

RECONSTITUTION CARTOGRAPHIQUE DU RÉSEAU SOUTERRAIN DES ANCIENNES FORTIFICATIONS GENEVOISES

CERTIFICAT COMPLÉMENTAIRE EN GÉOMATIQUE

Rapport de stage

Office du Patrimoine et des Sites

Juan Felipe Aguilera Barreto

Sous la direction de :

Alain Dubois (UNIGE -HEPIA)

Hy Dao (UNIGE)

Matthieu de la Corbière (OPS)

Paola Bozonet (OPS)



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**



REPUBLIQUE
ET CANTON
DE GENÈVE

POST TENERAS LUX

Résumé

Dans le cadre des modifications adoptées en 2020 par la Loi sur la protection des monuments, de la nature et des sites (LPMNS), les souterrains des anciennes fortifications ont obtenu une mesure de protection patrimoniale. À cet égard, le Service de l'inventaire des monuments et des sites (IMAH) a été chargé de produire une cartographie de l'ancien réseau des galeries de contre-mines publiable sur le Système d'information du territoire genevois (SITG). Dans ce cadre, un stage a été proposé afin de répertorier les galeries connues sur la base de la documentation historique et des relevés récents, reconstituer les tronçons supposés et catégoriser les différents fragments.

À l'aide des outils géomatiques, l'information historique est prise comme un support pour affiner l'inventaire patrimonial et pour formaliser les mesures de protection par le biais d'un plan de synthèse officiel. Les sources documentaires ont été géoréférencées et vectorisées pour leur donner des propriétés attributaires de datation, valeur patrimoniale et état de conservation parmi d'autres. La vectorisation des éléments relevés a permis de reconstituer les fragments supposés à l'aide des sources bibliographiques. Ainsi, une restitution de l'emprise des ouvrages a été produite et une zone de risque qui favorise leur protection en cas de creusements a été ajoutée.

En conséquence, deux couches de données vectorielles ont été produites avec leurs attributs et pièces jointes. L'une concerne les mesures de protection et l'autre montre le réseau original des galeries de contre-mines. En outre, une expérience de modélisation 3D a été réalisée à partir des nuages de points obtenus lors de l'enquête mandatée par la DIT.

Remerciements

La réalisation de ce stage a été possible grâce à la contribution de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Tout d'abord, je voudrais adresser toute ma reconnaissance au directeur de ce stage, Monsieur Alain DUBOIS, qui m'a soutenu et encouragé dans chaque étape du processus. Grâce à sa patience, sa sagesse et à sa pleine disponibilité les réflexions sont allées beaucoup plus loin.

Je désire aussi remercier tous les membres de l'équipe d'encadrement de l'OPS qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite du stage. À Madame Paola BOZONET, pour sa gentillesse son soutien et ses précieux conseils. À Monsieur Andreas STUSSI pour son assistance technique et ses éclaircissements.

Je tiens à remercier spécialement Monsieur Matthieu DE LA CORBIÈRE pour le suivi attentif de mon travail ainsi que pour toutes les visites et les discussions qui m'ont permis de connaître un peu de la riche histoire genevoise.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à Monsieur Hy DAO et Madame Nicole Efrancey, qui ont été les premiers à me faire découvrir l'opportunité de faire ce stage et qui ont toujours été disponibles pour me conseiller.

Un grand remerciement envers mes amis et collègues qui m'ont soutenu dans la correction de mon écriture. Pour cela, pour leur accueil et pour tous les bons moments au cours du CCG je tiens à remercier Lucas ALLEMAND, Tiffany BORELLA, Camila DEMONEKY, Marissa EICHENBERGER, Ella FAIST, Hélène RAUD et Maria Alejandra SABOGAL

Enfin, je tiens à témoigner toute ma gratitude à mon père pour son soutien inestimable. *Sin ti papa, y sin mama que nos cuida, nada sería posible.*

Table de matières

Résumé.....	3
Remerciements.....	4
Table de matières.....	5
Table de figures.....	6
1.Introduction.....	7
1.1 Contexte du stage : Le Service de l’inventaire des monuments d’art et d’histoire et la Loi sur la protection des monuments, de la nature et des sites (LPMNS).....	8
1.2 Les anciennes fortifications de la ville de Genève et ses galeries de contre-mines.....	9
1.4 Les données : sources de compréhension de l’histoire et l’espace.....	14
2 Approche conceptuel et méthodologique :.....	20
2.1 Géoréférencement.....	20
2.1.1 Les points de contrôle :.....	22
2.2.2Transformation des rasters.....	23
2.2.3L’erreur quadratique moyenne.....	28
2.3Digitalisation des objets vectoriels.....	31
2.3.2 Représentation vectorielle.....	33
2.3.3 Relation topologique entre polygones.....	35
2.4 Hyperliens.....	37
3 Résultats.....	39
3.1 Une localisation au niveau du centimètre.....	40
3.2 Reconstitution vectorielle du réseau souterrain.....	45
3.2.1 Analyse topologique.....	50
3.3Attributs et pièces jointes.....	52
3.4 Livrables : un jeu de données et différents besoins.....	55
4. Modélisation 3D.....	58
5.Conclusion.....	61
Bibliographie.....	64
Annexes.....	67

Table de figures

Figure 1 - Organigramme du département du territoire et constitution de l'office du patrimoine et des sites (République et canton de Genève, www.ge.ch).....	9
Figure 2 - Evolution de l'enceinte fortifiée de Genève au cours du XVIIe siècle. Modifications proposées par Odet De La Noue (1607), par Christophe Tassion et Vandame (1630) et par Maximilien d'Yvoy (1685) (Winiger-Labuda, 2010, p.222, 226, 230).....	10
Figure 3 - Trois lignes de défense présentes dans le plan des fortifications de Guillaume Le vasseur Des Roques.....	11
Figure 4 - Réseau souterrain des anciennes fortifications proposé par Louis Blondel- Trois types de galeries identifiées: Galerie d'écoute , majeure et de contre-mines (Blondel, 1924).....	13
Figure 5 : Images des Archives de l'état de Genève (AEG), dossier Militaire N 17.	15
Figure 6- Exemple des esquisses présentées dans les articles de la revue GENAVA.....	16
Figure 7 - Plans produits par le GESDEC dans le XXe siècle, notamment pendant les années 1970 .	17
Figure 8 - résultat du scan effectué par le groupe GAVA dans le logiciel Scene 2go	18
Figure 9 -Visualisation des nuages de points et projections orthographiques 3D obtenues par la DIT et le GAVA	19
Figure 10- positionnement de raster à partir des données cibles.....	22
Figure 11 - Points de repérage des différents relevés pour ajouter les points de contrôle	23
Figure 12 – degrés de transformation affine (Desktop. ArcGIS, s.d).....	26
Figure 13 - Trace d'un pli dans le Plan N°251.86.2 du dossier d'archive GESDEC.....	27
Figure 14 Géoréférencement des images d'archive sur la base des relevés actuels	28
Figure 15 - erreur quadratique moyenne du géoréférencement de la projection orthographique 3d de la galerie François -Le-Fort.....	29
Figure 16 – Diagramme des types d'objets vectoriels.....	33
Figure 17 - Mensuration dans les nuages de points dans le logiciel CloudCompare	34
Figure 18 - Règles topologiques appliquées.....	37
Figure 19 - Points de contrôle et EQM du géoréférencement du plan 251.85.2	42
Figure 20 - sources de repérage dans les plans historique du GESDEC	43
Figure 21 - Digitalisation des galeries connues et documents de référence	45
Figure 22 - Mensuration de la largeur des galeries sur la base des projections orthographiques 3D...	46
Figure 23 - Digitalisation des fragments supposés sur la base de la documentation historique.....	47
Figure 24 - Lignes utilisées pour préserver les formes géométriques du réseau souterrain face à l'absence d'éléments connus. Les lignes ont permis de reconstituer des fragments supposés à partir de données éloignées de la zone.....	49
Figure 25 - Résultats de l'analyse topologique	51
Figure 26 - erreur d'ecart entre deux surfaces adjacentes.....	52
Figure 27 - Correction des erreurs topologiques et exceptions	52
Figure 28 - Fusion d'entités en fonction de la documentation historique.....	54
Figure 29 - Carte de reconstitution du réseau souterrain des anciennes fortifications. La symbologie permet de différencier le statut de chaque fragment et des zones de tampon ont été créées afin de mettre en évidence la structure des ouvrages et une zone à risque de découvertes potentielles.	56
Figure 30 - Carte des mesures de protection adoptés par la LPMNS d'après l'article 41. Les catégories établies par l'IMAH font référence au valeur patrimoniale des différents fragments du réseau. Les tronçons disparus ne sont pas représentés sur la carte.....	57
Figure 31 - Résultat de la modélisation 3D: contraste avec une photo fournie par l'IMAH et perspective inférieure du sous-sol	60

1 Introduction

Le présent document concerne le stage effectué durant quatre mois au sein de l'Office du patrimoine et des sites (OPS) afin de créer des informations géographiques sur les galeries souterraines des anciennes fortifications de Genève. Dans le cadre du Certificat Complémentaire en Géomatique proposé par l'UNIGE, différents partenariats avec des organismes publics et privés permettent aux étudiants d'avoir une expérience professionnalisante dans divers domaines. La proposition du stage lancée par le Service de l'inventaire des monuments d'art et d'histoire proposait la possibilité d'utiliser des outils géomatiques dans un but de protection patrimoniale.

Le besoin de créer une cartographie des souterrains des anciennes fortifications a émergé en raison des mesures légales adoptées à cet égard. Le travail a été donc consacré à reconstituer la structure des galeries de contre-mines des anciennes fortifications sur la base de la documentation historique et des relevés produits par différents organismes à plusieurs époques. L'intention principale était la production de données d'appui des mesures de protection.

À la suite de modifications apportées en 2020 à la Loi sur la protection des monuments, de la nature et des sites (LPMNS L4 05 du 4 juin 1976, art. 41A-J), les souterrains des anciennes fortifications de Genève ont été reliés aux mesures de protection patrimoniale. C'est pourquoi ce stage fut proposé comme le moyen de produire l'information géographique sur ces ouvrages en reconstituant le réseau à partir des galeries relevées.

Dans ce cadre, le travail a été mené à bien sous la supervision de la Direction de l'OPS, M. Matthieu de la Corbière, et avec le suivi du Prof. Alain Dubois en tant que directeur de stage. Du côté de l'organisation, un plan détaillé de travail a été proposé et des réunions hebdomadaires permettaient d'évaluer l'avancement du travail et de faire les corrections fur et à mesure que les résultats intermédiaires étaient partagés. En parallèle, le suivi scientifique a été assuré grâce à une communication constante et un soutien de la part du directeur.

Au niveau procédural, le travail consiste dans un premier temps à récupérer la documentation technique et historique sur les galeries connues. Des plans du XVIIIe et XIXe, des relevés géologiques et archéologiques des années 1970 et des données 3D prises en 2020 par la Direction de l'information du territoire ont été récupérés comme références. Également, des sources bibliographiques et des documents des archives historiques jouent un rôle pour l'analyse et la constitution des données.

L'intention principale du présent rapport est donc de parcourir le cheminement suivi au long du stage, mettre en avant les méthodes et concepts mobilisés afin de montrer les processus techniques qui ont permis d'obtenir un résultat rigoureux. Les différentes étapes franchies montrent comment les outils et les analyses géomatiques ont permis la mise en valeur du patrimoine en faisant le lien avec des disciplines telles que l'histoire, la géologie et l'archéologie.

1.1 Contexte du stage : Le Service de l'inventaire des monuments d'art et d'histoire et la Loi sur la protection des monuments, de la nature et des sites (LPMNS)

Le Département du Territoire est l'institution qui est responsable de piloter les dynamiques territoriales au niveau du canton de Genève. En tant qu'organisme de coordination du développement du territoire, une cohérence au niveau des politiques publiques doit être assurée entre les différentes branches sectorielles. Afin de garantir un développement maîtrisé des processus territoriaux, un dialogue entre différents domaines doit s'instaurer. En parallèle, une série d'organes proposent les lignes directrices pour porter une vision commune soutenue par les offices chargés de la gestion des informations.

L'Office du patrimoine et des sites est un organisme qui fait partie de la structure organisationnelle du Département du Territoire. Ses principaux axes de travail portent sur la protection du patrimoine genevois et l'identification des sites avec un potentiel patrimonial. Ainsi, grâce à la mise en valeur du patrimoine, une conservation des ouvrages historiques est possible dans le cadre d'un processus de densification urbaine prédatrice grâce à des mesures de protection légales.

Or, l'OPS est constituée de trois services qui s'occupent des tâches spécifiques et qui, ensemble, permettent de garantir la préservation du patrimoine en parallèle avec différents types de processus d'affectation du territoire. Le Service de l'inventaire des monuments d'art et d'histoire (IMAH), le Service Archéologique et le Service des monuments et des sites travaillent de façon concertée pour favoriser l'information patrimoniale au niveau du canton (Figure 1).

Dans ce cadre, l'IMAH est le service responsable de répertorier les éléments de valeur patrimoniale du canton et de produire l'information documentaire concernant ces éléments. C'est précisément dans cette optique que s'inscrit le propos du stage. À la suite des modifications adoptées dans la LPMNS, le Service a été responsable de produire la cartographie des souterrains des anciennes fortifications. Cette tâche demandait la reconstitution et

catégorisation des différents tronçons afin de publier les données sur le Système d'information du territoire genevois (SITG) et de créer un plan de synthèse ayant une valeur légale.

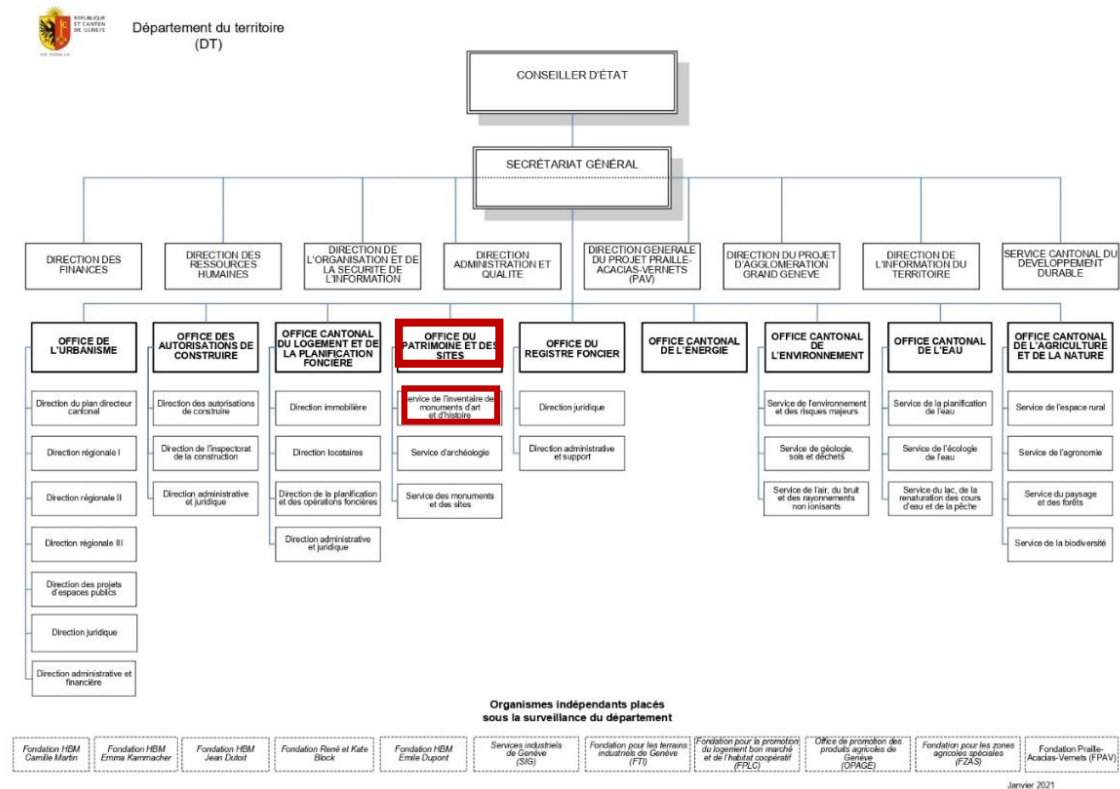


FIGURE 1 - ORGANIGRAMME DU DÉPARTEMENT DU TERRITOIRE ET CONSTITUTION DE L'OFFICE DU PATRIMOINE ET DES SITES (RÉPUBLIQUE ET CANTON DE GENÈVE, WWW.GE.CH).

Par conséquent, l'objectif majeur était de produire et catégoriser de façon rigoureuse l'information géographique des anciens souterrains sur la base de la documentation disponible. Dans ce sens, l'approche méthodologique devait être réellement affinée afin de générer un diagnostic précis de la situation et de donner une cohérence aux mesures de protection. Ainsi, la question principale qui est apparue pour guider le travail était de savoir comment mobiliser des outils géomatiques pour la reconstitution du réseau des galeries de contre-mines des anciennes fortifications à parties des projections orthographiques 3D et des documents historiques ?

1.2 Les anciennes fortifications de la ville de Genève et ses galeries de contre-mines

La ville de Genève n'a vécu aucune confrontation armée en milieu urbain depuis 1602. Juste après l'Escalade, un projet de rénovation de tous les fronts fortifiés de la ville a commencé.

Tout au long du XVII^e siècle les défenses de la ville ont été modifiées plusieurs fois sur la base de différents plans d'ensemble, celui de Vandame à partir de 1611 et après le plan Yvoy à partir de 1685 (Winiger-Labuda, 2010). Cela a empêché d'avoir un processus continu et méthodique de construction des fortifications. La structure a donc été renouvelée par le biais de projets partiels exécutés selon les priorités politiques de l'époque (Figure2).

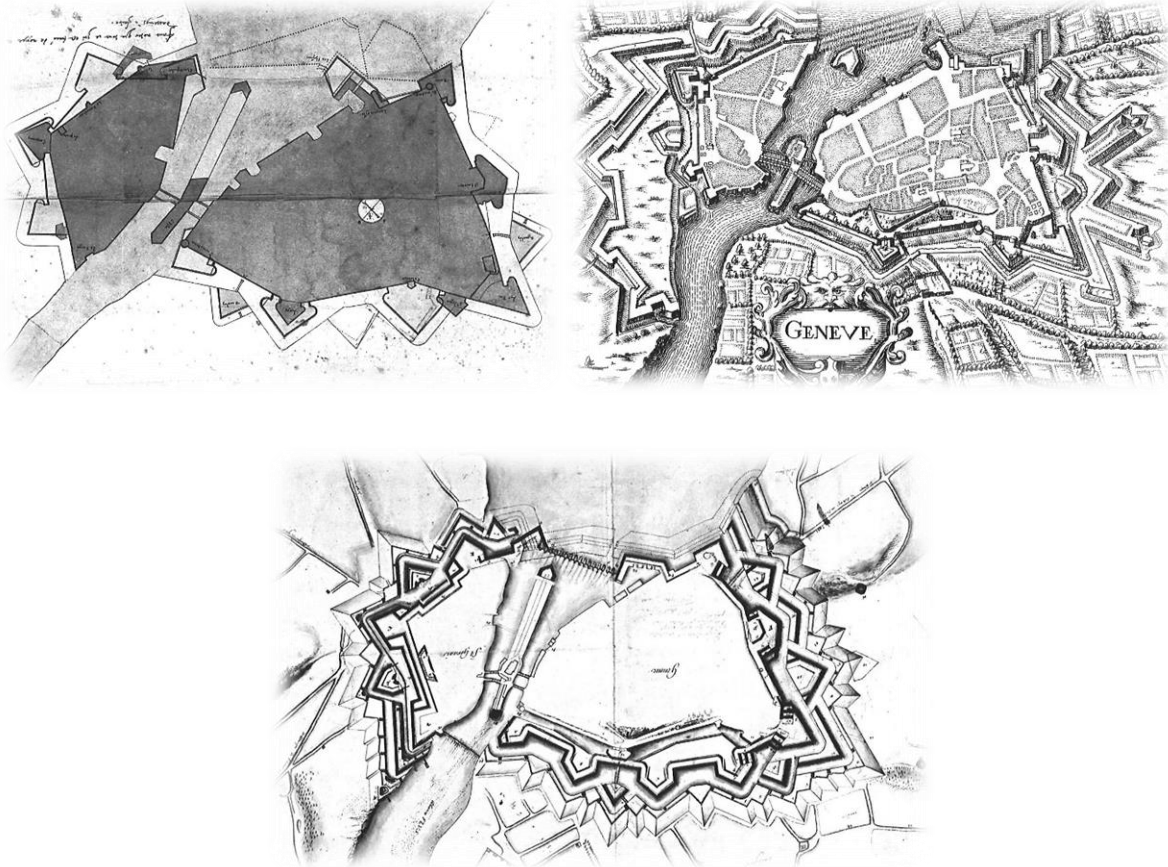


FIGURE 2 - EVOLUTION DE L'ENCEINTE FORTIFIÉE DE GENÈVE AU COURS DU XVII^e SIÈCLE. MODIFICATIONS PROPOSÉES PAR ODET DE LA NOUE (1607), PAR CHRISTOPHE TASSION ET VANDAME (1630) ET PAR MAXIMILIEN D'YVOY (1685) (WINIGER-LABUDA, 2010, P.222, 226, 230))

La campagne de renouvellement lancée comme une réponse à la tentative de siège par les savoyards a fini avec les derniers réaménagements de 1690. Cependant, une évolution des conditions et des techniques de combat et le contexte géopolitique de l'époque ont entamé le débat pour la poursuite d'un projet de perfectionnement des défenses de la ville basé sur un plan d'enceinte.

Dans ce contexte, après de plusieurs consultations et débats le projet d'enceinte de Guillaume Le Vasseur Des Rocques a été choisi en 1714 comme une réponse aux besoins d'adaptation des fortifications mais aussi comme un dispositif de régulation des processus d'expansion urbaine.

Le projet a été débuté en 1715 sur la base des plans de la couronne d'enceinte proposés par Des Rocques sous l'influence du modèle de fortifications de Vauban. Dans le projet une quantité importante des structures de la ceinture existante a été adoptée mais en même temps plusieurs nouveaux ouvrages étaient proposés (Winiger-Labuda, 2010). L'idée était donc d'amplifier les fortifications vers l'extérieur par le biais de nouvelles structures composant trois lignes de défense (Figure 3). Ainsi, les ceintures successives et complémentaires ont été stratégiquement conçues pour faire face au bombardement d'artillerie lors d'un éventuel siège de la ville (De la Corbière, Visite galerie Francois-Le-Fort, août 2022).

La première ligne de défense était composée de onze grands bastions qui ont été adaptés de l'ancienne enceinte du XVIIe siècle et qui faisait office de clôture urbaine à la ville. Ensuite, un fossé s'étendait sur quelques dizaines de mètres, tout en laissant place aux nouvelles structures. Une ligne intermédiaire composée de structures nommées demi-lunes et contregardes, indépendantes les unes des autres, marquait une rupture du fossé en deux parties. Finalement, une troisième et dernière ligne de contrescarpes continue dans laquelle un chemin couvert et des places d'armes englobait le système fortifié (Blondel, 1924).

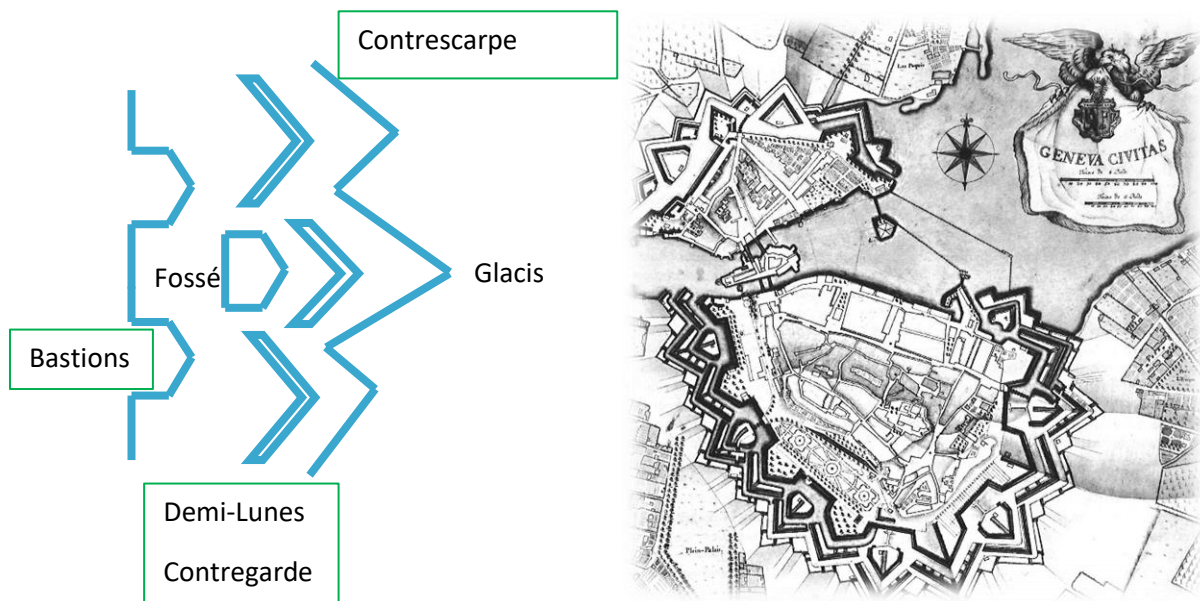


FIGURE 3 - TROIS LIGNES DE DÉFENSE PRÉSENTES DANS LE PLAN DES FORTIFICATIONS DE GILLAUME LE VASSEUR DES ROQUES

Cependant, au long des travaux le projet a été critiqué et des propositions d'amendements ont été faites en raison de la gestion du chantier et d'importants dépassements des coûts. « La

construction des « grands magasins » (« casemates ») et la création d'un réseau de galeries de contre-mines, de même que le revêtement des contrescarpes et l'aménagement de vastes glacis, furent en effet décidés au cours du chantier, sans réévaluation préalable du budget global. Tel fut notamment le cas du nouveau front de Champel. » (Winiger-Labuda, 2010, p.239). Ultérieurement, des propositions de modifier le plan d'enceinte telles que celle faite par Micheli où un étalement urbain était proposé ont été évaluées mais le budget attribué aux fortifications diminuait de plus en plus au fil des années en raison des dépenses. En 1750, les travaux ont été interrompus parce que la source de financement pour leur poursuite n'a pas été approuvée. (Winiger-Labuda, 2010).

