

Mémoire de fin d'études : "Développement d'un héritage BIM : Cas d'application aux réseaux du fort de Flémalle."

Auteur : Klingeleers, Valentin

Promoteur(s) : Hallot, Pierre

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/6812>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



UNIVERSITE DE LIEGE – FACULTE D'ARCHITECTURE

Développement d'un « Heritage BIM » :
Cas d'application aux réseaux du fort de Flémalle

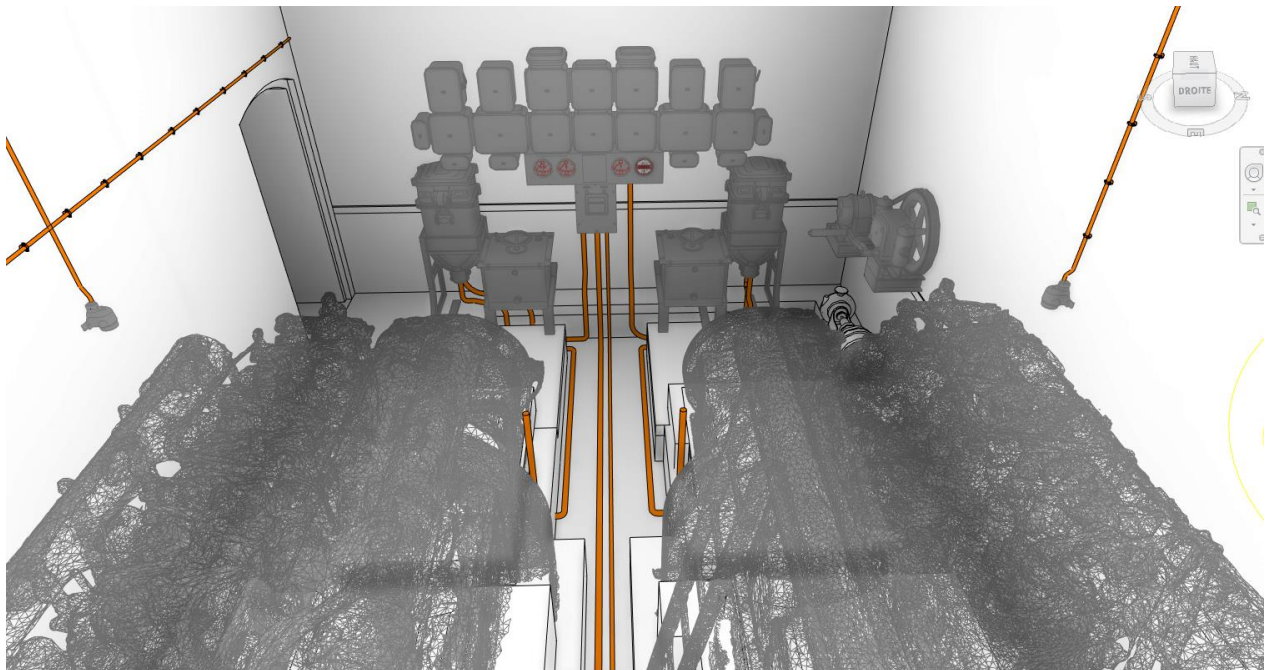
Travail de fin d'études présenté par Valentin KLINGELEERS en vue de l'obtention du grade
de Master en Architecture

Sous la direction de : Pierre Hallot

Année académique 2018-2019

Axe(s) de recherche :

Culture numérique



Développement d’un « Heritage BIM » : Cas d’application aux réseaux du fort de Flémalle

Travail de fin d’études présenté par Valentin KLINGELEERS en vue de l’obtention du grade de Master en Architecture

Sous la direction de : Pierre Hallot

Année académique 2018-2019

Axe(s) de recherche :

Culture numérique

Remerciements

La réalisation du présent Travail de Fin d'Etudes a nécessité l'intervention de nombreuses personnes, sans qui nous n'aurions pu arriver à un tel résultat. Nos remerciements vont tout d'abord à Monsieur Pierre Hallot, professeur à l'Uliège et promoteur de ce travail. Que ce soient pour les relevés, la relecture du travail ou pour les conseils prodigués tout au long des deux ans de sa rédaction, il fut toujours disponible et nous avons appris énormément en sa compagnie.

J'exprime également ma gratitude envers Jean-Christophe Happaert, pour les centaines d'heures passées sur sites ainsi que Monsieur Christian Hendrick et l'Amicale du Fort de Tancremont, pour les ouvertures des lieux en dehors des horaires de visite normaux.

Merci également à tous les passionnés de fortification qui nous ont aidés, depuis bien plus de deux ans et à l'ASBL Musée Fort de Flémalle, en particulier Grégory Bovy, pour la confiance qu'ils nous accordent dans la gestion du fort.

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers les différents membres de notre jury : Mme Claudine Houbart, M. Philippe Bragard et M. Abdelkader Boutemadja ainsi qu'à M. Stéphane Dawans, pour l'aide apportée depuis deux ans.

Finalement, mes plus sincères remerciements à mes proches ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin, tant d'un point de vue logistique, technique ou pour la relecture du présent Travail de Fin d'Etudes.

Table des matières

Remerciements	3
Table des matières	4
Table des figures	7
Introduction	9
Partie I : Contexte historique :	11
1) Historique de la fortification :	11
1.1) Brève introduction :	11
1.2) Le système « Séré de Rivières » :	13
1.3) Le système fortificatif belge :	18
2) Le fort de Flémalle	31
3) Documentation historique	42
3.1) Etat des lieux et conclusions :	42
3.2) Recherches d’archives :	42
Partie II: Documentation digitale du patrimoine :	44
1) Relevés :	44
1.1) Relevés manuels :	44
1.2) Relevés « automatisés » : Photogrammétrie – Drone – LaserScan :	45
2) Modélisation 3D :	48
2.1) Modélisation 3D à partir du relevé manuel 3D paramétrique :	48
2.2) Maquette 3D intelligente – Vers le « BIM » :	50
2.3) Modélisation 3D à partir du nuage de points :	58
3) « Heritage BIM » :	58
3.1) Introduction :	58
3.2) Quelques cas d’études :	60
3.3) Heritage BIM versus Sauvegarde numérique du patrimoine :	63
3.4) Les outils Revit au service de l’Heritage BIM :	65
Partie III : Question de recherche	67
1) Hypothèse I : Relevé effectué par LaserScan :	67
2) Hypothèse II : Réalisation d’un modèle « Heritage BIM » :	67
3) Hypothèse III : Relevés d’éléments similaires dans d’autres forts :	67
Partie IV : Modélisation 3D du fort :	68
1) Relevés du fort :	68
1.1) Méthodologie de relevés au fort :	68
1.2) Résultats :	68

1.3) Analyse critique sur la méthode utilisée :	69
2) Modélisation 3D Revit :	70
2.1) Méthodologie et parti pris :	70
2.2) Modélisation architecturale, cas concrets :	73
2.3) Modélisation technique (MEP), cas concrets :	77
2.3) Analyse critique sur la méthode utilisée :	83
Partie V: Utilisation d'un « Heritage BIM » au fort de Flémalle	84
1) Ajout des sources historiques :	84
1.1) Fonctionnement du réseau électrique :	84
1.2) Familles et informations historiques :	88
1.3) Les phases :	90
1.4) Les filtres de phases :	91
2) Ajouts externes :	92
2.1) Etude d'une problématique :	92
2.2) Mise en situation :	93
2.3) Méthodologie :	95
2.4) Utilisation de la source externe :	96
Partie VI : Analyse réflexive	98
1) Etendues et implications d'un tel travail :	98
2) Prérequis et compétences nécessaires :	99
3) Atouts de la démarche : réalisation d'une timeline du bâtiment :	99
3.1) A des fins didactiques :	99
4.2) A des fins d'études : tests d'hypothèses :	103
4) Autres pistes de réflexions – la valeur ajoutée du BIM :	110
4.1) En termes de compréhension des vestiges par le grand public :	110
5.2) En termes d'utilisation par des bureaux d'études :	112
4.3) En tant que banque de données interactive :	113
4.4) Mise en évidence des erreurs d'époque :	114
5) Limites rencontrées :	115
Partie VII : Conclusion	117
Bibliographie	118
Lexique :	126
Annexe I : armement	128
Annexe II : Fort Brialmont « type »	131
Annexe III : plan des combats de 1914	133

<i>Annexe IV : plan réarmement</i>	<i>134</i>
<i>Annexe V : Vestiges d'installation électrique dans nos forts.....</i>	<i>135</i>
<i>Annexe VI : Eléments électriques particuliers utilisés dans les forts belges</i>	<i>138</i>
<i>Annexe VII : chaîne de traitement Dynamo</i>	<i>139</i>

Table des figures

Figure 1 Schéma d'une fortification bastionnée, http://megane14.blogspot.com/2012/01/les-fortifications.html	12
Figure 2 Plan de la place forte de Toul. Etudes toulouses, 2012, p. 20.	13
Figure 3 Fort de Douaumont en 1885, Truttmann, la barrière de fer, 2000, p. 116.	14
Figure 4 Tirs sur le fort de la Malmaison, http://fortificationetmemoire.fr/le-fort-de-la-malmaison/	15
Figure 5 Fort Séré de Rivières, renforcement bétonné des maçonneries existantes, Truttmann, La barrière de fer, p. 98.	15
Figure 6 Tourelle pour deux canons de 75mm, éclipsée et en batterie. Photos personnelles.	16
Figure 7 Mortier de 420mm dit "Grosse Bertha", https://www.caminteresse.fr/histoire/quest-devenue-la-grosse-bertha-1188550/	16
Figure 8 Fort de Vacherauville, travaux "de 17", Truttman, la muraille de France ou la ligne Maginot, p. 39.	17
Figure 9 Plan Schlieffen-Molkte, https://media1.britannica.com/eb-media/09/178709-004-C3306AFE.jpg	18
Figure 10 Système de défense de Liège, aussi appelée ceinture fortifiée de Liège. http://maquette-garden.forumactif.com/t24886-les-forts-de-la-pfl-1888-1892	19
Figure 11 Plan d'un grand fort Brialmont type. ASBL Musée fort de Flémalle.	19
Figure 12 Comparaison entre un petit et un grand fort. ASBL Musée fort de Flémalle.	20
Figure 13 Comparaison entre grand et petit massif central. Travail personnel.....	22
Figure 14 Débouché d'infanterie, modifications allemandes. ASBL Musée fort de Flémalle.	24
Figure 15 Renforcement d'une galerie. ASBL Musée fort de Flémalle.	26
Figure 16 Coupe dans une tour d'air, Viatour, Seul entre Meuse et Ourthe, 2014, page 134.	27
Figure 17 La position fortifiée de Liège. Carte personnelle.....	30
Figure 18 Situation du fort de Flémalle au sein de la ceinture fortifiée de Liège. http://maquette-garden.forumactif.com/t24886-les-forts-de-la-pfl-1888-1892	31
Figure 19 Plans et coupes du fort de Flémalle. Collection Musée Fort de Flémalle.	32
Figure 20 Fort de Flémalle après sa reddition. ASBL Musée fort de Flémalle.	40
Figure 21 Principe de recouvrement photographique. Numérisation 3D des bâtiments, p.45.	45
Figure 22 Schéma simplifié d'un scanner laser. Numérisation 3D des édifices remarquables, p.83.....	46
Figure 23 Nuage de points. Travail personnel.	47
Figure 24 Eléments de repère adaptés à la numérisation laser. Photos personnelles.	48
Figure 25 Rendus réalistes sur base de la maquette virtuelle Sketchup. Travail personnel.	49
Figure 26 Répartition du BIM au niveau mondial en 2015. https://www.cadenas.de/fr/actualites/communiques/reader/items/les-5-faits-que-vous-devez-absolument-savoir-sur-le-bim	50
Figure 27 LOD, représentation graphique. http://www.objectif-bim.com/index.php/technologie-bim/la-maquette-numerique/niveau-de-detail-de-la-maquette-numerique	51
Figure 28 Organisation des éléments dans Revit. Revit pour les architectes, bonne pratique BIM, page 27.....	53
Figure 29 Contraintes d'une famille système par rapport aux niveaux. Image personnelle. ...	54
Figure 30 vue partielle du tableau « Remplacement/Visibilité graphisme. Source Revit.....	57

Figure 31 Timeline de l'usine de Batawa. Buiding information and Heritage documentation, page 6.	60
Figure 32 Maquette HBIM de la villa Majorelle. http://www.artgp.fr/bim-villa-majorelle.html	61
Figure 33 Schémas de ferrailage au sein de la maquette HBIM. https://www.tekla.com/fr/r%C3%A9férences/le-bim-pour-un-b%C3%A2timent-embli%C3%A9matique-du-patrimoine-architectural-du-xviiie-si%C3%A8cle	61
Figure 34 Modélisation de la charpente. https://abcdblog.typepad.com/abcd/2017/09/grace-a-l-expertise-de-solidpoint-le-patrimoine-revit-en-bim-l-exemple-de-repton-school-dans-le-derbyshire.html	62
Figure 35 Maquette numérique de l'Oriental Club. - ANTONOPOULOU, SOFIA, BRYAN, PAUL, BIM for heritage : developing a historic building information model. Swindon : Ed. Historic England, 2017, page 46.	62
Figure 36 Bouddhas de Bamiyan avant et après destruction. https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouddhas_de_B%C3%A2miy%C3%A2n	63
Figure 37 Heritage BIM, cas concret de la collégiale Sainte-Croix. Travail personnel.....	64
Figure 38 Passage d'un modèle en nuage de points à un élément maillé. https://elmoatazbill.users.greyc.fr/point_cloud/index.html	66
Figure 39 Comparaisons d'éléments maillés à différents niveaux de détails. Travail personnel	66
Figure 40 Première campagne de relevés (en rouge). Travail personnel	68
Figure 41 Seconde campagne de relevés (en rouge). Travail personnel.	69
Figure 42 Plans du fort en 1914.	70
Figure 43 Parti-pris pour les toitures. Travail personnel.....	71
Figure 44 Modélisation sur base du nuage de points. Travail personnel.	72
Figure 45 Liste partielle des différents types de murs. Travail personnel.	73
Figure 46 Création d'une famille In Situ pour les voûtes. Travail personnel	74
Figure 47 Gestion des phases pour les escaliers. Travail personnel.	75
Figure 48 Principe de saignées dans les sols. Travail personnel.....	76
Figure 49 Modélisation des plafonds réarmés et comparaison avec le plan d'époque. Travail personnel.	76
Figure 50 Paramétrage coffret électrique. Travail personnel.	77
Figure 51 Changement de position de la poignée de manœuvre. Travail personnel.	78
Figure 52 Tableau général. Plans partiels et modélisation Revit. Travail personnel.	78
Figure 53 Représentation filaire d'un circuit électrique dans le bureau de tir. Travail personnel.	80
Figure 54 repérage des tracés et placement du premier collier. Travail personnel.	81
Figure 55 Placement des colliers sur base du relevé laser et de photographies. Travail personnel.	82
Figure 56 Ajout des éléments de notre bibliothèque. Travail personnel.....	82
Figure 57 Tableau divisionnaire du fort de Tancrémont. Photo personnelle.	86
Figure 58 Propriétés du type d'une boîte de dérivation. Travail personnel.	89
Figure 59 Informations techniques renseignées. Archives W.H.I., fond QGT, boîte 73.	89
Figure 60 Gestionnaire de phase du projet. Travail personnel.....	90
Figure 61 Tableau des filtres de phases. Travail personnel.	91
Figure 62 Relevé des différents moteurs de la PFL.	94
Figure 63 Résultats du premier scan 3D. Travail personnel.	95

Introduction

Depuis de nombreuses années, l’outil informatique s’est fait une place dans le travail des architectes, devenant finalement indispensable dans le cadre de leur mission. Aujourd’hui, l’utilisation du BIM se généralise au niveau mondial, notamment dans un but d’optimisation des méthodes de travail. Ce processus permet de faire le lien entre l’interface de modélisation et la réalité d’un chantier. D’un point de vue patrimonial, cette méthode n’en est encore qu’à ses balbutiements. Cependant, des travaux de plus en plus nombreux démontrent d’ores et déjà les possibilités que de telles techniques offrent en termes de modélisation et de compréhension de l’histoire riche et parfois complexe d’un bâtiment patrimonial.

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi d’étudier les possibilités des possibilités de l’outil BIM au service du patrimoine à travers l’étude de cas du fort de Flémalle.

Liège jouit d’un riche passé militaire et défensif dont les vestiges parsèment encore aujourd’hui notre région. La réalisation d’ouvrages de défense en béton par le général Brialmont à la fin du XIX^{ème} siècle marque un tournant dans l’histoire des fortifications. Durant la première guerre mondiale, l’envahisseur fut surpris par la résistance de la place forte de Liège, qui n’aurait dû poser aucun problème aux armées du Kaiser. Cela les conduisit à révéler une arme dévastatrice qu’ils réservaient jusque là aux forts français : la fameuse Grosse Bertha. Le 15 août 1914, le fort de Loncin, transpercé par l’un des obus de cette nouvelle arme, explose en ensevelissant sous ses décombres plus de 350 hommes. Cet événement met brutalement en face à face des fortifications conçues presque 40 ans plus tôt avec les progrès de l’artillerie mobile.

A l’aube de la seconde guerre mondiale, ces forts dépassés seront cependant réutilisés par l’armée belge, afin de faire face une seconde fois à l’envahisseur. Ils seront consolidés et réarmés en ayant comme principe directeur une économie de moyens maximale. Une seconde fois dans l’histoire de ces monstres de béton, des hommes donneront leur vie pour défendre leur pays, souvent endoctrinés et croyant en leur possibilité de riposte face à une armée plus puissante et plus moderne. La prise du fort d’Eben Emael (connu comme le plus grand fort d’Europe) par des troupes aéroportées surentraînées ou encore la prise de vive force du fort de Bonnelles démontreront, encore une fois, les faiblesses tactiques et techniques de notre pays.

Après les combats, les forts seront, pour la plupart, pillés de tous leurs équipements par l’effort de guerre allemand, afin de récupérer de la matière première. Après-guerre, des ferrailleurs civils termineront le travail de désossage de ces témoins de notre histoire.

Désormais ouverts aux visites pour les quelques personnes encore intéressées par le sujet, les modifications subies par les forts au cours de leur histoire restent difficiles à expliquer au grand public.

L’objectif de ce travail est donc de rendre compte de la possibilité d’utiliser l’outil numérique pour représenter cette riche histoire.

La première partie de ce travail nous permettra de situer le cadre historique et territorial de cette étude de cas. Nous survolerons d’abord l’évolution générale des fortifications depuis

l'âge de fer jusqu'à l'aube du XIX^{ème}. A partir de cette époque, nous mettrons en parallèle l'évolution des fortifications françaises et belges, afin de donner une base de comparaison à notre système fortifié. Nous verrons ensuite les particularités du fort de Flémalle, ainsi que son histoire, de sa construction à l'heure actuelle. Cet historique permettra de situer précisément l'objet de notre étude dans le temps afin d'en comprendre toute l'étendue et la complexité. Finalement, nous dresserons un bref inventaire des sources historiques en notre possession dans le cadre de cette étude.

La seconde partie nous permettra de décrire, de manière non exhaustive, les moyens de documentation digitale à notre disposition pour obtenir les informations de relevés nécessaires. Nous aborderons les relevés manuels et automatiques, à travers l'utilisation de plus en plus répandue des scanners laser ou des drones. Nous aborderons enfin l'utilisation d'un « Heritage BIM », et les avantages qu'apporte celui-ci dans les travaux sur des édifices patrimoniaux.

Nous verrons ensuite comment utiliser ces relevés afin de créer une maquette numérique en 3 dimensions qui sera la base de travail d'un projet tel que mené ici. Nous terminerons cette partie par une application de cette modélisation sur des éléments patrimoniaux.

Après avoir posé notre question de recherche ainsi que les hypothèses de base à partir desquelles nous allons évoluer, nous verrons en détails la modélisation du fort de Flémalle, les moyens mis en œuvre pour la réaliser et les problèmes rencontrés lors de celle-ci.

La partie suivante sera consacrée à l'usage d'un Heritage BIM dans le cas précis qui nous intéresse ici. Nous verrons comment les informations historiques s'intègrent au sein de la maquette numérique avant de développer le cas du réseau électrique, autour duquel nous avons articulé notre travail. Un élément de cette partie traitera également d'un cas concret de sauvegarde numérique du patrimoine, et de son intégration au présent casus.

La dernière partie de ce travail fera la synthèse des deux ans qu'a duré l'étude de cas présentée ici, à travers les difficultés rencontrées, avant de mettre en avant les avantages d'une telle méthode. Nous proposerons ensuite une liste non-exhaustive des différentes perspectives qu'offre un travail de ce type dans différents domaines, en lançant des pistes de réflexion pour continuer celui-ci.

Pour terminer, nous résumerons brièvement notre démarche, avant d'en tirer nos conclusions. Nous rappellerons finalement notre question de départ et conclurons par notre réponse.

Partie I : Contexte historique :

1) Historique de la fortification :

Dans ce premier chapitre, nous aborderons, de manière synthétique, l'histoire des fortifications, de l'âge du fer au XVIII^{ème}. Nous détaillerons ensuite cet historique du XVIII^{ème} au XX^{ème} à travers une étude de cas mettant en parallèle les fortifications françaises et belges. Dans un souci de concision, cet historique sera restreint à ces deux systèmes fortificatifs ; le but de ce chapitre étant uniquement de donner les clés au lecteur pour comprendre le contexte géopolitique et technique de l'époque. Le choix de la France, s'explique par la présence, sur un même territoire, d'une bonne synthèse des différentes avancées techniques dans la période qui nous intéresse.

1.1) Brève introduction :

De tous temps, l'homme a cherché à se protéger des dangers qui le menaçaient. Il a appris tout d'abord à tirer le meilleur parti des opportunités offertes par la nature en termes de relief : un point haut offre un observatoire de premier choix, une rivière peut créer un rempart naturel face à l'ennemi, etc...

L'histoire montre une constante relation entre les avancées en matière d'attaque et de défense.

Un système de défense peut rester performant pendant une longue période jusqu'à ce qu'un nouveau système d'attaque le mette en péril, forçant le camp de la défense à réagir dans un souci constant de protection.

Dans l'introduction de son livre « Histoire de la ligne Maginot »¹, Jean-Pascal Soudagne dresse une brève histoire de la fortification. Il prend comme point de départ l'oppidum, camp retranché romain protégé par des fossés et des palissades en bois. Ensuite vient l'époque des châteaux forts, où la palissade en bois est remplacée par de hautes murailles en pierre. Ces fortifications furent rendues obsolètes par l'apparition du boulet métallique, au XV^{ème} siècle, capable de détruire n'importe quel rempart à moins de 100 mètres. Face à cette nouvelle menace, les ingénieurs italiens imaginent alors un « mur de terre réparé de 25 mètres d'épaisseur recouvert de pierres et de briques absorbant le choc du boulet »². Le développement de ce type de fortification atteindra son apogée à travers les réalisations d'ingénieurs comme Vauban³ ou encore Van Coehoorn⁴.

¹ SOUDAGNE, JEAN-PASCAL, *Histoire de la ligne Maginot*, (2011). Rennes : Ed. Ouest-France, pages 5-7

² *Ibid*, page 5.

³ Sébastien Le Prestre de Vauban (1633-1707). Ingénieur militaire français connu pour ses réalisations en matière de fortification ainsi que pour ses méthodes de siège.

⁴ Menno Van Coehoorn (1641-1704). Ingénieur militaire néerlandais dont les travaux sont comparables à ceux de Vauban.

Ces fortifications reposent sur une alternance de bastions, reliés par des courtines, le tout entouré par un fossé (**Figure 1**). Entre les bastions se trouvent des demi-lunes, qui sont des ouvrages défensifs détachés. Elles permettent de défendre les abords en compléments des pièces d'artillerie, placées au sommet des bastions. Avec la fortification bastionnée, c'est la haute muraille des châteaux forts qui s'épaissit et qui « s'enfonce » dans le sol pour augmenter sa résistance.

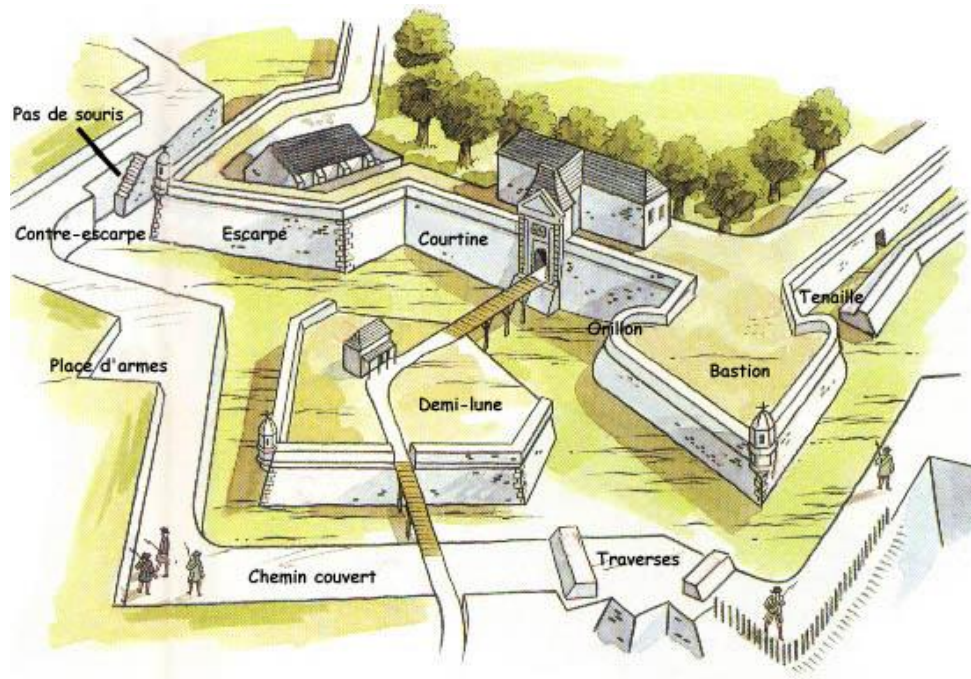


Figure 1 Schéma d'une fortification bastionnée, <http://megane14.blogspot.com/2012/01/les-fortifications.html>

La « crise de l'artillerie rayée »⁵ (1858) :

Avant cette date, le parc d'artillerie était composé presque exclusivement de canons en bronze dits « à âme lisse ». Ceux-ci utilisaient le boulet métallique et étaient chargés par la bouche. Les avancées communes en matière de métallurgie conduisirent à produire des canons dont l'âme, rayée, permettait une augmentation de la précision lors du tir. En effet, les rayures du tube imprimaient au projectile un mouvement de rotation sur lui-même, stabilisant celui-ci sur sa trajectoire. Parallèlement, le boulet métallique fut abandonné au profit d'un projectile de forme cylindro-ogivale, dont la forme aérodynamique permettait une augmentation de la portée : l'obus.

Cette « crise » eut pour conséquence principale de rendre obsolète la fortification bastionnée telle que conçue par Vauban. En effet, les projectiles pouvaient désormais passer par-dessus des murailles et atteindre directement la ville qu'elles protégeaient encore naguère.

⁵ TRUTTMANN, PHILIPPE, *La muraille de France ou la ligne Maginot*, Thionville (seconde édition). Ed. Gerard Klopp, 2009, page 21.

En 1870 éclate la guerre franco-allemande. Au terme de plusieurs mois de combat, la défaite française est actée par le traité de Francfort, le 10 mai 1871⁶. Celui-ci ampute la France, à travers la perte de l'Alsace et d'une partie de la Lorraine, de places fortes importantes (Metz, Strasbourg) pour barrer l'axe d'invasion vers Paris depuis l'Allemagne. La France se retrouve donc avec une frontière dont la défense doit être totalement revue.

Il fallait donc, face à cette avancée dans le camp de l'attaque, réagir dans le camp de la défense. La solution mise en place fut alors de « *remplacer les enceintes fermées [...] par une ceinture de forts détachés, établie à 6 kilomètres environ du « noyau central », pour mettre celui-ci hors de portée des obus de l'assaillant* »⁷. Dans ce nouveau système, le bastion est remplacé par un ouvrage d'artillerie indépendant, appelé « fort ». Les courtines disparaissent quant à elles au profit d'installations dites « de campagne », à organiser au moment de la mobilisation et appelées « redoutes ».

Cette solution s'illustre, pour la France, par les travaux du Général Séré de Rivières, et, plus tard, par ceux du général Brialmont pour la Belgique.

1.2) Le système « Séré de Rivières » :

Le Général Raymond Adolphe Séré de Rivières (1815-1895) est un ingénieur militaire du génie français à qui l'on doit le système de fortifications qui porte son nom (**Figure 2**). Ce système est constitué de « *plusieurs forts détachés, capables de se défendre mutuellement. Ils sont placés à 5 ou 10 kilomètres autour du noyau central pour abriter des bombardements la ville où se trouvent les soldats qui logent dans des casernes* »⁸. Ces forts sont construits pour la plupart entre 1874 et 1885, et partiellement remaniés entre 1885 et 1914⁹. Les anciennes fortifications bastionnées prennent place au sein du noyau central, où elles ont perdu tout rôle défensif de premier plan. L'approvisionnement des forts est assuré par une infrastructure ferroviaire à voie étroite (60 cm). Celle-ci relie la

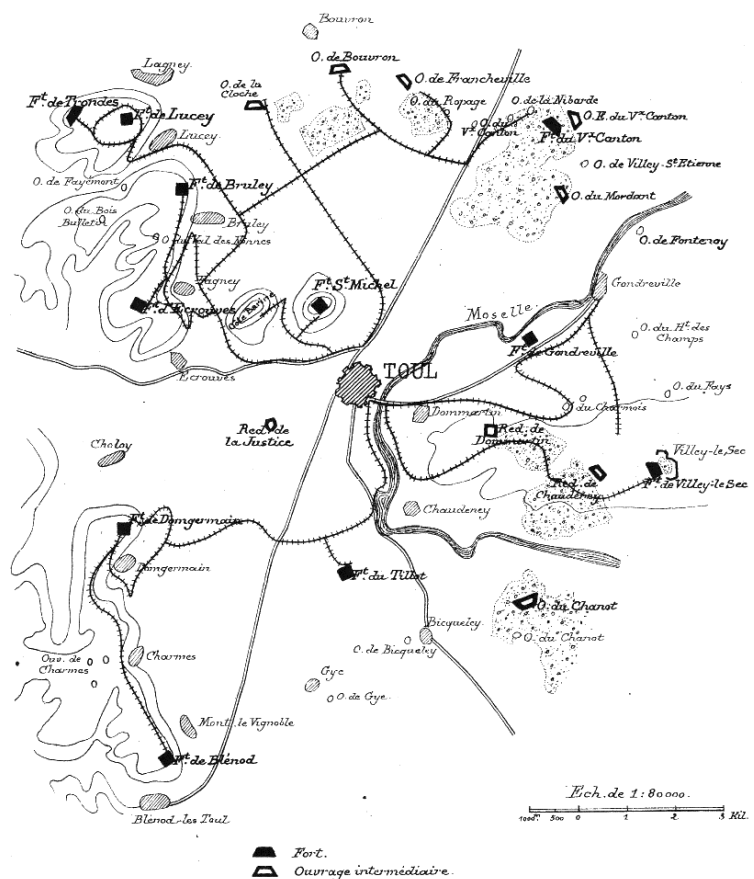


Figure 2 Plan de la place forte de Toul. Etudes toulouses, 2012, p. 20.

⁶ TRUTTMANN, PHILIPPE, *La barrière de fer*. Thionville : Ed. Gerard Klopp, 2000, page 16.

⁷ *Ibid.*

⁸ TRUTTMANN, PHILIPPE, *La barrière de fer*, *Op Cit.*, page 16.

⁹ TRUTTMANN, PHILIPPE, *La muraille de France ou la ligne Maginot*, *Op. Cit.*, page 22.

première ligne fortifiée, composée des différents forts, avec toute l'infrastructure nécessaire à la défense de la place, comme des magasins à munitions, à vivres, des entrepôts frigorifiques,... Dans les intervalles entre les forts, une série d'abris enterrés appelés « abris cavernes » permettent à l'infanterie en charge de la défense de ces intervalles, de se protéger. Ces troupes peuvent défendre ces intervalles depuis des positions de campagne plus ou moins développées. Dans certaines places, des hangars à dirigeables et des terrains d'aviation complètent le dispositif défensif. Toutes ces infrastructures veillent à assurer la continuité des feux autour de la place à défendre, créant ainsi, comme l'appelle Philippe Truttmann dans son livre, la « barrière de fer »¹⁰.

Les premiers forts de ce système (**Figure 3**), mis en chantier à partir de 1874, sont construits en maçonnerie, recouverte d'une couche de terre épaisse (2 à 5 mètres). Ils sont conçus pour résister à des obus de 21 cm, le plus gros calibre connu à l'époque dans l'artillerie de terre. Le fort type est polygonal, avec l'entrée située du côté de la place à défendre. Il est entouré d'un fossé sec, défendu par des canonnières¹¹. Le reste de l'armement est placé sur le dessus du fort, à l'air libre et derrière des parapets assurant protection et camouflage. Les soldats sont logés dans un casernement dont la façade s'ouvre sur une ou plusieurs cour(s). Les premiers cuirassements¹², en fonte dure, font leur apparition dans les forts les plus exposés.

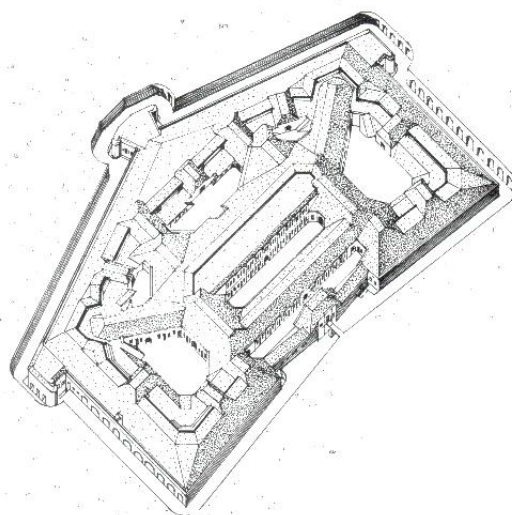


Figure 3 Fort de Douaumont en 1885, Truttmann, *la barrière de fer*, 2000, p. 116.

La crise de l'obus torpille (1885) :

En 1885, Eugène Turpin découvre la mélinite, un explosif chimique puissant, sans comparaison avec les autres explosifs de l'époque. Un an plus tard, la mélinite se voit combinée à un nouvel obus en acier, remplaçant ceux en fonte utilisés jusqu'ici. L'obus éclate après pénétration, pour causer un maximum de dégâts.

Ce nouveau projectile est testé la même année sur le fort de la Malmaison, près de Paris. Ce fort représente le fort « Séré de Rivières » type. Les résultats de ces tirs peuvent dès lors être considérés comme probants pour l'ensemble des forts français construits depuis 1874.

¹⁰ TRUTTMANN, PHILIPPE, *La barrière de fer*, Op. Cit.

¹¹ « Dans un ouvrage polygonal, casemate défilée à un ou deux étages de canons ou mousqueterie, destinée au flanquement des fossés ». Def. 1°. Dictionnaire Larousse, 2018.

¹² « Construction métallique blindée protégeant des éléments actifs de la fortification en usage depuis 1875 ». Def. 1°. Dictionnaire Larousse, 2018.

Les tests sont de plusieurs types : Explosion d'obus posés à même le sol afin de mesurer les mouvements de terres (gerbes), tirs directs et après ricochet sur les ouvrages, ainsi que sur les terrassements et, pour terminer, mesures des effets des tirs après pénétration dans les terres de couverture.¹³ Les fenêtres des casernements sont obstruées par des madriers, conformément aux principes de défense admis dans les forts à cette époque.

Les tirs sont exécutés sur le fort entre le 11 août et le 25 octobre 1886 (**Figure 4**). 242 coups¹⁴ sont tirés avec des canons de 150 et de 220 millimètres dotés de ce nouveau type d'obus.

Les résultats sont désastreux. Les voûtes en maçonnerie sont percées. Les barrages de madrier, censés protéger les soldats dans leurs chambrées, volent en éclat. Les obus, se désagrègent en des centaines d'éclats métalliques en explosant, devenant autant de projectiles mortels pour l'infanterie. Les terres de couronnement sont pulvérisées par les obus qui n'ont aucun mal à pénétrer les voûtes en maçonnerie, d'une épaisseur moyenne d'un mètre.

Ces résultats démontrent que les ouvrages construits en maçonnerie depuis 1874 ne sont plus capables de protéger, ni hommes, ni munitions. Ils concluent donc à l'obsolescence de tous les forts du système Séré de Rivières.

Les forts après l'obus torpille :

La réaction face aux expériences de la Malmaison va consister en une modernisation partielle des forts déjà construits. Entre 1885 et 1899, les forts Séré de Rivières vont être modernisés à l'aide d'un béton dit « spécial »¹⁵. Une couche de 2,5 mètres d'épaisseur est coulée par-dessus les maçonneries existantes afin de les protéger (**FIGURE 5**), et des casernements dits « à l'épreuve » sont construits. Ils permettent de mettre les hommes à l'abri de la nouvelle menace. Les pièces d'artillerie à l'air libre sont retirées et graduellement remplacées par des pièces sous cuirassements. Celles-ci ont le plus souvent une action à 360 degrés.

Le béton armé fait son apparition dans la fortification française en 1897. Il permet de renforcer les ouvrages avec des épaisseurs de béton plus faibles.

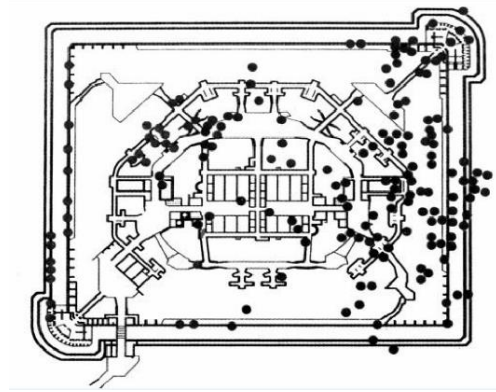


Figure 4 Tirs sur le fort de la Malmaison, <http://fortificationetmemoire.fr/le-fort-de-la-malmaison/>

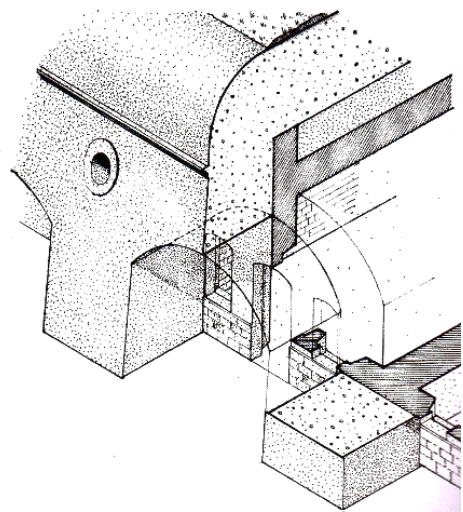


Figure 5 Fort Séré de Rivières, renforcement bétonné des maçonneries existantes, Truttmann, *La barrière de fer*, p. 98.

¹³ <http://fortificationetmemoire.fr/le-fort-de-la-malmaison/>, consulté le 20/02/18 [en ligne].

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ « Béton à base de 400 kilogrammes de ciment par mètre cube ». FRIJNS, MARCO, MALCHAIR, LUC, MOULINS, JEAN-JACQUES, PUELINCKX, JEAN, *Index de la fortification française 1874-1914*. Welkenraedt : Ed. Auto-edition, 2008, page 74.

Il est également utilisé dans la création de nouveaux ouvrages qui s'implantent souvent au sein des maçonneries existantes.

Le cuirassement de type « Tourelle à éclipse » se généralise, notamment à travers l'utilisation du canon de 75 millimètres Modèle 1897. Ce cuirassement peut, par un mouvement vertical, défiler ses tubes aux tirs ennemis en les protégeant dans le massif de béton qui l'entoure. Ne reste plus alors en surface qu'un dôme métallique, nommé calotte. De plus, un système de rotation lui permet d'effectuer des tirs à 360 degrés. Ce système permet de garantir une grande sécurité aux artilleurs ainsi qu'à leurs pièces. Ceux-ci ne sont en effet plus exposés qu'au moment du tir. En dehors de ces périodes, la tourelle éclipse est presque invulnérable (**Figure 6**).



Figure 6 Tourelle pour deux canons de 75mm, éclipse et en batterie. Photos personnelles.

Comparativement aux premiers forts « Séré de Rivières », dont la structure devait résister à des obus de 21 centimètres, les fortifications construites à partir de 1897 sont dimensionnées pour résister à des projectiles de 270 millimètres (27cm), le plus gros calibre utilisé par l'armée de terre à l'époque.

Les derniers forts construits ou modernisés peu avant 1914 sont construits entièrement en béton armé, et certains organes de tir (batterie) commencent à être détachés du fort principal et reliés à celui-ci par des galeries.

Les forts « Séré de Rivières » résistent avec des fortunes diverses aux attaques allemandes de 1914 et découvriront, après les forts belges, les capacités de destruction de l'artillerie de siège allemande. Ses « célèbres » mortiers de 420mm M-Gerät (**Figure 7**) et Gamma-Gerät (plus connus sous le nom de « Grosse Bertha »), ainsi que des mortiers lourds autrichiens de 305 millimètres. Ces armes, couplées à une propagande allemande savamment orchestrée, convainquent au sein-même de l'État-Major français, de l'inutilité des forts. De plus, depuis septembre 1914¹⁶, une grave pénurie dans l'armement français sévit. Ces deux facteurs conjugués conduisent au prélèvement, dans tous les forts de la place, des



Figure 7 Mortier de 420mm dit "Grosse Bertha",

<https://www.caminteresse.fr/histoire/quest-devenue-la-grosse-bertha-1188550/>

¹⁶ TRUTTMANN, PHILIPPE, *La muraille de France ou la ligne Maginot*, Op. Cit. , page 35.

différents canons ainsi que de leurs munitions, ne laissant aux garnisons que des armes légères pour la défense rapprochée.

En 1916, les Allemands attaquent Verdun et se heurtent, non sans surprise, aux forts désarmés qui résistent aux différentes vagues d'assaut. Cette résistance inattendue pousse l'État-Major français à revoir sa position et à décider de réarmer les forts au plus vite. De plus, différents travaux menés avec plus ou moins d'improvisation, améliorent les moyens de défense et les conditions de vie des soldats français. Ces travaux, dits «de 17» (**Figure 8**), consistent en le creusement de galeries sous les forts, afin de mettre la garnison et les munitions à l'abri des bombardements normaux ou au gaz. Ces galeries débouchent en arrière de la ligne de front et permettent un approvisionnement du fort, même lors des combats.

De nouveaux postes de tir et d'observation, reliés aux galeries des «travaux de 17», permettent de compléter le champ de tir de l'ouvrage. Dans certains cas, ces galeries sont complétées par toute une série de locaux servant d'infirmérie, de cuisine, de chambrées, d'usine électrique, ... ne laissant plus au niveau du fort, que les organes de tir. Ceux-ci sont alors généralement reliés aux galeries par des puits munis d'échelles.

Les «travaux de 17» comptabilisent, à la fin de la guerre, un total d'environ 31,5 kilomètres¹⁷ de galeries sous les différents forts de Verdun.

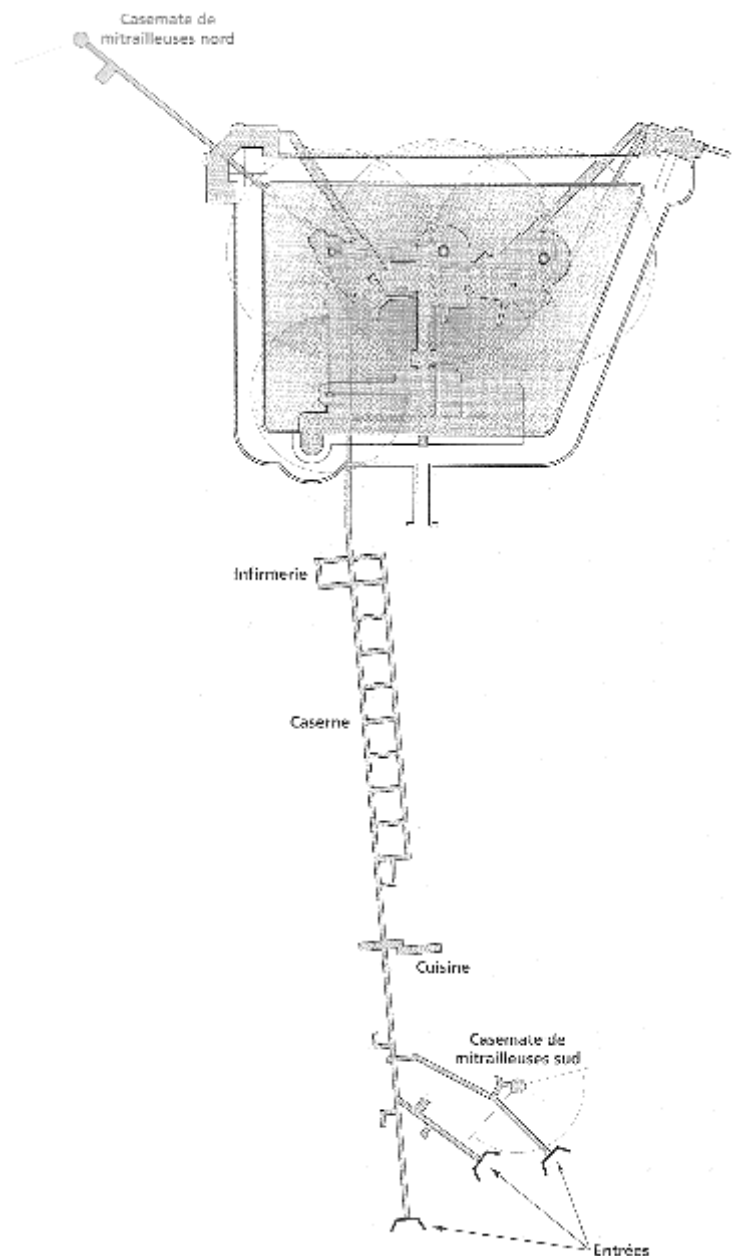


Figure 8 Fort de Vacherauville, travaux "de 17", Truttman, la muraille de France ou la ligne Maginot, p. 39.

¹⁷ Ibid.

1.3) Le système fortificatif belge :

Née d'une révolution populaire contre le Royaume des Pays-Bas en 1830, la Belgique est officiellement reconnue comme État neutre par les grandes puissances, lors de la conférence de Londres en 1831¹⁸.

Suite à la guerre franco-prussienne de 1870 évoquée ci-dessus, la France fortifie sa frontière et y masse ses armées.

En Belgique, la mobilisation de l'armée révèle de nombreux problèmes au sein de celle-ci. Ces problèmes ne seront pas encore tous résolus à la veille de la première guerre mondiale.

L'Allemagne, quant à elle, face à la « barrière de fer »¹⁹ française, développe le plan Von Schlieffen-Moltke (**Figure 9**). Ce plan prévoit la traversée de la Belgique en cas d'attaque de la France, avec une possibilité de violation du territoire en cas de refus des autorités belges. L'invasion de la France se fait alors par le nord, afin de prendre les troupes françaises à revers le long de la frontière franco-allemande.

La Belgique, dont la neutralité est soutenue par la France et la Grande-Bretagne, est bien consciente de sa position défavorable en cas de conflits.

En effet, le sillon de la Meuse est le seul obstacle naturel empêchant une traversée du pays par une armée venant de l'est ou du sud. Il faut donc sécuriser cet obstacle le plus rapidement possible.

En 1886, le gouvernement belge vote les crédits nécessaires à la fortification de la Meuse à Liège et Namur. La première a pour but la défense face à une attaque venant de l'est, tandis que la seconde doit prévenir une attaque par le sud du pays.

Pour réaliser ces nouvelles fortifications, l'état belge fait appel au général Henry Alexis Brialmont (1821-1903), ingénieur militaire belge déjà connu pour les plans de la nouvelle ceinture fortifiée d'Anvers. Son principe est semblable au système français. Il se compose d'une série de forts, capables de battre les principales voies de communication du feu de ses canons et de se couvrir les uns les autres. Entre ces forts doivent prendre place des troupes d'intervalle dans des redoutes²⁰ de campagne.

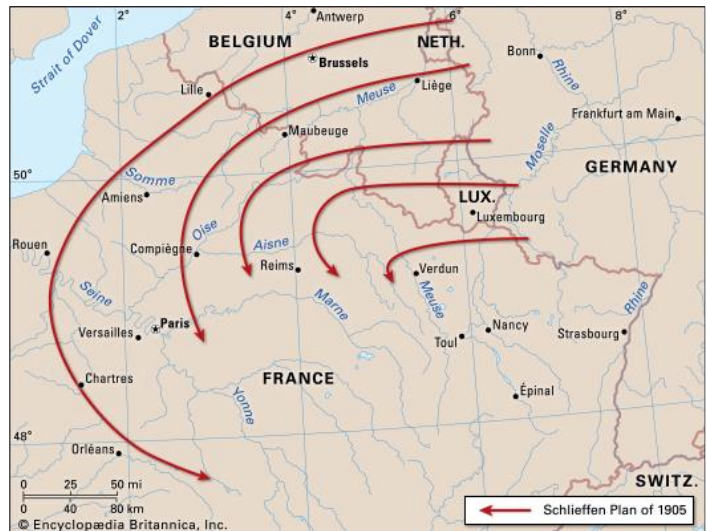


Figure 9 Plan Schlieffen-Moltke, <https://media1.britannica.com/eb-media/09/178709-004-C3306AFE.jpg>

¹⁸ https://www.belgium.be/fr/la_belgique/connaitre_le_pays/histoire, consulté le 14/04/19 [en ligne].

¹⁹ TRUTTMANN, PHILIPPE, *La barrière de fer*, Op. Cit.

²⁰ « *Petit ouvrage de fortification isolé, fermé, de forme carrée* ». Def. 1°. Dictionnaire Larousse, 2018.

Ces forts sont distants de 6 à 9 kilomètres du centre-ville qu'ils ceinturent (**Figure 10**).

²Contrairement au système français, Brialmont va opter pour une fortification entièrement bétonnée, ainsi qu'une standardisation maximale des éléments de fabrication. Les mêmes coffrages peuvent être utilisés pour tous les chantiers, idem pour l'armement,... Contrairement au système français, aucune infrastructure de soutien n'est prévue à l'intérieur de la place. De même, il n'existe pas de système ferroviaire à voie étroite. Les forts sont seulement reliés entre eux par une voie stratégique. Cette voie a notamment servi lors de la construction des ouvrages.

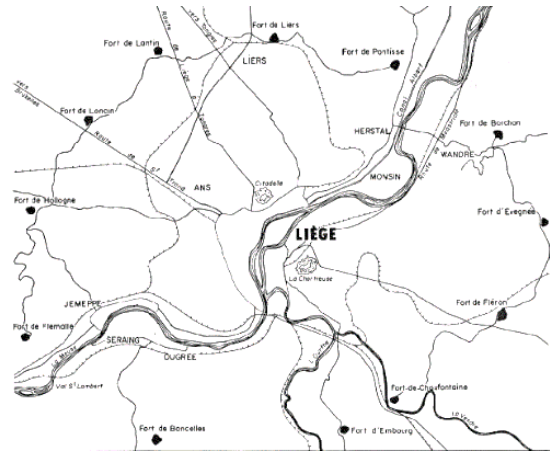


Figure 10 Système de défense de Liège, aussi appelée ceinture fortifiée de Liège.

