

Construction d'une habitation à 4140 Hautgné (Sprimont)

Précision du risque karstique par prospection
géophysique

Microgravimétrie et ERT

Rapport

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières.....	2
Table des annexes.....	3
1. Introduction.....	5
2. Localisation de l'étude.....	7
2.1. Cadre géologique.....	7
2.2. Cadre hydrogéologique.....	8
2.3. Cadre pédologique.....	9
2.4. Risques associés aux sous-sols.....	9
3. Microgravimétrie.....	11
3.1. Principe.....	11
3.2. Applications et limitations.....	11
3.3. Acquisition des données, traitement et interprétation.....	12
3.4. Plan d'action.....	13
3.5. Mise en Œuvre et traitement des mesures gravimétriques.....	13
3.6. Résultats et interprétation des mesures gravimétriques.....	19
1.1.1. Anomalie de Bouguer, anomalie régionale et anomalie résiduelle.....	19
1.1.2. Identification et caractérisation des anomalies négatives.....	20
4. Tomographie électrique (Wenner).....	22
4.1. Principe.....	22
4.2. Applications et limitations.....	22
4.3. Acquisition des données, traitement et interprétation.....	23
4.4. Mise en œuvre, résultats et interprétations des mesures électriques.....	23
5. Conclusions.....	25
6. Agrément.....	28
7. Assurances.....	28

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : localisation de la zone d'étude sur Orthophotoplan.....	1
Annexe 2 : localisation de la zone d'étude sur la carte géologique	2
Annexe 3 : localisation de la zone d'étude sur la carte hydrogéologique	3
Annexe 4 : localisation de la zone d'étude sur la carte pédologique	4
Annexe 5 : localisation de la zone d'étude sur la carte de la DRIGM.....	5
Annexe 6 : microgravimétrie – Corrections topographiques.....	6
Annexe 7 : microgravimétrie – Carte de l'anomalie de Bouguer complète	7
Annexe 8 : microgravimétrie – Carte de l'anomalie régionale	8
Annexe 9 : microgravimétrie – Carte de l'anomalie résiduelle.....	9
Annexe 10 : tomographie électrique.....	10

Offre(s)

Type	Version	Date	Rédigé par	Vérifié par	Approuvé par
Offre Initiale (OF_2022_036)	01	17/05/2022	M. Demarteau	/	M. Demarteau

Travaux de terrain

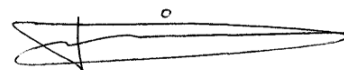
Types de Travaux	Date de début	Date de fin	Équipe FREMEN GEO
Mesures microgravimétriques (90 stations avec un maillage d'environ 5 mètres), y compris levé topographique DGPS	20/09/2023	22/09/2023	A.Rys S. Jusseret
Mesures microgravimétriques (60 stations avec un maillage resserré sur les anomalies), y compris levé topographique DGPS	10/10/2023	11/10/2023	A.Rys M. Demarteau
Réalisation de 1 tomographie (espacement de 1,5 m).	17/10/2023	17/10/2023	M. Demarteau T. Assaguina

Rapport(s)

Type	Version	Date	Rédigé par	Vérifié par	Approuvé par
Rapport final	01	15/11/2023	A.Rys	M. Demarteau	M. Demarteau



RYS Alexandre
 Responsable de projets



DEMARTEAU Maxime
 Administrateur

1. INTRODUCTION

Dans le cadre d'un projet de construction d'une habitation à Hautgné 4140 Sprimont (Commune de Sprimont. Parcelle cadastrale : 4^e Division, Section A, n°202M), Monsieur SCHYNS nous a sollicité pour la réalisation d'une campagne de mesures géophysiques visant à préciser le risque karstique au droit de la parcelle concernée par le projet de construction.

La demande de Monsieur SCHYNS fait notamment suite à différents échanges avec la Commune de Sprimont dans le cadre de sa demande de permis et à un rapport de l'ULg (M.L. MOULANA & C. EK, daté du 15 février 2022), produit par la Commune de Sprimont et portant sur le projet de construction de Monsieur SCHYNS.

Ce rapport nous a été transmis dans le cadre de la demande de Monsieur SCHYNS. Il fait notamment état de différents phénomènes et contraintes karstiques, ainsi que du risque d'inondation dans la zone de Hautgné.