Au cours du Moyen-âge, les passages souterrains ont acquis un caractère de défense au sein de l'art militaire. Soit comme issue de secours qui permettait aux défenseurs de s'échapper, soit comme un dispositif de défense en tant que contre-mine, les galeries souterraines ont été un élément commun à de nombreuses villes fortifiées, dont celle de Genève qui a adopté un réseau complexe en raison des conditions topographiques.

Des travaux d'explorations faits par l'architecte cantonal Louis Blondel ont permis de détecter une galerie qui partait des fondations du Palais Eynard « se prolongeant sous le bastion de St-Léger et son fossé » (Blondel, 1924, p.487). D'après les explorations effectuées, il a été possible de constater qu'il s'agissait des galeries de contre-mines appartenant aux fortifications du XVIIIe siècle. Cela compte tenu que les fragments explorés correspondaient à la périphérie de la vieille ville, notamment situées vers la zone entre Rive et St-Léger.

Le plan général des galeries de contre-mines de Genève a été créé en 1720. Cependant, le document original a disparu et la trace de la copie fournie par la direction militaire de Grenoble au colonel Dufour a été suivie jusqu'à 1857. Or, la recherche menée par Blondel a permis de constater que les principes de Vauban pour la défense souterraine ont été suivis et que le plan des galeries n'a pas été abouti grâce aux documents des « états de travaux de la Chambre de fortifications de 1718 à 1737 » (Figure 4) (Blondel, 1924, p.490).

D'après la documentation historique, chacun des ouvrages extérieurs possédait une galerie de contre-mines avec la même forme géométrique et certains étaient équipés de passages entre les différents ouvrages de fortifications. Les galeries permettaient évidemment le déplacement des soldats et des munitions le long du réseau, mais leur objectif principal était de fournir une protection contre les attaques souterraines.

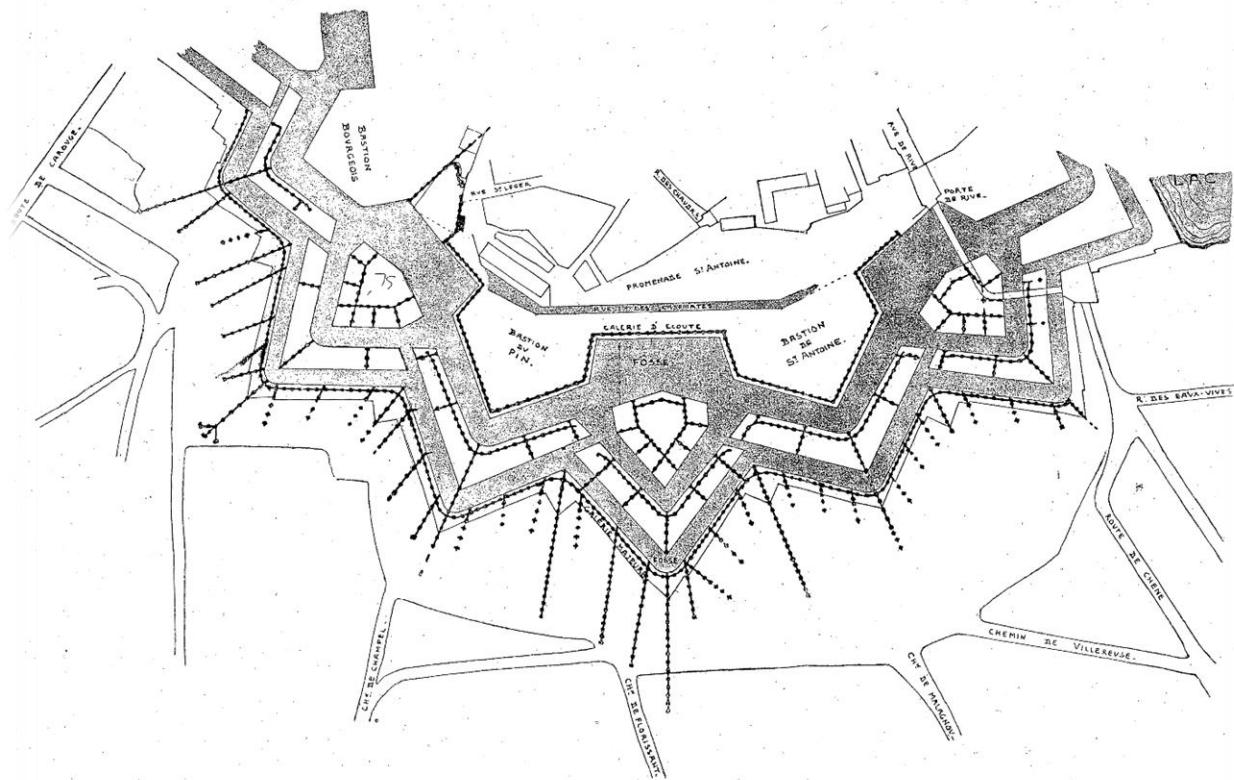


Planche IV. — Plan des galeries de mines sous les fortifications de Genève.
 ++++++ Galeries exécutées ou reconnues.
 - - - - - Galeries projetées ou supposées.

FIGURE 4 - RÉSEAU SOUTERRAIN DES ANCIENNES FORTIFICATIONS PROPOSÉ PAR LOUIS BLONDEL- TROIS TYPES DE GALERIES IDENTIFIÉES: GALERIE D'ÉCOUTE, MAJEURE ET DE CONTRE-MINES (BLONDEL, 1924)

La première ligne de défense disposait d'une galerie souterraine continue qui suivait la forme des bastions et son but ultime était de faciliter la communication et le transit. Ce fragment était désigné comme une galerie d'écoute et n'avait aucune connexion avec l'extérieur.

Par ailleurs, les ouvrages des contregardes et des demi-lunes, qui étaient entièrement entourés par le fossé, comportaient des couloirs de mines parallèles aux murs extérieurs accessibles par des portes aménagées dans la surface de la fosse. Sa destination spécifique était de les remplir de poudre et les faire exploser en cas où l'ennemi les capturerait.

Cependant, les explorations faites en 1922 par Blondel ont permis de relever que certains des ouvrages des contre-gardes avaient une connexion sous le deuxième fossé avec l'axe de la contrescarpe. C'était le cas de la contre-garde du bastion Bourgeois qui était liée depuis son angle avec la contrescarpe, continuant vers l'extérieur de la troisième ligne de défense. La contre-garde galerie du ravelin de Champel, en revanche, était liée à la contrescarpe par ses deux extrémités (Blondel, 1924)

Concernant les contrescarpes, en tant que troisième et dernière ligne de défense, la galerie dite majeure suivait la forme de la fortification. Celle-ci était reliée par des escaliers et des portes menant à la deuxième douve. À partir de cet axe, des rameaux de mines se ramifiaient vers l'extérieur du système de fortification jusqu'à la campagne. Son objectif principal était de détecter la création de tunnels et de surprendre les attaquants en créant une jonction, ou de les faire exploser en ayant protégé le reste de l'ouvrage.

D'après Blondel, un calcul approximatif de l'emprise des galeries vérifiées pouvait atteindre 5000 mètres carrés, cela en tenant en compte la surface des 27 casemates qui étaient liées à la galerie d'écoute (Blondel, 1924, p.495).

Ultérieurement, dans les années 1950, une série de dynamiques complexes ont commencé à se produire dans les anciens souterrains et les autorités genevoises ont pris la décision de commencer à plafonner les connexions afin de limiter l'accès des gens à des activités qui n'étaient pas tout à fait acceptées (De la Corbière, Visite galerie François-Le-Fort, août 2022).

1.4 Les données : sources de compréhension de l'histoire et l'espace

L'approche aux données de base a été réalisée en deux temps. D'abord, un processus d'identification des sources documentaires et d'emplacements de stockage a été effectué afin de bien cibler les documents d'intérêt. Dans ce sens, la toute première étape à faire était la récupération et le tri des anciens documents officiels à utiliser comme support des éléments à digitaliser dans la couche géographique. Ensuite, une étape de contacts et récupération de données avec d'autres organismes a été accomplie pour accéder aux relevés plus récents qui ont été produits avec des nouvelles techniques et qui par conséquent présentent une meilleure précision et qualité d'image.

Comme mentionné précédemment, ce stage a été réalisé comme la continuation d'un travail qui abordait le même sujet et qui a été fait au sein de la DIT. Compte tenu que le dossier où, toutes les données étaient stockées n'avait pas une manière systématique de catégoriser les informations en termes de source et de type, une recatégorisation de l'information a été faite afin de gérer la recherche et l'analyse des données en fonction des sources documentaires et des galeries relevées. Une fois récupérés, tous les relevés des souterrains à disposition (plans officiels, images, fichiers techniques, relevés 3d ou AutoCAD), quatre sources principales ont été identifiées avec un niveau de détail et de précision différentes.

D'un côté, les références plus anciennes aux souterrains font partie de l'Archive Générale de la Ville de Genève et elles sont stockées notamment dans le dossier AEG Militaire N 17 (Figure 5). Cependant, certains documents d'intérêt ont été trouvés dans les dossiers AEG Militaire N 13. Il s'agit des images d'archive qui datent de l'époque des fortifications et qui ont une valeur exceptionnelle pour la compréhension du réseau souterrain, mais elles n'ont pas assez de détails pour être utilisées comme référence directe pour orienter la digitalisation. Même si la qualité de l'image était bonne, il n'était pas possible de faire un traitement pour trouver les bonnes dimensions en raison de l'absence de points de repérables dans la surface actuelle.

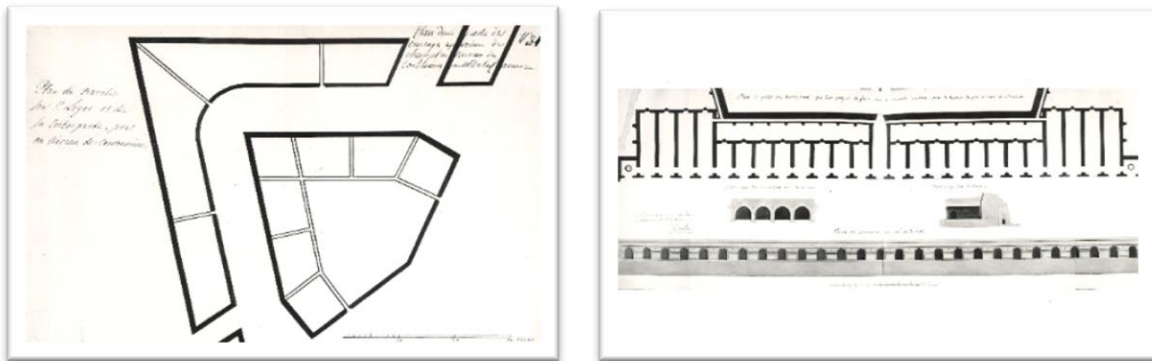


FIGURE 5 : IMAGES DES ARCHIVES DE L'ÉTAT DE GENÈVE (AEG), DOSSIER MILITAIRE N 17.

La revue GENAVA a publié différents articles qui ont abordé le sujet de certains tronçons des souterrains découverts à différents moments de l'histoire genevoise (Figure 6). Cette revue aborde l'histoire, l'art et l'archéologie de la Ville de Genève et ses publications entre 1923 et 2017 sont consultables en ligne sur le site e-periodica.ch (Zuerich, s. d.). Grâce à cette archive numérique, les références de publication ont été ajoutées afin de nourrir les informations attributaires des éléments relevés d'après les articles. Ainsi, l'année de publication, de la revue en question et le numéro de page de l'article ont été pris pour créer un numéro de référence du relevé. Cependant, la qualité de ces relevés en termes de résolution est vraiment limitée pour de digitaliser les formes en détail. Par conséquent, cette source a été utilisée notamment comme un complément à d'autres relevés plus récents ou bien de meilleure qualité d'image.

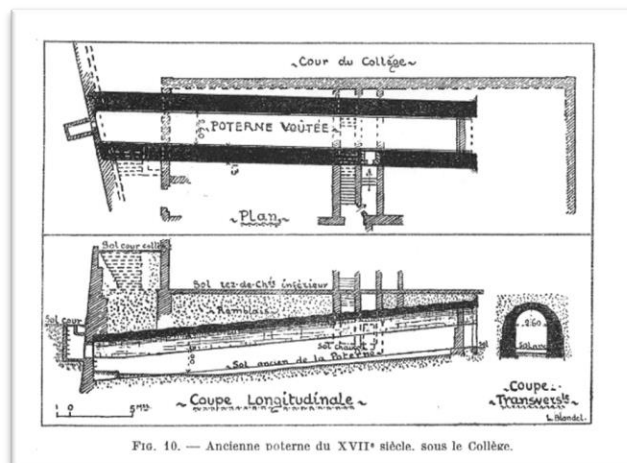


FIG. 10. — Ancienne poterne du XVII^e siècle, sous le Collège.

Or, au niveau des documents officiels publiés au cours de la deuxième moitié du XXe siècle, une série de plans produits par le Service Cantonal de Géologie apparaît comme une source importante pour la localisation précise des galeries souterraines. Les plans mettent en évidence les tronçons découverts et relevés par les géologues par rapport à l'infrastructure

FIGURE 6- EXEMPLE DES ESQUISSES PRÉSENTÉES DANS LES ARTICLES DE LA REVUE GENAVA

bâtie en surface. Cela permet de disposer de points de référence précis qui peuvent être pris comme une source de géoréférencement sur la base du cadastre des bâtiments publié au SITG.

Ainsi, les plans publiés par le Service de géologie (renommé GESDEC) deviennent une première source fiable visant la localisation précise des galeries relevées (Figure 7). Les angles des bâtiments et parfois les limites des parcelles correspondent aux données cadastrales actuelles, permettant ainsi d'avoir la possibilité d'ajouter des points de contrôle avec une précision et certitude considérable. Cependant, des limites ont été également rencontrées au moment d'utiliser ces documents pour la démarche de géoréférencement. En s'agissant des documents de grande taille qui ont été scannés, il faut prévoir une limite de précision liée à la pixélisation de l'image au moment d'ajouter les points de contrôle. Par ailleurs, au niveau de la conservation des documents, les plis présents dans certains plans rendent un peu plus complexe l'adaptation du raster à la surface réelle.

Une dernière réflexion concernant les relevés GESDEC est liée au fait qu'il n'y a pas de certitude sur le niveau de précision de ces relevés. Etant donné qu'ils ont été faits au cours des années 1970 principalement, la technique utilisée était de référencer l'axe central du sol de la galerie pour après constituer l'espace intérieur de la galerie (De la Corbière, communication personnelle, juin 2022). Compte tenu du fait que le GESDEC n'a pas à disposition actuellement un dossier d'archive qui explique les procédures réalisées, il est difficile d'assurer la véracité de la position des galeries sans la vérifier auprès d'une source fiable.

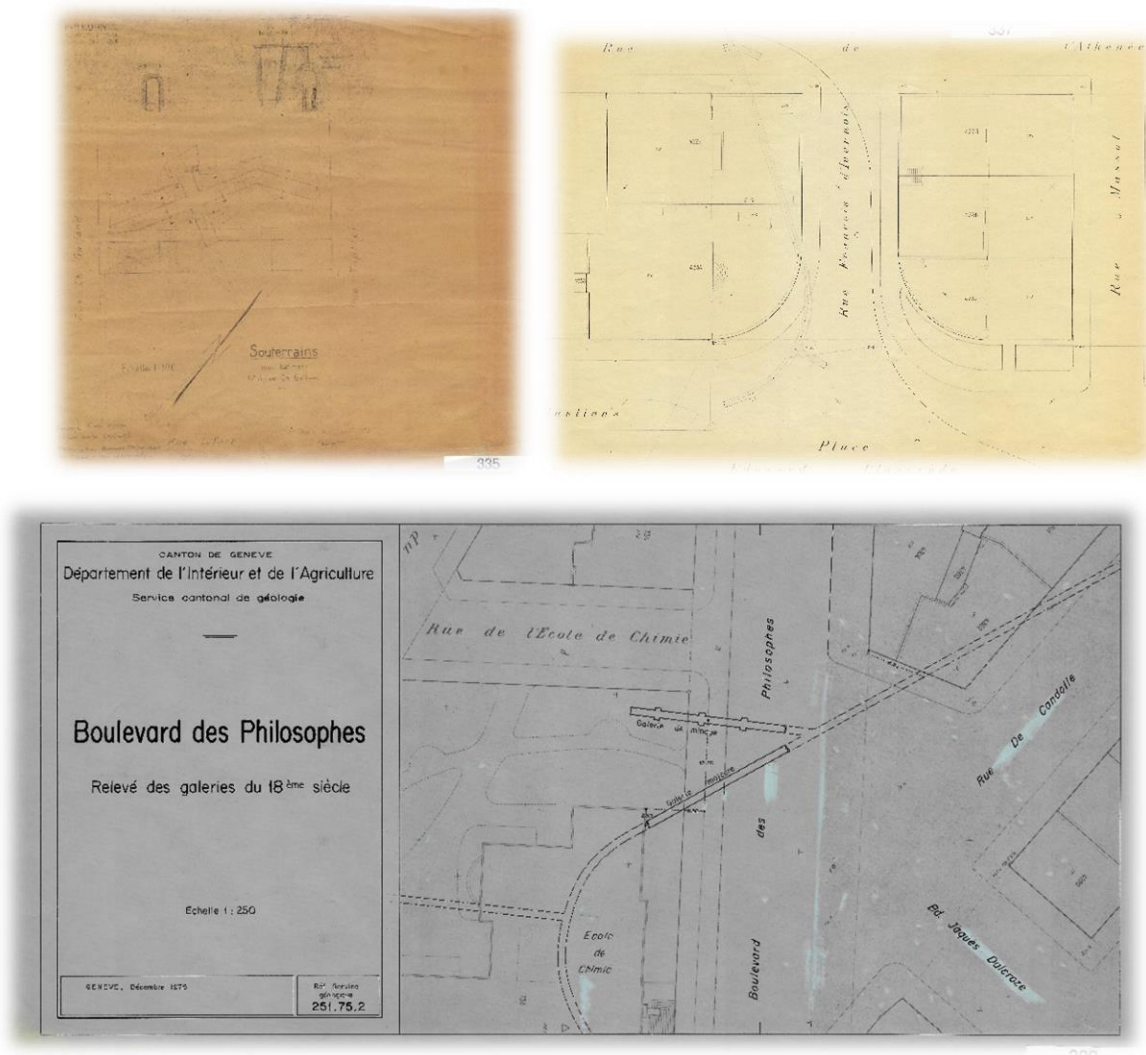


FIGURE 7 - PLANS PRODUITS PAR LE GESDEC DANS LE XX^E SIÈCLE, NOTAMMENT PENDANT LES ANNÉES 1970

Finalement, la dernière et la plus précise source trouvée est une collection de relevés LIDAR 3D faite par le Groupe audio-visuel accident (GAVA) et la Direction de l'information du territoire (DIT) (Figure 8). Ce travail a porté sur la mensuration précise des principaux souterrains connus afin de contribuer aux données du cadastre sous-sol géré par la DIT. Les résultats du relevé GAVA 3D ont été ajoutés à la couche géographique du cadastre sous-sol publiée sur le SITG, en ajoutant une zone de tampon d'une dizaine de mètres autour de chaque objet afin de mettre en évidence la structure des ouvrages ainsi que d'accorder une marge de décalage.



FIGURE 8 - RÉSULTAT DU SCAN EFFECTUÉ PAR LE GROUPE GAVA DANS LE LOGICIEL SCENE 2GO

Au niveau de la procédure pour obtenir les données, une technique pour esquisser les accidents de la circulation a été mise en place afin de créer une représentation 3D comprenant l'entrée et l'intérieur de chaque galerie. À l'aide de plusieurs dispositifs de scanner 3D, un nuage de points reconstituant les murs intérieurs des galeries et la structure des objets proches de l'entrée afin de référencer les souterrains par rapport aux éléments en surface. Avec cette démarche, deux types de résultats pertinents pour le stage ont été produits : d'un côté, un fichier d'image en format *tiff* avec une haute résolution qui permet de percevoir les détails à l'échelle du centimètre (perspective orthographique 3D) et également un nuage de points en format *e57* composé de millions de points scannés qui permet de visualiser tous les détails et de reproduire numériquement l'entrée et l'intérieur des galeries (Figure 9).

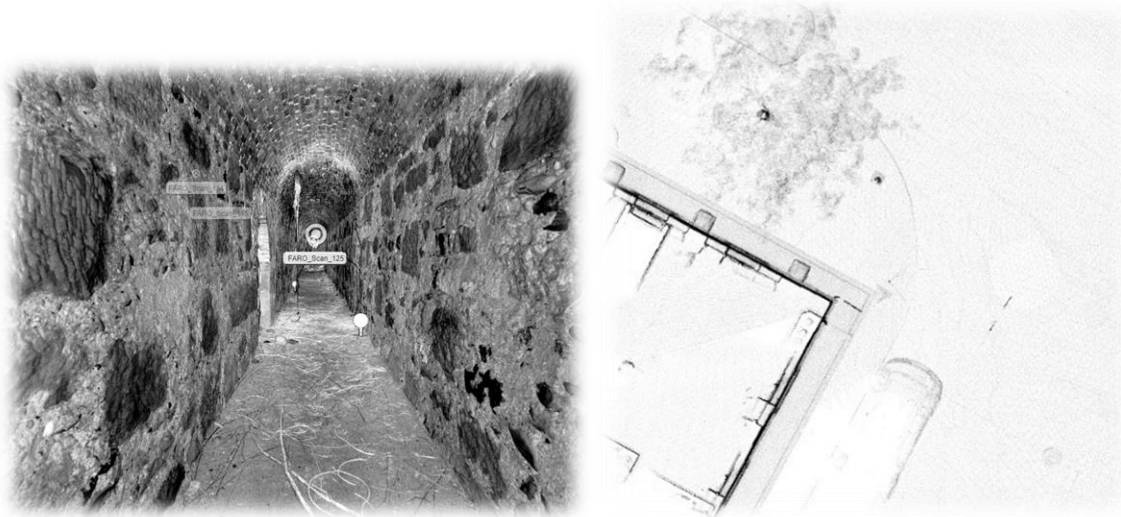


FIGURE 9 -VISUALISATION DES NUAGES DE POINTS ET PROJECTIONS ORTHOGRAPHIQUES 3D OBTENUES PAR LA DIT ET LE GAVA

Ainsi, les images produites ont été utilisées comme une source pour la digitalisation d'objets vectoriels à ajouter aux données du cadastre souterrain de la ville. Pour ce faire, des éléments de repérage sont placés afin de mettre en évidence les points de la mensuration officielle lors de la démarche de scannage pour obtenir des points de géoréférencement précis par rapport à la surface. Par ce biais, la DIT a établi une localisation des galeries relevées avec une précision considérable pour après digitaliser et ajouter les objets digitalisés aux données du cadastre sous-sol.

Par ailleurs, les nuages de points ont été utilisés afin de produire des capsules vidéo qui reproduisent un parcours interne des galeries depuis l'entrée. Ces produits ont été créés par le GAVA mais ils ont uniquement été utilisés de façon « documentaire » pour afficher numériquement les données. Le niveau de détail des nuages de points permet même de remarquer les textures des murs et tous les objets présents à l'intérieur des galeries, c'est pourquoi la taille de chacun des fichiers est substantielle. L'ensemble des points reproduit les conditions structurales des galeries et les objets bâtis à proximité de l'accès depuis la surface, mais chaque point possède des informations propres liées à sa localisation dans l'espace.

Avec ce type de données, il est non seulement possible de trouver les coordonnées de longitude (Y) et de latitude (X) d'un objet, mais aussi les valeurs Z qui font référence à l'altitude d'un objet par rapport à certain point. À partir des valeurs de l'altitude, la profondeur de l'objet peut être déterminée en relation à une source d'altitude du sol dans une scène 3D. Cependant, l'échange établi avec le GAVA dans le cadre du stage a permis de confirmer que les nuages de points n'étaient pas géoréférencés. Les points de repérage mis en place à l'extérieur des façades

des bâtiments devraient contribuer à positionner correctement les données sur la base du cadastre officiel de Genève. Ainsi, aucune analyse 3D n'a été réalisée avec les données relevées malgré le potentiel de ces données.

2 Approche conceptuelle et méthodologique :

Concernant l'approche méthodologique, différentes démarches ont été accomplies afin d'obtenir un résultat. De nombreux processus concaténés ont permis de reconstituer le réseau, toujours en priorisant les relevés récents plus précis qui serviront de référence digitale. Ainsi, la première étape a été consacrée à la récupération des données mises à disposition. Par la suite, une vérification de la précision de ces sources de données a été nécessaire. Finalement, la dernière étape fut la procédure de digitalisation. Tout cela afin d'assurer la vérification des hypothèses et garantir ainsi une zone de tampon raisonnable pour la protection de l'infrastructure souterraine en accord avec la LPMNS.

L'approche méthodologique a été le résultat du suivi de tous les encadrants, en particulier les responsables du suivi scientifique à l'Université de Genève, mais également les responsables de l'encadrement du stage au sein de l'OPS. Les différentes étapes qui composent la méthodologie générale ont été confrontées au même processus d'approbation afin d'assurer la pertinence des résultats depuis le début de la démarche.