<http://maquette-garden.forumactif.com/t24886-les-forts-de-la-pfl-1888-1892>

Le fort de la Meuse type :

Pour les forts de la Meuse, Brialmont imagine un fort enterré type triangulaire (**Figure 11**), entouré de fossés secs, défendus par des coffres d'escarpe et/ou de contrescarpe. L'artillerie principale, placée sous coupoles tournantes, est regroupée au sein d'un grand massif bétonné appelé « massif central ». A chaque angle du fort (appelé « saillant »), une petite coupole éclipseable, équipée d'un canon à tir rapide, assure la défense rapprochée de l'ouvrage. Du côté intérieur à la ville se trouvent les locaux nécessaires à la vie de la troupe, situés en escarpe et en contrescarpe d'un fossé dit « de gorge ». Les deux autres côtés du triangle, situés en théorie face à l'ennemi, ne disposent plus d'un mur en béton en guise d'escarpe, mais bien d'un talus

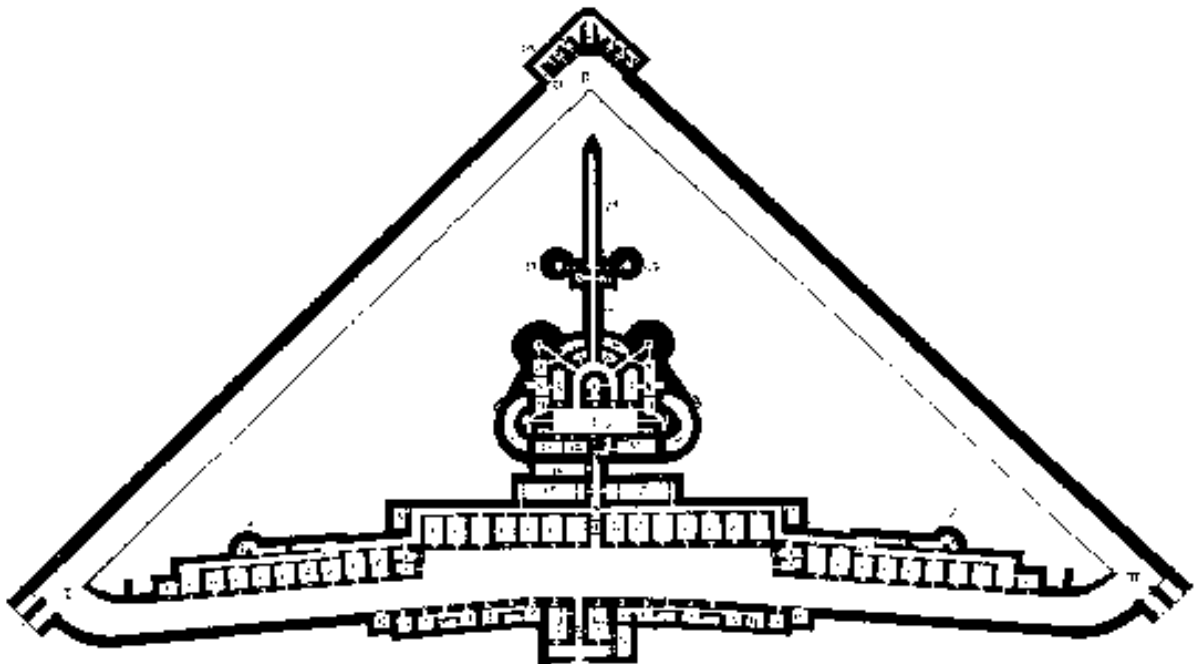


Figure 11 Plan d'un grand fort Brialmont type. ASBL Musée fort de Flémalle.

en terre se terminant par des profils « en banquettes », permettant à de l'infanterie de compléter la défense rapprochée en cas d'attaque ennemie.

Ce fort type est décliné en deux variantes, le grand et le petit fort (**Figure 12**). Nous dressons ci-après un tableau comparatif succinct des différences principales entre les deux variantes :

	Petit fort (type)	Grand fort (type)
Armement ²¹	3 petites coupoles de 5.7cm à tir rapide 2 coupoles pour un canon de 12cm 1 coupole pour deux canons de 15cm 1 coupole pour un obusier de 21cm	4 petites coupoles de 5.7 cm à tir rapide 2 coupoles pour 2 canons de 12cm 1 coupole pour deux canons de 15cm 2 coupoles pour un obusier de 21cm
Fossé de gorge	Droit, d'une seule section	Pseudo bastionné, courtine large ou étroite
Défense du fossé de gorge	Coffre simple de contrescarpe	Coffres de gorge à la courtine

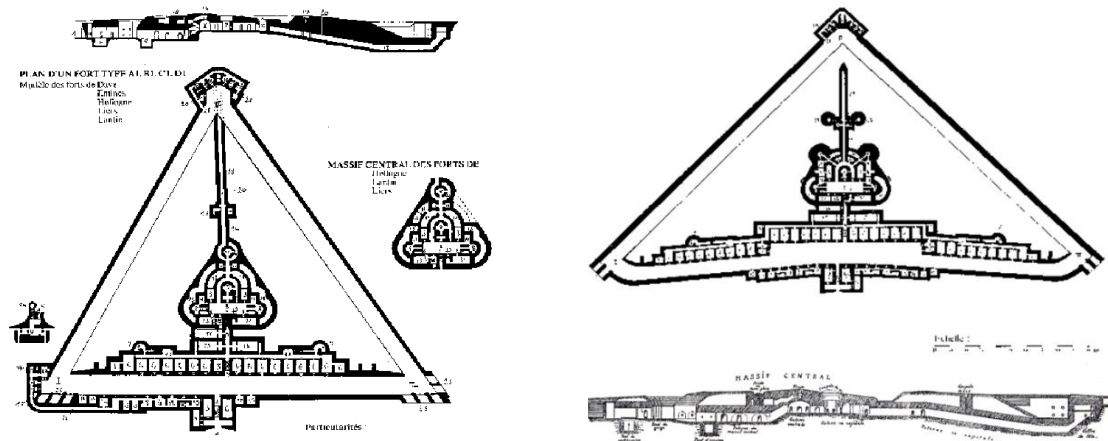


Figure 12 Comparaison entre un petit et un grand fort. ASBL Musée fort de Flémalle.

Les éléments principaux du fort type sont les suivants²² :

- L'entrée du fort (1) :

L'entrée du fort se fait par une rampe descendante qui débouche sur une place appelée « tambour de poterne ». Ce tambour est défendu par 4 créneaux pour fusils, situés de l'un des côtés de l'entrée. Un porche pavé mène jusqu'au fossé de gorge. Le franchissement de ce porche est entravé par plusieurs obstacles. En premier lieu, un pont à effacement latéral permet, lorsque celui-ci est tiré à la main, de découvrir un fossé de 4 mètres de profondeur, destiné à barrer l'accès. Derrière ce pont se trouve une double grille en fer forgé qui, une fois fermée, empêche tout passage vers l'intérieur de l'ouvrage.

²¹ Un inventaire de l'armement des forts est disponible à l'annexe I du présent travail.

²² La numérotation des éléments ci-dessous renvoie à l'annexe II du présent travail.

Derrière cette grille se situent les deux entrées des corps de garde. Ces locaux sont de grands locaux voûtés éclairés par une fenêtre qui peut être obstruée en temps de guerre par une rangée de poutrelles. Un canon de 5.7 centimètres à tir rapide, située dans le local d'escarpe face à la poterne, complète la défense de l'entrée.

- Le fossé de gorge et les locaux de contrescarpe (2):

Comme dit plus haut, le fossé de gorge est le seul donnant accès à des locaux à destination de la troupe : les chambrées, l'infirmierie, le mess des officiers,... Ils sont situés en escarpe et disposent tous d'une fenêtre pouvant être obturée par un barrage de poutrelles et des sacs de sable. Du côté de la contrescarpe se trouvent les locaux de service tels que la boulangerie, le lavoir, la salle d'affusion, la cuisine, les toilettes, ...

En fonction de la taille du fort (Grand ou petit), le fossé de gorge est, soit d'un seul tenant, soit pseudo-bastionné. Dans le premier cas, la contrescarpe est pourvue d'un coffre²³ de contrescarpe à deux étages, muni de deux canons d'un calibre de 5.7 centimètres défendant toute la longueur du fossé. Dans le second cas, le fossé est brisé par une courtine à hauteur de la poterne d'escarpe, dont les deux côtés sont pourvus chacun de deux canons de 5.7 à tir rapide croisant leur feu pour défendre chacun un demi fossé de gorge.

- L'escarpe et la galerie en capitale (3):

Située sur l'axe de symétrie du fort, la poterne d'escarpe permet l'accès à la galerie centrale du fort, appelée galerie en capitale. Le niveau de cette galerie se trouve un mètre en dessous du niveau de la contre-escarpe. Le dispositif d'obstruction est le même qu'en contre-escarpe, à savoir un pont roulant et une grille. Passés cette grille, nous arrivons au croisement principal du fort. A gauche et à droite partent deux galeries desservant tous les locaux d'escarpe. Au $\frac{3}{4}$ de ces galeries sont greffés les escaliers d'accès aux deux coupoles de 5.7 centimètres déjà évoquées ci-dessus. Continuons tout droit. A gauche et à droite se trouvent des portes à guichet : Ce sont les accès aux poudrières. Locaux spacieux, ils contiennent chacun 6 tonnes de poudre noire destinées aux coupoles du fort. Le local est divisé en un sas d'accès, le local des poudres et le local des lampes. Ce local communique avec le précédent par trois niches contenant des lanternes, maintenues derrière un verre hermétique pour éviter toute étincelle.

En continuant dans la galerie en capitale, se trouve encore une double porte, l'accès au magasin à charbon et au local des chaudières. De la galerie en capitale monte ensuite un escalier menant à la salle de rassemblement.

- Le massif central (4) :

²³ Organe de tir servant à la défense d'un fossé et ne pouvant tirer généralement que dans celui-ci.

Au centre du fort Brialmont se situe le massif central (**Figure 13**). Celui-ci prend la forme d'une énorme masse bétonnée non-recouverte de terre. Au centre du massif central se situe la salle de rassemblement. Cette salle est le centre névralgique du fort. S'y trouvent les accès aux coupoles de 21 centimètres (1), de 12 centimètres (2) et de 15 centimètres (3). On peut également accéder, depuis cette salle, à la salle de la dynamo, au bureau de tir, au débouché d'infanterie et aux coffres de tête, à de nombreux magasins attenants à chaque coupole et à quelques logements disséminés sous la carapace de béton. L'escalier d'accès au débouché d'infanterie permet de rejoindre les banquettes d'infanterie dont il est question plus haut, ainsi que la coupole phare (4). Celle-ci servait à l'éclairage des abords ainsi qu'à la communication avec les forts voisins par l'intermédiaire de signaux lumineux.

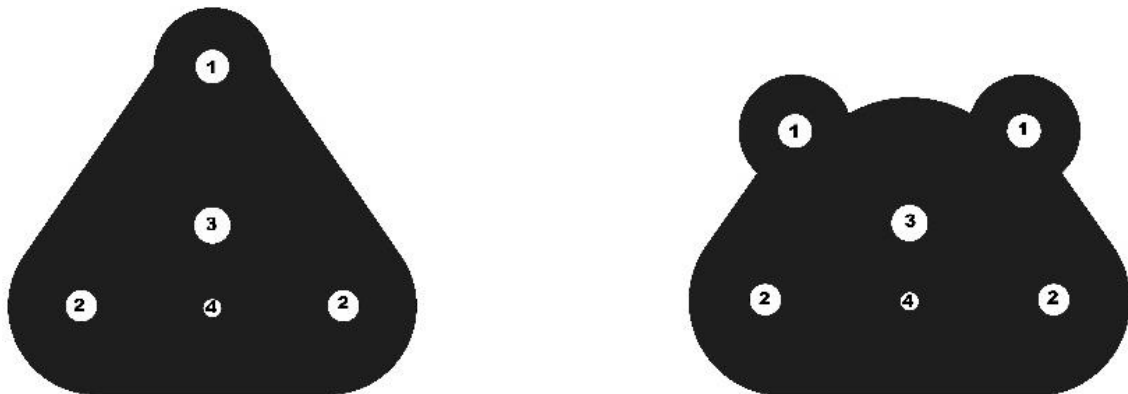


Figure 13 Comparaison entre grand et petit massif central. Travail personnel

- Le coffre de tête (5) :

Du massif central, et toujours selon l'axe de symétrie du fort, une galerie permet de rejoindre le coffre de tête, situé la pointe du triangle. Cette galerie dessert la ou les coupoles de 5.7 centimètres (en fonction de la variante du fort) avant de plonger sous le fossé pour passer en contrescarpe. Le coffre de tête à deux étages défend les deux fossés restants à l'aide de 4 canons de 5.7 sur affûts dits « chandeliers ».

Après avoir décrit un fort de la Meuse type, on ne peut se passer de dire que ce plan de base a connu de nombreuses variantes, en particulier pour des raisons liées à la nature du terrain.

Le fort triangulaire devient ainsi quadrangulaire, ce qui rajoute un coffre à la tête de l'ouvrage.

Le petit fort est parfois doté d'une courtine à la gorge, ce qui modifie son tracé et supprime le coffre simple de contrescarpe.

L'évolution :

Les forts de la Meuse ont été construits entre 1888 et 1891²⁴. Pour la première fois, on utilise le béton comme unique matériau de construction pour un gros ouvrage fortifié. Ce béton est simple, non-armé et coulé uniquement de jour. En effet, les techniques de construction de l'époque ne permettaient pas une coulée continue. Cette technique aurait permis de créer un ouvrage monolithique, coulé d'un seul bloc et donc plus résistant. Le résultat obtenu est donc un ouvrage constitué d'une multitude de couches de béton, sans réelle cohésion entre elles, ce qui conduit à diminuer sa résistance. De plus, des manquements dans le respect du cahier des charges ont conduit à l'utilisation des galets dont la taille aurait dû être un facteur éliminatoire. En effet, d'après ce document, les galets devaient pourvoir passer par un anneau de 6 cm de diamètre et rester bloqués par un de 2 cm²⁵.

La ventilation du fort prévoyait une circulation d'air naturelle entre les différentes entrées de l'ouvrage. En cas d'attaques, les poussières créées par les bombardements, les gaz dégagés par les armes ainsi que d'éventuels gaz de combats pénétraient donc directement dans les galeries et locaux de l'ouvrage.

Tous ces défauts auront de lourdes conséquences sur la résistance des forts en 1914.

Les forts de la Meuse en août 1914 :

Contrairement à la France, les forts n'ont, pour ainsi dire, pas évolués entre leur construction, en 1888, et le déclenchement du premier conflit mondial, en 1914. Or, et nous l'avons vu dans le chapitre précédent, le passage du XIX^e au XX^e siècle fut une période de développement important pour l'artillerie. Dimensionnés pour résister à des obus de 21 centimètres, les ouvrages de Brialmont furent attaqués en août 1914 par des calibres pouvant aller jusqu'à 30,5 voire même 42 centimètres pour certains d'entre eux.

Malgré tous ces défauts, les forts de la Meuse permirent, grâce à l'héroïsme de la plupart de leurs défenseurs, de retarder le plan Schlieffen bloquant devant Liège et Namur les forces allemandes pendant un temps bien plus important que ce que ceux-ci n'avaient prévu. De plus, la résistance inopinée de ces deux places fortes obligea les allemands à révéler plus tôt que prévu leur nouvel armement, les mortiers de 42 cm M et Gamma Gerät dits « Grosse Bertha », arme secrète qu'ils réservaient, comme nous l'avons vu plus tôt, aux places fortes françaises²⁶

1914-1916, les forts belges sous l'occupation allemande :

Après les combats d'août 1914, les allemands prennent possession des forts de la Meuse et les transforment en points d'appui d'infanterie.

Un certain nombre de modifications est apporté pour pallier aux principaux défauts apparus dans les forts durant les combats d'août 1914.

²⁴ BRAGARD, PHILIPPE, DOUETTE, DENIS, VANDENBROUCKE, *Forts de la Meuse, Place de Namur, Images et textes de la construction des forts (1887-1892)*. Namur, Les Amis de la Citadelle de Namur, 2010, page 5

²⁵ *Ibid.* page 22.

²⁶ VERNIER, FRANCK, *Le calvaire des forts belges sous les coups de la Grosse Bertha, Liège – Namur – Anvers*. Verviers, Ed. du Patrimoine Militaire, 2014, page 5.

Face au peu de documentation trouvée sur le sujet, nous dressons ci-dessous une liste non-exhaustive de ces modifications :

- Durant le siège des forts, l'absence de latrines dans l'escarpe avait obligé les soldats à utiliser des bacs inodores, dont la contenance s'était vite révélée insuffisante. Pour pallier à ce problème, l'occupant va créer dans le dernier local du fossé de gorge des latrines.
- Une ventilation efficace va aussi être mise en place. Pour ce faire, deux prises d'air sont construites sur les glacis du fort. Celles-ci convergent vers une galerie qui aboutit dans l'avant dernier local d'escarpe. De là, un ventilateur distribue l'air frais dans le fort à l'aide de conduites suspendues aux voûtes.
- Les entrées d'escarpe sont modifiées. Le débouché d'infanterie est remplacé par un bunker muni d'une double sortie chicanée (**Figure 14**). Ces deux sorties sont défendues chacune par un créneau de fusiller. La poterne d'escarpe voit quant à elle ses dimensions réduites. Le pont roulant est supprimé et une entrée chicanée fermée par des barrages de poutrelles voit le jour.
- L'armement des coupoles est démonté de même que les cuirassements trop fortement endommagés.
- Les superstructures des ouvrages sont modifiées. Les talutages sont revus afin de garantir une plus grande sécurité à l'infanterie.
- Certains bétons endommagés par les combats sont réparés.

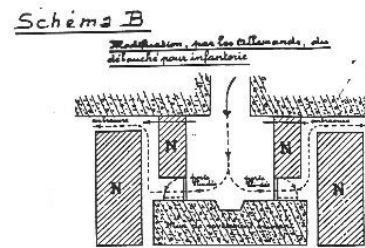
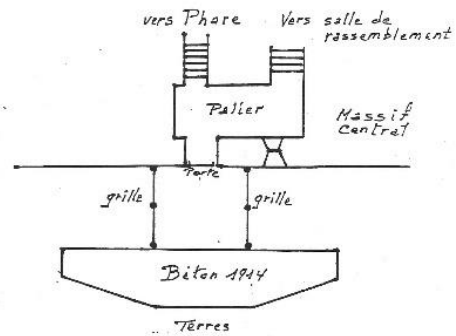


Figure 14 Débouché d'infanterie, modifications allemandes. ASBL Musée fort de Flémalle.

L'entre-deux-guerres :

En 1918, les belges reprennent possession des forts de la Meuse et y constatent les modifications faites par les allemands. En 1920, l'« Accord militaire défensif franco-belge pour le cas d'une agression allemande non provoquée » est signé entre la Belgique et la France²⁷. Cet accord, rendu possible grâce à la disparition de l'obligation de neutralité belge, garantit notamment une intervention militaire de la part de l'armée française en cas d'agression. Cet accord reste en vigueur jusqu'en 1936, année en laquelle la Belgique opte à nouveau pour la neutralité.

Les différentes doctrines de défense du pays :

Entre 1920 et 1939 deux conceptions principales s'affrontent au sein de l'état-major belge :

- La défense du pays en profondeur : celle-ci est basée sur un rapport de force favorable pour notre armée. Dans le cas contraire, elle doit avoir la mobilité nécessaire pour se

²⁷ https://www.persee.fr/doc/rbph_0035-0818_2004_num_82_1_4835, consulté le 21/02/19 [en ligne].

replier derrière l'Escaut. Cette manœuvre a pour but de rejoindre les armées française et anglaise venues à la rescousse conformément aux accords de Locarno.

- La « défense intégrale » : défense menée sur un front permanent à hauteur des anciens champs de bataille. L'ensemble de ce front est divisé en 5 secteurs dont la défense doit être organisée dès le temps de paix et de manière permanente²⁸.

Cette querelle interne aura des répercussions sur la défense globale du pays de manière générale et sur la fortification en particulier, amenant dans la plupart des cas à des solutions de compromis.

La défense de la Meuse, réutilisation des vieux forts :

En octobre 1926 est créée la « Commission d'études de la meilleure utilisation des forts ».

Elle doit « *se borner à l'étude de l'utilisation de nos forts partiellement détruits* ». ²⁹

Tout au long de la lecture des rapports de cette commission, nous avons pu nous rendre compte que le facteur principal influençant les travaux à effectuer sur les forts de la Meuse fut plus que jamais l'aspect financier. En effet, la phrase d'ouverture de cette commission déclare explicitement que « *la commission ne retiendra que des transformations dont le coût ne dépasse pas les possibilités économiques actuelle du Pays. Celles-ci excluent toute transformation profonde de notre système défensif et n'autorisent qu'une appropriation de ce système* ». ³⁰

Le premier rapport de la commission, en date du 22 octobre 1926, fixe d'abord le rôle des forts dans le dispositif militaire belge. « *Ces organisations [Ndlr : les forts] sont nécessaires non seulement pour faciliter initialement la couverture et la concentration de l'Armée et des renforts alliés mais aussi pour faciliter ses opérations et éventuellement lui fournir le temps indispensable pour préparer de nouveaux groupements de forces en cas de revers. La fortification aide les jeunes troupes en inscrivant leur devoir sur le terrain.* » ³¹

Le 21 novembre 1926, la commission s'accorde sur le fait que la présence d'un armement de sûreté, pouvant battre les objectifs lointains et ainsi retarder l'ennemi dans son avancée, est nécessaire dans les forts.

Le 28 janvier 1927, le matériel destiné à cette mission est défini. Il s'agit du canon de 150mm/L40 ainsi que du canon de 105mm/L35³². Ces canons avaient été donnés par l'Allemagne en dommage de guerre à la Belgique en 1918. A l'époque du rapport, la Belgique disposait de 37 tubes de 105mm et de 33 tubes de 150mm. La Fonderie Royale des Canons (FRC), à la demande de la Commission, étudie la possibilité du placement des pièces dans les anciennes coupoles de 12cm pour les 105mm et de 21cm pour les 150mm.

²⁸ COENEN, EMILE, VERNIER, FRANCK, *La position Fortifiée de Liège Tome V, Les forts de la Meuse modernisés*. Erp : Ed. de Krijger, 2004, page 14.

²⁹ *Premier rapport de la Commission pour la Meilleure utilisation des forts*, 22/10/1926, Archives du War Heritage Institute, Bruxelles, Fond Moscou, boîte 154.

³⁰ *Ibid.*

³¹ *Ibid.*

³² 105mm/L35 : Le 105mm correspond au calibre du projectile. La mention L35 indique la longueur du tube, égale à 35 calibres. Le calibre étant de 105mm, cela donne donc une longueur de tube de 3675 millimètres, soit un tube de 3 mètres 675.

La Commission rend son rapport final le 22 février 1927. Elle conclut par le fait que les forts peuvent encore servir à la défense du pays moyennant des interventions peu coûteuses. Celles-ci comprennent la mise en place d'un armement de sûreté dans les anciennes coupoles et le renforcement de la défense rapprochée de l'ouvrage à l'aide de mitrailleuses. Elle s'accorde également sur le fait qu'un réseau de communication performant entre le fort et l'extérieur doit être mis en place. Ce réseau serait raccordé à de nombreux observatoires permettant au fort de « voir sans être vu ».

Des réseaux de galeries et d'abris souterrains seraient, enfin, creusés sous le fort existant, afin de mettre la garnison à l'abri. Les soldats rejoindraient leur poste à l'aide d'ascenseurs doublés d'échelles. Une galerie de plusieurs centaines de mètres relierait l'arrière des lignes avec ce réseau souterrain afin de permettre une relève de la garnison ainsi qu'un acheminement constant en vivres et munitions³³. Cet étage souterrain serait pourvu d'une protection contre les gaz de combats³⁴.

Les principes de réarmement :

Le 21 mars 1927 est créée la « Commission d'études du système fortificatif du pays ». Celle-ci a pour mission de définir le système fortificatif dont a besoin le pays.

Elle aboutira, par l'intermédiaire de son rapport du 2 février 1928, aux principes de réarmement des forts de la Meuse. Ces principes sont les suivants :

a) D'un point de vue structurel :

- Suite à la mauvaise résistance du béton non-armé de 1888, les autorités militaires vont admettre le principe de réduction des galeries en les doublant de béton armé. Contre les murs de 1888, un nouveau mur de 25 centimètres de béton armé est construit. A 1 mètre 80 de hauteur en moyenne, est posée une cornière qui sert de support pour le plafond. Ce plafond est composé d'une tôle ondulée en acier galvanisé cintrée de 3 millimètres d'épaisseur. Les tôles servent de coffrage perdu pour couler une nouvelle épaisseur de 25 centimètres de béton armé servant de plafond à la nouvelle galerie. L'espace compris entre ce nouveau béton et le sommet de la voûte de l'ancienne galerie est comblé de gravats (**Figure 15**).

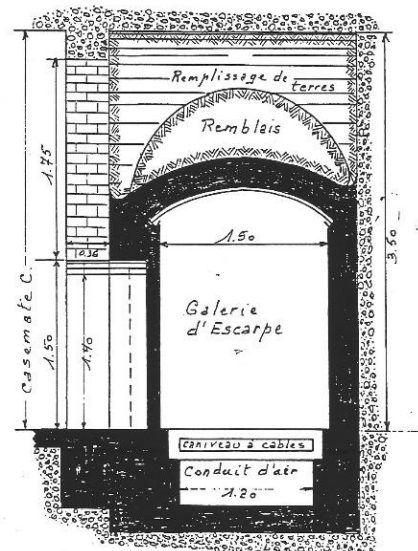


Figure 15 Renforcement d'une galerie.

ASBL Musée fort de Flémalle.

- Un nouvel étage, creusé à même la roche, est créé sous le massif central du fort existant. Cet étage, appelé quadrilatère, permet de stocker les munitions profondément sous terre. Des ascenseurs à munitions permettent

³³ On voit bien ici l'influence qu'ont eu les travaux 17 à Verdun sur nos généraux. Le projet tel que proposé par la Commission pour la meilleure utilisation des forts ressemble très fortement aux travaux 17 français.

³⁴ *Rapport final de la Commission pour la Meilleure utilisation des forts, Op. Cit.*

d'approvisionner les coupoles tandis que les soldats y accèdent par des puits munis d'échelles.

- Le fort est mis à l'abri d'une attaque par gaz de combats. Une tour, située à 400 mètres du fort dans un vallon, permet d'aspirer l'air frais à 18 mètres au-dessus du niveau du sol³⁵ (**Figure 16**). Cet air est amené jusqu'au fort par une galerie voûtée de 1 mètre 60 de hauteur sous plafond jusqu'à un ventilateur pouvant aspirer 27.000 mètres cubes d'air par heure. L'air est alors réchauffé via un échangeur thermique avant d'être envoyé dans tout le fort par l'intermédiaire des caniveaux à air. Dans les locaux, des vanes réglables permettent de gérer le débit d'air. Chaque local est également pourvu d'une évacuation d'air vicié débouchant à l'extérieur et pouvant être fermée par un trappillon hermétique. A l'entrée du fort, des locaux de

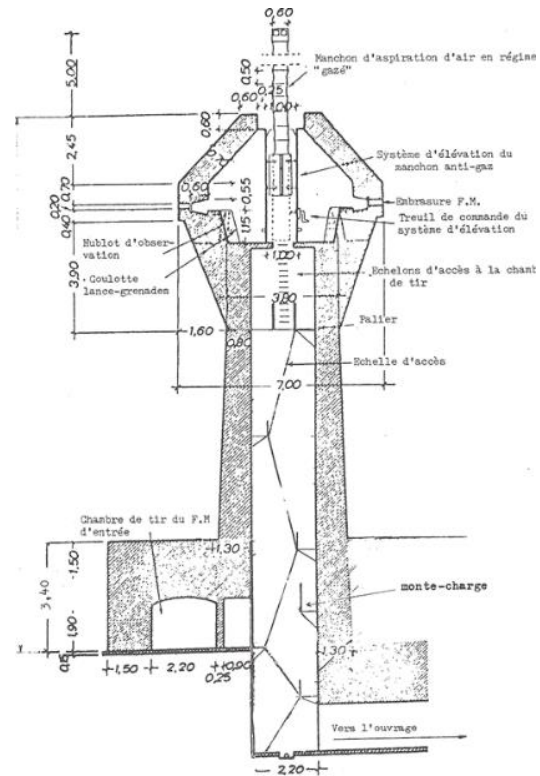


Figure 16 Coupe dans une tour d'air, Viatour, Seul entre Meuse et Ourthe, 2014, page 134.

- désinfection permettent à des soldats éventuellement gazés de se débarrasser de leurs vêtements avant d'être pris en charge par le service de santé du fort. Au niveau de l'infirmerie, des locaux à usage spécifique reçoivent ces gazés. Dans les locaux de désinfection se trouve également un vestiaire contenant des combinaisons étanches pour la sortie d'une patrouille.
- Les locaux et espaces ne servant plus dans le fort réarmé sont comblés à l'aide des gravats provenant du creusement des étages inférieurs.
- Pour abriter la troupe en temps de paix, deux bâtiments à ossature bois sont construits sur les glacis d'un côté ou de l'autre de la rampe d'accès. Outre de chambrées, ceux-ci sont dotés d'une salle de cours, d'un mess, d'une cuisine, d'un parloir, d'une cellule, ... Ces baraquements doivent être détruits à la déclaration de guerre, afin de dégager le champ de tir des armes du fort.

b) Du point de vue de l'armement³⁶ :

- Comme nous l'avons vu précédemment, l'armement du fort est modifié. Les vieilles coupoles, placées en 1892, reçoivent des armes d'origine allemande données comme dommage de guerre à la Belgique. Ces modifications sont réalisées par la Fonderie Royale des Canons, directement dans les forts pour les gros cuirassements, ou dans leurs ateliers, après démontage, pour les plus petits. Les coupoles de 12 centimètres

³⁵ Hauteur théorique des plus hautes nappes de gaz. Cependant, en cas de nappes plus haute, un système de prise d'air télescopique au sommet de la tour permettait de puiser l'air 6 mètres plus haut. Ce manchon télescopique était muni d'une toile badigeonnée d'un produit neutralisant les gaz ypérites.

³⁶ Les différentes coupoles sont illustrées dans l'annexe II située en fin du présent travail.

reçoivent, comme dit plus haut, un ou deux canon(s) de 105 millimètres, tandis que les coupoles pour obusier de 21 centimètres reçoivent un canon de 150 millimètres.

- L'ancienne coupole de 15 centimètres est modifiée pour recevoir une ou plusieurs sections de mitrailleuses, ainsi que des lance-grenades, afin d'assurer la défense rapprochée de l'ouvrage. Après modifications, les anciennes coupoles de 5.7 centimètres sont dotées d'obusiers de 75 millimètres.
- Finalement, la coupole phare est transformée en Poste d'Observation Cuirassé (P.O.C.). Son mouvement d'éclipse est supprimé et l'embrasure du phare est remplacée par 6 créneaux d'observation. En outre, les coupoles de 105, 150 et 75 mm reçoivent des moyens d'observation de type lunettes panoramiques.
- Les cuirassements manquants sont prélevés sur des forts où ils sont censés ne plus servir. Les avant cuirasses aussi sont récupérées sur différents forts à Namur, Anvers ou dans les forts non-réarmés de Liège.
- Les coffres reçoivent quant à eux des fusils mitrailleurs dans un dispositif spécial de forteresse.

c) Du point de vue des réseaux :

- Un réseau téléphonique interne permet la communication entre tous les organes du fort. Au niveau du bureau de tir, un central téléphonique permet de centraliser toutes ces lignes. Ce dernier est interconnecté avec un second central téléphonique relié quant à lui au réseau souterrain de la P.F.L.
- Une installation électrique performante est mise en place, afin de subvenir à tous les besoins du fort.
- Un réseau de chauffage, basé sur le principe de la cogénération³⁷, est mis en place pour supprimer l'humidité dans les galeries.

Les travaux de renforcement de la rive droite de la Meuse commencent en 1929³⁸. Les forts sont occupés en permanence à partir de 1935, ce qui n'empêche pas les travaux de se poursuivre.

En 1937 est créée la « Commission pour la Fourniture de l'Energie Electrique dans les Forts », plus souvent appelée « Commission Jamotte », du nom de son président, le Lieutenant-Colonel Jamotte. Celle-ci doit se pencher sur les nombreux problèmes relevés sur les équipements des forts réarmés. La commission rendra de nombreux rapports entre 1937 et 1939. Dans ceux-ci, beaucoup de recommandations pour améliorer le fonctionnement des forts, nouveaux comme réarmés³⁹.

³⁷ « La cogénération consiste à produire et à utiliser simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'une même énergie primaire et au sein de la même installation. Elle se base sur le fait que la production d'électricité (à partir d'un moteur thermique ou d'une turbine) dégage une grande quantité de chaleur habituellement inutilisée ».

Def. <https://www.connaissancedesenergies.org/qu-est-ce-que-la-cogeneration>, consulté le 21/02/19 [en ligne].

³⁸ COENEN, EMILE, VERNIER, FRANCK, *La position Fortifiée de Liège Tome V, Les forts de la Meuse modernisés, Op. Cit.*, page 18.

³⁹ Les forts nouveaux sont les forts d'Aubin-Neufchâteau, Battice, Eben-Emael et Tancremont.

En premier lieu, il s'avère que les groupes électrogènes installés dans les forts ne suffisent pas à la bonne marche des équipements installés dans les ouvrages.

Deuxièmement, il s'avère que le chauffage des forts pose problème. En effet, celui-ci ne fonctionne que quand les moteurs tournent (cogénération). Or, en temps de paix, l'électricité est fournie par le réseau civil. Les moteurs ne tournent alors que quelques heures par jour.

Troisièmement, la question de la ventilation du fort ainsi que de sa « Protection Z »⁴⁰ sont abordés. La commission estime qu'une ventilation performante des forts nécessite la mise en place d'une prise d'air de secours, pouvant pallier à une défaillance au niveau de la prise d'air principale. La construction d'un « local Z » est également évoquée. Selon les plans, celui-ci prend diverses formes : Un projet, refusé car jugé trop coûteux, prévoyait la création d'un local équipé d'un dispositif de filtrage d'air au niveau de la galerie d'air dans le réseau de grande profondeur. Un autre projet prévoyait de construire ce local dans une chambrée d'escarpe une fois celle-ci dégagée de ses terres de remblai. La surpression, principe adopté pour empêcher l'intrusion des gaz extérieurs et évacuer les gaz produits par les armes du fort, n'est pas suffisante dans les organes les plus éloignés du ventilateur principal, comme les coffres de défense par exemple. La commission préconise le placement de ventilateurs secondaires afin d'y assurer une surpression correcte.

Certaines de ces remarques seront prises en compte. Une chaudière d'appoint sera installée entre 1939 et 1940. Comme nous le verrons plus loin, les groupes électrogènes seront presque tous remplacés.

Par contre, les améliorations préconisées concernant la ventilation ne seront jamais réalisées. Le 10 mai 1940, date de l'invasion allemande en Belgique, des travaux seront encore en cours dans de nombreux forts.

⁴⁰ Protection contre les gaz de combat type ypérite

La position fortifiée de Liège au 10 mai 1940 :

En 1940, la Position fortifiée de Liège se compose d'une série de lignes de défense allant de la frontière allemande à la ville de Liège (**Figure 17**). Ces lignes sont, de l'Allemagne à Liège :

1) La ligne d'alerte : elle est composée de 35 maisons renforcées par un mur de béton, et situées à la frontière même. Son but était de prévenir au plus vite toute incursion ennemie sur notre territoire.

2) La position avancée : est constituée d'une série d'abris bétonnés (65 au total), répartis dans des villages situés sur les principales voies d'accès entre Liège et l'Allemagne.

3) La PFL I (Position Fortifiée de Liège I) : elle regroupe les 3 forts modernes d'Aubin-Neufchâteau, de Battice et de Tancremont (construits à partir de 1934) ainsi que 178 abris en béton couvrant les intervalles entre ces forts.

4) La PFL II : elle comporte les 6 anciens forts réarmés de Barchon, Evegnée, Fléron, Chaudfontaine, Embourg et Bonnelles. Elle était complétée par 65 abris répartis entre les différents forts, comme dans la ligne précédente.

5) La PFL III : cette ligne est la plus proche de Liège et est disséminée dans le tissu urbain. Elle a pour but d'empêcher l'irruption rapide de véhicules motorisés dans la ville. Elle est dotée de 42 abris dont 8 camouflés de manière extrêmement poussée et abritant de l'armement antichar. Ces abris défendent, en outre, des barrages routiers composés de différents obstacles contre irruption.

6) La PFL IV : dernière ligne de défense, elle est la seule située à l'ouest de la Meuse. Elle se compose des deux forts réarmés de Pontisse et de Flémalle ainsi que d'abris défendant le fleuve.

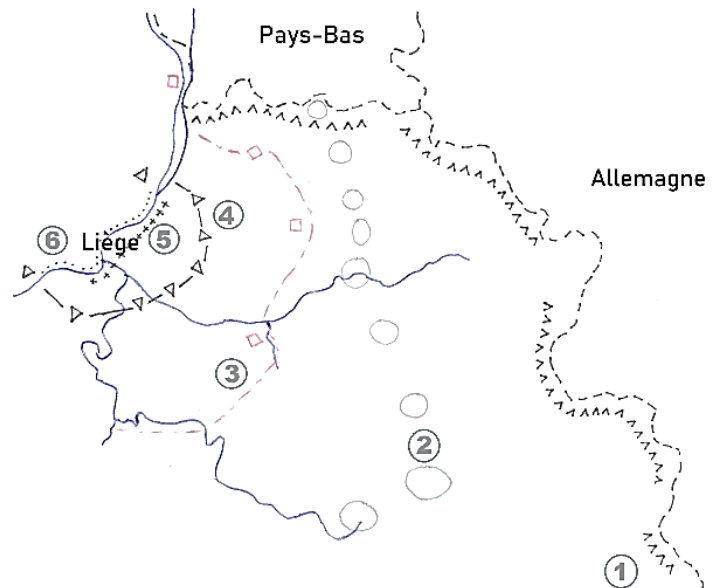


Figure 17 La position fortifiée de Liège. Carte personnelle

2) Le fort de Flémalle

Les chapitres précédents ont permis de situer le fort de Flémalle dans un contexte historique et géopolitique large. Nous allons maintenant décrire les particularités propres à ce fort à travers les différentes périodes que nous avons évoquées précédemment.

Les particularités du fort de Flémalle :

Comme nous l'avons vu plus tôt, le plan type de Brialmont s'est parfois adapté aux conditions du terrain. C'est le cas pour le fort de Flémalle.

Le site retenu à l'époque pour implanter l'un des forts de la Meuse est une colline dont le sommet culmine à 185 mètres d'altitude, située à cheval sur les communes de Mons-Lez-Liège, Flémalle-Grande et Flémalle-Haute. Il est le fort le plus occidental de la ceinture de Liège et verrouille la Meuse avec son voisin le fort de Boncelles (**Figure 18**). Pour remplir cette mission, Brialmont choisit d'implanter un grand fort. Cependant, en raison du manque de place au sommet de la colline, L'ingénieur s'écartera pour Flémalle du plan type triangulaire au profit d'un fort à quatre côtés (**Figure 19**), permettant de réduire la distance entre ses saillants. Cette modification de plan aura pour conséquence la création d'un deuxième coffre de tête (simple) afin de battre le quatrième fossé créé. Ce coffre simple et le coffre double sont reliés par une galerie de contrescarpe à laquelle se greffe la galerie classique d'accès au massif central. Etant donné que le fort est en quelque sorte « raboté de sa pointe », la galerie est munie d'escaliers au lieu de la traditionnelle pente, et ce afin de descendre plus vite sous le fossé. Les coupoles de 5.7 cm de tête sont plus éloignées de la galerie centrale que sur un fort classique, d'où la nécessité de les relier à celle-ci par une autre galerie.

Une autre différence majeure se situe au niveau de la contrescarpe du fossé de gorge.

En effet, cas unique dans les forts de la Meuse, Flémalle dispose de 7 chambrées destinées à la troupe en contrescarpe. Malheureusement, et ce, malgré nos recherches, nous n'avons pas encore trouvé la raison de cette spécificité unique.

Dernier élément notable, le fort n'est pas pourvu d'un puits d'eau potable comme c'est le cas dans la plupart des autres forts. A défaut de puits, l'ouvrage dispose d'une canalisation qui prend sa source dans une araine⁴¹ drainant le charbonnage des Kessales, siège du Xhoré, situé en contrebas de la colline et pompée jusqu'au fort.

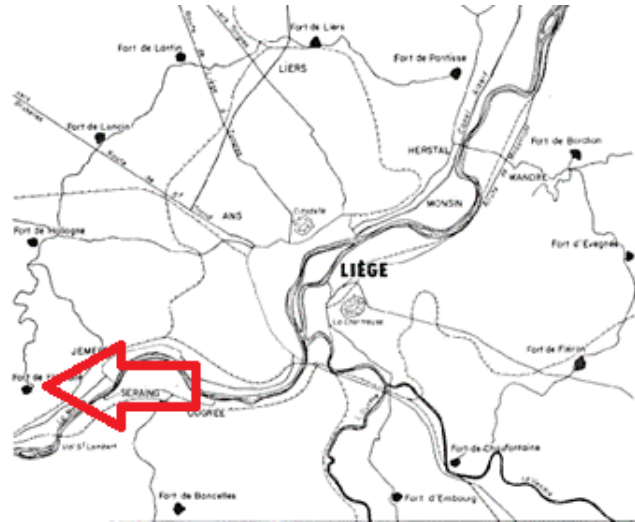


Figure 18 Situation du fort de Flémalle au sein de la ceinture fortifiée de Liège. <http://maquette-garden.forumactif.com/t24886-les-forts-de-la-pfl-1888-1892>

⁴¹ Nom local donné à une galerie d'exhaure. Ces galeries « avaient pour fonction d'évacuer, par gravité, les eaux des travaux supérieurs vers des points bas, des cours d'eau, des cavités karstiques ou au sein de formations géologiques fissurées, karstifiées ou drainantes, voire d'anciens travaux miniers ». Def. site internet du Service géologique de Wallonie.

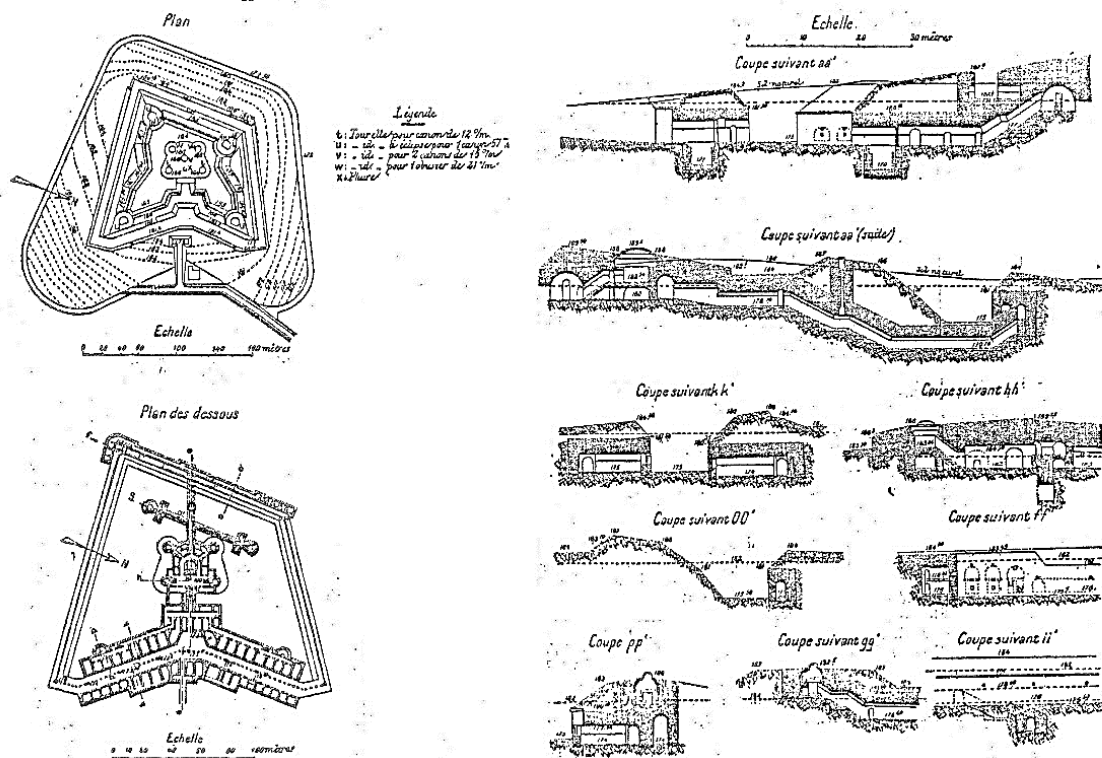


Figure 19 Plans et coupes du fort de Flémalle. Collection Musée Fort de Flémalle.

Combats d'août 1914 :

Les lignes qui suivent sont tirées du journal de campagne du fort, et ont pour but de comprendre les dégâts causés à l'ouvrage durant la période comprise entre le 4 et le 16 août 1914⁴².

Le fort est mis en état d'alerte le 30 juillet 1914. Les journées comprises entre le 30 juillet et le 9 août sont dédiées aux travaux dits « de mise en état de défense ». Ceux-ci comprennent notamment la mise en place d'un réseau de fils de fer barbelé autour de l'ouvrage ainsi que le dégagement du champ de tir⁴³ et la mise en place d'obstructions dans les routes et chemins alentours.

En 1913, des travaux d'étanchéité sur la toiture des locaux du Saillant IV avaient conduit à mettre à nu celle-ci en retirant les 5 mètres de terre formant le talus du massif central. Les soldats durent donc remettre en place le talutage de toute urgence. Cependant, à la lecture du journal de campagne, il semble que cette remise en place ne fut réalisée que de manière très limitée. Le 4 août, les Allemands violent la neutralité belge et envahissent le pays. Les effectifs du fort sont alors de 544 hommes.

Le premier contact visuel avec l'ennemi est renseigné le 13 août, lorsque la coupole de 15 cm ouvre le feu sur des allemands situés à Flémalle-Grande.

⁴² Les dégâts cités sont repris, par numéro d'ordre, sur le plan du fort constituant l'annexe III du présent travail.

⁴³ En cas de guerre, la garnison du fort procédait à la destruction de tous les bâtiments compris dans un rayon de 600 mètres autour du fort. Il en va de même pour toutes les plantations, haies et autres obstacles pouvant gêner l'observation et/ou les tirs du fort.

Le 14 août 1914 le fort subit son premier bombardement d'artillerie. Celui-ci se continue le 15 août et est principalement dirigé sur le coffre de courtine du Saillant IV, ainsi que sur le débouché d'infanterie. De par la conception même de l'ouvrage, ces endroits font partie des zones les plus vulnérables du fort. En effet, ils sont tournés vers l'intérieur de la place, normalement à l'abri d'un bombardement direct.

Le 16 août à 04h15 commence le bombardement final. Aux alentours de 7 heures, les gaz dégagés par les tirs du fort se mêlent à ceux provenant de l'explosion des obus ennemis pour envahir les galeries, rendant l'atmosphère irrespirable. Nous retranscrivons ci-dessous une liste dressée par le Lieutenant Peraux, sous-officier au fort de Flémalle en 1914. Cette liste a été faite le 16 août aux alentours de minuit, soit quelques heures avant la reddition du fort. Elle décrit, point par point, l'état du fort à cette heure :

1) La coupole de 15 cm, qui déjà en temps de paix, avait sa circulaire de roulement ovalisée, ne pouvait plus tourner par suite de l'agrandissement de la crevasse coupant le fort dans son axe, et d'un coup sur la calotte. La coupole de 21 cm était faussée, ne pouvant plus tourner, elle est déclarée hors service. La coupole de 5,7 du Saillant III, faussée également, ne pouvait plus se lever que très difficilement, et ne pouvait plus se caler.

2) La fissure coupant le fort dans son axe est agrandie dans la galerie centrale, du béton est tombé entre la cuirasse et l'avant-cuirasse de la 15.

3) Le mur du bureau de tir (1,5m d'épaisseur) est crevassé à l'intérieur sous le ventilateur, de gros blocs de béton sont enlevés au-dessus du massif central, à l'extérieur de ce local. Un trou de plus d'un mètre de profondeur existe dans le mur extérieur, en-dessous du ventilateur et à hauteur du terre-plein.

4) Un bloc de 2 m sur 1 est détaché et est prêt à tomber au local de la dynamo.

5) Un bloc de plusieurs mètres cubes est enlevé du massif central, entre les coupoles de 12 et de 21 cm ; un autre est prêt à tomber.

6) Le mur (épaisseur 2 m) de la galerie des fronts II-III est renversé sur 3 m et sur toute sa hauteur. Il faut ramper sous l'éboulement pour se rendre au coffre III. On voit un échafaudage au milieu du béton, ainsi que du sable non aggloméré !

7) Le coin du mur de la demi-batterie flanquante de gorge de droite est enlevé, le mur est fissuré et creusé jusqu'au percement.

8) La voûte de la boulangerie (2,5 m de béton et 2 m de terre) est percée et le four mis hors service.

9) Deux entonnoirs⁴⁴ remplis de terre barrent tout le passage au front de tête, devant le massif central.

10) Deux entonnoirs identiques, de plus de 3 m de diamètre existent au front de gorge, au-dessus du magasin à poudre et du local de réunion des soldats. L'un interdit l'approche du Saillant I. Entre les SIII et IV, il n'y a rien à cause du grand

⁴⁴ Cratères laissés par les bombardements en forme d'entonnoirs.

remblai de terre provenant des terres qui se trouvaient sur les locaux du demi-front de gorge de droite qu'on réfectionnait. Entre SIV et le tambour d'entrée, il fait impraticable.

11) Un grand entonnoir existe au débouché d'infanterie. Des matelas furent préparés pour le boucher en cas d'occupation des banquettes.

12) Les grilles du débouché d'infanterie sont tordues, déchiquetées ; la porte blindée arrachée.

13) Les grilles défensives des fronts I-II et III-IV sont brisées.

14) Le réseau de fils de fer du glacis de tête est complètement enlevé.

15) Le réseau des fronts I-II et III-IV est déchiqueté (dès le 14 à midi).

16) Les terres sont éboulées sur la galerie en capitale conduisant aux coffres de tête et sont retenues par la grille qu'elles ont bombée.

17) Les cheminées des locaux de gorge sont démolies, les terres enlevées sur les locaux de contre-escarpe, surtout sur les deux locaux situés de chaque côté de l'entrée.

18) Des éclats de projectiles sont entrés par les blindages des locaux de gorge, dans le couloir d'escarpe et au débouché d'infanterie, vers le phare. Les fenêtres ont été bouchées au moyen de matelas.

19) L'utilisation de la cuisine de contre-escarpe est devenue impossible dès le 15 après-midi (cheminée bouchée) ; l'installation des douches⁴⁵ à l'escarpe ne peut se faire, il faudrait pour cela, sous le bombardement, desceller les barreaux des fenêtres, l'ouverture des portes étant insuffisante. Il restait seulement une petite douche de 100 litres pour le café, insuffisante pour tout le monde.

20) Il n'est pas possible de relever les dégâts sur les voûtes des locaux du demi-front de gorge de droite et sur le pourtour de la coupole du SIV, ces parties sont dépourvues de terre et leur accès est impossible.

21) Les bacs inodores placés dans les couloirs sont insuffisants, des déjections, de l'urine sont répandues sur le sol, les matières désinfectantes font défaut.

A tous ces déboires doit sûrement se rajouter l'explosion du fort de Loncin survenue le jour précédent⁴⁶.

Le drapeau blanc est hissé le 16 août à 08 heures 30. Avec Flémalle, c'est le dernier fort de la position fortifiée de Liège qui se rend.

⁴⁵ Le terme douche s'entend ici au sens culinaire du terme

⁴⁶ Le 15 août 1914 à 16h20, le 23^{ème} coup d'un des obusiers de 42cm allemand mis en place pour le siège de Liège perfore la voûte de la poudrière de droite, provoquant l'explosion de celle-ci. Le fort entier fut soulevé, tuant 350 hommes sur le coup. De nos jours, l'imposant cratère toujours visible au milieu du fort de Loncin permet de se rendre compte de l'ampleur de la catastrophe qui se joua ce jour-là.

