



Août  
–  
Novembre  
2023

# *Application des outils de QGIS à la production et gestion de données géophysiques*

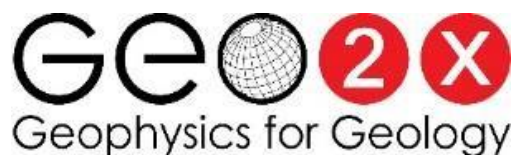
---

MÉMOIRE DE STAGE  
GEO2X SA

CERTIFICAT COMPLÉMENTAIRE EN GÉOMATIQUE (UNIGE)  
SOLINE GHINET

*Directrice de mémoire : Dre Corine Frischknecht*

*Référent de stage à Geo2X SA : Valentin Métraux*



## Table des matières

Liste des Figures.....	2
Résumé .....	4
Remerciements.....	5
Disclaimer.....	5
1. Introduction .....	6
1.1. Présentation de Geo2X SA .....	6
1.1.1. Objectif du projet de stage .....	7
2. Méthodes géophysiques .....	8
2.1. Sismique réflexion et sismique réfraction .....	8
2.2. Électromagnétisme .....	9
2.3. Tomographie électrique.....	10
3. Outils SIG .....	12
4. Projets .....	12
4.1. SIG-Genève (sismique réflexion 2D) .....	12
4.1.1. Contexte.....	12
4.1.2. Méthodes.....	15
4.1.3. Résultats.....	15
4.2. SGE-Eclépens (sismique réflexion 3D) .....	22
4.2.1. Contexte.....	22
4.2.2. Méthodes.....	25
4.2.3. Résultats.....	26
4.3. Autres petits projets d'acquisition géophysique .....	40
4.3.1. Mont Soleil .....	40
4.3.2. MFR Romont .....	41
4.3.3. NORBERT-Fribourg .....	43
4.3.4. Aubonne-Etoy et Nyon-Vinzel : .....	43
5. Déroulement du stage.....	47
6. Conclusion et perspectives.....	48
Références .....	49
ANNEXES .....	50

## Liste des Figures

Figure 1: Exemple de résultat obtenu avec les données brutes, puis l'interprétation. Cet exemple ne provient pas du travail de Geo2X SA mais d'une étude de Mridekh et al. (2000). <a href="https://www.researchgate.net/figure/Coupe-sismique-et-interpretation-montrant-le-changement-de-style-tectonique-entre-les_fig4_248521295">https://www.researchgate.net/figure/Coupe-sismique-et-interpretation-montrant-le-changement-de-style-tectonique-entre-les_fig4_248521295</a> .....	8
Figure 2: Schéma explicatif d'acquisition de données en sismique réflexion. Le camion-vibreur envoie des ondes dans le sol, qui sont ensuite réfléchies par les couches géologiques en subsurfaces. L'onde sont finalement réceptionnées par les capteurs, appelés géophones. <a href="https://swissgeoenergy.com/eclpens-switzerland/">https://swissgeoenergy.com/eclpens-switzerland/</a> .....	8
Figure 3: Schéma explicatif du principe de fonctionnement de l'EM. <a href="https://i.imgur.com/quEY7up.png">https://i.imgur.com/quEY7up.png</a> .....	9
Figure 4: Exemple de résultat obtenu grâce à des mesure électromagnétiques. Les grands rectangles du dessus montrent les mesures en vue aérienne, selon la profondeur, tandis que les coupes du dessous montre la vue de profil. <a href="https://em.geosci.xyz/_images/aspencascmodels.png">https://em.geosci.xyz/_images/aspencascmodels.png</a> .....	10
Figure 5: Exemple de dispositif de mesure en tomographie électrique. Des électrodes sont placées dans le sol et transmettent un courant provenant d'une batterie, faisant office de source. <a href="https://www.mdpi.com/applsci/applsci-09-02963/article_deploy/html/images/applsci-09-02963-g001.png">https://www.mdpi.com/applsci/applsci-09-02963/article_deploy/html/images/applsci-09-02963-g001.png</a> .....	11
Figure 6: Exemple de résultat obtenu grâce à des mesures de tomographie électrique. Les données obtenues sont traitées avec un modèle qui permet de visualiser les couches géologiques à travers les changements de résistivité des matériaux du sous-sol. L'exemple montré ci-dessous provient de la publication de Perrin et al. (2011) .....	11
Figure 7: Camions-vibrateurs mobilisés pour la campagne de sismique 2D à Genève. Image de <a href="http://vibroseismic.com/tour.html">http://vibroseismic.com/tour.html</a> . .....	13
Figure 8: 14 lignes sismiques 2D demandées par les SIG pour couvrir le "Grand-Genève" .....	14
Figure 9: Types d'outils de sélection disponibles dans QGIS.....	16
Figure 10: outils de digitalisation de QGIS, disponibles lorsque la couche est en mode édition. ....	16
Figure 11: Téléchargement des couches bâtiments de Genève (Swisstopo) et du département de l'Ain et de la Haute-Savoie (IGN). Les couches des bâtiments en France sont reprojetées dans le système suisse : EPSG:2056 - CH1903+ / LV95, fusionnées et clippées à la taille de la zone d'intérêt. ....	17
Figure 12: Buffer de 50m autour des points de tir pour prévoir une distribution ciblée de prospectus d'information à la population. ....	17
Figure 13: Exemple d'utilisation de QGIS pour prévoir la diminution de puissance de tir des camions-vibrateurs en fonction de leur proximité à un bâtiment. ....	18
Figure 14: Exemple de vibpath préparé pour faciliter les transferts des camions-vibreur entre deux points géographiquement éloignés. Le vibpath est constitué de sorte à éviter les autoroutes, les ponts à < 20 tonnes, les routes interdites aux camions etc. ....	19
Figure 15: Carte produite pour le rapport final transmis aux SIG à la fin de la mission. La mise en page se base sur le modèle fournit par Geo2X SA et la carte est produite en A3 pour conserver un très haut taux de détails en agrandissant l'image. Les autres cartes produites pour le rapport se trouvent en annexe.....	20
Figure 16: code R pour séparer la couche contenant les 12 lignes 2D en 12 couches shapefile individuelles. ....	21
Figure 17: Aire de l'étude géophysique menée à Eclépens. Le rectangle ABCD est la zone d'offset et le rectangle EFGH représente la zone d'intérêt. La mise en page a été faite avec les outils intégrés de QGIS Layout, permettant de créer une mise en page dynamique multiple reprenant le périmètre de la zone agrandie (carré jaune) pour créer un plan de situation de la carte principale. ....	23
Figure 18: Géophone de Stryde, petit, compact et léger. ....	23
Figure 19: Pré-plot produit par l'équipe SIG pour le projet de sismique réflexion 3D dans la région de Eclépens. Au programme, environ 21'200 points de tir (sources) et 13'400 géophones (receivers) ont été prévus pour couvrir correctement la zone d'étude.....	24
Figure 20: Subdivision en 4 zones principales (une par camion), chacune subdivisées en huit zones, représentant les huit nuits d'acquisition prévues. Ex : les zones A1 représentent la première nuit d'acquisition. ....	27
Figure 21: Vibpaths digitalisés une première fois pour couvrir tous les points de tir sur le terrain. Les vibpaths sont préparés avec des tronçons dits de « production », pour indiquer qu'il y a des points de tir et des tronçons « transit » là où il n'y a pas de points de tirs et que le camions doit se déplacer entre deux points d'acquisition. Des indications de manœuvre sont également incluses pour indiquer aux camions s'ils ont l'espace d'opérer un demi-tour ou non. Ces indications sont	

importantes car les camions travaillent de nuit et certains terrains sont accidentés ou trop étroits pour opérer un demi-tour. ....	28
Figure 22: Exemple du résultat obtenu après plusieurs journées de repérage avec la trace GPS et les modifications et commentaires apportés grâce à QField, visualisé dans QGIS. ....	29
Figure 23: Code écrit en langage R pour intersecter les couches nécessaires et obtenir un fichier excel avec les noms et IDs des parcelles dont les propriétaires devaient être appelés. ....	30
Figure 24: Parcelles exportées en format .jpg grâce à la fonctionnalité « Atlas » dans QGIS. Atlas permet un affichage dynamique des légendes grâce aux commandes SQL. Les images des parcelles montrent leurs limites (ligne bleue), les géophones (points jaunes) et les tirs (points rouges) traversant celles-ci. Le reste des images des parcelles, créées avec la fonctionnalité de l'Atlas, se trouvent en annexe. ....	31
Figure 25: Géophones classifiés selon leur type de milieu d'implantation ; 9 catégories ont été choisies : Forêts et bosquets (vert), Agricole -Champs (orange), Agricole - Limites de champs (brun clair), Agricole – Bande de compensation (beige), Agricole – Lisière (blanc cassé), Routes et pistes (brun foncé), Industries (violet), Villages et villes (rouge), Divers (blanc)...	32
Figure 26: Code R utilisé pour calculer le nombre de géophones sélectionnés par zone. ....	33
Figure 27: Second code pour sélectionner 200 géophones par jour à échanger sur le terrain ....	34
Figure 28: Représentation visuelle du résultat de la mise en tampon des maisons se trouvant dans un rayon de 50m d'un point de vibration. ....	35
Figure 29: Exemple des 4 vibpaths prévu pour une nuit d'acquisition avec prise en compte (dans la séquence) de la distance minimale de 2.5km entre chaque camion-vibrateur pendant les tirs.....	36
Figure 30: Vibpath transféré sur « MyMaps » dans Google. Toute la symbologie doit être refaite car elle ne s'enregistre pas dans les fichiers KML.....	37
Figure 31: Exemple pour la zone D, 1 <sup>ère</sup> nuit des statistiques de prévision du temps d'acquisition par camion (fleet), des besoins en termes de mesures PPV et des besoins en sécurisation du trafic autour des camions. ....	38
Figure 32: Exemple de carte de fin de projet préparée pour l'entreprise mandataire. Le reste des cartes produites pour le rapport se trouvent en annexe. ....	39
Figure 33: Carte de la zone d'étude par EM à Mont Soleil, préparée pour les collègues allant sur le terrain. ....	41
Figure 34 : Mise en page des résultats d'une étude du sol par électromagnétisme à Romont dans le Jura bernois. Le reste des cartes produites pour le rapport se trouvent en annexe. ....	42
Figure 35: Géoréférencement et digitalisation des canalisations enterrées autour des profils d'acquisition. A) profils et plan des canalisations enterrées. Les plans ont été géoréférencés, puis les canalisations ont été digitalisées manuellement avec les outils de digitalisation de QGIS (création de couche polylignes). B) Résultat de la digitalisation, avec une symbologie catégorisée, permettant de distinguer les conduites d'eau et les conduites du réseau téléphonique enterré de Swisscom. ....	43
Figure 36: Méthodologie de la création d'un pré-plot pour une acquisition sismique 3D. A) Pré-plot « frugal » avec les tirs et les géophones positionnés principalement sur les routes. B) Dessin du polygone circulaire de référence pour le code Python. C) Quadrillage orthogonal tourné en fonction d'une orientation maximisant le nombre de tirs, créé avec Python. D) Close-up du quadrillage de référence pour bouger les points orthogonalement. E) Différence entre les points du quadrillage initial et les points bougés pour accommoder les routes et chemins carrossables. F) Résultat final du pré-plot basé sur une grille initialement orthogonale. ....	45
Figure 37: Code Python écrit pour créer et tourner les grilles qui permettent de préparer un pré-plot orthogonal. ....	46

## Résumé

Pour valider les enseignements du Certificat Complémentaire en Géomatique, j'ai effectué un stage en entreprise chez Geo2X SA entre le 21 août et le 17 novembre 2023.

Geo2X SA est une entreprise de géophysique, produisant des données pour des entreprises privées ou sur demande des cantons ou de l'état, pour connaître la nature du sous-sol dans des zones définies. Pour produire des images du sous-sol, l'entreprise acquiert des données sur le terrain à l'aide de différentes méthodes géophysiques (sismique réflexion, réfraction, électromagnétisme, tomographie électrique etc). Les chantiers peuvent durer de quelques heures (campagne de géoradar sur une toute petite zone type parking) à quelques mois (grosse campagne de sismique réflexion sur des zones très étendues), dépendant de la taille de la zone d'étude et de la précision et profondeur des données voulue.

Pour aider les missions de terrain, Geo2X SA s'appuie sur l'utilisation de QGIS pour gérer les flux de données et pour coordonner les équipes de terrain, leur permettant d'effectuer les acquisitions dans les meilleures conditions possibles.

Le but du stage était de développer mes connaissances en utilisation de systèmes d'informations géographiques (SIG) en aidant l'équipe SIG chargée de la gestion informatique des projets en cours. L'équipe SIG avait besoin d'un soutien actif sur deux gros projets entre fin août et fin octobre et il a donc été convenu que je vienne en renfort sur ceux-ci, puis sur de plus petits projets jusqu'à mi-novembre.

Pendant le stage, tous les traitements de données vectorielles géolocalisées se sont faits avec QGIS, RStudio et Python. Le travail effectué pour Geo2X SA était très varié, allant de la manipulation de tables attributaires de couches de points à l'utilisation de langages informatiques (R et Python) pour automatiser une série de manipulations de couches dans QGIS. Le travail consistait, généralement, en manipulations diverses de couches vectorielles (buffer, clip, géoréférencement, union, transformations etc), créées pour les pré-plots des projets de sismique active en cours. Les pré-plot contenaient toute une série de couches vectorielles ou raster superposées permettant le bon déroulement des missions.

Ce mémoire de stage est le résultat des tâches accomplies pour Geo2X SA durant ces trois mois. Tous les documents produits et dont une partie est présenté ci-après, sont des couches vectorielles et des cartes transmises soit aux équipes de terrain, soit aux clients en fin de mission. Une partie des documents produits n'avait donc aucune fin officielle et consistait en du matériel de travail destiné aux personnel travaillant sur le terrain. Les couches vectorielles étaient transmises à travers un lien partagé sur WhatsApp aux équipes de terrain sous format Google Maps. La couche shapefile était enregistrée sous format .KML depuis QGIS, puis en utilisant le service « MyMaps » de Google pour les convertir en cartes consultables depuis

n'importe quel appareil connecté (téléphone, tablette, ordinateur portable). Une autre partie des cartes et documents étaient produits pour les rapports à remettre aux entreprises mandataires en fin de mission.

Le stage a été très instructif et m'a permis de grandement progresser à travers la résolution de problématiques diverses imposées par les besoins des projets. J'ai également gagné en rapidité, efficacité et j'ai appris de nombreuses nouvelles manipulations vectorielles. J'ai eu le temps de continuer à apprendre tout en sachant me rendre utile pour l'entreprise, ce que j'ai énormément apprécié avec cette expérience chez Geo2X SA.

## Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement l'ensemble de l'équipe de Geo2X SA de m'avoir offert l'opportunité enrichissante de réaliser mon stage dans une ambiance conviviale et bienveillante. C'était une très belle expérience, qui m'a permis d'approfondir mes connaissances en géomatique tout en développant des compétences pratiques en géophysique.

Je tiens à remercier ma directrice de mémoire Corine Frischknecht, chargée de cours au département des sciences de la Terre, pour sa supervision et grâce à qui j'ai postulé chez Geo2X SA.

J'aimerais chaleureusement remercier le directeur de Geo2X SA, David Dupuy, de m'avoir accueillie au sein de son équipe. Également, je tiens à remercier particulièrement mon référent de stage, Valentin Métraux, pour son accompagnement bienveillant, ses conseils et ses explications précieuses.

La collaboration avec l'équipe m'a non seulement apporté une compréhension approfondie des enjeux liés à la géophysique et à l'acquisition de données géophysiques mais a également renforcé mon intérêt pour ce secteur. Cette expérience restera un pilier essentiel dans ma formation académique et professionnelle, et je suis reconnaissante d'avoir pu contribuer aux projets de Geo2X SA.

## Disclaimer

Tous les fonds de cartes des cartes de ce travail proviennent de la base de données cartographiques de Swisstopo et de la base d'images satellites de Google.

Les données et cartes présentées ici ont été produites pendant le stage et sont confidentielles ; elles appartiennent à Geo2X SA.

## 1. Introduction

Dans le cadre du Certificat Complémentaire en Géomatique, délivré conjointement par la Faculté des Sciences de la Société et la Faculté des Sciences, et en collaboration avec l'Institut des Sciences de l'Environnement de l'Université de Genève, j'ai effectué un stage de trois mois dans l'entreprise Geo2X SA pour mettre en pratique les enseignements théoriques suivis au printemps 2023 et renforcer mes compétences. Le travail chez Geo2X SA consistait à venir soutenir l'équipe SIG responsable de l'aspect cartographique de tous les chantiers d'acquisition de données géophysiques se déroulant durant mon stage.

### 1.1. Présentation de Geo2X SA

Geo2X SA est une entreprise suisse fondée en 2002 et basée à Yverdon-les-Bains. Cette entreprise est spécialisée dans les mesures géophysiques et propose, selon l'objectif à atteindre, l'acquisition de données 2D ou 3D avec plusieurs méthodes telles que la vibro-sismique, la sismique réfraction, la sismique réflexion, les méthodes électriques (ERT), l'électromagnétisme (EM), le magnétisme, la gravimétrie, le géo-radar, ou propose également des mesures de bathymétrie. Récemment, l'entreprise s'est focalisée sur de grosses campagnes de sismique réflexion 2D et 3D dans la région lémanique et sur de plus petits chantiers dont les acquisitions sont faites à l'aide de méthodes électriques (ERT) ou électromagnétiques (EM). Les gros chantiers de sismique 2D et 3D ont souvent pour but de caractériser les couches et structures du sous-sol sur plusieurs kilomètres de profondeur, dans le but de détecter des failles. La détection de failles est cruciale pour les projets de géothermie profonde, pour lesquels le forage doit se faire dans la faille, ou pour des projets de fracking, pour lesquels le forage ne doit pas se faire dans des failles préexistantes. Les plus petits chantiers d'ERT ou d'EM ont également pour but de caractériser la roche en subsurface, à moindre profondeur (quelques dizaines à centaines de mètres de profondeur), pour des projets d'implantation d'éoliennes ou d'un parc de panneaux solaires.

Plusieurs acquisitions vibro-sismiques, électriques et électromagnétiques ont été organisées par Geo2X SA pendant la durée de mon stage. Geo2X SA est mandaté par des entreprises souhaitant connaître la nature du sous-sol dans certaines régions données pour appuyer, ou non, la faisabilité de travaux prévus par ces entreprises. Les chantiers se déroulent en plusieurs étapes :

- Réponse à l'appel d'offre pour obtenir le chantier
- Préparation du travail de terrain
- Acquisition des données sur le terrain

- Traitement et interprétation des données (souvent délégués à une entreprise tierce, spécialisée)
- Écriture du rapport final sur le déroulement du chantier et les résultats obtenus

L'utilisation des outils de géomatiques est primordiale pour chacune des étapes susmentionnées pour pouvoir estimer les besoins en termes de financement, matériel et force vive pour chaque chantier en répondant à l'appel d'offre, pour pouvoir préparer les cartes d'implantation de géophones/électrodes (pré-plot), lors de la coordination de l'implantation des géophones en temps réel pour les gros chantiers de sismique et enfin pour la préparation du post-plot pour les cartes finales à fournir à l'entreprise mandataire. L'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) sert à faciliter le travail des collègues sur le terrain en leur fournissant des cartes précises et complètes (consultables sur Google Maps) et permet à Geo2X SA de pouvoir respecter consciencieusement les demandes des clients et fournir un service de haute qualité. Les pré-plots servent également à organiser les chantiers pour anticiper les besoins des équipes, connaître précisément les zones à planter et recenser les permis de passage – qui seront référés ici en tant que « permittage » - dans les propriétés privées traversées pour les campagnes d'acquisitions dans les régions étudiées.

#### 1.1.1. Objectif du projet de stage

L'objectif du stage était d'approfondir les connaissances acquises lors du Certificat Complémentaire en Géomatique en les mettant en pratique sur des projets portant sur des problématiques réelles. Notamment, mes connaissances en systèmes d'information géographiques m'ont permis d'apporter un soutien logistique important à l'équipe travaillant sur les pré-plots et post-plot de différents projets. L'équipe SIG fixe de Geo2X SA se compose de deux personnes (Valentin Métraux et Alexis Neven), qui sont parfois aidés par une troisième personne pouvant effectuer des tâches simples. Valentin Métraux est diplômé en Sciences de l'Environnement et s'est formé à l'utilisation des SIG à travers son mémoire de recherche de Master puis à travers les années d'expérience qu'il a acquises en travaillant chez Geo2X SA. Alexis Neven est géophysicien, spécialisé en méthodes électromagnétiques. Il a appris à utiliser les SIG à travers son travail de Doctorat. Tous deux maîtrisent également très bien l'utilisation de Python, apprise de manière autodidacte.