Dans un premier temps avec ma proposition, j'ai pu d'orienter le cheminement pour aboutir la procédure en question. Certaines expériences ont été exécutés afin de mettre en évidence le potentiel, les éventuels doutes et les limitations du projet. Puis, à la lumière des premiers résultats, une réunion a été coordonnée avec M. Alain Dubois en tant que directeur du stage afin de poser toutes les questions et clarifier les doutes concernant l'exécution des procédures. Ultérieurement, les corrections et traitements nécessaires ont été effectués pour ensuite les soumettre à approbation lors des points de suivi hebdomadaires.

2.1 Géoréférencement

Pour n'importe quel type de traitement de l'information géographique, il peut s'avérer nécessaire d'utiliser des fichiers numériques qui n'ont pas forcément une référence spatiale associée. Bien évidemment, pour une analyse historique concernant l'espace de la ville et son évolution, ce travail exige l'utilisation de ressources anciennes comme les documents d'archive ou les plans historiques. S'agissant de documents officiels, il a fallu numériser les formats papier. La plupart des fichiers mis à disposition pour le stage n'avaient pas de références

spatiales. La première partie de l'approche méthodologique correspond donc au géoréférencement des plans en format raster dans un Système d'Information Géographique (SIG).

Les données de base fournis par la DIT et l'OPS afin de reconstituer le réseau souterrain étaient en effet le résultat de la numérisation de documents anciens récupérés et stockés dans l'Archive d'Etat de Genève, ainsi que des plans officiels créés à différentes époques, produits par le GESDEC. Or, en termes qualité d'images, la conversion vers un format *.png* n'a pas modifié le niveau de détail. Néanmoins, certains documents n'avaient pas une précision assez fiable ni dans leurs traits ni au niveau de l'échelle (notamment les images d'archive qui font plutôt référence aux structures de façon schématique).

Afin de travailler avec un fichier d'image dans un SIG, il est nécessaire d'attribuer des références géographiques au fichier ce qui permet de positionner l'image dans l'espace selon un système de coordonnées. Les systèmes de coordonnées sont définis par la méthode de représentation (projection) de la courbe de la terre dans une surface plane. C'est-à-dire que les coordonnées attribuées comme référence spatiale s'inscrivent dans un système de projection géodésique, mondial ou local, comme le système WGS84 ou le CH1903+/LV95 respectivement.

Il convient de préciser que les images sont converties en un format raster au moment où le fichier est importé dans un logiciel de traitement d'information géographique. C'est-à-dire que chaque pixel devient une cellule de stockage d'information, favorisant ainsi les traitements de l'image. Grâce au format raster, la définition d'un emplacement spécifique est possible en fonction des coordonnées cartographiques attribuées à différents points, cela permet de positionner correctement l'ensemble de l'image. Pour ce faire, une référence fiable doit être prise comme base pour aligner les informations du raster par rapport aux points de contrôle qui sont ajoutés selon les données de référence.

Le processus de géoréférencement fait référence à la démarche de créer un alignement spatial pour un fichier raster sur la base de données géolocalisées, fiables, et de haute précision. L'image dans un format raster s'adapte à la surface selon le type de géoréférencement et les données de référence auxquels l'image sera attachée. Ainsi, la grille de pixels du raster sera alignée sur les sources d'attachement attribuées par le biais des points de contrôle (figure 10).

Grâce à ce processus il est possible d'afficher les données et d'effectuer des analyses d'après les informations des cellules (Desktop ArcGIS, | Documentation, s. d.).

2.1.1 Les points de contrôle :

En général le géoréférencement des données raster se fait par rapport aux données cibles sous la forme de rasters ou de vecteurs projetés dans le système de coordonnées souhaité afin d'éviter les décalages. L'aspect fondamental est l'alignement à établir entre le raster et les données de référence. Cet ajustement est fait à partir de points de contrôle identifiables facilement dans les deux jeux de données. Le but est de fixer l'emplacement des points par rapport au sol dans le cadre du système de projection, qui se traduit par des coordonnées X, Y.

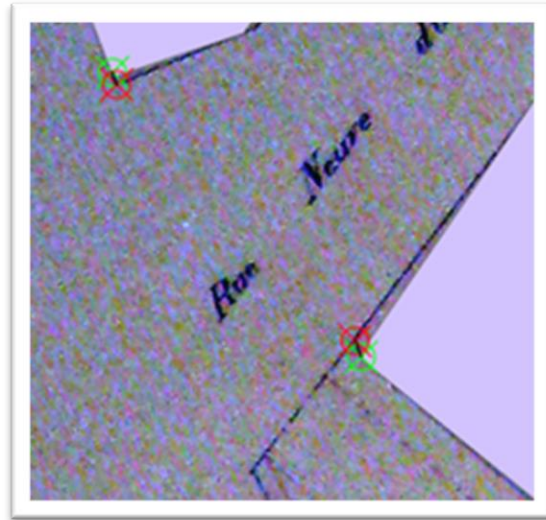


FIGURE 10- POSITIONNEMENT DE RASTER À PARTIR DES DONNÉES CIBLES.

Certains objets ou formes sont propices pour ajouter les points de contrôle. Les intersections entre les objets vectoriels ou des angles peuvent être considérées comme une bonne source de référence pour aligner avec précision le raster. Evidemment une couche des points peut aider au géoréférencement précis d'une image si elle possède une qualité suffisante afin de bien identifier le point équivalent dans le raster. Dans ce sens, les bâtiments, le réseau routier, les parcelles et les points de mensuration officielle deviennent des éléments exceptionnels pour conduire un bon géoréférencement des données raster.

Dans le cadre du stage, sachant que le niveau précision des données publiés au SITG est très fiable, la couche des bâtiments hors-sol et la couche des points de mensuration officielle publiés dans le géoportail ont été prises comme référence. Ces éléments sont identifiables dans la plupart des relevés relativement récents. La couche CAD_BATIMENT_HORSOL contient tous les bâtiments du canton et ces éléments sont également présents tant dans les relevés GESDEC comme ceux du GAVA (Figure 11). Ils montrent clairement la forme des bâtiments en surface. Pour la couche CAD_POINTFIXE_PP présente les points de mensuration officielle de 3^{ème} catégorie (ceux au niveau du canton), et ces points sont identifiables dans les relevés faits par le GAVA car ils ont mis en place des objets de repérage de ces points lors du scan 3D (Annexe 1).



FIGURE 11 - POINTS DE REPÉRAGE DES DIFFÉRENTS RELEVÉS POUR AJOUTER LES POINTS DE CONTRÔLE

2.2.2 Transformation des rasters

La quantité de points de contrôle ajoutés pour établir le lien spatial par rapport au sol sera un aspect clé au moment de générer la transformation du jeu de données raster. Le type de transformation de l'image (ou même sa déformation si c'est le cas) sert à caler l'image aux coordonnées géographiques fixées grâce aux liens établis avec les points de contrôle.

Une fois que les points de contrôle accrochent le raster aux données cibles, le type de transformation souhaité peut être choisi en fonction des particularités de visualisation, taille et la qualité de l'image. C'est grâce à cette transformation qu'il est possible de déterminer l'adaptation de l'image par rapport à l'espace et de bien aligner les pixels aux points de référence attribués. Ainsi, sur la base de la valeur d'erreur moyenne et en prenant en compte les caractéristiques du raster en termes de la visualisation, il est possible de choisir le type de transformation le plus approprié afin d'obtenir le positionnement le plus précis et diminuer l'éventuel décalage à l'échelle du centimètre.

Au moment de déterminer les coordonnées précises pour chaque pixel du raster, il existe différents types de transformation possibles qui sont plus appropriés que d'autres en fonction de la quantité de points de contrôle établis et des expressions mathématiques qui calculent l'emplacement cartographique correct pour chaque cellule. C'est-à-dire que le choix de la méthode de transformation doit être orienté selon les caractéristiques de l'image et notamment selon les besoins concrets en termes de résultats.

De manière générale, certains types de transformation cherchent à établir l'emplacement de chaque cellule par le biais d'une expression algébrique axée sur les points de contrôle afin de trouver les valeurs des coordonnées x , y . Or, d'autres types de transformation possèdent des

particularités optimales pour certains calculs à partir des points de contrôle et des lignes d'alignement pour affiner la précision de l'emplacement des coordonnées cartographiques. Ces différences au niveau la procédure de géoréférencement auront une incidence sur la précision générale ou locale de l'image.

Afin d'implémenter le type de transformation précise selon les caractéristiques de documents à disposition, une analyse sur les principaux besoins a été faite pour choisir la méthode de géoréférencement appropriée (Tableau 1). Ainsi, la nécessité d'avoir une précision considérable pour l'ensemble de l'image, l'absence de références géographiques préliminaires dans la plupart des fichiers et le fait que certains des anciens documents avaient été pliés, ont été les facteurs prises en compte pour déterminer la transformation la plus pertinente.

TABLEAU 1 - TYPES DE TRANSFORMATION DE RASTER

Type de transformation	Potentiel	Caractéristiques	N° de points
Spline	Local	Étirement caoutchouté. Précision faible loin des points de control	10 points
Ajustement	Global / Local	Transformation polynomiale plus une technique de triangulation	3 points
Projective	Imagerie oblique	Déformation des lignes pour contribuer à l'alignement.	4 points
Helmert	Générale	Préserver la forme originale du raster	3 points
Polynomiale affine, 2 ^{ème} , 3 ^{ème} degré	(nulle, Globale	Fonction polynomiale basée sur les points de control et algorithme LSF	3, 6 ou 10

Certains types de transformation sont très efficaces pour traiter des situations vraiment précises. Par exemple, la transformation spline permet d'affiner la précision de l'alignement des points de contrôle dessinés. Cependant une la déformation de l'image produite influe sur le niveau précision de l'ensemble du raster. Même si l'erreur résiduelle est faible les objets ne garderont pas leur forme réelle.

Par ailleurs, la transformation projective comme celle de Helmert limitent la déformation du raster en se focalisant sur les liens d'alignement. La méthode projective est fonctionnelle pour le traitement des photographies aériennes notamment, tandis que les documents à géoréférencer pour accomplir l'objectif du stage sont principalement des plans. Concernant la transformation

Helmert, la forme du raster est préservée, mais il ne serait pas possible, par exemple, de prévoir la déformation des anciens documents papiers pliés et après scannés.

Or, la transformation par ajustement a une performance exceptionnelle au niveau de la précision à proximité des points mais aussi pour l'ensemble de l'image. En plus, l'expression polynomiale est complétée par un traitement de triangulation entre les points de contrôle afin de diminuer l'erreur résiduelle. Cette méthode est utilisée notamment afin d'affiner la précision des rasters qui possèdent déjà une référence spatiale. Ainsi sur la base de deux jeux de points de contrôle, la transformation est effectuée pour ajuster la correspondance des points localement. Cependant, il n'y a pas un moyen de prendre en considération les déformations du papier causées par les plis et l'absence de références spatiales préliminaires. Ce problème empêche, dans la plupart des données, de bien exécuter la transformation.

Dans ce sens, compte tenu du fait que la localisation des anciennes galeries souterraines exigeant une précision globale de l'ensemble de l'image et que pour la plupart des fichiers numériques des documents anciens étaient sans référence géographique, la *transformation polynomiale* a été choisie pour le processus de géoréférencement. Pour la majorité des documents une *transformation affine* (1^{er} ordre) suffisait pour obtenir un erreur résiduelle admissible, mais pour les plus anciens documents qui avaient été pliés et après scannés, une *transformation de deuxième ordre* fut nécessaire.

Ce type de transformation est faite à partir d'une fonction algébrique qui, sur la base de deux formules, détermine les coordonnées x,y en sortie et en entrée d'un emplacement précis (points de contrôle) (Desktop ArcGIS, | Documentation, s. d.). À la lumière de ce calcul un algorithme *Least Square Fitting (LSF)* est appliqué pour obtenir une formule applicable pour tous les points du raster, positionnant ainsi le raster et mettant en évidence l'erreur quadratique moyenne.

Les outils de l'imagerie géographique dans un SIG permettent de faire plusieurs traitements à partir de calculs faits par rapport aux valeurs de chaque cellule. Pour le calcul polynomial trois options sont proposées par le menu géoréférencement ArcGIS Pro, cela compte tenu que les transformations au-delà du troisième ordre ne sont pas communes (Figure 12).

La transformation affine ou de premier ordre est la plus couramment appliquée. Il s'agit d'une transformation par déplacement qui va générer un positionnement du raster par le biais de l'ajustement de l'échelle du jeu de données et sa rotation. En conséquence, les lignes et colonnes du raster conservent leurs caractéristiques linéaires, elles restent droites, le positionnement est

fait uniquement grâce à la mise à échelle et aux mouvements de translation ainsi que de rotation du jeu des données.

Pour ce faire, il est essentiel d'avoir au moins trois liens de contrôle qui vont fixer la position du raster et partir desquels l'erreur quadratique moyenne sera calculé afin d'évaluer le décalage du raster par rapport à la réalité. La création de liens supplémentaires peut influencer la valeur d'erreur de transformation mais cela va également contribuer à améliorer la précision en sélectionnant les points les plus pertinents pour affiner la valeur d'erreur quadratique moyenne.

Dès que l'ordre de transformation augmente, le facteur de déformation du raster peut être pris en compte et la quantité de liens nécessaire augmente. L'alignement devient plus complexe compte tenu qu'en plus de la mise en échelle et la rotation, la correction de la déformation est prise en compte dans le calcul des coordonnées de chaque point du raster. Ainsi, les types de transformation de deuxième et de troisième ordre sont appropriés au moment de prendre en considération les déformations dans l'image produites par des courbes ou des lignes qui altèrent l'affichage numérique de l'image.

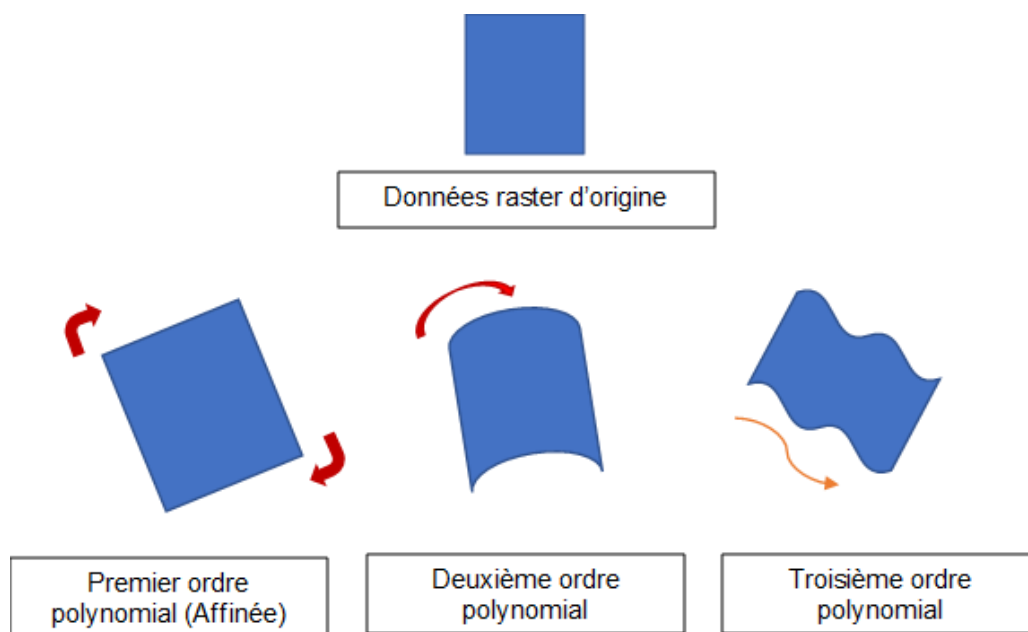


FIGURE 12 – DEGRÉS DE TRANSFORMATION AFFINE (DESKTOP. ARCGIS, S.D)

Concernant les fichiers mis à disposition pour le géoréférencement des galeries, la majorité des anciens documents étaient bien conservés ce qui facilite leur numérisation. Par conséquent, une transformation affine a permis de positionner avec une précision acceptable les fichiers

raster. Cependant, certains documents importants avaient certaines caractéristiques qui exigeaient un traitement de transformation plus complexe.

Ayant un format numérique de base et une qualité d'image exceptionnelle, les résultats du relevé 3D fait par le GAVA et la DIT n'ont pas posé le moindre problème au moment d'aligner l'image avec les données du cadastre officiel. Même pour la galerie de l'Athénée, le fichier *Tiff* avait déjà une référence spatiale et il a fallu juste faire une transformation par ajustement afin de vérifier la précision du géoréférencement de l'image.

En revanche, les anciens documents officiels ont une complexité majeure en termes de procédure d'alignement spatiale en raison de la qualité d'image et le niveau de conservation des documents. Les relevés produits pendant les années 1970 par le GESDEC ont un niveau de détails assez pertinent pour faire l'exercice de complément des galeries qui n'ont pas été relevées par l'enquête de la DIT. Ces données ont été créées à

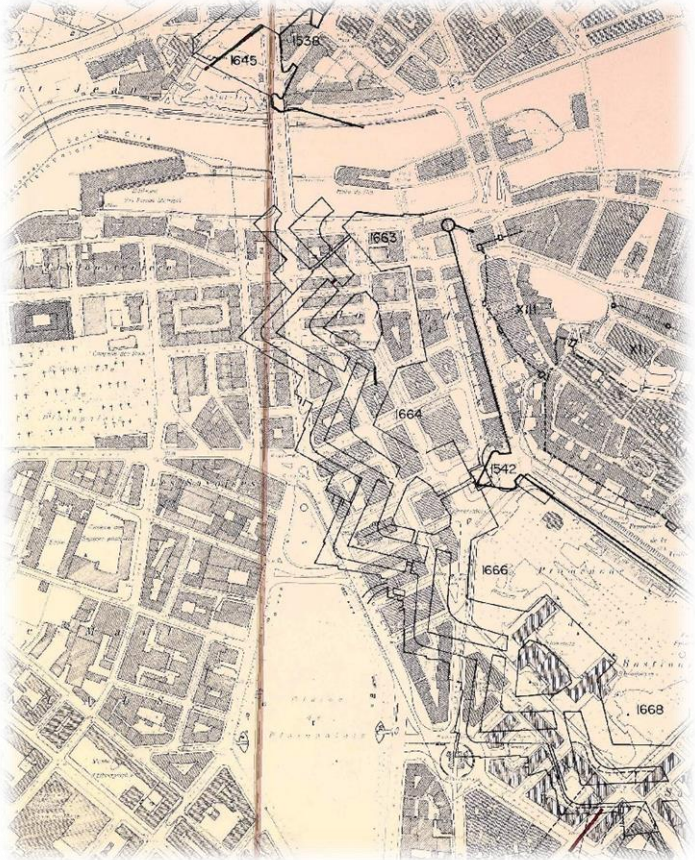


FIGURE 13 - TRACE D'UN PLI DANS LE PLAN N°251.86.2 DU DOSSIER D'ARCHIVE GESDEC

l'échelle par les géologues sur le biais de la ligne centrale des galeries. Cependant, quelques documents n'ont pas eu une bonne conservation, ce qui a donné lieu à des plis, des froissements et des taches (Figure 13).

Compte tenu du fait que les documents de l'Archive d'Etat de Genève étaient les plus anciens, la précision en termes d'échelle et de détail n'étaient pas aussi pertinente. Dans la plupart des cas, ces éléments d'archive ont été pris comme une référence d'analyse pour la reconstitution du réseau souterrain supposé. Cependant, pour certains cas particuliers, les images historiques ont pu être géoréférencées sur la base des relevés actuels des galeries (Figure 14).

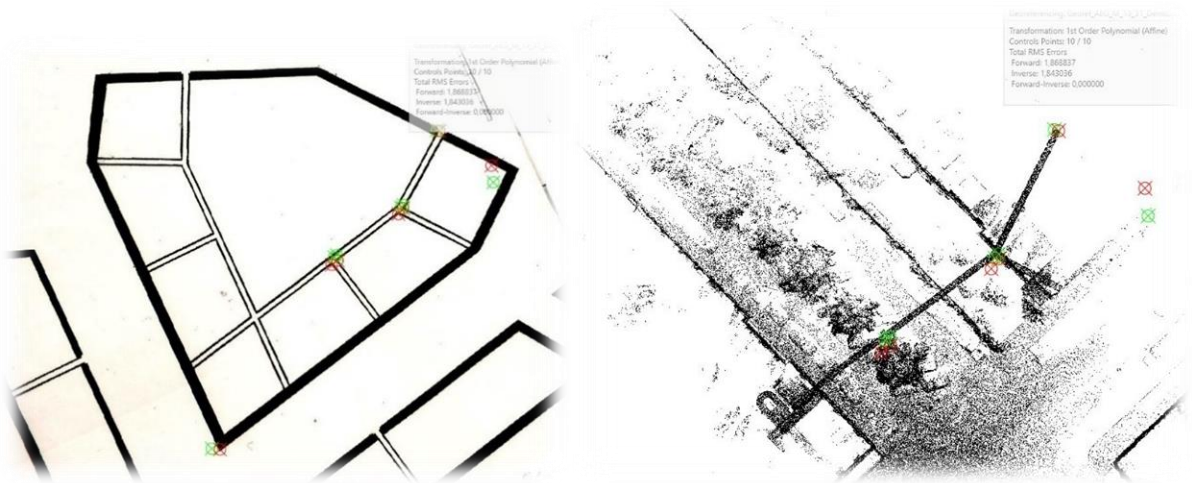


FIGURE 14 GÉORÉFÉRENCIEMENT DES IMAGES D'ARCHIVE SUR LA BASE DES RELEVÉS ACTUELS

2.2.3 L'erreur quadratique moyenne

Une fois que les points de contrôle sont définis et que la transformation de l'image est effectuée, une étape de vérification de la pertinence des résultats doit être accomplie. Initialement, une première vérification au niveau d'affichage permet de mettre en évidence si des erreurs significatives sont présentes par rapport aux données cibles. Cependant, la précision au niveau du détail pour évaluer la qualité de la position peut seulement être vérifiée à partir de la valeur de l'erreur quadratique.

Pour chaque point une valeur d'erreur quadratique est calculée par rapport au point de référence et une valeur d'erreur quadratique moyenne est calculée pour l'ensemble du raster. Cette valeur est le résultat du calcul fait sur la base de tous les points de contrôle afin d'évaluer l'éventuel décalage entre le raster géoréférencé et les données cibles. L'erreur quadratique moyenne représente la différence entre la prévision de l'alignement effectué par le modèle à partir des points et la valeur du point de référence pris pour établir le lien. Grâce aux calculs statistiques, la valeur pourrait s'utiliser comme une mesure de la qualité de l'estimateur en termes de précision.

Ainsi, compte tenu du fait que les rasters des relevés ne couvrent pas une surface vaste, la valeur d'erreur devrait être significativement faible pour la considérer comme acceptable. Quand il s'agit de grandes zones comme des forêts ou des cartes régionales à petite échelle, la complexité de l'alignement du raster augmente. C'est pour cela que la précision de l'alignement du raster sera moins grande par rapport à une zone à échelle cadastrale. Par exemple, certaines études

qui s'intéressent à faire un géoréférencement des forêts ou des parcs nationaux proposent un erreur quadratique acceptable de plus d'une vingtaine de mètres (Lallemant et al., 2017). Une dynamique similaire se produit lorsque l'intention est de gérer le géoréférencement des anciens documents qui n'ont pas un niveau de détail suffisamment ajusté.



FIGURE 15 - ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DU GÉORÉFÉRENCEMENT DE LA PROJECTION ORTHOGRAPIQUE 3D DE LA GALERIE FRANÇOIS -LE-FORT

Or, bien que les dimensions et la résolution du raster sont des facteurs essentiels pour la précision, le degré d'exactitude de la position sera toujours plus fiable sur une grande échelle même si la qualité de l'image n'est pas la meilleure. Cela compte tenu des renseignements de la réalité qui sont plus facile à faire tout simplement, mais aussi car les objets sont plus nets facilitant l'attachement précis des points de contrôle.

Afin d'obtenir quelques pistes d'analyse, pour définir une limite d'erreur quadratique moyenne maximale acceptée pour les résultats du géoréférencement des documents, certains articles scientifiques ont été abordés. En règle générale, les documents qui s'occupent du géoréférencement des images aériennes proposent une marge de décalage considérablement faible (1 à 10 mètres) en raison de la résolution des images. Désormais, les études axées sur le géoréférencement de documents anciens (scannées comme une source d'information historique) font toujours références à la complexité de travailler avec ce type de données et aux enjeux d'affiner autant que possible les valeurs d'erreur élevées.

Dans ce cadre, un article dédié au géoréférencement des anciennes cartes propose une approche au sujet qui énonce différentes catégories de cartes en fonction de leurs particularités en tant que fichier numérique (projection, échelle). En plus, le fait de prendre en considération des éventuelles erreurs commises par l'auteur est soulevé comme un facteur qui va exercer une influence sur le résultat (Cajthaml, 2011). À partir de ces postulats, il est possible de comprendre que toujours une marge d'erreur liée à d'autres facteurs sera possible malgré une bonne application de la méthode de géoréférencement.

Or, une autre référence bibliographique pertinente pour affiner la démarche méthodologique est une étude publiée dans une revue de géomatique dans laquelle un géoréférencement des plans historiques (XVIIe au XIXe) est exécutée et mis en relation avec des cartes actuelles. L'approche développée dans le document propose une limite de moins de 1 mètre d'erreur quadratique moyenne pour être acceptée comme rigoureuse (Baiocchi & Lelo, 2005). Cela compte tenu du fait que la taille des rasters n'était pas si étendue et que la qualité d'image était assez considérable.

Aux vues de ces différentes sources et grâce au dialogue avec l'équipe d'encadrants du stage, les plafonds maximaux acceptés comme erreur quadratique moyenne ont été fixés afin d'affiner la précision de la démarche.

En ce qui concerne les relevés plus récents, le niveau de décalage devrait être significativement faible en raison de la haute précision de la méthode de scannage 3D. Dans ce sens, les relevés produits par le GAVA seront pris comme la référence principale pour la reconstitution de l'ancien réseau souterrain. Cependant, c'est important de prendre en considération qu'il va toujours exister une petite marge d'erreur au niveau de la représentation des objets.