Le réarmement du fort de Flémalle (1929-1940) :

Nous avons vu précédemment les principes généraux de renforcement des forts de la Meuse. Nous allons maintenant nous intéresser au renforcement du fort de Flémalle en particulier⁴⁷.

L'entrée du fort :

Du côté gauche du passage de poterne, le grand local voûté d'origine voit ses dimensions réduites par la construction d'un bunker intérieur nommé « Corps de garde de temps de guerre » (1). Celui-ci permet de défendre la rampe d'accès à l'aide d'un fusil-mitrailleur. Un phare permet d'éclairer la zone et un lance-grenades⁴⁸ assure la défense rapprochée. Un percement réalisé dans le mur de façade permet de rejoindre un bunker construit dans le tambour de poterne. Celui-ci contient une sortie de secours⁴⁹, un créneau pour fusil⁵⁰ (Mais sans dispositif d'embrasure) et un lance-grenades. Ce bunker remplace les 4 créneaux pour fusil de 1914 situés juste en face. Les défenses passives telles que la grille et le pont roulant sont maintenus.

Le fossé de gorge et les locaux de contrescarpe :

Le fossé en tant que tel ne reçoit pas de modifications. Les coffres de défense sont modifiés selon les principes énoncés plus haut (2). Ils sont munis de fusils mitrailleurs, d'un phare et d'un lance-grenades.

Les locaux de contrescarpe ne sont pas renforcés. Ils gardent une fonction de service, mais leur aménagement est quelque peu modifié. Ainsi les cachots sont-ils détruits pour accueillir la cuisine de l'ouvrage. Sa fenêtre est surbaissée afin de permettre le passage d'une cheminée accolée au mur de contrescarpe.

L'escarpe et la galerie en capitale :

L'entrée allemande modifiée est conservée. La chicane est percée afin de permettre la communication avec les locaux de désinfection (3) situés dans le premier local de droite. Un sas est créé en remplaçant l'ancienne porte renforcée allemande par une porte hermétique à charnière (P.H.C.). L'accès aux saillants est lui aussi renforcé. Il donne accès, vers le Saillant I (4), à un monte-charge en liaison avec la galerie de bombardement⁵¹, aux coffres de défense de la demi-gorge droite, à une citerne⁵², aux locaux du service de santé, à la coupole de 75mm du Saillant I et aux locaux de détente.

⁴⁷ Les éléments numérotés se rapportent à l'annexe IV du présent travail.

⁴⁸ Tuyau en fibrociment débouchant en oblique à l'extérieur. La face interne est protégée par un volet hermétique empêchant le retour de souffle en cas d'explosion. La grenade une fois dégoupillée est lancée dans le tube, le volet est refermé et celle-ci vient alors exploser au pied de l'ouvrage à défendre.

⁴⁹ La sortie de secours est un passage de 80 centimètres de haut sur 50 centimètres de large. Elle est obturée au moyen d'une dalle en béton de 10 centimètres d'épaisseur maintenue fermée de l'intérieur par des clavettes. Une rainure dans béton permet de mettre en place un barrage de poutrelles. Celui-ci se compose de poutrelles métalliques empilées jusqu'au sommet de la sortie. La dernière poutrelle est alors calée par des calles en bois qui ne peuvent être enlevées que de l'intérieur.

⁵⁰ Un plan non daté nous a permis de voir qu'une modification ultérieure à la construction du bunker avait été réalisée dans le but de pouvoir tirer au fusil-mitrailleur en direction de la rampe d'accès par le créneau qui disposait jusqu'ici d'une action frontale. Cette modification a consisté à augmenter l'angle de l'embrasure vers la rampe d'accès ainsi qu'à supprimer une partie du mur de refend qui existait face à la façade.

⁵¹ Galerie située au niveau de la galerie d'air, et contenant une partie des munitions de l'ouvrage, en ce compris celles destinées aux deux coupoles de 75 des saillants I et IV.

⁵² Deux citernes existaient sous les locaux en 1914. Lors du renforcement du fort, l'une d'elle fut renforcée et les locaux de l'infirmerie et du bloc opératoire furent construits par au-dessus. La deuxième citerne communiquant avec la première par une canalisation.

Vers le saillant IV (5), on retrouve l'accès aux locaux de désinfection, aux coffres de défense de la demi-gorge gauche, au local de la chaudière, aux latrines, aux réserves à mazout, à la coupole de 75mm du Saillant IV et aux locaux de détente.

Dans l'ancienne poudrière de droite prend place le bureau de tir (6). Celui-ci est constitué de 4 pièces : Un central téléphonique, un bureau de tir à proprement parler, un local destiné à recevoir l'émetteur-récepteur radio et une salle des cartes. Dans ce dernier local aboutit le puits d'accès à un bureau de tir secondaire greffé sur la galerie d'air, 14 mètres plus bas. La poudrière de gauche est comblée par des déblais provenant des fouilles. Seul son sas d'accès est conservé et reçoit l'un des points d'eau potable du fort. L'ancienne réserve à charbon reçoit un atelier de réparation mécanique avec ses magasins, ainsi que le local de charge des accus de téléphone. La salle des machines (7) basse garde un volume identique. Seul l'équipement change, la machine à vapeur est remplacée par deux groupes électrogènes. La salle des machines haute, en communication avec la salle de rassemblement, est condamnée et renforcée par une première dalle en béton armé de 25 centimètres d'épaisseur coulée à même le sol. La deuxième dalle est de forme convexe et a une épaisseur de 40 centimètres. En face de la salle des machines, un accès en puits est créé pour rejoindre le débouché d'infanterie ainsi que le poste d'observation cuirassé (ancien emplacement du phare).

L'escalier d'accès à la salle de rassemblement est bouleversé par le percement d'un nouvel escalier, descendant à l'étage du quadrilatère. Le fort de Flémalle devant recevoir un canon de 150 millimètres, l'accès à la salle de rassemblement n'est pas totalement condamné après le passage de la pièce. 3 barrages de poutrelles sont placés sur la seconde volée de marches. Au niveau de la galerie renforcée, les tôles ondulées sont présentes mais seulement posées sur les cornières. Les tôles sont fixées à 3 madriers de chêne placés dans l'axe de la galerie. Boulonnés à des ancrages, 7 profilés en U métalliques complètent le dispositif de fermeture qui est ensuite recouvert d'un mètre de sable.

- La salle de rassemblement et étage supérieur :

Tous les locaux de l'étage supérieur, à l'exception des coupoles encore utilisées, sont remblayés ou partiellement remblayés. Cet étage est condamné de manière non définitive par des portes boulonnées et des barrages de poutrelles.

- Le quadrilatère et galerie d'air :

L'étage du quadrilatère (8) contient les accès aux différentes coupoles, aux coffres de tête, des latrines, le local du ventilateur « Aspirateur » principal et l'accès à la galerie d'air. Sur cette galerie se greffent l'accès au bureau de tir secondaire, au local du groupe hydrophore fournissant l'eau potable au fort, à la galerie à munitions et à des locaux dits « pour artifices »⁵³.

Elle continue ensuite sur 400 mètres jusqu'au pied de la tour d'air. Son trajet adopte la forme d'une ligne brisée dont la cassure est munie d'une casemate de défense dotée d'un fusil-mitrailleur et d'un lance-grenades.

- La tour d'air :

Cet édifice remplit un rôle multiple. Il permet en premier lieu d'aspirer l'air frais à l'extérieur grâce à une ouverture pouvant être fermée hermétiquement. Au-dessus de cette baie se situe

⁵³ Les artifices sont le nom donné aux fusées coiffant les obus. Elles ont pour rôle de déclencher l'explosion de celui-ci. Ce sont des éléments très sensibles qui nécessitent une attention toute particulière.

un local contenant 6 embrasures d'où l'on peut observer les alentours ou tirer au fusil-mitrailleur. Au niveau du sol, un bunker muni d'une sortie chicanée permet la sortie d'éventuelles patrouilles.

- L'armement :

L'armement initial du fort était composé de 2 coupoles pour deux canons de 12 centimètres, une coupole pour deux canons de 15 centimètres, deux coupoles pour un obusier de 21 centimètres et 4 petites coupoles éclipsables pour un canon de 5.7 centimètres.

Lorsque la commission étudie le renforcement du fort, elle constate qu'il lui manque ses 4 petites coupoles, dont le métal a été vraisemblablement récupéré par l'occupant. Le reste des cuirassements est en place mais, l'armement en a été retiré comme dans les autres forts.

A la lumière de nos recherches actuelles, nous pouvons affirmer que deux de ces cuirassements ont été déplacés vers d'autres forts. La coupole pour deux canons de 12 centimètres de gauche sera démontée pour être replacée au fort de Pontisse, privé de ses cuirassements. La coupole phare sera quant à elle démontée pour être reconditionnée par la Fonderie Royale des Canons en poste d'observation cuirassé à destination du fort de Bonnelles⁵⁴. Nous n'avons par contre trouvé aucune information sur la coupole pour obusier de 21 centimètres de droite. Nous pouvons juste affirmer qu'elle n'a pas été réutilisée dans le renforcement, sans plus d'information sur ce qu'il en est advenu. Le reste des cuirassements est rééquipé de manière classique selon les principes décrits plus haut.

Les 4 petites coupoles manquantes ont été prélevées sur des forts d'Anvers et équipées d'obusiers de 75 millimètres selon les principes énoncés plus haut.

Les combats de mai 1940 :

L'Allemagne envahit la Belgique le 10 mai 1940, vers 1 heure du matin. L'alerte est donnée au fort de Flémalle vers 1 heure 10. Le personnel dormant dans les baraquements de temps de paix est réveillé et réquisitionné pour mettre le fort en état de défense. Les baraquements sont incendiés conformément aux ordres et brûleront toute l'après-midi.

Le colonel Modart, commandant en chef de la PFL, arrive au fort vers 6 heures et y installe son Etat-Major. Vers 20 heures, le fort reçoit l'ordre de repli de l'armée de campagne en charge de la défense des intervalles entre les forts. Ceux-ci devront donc désormais résister seuls à l'envahisseur, avec pour ordre de retarder au maximum l'ennemi.

Le 11 mai, le fort ouvre le feu pour la première fois avec sa coupole de 150 mm, mais de nombreux incidents ralentissent la cadence de tir. Ces incidents proviennent d'une mauvaise conception du réarmement de cette coupole, notamment au niveau des installations électriques et mécaniques. Les problèmes de cette coupole étaient déjà partiellement connus, mais c'est la cadence de tir élevée qui les révéleront réellement.

Le lundi 13 mai à 6 heures 30, la position des MiCAs⁵⁵ est violemment attaquée. Cette attaque coûtera à la garnison sa première victime.

⁵⁴ En effet, le réarmement de ce fort avait été prévu avant le renforcement du fort de Flémalle, d'où le départ du cuirassement à destination de Bonnelles.

⁵⁵ MiCA : Acronyme de Mitrailleuses Contre Avions. Evoquée tardivement et sans réelles solutions, la défense anti-aérienne des forts se bornait en 1940 à une position de fortune creusée à même le sol, protégée par des sacs de sable et seulement équipée de quelques mitrailleuses allemandes « Maxim 08/15 », montées sur trépieds.

A partir de 20 heures, le Fort est bombardé par du matériel de gros calibre qu'il parviendra finalement à neutraliser.

Le 14 mai, la position des MiCAs est définitivement abandonnée, rendue intenable par le harcèlement systématique d'un ennemi sans cesse en mouvement. Le fort est bombardé par de l'artillerie durant toute la journée. Des tirs sont effectués par les coupoles sur 33 avions ennemis tentant de se poser sur l'aérodrome d'Ans, causant de gros dégâts parmi ceux-ci.

A la suite de ces tirs, le fort est violemment bombardé par l'aviation ennemie⁵⁶. En fin de journée, il essuie un second bombardement aéroporté. Les dégâts sont nombreux : de gros blocs de béton obstruent le flanquement des fossés par les coffres et des fissures apparaissent à différents endroits dans l'ouvrage.

Vers 21 heures, le dernier poste d'observation détaché du fort annonce qu'il abandonne sa fonction, sa position étant rendue intenable par l'ennemi. Cet acte a pour conséquence d'isoler encore un peu plus le fort.

Le mercredi 15 mai débute sans le moindre incident. Cependant, de 10 à 13 heures, le fort subit son troisième bombardement aérien. Les avions ennemis visent les réseaux de barbelés ceinturant l'ouvrage. Les entonnoirs créés par les bombes facilitent ainsi le déplacement des soldats et l'investissement du fort. Le mur de contrescarpe est entamé en plusieurs endroits.

La coupole de 75 mm du saillant IV est inaccessible : les parois du couloir se sont écrasées, le monte-charge est détruit ; tout passage y est impossible. Les autres coupoles sont encore intactes intérieurement, mais elles sont recouvertes de gros blocs de béton et de terre. La coupole de 105 mm ne tourne plus et un gros bloc de béton est calé entre les deux canons. La coupole du saillant II a été touchée, elle est calée, la calotte est coincée dans la circulaire. Elle ne peut plus être soulevée.

Des soldats ennemis sont signalés sur le massif. L'un d'entre eux se dirige vers la coupole de 75 du saillant III qui vient de se soulever pour la faire sauter. La coupole Mi-Lg⁵⁷ intervient à la grenade et à la mitrailleuse. C'est à ce moment que, malgré la présence de soldats allemands sur le massif central, l'aviation ennemie reprend son bombardement en utilisant des bombes de gros calibre. Les organes de feu encore en ordre de tir sont évacués. Ce bombardement coûtera la vie à un autre soldat du fort, resté en place dans la coupole de Mi-Lg. Celle-ci est éventrée par l'une des bombes ennemies, laissant un trou béant dans sa cuirasse.

La coupole du saillant III, quoique éclipsée, est à son tour fissurée, désaxée et calée. Elle est hors de service.

Le bombardement continue à une cadence plus rapide et devient de plus en plus violent. Tout le fort est ébranlé. Dans les couloirs des saillants I et IV, les caisses à munitions se renversent et le béton des voûtes continue à se désagréger. Par moments, sous l'effet des bombes, des gerbes de pierre et de terre d'une cinquantaine de mètres de hauteur s'élèvent du sol, rendant le fort complètement invisible. Le bombardement dure ainsi jusqu'à 20 heures 30. On procède ensuite à une nouvelle inspection du fort. La coupole du saillant I se soulève et tourne encore,

⁵⁶ Ces bombardements sont effectués par des vagues de 27 bombardiers en piqué « Stukas », équipés de bombes de 250 et de 500 kilos.

⁵⁷ Coupole Mi-Lg : Acronyme pour Mitrailleuses-Lance-grenades.

mais elle est masquée. Son tir est rendu impossible par les débris de béton qui l'entourent. La coupole de 150 est intacte mais ne peut plus tourner. La Mi-Lg est hors-service et une brèche de 1,5m de diamètre dans son manteau bétonné permet un accès direct du massif central au quadrilatère. L'ennemi peut donc pénétrer dans le fort, avec la menace de le voir sauter à tout instant. Le POC n'a plus qu'un champ visuel très réduit à cause des débris qui l'entourent. Dans le quadrilatère à munitions, un barrage de sacs de ciment et de sable est construit au pied du puits de la coupole Mi-Lg pour prévenir toute tentative de pénétration de l'ennemi. Toutefois le danger d'explosion du quadrilatère, soit par une bombe, soit par une charge placée dans le puits, subsiste. La conscience de ce danger a un impact dévastateur sur la garnison du fort.

Le jeudi 16 mai, le moral de la troupe se relève quelque peu car elle a légèrement pu se reposer. Le colonel Modart prend alors la décision de quitter le fort par le bunker de la tour d'air.

A 14 heures, le bombardement par avions recommence tandis que la tour d'air est prise à partie par du matériel d'artillerie qui transperce le béton. L'air aspiré est chargé de poussières de béton et de gaz d'explosion, qui se répandent dans tout le Fort et rendent l'atmosphère irrespirable et la visibilité difficile. La ventilation doit être arrêtée. Deux soldats sont tués.

Le Conseil de défense du fort décide à l'unanimité de cesser la défense de l'ouvrage pour les motifs suivants :

- 1) *Les coupoles sont hors de service.*
- 2) *Les coffres de flanquement sont partiellement obstrués par les amas de béton et de terre et ne permettent plus le tir que dans des secteurs très réduits.*
- 3) *Le danger permanent d'explosion du fort avec toute sa garnison par la brèche de la Mi-Lg.*
- 4) *L'aveuglement complet du fort. Il est impossible de continuer à occuper l'étage supérieur de la tour d'air, dont la destruction complète est, du reste, imminente. De plus, aucune lunette de coupole ne peut plus observer. Enfin, le POC n'a plus qu'un champ visuel très restreint.*
- 5) *L'arrêt de la ventilation par la tour et l'impossibilité de ventiler par le sas d'entrée du Fort à cause de la présence de l'ennemi dans les fossés.*
- 6) *La fatigue extrême du personnel qui a fourni un travail considérable depuis 6 jours, et pour ainsi dire sans repos (nombreux tirs, vigilance continue, corvée munitions, occupation simultanée des organes de feu, tant à longue portée qu'à portée rapprochée, barrages, manque d'hommes, aucune relève, etc...)*
- 7) *Affaiblissement du moral de la garnison depuis que le personnel se rend compte que la résistance est vaine.*
- 8) *Reprise du bombardement aérien qui va causer des pertes inutiles.*

Cette décision est communiquée aux officiers, qui l'approuvent à l'unanimité. Il est procédé sur le champ à la destruction des documents, du poste TSF et des centraux téléphoniques. La ventilation est également mise hors d'usage. On met hors service les pièces encore utilisables des coupoles coincées.

Il est 14 heures 30 lorsque le drapeau blanc est hissé. Immédiatement l'ennemi se montre en force au-dessus des fossés et près du corps de garde et réclame avec véhémence la sortie immédiate de tout le personnel du fort. Les combats de mai 1940 auront coûté la vie à 13 hommes de la garnison. Leur nom figure sur le monument aux morts et se rajoutent à celui de l'unique soldat tué dans le fort en 1914. Ils auront également profondément modifié la topographie des lieux, comme en témoigne l'image ci-dessous (FIGURE 20). Durant ces 6 jours de combats, le fort de Flémalle aura reçu pas moins de 41 bombes de 500 kg, larguées par l'aviation allemande. A ce chiffre s'ajoutent de nombreux autres projectiles, mais dont le nombre n'a pas pu être quantifié.



Figure 20 Fort de Flémalle après sa reddition. ASBL Musée fort de Flémalle.

1940- 2019, ruine et renaissance :

Après la campagne de mai 40, la Belgique connaît 4 ans d'occupation allemande.

Contrairement à la première guerre mondiale, l'occupant ne se sert plus des forts comme il l'avait fait durant le premier conflit mondial. Des soldats et des ingénieurs visitent cependant nos forteresses à des fins diverses. Les forts d'Eben-Emael et de Bonnelles serviront à des fins de propagande. Nombreux films y sont tournés afin d'affirmer la suprématie du III^e Reich face à ses ennemis. Des ingénieurs visitent les vieux forts réarmés afin de dresser une sorte d'encyclopédie de la fortification, le « Denkschrift über Lüttich Festungen ».

Ensuite, le fort est envahi par les troupes de l'Organisation Todt. Cette entreprise allemande, dirigée par l'ingénieur Friedrich Todt, a pour but la récupération de tous les matériaux pouvant être utiles à l'effort de guerre allemand. C'est ainsi que les coupoles et canons furent découpés afin d'être refondus. Les tôles ondulées de tous les plafonds furent quant à elles récupérées pour être réutilisées sur le mur de l'Atlantique, de même que l'un des deux groupes électrogènes.

A l'heure actuelle et face au peu de documentation sur le sujet, il nous est impossible d'être plus complet quant au matériel récupéré par les Allemands.

Une autre partie de l'histoire du fort remonte à l'hiver 1944, quand les populations civiles de la région s'y réfugièrent. En effet, la vallée de la Meuse étant un bassin sidérurgique de première importance à l'époque, elle fut bombardée massivement par les V1 et les V2 allemands. Les populations de la région prirent donc l'habitude de se réfugier dans le fort le plus proche afin d'échapper à ces attaques meurtrières.

Après la seconde guerre mondiale, le fort resta domaine militaire jusqu'en 1973, après quoi il fut vendu à un promoteur immobilier pour la construction d'un lotissement.

André Cools, à l'époque bourgmestre de Flémalle, classa alors le site en tant que réserve naturelle afin d'empêcher la concrétisation de ce projet immobilier et de permettre, par la même occasion, de conserver les vestiges du fort de Flémalle.

Dans les années 90, la protection civile installa un poste de commandement dans les locaux de contrescarpe de droite.

Ce sont certains agents présents au fort durant cette période qui mirent en place l'ASBL qui, depuis 1995, valorise les vestiges du fort de Flémalle en les faisant découvrir aux visiteurs lors des dates d'ouverture. L'association dynamique mène actuellement plusieurs projets pour valoriser l'ouvrage. Elagage des superstructures, travaux de fouilles, remise en place d'anciens coffrets électriques, organisation d'évènements spéciaux comme un marché aux saveurs ou une bourse militaire permettent aux visiteurs de découvrir dans les meilleures conditions possibles le fort de Flémalle.

3) Documentation historique

3.1) Etat des lieux et conclusions :

Comme nous l'avons vu, les forts réarmés ont été pillés de leurs métaux par l'occupant aux alentours de 1941. Ce pillage s'est effectué de manière plus ou moins intensive selon les forts. A titre purement indicatif, nous pouvons citer les quelques observations suivantes :

- De manière générale, toutes les tôles ondulées ont été retirées, mises à part celles supportant un plafond plat. Les tôles de la galerie d'air, situées au plus bas du fort, sont également généralement toujours en place.

- Les installations électriques ont été entièrement retirées, mis à part les dispositifs de fixations scellés dans les murs. Cependant, à de nombreux endroits, le béton a tout de même été cassé autour de ces pièces métalliques pour les récupérer. Parfois, sur une vingtaine de colliers, 3 sont manquants de manière totalement aléatoire, ...

Ces quelques vestiges⁵⁸ nous permettent néanmoins d'appréhender le tracé définitif des canalisations, l'emplacement de certains dispositifs d'éclairage, des interrupteurs, des prises de courant, ... Ces vestiges, bien que partiels, représentent une partie non négligeable des sources historiques. Elles nécessitent cependant une connaissance préalable des éléments constitutifs des réseaux en question et ne sont donc pas utilisables directement par des personnes non averties.

3.2) Recherches d'archives :

Les archives relatives aux forts belges ont connu une histoire mouvementée. En effet, après les combats de mai 1940, l'Allemagne occupe la Belgique durant plus de quatre ans. C'est durant l'occupation que les Allemands transfèrent les archives militaires dans des dépôts en Allemagne. Vers la fin de la guerre, les Russes trouvent ces dépôts et récupèrent les archives belges. Celles-ci sont alors envoyées à Moscou où elles demeureront jusqu'en 2002, date à laquelle elles sont récupérées par la Belgique et stockées au Centre de documentation de l'armée à Evere⁵⁹.

Elles ont finalement été regroupées au sein des archives de l'ancien Musée Royal de l'Armée et de l'Histoire Militaire situées sur le site du Cinquantenaire à Bruxelles (Renommé depuis War Heritage Institute). Les archives dites « du fond Moscou » rejoignent les autres fonds d'archives déjà présents sur le site (Fond QGT, Van Brabant, ...). Cela permet de regrouper, sur un seul site, toute la documentation relative à la fortification belge jusqu'à la déclaration de la seconde guerre mondiale.

En effectuant des recherches dans ces différents fonds d'archives, nous avons pu retrouver un aperçu de la plupart des éléments aujourd'hui disparus dans un fort. Ceux-ci peuvent se retrouver dans les documents suivants :

⁵⁸ Une liste non exhaustive de ces vestiges constitue l'annexe V du présent travail.

⁵⁹ *Cibles, trimestriel du Musée royal de l'Armée*, 2002, n°15

- Les plans de la DTF⁶⁰ :

Au nombre de 15 feuilles grand format, ils regroupent les principaux travaux de gros-œuvre réalisés dans l'entre-deux-guerres au fort de Flémalle. Sur chaque feuille se trouvent également des détails relatifs à différents équipements du fort comme les locaux de désinfection, les latrines, etc...

Ils ont cependant le défaut d'être l'expression d'une première version du renforcement et leur comparaison avec le terrain montre souvent des divergences quant à l'exécution de ceux-ci.

- Les plans relatifs aux différentes installations :

Ils nous renseignent sur des éléments de détails et proviennent soit du génie des fortifications soit des différents fabricants des éléments concernés. On peut citer par exemple les plans relatifs au chauffage et à l'électrification des locaux, les plans des citernes à mazout, à eau potable,...

- Les cahiers spéciaux des charges :

Sous forme de textes accompagnés parfois de plans, ils regroupent un grand nombre d'informations relatives à l'objet de l'entreprise.

- Les brochures publicitaires :

Cette dernière source peut sembler anecdotique, mais elle regroupe en fait beaucoup d'informations sur un grand nombre d'éléments. En effet, l'armée belge passait à l'époque par des marchés, auxquels les entreprises répondaient souvent par une offre ainsi qu'une brochure de leurs produits. Il faut cependant faire bien attention d'avoir en main la brochure de l'entreprise qui a remporté le marché.

⁶⁰ Direction des Travaux Fortificatifs : Organisme rattaché au Bureau du Génie de l'Armée Belge. Elle a pour but la coordination et la réalisation des travaux relatifs aux forts belges. Information Erik Janssen, archiviste W.H.I.

Partie II: Documentation digitale du patrimoine :

1) Relevés :

La première étape dans un travail comme celui-ci, visant à la restitution d'espaces construits, est constituée par la prise de mesures des éléments à reproduire. De nombreuses techniques de relevés existent. Nous allons, ci-dessous, en dresser une liste non-exhaustive et décrire les principales méthodes utilisées dans le cadre de ce travail.

Un relevé d'architecture « est une représentation graphique d'un ouvrage existant. Il est fait dans le cas où il n'y a pas de documentation graphique permettant d'effectuer certaines opérations sur cet ouvrage»⁶¹.

1.1) Relevés manuels :

Leur objectif premier est de retranscrire, généralement sur papier et de manière précise, la totalité des mesures d'un édifice ou d'un ensemble bâti.

Les outils généralement utilisés dans le cadre d'un relevé manuel sont :

- Le décamètre
- Le fil à plomb
- Chaîne d'arpenteur
- Du matériel de dessin (Support, papier, crayon, gomme, ...)
- Un télémètre laser (ou distancemètre)
- ...

Dans leur cours « Techniques du relevé architectural »⁶², les auteurs identifient 3 phases à un relevé manuel :

l'esquisse, le relevé et le dessin.

La première phase consiste à redessiner, souvent sur place et à main levée, un plan sommaire de l'objet du relevé. C'est ce document qui sera annoté lors de la phase suivante. Il peut être intéressant de déterminer les grandes dimensions de l'élément à l'aide de méthodes rudimentaires comme compter le nombre de pas, ou bien le nombre d'éléments répétitifs (dallage, ...). Le but de ces préliminaires est uniquement d'établir les proportions du croquis.

La seconde phase consiste, comme son nom l'indique, à réaliser les relevés proprement dits. Lors de cette phase, l'objet est mesuré avec précision, au moyen des instruments dont il est question ci-dessus. Les cotes sont ensuite notées sur le dessin en veillant à préserver la lisibilité et la clarté de l'ensemble. Une prise de note mal effectuée conduira à des erreurs ou à des questionnements à posteriori sur le travail réalisé. Un plan saturé de cotes en tous sens ne sera en effet que très peu utile. Des coupes, élévations cotées correctement rendent les choses beaucoup plus claires et utilisables par tous.

⁶¹ <https://docplayer.fr/6408684-Cours-technique-du-releve-architectural.html>, consulté le 03/04/19 [en ligne].

⁶² *Ibid.*

La troisième phase consiste en la création d'un document de communication clair et redessiné de manière propre et nette. De plus en plus, cette phase est réalisée sur ordinateur et communiquée de cette manière aux personnes concernées.

Les relevés manuels ont l'avantage d'être simples à mettre en œuvre. Ils nécessitent en effet peu de matériel et peu de compétences spécialisées. Ils sont cependant peu rentables en termes de rapport temps/travail produit.

La précision de ces relevés dépend ici de l'opérateur en charge du travail. Il est également important pour lui de veiller, dans un souci de bonne compréhension, à transcrire de manière correcte les proportions de l'espace.

De plus, un relevé photographique peut également s'avérer utile, afin de garder une trace supplémentaire de la (les) pièce(s) relevée(s) et son (ses) emplacement(s).

1.2) Relevés « automatisés » : Photogrammétrie – Drone – LaserScan :

a) Les relevés photogrammétriques :

Le premier usage de la photogrammétrie remonte au XIX^e siècle. En France, l'architecte en chef de la cathédrale de Reims utilise ses propres techniques de photogrammétrie afin de relever le bâtiment dès les années 1930⁶³.

La photogrammétrie est une « *Technique permettant de déterminer les dimensions et les volumes des objets à partir de mesures effectuées sur des photographies montrant les perspectives de ces objets* »⁶⁴.

Au départ, l'exploitation photogrammétrique de clichés se faisait manuellement. Un opérateur devait, à l'aide d'un matériel complexe et encombrant, ajuster de manière manuelle deux clichés dont le recouvrement était d'au minimum 50% (FIGURE 21). L'arrivée de l'informatique dans les années 70 a permis de simplifier la technique en automatisant de plus en plus de tâches. A partir des années 90, l'arrivée de l'appareil photo numérique permet d'utiliser des algorithmes de mesures automatiques directement sur l'image.

Grâce à des logiciels presque voire totalement automatisés, la photogrammétrie est maintenant accessible à tous et ne nécessite plus de matériel spécialisé. Un simple smartphone suffit désormais pour la prise de vue. Les données sont ensuite transférées sur un ordinateur qui, au travers d'un logiciel spécialisé, permet de réaliser un modèle en 3

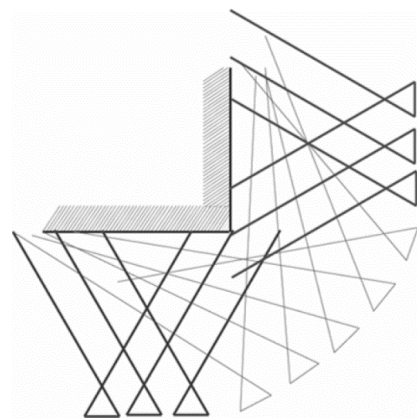


Figure 21 Principe de recouvrement photographique. Numérisation 3D des bâtiments, p.45.

⁶³ CHANDELIER, LAURE, HENO, RAPHAËLE, *Numérisation 3D de bâtiments, cas des édifices remarquables*. Londres : Ed. ISTE, 2014, page 32.

⁶⁴ <http://www.cnrtl.fr/definition/photogramm%C3%A9trie>, consulté le 11/03/19 [en ligne].

dimensions sur base des prises de vue réalisées. Pour obtenir un modèle correct, il faut multiplier les clichés en variant l'angle de prise de vue.

Le but est de couvrir l'entièreté de l'objet à modéliser, en gardant un recouvrement suffisant entre les différentes photos. Celui-ci permet aux algorithmes de déterminer les points communs entre les photos afin de les assembler.

b) Les Relevés par drone :

Dans le cas d'un grand espace extérieur, les relevés par drone offrent à l'utilisateur de nombreuses opportunités. Il « suffit » de faire voler le drone autour de l'objet à relever en le filmant. Le but est de filmer l'objet sous tous les angles, afin d'en avoir une vision complète. Plusieurs vols sont cependant nécessaires pour arriver à ce résultat. Dans le cas où une information colorimétrique est nécessaire, il faut également prêter attention aux images capturées. Une image surexposée rendra par exemple une information de couleur fautive, avec également un risque de perte de détails.

Une fois cette prise d'images réalisée, on utilise la technique de la photogrammétrie pour passer d'une vidéo, que l'on décompose en un nombre important de photos, à un modèle virtuel.

L'inconvénient de cette méthode vient de la nécessité de contrôler des prises de vue. Dans le cas contraire, des notions de retouches d'images vidéo sont nécessaires. Il faut bien entendu également tenir compte des réglementations en vigueur en matière de vol de drones.

c) Les relevés par LaserScan :

C'est en 1962 que l'émission laser est utilisée pour la première fois dans le but de mesurer la distance de la terre à la lune. Cette mesure a été réalisée grâce à la technologie lidar, qui consiste à « analyser les propriétés d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur »⁶⁵.

C'est cette technologie qui est utilisée dans les scanners lasers. Ceux-ci fonctionnent par balayage. De manière simplifiée, on peut décrire leur fonctionnement comme suit (**FIGURE 22**):

Un rayon laser est émis depuis la source l'appareil (1) et envoyé sur un miroir rotatif (2). Ce miroir rotatif permet de faire varier l'angle d'émission du laser et de couvrir ainsi un cercle vertical presque complet (le pied de l'appareil créant une zone non-relevée sous celui-ci).

L'appareil peut également effectuer une rotation horizontale sur 360 degrés, ce qui permet donc de scanner tout l'environnement autour du scanner, à la manière d'une sphère presque complète. Les angles

horizontaux et verticaux sont enregistrés, de même que la distance des points par rapport au point d'émission – réception (3). Le scanner est dirigé par un logiciel de pilotage (4), qui permet de régler notamment les paramètres d'acquisition.

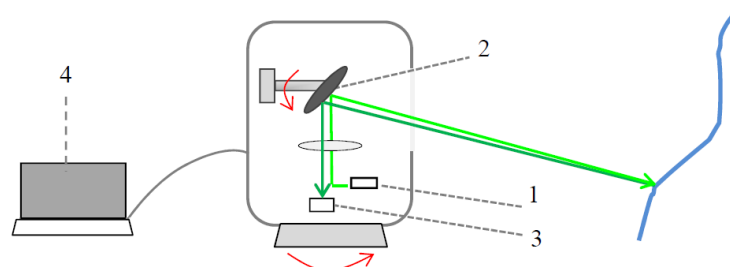
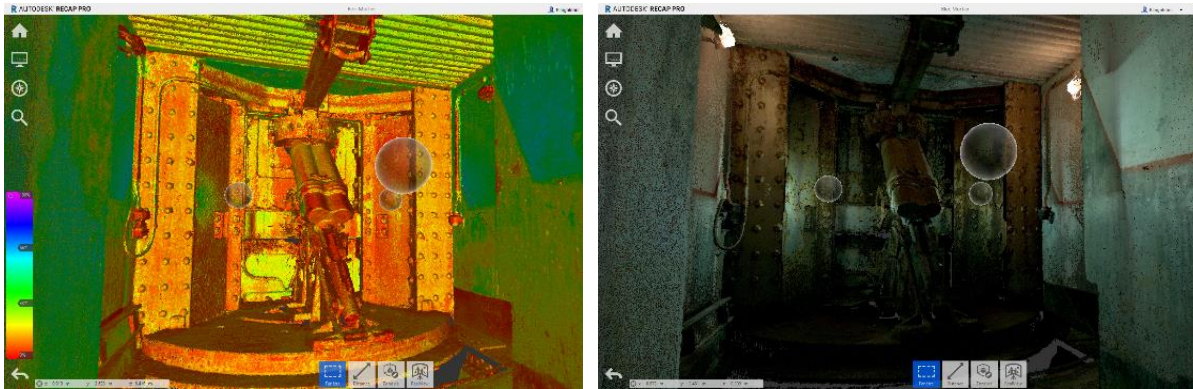


Figure 22 Schéma simplifié d'un scanner laser. Numérisation 3D des édifices remarquables, p.83.

⁶⁵ CHANDELIER, LAURE, HENO, RAPHAËLE, *Op. Cit.*, page 82.

Le résultat est un « nuage de points » en coordonnées sphériques, couvrant toute la zone visible depuis la station de relevé. En plus des points 3D, souvent convertis en coordonnées cartésiennes, le scanner peut rendre une information de retour d'intensité (FIGURE 23.1) du signal retourné. Cela permet notamment de discerner les différents matériaux, certaines traces dans les maçonneries,... Certains scanners sont enfin dotés de caméras permettant d'ajouter une information colorimétrique (Rouge, Vert, Bleu) pour chaque point relevé. Il est à noter que cette information est souvent d'une qualité relative (FIGURE 23.2), et sera complétée au besoin par des relevés photographiques indépendants.



1) Nuage de points. Affichage du retour d'intensité.

2) Nuage de points. Information de couleur par photographie.

Figure 23 Nuage de points. Travail personnel.

Les principales caractéristiques des scanners lasers sont :

- La fréquence d'acquisition : le nombre de points relevés par seconde ;
- La distance minimale d'acquisition : en deçà d'une certaine distance, les scanners ne sont pas capables d'enregistrer des mesures. Cette distance peut varier de quelques décimètres à un mètre⁶⁶ selon les technologies ;
- La portée : elle dépend de la puissance d'émission du faisceau laser et de la réflectance de l'objet⁶⁷. Elle peut varier entre un mètre et plusieurs kilomètres ;
- La résolution horizontale et verticale : c'est l'angle minimal entre deux stations différentes du scanner ;
- La précision en distance et en angle ;
- La longueur d'onde du rayonnement laser.

Il existe 3 grandes familles de Scanner laser⁶⁸ :

- **Le scanner à temps de vol ou à impulsions** : Il est basé sur le temps écoulé entre l'émission et la réception du faisceau laser, ce qui permet de déduire la distance.
- **Le scanner à décalage de phase** : Dans ce cas-ci, l'émission laser est « continue, à forte intensité et avec une modélisation sinusoïdale en amplitude ». La distance est alors calculée en comparant la phase de l'onde de départ et celle de l'onde d'arrivée.
- **Le scanner à triangulation optique** : Cette famille de scanner a la particularité de disposer d'un émetteur et d'un récepteur de rayons distincts. La résolution du triangle

⁶⁶ Ibid. page 87.

⁶⁷ « Rapport du signal renvoyé par l'objet atteint au signal incident selon la longueur d'onde et l'incidence du laser ». Def. CHANDELIER, LAURE, HENO, RAPHAËLE, *Op. Cit.*, page 87.

⁶⁸Ibid., page 84.

formé entre l'émetteur, le point relevé et le récepteur. Ils permettent une modélisation de grande précision.

Depuis la fin des années 90⁶⁹, l'usage du scanner laser dans le domaine du patrimoine n'a cessé de s'étendre. Cette technique permet, de manière assez rapide et surtout automatisée, de relever de manière presque exhaustive un espace. Cependant, il est important de tenir compte du fait que le scanner ne peut relever que ce qui se situe dans sa zone de visibilité. En d'autres termes, il faut bien souvent plusieurs stations à différents endroits pour supprimer les angles morts dans une même pièce.

Il ne faut cependant pas croire que l'automatisation rend superflue la présence personnelle sur les lieux du relevé. Un contrôle des données produites reste nécessaire pour ne pas compromettre la suite des opérations. Prenons par exemple l'ajustement automatique entre deux stations de relevés. Pour chaque station est généré un nuage de points. L'ajustement entre ces deux nuages se fait automatiquement sur base de points communs à travers les deux nuages. Il arrive que cet ajustement soit erroné et nécessite une rectification manuelle sur terrain. Le placement de repères comme des cibles ou des sphères (**FIGURE 24**) peut aider à l'ajustement et un recours à une méthode plus « traditionnelle » comme la mise en place d'une polygonale et l'utilisation d'une station totale peut s'avérer nécessaire afin de garantir la justesse des relevés.



Figure 24 Eléments de repère adaptés à la numérisation laser. Photos personnelles.

2) Modélisation 3D :

2.1) Modélisation 3D à partir du relevé manuel 3D paramétrique :

En préambule à ce travail, de nombreux relevés manuels avaient déjà été réalisés. Ceux-ci ont permis de créer une maquette numérique d'environ 70% du fort à l'aide du logiciel Trimble Sketchup. Sur base de celle-ci, nous avons réalisé une visite virtuelle de l'ouvrage tel qu'il aurait pu être en 1940. Cette visite virtuelle a été conçue dans un but de vulgarisation à destination du grand public. Elle est utilisée sous forme de vidéo par l'ASBL « Musée fort de Flémalle » en guise d'introduction à la visite des ruines de l'ouvrage.

Au départ, nous voulions créer une seule maquette numérique du fort par époque. Cette technique a fonctionné pour l'état du fort en 1914. En effet, nous disposons de peu d'informations sur les équipements intérieurs et les détails des différentes installations. La maquette numérique s'est donc limitée à une modélisation du gros-œuvre uniquement.

⁶⁹ Ibid.

La tâche est par contre rapidement devenue impossible pour l'état du fort en 1940. En effet, au fur et à mesure que nous faisons des découvertes dans les archives militaires, de nouveaux calques étaient créés. Au gros-œuvre de base sont venus s'ajouter les réseaux électriques, de chauffage, etc... (FIGURE 25.1) Les possibilités informatiques à notre disposition se sont vite révélées insuffisantes face à la taille des données à modéliser. Nous avons alors commencé à segmenter le modèle principal en « sous-modèles », plus petits et donc plus légers.

Dans une volonté didactique, nous avons finalement pris le parti de nous orienter vers un modèle 3D plus « vivant ». A cette fin, nous avons ajouté des traces de vie des soldats dans l'ouvrage (FIGURE 25.2). Des casques, des lampes de poche, des caisses de bières, etc... sont autant d'éléments dont la présence nous est connue au travers de photographies d'époque dans d'autres forts. Ils permettent aux visiteurs de mieux s'immerger dans la vidéo de présentation.



1) Galerie en capitale avec ses réseaux modélisés.

2) Effets personnels dans les locaux.

Figure 25 Rendus réalistes sur base de la maquette virtuelle Sketchup. Travail personnel.

Ce dernier niveau d'information a encore nécessité une fragmentation des « sous-modèles », réduisant parfois un modèle 3D à une seule pièce, le tout pour garder une certaine fluidité dans leur utilisation.

A l'heure actuelle, nous avons créés pour le fort de Flémalle 150 modèles Sketchup différents pour un total de 2,54 Go. Cette « double fragmentation » est source de problèmes notamment lors de la création de vidéos ou encore pour générer des coupes complètes ou des plans d'ensemble.

2.2) Maquette 3D intelligente – Vers le « BIM » :

Préambules :

Le mot « BIM » (Building Information Modeling) « désigne une technologie et des processus associés pour produire, communiquer et analyser des modèles de construction (Eastman, 2011). Ainsi, le BIM se définit à la fois comme un processus de gestion et de production de données, un modèle unique du bâtiment, un concept « raisonnons sur un modèle unique », un logiciel parce qu'il fonctionne en intégrant une série de logiciels, et une norme grâce aux IFC (fichiers d'échange ISO 10303-21). (...). Le Building Information Modeling (BIM en abrégé) englobe la géométrie de la construction, les relations spatiales, les informations géographiques, les quantités ainsi que les propriétés des éléments de construction. Le BIM ainsi créé lors du processus de conception du bâtiment pourra être utilisé lors de son exploitation, mais aussi lors de sa démolition (aspects structurels, empreinte écologique des matériaux, réutilisation, etc.) »⁷⁰.

Cette méthode de travail est en train de s'intégrer dans les processus architecturaux du monde entier (FIGURE 26). Certains pays européens font figure de modèles. C'est le cas du Royaume-Uni, de l'Allemagne, de la Norvège. En Finlande, le BIM est obligatoire depuis 2007 pour certains éléments du patrimoine.⁷¹

Hors Europe, les Etats-Unis, Hong-Kong ou Singapour font office de leaders. A Singapour, 100% des chantiers ont l'obligation d'être BIM depuis 2016.⁷²



Figure 26 Répartition du BIM au niveau mondial en 2015.

<https://www.cadenas.de/fr/actualites/communiqués/reader/items/les-5-faits-que-vous-devez-absolument-savoir-sur-le-bim>

⁷⁰ CELNIK, OLIVIER, LEBEGUE, ERIC, *BIM & maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction*. Paris : Ed. Eyrolles, 2015, page 43.

⁷¹ GUEZO, JULIE, NAVARRA, PIERRE, *Revit pour les architectes. Bonnes pratiques BIM* (deuxième édition). Paris : Ed. Eyrolles, 2018, page 3.

⁷² *Ibid.*

Différents logiciels de modélisation BIM sont actuellement disponibles sur le marché. Nous pouvons citer Revit, ArchiCAD, Allplan,... mais il en existe encore d'autres. Par rapport au sous-chapitre ci-dessus, il faut savoir que Sketchup peut également être utilisé comme logiciel « BIM », à condition que ses fonctions soient judicieusement employées. Nativement, on peut en effet donner des informations à des modèles d'éléments, appelés composants. L'utilisation de plug-ins (extensions) permet, par exemple, de visualiser la timeline d'un chantier⁷³, ou bien de générer des éléments en 3D selon une paramétrisation préalable. L'utilisation d'un SDK (Software Development Kit) comme Ruby pour Sketchup permet le développement d'applications dans tous les domaines souhaités et notamment le BIM.

Level Of Details (LOD) :

Une autre caractéristique du « BIM » est la notion de « Niveau de détails », ou « Level Of Details » (LOD) en anglais.

« Le BIM modifie clairement le processus de conception en ce sens que les méthodes de travail changent. [...] Les différents niveaux de rendus ne sont pas définis par l'échelle du plan mais par le niveau de détails de renseignement des objets »⁷⁴

Ceux-ci définissent le niveau de maturité du projet BIM. A chaque « LOD » correspond une attente en termes de degré de modélisation et de maturation du projet.

Le site « Objectif BIM »⁷⁵ renseigne les différents niveaux de détails de la manière suivante (FIGURE 27) :

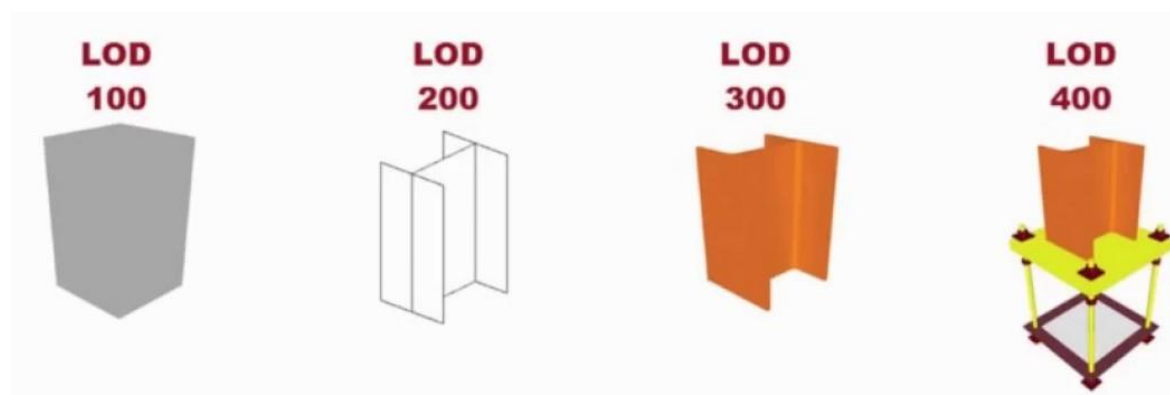


Figure 27 LOD, représentation graphique. <http://www.objectif-bim.com/index.php/technologie-bim/la-maquette-numerique/niveau-de-detail-de-la-maquette-numerique>

⁷³ <https://architectura.be/fr/actualite/13590/visualisation-et-modelisation-bim-4d-avec-sketchup-d-studio>, consulté le 07/04/19 [en ligne].

⁷⁴ GUEZO, JULIE, NAVARRA, PIERRE, *Revit pour les architectes. Bonnes pratiques BIM* (deuxième édition), Op. Cit., page 1.

⁷⁵ <http://www.objectif-bim.com/index.php/technologie-bim/la-maquette-numerique/niveau-de-detail-de-la-maquette-numerique>, consulté le 04/04/19 [en ligne].

- **LOD 100** : Les éléments du modèle sont représentés de manière symbolique ou générique. Les informations liées peuvent également être génériques ;
- **LOD 200** : Les éléments du modèle sont représentés de manière générique en tant qu'objet ou assemblage. Les informations relatives aux dimensions, formes ou orientations peuvent être approximatives ;
- **LOD 300** : Les objets du modèle sont représentés de manière spécifique pour chaque objet ou assemblage. Les informations relatives aux dimensions, formes ou orientations sont également spécifiques aux éléments ;
- **LOD 350** : Même exigences que le LOD 300, mais les éléments peuvent interagir entre eux ;
- **LOD 400** : Idem LOD 350, mais contenant, en plus, les détails liés à la fabrication, l'assemblage et l'installation des éléments ;
- **LOD 500** : Idem LOD 400, mais tel que construit et vérifié sur place.

BIM et formats d'échange :

L'un des atouts des nouveaux modes de modélisation 3D architectural est sans aucun doute la mise en place d'un format d'échange universel appelé « IFC ». Les avantages de ce format sont nombreux. Il est gratuit et open source (Licence libre). Il comporte des informations relatives à l'objet ainsi que ses possibles relations avec les autres objets de la maquette numérique, en plus des données liées à la géométrie des éléments. L'utilisation d'un format « universel » et open source permet d'éviter les problèmes d'interopérabilité qui peuvent survenir entre les différents corps de métier autour de la maquette numérique.

Revit en quelques mots :

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi d'exploiter les possibilités d'Autodesk Revit, mais c'est un choix purement personnel. La méthodologie ainsi que le retour d'expérience que nous proposons donc ci-après seront uniquement valables pour ce logiciel. Cependant, des réflexions d'ordre plus général sur la mise en place d'un projet de modélisation d'un bâtiment patrimonial restent valables, quel que soit le programme utilisé.

Revit est un logiciel de la suite Autodesk qui intègre les procédés « BIM ». Cela signifie que « *les éléments modélisés possèdent des caractéristiques et informations, en plus d'une géométrie 3D, qui seront utilisées tout au long d'un processus BIM* »⁷⁶.

Revit est un programme de modélisation 3D développé pour les milieux de la construction et les architectes. Il intègre la conception d'un bâtiment à travers la réalisation d'une maquette virtuelle en 3D où chaque élément possède des informations graphiques et techniques (coût, matériaux, structure,...). L'avantage d'un tel logiciel est que les modifications appliquées à un élément (un mur par exemple), seront appliquées simultanément à tout le modèle et à toutes les vues du projet. Il permet donc une révision des éléments jusqu'à une phase très avancée du projet, et ce sans devoir recréer toutes les vues déjà réalisées.

⁷⁶ GUEZO, JULIE, NAVARRA, PIERRE, *Op. cit.*, page 27.

La classification des éléments dans Revit peut se résumer selon l'arborescence ci-dessous (FIGURE 28) :

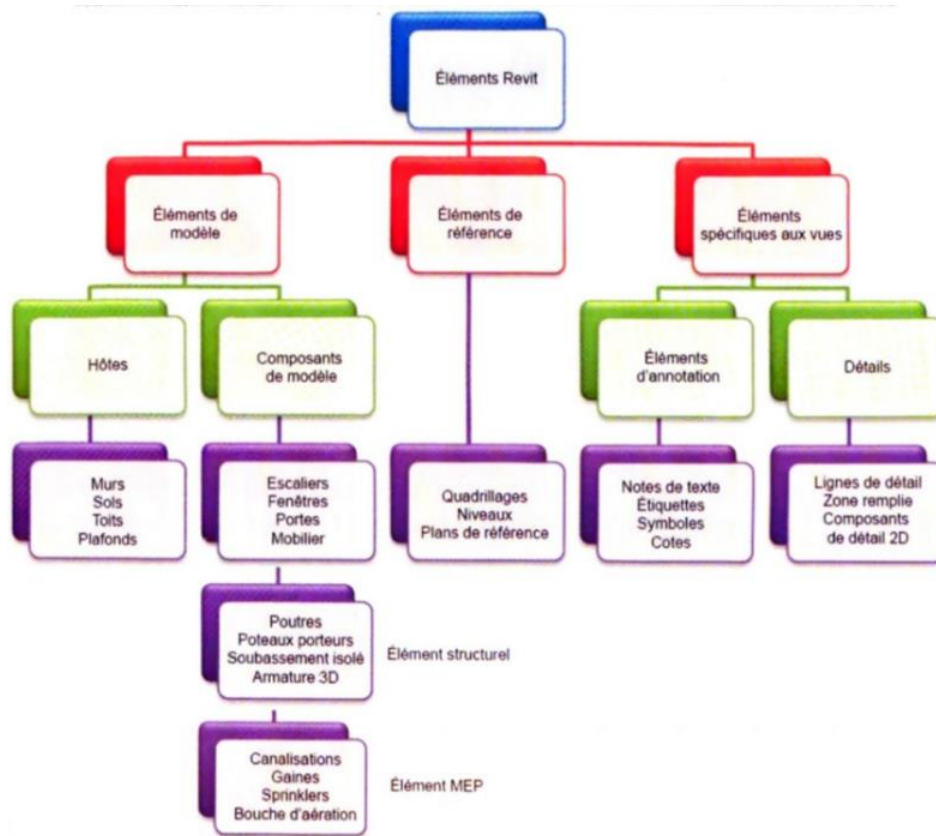


Figure 28 Organisation des éléments dans Revit. Revit pour les architectes, bonne pratique BIM, page 27.