## 2. Méthodes géophysiques

Les principales méthodes géophysiques utilisées lors de mon stage ont été la sismique réflexion et réfraction, l'électromagnétisme et la tomographie électrique. Elles sont introduites dans les paragraphes suivants en utilisant les références de Kearey et al. (2002) et de Domra et al. (2015).

### 2.1. Sismique réflexion et sismique réfraction

Pour acquérir des données en sismique, des ondes sismiques sont générées par des sources artificielles (explosions contrôlées, camions-vibrateurs ou marteau), et la propagation des ondes à travers le sous-sol est enregistrée par des capteurs appelés géophones (fig.1). Les géophones peuvent être à un ou trois composantes, dépendant de la méthode d'acquisition et de la précision et qualité des résultats attendus. Un géophone à une composante enregistrera les mouvements du sol dans deux directions, soit la composante verticale de l'onde (ondes P et S) tandis qu'un géophone à trois composantes enregistrera les composantes verticales et horizontales N-S et E-O de l'onde (onde P, S, de Love et de Rayleigh).

Le résultat est obtenu sous forme de traces sismiques qui permettent de reconnaître des structures dans les couches géologiques (fig.2).

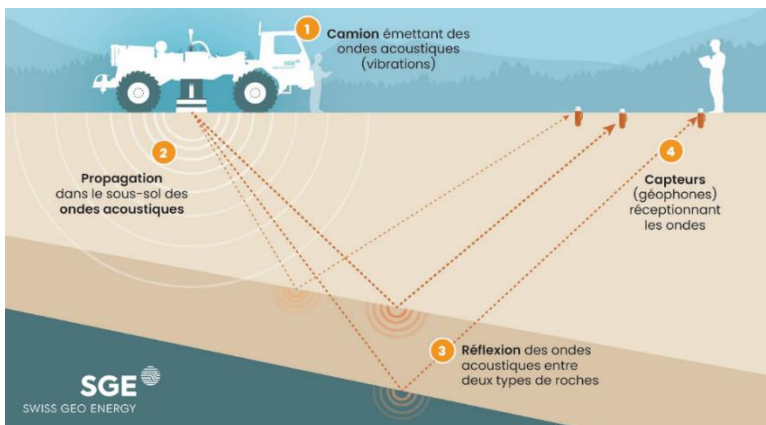


Figure 2: Schéma explicatif d'acquisition de données en sismique réflexion. Le camion-vibreur envoie des ondes dans le sol, qui sont ensuite réfléchies par les couches géologiques en subsurfaces. L'onde est finalement réceptionnée par les capteurs, appelés géophones. <https://swissgeoenergy.com/eclpens-switzerland/>

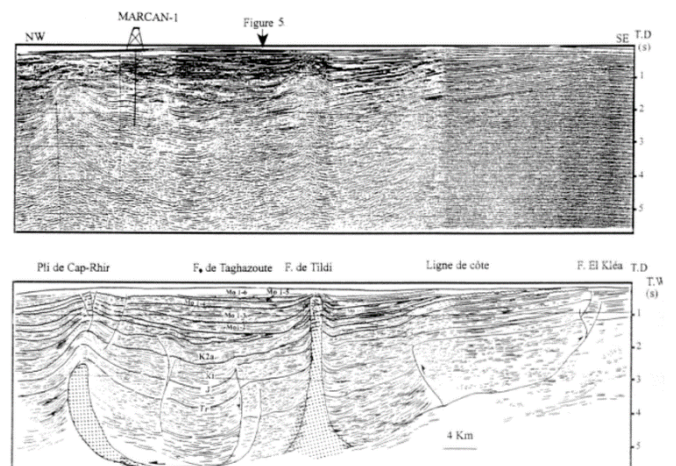


Figure 1: Exemple de résultat obtenu avec les données brutes, puis l'interprétation. Cet exemple ne provient pas du travail de Geo2X SA mais d'une étude de Mridekh et al. (2000). [https://www.researchgate.net/figure/Coupe-sismique-et-interpretation-montrant-le-changement-de-style-tectonique-entre-les\\_fig4\\_248521295](https://www.researchgate.net/figure/Coupe-sismique-et-interpretation-montrant-le-changement-de-style-tectonique-entre-les_fig4_248521295)

## 2.2. Électromagnétisme

L'électromagnétisme repose sur le principe de l'induction électromagnétique. Lorsqu'un champ magnétique variable est appliqué à un matériau conducteur, il induit un courant électrique dans le matériau. La mesure de la réponse électromagnétique permet d'obtenir des informations sur la conductivité électrique du sous-sol.

Pour acquérir les données, une bobine, l'émetteur, génère un champ magnétique primaire, qui induit un courant magnétique secondaire dans le sous-sol (fig.3). Trois récepteurs répartis sur la surface de l'instrument de mesure (un tube de 4.10m) mesurent la réponse électromagnétique résultante. Plus le récepteur est éloigné de la bobine émettrice, plus la profondeur d'investigation est grande.

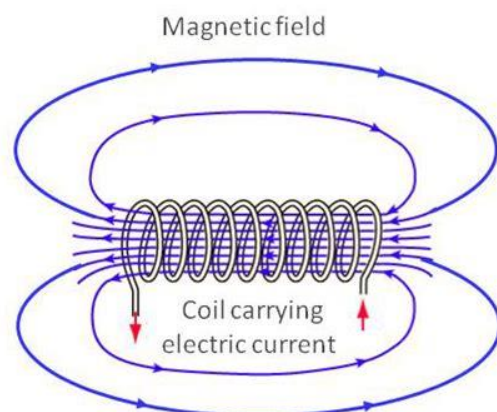


Figure 3: Schéma explicatif du principe de fonctionnement de l'EM.  
<https://i.imgur.com/quEY7up.png>

L'interprétation des données électromagnétiques implique l'analyse de la variation de la réponse électromagnétique en fonction de la fréquence. Les matériaux conducteurs, tels que les minéraux métalliques (contenant du fer, du cuivre, de l'or, etc), ou les fluides salins, présenteront une réponse électromagnétique distincte des matériaux isolants. La profondeur de pénétration des signaux électromagnétiques dépend de la fréquence utilisée, ce qui permet d'obtenir des informations à différentes profondeurs du sous-sol (fig.4).

L'électromagnétisme peut être utilisé pour détecter des gisements minéraux, pour caractériser des aquifères ou pour détecter des dépôts de déchets enfouis, mesure l'épaisseur des sédiments quaternaires ou pour étudier des vestiges archéologiques (Geo2X SA, 2023).

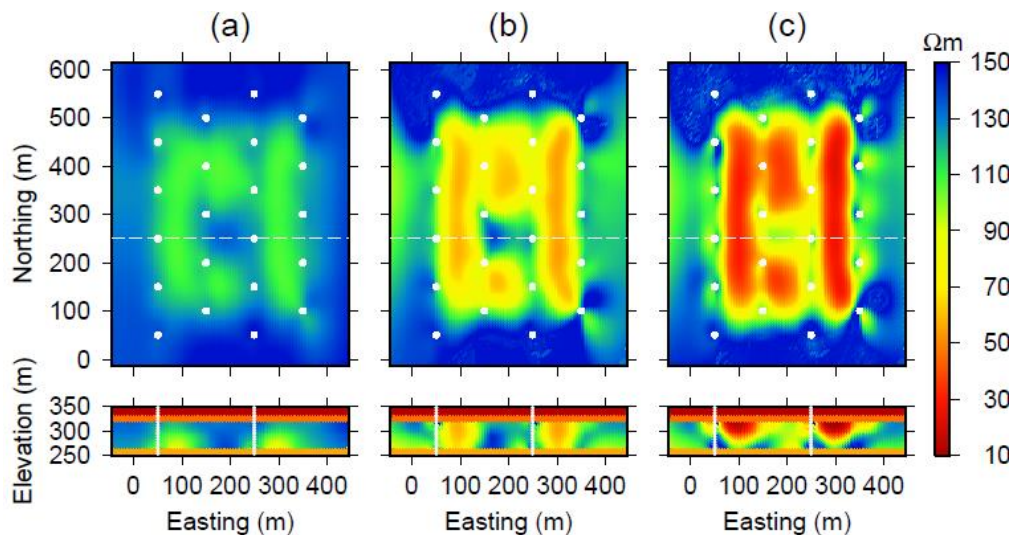


Figure 4: Exemple de résultat obtenu grâce à des mesure électromagnétiques. Les grands rectangles du dessus montrent les mesures en vue aérienne, selon la profondeur, tandis que les coupes du dessous montre la vue de profil. [https://em.geosci.xyz/ images/aspencascmodels.png](https://em.geosci.xyz/images/aspencascmodels.png)

### 2.3. Tomographie électrique

La tomographie électrique ou ERT (Electrical Resistivity Tomography), est une méthode géophysique qui vise à caractériser la résistivité électrique du sous-sol. L'ERT repose sur la mesure de la résistance électrique des matériaux souterrains, présentant des résistivités électriques différentes en fonction de leur composition (roches, fluides, sols).

Les mesures sont faites grâce à des électrodes placées à la surface du sol, connectées à un appareil injectant un courant électrique. Un dispositif de mesure de potentiel est utilisé avec des réseaux d'électrodes (fig.5). Ces électrodes sont disposées de manière à former une configuration géométrique qui influence la profondeur et la résolution de l'image obtenue. Les mesures sont effectuées sur plusieurs positions le long d'une ligne ou d'un réseau, et la procédure est répétée pour différentes configurations géométriques selon les méthodes utilisées (Schlumberger, dipôle-dipôle, etc).

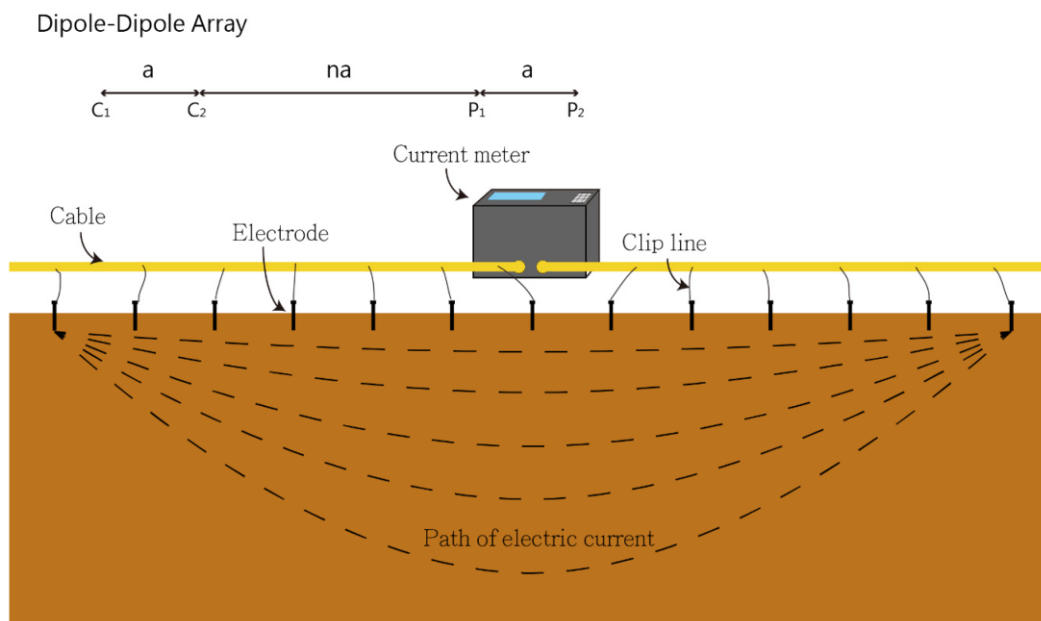


Figure 5: Exemple de dispositif de mesure en tomographie électrique. Des électrodes sont placées dans le sol et transmettent un courant provenant d'une batterie, faisant office de source. [https://www.mdpi.com/applsci/applsci-09-02963/article\\_deploy/html/images/applsci-09-02963-g001.png](https://www.mdpi.com/applsci/applsci-09-02963/article_deploy/html/images/applsci-09-02963-g001.png)

Une fois collectées, les données doivent être inversées mathématiquement et sont confrontées à un modèle pour pouvoir déterminer la distribution de la résistivité électrique du sous-sol (fig.6). Des algorithmes d'inversion sont utilisés pour générer des images en deux ou en trois dimensions de la subsurface. Les zones de faible résistivité peuvent indiquer la présence d'eau, de minéraux conducteurs, ou d'autres matériaux électriquement conducteurs (ex. marnes, calcaire argileux). Les zones de haute résistivité peuvent suggérer des matériaux plus isolants (calcaires).

L'ERT est utilisée pour cartographier les aquifères, détecter les zones d'eau salée, comprendre les caractéristiques hydrogéologiques et pour surveiller la migration de contaminants dans le sol. Elle est également employée pour évaluer la stabilité des sols, détecter des cavités ou des zones de faible densité. Finalement, cette méthode géophysique est également utilisée en archéologie car elle permet de localiser des structures archéologiques enfouies.

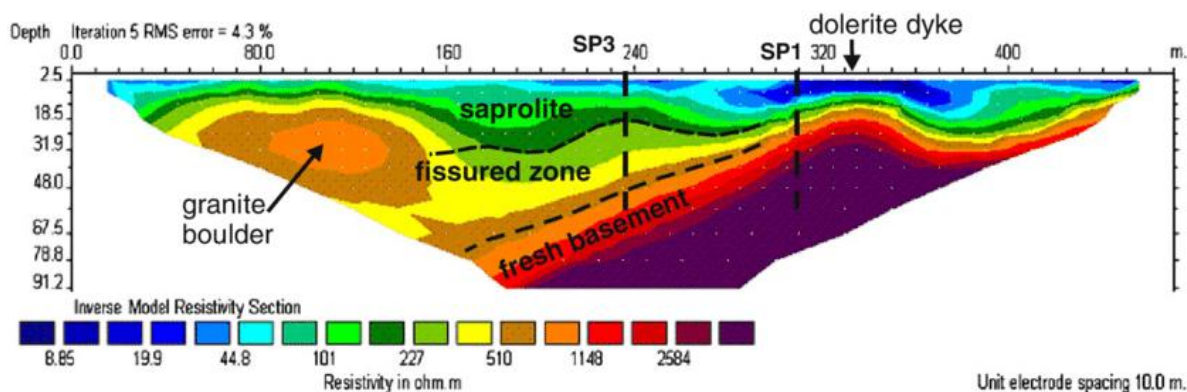


Figure 6: Exemple de résultat obtenu grâce à des mesures de tomographie électrique. Les données obtenues sont traitées avec un modèle qui permet de visualiser les couches géologiques à travers les changements de résistivité des matériaux du sous-sol. L'exemple montré ci-dessous provient de la publication de Perrin et al. (2011) .

### 3. Outils SIG

Pour répondre au mieux aux besoins de l'entreprise, QGIS Desktop, un logiciel SIG open source, est largement utilisé pour ses outils de manipulation de couches vectorielles et raster et de digitalisations personnalisées. Geo2X SA a choisi d'utiliser QGIS car ce logiciel répond parfaitement aux besoins de l'entreprise, en termes de systèmes d'information géographique et il n'est pas nécessaire de renouveler une license payante chaque année. De plus, QGIS étant open source, les aides en lignes pour résoudre des problèmes/ trouver des solutions sont beaucoup plus complètes que celles pour d'autres SIG tels que ArcGIS. Les données et projets QGIS sont partagés sur un serveur interne, permettant à plusieurs personnes de travailler sur les mêmes projets. Des outils de programmations, tels que les langages R et plus particulièrement Python, sont également couramment utilisés pour automatiser des tâches complexes, répétitives et/ou fastidieuses à faire à la main. La programmation avec R (version 4.3.1.) s'est faite dans RStudio (version 2023.06.2+561). La programmation avec Python (version 3.11.5) s'est faite avec Jupyter Notebook (version 6.5.4.).

Une fois les données vectorielles prêtes dans QGIS, celles-ci sont transférées sur les appareils de terrain par câbles USB en format CSV (GPS différentiels, tablettes connectées fournies avec les géophones) ou sous forme de fichiers KML chargés grâce au service « MyMaps »<sup>1</sup> de Google, consultables facilement depuis le terrain et partagé dans le groupe WhatsApp dédié (téléphones, tablettes ou ordinateurs portables). Finalement, QField, a été utilisé sur le terrain pour effectuer toute la partie de reconnaissance de terrain, en amont de l'implantation des géophones. QField est une application pour smartphone ou tablette permettant de consulter un projet QGIS depuis le terrain et de modifier les attributs, ajouter des remarques et garder une trace GPS des terrains parcourus (voir § 4.2.3.).

### 4. Projets

#### 4.1. SIG-Genève (sismique réflexion 2D)

##### 4.1.1. Contexte

Une campagne d'acquisition sismique, mandatée par les Services Industriels de Genève (SIG), s'est déroulée à Genève du 4 au 22 septembre 2023. Cette acquisition de sismique réflexion 2D visait à caractériser des couches géologiques sous le « Grand Genève », pour compléter les images du sous-sol du bassin Genevois, précédemment acquises lors des campagnes sismiques 2D et 3D de 2015-2018/2019-2020 et 2021 à Genève<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> <https://www.google.com/intl/de/maps/about/mymaps/>

<sup>2</sup> <https://www.geothermies.ch/actualites/campagne-de-prospection-du-sous-sol-genevois/50>

La campagne a été menée avec deux camions-vibrateurs IVI Mark 4 de 8 x 2.45 x 3.35m et 24 tonnes (fig.7).



Figure 7: Camions-vibrateurs mobilisés pour la campagne de sismique 2D à Genève. Image de <http://vibro seismic.com/tour.html>.

Les deux camions, se déplaçant l'un derrière l'autre, vibraient simultanément avec une fréquence allant de 5 à 85 Hz pendant 36 secondes. 80% à 25% de l'énergie était envoyée dans le sol en fonction de présence de maisons ou de conduites fragiles, pouvant potentiellement être abimées par les vibrations. Des géophones SmartSolo (IGU-16 et IGU-16HR) à une composante ont été posés tous les 10 mètres sur les lignes sismiques prédéterminées par les Services Industriels Genevois (fig.8). Douze lignes de 2.5 à 11 km ont été posées les unes après les autres dans les environs de Genève, en Suisse et en France ; trois à Annemasse (lignes 1 à 3), deux entre Genève et le Vuache (lignes 5 et 6), trois dans la région de St-Genis-Pouilly (lignes 7, 8, 9), trois aux alentours de Versoix et une à Collonge-Bellerive (lignes 10, 11, 12). Deux lignes supplémentaires ont été posées pour une acquisition à la chute de poids plutôt qu'au camion-vibrateur entre Prévevassin et Echenevex (lignes 101 et 102 ; fig.8).