Or, bien que certains fichiers soient relativement anciens, ils possèdent des informations qui vont devenir un complément des relevés plus récents puisque plusieurs galeries qui avaient été mises en évidence n'ont pas été relevées par l'enquête de la DIT en 2020.

Le niveau de détail, de précision et de résolution des plans GESDEC permet d'avoir les caractéristiques nécessaires afin de réussir une bonne démarche de géoréférencement. Même si les documents originaux datent d'au moins des années 1970, la technique avec laquelle ils ont été produits et la bonne conservation des documents permettent de proposer un plafond maximal d'erreur assez bas. Cependant, malgré une valeur d'erreur très basse, certains plans ne sont pas cohérents avec les formes relevées par le scan 3D, auquel cas la priorité sera toujours accordée aux relevés récents.

En raison de ce qui précède et en prenant en compte les caractéristiques des relevés (dimension, résolution, détail), l'erreur maximale acceptée pour les résultats a été fixée à 50 centimètres. Cela afin d'avoir une base de départ rigoureuse et ainsi continuer la procédure avec une faible incertitude de la localisation des galeries connues. Les premières expérimentations ont prouvé que ce degré de précision était facilement atteignable et que seulement les grands plans dépassaient la trentaine de centimètres de décalage (erreur quadratique moyenne).

Concernant les documents d'archive et les esquisses publiées dans la revue GAVA, il faut clarifier que ces représentations sont notamment schématiques. L'utilisation de ces sources se fera principalement en tant qu'éléments d'analyse qui permettront de comprendre la structure des souterrains et de reconstituer le réseau manquant à partir des galeries connues. Dans ce sens, l'attribution de points de contrôle et de l'erreur quadratique moyenne seront faits en fonction de l'ajustement et de l'adaptation ces images aux données vérifiées. Un décalage de plus d'un mètre ne sera donc pas un obstacle à leur utilisation. Il faut prendre en compte que l'image ne sera pas prise comme une référence directe pour la digitalisation vectorielle mais comme une piste d'analyse pour compléter le réseau à partir de la position des relevés des galeries.

Considérant que la démarche de géoréférencement sera la source qui donnera de la véracité et de la précision aux objets de référence, l'idée était d'affiner autant que possible la localisation géographique afin de commencer la digitalisation des galeries connues sur une base fiable.

2.3 Digitalisation des objets vectoriels

Le processus de digitalisation concerne la création d'objets vectoriels sur la base d'un jeu de données de support qui a déjà une localisation spatiale correcte et qui sert comme référence pour le traçage d'une forme détaillée. Cette procédure permet de mettre en évidence des éléments dans un système de coordonnées de référence et de leur attribuer des informations au sein d'une couche thématique.

L'importance de la digitalisation réside dans le fait que les objets créés sont identifiés à partir d'un support raster, sur la base duquel la possibilité de créer des attributs ou de récupérer des formes/information concrètes n'est pas possible. Des sommets (points d'arrêt) sont numérisés et des traces articulent ces points d'après les fonctionnalités utilisées pour ainsi créer des formes complexes. Ces formes auront des propriétés géométriques, sémantiques et géographiques relatives respectivement aux formes, aux attributs et à la localisation. De plus, les objets disposeront des caractéristiques topologiques en ce qui concerne leur relation avec les autres objets au sein de la classe d'entités qui les regroupe.

La classe d'entités fait référence à une couche qui stocke des objets vectoriels relatifs à une thématique en fonction de l'information géographique qui leur est attribuée. Elle contient la forme géométrique des objets ainsi que les attributs propres à chaque objet et leur information géographique. C'est pourquoi il est possible de visualiser la localisation, les attributs et la forme des objets vectoriels dans un SIG.

Un objet vectoriel est une forme géométrique formée individuellement par un ou plusieurs sommets qui pourraient être liés par des segments tracés. Chacun de ces sommets va acquérir une coordonnée spatiale projetée dans le système de coordonnées spatial de la classe d'entités qui contient l'objet. Dans ce sens les sommets fonctionnent comme un point d'ancrage qui possède une valeur de longitude (X) et de latitude (Y), mais qui pourrait éventuellement avoir une valeur Z référente à un référentiel altimétrique.

L'objet digitalisé devient ainsi une entité qui est définie spatialement en terme de sa localisation et de sa forme, mais aussi de données alphanumériques concernant ses caractéristiques. Les propriétés géométriques de l'entité qui ont été prises sur la base du support raster seront associées à des données attributaires de forme et de localisation par défaut, mais aussi à d'autres catégories attributaires que l'on peut ajouter pour renseigner la couche thématique.

Grâce aux outils proposés dans le menu d'édition d'ArcGIS Pro, la création, la modification, ou même la suppression des objets d'une classe d'entités est possible. Ces outils facilitent la juxtaposition des objets créés aux formes réelles présentes dans le raster de référence, en utilisant les différentes fonctions d'édition.

Or, en ce qui concerne les types de représentation des objets, chaque entité est composée par des points d'ancrage. Chacun des sommets a sa propre information géographique mais les traces qui lient les sommets, ou leur absence, détermine le type de classe d'entités.

Pour ce qui est des objets vectoriels, il est possible d'obtenir des entités en tant que points, de lignes et de polygones. Sachant que les sommets sont des points d'ancrage qui composent les objets, alors une classe d'entités de type point contiendra seulement des points (un seul point d'ancrage) et chaque entité se verra attribué une coordonnée X et Y (éventuellement Z) dans un système spatial de référence. Cependant, pour la création des formes complexes ce sont les segments entre les points qui détermineront le type des entités.

En tenant compte, que toute entité est composée de points d'arrêt, les formes complexes résultent de l'articulation des points créant ainsi des segments qui constituent la forme de l'objet dans son ensemble (Figure 16). Dans les cas des entités de type ligne, l'objet est formé à partir des sommets et par des segments qui les articulent. Désormais s'il s'agit d'une série de segments constituant une ligne fermée, elle devient un polygone étant donné que deux des sommets auront les mêmes coordonnées. Cela va créer un rapport intérieur — extérieur de l'entité qui

permettra différents types de géotraitement à partir de la forme géométrique de l'entité et de l'information géographique associée à l'entité.

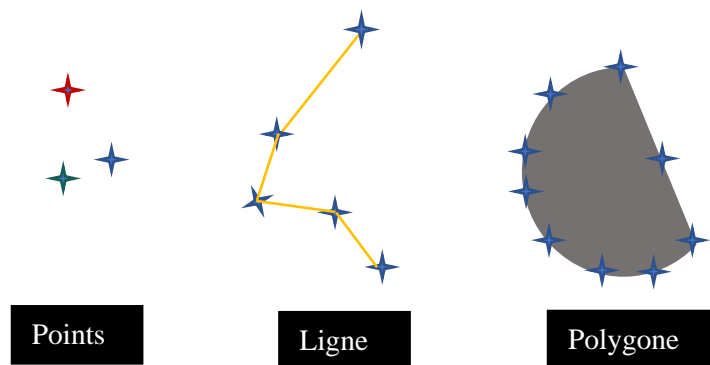


FIGURE 16 – DIAGRAMME DES TYPES D'OBJETS VECTORIELS

La numérisation d'objets est faite au sein d'une couche thématique qui contient toutes les entités relatives à ce sujet. À ce stade, il est important de préciser que toutes les entités d'une couche vectorielle doivent être du même type. Une définition explicite du type de géométrie est requise au moment de la création de la couche, où la digitalisation des objets vectoriels sera faite. Cependant, les mêmes informations pourraient parfois être évoquées avec différents types de représentation.

2.3.2 Représentation vectorielle

Une fois que l'entité est numérisée, les informations concernant son identifiant unique au sein de la couche, ainsi que les informations géométriques, sont ajoutées comme attributs par défaut. L'information géographique est également enregistrée par le biais des coordonnées géographiques projetées dans le système de référence spatial attribué à la couche. Les données alphanumériques sont affichées dans la table attributaire, tandis que les géométries sont visibles et éditables uniquement dans le menu d'attributs de la classe d'entités.

Dans le cas des points, il n'y a que l'information des coordonnées géographiques qui sera enregistrée par défaut comme propriété de la géométrie en plus de l'identifiant unique de l'entité. Pour les lignes, les mesures de la longueur sont aussi enregistrées en plus de l'information géographique des sommets. En revanche, les entités de type polygone ont les attributs de la surface exacte et de la longueur de leur périmètre permettant de mettre en évidence l'emprise au sol d'une entité.

D'après les archives historiques, il est possible d'attribuer des dimensions communes à tout le réseau souterrain des fortifications de Genève. Selon les esquisses aperçues dans les archives

et les sources bibliographiques, l'intérieur des galeries mesurait environ 90 centimètres de large et 190 centimètres de hauteur. Cette mesure a été ratifiée dans la deuxième partie du stage sur la base des relevés 3D grâce à des outils de mensuration de différents logiciels.

La mensuration prise directement sur le nuage de points dans le logiciel *Cloud Compare*, ainsi que celle prise à partir des fichiers *tiff* sur ArcGIS Pro, montrent que les dimensions des galeries relevées par la DIT et le GAVA sont conformes à celles proposées par les sources d'archive (Figure 17). Les variations sont de maximum 3 centimètres et cela pourrait être lié à l'outil de mesure et à la finesse de l'échelle à laquelle la mesure a été prise.

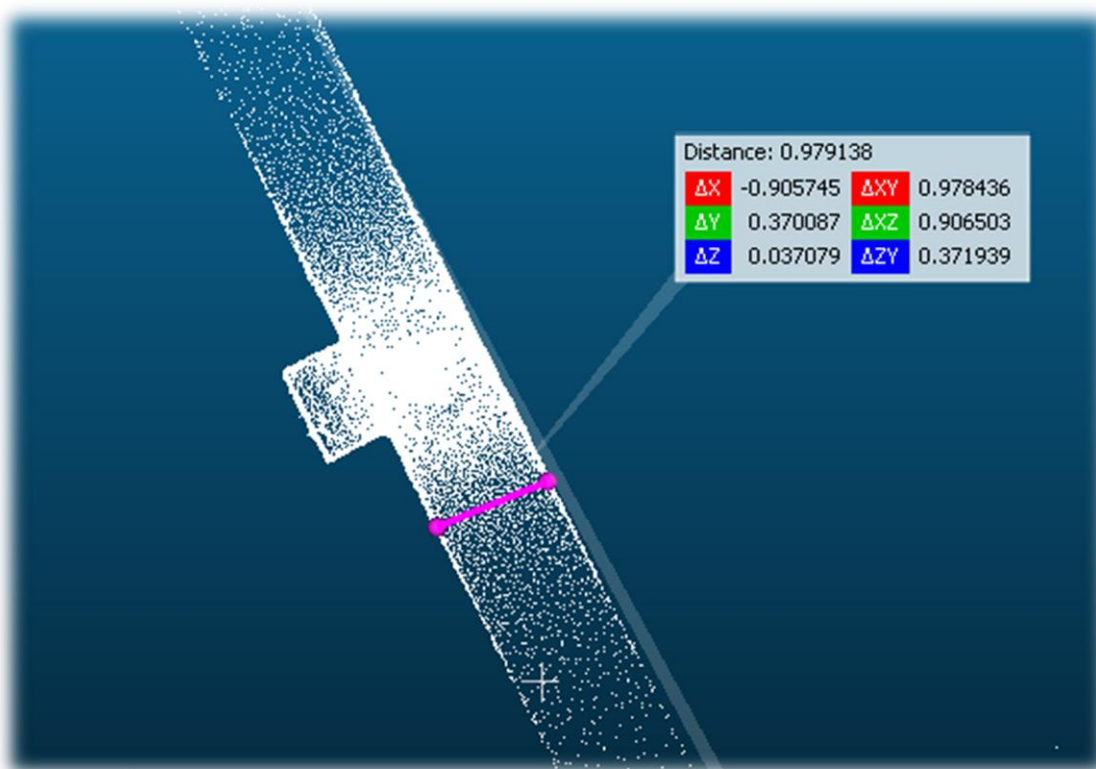


FIGURE 17 - MENSURATION DANS LES NUAGES DE POINTS DANS LE LOGICIEL CLOUDCOMPARE

Considérant que les dimensions intérieures ont été validées, la décision de représenter le réseau souterrain sous forme de polygone et non de lignes a été prise afin de rendre visible l'emprise réelle des galeries. Les entités de type ligne n'ont pas d'information géométrique sur la surface, elles agissent comme des objets linéaires qui vont toujours garder leur longueur tandis que ses aspects de largeur augmentent au fur et à mesure que l'échelle de visualisation augmente. En revanche, le polygone représente la surface réelle à toutes les échelles de visualisation.

Par ailleurs, le type de représentation a permis non seulement de mettre en évidence l'aspect intérieur des galeries, mais aussi de faire une projection de l'emplacement de la structure

maçonnée (selon les sources bibliographiques). Ainsi, les galeries seront autant prises en compte que leur structure maçonnée pour renseigner l'information géographique de l'ancien système souterrain au sens de la LPMNS.

Dans ce sens, l'objectif était de mettre en évidence l'emprise au sol des anciennes galeries de contre-mines. À cet effet, il était nécessaire de rectifier la mesure, dont la largeur, pendant le processus de numérisation des objets. Avec l'outil de mensuration d'ArcGIS Pro, les segments qui donnent la largeur aux galeries ont été vérifiés et ajustés dans une plage qui se situe entre 90 centimètres et 1 mètre. Cela considérant que les ajustements de taille devaient être effectués manuellement après les mesures prises. Ainsi, l'attribution d'une largeur par défaut aux polygones n'a pas été possible et les modifications au niveau du centimètre en deviennent considérablement compliquées.

2.3.3 Relation topologique entre polygones

La topologie est une branche des mathématiques qui fournit les notions pertinentes pour la classification des surfaces et la compréhension de la relation entre les objets spatiaux : une conception qui permet le traitement et modélisation des objets géographiques et l'analyse en rapport avec leur voisinage (Gröger & Plümer, 2010). Dans cet ordre d'idées, les relations géométriques de proximité entre plusieurs entités sont alors abordées en distance. Ces postulats permettent de prendre en considération différentes classes d'interaction entre deux ou plusieurs entités vectorielles, toujours sur la base d'un rapport de proximité.

Au niveau de l'affichage de l'espace géographique, il est possible d'identifier plusieurs relations spatiales. Une entité en soi va faire émerger les notions intérieure, extérieure et leur limite en tant qu'objet spatial. Cependant, ce sont les relations entre entités qui nous permettent de distinguer les objets de ceux qui font parties d'un système spatial spécifique. Ainsi, à partir d'une situation liée à la position des entités, les notions de lien adjacent, de connectivité, d'inclusion et d'intersection émergent en tant que types de relations topologiques.

Les relations topologiques entre les entités constituent un aspect fondamental en termes de l'information traitée dans un SIG. Cela évoque que le rapport entre les différents objets spatiaux au sein d'une même classe d'entités sert à gérer et valider l'information de la localisation des objets, ainsi que ses propriétés attributaires. C'est sur la base d'information topologique que repose la fiabilité des requêtes et les analyses spatiales, car les différents types de situations entre polygones peuvent avoir une influence défavorable pour le géotraitement des données.

Au moment de représenter des objets spatiaux numériques dans un SIG, les traits et les limites ne sont pas toujours justes. Il est possible que ce type de représentation présente des erreurs de manipulation lors de la démarche de digitalisation, ou encore que certaines des erreurs n'aient pas été prises en compte ou n'aient pas pu être observées lors de la visualisation des objets. À cet égard, il en émerge la nécessité de rectifier les éventuelles erreurs des relations topologiques afin de valider l'exactitude des relations de proximité (Shi & Liu, 2007).

La création d'une topologie dans un SIG définit un type de rapport entre les entités en fonction de sa géométrie. Le type de relation est établi *ad hoc* selon des besoins spécifiques de chaque cas afin d'analyser et de vérifier le rapport de voisinage des géométries souhaité.

Le logiciel ArcGIS Pro propose des fonctions qui, à partir d'un géotraitement de calcul, permet de créer une topologie pour une ou plusieurs classes d'entités. Cet outil va générer une nouvelle couche qui expose les éventuelles erreurs d'après les critères sélectionnés en fonction de l'objectif de vérification. Ainsi, le logiciel offre la possibilité d'analyser, de gérer et de valider les relations topologiques entre les objets d'une ou de plusieurs classes d'entités.

Avec la création d'une relation topologique, une démarche d'analyse des coordonnées des sommets est faite pour tous les objets des classes d'entités intégrées dans la topologie (Desktop ArcGIS, *Topologie dans ArcGIS—ArcGIS Pro / Documentation*, s. d.). Cela dit, un calcul de distance par rapport à d'autres sommets est fait sur la base d'une valeur de tolérance attribuée pour évaluer le caractère de la relation géométrique. Ainsi les sommets qui sont dans la zone de tolérance seront interprétés comme des coïncidences. Sur la base des résultats, la couche émergente va mettre en évidence les erreurs (ponctuelles, linéaires ou surfaciques) présentes dans l'analyse topologique.

Ensuite, il était important de procéder à l'analyse topologique afin de valider les résultats du processus de digitalisation des galeries. Étant donné que les galeries souterraines ont été représentées en tant que polygone, la validation de la relation topologique présentée en termes surfaciques devait être aboutie afin de vérifier la présence d'éventuelles intersections de surface, mais également s'il y avait des erreurs liées aux segments de lignes adjacentes. Ces derniers ont permis d'assurer l'absence d'écarts dans le réseau. Ainsi, en ce qui concerne les réglages, une tolérance de 1 centimètre a été établie pour l'analyse et seulement la classe d'entités qui contient le réseau souterrain faisait partie de la topologie créée.

En tant que réseau, les galeries souterraines devaient avoir une continuité malgré la catégorisation qui a été proposée pour renseigner l'état des différents tronçons. C'est pourquoi les différents objets devaient avoir une condition adjacente sur le plan du rapport topologique, assurant la continuité du réseau sans avoir d'espaces d'écart internes.

A cet effet, les règles topologiques qui ont été définies pour le calcul géométrique étaient axées sur le fait de ne pas admettre les superpositions de surface entre les polygones (*Must not overlap*) et également de ne pas admettre un écart entre les polygones (*Must not have gaps*). Ainsi, le résultat souhaité serait une représentation topologique dans laquelle les polygones adjacents ont un même segment commun et leurs nœuds ont les mêmes coordonnées (Figure 18).

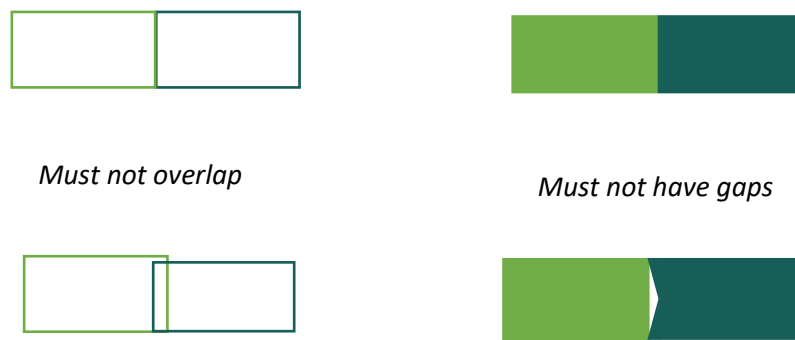


FIGURE 18 - RÈGLES TOPOLOGIQUES APPLIQUÉES

2.4 Hyperliens

En ce qui concerne l'objectif principal du stage, il n'était pas seulement nécessaire de reconstituer les propriétés géométriques souterraines, mais il était également nécessaire de relever les attributs alphanumériques conformément aux informations d'archives et des lignes directrices pour la classification et la sauvegarde des ouvrages souterrains.

Une fois que le réseau souterrain a été numérisé et validé, tant géométriquement que géographiquement, un processus de construction de la table attributaire s'est développé sur la base des informations à disposition ainsi que de catégories établies par l'OPS. Dans le cadre de ce processus, il était fortement souhaité d'associer les relevés, les plans, les esquisses et les images d'archive à leurs galeries correspondantes. Le tout dans le but de donner un contexte et un support technique à la transmission d'informations des couches livrables pour publication.

Cependant, un enjeu important a émergé au moment de la mise en lien de toute la documentation, étant donné que parfois, plusieurs documents font référence au même objet

vectorel. Toutefois, dans un même champ attributaire il n'est possible d'ajouter qu'une seule information, le fait d'avoir trois éléments pour un seul attribut posait une difficulté pour l'utilisation optimale de la table attributaire.

La possibilité de créer plusieurs champs pour une même catégorie afin d'agencer tous les documents relatifs à un objet n'était pas très efficace, car certains objets avaient trois documents à joindre, tandis que d'autres n'en avaient qu'un seul. En termes de compréhensions et de lisibilité, la quantité de champs informatifs était déjà suffisamment importante pour y ajouter de nombreux champs supplémentaires.

Une première piste pour traiter cette contrainte fut de créer différents tableaux attributaires et ainsi gérer les informations comme une base de données à partir des requêtes de type *Structured Query Language* (SQL). Par le biais d'un modèle relationnel, un lien de type *one-to-many* (1-N) permettrait d'associer plusieurs documents à une galerie par l'objet ID. Ainsi, à partir d'un modèle logique de données simple, toutes les données pouvaient être liées et trouvées sur la base d'un identifiant. Cependant, cette approche a été rejetée en raison de plusieurs arguments.

Tout d'abord, l'échange avec M. Andreas Stussi (SITG) a fait ressortir qu'il n'était pas possible de procéder aux requêtes SQL dans le géoportail. Par conséquent, les tableaux associés aux données seraient inaccessibles une fois la couche publiée. Ainsi, l'argument principal de trouver une autre solution était axé sur l'intention de publier les données sur le guichet patrimoine SITG et rendre accessible l'information de l'ancien réseau souterrain aux utilisateurs (public et collaborateurs de l'État). L'idée était donc de faciliter la visualisation et la consultation des informations le plus possible. Conséquemment, devoir passer par des requêtes pour accéder à l'information rendait le processus très compliqué.

Dans cette optique, la proposition d'utiliser des liens hypertextes pour attacher les informations des entités a été considérée comme l'approche la plus pertinente pour faciliter la consultation de l'information relative à chaque galerie, mais aussi pour transmettre l'information générale de tout le réseau.

La table attributaire d'une classe d'entités rend possible la création des champs attributaires de type texte, dans lesquelles est possible d'ajouter des liens *Uniform Resource Locator* (URL) qui identifient le cheminement d'accès à une source. Une fois que la table reconnaît l'information ajoutée, le texte devient un hyperlien qui permet d'accéder à la source d'information (*Hyperliens dans un champ de texte—ArcGIS Pro | Documentation, s. d.*). De

cette façon est possible d'associer tout type de documents, ou encore des sites web. Mais, il faut tenir en compte que l'accès à l'espace de stockage de l'information doit être envisagé en fonction de l'usage et de la localisation des utilisateurs.

Considérant que la consultation de l'information de l'ancien réseau souterrain s'effectuera en ligne, ou encore depuis différents postes de travail de l'État de Genève, un espace d'hébergement dans un serveur web (requêtés *World Wide Web*) était nécessaire pour garantir l'accès en ligne aux documents. Dans ce cas particulier, toutes les pièces jointes ont été stockées sur le serveur du SITG où est conservée la documentation complémentaire des couches géographiques. Plus précisément à l'intérieur du dossier concernant l'IMAH.

À ce point, le problème d'avoir plusieurs documents pour le même objet persiste. Cependant, grâce à l'orientation de l'architecte géomaticienne du service, Mme. Paola Bozonet, l'option de créer des pages de garde pour chaque objet a émergé comme une solution performante afin d'associer les informations de façon simple et compréhensible.

L'idée était donc de créer un champ attributaire nommé *Fiche informative* et d'ajouter simplement un hyperlien pour chaque objet de la couche, ce qui permet de créer l'accès à la page de garde. Cette fiche contient l'information de l'objet et les liens URL pour l'accès à la documentation de support (relevés, plans, images d'archive, sources bibliographiques). Ainsi, en sélectionnant la couche, l'information complète et spécifique à chaque galerie devient facilement accessible. À ces informations s'ajoutent une description pour faciliter la lecture de l'utilisateur.

Or, un autre enjeu s'est posé en termes des documents communs à tous les objets de la couche du réseau souterrain. L'option de créer un hyperlien dans un champ attributaire permet d'attacher les pièces jointes par le biais d'une page de garde. C'est pourquoi l'option d'utiliser des liens hypertextes dans le *pop-up* de la classe d'entités a été sélectionnée pour ajouter les documents de support pour l'ensemble des données.

3 Résultats

Les éléments livrables produits au cours du stage ont été liés aux besoins et aux exigences de l'OPS afin de répondre aux exigences légales qui sont apparues dès que les galeries souterraines des anciennes fortifications ont été placées sous la protection de la LPMNS. En ce sens, une couche géographique (classe d'entités) de l'ancienne infrastructure souterraine, accompagnée

de l'information attributaire de ses différentes sections a été le produit principal généré en vue de sa publication sur le SITG. Or, l'intention de créer ces données portait également sur la mise à jour du Plan N°30133 qui traite les mesures de protection établies par la LPMNS. C'est pourquoi un deuxième jeu de données adapté aux critères de protection du patrimoine de l'OPS a été créé sur la base de la couche principale.

Cependant, pour arriver aux produits finaux, il a fallu passer par plusieurs étapes intermédiaires qui ont permis de mettre en place le résultat final, qui sont en elles-mêmes des résultats partiels qui doivent être présentés. À cet égard, cette partie du document sera consacrée à présenter initialement ces étapes intermédiaires qui sont dans son ensemble le tremplin pour arriver aux résultats finaux du stage.

Ainsi, dans un premier temps, les résultats du géoréférencement en termes d'EQM seront présentés afin d'établir la base de précision de la localisation qui a servi de base pour la création des données vectorielles. Ensuite, la procédure de digitalisation des galeries relevées et la démarche analytique qui a été employée pour la reconstitution des tronçons supposés seront exposées. Finalement, une partie consacrée à la création de la table attributaire et de la documentation complémentaire sera présentée.