- **Éléments de référence** : Il s'agit des éléments structurants du projet. Tous les objets dessinés par la suite auront un comportement lié à des références définies par les quadrillages, les niveaux et les plans de référence.
- **Éléments de modèle** : Tout ce qui se dessine et qui contribue à créer un bâtiment. Les hôtes peuvent accueillir en leur sein les composants de modèle, qui s'intègrent à ceux-ci. Par exemple, une fenêtre s'intégrera dans un mur, et son comportement par la suite dépendra de celui de ce mur. Les composants de modèle comprennent, en outre, des éléments structurels et des éléments dits « MEP » (Mechanical, Electrical and Plumbing). Ces derniers feront l'objet d'un plus grand développement dans la suite de ce travail.
- **Éléments spécifiques aux vues** : Cette catégorie regroupe, comme son nom l'indique, tout ce qui a trait aux vues. Il ne s'agit donc pas ici d'éléments faisant partie du projet 3D, mais bien d'outils pour permettre une lisibilité et une bonne compréhension des vues produites.

La modélisation de tout projet débute par le placement des niveaux, faisant partie de la catégorie « éléments de référence ». Les niveaux permettent de placer les éléments « hôtes » comme les murs, les sols, ... Une modification de ces niveaux entraîne donc un déplacement des éléments qui y sont rapportés. Ils peuvent être référencés de deux manières.

Soit en absolu (Niveau Rez fini comme niveau 0.0) ou en relatif (Niveau 0.0 correspondant à l'altitude du plan). Par défaut, les éléments tels que les sols considéreront le niveau comme étant le niveau fini. Il est également possible de donner aux murs un décalage inférieur ou supérieur par rapport aux contraintes définies, comme nous le montre l'illustration ci-contre (**FIGURE 29**).

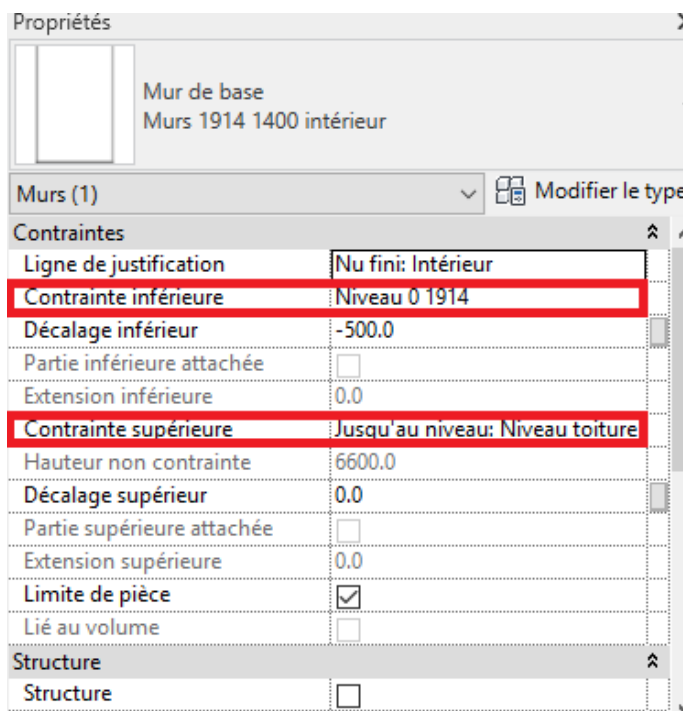


Figure 29 Contraintes d'une famille système par rapport aux niveaux. Image personnelle.

Les familles dans Revit :

Il existe trois grandes familles dans Revit : les familles « système », « chargeables » et « in situ ».

Une famille système est une famille dans laquelle « On retrouve les murs, sols, plafonds, escaliers, garde-corps, etc. Elles sont dessinées directement dans et pour le projet. Elles ne peuvent être chargées depuis la bibliothèque comme les familles chargeables (à partir de fichiers externes). Elles existent dans un gabarit de base... »⁷⁷. Elle correspond à un élément de modèle « hôte », en référence à l'arborescence ci-dessus (**FIGURE 28**).

Une famille « chargeable » est une famille qui peut être modifiée dans un fichier source appelé « gabarit ». Le site de Revit les renseigne comme des « Composants de construction faisant l'objet d'achats, de livraisons et d'installations dans le cadre de la construction d'un bâtiment... »⁷⁸

Ces familles disposent de toute une série de « types » différents. Ces types portent notamment sur l'épaisseur des éléments, leur composition, ... Ils sont prédéfinis sous une classification générique.

⁷⁷ GUEZO, JULIE, NAVARRA, PIERRE, *Op. Cit.*, page 29.

⁷⁸ *Ibid.*

On peut évidemment créer de nouveaux types, en dupliquant ceux déjà existants. Il faut alors les renommer avant de changer leurs propriétés.

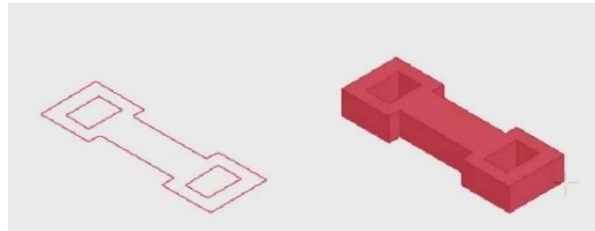
Les familles « in situ » sont, quant à elles et comme leur nom l'indique, des familles créées au sein même du modèle, à destination unique et exclusive de celui-ci. Leur reproduction au sein du même modèle est, de même, limitée.

Les catégories « chargeables » et « In Situ » font toutes les deux parties des éléments « composants de modèle » (**FIGURE 28**).

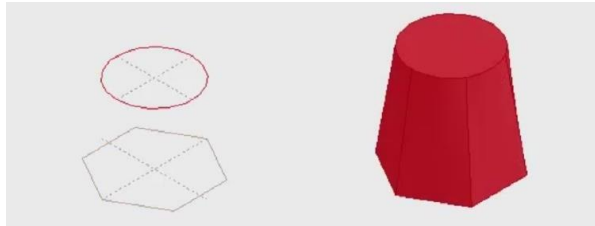
Les familles comportent un certain nombre de paramètres prédéfinis. Ces paramètres dépendent de la vocation de celles-ci. Il faut donc être attentif au moment de créer une famille, car le choix de tel ou tel gabarit de famille induira certains comportements irréversibles dans le modèle. Par exemple, un gabarit de famille « équipement spécialisé métrique (mur) » ne donnera un élément qui ne pourra être placé que sur un mur. Le choix d'une famille « équipements spécialisés » induira la possibilité de créer des éléments de connexion afin de créer des réseaux (électriques, hydrauliques, aérauliques,...). Les familles de luminaires comporteront des algorithmes de calcul pour l'éclairage, etc...

Les éléments qui composent les familles sont modélisés sur base de 5 opérations différentes. Elles sont relativement simples et sont listées dans le tableau ci-dessous :

- **Extrusion** : permet de transformer un objet plan en solide 3D en suivant un vecteur normal à ce plan.



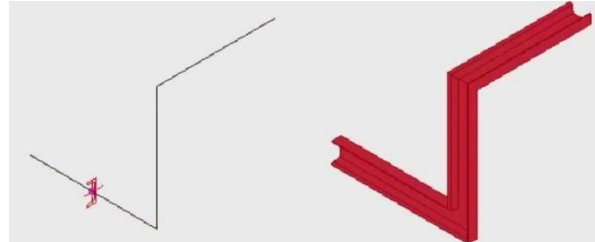
- **Raccordement** : crée une forme solide qui est le résultat d'un raccord entre deux profils de forme et d'altitudes différentes.



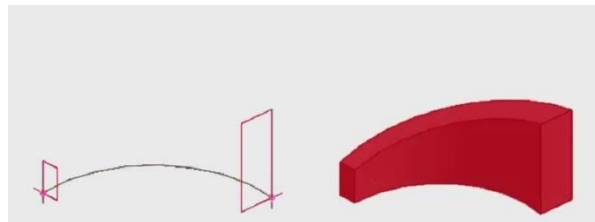
- **Révolution** : procédé similaire à l'extrusion. La différence vient que la création de la forme 3D se fait par rotation autour d'un axe.



- **Extrusion par chemin** : extrusion dont le vecteur est ici une trajectoire tracée sur base d'une esquisse



- **Raccordement par chemin** : raccordement dont le vecteur est ici une trajectoire tracée sur base d'une esquisse.



Ces outils de modélisation permettent de créer, soit des formes « pleines », autrement dit des solides, soit des formes « vides », qui généreront dès lors des vides dans les solides.

Une fois les niveaux placés, il ne reste plus qu'à construire la maquette virtuelle en utilisant, de manière judicieuse, les différentes familles décrites plus haut. Une autre grande question liée aux familles est celle des paramètres d'occurrence et de type. Le choix de l'un ou de l'autre paramètre pour un objet conditionnera son utilisation future dans la maquette numérique.

Un paramètre d'occurrence est un paramètre qui affecte uniquement l'objet concerné. Faire varier ce paramètre (par exemple la largeur de l'élément) n'influencera pas les autres éléments de la même famille dans Revit. Les paramètres de type sont quant à eux relatifs à la famille complète. Leur modification apportera donc des changements dans tous les éléments de même type dans le modèle.

Les Graphismes de la vue :

Comme nous l'avons vu plus haut, il est possible de créer dans Revit autant de vues que l'on veut. Celles-ci ne sont toujours qu'une représentation graphique de la maquette numérique et s'adapteront donc à celle-ci en cas de modifications ultérieures. Chaque catégorie d'élément a une représentation prédéfinie dans le logiciel. Cette représentation est reprise dans le tableau « Remplacement Visibilité/Graphismes », et est divisée en deux sections, la charte graphique en projection/surface et celle en coupe. Pour chacune d'elles, le logiciel attribue une épaisseur de lignes et un motif. Ces attributions par défaut peuvent être modifiées pour la plupart des catégories d'éléments. Cependant, certaines cases apparaissent en grisé dans le tableau « Remplacement visibilité graphisme » (FIGURE 30). Prenons le cas de la première ligne du tableau, la catégorie de familles « Appareils sanitaires ». Nous pouvons librement définir l'épaisseur du trait, le motif et la transparence éventuelle des éléments en plan (projection/surface). Les cases de la partie « coupe » sont quant à elles grisées. En suivant un raisonnement logique, Revit ne prévoit en effet pas qu'on réalise une coupe dans un élément sanitaire, en se basant sur les pratiques habituelles dans les milieux de la construction. Il est cependant toujours possible de changer ces paramètres à l'aide de filtres notamment.

Visibilité	Projection/Surface			Coupe		Demi-teinte	Niveau de détail
	Lignes	Motifs	Transparence	Lignes	Motifs		
<input checked="" type="checkbox"/> Appareils sanitaires						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input checked="" type="checkbox"/> Armature à béton						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input checked="" type="checkbox"/> Connexions structurelles						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input checked="" type="checkbox"/> Coupleurs d'armature structurelle						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input type="checkbox"/> Eléments						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input checked="" type="checkbox"/> Eléments de détail						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input checked="" type="checkbox"/> Environnement						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input checked="" type="checkbox"/> Equipement de génie climatique						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input checked="" type="checkbox"/> Equipement spécialisé						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input checked="" type="checkbox"/> Equipement électrique						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input checked="" type="checkbox"/> Escalier						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input checked="" type="checkbox"/> Fenêtres						<input type="checkbox"/>	Par vue
<input checked="" type="checkbox"/> Fondations						<input type="checkbox"/>	Par vue

Figure 30 vue partielle du tableau « Remplacement/Visibilité graphisme. Source Revit.

Par défaut, la visibilité des éléments est liée à la famille à laquelle ils appartiennent. Comme nous l'avons déjà dit plus haut, il est donc important de définir avec précision la catégorie à laquelle appartiendra l'objet. Lorsqu'une catégorie est décochée dans le tableau, l'entièreté des éléments de cette catégorie est masquée.

Ces paramètres de graphisme sont propres à chaque vue, mais il est possible de les définir comme normes à travers la création d'un gabarit.

2.3) Modélisation 3D à partir du nuage de points :

Une autre possibilité de Revit est de permettre, de façon native, l'insertion de nuages de points dans le logiciel. Ceux-ci, correctement positionnés, deviennent alors le fond de plan tridimensionnel servant de base à la modélisation. Comme déjà évoqué plus tôt, nous nous permettons ici de rappeler la nécessité de vérifier la justesse du nuage de points avant de commencer la modélisation. Si, en pratique, le nuage n'est « qu'attaché » au modèle, ce qui permet sa mise à jour en cours de travail, une erreur créée au début de la modélisation peut entraîner de graves anomalies au sein de la maquette numérique. Ces anomalies sont parfois très difficiles à récupérer par la suite. Aussi, la plus grande vigilance est nécessaire lors de la vérification du nuage de points pour le bon déroulement de la suite du travail.

3) « Heritage BIM » :

3.1) Introduction :

Comme nous l'avons vu précédemment, l'intégration des procédés « BIM » pour la conception architecturale s'impose peu à peu comme le nouveau standard en matière de modélisation 3D architecturale. Cette évolution est même considérée par certains comme « *un changement de paradigme qui remplacera la représentation bidimensionnelle lingua franca pour la conception, l'assemblage et la gestion du cycle de vie de nouveaux bâtiments* »⁷⁹. Si l'utilisation de ces nouvelles technologies devient maintenant de plus en plus répandue dans la conception de nouveaux bâtiments, il en va différemment en ce qui concerne les bâtiments déjà construits et le patrimoine bâti. Des études font cependant office de précurseurs, et instaurent peu à peu les bases d'une discipline qui mêle documentation historique et modélisation virtuelle paramétrique.

Trouver une définition d'un « Heritage BIM » se révèle plus difficile qu'il n'y paraît.

Dans le cadre de l'étude de cas menée par l'Université canadienne de Carleton, Ottawa, les auteurs envisagent l'Heritage BIM comme un « *BIM au rôle élargi, pour incorporer à la fois des actifs quantitatifs (objets intelligents, données de performance) et des actifs qualitatifs (informations historiques, photographies, récits oraux, musiques, ...)* De plus, les modèles exploitent les capacités du BIM pour fournir une timeline navigable qui permet de documenter la chronologie d'un site, y compris les possibilités futures »⁸⁰.

Le site britannique HBIM, qui étudie les performances énergétiques dans les bâtiments patrimoniaux, décrit quant à lui sa démarche comme « *Une collaboration institutionnelle qui étudie des méthodes de mesure intelligente des performances dans les bâtiments patrimoniaux, à des fins de durabilité et de préservation du patrimoine. [...]. Les données, les mesures et les analyses collectées seront gérées et affichées via un portail Web pour la modélisation des informations sur les bâtiments patrimoniaux, qui servent de modèle à des études de cas similaires...* »⁸¹.

⁷⁹ FAI, STEPHEN, GRAHAM, KATIE, DUCKWORTH, TODD, WOOD, NEVIL, ATTAR, RAMTIN, *Building information modelling and heritage documentation*, page 2.

⁸⁰ *Ibid.*

⁸¹ <http://www.hbim.org/> 310319 consulté le 31/03/19 [en ligne].

Des organismes comme « BIM4Heritage »⁸² ou encore le COTAC⁸³ (Council On Training in Architectural Conservation) se veulent les promoteurs du « Heritage BIM » dans les projets de restauration. Ils mettent notamment en avant la grande capacité de communication qu’offrent de tels procédés pour les bâtiments patrimoniaux.

Une des caractéristiques des projets ayant trait au patrimoine est la complexité des éléments étudiés. Ceux-ci nécessitent une collaboration étroite entre de nombreux spécialistes et experts dans des disciplines diverses et variées. Ceux-ci doivent échanger, collaborer et interpréter des éléments complexes.

A l’heure actuelle, les informations liées aux bâtiments historiques et archéologiques sont encore souvent matérialisées par une grande diversité de documents indépendants aux formats divers (documents informatiques, archives, rapports, dessins,...).

Il est très important que toutes ces informations soient bien comprises par les différents acteurs afin de pouvoir prendre les décisions importantes et de définir les axes du projet de réhabilitation.

La démarche HBIM est une solution à ces problèmes complexes d’interopérabilité. Au-delà d’une maquette numérique, c’est aussi la création d’une banque de données, accessible à tous et dont les formats sont compatibles pour chacun.

Ingval Maxwell, historien britannique spécialisé dans les questions de Heritage BIM et initiateur du groupe « BIM4Conservation », déclarait, dans son rapport du COTAC « BIM4C Integrating HBIM Framework Report Part 1 », que « *la qualité de l’information pour cette base de connaissances multidisciplinaires est cruciale pour les projets patrimoniaux. Une mauvaise information (inexacte, incomplète ou non coordonnée) conduit souvent à des erreurs qui peuvent être préjudiciables pour l’aspect historique, sa valeur et son importance* »⁸⁴.

⁸² <http://bim4heritage.org/index.html>, consulté le 04/04/19 [en ligne].

⁸³ <http://cotac.global/about/>, consulté le 04/04/19 [en ligne]

⁸⁴ Historic England 2017 BIM for Heritage: *Developing a Historic Building Information Model*. Swindon. Historic England. page 7.

3.2) Quelques cas d'études :

- Le quartier « Batawa », Canada :

Situé à 175 kilomètres de Toronto, Batawa est une très petite localité d'environ 300 habitants. Elle fut fondée en 1939 par une grande entreprise de chaussures comme une ville pour les travailleurs de l'usine. Celle-ci a fermé ses portes et laisse les quelques 600 hectares du site en friche, hormis les zones encore habitées. L'étude de ce quartier a été commandée afin de proposer des solutions de réaffectation de l'usine, la rénovation des bâtiments existants et la construction de 5000 nouveaux logements. Un modèle numérique de terrain (MNT) a tout d'abord été créé. Sur celui-ci sont venus s'implanter les bâtiments modélisés. Ceux-ci ont été représentés à certaines époques marquantes (transformations, annexes,...), sur base des archives trouvées et des documents utilisables (**FIGURE 31**). La modélisation s'est uniquement basée sur ces documents, délaissant la lasergrammétrie. Ce choix se justifie, d'après les auteurs, par le fait que « *Les flux de travail existants pour l'exploitation des données d'un nuage de points vers le BIM sont encore à leurs balbutiements* »⁸⁵. Cette étude datant de 2015, nous ne comprenons pas réellement cette justification. En effet, l'exemple pris plus bas, traitant de la Repton School, date de la même époque et a pourtant été réalisé sur base d'un nuage de points.

Outre la création de la maquette virtuelle, la mise en place du processus HBIM a permis de réaliser une banque de données numériques, rassemblant tous les documents historiques trouvés sur le sujet. Le résultat de ce travail a été une étude du quartier « Batawa » permettant de mieux comprendre son évolution à travers le temps, et ainsi de mieux coordonner les actions à mener pour sa réhabilitation.

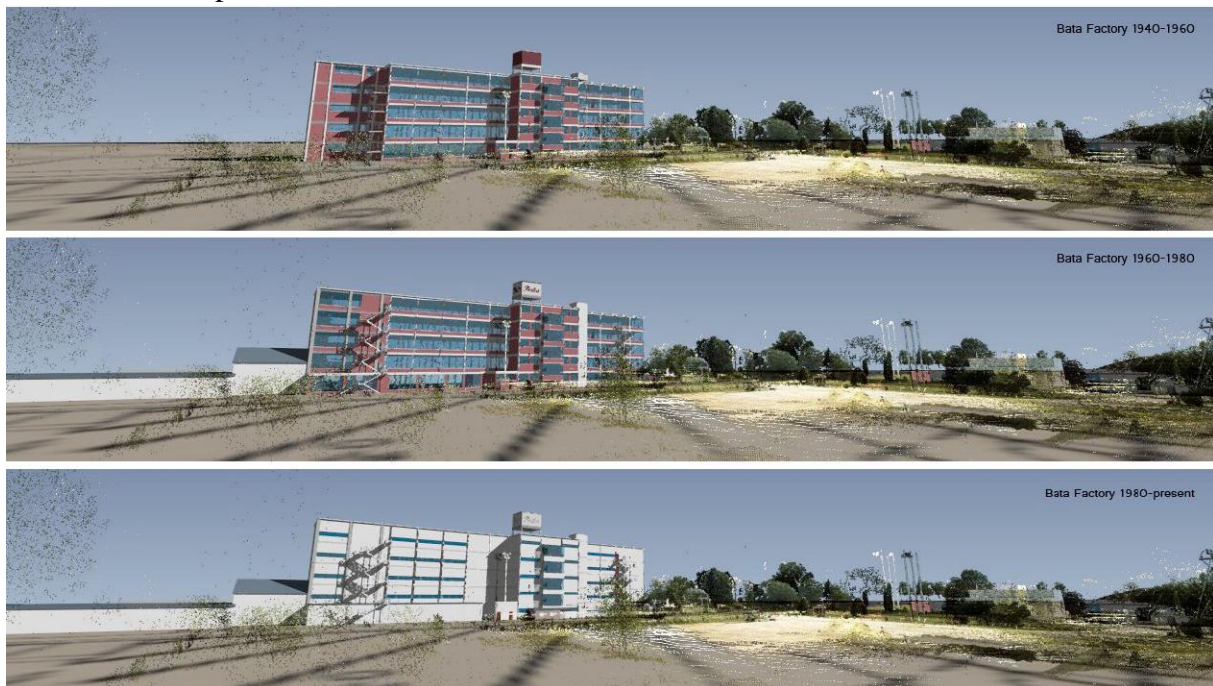


Figure 31 Timeline de l'usine de Batawa. *Buiding information and Heritage documentation*, page 6.

⁸⁵ *Building information modelling and heritage documentation*, Op. Cit., page 7.

- *La Villa Majorelle :*

L'agence française « Art Graphiques et patrimoine », spécialisée dans la modélisation du patrimoine bâti, s'est vue confier la sauvegarde numérique d'une villa art nouveau située près de Nancy. Grâce aux techniques lasergrammétriques et photogrammétriques, ils ont pu réaliser une copie numérique complète de l'édifice. La phase de sémantisation de ces données a permis de créer une maquette virtuelle complète de la villa (**FIGURE 32**), intérieurs et extérieurs, dans un niveau de détail assez élevé. Celle-ci poursuit des objectifs multiples, « allant des travaux de restauration à la valorisation numérique de ce chef-d'œuvre de l'art nouveau. Tandis que, à l'heure actuelle, aucun projet de médiation n'est encore établi, l'ensemble de ces données permettrait en futur la mise en place d'une vaste gamme d'outils de médiation numérique »⁸⁶.

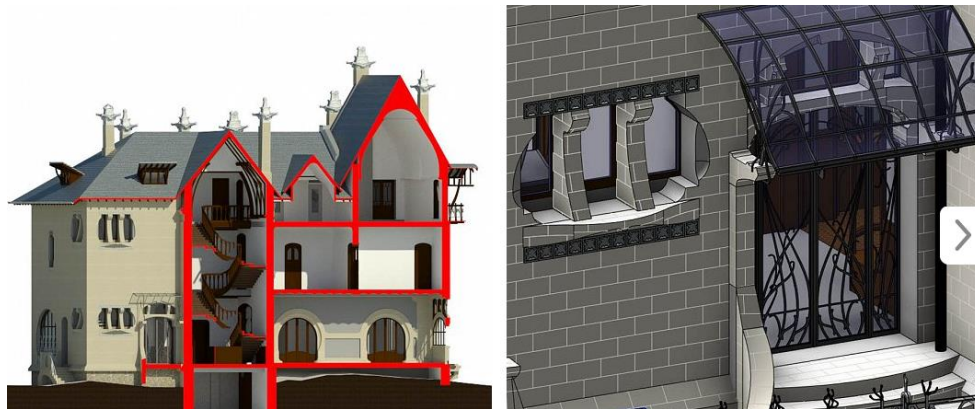


Figure 32 Maquette HBIM de la villa Majorelle. <http://www.artgp.fr/bim-villa-majorelle.html>

Nous retrouvons bien ici la volonté de mêler intérêt didactique et technique au sein d'un seul support : la maquette numérique HBIM.

- *L'arsenal royal de Rochefort :*

Construit sous le règne de Louis XIV, l'arsenal de Rochefort est un complexe architectural de première importance dans l'histoire de la région. Son bâtiment à vivres, datant du XVII^{ème} siècle, a récemment fait l'objet d'un processus de réhabilitation en immeuble d'appartements, pour une superficie totale de plus de 14 500 mètres carrés. Le bureau d'étude en charge du projet a décidé de mettre en place une démarche de type « Heritage BIM » pour intégrer de la manière la plus qualitative possible son intervention au sein de cet ensemble patrimonial. L'intégration des nouvelles structures, en béton armé (**FIGURE 33**), a pu être maîtrisée dans le moindre détail, grâce à l'utilisation du logiciel « Tekla Structure ».

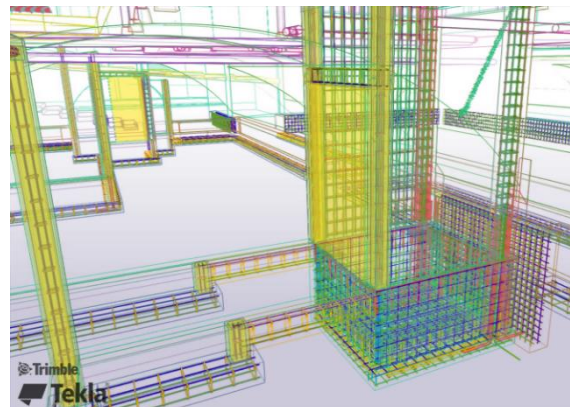


Figure 33 Schémas de ferrailage au sein de la maquette HBIM.

<https://www.tekla.com/fr/r%C3%A9f%C3%A9rences/le-bim-pour-un-b%C3%A2timent-embellissement-heritage-bim-du-patrimoine-architectural-du-xvii%C3%A8cle>

⁸⁶ <http://www.artgp.fr/bim-villa-majorelle.html>, consulté le 24/04/19, [en ligne].

- *La Repton School* :

Ce bâtiment du XVI^{ème} siècle, situé dans le Derbyshire, a fait l'objet d'une campagne de relevés par lasergrammétrie. Celle-ci a eu pour but la réalisation d'une maquette 3D « HBIM » permettant de prévoir, à l'avenir, les différents travaux de restauration. L'élément le plus marquant de cette modélisation a été la réalisation de la charpente du hall principal (FIGURE 34). En effet, le commanditaire souhaitait un LOD relativement élevé.

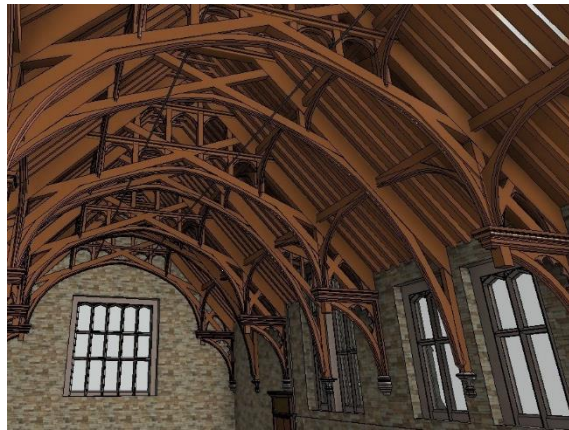


Figure 34 Modélisation de la charpente.

<https://abcdblog.typepad.com/abcd/2017/09/grace-a-l-expertise-de-solidpoint-le-patrimoine-revit-en-bim-l-exemple-de-repton-school-dans-le-derbyshire.html>

- *L'Oriental Club* :

Construit entre 1770 et 1776, l'Oriental Club est un bâtiment néo-classique situé à Londres. Des travaux de rénovation devenant urgents ont conduit le maître d'ouvrage à faire appel à un bureau d'étude spécialisé. Celui-ci disposait déjà d'une expérience certaine en terme d'Heritage BIM, et a donc appliqué cette méthode à ce cas de figure. La modélisation s'est basée sur un relevé par lasergrammétrie. La complexité d'un tel bâtiment s'est ressentie dans les décors. En effet, de nombreuses statues, ou les rambardes ouvragées en fer forgé, ont nécessité un travail conséquent (FIGURE 35).

La maquette numérique a été remise au maître de l'ouvrage afin que celui-ci puisse réaliser tous les plans et les coupes qu'il jugerait nécessaire. De plus, une demande particulière de ce dernier précisait vouloir disposer d'une famille paramétrique pour les fenêtres. Celle-ci a été modélisée en représentant tous les éléments « as built ». Ceux-ci ont pu être isolés et analysés séparément dans le cadre d'un relevé de leur état sanitaire.

Le support virtuel a également servi de base pour les études sur les techniques spéciales, qui ont été implémentées dans une copie du modèle de base.

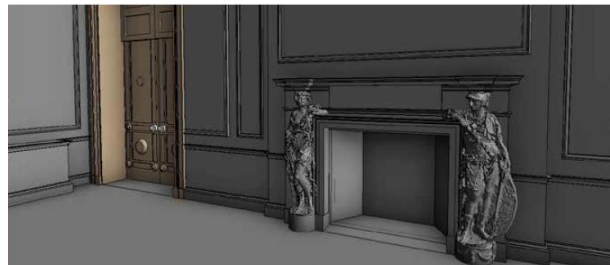


Figure 35 Maquette numérique de l'Oriental Club. -

ANTONOPOULOU, SOFIA, BRYAN, PAUL, BIM for heritage : developing a historic building information model. Swindon : Ed. Historic England, 2017, page 46.

3.3) Heritage BIM versus Sauvegarde numérique du patrimoine :

Il ne faut pas confondre Heritage BIM et sauvegarde numérique du patrimoine.

En effet, la préservation du patrimoine culturel matériel par les techniques de modélisation informatiques est devenue, si pas la norme, tout du moins une pratique courante et ce depuis quelques années maintenant.

La destruction des Bouddhas de Bamiyan (Afghanistan) par les talibans en 2001 (**Figure 36**) fut l'élément déclencheur d'une prise de conscience à l'échelle mondiale en termes de préservation culturelle, archéologique de sites patrimoniaux.

Les technologies de numérisation virtuelle existaient déjà à l'époque, comme nous l'avons vu précédemment, mais la communauté internationale n'avait pas encore pris conscience de la volonté de destruction de la culture, par des groupes terroristes notamment.



Figure 36 Bouddhas de Bamiyan avant et après destruction.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouddhas_de_B%C3%A2miy%C3%A2n

Plus récemment, les destructions effectuées par l'Etat Islamique à Palmyre ou au musée de Mossoul ont été des preuves supplémentaires de la nécessité d'une sauvegarde numérique du patrimoine. Dans ce dernier cas de figure, des modèles virtuels ont pu être recréés sur base de simples photos prises par des milliers de touristes à travers le monde par la technique de la photogrammétrie. A Palmyre, l'UNESCO avait heureusement fait procéder à une série de relevés par lasergrammétrie sur des éléments de la cité antique aujourd'hui détruits par les terroristes.

Dans un cadre moins dramatique, les relevés photogrammétriques et lasergramétriques de la Maison Rigaud à Liège, réalisés par l'institut de géomatique de l'université de Liège ont permis de conserver une trace virtuelle de ce patrimoine, qui fut détruit en 2018.

En parallèle à ces cas, malheureusement trop nombreux, de numérisation patrimoniale « d'urgence », de nombreux cas d'études sur des monuments majeurs (ou non), se révèlent précieux pour les archéologues et tous les acteurs du patrimoine bâti.

Depuis octobre 2015, le projet ScanPyramids⁸⁷ a permis de faire de nombreuses découvertes archéologiques grâce à différents types de scanners. Récemment, ce projet international a permis de découvrir une grande cavité jusque-là inconnue des scientifiques.

Des scans 3D des grandes cathédrales gothiques françaises ont permis de mettre en évidence certaines pathologies des bâtiments et de découvrir, à travers des coupes, par exemple, les méthodes utilisées à travers les époques pour y remédier.

⁸⁷ <http://www.scanpyramids.org/>, consulté le 02/04/19 [en ligne].

Toutes ces données numériques permettent une reproduction à l'infini des objets modélisés numériquement, à des fins d'études ou encore de muséalisations, le tout pour un coût minime. Elles permettent également de garantir une étude des objets en toute sécurité, que ce soit pour l'œuvre, dans le cas d'un matériel fragile, ou pour le chercheur, dans le cas d'une zone de guerre par exemple. Cette sauvegarde numérique n'est cependant qu'une première étape. En effet, les données sont souvent sous forme de nuage de points ou de modèles 3D maillés. S'ils ont déjà un intérêt certain, en termes de couleur, de texture, de principes constructifs,... Ils n'ont cependant aucune information sémantique.

Le passage à un « Heritage BIM », se fait donc au niveau de l'ajout d'informations, structurelles, historiques, etc... permettant une compréhension pluridisciplinaire de l'objet patrimonial en question. Le passage entre ces deux niveaux de représentation se fait, encore à l'heure actuelle, en grande partie par l'entremise d'opérateurs formés à une tâche qui se révèle toujours complexe. Il s'agit ici de modéliser, les éléments, sur base de la sauvegarde numérique (**Figure 37**). L'exemple ci-dessous illustre un nuage de points doté d'une information colorimétrique. Les piliers, les arcs doubleaux, les clés de voûtes et les croisées d'ogives sont des familles créées « In Situ » sur base du relevé 3D. Chaque élément est donc modélisé individuellement pour correspondre avec un maximum de précision à la réalité construite.

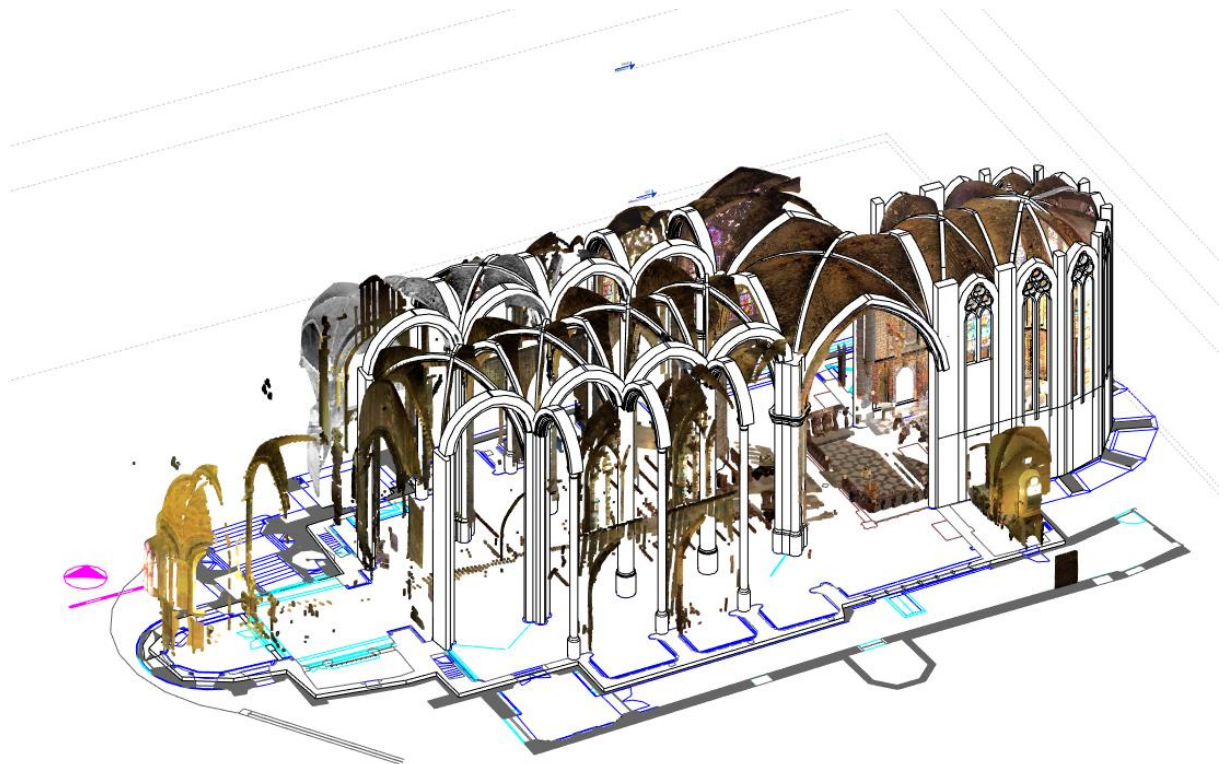


Figure 37 Heritage BIM, cas concret de la collégiale Sainte-Croix. Travail personnel.

Le principal problème relatif à toutes ces données est celui du stockage. Nous sommes encore actuellement dans un système paradoxal, comme le mentionne le rapport sur la « Cultural Heritage preservation using constructive shape modeling » : « *Malheureusement, une grande partie des numérisations, visualisations et animations numériques actuelles des artefacts patrimoniaux deviendront inutilisables avant que ces artefacts soient eux-mêmes perdus ou détruits* »⁸⁸.

Des réflexions de première importance sont donc nécessaires afin de garantir la pérennité de ces données numériques. En effet, la durée de vie moyenne d'un système informatique est de 3 ans⁸⁹. Cela conduit bien souvent à produire des données devenues inutilisables quelques années plus tard. La solution proposée par l'étude « Cultural Heritage Preservation Using Constructive Shape Modeling » serait de « *développer un système de conservation utilisant une forme hautement abstraite de représentation mathématique sous la forme d'un standard ouvert, qui risque moins de devenir obsolète. Son code source serait ouvert pour inspection publique, pourrait être librement modifié, recompilé et testé. Enfin, toutes les procédures seraient rendues publiques et transparentes* »⁹⁰.

3.4) Les outils Revit au service de l'Heritage BIM :

Afin de réaliser un modèle virtuel de type « HBIM », Revit nous propose un certain nombre d'outils particulièrement adaptés aux études dans le temps par exemple.

Revit contient un outil extrêmement intéressant dans le cadre général de l'étude du patrimoine et dans la réalisation d'un modèle « Heritage BIM » en particulier, il s'agit des phases.

Cette fonctionnalité native de Revit, permet de représenter le modèle BIM d'un bâtiment aux différentes phases de son existence. La procédure est très simple : il suffit d'ouvrir l'onglet dédié et d'y créer une nouvelle phase. Deux phases sont existantes par défaut, ce sont les phases « existante » et « nouvelle construction ». Il suffit de cliquer sur « insérer une nouvelle phase » pour la créer. Il est important de la nommer de la manière la plus claire possible. Une description permet également de rendre la différenciation des phases plus claire.

Ces phases peuvent faire l'objet de représentations graphiques spécifiques. On peut choisir de représenter les éléments phasés avec certaine couleur, un certain type de traits,...

Avec cet outil de phase, Revit fait le bond entre la 3D, c'est-à-dire les 3 dimensions de l'espace, et la 4D. La quatrième dimension étant ici le temps. Au sein d'un même modèle, il est donc possible d'avoir une chronologie complète du bâtiment étudié. Cette chronologie peut bien évidemment être aussi détaillé qu'on le souhaite, pouvant même décrire le chantier jour après jour. La précision quant à cette notion temporelle doit être décidée en amont par le commanditaire de la maquette virtuelle. Cette décision doit prendre en compte les besoins des utilisateurs finaux, les ressources historiques disponibles ainsi que le temps imparti pour la modélisation.

Nous avons évoqué plus tôt le cas des familles dites « In Situ ». Ces familles sont énormément utilisées dans le cas d'un « Heritage BIM ». En effet, les éléments sont très

⁸⁸ Cultural Heritage Preservation Using Constructive Shape Modeling, page 3.

⁸⁹ *Ibid.* page 4.

⁹⁰ *Ibid.* page 5.

souvent non standardisés et nécessitent donc une modélisation individuelle sur base des relevés effectués.

Un autre élément qui caractérise un HBIM est la complexité des éléments à modéliser. Certains éléments ornementaux se révèlent particulièrement difficiles et chronophages à dessiner en 3D. Ces éléments peuvent cependant être rendus de manière assez fidèles grâce au principe de maillage avec des logiciels comme 3DRechaper⁹¹ par exemple. Celui-ci consiste à construire une série de formes (souvent des triangles) englobant les points et permettant de rendre des faces (**FIGURE 38**).

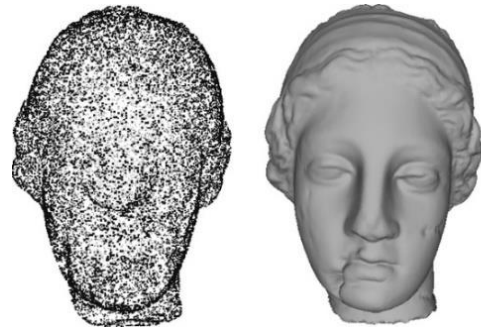


Figure 38 Passage d'un modèle en nuage de points à un élément maillé.

https://elmoatazbill.users.greyc.fr/point_cloud/index.html

Plus le nombre de mailles est grand, plus le modèle sera précis, et plus il sera lourd également (**FIGURE 39**). Il est donc important de trouver un juste milieu entre représentation correcte d'un objet et fluidité du modèle complet.

Dans le tableau ci-dessous, réalisé sur base de l'un de nos relevés, nous utilisons 3 niveaux de maillage différents pour restituer en 3 dimensions un élément électromécanique scanné.

Nombre de faces	Taille de l'élément	Résultat
2880	442 Ko	
7044	949 Ko	
38714	5,5 Mo	

Figure 39 Comparaisons d'éléments maillés à différents niveaux de détails. Travail personnel

⁹¹ <https://www.3dreshaper.com/fr/>, consulté le 04/04/19 [en ligne].

Partie III : Question de recherche

L'utilisation d'un outil « BIM » aide-t-elle à la compréhension d'un système de réseau électrique dans le cas d'un patrimoine militaire belge ?

1) Hypothèse I : Relevé effectué par LaserScan :

Dans le cadre de ce travail, nous sommes partis d'un relevé LaserScan sans information colorimétrique et avec une densité moyenne.

2) Hypothèse II : Réalisation d'un modèle « Heritage BIM » :

Nous avons choisi, pour développer la partie « HBIM » de la maquette virtuelle, d'étudier plus en détail le réseau électrique du fort de Flémalle. Ce choix s'est fait pour des raisons documentaires. En effet, nous avons retrouvé dans les archives un grand nombre de documents relatifs à l'installation électrique dans différents forts de Liège. Les documents qui nous ont été utiles sont les plans d'installation électrique, le plan des différents tableaux, le cahier spécial des charges et les bordereaux, mais aussi les dépliants publicitaires d'époque, les lettres adressées par les différents intervenants, ... Les photos d'époques prises dans certains forts apportent aussi une documentation précieuse. Malheureusement, aucune photo de l'intérieur du fort de Flémalle avant les combats de mai 1940 n'est connue.

3) Hypothèse III : Relevés d'éléments similaires dans d'autres forts :

Comme nous l'avons vu précédemment, le fort de Flémalle a été dépouillé de tous ses équipements électromécaniques. Ce n'est cependant pas le cas de tous les forts, et des éléments identiques à ceux présents à l'époque au fort de Flémalle demeurent, notamment dans les forts modernes d'Eben-Emael, de Battice et de Tancremont.

La prudence est cependant de mise quant à ces installations. En effet, leurs mises en œuvre dans les années 30 est revenue à différents entrepreneurs selon les lots définis par la D.T.F.

A la lecture des documents trouvés dans les archives, ces entrepreneurs sont différents pour les forts réarmés et pour les nouveaux forts. C'est ainsi que, entre les forts d'Eben-Emael et de Tancremont, des différences apparaissent déjà⁹². Face aux lacunes des cahiers spéciaux des charges, il est donc impossible, à l'heure actuelle, de savoir comment chaque entrepreneur les a comblées.

⁹² Pour exemple, les systèmes de compensation de la dilatation des conduites de chauffage sont différents selon que l'on se trouve à Eben-Emael ou à Tancremont.

Partie IV : Modélisation 3D du fort :

Dans la partie II, nous avons vu quels éléments étaient nécessaires à la réalisation d'une maquette virtuelle type « Heritage BIM ». Nous allons maintenant voir comment ces sources ont été utilisées pour la création de la maquette en question.

1) Relevés du fort :

1.1) Méthodologie de relevés au fort :

Pour réaliser nos relevés du fort de Flémalle, nous avons choisi d'utiliser conjointement des relevés faits par LaserScan et des relevés photogrammétriques.

Avant de commencer les campagnes de relevés, nous avons réalisé au préalable une visite de l'ouvrage afin de définir les besoins et les objectifs du relevé. Cette visite a donné lieu à quelques hypothèses de base relatives aux relevés à réaliser :

- Tout d'abord, nous nous sommes rendu compte que l'information colorimétrique liée au nuage de points était superflue, dans le cadre de cette mission. En effet, les couleurs présentes dans le fort, en plus d'être relativement peu variées, n'apportent pas d'informations utiles dans le cadre de ce travail, à savoir la compréhension d'un réseau électrique dans un bâtiment militaire patrimonial à l'aide des outils « BIM ».
- Ensuite s'est posée la question de la densité du nuage de points. Le but du relevé, dans ce cas, est d'avoir une cartographie virtuelle des vestiges de l'installation électrique. Ces vestiges se traduisant souvent par des éléments facilement identifiables, nous n'avons pas choisi la densité la plus élevée, car l'information résultante aurait été superflue dans le cadre de ce travail. Une densité moyenne nous est donc apparue suffisante. Ces deux premiers choix ont aussi été faits dans un souci de rapidité des relevés. Les relevés à haute densité et les relevés photographiques intégrés allongent évidemment le temps de relevé par station.
- Finalement, nous n'avons pas utilisé de marqueurs externes comme des cibles ou des sphères, partant du constat que le contraste entre les éléments relevés serait suffisant pour identifier des points de concordance valables entre les différents nuages.

1.2) Résultats :

Les relevés au fort de Flémalle ont été réalisés en deux fois, selon la méthodologie énoncée plus haut. La première journée a permis à une seule personne de relever la courtine et la poterne d'escarpe, la galerie en capitale, la salle des machines et ses dépendances et la moitié droite de l'étage du quadrilatère (**FIGURE 40**). Sur les 5 heures qu'ont duré le relevé, nous avons réalisé 66 stations. Au terme de cette première journée, les données ont été traitées par le logiciel Autodesk Recap, avant d'être importées dans Revit. C'est seulement après le traitement de ces données, réalisé à domicile, que nous nous sommes rendus compte d'une

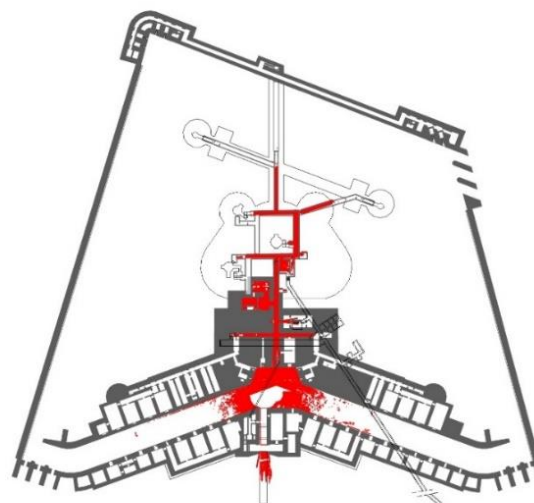


Figure 40 Première campagne de relevés (en rouge).

Travail personnel

erreur dans l'ajustement automatique entre les différents nuages de points au niveau de l'étage du quadrilatère. En effet, les plans en notre possession renseignaient une différence de niveaux de 45 centimètres entre deux points précis et identifiés. Or, dans notre nuage de points, constitué de toutes les stations réalisées, nous avons une différence de 25 centimètres entre ces deux mêmes points.

La seconde phase a duré 3 heures et a permis de corriger les erreurs du premier relevé ainsi que de scanner les locaux de détente du Saillant IV et le couloir permettant d'y accéder jusqu'au local à mazout (FIGURE 41).

Notre promoteur s'est occupé de la correction de l'erreur décelée, aidé par un de ses assistants. Cette tâche nécessite en effet des compétences que nous n'avions pas.

Nous avons, pour notre part, procédé aux mesures à l'aide du scanner dans les locaux décrits ci-dessus.

En ce qui concerne la correction elle a été réalisée à l'aide d'une station totale.

Nous avons relevé une série de points préalablement identifiés (cibles). En partant d'un point extérieur, nous avons effectué un cheminement à travers la galerie en capitale, l'escalier d'accès au quadrilatère pour finir par viser le point où l'erreur avait été relevée. Celle-ci nous a appris qu'une différence de 3 centimètres existait entre la réalité et les plans, tolérance normale sur un chantier de cette ampleur et de cette époque.

Sur base de cette polygonale, nous avons réalisé une nouvelle série de scans englobant les cibles relevées précédemment avec la station totale. Leur position précise étant connue les unes par rapport aux autres, nous avons donc finalement pu forcer l'ajustement des différents nuages afin de rectifier l'erreur.

1.3) Analyse critique sur la méthode utilisée :

Au terme de nos relevés, plusieurs problèmes sont apparus. Des hypothèses de départ ont été confirmées, tandis que d'autres demandent plus de nuance quant à nos choix initiaux :

- L'information colorimétrique :

Notre postulat de départ était que doter le nuage de points d'une information colorimétrique n'aidait pas à répondre à notre question de départ.

Si, globalement, l'hypothèse de départ s'est vérifiée dans les faits, elle a cependant été invalidée dans certains cas. Par exemple, le relevé de la salle des machines aurait nécessité un complément colorimétrique. Ce manque s'est particulièrement fait sentir lors de la modélisation de cette salle. En effet, il fut assez difficile de différencier, sur la seule base du relevé en retour d'intensité, les carrelages du sol des éléments métalliques rouillés, par exemple. Dans ce cas précis, le recours à des photographies classiques s'est avéré fort utile.

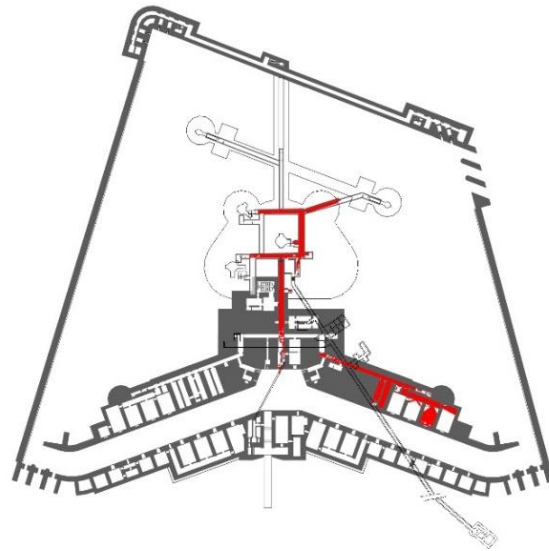


Figure 41 Seconde campagne de relevés (en rouge). Travail personnel.

- **La densité du nuage de points :**

Dans le cadre des relevés réalisés dans le fort de Flémalle, la densité moyenne du nuage de points n'a pas posé de problèmes particuliers. Cette hypothèse s'est donc confirmée sur le terrain.

- **La non-utilisation de marqueurs externes :**

Encore une fois, cette hypothèse a été globalement confirmée, à une exception près.