Outre ce document, la demande de Monsieur SCHYNS était notamment accompagnée :

- des plans (implantation – situation – cadastre – profils – plans vides ventilés + égouttage) de la future construction ;
- de la copie d'échanges entre le SPW – Cellule Aménagement-Environnement et Monsieur SCHYNS concernant le risque karstique dans la zone ;
- d'un certificat d'urbanisme daté du 19 juin 2019 concernant la parcelle cadastrale 202M ;
- du rapport n° X/68633 d'ArGEnCO (Ulg) portant sur la réalisation de deux tomographies électriques au droit de la parcelle cadastrale 202M.

L'analyse de ces différents documents confirme que la zone est, a priori, critique d'un point de vue géotechnique. Le site s'inscrit au sein d'une zone de contrainte karstique forte et, semble-t-il, vu notamment les différentes manifestations de phénomènes karstiques (dolines, pertes, ... en ce compris relativement au sud de la route, puisqu'un phénomène non négligeable est décrit à hauteur du n°16) à juste titre. De plus, les circulations d'eau sont nombreuses dans la zone et entretiennent ces phénomènes.

En vue de compléter et préciser cette analyse, FREMEN GEO a effectué une visite de site en compagnie de Monsieur SCHYNS et de Madame MAKKA (Architecte) le jeudi 28 avril 2022.

Sur base de ces éléments, nous avons préconisé et réalisé, en accord avec Monsieur SCHYNS, pour ce dossier :

- une première phase de mesures microgravimétriques sur l'ensemble de la parcelle avec un maillage étendu d'environ 5 m ;
- une seconde phase de mesures microgravimétriques avec un maillage resserré d'environ 2 m sur une zone définie à l'issue de la première phase ;
- une tomographie électrique, positionnée sur base des résultats des deux premières phases.

Le présent rapport concerne l'établissement du contexte géologique, hydrogéologique et pédologique de la zone d'étude sur base bibliographique, ainsi que la réalisation, le traitement et l'interprétation de ces mesures (microgravimétrie et tomographie électrique) conformément aux règles de l'art. Le Guide technique édité par l'AGAP et le BRGM (Bouvier, A., Baron, J.-P., non daté. *Guide technique. Microgravimétrie et prospection microgravimétrique. Manuel pour la conception et la mise en œuvre.* Cahier de l'AGAP n°3. BRGM éditions) et le Code de bonne

pratique édité par l'AGAP constituent à ce titre les documents de référence pour l'aspect technique de ce rapport.

Il convient de préciser que les méthodes géophysiques constituent des méthodes d'investigation indirectes. Les hypothèses qui seront énoncées à l'issue de la campagne de mesures ne pourront être confirmées que par la réalisation d'investigations directes complémentaires (des terrassements et/ou forages carottés par exemple).

2. LOCALISATION DE L'ÉTUDE

Le marché de services mentionné dans l'introduction de ce rapport concerne une zone située dans le hameau de Hautgné, dans la commune de Sprimont, en périphérie de la route du Hayen, plus précisément sur la parcelle cadastrale : 4^e Division, Section A, n°202M. La localisation détaillée du chantier est fournie à l'**Annexe 1** de ce rapport.

Cette parcelle, en vue de la construction d'une habitation, a fait l'objet de plusieurs études, notamment :

- Un rapport intitulé « Rapport sur un projet de construction sur la parcelle A 202 M à Hautgné, Commune de Sprimont », réalisé par M.L Moulana et C. EK (15/02/2022). Ce rapport consiste en un inventaire bibliographique des risques encourus en périphérie de la parcelle. Il met en évidence le risque karstique élevé de la zone d'étude ainsi que son augmentation croissante par rapport aux inondations de la zone.
- Le rapport n° X/68633 d'ArGEnCO (Ulg) portant sur la réalisation de deux tomographies électriques au droit de la parcelle cadastrale 202M. Cette étude a conduit aux conclusions suivantes :
 - le site repose sur des roches calcaires (formation du Frasnien) fortement altérées en périphérie de la voirie et près de la surface ;
 - le toit du calcaire s'enfonce progressivement vers l'arrière de la parcelle, laissant place à des terrains plus schisteux et meubles. La délimitation entre ces deux entités n'est pas facilement discernable ;
 - la zone dans laquelle le schiste affleure ne présente pas de karstification. Il est recommandé d'éviter la construction dans la zone de terrain proche de la voirie.

