....	247
Fig.5.13: Profils pénétrométriques à travers le cratère d'obus 5037.....	248
Fig.5.14: Situation et interprétation du secteur de la Cote 108. A - Image Lidar brute. B - Plan directeur et image Lidar brute. C - Formes (Tranchées, boyaux, cratères de mines) nivelées et persistantes. D - Densité des entonnoirs d'obus.....	250
Fig.5.15: Carte de situation de la zone de fouille dans le réseau de défense (Brenot et al., 2017)	252
Fig.5.16: Coupe transversale dans une tranchée comblée partiellement en Argonne (Cliché : Brenot J.).	255
Fig.5.17: A - Carte du réseau de tranchées à partir de la digitalisation des plans directeurs. B – Carte des tranchées à partir du traitement automatique du Lidar (Brenot et al., 2017).	256
Fig.5.18: Distribution spatiale des trous d'obus sur la zone d'étude (Brenot et al., 2017).	257
Fig.5. 19: Carte de situation de la zone d'étude dans le réseau de défense.....	260
Fig.5.20: Méthodologie de la détection automatique et de la caractérisation morphométrique.....	262
Fig.5. 21: A – Carte topographique de l'IGN. B – Image Lidar brute. C – Résultat de la digitalisation à partir des plans directeurs. D – Carte des anomalies topographiques (TPI). E – Carte des tranchées, positions d'artillerie et cantonnements. F – Densité de tranchées préservées. G – Densité des impacts et portées des canons français à partir d'une position reconnue.	263
Fig.5. 22: Répartition spatiale des tranchées et longueur linéaire préservée selon plusieurs zones tampons (100, 200 et 500 m, exprimée en m/ha).	265
Fig.5.23: Répartition spatiale des impacts d'obus préservés à partir d'une zone tampon de 100 m....	267
Fig.5.24: Distribution statistique des entonnoirs d'obus en fonction de leur diamètre.....	268
Fig.5.25: Croisement de la banque de données des réseaux de défense et du couvert forestier actuel.	269
Fig.5. 26: « Polémo-paysage » fossilisé de 1919 à aujourd'hui.....	272

Fig.6.1: Cartographie des systèmes de mines sur le front ouest de la Grande Guerre	278
Fig.6. 2: A - Entonnoirs de mines dans le no man's land, extrait de plan directeur anglo-saxon, secteur de Givenchy. B – Entonnoirs de mines sur l'ancien tracé de la ligne de front au Nord de Perthes-lez-Hurlus (Extrait du plan directeur de Tahure de 1918).	279
Fig.6. 3: A – Creusement d'une galerie de mine en Argonne B – Creusement d'un rameau de combat par les pieds (Source : Dessin de Andy Gammon). C – Drague de mine. D – Niveau de maçon. E – Niveau en demi-cercle. F – Chariot de mine (École des mines, 1914).	281
Fig.6. 4: A – Carte allemande au 1/1 000 du 24 septembre 1918 des réseaux souterrains dans le secteur de la Cote 285 en Argonne (Source : Association Deutsches Erinnerungskomitee Argonnerwald 14-18). B – Plan directeur au 1/1 000 du 23 septembre 1917 des réseaux souterrains dans le secteur de la Cote 285 en Argonne (Source : Association Deutsches Erinnerungskomitee Argonnerwald 14-18).	282
Fig.6. 5: A – Bourrage par sacs à terre d'un fourneau de mine en Argonne (Source : BDIC VAL 113/103). B – Allumage de la mèche lente du fourneau en Argonne (Source : BDIC VAL 113/104). C – Ecoute des travaux de mines de l'ennemi par un officier du génie en Argonne (Source : BDIC VAL 113/099).	284
Fig.6. 6: A - Indices morphométriques d'un cratère de mines (d'après le Ministère de la Guerre, 1938). B - Relation entre la charge explosive du fourneau et le rayon de l'entonnoir de mine selon la nature du sol.	286
Fig.6. 7: A – Blocs décimétriques dans le fond et sur les flancs d'un cratère aux Eparges (Source : cliché Taborelli P.). B – Blocs décimétriques sur le bourrelet d'un cratère aux Eparges (Source : cliché Taborelli P.).	287
Fig.6. 8: Planche photographique diachronique de l'explosion d'une mine à Beaumont-Hamel dans la Somme en 1916 (ECPAD) et d'une mine en Syrie en 2014 (You Tube). A - Avant l'explosion. B - Explosion soulèvement du sol. C - Gerbe verticale avec trainées d'éjectas blocs projetés ou « bombes ». D - Ascension maximale de la gerbe de terre et de roche. E - Retombées des éjectas et particules fines avec panache de poussières au sol.	288
Fig.6. 9: Planche panoramique de cratères de mines en 2015 en Champagne-Ardenne. A : Cratère de mine en Argonne (cliché : Devos A.) ; B : Cratère de mine à Massiges (cliché : Devos A.) ; C : Cratère de mine dans le camp militaire de Suippes (cliché : Taborelli P.).	289
Fig.6. 10: Coupe de la butte de Vauquois (d'après les Amis de Vauquois, 2004).	291
Fig.6. 11: Vue panoramique de cratères de mines coalescents à Vauquois (Cliché : Sinet E.).	291
Fig.6.12: Image Lidar de la Cote 108 et des différents stades de formation des cratères de mines.	292
Fig.6. 13: Distribution temporelle des explosions de mines et camoufflets sur le site de la Cote 108 (Winkler, 1929 ; Laforgerie et Weiss, 2013).	294
Fig.6. 14: A - Plan directeur du 1er mai 1918 sans le méga-cratère. B - Plan directeur du 28 septembre 1918 avec le méga-cratère. C - Photographie aérienne oblique du 27 mai 1918 sans le méga-cratère (Collection Schneider). D - Photographie aérienne du 31 mai 1918 avec le méga-cratère (Source : Collection Viltart).	295
Fig.6. 15: Morphométrie et interprétation des conséquences de l'explosion du « méga-cratère » de la Cote 108.	296
Fig.6.16: A - Carrière de Acy-le-Haut (Source : Cliché Sosson C.). B - Carrière d'Hermonville (Source : Cliché Devos A.). C – Évolution de l'épaisseur du Lutétien d'Ouest en Est (d'après Devos et al., 2015a).	298
Fig.6. 17: Evolution de l'exploitation souterraine du Lutétien d'Est en Ouest du Pays rémois au Soissonnais et Valois (Devos et al., 2010).	299
Fig.6. 18: A – Chaînage du fumier froid. B – Traces des meules dans la carrière de Marzilly (Source : Cliché Devos A.). C – Montage des meules et lardage. D – Gobetage des meules avec de la terre et du calcaire. E – Réservoir pour l'arrosage des meules dans la carrière de Roucy (Source : Cliché Devos A.). F – Cueillette des champignons.	300
Fig.6. 19: Localisation des carrières dans la zone de front du 5 avril 1917.	301