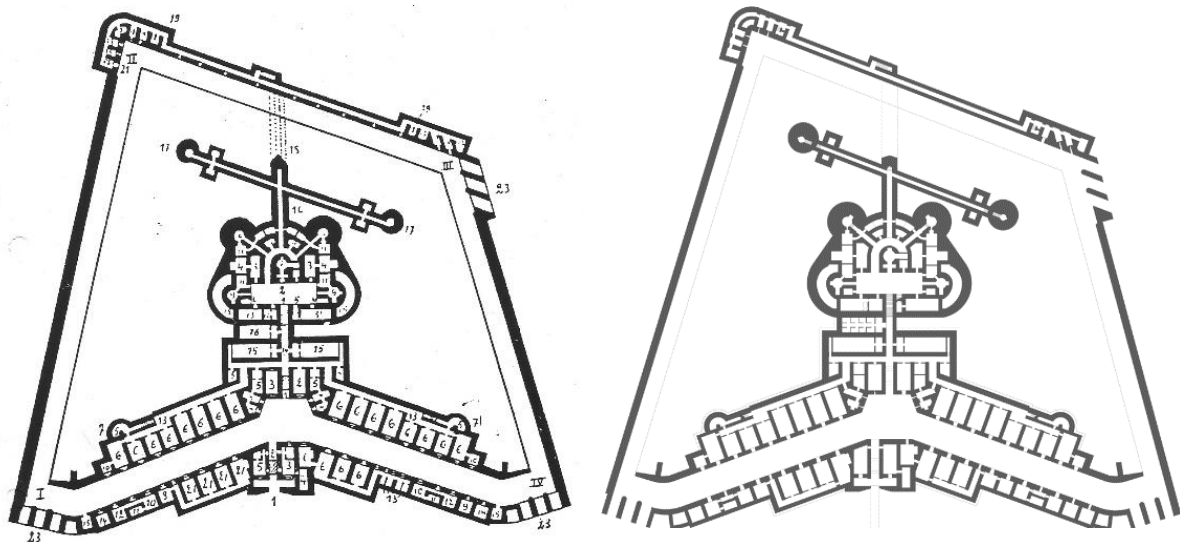
Lors du relevé de l'escalier de descente vers l'étage du quadrilatère, l'ajustement automatique du nuage de points n'a pas fonctionné. Dans la descente de cet escalier, il aurait donc été nécessaire de placer des repères tels que des cibles imprimées à des endroits judicieusement choisis afin de permettre un ajustement automatique performant.

Nous avons aussi constaté une erreur d'ajustement au niveau de l'étage du quadrilatère.

2) Modélisation 3D Revit :

2.1) Méthodologie et parti pris :

Afin de modéliser un ouvrage patrimonial complexe d'un point de vue temporel tel que le fort de Flémalle, nous avons choisi de commencer par la partie originelle du fort (**FIGURE 42**), construite entre 1888 et 1892 en béton non armé. Celle-ci n'étant que peu visible au niveau des étages modifiés par le réarmement, nous sommes partis d'une hypothèse donnée par les plans de la DTF, à savoir que les murs originaux se situaient derrière 25 centimètres de béton armé, correspondant au réarmement des galeries. Certaines pièces ayant été totalement remblayées et n'étant plus accessibles à l'heure actuelle, nous avons pris pour ces pièces les cotes reprises sur les plans, sans possibilité de les vérifier.



1) Plan du fort existant. Collection Musée fort de Flémalle

2) Plan du fort créé avec Revit. Travail personnel

Figure 42 Plans du fort en 1914.

Les murs du bâtiment originel ont été dessinés jusqu'au niveau de la dalle de ciel du fort. Cela signifie que les éléments définis comme étant des toitures (les voûtes) s'intercalent entre les murs (**FIGURE 43**). Nous avons fait ce choix car il nous semblait plus simple de modéliser des voûtes de manière individuelle et de les placer entre les murs plutôt que de modéliser en un seul élément toute l'épaisseur de la dalle de ciel du fort.

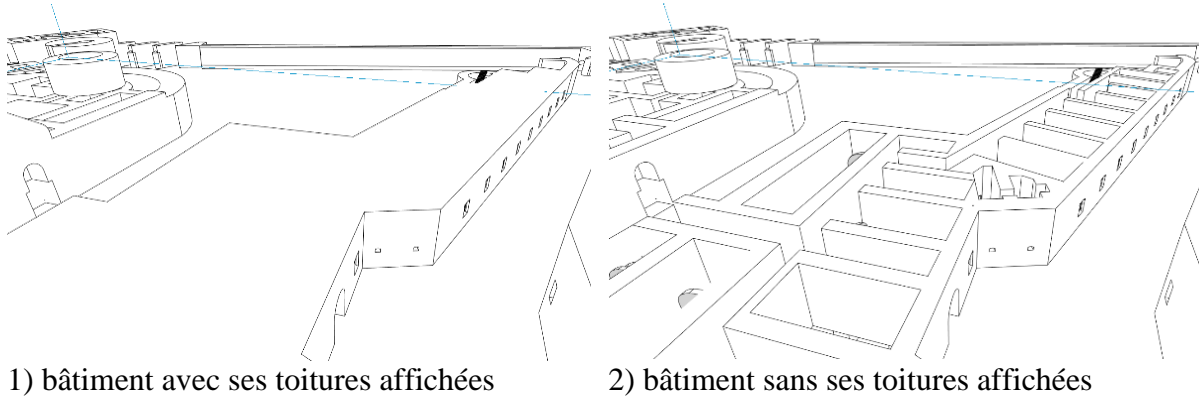


Figure 43 Parti-pris pour les toitures. Travail personnel.

Nous avons également pris le parti d'utiliser le nuage de points comme fond de plan pour la modélisation des parties numérisées, en se servant des plans d'époque, pour combler les lacunes ou comme vérificateurs.

Nous avons finalement choisi de privilégier la représentation planaire, dans un souci de rapidité. Cela signifie que certains éléments tels que des voûtes complexes, ou encore le relief tout à fait particulier du massif central n'ont pas été modélisés. Il en va de même pour l'armement. Ce dernier est néanmoins déjà entièrement modélisé via Sketchup. Un import des coupoles entre Sketchup et Revit est donc tout à fait possible. Il sortait cependant du scope du présent projet.

L'utilisation d'un nuage de points comme fond de plan :

Celle-ci est relativement nouvelle et est encore souvent sous-utilisée car mal comprise, même au sein du milieu des architectes.

En effet, l'approche classique a toujours été de travailler sur base de plans, de coupes et d'élévations. Ces supports en deux dimensions sont, pour nous, les bases d'une représentation en trois dimensions que nous avons appris à construire mentalement. L'avantage d'un nuage de points, couplé à un logiciel comme Revit, est de permettre, de manière directe, la réalisation d'une maquette virtuelle en trois dimensions qui deviendra l'origine de tous les plans, coupes et élévations que l'architecte jugera utiles par la suite. Il y a donc, ici, une optimisation très importante du travail de l'architecte.

De plus, Revit donne tous les outils nécessaires à une transition en douceur entre les références 2D et 3D. En effet, le logiciel découpe le nuage de points en tranches, qui apparaissent dès lors à l'écran comme des fonds de plan en deux dimensions. La différence réside dans le fait que l'information 3D est ici toujours présente et disponible lorsque l'on en a besoin (FIGURE 44).

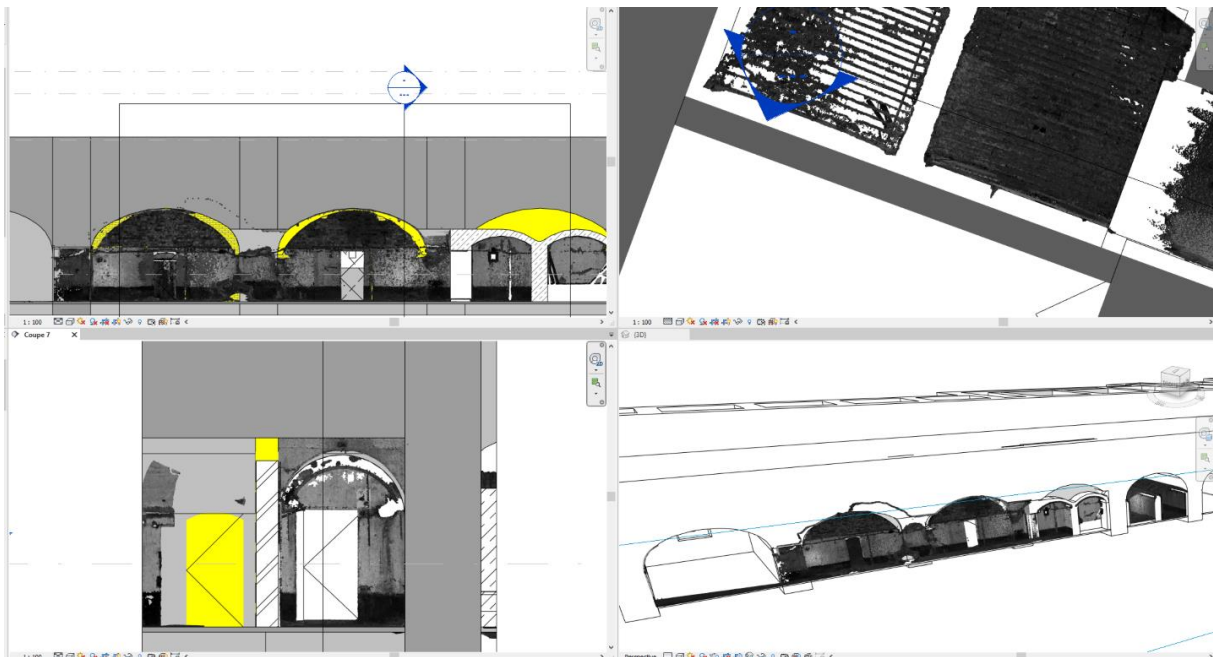


Figure 44 Modélisation sur base du nuage de points. Travail personnel.

Le problème des tolérances :

Le relevé sur base du laserScan est assorti d'une précision de l'ordre de quelques millimètres à 100 m. Ses conclusions peuvent donc s'avérer impitoyables en matière de tolérances de réalisation. Des incompatibilités apparaissent vite entre les repères orthonormés sur lesquels se base le logiciel de modélisation et les relevés du terrain. Sur tout logiciel de CAO, la perpendicularité est assurée de manière exacte. Lorsque l'on redessine sur base du nuage de points, on arrive très souvent à des éléments qui ne sont pas totalement perpendiculaires, les tolérances de chantier étant ce qu'elles sont. Dès lors, il faut prendre position par rapport à ce relevé. Veut-on relever au millimètre près un ouvrage, en respectant les erreurs réelles (minimes bien entendu), ou bien doit-on partir sur une modélisation « moins rigoureuse » par rapport à la construction réelle, mais qui aura l'avantage d'avoir de vrais angles droits, des murs plans, etc. ?

Dans le cas du fort de Flémalle, les erreurs nées « de la main de l'homme » sont de l'ordre du centimètre. Elles peuvent donc, nous semble-t-il, être négligées. Mais qu'en serait-il dans le cas d'un bâtiment patrimonial plus ancien et moins compassé, où les différences de mesures entre deux parties d'un mur ne se chiffraient plus en centimètres, mais en dizaine de centimètres ?

Il nous semble que cette question, qui se posera inévitablement à toute personne accomplissant un travail semblable à celui-ci, doit être débattue entre les différents acteurs du projet en amont de la phase de modélisation. La finalité du travail dictera les choix au cas par cas.

2.2) Modélisation architecturale, cas concrets :

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, nous nous sommes servis des 3 grandes sortes de familles déjà évoquées plus haut. Nous commencerons par les éléments les plus simples, ne nécessitant pas la création de nouveaux objets, pour terminer par des éléments dont le comportement peut varier en fonction des paramètres qui lui seront attribué.

a) Les murs :

Nous nous sommes servis des familles système, en créant un type par épaisseur et par matériau (**FIGURE 45**). De plus, nous avons précisé de quelle époque datait le mur type ainsi que sa composition.

Ainsi, nous avons 9 types de murs « 1940 » ayant pour matériau « maçonnerie-voile Béton Armé » et ayant des épaisseurs variant de 100 à 1000 millimètres. Il existé également un type de mur « brique 1940 » ayant une épaisseur de 350 millimètres.

Les murs « 1914 » comportent, eux, 11 types, avec des épaisseurs variant de 800 à 3000 millimètres. Ils sont tous constitués du matériau « Béton, coulé sur place ». Enfin, nous avons choisi, dans le nom du type, de préciser si le mur était destiné à l'extérieur (les murs les plus épais) ou bien à l'intérieur de l'ouvrage. 3 murs de briques « 1914 », ayant des épaisseurs de 240, 360 et 480 millimètres complètent la liste des murs créés pour ce projet.

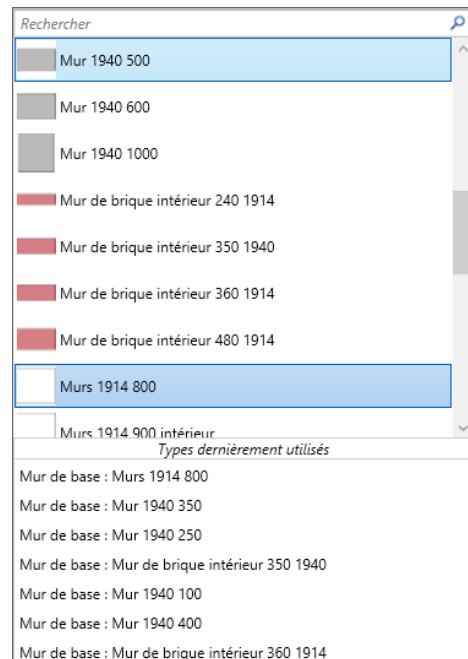


Figure 45 Liste partielle des différents types de murs. Travail personnel.

b) Les portes simples :

Nous avons modifié une famille de porte existante afin de lui donner l'aspect voulu. Dans Revit, les portes ne sont pas uniquement les éléments d'hubriserie. Elles contiennent également le percement du mur. Nous avons donc donné à ce percement la forme des baies existantes, avec leur voûte en berceau. Nous avons rendu ces portes paramétrables par type en longueur, hauteur et largeur. Les accès aux deux poudrières étant composés de deux portes, nous avons choisi de créer un type de porte que nous avons nommé « sas ». Finalement, certaines baies ne contenaient aucune porte. Dans ce cas, nous avons créé un paramètre d'occurrence, permettant d'afficher ou non les portes dans les vues en plan. Les portes en bois sont des éléments partiellement standardisés, et le même modèle fut souvent utilisé en 1914 et 1940. Malgré cela, nous avons tout de même dû créer 16 types de portes différents, sur base de leurs mesures.

c) Les fenêtres :

Celles-ci ont été entièrement modélisées depuis un gabarit de fenêtre métrique afin de leur donner la forme et les dimensions des baies créées en 1888. Il en va de même pour les embrasures.

Une question s'est posée quant à la modification temporelle de ces fenêtres. En effet, elles ont été rebouchées par du béton armé lors du réarmement du fort. Ce bouchon de béton armé est plein lorsque le local d'origine n'est pas réutilisé, et percé d'une évacuation d'air vicié lorsque le local est réemployé. La méthode qui nous semblait idéale aurait été de créer une famille dite « imbriquée », où la famille « fenêtre fort » aurait reçu en son sein la famille « bouchon fenêtre ». Cette dernière ayant un paramètre d'occurrence faisant apparaître ou disparaître l'évacuation d'air vicié. Le bouchon ainsi importé aurait dû disposer d'un paramètre lié aux phases, et permettant de l'afficher lorsque la phase de vue 1940 était sélectionnée, et de le masquer lors de la phase 1914. Ainsi, une seule fenêtre importée dans le projet aurait contenu toutes les informations relatives aux différentes époques.

Malheureusement, et ce, malgré nos recherches, nous n'avons pas réussi à lier les paramètres de phase au sein d'une famille. Nous avons donc modélisé les deux éléments, la fenêtre et le bouchon, séparément, et les avons ensuite réunis à même le modèle. Malheureusement, aucune interaction n'existe entre eux, ce qui oblige, par exemple, à placer les bouchons dans chaque fenêtre séparément. Il en résulte une perte de temps lors de la modélisation.

d) Les voûtes :

Les voûtes primaires, datant de 1888 et en béton simple, sont un exemple de modélisation par famille « In Situ » (**FIGURE 46.1**). Elles ont donc été modélisées au sein même du modèle (**FIGURE 46.2**) en utilisant la catégorie de famille « Toits » sur base d'une extrusion. Leur profil nous a été fourni par les plans de coffrage des forts de la Meuse. Ces voûtes ne contiennent que l'information du matériau qui les compose. Une fois dessinées, on utilise l'outil « attacher la géométrie » pour faire disparaître les arêtes communes aux murs (**FIGURE 46.3**), et obtenir ainsi un rendu plus uniforme des surfaces.

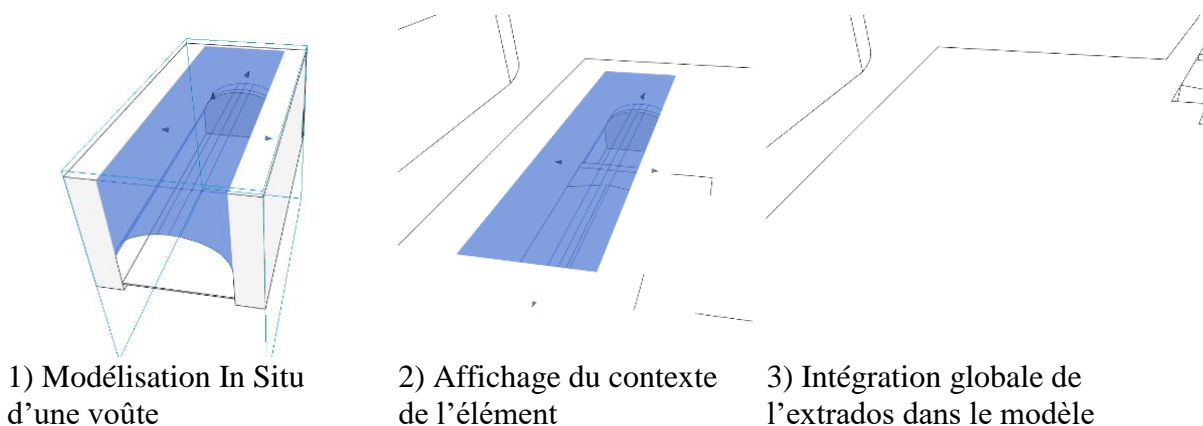


Figure 46 Création d'une famille In Situ pour les voûtes. Travail personnel

e) Les escaliers :

La question des escaliers dans un fort réarmé mérite une attention toute particulière. Tout d'abord, l'escalier d'origine se compose de marches en pierre bleue noyées dans le béton de l'ouvrage. Pour le représenter, nous avons choisi un type d'escaliers « coulés sur place,

monoblocs » auquel nous avons attribué des marches en pierre. Ces marches sont posées dans un limon intégral auquel nous avons affecté le matériau « béton simple ». Il en résulte, d'un point de vue modélisation, que l'escalier est un élément dissociable du béton l'entourant, celui-ci étant alors lisse sous l'escalier. La gestion des différentes phases s'avère compliquée en ce qui concerne les escaliers. En effet, lors du réarmement, de nombreux escaliers ont été percés pour livrer le passage aux puits de communications verticaux avec l'étage du quadrilatère.

La solution que nous avons adoptée se révèle complexe. Nous avons choisi de créer différents escaliers jointifs. Ceux qui demeurent, et ceux qui sont supprimés. Nous n'avons pas trouvé un outil natif à Revit permettant de créer des ouvertures dans les escaliers.

Dans l'exemple repris-ci-dessous, nous pouvons voir l'escalier d'accès à la coupole de 75mm du Saillant III. Lors du renforcement, l'escalier d'origine (**FIGURE 47**) fut percé par deux puits. Le premier avait pour but le passage des hommes, le second l'acheminement des munitions. Ces puits percent l'escalier sur la moitié de sa largeur. Nous avons donc modélisé un premier escalier complet (**Figure 47.1**) allant de la galerie au pied de la coupole. A côté de celui-ci, nous avons dessiné un second escalier (**Figure 47.2**) comportant uniquement les éléments destinés à rester en place.

Les marches restantes, détruites lors du percement des puits, sont créés à l'aide d'une famille d'escaliers in situ (**Figure 47.2**). Finalement, on applique aux éléments devant rester en place :

Phase de construction : Phase 1914

Phase de démolition : Aucune

Quant aux marches destinées à disparaître, on leur applique les phases suivantes :

Phase de construction : Phase 1914

Phase de démolition : Phase 1940

Il suffit finalement de changer la phase de la vue pour voir l'escalier percé (**Figure 47.3**).

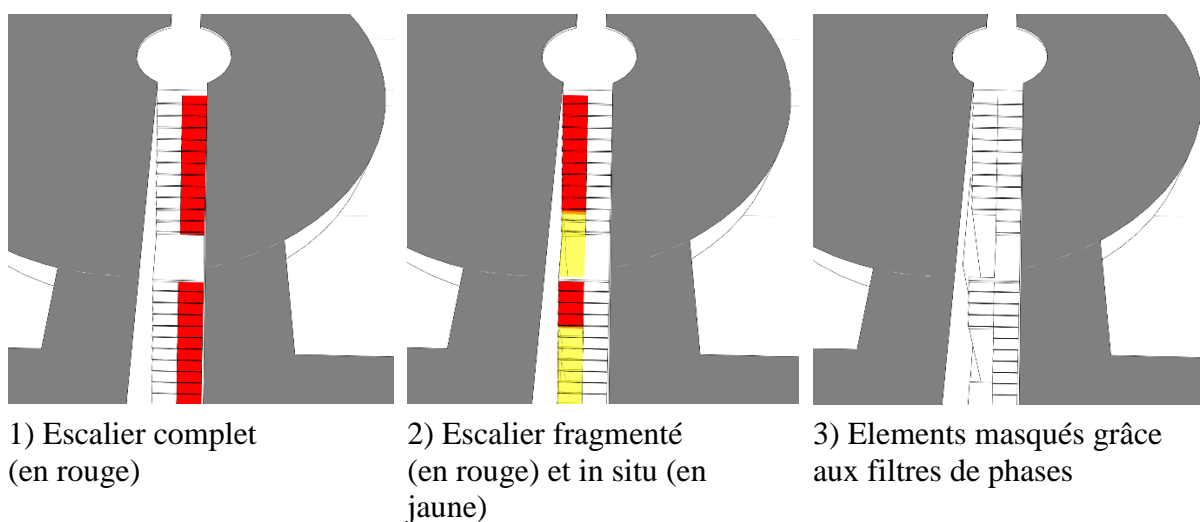


Figure 47 Gestion des phases pour les escaliers. Travail personnel.

f) Les sols :

Les sols sont créés sur base d'une famille système. Nous avons créé différents types en fonction des épaisseurs et des matériaux. Comme pour les escaliers, les sols ont été modifiés par le réarmement du fort. De nombreux caniveaux à câbles ont été créés dans des saignées pratiquées dans les sols d'origine du fort. Pour réaliser ces caniveaux, nous avons scindés les sols en deux catégories. Celles destinées à rester et celles destinés à la démolition. De cette manière, en affichant la vue de phase 1914 (**Figure 48.1**), les sols paraissent d'un seul tenant. Lorsque l'on passe en phase 1940, les éléments de sol ayant pour phase de démolition « 1940 » disparaissent (**Figure 48.2**). De plus, les caniveaux sont créés sur base de la famille in-situ « fondations » et ont pour phase de création la phase 1940 (**Figure 48.3**).

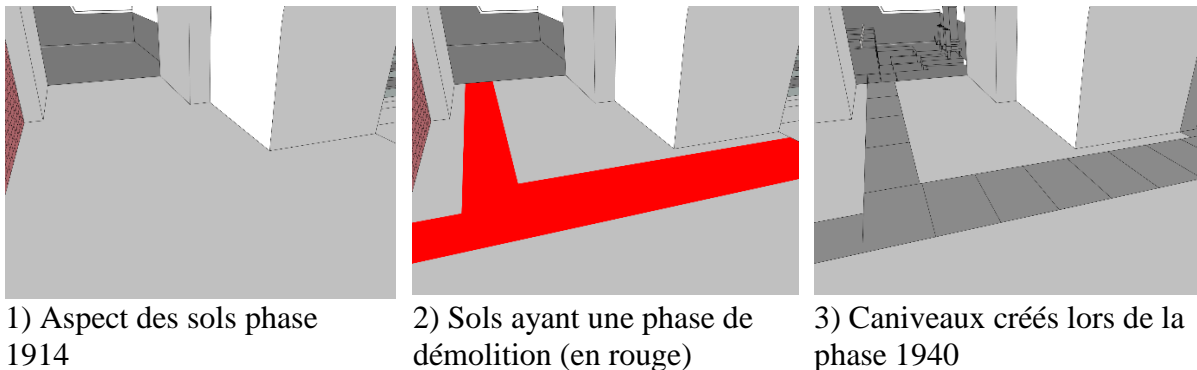
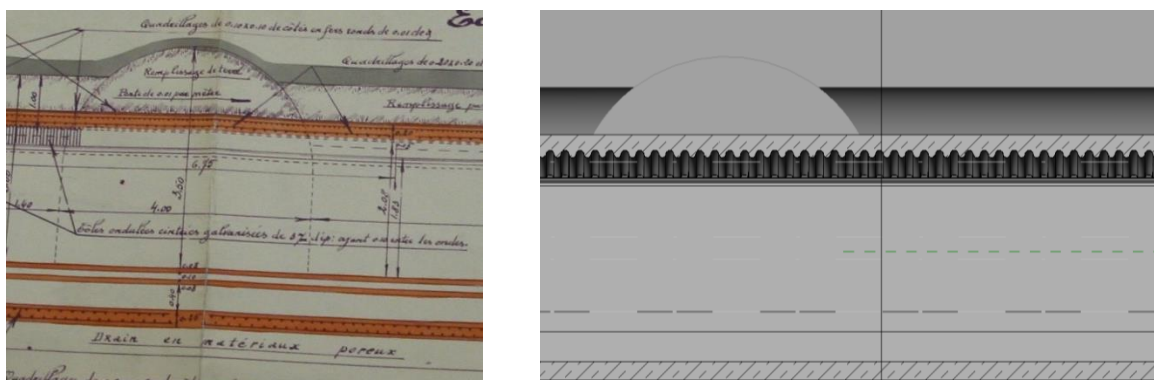


Figure 48 Principe de saignées dans les sols. Travail personnel.

g) Les plafonds :

Dès le départ de ce travail, la question des plafonds réarmés s'est posée. Ces éléments sont en effet assez complexes à modéliser. Une tôle ondulée et cintrée sert de coffrage perdu à une couche de 25 centimètres de béton armé suivant le cintre des tôles (**FIGURE 49**). Nous avons testé plusieurs méthodes avant de nous arrêter sur la méthode qui a fonctionné le mieux. Nous avons créé une famille « Modèle générique » où nous avons tout d'abord modélisé la tôle ondulée cintrée. Nous lui avons donné une longueur d'un mètre (longueur de livraison des éléments à l'époque), et lui avons donné comme matériau « acier galvanisé ». Ensuite, nous avons dessiné la « dalle de ciel » en béton en suivant les ondulations de la tôle. Finalement, nous avons ajouté les deux éléments faisant la jonction avec les piédroits des galeries. Ces éléments ont été dessinés pour accueillir la cornière sur laquelle repose les tôles, laquelle a été également dessinée sur base de l'extrusion d'un profil.



2.3) Modélisation technique (MEP), cas concrets :

Les éléments liés aux réseaux appartiennent à une partie spécifique de Revit, les systèmes (à ne pas confondre avec les familles systèmes).

Ceux-ci comprennent, outre les éléments électriques, les éléments de canalisation, de ventilation, de sécurité incendie,...

Comme nous l'avons dit plus tôt, nous avons choisi de nous intéresser au réseau électrique du fort. Dans un modèle BIM actuel, nous pourrions aller chercher dans des bibliothèques dédiées créées par des grands fournisseurs (Legrand,...) des éléments déjà dessinés et correctement paramétrés.

Une des complexités d'un modèle Heritage BIM est le fait que de telles bibliothèques n'existent bien souvent pas. Il faut donc modéliser ses propres éléments afin de créer une bibliothèque dédiée au modèle étudié. Nous avons choisi de nous baser sur des éléments présents dans les bibliothèques Revit MEP de base et de les adapter à nos besoins spécifiques. Cette modélisation se fait sur base de tous les éléments historiques qui seront mis à notre disposition. Dans le cas d'un fort, beaucoup de câbles électriques étaient visibles et fixés à même les murs, ce qui constitue une source importante d'informations.

Les prises, interrupteurs, boîtes de dérivation, de même que les luminaires ont été modélisés sur base de mesures prises sur des éléments provenant de collections privées.

Les coffrets électriques, quant à eux, ont été modélisés sur base de plans et sont l'exemple le plus parlant dans le cadre de notre modélisation du réseau électrique.

Nous sommes partis d'un coffret standard, dont la modélisation s'apparentait à un simple parallépipède rectangle. A l'aide des différents outils de modélisation que nous avons vu plus haut, nous lui avons donné la forme des coffrets utilisés à l'époque.

La particularité de ces éléments est qu'ils devaient pouvoir exister en différentes dimensions. Nous avons donc contraint celles-ci à l'aide de cotes paramétrables. Nous avons créé 3 paramètres permettant de modifier toutes les dimensions des éléments. Nous avons choisi de rendre ces paramètres « types », afin de pouvoir obtenir facilement une nomenclature des différents types de coffrets. Nous avons défini un paramètre de hauteur, un de largeur et un de profondeur du coffret. La difficulté dans un cas comme celui-ci est d'arriver à contraindre de manière correcte les différents éléments composant le coffret entre eux. Par exemple, le logo de la marque (Société Hazeymer) doit toujours rester au croisement des diagonales de l'objet (**FIGURE 50.1**). Pour cela, il faut créer des plans (**FIGURE 50.2**) et leur donner des cotes d'équivalence (**FIGURE 50.3**), afin qu'ils restent au milieu de l'élément malgré le changement de dimensions de celui-ci.

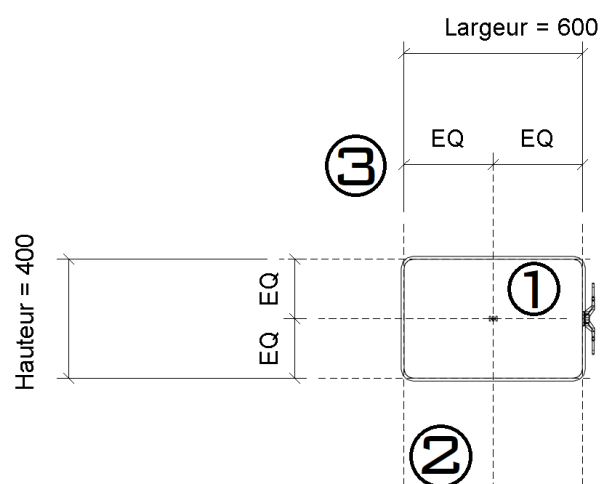


Figure 50 Paramétrage coffret électrique. Travail personnel.

Finalement, nous avons également dessiné la poignée permettant la manœuvre de l'élément. Nous avons ensuite fait en sorte que celle-ci puisse être mobile, avec une position haute (circuit enclenché) et une position basse (circuit déclenché) (FIGURE 51). Cette représentation sera utile lors de tests d'hypothèses, pour savoir quel réseau est alimenté et quel autre ne l'est pas.

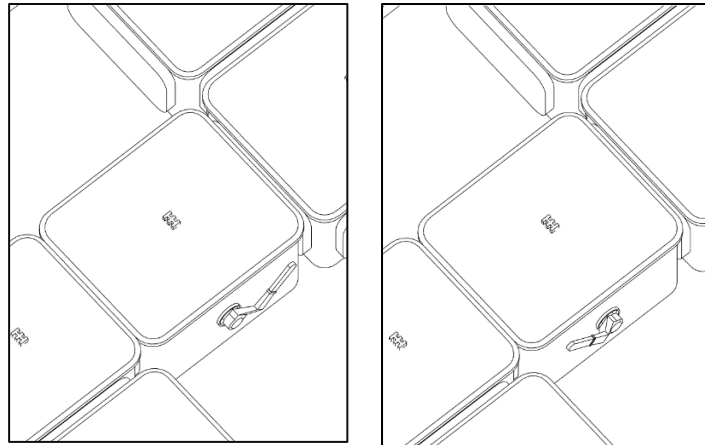


Figure 51 Changement de position de la poignée de manœuvre. Travail personnel.

L'exemple ci-dessus est un exemple d'objet dont le détail s'approche d'un LOD 400. Cependant, le niveau de détails voulu est à définir en amont du travail de modélisation. Il est évident que la simple représentation filaire des réseaux électriques ne nécessite pas un tel niveau de précision et de paramétrisation.

Le placement des éléments du réseau électrique tels que les prises de courant, les interrupteurs et les points d'éclairage s'est fait sur base des résultats du Scan 3D, en compléments des plans d'époque et de photos réalisées sur place.

Les tableaux divisionnaires du fort ont été placés de manière identique (FIGURE 52).

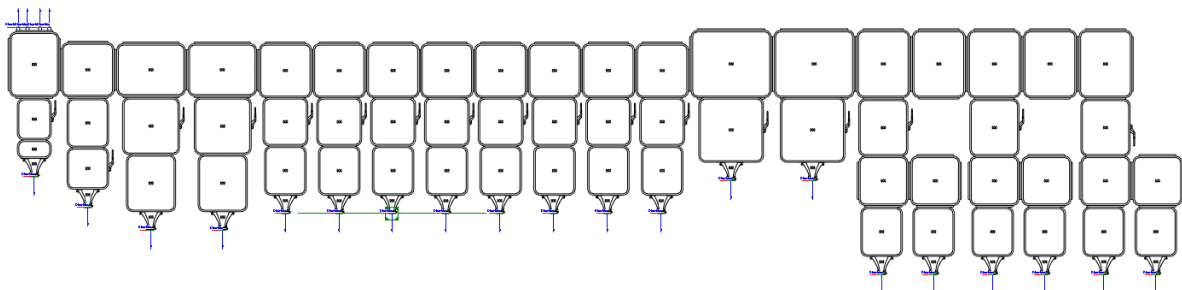
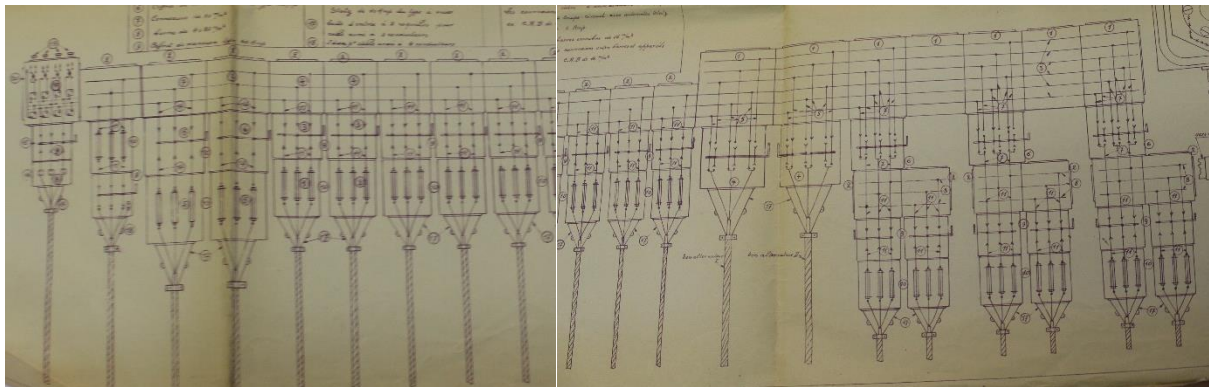


Figure 52 Tableau général. Plans partiels et modélisation Revit. Travail personnel.

Nous avons créé une famille par tableau, portant le nom du tableau (renseigné sur les plans d'époque). Cette famille est un exemple de famille imbriquée, et comporte les familles des différents types de coffrets (boîtes à barres omnibus, coffrets coupe-circuits, coffrets de manœuvre, ...) dont nous avons décrit la création ci-dessous. Ceux-ci ont été simplement assemblés au sein de la famille principale.

Tous les éléments doivent également être pourvus de connecteurs. Ces éléments, propres à la partie MEP, permettent de relier ceux-ci entre eux. Ils doivent être correctement paramétrés afin de pouvoir être reliés.

Une fois que la maquette virtuelle est terminée, on peut commencer à s'intéresser à la constitution des réseaux. Dans le cadre de ce travail d'études et de sa question de recherche, nous voulions trouver une méthode de modélisation du réseau électrique. Après avoir suivi des formations sous formes de tutoriels en ligne sur la partie MEP de Revit, nous avons développé une méthodologie qui nous est propre. Celle-ci est basée sur une représentation faisant la distinction entre deux éléments, les « conduits » et les éléments de « circuit ». Les premiers seront utilisés pour tout ce qui concerne la représentation en 3D des éléments, tandis que les seconds nous serviront pour la constitution des vues en plan. Cette démarche de travail a ensuite été soumise à des ingénieurs en techniques spéciales du Bureau Greisch, qui ont aidé à la peaufiner mais également à la valider.

Méthodologie adoptée :

a) Les circuits (représentation planaire) :

Nous avons choisi de créer nos circuits dans les vues en plan en utilisant l'outil « Circuits » de Revit. Celui-ci permet de relier différents éléments électriques ayant les mêmes propriétés (tension de service, charge apparente,...) par des câbles dont les propriétés doivent également correspondre. Elles sont toutes définies via des menus de paramètres électriques. Pour la première partie de ce travail, il nous faut donc munir les différents tableaux et appareils électriques d'un connecteur « de circuit », qui doit être correctement paramétré (en termes de tension, d'ampérage,...) pour fonctionner correctement, comme nous l'avons dit plus haut.

Par exemple, un connecteur renseigné comme pouvant supporter 230 Volts maximum ne pourra pas être mis en circuit avec un élément débitant en 400 Volts par exemple. Revit nous propose par défaut un certain nombre de tensions en usage à l'heure actuelle. Dans le cadre d'un modèle Heritage BIM, nous avons adapté ces tensions aux documents d'époque.

En se référant à ceux-ci, nous avons gardé les tensions suivantes :

- 230 V triphasé : tension de service dans le fort
- 24 V continu : tension utilisée par le groupe de chargement des batteries de téléphone

La procédure de création des circuits est systématique. Il faut tout d'abord placer tous les éléments que nous voulons relier. Une fois cette étape faite, il faut sélectionner les appareils que nous voulons relier au sein d'un même circuit. Par exemple, des luminaires.

Une fois ces luminaires sélectionnés, une option nommée « puissance » dans la barre d'outils, section/ créer des systèmes, nous permet de relier ces luminaires au sein d'un même circuit. Automatiquement, une série de courbes, symbolisant les fils électriques, apparaissent. Celles-ci relient les différentes sources lumineuses entre elles. Lorsque l'on crée un circuit électrique pour la première fois, une option de la barre « outil du système » nous permet de définir à

quel tableau nous voulons relier le circuit nouvellement créé. Une fois le circuit relié à un tableau, on peut encore ajouter les interrupteurs qui le commandent. Pour cela, il faut sélectionner les luminaires composant le circuit, soit directement dans la maquette numérique soit via le navigateur du système. Une fois ceux-ci sélectionnés, une autre option de la barre d'outils nous permet, comme son nom l'indique, de créer des interrupteurs. Cliquer sur ce bouton nous ouvre un nouveau menu au sein de la barre d'outils où l'on peut sélectionner un interrupteur. En cliquant sur l'interrupteur que l'on veut connecter, des lignes reliant tous les luminaires indiquent qu'il fait le lien avec les différentes installations (**FIGURE 53**). Il faut ensuite cliquer en dehors d'un des éléments sélectionnés, afin de supprimer la sélection en cours, puis venir faire un clic droit sur l'interrupteur et sélectionner l'option « ajouter au circuit ».

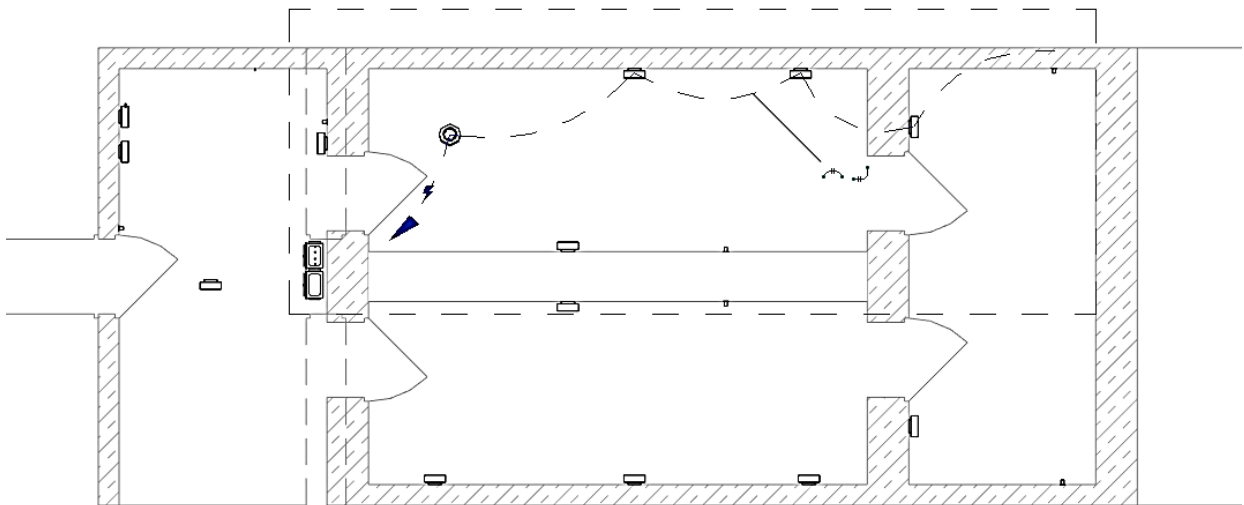


Figure 53 Représentation filaire d'un circuit électrique dans le bureau de tir. Travail personnel.

La dernière étape consiste à revenir sélectionner l'un des éléments du circuit afin de connecter le tout ensemble.

Afin de garder une nomenclature claire, il est intéressant de donner un nom différent pour chaque tableau. Ce nom peut être ajouté dans la palette de propriétés. Une fois les changements appliqués, on peut voir dans le navigateur du système que le tableau sélectionné alimente les différents circuits. De même que pour les tableaux, il est possible de donner un préfixe aux différents circuits.

Cette méthode permet donc de relier les éléments du système électrique, mais ces liaisons ne sont visibles qu'en plan. Cependant, les éléments resteront reliés quelque soient les vues choisies, seules les liaisons n'apparaîtront pas.

b) Les conduits (représentation tridimensionnelle) :

L'outil « Conduits » permet de représenter en 3 dimensions les câbles électriques. Il faut commencer par définir les sections ainsi que les raccords par défaut (coudes, tés, boîtes de dérivation,...) Nous avons créé des éléments de coude afin de pouvoir faire varier le rayon de courbure. Les boîtes de dérivation ont été récupérées de notre bibliothèque MEP précédemment créée. Tous ces éléments sont munis de connecteurs « de conduits », à ne pas confondre avec les connecteurs de circuits dont nous avons parlé plus haut.

Comme dans le cas des circuits, nous avons développé une méthode qui est propre à ce travail. Celle-ci a été mise en place sur base des documents qui étaient à notre disposition et reflète donc une étude de cas particulière, qui devra être adaptée en fonction des projets.

- Repérage des tracés :

Sur base de coupes dans le modèle, nous cherchons à obtenir une projection orthographique de notre mur avec le nuage de points pour fond de plan. Les tracés supposés se remarquent grâce aux colliers de fixations, souvent encore en place au fort. Nous avons pris l'habitude de positionner un premier collier sur le mur (**FIGURE 54**), peu importe son emplacement le long du câble. Ce premier collier va servir de repère pour le placement du câble. Lors de notre modélisation préalable du collier, nous avons placé à chacune de ses extrémités un connecteur. Ce connecteur va jouer le rôle « d'attache » pour le câble électrique. Cela signifie qu'une fois le collier correctement positionné au mur, peu importe la vue que nous choissions pour placer le câble ensuite, celui-ci se reliera directement au connecteur. Le repérage des tracés peut être considéré, dans le placement réel d'une installation électrique, comme un trait de cordon sur le mur.

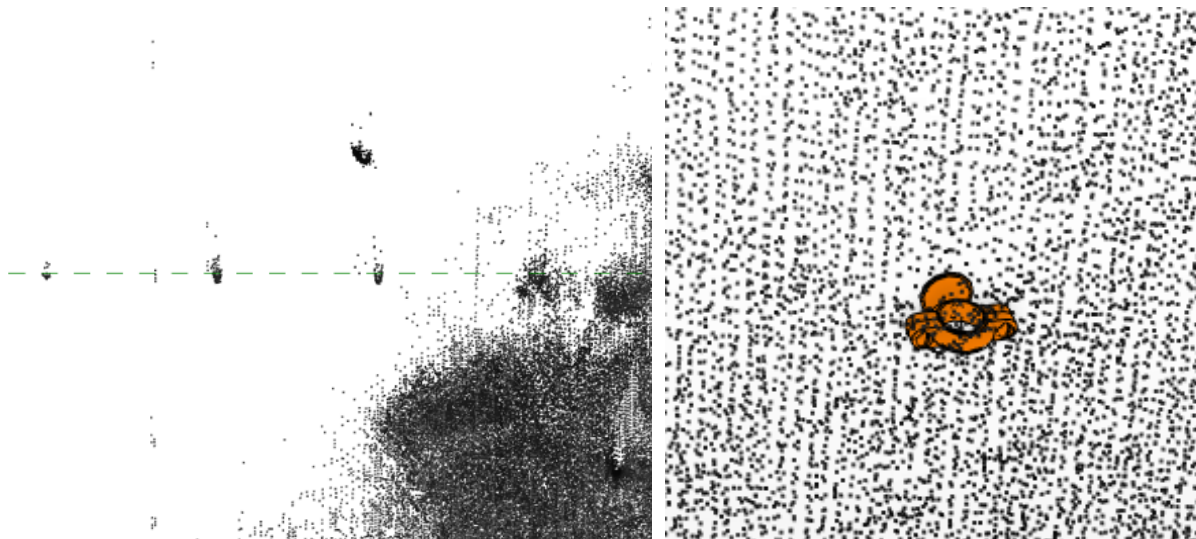


Figure 54 Repérage des tracés et placement du premier collier. Travail personnel.

- Placement des autres colliers :

Une fois le câble positionné, il ne reste plus qu'à positionner les autres colliers le long de celui-ci. Les colliers se positionneront automatiquement de manière correcte par rapport à l'élément guide, grâce à la propriété des connecteurs dont nous avons parlé ci-dessus. Leur placement peut cependant se révéler complexe. En effet, la densité du nuage de points est parfois trop faible pour pouvoir discerner clairement les vestiges encore en place⁹³. Dans ce cas, il faut alors recourir à des photographies pour pallier à ce problème. L'exemple ci-contre montre la difficulté de se baser sur notre relevé laser seul (**FIGURE 55**).

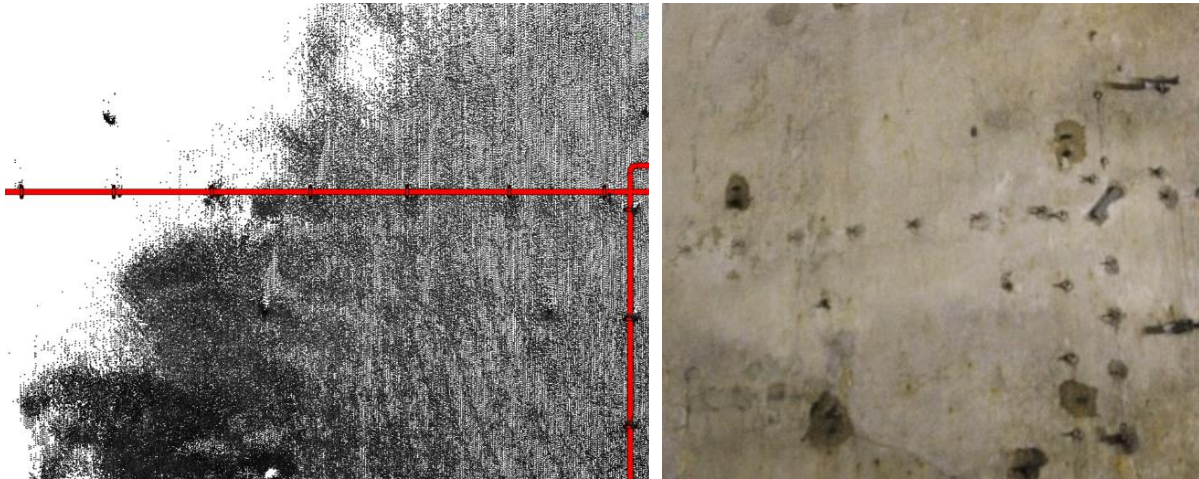


Figure 55 Placement des colliers sur base du relevé laser et de photographies. Travail personnel.

- Placement des éléments de la bibliothèque :

Comme pour les colliers, le placement des éléments électriques (prises, interrupteurs,...) se fait sur base du nuage de points et de photographies. Dans l'exemple ci-contre, nous pouvons voir l'ajout d'une lampe de forteresse ainsi que d'une boîte de dérivation (**FIGURE 56**).

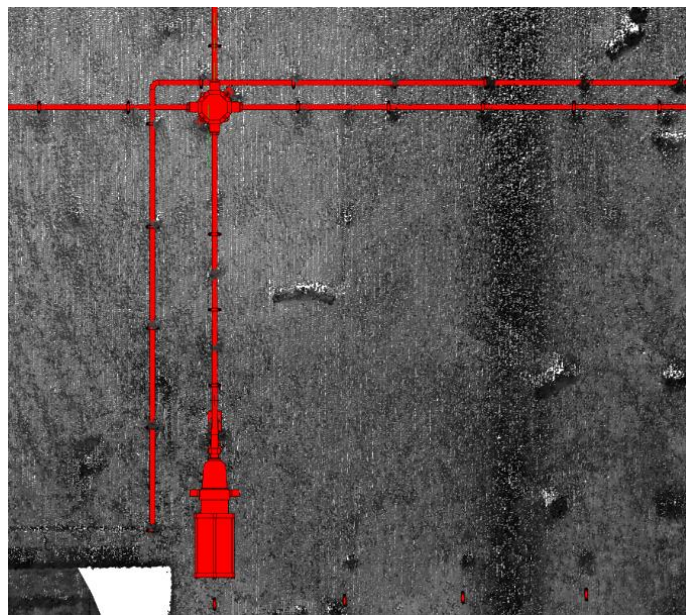


Figure 56 Ajout des éléments de notre bibliothèque. Travail personnel.

⁹³ L'annexe V, reprenant des exemples de vestiges caractéristiques, se situe en fin du présent travail.

2.3) Analyse critique sur la méthode utilisée :

Cette méthode, basée sur une double modélisation (circuits et conduits), se révèle complexe et surtout extrêmement chronophage. De même, les tableaux électriques doivent être correctement connectés. Ils doivent être munis d'un seul connecteur de type circuit, mais d'autant de connecteurs de types conduits qu'il y a de départs de câbles. Dans le temps qui nous était imparti pour réaliser le présent travail, nous n'avons réalisé que quelques parties du fort en ce qui concerne les circuits. Pour ce qui est des conduits, seuls les câbles de la salle des machines ont été dessinés. Il nous semble donc que vouloir arriver à un tel niveau de détails doit être un des critères important à débattre lors de la mise en place du cahier des charges de la maquette numérique. Ce choix doit prendre en compte le temps pris pour la modélisation mais aussi le niveau d'acquisition de données que cela nécessite. Comme nous le verrons en fin de ce travail, d'autres logiciels seront plus à même d'obtenir un tel résultat.

La modélisation des éléments qui ont servi à créer notre bibliothèque s'est basée sur des méthodes de mesures manuelles et classiques. Celles-ci se sont révélées totalement adaptées.