2.1. CADRE GÉOLOGIQUE

La zone investiguée se localise sur la carte géologique 49/1-2, Tavier-Esneux (**Annexe 2**). Cette carte est disponible en ligne dans sa version définitive via la plate-forme CIGALE 4.0.1 du SPW ou sur le site <http://geologie.wallonie.be/home.html>.

La géologie de la Belgique a été profondément influencée par le cycle de l'orogénèse Varisque (ou Hercynienne), dont l'impact a été le plus marqué au cours du Dévonien supérieur. Cet événement a entraîné le déplacement du massif ardennais sur les terrains du Massif du Brabant au nord.

D'un point de vue régional, la zone dont il est question ici appartient à la partie orientale du synclinorium de Dinant, une unité plissée et faillée de l'allochtone Ardennais. Cette région se caractérise par une alternance de synclinaux à noyaux carbonifères et d'anticlinaux à cœurs fameniens.

D'un point de vue local, le site d'étude se situe sur le flanc sud d'un anticlinal à cœur gréseux, orienté OSO – ENE. Sur ses flancs, les formations carbonatées dominent et sont sujettes à de nombreux phénomènes karstiques.

Les formations géologiques présentes au niveau du site ou en périphérie sont les suivantes :

- **La Formation de Névremont (NEV) (Givétien)** est constituée à la base d'un quartzite blanc/rosé surmonté par des bancs décimétriques de calcaires fins. Ces dépôts présentent généralement une coloration variable, allant du gris au bleu-noir. **L'épaisseur** de cette formation varie entre 20 et 100 mètres.
- **La Formation de Lustin (LUS) (Frasnien)** est composée de deux membres distincts. Le membre inférieur est constitué d'un calcaire corallien se présentant sous la forme de bancs d'épaisseur métrique à plurimétrique. Il est localement interrompu par des bancs de calcaires fins décimétriques et de calcaires argileux. Le membre supérieur est quant à lui caractérisé par des calcaires à grains fins (micrites) de teintes variées, disposés en bancs décimétriques à pluridécimétriques. **L'épaisseur** de cette formation est d'environ 90 mètres.
- **La Formation d'Aisemont (AIS) (Frasnien)** est caractérisée à la base par des schistes verts, localement calcaireux et parfois argileux. Cette partie est surmontée par des calcaires fossilifères disposés en bancs pluridécimétriques. **L'épaisseur** de cette formation est d'environ 30 mètres.

2.2. CADRE HYDROGÉOLOGIQUE

La zone investiguée se localise sur la carte hydrogéologique 49/1-2, Tavier-Esneux (**Annexe 3**). Cette carte est disponible en ligne dans sa version définitive via la plate-forme CIGALE 4.0.1 du SPW ou en téléchargement sur le site <http://environnement.wallonie.be/cartosig/cartehydrogeo>.

Au droit et en périphérie du site d'étude, trois principales unités hydrogéologiques peuvent être distinguées :

- **L'aquifère des calcaires du Givétien** est constitué des formations, de Névremont, du Roux et de Fromelennes. Ces formations, principalement carbonatées, présentent un potentiel aquifère intéressant en raison de leur conductivité hydraulique élevée et de leur porosité accrue due à une fracturation intense et à la karstification. Cette nappe est alimentée par des infiltrations diffuses à travers les couches superficielles ou par infiltration préférentielle au niveau des fractures et des pertes d'eau.
- **L'aquifère des calcaires du Frasnien** est composé de la Formation de Lustin. Cette aquifère partage des caractéristiques et des propriétés similaires à celles de l'aquifère des calcaires du Givétien.
- **L'aquitard du Frasnien** est représenté par les formations, d'Aisemont et de Neuville. Elle se caractérise par des lithologies plus variées telles que des calcaires argileux, des schistes et des calcaires noduleux. Cette diversité crée une unité hydrogéologique dont le potentiel aquifère est relativement faible. De plus, à la base du Frasnien, se trouve la mince Formation de Presles (généralement non cartographiable) qui constitue un niveau aquitard.