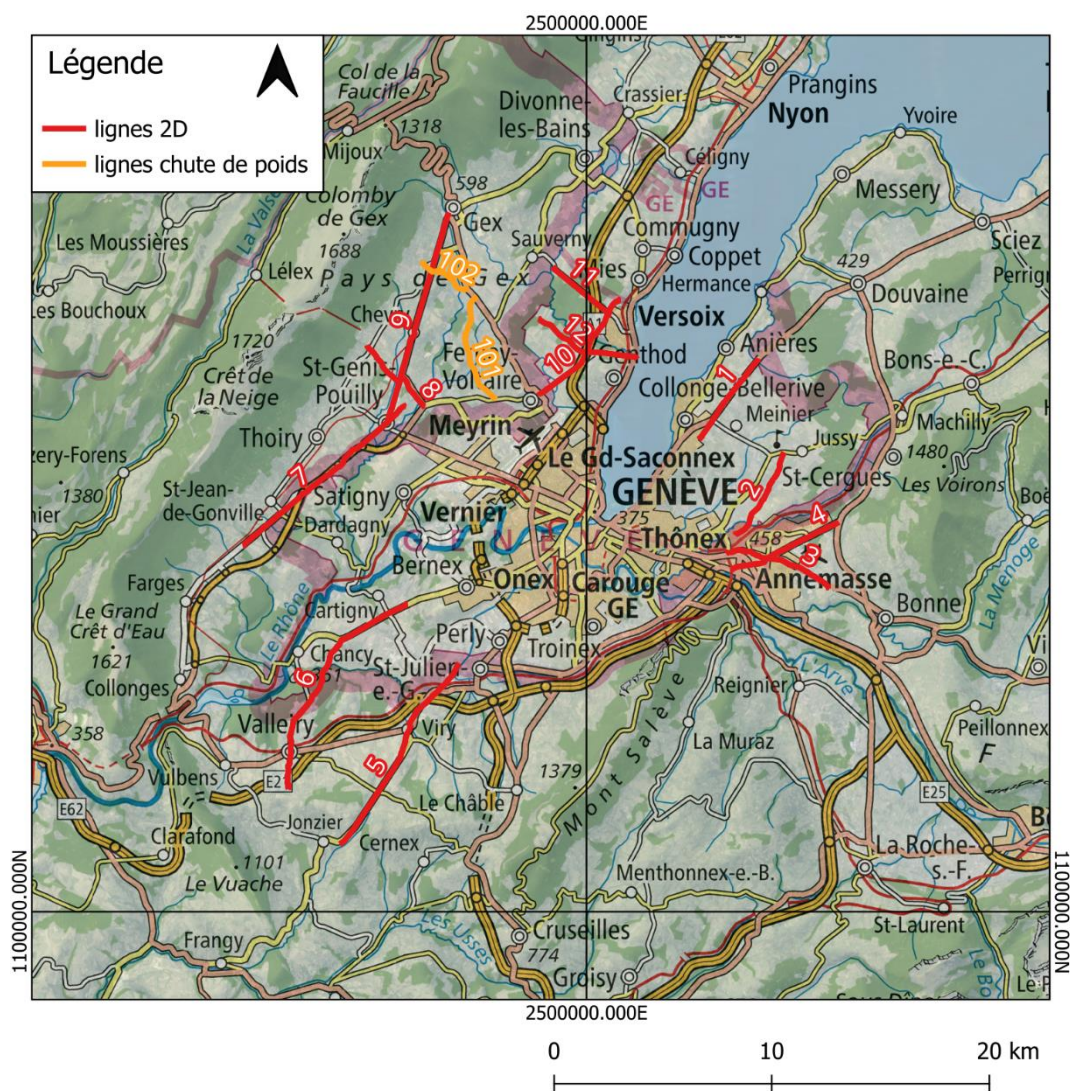


Figure 8: 14 lignes sismiques 2D demandées par les SIG pour couvrir le "Grand-Genève".

Pour coordonner facilement les opérations et suivre efficacement l'avancement du projet, un projet QGIS (pré-plot) a été créé par Valentin Métraux avec les points de tir (point GPS sur lesquels les camions vibrateurs doivent se positionner et poser la plaque avant de démarrer une vibration) et les positions des géophones puis a été utilisé tout au long du chantier. Le chantier se déroulant en Suisse et en France, il a fallu faire un choix et le système de coordonnées suisse a été choisi : EPSG:2056 - CH1903+ / LV95. Le pré-plot a d'abord été utilisé sur le terrain par les topographes de Geo2X SA pour marquer, au GPS différentiel, les positions des géophones au sol, préalablement à leur implantation. Le pré-plot a également servi à coordonner la distribution de flyers, à accompagner l'implantation des géophones chaque jour, à indiquer les positions de tir pour les chauffeurs des camions-vibrateurs, à suivre l'avancement du projet en temps réel etc.

#### 4.1.2. Méthodes

L'approche utilisée pour gérer le chantier du « Grand-Genève » été d'utiliser QGIS pour coordonner, recenser et mettre à jour les changements et besoins se présentant tout au long du projet. La version 3.32.1-Lima de QGIS a été utilisée. Un pré-plot a été préparé pour prévoir l'implantation des géophones et des points de vibrations des camions-vibrateurs. Les sources et les récepteurs ont été positionnés théoriquement sur la zone d'acquisition, le long des routes. Les points sont générés le long d'une géométrie (ici, des lignes digitalisées au préalable) avec un espacement de 10m inter-point. Les points sont ensuite déplacés manuellement pour accommoder les obstacles et les routes. Les attributs des points sont modifiés et complétés dans la table attributaire avec les informations nécessaires (unique id, positions xy, date d'implantation etc.). Le système de projection utilisé est celui de la Suisse, EPSG :2056 - CH1903+/LV95. Ce pré-plot sert de guide théorique aux équipes s'occupant de la topographie, chargées d'aller marquer la position des géophones sur le terrain avant l'implantation de ceux-ci, ou de prendre les positions GPS exactes des géophones une fois implantés.

Pour plus de détails sur les méthodes entourant les outils de gestion d'un projet sismique avec QGIS, voir section 4.2.2.

#### 4.1.3. Résultats

Pour cette acquisition de sismique réflexion 2D, mon rôle en tant que stagiaire en SIG a été de produire différents documents cartographiques. Par exemple, pour faciliter la distribution ciblée de dépliants, il était nécessaire d'identifier les maisons se trouvant à moins de 50m d'un point de vibration, préalablement à la campagne sismique. Pour cela, il a fallu récupérer les couches des bâtiments sur les sites internet respectifs de l'Office fédéral de topographie<sup>3</sup> (Swisstopo), pour les zones en Suisse, et de l'Institut national de l'information géographique et forestière<sup>4</sup> (IGN) pour la France. Avec Swisstopo, j'ai téléchargé la couche bâtiment V25 à partir du geopackage contenant les couches vecteur au 1 :25000 de la région de Genève. Pour la couche des bâtiments sur les territoires français concernés, il a fallu télécharger fichiers du département de l'Ain et de la Haute-Savoie en format .7z avant d'extraire les geopackages grâce au software 7-zip. Il a ensuite été nécessaire reprojecter les couches françaises (initialement en système de coordonnées EPSG : 2154 – RGF93 v1 / Lambert - 93) dans le système de coordonnées géographiques suisses (EPSG :2056 – CH1903+ / LV95) avant de réunir les trois couches avec l'outil « Fusionner des couches vecteur » (Genève, Ain et Haute-

---

<sup>3</sup> <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/maps/smv/smv25.html>

<sup>4</sup> <https://www.ign.fr/>



Savoie). Un clip sur la zone d'intérêt a ensuite été effectué (fig.11). Une fois les bâtiments de la zone d'intérêt prêts, l'utilisation de l'outil « tampon » de QGIS a été utilisé pour déterminer une zone tampon de 50m autour des points de tir prévu (fig.12). Cela a permis d'effectuer une sélection par localisation (tous les éléments de la couche « bâtiment » intersectant la couche « tampon ») grâce aux outils dédiés dans la barre des tâches et de répertorier les maisons se trouvant dans les zones tampons (fig.9 et 12).

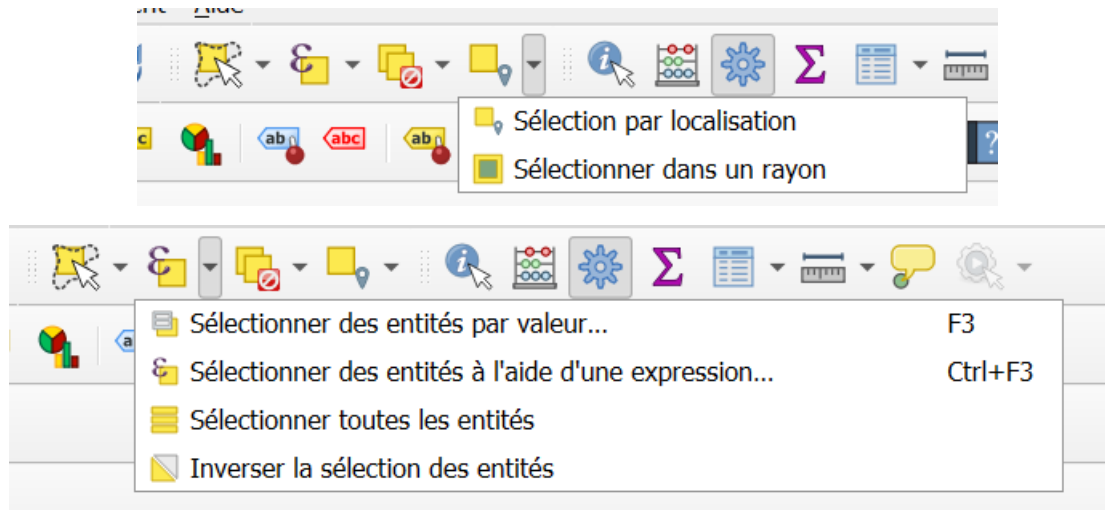


Figure 9: Types d'outils de sélection disponibles dans QGIS.



Figure 10: outils de digitalisation de QGIS, disponibles lorsque la couche est en mode édition.

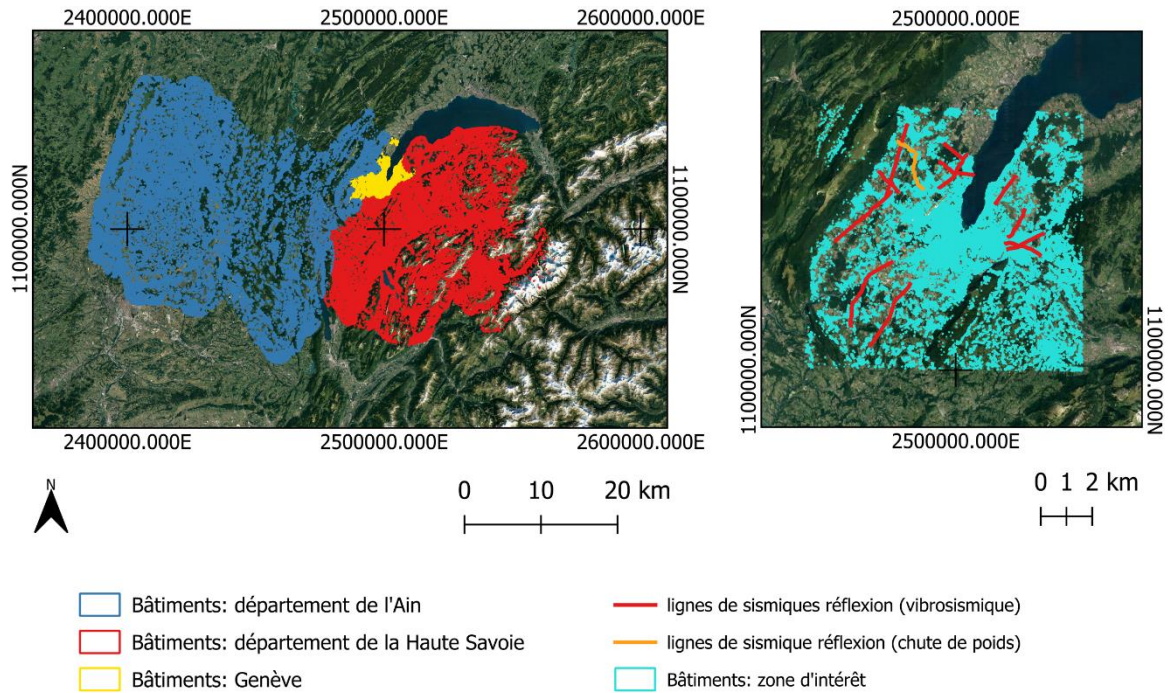


Figure 11: Téléchargement des couches bâtiments de Genève (Swisstopo) et du département de l'Ain et de la Haute-Savoie (IGN). Les couches des bâtiments en France sont reprojctées dans le système suisse : EPSG:2056 - CH1903+ / LV95, fusionnées et clippées à la taille de la zone d'intérêt.

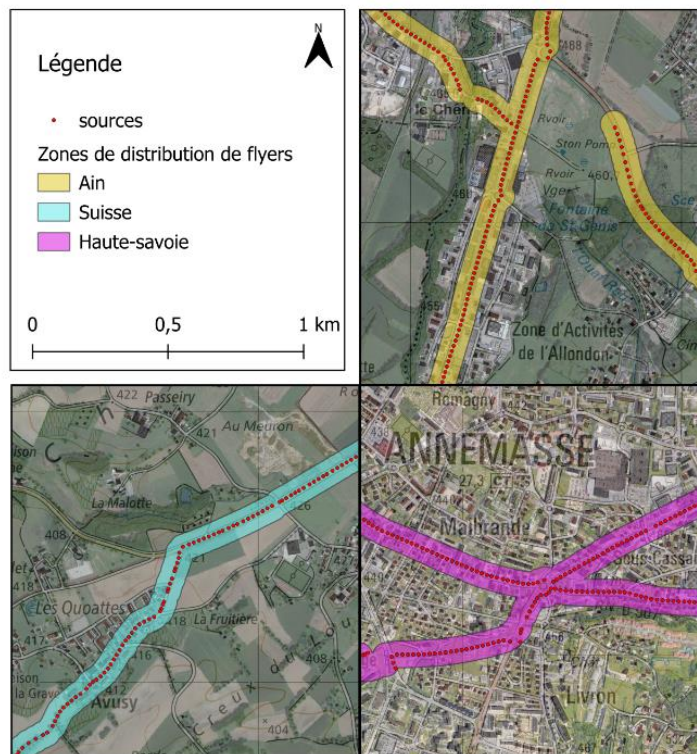


Figure 12: Buffer de 50m autour des points de tir pour prévoir une distribution ciblée de prospectus d'information à la population.

Dans la même idée, une carte des points de vibration se trouvant à moins de 10m et 15m d'un point de tir devait être produite pour prévoir une baisse de la puissance à utiliser par les camions-vibrateurs lors de leur passage sur ces points-là, de sorte à éviter tout dommage sur les bâtiments dû aux vibrations. La couche des bâtiments a pu être réutilisée et la même méthode que pour les dépliants a été appliquée (zone tampon et sélection par localisation). Les points sélectionnés ont ensuite été dissociés en deux catégories en fonction de leur distance au bâtiment le plus proche avant d'être assignés à une puissance de tir adaptée (fig.13). La sélection a été effectuée grâce à l'outil « sélectionner dans un rayon » (fig.9) avec d'abord un rayon de 15m puis un rayon de 10m (fig.13) et les objets sélectionnés ont successivement été attribués à leur valeur correspondante dans la table attributive.

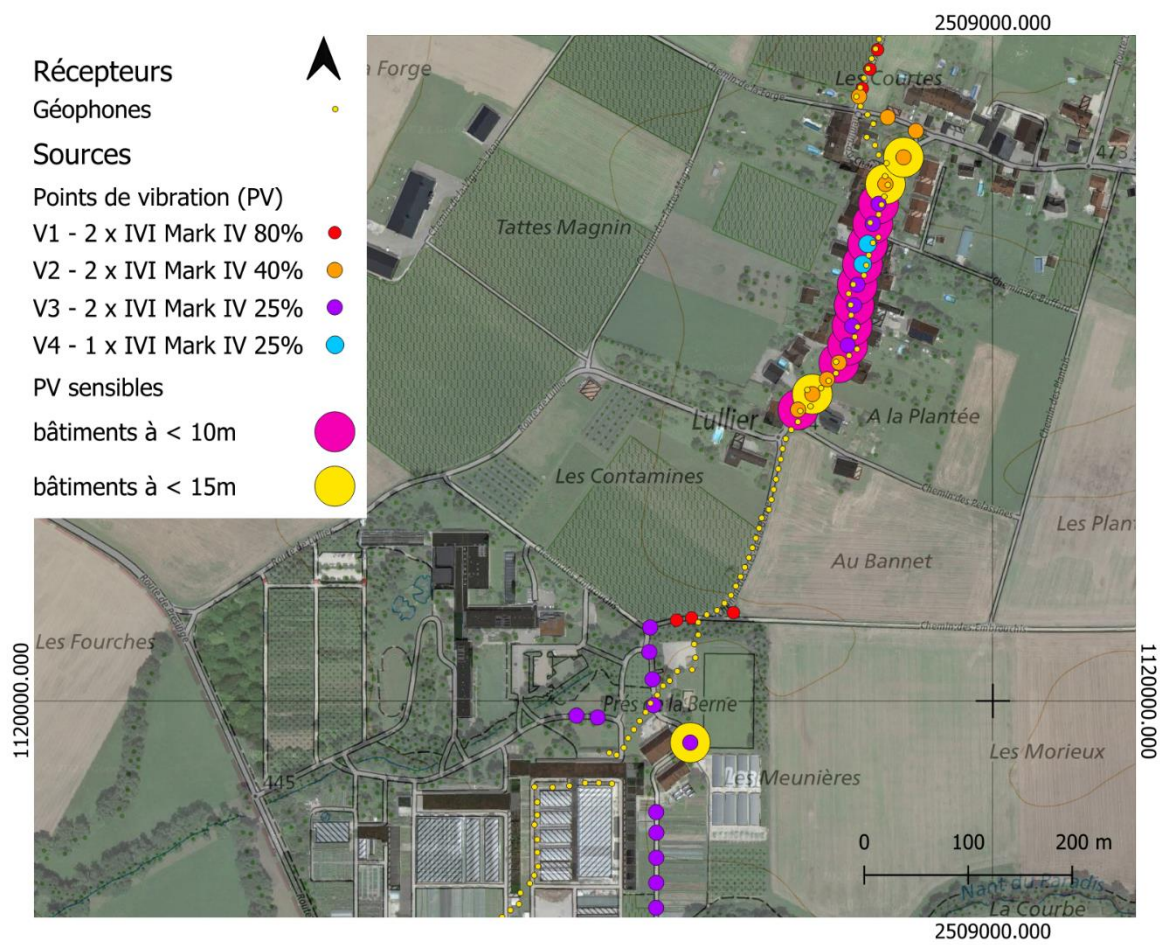


Figure 13: Exemple d'utilisation de QGIS pour prévoir la diminution de puissance de tir des camions-vibrateurs en fonction de leur proximité à un bâtiment.

Lors de la campagne d'acquisition, les camions ont parfois dû se déplacer sur une nouvelle ligne pendant la nuit ou effectuer un long trajet entre la fin de leur ligne et le parking prévu. Puisque les camions-vibrateurs font plus de 20 tonnes, 3.35m de haut et que leur vitesse

moyenne est de 20km/h, il était nécessaire d’anticiper les trajets pour diminuer au maximum les problèmes liés à des routes inadaptées à ce type de gabarit. À l’aide de planificateurs de routes pour camions en ligne ([Road Lords](https://dispatcher.roadlords.com/route-planner))<sup>5</sup> et des outils de digitalisation de QGIS (disponibles lorsque la couche est en mode « édition » ; fig. 10), il a été possible de digitaliser des « vibpaths » (trajets des vibrateurs) évitant les routes problématiques et amenant les camions à bon port avec le minimum de soucis (fig.14). Ces vibpaths pouvaient ensuite être exportés de QGIS en format KML, téléchargés sur Google Maps grâce à la fonctionnalité « MyMaps », puis être transmis par message WhatsApp aux chauffeurs des camions, pour qu’ils puissent facilement s’en servir sur Google Maps. La digitalisation des vibpaths consistait à créer une couche shapefile de type polylignes, représentant les routes à suivre par les camions. Ces lignes sont ajoutées manuellement, par segments, grâce à la fonction d’édition de couche et des outils qui y sont associés (ajouter une entité linéaire, outil de nœud, séparer les entités etc.) (fig.14).