Il n'est donc pas nécessaire, dans ce genre de travail, d'avoir systématiquement recours aux services d'un scanner laser, surtout pour les petits éléments.

Partie V: Utilisation d'un « Heritage BIM » au fort de Flémalle

1) Ajout des sources historiques :

1.1) Fonctionnement du réseau électrique :

Une partie de ce travail est basée sur l'étude du réseau électrique d'un fort réarmé. Afin de représenter par la suite de manière correcte ce réseau, il est important de le comprendre. Nous avons donc cherché dans les archives du War Heritage Institute tous les documents qui nous permettraient de comprendre le fonctionnement de ces systèmes électriques. Ces informations ont été recoupées avec les vestiges présents sur place, ainsi qu'avec les exemples d'installations des forts de Tancremont et d'Eben-Emael.

Pour finir, un document a retenu toute notre attention dans le cadre de cette étude. Il s'agit du « Manuel d'instructions générales concernant les installations électriques des forts de Liège. ». Ce document a été écrit à destination des commandants de fort ainsi que de leur personnel spécialisé. Il comporte un descriptif très intéressant et très complet des moteurs, de leur équipement, des installations liées à la charge des batteries de téléphones, à la ventilation, à l'éclairage, etc... mais également des informations intéressantes sur les documents mis à disposition du personnel électricien, des pièces de rechange stockées dans le fort,... L'inconvénient de cette source est qu'elle a été produite avant le changement de moteurs, rendant obsolète la partie qui leur est consacrée.

Il en va de même pour les plans des installations électriques, la partie relative à la salle des machines est inutilisable pour une modélisation du fort dans son état définitif. Nous verrons dans la partie V « Analyse réflexive », Comment la maquette virtuelle que nous proposons de réaliser permettra de produire différentes hypothèses quant à l'aménagement définitif de cette salle. La description ci-dessous est fort technique, mais elle permettra plus tard de justifier nos choix lors de la formulation d'hypothèses, ainsi que d'identifier l'emplacement d'un équipement particulier sur base d'une simple trace.

Initialement, les forts réarmés de la PFL (Position Fortifiée de Liège) étaient dotés de deux moteurs Walschaerts⁹⁴ couplés à un alternateur CEB-ACEC de 65 k.V.A. Ceux-ci permettaient de produire l'électricité nécessaire au bon fonctionnement de l'ouvrage en temps de guerre⁹⁵. L'installation de deux groupes électrogènes permettait d'utiliser un groupe et de disposer d'un deuxième de réserve.

Comme évoqué précédemment, ces moteurs se révélèrent très vite insuffisants au bon fonctionnement du fort.

La commission d'étude pour la meilleure utilisation des forts demanda alors qu'on lui transmette la puissance nécessaire, en chevaux, pour chaque ouvrage. Pour le fort de Flémalle,

⁹⁴ Moteurs Walschaert verticaux, type MDV 4 à trois cylindres. Ils développaient une puissance de 75 Cv. à 500 tours par minute. Ils furent livrés par les ateliers Walschaert de Bruxelles entre le premier août et le 31 décembre 1932.

⁹⁵ En temps de paix, le courant électrique est fourni par le réseau civil par l'intermédiaire d'une ligne aérienne arrivant à la poterne du fort.

117,5 Cv étaient nécessaires. Or, le moteur en place n'en développait que 75. Le constat fut le même pour les autres forts de la P.F.L.

Pour remplacer les moteurs en place, la Commission opta pour des moteurs Carels de 130 Cv⁹⁶. De cette manière, un seul moteur suffisait à fournir l'énergie nécessaire au bon fonctionnement du fort. Une première commande de 8 moteurs Carels fut passée à une date qui nous est encore inconnue. Un plan de modification du bâti d'un moteur Walschaert pour accueillir un moteur Carels, trouvé dans les archives du War Heritage Institute, nous renseigne cependant la date du 21 décembre 1937⁹⁷ sans plus de précision quant à la date d'installation du moteur.

La seconde fut vraisemblablement passée en février 1939⁹⁸.

D'après les vestiges visibles au fort de Flémalle, nous pouvons affirmer que les deux moteurs Carels étaient en place en mai 40.

Le réseau électrique du fort de Flémalle est constitué des éléments principaux suivants :

1) Une source de courant :

En temps de paix, l'alimentation électrique du fort est assurée par le réseau civil. Celui-ci arrive, par voie aérienne, jusqu'au corps de garde de temps de paix où se situe le compteur électrique du fort.

En temps de guerre, deux groupes électrogènes installés dans la salle des machines prennent le relais, afin de garantir la fourniture d'électricité. Un système automatique par électro-aimant interdit l'alimentation du réseau par deux sources de courant différentes. Cela signifie que l'alimentation extérieure est coupée dès que l'un des moteurs est mis en connexion avec le réseau.

2) Des tableaux électriques :

Au nombre de 16 à Flémalle, ils sont répartis aux quatre coins du fort. Un tableau est composé de coffrets hermétiques en fonte munis de porte de visite.

Ces coffrets sont de 4 types :

- **Les coffrets coupe-circuit (Figure 57.1)** : ils jouent le rôle de boîtes à fusibles. Ils se différencient visuellement des coffrets de manœuvre par l'absence de poignée mais disposent eux aussi d'un capot à charnière.

- **Les boîtes à barres omnibus (Figure 57.2)** : elles protègent des barres de cuivre qui permettent de relier les différents coffrets entre eux. Leur capot n'est pas prévu pour une ouverture facile. Il faut se munir d'un tournevis spécifique pour les ouvrir.

⁹⁶ Moteurs Carels verticaux, type 3A35 à trois cylindres. Ils développaient une puissance de 130 Cv. à 500 tours par minute.

⁹⁷ Anciens forts de Liège. Remplacement des moteurs Walschaert par des moteurs Carels type 3A35. Modification de la fondation.

⁹⁸ Note pour la D.S.G.F. ayant pour objet : Artillerie de forteresse. Augmentation de la puissance des centrales électriques dans les forts, 6 février 1939, Archives du War Heritage Institute, fond QGT, boîte 74.

- **Les coffrets de manœuvre (Figure 57.3)** : ils sont dotés d'une poignée de manœuvre permettant d'ouvrir ou de fermer le circuit. Ils jouent le rôle d'interrupteurs généraux. Leur capot est sur charnière pour pouvoir y accéder facilement.

- **Les coffrets tableautins hermétiques (Figure 57.4)** : ils jouent en même temps le rôle d'interrupteurs et de boîtes à fusibles. Ce sont les seuls coffrets d'où partent des câbles « CHB » (Câbles orange).



Figure 57 Tableau divisionnaire du fort de Tancrémont. Photo personnelle.

Ils sont alimentés par le biais de câbles armés. De ces tableaux peuvent partir soit :

- D'autres câbles armés, à destination d'autres tableaux
- Des câbles « CHB » pour Câbles Hermétiques Blindés, pour alimenter les appareils d'éclairage ou les autres appareils électriques ne nécessitant pas une grosse section.

Les raccords câbles-tableaux sont réalisés de manière étanche et différente selon le type de câbles :

- En cas de câbles armés, le raccord étanche est assuré par des « boîtes d'entrée à deux coquilles », coulées à la paraffine portée à une température proche de l'ébullition⁹⁹.
- En cas de câbles hermétiques blindés, ce raccord est réalisé quant à lui par des presse-étoupes en cuivre dont l'étanchéité est réalisée par des bagues en caoutchouc dont le diamètre est judicieusement adapté à celui du câble¹⁰⁰.

Les câbles armés sont le plus souvent placés en caniveaux sous les galeries de circulation. Néanmoins, ils peuvent également être fixés au mur ou au plafond à l'aide de colliers distants

⁹⁹ Cahier Spécial des charges relatif aux travaux et fournitures à faire pour l'installation de l'éclairage électrique dans les forts de Liège, 1931, Archives du War Heritage Institute, Bruxelles, fond QGT, boîte 73.

¹⁰⁰ Ibid.

de 50 centimètres maximum. Ces câbles disposent en outre de bracelets d'identification fixés tous les deux mètres.

Les câbles type « CHB » peuvent être en caniveaux, fixés au mur à l'aide de colliers, au plafond de la même manière et également intégrés dans les murs. Dans ce cas, le cahier spécial¹⁰¹ des charges précise que « l'axe longitudinal du câble ainsi dissimulé sera repéré sur l'enduit par un trait de 10 (dix) millimètres de largeur et 3 (trois) millimètres de profondeur »¹⁰².

La mise à la terre du réseau de câbles se fait au tableau général par raccordement à la distribution d'eau, au moyen d'un conducteur en cuivre plat de 25mm².

3) Des appareils d'éclairage :

Les appareils d'éclairage peuvent se diviser en 3 sous catégories :

- Les lampes « à armatures hermétiques à canon, type 6 ou 8 barreaux¹⁰³, produites par les établissement Joseph Wauters de Bruxelles. Elles ont une puissance de 40 ou 60 Watts suivant le type. Elles peuvent être fixées au plafond, au mur ou sur linteau et servent à l'éclairage des locaux.
- Les lampes à hublots types H.M. ou H.O., selon la forme de l'applique. Elles sont destinées quant à elles à l'éclairage des coupes et sont fixées sur la face interne de la calotte.



- Les lampes baladeuses, sont de types grillagées de 24 volts et sont utiles au service des pièces.

4) Des éléments particuliers¹⁰⁴ :

Nous dénommons « éléments particuliers », les boîtes de dérivation, les prises de courant et les interrupteurs. Tous ces éléments sont rigoureusement étanches, et scellés à la paraffine une fois placés. Ils sont tous fixés sur des fixations « standards » en acier galvanisé. Les boîtes de

¹⁰¹ Ibid.

¹⁰² Cahier Spécial des charges relatif aux travaux et fournitures à faire pour l'installation de l'éclairage électrique dans les forts de Liège, Op. Cit.

¹⁰³ Lettre de soumission des établissements Wouters à la D.T.F. (Direction des Travaux fortificatifs), Bruxelles, 6 février 1934, Archives du War Heritage Institute, fond QGT, boîte 74.

¹⁰⁴ Ces éléments sont illustrés dans l'annexe VI, à la fin du présent travail.

dérivation sont généralement placées sur des fixations positionnées à 45°, tandis que les interrupteurs et les prises sont fixés sur des supports horizontaux.

5) Des installations électromotrices et électriques diverses :

Celles-ci sont multiples et ne seront pas développées dans le cadre de ce travail. A titre d'exemples, on peut néanmoins citer les installations nécessaires au fonctionnement de la coupole de 150 mm, les installations du ventilateur principal et des ventilateurs secondaires, celles nécessaires au bon fonctionnement de l'atelier de réparation mécanique, du bloc opératoire, ...

1.2) Familles et informations historiques :

L'une des applications concrètes des procédés BIM au sein de la maquette numérique est la possibilité d'intégrer des informations dans la famille Revit. Celles-ci sont regroupées dans les propriétés de type, sous l'onglet « données d'identifications ». Un certain nombre d'informations est contenu dans ces données, qui sont à compléter par l'utilisateur. Libre à celui-ci d'en rajouter autant qu'il le souhaite, pour aller au degré de sémantisation désiré. Ces données seront assignées au modèle et feront partie d'un export au format IFC. Elles peuvent également être la source de calculs, notamment grâce aux informations liées au coût, etc...

Il nous serait tout à fait possible de vérifier le métré établi par l'entrepreneur sur base de la maquette virtuelle, et ce de manière très simple. Dans l'exemple ci-dessous, nous avons pris le cas d'une boîte de dérivation, que nous avons personnellement modélisée (**FIGURE 58**). Dans le tableau de droite, on peut voir que nous avons complété les informations relatives au modèle, au fabricant, et au coût. Ces informations proviennent d'une brochure publicitaire découverte dans les archives du W.H.I (**FIGURE 59**). Les prix renseignés dans celle-ci sont en Reichsmark. Pour cette catégorie dans Revit, nous avons appliqué un facteur de calcul nous donnant les prix en francs belges de l'époque.

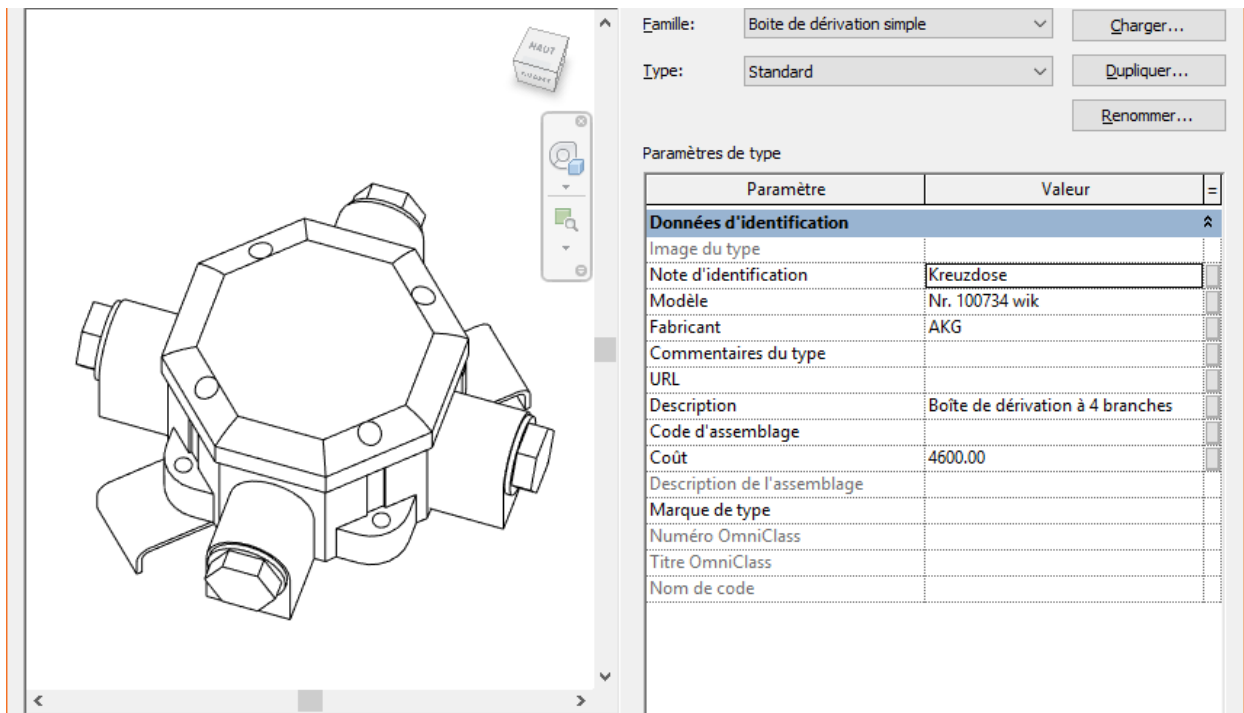


Figure 58 Propriétés du type d'une boîte de dérivation. Travail personnel.

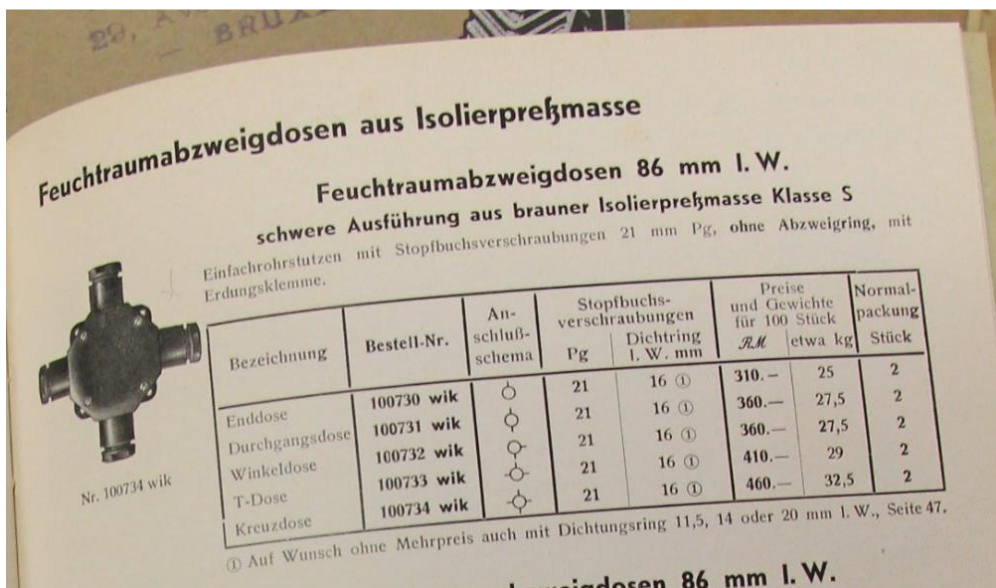


Figure 59 Informations techniques renseignées. Archives W.H.I., fond QGT, boîte 73.

1.3) Les phases :

Dans le cas précis du fort de Flémalle, nous avons ajouté 4 phases supplémentaires aux phases existantes :

- **Une phase 1914** : cette phase a pour but de représenter le fort avant les combats d'août 1914. Il contient donc tous les murs, toits, plafonds, etc..., construits entre 1888 et 1914.
- **Une phase 1916** : celle-ci contient les éléments ajoutés par les allemands durant l'occupation du fort. Pour plus de commodité et face à l'absence de documentation à ce sujet, nous avons choisi de la nommer « 1916 », pour spécifier que ces modifications apparaissent entre 1914 et 1918.
- **Une phase 1932** : créée pour représenter la salle des machines dans sa première version, avec les moteurs diesels originaux.
- **Une phase 1940** : cette dernière phase se veut le reflet de la situation du fort avant les combats de mai 1940.

La phase par défaut « Nouvelle construction » n'a pas été utilisée dans le cadre de ce travail, étant donné notre intérêt pour le passé du lieu. Il faut cependant noter que les phases peuvent porter aussi bien sur des éléments passés que sur des éléments présents ou futurs de la vie d'un bâtiment.

L'interface se présente d'ailleurs comme une ligne du temps, avec le passé au-dessus et le futur en-dessous (**FIGURE 60**).

PASSE		
	Nom	Description
1	Phase 1914	Etat du fort en 1914
2	Phase 1916	Modifications allemandes
3	Phase 1932	Etat SM 1932
4	Phase 1940	Etat du fort en 1940
5	Existante	
6	Nouvelle construction	

FUTUR

Figure 60 Gestionnaire de phase du projet. Travail personnel.

Lorsque l'on crée un élément dans Revit, deux cases de la palette de propriétés doivent retenir notre attention. Regroupées sous le titre « Phase de construction », elles permettent d'affecter à chaque élément créé une phase de construction et une phase de démolition.

Dans le cas du fort de Flémalle, il a été décidé de s'astreindre aux phases principales de la vie du fort, telles qu'elles ont été décrites plus tôt. Ce phasage restreint nous a semblé suffisant dans le cas présent.

Il aurait bien entendu été possible de développer bien plus cette chronologie, à l'aide des correspondances de chantier, des plans datés, des rapports du génie lors de ses visites sur place, ...

1.4) Les filtres de phases :

La création des phases est, nous l'avons vu ci-dessus, une opération assez facile.

Cependant, à ce stade, les phases ne sont pas encore communicables graphiquement. Pour cela, il faut se servir des filtres de phases. Lorsque l'on ouvre le gestionnaire de phases, plusieurs onglets nous sont proposés. Le premier, « Phases du projet » a été décrit ci-dessus.

C'est maintenant au second que nous allons nous intéresser à savoir l'onglet « Filtres de phases ». Autodesk décrit les filtres de phases comme « ...une règle applicable à une vue pour contrôler l'affichage des éléments en fonction de l'état de leur phase : Nouveau, Existant, Démoli ou Temporaire. ». ¹⁰⁵

L'interface se présente sous la forme d'un tableau (FIGURE 61). Tout d'abord, on nous demande un nom de filtre. Pour faire simple, nous avons choisi de reprendre pour les filtres créés le nom des phases auxquelles ils se rapportent. Nous avons donc créé un filtre de phase 1914, un autre 1916, un troisième 1932 et un dernier 1940. Les colonnes suivantes sont dédiées, comme dit plus haut, à l'état de la phase : nouveau, existant, démoli ou temporaire.



	Nom du filtre	Nouveau	Existant	Démoli	Temporaire
1	Afficher tout	Par catégorie	Remplacé	Remplacé	Remplacé
2	Composants démolis +	Par catégorie	Non affiché	Remplacé	Remplacé
3	Composants existants	Non affiché	Remplacé	Remplacé	Non affiché
4	Composants existants	Par catégorie	Remplacé	Non affiché	Non affiché
5	Composants terminés	Par catégorie	Par catégorie	Non affiché	Non affiché
6	Nouveaux composants	Par catégorie	Non affiché	Non affiché	Non affiché
7	Phase 1914	Par catégorie	Par catégorie	Remplacé	Remplacé
8	Phase 1932	Par catégorie	Par catégorie	Non affiché	Remplacé
9	Phase 1940	Par catégorie	Par catégorie	Non affiché	Remplacé
10	Phase précédente	Non affiché	Remplacé	Non affiché	Non affiché
11	Plans DTF	Remplacé	Remplacé	Remplacé	Remplacé

Figure 61 Tableau des filtres de phases. Travail personnel.

Pour chaque état, on a le choix entre plusieurs options :

- **Par catégorie** : cette option d'affichage nous donne l'apparence de l'élément telle qu'elle est définie dans le type de cet élément.
- **Non affiché** : cette option rend invisibles tous les éléments d'un état de phase.
- **Remplacé** : cette option permet de choisir le mode d'affichage que l'on veut pour les différents états de phase. Si cette option est choisie, il faut alors se rendre dans le dernier onglet de la fenêtre « Remplacements du graphisme ». Cette dernière fenêtre nous permet de définir toutes les propriétés graphiques des états de phase. Cette fenêtre gère en même temps les éléments projetés et les éléments coupés. On peut

¹⁰⁵<https://knowledge.autodesk.com/fr/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/FRA/Revit-DocumentPresent/files/GUID-DB104358-4D5A-494E-ACAE-BB8B4E72E572-htm.html>, consulté le 12/11/18 [en ligne].

définir l'épaisseur des traits, le type de ligne (pointillée,...), le motif de coupe, etc...
La dernière colonne nous permet de définir, par état de phase, un matériau par défaut.

Encore une fois, un certain nombre de filtres sont présents par défauts.

2) Ajouts externes :

Une autre partie importante de ce travail correspond la récupération d'éléments externes de manière virtuelle dans le but de réinjecter ces éléments dans la maquette virtuelle. Cette démarche est intéressante de plusieurs points de vue, et offre aux propriétaires de l'objet comme à ceux qui le « copient » une plus-value intéressante.

2.1) Etude d'une problématique :

Récemment, dans le cadre d'un workshop sur les vestiges de la façade de l'hôtel Aubecq, nous avons eu l'occasion de découvrir plusieurs cas d'anastylose de façades de différentes époques à un autre endroit que celui d'origine. Dans le cas du Pergamon Museum, des façades entières d'éléments antiques ont été reconstituées sur base de leurs fragments dans des salles du musée. Cela pose bien entendu une question d'authenticité, mais également la place des vestiges. Sont-ils plus à leur place dans la salle d'un musée berlinois plutôt que dans leur site séculaire d'origine ? Cette problématique semble souvent se poser dans le cas des vestiges archéologiques. Doit-on les préserver in-situ, au risque d'une accessibilité difficile ou de problèmes liés à leur préservation de manière sécurisée, ou bien les déplacer dans un musée où leur sécurité sera assurée mais où ils perdront le lien avec l'environnement pour lequel ils ont été bâtis ou travaillés ? Dans le premier cas, nombre de tombeaux égyptiens pillés montrent qu'une sécurisation de ces vestiges in-situ est déjà compliquée, mais que leur accès au grand public l'est encore plus. Tous ces problèmes rejoignent ce dont nous avons déjà parlé plus tôt, à savoir la sauvegarde numérique d'éléments du patrimoine. Dans le second cas, comme nous l'avons précédemment expliqué, le déplacement dans des musées n'est pas toujours gage de sécurité garantie (Musée de Mossoul, destruction d'artefacts par l'état islamique, 2014¹⁰⁶).

La méthode développée ci-dessous nous semble être une possibilité de réponse à ces questions d'éthique liées au déplacement d'éléments historiques dans le cadre de leur mise en valeur. Elle ne se borne pas seulement à une sauvegarde numérique dans un but d'archivage. Dans le cas qui nous intéresse, un objet produit en série à une certaine époque, mais dont seuls deux vestiges subsistent à l'heure actuelle, a été numérisé, afin de servir de base pour une représentation virtuelle. Celle-ci représente un autre endroit, où le même objet se situait à l'époque. De plus, cette « récupération virtuelle » sert de base aux tests d'hypothèses sur des cas concrets de résolution de problèmes à une époque donnée.

¹⁰⁶ <http://www.lefigaro.fr/international/2017/03/13/01003-20170313ARTFIG00248--mossoul-un-musee-d-ombres-et-de-cendres.php>, consulté le 10/04/19 [en ligne].

2.2) Mise en situation :

Dans le cadre du présent travail de fin d'études, nous avons appliqué cette méthode au cas d'un moteur Carels, situé au fort de Tancremont. Celui-ci a survécu aux pillages qu'ont subis les forts et est encore visible à l'heure actuelle au sein de l'ouvrage.

Ces moteurs ont été produits par la firme Carels de Gand. Celle-ci a été fondée aux alentours de 1835 et était spécialisée dans la production de moteurs diesel pour bateaux¹⁰⁷. Comme nous l'avons vu plus tôt, Carels a remporté le marché pour la production des moteurs diesels à installer dans les forts liégeois. Ceux-ci ont été de deux types : un moteur 3 cylindres et un moteur 4 cylindres.

A l'heure actuelle, Seuls 4 moteurs subsistent (**FIGURE 62**) :

1) Fort d'aubin Neufchâteau :

Type :

3 cylindres, 130 Cv.

Etat actuel :

seules les plus grosses pièces subsistent, le moteur est totalement rouillé et dans un état de délabrement avancé.

(Photo Jean-Paul Delacruz)



2) Fort de Tancremont :

Type :

3 cylindres, 130 Cv.

Etat actuel :

En relativement bon état, des pièces secondaires manquent (système de graissage, manomètres, thermomètres,...)

(Photo personnelle)



¹⁰⁷ Interview de Jean Westerlinck, travaillant chez Anglo Belgian Corporation, et spécialiste de l'histoire de la famille Carels.

3) Fort de Battice :

Type :

4 cylindres, 175 Cv.

Etat actuel :

C'est le moteur le mieux conservé. Il tourne toujours tous les mois (à l'air comprimé) et est complet.

(Photo personnelle)



4) Fort d'Eben-Emael :

Type :

4 cylindres, 175 Cv.

Etat actuel :

Semble être en bon état, mais impossible de réaliser un examen détaillé (situé derrière une grille).

(Photo DarkPlaces.org)



Figure 62 Relevé des différents moteurs de la PFL.

Pour rappel, le fort de Flémalle était équipé d'un moteur 3 cylindres. Le choix s'est donc porté sur le moteur de Tancremont ou sur celui d'Aubin-Neufchâteau. C'est le premier qui fut choisi, pour une raison évidente de meilleure conservation.

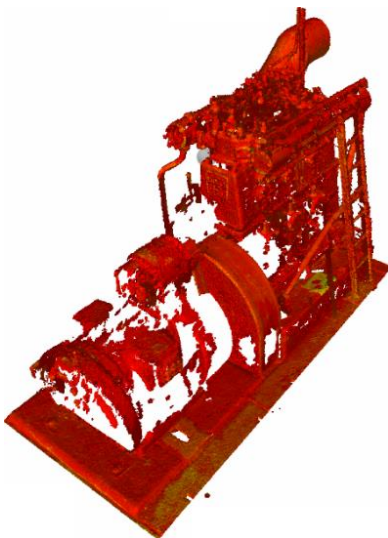
2.3) Méthodologie :

Nous avons d'abord contacté l'ASBL en charge des visites au fort de Tancremont afin de leur expliquer notre démarche. Ceux-ci ont vite compris l'intérêt d'une telle démarche, et nous ont accueillis avec beaucoup d'entrain. Nous nous sommes d'abord rendus sur place avec le petit scanner (Leica BLK 360). Nous avons placé des points de repère (cibles) à des points stratégiques afin de pouvoir facilement lier les nuages de points des différentes stations de relevé. Nous avons réalisé 5 stations différentes en essayant de tourner autour du moteur. Cependant, la présence d'objets encombrants et le peu d'espace entre le moteur et le mur ont contraint quelque peu le placement du scanner. Nous avons effectué un premier examen visuel grâce à l'interface de la tablette tactile et le relevé nous semblait satisfaisant.

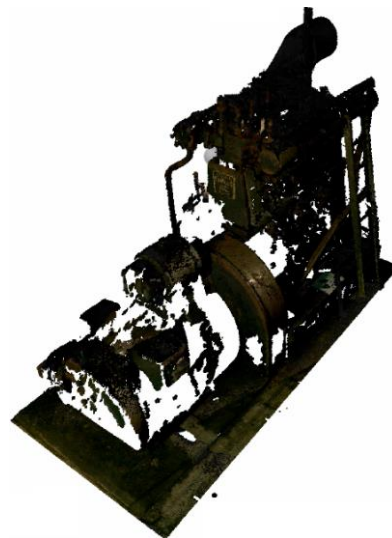
Cependant, au moment de traiter les données, nous nous sommes rendus compte que de grandes parties du modèle n'avaient pas été relevées (**FIGURE 63.1**):

- La face avant de l'alternateur n'a pas été scannée pour une raison inconnue ;
- La face latérale droite manquait de points. Il aurait vraisemblablement fallu réaliser une station supplémentaire ;
- La face arrière a souffert du même souci, mais les éléments relevés se situaient assez bas. Il aurait fallu poser le scanner au sol pour les relever ;
- La face latérale gauche est la moins complète. Cela est à imputer au manque de place ainsi qu'aux objets encombrant le passage.
- Le relevé de la face supérieure a également posé problème, car le scanner a été placé sur le dessus du moteur. Cela a eu pour conséquence de créer un cercle « non-mesuré » au droit du scanner.

L'information colorimétrique relevée par les caméras internes du scanner n'était également pas de bonne qualité (**FIGURE 63.2**). En effet, le moteur n'est pas très bien éclairé et les capteurs optiques du scanner ont vite montré leur limite.



1) Résultat du scan en intensité



2) Résultat du scan avec information colorimétrique

Figure 63 Résultats du premier scan 3D. Travail personnel.

A la lueur de ces constats, nous pouvons tirer les observations suivantes :

- Mise à part l'erreur inconnue au niveau de l'alternateur, le relevé scanner aurait pu être d'une qualité supérieure. Ceci est à imputer à un manque d'expérience de notre part en matière de relevés.
- L'information colorimétrique aurait pu être également corrigée par la prise de vue de photos avec un appareil photo externe, mais le traitement de ces données par la suite sortait du cadre de nos compétences propres.

Forts de cette première expérience, nous avons planifié une seconde campagne de relevés, aidés par notre promoteur. Cette fois-ci, nous avons utilisé un scanner plus puissant, et avons décidé de photographier le moteur sous tous les angles afin de pouvoir produire une reproduction photogrammétrique. Lors de cette seconde campagne, nous avons déplacé les objets encombrants afin de pouvoir faire le tour complet du moteur.

Nous avons plus de 150 photos en tournant autour du moteur, et en s'assurant un recouvrement suffisant entre les différentes photos. Cette solution a permis de résoudre les problèmes de couverture des éléments difficilement accessibles comme les parties basses, ou les éléments de culasse du moteur. L'utilisation de flash « cobras » a aussi permis d'avoir une exposition uniforme du sujet, mais nécessiterait, pour l'étude des couleurs, de redéfinir la balance des blancs.

Cette fois-ci, le traitement a été effectué en externe, et le résultat nous a été communiqué par la suite. Celui-ci est d'une qualité très nettement supérieure au premier (FIGURE 64). De plus, l'information colorimétrique traitée séparément a donné pleine satisfaction. Le modèle du moteur a été fourni au format .dxf (élément 3D maillé mais non-texturé) et au format .obj (Modèle 3D texturé) et en 3 niveaux de détails différents¹⁰⁸. C'est le modèle le plus détaillé que nous avons choisi d'utiliser dans le cadre de cette étude.

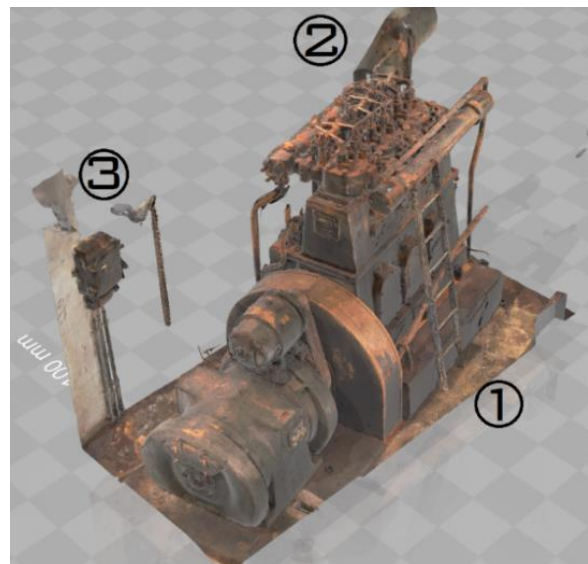


Figure 64 Résultat du second relevé. Modèle 3D Pierre Hallot.

2.4) Utilisation de la source externe :

Une fois ces modèles produits, il ne restait plus qu'à les utiliser au sein de notre maquette Heritage BIM.

Il a tout d'abord été nécessaire de nettoyer le modèle fourni des éléments propres au fort de Tancrémont. Il s'agit du socle du moteur (FIGURE 64.1), du pot d'échappement (FIGURE 64.2) et du coffret de démarrage du compresseur (FIGURE 64.3). En effet, ces éléments ne sont pas les mêmes au fort de Flémalle. Le but est ici d'utiliser uniquement le groupe électrogène, sans ses équipements.

¹⁰⁸ Nous renvoyons à la FIGURE 39 à titre d'informations

Le nettoyage de ce fichier au format .obj s'est fait via MeshLab, un logiciel de retouche et d'édérations de meshes.

Nous avons ensuite importé le fichier en passant par Dynamo, la plateforme de programmation visuelle open source de Revit. Nous avons créé une chaîne de traitement afin de pouvoir importer un objet « mesh »¹⁰⁹ dans Revit, car ce type de fichier n'est pas importable de base¹¹⁰. Dynamo est une partie importante de Revit, à l'instar de Ruby dans Sketchup. Lorsque l'on maîtrise cet outil, les possibilités du logiciel se trouvent encore grandement accrues.

Une fois ce groupe importé, nous lui avons attribué les connecteurs¹¹¹ de conduits et de circuits, comme nous l'avons vu plus tôt. Malheureusement, cette méthode ne permet pas de rajouter des connecteurs directement sur l'objet. Nous avons donc créé une famille de connecteurs reprenant la forme du connecteur d'époque à l'alternateur. Nous avons donné à celui-ci toutes les caractéristiques électriques du moteur afin de pouvoir le connecter au reste du réseau. Nous l'avons finalement remplacé dans la maquette numérique et avons constaté que les ancrages du socle correspondaient parfaitement avec les points d'ancrage du moteur. De cette manière, nous avons pu obtenir un visuel convaincant de la salle des machines telle qu'elle était en 1940, munie de ses deux moteurs (**FIGURE 64**), tout en conservant la possibilité de créer des circuits électriques.



Figure 65 Résultat final de l'import. Travail personnel.

¹⁰⁹ Fichier au format .obj

¹¹⁰ La chaîne de traitement Revit compose l'annexe VII, située en fin du présent travail.

¹¹¹ Dans le cas d'une étude ne traitant pas uniquement des réseaux, nous aurions pu placer les connecteurs d'eau de refroidissement, de diesel, d'huile, ...

Partie VI : Analyse réflexive

Cette dernière partie sera consacrée à l'analyse des possibilités offertes par un tel travail. Celles-ci trouvent des applications dans de nombreux domaines, qu'ils soient patrimoniaux, touristiques ou encore techniques.

1) Etendues et implications d'un tel travail :

A l'époque où ce travail a été lancé, nous n'avions presque aucune maîtrise de Revit. Notre modélisation précédente avec Sketchup nous avait montré l'intérêt d'une maquette virtuelle exhaustive et la nécessité de devoir passer sur un logiciel plus complet si nous voulions y arriver. Le BIM étant un marché en pleine expansion à l'heure actuelle, nous avons choisi Revit pour nous immerger dans le milieu et apprendre ce qu'est le BIM ainsi que ses implications. Revit est un programme complexe que nous ne maîtrisons encore que partiellement. Afin de pouvoir l'utiliser, nous avons suivi 35 heures de formation payante au sein d'un organisme spécialisé, afin d'apprendre les maniements de base de Revit. Nous avons également acheté des tutoriels via des écoles de formation en ligne, tant pour la partie « architecture » que pour la partie « MEP ». Finalement, l'aide de nombreuses personnes compétentes dans Revit et/ou dans leur domaine spécifique au cours des deux ans qu'ont duré ce travail fut précieuse pour la résolution de casus problématiques.

Nous n'avons pas tenu un compte exact des heures passées sur la réalisation de la maquette virtuelle. Cependant, il nous semblait intéressant qu'un tel travail soit accompagné d'une estimation du temps passé à le réaliser. Nous nous sommes basés sur une moyenne théorique de 6 heures par semaine durant les périodes scolaires, et de 3 heures par semaine en dehors de celles-ci. Cette moyenne théorique est basée sur notre propre méthode de travail et n'est donc décrite ici qu'à titre purement indicatif. Nous préférons travailler plus longtemps pendant une journée quitte à ne pas ouvrir le modèle durant un jour entier. Cette moyenne tient également compte du temps consacré à notre formation d'architecte, et notamment le cours de projet, élément extrêmement chronophage dans ce type d'études. Il tient également compte du fait, fort important, que nous ne maîtrisions pas le logiciel au début de ce travail. Certaines tâches auraient donc nécessité beaucoup moins de temps si leur processus avait été maîtrisé dès le début.

L'année scolaire 2017-2018 comptait 182 jours, contre 180 jours pour 2018-2019.

Il faut retirer de cette dernière année 91 jours (avril, mai, juin), ayant stoppé la modélisation fin mars. Soit un total de 271 jours en régime scolaire.

Nous rajoutons à cela une estimation de 120 jours de congés scolaires (+/- 4 mois) à 3 heures par jour, soit un total de 1986 heures de travail, que nous arrondissons à 2000.

Comme nous l'avons déjà expliqué plus tôt, nous avons posé certains choix quant à l'orientation que devait prendre le projet et son niveau de détail. Les figures ci-dessous illustrent l'état d'avancement final de la maquette dans le temps imparti (**FIGURE 62**). La forme du fort et les éléments principaux sont nettement reconnaissables, et la représentation est suffisante pour des représentations en plan complètes à un LOD proche du niveau 300. Il en va cependant tout autrement pour les vues 3D, comme l'illustre l'image ci-dessous

(FIGURE 66). Un grand travail serait encore nécessaire pour terminer le gros-œuvre fermé, notamment les formes volumétriques complexes comme le massif central. Il en va de même pour la topographie de l'ouvrage.

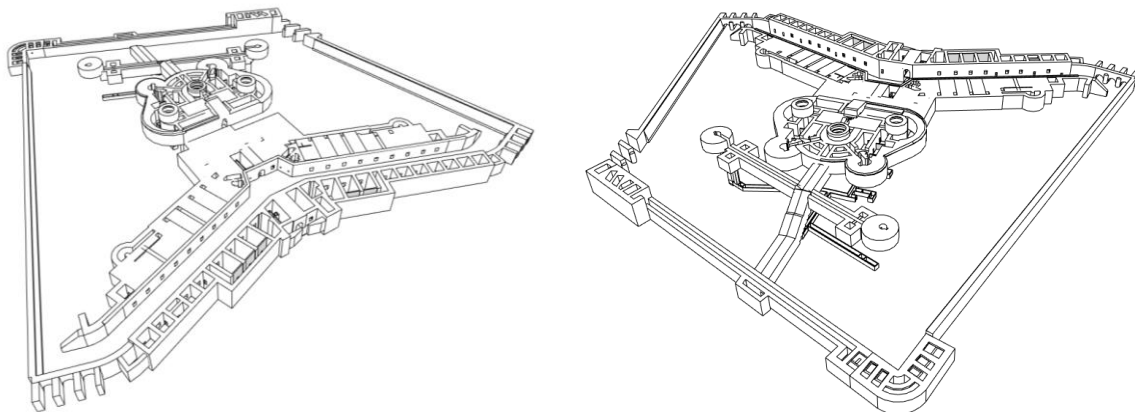


Figure 66 Maquette numérique du fort de Flémalle à l'heure actuelle. Travail personnel.

2) Prérequis et compétences nécessaires :

Comme nous l'avons dit ci-dessous, la réalisation d'une maquette Heritage BIM d'un bâtiment patrimonial est une tâche qui nécessite un certain nombre de compétences.

Tout d'abord, une maîtrise suffisante des logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateurs) et des processus BIM est indispensable. Celle-ci peut s'acquérir au cours du travail, mais la maîtrise préalable est un atout non-négligeable, afin de rendre un tel projet réalisable dans des délais convenables.

Il faut également acquérir une grande connaissance du bâtiment étudié. Dans le cas de ce travail, cela fait des années que la passion de la fortification nous a amené à acquérir un grand nombre de connaissances sur le sujet. Comme nous l'avons vu dans la partie liée à l'Heritage BIM, le processus doit normalement s'enrichir des connaissances de nombreux intervenants dans des domaines divers et variés.

Dans notre cas, nous avons contacté plusieurs spécialistes, en matière de fortification et de modélisation BIM. Ces contacts ont toujours été à l'origine d'une grande émulation, mais n'ont pas amené à des interventions directes de la part des protagonistes. Nous sommes donc restés seul « maître » de la maquette numérique, sans mettre en place le processus de coopération qui caractérise normalement les projets « BIM ».

3) Atouts de la démarche : réalisation d'une timeline du bâtiment :

3.1) A des fins didactiques :

L'un des outils majeurs exploité dans le cadre de la communication d'un modèle Heritage BIM est la possibilité de réaliser une ligne du temps de la vie de l'ouvrage. Celle-ci peut concerner n'importe quelle vue grâce à l'utilisation de l'outil de phases. La réalisation de telles vues est un atout indéniable pour comprendre les modifications successives qu'a subi le fort au cours de son histoire. Il est également possible de produire des vues 3D pouvant être

observées grâce à des moyens de réalité virtuelle (Google Cardboards, Oculus rift,...) aux différentes périodes clés de la vie du bâtiment. Malheureusement, l'étude de cette dernière possibilité sort du cadre du présent travail et n'est citée ici qu'en termes de pistes de réflexions.

Cas concret 1 : Productions de nouveaux plans :

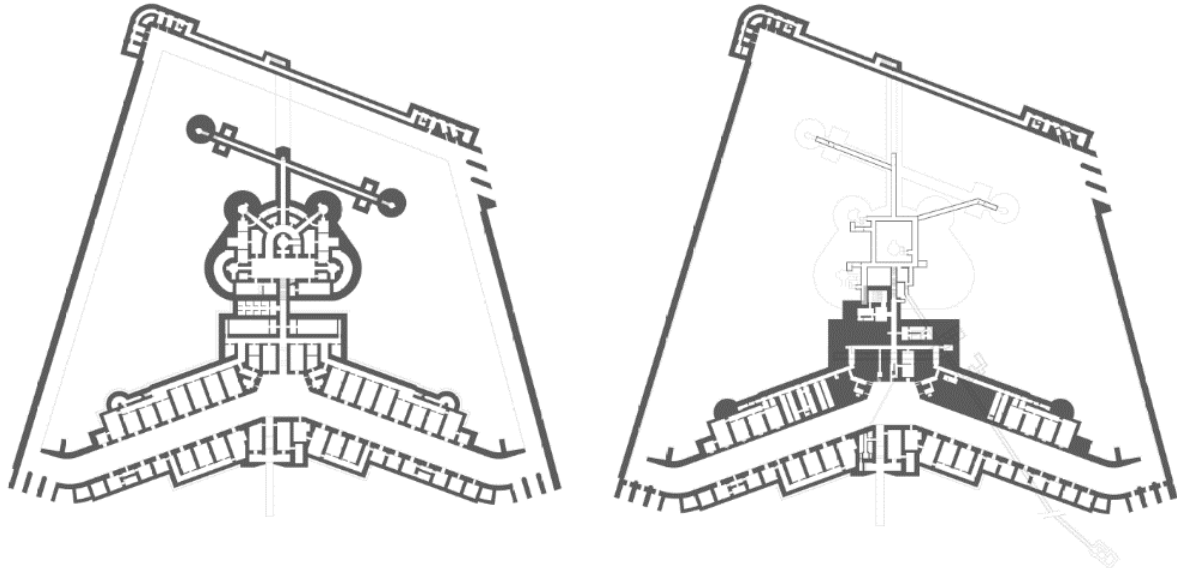


Figure 67 Plans du fort en 1914 et en 1940 réalisés sur Revit. Travail personnel.

Afin de réaliser ces images, il a été nécessaire de générer plusieurs vues qui ciblaient toutes un niveau différent. Cela a permis de gérer la profondeur de coupe, sa hauteur,... pour chaque niveau du fort. Le résultat (FIGURE 67) est à comparer avec les plans en notre possession et existants jusqu'alors (FIGURE 68). D'un point de vue graphique, la réalisation de nouveaux plans provenant d'un même modèle permet de produire deux plans dont les tracés régulatoires sont rigoureusement identiques, contrairement aux plans provenant de différentes sources que nous avons jusqu'ici. Le fait d'utiliser la même charte graphique pour les deux plans permet également de rendre leur lecture plus claire par rapport à leurs précédents.

D'un point de vue architectural, ces plans sont des éléments vectorisés, pouvant être reproduits à n'importe quelle échelle et pouvant être utilisés comme base pour tous travaux nécessitant ce genre de support.

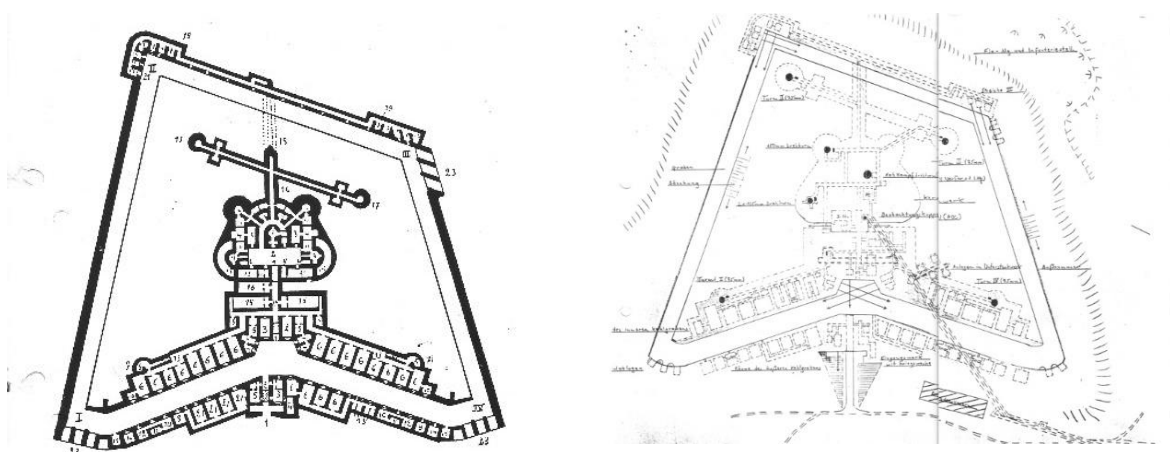


Figure 68 Anciens plans du fort. ASBL Musée Fort de Flémalle.

Cas concret 2 : Les locaux de détente aux différentes époques :

Afin de communiquer aux visiteurs les différentes phases de modification du fort, nous n'avons guère jusqu'ici que les plans des archives militaires. La visite virtuelle que nous avons réalisée a permis de représenter de manière virtuelle l'ouvrage tel qu'il fut en 1940, mais elle a le désavantage de n'être développée que pour cette époque seule.

Sur les plans de la DTF (Direction des travaux Fortificatifs), les éléments démolis sont représentés en jaune, les éléments nouveaux en rouge/orange et les éléments existants en gris (**FIGURE 69**). Il est parfois difficile de faire la distinction entre les différents traits. Des indications manuscrites, superflues dans le cadre d'une utilisation « tout public » compliquent encore la lecture. Enfin, ils ne correspondent pas à la réalité telle que nous pouvons la voir à l'heure actuelle au fort de Flémalle.

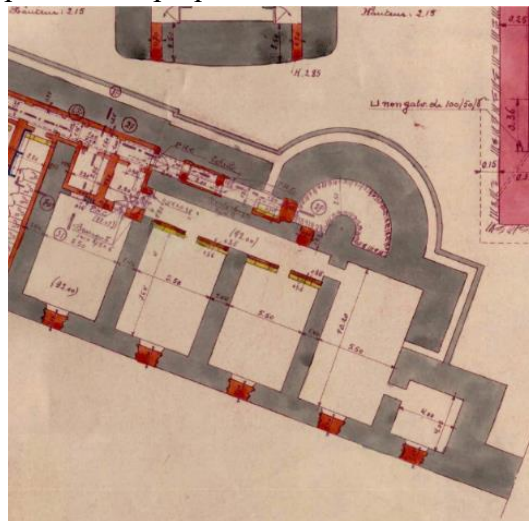


Figure 69 Travaux des locaux de détente. Feuille 7 plans DTF, W.H.I., fond Moscou, boîte 2802.

Nous avons donc produit deux plans, un pour 1914 et un pour 1940¹¹² (**FIGURE 70**). Tous les éléments de cotation ont été retirés dans un souci de lisibilité. Ces nouveaux plans correspondent aussi à la réalité « as built », contrairement au plan d'époque. Nous avons donc créé une série de vues, ciblant les époques principales d'utilisation du fort, et représentant uniquement la période en question (**FIGURE 71**).