Fig.6. 20: Coupe schématique de l'intégration des carrières souterraines dans les réseaux de défense	302
Fig.6. 21: Effondrement de ciels des creutes du Lutétien suite à l'obusage par un obus de 400 mm. A : en vue aérienne à Fruty (in Villate, 1925), B : en surface (Le Miroir n°208, 18 novembre 1917, p.7) et C : au fond de la carrière (Le Miroir n°212, 16 décembre 1917, p.14).....	303
Fig.6. 22: A : Plan 3D de la Caverne du Dragon avec son réseau de fracturation (Source : Ortega et Taborelli, 2012). B - Emprise de la Creute du Dragon en hachuré rouge entre les premières lignes françaises (rouge) et allemandes (en bleu) (JMO du 403ème RI, 26N766025). C – Photographie de l'entrée sud allemande effondrée (Cliché : Trimoreau A.).	305
Fig.6. 23: A : Creusement au marteau-perforateur d'une galerie d'accès à Hermonville (sources : BDIC VAL 072055), B : Groupe électrogène fournissant l'électricité aux carrières d'Hermonville (sources BDIC VAL 072049), C : Ventilateur central de la carrière Saint-Victor situé à l'aplomb d'un puisard vers 1918 (source : Bulletin du renseignement du génie, 1918), D : Le même ventilateur sous un cône de soutirage des limons de plateaux en 2011 (Cliché : Devos A.), E : Localisation des cheminées d'aération forcées dans la creute de Bernagousse, (source : anonyme, 1923).F : Signalétique dans la carrière de Marzilly.....	307
Fig.6. 24: Etude balistique sur les ogives dans l'entrée de la carrière d'Hermonville (Source : Cliché Barbin V.).	310
Fig.6. 25: Photographies des ogives déformées et étude statistique selon leur date trimestrielle de fabrication.	311
Fig.6. 26: Graffiti et sculptures de soldats dans les carrières de Marzilly, Roucy, Confrécourt et Brayen-Laonnois. (Cliché : Devos A. et Taborelli P.).....	312
Fig.6. 27: Photographie de la sculpture d'un soldat français (A) dans la carrière de Roucy dans les années 1980 avant sa dégradation (Lachaux, 2005) et son vol (B, cliché Devos A.).	313
Fig.6. 28: A - Plan de la carrière de la Grotte de l'Ours et localisation des graffiti. B – Photographie de l'entrée de la carrière de la Grotte de l'Ours (Cliché : Devos A.). C – Blasonnements à l'entrée de la carrière de la Grotte de l'Ours (Cliché : Devos A.).	314
Fig.6. 29: Plan de la carrière de Marzilly et localisation des graffitis.....	315
Fig.6. 30: A - Plan de la carrière de Roucy et localisation des graffitis. B – Photographie des inscriptions de champignonnistes (Cliché : Devos A.). C – Table de carrier (Cliché : Taborelli P.). D – Graffiti en mémoire de carriers tués par accident (Cliché : Devos A.).....	316
Fig.6. 31: Carte des densités d'abris dans le secteur de Ville-sur-Tourbe	318
Fig.6. 32: A – Poste de guetteur bétonné en forêt d'Argonne (Cliché : Taborelli P.) B – Reconstitution d'abris superficiels sur le site de la Main de Massige (Cliché : Devos A.). C – Entrée double d'un abri-caverne (Cliché : Taborelli P.). D – Abri de type niche (Source : Cliché IWM).....	319
Fig.6. 33: Vue 3D et en coupe des 3 tunnels allemands du Mont Cornillet.....	320
Fig.6. 34: Potentialité de creusement des abris.	321
Fig.6. 35: Carte de l'extension de Reims de 1918 à 2016 et des réseaux de défense.	322
Fig.6. 36: A – Effondrement d'un abri allemand près d'Aubérive-sur-Suippe (Cliché : Devos A.). B – Intérieur de l'abri allemand dans la craie près d'Aubérive-sur-Suippe (Cliché : Devos A.). C- Tranchée des Uhlans et abris associés sur l'extrait du plan directeur de Sainte-Marie à Py du 31 janvier 1918.....	323
Fig.6. 37: Schéma des différentes phases de creusement et d'aménagement des crayères (Devos et al., 2017).	325
Fig.6. 38: Topographie du souterrain de Saint-Rémi (en coupe).	326
Fig.6. 39: Cartographie de l'épaisseur de la zone vadose sur le site de la ville de Reims. A : en hautes-eaux. B : en basses-eaux (Devos et al., 2017).	328
Fig.6. 40: Coupe schématique de la répartition spatiale des cavités souterraines dans leur contexte géomorphologique et piézométrique (d'après Laurain et al., 1995) . A : crayères. B : galeries de liaison. C : galeries filantes. D : souterrains de la Marne. E : caves privatives. F : puits à eau.	329
Fig.6. 41: Graffitis observés dans les caves Taittinger. A : Date et Croix de Guerre allemande. B : Casque à pointe. C : Date et patronyme. D : Inscription patriotique française.	330

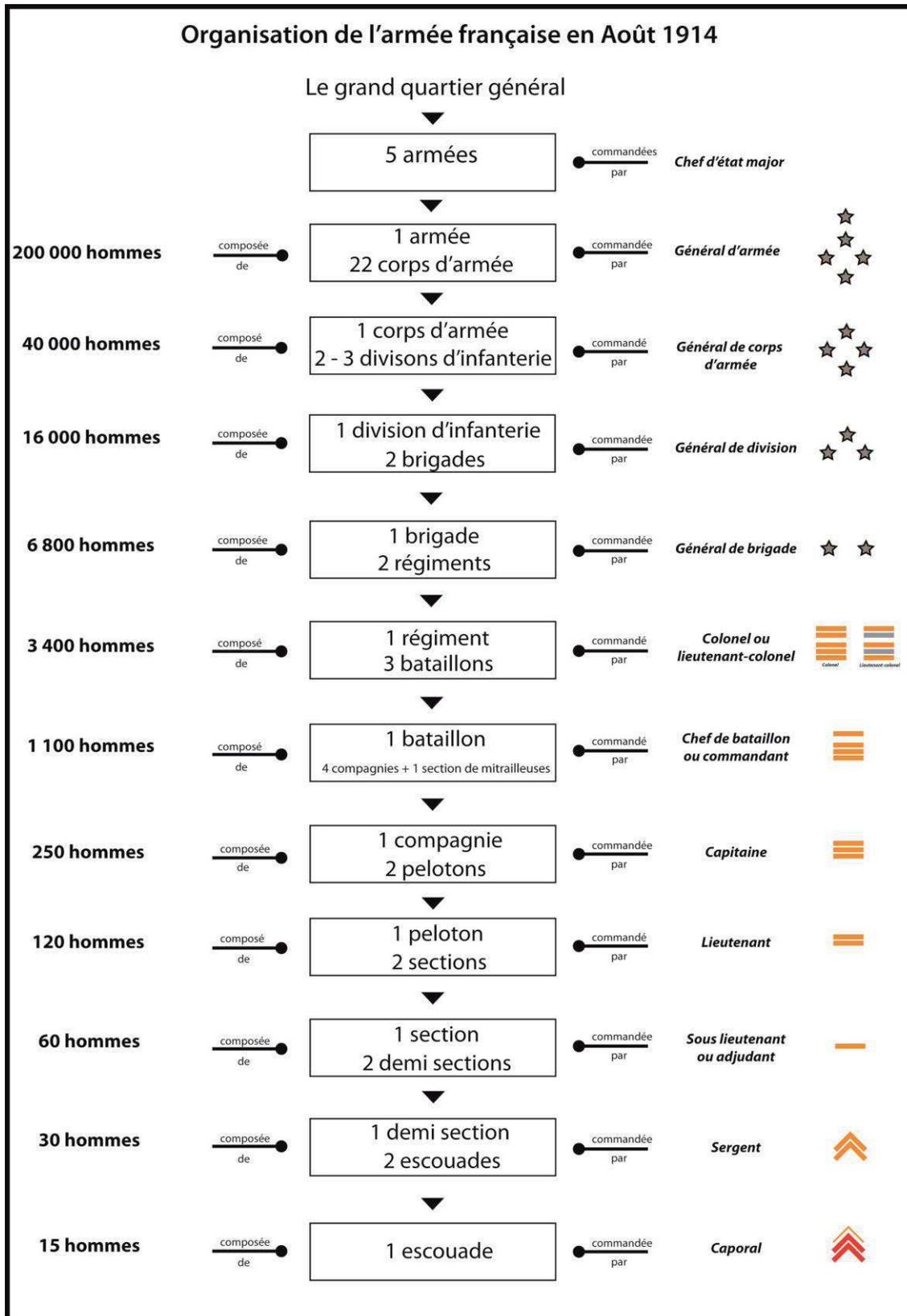
Fig.7. 1: Évolution des horizons pédologiques lors du creusement des réseaux de défense.	335
Fig.7. 2: A et B - Carte postale de la cote 108. C : Image Lidar et position des fosses pédologiques. D - Nappe de graveluches sur les pentes du cratère. E – Coupe du « méga-cratère » et emplacement des fosses pédologiques. F-H - Photographies de trois fosses pédologiques. F-H - Photographies de trois fosses pédologiques en fond, à mi-pente et sur le haut de versant du cratère (Cliché : Devos A.).	337
Fig.7. 3: A- Les composantes d'un obus. B - Photo d'un obus shrapnel (cliché : Devos A.). C - Photo d'une coupe d'un cratère d'obus en fouille archéologique (cliché : Devos A.).	338
Fig.7. 4: Localisation des sites d'étude pour la mesure géochimique dans les réseaux de défense de Champagne-Ardenne.....	339
Fig.7. 5: A - Analyseur par fluorescence X portable Niton XL3t 980 GOLDD+ (Source : Thermo Niton). B – Mesure sur le terrain par fluorescence X à Isle-sur-Suippe (Source : cliché Devos A.). C – Prélèvement d'échantillon à Isle-sur-Suippe (Source : cliché Devos A.)	340
Fig.7. 6: Dispositif de mesures de la fluorescence X au laboratoire (stand portable NIT-420-017)..	341
Fig.7. 7: Teneurs en plomb et en cuivre dans un cratère d'obus dans le bois de la Gruerie en Argonne.	342
Fig.7. 8: Localisation des prélèvements dans un trou d'obus du « secteur 10 » et teneurs en ETM associées. (Cliché : Taborelli P.)	342
Fig.7. 9: Localisation des analyses FPXRF réalisées et gamme des teneurs en cuivre mesurées dans les horizons de surface en forêt de Verzy (Chabert, 2016).	343
Fig.7. 10: Evolution des teneurs en cuivre et plomb dans le cratère Sud-Est à Verzy (Chabert, 2016).	344
Fig.7. 11: A - Éclats d'un obus de 75 mm français (Source : Musée de la Grande Guerre de Meaux). B - Éclats d'un obus de 105 mm français (Source : Gervereau, 2001).	345
Fig.7. 12: Anomalies magnétiques en prospection géophysique (Source : Note, 2016).	346
Fig.7. 13: Concentrations en perchlorates des eaux dans les réseaux de distribution (ARS Champagne- Ardenne, 2013 ; ARS Nord-Pas-De-Calais, 2014 ; ARS Picardie, 2013) et étendue des lignes de défense entre 1914 et 1918 (Carlu, 2018 à paraître).....	350
Fig.7. 14: Carte des réseaux de défense et des concentrations en perchlorate en Champagne-Ardenne (Carlu, 2018 à paraître).	351
Fig.7. 15: Modèle conceptuel des différents modes de contamination de l'eau souterraine par les activités militaires de la Première Guerre Mondiale (Dodici, 2015).	352
Fig.7. 16: A – Usine de fabrication d'obus (Source : ECPAD). B – Dépôts d'obus pour artillerie lourde (Source : ECPAD). C – Pièce d'artillerie lourde sur voie ferrée à Châlons-sur-Vesle (Source BDIC VAL 082/054). D – Explosion d'obus dans le réseau de défense dans la Somme (Source : RMN). E – Dépôt d'obus pour enfouissement ou pétardement (Source : ECPAD). F – Obus non explosé en Argonne (Source : Cliché Devos A.).....	353
Fig.7. 17: Croisement de la carte viticole de Champagne de 1882 et des réseaux de défense près de Reims.....	356
Fig.7. 18: Étude diachronique de la colonisation forestière de la Cote 108 de 1929 à 2015.....	358
Fig.7. 19: Photographies aériennes obliques à basse altitude des réseaux de défenses remblayés mais révélés par le différentiel de pousse végétale en Champagne crayeuse. A- Tranchées à traverses simples. B - Boyaux en crémaillère. C - Tranchées de départ, boyaux et postes avancés. D - Tranchées à traverses simples et boyaux (Source : clichés Godin M.).....	360
Fig.7. 20: A – Image Lidar des cratères de mines en Argonne près de la Harazée. B – Photographie d'une mare forestière dans les cratères de mines en Argonne de la Harazée (Source : Cliché Taborelli P.).	361