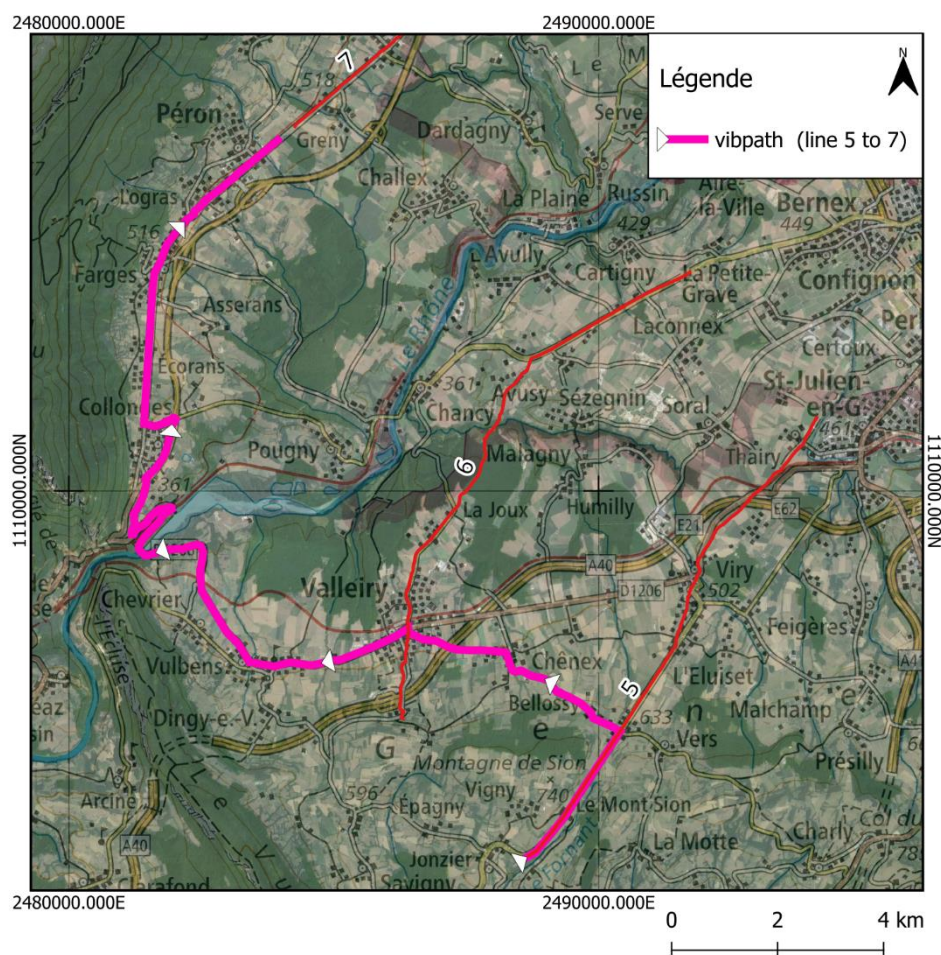


Figure 14: Exemple de vibpath préparé pour faciliter les transferts des camions-vibrateur entre deux points géographiquement éloignés. Le vibpath est constitué de sorte à éviter les autoroutes, les ponts à < 20 tonnes, les routes interdites aux camions etc.

<sup>5</sup> <https://dispatcher.roadlords.com/route-planner>

Finalement, les cartes du post-plot ont été transmises au client, avec les positions finales réelles des géophones et des points de tirs, avec leurs spécificités propres le cas échéant (fig.15). Pour la lisibilité des cartes finales, seule une ligne de géophones/tirs devait apparaître à la fois. Certaines lignes se croisant (fig.8), il était nécessaire d'afficher les lignes indépendamment les unes des autres. La manipulation de « sélection des entités par valeurs » (fig.9) puis « sauvegarder les entités sélectionnées » pour chaque ligne a pu être automatisée grâce à un code écrit dans RStudio pour produire un shapefile par ligne, pour les géophones (RCV) et les positions de tir (SRC). En tout, 24 shapefiles ont pu être créés en quelques secondes dans un dossier grâce au code écrit en langage R (fig.16).



Figure 15: Carte produite pour le rapport final transmis aux SIG à la fin de la mission. La mise en page se base sur le modèle fournit par Geo2X SA et la carte est produite en A3 pour conserver un très haut taux de détails en agrandissant l'image. Les autres cartes produites pour le rapport se trouvent en annexe.

```

library(sf)

# Chargement des données
SRC_final <- "//          /Chantier/22084-SIG-2D/22-GIS/229-TEMP/Export_fin_projet/SRC_final.shp"
RCV_final <- "//          /Chantier/22084-SIG-2D/22-GIS/229-TEMP/Export_fin_projet/RCV_final.shp"
src <- st_read(SRC_final)
rcv <- st_read(RCV_final)

# Valeurs de ligne à extraire
ligne <- c(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12)

# dossier de sortie
output_dir <- "//          /Chantier/22084-SIG-2D/22-GIS/229-TEMP/Export_fin_projet/"

# SOURCES
# Boucle pour extraire les lignes en fonction de leur numéro
for (l in ligne) {
  # Sélection avec la valeur de la colonne "line"
  src_selected <- src[src$src_line == l, ]

  # Fichier de sortie
  output_filename <- paste0("SRC_", l, ".geojson")

  # Chemin complet du fichier de sortie
  output_path <- file.path(output_dir, output_filename)

  # sélection écrite dans un nouveau fichier shapefile
  st_write(src_selected, output_path, driver = "GeoJson")
}

# RECEVEURS
for (l in ligne) {
  # Créer un sous-ensemble basé sur la valeur de la colonne "line"
  rcv_selected <- rcv[rcv$rcv_line == l, ]

  # Nom de fichier de sortie
  output_filename <- paste0("rcv_", l, ".geojson")

  # Chemin complet du fichier de sortie
  output_path <- file.path(output_dir, output_filename)

  # Ecrire le sous-ensemble dans un nouveau fichier shapefile
  st_write(rcv_selected, output_path, driver = "GeoJson")
}

```

Figure 16: code R pour séparer la couche contenant les 12 lignes 2D en 12 couches shapefile individuelles.

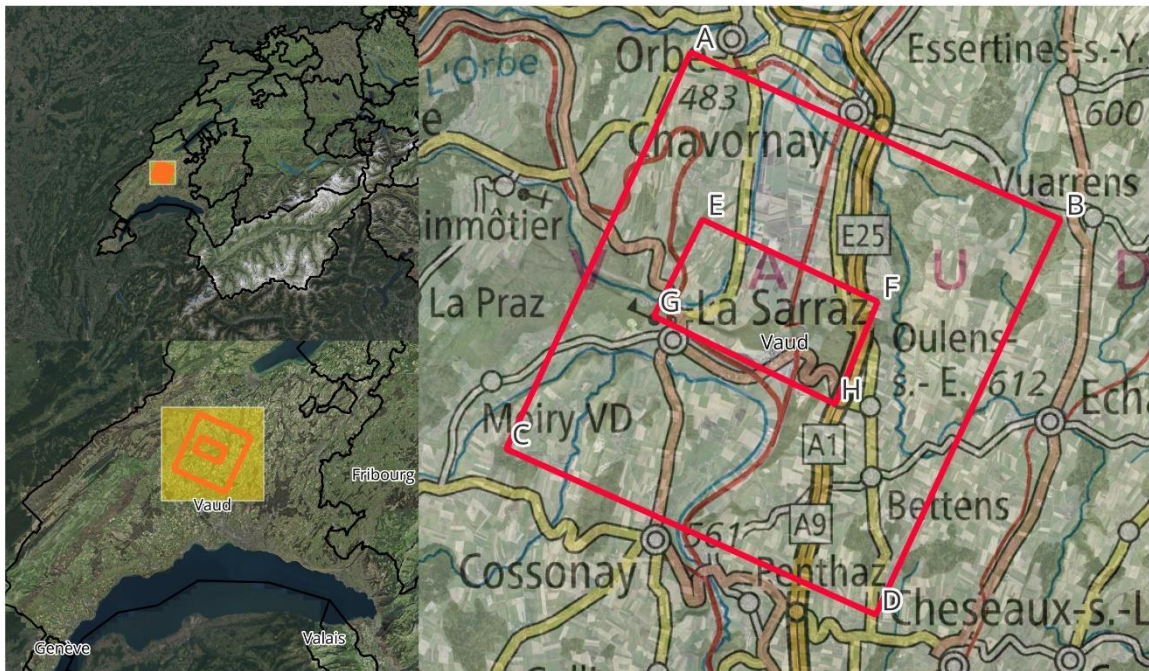
## 4.2. SGE-Eclépens (sismique réflexion 3D)

### 4.2.1. Contexte

La campagne de sismique réflexion 3D de Eclépens, dans le canton de Vaud, a été mandatée par l'entreprise Swiss Geo Energy (SGE) et s'est déroulée entre mai et novembre 2023. La campagne s'est déroulée en plusieurs phases :

- Permittage, communication et reconnaissance de terrain (mai -septembre 2023)
- Déploiement des géophones (août-septembre 2023)
- Mobilisation du personnel nécessaire et acquisition des données (septembre-octobre 2023)
- Collecte et démobilisation des équipes (octobre-novembre 2023)

Cette campagne avait pour but de produire une image 3D détaillée des couches géologiques en subsurface du Gros-de-Vaud, pour chercher des zones potentiellement favorables à l'implantation d'un projet de géothermie profonde. La zone d'étude couvrait une zone de 100km<sup>2</sup> en allant de Orbe à Chevilly et de Chevilly à Bousens (Surface ABCD, fig.17). Cette campagne de mesures géophysiques a demandé un travail de permittage très important, avec 2477 parcelles impactées dont 1241 étaient des parcelles publiques et 1236 étaient des parcelles privées pour lesquelles il était nécessaire d'obtenir une autorisation d'implantation de géophones. La surface EFGH de la figure 17 représente la zone d'intérêt finale tandis que la zone ABCD représente la zone totale sur laquelle les géophones ont été déployés, pour densifier le nombre d'informations dans le rectangle EFGH (fig.17). En effet, plus la zone couverte est importante, plus le nombre de « common mid-point » est élevé. Lorsque des ondes sont envoyées dans le sol, elles sont réfléchies en un point central entre la source de la vibration et le récepteur de celle-ci. La répétition du signal par un même point central commun permet d'assurer la bonne qualité des données. La densification des récepteurs dans la zone EFGH ainsi que l'élargissement de la zone aux limites ABCD permet d'obtenir de meilleures images du sous-sol dans la zone EFGH.



 Survey area

Figure 17: Aire de l'étude géophysique menée à Eclépens. Le rectangle ABCD est la zone d'offset et le rectangle EFGH représente la zone d'intérêt. La mise en page a été faite avec les outils intégrés de QGIS Layout, permettant de créer une mise en page dynamique multiple reprenant le périmètre de la zone agrandie (carré jaune) pour créer un plan de situation de la carte principale.

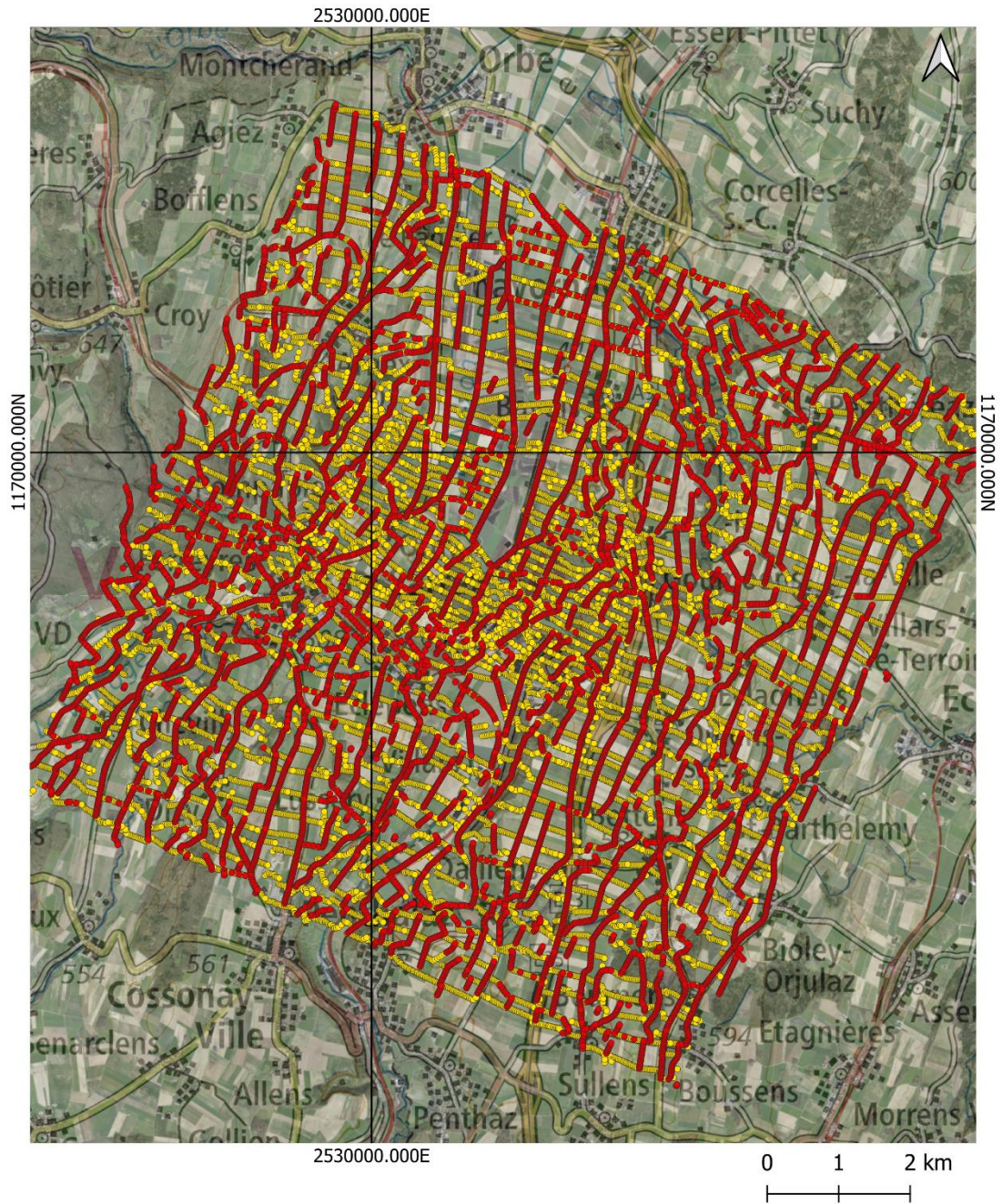
Cette campagne était la plus importante jamais menée par Geo2X SA et impliquait plus de 40 personnes travaillant simultanément, 4 camions-vibrateurs mobilisés par nuit, plus de 21'200 géophones au sol (receivers) et plus de 13'400 positions de tirs (sources) (fig.19). Les géophones utilisés pour cette campagne sont des Strydes Node™ à une composante, permettant de mesurer l'accélération verticale du sol. Leur petit format compact et léger (fig.18) a permis une implantation facilitée et plus rapide qu'avec d'autres géophones plus volumineux. Chaque membre des équipes de pose des géophones pouvait prendre environ 80 géophones dans le sac pour procéder à l'implantation partout, même dans les endroits inaccessibles en voiture (forêts, collines,



Figure 18: Géophone de Stryde, petit, compact et léger.



zones humides etc). Les données ont été acquises en 11 nuits par les quatre camions-vibrateurs.



**Preplot**

- Sources
- Receivers

Figure 19: Pré-plot produit par l'équipe SIG pour le projet de sismique réflexion 3D dans la région de Eclépens. Au programme, environ 21'200 points de tir (sources) et 13'400 géophones (receivers) ont été prévus pour couvrir correctement la zone d'étude.

#### 4.2.2. Méthodes

L'approche utilisée pour gérer un projet de cette envergure a été d'utiliser QGIS pour coordonner, recenser et mettre à jour les changements et besoins se présentant tout au long du projet. La version 3.32.1-Lima de QGIS a été utilisée. Un pré-plot a été préparé par un membre de l'équipe SIG pour couvrir la surface désirée par l'entreprise mandataire. Les sources et les récepteurs ont été positionnés théoriquement sur la zone d'acquisition, sur la base d'une grille orthogonale (procédure expliquée plus en détails dans la section Aubonne-Vinzel ; fig.36). Les points sont générés avec QGIS, puis déplacés manuellement pour accommoder les besoins de la campagne géophysique. Les attributs des points sont ensuite modifiés et complétés dans la table attributaire avec les informations nécessaires (unique id, positions xy, environnement d'implantation etc.). Le système de projection utilisé est celui correspondant à la Suisse, le EPSG :2056 - CH1903+/LV95.

Sur la base du pré-plot, les trajets des camions-vibrateurs (vibpaths) sont digitalisés une première fois, de sorte à couvrir tous les points à vibrer de la zone d'étude. Un repérage sur le terrain est ensuite effectué avec l'aide de l'application QField. Les modifications peuvent être envoyées sur les ordinateurs du bureau pendant la journée grâce à une fonction de « push », envoyant les informations ajoutées sur un fichier stocké dans le cloud relié à QField ([QFieldCloud](https://qfield.cloud/))<sup>6</sup>, synchronisé avec le projet QGIS de la personne s'occupant des modifications depuis le bureau. Les vibpaths sont ensuite repris jour par jour durant la campagne en fonction de l'évolution de l'acquisition.

Le pré-plot sert également de guide aux équipes s'occupant de l'implantation des géophones. Pour la campagne d'Eclépens, les équipes de pose étaient composées de trois personnes : une personne menait l'équipe grâce à une tablette fournie avec les géophones Stryde, sur laquelle le pré-plot avait été chargé, qui permettait de trouver le point d'implantation théorique du géophone, la deuxième personne portait une barre-à-mine et faisait le trou à l'endroit désigné avant de planter le géophone, et une troisième personne suivait avec un GPS différentiel et mesurait la position exacte du capteur une fois posé. Les données GPS collectées sont ensuite transférées dans le projet QGIS sous forme de tableau CSV, converties en couche de points, et servent de pré-plot officiel du projet. De nombreux traitements de données ont été faits : édition de couche, manipulations de tables attributaires, fusion, découpage, tampon, transformations affines de données vectorielles, digitalisations, utilisation des outils de sélections divers (dans un rayon, par attribut, par expression etc), de géoréférencement etc. De nombreuses cartes ont dû être produites et l'utilisation des outils de mise en page de QGIS a permis de créer des rendus de bonne qualité. Dans ces rendus, les éléments importants étaient : la carte, la flèche indiquant le nord, l'échelle et le système de

---

<sup>6</sup> <https://qfield.cloud/>

coordonnées utilisé, et la légende. Certaines cartes n'ont pas de coordonnées affichées, selon les demandes exprimées par les clients de Geo2X SA.

La fonction « Atlas » de la mise en page QGIS a également été utilisée de multiple fois pour automatiser la création des cartes dont mes collègues avaient besoin pour le bon déroulement de certaines tâches, notamment pour les demandes d'autorisation de passage sur des parcelles privées (permittage).

Lorsque les différentes cartes étaient prêtes à être utilisées sur le terrain, les couches nécessaires étaient exportées en format KML et téléchargées dans l'extension « MyMaps » de Google. La symbologie devait être refaite avec les fonctionnalités de « MyMaps » et les cartes pouvaient ensuite être partagées sous forme de lien, envoyé aux équipes concernées par le biais de messages WhatsApp. Google Maps a été choisies comme support de transmission, car la fonctionnalité « MyMaps » de Google permet à toute personne munie d'un smartphone et du lien envoyé d'accéder aux informations de la carte. C'était une méthode rapide et efficace de faire circuler les informations nécessaires pendant le travail de terrain.

#### 4.2.3. Résultats

L'utilisation de QGIS a été cruciale pour ce projet, permettant de connaître en temps quasi réel le nombre de parcelles avec autorisation, de géophones au sol ou manquant, de positions tirées ou d'obstacles à éviter. Un gros travail d'anticipation des difficultés sur le terrain a dû être entrepris pour minimiser les problèmes lors de l'acquisition des données par les camions-vibrateurs. La zone d'étude a été divisée en quatre quadrants, eux-mêmes divisés en huit zones ; chaque zone représentait une nuit d'acquisition pour les camions-vibrateurs (fig.20). L'acquisition avait initialement été prévue sur 8 nuits mais, dû à quelques problèmes techniques sur les camions, l'acquisition s'est finalement déroulée sur 11 nuits. Les zones sont réparties ainsi pour respecter une distance minimale de 2.5km entre chaque camion, de sorte à minimiser le bruit sur les lignes en acquisition.