Une approche géocentrique, consistant en un inventaire de l'ensemble des prises d'eau, a été réalisée dans un rayon de 3,00 km autour des coordonnées suivantes : X(m) : 229595 et Y(m) : 152489. En résumé, on dénombre 54 prises d'eau, réparties comme suit :

- 1 puits est prévu pour un carwash utilisant la nappe des calcaires dévoniens du Bassin de Dinant ;
- 9 puits sont destinés à l'élevage, utilisant la nappe du massif schisto-gréseux de Dinant (4), les calcaires dévoniens du Bassin de Dinant (1) et une nappe non spécifiée (4) ;
- 6 puits sont destinés à la distribution publique. La nappe sollicitée pour un puits n'est pas spécifiée (1), tandis que pour les 5 autres, c'est la nappe du massif schisto-gréseux de Dinant ;
- 2 puits sont destinés à un usage domestique et alimentaire, mais la nappe sollicitée n'est pas spécifiée ;
- 27 puits sont destinés à un usage domestique sanitaire. La nappe sollicitée pour 23 puits n'est pas spécifiée, pour 2 puits, c'est le massif schisto-gréseux de Dinant, et pour 2 puits, c'est le thalweg de la Meuse et de ses affluents ;
- 7 puits sont destinés à l'agriculture, exploitant la nappe du massif schisto-gréseux de Dinant (2) et une nappe non spécifiée (5) ;
- 2 puits de nature indéterminée alimentés par la nappe calcaires dévoniens du Bassin de Dinant (1) et la nappe du massif schisto-gréseux de Dinant (1).

2.3. CADRE PÉDOLOGIQUE

Selon les informations disponibles sur la carte numérique des sols de Wallonie du site du SPW, la parcelle étudiée est caractérisée par un seul type de sol, à savoir des sols non cartographiés. Cependant, sur les parcelles adjacentes, différents types de sols sont observés :

- au sud-est, on trouve des dépôts limoneux avec un drainage naturel favorable ;
- à l'ouest, les sols sont limono-caillouteux avec une charge calcaire, et le drainage naturel est presque exclusivement favorable ;
- au sud et au nord, il y a un regroupement de complexes de sols avec des textures variées, notamment sur les pentes abruptes, ainsi que des sols de fonds de vallons, qui peuvent être limoneux ou rocailleux (**Annexe 4**).

2.4. RISQUES ASSOCIÉS AUX SOUS-SOLS

Les pages relatives aux Thématiques sous-sol de Wallonie, accessibles par l'intermédiaire de l'outil en ligne Cigale du SPW (<http://carto1.wallonie.be/CIGALE/viewer.htm?APPNAME=SSOL>), montrent l'existence de plusieurs zones de consultation de la DRIGM au droit du secteur d'étude ou à proximité immédiate de celui-ci (voir **Annexe 5**).

- **Site karstique N° 492-211z - Chantoir Comblé à Hautgné 19** : un effondrement circulaire aux parois quasi verticales et terreuses s'est brusquement ouvert juste devant la maison (n°19) au début des années 2000, au niveau du seuil de la porte d'entrée. Malgré son comblement, la maison continue de bouger, comme en témoignent les fissures apparues sur les murs, le plafond et le sol du garage. **Les dimensions** de l'effondrement sont de 1,5

- mètre de longueur, 1,5 mètre de largeur et 2,5 mètres de profondeur. **Coordonnées** : X(m) : 237711, Y(m) : 137189.
- **Site karstique N° 492-197z - Affaissement de la route d'Avionpuits** : la chaussée s'affaisse régulièrement, nécessitant des travaux de réparation de la part de la commune. Cela s'est produit au moins quatre fois au cours des deux dernières années. **L'affaissement mesure** 2,0 mètres de longueur, 1,5 mètre de largeur et 0,5 mètre de profondeur. **Coordonnées** : X(m) : 237686, Y(m) : 137156.
 - **Site karstique N° 492-195z - Dépression de la parcelle Triangulaire** : une dépression circulaire s'est formée en 2017 dans une zone de remblais. Elle s'approfondit régulièrement et montre des traces d'écoulement d'eau ainsi que des infiltrations temporaires. Des essais de sol (pénétromètres) effectués en 2018 ont révélé une instabilité, conduisant à envisager l'utilisation de pieux pour une construction "sur pilotis". **La dépression mesure** 1,5 mètre de longueur, 1,0 mètre de largeur et 0,4 mètre de profondeur. **Coordonnées** : X(m) : 237741, Y(m) : 137188.
 - **Site karstique N° 492-194z - Chantoir Schreiden** : il s'agit d'une perte ouverte suite aux crues de mai 2008, absorbant les eaux provenant du sud de Hautgné. Lors de ces crues, l'effondrement s'est considérablement agrandi, submergeant la propriété voisine sous 1,5 mètre d'eau. **Ses dimensions** sont de 2,5 mètres de longueur, 2,0 mètres de largeur et 2 mètres de profondeur. **Coordonnées** : X(m) : 237735, Y(m) : 137209.
 - **Site karstique N° 492-015z - Chantoir n°1 de Hautgné** : il s'agit d'une perte temporaire activée régulièrement lors des pluies, elle a débordé lors des crues de fin mai 2008, inondant la vallée sèche se dirigeant vers Hayen. **Ses dimensions** sont de 1,0 mètre de longueur, 1,0 mètre de largeur et 2 mètres de profondeur. **Coordonnées** : X(m) : 237734, Y(m) : 137232.
 - **Site karstique N° 492-169z - Effondrement amont de Hautgné** : cet effondrement partiellement provoqué par le soutirage dû à des écoulements souterrains passe sous une habitation. L'adduction d'eau, si elle fuit, pourrait accélérer le processus. **Il mesure** 1,0 mètre de longueur, 0,5 mètre de largeur et 0,65 mètre de profondeur. **Coordonnées** : X(m) : 237695, Y(m) : 137129.
 - De plus, une « **rivière souterraine** » **N°492S² - Rivière souterraine de Dolembreux** a été mis en évidence en périphérie des différents chantoirs.