Liste des tableaux

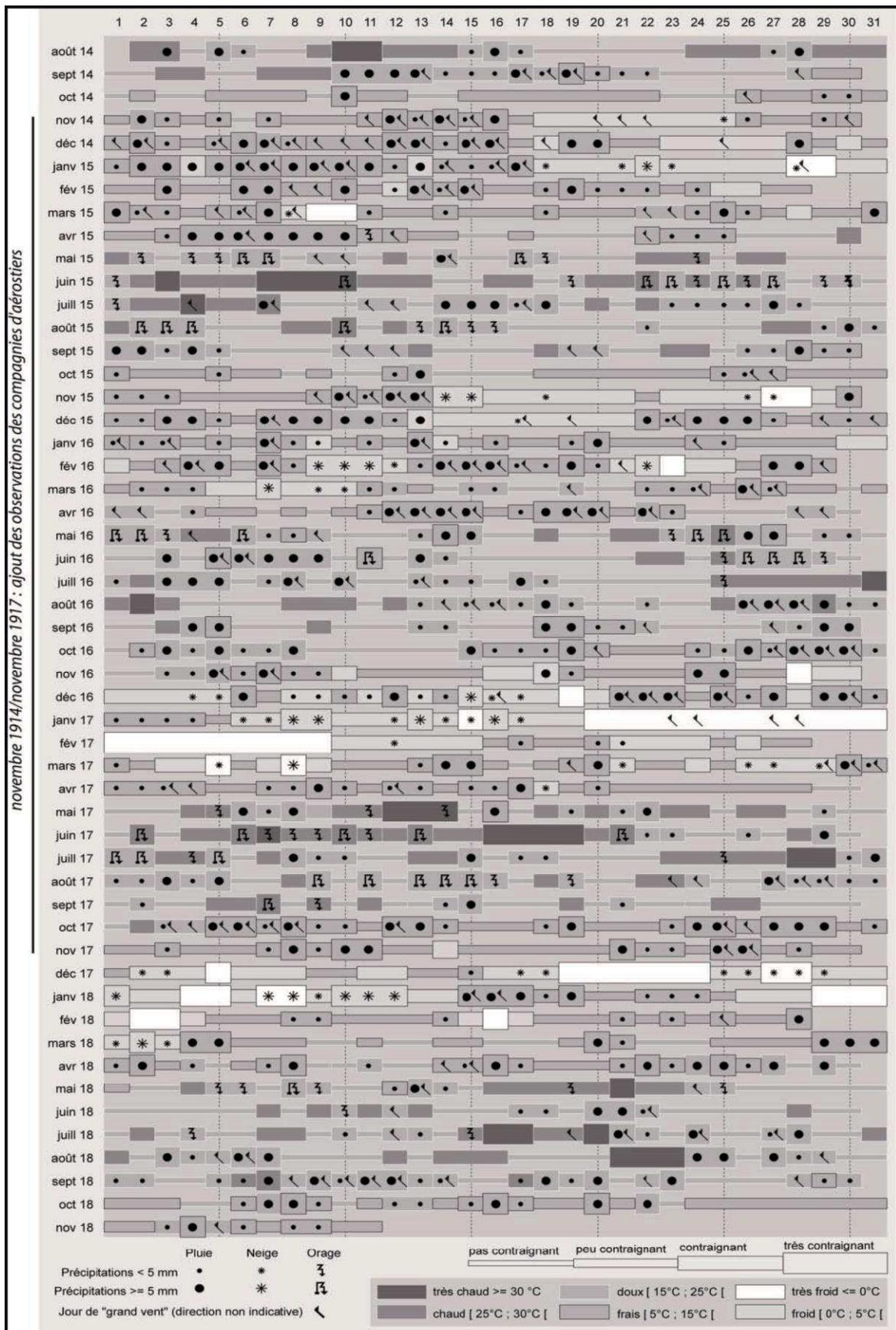
Tab 1.1 : Profondeur cartographiée en kilomètres des plans directeurs en fonction de l'échelle (Sources : GQGA-EM, 1916 ; GQGA-EM, 1917a, Combaud <i>et al.</i> , 2016).....	61
Tab. 1.2 : Distribution des plans directeurs selon les échelles (Combaud <i>et al.</i> , 2016).....	67
Tab. 3.1 : Caractéristiques, typologie des structures de réseaux de défense digitalisées à partir des plans directeurs en Champagne-Ardenne.....	125
Tab. 3.2 : Indices morphométriques des réseaux de défenses de la Grande Guerre en Champagne-Ardenne par milieu naturel traversé.....	129
Tab 3.3 : Résultats de l'analyse spatiale des réseaux de défense de Champagne sèche, du vallon d'Aisne et d'Argonne.....	147
Tab. 4.1 : Paramètres des vols Lidar en Argonne et dans le secteur de Reims.....	202
Tab. 5.1 : Indices morphométriques des structures archéologiques du « secteur 10 ».....	246
Tab. 5.2 : Formes de la Grande Guerre sur le site de la Cote 108.....	251
Tab. 5.3 : Indices morphométriques du traitement automatique des tranchées dans chaque zone (Brenot <i>et al.</i> , 2017).....	257
Tab. 5.4 : Indices morphométriques du traitement automatique des trous d'obus dans chaque zone (Brenot <i>et al.</i> , 2017).....	258
Tab 6.1 : Valeur de g selon la nature de l'encaissant (d'après Villate, 1925).....	285
Tab. 7.1 : Nombre de communes analysées par département avec leur gamme de concentration en perchlorates (données ARS).....	349

Annexes

Annexe 0.1 : Organisation de l'armée française en 1914



Annexe 0.2 : Climat journalier en Meuse et dans la Marne pendant la Grande Guerre (Source : Savouret *et al.*, 2011).