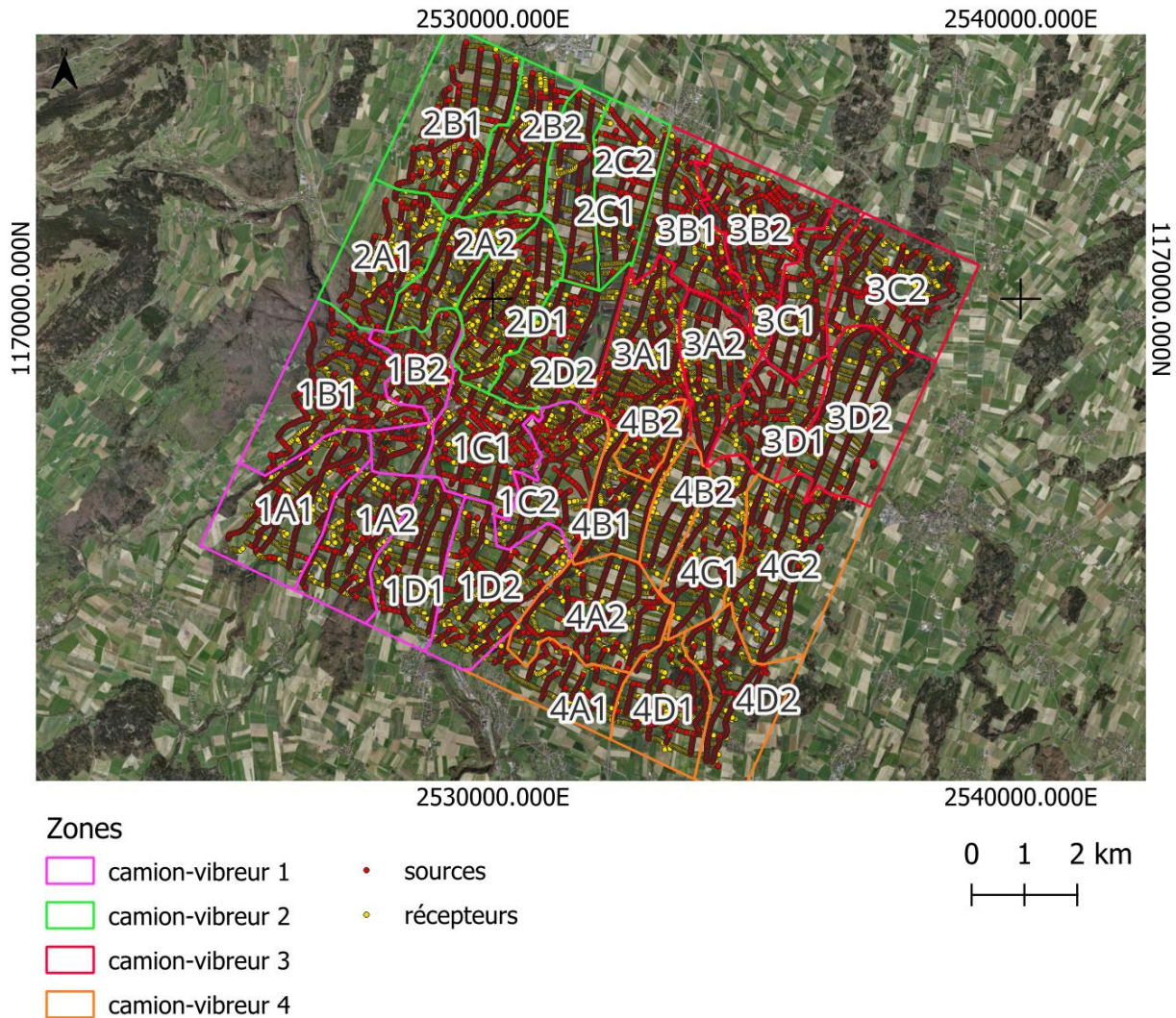


Figure 20: Subdivision en 4 zones principales (une par camion), chacune subdivisées en huit zones, représentant les huit nuits d'acquisition prévues. Ex : les zones A1 représentent la première nuit d'acquisition.

Les quatre zones principales sont représentées par couleur, indiquant la zone de travail de chaque camion vibreur. La zone 1A1 doit être comprise comme suit : 1 = camion n° 1, A1 = première nuit. Ensuite, l'acquisition suivait l'ordre suivant A1 – A2 – B1 – B2 – C1 – C2 – D1 – D2. Les trois nuits supplémentaires ont été ajoutée car les camions n'arrivaient pas toujours à terminer les points prédéfinis pour la nuit et il a été nécessaire de revenir vibrer les points oubliés ou qui n'avaient pas pu être faits

À partir du pré-plot, les trajets des camions-vibreurs dans chacune des 32 zones ont été prédéfinis (fig.21). L'utilisation de QField a permis de vérifier toutes les routes, passages, ponts et forêts empruntés par les camions-vibreurs, tout en notifiant les problèmes et remarques en direct à la personne s'occupant du pré-plot au bureau (fig.22). Ce repérage de terrain a permis d'éviter le nombre d'incidents et de ralentissement lors de l'acquisition en

anticipant par exemple, le nettoyage des arbres tombés sur le passage ou les routes inadéquates pour les camions-vibrateurs.

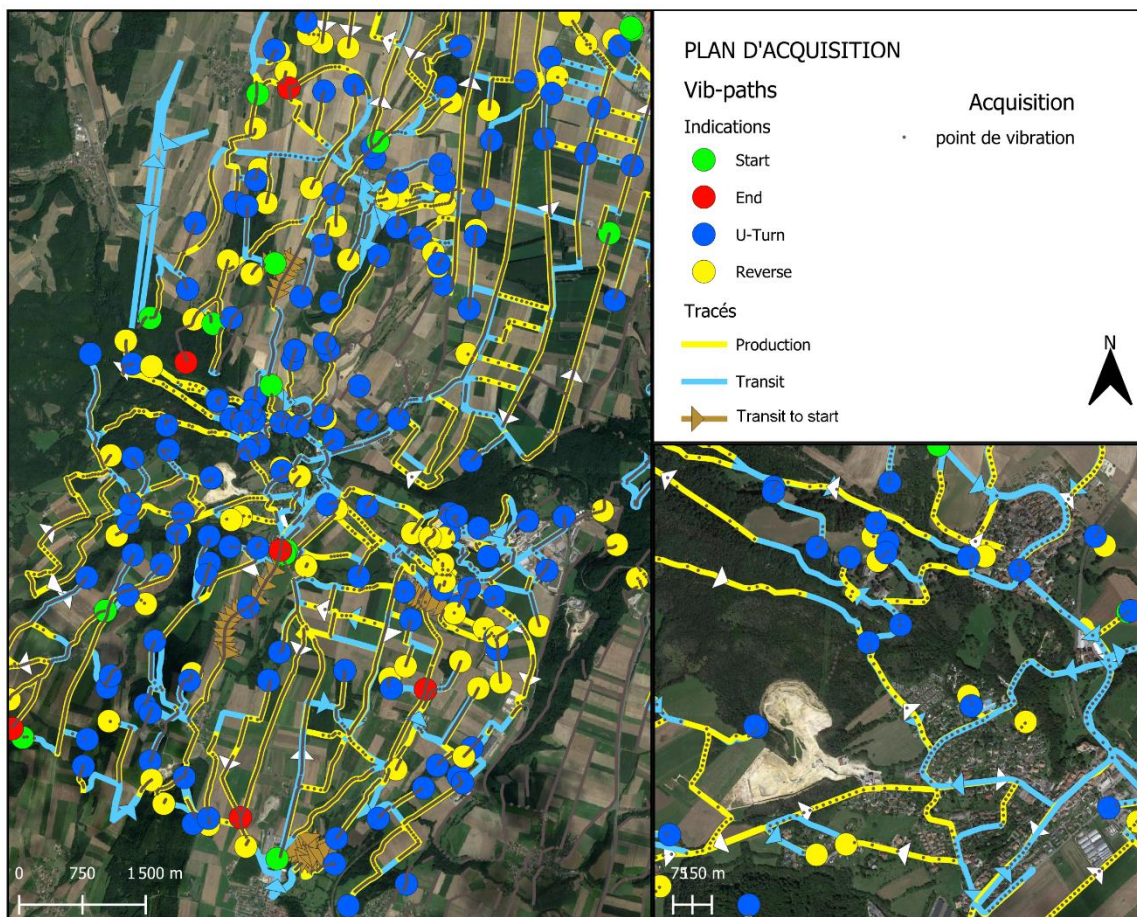


Figure 21: Vibpaths digitalisés une première fois pour couvrir tous les points de tir sur le terrain. Les vibpaths sont préparés avec des tronçons dits de « production », pour indiquer qu'il y a des points de tir et des tronçons « transit » là où il n'y a pas de points de tirs et que le camions doit se déplacer entre deux points d'acquisition. Des indications de manœuvre sont également incluses pour indiquer aux camions s'ils ont l'espace d'opérer un demi-tour ou non. Ces indications sont importantes car les camions travaillent de nuit et certains terrains sont accidentés ou trop étroits pour opérer un demi-tour.



Figure 22: Exemple du résultat obtenu après plusieurs journées de repérage avec la trace GPS et les modifications et commentaires apportés grâce à QField, visualisé dans QGIS.

La pose des géophones a demandé trois semaines de travail avec une vingtaine de personnes par jour. Les employés de Geo2X SA suivaient le pré-plot disponible sur des tablettes, qui leur indiquait les positions exactes d’implantation des géophones. Puisqu’il fallait régulièrement passer/implanter dans des propriétés privées, l’équipe de permittage devait anticiper la pose des géophones du lendemain et du surlendemain et prévenir les propriétaires des terrains agricoles et des parcelles ayant accordé une autorisation sous condition (pose à certaines dates précises, demande d’être informé à chaque passage des équipes de Geo2X SA, propriétaire voulait être présent pendant la pose des géophones, etc). Il était donc nécessaire d’appeler, chaque jour, les propriétaires concernés pour s’assurer qu’aucun travail de la terre ne soit en cours ou prévu durant l’acquisition géophysique. Pour savoir qui appeler, un recoupement entre les géophones à implanter et les parcelles devait être fait pour obtenir les numéros de parcelles concernées. Plusieurs couches, contenant des informations différentes, devaient être, chaque jour, intersectées de sorte à obtenir les parcelles recensées avec le nom de la commune + ID de la parcelle. Pour éviter des manipulations quotidiennes répétitives,

J'ai écrit un code sur R permettant d'intersecter la couche du permittage et celle des points à implanter pour récupérer les IDs des parcelles et sortir automatiquement un fichier excel avec les informations nécessaires au permittage (fig.23).

```
# Installer et charger les packages nécessaires
if (!requireNamespace("sf", quietly = TRUE)) {
  install.packages("sf")
}
if (!requireNamespace("writexl", quietly = TRUE)) {
  install.packages("writexl")
}

library(sf)
library(writexl)

setwd("// /Chantier/23002-SGE-Eclepens-3D/22-GIS/229-5- SCRIPTS/CallPermit")

# Définir le chemin vers le fichier SHP de la couche polygone "permitted"
permitted <- "// /Chantier/23002-SGE-Eclepens-3D/22-GIS/229-5- SCRIPTS/CallPermit/permittedtest.shp"

# Définir le chemin vers le fichier SHP de la couche points "20230910_Teams_Daily_Schedule_rev"
rcv_zone <- "// /Chantier/23002-SGE-Eclepens-3D/22-GIS/229-5- SCRIPTS/CallPermit/20230910_Teams_Daily_Schedule_rev01test.shp"

# Lire les fichiers SHP en tant que couches sf
permitted_sf <- st_read(permitted)
rcv_zone_sf <- st_read(rcv_zone)

# Sélectionner les polygones touchés par les points (par localisation)
selected_polygons <- st_intersection(rcv_zone_sf, permitted_sf)

# Ajouter une colonne s'appelant "municipality_id" qui concatène les champs municipali et parcels_id
selected_polygons$municipality_id <- paste(selected_polygons$municipali, selected_polygons$parcel_id, sep = "_")

# Récupérer les données de municipality_id, seulement une fois
results_filt <- unique(selected_polygons$municipality_id)

# Extraire la table attributaire des polygones sélectionnés
results_df <- as.data.frame(results_filt)

# Spécifier le chemin vers le fichier Excel de sortie
excel_file_path <- "// /Chantier/23002-SGE-Eclepens-3D/51-MANAGEMENT/518-PERMITTING/5170-Coordination Permit GM-GC-SG/parcels_tocall_11sept.xlsx"

# Écrire les résultats dans un fichier Excel avec les en-têtes de la table attributaire
writexl::write_xlsx(results_df, path = excel_file_path)

cat(sprintf("Résultats exportés dans %s/n", excel_file_path))
```

Figure 23: Code écrit en langage R pour intersecter les couches nécessaires et obtenir un fichier excel avec les noms et IDs des parcelles dont les propriétaires devaient être appelés.

L'écriture du code a permis de supprimer la composante répétitive de la tâche en réduisant considérablement le nombre de manipulations à faire chaque jour. De plus, les permitteurs avaient besoin d'avoir une carte de chaque parcelle, avec les positions prévues des géophones pour pouvoir discuter avec les propriétaires de l'emplacement de ceux-ci sur leurs parcelles. Ces cartes ont également été transmises par e-mail aux propriétaires qui le désiraient. Pour leur obtenir cela, il a été nécessaire d'utiliser la fonction d'Atlas dans QGIS pour préparer la mise en page puis lancer l'extraction automatique des cartes de chaque parcelle (fig.24). L'Atlas permet d'automatiser la création de carte selon une colonne de la table d'attribut de la couche choisie. Pour les parcelles, un identifiant unique permettait de les différencier et c'est sur ce critère que l'atlas a été généré (fig.24). L'Atlas est une fonction très utile lorsque la création de carte peut se faire sur des critères présents dans la table d'attribut et permet de gagner beaucoup de temps. La création de 544 cartes en moins d'une heure n'aurait jamais été possible sans cette fonction.

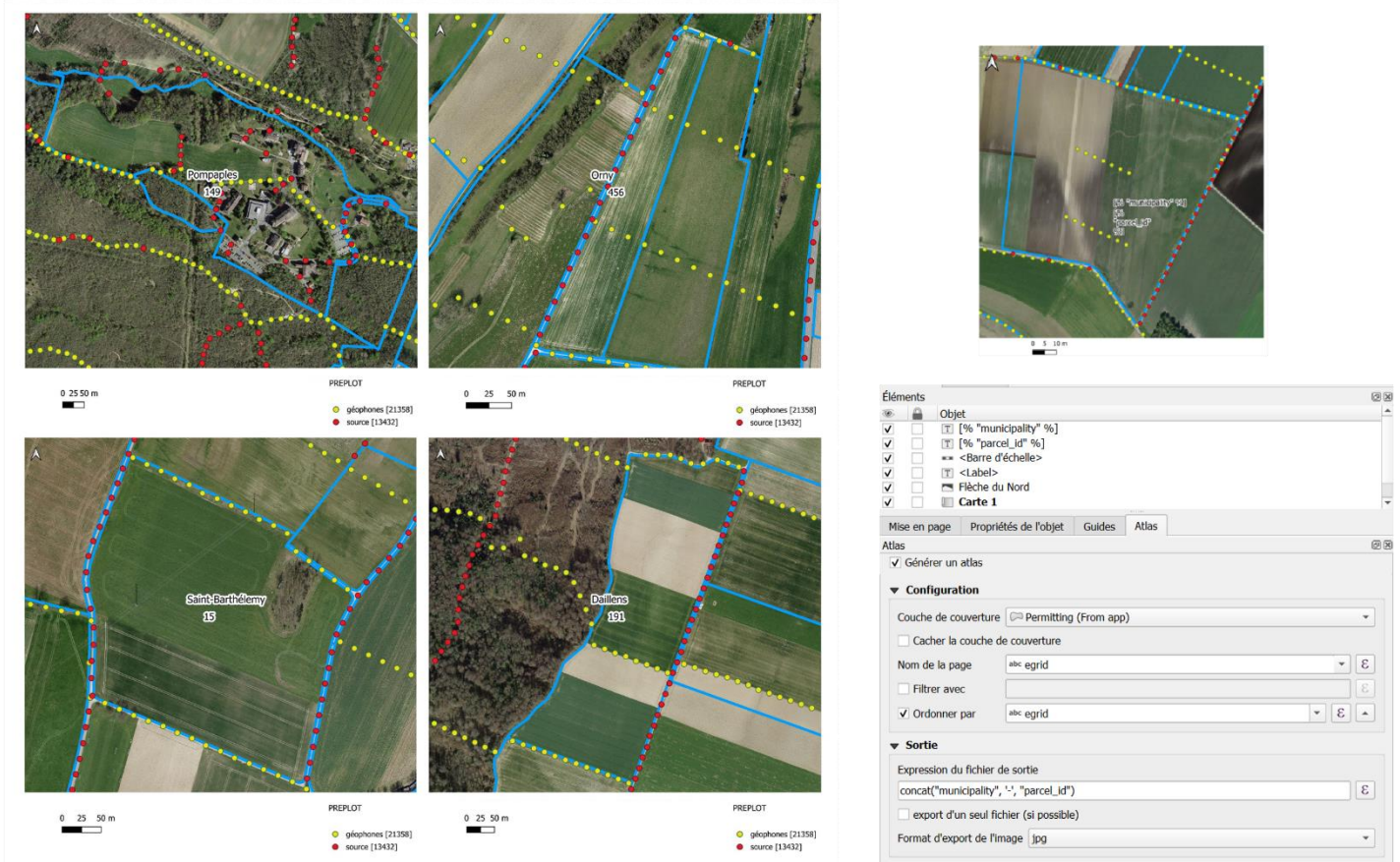


Figure 24: Parcelles exportées en format .jpg grâce à la fonctionnalité « Atlas » dans QGIS. Atlas permet un affichage dynamique des légendes grâce aux commandes SQL. Les images des parcelles montrent leurs limites (ligne bleue), les géophones (points jaunes) et les tirs (points rouges) traversant celles-ci. Le reste des images des parcelles, créées avec la fonctionnalité de l'Atlas, se trouvent en annexe.

En début de projet, les géophones ont été classifiés en 9 catégories en fonction de leur zone d'implantation (« forêt et bosquets », « ville et villages », « routes et pistes », « industries », etc), de sorte à pouvoir définir les zones prioritaires ou sensibles pour l'implantation (fig.25). Les zones prioritaires pour l'implantation des capteurs étaient les zones de forêt, avec peu de passage et donc peu de risque que les géophones soient volés ou déplacés. Inversement, les zones sensibles étaient les villes et villages, où la probabilité que les géophones disparaissent était plus élevée.



### Preplot

#### Géophones [21509]

- Forêts et bosquets [3292]
- Agricole - Champs [1484]
- Agricole - Limites de champs [3843]
- Agricole - Bande de compensations [325]
- Agricole - Lisières [2103]
- Routes et pistes [8591]
- Industries [500]
- Villages & villes [1327]
- Divers [44]

#### Zones de tir

- 1
- 2
- 3
- 4

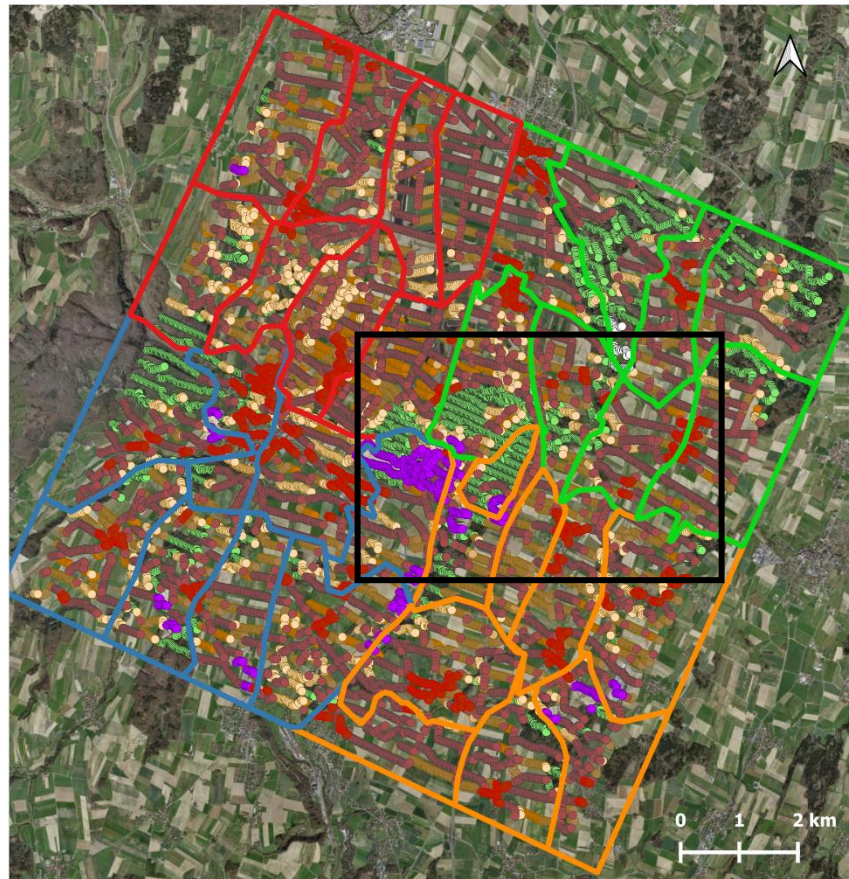


Figure 25: Géophones classifiés selon leur type de milieu d'implantation ; 9 catégories ont été choisies : Forêts et bosquets (vert), Agricole -Champs (orange), Agricole - Limites de champs (brun clair), Agricole – Bande de compensation (beige), Agricole – Lisière (blanc cassé), Routes et pistes (brun foncé), Industries (violet), Villages et villes (rouge), Divers (blanc).