Enfin, précisons que FREMEN GEO a consulté l'avis de la Direction des Risques industriels, géologiques et miniers du SPW transmis par Monsieur SCHYNS. Il apporte des précisions importantes sur les risques encourus dans la zone d'étude. À savoir que :

- le périmètre se situe au-dessus de roches carbonatées, dont la partie supérieure a probablement été altérée ou dissoute par les eaux infiltrées, ce qui peut donner lieu à des phénomènes karstiques ;
- le bien se situe dans une zone de contrainte forte, cette dénomination désigne un secteur au sein duquel il est recommandé d'éviter, voire d'interdire de construire, car les contraintes karstiques y sont importantes ;
- a proximité du site, des phénomènes karstiques connus sont répertoriés dans l'Atlas du Karst wallon. Cependant, cela ne signifie pas que des phénomènes non signalés ou qui ne se sont pas manifestés en surface n'existent pas sous la parcelle d'étude ;

- dans un tel contexte, des mouvements de terrain plus ou moins importants peuvent toujours se produire, que ce soit suite à une évolution naturelle ou aux effets de l'activité humaine. Ces déplacements de matériaux peuvent entraîner des affaissements ou des effondrements plus ou moins importants en surface. Certains désordres tels que des fissures ou des basculements peuvent survenir en raison d'un tassement différentiel entre la roche saine et la roche altérée ou les remplissages meubles de poches et de creux.

3. MICROGRAVIMÉTRIE

3.1. PRINCIPE

La méthode microgravimétrique est une méthode géophysique passive consistant à étudier les variations du champ de pesanteur (ou champ gravitationnel) local par une mesure, à la surface du sol, en plusieurs points d'une zone donnée, en vue d'y établir la répartition de densité du sous-sol (excès ou défauts de masse).

La mesure de variation du champ de pesanteur local (composante verticale) s'effectue à l'aide d'un gravimètre de précision. Ce dispositif consiste en une balance de haute sensibilité mettant en équilibre une masse normée reliée à un ressort. Les variations du champ de pesanteur au voisinage immédiat du gravimètre se traduisent par un allongement du ressort proportionnellement à ces variations (**Figure 1**).