Annexe 1.1 : Tableau de la banque de données des plans directeurs sur le front ouest

Numéro	Nom du plan directeur	Aire (km ²)	Numéro	Nom du plan directeur	Aire (km ²)
0	Pierre-Fontaine	214,64	81	Commercy A	246,14
1	Belleherbe	213,00	82	Ligny-en-Barrois	247,84
2	St Hippolyte	216,28	83	Bar-le-Duc	254,45
3	Brémoucourt	214,82	84	Sans Nom	262,94
4	Delémont-Moutier	220,64	85	Sompuis	267,26
5	Bâle	226,01	86	Mouthierender	264,40
6	Ferrette	226,04	87	Wassy	259,69
7	Ste Ursanne	213,98	88	Saar-Union	221,54
8	Hisel	215,77	89	Albestroff	215,72
9	Delle	218,01	90	Château-Salms B	238,19
10	Montbéliard	218,35	91	Château-Salms A	236,58
11	Dampierre	212,13	92	La Seille	244,07
12	L'Isle-sur-le-Doubs	217,13	93	Nomény A	239,07
13	Lure	226,26	94	Nomény 3-4	119,30
14	Champagne	219,42	95	Pont-à-Mousson 7-8	122,02
15	Belfort	222,19	96	Bois-le-Prêtre	244,70
16	Fontaine	219,04	97	Mortmare	249,02
17	Atkirch	216,64	98	Saint-Mihiel C	250,72
18	Landser	226,11	99	Saint-Mihiel B	251,76
19	Hunmgue	228,62	100	Vaubécourt B	254,55
20	Lorrach	227,28	101	Vaubécourt A	256,84
21	Mulheim	231,01	102	Revinny	260,35
22	Hombourg	228,68	103	Heiltz-le-Maurupt	264,50
23	Mulhouse	227,97	104	Vitry-le-François	266,07
24	Thann	220,61	105	Thiéblemont	265,47
25	Massevaux	221,08	106	Marson	265,08
26	Ballon d'Alsace	225,32	107	Ecury-sur-Cooles	265,20
27	Mélieux	219,80	108	Madly	272,80
28	Soukures	225,69	109	Thibie	269,54
29	Gérardmer	206,11	110	Vertus	263,28
30	Munster	211,23	111	Moutmort	268,50
31	Neuf-Brisach	216,35	112	Touman	263,41
32	Vieux-Brisach	215,20	113	Fromentères	269,10
33	Narckolsheim	224,34	114	Brie Comte-Robert	264,89
34	Schlestadt	228,10	115	Corbeil	265,91
35	Ribeauvillé	228,61	116	Palaiseau	264,90
36	Ste Marie-aux-Mmes	223,83	117	Sèvres	266,58
37	Bruyères	238,06	118	St Denis	270,09
38	Fraize	219,78	119	Le Raincy	265,99
39	Remiremont	230,72	120	Lagny	262,09
40	Rouffach	218,70	121	Meaux	272,05
41	Arches	239,53	122	Coulommiers	279,29
42	Epinal	242,38	123		263,43
43	Mirecourt	244,80	124	Luzarches	263,90
44	Rouvres	240,28	125	Dammartin-en-Goële	263,74
45	Châtenois	246,27	126	Moutgé	262,23
46	Neufchâteau	249,79	127	Lisy-sur-Ourcq	265,61
47	Grand	246,94	128	Ste Aulde	270,54
48	Châtel-sur-Moselle	205,84	129	Château-Thierry	273,46
49	Rambervillers	198,70	130	Condé-en-Brie	270,73
50	La Neuveville-les-Raon	191,81	131	Dormans	268,81
51	Raon l'Étape	231,88	132	Epemay	269,45
52	St Die	223,15	133	Ambonnay	144,34
53	Barr	180,60	134	Châlons-sur-Marne	266,54
54	Villé	181,29	135	St Gbrien	112,62
55	Benfeld	178,29	136	Somme-Suppe	254,86
56	Geispolsheim	224,49	137	Valmy	253,30
57	Ste Odile	224,40	138	Ste Ménéhould	215,86
58	Shirmeck	228,38	139	Clermont A	252,82
59	Senones	225,00	140	Clermont B	191,71
60	Le Donon	108,64	141	Clermont C	182,12
61	Cirey	219,96	142	Vigneulles A	195,26
62	Baccarat	115,94	143	Vigneulles B	181,54
63	Lunéville	236,23	144	Chambley 5-6	119,98
64	Bayon	241,96	145	Metz	224,01
65	Haroué	238,94	146	Pange	227,34
66	Vézelize	242,07	147	Faulquemont	225,27
67	Colombey-les-Belles	245,42	148	St Avold	229,00
68	Gondrecourt B	253,64	149	Sarrelouis	237,40
69	Gondrecourt A	246,66	150	Bouzonville	253,53
70	La Vézouse	232,51	151	Vigy	236,98
71	Paroy	116,77	152	Maizières-les-Metz	237,32
72	Réchicourt	215,48	153	Briey	221,88
73	Sarrebourg	219,91	154	Chambley 3-4	123,94
74	Phalsbourg	225,11	155	Chambley 1-2	123,81
75	Le Sanon	234,69	156	Conflans-en-Jarnisy	240,89
76	Nancy B	121,35	157	Etam B	246,09
77	Nancy A	240,76	158	Etam A	245,84
78	Toul B	245,63	159	Verdun B	240,89
79	Toul A	243,76	160	Verdun A	236,28
80	Commercy B	247,16	161	Forêt d'Argonne	244,99

Numéro	Nom du plan directeur	Aire (km²)	Numéro	Nom du plan directeur	Aire (km²)
162	Cernay-en-Dormois	261,97	243	Bertrix	258,49
163	Tahure	267,64	244	Paliseul	257,10
164	Ste Marie-à-Py	264,32	245	Hautes-Rivières	241,38
165	Beine	266,77	246	Rocroi	262,89
166	Avize	285,01	247	Maubert-Fontaine	266,76
167	Reims	287,66	248	Signy-le-Petit	267,37
168	Jonchery-sur-Vesle	268,56	249	Hirson	266,92
169	Fismes	268,18	250	Vervins	263,79
170	Fère-en-Tardenois	272,92	251	Guisse	263,97
171	Oulchy-le-Château	273,71	252	Bohain	265,06
172	Villers-Cotterets	270,06	253	Le Catelet	262,61
173	Crépy-en-Valois	262,97	254	Combles	256,23
174	Verberie	260,24	255	Albert	257,19
175	Senlis	260,73	256	Corbie	252,20
176	Beaumont-sur-Oise	263,32	257	Amiens	255,00
177	Hermes	260,01	258	Doullens	251,61
178	Creil	261,48	259	Acheux	254,72
179	Clermont	260,27	260	Bapaume	251,23
180	Estrées-st-Denis	265,03	261	Bertincourt	256,98
181	Compiègne	261,49	262	Péronne	255,67
182	Pierrefonds	264,80	263	Roisel	259,16
183	Vic-sur-Aisne	271,15	264	Cambrai	257,45
184	Soissons	272,82	265	Clary	257,10
185	Vailly	274,15	266	Le Cateau	260,22
186	Chemin-des-Dames	269,62	267	Landrecies	260,77
187	Berry-au-Bac	271,13	268	Le Nouvion	259,63
188	Brimont	270,07	269	Avesnes	257,03
189	Warmerville	259,58	270	Givet	233,45
190	Juniville	264,56	271	Houyet	250,15
191	Attigny	266,17	272	Rochefort	252,08
192	Vouziers	261,93	273	St Hubert	238,16
193	Buzancy	228,61	274	Laroche	241,52
194	Dun-sur-Meuse	226,28	275	Le Quesnoy	256,15
195	Brandeville	205,48	276	Bavat	259,30
196	Marville	217,94	277	Trelon	259,36
197	Longuyon	221,71	278	Maubeuge	250,30
198	Audun-le-Roman	225,20	279	Valenciennes	253,54
199	Rochonvillers	241,06	280	Denain	254,07
200	Longwy	249,37	281	Douai	251,03
201	St Léger	250,51	282	Vitry-en-Artois	250,69
202	Virton	244,39	283	Arras	243,45
203	Montmédy	258,02	284	Aubigny	250,92
204	Stenay	255,08	285	St Michel	247,88
205	Raucourt	242,34	286	Carvin	248,57
206	Le Chesne	261,71	287	Lens	244,84
207	Tourteron	265,64	288	Béthune	245,87
208	Rethel	266,59	289	Lillers	247,43
209	Château-Porcien	264,08	290	Heuchin	253,58
210	Dizy-le-Gros	269,47	291	Lumbres	231,50
211	Sissonne	217,44	292	St Omer	251,40
212	Laon	232,74	293	Aire	242,26
213	Anizy-le-Château	266,57	294	Hazebrouck	241,72
214	La fère	264,70	295	Laventie	241,66
215	Chauny	264,72	296	Armentières	240,71
216	Noyon	254,71	297	Ypres	239,97
217	Lassigny	258,38	298	Elverdingue	240,76
218	Montdidier	259,11	299	Steenwoorde	237,31
219	St Just-en-Chaussée	260,46	300	Cassel	239,03
220	Breteuil	258,12	301	Watten	250,00
221	Oresmaux	258,89	302	Mardyck	250,48
222	Moreuil	260,16	303	Dunkerque	236,36
223	Hangest	256,96	304	Hondschoote	232,00
224	Chaulnes	258,95	305	Dixmude	233,19
225	Nesle	256,14	306	Coucklaere	232,99
226	Ham	262,19	307	Roulers	235,52
227	St Quentin	265,74	308	Nieuport	210,23
228	Ribemont	266,19	309	Bruges	235,13
229	Crécy-sur-Serre	172,76	310	Ostende	236,90
230	Marle	259,32	311	Zeebrugge	113,63
231	Montcornet	262,34			
232	Aubenton	263,54			
233	Liart	259,97			
234	Renwez	258,52			
235	Mézières	258,83			
236	Sedan	240,69			
237	Francheval	252,61			
238	Florenville	257,27			
239	Izel	246,60			
240	Habay-la-Neuve	251,05			
241	Tillet	249,53			
242	Neufchâteau	243,09			