Une fois que tous les détails auront été exposés, les résultats finaux seront présentés dans leur ensemble pour ensuite aborder les limites identifiées lors de la démarche.

3.1 Une localisation au niveau du centimètre

Lors du géoréférencement des relevés et des plans, un aspect fondamental lié à la taille et aux caractéristiques des rasters a été identifié. Comme dit précédemment dans la section méthodologique et conceptuelle, les dimensions en termes de surface, la qualité de l'image et les éventuelles déformations des rasters sont un facteur qui va avoir une incidence directe sur le processus d'alignement et de transformation. Par conséquent, la précision de la position des galeries dépendait de la méthode de géoréférencement la plus appropriée en fonction des propriétés de chaque raster.

Les couches géographiques de référence ont été prises du SITG sur la base des éléments identifiables dans les documents à disposition. Ainsi, la couche CAD_BATIMENT_HORSOL qui présente tous les bâtiments du canton, la couche CAD_POINTFIXE_PP qui contient les points de cadastre officiel (3^{ème} catégorie) et la couche CAD_PARCELLE_MENSU concernant

les limites officielles des parcelles ont été les données cibles pour le géoréférencement de toute la documentation indépendamment du type de source.

Exceptionnellement, pour le géoréférencement du relevé des casemates et de la galerie du Boulevard Helvétique, la couche CAD_OBJETS DIVERS a été utilisée compte tenu qu'il s'agit d'une orthophoto ne couvrant que la surface du parc de la Promenade de l'Observatoire. Dans l'image, il n'y a aucun bâtiment et les points de mensuration ne sont pas identifiables. Par conséquent, les escaliers du musée et du parc ont servi comme référence pour le positionnement obtenant une très bonne valeur d'erreur résiduelle.

En tenant en compte du fait que la qualité des relevés joue un rôle fondamental dans l'ensemble de la démarche de reconstitution du réseau souterrain, une hiérarchie entre les différentes sources a été définie en vue d'affiner l'analyse en se basant sur les données les plus fiables. Ainsi, les relevés 3D du GAVA et la DIT auront toujours la priorité face aux documents du dossier GESDEC et d'autre part, tant les esquisses présentes dans la revue GAVA comme les images d'archive seront juste un complément analytique aux relevés considérant son caractère schématique. C'est donc à partir de la position des tronçons relevés par l'enquête GAVA que la reconstitution du réseau sera effectuée, en complétant avec les plans du GESDEC, les esquisses GAVA et les images d'archive pour proposer ainsi les articulations supposées.

De manière générale, il est possible de séparer la documentation en deux catégories. D'un côté, les documents qui font référence à une galerie précise et qui correspondent à une petite surface. Les éléments spatiaux présents dans ces documents auront des caractéristiques plus détaillées en raison de l'échelle de représentation et cela va permettre d'affiner la précision du géoréférencement. D'autre part, certains documents correspondent à une surface plus vaste qui expose les données à l'échelle du quartier ou de la ville. Ces documents font référence à l'ensemble du réseau souterrain ou bien à une partie substantielle de celui-ci, ce qui rend la démarche de géoréférencement plus complexe.

Les plans de grande envergure spatiale présentaient une complexité pour obtenir un positionnement spatial correct, cela étant dû aux dimensions du document et à la déformation de l'image (plis et froissements). Une autre limite survient lorsque le document couvre une grande zone mais que son format est petit et que, pour adapter le raster au terrain, l'image devient pixelisée. À cet égard, une transformation polynomiale de deuxième ordre est nécessaire pour gérer les déformations du raster par rapport au terrain.

Le plan N° 251.86.2 est un document créé par le GESDEC en 1987 comme une tentative de rassembler les relevés des galeries souterraines faites au cours des années 1970 et de recréer le réseau original proposé par Louis Blondel à la lumière des nouveaux résultats. Considérant les dimensions du document (1 :2500) et son état de conservation, l'erreur quadratique moyenne pourrait s'avérer élevée (Figure 19). Cependant, une transformation de deuxième ordre avec 10 points de contrôle a permis d'obtenir un positionnement vraiment précis, atteignant au maximum 5 centimètres de décalage. En dialogue avec les encadrants du stage et d'après les articles scientifiques consultés, une valeur d'erreur résiduel de 1 mètre est en soi assez bonne considérant la taille du plan. Par conséquent, réduire ce chiffre à moins de la moitié est tout à fait convenable pour la démarche en termes de rigueur.

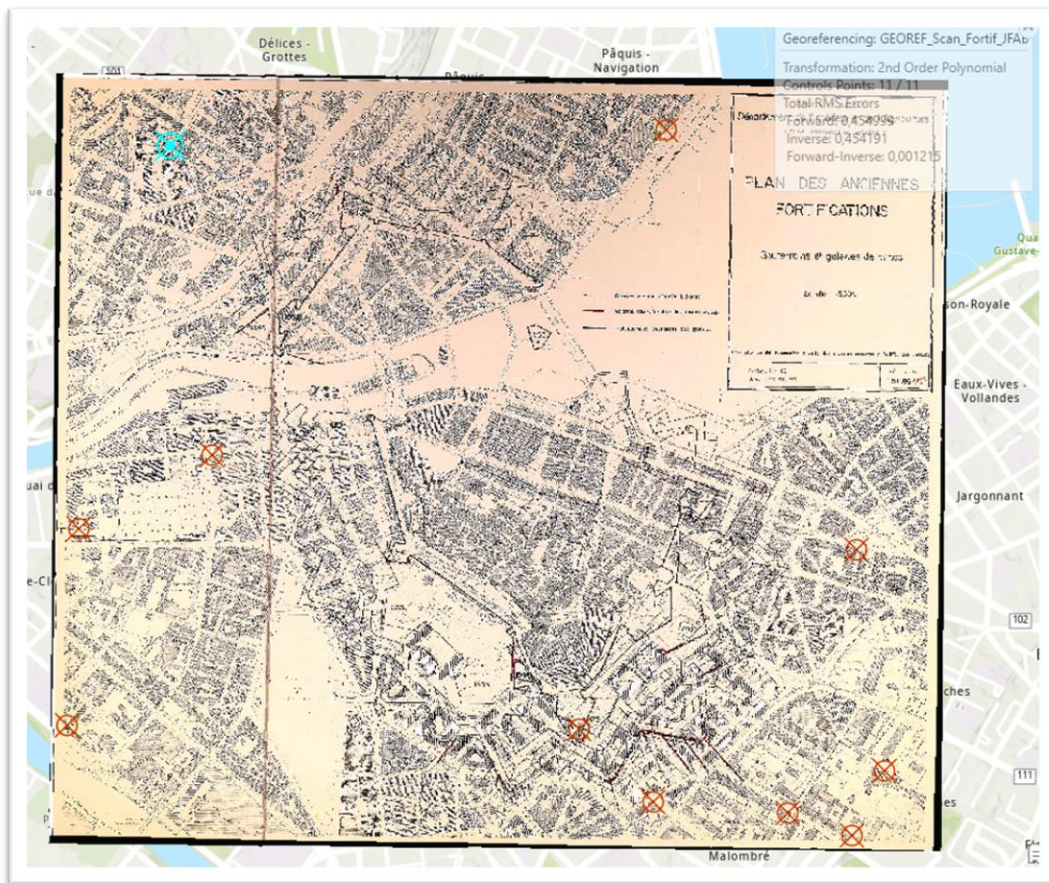


FIGURE 19 - POINTS DE CONTRÔLE ET EQM DU GÉORÉFÉRENCIEMENT DU PLAN 251.85.2

Dans le cas des documents de petit format (environ 1 :500) le niveau de décalage a été toujours faible pour les documents qui possédaient les éléments de référence éligibles comme référence. La plupart des relevés du XXe siècle contient les bâtiments et certains d'entre eux évoquent les limites des parcelles. C'est sur la base de ces éléments, notamment des bâtiments, que le géoréférencement des documents élaborés par le GESDEC a été réalisé (Figure 20).

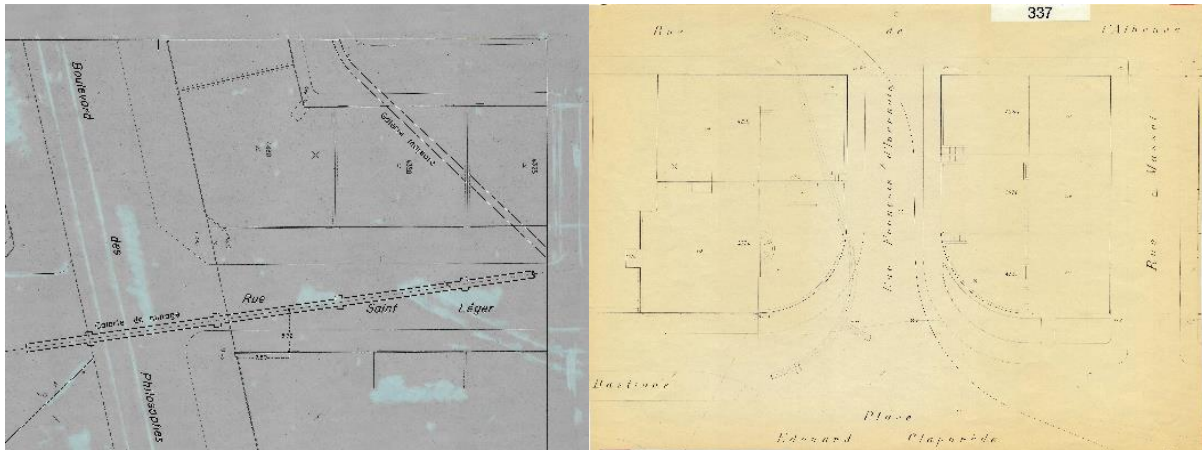


FIGURE 20 - SOURCES DE REPÉRAGE DANS LES PLANS HISTORIQUE DU GESDEC

Les relevés produits par les géologues cantonaux au cours des années 1970 ont été géoréférencés avec un résultat de haut niveau de précision grâce à la qualité des rasters et à la quantité de détails présents dans l'image. La présence des bâtiments et des parcelles contribue à disposer de différentes options de liaison réparties à toutes les extrémités du raster, favorisant ainsi le géoréférencement des documents. Quant à l'erreur quadratique moyenne identifiée par la démarche, les résultats obtenus pour les documents du dossier GESDEC montrent généralement un décalage de moins de 10 centimètres. Un chiffre assez rigoureux pour être accepté, sachant que ces sources agiront comme un complément des relevés plus récents en raison de son degré de précision.

Cependant, les documents les plus anciens du dossier GESDEC n'avaient pas suffisamment d'éléments de référence en surface pour la création des points de contrôle, limitant ainsi la possibilité d'attribuer une référence spatiale correcte. C'est le cas des documents de la Poterne de St-Léger et de la galerie trouvée dans la Rue Charles-Galland, lesquels présentent les plans des galeries mais sans aucun autre élément de repérage.

Heureusement, ces deux sites disposaient d'autres plans plus récents et plus détaillés qui étaient contenus dans le même dossier. Même s'il existe plusieurs documents pour un site, il est important de géoréférencer tous les documents afin de repérer les détails présents ou absents dans les différentes versions. De plus, le contraste entre les différents relevés d'un même site a permis de faire une première évaluation du processus de géoréférencement.

Concernant les relevés 3D produits par le GAVA sur demande de la DIT, le résultat du processus de scannage génère une représentation d'image 2D des points (perspective orthographique) en plus du nuage de points qui sera abordé ultérieurement. Le

géoréférencement de cette image devient notamment précis en raison de la qualité d'image du fichier et de la quantité de points identifiés par le scanner dans les surfaces. Même la quantité de détails rend parfois difficile l'identification des angles des bâtiments compte tenu que le scannage va récupérer aussi les points identifiés dans les ornements des plafonds. Cependant, l'identification des angles nets et les points de mensuration soulevés ont permis de réussir un excellent résultat du géoréférencement des relevés dont la valeur maximale d'EQM est de 5 centimètres (Annexe 2). Ainsi, considérant les possibles défauts lors de la démarche (assemblage des points scannés, la difficulté de trouver le point correct pour l'alignement et la marge de décalage données cibles) il est possible d'assurer la position des galeries dans une zone de tampon de 10 mètres.

Il faut préciser que l'enquête lancée par la DIT n'a recueilli des données qu'auprès de cinq galeries (François-Le-Fort, Charles-Galland, Jean-Senebier, Alice-Rivaz, St-Léger, l'Athénée). Par conséquent, bien que ces relevés aient la priorité pour fixer les points de départ de la reconstitution, les plans des galeries relevés par les géologues cantonaux joueront un rôle clé pour le positionnement d'autres galeries connues (Philosophes 1 & 2, Bd. Helvétique, Casemate de St. Antoine).

Comme énoncé précédemment, pour les esquisses des articles publiés dans les différents volumes de la revue GAVA et les images d'archive de la ville le géoréférencement de ces éléments est fait avec un objectif notamment analytique. Ces sources ne seront pas utilisées comme une référence visuelle pour la digitalisation, mais comme des éléments de compréhension de la structure du réseau et ils auront une plus grande pertinence pour la démarche de reconstitution des tronçons supposés. Par conséquent, le géoréférencement de ce type d'éléments contient des valeurs d'erreur plus grandes compte tenu du fait que les images ne sont pas représentatives de la réalité spatiale, mais plutôt une explication de la composition de la structure.

De plus, il faut prendre en compte que les esquisses et les images ne présentent aucun élément de repérage clair par rapport à la surface, ce qui rend plus difficile l'attribution des points de contrôle. C'est pourquoi le géoréférencement de ces éléments a été fait à partir d'autres rasters qui avaient déjà été géoréférencés avec précision (Figure 14). Ainsi, les valeurs d'erreur quadratique moyennes acceptées pour ce type de sources est jusqu'à 1 mètre et demi.

Le processus de géoréférencement des relevés au format de projection orthographique 3D et des anciens documents d'archive a permis de fixer spatialement les tronçons souterrains connus avec une précision assez rigoureuse (Figure 21). L'écart éventuel varie seulement de 3 à 7 centimètres en ce qui concerne les éléments qui ont été pris comme référence visuelle pour la digitalisation vectorielle des galeries. C'est sur la base de la vraisemblance de ces constatations que la reconstitution des tronçons supposés sera proposée avec le soutien des esquisses et des images d'archives.



FIGURE 21 - DIGITALISATION DES GALERIES CONNUES ET DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

3.2 Reconstitution vectorielle du réseau souterrain

Avec toutes les données rasters déjà géoréférencés et les valeurs d'erreur quadratique moyenne vérifiées selon le plafond accepté dans le cadre du stage, le processus de numérisation des galeries dans une nouvelle classe d'entités a pu être lancé. Le support visuel des rasters a permis de tracer les contours des galeries, en créant un polygone dont la surface correspond aux dimensions type des souterrains identifiés dans l'information d'archive.

Les projections orthographiques 3D du dossier GAVA ont permis de numériser correctement les dimensions et la localisation des souterrains connus. Une vérification avec l'outil de

mesuration ArcGIS a été appliquée pour rectifier la largeur des objets vectorisés sur la base de ces relevés et les résultats étaient toujours dans la plage acceptée (90 cm– 1 m) (Figure 22)

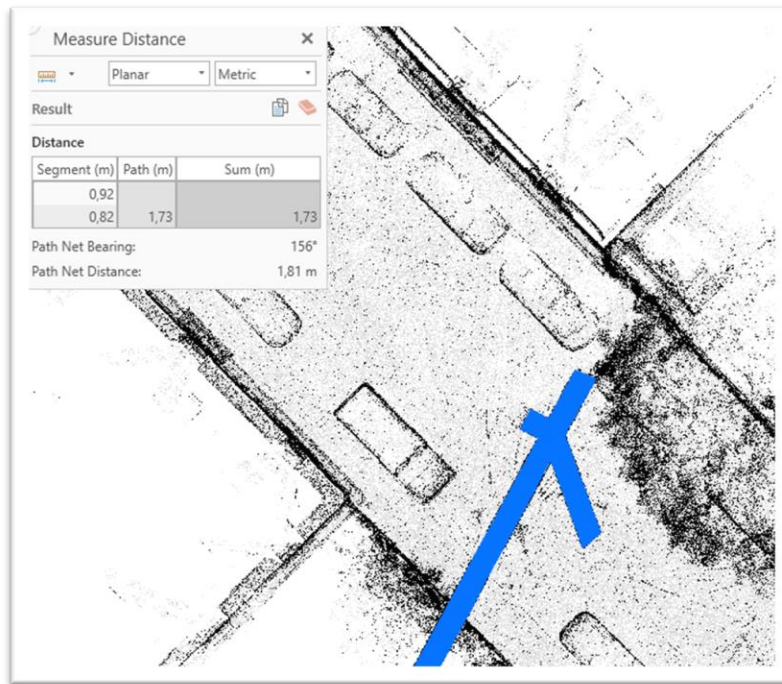


FIGURE 22 - MENSURATION DE LA LARGEUR DES GALERIES SUR LA BASE DES PROJECTIONS ORTHOGRAPHIQUES 3D

Cependant, concernant les anciens plans, malgré un bon positionnement des rasters, il a fallu rectifier la largeur des polygones. En effet, certains contours dépassaient la dimension de largeur type. Ceci est dû à la méthode utilisée par les géologues qui consistait à référencer l'axe central des galeries pour ensuite reproduire sa surface intérieure. Cette méthode permet de représenter une position précise de la galerie mais, peut dans certains cas étirer un peu le polygone déduit de l'axe central en raison de la transformation du raster lors du géoréférencement. Bien que ce type de situations aient été peu nombreuses, une correction manuelle a été effectuée afin d'ajuster la largeur des polygones aux mesures établies.

La démarche de reconstitution des tracés supposés a ainsi pu être réalisée sur la base des éléments vectoriels validés et rigoureusement positionnés. Avec toutes les galeries relevées déjà numérisées, l'idée était initialement d'identifier et créer les liaisons directes entre les fragments connus. L'orientation des extrémités des fragments connus nous permettent de deviner la continuation du souterrain en les mettant en relation avec d'autres galeries relevées et les données historiques.

Dans cette optique, même si certains documents anciens proposent des hypothèses sur la structure du réseau souterrain, l'exercice de reconstitution du réseau réalisé au cours du stage a eu pour principale référence la position des galeries relevées par l'enquête de la DIT par le biais du scanner 3D. Les autres sources documentaires ont toutefois été utilisées en complément lorsque les informations étaient cohérentes.

Dans la zone de Champel, plusieurs liaisons directes entre les galeries connues ont été identifiées. Grâce aux anciens plans et aux sources bibliographiques on a pu constater que ces liaisons font partie de la galerie majeure de la contrescarpe des fortifications. La numérisation de ces tracés a été effectuée sur la base de ces informations et a permis d'obtenir une forme continue dont il est possible de prélever les fragments qui se répètent dans le réseau.

Une fois que les tracés directs entre les galeries connues ont été faits, l'étape suivante a consisté à récupérer et à adapter les formes connues afin de compléter l'ensemble de l'ancien réseau souterrain. C'est à ce moment-là que les esquisses et les images d'archive sont devenues vraiment importantes pour l'analyse de la structure (Figure 20).

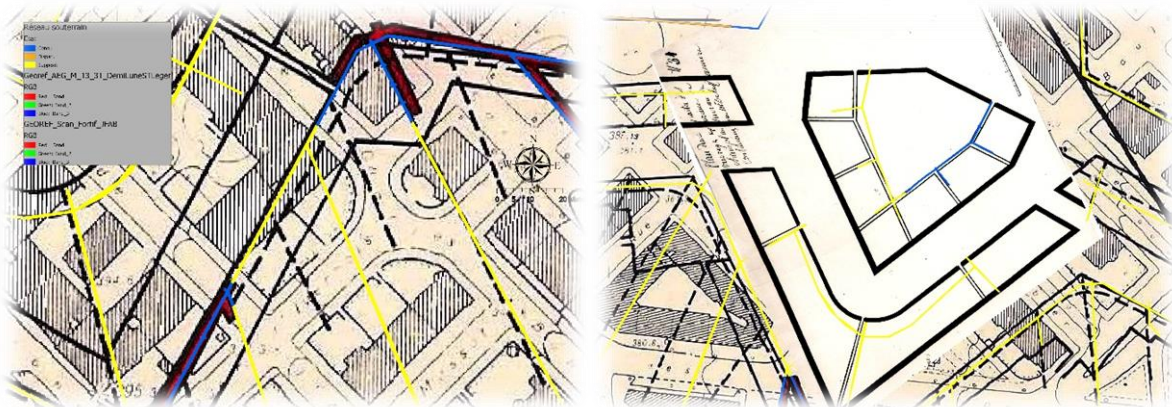


FIGURE 23 - DIGITALISATION DES FRAGMENTS SUPPOSÉS SUR LA BASE DE LA DOCUMENTATION HISTORIQUE

Les formes récupérées ont servi de base géométrique applicable aux tronçons actuellement inconnus mais énoncés dans les sources historiques (Annexe 3). Il a parfois été nécessaire d'adapter les formes en fonction de la taille ou en raison de petites variations de la forme dans d'autres parties de l'ouvrage. Par exemple, dans le cas des demi-lunes il a fallu adapter la seule forme connue, recrée à partir de la galerie Jean-Senebier, pour avoir une base géométrique fonctionnelle à toutes ces structures.

Cependant, la position exacte correspondant aux formes récupérées ailleurs dans le réseau restait inconnue. L'analyse des documents d'archive, les mesures des tracés reconstitués et

l'utilisation de formes géométrique comme sources de repérage ont été utilisées pour trouver le bon emplacement des formes de référence.

De toute évidence, le plan général des géologues de 1986 a servi de référence pour la démarche de reconstitution. Cependant, à certains emplacements, les données présentées dans le plan avaient un décalage considérable par rapport aux galeries digitalisées à partir des relevés 3D géoréférencés. De plus, les souterrains proposés dans ce plan se réfèrent aux hypothèses de Louis Blondel qui n'ont jamais été vérifiées et qui ne correspondent pas aux documents plus anciens comme le plan 39M4 datant de 1800 environ.

À partir des images d'archive et des esquisses référentes à des structures concrètes il a été possible de recréer la forme originale des souterrains. Les dimensions ont été adaptées par rapport aux données des fortifications du XVIIe publiées dans le guichet géopatrimoine du SITG. Cette couche des fortifications a été prise comme une référence pour trouver la bonne taille des souterrains par rapport aux structures fortifiées mais pas comme référence de position. En effet, le jeu de données vectoriel des fortifications présente un écart par rapport à la position des galeries géoréférencées avec un haut niveau de précision.

L'utilisation des entités redimensionnées a été orienté par une mensuration des distances prises sur la base des tronçons connus. Les mesures prises ont permis d'avoir certains dimensions relatives sur les différentes structures composant le réseau (bastions, contregardes, contrescarpes, demi-lunes) afin de vérifier la pertinence des objets vectorisés. Il est tout à fait possible que les dimension des structures des fortifications n'aient pas toujours été exactement les mêmes, cependant, le fait d'avoir des valeurs relativement proches a permis de maintenir une cohérence par rapport à la géometrie des fortifications.

Afin de trouver le positionnement correct des formes répliquées, plusieurs objets géométriques ont été créés et utilisés comme source de repérage. Cela a permis de guider la digitalisation des entités supposées en fonction de la géometrie du réseau. Par exemple, dans la Figure 24, il est possible d'identifier comment les lignes créées déterminent les vertex des trois lignes de défense à partir d'un élément connu. Cette référence permet d'orienter la reconstitution du réseau dans les tronçons où il n'y a pas directement d'entité connue ayant la capacité d'agir comme point de confirmation de la position.

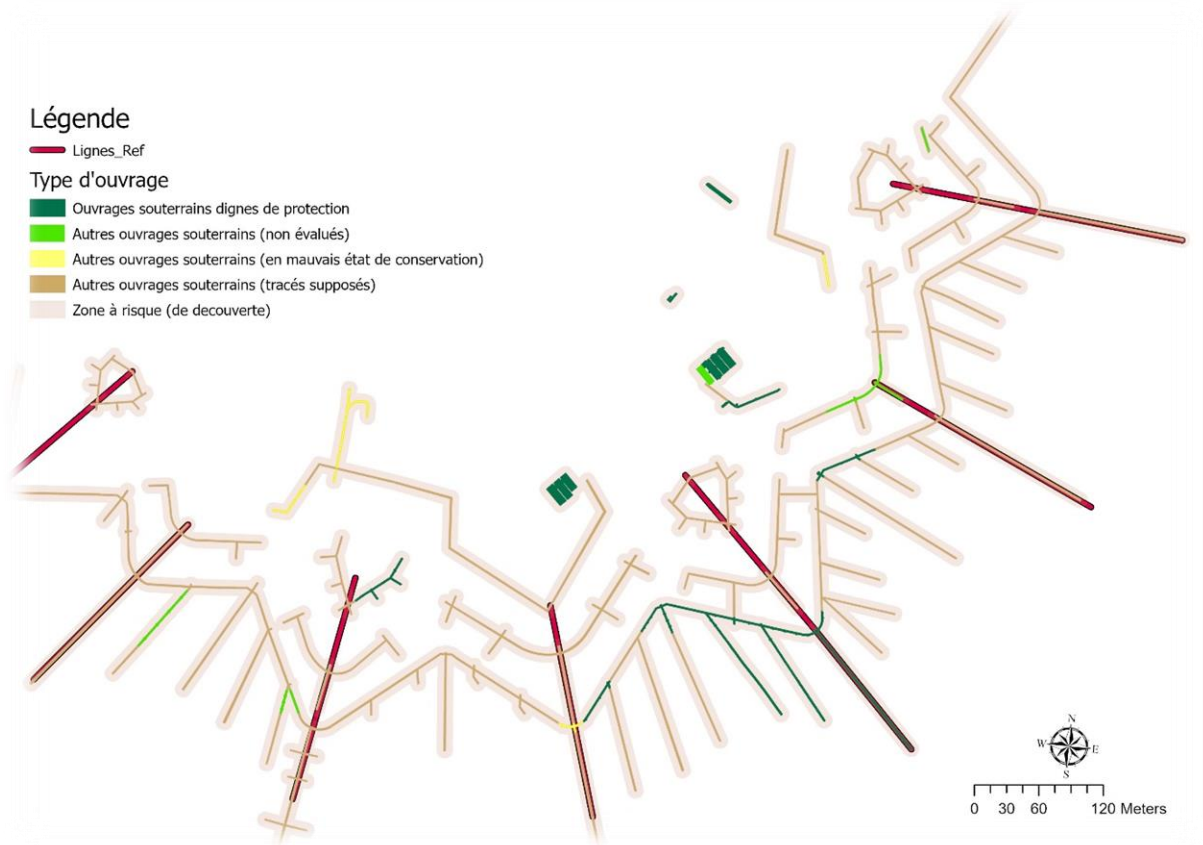


FIGURE 24 - LIGNES UTILISÉES POUR PRÉSERVER LES FORMES GÉOMÉTRIQUES DU RÉSEAU SOUTERRAIN FACE À L'ABSENCE D'ÉLÉMENTS CONNUS. LES LIGNES ONT PERMIS DE RECONSTITUER DES FRAGMENTS SUPPOSÉS À PARTIR DE DONNÉES ÉLOIGNÉES DE LA ZONE

En bref, la création des traces hypothétiques s'est toujours faite à partir d'éléments connus dont la position avait déjà été vérifiée. Ces objets vectoriels ont permis d'affiner la position des fragments inconnus à l'aide d'autres entités géométriques. Cependant, la forme de ces fragments a été reconstituée grâce aux informations fournies par la documentation historique.