Sur la base de ces classes, les géophones dans les « villes et villages » et proches des « routes et pistes » ont été désignés pour une rotation, de sorte à récupérer chaque jour 200 géophones ayant acquis des données pendant la nuit précédente. Cette rotation a été mise en place pour deux raisons ; récupérer régulièrement des données pour que les clients puissent voir quelques données pendant l'acquisition et sauver les données des zones sensibles, notamment les zones de fort passage comme dans les villages, où les vols et casse de matériel sont plus communs. Pour choisir les géophones à échanger chaque jour, une présélection de 50 géophones par sous-zone (seulement des classes « villes et villages » et « routes et pistes ») avait été effectuée pour les 32 sous-zones à acquérir, présentées en figure 20. Cette première sélection a été faite manuellement sur la base de deux critères : les géophones devaient être récupérés dans les villages et devaient, par zone, se trouver très proche géographiquement pour que les équipes ne perdent pas de temps de déplacement inutilement. Après de multiples ajustements et changements, il a fallu vérifier que 50 géophones par zone avaient bien été sélectionnés et que le compte était bon. Un code R a été écrit pour connaître le nombre de géophones sélectionnés par zone rapidement (fig.26).

```

library(sf)

#CODE POUR COMPTER LE NOMBRE DE GEOPHONES PAR JOUR
# Charger les données
zones_vib_shp <- "/// /Chantier/23002-SGE-Eclepens-3D/22-GIS/229-5- SCRIPTS/CountNodes/zones_vib.geojson"
nodes_shp <- "/// /Chantier/23002-SGE-Eclepens-3D/22-GIS/229-5- SCRIPTS/CountNodes/rmv_first_latest.geojson"
vib <- st_read(zones_vib_shp)
zones_vib<-vib[,grepl("Zone",names(vib))]
nodes <- st_read(nodes_shp)

# Boucle pour chaque point de la couche "zones_vib"
for (i in 1:nrow(zones_vib)) {

  #extraire la zone courante
  i_zone<-zones_vib[i,]

  # Intersection entre le tampon et la couche "nodes"
  nodes_pts <- st_intersection(i_zone, nodes)

  # Compte le nombre de points de la couche "nodes" dans les intersections
  nbr_nodes <- nrow(nodes_pts)

  # Ajouter le nombre de points de la couche "nodes" à la table attributaire de la couche "shoot"
  zones_vib[i, "nbr_nodes"] <- nbr_nodes
}

st_write(zones_vib, "/// /Chantier/23002-SGE-Eclepens-3D/22-GIS/229-5- SCRIPTS/CountNodes/nbr_nodes_zone_v4.shp",driver = "ESRI Shapefile",)

#Nombre de rcv par nuit et par zone:
#Nouvelle colonne appelée night sans le premier nombre 3B1 -> B1
zones_vib$night<-gsub("3B1", "", zones_vib$zone)

#agrégation de la colonne night et somme des valeurs de la colonne nbr_nodes pour connaître le nombre de nodes par nuit
agg_night<-aggregate(nbr_nodes~night,data=zones_vib,FUN=sum)

#ajout de deux colonnes à la nouvelle df et implément des valeurs calculées précédemment
colnames(agg_night)<-c("night", "sum_nodes")

print(agg_night)

sum(agg_night$sum_nodes)

#AJOUT DES ZONES CORRESPONDANTS AUX NODES
library(sf)

# Charger les données
zones_vib_shp <- "/// /Chantier/23002-SGE-Eclepens-3D/22-GIS/229-5- SCRIPTS/CountNodes/zones_vib.geojson"
nodes_shp <- "/// /Chantier/23002-SGE-Eclepens-3D/22-GIS/229-5- SCRIPTS/CountNodes/rmv_first_latest.geojson"
vib <- st_read(zones_vib_shp)
zones_vib<-vib[,grepl("Zone",names(vib))]
nodes <- st_read(nodes_shp)

# st_join pour associer les polygones aux points
nodes_zoned <- st_join(nodes, zones_vib)

st_write(nodes_zoned, "/// /Chantier/23002-SGE-Eclepens-3D/22-GIS/229-5- SCRIPTS/CountNodes/nodes_par_zone.geojson",driver = "GeoJSON",)

```

Figure 26: Code R utilisé pour calculer le nombre de géophones sélectionnés par zone.

J'ai ensuite développé un second code R pour sélectionner automatiquement les 200 géophones à relever du jour et créer un shapefile correspondant, selon la zone couverte par les camions-vibrateurs la nuit précédente (fig.27). Ce shapefile était ensuite combiné avec les géophones à implanter pendant la journée pour que les équipes sur le terrain aient toutes les informations nécessaires au bon déroulement de la rotation et de la pose des géophones.

```

library(sf)
library(dplyr)

# charger les données
rotation_path <- "// /Chantier/23002-SGE-Eclépens-3D/22-GIS/228-EXPORTS/Geophones50_by_zones/Geophones_rmv_bynight/Night_3.gpkg"
rotation <- st_read(rotation_path)

#extraction
rotation_grep<-rotation[grep('N3',rotation$N3),]
rotation_col <- rotation_grep %>%
  mutate(
    Fleet = sub("(\\d+)([A-Z]+)(\\d+)", "\\1", Zone),
    Sector = sub("(\\d+)([A-Z]+)(\\d+)", "\\2", Zone),
    Night = sub("(\\d+)([A-Z]+)(\\d+)", "\\3", Zone)
  )
rotation_A1_final<-rotation_col[,c("uid","Fleet","Sector","Night","N3","Zone")]

output_path="// /Chantier/23002-SGE-Eclépens-3D/11-DATAS/01 - Acquisition docs/GestionGeophones/Data/rotation_night3.shp"
st_write(rotation_A1_final,output_path,driver="ESRI Shapefile",append = FALSE)

```

Figure 27: Second code pour sélectionner 200 géophones par jour à échanger sur le terrain

Pour anticiper au maximum des éventuelles plaintes de la part des habitants des villages pour dégâts sur leurs habitations, des équipes de contrôle PPV (peak particle velocity) ont été mises en place chaque nuit pour mesurer la vitesse maximale de déplacement du sol lors du passage des camions-vibrateurs. Toutes les habitations à 50m ou moins d'un point de tir ont dû être recensées pour pouvoir être surveillées durant les tirs proches (utilisation de l'appareil de mesure des PPV). La couche des bâtiments V25 des zones concernées par l'acquisition a été récupérée sur le site de Swisstopo, puis découpée grâce à l'outil de découpage à la taille de la zone d'intérêt. Avec la couche bâtiment et une couche recensant le passage des camions, il a été possible de calculer une zone tampon de 50m autour des vibpaths et de démarquer ensuite les maisons se trouvant dans celle-ci (fig.28).

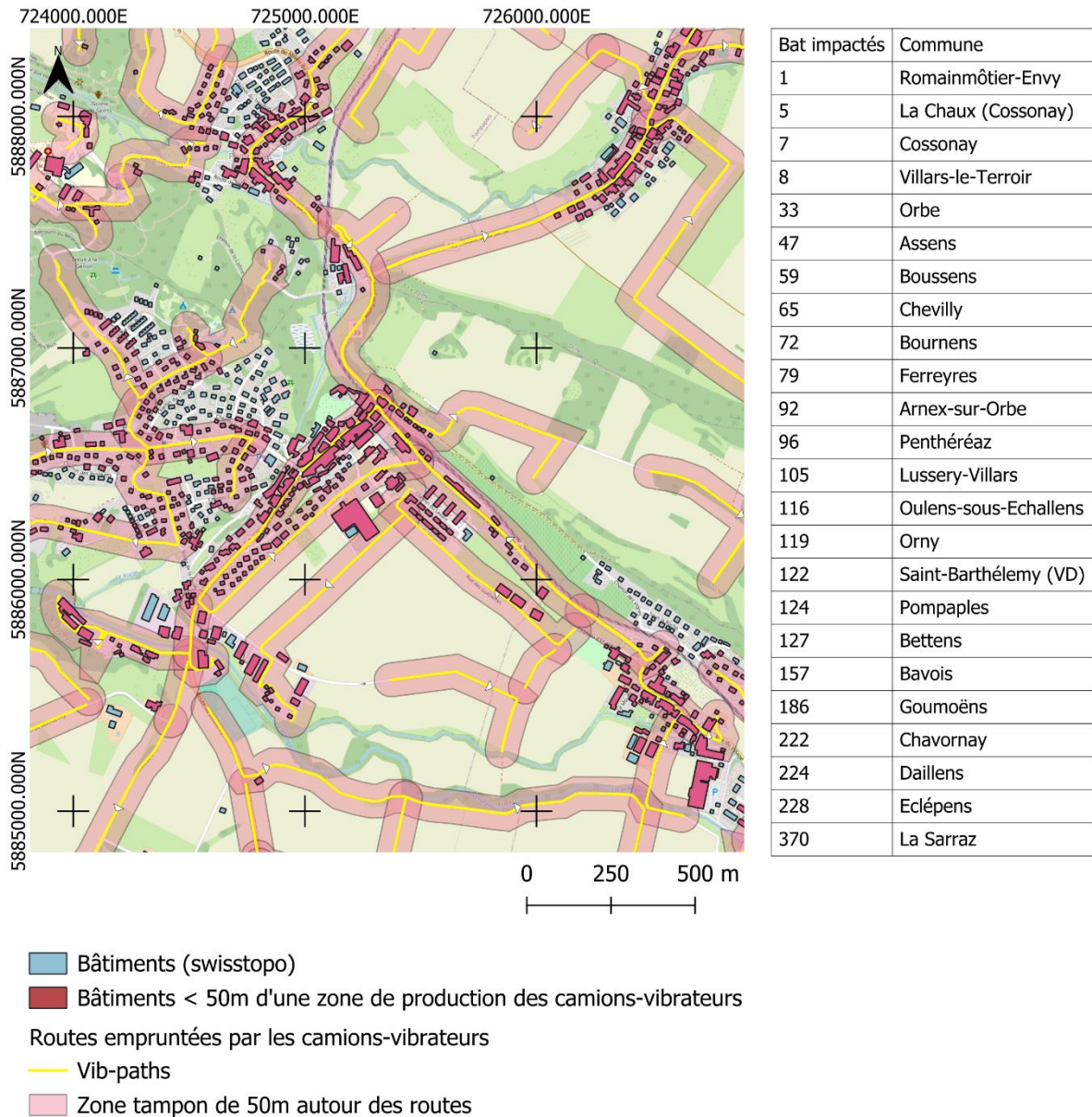


Figure 28: Représentation visuelle du résultat de la mise en tampon des maisons se trouvant dans un rayon de 50m d'un point de vibration.

Finalement, une grosse partie de mes tâches pendant la période d'acquisition d'Eclépens s'est focalisée sur la création des vibpaths pour la nuit suivante (fig.29). En effet, les vibpaths devaient être refaits tous les jours en fonction de l'avancement de chaque camion et de consignes spécifiques à respecter. Cette tâche cruciale permettait de prédéfinir les routes que les camions-vibrateurs empruntaient chaque nuit en anticipant les obstacles, les zones dans lesquelles il fallait passer en premier (zones habitées), les détours à faire, les routes interdites et les besoins en termes de contrôle du trafic routier et des mesures PPV.

Chaque jour, les vibpaths couvraient environ 450 points de vibration. La création de ces vibpaths consistait en une digitalisation de réseau de lignes indiquant les zones de production et les zones de transit pour les camions-vibrateurs. Les quatre camions-vibreurs travaillant en même temps, une distance de 2,5km entre les vibrateurs devait en tout temps être respectée pour une meilleure résolution des données. Il fallait également ajouter, sur la base de la reconnaissance de terrain faite au préalable, les zones de demi-tour ou de marche arrière, de sorte à minimiser le temps de manœuvres durant l'acquisition (fig.30). Deux exemples de vibpaths sont présentés dans ce rapport ; la figure 21 illustre l'aspect général du pré-plot lorsque tous les vibpaths ont été préparés pour le scouting en début de projet, tandis que la figure 29 montre les 4 vibpaths préparés pour une nuit, chaque vibpath étant le programme d'un des quatre camions-vibrateur.

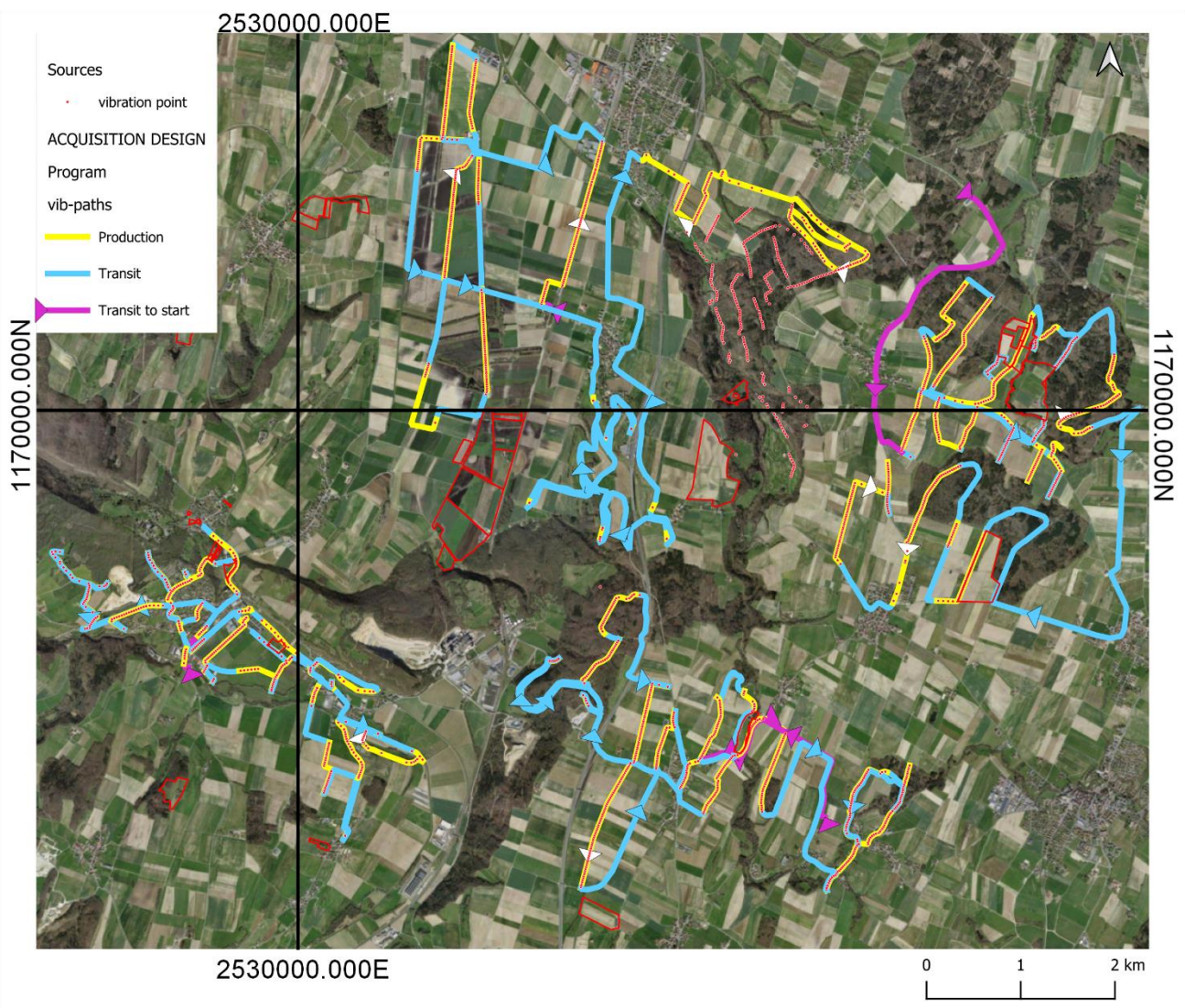


Figure 29: Exemple des 4 vibpaths prévu pour une nuit d'acquisition avec prise en compte (dans la séquence) de la distance minimale de 2.5km entre chaque camion-vibrateur pendant les tirs.

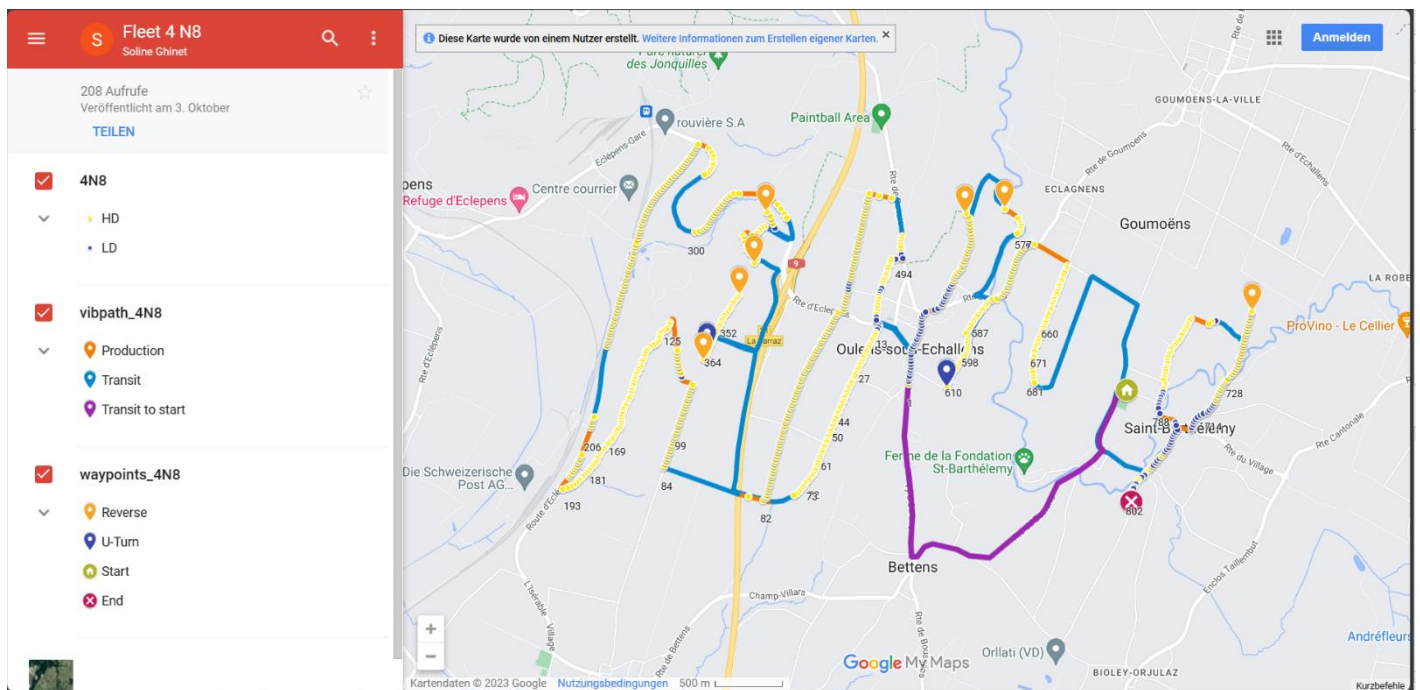
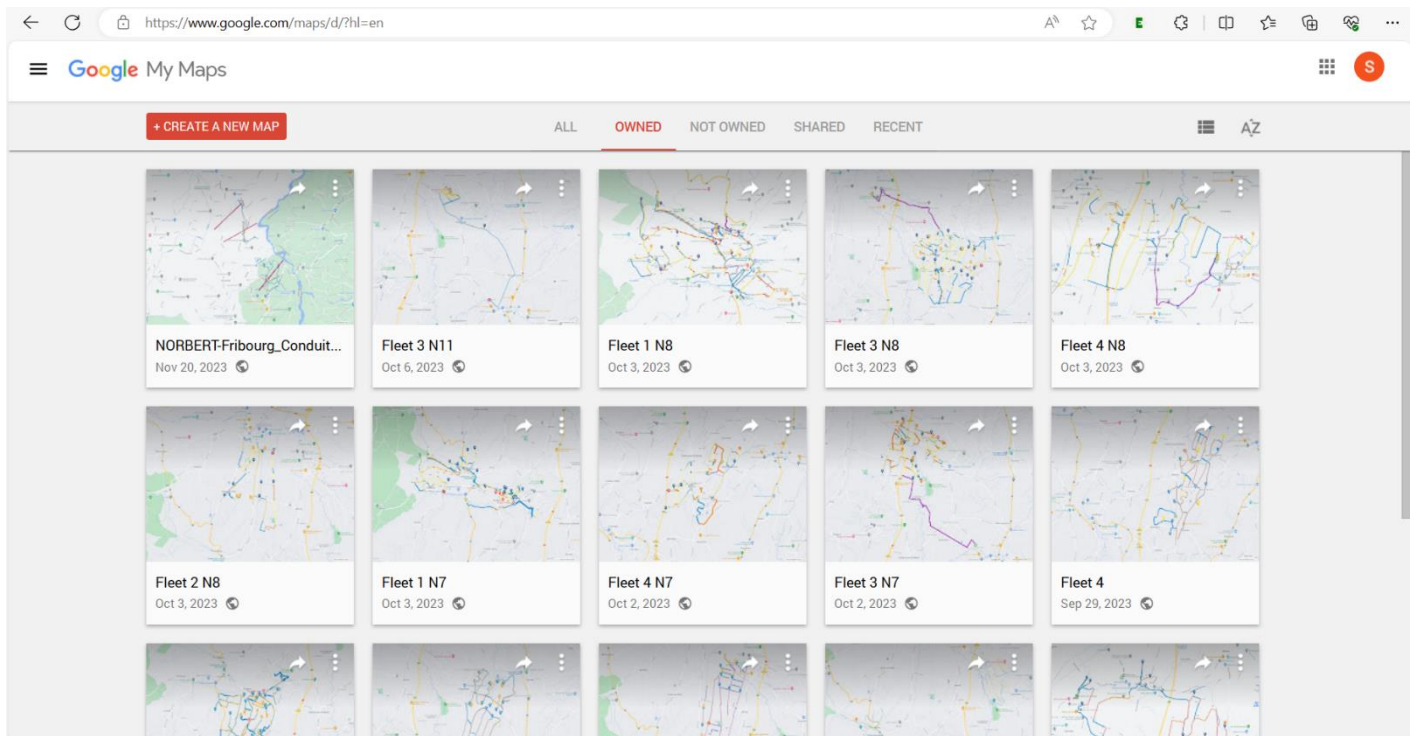


Figure 30: Vibpath transféré sur « MyMaps » dans Google. Toute la symbologie doit être refaite car elle ne s'enregistre pas dans les fichiers KML.