Annexe 1.2 : Tableau de la banque de données des plans directeurs en Champagne-Ardenne

Nom du plan directeur	Aire du plan directeur (km ²)	Camps	Échelle	Linéaire de front (km)	Date
Berry-au-Bac	261,65	allemand	1/5 000	22,00	05/05/1917
Jonchery-sur-Vesle	262,65	allemand	1/5 000	21,50	13/06/1917
Brimont	262,43	allemand	1/10 000	7,00	01/08/1917
Reims	275,35	allemand	1/5 000	5,10	25/01/1917
Warmeriville	261,17	allemand	1/5 000	7,40	-
Beine	267,17	allemand	1/5 000	21,00	19/06/1918
Ambonnay	258,46	allemand	1/5 000	19,70	03/07/1918
Châlons	259,99	allemand	1/5 000	11,00	15/10/1916
Ste Marie à Py	261,09	allemand	1/10 000	0,00	11/05/1918
Attigny	261,07	allemand	1/5 000	14,00	01/11/1916
Tahure	260,03	allemand	1/5 000	2,30	16/12/1917
Somme-Suippe	260,26	allemand	1/5 000	0,00	16/06/1918
Juniville	260,27	allemand	1/5 000	14,20	21/07/1918
Valmy	260,69	allemand	1/5 000	23,40	28/08/1918
Cernay-en-Dormois	260,03	français	1/20 000	0,00	28/09/1918
Vouziers	260,43	français	1/20 000	0,00	23/09/1918
Buzancy	221,80	français	1/20 000	8,10	20/04/1918
forêt d'Argonne	250,83	français	1/20 000	15,80	15/07/1918
Ste Ménéhould	231,25	français	1/20 000	0,00	23/08/1918
Ambonnay	140,26	français	1/20 000	14,10	10/08/1918
Attigny	74,00	français	1/20 000	0,00	30/05/1918
Avize	276,65	français	1/20 000	0,00	31/05/1918
Prunay	53,87	français	1/20 000	14,10	16/09/1918
Berru	131,38	français	1/20 000	0,00	17/08/1918
Secteur Mont Sans Nom	11,31	français	1/20 000	15,70	16/09/1918
Mont de Berru	123,83	français	1/20 000	0,00	14/06/1918
GCTA 5e Armée	140,34	français	1/20 000	0,00	19/08/1918
-	20,29	français	1/20 000	0,00	07/07/1918
-	67,00	français	1/20 000	14,40	19/09/1918
-	4,18	français	1/20 000	0,00	17/05/1918
Moscou	12,10	français	1/20 000	0,00	16/09/1918
Sous secteur Loire Courcy	41,27	français	1/20 000	14,00	19/09/1918
Berry-au-Bac SE	65,39	français	1/20 000	0,00	01/05/1918
Berry-au-Bac NO	65,38	français	1/20 000	0,00	18/06/1917
Berry-au-Bac NE	65,19	français	1/20 000	0,00	31/10/1918
Gruppenkarte E	300,62	français	1/20 000	0,00	-
-	48,33	français	1/10 000	6,30	06/07/1917
Cote 108 (sud)	8,05	français	1/20 000	7,10	26/04/1917
-	54,15	français	1/10 000	3,50	15/04/1917
-	19,30	français	1/20 000	15,00	04/04/1917
-	53,84	français	1/20 000	18,50	20/08/1915
-	60,73	français	1/10 000	4,20	-
Artillerie-Karte Brimont	300,60	français	1/10 000	5,20	15/04/1917
Brimont NO	65,39	français	1/5 000	2,10	10/05/1917
Région des Cavaliers de Courcy	14,82	français	1/5 000	3,80	22/03/1917
Autry	70,45	français	1/10 000	6,20	25/07/1917
-	8,26	français	1/10 000	8,50	22/03/1917
Ripont	69,85	français	1/10 000	7,00	26/04/1917
Carte 13 AFGG	164,07	français	1/10 000	2,00	26/03/1917
-	70,68	français	1/10 000	8,80	22/07/1917
93 ème DI	145,33	français	1/5 000	2,60	09/09/1917
Carte 33 AFGG	35,14	français	1/10 000	8,70	19/06/1916
-	29,86	français	1/10 000	4,80	05/08/1917
Sous secteur du Balcon	36,16	français	1/10 000	7,80	05/11/1917
-	41,70	français	1/10 000	6,80	01/04/1917
-	11,70	français	1/10 000	0,00	26/03/1917
-	44,61	français	1/10 000	5,50	27/05/1917
2D division Meuse Argonne	317,90	français	1/10 000	7,60	08/03/1917
28TH division	284,98	français	1/10 000	3,40	01/01/1918
42ND division	133,07	français	1/10 000	8,20	06/01/1918
82ND division	200,10	français	1/20 000	16,70	01/03/1915
92D division	97,52	français	1/10 000	9,20	26/06/1916
Minenstollen	15,31	français	1/20 000	7,00	25/09/1915
Secteur Tour d'Auvergne	3,62	français	1/10 000	0,00	-
XIII CA 2e bureau SRA et STCA	188,83	français	1/10 000	4,80	01/07/1918
XIII CA 2e bureau SRA et STCA 2	174,80	français	1/20 000	8,30	05/07/1915
XIII CA 2e bureau SRA et STCA 3	275,44	français	1/5 000	2,70	01/09/1916
XIII CA 2e bureau SRA et STCA 4	543,19	français	1/20 000	17,00	15/12/1917
Pompelle	16,46	français	1/20 000	17,00	01/01/1918