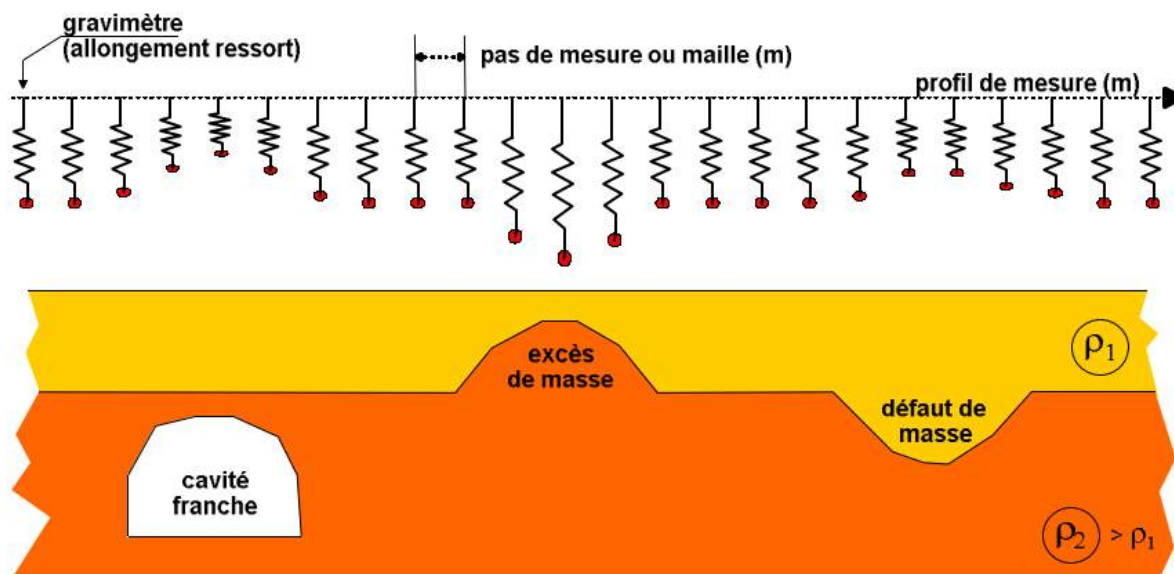


Figure 1 : Schéma de principe de la méthode gravimétrique. Source : AGAP.

3.2. APPLICATIONS ET LIMITATIONS

Les mesures gravimétriques peuvent être mises en œuvre dans la cadre de thématiques diverses, telles que la détection de cavités anthropiques ou naturelles, l'identification de contextes géologiques particuliers (failles, filons, zones décomprimées) et la recherche de structures archéologiques enterrées.

- Certaines limitations et contraintes sont inhérentes à la méthode gravimétrique, à savoir :

- la nécessité d'un contraste de densité suffisant entre l'objet recherché et son environnement ;
- l'impératif d'exécuter les mesures dans un environnement calme et sans perturbations (météorologiques, installations industrielles à proximité, activité sismique, etc.) ;
- le besoin de mettre en œuvre la méthode dans un environnement où la topographie n'est pas trop importante. La présence de bâtiments ou obstacles (colline, vallée, etc.) sur la zone d'étude ou à proximité de celle-ci nécessite un traitement particulier des données.

Enfin, il convient de rappeler que la méthode gravimétrique constitue, comme toutes les méthodes géophysiques, une méthode d'investigation indirecte. À cet égard, les hypothèses énoncées à l'issue d'une campagne de mesures pour expliquer la présence d'anomalies ne peuvent être confirmées que par la réalisation d'investigations directes complémentaires (terrassements et/ou forages carottés par exemple).

3.3. ACQUISITION DES DONNÉES, TRAITEMENT ET INTERPRÉTATION

L'équipement de mesure employé pour cette étude est constitué d'un gravimètre relatif SCINTREX CG5. Celui-ci présente les caractéristiques suivantes :

- précision : 1 μGal (=10⁻⁶ Gal, 10⁻⁸ m/s²) ;
- déviation standard (répétabilité de la mesure) : inférieur à 5 μGal ;
- gamme de mesure : jusqu'à 8 000 mGal ;
- dérive journalière : entre 0,2 et 1,5 mGal/jour (le gravimètre utilisé présente une dérive inférieure à ces valeurs affichées par le fabricant [inférieure à 0,1 mGal/jour]) ;
- mesure : champ de pesanteur, température du four, inclinaison (tilt) ;
- capteur renforcé ;
- gamme de température de fonctionnement : -35 à 45 °C ;
- GPS (pour correction de marée).

Un GPS différentiel (DGPS) Leica GS10 couplé à une station totale ont été utilisés pour le positionnement absolu des stations de mesure au sein du référentiel Lambert 72.

Le traitement de données contient les étapes suivantes :

- correction de la marée terrestre gravimétrique ;
- correction de la dérive temporelle du gravimètre ;
- soustraction du champ de pesanteur théorique (fonction de la latitude) ;
- correction à l'air libre (correction d'altitude) ;
- correction de relief (correction de plateau et corrections de terrain) ;
- correction des effets de structures anthropiques éventuellement présentes au voisinage des points de mesure.