Une fois prêts, les vibpaths sont extraits en fichier KML et envoyés sous forme de lien par WhatsApp aux équipes grâce à la fonction « MyMaps » dans Google (fig.22).

Ces vibpaths étaient ensuite utilisés pour définir la séquence (l'ordre) d'acquisition des tirs de la nuit suivante grâce à des codes écrits avec Python par l'équipe SIG. Cette séquence permettait ensuite d'évaluer les besoins en termes de PPV (mesure des vibrations sur les maisons) et de sécurisation du trafic autour des camions (régulièrement arrêtés sur la route et bloquant la circulation) ainsi que les routes parcourues, pour chaque nuit et chaque zone (fig.31).

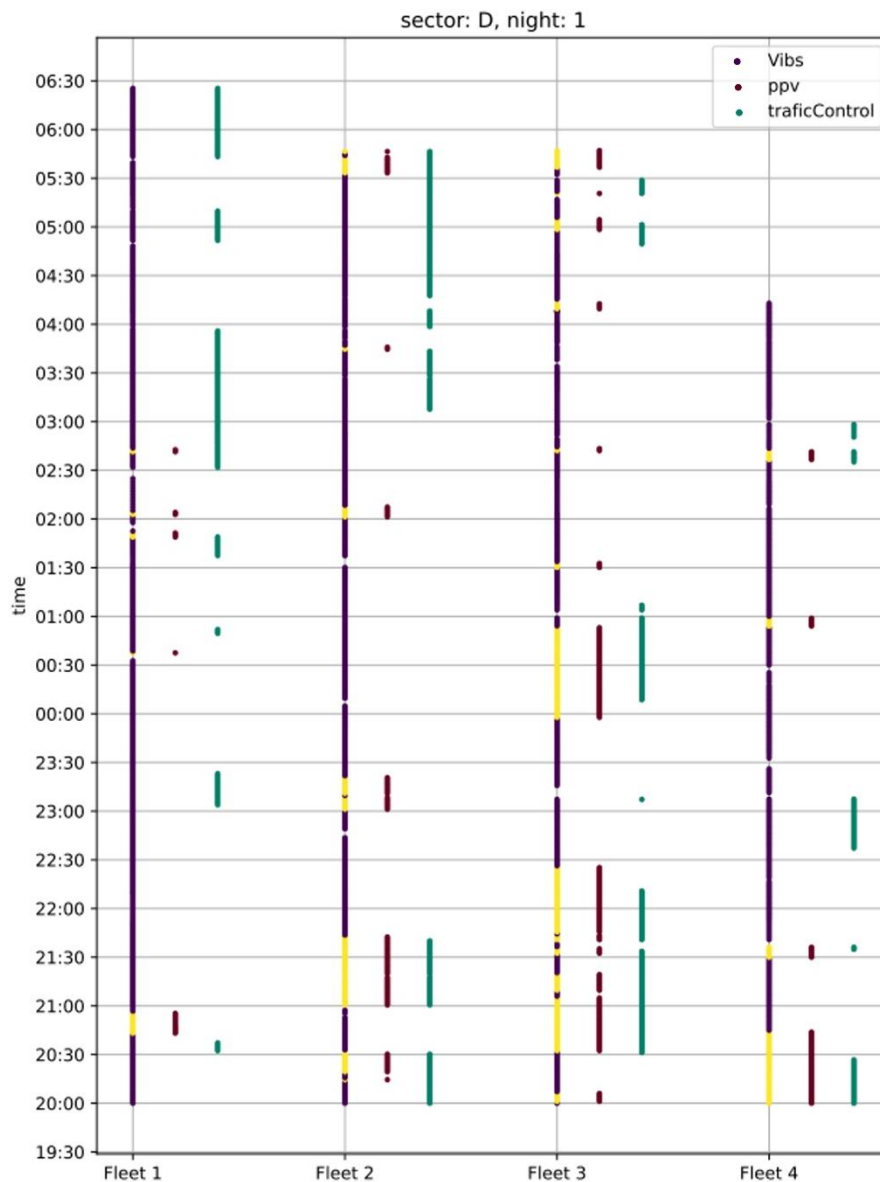


Figure 31: Exemple pour la zone D, 1<sup>ère</sup> nuit des statistiques de prévision du temps d'acquisition par camion (fleet), des besoins en termes de mesures PPV et des besoins en sécurisation du trafic autour des camions.

En fin de projet, j'ai été chargée de produire les cartes du post-plot pour l'entreprise mandataire, Swiss Geo Energy (fig.32). J'ai fait la mise en page en fonction des demandes du

client et de Geo2X SA, sur la base d'un modèle type que la société utilise. Ce modèle a été créé par un précédent géomaticien.



Figure 32: Exemple de carte de fin de projet préparée pour l'entreprise mandataire. Le reste des cartes produites pour le rapport se trouvent en annexe.



### 4.3. Autres petits projets d'acquisition géophysique

De plus petits projets ont également été menés durant mon stage. Ces projets nécessitent souvent un pré-plot avec lequel les équipes vont sur le terrain. Les pré-plots servent de repères GPS à suivre tout au long de l'acquisition puisqu'ils sont chargés soit dans le GPS différentiel, utilisé pour faire la topographie sur chaque projet, soit grâce à la fonctionnalité « MyMaps » de Google, permettant de visualiser le pré-plot depuis son téléphone, sur Google Maps. La précision de Google Maps offre une estimation satisfaisante de la position de l'utilisateur sur le terrain, qui peut ensuite suivre une ligne théorique du pré-plot ou retrouver des géophones implantés, assez facilement.

#### 4.3.1. Mont Soleil

En octobre 2023, un chantier de deux jours de mesures électromagnétiques (EM) a eu lieu au Mont Soleil à Fribourg, en amont de l'implantation d'un parc de panneaux solaires. L'EM devait être faite sur des lignes espacées de 10 mètres dans des polygones prédéfinis par l'entreprise mandataire, MFR Géologie-Géotechnique SA. L'entreprise mandataire a transmis un document .jpeg des zones à parcourir avec l'instrument de mesures électromagnétiques mais n'a pas fourni le fichier .shp. En me basant sur l'image aérienne Swisstopo, en fond de leur document, j'ai reproduit les polygones des zones d'acquisition avec les outils de digitalisations de QGIS (fig.10). J'ai ensuite produit une seconde couche (polylignes), avec les lignes d'acquisition digitalisées tous les 10 mètres dans les zones (fig.33). Le pré-plot a ensuite pu être chargé sur les instruments de terrain pour que l'équipe d'acquisition se dirige facilement sur les lignes.

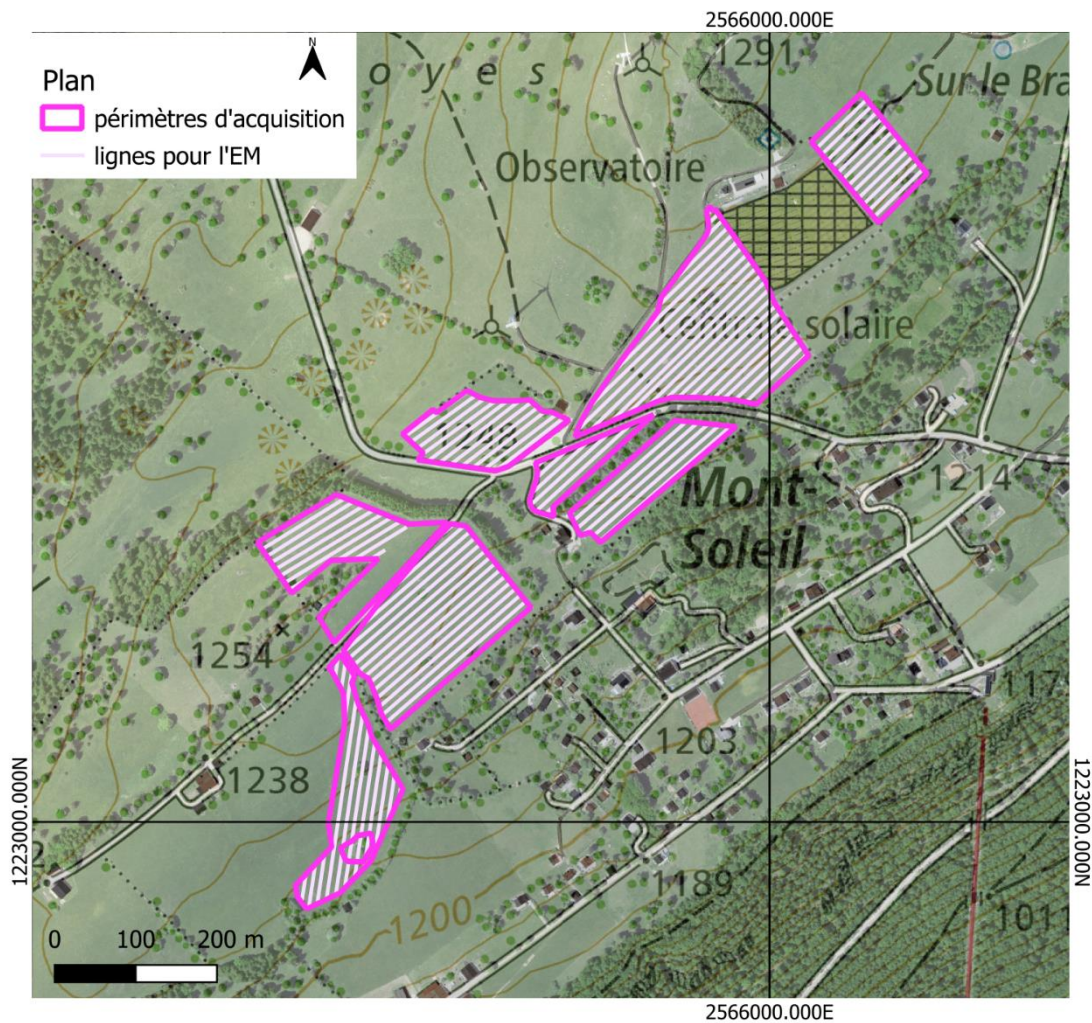


Figure 33: Carte de la zone d'étude par EM à Mont Soleil, préparée pour les collègues allant sur le terrain.

#### 4.3.2. MFR Romont

Un chantier d'EM et de tomographie électrique (ERT) a été mené en début novembre 2023 à Romont dans le Jura. Mandatées par Ennova SA en amont de l'implantation d'éoliennes, les mesures géophysiques de Geo2X SA doivent servir à mieux caractériser les couches peu profondes et les structures dans cette zone du Jura. Après le traitement des données par les spécialistes de ces méthodes, je me suis occupée de préparer les cartes de présentations des données pour les clients (fig.36).

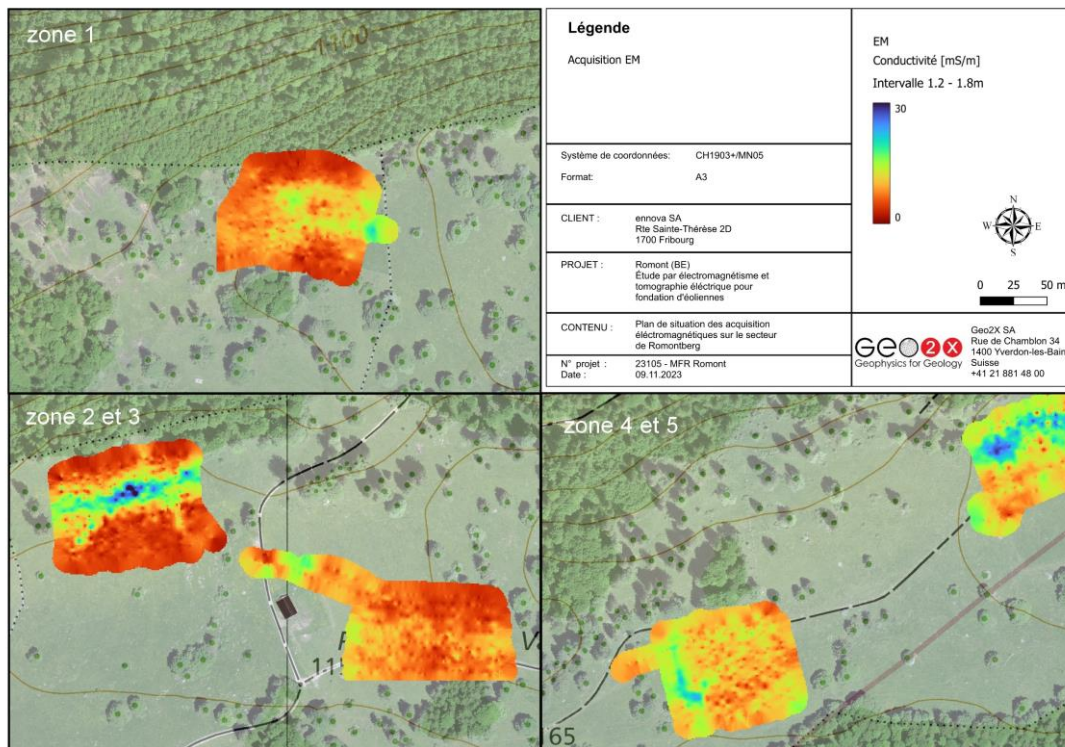
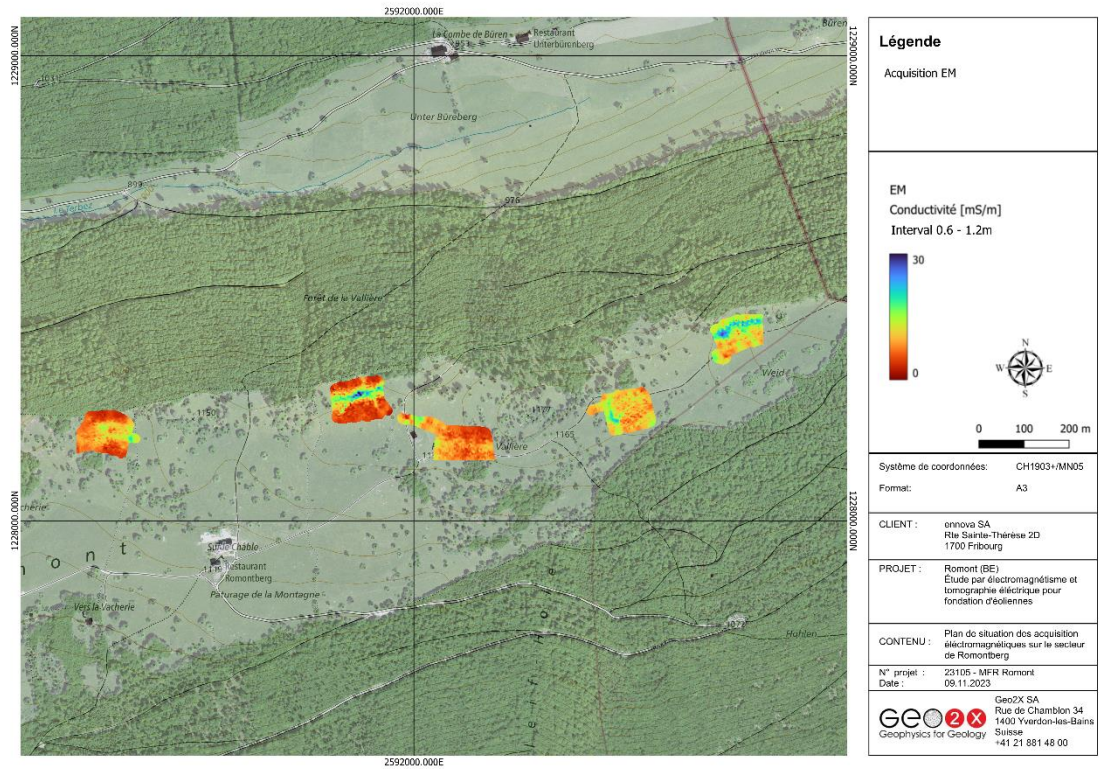


Figure 34 : Mise en page des résultats d'une étude du sol par électromagnétisme à Romont dans le Jura bernois. Le reste des cartes produites pour le rapport se trouvent en annexe.

### 4.3.3. NORBERT-Fribourg

Un chantier d'ERT et de sismique à l'explosif s'est tenu à Fribourg mi-novembre 2023. Pour ce chantier, trois lignes d'acquisitions passaient en travers de la campagne et de quelques routes, proche d'habitations. Pour que le chantier se passe sans dommages aux canalisations enterrées, il a fallu géoréférencer les images des canalisations envoyées par l'entreprise mandataire puis digitaliser manuellement les conduites (fig.35). Le géoréférencement a été effectué avec la fonctionnalité intégrée de QGIS et une dizaine de points de repères ont été placés, à la main, sur chacune des cartes pour assurer un géoréférencement correct des images des conduites enterrées.