Reims	44,43	français	1/10 000	6,00	01/03/1917
Reims B1.9	99,03	français	1/10 000	5,90	01/03/1917
MWK 225	2,84	français	1/10 000	2,90	-
Gruppen-Karte Brimont West	308,94	français	1/10 000	6,00	26/03/1917
-	35,65	français	1/5 0000	42,00	26/04/1917
-	34,43	français	1/10 000	0,00	25/03/1918
Défense de Betheny	5,78	français	1/10 000	4,80	10/02/1918
Le linguet	16,18	français	1/10 000	4,20	30/10/1917
Carte des batteries ennemies	934,52	français	1/5 000	4,00	25/10/1917
Reims SO	68,77	français	1/10 000	1,00	10/09/1918
2D division	194,24	français	1/5 000	3,00	14/02/1918
-	24,99	français	1/5 000	4,30	-
Sous secteur d'Aubérive	17,45	français	1/5 000	0,00	-
La Fosse Froide	9,83	français	1/5 000	0,00	-
St Souplet	54,40	français	1/5 000	1,70	-
-	4,13	français	1/5 000	3,50	23/04/1917
Bois Raquette	9,94	français	1/10 000	6,40	22/06/1918
Bois Raquette Nord	9,68	français	1/5 000	7,50	30/06/1916
Bois Sabot Nord	9,48	français	1/5 000	4,20	15/12/1915
Bois sabot	3,10	français	1/20 000	13,50	26/09/1918
Cote 193	11,79	français	1/5 000	0,00	-
Souain	47,96	français	1/5 000	3,20	-
Butte du Mesnil	13,02	français	1/10 000	7,00	-
Butte de Tahure	9,95	français	1/10 000	3,30	-
La Dormoise	142,64	français	1/5 000	0,00	-
Perthes Nord	9,04	français	1/5 000	4,20	-
Perthes Sud	9,04	français	1/5 000	4,70	04/04/1917
-	27,10	français	1/10 000	5,40	16/02/1917
-	11,37	français	1/10 000	3,40	01/08/1917
Saint Souplet Nord	10,31	français	1/10 000	7,80	06/10/1915
saint Souplet Sud	10,19	français	1/20 000	15,00	06/10/1915
Sous secteur de la Truie	13,98	français	1/20 000	11,00	01/10/1915
XII CA EM	13,14	français	1/10 000	9,70	10/03/1918
-	11,60	français	1/10 000	8,70	01/09/1918
-	44,10	français	1/20 000	10,50	01/11/1915
-	188,45	français	1/10 000	0,00	07/09/1918
-	98,53	français	1/10 000	8,00	10/03/1917
Secteur Tahure	63,81	français	1/10 000	0,00	22/03/1918
-	53,09	français	1/5 000	3,90	-
Plan directeur	158,60	français	1/10 000	8,50	-
Somme-Py	28,26	français	1/5 000	0,00	-
Somme-Py	53,91	français	1/20 000	16,50	20/12/1914
Souain	48,03	français	1/10 000	4,80	-
Souain Sud	9,75	français	1/10 000	7,80	-
Tahure SO	38,26	français	1/20 000	0,00	31/10/1918
Tahure Cernay-en-Dormois	521,73	français	1/10 000	0,00	01/01/1918
Carte 15 AFGG	176,12	français	1/20 000	10,20	16/04/1917
-	41,06	français	1/20 000	8,10	06/05/1917
Gruppe Perthes	253,13	français	1/20 000	8,10	04/10/1918
Gruppe Perthes	422,53	français	1/20 000	8,10	28/10/1917
-	68,96	français	1/20 000	15,80	12/10/1917
-	21,04	français	1/20 000	0,00	23/08/1918
Warmeriville SE	69,91	français	1/20 000	0,00	23/09/1917
Berry-au-Bac	261,65	français	1/20 000	14,10	06/07/1917
Brimont	262,43	français	1/20 000	0,00	07/07/1918
Brimont	262,43	français	1/20 000	14,10	07/08/1918
Brimont	262,43	français	1/20 000	14,10	31/01/1918
Reims	275,35	français	1/20 000	15,70	16/09/1918
Warmeriville	261,17	français	1/20 000	15,70	21/01/1918
Warmeriville	261,17	français	1/20 000	15,70	31/05/1918
Beine	267,17	français	1/20 000	0,00	17/06/1918
Châlons	259,99	français	1/20 000	14,40	01/08/1918
Ste Marie à Py	261,09	français	1/20 000	14,00	05/01/1917
Ste Marie à Py	261,09	français	1/20 000	14,00	06/04/1917
Tahure	260,03	français	1/20 000	14,00	19/06/1917
Tahure	260,03	français	1/20 000	14,00	15/08/1917
Tahure	260,03	français	1/20 000	14,00	29/11/1917
Valmy	260,69	français	1/20 000	14,00	27/01/1918
Cernay-en-Dormois	260,03	français	1/20 000	14,00	23/07/1918
forêt d'Argonne	250,83	français	1/20 000	0,00	02/06/1918
forêt d'Argonne	250,83	US	1/20 000	11,00	01/10/1918
forêt d'Argonne	250,83	US	1/20 000	20,00	01/11/1918
forêt d'Argonne	250,83	US	1/20 000	15,00	01/10/1918
forêt d'Argonne	250,83	US	1/20 000	15,00	15/10/1918
forêt d'Argonne	250,83	US	1/20 000	15,00	15/10/1918
forêt d'Argonne	250,83	US	1/20 000	9,00	01/10/1918
Ste Ménéhould	231,25	US	1/20 000	13,00	01/10/1918

Annexe 6.1 : Tableau des systèmes de mines sur le front ouest

Secteur-sites- systèmes	Pays	Roche
Ypres est Hooge	Flandres	Argile et sable
Saint-Eloi	Flandres	Argile et sable
Wijtschate Petit Bois Peckham	Flandres	Argile et sable
Messines	Flandres	Argile et sable
Ploegsteert Le Peterin	Flandres	Argile et sable
La Chapelle d'Armentières Muschroom	Flandres	Argile et sable
Fromelles	Flandres	Argile et sable
Neuve chapelle	Flandres	Argile et sable
Givenchy-lès-la-Bassée	Flandres	Argile et sable
Auchy-Les-Labassée / cambrin	Flandres	Argile et sable
Givenchy / carency	Artois	craie et sable
Vimy / neuville saint vaast	Artois	craie et sable
Thelus / ecurie	Artois	craie et sable
Roclincourt	Artois	craie et sable
Mont Saint Eloi Bois d'Ecoivres	Artois	craie et sable
Beaurains	Artois	craie et sable
Beaumont-Hamel	Oise-Somme	craie
La Boisselle Lochnagar crater	Oise-Somme	craie
Fricourt	Oise-Somme	craie
Carnoy	Oise-Somme	craie
Fontaine-les-Cappy	Oise-Somme	craie
Cappy	Oise-Somme	craie
Dampierre	Oise-Somme	craie
Fouquescourt	Oise-Somme	craie
Maucourt	Oise-Somme	craie
Beuvraignes	Oise-Somme	craie
Quennevières	Soissonais	calcaire
Tracy-le-Val : Bois du Quesnoy, Bois Saint Mard	Soissonais	calcaire
Autreche ferme Saint-Victor	Soissonais	calcaire
Soissons distillerie	Soissonais	calcaire
Craonne Bois de la Mine/ bois d'Aubrèaux	Chemin des Dames	calcaire
Berry au Bac / Sapigneul Côte 108	Champagne sèche	craie
Betheny tranchée d'Aviona	Champagne sèche	craie
Pompelle / Ferme d'Alger	Champagne sèche	craie
Saillant de Souain	Champagne sèche	craie
Bois Sabot	Champagne sèche	craie
Perthes les Hurlus cote 200	Champagne sèche	craie
Tahure: route de Grateuil, cote 193	Champagne sèche	craie
Les Mamelles	Champagne sèche	craie
Beauséjour / Fortin de Beauséjour	Champagne sèche	craie
Butte du Mesnil	Champagne sèche	craie
Main de Massiges cote 199	Champagne sèche	craie

Ville-sur-Tourbe Pruneau	Champagne sèche	craie
Bois de la Gruerie "la réserve"	Argonne	Gaize
Four de Paris	Argonne	Gaize
Bolante-La Grande Courte chausse	Argonne	Gaize
Fille morte, cote 285	Argonne	Gaize
Haute chevauchée	Argonne	Gaize
Vauquois	Argonne	Gaize
Bois de Malancourt	Argonne	Gaize
Marchéville	Hauts de Meuse	calcaire
Les Eparges	Hauts de Meuse	calcaire
Bois des Chevaliers	Hauts de Meuse	calcaire
Bois bouchot	Hauts de Meuse	calcaire
Bois d'Ailly	Hauts de Meuse	calcaire
foret d'Apremont	Hauts de Meuse	calcaire
Marbotte	Hauts de Meuse	calcaire
foret de Mort Mare / Flirey	Woevre	Argile
Regniéville	Woevre	Argile
Bois Le Prêtre (Mouchoir, Carrefour, Croix des Carmes)	Woevre	Argile
Leintrey	Plateau lorrain	Marne
Badonviller Ferme du Chamois	Vosges	grès
col de la Chapelotte	Vosges	grès
Ban de Sapt / La Fontenelle	Vosges	grès
Lusse cote 607	Vosges	grès
La Cude	Vosges	Granite
la Tête du Violu / fort Régault	Vosges	Granite
Tête des Faux	Vosges	Granite
Ammertzwiller	Alsace	Marne