Dans le cadre de cette étude, le logiciel QCTool (Eikon Technologies) a permis la réalisation de l'ensemble de ces opérations de traitement des données. L'interpolation des données pour la création des cartes d'anomalie de Bouguer, d'anomalie régionale et d'anomalie résiduelle a été réalisée au moyen du logiciel SURFER (Golden Software, LLC). Le traitement géospatial des

données du projet (définition de la maille de prospection, reprojection des données en coordonnées UTM 31N et WGS84, rééchantillonnage des rasters, consolidation des données cartographiques disponibles, etc.) a pris place au sein d'un environnement QGIS (logiciel libre open source).

3.4. PLAN D'ACTION

Sur la base des éléments exposés dans ce rapport, nous avons préconisé le plan d'action suivant :

- **réalisation de 90 stations** de mesures microgravimétriques couvrant la totalité de la zone d'étude selon un **maillage étendu d'environ 5 m** = phase 1 ;
- **réalisation de 60 stations** de mesures microgravimétriques implantées sur base des résultats précédents. Celles-ci ont été concentrées au droit des zones possédant une anomalie « significative ». Globalement, ces différentes stations **étaient espacées d'environ 2 mètres** = phase 2.

Les mesures commandées ont été réalisées le 20 et 22 septembre 2023 (Phase 1) et le 10 et 11 octobre 2023 (Phase 2).

3.5. MISE EN ŒUVRE ET TRAITEMENT DES MESURES GRAVIMÉTRIQUES

Mode opératoire

Une base gravimétrique unique a été utilisée pour l'ensemble des mesures. Celle-ci se localise sur la route bordant la parcelle d'étude. Le choix de cet emplacement a été guidé par la présence d'une surface bétonnée permettant le positionnement stable du gravimètre. Les mesures gravimétriques ont été effectuées par cycle d'environ 10 à 15 stations. Chaque cycle de mesure, de durée proche d'une heure, débute et se clôture par une série de mesures à la station de base. Ce protocole permet le calcul de la dérive du gravimètre, supposée linéaire avec le temps (hypothèse valide à condition que les retours à la base ne soient pas trop éloignés dans le temps).

Le mode d'acquisition du gravimètre utilisé dans le cadre de cette étude est le suivant :

- délai d'acquisition de 5 s ;
- 6 mesures de 30 s (= « temps de lecture ») à la station de base. Un écart d'au maximum 5 μ Gal est toléré pour l'ensemble des mesures. Dans le cas où cette condition n'est pas remplie, la mesure est répétée jusqu'à l'obtention de 6 mesures successives permettant de la satisfaire ;
- 2 mesures successives de 30 s à chaque station autre que la station de base. Un écart d'au maximum 5 μ Gal est toléré. Dans le cas où cette condition n'est pas remplie, la mesure est répétée jusqu'à l'obtention de deux mesures successives permettant de la satisfaire. Les mesures successives écartées de 5 μ Gal sont préférentiellement reprises, car celles-ci peuvent être considérées comme douteuses (une reprise se définit comme une mesure effectuée sur une station ayant déjà fait l'objet d'une mesure au cours d'un programme de mesure antérieur – une reprise ne peut être définie comme telle qu'à la condition où une [ou plusieurs] mesure[s] effectuées sur une [ou plusieurs] autre[s] station[s] sépare la mesure initiale de sa reprise).

Trente stations gravimétriques ont été reprises au moins une fois (20 % de stations reprises).

Pour chaque station, la hauteur de la base du boîtier du gravimètre a été mesurée avec un mètre pliant. Cette hauteur, additionnée à la hauteur du capteur (0,089 m depuis la base du boîtier), a

été utilisée pour calculer les valeurs de g compensées (corrigées de la dérive instrumentale, de la marée terrestre et de la hauteur du trépied). Les valeurs de g compensées issues des reprises donnent la répétabilité de la mesure propre à cette étude.

Réduction des données vers l'anomalie de Bouguer

La réduction des données vise à corriger les données brutes (données mesurées) de tous les effets (marée terrestre, dérive instrumentale, différences d'altitude, effets topographiques, etc.) ne présentant pas d'intérêt pour l'évaluation de la structure du sous-sol. Les mesures ainsi corrigées constituent l'**anomalie de Bouguer complète** (ou « **anomalie de Bouguer** »).