Concernant l'extension du réseau vers Rive et Plainpalais, les hypothèses de Blondel et les données décrites par le Plan N°251.86.2 du GESDEC proposent la fin du réseau au niveau du rond-point de rive et du Square de la Comédie respectivement. Cependant, deux facteurs ont conduit à prolonger le parcours : d'un côté, direction Rive, les tracés proposés s'arrêtent dans le sommet d'un contrescarpe tandis que la contregarde correspondante possède une structure souterraine complète. Cette constatation, ainsi que le fait qu'une petite galerie a été identifiée un peu plus loin pendant les années 1970 nous permettent de proposer une liaison qui allongerait le réseau de 200 mètres. D'autre part, l'autre extrémité du réseau a été déplacée au rond-point de Plainpalais sur la base de témoignages oraux transmis à M. Matthieu de la Corbière.

Le processus de reconstitution du réseau a été fait dans la même classe d'entités que les galeries connues mais avec une autre valeur dans le champ attributaire nommé Statut. Cela a permis de faire la différenciation visuelle entre les entités connues, supposées et disparues. La catégorie disparue est composée d'entités qui ont été reconstituées d'après les documents historiques mais dont la disparition est certaine, soit parce qu'une reconstitution du terrain est maintenant évidente, soit parce que l'office a confirmé officiellement leur disparition (ou leur perte de valeur en raison des ouvrages).

Il est possible d'énoncer comme exemple le cas des Casemates, dont une partie a été préservée et est accessible en surface, mais dont une grande partie de la structure a été rasée lors de la construction du Boulevard Emile-Jaques-Dalcroze et le musée d'art et d'histoire. Un autre cas précis est celui des galeries situées sous le parc de Bastions, lesquelles ont été visitées par une délégation de l'OPS qui a constaté que, bien que toujours accessible, la structure d'origine avait été bétonnée lors de travaux publics dans le sous-sol.

3.2.1 Analyse topologique

Après avoir affiné la structure géométrique du réseau grâce aux commentaires et corrections transmis lors des réunions hebdomadaires et une fois le résultat approuvé, une topologie a été créée pour assurer un rapport correct entre les entités de la couche.

Les propriétés de la topologie, utilisées afin de vérifier la relation entre les objets vectoriels, ont été définies selon les exigences concrètes pour donner une cohérence au résultat de digitalisation du réseau souterrain. En d'autres termes, la validation topologique a permis de s'assurer que la représentation géométrique correspondait aux objets réels proposés et que la relation entre les formes était conforme aux caractéristiques physiques de l'ancienne infrastructure souterraine.

Sachant que la structure des souterrains avait une continuité entre certains des objets qui composaient les différents types de galeries (galerie d'écoute, galerie majeure, galeries de contre-mines), il était nécessaire d'éviter des liens rompus entre deux objets adjacents. Également, un facteur de vérification a été défini pour éviter que les surfaces de deux polygones ne se chevauchent par erreur en raison d'un nœud traversant la frontière de l'objet.

À ce propos, les règles établies pour gérer la relation topologique avaient pour but de garantir la continuité du réseau et d'éviter la superposition entre les objets. De cette façon, en activant

les paramètres *Must not have gaps* et *Must not overlap*, sur la base d'une tolérance de 1 centimètre, la topologie a été vérifiée. En somme, les erreurs identifiées correspondent à tous les écarts de plus d'un centimètre entre des polygones adjacents ou à une intersection de plus de 1 centimètre entre deux objets.

Lors de la digitalisation des entités, l'outil *snapping* a facilité la création de sommets et des segments communs pour les polygones adjacents. Cet outil agit comme une sorte d'aimant qui attire le curseur vers un nœud existant afin de préserver une relation correcte et exacte entre les entités. Par conséquent, peu d'erreurs topologiques significatives ont été identifiées lors de la vérification topologique (Annexe 4).

Cependant, les caractéristiques mêmes de la structure du réseau induisent des erreurs possibles, en particulier concernant le paramètre qui évite d'avoir un écart de surface entre entités voisines. Bien que ce soit le seul moyen d'éviter d'éventuelles ruptures entre surfaces adjacentes, l'analyse topologique va identifier une erreur tant qu'il existe une distance entre les polygones qui composent les différentes lignes de défense et qui ne sont pas liés (Figure 25).

Dans ces conditions, afin de procéder à la validation de la topologie, chacune des erreurs a été évaluée pour identifier s'il s'agissait d'une faute compromettant la cohérence du réseau, auquel cas elle était signalée comme *Non Applicable*.



FIGURE 25 - RÉSULTATS DE L'ANALYSE TOPOLOGIQUE

Ainsi, les erreurs liées à des écarts entre polygones étaient signalées comme des erreurs de ligne, car la défaillance était liée à la position du contour des entités. Parallèlement, les problèmes de superposition ont été signalés au sein des erreurs de surface, c'est-à-dire comme des défauts de polygone.

dédié à proposer les champs attributaires pour renseigner les informations sur l'objet et aussi pour lui attribuer certaines catégories proposées par l'OPS en termes de valeur patrimoniale.

Les catégories établies ont été proposées en fonction des données disponibles et la classification de ces objets a été orientée par les concepts utilisés par l'office. D'une part, il était nécessaire de créer les informations permettant d'identifier individuellement les différentes galeries et de leurs attribuer des informations sur leur datation, les relevés effectués et l'auteur des relevés. D'autre part, des champs concernant l'état de conservation et la valeur patrimoniale ont été ajoutés d'après le protocole utilisé par l'office pour caractériser les conditions du patrimoine bâti.

Bien qu'un nombre considérable d'attributs ait été créé, seuls les plus importants pour identifier les galeries et les catégoriser ont été définis comme visibles. Une sélection favorisant la lisibilité des pop-ups a été faite et uniquement les attributs du nom de la galerie et ses propriétés patrimoniales sont restés affichables dans la couche à publier. Le reste des informations attributaires a été stocké dans un projet ArcGIS pour la consultation interne des informations détaillées par l'équipe de l'OPS.

Pour ajouter les informations attributaires il a été nécessaire d'établir de manière définitive la composition des entités. En d'autres termes, une analyse des documents historiques a été effectuée pour évaluer les associations possibles entre les différentes formes d'une même entité et un support documentaire.

Bien entendu, les galeries relevées qui avaient un document technique d'appui ont été considérées comme des entités à part entière au sein de la catégorie *Connu* établie grâce au code 1 dans le champ attributaire *Statut*. Cependant, dans le cas des fragments reconstitués sous les catégories *Supposés* et *Disparus*, un grand nombre de polygones qui ont été créés ne reflétaient pas la structure complète de l'entité selon les informations documentaires de support.

Parfois, plusieurs polygones composaient les souterrains communs à une des structures fortifiées qui étaient présentées comme une seule entité d'après le document d'appui. Dans d'autres cas, il n'y avait pas du tout de document spécifique concernant un fragment précis. La reconstitution avait été faite sur la base du plan général des géologues (N°251.86.2) à l'aide de mesures et des lignes. Ces situations ont représenté un défi tant au niveau de la lisibilité et compréhension des nombreuses données attributaires, que pour la création du support d'information documentaire et l'attribution de l'information de chaque objet.

Initialement, après la numérisation de tous les éléments identifiés dans la documentation historique, le nombre d'objets de la classe d'entités atteignait environ 80. De toute évidence, ce nombre d'entités était ingérable, considérant que chaque objet vectoriel devait posséder un support documentaire, ainsi que ses propres informations. C'est pourquoi un géotraitement permettant de fusionner des polygones a été appliqué afin de résoudre le conflit entre le nombre de polygones et le nombre de documents de référence.

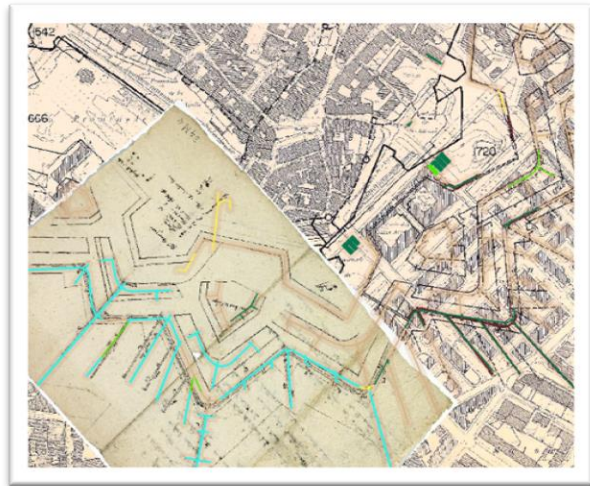


FIGURE 28 - FUSION D'ENTITÉS EN FONCTION DE LA DOCUMENTATION HISTORIQUE

Grâce à l'outil *Merge* il a été possible de résoudre les deux soucis rencontrés par rapport aux attributs de la couche. Lorsqu'il s'agissait de plusieurs polygones présentés dans le même document une fusion permettait de conserver juste une entité composée de plusieurs formes même si elles n'étaient pas adjacentes (Figure 25).

Par ailleurs, dans certains cas, aucun document de référence n'était disponible et la reconstitution hypothétique de la forme du réseau supposé a été faite à partir d'autres éléments d'analyse. Une fusion de tous les éléments possédant ces caractéristiques a été faite, formant une entité unique nommée « *réseau général supposé* » qui a pour support le plan N°251.86.2 de 1987 dans la fiche informative.

Ainsi, après le processus de synthèse la classe d'entités est finalement composée de 28 objets dont 17 sont des galeries connues, 4 sont des structures disparues et 5 correspondent aux tracés supposés. Chaque objet dispose d'une information attributaire et d'une fiche informative qui permet d'accéder aux documents techniques de support. Toutefois, il convient de préciser que les tronçons supposés ne peuvent pas être évalués en terme patrimonial donc les champs de valeur patrimoniale et d'état de conservation apparaissent toujours comme *Non évalués*. De leur côté, les structures disparues auront une valeur *Null* en ce qui concerne les champs de catégorisation patrimoniale.

Concernant les hyperliens qui permettent l'accès à la documentation via le serveur disposé par le SITG, un lien hypertexte pour chaque objet a été mis à disposition dans un champ nommé

« *Lien vers la fiche informative* ». Les liens attribués à chaque entité permettent d'accéder à une fiche qui contient les hyperliens vers tous les relevés et documents relatifs à cette entité. Une fiche de recensement pour les galeries connues (créée par l'OPS) aurait dû être ajoutée par le biais d'un autre lien mais il n'a pas été possible d'obtenir les documents pour la fin du stage.

Une enquête sur les souterrains des anciennes fortifications et la mise à jour du Plan N°30133 ont été ajoutés comme un élément commun à toutes les entités via un hyperlien ajouté dans la fenêtre contextuelle (pop-up) de la classe d'entités.

3.4 Livrables : un jeu de données et différents besoins.

A ce stade du projet, les données géométriques et les attributs alphanumériques étaient complets et leur validation a permis d'aborder la dernière phase de mise en page. Le but principal du stage était la création d'une couche d'entités géographiques à publier dans le guichet Géopatrimoine du SITG. Dans ce sens, les produits livrables requis à la fin du stage étaient une classe d'entités vectorielles présentant les données des anciens souterrains et une table d'attributs correspondant à ces données géométriques (Figure 29). Cependant, lors des trois mois de stage, plusieurs éléments ont émergé pour finalement rendre évident l'intérêt d'ajouter d'autres éléments aux livrables.

En ce qui concerne la représentation graphique, il était important de montrer que les galeries disposaient d'une infrastructure maçonnée qui devait être prise en compte lors de l'évaluation de l'emprise spatiale des ouvrages. Le défi de représenter l'intérieur des galeries et leur structure bâtie a été relevé en créant une zone de tampon conforme aux dimensions proposées par les sources bibliographiques. En excluant le polygone, une zone de deux mètres de chaque côté des entités a été produite pour représenter la structure bâtie des galeries.

Les données vectorielles produites ont été la base pour la mise à jour du Plan N°30133 (Annexe 7) concernant les ouvrages souterrains des anciennes fortifications parmi d'autres mesures de protection du patrimoine genevois. Cependant, l'information nécessaire pour fournir le fondement juridique du document officiel n'était pas la même que celle de la couche de reconstitution du réseau en tant que tel. Pour le plan il était nécessaire de mettre en évidence la valeur patrimoniale des galeries en fonction de son état de conservation plutôt que leur statut actuel.

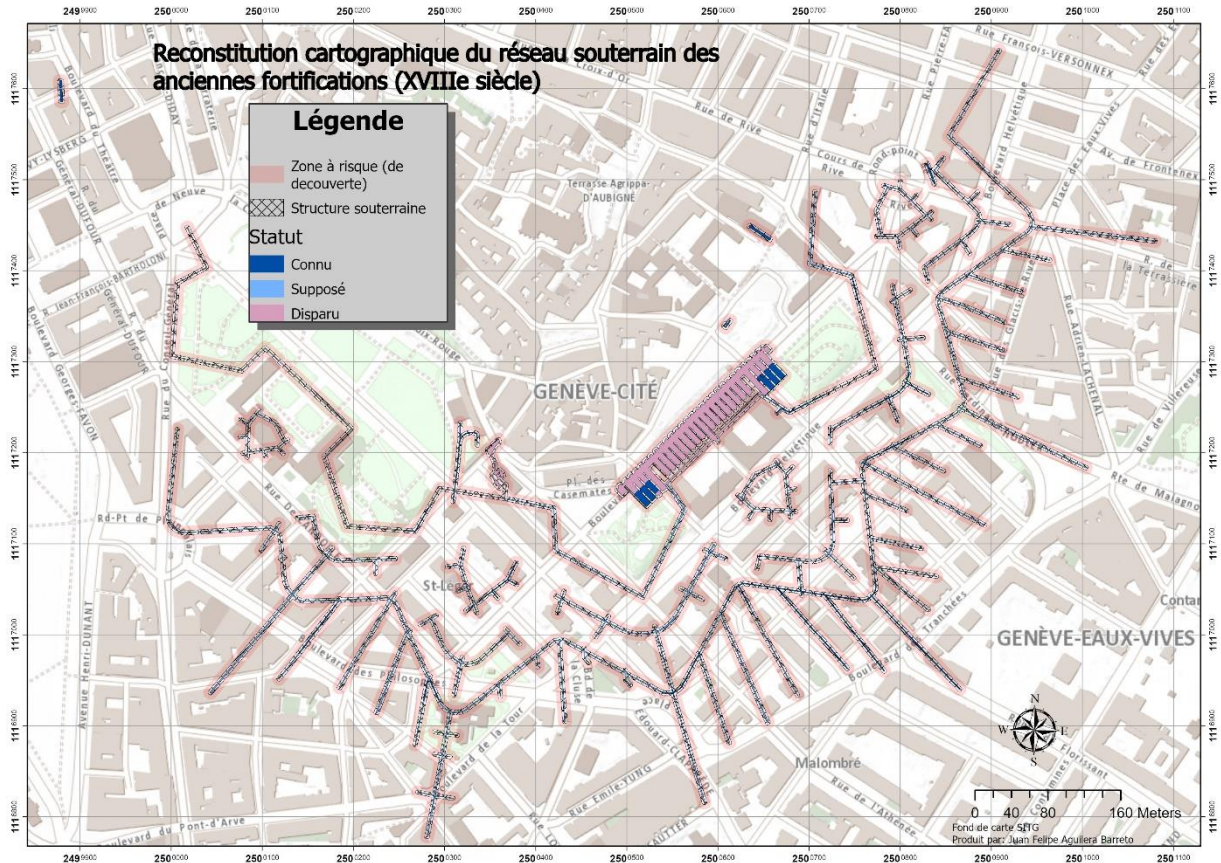


FIGURE 29 - CARTE DE RECONSTITUTION DU RÉSEAU SOUTERRAIN DES ANCIENNES FORTIFICATIONS. LA SYMBOLIQUE PERMET DE DIFFÉRENCIER LE STATUT DE CHAQUE FRAGMENT ET DES ZONES DE TAMPON ONT ÉTÉ CRÉÉES AFIN DE METTRE EN EVIDENCE LA STRUCTURE DES OUVRAGES ET UNE ZONE À RISQUE DE DÉCOUVERTES POTENTIELLES (VOIR ANNEXE 8).

En termes de représentation graphique, il était important de montrer que les galeries disposaient d'une infrastructure maçonnée qui devait être prise en compte lors de l'évaluation de l'emprise spatiale des ouvrages (Figure 26). Le défi de représenter l'intérieur des galeries et leur structure bâtie a été relevé en créant une zone de tampon conforme aux dimensions proposées par les sources bibliographiques. En excluant le polygone, une zone de deux mètres de chaque côté des entités a été produite pour représenter la structure bâtie des galeries

Ainsi, la nécessité de créer deux couches a émergé comme une proposition visant à apporter une certaine différenciation entre les données des mesures de protection et les données historiques de la structure originale du réseau. Le premier jeu de données a été utilisé pour la mise à jour du Plan N°30133 en utilisant quatre catégories définies par l'IMAH (Figure 30). Dans le guichet Géopatrimoine ce jeu de données sera publié dans l'onglet des mesures de protection, tandis que les données du réseau souterrain original seront publiées dans la section qui présente les données géographiques historiques des anciennes fortifications.

Comme le montre la Figure 30, le jeu de données qui présente les mesures de protection n'inclut pas les fragments qui ont été catalogués comme disparus. Considérant que cette couche a pour objectif de mettre en évidence les éléments qui sont sous la protection de la LPMNS, il n'était pas cohérent d'ajouter des ouvrages qui ont disparu au fil du temps.

De plus, sachant que la reconstitution des tracés supposés reste quand même hypothétique, une zone de risque couvrant 10 mètres autour de chaque entité a été ajoutée comme méthode de prévention contre d'éventuels décalages.

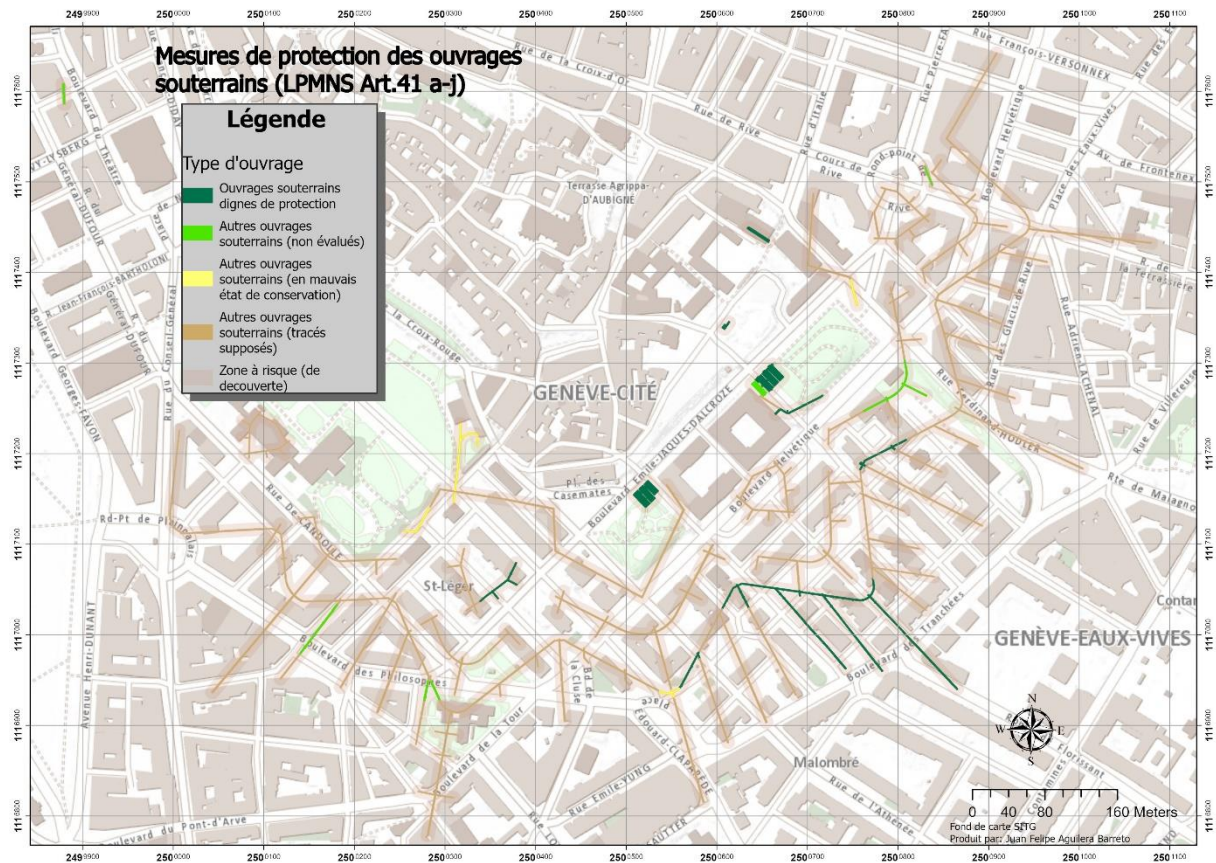


FIGURE 30 - CARTE DES MESURES DE PROTECTION ADOPTÉES PAR LA LPMNS D'APRÈS L'ARTICLE 41. LES CATÉGORIES ÉTABLIES PAR L'IMAH FONT RÉFÉRENCE AU VALEUR PATRIMONIALE DES DIFFÉRENTS FRAGMENTS DU RÉSEAU. LES TRONÇONS DISPARUS NE SONT PAS REPRÉSENTÉS SUR LA CARTE (VOIR ANNEXE 9).

En résumé, les résultats finaux correspondent à deux couches d'entités avec leurs propres données attributaires et pièces jointes, l'une pour mettre à jour la carte des structures souterraines protégées et l'autre pour reconstituer le réseau souterrain des anciennes fortifications. Comme support, trois GDB ont été livrées, une pour chacune des couches et une autre contenant tous les documents géoréférencés.

Finalement, une expérience 3D a été réalisée avec les nuages de points de l'enquête réalisée par la DIT. Cela a été fait au-delà des propos du stage comme une piste de continuation qui pourrait

être utile pour affiner l'analyse du réseau souterrain des anciennes fortifications à la lumière de nouvelles initiatives d'utilisation de méthodes géomatiques qui se basent sur les données 3D pour aborder le sous-sol de la Ville de Genève.

4. Modélisation 3D

Dès que les données de l'enquête de la DIT ont été transmises pour favoriser l'aboutissement du stage, l'idée de modéliser les galeries souterraines présentait un grand intérêt personnel. La priorité était clairement de rendre les couches requises par l'IMAH et faire la mise à jour des ouvrages souterrains protégés. Or, en dialogue avec M. Matthieu de la Corbière, un consensus a été conclu pour proposer une modélisation des données 3D et de la mettre en relation avec les données du cadastre 3D du sous-sol de la ville une fois l'objectif principal atteint.

La découverte des fichiers de nuage de points au format *E57* m'a d'abord fait penser que ce serait possible de faire une transformation des données vers un format LIDAR (Light Detection And Ranging) et de tout simplement ajouter ces données dans un scène locale 3D sur ArcGIS Pro. Cependant, diverses complications sont survenues et ces approches de modélisation ont été réalisées vers la fin du stage donc le temps à disposition était une contrainte pour faire les démarches d'affinement de façon rigoureuse.

Tout d'abord, la taille des fichiers produits lors du scannage est vraiment considérable en raison de la quantité des points détectés. Bien évidemment, la taille du fichier requérait un poste de travail performant en termes de processeur, mais même les postes de l'UNIGE n'arrivaient à gérer la quantité d'informations des fichiers originaux. C'est pourquoi un allègement de la taille des données a été nécessaire afin de rendre plus performant son traitement.

Par le biais du logiciel *FME Workbench*, grâce à l'outil *PointCloudThinner*, un point sur mille a été sélectionné comme intervalle pour la création d'un nouveau fichier plus léger. Ainsi, d'un fichier original qui pesait 17 918 183Ko, un autre de 14 276Ko a été obtenu dans le cas de la galerie François-Le-Fort.

Lors des premiers essais, une transformation vers format LIDAR a été effectuée en parallèle à l'allègement afin d'ajouter les points sur ArcGIS Pro. Malheureusement, pendant le processus de traduction, le logiciel n'a pas réussi à identifier un système de coordonnées présent dans les données d'entrée. À cet égard, un contact directement avec le GAVA a permis de constater qu'en effet les points n'ont pas une référence spatiale en raison des limitations du réseau GPS dans le sous-sol. Le scannage des points des bâtiments proches à l'entrée des galeries a été fait afin d'avoir des éléments de référence qui permettaient de positionner les points sur la base des données 3D de la Ville de Genève.