Annexe 6.2 : Tableau des cartoucheries françaises de balles durant la Grande Guerre

A	Fonderie Audemar & Guyon à Dole (Jura)
AAR	Cartoucherie d'Alger
A.AR	Cartoucherie d'Alger
ABN	Atelier de fabrication de Besançon
ABS	Atelier de construction de Bourges
ADT	Atelier de construction de Douai
A.DC	Code d'un atelier de fabrication répertorié mais non-identifié. Période 1914-18
A.DT	Serait une variante de l'Atelier de construction de Douai
A.TE	Atelier de fabrication de Toulouse
A.VE	Cartoucherie de Valence
A.VIS	Atelier de fabrication de Vincennes
ADI	Atelier de construction de Douai
ALN	Atelier de construction de Lyon
AM ou AMps	Atelier de Construction de Millau
AMN	Atelier de chargement de Montlaçon
AMx	Atelier de construction d'Issy-Les-Moulineaux
AP	Atelier de précision
APX	Atelier de construction de Puteaux
AR	Cartoucherie d'Alger
ARE	Atelier de construction de Roanne
ARS	Atelier de construction de Rennes
ART	Direction de l'Artillerie, dont dépendait la fabrication des munitions, avant la création du Service du Matériel, en France, jusqu'à 1918
ART.D	Voir code ART. L'adjonction de la lettre D correspond à la mise en service des cartouches 1886D, montant la balle D, biogivale en métal massif due à Désaleux
ART.M	Voir code ART. L'adjonction de la lettre M correspond à l'introduction des étuis 1886M, dits "modifiés"
AS	Compagnie des Mines, Fonderies et Forges d'Alès
ASCD	Atelier de chargement de Saint-Chamond
ASS	Atelier de chargement de Salbris
ATE	Atelier de fabrication de Toulouse
Aub	Atelier de chargement d'Aubigné
ATS	Atelier de construction de Tarbes
AV	Ateliers Vaucanson (Industrie privée)
AVE	Cartoucherie de Valence
AVIS	Atelier de fabrication de Vincenne
AVX	Atelier de chargement de Vénissieux

AX	Code fabricant non-identifié de la période 1914-18
B	Atelier de Pyrotechnie du BOUCHETey-Fouquet (Marque ancienne abandonnée)
(Ancre) B	Pyrotechnie maritime de Brest
BA	Parc d'artillerie de Corse de Bastia
BN	Parc d'artillerie de place de Besançon
BRN	Parc d'artillerie de place de Briançon
BS	Atelier de laminage de l'école de pyrotechnie
Bs	Atelier de laminage de Bourges (Marque ancienne abandonnée)
BT	Parc d'artillerie de place de Brest
BZE	Parc d'artillerie de place de Bizerle
(Ancre) C	Pyrotechnie maritime de Cherbourg
CG	Parc d'artillerie de place de Cherbourg
CGP	Parc d'artillerie de place de Cherbourg
CML	Société des constructions mécaniques de la Loire (Industrie privée)
CN	Ateliers mécaniques de Nnormandie, Caen
CP	Société méridionale d'industrie Anciens établissements Paulet
CS	Atelier de Castres
DE	Parc d'artillerie de place de Dunkerque
DI	Atelier de construction de Douai
DTE	code de fabriquant non identifié
EA	Entrepôt de réserve générale d'Aubigné
EB	Entrepôt de réserve générale de matériel d'artillerie de tranchée de Blois
EBR	Entrepôt de réserve générale de Brienne-le-château
EBS	Entrepôt de réserve générale de Bourges
ECN	Entrepôt de réserve générale de Châteaudun
ECP	Ecole centrale de pyrotechnie de Bourges
ECP	Ecole centrale de pyrotechnie militaire
ECY	Entrepôt de réserve générale de Chemilly
EDB	Etablissements Delaunay Belleville
EEL	Société d'éclairage électrique de Lyon (Industrie privée)
EF	Entrepôt de réserve générale de la Ferté-Hauterive
EG puis E	Eschger Ghesquière et Cie (Marque ancienne abandonnée)
EL	Entrepôt de réserve générale de Leyment
EM	Entrepôt de réserve générale de Mézidon
ENT	Ecole normale de tir
EPCS	Parc de Chartres
EPG	Etablissements pyrotechniques de Grenoble (Industrie privée)

ESB	Entrepôt de réserve générale de Salbris
ET	Entrepôt de réserve générale de Thonars
FLN	Inspection des forges de Lyon
FN	Fonderie nationale de Nanterre
FPS	Inspection des forges de Paris
GE	Parc d'artillerie de place de Grenoble
H	Hérmerding (Marque ancienne abandonnée)
HS	Etablissements Schneider au Havre (Industrie privée)
IE	Code IE.D, fabrication d'étuis et peut être de chargement effectués par l'industrie privée pour le compte de l'état. (De 1906 à 1907)
IC puis S	Société industrielle et commerciale des métaux (Marque ancienne abandonnée)
INF	Infanterie
(ancré) L	Pyrotechnie maritime de Lorient
L	Lérange et Cie (Marque ancienne abandonnée)
LE	Parc d'artillerie de place de Lille
LHE	Parc d'artillerie de place du Havre
LN	Parc d'artillerie régional de Lyon
LRE	Parc d'artillerie de place de la Rochelle
LM	Manufactures de machines du Haut Rhin : usine du Mans
LS	Parc d'artillerie de place de Langres
LT	Parc d'artillerie de place de Lorient
MAC	Manufacture d'armes de Châtellerault
MAS	Manufacture d'armes de Saint-Etienne
MAT	Manufacture d'armes de Tulle
MCA	Magasin central automobile
ME	Parc d'artillerie de place de Maubeuge
MR	Manufactures de machines du Haut-Rhin : usine de Mulhouse ou du Mans
MRE	Parc d'artillerie de place de Marseille
MV	Atelier de construction de Puteaux
NE	Parc d'artillerie de place de Nice
OTO	Automoto (Industrie privée)
oyj	Atelier de construction de Tarbes sous l'occupation allemande entre 1940 et 1944
pas	Cartoucherie de Toulouse sous l'occupation allemande entre 1940 et 1944
PX	Atelier de construction de Puteaux
RES	Parc d'artillerie de place de Reims
RF	Entrepôt de réserve générale de la Ferté-Hauterive
RL	Entrepôt de réserve générale de Leyment

RM	Entrepôt de réserve générale de Mézidon
RPCS	Entrepôt de réserve générale de projecteurs de Chartres
RS	Atelier de construction de Rennes
RSB	Entrepôt de réserve générale de Salbris
RT	Entrepôt de réserve générale de Thonars
S	Compagnie française des métaux (Marque ancienne abandonnée)
SAL	Atelier de chargement de Salaise
SC	Usine de Saint-Chamond (Industrie privée)
SCHN	Schneider et Cie (Industrie privée)
Schneider	Schneider et Cie (Industrie privée)
SF	Société Française de munitions Issy les Moulineaux
SFM	Société française des munitions (Industrie privée)
STA	Section technique de l'Artillerie
(ancre) T	Pyrotechnie maritime de Toulon
TE	Cartoucherie de Toulouse
TH	Cartoucheries de la seine Tréfileries et Laminoirs du Havre
TLH	Cartoucheries de la Seine Tréfileries et Laminoirs du Havre
TN	Parc d'artillerie de place de Toulon
TS	Atelier de construction de Tarbes
V	Vincennes
VE	Cartoucherie de Valence
VIS	Atelier de chargement de Vincennes
VIS	Parc d'artillerie de place de Vincennes
VIS	Cartoucheries de Vincennes
VN	Parc d'artillerie de place de Verdun
VS	Cartoucherie de Vincennes

Annexe 6.3 : Tableau des fournisseurs de métaux françaises de balles durant la Grande Guerre