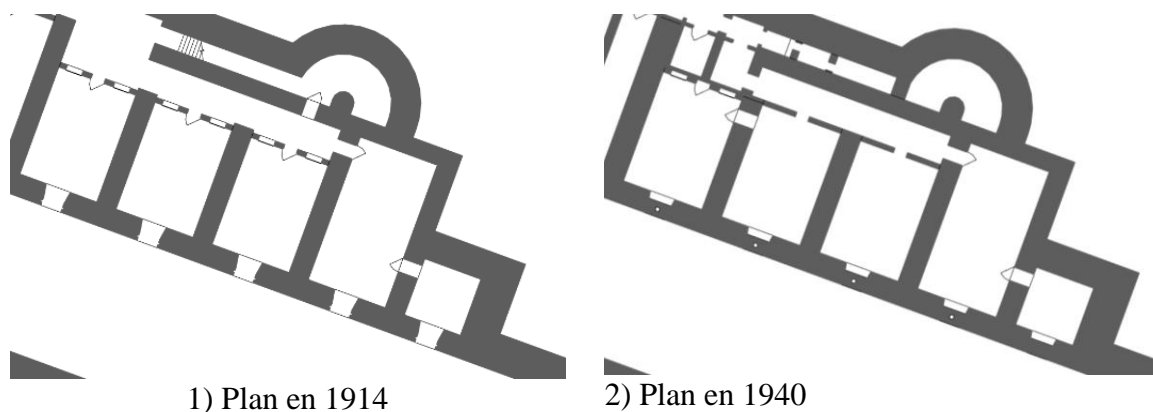
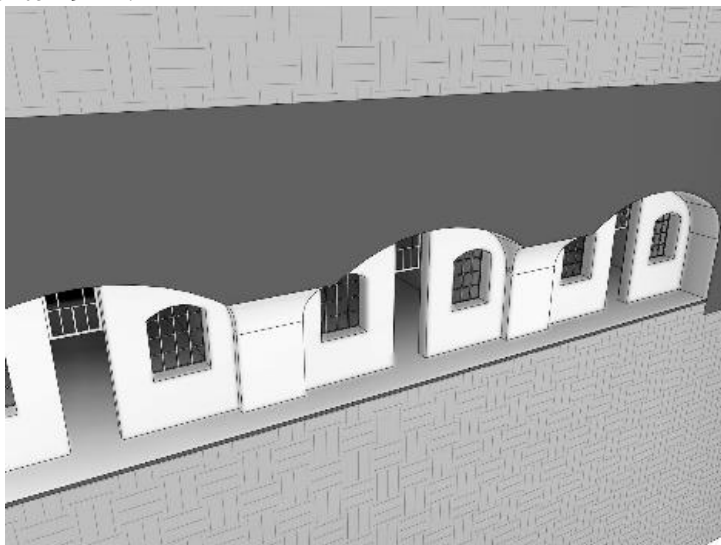


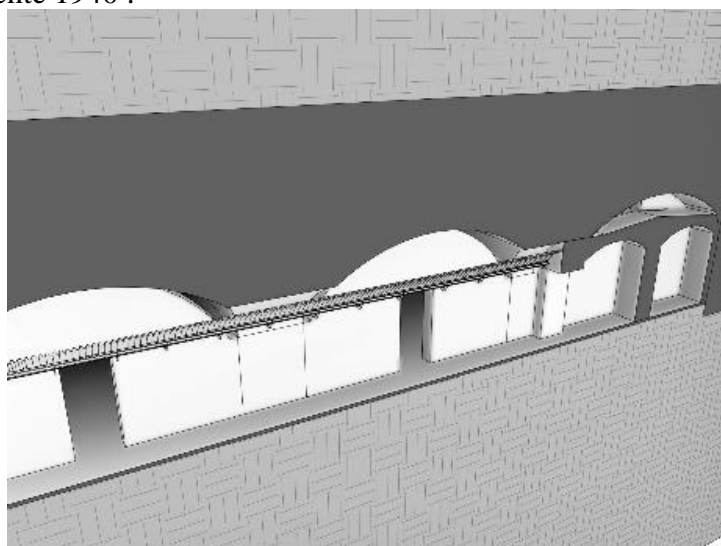
Figure 70 Plans des locaux de détente en 1914 et en 1940. Travail personnel.

¹¹² La phase 1916 (modifications allemandes) n'est pas représentée dans cet exemple car aucune des modifications faites par les allemands n'a porté sur cette partie du fort.

1) Locaux de détente 1914 :



2) Locaux de détente 1940 :



3) Locaux de détente 2019 :

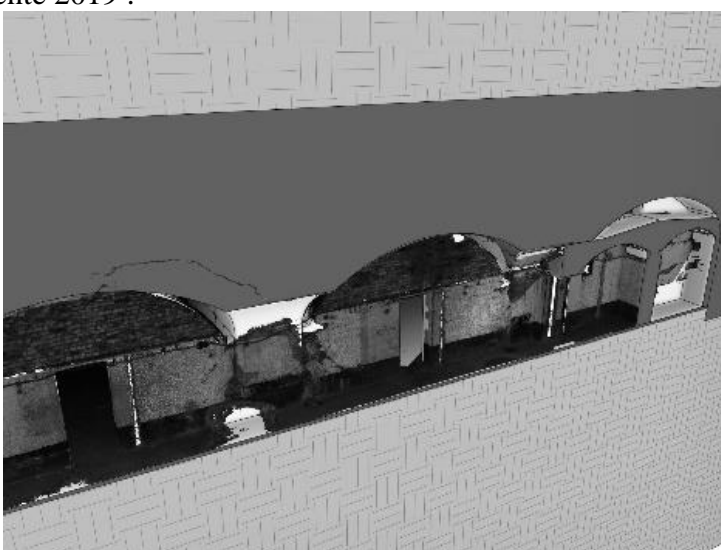


Figure 71 Timeline sous forme de vues 3D. Travail personnel.

4.2) A des fins d'études : tests d'hypothèses :

Pour tester des hypothèses au sein de notre modèle « Heritage BIM », nous avons choisi le cas de la salle des machines. Nous avons précédemment décrit son fonctionnement ainsi que les changements généraux qui s'y sont produits. Au travers de ce travail, nous proposons une restitution des réseaux de cette salle avant et après le changement des moteurs. Nous pourrions également tester différentes versions pour les endroits qui nous sembleront litigieux. Nous garderons à l'esprit tout au long de cette recherche qu'il s'agit d'hypothèses de travail, basées sur une documentation lacunaire, produite il y a plus de 80 ans.

- Le plan général des installations électriques du fort de Flémalle ne révèle que peu de choses sur la salle des machines (**FIGURE 72**, local 85a). Sur ce plan datant de 1932, on peut seulement voir que la salle des machines est alimentée par un seul circuit sur lequel sont reliés 6 points lumineux, deux interrupteurs et 3 prises de courant. Ce circuit est directement relié au Tableau Général (TG). Le circuit des locaux 80b, 81a et 81b semble non relié au reste de l'installation, une erreur semble donc avoir été commise à cet endroit.

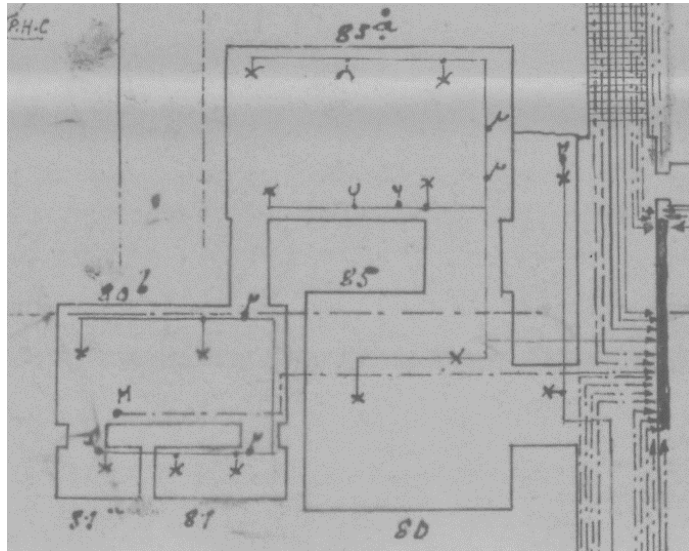


Figure 72 Plan de la DTF. WHI, fond Moscou, boîte 85.

- Un autre plan datant également de 1932 (**FIGURE 73**) nous renseigne sur un tableau nommé T.C. Celui-ci était situé en face des moteurs. Il était constitué, comme nous l'avons déjà décrit, de deux disjoncteurs dotés d'appareils de mesure. Les alternateurs y étaient reliés. Du disjoncteur partait un second câble alimentant le tableau divisionnaire. Ce tableau permettait d'alimenter les démarreurs des moteurs du ventilateur principal, situé à l'étage du quadrilatère. De ce tableau partait deux câbles reliés au Tableau Général afin de l'alimenter.

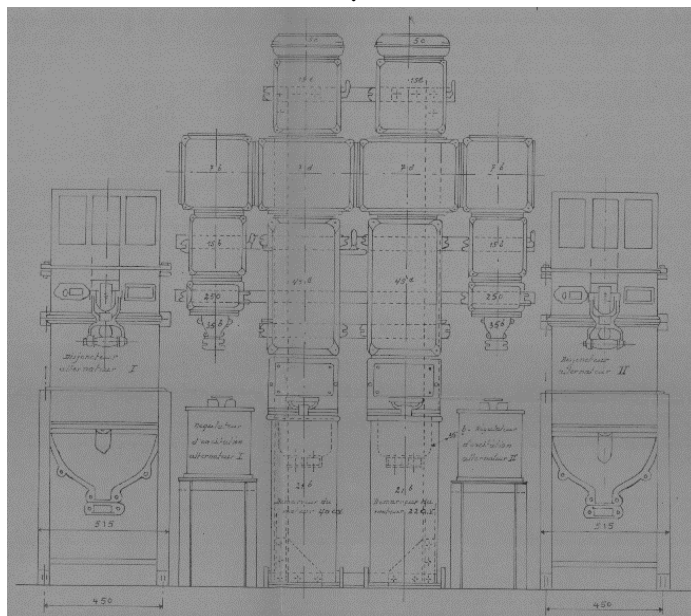


Figure 73 Elévation du tableau « TC ». Feuille n°5, clause additionnelles n°3, WHI, fond QGT, boîte 74.

A une date et pour des raisons qui nous restent inconnues, la salle des machines a subi plusieurs modifications, de même que le Tableau Général.

Le tableau « T.C. » est remplacé par un autre de plus grande taille. Un plan schématique (FIGURE 74) de ce nouveau tableau a été trouvé dans les archives. Les instruments de mesure des deux disjoncteurs sont remplacés par un panneau de contrôle unique dont la connexion est assurée à l'un ou à l'autre à l'aide d'une prise. Il est choisi de supprimer la double alimentation du tableau, et de la remplacer par un câble unique. Les démarreurs du ventilateur sont déplacés dans le local de celui-ci. Le moteur de charge des accus est relié sur le nouveau tableau, de même qu'un nouveau tableautin d'éclairage à usage unique de la salle des machines.

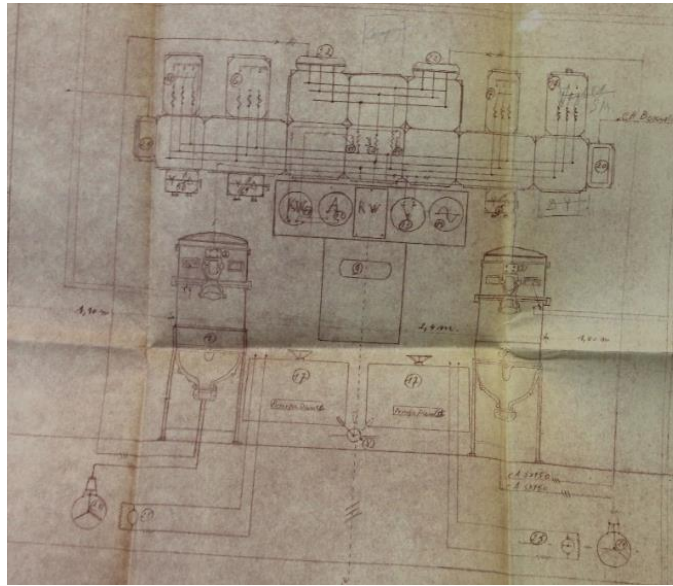


Figure 74 Plan de remplacement du tableau « TC », WHI, fond QGT, boîte 74.

- Problématique liée aux vestiges :

Le problème rencontré lors de la modélisation de ce local vient surtout de l'interprétation des vestiges sur place. En effet, sur le mur gauche se trouve une grande série de colliers électriques. Ceux-ci semblent former différents circuits qui s'emmêlent souvent, ce qui semble peu efficace en termes d'installation électrique. Notre hypothèse est que le réseau lié à seconde installation électrique s'est implanté au sein du premier, en laissant les vestiges de celui-ci en place. Cependant, malgré cette hypothèse, des questions quant au placement des points lumineux restent sans réponse. En effet, le plan d'époque (FIGURE 67) nous renseigne 4 lampes. Or, au vu des vestiges sur place, nous n'avons pu en identifier que 3. Il en va de même pour les prises électriques, nous n'avons trouvé que 3 emplacements pour celles-ci.

Une des possibilités pour discerner les installations ultérieures à 1932 est le degré de finitions des éléments. En effet, on peut voir sur place que des colliers ont été scellés dans un nouveau béton qui n'a pas été repeint en blanc comme le reste du local, cela est une autre hypothèse quant à l'époque des éléments.

Un autre questionnement que nous avons été amenés à poser est la connexion du coffret tableautin d'éclairage de la salle des machines. Celui-ci doit, à notre connaissance, être alimenté par un câble armé. Or, lorsque l'on compare le plan de modification du tableau « TC » (FIGURE 74) et les vestiges sur place, il semble que les deux éléments en question soient reliés par un câble « CHB ». Qu'en est-il de la réalité « as built » de l'époque ? Nous allons ci-dessous représenter les différentes hypothèses.

- **Représentation des hypothèses :**

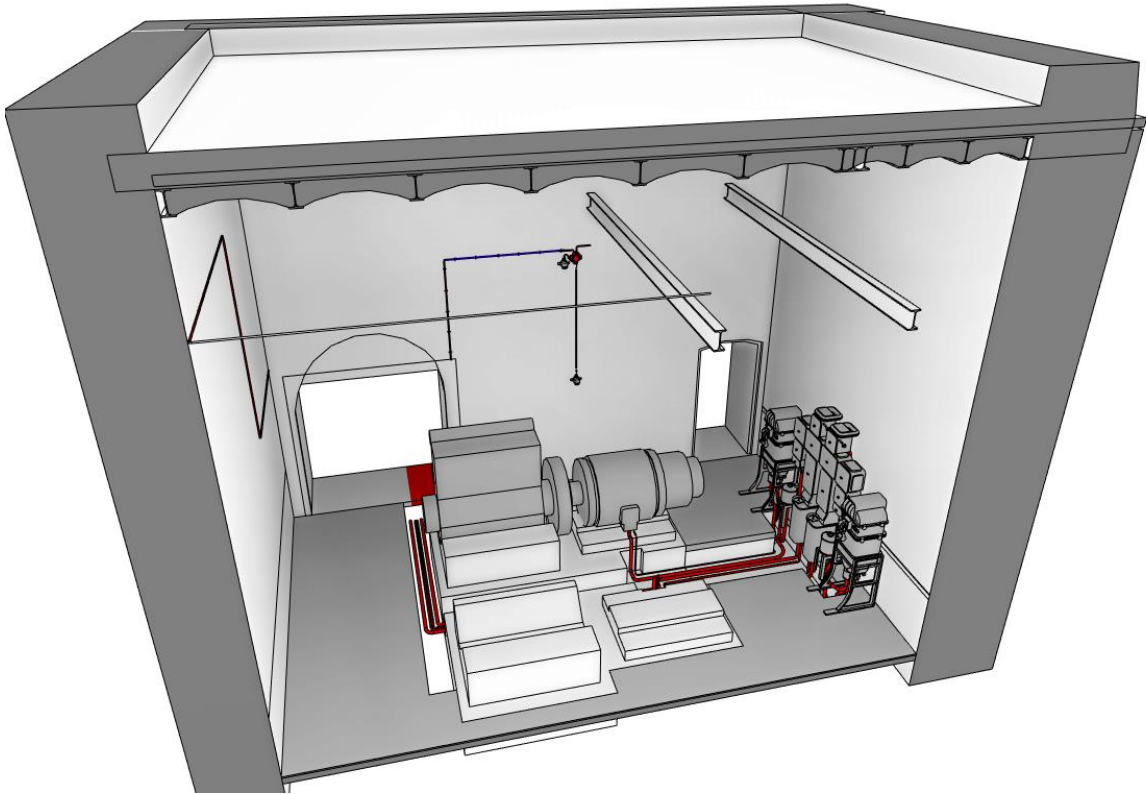
a) Installation électrique de la salle des machines en 1932 :

Celle-ci s'est faite en prenant pour base les fixations d'éléments dont les finitions étaient correctes (Bords repeints). Elle s'est également basée sur des photos d'époque du fort d'Aubin Neufchâteau et sur les plans d'installation électrique dont il est question ci-dessus.

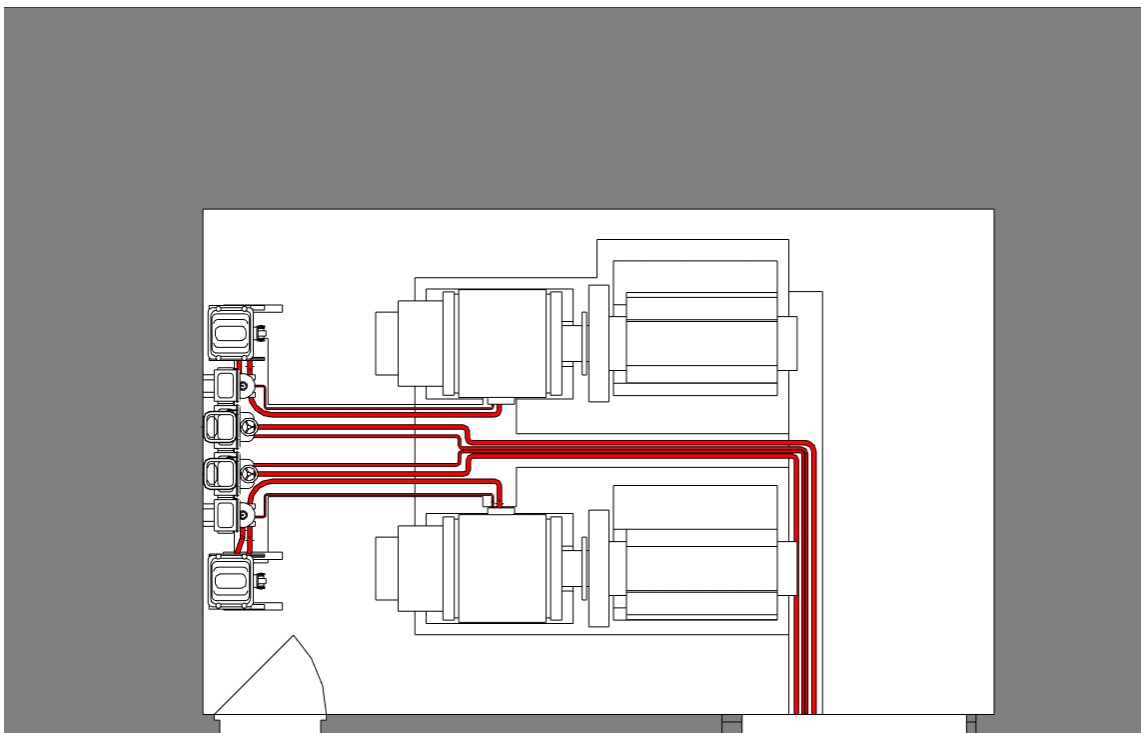
Sur le plan, nous pouvons voir 4 points lumineux ainsi que deux prises. Nous n'avons pas réussi à trouver à Flémalle l'emplacement de ces lampes sur base des photos et relevés en notre possession. Quant aux deux prises, les vestiges sur places nous donnent leur emplacement. La première se trouve à un 1m60 du sol, près du moteur. La seconde se trouve quant à elle à 3m44 du sol. Nous n'avons pas d'informations sur l'utilité de cette deuxième prise. Cependant, nous pouvons supposer qu'elle servait à l'inspection de la réserve de combustible située non loin.

L'étude du plan nous permet également de voir que l'alimentation de ce circuit venait du tableau général situé dans la salle des machines. L'alimentation devait se faire par câbles CHB, comme en témoigne les traits pleins sur le plan (**FIGURE 72**). De plus, des colliers arrivant depuis la porte d'accès au local semblent corroborer cette hypothèse. Un autre câble CHB part de la porte et semble se diriger vers le Tableau « T.C. ». Nous ne connaissons pas à l'heure actuelle l'usage de ce câble, étant donné que le Tableau « T.C. » originel (**FIGURE 73**) ne comportait pas de départs de câbles CHB.

Nous avons retranscrit toutes ces hypothèses dans Revit afin d'obtenir la représentation ci-après (**FIGURE 75**). Il nous a cependant été assez difficile de représenter le réseau d'éclairage. En effet, des marques non-peintes sur le mur laissent à penser qu'un câble électrique passait à ces endroits, mais sans colliers pour le confirmer. Cette première représentation reste donc lacunaire. Le mur de gauche par exemple, n'a pas de traces visibles de points d'éclairage ni de quatrième prise électrique. Le mur du fond n'a quant à lui aucune trace des deux interrupteurs que l'on retrouve sur le plan. Cette première hypothèse s'est donc concentrée sur les connexions en caniveau, partant des moteurs et allant jusqu'aux disjoncteurs. Ces disjoncteurs étaient, à l'époque, tous deux reliés au Tableau « TC ». De ce tableau TC partaient ensuite deux câbles armés en direction du tableau général. D'autres câbles partaient des démarreurs des moteurs du ventilateur ainsi que des régulateurs d'excitations des deux moteurs. Tous ces câbles sont représentés dans les images ci-dessous (jusqu'au seuil de la salle des machines). Nous sommes partis pour les sections de câbles de l'hypothèse qu'elles étaient identiques à ce que l'on peut voir dans les autres forts.

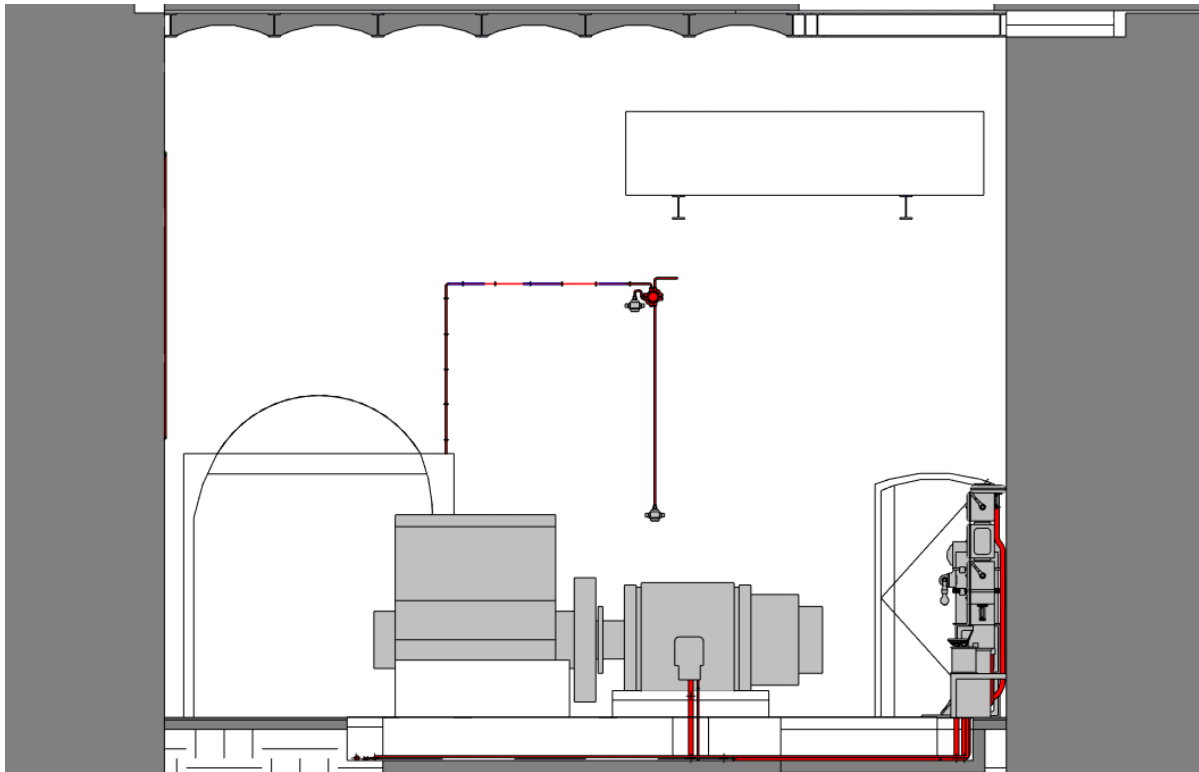


Vue 3D du câblage de la salle en 1932.



Vue en plan du câblage en 1932

Figure 75 Représentations des hypothèses d'installation en 1932. Travail personnel.



Coupe orientée gauche. Représentation partielle du réseau CHB.

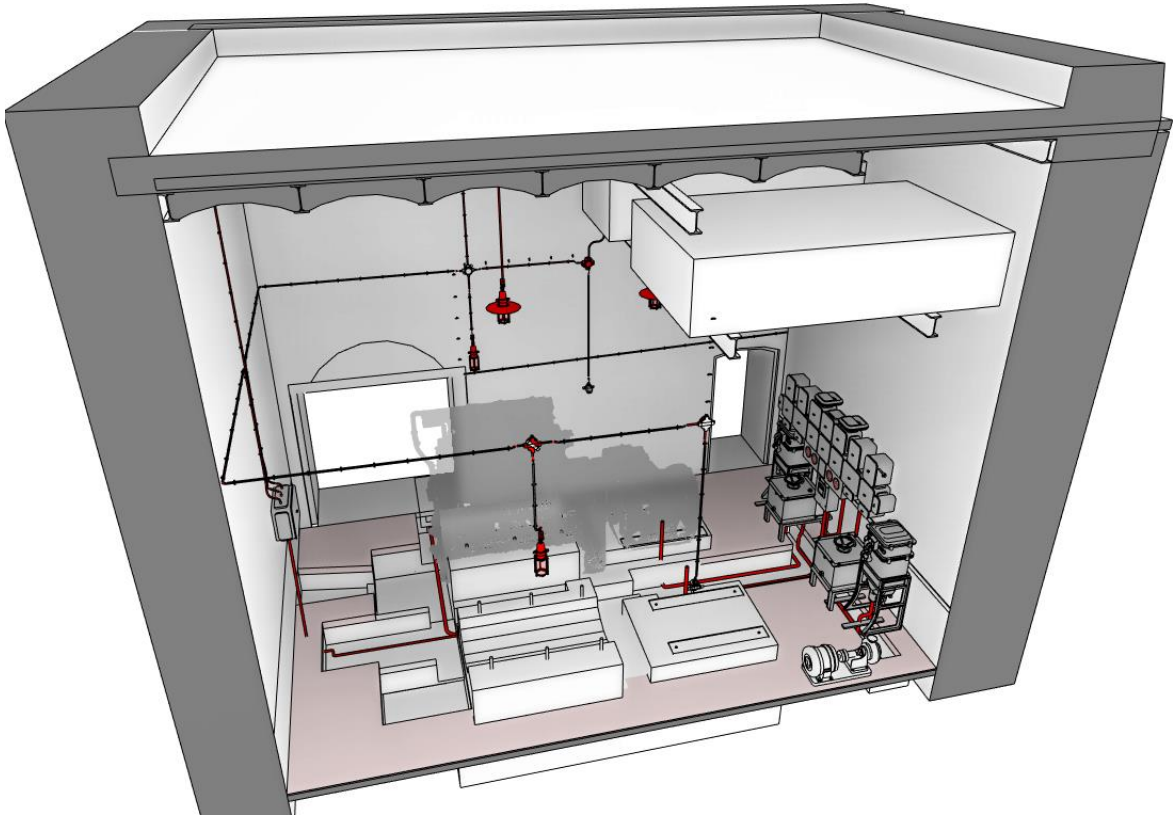
Figure 75 Représentations des hypothèses d'installation en 1932. Travail personnel.

b) Salle des machines en 1940 :

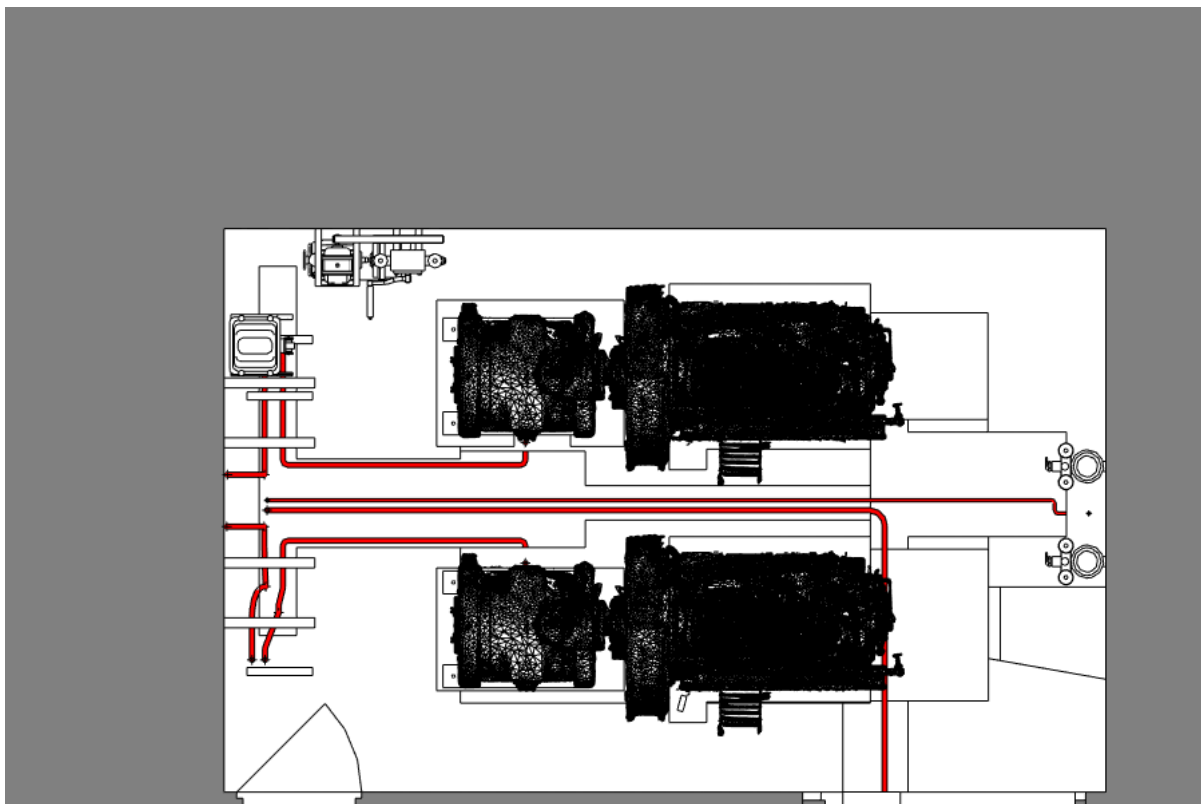
La représentation des hypothèses d'installation électrique en 1940 est plus complète que son homologue de 1932. En effet, nous disposons de plus de vestiges et de documents par rapport à l'état du local à cette époque. Nous sommes partis des mêmes hypothèses que celles énoncées plus haut afin de modéliser les différents câbles électriques (**FIGURE 76**). Dans cette version, nous avons pu replacer l'éclairage définitif, dont des traces subsistent encore à l'heure actuelle. Le modèle a été recâblé et donne le résultat ci-dessous. Le tableautin d'éclairage a remplacé la commande de l'éclairage de la salle depuis le tableau général. Les disjoncteurs sont reliés aux moteurs d'un côté et peuvent être connectés au tableau T.C. par une prise. Les éléments sous caniveau sont représentés de manière aléatoire. En effet, le cahier des charges nous renseigne que les câbles placés sous caniveaux sont simplement déroulés à même le sol. Il n'y a donc aucune trace de leur passage exact :

« Dans les caniveaux visitables, les câbles susdits (Ndlr : Câbles armés) seront posés sur le béton sans moyen d'attache. Les caniveaux seront au préalable convenablement brossés et les décombres seront transportés dans un local à désigner sur place. Des bracelets d'identification seront placés tous les deux mètres sur chacun des câbles »¹¹³.

¹¹³ Cahier Spécial des charges relatif aux travaux et fournitures à faire pour l'installation de l'éclairage électrique dans les forts de Liège, Op. Cit.

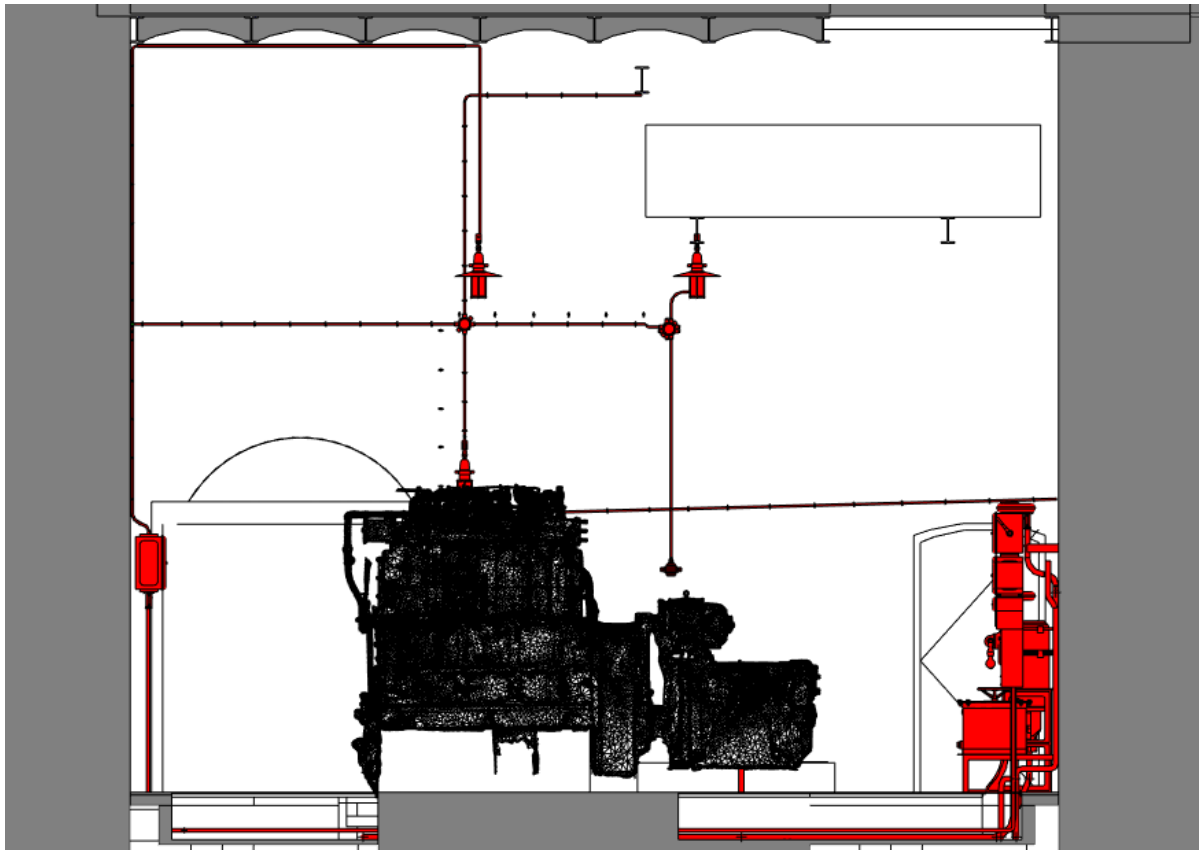


Vue 3D du câblage de la salle en 1940.



Vue en plan du câblage en 1932

Figure 76 Représentations des hypothèses d'installation en 1940. Travail personnel



Coupe orientée gauche. Représentation partielle du réseau CHB.

Figure 76 Représentations des hypothèses d'installation en 1940. Travail personnel.

Conclusions :

La modélisation technique de ces éléments permet une meilleure compréhension des réseaux à travers les époques. Cependant, cette représentation s'avère compliquée sur seule base des vestiges d'époque, comme le montre l'hypothèse de 1932. Ces tests permettent également de démontrer qu'un même modèle peut être utilisé à destination du grand public, mais également à destination des techniciens désireux d'étudier plus en détails le fonctionnement d'un élément, de même que sa mise en place à l'époque.

La réalisation de ces hypothèses permet également de donner une idée des conditions d'éclairage de la salle des machines. Le rendu ci-contre (**FIGURE 77**) est créé sur base des conditions d'éclairage données par les documents d'époque. La puissance des lampes est déterminée par une fiche technique trouvée dans les archives (60 watts).

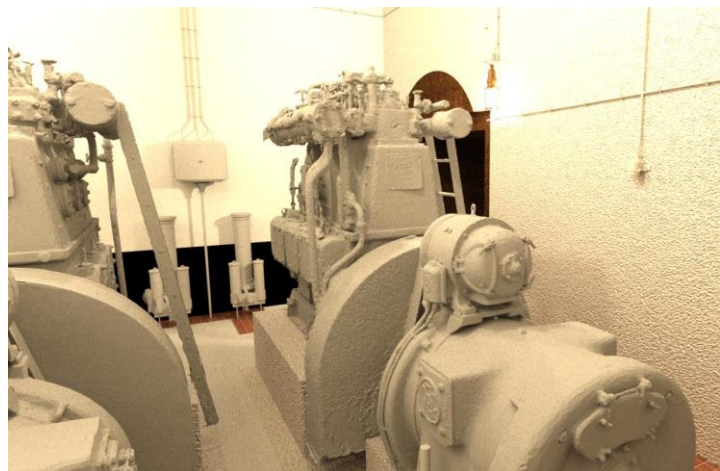


Figure 77 Rendu d'éclairage. Travail personnel.

4) Autres pistes de réflexions – la valeur ajoutée du BIM :

4.1) En termes de compréhension des vestiges par le grand public :

Tout au long du présent travail, nous avons pu nous rendre compte de la complexité d'avoir une bonne compréhension des modifications successives apportées au fort. Le modèle créé peut être une source de production de documents inégalée. Le principe de création des vues permet de générer des images de n'importe quel endroit du fort. L'outil de phases permet de visualiser cet endroit aux différentes époques clés du fort. Le bon paramétrage des éclairages dans la maquette BIM et l'information liée aux matériaux permettrait de générer très rapidement des rendus réalistes permettant de mieux cerner l'ambiance des lieux. Ce rendu d'ambiance est d'autant plus réaliste qu'il dépend de paramètres de puissance d'éclairage donnés par les documents d'époque.

Cas concret 1 : réalisation d'une coupe perspective :

Indépendamment de ce travail, nous avons récemment réalisé une série de panneaux didactiques pour illustrer certains éléments clés du fort. Pour une raison de quantité de modèles déjà réalisés, nous nous sommes surtout basés sur nos travaux antérieurs faits sur Sketchup. Nous avons réalisé des vues 3D en coupant dans les volumes de béton. L'outil « sections » de base sur Sketchup permet de couper dans les éléments, sans distinction dans ceux-ci (matériaux, motif de coupe,...). Dans le cas de la réalisation des panneaux, nous avons choisi de découper le modèle de la pièce en question de manière irréversible pour réaliser les zones coupées afin de pouvoir représenter de manière distincte les différents matériaux (**FIGURE 78**).

A contrario, l'approche BIM dans Revit, permet d'envisager les choses d'une manière beaucoup plus performante. Les zones de coupes s'apparentent à des volumes parallélépipédiques, dont les dimensions peuvent être modifiées à volonté. Elles ne sont en aucun cas liées à la géométrie. On peut donc générer autant de coupes perspectives que l'on veut sans devoir redessiner tous les éléments coupés comme c'est le cas dans la méthode que nous avons utilisée. Revit dispose d'une « intelligence » des différents matériaux, intrinsèque au concept BIM, rendant le graphisme de chacun d'entre-eux paramétrable à volonté. Une modification de graphismes sur un des matériaux changera automatiquement ceux-ci à chaque endroit où le matériau sera coupé. Mis à part le choix des graphismes (facultatif) et la définition de la zone de coupe, les tâches se réalisent de manière automatique (**FIGURE 79**).

Etapas pour la réalisation d'une coupe perspective dans Sketchup :

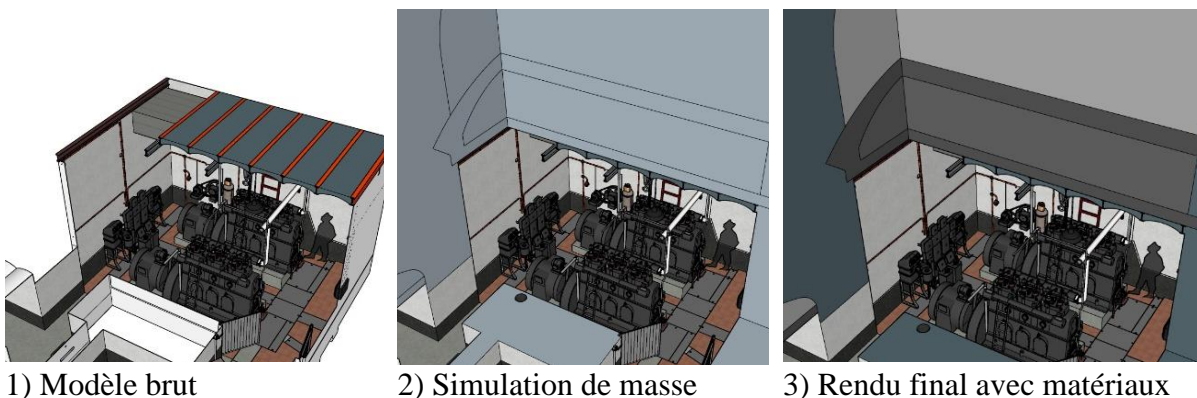
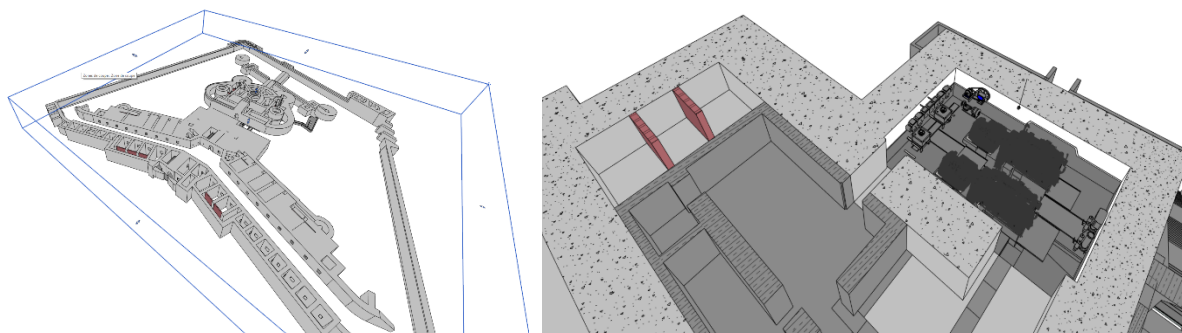


Figure 78 Process Sketchup de coupe perspective dans la salle des machines. Travail personnel.

Etapes pour la réalisation d'une coupe perspective dans Revit :



1) Définition zone de coupe

2) Graphismes choisis

Figure 79 Process Revit de coupe perspective de la salle des machines. Travail personnel.

Cas concret 2 : Insertion de modèles 3D dans le nuage de points :

L' « insertion » d'objets 3D dans le nuage de points est une tâche très simple dans Revit. Il suffit pour cela de jouer avec la visibilité des différents éléments. Le nuage de points étant justement positionné dans le modèle (en tant que référence), il suffit d'activer son affichage afin de réaliser une vue enrichie qui permet de mieux cerner les équipements d'époque dans leur environnement actuel (FIGURE 80). Cette représentation peut permettre au public de faire plus facilement le lien avec ce qu'ils voient, par rapport à une représentation totalement modélisée.



1) Salle des machines, résultat visuel.

2) Tableau divisionnaire général et nuage de points.

Figure 80 Visualisation d'éléments numérisés en parallèle avec l'affichage du nuage de points. Travail personnel.

Cas concret 4 : Visualisation graphique des dégâts liés aux bombardements :

Dans le cadre de la réalisation de l'un de nos panneaux didactiques, nous avons voulu représenter le décrochage d'une voûte causé par un bombardement aérien. Lors de celui-ci, une partie du plafond s'est effondrée dans la galerie. Les blocs qui sont tombés à l'époque sont toujours en place à l'heure actuelle.

Pour ce faire, nous avons simplement réalisé une coupe dans la maquette virtuelle au droit du couloir concerné, avant de rajouter dans l'espace papier de Revit les contours du plafond à l'heure actuelle (FIGURE 81).



Figure 81 Coupe à travers le décrochage de la voûte. Travail personnel.

Sur base de ce cas précis, nous avons également souhaité connaître le poids approximatif de l'un des éléments de la voûte tombé au sol. Pour cela, nous avons d'abord nettoyé le nuage de points en ne gardant que le bloc de béton qui nous intéresse. Ensuite, nous l'avons converti en un objet maillé. Après quelques manipulations dans Sketchup afin d'obtenir un objet solide, nous avons obtenu le volume approximatif du bloc de béton. En multipliant ce chiffre par la masse volumique du béton non armé, nous sommes donc arrivé à une masse de 1700 kg.

5.2) En termes d'utilisation par des bureaux d'études :

La réalisation d'une maquette BIM est un atout majeur dans la conception d'un chantier. Celle-ci peut être mise à disposition des bureaux d'études devant intervenir d'une manière quelconque au sein de l'ouvrage. Le partage du modèle grâce au format IFC rend la maquette utilisable par tous. Pour illustrer notre propos, nous prendrons deux exemples concrets liés à la gestion du fort par l'ASBL.

En 2017, le fort a dû être fermé au public pour cause de problèmes de stabilité d'un bloc de béton. En effet, les bombardements aéroportés de mai 1940 avaient fragilisé le coin du mur d'escarpe du Saillant IV. Nous avons constaté des mouvements légers de ce coin au fil des années, conduisant à un risque important lors de nos visites. Un bureau d'étude en stabilité a été contacté afin d'envisager diverses possibilités de consolidation des différents éléments afin de les maintenir en place. Pour cette occasion, nous avons produit différentes coupes de l'élément en question, sur base de plans d'époque. Le recours à la maquette virtuelle nous aurait permis de produire un plus grand nombre de documents, sous toutes les orientations souhaitées. De même, un bureau d'étude maîtrisant le BIM aurait pu récupérer la maquette afin de lui rajouter les informations nécessaires à des études structurelles et à des tests de scénarios en vue d'une consolidation des blocs en place. Finalement, pour cause budgétaire, les éléments précaires ont été détruits par le génie d'Amay dans le cadre d'un de leurs exercices.

Récemment, des problèmes au niveau de l'installation électrique actuelle du fort nous a fait contacter un technicien agréé. Le constat de celui-ci fut sans appel : l'entièreté de l'installation électrique doit être refaite dans les plus brefs délais afin de pouvoir continuer à ouvrir le fort au public. Le recours à notre maquette numérique pourrait présenter des avantages majeurs quant aux études préalables. Ceux-ci résulteraient en un gain de temps pour l'installateur, et un gain financier pour la commune, propriétaire du fort.

De même que dans le premier cas, la simple production de documents de travail à n'importe quel endroit de la maquette représente déjà un avantage certain par rapport aux procédés traditionnels.

4.3) En tant que banque de données interactive :

L'une des réflexions que nous avons initiée lors de la rédaction de ce travail concernait la consultation des archives. Celle-ci ne peut se faire qu'au musée du Cinquantenaire à Bruxelles durant les heures d'ouvertures du musée.

D'autres contraintes, comme 3 boîtes d'archives maximum par levée et un nombre de levées relativement restreint viennent complexifier un peu plus l'accès aux différents fonds mis à disposition par le War Heritage Institute.

Dans le cadre du présent travail de fin d'études, nous avons imaginé une alternative à ce problème.

Comme nous l'avons dit plus tôt, le processus BIM de manière générale, l'Heritage BIM en particulier, sont à l'origine de la création d'une importante banque de données relatives aux informations du bâtiment.

La mise en place d'une plateforme de consultation des maquettes virtuelles des différents éléments d'architecture militaire serait déjà très intéressante d'un point de vue scientifique. Coupler ces éléments 3D à la possibilité de consulter les plans et documents d'archives numérisés par époque, localisation au sein des ouvrages, disciplines,... permettrait de recréer des timelines virtuelles des bâtiments étudiés, avec la proximité des sources d'archives consultables par tous. Cette interface numérique pourrait très bien s'intégrer au site internet existant du W.H.I. ou au sein d'une nouvelle plateforme et permettrait de donner à un plus grand nombre l'accessibilité à tous ces documents d'époque. Le recours aux nouvelles technologies serait aussi un argument en faveur d'un plus grand intérêt de la part des nouvelles générations. Tous ces éléments pourraient en effet être disponibles également via des applications pour smartphone permettant de se déplacer (virtuellement grâce aux casques V.R, oculus rift et autres, ...) dans un fort à différentes époques, tout en consultant les récits des combats, son histoire, les correspondances des entrepreneurs avec la Direction des Travaux Fortificatifs, ...

A titre d'exemple, nous avons choisi d'exposer les produits de la firme Dassault Système.

Cette société aéronautique française a développé des filières dans de nombreux domaines, et notamment celui de la 3D.

Durant plus de deux ans, la firme a développé le projet « Paris 3D », qui permet « un voyage immersif et historique dans Paris, depuis le premier siècle ACN jusqu'à 1889 »¹¹⁴. Il fut mené par plus de 40 personnes sous la direction d'une archéologue durant deux ans.

Celui-ci se décline maintenant en un site internet, une application numérique, un livre et en différents événements.

Il suffit de consulter les documentaires disponibles gratuitement sur les plateformes vidéo internet, pour se rendre compte de l'intérêt d'une telle démarche en termes de documentation du bâti mais également, et surtout, en termes de communication.

4.4) Mise en évidence des erreurs d'époque :

Lors de la mise en place des éléments de l'installation électrique, nous avons pu voir que certains éléments des plans d'époque étaient incorrects. Des circuits dessinés en plan n'étaient pas reliés à l'installation, des schémas de coffrets étaient faux, etc... En mettant de côté la modélisation MEP du fort, la centralisation de toutes les informations permet déjà de relier les différentes sources entre elles et de faire apparaître les premières erreurs. Cette mise en confrontation des différentes sources permet aussi aux auteurs du projet de se représenter de manière beaucoup plus claire le sujet qui les intéresse.

Dans Revit, nous pouvons déterminer un nombre maximum de circuits à connecter sur un tableau. De telle sorte, il nous est possible de contrôler la justesse des plans d'époque par rapport aux connexions électriques des différents tableaux. Il est également possible de réaliser des calculs de perte de charge, etc... Mais ces calculs n'ont pas été menés dans le cadre du présent travail.

Une autre piste de réflexion serait de comparer les écrits d'époque (récits des combats, témoignages d'époque,...) avec la réalité concrète, symbolisée par la maquette BIM de l'ouvrage.

Prenons l'exemple d'un élément de l'installation électrique qui aurait été détruit lors des combats. Cette destruction, d'après les récits d'époque, aurait conduit à la mise hors service d'une coupole du fort, qui aurait été une cause de la reddition de celui-ci. La question que l'on peut se poser est dès lors la suivante : la mise hors service de cet élément a-t-elle vraiment conduit aux événements décrits ou bien les conditions déplorable dans lesquelles devaient se battre les soldats sous les bombardements leur ont-elles laissé croire que l'équipement était hors service alors que ce n'était pas le cas ?

Les technologies actuelles permettraient de répondre à cette question. La déconnexion d'un élément du réseau électrique nous donnerait la liste des éléments déconnectés par la même occasion.

¹¹⁴ <https://www.3ds.com/stories/paris-3d/>, consulté le 09/04/19 [en ligne].

5) Limites rencontrées :

Bien que n'ayant pas testé toutes les capacités de Revit, nous pouvons malgré tout en citer quelques limites que nous avons rencontrées dans les domaines étudiés.

La limite la plus importante concerne la partie électricité du logiciel. Celui-ci permet en effet de réaliser des circuits électriques. Ce système fonctionne assez bien pour les vues en plan ou les élévations, mais pas pour les vues 3D comme nous l'avons vu dans la partie IV.

La modélisation du réseau électrique s'avère laborieuse et le système adopté mêlant « circuits » et « conduits » est un moyen d'arriver à ses fins avec Revit. Elle n'est cependant pas la méthode la plus performante.

Lors de notre rencontre avec Madame Sabrina Lejeune, dessinatrice techniques spéciales au sein du Bureau d'ingénierie Greisch, celle-ci nous a expliqué que « la partie électricité est un peu le parent pauvre du volet techniques spéciales de Revit ». Dans le cas du Bureau Greisch, ils utilisent Revit en complément du logiciel Caneco BT. Ce dernier est entièrement destiné à la « conception automatisée d'installations électriques basse tension »¹¹⁵.

Il aurait donc vraisemblablement fallu passer par un programme tel que Caneco si nous avions dû pousser l'étude électrique plus en avant.

Une autre limite concerne la modélisation d'éléments complexes. A plusieurs reprises dans le présent travail, nous avons parlé de problèmes liés à des modélisations complexes. Celles-ci comprennent le dessin d'éléments qui sortent des opérations classiques (extrusions, raccordements,...) La solution par Revit est la création de « volumes » (**FIGURE 82**) dont les paramètres peuvent être modifiés à volonté pour donner des formes parfois très complexes à l'aide, notamment, de poignées de saisie de la forme. C'est un outil qui semble extrêmement puissant, comme en témoigne notamment la modélisation totalement paramétrique d'un chapiteau corinthien.