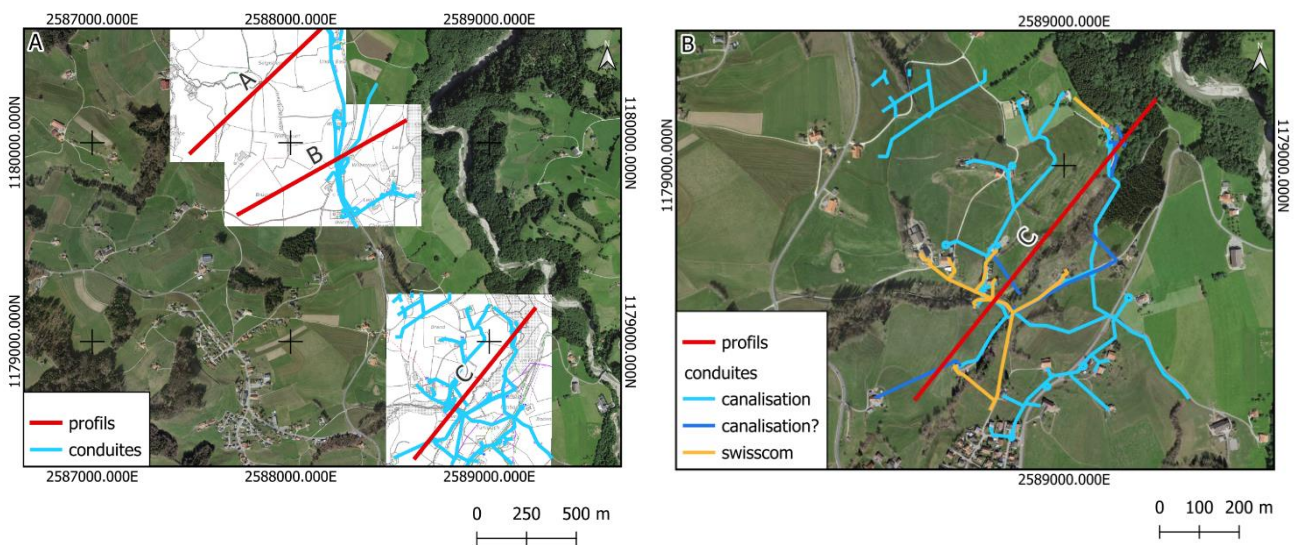


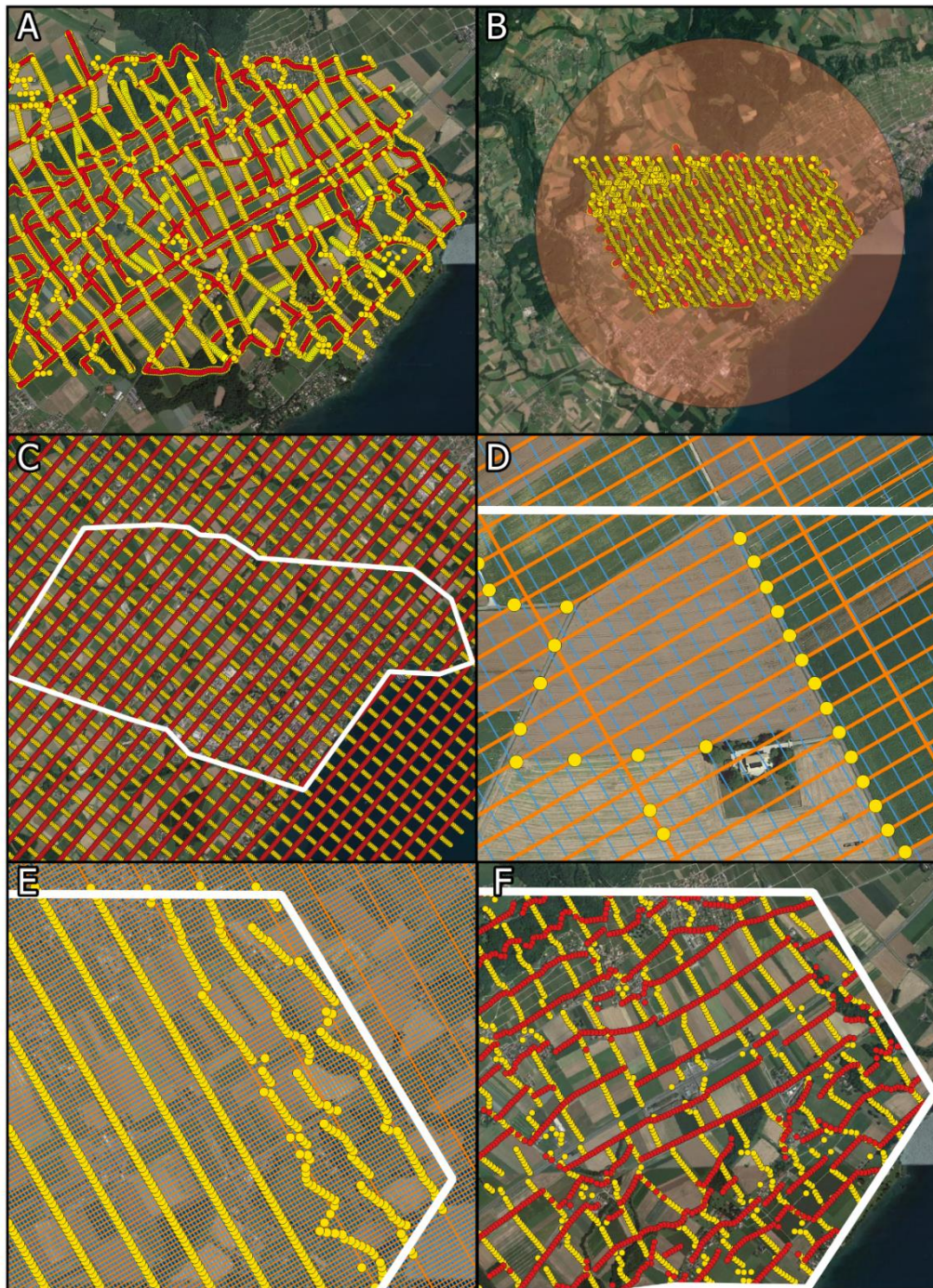
Figure 35: Géoréférencement et digitalisation des canalisations enterrées autour des profils d'acquisition. A) profils et plan des canalisations enterrées. Les plans ont été géoréférencés, puis les canalisations ont été digitalisées manuellement avec les outils de digitalisation de QGIS (création de couche polygones). B) Résultat de la digitalisation, avec une symbologie catégorisée, permettant de distinguer les conduites d'eau et les conduites du réseau téléphonique enterré de Swisscom.

### 4.3.4. Aubonne-Etoy et Nyon-Vinzel :

Geo2X SA étant une entreprise très dynamique, plusieurs chantiers sont prévus pour l'année 2024. Un chantier de sismique réflexion 3D est prévu pour l'été 2024 à Nyon, Vinzel et Aubonne. Pour préparer la réponse à l'appel d'offre d'une entreprise privée, Geo2X SA propose un premier pré-plot théorique des aires d'étude, permettant d'estimer l'ampleur des moyens à mettre en place pour une bonne réalisation de ces projets. Les conditions définies par cet appel d'offre sont 25m d'espacement entre les points et 250m entre les lignes, sur une zone prédéfinie.

La création d'un pré-plot se fait en plusieurs étapes :

- Premier pré-plot en positionnant tous les points de tirs à l'espacement demandé (ici 25m inter-point) sur les routes de la zone étudiée pour estimer dans quelle orientation une grille orthogonale permet d'optimiser le nombre de points vibrés (fig.36A). La méthode de la grille orthogonale (deux grilles de lignes se croisant à 90° l'une de l'autre) a été étudiée par Galbraith (1994) et Gabriel (2003) et permet une bonne optimisation de la couverture de données et du nombre de traces sismiques dans la zone d'étude ciblée.
- Deuxième pré-plot sur la base d'une grille orthogonale. Une fois l'orientation préférentielle trouvée, les points sont disposés sur les lignes du quadrillage avec 25 m entre chaque point et 250m entre chaque ligne de points (fig.36C-D).
- Une deuxième grille est ajoutée, à 90° de la première grille de points, avec un espacement de 20m entre chaque ligne. Cette seconde ligne permet de respecter la distance de projection maximale autorisée par l'entreprise mandataire (fig.36D).
- Les points sont déplacés un à un sur la base du quadrillage et sont positionnés sur les routes et chemins, pour les sources, et partout sauf au milieu des champs, pour les récepteurs. Les points sont projetés orthogonalement pour respecter l'espacement et la densité choisie par l'entreprise mandataire (fig.36E-F).



**Preplot Vinzel**

● Vinzel SRC [2217]

● Vinzel RCV [2353]

■ Extent polygon

■ Vinzel - Survey area

— line grid RCV

— crossline grid RCV

Figure 36: Méthodologie de la création d'un pré-plot pour une acquisition sismique 3D. A) Pré-plot « frugal » avec les tirs et les géophones positionnés principalement sur les routes. B) Dessin du polygone circulaire de référence pour le code Python. C) Quadrillage orthogonal tourné en fonction d'une orientation maximisant le nombre de tirs, créé avec Python. D) Close-up du quadrillage de référence pour bouger les points orthogonalement. E) Différence entre les points du quadrillage initial et les points bougés pour accommoder les routes et chemins carrossables. F) Résultat final du pré-plot basé sur une grille initialement orthogonale.

Pour produire le quadrillage et les points du pré-plot (fig.36), deux options étaient possibles : le faire manuellement pour chaque zone d'étude, pour les sources et les récepteurs, ou bien utiliser un langage informatique pour automatiser la tâche. J'ai choisi d'automatiser la tâche au maximum en tentant de créer les deux grilles et les lignes de points avec RStudio. Cette première partie s'est révélée sans trop de difficulté. Sur la base d'un polygone circulaire dessiné directement sur QGIS et couvrant toute la zone d'étude désirée, il était possible de créer les grilles facilement. J'ai ensuite tenté de faire tourner les grilles (par rapport à leur centre) avec un certain angle pour les positionner dans une orientation choisie pour maximiser le nombre de sources, mais le langage R n'a pas accès à tous les outils de QGIS et il n'a pas été possible d'obtenir une rotation des grilles comme désiré. Il a donc fallu utiliser le langage Python, qui propose des fonctions plus avancées et diverse pour la manipulation de données géospatiales. L'utilisation de Python était un vrai défi pour moi car c'est un langage de programmation que je connais très peu. Avec les aides en ligne, j'ai tout de même réussi à créer, tourner et enregistrer mes grilles et lignes de points en format shapefile, prêts à être utilisés dans QGIS (fig.37). Une fois le code écrit, il suffit seulement de déterminer à l'avance l'orientation des grilles et de modifier la forme et le positionnement du polygone initial pour pouvoir faire tourner le code et reproduire les grilles pour de prochains projets. Les grilles peuvent ensuite être gardées en entier ou être découpée dans QGIS. Le découpage des couches n'a pas été inclus dans le code car celui-ci peut être fait à la fin de la préparation du pré-plot, seulement sur la couche des points et pas nécessairement sur les grilles. Le code permet aussi d'adapter facilement l'orientation des grilles, qui tournent dans le sens anti-horaire.

```

#CREATION D'UNE GRILLE DE LIGNES DE 250X25M AVEC ROTATION PAR RAPPORT AU CENTRE
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import LineString
from shapely.affinity import rotate
import numpy as np

# Load the polygon from the shapefile
polygon_shp = r'\\ \Chantier\0000-OFFRES\23113-ENERGEO-Nyon-Vinzel\22-GIS\229-5-SCRIPTS\Grids preplots\Nyon\Extent-p
polygon_gdf = gpd.read_file(polygon_shp)

# Create a bounding box around the polygon
bounding_box = polygon_gdf.total_bounds
minx, miny, maxx, maxy = bounding_box

# Find the center of the polygon
center_x, center_y = polygon_gdf.geometry.centroid.x.values[0], polygon_gdf.geometry.centroid.y.values[0]

# Create a grid within the bounding box
grid_size_x = 250 # meters
grid_size_y = 25 # meters

x_coords = np.arange(minx, maxx, grid_size_x)
y_coords = np.arange(miny, maxy, grid_size_y)

# Create LineStrings for the grid cell boundaries
grid_lines = [LineString([(x, y), (x + grid_size_x, y), (x + grid_size_x, y + grid_size_y), (x, y + grid_size_y), (x, y)]) for x
# Rotate each grid line around the center of the polygon
rotated_grid_lines = [rotate(line, angle=50, origin=(center_x, center_y)) for line in grid_lines]

# Create a GeoDataFrame with the rotated grid lines
rotated_grid_gdf = gpd.GeoDataFrame(geometry=rotated_grid_lines, crs=polygon_gdf.crs)

# Intersect the rotated grid lines with the polygon to get the final rotated grid within the polygon
rotated_grid_within_polygon = gpd.GeoDataFrame(geometry=[line.intersection(polygon_gdf.geometry.unary_union) for line in rotated
# Save the resulting rotated grid to a new shapefile
rotated_grid_within_polygon.to_file(r'\\ \Chantier\0000-OFFRES\23113-ENERGEO-Nyon-Vinzel\22-GIS\229-5-SCRIPTS\Grids p

```

Figure 37: Code Python écrit pour créer et tourner les grilles qui permettent de préparer un pré-plot orthogonal.

## 5. Déroulement du stage

Le stage chez Geo2X SA a duré trois mois, durant lesquels j'ai travaillé à 100% sur les projets de l'entreprise. Mes tâches étaient d'aider l'équipe responsable des aspects SIG des chantiers en cours en les épaulant pour produire différents types de cartes (cartes à transférer aux clients sur l'avancement du chantier, cartes à transmettre aux communes pour les informer des opérations, cartes à transmettre aux équipes de terrain pour l'implantation de géophones, etc). J'ai également travaillé sur les pré-plots des projets, qui évoluaient chaque jour. Une partie des manipulations étaient une sorte de « maintenance » du projet, avec la mise à jour d'attribut, tandis qu'une autre partie était vraiment concentrée sur des manipulations vectorielles des couches (zone tampon, découpage, fusion, digitalisation, transformations affines de vecteurs, sélections par différents critères, reprojection, jointures spatiales etc.), comme appris lors des cours du CCG. J'ai également pu développer mes connaissances en géoprogrammation grâce aux outils d'automatisation des tâches que j'ai mis en place avec les langages informatiques R et Python.

Le stage s'est très bien déroulé et j'ai eu beaucoup de plaisir à acquérir de nouvelles connaissances à travers les conseils et accompagnements de mes collègues. J'ai énormément apprécié la considération que tous m'ont montré dès le début du stage et je me suis très vite sentie comme faisant partie intégrante de l'équipe. Tout en me faisant faire des tâches utiles, l'équipe SIG m'a donné le temps de prendre en main QGIS à travers des tâches d'abord simples puis se compliquant plus avec le temps. J'ai donc eu le temps et l'espace de mettre en pratique mes connaissances et de continuer à apprendre tout au long du processus. Le contenu des enseignements du Certificat Complémentaire en Géomatique était en parfaite adéquation avec les besoins de Geo2X SA et j'ai pu répondre aux demandes sans soucis majeurs.

J'ai également eu la chance de participer au travail sur le terrain à plusieurs reprises, ce qui a rendu le travail avec QGIS d'autant plus intéressant. En effet, j'ai pu voir et comprendre mieux les enjeux et difficultés rencontrées par les équipes sur le terrain. J'ai également pu apprécier le fait que de travailler avec des cartes bien faites et complètes, est crucial pour ne pas perdre de temps lorsqu'on travaille à l'extérieur.



## 6. Conclusion et perspectives

Pour conclure, le stage chez Geo2X SA m'a permis de mettre en pratique les connaissances acquises lors du Certificat Complémentaire en Géomatique et d'en découvrir l'utilité concrète. J'ai eu l'occasion de m'entraîner et m'améliorer en manipulations de couches vectorielles en tous genres, en manipulations sur les tables attributaires et en utilisation de langages informatiques tels que R et Python pour résoudre certains problèmes ou automatiser des manipulations redondantes ou complexes.

Conformément aux tâches annoncées dans la convention de stage, j'ai assisté l'équipe SIG avec le travail de cartographie lié aux projets de géothermie profonde à Genève lors de la campagne de sismique réflexion 2D et à Eclépens pour la campagne de sismique réflexion 3D. J'ai participé à la gestion des autorisations nécessaires, à l'élaboration d'analyses spatiales pour étudier l'impact des contraintes posées par le permittage ou par des problèmes environnementaux (zones protégées, conduites enterrées, présence d'animaux dans des enclos à proximité, etc). Grâce à mes connaissances en géomatique, j'ai aidé activement à la gestion des multiples contraintes, besoins et problèmes posés par des campagnes géophysiques de ce type-là.

Ce stage a été très instructif et j'ai bénéficié d'un très bon accompagnement, toujours disponible et compréhensif pour m'aider en cas de problème. J'ai énormément apprécié que le travail avec QGIS soit directement bénéfique aux équipes allant sur le terrain.

En termes de perspectives, j'ai la chance de pouvoir continuer à travailler chez Geo2X SA jusqu'à fin 2024, me permettant de continuer à développer mes connaissances en géomatique et en géophysiques.

## Références

Alvarez, Gabriel. "Flexible 3-D seismic survey design." (2003).

Kana, J.D., Djongyang, N., Raidandi, D., Nouck, P.N., & Dadjé, A. (2015). A review of geophysical methods for geothermal exploration. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 44, 87-95.

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3rd ed. ix + 262 pp.

Mike Galbraith (1994) Land 3-D Survey Design by Computer, *Exploration Geophysics*, 25:2, 71-77, DOI: [10.1071/EG994071](https://doi.org/10.1071/EG994071)

Mridekh, Abdelaziz & Toto, El Rbi & Hafid, Mohamad & Ouataoui, Abdelmajid. (2000). Structure sismique de la plate-forme Atlantique au large d'Agadir (Maroc sud-occidental).

Perrin, J., Ahmed, S., & Hunkeler, D. (2011). The effects of geological heterogeneities and piezometric fluctuations on groundwater flow and chemistry in hard-rock aquifer, southern India. *Hydrogeology Journal*, 19, 1189-1201. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0745-y>

Figure 1 : <https://swissgeoenergy.com/eclepens-switzerland/>

Figure 2 : [https://www.researchgate.net/figure/Coupe-sismique-et-interpretation-montrant-le-changement-de-style-tectonique-entre-les\\_fig4\\_248521295](https://www.researchgate.net/figure/Coupe-sismique-et-interpretation-montrant-le-changement-de-style-tectonique-entre-les_fig4_248521295)

Figure 3 : <https://physics.stackexchange.com/questions/323326/why-do-magnetic-field-lines-point-towards-the-north-pole-on-the-inside-of-a-sole>

Figure 4 : [https://em.geosci.xyz/content/case\\_histories/sagd/interpretation.html](https://em.geosci.xyz/content/case_histories/sagd/interpretation.html)

Figure 5 : [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-ERT-test\\_fig1\\_334667086](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-ERT-test_fig1_334667086)

Figure 6 : [https://www.researchgate.net/figure/a-Electrical-resistivity-tomography-ERT-section-along-the-trace-shown-in-Fig-1\\_fig4\\_225615008](https://www.researchgate.net/figure/a-Electrical-resistivity-tomography-ERT-section-along-the-trace-shown-in-Fig-1_fig4_225615008)

Figure 7 : <http://vibroseismic.com/tour.html>

Electromagnetism. *Geo2X SA*. Consulté 12 octobre 2023, à l'adresse <https://geo2x.com/wp/methods/electromagnetism/>

IGN : *produire et diffuser les données géographiques et forestières en France—Portail IGN - IGN*. Consulté 15 septembre 2023, à l'adresse <https://www.ign.fr/>

*MyMaps—Google Maps*. Consulté 2 octobre 2023, à l'adresse <https://www.google.com/intl/de/maps/about/mymaps/>

*QFieldCloud—Seamless fieldwork*. Consulté 28 août 2023, à l'adresse <https://qfield.cloud/>

*ROAD LORDS Dispatcher | Free HGV and truck route planner*. Consulté 13 septembre 2023, à l'adresse <https://dispatcher.roadlords.com/route-planner>

*Swiss Map Vector 25*. (s. d.). Bundesamt für Landestopografie swisstopo. Consulté 5 septembre 2023, à l'adresse <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/maps/smv/smv25.html>

## ANNEXES

Les documents cartographiques produits pendant le stage étant confidentiels, ceux-ci ne peuvent pas être divulgués.

Les documents annexes sont les cartes produites pour les rapports de fin de mission, les cartes produites grâce à la fonctionnalité « Atlas » de QGIS et les codes écrits en R et en Python pour automatiser certaines tâches.

Les fichiers produits sont :

- 1) MFR-Romont-EM : 22 cartes produites pour le rapport de fin de mission de l'acquisition de données géophysiques à Romont, dans le Jura Bernois. Les données ont été acquises avec un instrument fonctionnant sur le principe d'électromagnétisme.
- 2) Nyon-Vinzel-3D : Code Python écrit pour le pré-plot d'une future sismique réflexion 3D à Nyon et Vinzel.
- 3) SGE-Eclépens-3D : 33 cartes d'implantation des géophones sur les communes et 544 cartes montrant les parcelles, créées dans l'Atlas et 7 cartes pour le rapport de fin de mission de la campagne sismique 3D de Eclépens. Les codes R que j'ai produit pour les besoins de la campagne d'Eclépens sont également ajoutés à ce dossier.
- 4) SIG-Genève-2D : 33 cartes pour le rapport de fin de mission de la campagne sismique 2D du Grand-Genève et code R produit pour le post-plot de Genève.