A	Fonderie Audemar & Guyon à Dole (Jura)
AJ	Cie française du bimétal à Alfortville (Seine)
B	Compagnie générale d'électricité (Usine de Bouthorel)
B	Cie Générale d'électricité Usine de Boisthorol (Orne)
BA	Fonderies et Laminoirs de Paris anc ets Basset à Harfleur
BD	Les fils de Victor Bidault & Cie à Vitry-sur-Seine
BDV	Les fils de Victor Bidault & Cie à Vitry-sur-Seine
BO	Société métallurgique de la Bonneville (Eure)
BS	Atelier de laminage de l'Ecole de pyrotechnie
BX	non identifié
C	Compagnie française des métaux (Usine de Castelsarrasin) (Tarn et Garonne)
CY	Baraguey, Fouquet et Cie (Usine de Chagny) Eure
D	Société d'électro-métallurgie de Dives
F	Société le Ferro-Nickel
G	Compagnie française des métaux (Usine de Givet) Ardennes
H	Atelier des tréfileries et Laminoirs du Havre Usine de Grandville (Seine inférieure)
I	Société métallurgique franco-belge à Issy les Moulineaux
J	Compagnie Française du bi-métal (Usine de Joinville-le-Pont) Seine
L	SA Ets Charpentier-Vogt-G.Goguel et Cie à Montbelliard (Doubs)
LA	Les Aciers fins de la Loire à St Etienne
M	Compagnie générale d'électricité (Etablissement Mouchel)
M	SA cuivre & Alliage à Ham (Somme)
N	Société des usines Navarre à Evreux (Eure)
O	Société métallurgique à Bonneville (Eure)
P	Société anonyme des mines et fonderie de Pontgibaud (Coueron) Loire inférieure
PC	A.Gramont (Usine de Pont-de-Chéruy) Isère
R	Société anonyme des tréfileries et laminoirs du Havre (anciens établissements Lazare Weiler et Société coopérative de Rugles réunis)
RY	Etablissements Rey frères à Nimes
S	Compagnie française des métaux (Usine de Sérifontaine) Oise
SD	Compagnie française des métaux (usine de Saint-Denis)
T	Tréfileries et Laminoirs du Dauphiné à Domène (Isère)
V	Société anonyme des Fonderies et Laminoirs de Biache Saint-Waast (Pas de Calais)
V	Les fils de Victor Bidault & Cie à Vitry-sur-Seine

Y	Tréfileries et Laminoirs du Havre Usine de Pont-de Chérucy (Isère)
Z	S.A J.Boeuzc et Cie Lyon

Annexe 7.1 : Teneurs en Plomb (Pb) et Cuivre (Cu) déterminées sur site par FPXRF.

N° analyse	Profondeur	Pb (mg.kg ⁻¹)	Cu (mg.kg ⁻¹)	N° analyse	Profondeur	Pb (mg.kg ⁻¹)	Cu (mg.kg ⁻¹)
1	surface	51	< LD	30	5 cm	177	104
2	5 cm	48	< LD	31	5 cm	48	46
3	surface	16	< LD	32	surface	62	30
4	5 cm	92	26	33	5 cm	51	30
5	surface	47	< LD	34	surface	68	35
6	5 cm	30	29	35	surface	40	21
7	surface	17	< LD	36	5 cm	168	113
8	5 cm	39	17	37	5 cm	61	50
9	5 cm	30	27	38	surface	117	35
10	surface	42	< LD	39	5 cm	39	< LD
11	5 cm	10	< LD	40	surface	63	< LD
12	5 cm	36	154	41	5 cm	89	33
13	5 cm	64	297	42	5 cm	82	51
14	surface	22	< LD	43	surface	94	45
15	surface	49	27	44	5 cm	51	32
16	5 cm	29	40	45	surface	82	39
17	surface	47	< LD	46	surface	172	69
18	5 cm	40	25	47	surface	10	< LD
19	surface	97	67	48	5 cm	31	30
20	5 cm	66	61	49	surface	28	< LD
21	5 cm	118	61	50	5 cm	36	< LD
22	surface	13	< LD	51	surface	67	< LD
23	5 cm	30	35	52	5 cm	69	< LD
24	5 cm	37	< LD	53	5 cm	90	< LD
25	surface	115	< LD	54	5 cm	17	73
26	5 cm	57	29	55	surface	27	< LD
27	5 cm	54	< LD	56	5 cm	12	< LD
28	5 cm	64	22	57	surface	19	< LD
29	surface	57	50	58	5 cm	10	< LD

Acronymes

AEP : Alimentation en Eau Potable

AESN : Agence de l'Eau Seine-Normandie

AFGG : Armées Françaises de la Grande Guerre

ALVF : Artillerie Lourde sur Voie Ferrée

ARS : Agence Régionale de Santé

BNF : Bibliothèque Nationale de France

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CA : Corps d'Armée

ETM : Éléments Traces Métalliques

GCTA : Groupes de Canevas de Tir des Armées

IGN : Institut Géographique National

JMO : Journaux des Marches et Opérations

LiDAR : Light Detection and Ranging

MNE : Modèle Numérique d'Élévation

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNT : Modèle Numérique de Terrain

ONF : Office National des Forêt

PC : Poste de Commandement

PPR : Plan de Prévention des Risques

QG : Quartier Général

SGA : Service Géographique aux Armées

SHA : Service Historique de l'Armée

SHD : Service Historique de la Défense

SIG : Système d'Information Géographique

SROT : Sections de Repérage par Observation Terrestre

SRS : Sections de Repérage par le Son

STCA : Sections Topographiques de Corps d'Armée

STDI : Sections Topographiques de Division

STPU : Service de Travaux de Première Urgence

VFVE : Voie Ferrée à Voie Étroite

Les conditions géographiques et l'organisation spatiale du front de la Grande Guerre - Application à l'évaluation environnementale post-conflit en Champagne-Ardenne (France).

Résumé :

L'objectif de la thèse, réalisée dans le cadre du programme IMPACT14-18 (2015-2018), est de cartographier et de mesurer les impacts environnementaux de la Première Guerre Mondiale en Champagne-Ardenne. Le projet propose une nouvelle approche de la Grande Guerre par une analyse spatiale des réseaux de défense sur 115 km de front (13 000 km de tranchées et de boyaux) réalisée sous SIG à partir des plans directeurs au 1/20 000 de 1918 des Groupes de Canevas de Tirs des Armées. Le traitement de la banque de données spatiales permet non seulement de déterminer le potentiel de « polémo-paysages » de la Grande Guerre mais aussi de comprendre les facteurs militaires et géographiques (géomorphologie, géologie, hydrographie) structurant les réseaux. Les morphologies associées (tranchées, boyaux, entonnoirs de mines, trous d'obus), intégralement nivelées en grande culture mais recoupées par l'approche archéologique, sont étudiées de manière sectorielle, sous forêt à l'aide du Lidar aéroporté pour déterminer leur taux de conservation, sous la commande des pratiques sylvicoles. L'application opérationnelle des résultats s'intègre dans l'évaluation environnementale et les problématiques territoriales post-conflit de la Grande Guerre (aléa « cavités », bombturbation, contamination des sols et des nappes souterraines) mais révèle également un potentiel de valorisation patrimoniale.

Géographie, plans directeurs, SIG, Lidar, archéométrie, Grande Guerre, impacts post-conflit, « polémo-formes », Champagne-Ardenne

Geographical conditions and spatial organization of the front in World War I: Applications to post-war environmental evaluation in Champagne-Ardenne region (France).

Abstract:

The purpose of the thesis, carried out under the IMPACT14-18 program (2015-2018), is to map and measure the environmental impact of the First World War in Champagne-Ardenne. The project offers a new approach of the Great War by a spatial analysis of the defense networks on the 115 km of front (13 000 km of trenches and communication trenches) achieved under GIS from the 1/20 000 of 1918 trenches maps of the "Groupes de Canevas de Tirs des Armées". The treatment of spatial database not only helps us to determine the potential of "Polemo Landscapes" of the Great War but also to understand the military and geographical factors (geomorphology, geology, hydrography) structuring the networks. Associated morphologies (trenches, communications trenches, mine craters, shells craters), fully leveled in the field but highlighted by the archaeological approach, are studied sectorally under the forest thanks to the airborne Lidar, in order to define their conservation rates, according to the silvicultural practices. The operational application of the results fits the environmental assessment and the post-conflict territorial issues of the Great War ("cavities" hazard, bombturbation, soil and groundwater contamination) but also reveals a potential for heritage enhancement.

Geography, Trenches maps, GIS, Lidar, archeometry, Great War, post-conflict impacts, « polémo-forms », Champagne-Ardenne region

Discipline : GEOGRAPHIE

Spécialité : Géographie physique, humaine, économique et régionale

Université de Reims Champagne-Ardenne

Laboratoire GEGENAA – EA 3795

57, rue Pierre Taittinger, 51096 Reims Cedex