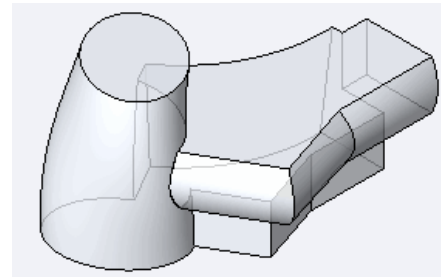


Figure 82 Volume In situ. Image Revit.

Malheureusement, nous n'avons pas eu le temps de l'appréhender dans le cadre du présent travail de fin d'études.

Dans le cas des interrupteurs par contre, nous avons pris le parti d'importer une géométrie de Sketchup afin de représenter de manière précise ces éléments. On se retrouve ici face à l'un des fondements du BIM, à savoir l'interopérabilité des plateformes. Cela permet d'utiliser avec discernement chacune d'elle, en fonction de leurs points forts respectifs.

Le paramétrage de certains éléments a aussi parfois été la cause de comportements quelque peu aléatoires. C'est le cas notamment pour certains éléments de coffrets électriques qui avaient tendance à se déformer de manière anarchique quand un changement de dimensions était demandé. La cause de ces problèmes n'a pas toujours pu être identifiée et il fut parfois nécessaire de recommencer l'objet pour que les changements de paramètres s'effectuent de manière correcte.

¹¹⁵ <https://www.alpi.fr/logiciels/caneco-bt.html>, consulté le 05/04/19 [en ligne].

La taille du fichier peut également être une limite pour certains. Le modèle Revit du fort fait 177 Mo. Nous n'avons eu aucun souci en termes de fluidité jusqu'à ce que l'on rajoute les moteurs maillés. Ceux-ci sont en effet fort lourds (44 Ko). Après leur placement, le modèle s'en est trouvé ralenti. Il est donc important de tenir compte des performances des machines utilisées, le processus étant généralement gourmand d'un point de vue de place.

L'import d'éléments « meshés » a bien fonctionné. Cependant, leur usage d'un point de vue graphique reste limité par l'apparence de ceux-ci. En effet, comme en témoigne notre visualisation (**FIGURE 65**), l'entière des faces composant l'objet reste visible. Ceci est un frein à une communication claire et lisible du modèle. A l'heure actuelle, la seule solution que nous avons trouvée est de passer par un logiciel tiers (3Ds Max). Son usage étant payant, nous n'avons pas « nettoyé » notre moteur, et l'avons donc laissé avec toutes ses facettes visibles.

Pour conclure, nous parlerons encore du mode de projection des vues 3D. Revit nous en propose deux, projection orthographique et projection perspective. Cette dernière souffre parfois d'une lenteur extrême dans les déplacements panoramiques. Une recherche sur des forums n'a pas mené à un problème du logiciel connu. Pour pallier à ce problème, nous avons fermé la vue active pour la rouvrir ensuite. Le déplacement dans le modèle revenait alors à la normale.

Partie VII : Conclusion

En conclusion à ce travail, nous pouvons affirmer que la réponse à notre question de départ est positive. En effet, l'utilisation d'un outil BIM aide réellement à la compréhension d'un système de réseau électrique dans le cas d'un patrimoine militaire belge. A travers l'étude de cas du fort de Flémalle, nous avons montré les atouts d'une maquette numérique BIM par rapport à d'autres techniques de CAO utilisées traditionnellement dans le cadre d'édifices patrimoniaux. Il nous semble que le processus présenté ici est le gage d'une meilleure compréhension des moyens techniques d'une autre époque. Nous avons tenté, au travers de ce travail, de donner un exemple de processus complet, de la prise de mesures à l'utilisation du produit final. Celui-ci reste néanmoins propre à ce cas d'études précis et devra être adapté en fonction du cas étudié.

Au-delà de l'aspect scientifique, un tel procédé représente un atout indéniable en termes de communication, afin de faire comprendre au grand public les modifications successives apportées à un bâtiment. Nous avons démontré qu'une seule maquette numérique correctement construite peut être utilisée tant pour la vulgarisation que pour les études techniques. Finalement, le recours à l'outil BIM permet de mieux coordonner des actions futures, en disposant d'une banque de donnée complète sur le bâtiment en question.

Cependant, le savoir-faire nécessaire à la réalisation d'un tel travail est important de même que les connaissances à acquérir, tant patrimoniales que techniques. C'est pourquoi nous gageons que ce processus serait rendu plus performant par un travail d'une équipe composée de spécialistes dans tous les domaines touchant de près ou de loin au bâtiment étudié.

Dans le cas de ce travail sur le fort de Flémalle, nous avons pu tester différentes hypothèses en termes de relevés, de modélisation et d'utilisation du travail produit. Certaines se sont vérifiées, tandis que d'autres ont nécessité des corrections de notre postulat de départ.

Pour terminer, nous sommes convaincus que l'Heritage BIM va se développer et devenir la norme en matière de restauration, tant ses possibilités sont grandes. Les technologies mises à notre disposition aujourd'hui ne sont que les prémices des moyens mis en œuvre demain.

Bibliographie

Partie historique :

Ouvrages :

- BASTIN, DANIEL, *Les forts de Pontisse & de Liers, frères d'armes herstaliens*. Bruxelles : Ed. Memogrames, 2007, 240 pages.
- BRAGARD, PHILIPPE, MARCHAL, JACKY, *Album des coffrages employés dans la construction des forts de la Meuse*. Namur : Ed. Les amis de la citadelle de Namur, 2011, 39 pages.
- BRAGARD, PHILIPPE, BRUCH, VINCENT, LIEGEOIS CHRISTOPHE, *Béton et zeppelins, travaux militaires allemands à Namur, 1914-1918*. Namur : Ed. Les Amis de la Citadelle de Namur, 2018, 280 pages.
- BRAGARD, PHILIPPE, DOUETTE, DENIS, VANDENBROUCKE, *Forts de la Meuse, Place de Namur, Images et textes de la construction des forts (1887-1892)*. Namur : Ed. Les Amis de la Citadelle de Namur, 2010, 128 pages.
- *Cibles, trimestriel du Musée royal de l'Armée*, 2002, n°15.
- COENEN, EMILE, VERNIER, FRANCK, *La position Fortifiée de Liège Tome II, Les abris de la PFL 1*. Erp : Ed. de Krijger, 1999, 75 pages.
- COENEN, EMILE, VERNIER, FRANCK, *La position Fortifiée de Liège Tome III, Les abris de la PFL 2*. Erp : Ed. de Krijger, 2000, 96 pages.
- COENEN, EMILE, VERNIER, FRANCK, *La position Fortifiée de Liège Tome IV, Les nouveaux forts*. Erp : Ed. de Krijger, 2001, 204 pages.
- COENEN, EMILE, VERNIER, FRANCK, *La position Fortifiée de Liège Tome V, Les forts de la Meuse modernisés*. Erp : Ed. de Krijger, 2004, 224 pages.
- COENEN, EMILE, VERNIER, FRANCK, *La position Fortifiée de Liège Tome VI, Les abris de la PFL n°3*. Erp : Ed. de Krijger, 2006, 96 pages.
- *Collection nationale Civisme*, 1952, n°11.
- *Etudes toulouses*, 2012, n°141.
- FRIJNS, MARCO, MALCHAIR, LUC, MOULINS, JEAN-JACQUES, PUELINCKX, JEAN, *Index de la fortification française 1874-1914*. Welkenraedt : Ed. Auto-edition, 2008, 832 pages.
- HALLOT, PIERRE, *Brève introduction aux techniques de documentation géométrique du patrimoine bâti*, Uliège, 2015, 74 pages.
- HARLEPIN, JEAN, *Renforcement et Réarmement des Forts de la Meuse, période 1927-1939, tome 1*. Bruxelles : Ed. inc., 1993, 200 pages.

- JONLET, LIONEL, *Les abris de la Position Fortifiée de Liège situés entre les forts d'Aubin-Neufchâteau et de Battice*. Verviers : Ed. compte d'auteur, 2011, 80 pages.
- LOMBARD, LAURENT, *Ceux de Liège, sous les ouragans d'acier*, Liège : Ed. G. Leens, 1938, 159 pages.
- MALCHAIR, LUC, *Marchovelette, un fort, deux guerres, trois outrages* (seconde édition). Grâce-Hollogne : Ed. Comité de Sauvegarde du Patrimoine Historique du Fort d'Hollogne, 2015, 253 pages.
- MOXHET, FERNAND, GERARD, FERNAND, *Loncin, le fort héroïque*. Loncin : Ed. Front de Sauvegarde du Fort de Loncin, 2014, 144 pages.
- SOUDAGNE, JEAN-PASCAL, MANSUY, MICHEL, *Comprendre la ligne Maginot*, Rennes : Ed. Ouest-France, 2009, 139 pages.
- SOUDAGNE, JEAN-PASCAL, *Histoire de la ligne Maginot*. Rennes : Ed. Ouest-France, 2011, 156 pages.
- SOUDAGNE, JEAN-PASCAL, *Histoire de la ligne Maginot*. Rennes : Ed. Ouest-France, 2006, 127 pages.
-
- TIXHON, AXEL, BRASSINE, MELODIE, BRAGARD, PHILIPPE, *La province de Namur au cœur de la grande guerre, guide du visiteur*. Namur : Ed. province de Namur, 2016, 70 pages.
- TRUTTMANN, PHILIPPE, *La barrière de fer*. Thionville : Ed. Gerard Klopp, 2000, 544 pages.
- TRUTTMANN, PHILIPPE, *La muraille de France ou la ligne Maginot* (seconde édition). Thionville : Ed. Gerard Klopp, 2009, 256 pages.
- VERNIER, FRANCK, *Le calvaire des forts belges sous les coups de la Grosse Bertha, Liège – Namur – Anvers*. Verviers : Ed. du Patrimoine Militaire, 2014, 171 pages.
- VERNIER, FRANCK, *Le fort d'Eben-Emael, tome 1 : genèse et description de l'ouvrage*. Verviers : Ed. du Patrimoine Militaire, 2011, 99 pages.
- VERNIER, FRANCK, *Le fort d'Eben-Emael, tome 2 : son armement, ses cuirassements*. Verviers : Ed. du Patrimoine Militaire, 2013, 107 pages.
- VERNIER, FRANCK, *1929-1940, Les forts de Namur, tome 1*. Ed. du Patrimoine Militaire, 2017, 194 pages.
- VERNIER, FRANCK, *1929-1940, Les forts de Namur, tome 2*. Ed. du Patrimoine Militaire, 2018, 130 pages.
- VIATOUR, MICHEL, *Seul entre Meuse et Ourthe, le fort de Bonnelles, tome 1 : août 1914-mai 1940*. Liège : Ed. de la province de Liège, 2014, 168 pages.

- VIATOUR, MICHEL, *Seul entre Meuse et Ourthe, le fort de Bonnelles, tome 2 : mai 1940*. Liège : Ed. de la province de Liège, 2015, 118 pages.

Références internet :

- FORTIFF'SERE.FR, *Les fortifications Séré de Rivières*, [en ligne], disponible sur : <http://fortiffsere.fr/>
- PORTAIL DE LA FEDERATION WALLONIE-BRUXELLES, *La ceinture fortifiée d'Anvers et le « réduit national »*, [en ligne], disponible sur : <http://www.commemorer14-18.be/index.php?id=9342>
- CULTURE ET SOCIETE : LA REVUE TOUDI, *La politique belge et la Wallonie (1920-1940)*, [en ligne], disponible sur : <http://www.larevuetoudi.org/fr/story/la-politique-militaire-belge-et-la-wallonie-1920-1940>
- FORT STEYNARD, *L'artillerie du XIX^{ème} siècle*, [en ligne], disponible sur : <http://www.fortsteynard.com/artillerie.html>
- FORTIFICATION ET MEMOIRE : LE SITE DES PASSIONNES – DE VAUBAN A TODT, *Les fortifications du Chemin des dames : le fort de la Malmaison*, [en ligne], disponible sur : <http://fortificationetmemoire.fr/le-fort-de-la-malmaison/>
- LES FORTIFICATIONS DE VAUBAN, PATRIMOINE MONDIAL DE L'UNESCO, *La fortification bastionnée*, [en ligne], disponible sur : <http://www.sites-vauban.org/Fortification-bastionnee>
- ART VISUEL, *Les fortifications*, [en ligne], disponible sur : <http://megane14.blogspot.com/2012/01/les-fortifications.html>
- BELGIUM.BE, *La Belgique à partir de 1830*, [en ligne], disponible sur : https://www.belgium.be/fr/la_belgique/connaitre_le_pays/histoire

Fonds d'archives :

- Fond QGT : Boîtes 73, 74, 91, 137, 198, 266, 267, 473.
- Fond Moscou : Boîtes 88, 154, 219, 248, 277, 338, 425, 455, 493, 705, 792, 1218, 1472, 1964, 2293, 2378, 2465, 2678, 2838, 2832, 3101, 3172, 3219, 3664, 3371, 4050, 4078, 4321, 4477, 4645, 4660, 4670, 4869, 4870, 4892.

Partie digitale:

Ouvrages :

- ABDELMONEM GAMAL, MOHAMED, ABDULLA M. ALBASHIR, KHAIRI, *Virtual heritage : global perspectives for creative modes of heritage visualisation*. Nottingham : Ed. Virtual heritage for Cairo, 2017, 62 pages.
- ABDELMONEM GAMAL, MOHAMED, *Navigating Virtual Heritage Applications for Historic Cities in the Middle East*, in : *Through the looking Glass, Back to the future of VR*. Dublin, 2017, 8 pages.
-
- ABDELMONEM GAMAL, MOHAMED, SELIM, GEHAN, MUSHATAT, SABAH, ALMORGEN, ABDELAZIZ, *Virtual Platforms for heritage preservation in the middle East : The case of medieval Cairo*, in : *International Journal of Architectural Research* 11. Caire, 2017, 14 pages.
- ABIODUN GANIYU, SIKIRU, *Identifying Knowledge Domains for Integration of Experiential Knowledge into BIM implementation for improved decision-making in Heritage Buildings*, in : *International conference on heritage building information modeling (HBIM)*. Londres, 2018, 17 pages.
- ANTONIO CUBA SEGURA, JOSE, LEBEGUE ÉRIC, (dir.). *Conduire un projet de construction à l'aide du BIM*. Paris : Ed. Eyrolles, 2016, 84 pages.
- ANTONOPOULOU, SOFIA, BRYAN, PAUL, *BIM for heritage : developing a historic building information model*. Swindon : Ed. Historic England, 2017, 78 pages.
- *Atrium construction*, 2015, n°70.
- BAIK, AHMAD, *From point cloud to Jeddah Heritage BIM Nasif historical house-case study*, in : *Digital applications in archaeology and cultural heritage*. Rome, 2019, pp. 1-58.
- BILLEN, ROLAND, JONLET, BENOIT, LUCZFALVY JANCZO, NEUVILLE, ROMAIN, NYS, GILLES-ANTOINE, POUX, FLORENT, VAN RUYMBEKE, MURIEL, PIAVAUX, MATHIEU, HALLOT, PIERRE, *La transition numérique dans le domaine du patrimoine bâti : un retour d'expérience*, in : *BULLETIN DE LA COMMISSION ROYALE DES MONUMENTS, SITES ET FOUILLES - Tome 30*. Namur : Ed. Commission royale des Monuments, Sites et Fouilles de la Région wallonne, pp. 121-148.
- BRUNO, SILVANA, DE FINO, MARIELLA, FATIGUSO, FABIO, *HBIM-Aided refurbishment process of Cultural Heritage*, in : *Conference back to 4.0 : Rethinking the digital construction industry*, 2016, 69 pages.
- CELNIK, OLIVIER, LEBEGUE, ERIC, *BIM & maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction* (seconde édition). Paris : Ed. Eyrolles, 2015, 764 pages.
- CHANDELIER, LAURE, HENO, RAPHAËLE, *Numérisation 3D de bâtiments, cas des édifices remarquables*. Londres : Ed. ISTE, 2014, 174 pages.

- DE MAESTRI, ANNALISA, *Premiers pas en BIM, l'essentiel en 100 pages*. Paris : Ed. Eyrolles, 2017, 104 pages.
- FAI, STEPHEN, GRAHAM, KATIE, DUCKWORTH, TODD, WOOD, NEVIL, ATTAR, RAMTIN, *Building information modelling and heritage documentation*, in : XXIII International CIPA Symposium, 2011, Prague, 8 pages.
- FAI, STEPHEN, FILIPPI MAURO, PALIAGA SILVA, *Parametric modeling (BIM) for the documentation of vernacular construction methods : a BIM model for the commissariat building, Ottawa, Canada*, in : XXIV International CIPA Symposium, 2013, Strasbourg, 6 pages.
- FAISAL ALI, SYED, *BIM Applications for maintenance and management of heritage buildings : Case study on the London Bridge Station*, in : International conference on heritage building information modeling (HBIM). Londres, 2018, 19 pages.
- FORD, MIKE, *Digital Heritage : Can new working methods work in old buildings ?*, in : International conference on heritage building information modeling (HBIM). Londres, 2018, 37 pages.
- FAY, ROGER, OWEN, CERIDWEN, in *BEPD Environment Design Guide.*, CAS 53, 2008, pp. 1-12.
- GARAGNANI, S., MANFERDINI, A. M., *Parametric accuracy: Building Information Modeling process applied to the cultural heritage preservation*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Commission V, WG V/4, 2013, pp. 87-92.
- GUARNIERI, A., FISSORE, F., MASIERO, A., VETTORE, A. *From TLS survey to 3D solid modeling for documentation of built heritage : The case study of Porta Savonarola in Padua*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2017, pp. 303-308.
- GUEZO, JULIE, NAVARRA, PIERRE, *Revit pour les architectes, bonnes pratiques BIM* (seconde édition). Paris : Ed. Eyrolles, 2018, 516 pages.
- HICHRI, NOUHA, STEFANI, CHIARA, DE LUCA, LIVIO, VERON, PHILIPPE, HAMON, GAEL, *From point cloud to BIM : a survey of existing approaches*, in : XXIV International CIPA Symposium, 2013, Strasbourg, 8 pages.
- MAXWELL, INGVAL, *Integrating digital technologies in support of historic building information modelling : BIM4Conservation (HBIM)*. Londres : COTAC report, 2014, 50 pages.
- MAXWELL, INGVAL, *BIM4Heritage : Where we are and where we are going*. Londres : COTAC report, 2017, 65 pages.
- NIETO, JUAN ENRIQUE, MOYANO, JUAN JOSE, RICO FERNANDO, ANTON DANIEL, *Management of built heritage via the HBIM project : a case study of flooring and wall tiling*, in : Virtual archaeology review, 7 (14), 2016, pp. 1-12.

- RAHAMAN, HAFIZUR, *Virtual Heritage : Reality and criticism*, in : CAADfutures. Montreal, 2009, 15 pages.
- RODRIGUEZ-GONZALVEZ, PABLO, MUNOZ-NIETO, ANGEL LUIS, DEL POZO, SUSANA, SANCHEZ-APARICIO, LUIS JAVIER, GONZALEZ-AGUILERA, DIEGO, MICOLI, LAURA, GONIZZI BARSANTI, SARA, GUIDI, GABRIELE, MILLS, JON, FIEBER, KAROLINA, HAYNES, IAN, HEJMANOWSKA, BEATA, *4D reconstruction and visualization of cultural heritage : analyzing our legacy trough time*, in : 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, Nafplio, 2017, pp. 609-616.
- RONDEAU, MARIE-CAROLINE, « Révélation des cathédrales sous le laser du Scanner 3D », in : *Reporter 68 : le magazine mondial de Leica Geosystems*, 2013, pp. 3-6.
- ROUMAIN DE LA TOUCHE, MAXIME, *L'intégration du scanner 3D dans le processus BIM (réhabilitation)*. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. <dumas-01179621>
- SCAYSBROOK, STEPHEN, *HBIM for heritage projects*, in : International conference on heritage building information modeling (HBIM). Londres, 2018, 6 pages.
- SKIBNIEWSKI, MIROSLAW, *The present and the future of BIM in historical building preservation*, in : International conference on heritage building information modeling (HBIM). Londres, 2018, 22 pages.
- VILBRANDT, CARL, PASKO, GALINA, PASKO, ALEXANDER, FAYOLLE, P.A., VILBRANDT, T., GOODWIN, J.R., GOODWIN, J.M., KUNII, T.L., *Cultural heritage preservation using constructive shape modeling*, in : Computer Graphics Forum, 2014, 19 pages.
- Brochure d'information, *A propos de « scanpyramids »*. Caire : Ed. HIP insitute, 2016, 22 pages.

Références internet :

- ABCD BLOG, *Grace à l'expertise de SolidPoint, le patrimoine Revit en BIM, l'exemple de Repton School dans le Derbyshire*, [en ligne], disponible sur : <https://abcdblog.typepad.com/abcd/2017/09/grace-a-l-expertise-de-solidpoint-le-patrimoine-revit-en-bim-l-exemple-de-repton-school-dans-le-derbyshire.html>
- ALICE : LABORATOIRE D'INFORMATIQUE POUR LA CONCEPTION ET L'IMAGE EN ARCHITECTURE, *La maison de l'amiral : enjeux et analyse du relevé architectural*, Lise Braarup Cuykens, [en ligne], disponible sur : http://www.alicelab.be/tfe/La_Maison_de_l_Amiral_enjeux_et_analyse_du_relev_e_architectural/359/
- ALICE : LABORATOIRE D'INFORMATIQUE POUR LA CONCEPTION ET L'IMAGE EN ARCHITECTURE, *réflexions sur la représentation graphique d'une restitution hypothétique, application au cloître de l'abbaye de Villers-la-Ville*, Vanessa Lardinois, [en ligne], disponible sur : http://www.alicelab.be/tfe/Reflexions_sur_la_representation_graphique_d_une_restitution_hypothetique/289/

- ALICE : LABORATOIRE D'INFORMATIQUE POUR LA CONCEPTION ET L'IMAGE EN ARCHITECTURE, *Vers une sauvegarde numérique du patrimoine*, Anthony Pamart, [en ligne], disponible sur :
http://www.alicelab.be/tfe/Vers_une_Sauvegarde_Numerique_du_Patrimoine_Industriel/288/
- ARCHITECTURA.BE, *les institutions et le BIM*, Abdelkader Boutemadja, [en ligne], disponible sur :
<https://architectura.be/fr/actualite/13472/les-institutions-et-le-bim-abdelkader-boutemadja>
- ARCHITECTURA.BE, *Visualisation et modélisation BIM 4D avec Sketchup, D Studio*, [en ligne], disponible sur :
<https://architectura.be/fr/actualite/13590/visualisation-et-modelisation-bim-4d-avec-sketchup-d-studio>
- ART GRAPHIQUE ET PATRIMOINE, *Références, la villa Majorelle*, [en ligne], disponible sur :
<http://www.artgp.fr/bim-villa-majorelle.html>
- BIM4HERITAGE.ORG, [en ligne], disponible sur :
<http://bim4heritage.org/index.html>
- BIM TODAY, *Laser scans of Notre Dame could help reconstruct historic building*, [en ligne], disponible sur :
<https://www.pbctoday.co.uk/news/bim-news/laser-scans-notre-dame/55672/>
- DASSAULT SYSTEMES, *GIZA 3D, a unique journey to the giza plateau*, [en ligne], disponible sur :
<https://www.3ds.com/stories/giza-3d/>
- DASSAULT SYSTEMES, *Paris 3D, an interactive journey through time*, [en ligne], disponible sur :
<https://www.3ds.com/stories/paris-3d/>
- DASSAULT SYSTEMES, *What is BIM level 3*, [en ligne], disponible sur :
https://blogs.3ds.com/perspectives/what-is-bim-level-3/#_ga=2.53054190.754090283.1554629025-7be3a5a0-5916-11e9-9e97-e300f74b421a
- DASSAULT SYSTEMES, *Simulation helps save the world's architectural heritage*, [en ligne], disponible sur :
https://blogs.3ds.com/perspectives/simulation-helps-save-the-worlds-architectural-heritage/#_ga=2.31306751.139661082.1554629109-7be3a5a0-5916-11e9-9e97-e300f74b421a

- DIGITALINC : BIM EXPERTS ON DEMAND, *Heritage BIM – the importance of a BIM-ready survey*, [en ligne], disponible sur :
<https://digitalinc.net/2017/11/15/heritage-bim-the-importance-of-a-bim-ready-survey/>
- GRALON, *Paris 3D : immergez-vous dans l’histoire de la capitale !*, [en ligne], disponible sur :
<https://www.gralon.net/articles/art-et-culture/architecture/article-paris-3d---immergez-vous-dans-l-histoire-de-la-capitale--6486.htm>
- GIM INTERNATIONAL, *Heritage BIM on the move*, [en ligne], disponible sur :
<https://www.gim-international.com/content/article/heritage-bim-on-the-move>
- METHODE BTP, *Capture 3D par photogrammétrie*, [en ligne], disponible sur :
<https://methodesbtp.com/articles/capture-3d-photogrammetrie/>
- SOLIDPOINT, *Pears Hall of Repton School, Derbyshire*, [en ligne], disponible sur :
<http://www.solidpoint.co.uk/2017/09/05/repton-school-derbyshire/>
- THE CONVERSATION, *Preservationists race to capture cultural monuments with 3D images*, [en ligne], disponible sur :
<https://theconversation.com/preservationists-race-to-capture-cultural-monuments-with-3d-images-53536>
- TEKLA, *Le BIM pour un bâtiment emblématique du patrimoine architectural du XVII^e siècle*, [en ligne], disponible sur :
<https://www.tekla.com/fr/r%C3%A9férences/le-bim-pour-un-b%C3%A2timent-embl%C3%A9matique-du-patrimoine-architectural-du-xvii%C3%A8cle>

Lexique :

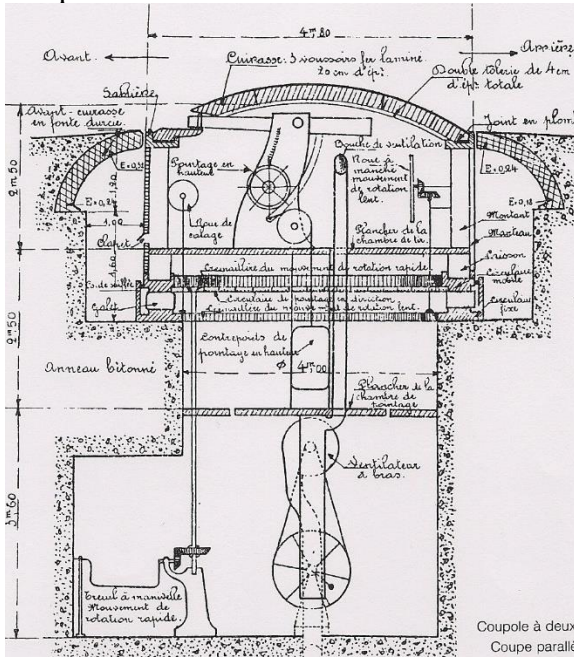
<u>Abri :</u>	Petit bâtiment bétonné servant à abriter des soldats. Il dispose d'une puissance de feu et parfois de moyens de défense rapprochée. <i>Def. Personnelle.</i>
<u>Bastion :</u>	Ouvrage polygonal à deux faces et deux flancs en saillie sur une enceinte. <i>Def. 1^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>
<u>Batterie</u>	Position ou ensemble de positions de tir des pièces d'artillerie. <i>Def. 2^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>
<u>Caponnière :</u>	Dans un ouvrage polygonal, casemate défilée à un ou deux étages de canons ou mousqueterie, destinée au flanquement des fossés. <i>Def. 1^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>
<u>Contrescarpe (Contre-escarpe) :</u>	Paroi extérieure d'un fossé de fortification. <i>Def. 1^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>
<u>Courtine :</u>	Mur joignant les flancs de deux bastions voisins. <i>Def. 1^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>
<u>Couple :</u>	Partie supérieure d'un blindage, dont le bombement facilite le ricochet des projectiles qui l'atteignent. <i>Def. 2^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>
<u>Cuirassement :</u>	Construction métallique blindée protégeant des éléments actifs de la fortification en usage depuis 1875. <i>Def. 3^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>
<u>Embrasure :</u>	Ouverture pratiquée dans un ouvrage fortifié pour permettre le tir d'une arme à feu. <i>Def. 4^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>
<u>Escarpe :</u>	Paroi intérieure d'un fossé de fortification. <i>Def. 1^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>
<u>Demi-lune :</u>	Fortification avancée et couvrant la courtine. <i>Def. 1^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>

<u>Fort :</u>	Ouvrage de fortification autonome et fermé, destiné à défendre isolément un point important. <i>Def..1^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>
<u>Galerie en capitale :</u>	Nom donné à la galerie centrale d'un fort. Celle-ci matérialise souvent l'axe de symétrie de l'ouvrage. Def. Personnelle.
<u>Redoute :</u>	Petit ouvrage de fortification isolé, fermé, de forme carrée. <i>Def..1^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>
<u>Parapet :</u>	Massif de maçonnerie ou de terre protégeant les défenseurs d'un rempart ou d'une tranchée tout en leur permettant de faire usage de leurs armes. <i>Def..2^e Dictionnaire Larousse, 2018.</i>

Annexe I : armement

Armement en 1914

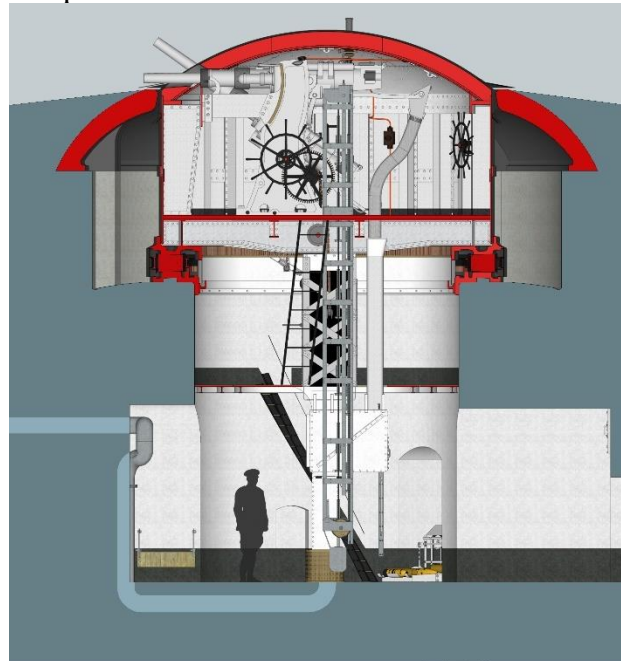
Coupoles de 12 cm :



BASTIN, DANIEL, *Les forts de Pontisse et de Liers, frères d'armes herstaliens*, Bruxelles : Ed. Memogrames, 2007, page 30.

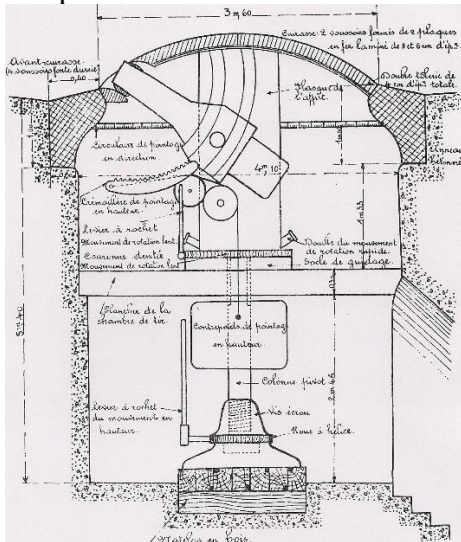
Réarmement en 1940

Coupoles de 105 mm :



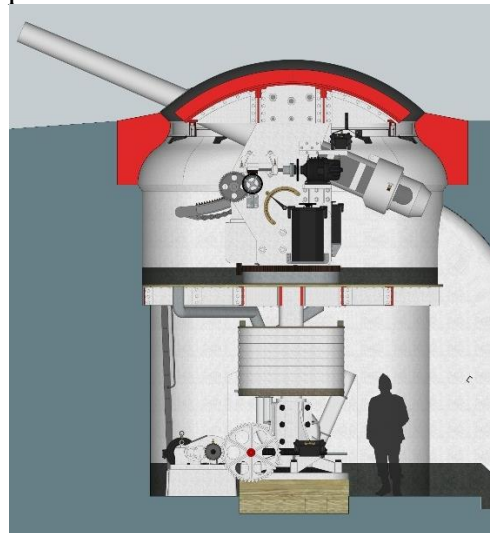
Travail personnel.

Coupoles de 21 cm :



BASTIN, DANIEL, *Les forts de Pontisse et de Liers, frères d'armes herstaliens*, Bruxelles : Ed. Memogrames, 2007, page 33.

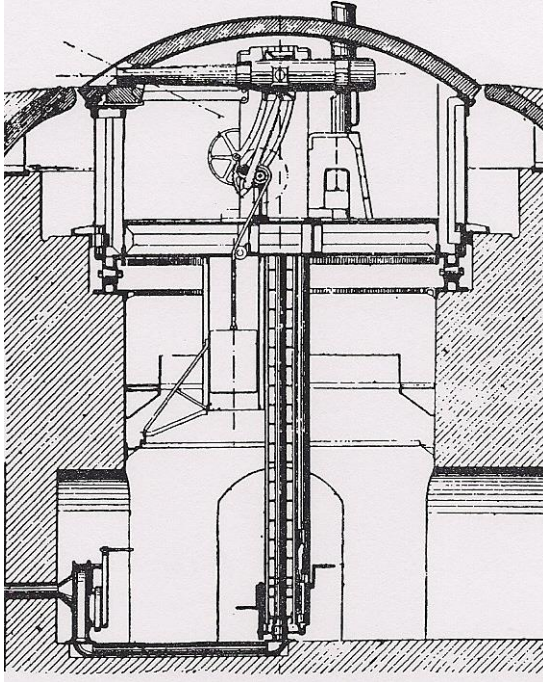
Coupoles de 150 mm :



Travail personnel.

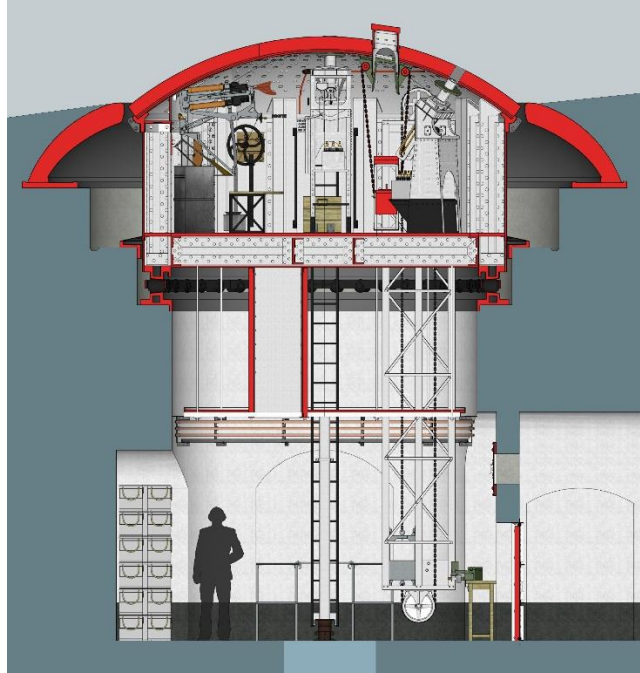
Annexe I : armement

Coupoles de 15 cm :



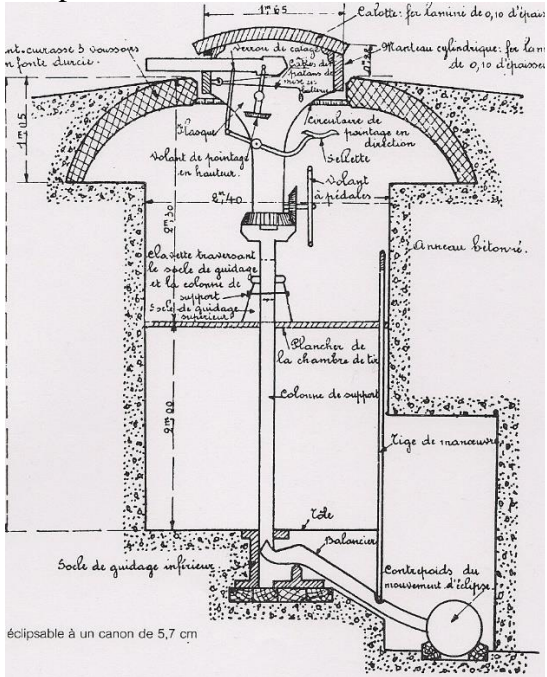
BASTIN, DANIEL, *Les forts de Pontisse et de Liers*,
frères d'armes herstaliens, Bruxelles : Ed.
Memograms, 2007, page 27.

Coupoles Mitrailleuses-Lance-grenades :



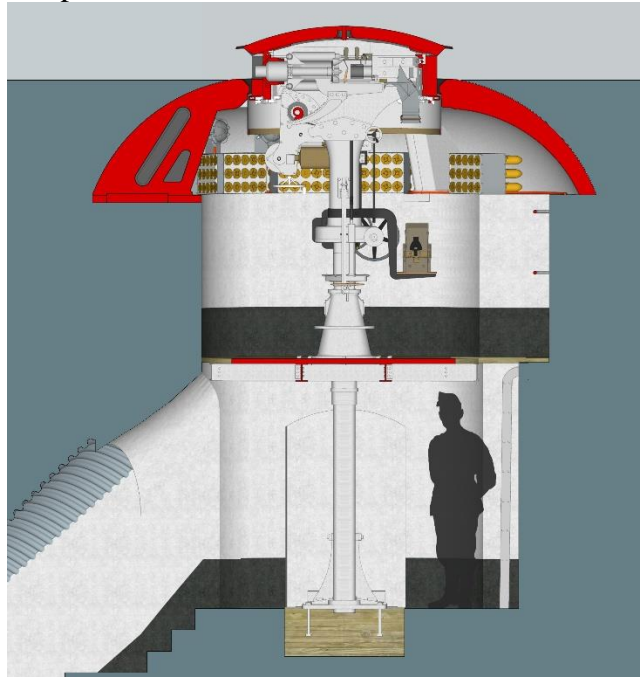
Travail personnel.

Coupoles de 5.7 cm :



BASTIN, DANIEL, *Les forts de Pontisse et de Liers*,
frères d'armes herstaliens, Bruxelles : Ed.
Memograms, 2007, page 36.

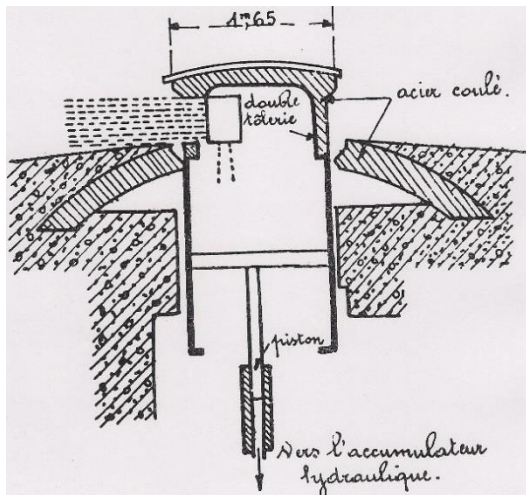
Coupoles de 75 mm :



Travail personnel.

Annexe I : armement

Coupoles phare :



BASTIN, DANIEL, *Les forts de Pontisse et de Liers, frères d'armes herstaliens, Bruxelles : Ed. Memogrames, 2007, page 40*

Poste d'observation cuirassé (POC) :

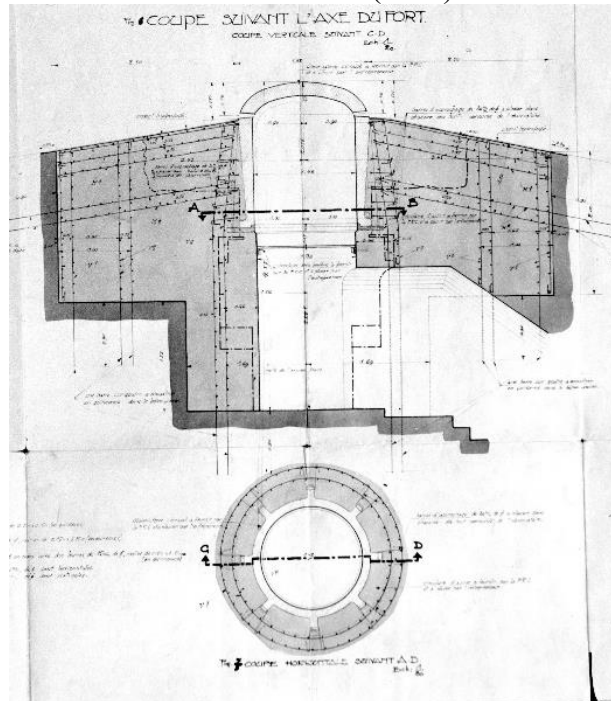
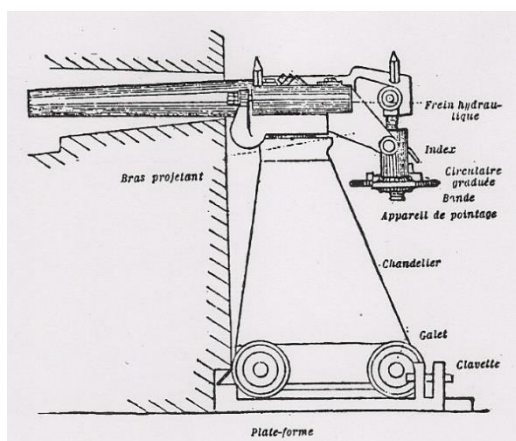


Photo Francis Tirtiat.

Fusil-mitrailleur FM Browning Mod 30 :



BASTIN, DANIEL, *Les forts de Pontisse et de Liers, frères d'armes herstaliens, Bruxelles : Ed. Memogrames, 2007, page 39.*



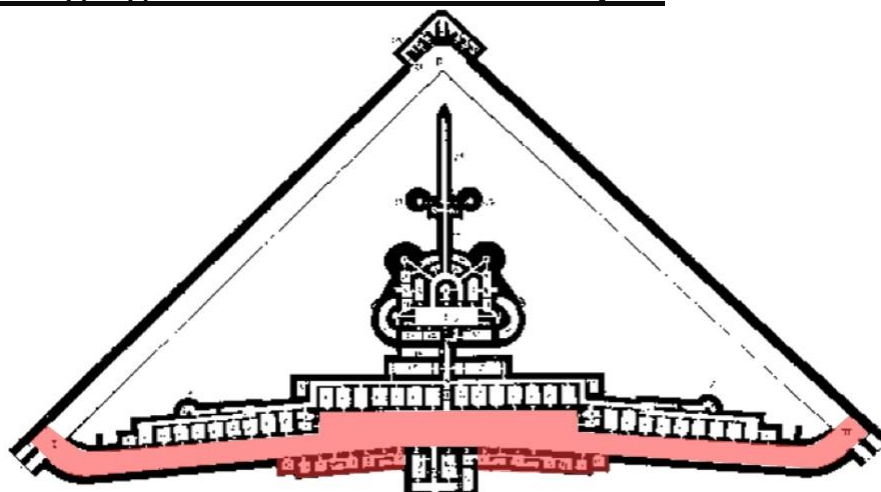
Travail personnel.

Annexe II : Fort Brialmont « type »

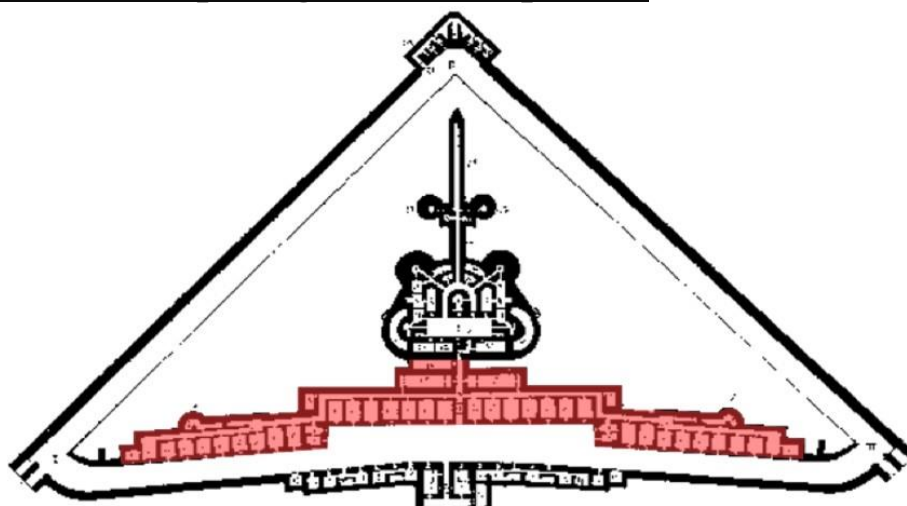
1) Entrée du fort :



2) Fossé de gorge et locaux de contrescarpe :

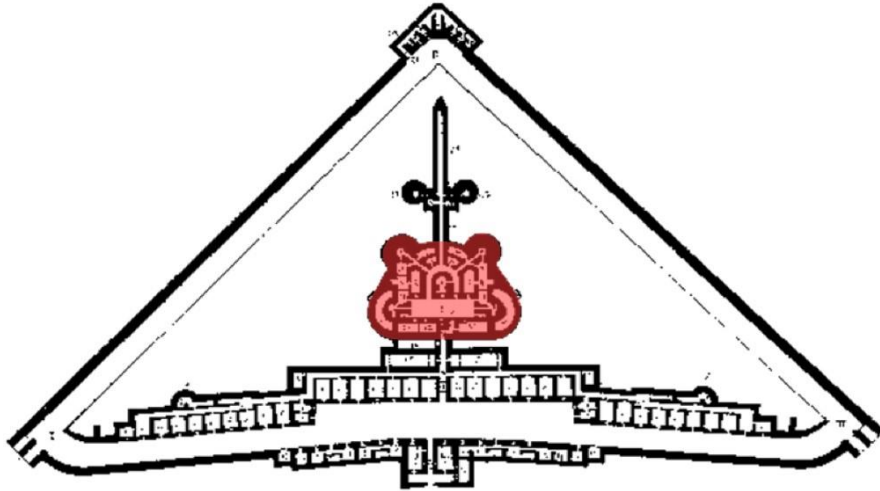


3) Locaux d'escarpe et galerie en capitale :



Annexe II : Fort Brialmont « type »

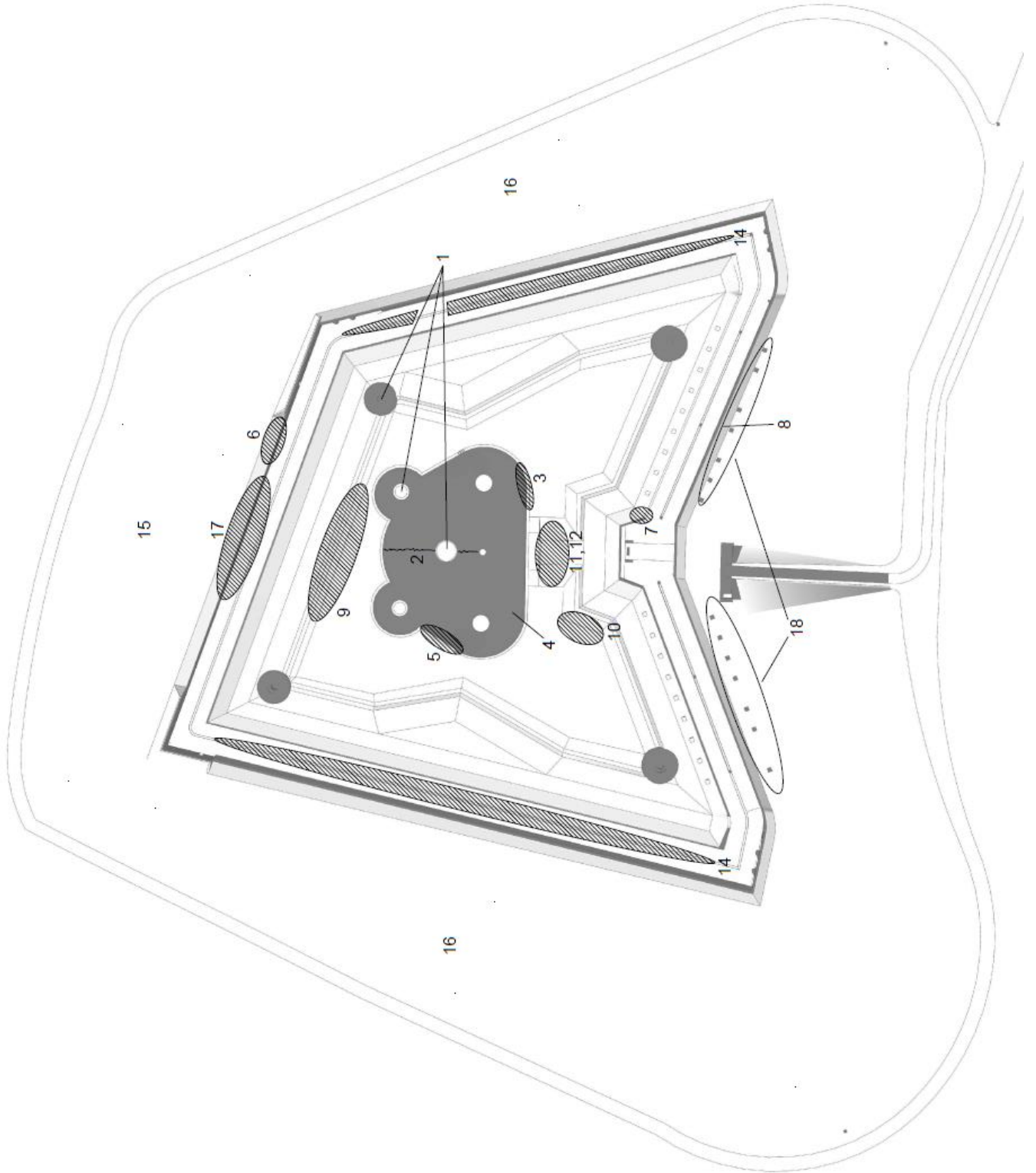
4) Massif central :



5) Coffre de tête :



Annexe III : plan des combats de 1914



Annexe V : Vestiges d'installation électrique dans nos forts



Fixations galvanisées « types » : l'écartement et la proximité d'un phare permet de dire qu'il s'agissait de l'emplacement d'un transformateur. Fort de Flémalle (photo personnelle).



Support métallique et isolateurs électriques : arrivée d'une ligne électrique aérienne. Fort de Bonnelles (photo personnelle).



Reste d'installation électrique: câbles CHB, colliers, boîte de dérivation simple et prise électrique. Fort de Fléron (photo personnelle).

Annexe V : Vestiges d'installation électrique dans nos forts



Moteur de commande d'un monte-charge. Fort de Fléron (photo personnelle).



Traces d'installation de charge des batteries de téléphones. Fort de Fléron (photo personnelle).



Trace d'équipement inconnu, prise et boîte de dérivation. Bloc opératoire, fort de Fléron (photo personnelle).

Annexe V : Vestiges d'installation électrique dans nos forts



Emplacement d'un tableau de distribution : câble armé dans le mur et fixations métalliques. Quadrilatère, fort de Flémalle (photo personnelle).



Tracé du passage d'un câble CHB : colliers, légère décoloration au niveau de la peinture. Bureau de tir, fort de Flémalle (photo personnelle).



Supports de fixation d'un régulateur d'excitation et d'un disjoncteur automatique à bain d'huiles. Caniveau à câbles rebouché par des débris. Salle des machines, fort de Flémalle (photo personnelle).

Annexe VI : Eléments électriques particuliers utilisés dans les forts belges

Prise électrique :



Photo personnelle

Interrupteur :



Photo personnelle

Boîte de dérivation :



Photo personnelle

Bague d'identification d'un câble armé :



Photo personnelle

Annexe VII : chaîne de traitement Dynamo