Vu que les données n'étaient pas géoréférencées et que le processus d'attribuer une référence spatiale aux points impliquait une démarche complexe et longue, il n'était ni utile ni efficace de travailler avec les données dans ArcGIS Pro. Le logiciel *CloudCompare* est un outil open source qui permet l'affichage et le traitement des nuages de points. À l'aide de ce logiciel, les fichiers allégés ont été consultés révélant la présence des données spatiales de longitude, de latitude et d'altitude par rapport à un point de référence 0,0. Les coordonnées étaient clairement fausses, mais il était possible de mesurer la distance de la galerie par rapport à la surface et ainsi corriger l'altitude des éléments vectorielles dans la couche Réseau souterrain à l'aide du modèle numérique de terrain (MNT) actuel de la ville.

Ainsi, plusieurs mesures de la distance entre le sol et la voûte ont été effectuées afin d'évaluer l'évolution de l'altitude des galeries par rapport au sol (Annexe 5). Les mesures ont ensuite été appliquées pour trouver la profondeur réelle des galeries par rapport au MNT. Cela à partir des valeurs d'altitude du sol des éléments de référence présents à la surface du nuage de points.

Avec les valeurs d'altitude corrigées (Annexe 6), une attribution de la valeur Z des polygones de la couche a été effectuée. Afin de prendre en compte l'évolution de l'altitude, des sommets ont été ajoutés chaque 2 mètres par le biais de l'outil de géotraitement *Densify*. En fonction des mesures prises du nuage de point et des valeurs corrigées à partir du MNT, chaque sommet a reçu une altitude.

Alors que la correction de l'altitude des galeries connues a été effectuée sur la base des données 3D, l'attribution de l'altitude des fragments supposés a été faite à partir de l'altitude corrigée des galeries connues. Une fois que les galeries relevées ont reçu leur valeur d'altitude, un calcul de la variation d'altitude entre deux galeries a été réalisé pour attribuer les valeurs correctes à chaque sommet afin de mettre en évidence la variation d'altitude.

Ensuite, sur une scène locale 3D le modèle numérique du terrain 2019 a été ajouté comme la source d'altitude du sol. Les données de la couche ont été extrudées en fonction de dimensions type identifiées dans la documentation historique et ratifiés avec la mensuration intérieure des galeries sur *CloudCompare* (1.95cm). Le résultat nous permet de conclure que la correction de l'altitude est cohérente avec la réalité en observant que le rapport avec le sol des galeries est proche de celui mis en évidence dans le nuage de points et également grâce à des photos d'archive (Figure 14).

A ce point, il est possible d'évaluer les souterrains extrudés par rapport à la surface actuelle. Or, l'idée était de mettre en relation les galeries avec les éléments présents actuellement dans le sous-sol. Initialement la couche CAD_BATIMENT_SOUSOL a été ajoutée et extrudée en fonction d'un des champs. Ensuite, les données cadastrales concernant le réseau électrique, le réseau téléphonique, le réseau d'assainissement et les conduites d'eau potable ont été ajoutés et découpés en fonction de la surface d'intérêt. Pour ajouter la profondeur de chacun de ces réseaux, des valeurs types proposées par

l'Institut de recherche InPACT (appartenant à l'HEPIA) dans une étude de documentation 3D du sous-sol ont été prises comme référence. La stratégie qui a été utilisée pour compléter les données du sous-sol a été d'attribuer une profondeur de 1 mètre pour les conduits d'eau, de 4 centimètres pour le réseau de télécommunications et de 60 centimètres pour le réseau électrique (InPACT, 2019).

Malgré les tentatives de réduction de la quantité des données, le nombre de lignes se référant aux éléments du cadastre sous-sol restait considérable, de sorte que le processus visant à leur donner une forme tridimensionnelle n'a jamais été achevé. Désormais, au niveau de l'affichage, le résultat permet de contraster les éléments actuels avec les galeries de contre-mines des fortifications. Il est vraiment intéressant de constater que, bien qu'ils existent certains points d'intersection entre les bâtiments souterrains et les anciennes galeries, les galeries connues sont dépourvues de toute relation avec les nouveaux éléments souterrains. Cela nous permet conclure que l'exercice n'est pas si éloigné de la réalité actuelle du sous-sol.

Il faut préciser que cet exercice de modélisation 3D peut être quelque peu contraignant et artisanal en raison de la correction manuelle des valeurs d'altitude. Le résultat n'est pas précis ou du moins il n'y a aucun moyen de l'évaluer. Cependant, l'expérience 3D de mettre en relation le réseau souterrain avec les éléments actuels du sous-sol nous permet de souligner le potentiel de ce type d'analyse. Même si le résultat n'est pas tout à fait exact, nous pouvons avoir un indice sur les parties qui ont probablement disparu et sur les emplacements où chercher des fragments subsistants (Figure 31).

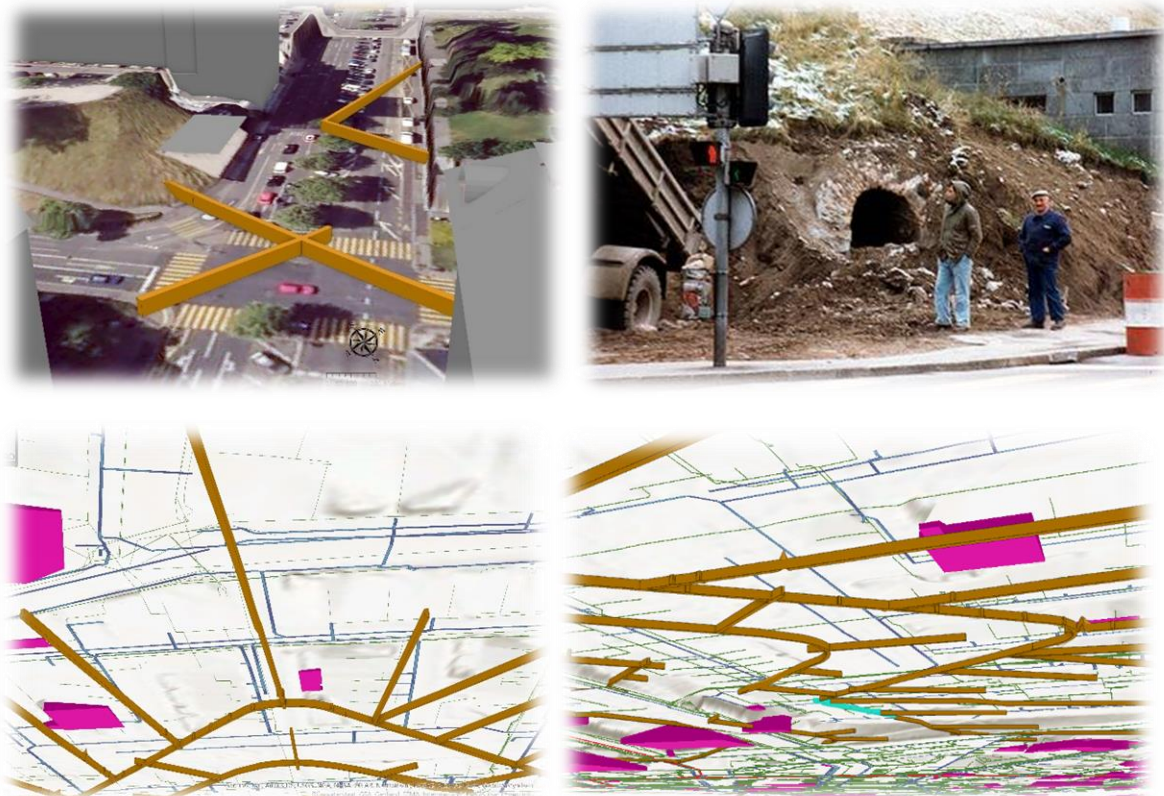


FIGURE 31 - RÉSULTAT DE LA MODÉLISATION 3D: CONTRASTE AVEC UNE PHOTO FOURNIE PAR L'IMAH ET PERSPECTIVE INFÉRIEURE DU SOUS-SOL AVEC LE RÉSEAU SOUTERRAIN DES ANCIENNES FORTIFICATIONS ET LE CADASTRE DU SOUS-SOL ACTUEL (VOIR ANNEXE 10)

5. Conclusion

Sur la base des objectifs principaux définis dans la convention de stage et compte tenu du fait des responsabilités de l'IMAH en termes de la protection des anciennes galeries de contre-mines qui ont amené à proposer ce stage, les résultats obtenus ont répondu aux attentes. L'ensemble du processus menant à la reconstitution du réseau s'est déroulé de manière rigoureuse et sous le contrôle constant des encadrants de l'OPS et de l'UNIGE. Les différentes étapes se sont ainsi progressivement développées et les résultats intermédiaires mis en cohérence ont permis d'atteindre l'objectif.

Même si chacune des étapes a présenté différents types de contraintes et défis, une bonne communication avec l'équipe encadrante a toujours permis de trouver les bonnes solutions pour améliorer les résultats. Dans ce sens, la réussite du travail et la livraison des résultats dans les délais impartis sont dues au travail de collaboration.

Le projet a exigé le développement de procédures spécifiques de manière rigoureuse, mais en même temps il était aussi très important de laisser libre cours à l'imagination. Un équilibre entre les données relevées et la réflexion sur des facteurs historiques et spatiaux a été nécessaire pour produire un résultat qui contribue à affiner les analyses et hypothèses proposées dans le passé.

De façon plus concrète, il est possible de conclure que le résultat final ne peut être évalué que sur la base de chaque étape du processus. Il n'aurait pas été possible de bien comprendre la structure du réseau des galeries de contre-mines sans la documentation historique. Par exemple, dans le plan général des souterrains Les Casemates ne sont pas présentées et sans les images d'archive du dossier N 13 et N 17 il n'aurait pas été possible de comprendre la structure de cet ouvrage. Il n'aurait pas été possible non plus de garantir le positionnement des objets vectoriels numérisés sans la base d'un géoréférencement rigoureux des relevés. Les produits livrables sont le résultat d'un processus d'étapes concaténées qui avaient leurs propres particularités.

En ce qui concerne les données, la recherche des documents a été poussée. Une vérification des dossiers d'intérêt du AEG et du dossier des fortifications du GESDEC a été réalisée afin de disposer de tous les documents d'intérêt. D'autre part, le contact avec différents organismes (DIT, Ville de Genève, SAGE) a permis de récupérer des documents qui n'étaient pas à disposition pour le stage précédent. Les efforts déployés pour rassembler l'information documentaire ont permis de garantir une bonne base d'appui de l'information présentée dans la couche à publier.

Concernant le géoréférencement des relevés et des plans, le positionnement des galeries sur la base des relevés et des plans récents a été réalisé avec une rigueur méthodologique en fonction des propriétés du document. Cela a permis d'obtenir un résultat très précis en termes de la référence spatiale attribuée et

également de garantir la certitude d'avoir un point de départ correct pour la reconstitution des tronçons supposés.

Or, les images d'archive et les esquisses des articles historiques n'ont pas eu un résultat de positionnement aussi précis que celui des plans et des relevés. Cependant, ces éléments ont servi comme source d'analyse pour la reconstitution des structures supposées.

À la lumière des relevés géoréférencés, la digitalisation des galeries connues a été une démarche concrète qui a permis d'avoir les points de référence pour reconstituer l'ensemble du réseau des galeries de contre-mines. Cependant, le processus de création des tronçons hypothétiques en fonction des sources historiques a été une procédure compliquée qui a demandé beaucoup d'allers-retours et d'orientations.

Considérant que la reconstitution des fragments supposées et disparus est un produit de l'analyse des documents et de la formulation d'hypothèses, la position exacte des entités n'est pas certaine. À cet égard, l'ajout de la zone à risque créée pour protéger les ouvrages face aux creusements donne une marge de 10 mètres en cas de décalage entre les données et la réalité.

Les informations alphanumériques des galeries connues sont complètes et la catégorisation de leurs caractéristiques patrimoniales a été faite selon les protocoles de l'IMAH. De plus, tous les documents de support ont été stockés dans le réseau de l'Etat de Genève de façon systématique en fonction des galeries relevées et de l'auteur des documents. Également, la consultation de ces données est possible grâce aux hyperliens contenus dans les fiches informatives de chaque galerie. Tous ces liens sont fonctionnels et les pièces jointes sont stockées dans le serveur mis à disposition à cette fin par le SITG.

La mise à jour du Plan N°30133 a été faite à partir des données adaptées pour rendre visible les mesures de protection. Le stage a permis d'ajouter deux catégories pour affiner l'analyse des anciens ouvrages souterrains : les ouvrages souterrains non évalués et les ouvrages souterrains en mauvais état de conservation.

Par rapport à l'expérience menée à partir des données 3D, bien qu'il n'y ait pas de certitude quant à la véracité des résultats, il est possible de constater qu'aucune des galeries connues n'intersecte avec les données des éléments du sous-sol actuel. Également, il est possible de mettre en évidence que les résultats sont cohérents avec des photos et des témoignages. Tout cela nous amène à penser que, même si le processus de correction de l'altitude a été fait manuellement, le résultat reste conforme aux éléments connus actuellement.

Pour conclure, les produits livrables ont été mis à la disposition des collaborateurs du SITG avant la fin du stage. Après, les deux couches ont été ajoutée sur le site de recette du SITG: https://maprec.sitg.ch/geoportail/pro/?mapresources=PATRIMOINE_HISTORIQUE.PATRIM

[OINE](#). Cet espace est conçu pour permettre la visualisation des données afin de vérifier les détails de la symbologie et le fonctionnement correcte des couches en attendant la confirmation de publication. Le dossier transmis était constitué des GDB contenant les couches et des fichiers *Lyr* pour ajouter la symbologie choisie sur la base du dialogue avec les encadrants.

En parallèle, un dossier contenant tout le travail du stage fut mis dans les archives des stages de l'OPS. À l'intérieur, trois répertoires rassemblent les résultats et les parties du travail. Le dossier livrable regroupe les GDB avec les résultats finaux, le projet ArcGIS, les pièces jointes et les fichiers de symbologie. Un dossier 3D qui contient une GDB avec les couches multipatch de résultats de la modélisation et la scène 3D ArcGIS Pro et un dernier dossier qui ressemble tous les documents catégorisés et les éléments utilisés lors du processus de constitution de la couche.

À titre personnel, l'expérience a été riche et satisfaisante. L'équipe d'encadrants, tant à l'OPS comme à l'UNIGE, a toujours été un grand soutien qui a permis de favoriser mon apprentissage. Le travail au sein de l'office m'a permis d'apprendre la rigueur avec laquelle les travaux sont menés. D'autre part, les conseils reçus des Prof. Alain Dubois et Prof. Hy Dao m'ont permis d'aiguiser le niveau d'analyse et de réaliser l'importance d'une approche scientifique pour générer résultats concrets et rigoureux dans le cadre de tout type de travail. L'échange avec eux m'a également permis de renforcer mon enthousiasme devant les possibilités offertes par la géomatique.

Bibliographie

- Baiocchi, V., & Lelo, K. (2005.). Géoréférencement des plans historiques (du XVIIIe au XIXe) de la ville de Rome, et leur comparaison avec des cartes actuelles. *Géomatique Expert*, N°45, 42 – 47. [45_8.pdf \(geomag.fr\)](#)
- Beyhan, B & Ergenoğlu. M. (2018). Revival of the collective memory with the help of cartographic materials and GIS. *7th International Conference on Cartography and GIS*. (2018).Sozopol, Bulgaria. ISSN: 1314-0604.
<https://www.semanticscholar.org/paper/REVIVAL-OF-THE-COLLECTIVE-MEMORY-WITH-THE-HELP-OF-Beyhan-Ergeno%C4%9Flu/76c65bd6f88287ce6c8961208d9431f7348e17e1>
- Blondel, L (1924). Notes d'archéologie genevoise. Bulletin de la société d'histoire et d'archéologie de Genève. *Tome IV – Livraisons 9 et 10. Librairie A. Julien, Genève. 949.442 (055) SOC*
- Cajthaml J. Czech. (2018). *METHODS OF GEOREFERENCING OLD MAPS ON THE EXAMPLE OF CZECH EARLY MAPS*. Consulté 5 novembre 2022, à l'adresse <https://www.semanticscholar.org/paper/METHODS-OF-GEOREFERENCING-OLD-MAPS-ON-THE-EXAMPLE-Czech/534f41dd424d22465b568977ff9abec053991c0e>
- Debret, J. (2020, 18 juin). Exemples de remerciements d'un mémoire. Scribbr. Consulté le 17 novembre 2022, de <https://www.scribbr.fr/memoire/remerciements-exemples/>
- De la Corbière, M. (2022) Enquête sur les souterrains des anciennes fortifications. *Patrimoine et architecture. Droit de l'inventaire*. Cahier n°25. Office du patrimoine et des sites. Département du territoire. République et canton de Genève. Art éditions

De la Corbière, M. (2010). Organisation de la défense et des chantiers de fortification Dans De la Corbière, M. (2010). *Les monuments d'art et d'histoire du canton de Genève. Tome III Genève, Ville forte Société d'histoire de l'art en suisse (Shas, Berne)*

Desktop ArcGIS. *Hyperliens dans un champ de texte—ArcGIS Pro | Documentation.* (s. d.). Consulté 6 novembre 2022, à l'adresse <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/data/tables/hyperlinks-in-a-text-field.htm>

Desktop ArcGIS. *Topologie dans ArcGIS—ArcGIS Pro | Documentation.* (s. d.). Consulté 5 novembre 2022, à l'adresse <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/data/topologies/topology-in-arcgis.htm>

Desktop ArcGIS. *Utiliser des liens hypertexte dans les fenêtres contextuelles—ArcGIS Pro | Documentation.* (s. d.). Consulté 6 novembre 2022, à l'adresse <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/mapping/navigation/use-hyperlinks-in-pop-ups.htm>

Geographic Information Technology Training Alliance. *Les relations topologiques.* (s. d.). Consulté 5 novembre 2022, à l'adresse http://www.gitta.info/Spatial_Cpts/fr/html/Topology_learningObject1.html

Gröger, G., & Plümer, L. (2011). Topology of surfaces modelling bridges and tunnels in 3D-GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(3), 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.10.001>

InPACT, HEPIA & MIC. (2019). Documentation 3D du sous-sol. Étude de faisabilité. *Institut de recherche InPACT paysage, architecture, construction, et territoire.*

Lallemant, T., Touzet, T., & Gervaise, A. (2017). Une méthodologie nationale pour le géoréférencement et la vectorisation des cartes d'état-major, minutes au 1/40 000. *Revue forestière française*, 69(4), 341-352. <https://doi.org/10.4267/2042/67865>

Notions de base du géoréférencement d'un jeu de données raster—ArcMap | Documentation.

(s. d.). Consulté 5 novembre 2022, à l'adresse

<https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm>

Shi, W., & Liu, K. (2007). A fuzzy topology for computing the interior, boundary, and exterior of spatial objects quantitatively in GIS. *Computers & Geosciences*, 33(7), 898-915.

<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.10.013>

République et canton de Genève. *Organigramme du département du territoire (DT)*. (s. d.). ge.ch.

Consulté 19 octobre 2022, à l'adresse <https://www.ge.ch/node/4307>

Winiger-Labuda, A. (2010). Projets et réalisations : L'enceinte du XVIIIe siècle (1708 – 1750).

Dans De la Corbière, M. (2010) *Les monuments d'art et d'histoire du canton de Genève. Tome III Genève, Ville forte Société d'histoire de l'art en suisse Shas, Berne*

Winiger-Labuda, A., Frommel, B., Ripoll, D., Schätti, N., Meyer, M., Viaccoz de Noyers, A.-M.,

Brunier, I., La Corbière, M. de, Gesellschaft für Schweizerische Kunstgeschichte, Società di

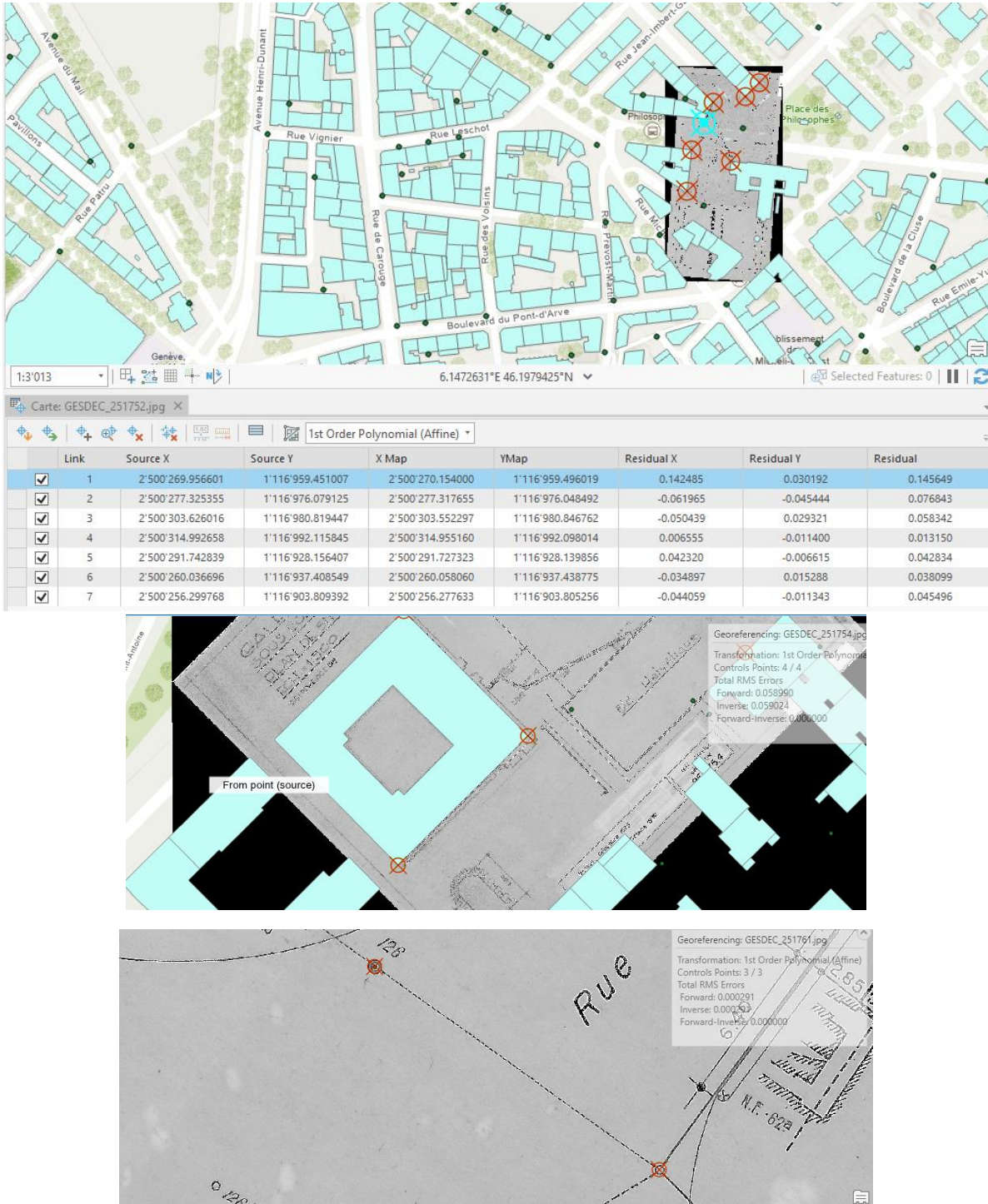
storia dell'arte in Svizzera, Brunier, I., & La Corbière, M. de. (2010). Genève, ville forte.

Société d'histoire de l'art en Suisse SHAS..

Annexes

Annexe 1 :

Exemple des points de contrôle ajoutés en fonction des données cibles (Bâtiments, points de cadastre et parcelles).



Annexe 2 :

Certains résultats de la transformation des rasters après le géoréférencement et valeurs résiduelles d'EQM.

Plan 251.86.2

Carte: GEOREF_Scan_Fortif_JFAB

2nd Order Polynomial

	Link	Source X	Source Y	X Map	YMap	Residual X	Residual Y	Residual
<input checked="" type="checkbox"/>	1	2 499 258,...	1 117 059,...	2 499 256,...	1 117 059,...	0,413232	0,335241	0,532116
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2 499 595,...	1 117 705,...	2 499 594,...	1 117 704,...	-0,073822	-0,189546	0,203414
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2 499 282,...	1 117 527,...	2 499 280,...	1 117 526,...	-0,663184	-0,500326	0,830746
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2 500 667,...	1 118 488,...	2 500 667,...	1 118 488,...	-0,258432	-0,297931	0,394398
<input checked="" type="checkbox"/>	5	2 501 130,...	1 117 491,...	2 501 130,...	1 117 493,...	0,308399	0,552984	0,633167
<input checked="" type="checkbox"/>	6	2 501 202,...	1 116 966,...	2 501 201,...	1 116 967,...	0,127649	-0,330441	0,354240
<input checked="" type="checkbox"/>	7	2 501 125,...	1 116 812,...	2 501 124,...	1 116 813,...	-0,300576	-0,049997	0,304706
<input checked="" type="checkbox"/>	8	2 500 972,...	1 116 864,...	2 500 971,...	1 116 864,...	-0,028531	-0,110185	0,113819
<input checked="" type="checkbox"/>	9	2 500 651,...	1 116 888,...	2 500 650,...	1 116 888,...	-0,238885	0,155914	0,285264
<input checked="" type="checkbox"/>	10	2 500 473,...	1 117 059,...	2 500 473,...	1 117 059,...	0,363043	0,068640	0,369475
<input checked="" type="checkbox"/>	11	2 499 490,...	1 118 443,...	2 499 489,...	1 118 441,...	0,351107	0,365648	0,506926

Georeferencing: GEOREF_Scan_Fortif_JFAB

Transformation: 2nd Order Polynomial

Controls Points: 10 / 11

Total RMS Errors

Forward: 0,250338

Inverse: 0,249721

Forward-Inverse: 0,000785

Relevé GAVA – Galerie Alice-Rivaz

Carte: Géoref_DIT_Calvin

1st Order Polynomial (Affine)

	Link	Source X	Source Y	X Map	YMap	Residual X	Residual Y	Residual
<input checked="" type="checkbox"/>	22	3'711.609427	-5'833.367468	2'500'639.151300	1'117'405.929800	0.032161	0.001783	0.032210
<input checked="" type="checkbox"/>	24	2'513.125707	-2'117.642401	2'500'609.590600	1'117'459.349700	0.018203	0.025280	0.031152
<input checked="" type="checkbox"/>	25	1'145.198144	-1'411.866233	2'500'586.062200	1'117'466.030200	0.001683	-0.009355	0.009506
<input checked="" type="checkbox"/>	27	3'350.585419	-2'926.199099	2'500'625.080100	1'117'449.419500	0.025979	-0.018823	0.032082

Georeferencing: Géoref_DIT_Calvin

Transformation: 1st Order Polynomial (Affine)

Controls Points: 4 / 5

Total RMS Errors

Forward: 0.016472

Inverse: 1.053345

Forward-Inverse: 0.000000

Relevé GAVA – Galerie Athénée

Link	Source X	Source Y	X Map	YMap	Residual X	Residual Y	Residual	
<input checked="" type="checkbox"/>	1	2'500'541.926335	1'116'947.462906	2'500'541.872400	1'116'947.483700	-0.006389	0.057378	0.057988
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2'500'583.956537	1'116'964.509444	2'500'583.904200	1'116'964.483200	-0.030851	-0.053369	0.061644
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2'500'542.023316	1'116'972.011326	2'500'542.008300	1'116'971.919300	0.030380	-0.059596	0.066893
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2'500'535.303462	1'117'011.852449	2'500'535.236400	1'117'011.805300	-0.017984	-0.011493	0.021342
<input checked="" type="checkbox"/>	5	2'500'545.970770	1'117'022.447863	2'500'545.924500	1'117'022.442900	-0.003322	0.013499	0.013902
<input checked="" type="checkbox"/>	6	2'500'581.358417	1'116'986.664039	2'500'581.365700	1'116'986.744600	0.030167	0.053580	0.061489

Georeferencing: GAVA-2021_athennee.tif

Transformation: 1st Order Polynomial (Affine)
 Controls Points: 6 / 6
 Total RMS Errors
 Forward: 0.051748
 Inverse: 0.051730
 Forward-Inverse: 0.000000

Releve GAVA - Galerie St-Léger

Link	Source X	Source Y	X Map	YMap	Residual X	Residual Y	Residual	
<input checked="" type="checkbox"/>	1	2'500'311.084285	1'117'232.644942	2'500'311.079100	1'117'232.629300	-0.000737	0.017082	0.017097
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2'500'328.495805	1'117'238.646139	2'500'328.273300	1'117'238.570100	-0.046096	-0.029834	0.054908
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2'500'302.264690	1'117'255.831478	2'500'302.189200	1'117'255.765100	0.001407	-0.017098	0.017156
<input checked="" type="checkbox"/>	5	2'500'319.253191	1'117'262.976844	2'500'318.953500	1'117'262.916000	-0.047163	0.002740	0.047243
<input checked="" type="checkbox"/>	6	2'500'312.641733	1'117'280.224643	2'500'312.383600	1'117'280.162800	0.047891	0.014032	0.049904
<input checked="" type="checkbox"/>	7	2'500'336.034569	1'117'219.153065	2'500'335.962800	1'117'219.133800	0.044698	0.013079	0.046573

Georeferencing: GAVA-2021_Galerie bastion.

Transformation: 1st Order Polynomial (Affine)
 Controls Points: 6 / 6
 Total RMS Errors
 Forward: 0.041819
 Inverse: 0.042161
 Forward-Inverse: 0.000000

Relevé GAVA – Galerie Jean-Senebier

Link	Source X	Source Y	X Map	YMap	Residual X	Residual Y	Residual	
<input checked="" type="checkbox"/>	1	2'500'362.992271	1'117'036.829307	2'500'362.924000	1'117'036.762000	0.021918	0.031569	0.038432
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2'500'369.813226	1'117'011.040872	2'500'369.699900	1'117'011.145000	0.005814	-0.027271	0.027884
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2'500'350.545047	1'117'030.450803	2'500'350.395600	1'117'030.561400	-0.020246	0.008231	0.021855
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2'500'377.945433	1'117'055.088820	2'500'377.896100	1'117'054.656400	-0.024223	0.031449	0.039896
<input checked="" type="checkbox"/>	5	2'500'367.129802	1'117'064.657213	2'500'367.113500	1'117'064.148500	0.016736	-0.043978	0.047055

Georeferencing: galerie_galland.tif

Transformation: 1st Order Polynomial (Affine)
 Controls Points: 5 / 5
 Total RMS Errors
 Forward: 0.047344
 Inverse: 0.047333
 Forward-Inverse: 0.000000

Relevé GAVA - Galerie François-Le-Fort

Carte: Georef_DIT_GAVA_2021_LeFort

1st Order Polynomial (Affine)

	Link	Source X	Source Y	X Map	YMap	Residual X	Residual Y	Residual
<input checked="" type="checkbox"/>	1	2'500'626.638111	1'117'080.913666	2'500'626.740400	1'117'081.430600	0.024711	0.028216	0.037507
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2'500'715.054005	1'117'054.000736	2'500'714.622400	1'117'053.943500	0.002902	-0.000067	0.002902
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2'500'668.386003	1'117'008.315197	2'500'668.688000	1'117'008.349200	0.016278	0.022274	0.027588
<input checked="" type="checkbox"/>	6	2'500'651.348072	1'117'055.900372	2'500'651.380900	1'117'056.145800	-0.033045	-0.026699	0.042483
<input checked="" type="checkbox"/>	7	2'500'637.757045	1'117'040.974467	2'500'638.034000	1'117'041.237000	-0.010845	-0.023725	0.026087

Georeferencing: Georef_DIT_GAVA_2021_LeFor

Transformation: 1st Order Polynomial (Affine)
 Controls Points: 5 / 5
 Total RMS Errors
 Forward: 0.030534
 Inverse: 0.030768
 Forward-Inverse: 0.000000

Plan GESDEC N° 251782

Carte: Georef_GESDEC_251782_Galland

1st Order Polynomial (Affine)

	Link	Source X	Source Y	X Map	YMap	Residual X	Residual Y	Residual
<input checked="" type="checkbox"/>	5	2'500'790.430295	1'117'192.645141	2'500'790.455311	1'117'192.568105	0.029824	-0.063231	0.069911
<input checked="" type="checkbox"/>	6	2'500'790.385245	1'117'172.758239	2'500'790.352601	1'117'172.745675	0.009800	0.006891	0.011980
<input checked="" type="checkbox"/>	7	2'500'769.005945	1'117'188.054702	2'500'768.973108	1'117'188.034866	-0.025140	0.034319	0.042542
<input checked="" type="checkbox"/>	8	2'500'820.145833	1'117'223.915542	2'500'820.207610	1'117'223.964588	0.015434	-0.000084	0.015435
<input checked="" type="checkbox"/>	9	2'500'823.766606	1'117'206.092325	2'500'823.748308	1'117'206.165172	-0.029919	0.022105	0.037199

Georeferencing: Georef_GESDEC_251782_Gall..

Transformation: 1st Order Polynomial (Affine)
 Controls Points: 5 / 5
 Total RMS Errors
 Forward: 0.041141
 Inverse: 0.041197
 Forward-Inverse: 0.000000

Feuille 342 GESDEC

Carte: GESDEC_Feuille342_Galland

1st Order Polynomial (Affine)

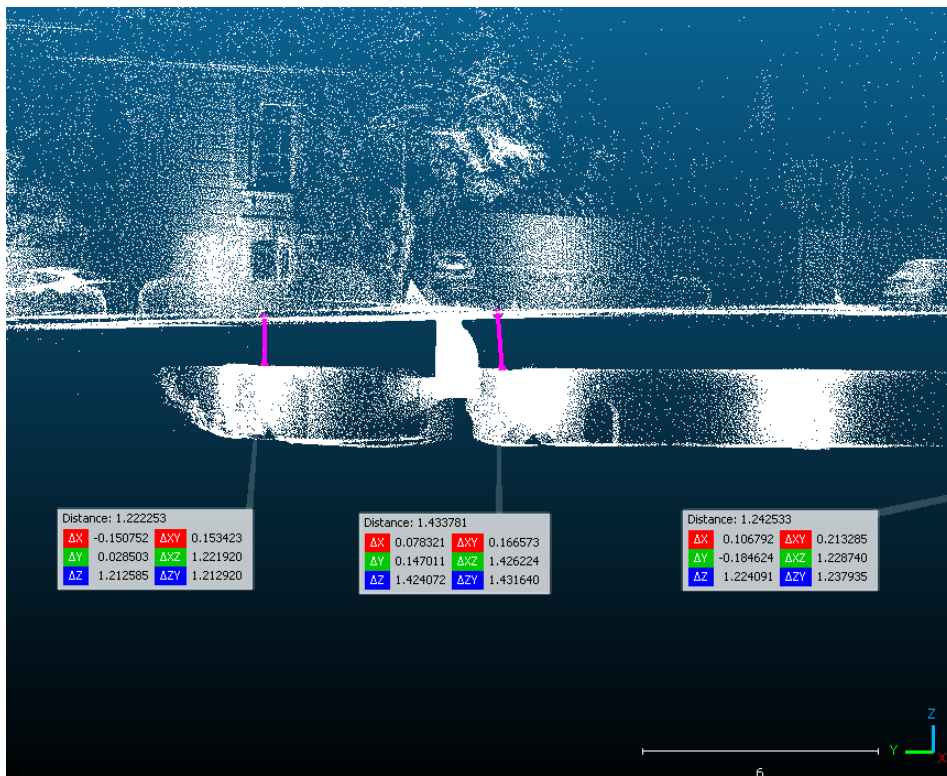
	Link	Source X	Source Y	X Map	YMap	Residual X	Residual Y	Residual
<input checked="" type="checkbox"/>	1	2'500'778.267108	1'117'160.663454	2'500'778.254244	1'117'160.675915	-0.003034	0.004446	0.005382
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2'500'790.354920	1'117'172.770732	2'500'790.352601	1'117'172.745665	0.014208	-0.010157	0.017465
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2'500'753.288197	1'117'185.731408	2'500'753.294367	1'117'185.774402	-0.019468	0.009989	0.021881
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2'500'773.891776	1'117'272.487396	2'500'773.917888	1'117'272.461675	-0.016657	0.009898	0.019376
<input checked="" type="checkbox"/>	5	2'500'749.021795	1'117'247.838241	2'500'749.103408	1'117'247.835496	0.024951	-0.014176	0.028697

Georeferencing: Georef_GESDEC_Feuille342_...

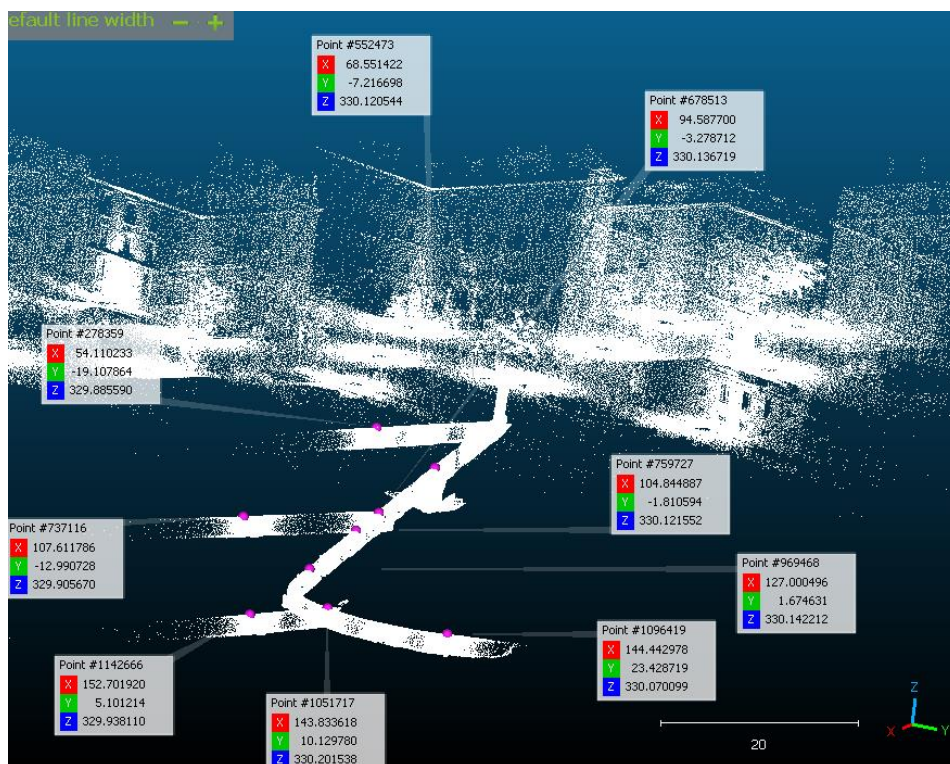
Transformation: 1st Order Polynomial (Affine)
 Controls Points: 5 / 5
 Total RMS Errors
 Forward: 0.020059
 Inverse: 0.020067
 Forward-Inverse: 0.000000

Annexe 5

Exemple de mensuration des données 3D effectuée dans le logiciel *Cloud Compare*.



Mesure de la distance entre la voûte des galeries et la surface afin de contraster avec la valeur d'altitude du MNT 2014



Mesure de la valeur z de la voûte des galeries afin de voir la variation de l'altitude

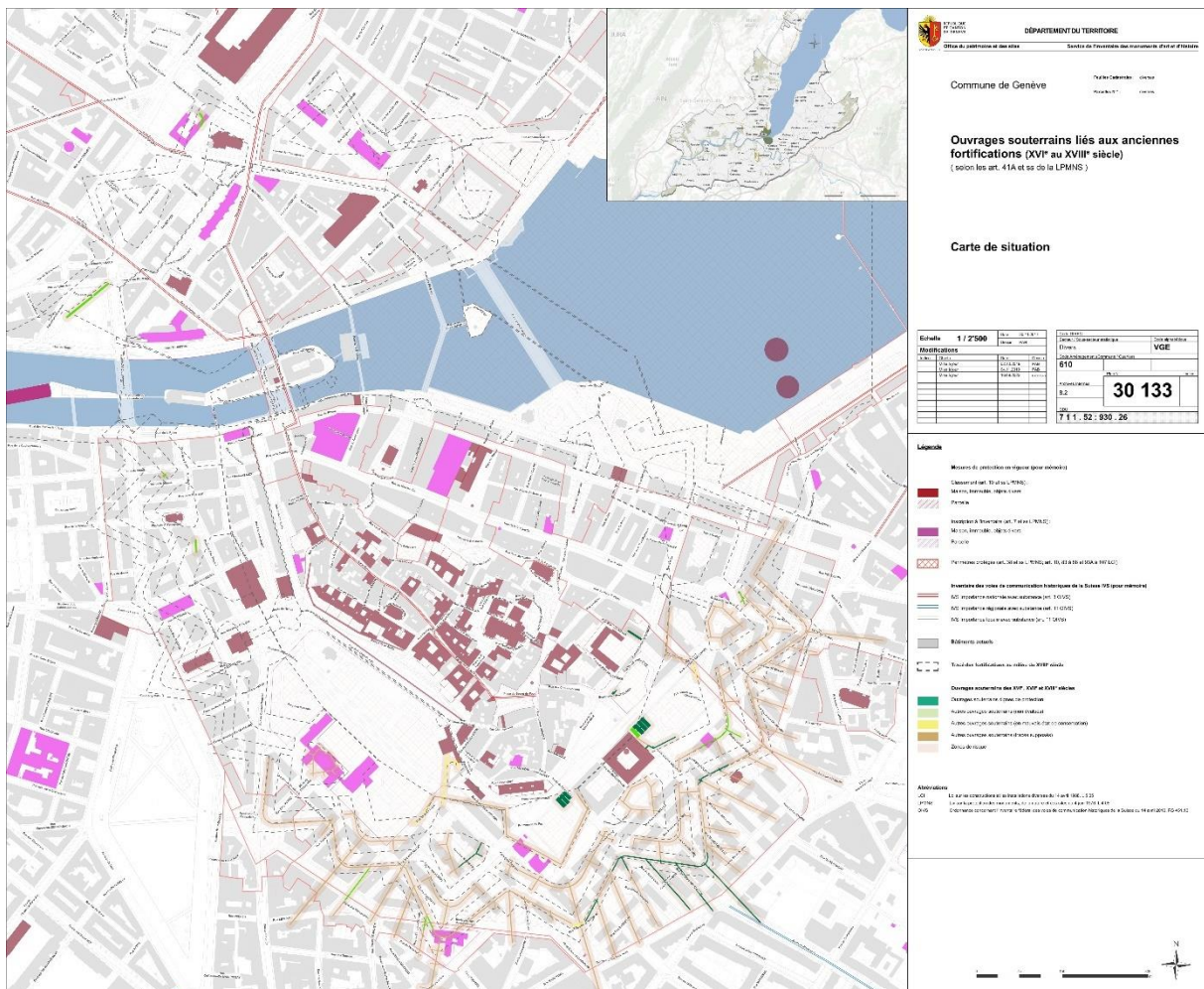
Annexe 6

Correction d'altitude des données 3D sur la base du Modèle Numérique du Terrain (MNT) 2014.

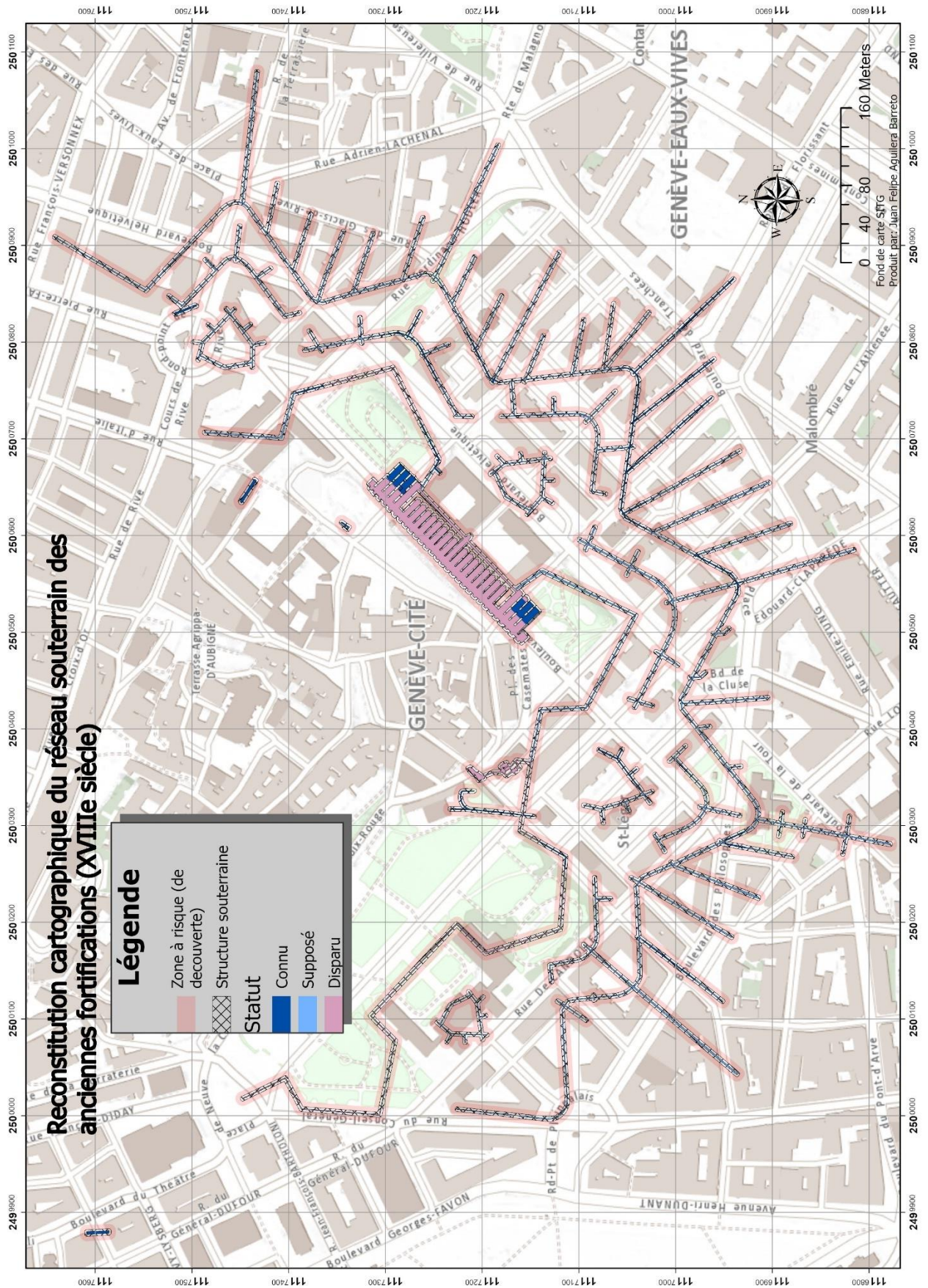
Galerie	Altitude fichier 3d	Altitude la surface MNT	Distance de la voûte à la surface	Altitude Corrigée
F. Le-Fort	338.29	398.97 – 399.22	4.28	394.49 – 394.20
Athénée	369.1	397.64 – 397.71	1.22	396.42 – 396.47
Charles-Galland	297.01	389.22 – 390.88	2.73	393.2 – 395.20
Senebier	356.2	386.88 – 387.92	5.68	381.2 – 382.24
Calvin/Alice-Rivaz	301.18	389.22 – 390.88	5.39	386.49 – 385.5

Annexe 7

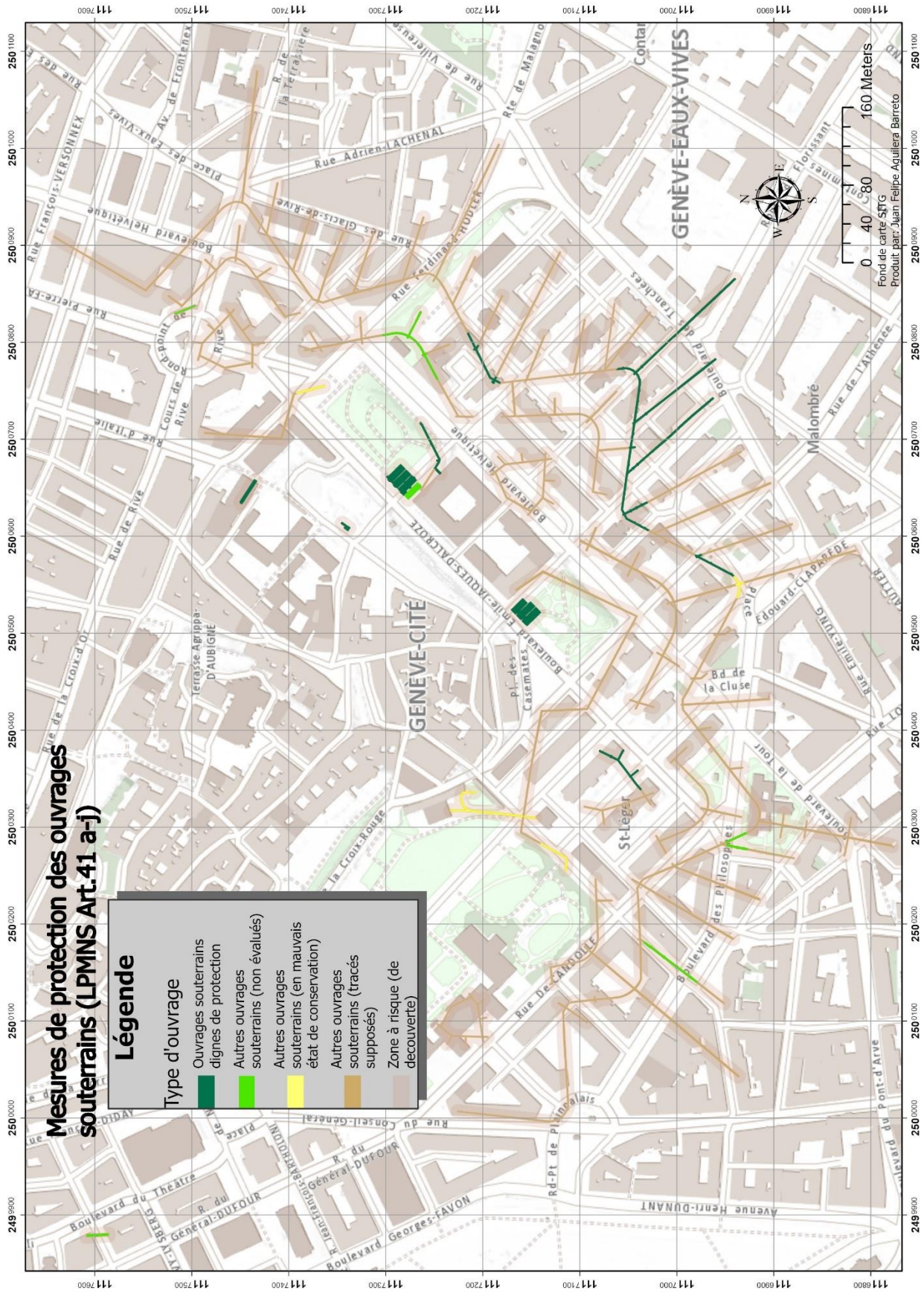
Mise à jour du Plan N°30133 sur la base des données produites au cours du stage



Annexe 8



Annexe 9



Annexe 10

Contraste entre le réseau souterrain des anciennes fortifications modélisé en 3d et les éléments actuels du cadastre du sous-sol