L'anomalie de Bouguer s'exprime suivant la formule :

$$A_B = g_{mes} - g_{th} + 0,3086h - 2\pi G\rho_b h + \rho_b T + T_A \quad (1)$$

où

- A_B représente l'anomalie de Bouguer ;
- g_{mes} représente le champ de pesanteur mesuré (corrigé de la hauteur du trépied et de la dérive instrumentale) ;
- g_{th} représente le champ de pesanteur théorique ;
- le terme $0,3086h$ représente le gradient à l'air libre (avec h : altitude du point considéré en mètres) ;
- le terme $2\pi G\rho_b h$ représente la correction de Bouguer (avec G : constante gravitationnelle [$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$] et ρ_b : densité de réduction de Bouguer [g cm^{-3}]) ;
- T représente la correction de terrain pour un terrain de densité 1 ;
- T_A représente la correction de terrain liée aux structures anthropiques.

Les réductions des données suivantes ont été réalisées pour l'obtention de l'anomalie de Bouguer :

- **correction de la marée terrestre** (dans le cadre de cette étude, la correction de marée est effectuée automatiquement par le gravimètre sur la base des données GPS fournies à l'entame du programme d'acquisition des données. La correction est effectuée sur la base de la formule de Longman [1959]) ;
- **correction de la dérive temporelle du gravimètre** par l'intermédiaire des mesures effectuées à la station de base au début et à la fin de chaque cycle d'acquisition (point 4.5.2. de ce rapport) ;
- **correction de latitude** sur la base des longitude, latitude et altitude propres à chaque station. Cette correction tient compte des variations du champ de pesanteur résultant de la forme ellipsoïdale (plutôt que sphérique) du globe terrestre (les points à l'équateur étant plus éloignés du centre de la Terre que les points positionnés aux pôles, ceux-ci présentent un champ de pesanteur plus faible) ;
- **correction à l'air libre** permettant de tenir compte des variations d'altitude entre stations ;
- **correction de Bouguer** (ou « correction de plateau », à ne pas confondre avec l'anomalie de Bouguer), tenant compte de l'effet gravitationnel des matériaux compris entre stations

d'altitudes différentes. L'application de la correction de Bouguer (ainsi que la définition des corrections de terrain, voir ci-dessous) nécessite la définition de la densité moyenne des matériaux constituant l'environnement géologique des objets recherchés (**densité de réduction**). Plusieurs méthodes permettent d'estimer la densité de réduction de l'anomalie de Bouguer. Parmi celles-ci, les plus courantes sont les suivantes :

- **estimation de la densité des terrains sur la base d'informations géologiques** à disposition et de gammes de densités courantes pour les matériaux géologiques concernés ;
- **méthode de Nettleton** : évaluation qualitative de la densité par la réalisation d'un profil de mesures gravimétriques au travers d'une surélévation topographique. La réduction des données ainsi obtenues pour différentes valeurs de densité permet d'établir un ensemble de profils d'anomalie de Bouguer. L'anomalie de Bouguer présentant la plus faible corrélation avec la surélévation topographique indique la densité des terrains investigués ;
- **méthode de Parasnis** : évaluation quantitative de la densité par la représentation graphique de l'anomalie à l'air libre de chacune des stations de mesures (définie comme la différence entre le champ de pesanteur mesuré et le champ de pesanteur théorique à une station donnée, augmentée de la correction à l'air libre) en fonction de l'altitude des stations. La pente de la droite obtenue est une fonction directe de la densité des terrains ;
- **méthode des triplets** : évaluation quantitative de la densité par la réalisation d'une comparaison des résultats obtenus en trois points alignés et équidistants relativement proches. Le dénivelé correspondant à un triplet donné doit être supérieur au mètre ; ce dénivelé doit être comparable pour l'ensemble des triplets considérés. Pour être significative, la méthode doit être réalisée à partir d'un nombre élevé de triplets, répartis de manière homogène. L'idée centrale de la méthode consiste à dégager, pour chaque triplet, une valeur du coefficient « C » de la correction de Bouguer, et d'en déduire une valeur de densité moyenne :

$$C = 0,3086 - 0,0419 * d \quad (2)$$

où

- **C** représente le coefficient de Bouguer (mGal/m) ;
- **0,3086** est le coefficient intervenant dans la définition du gradient à l'air libre (voir équation [1] ci-dessus) ;
- **d** est la densité des terrains considérés.

Notons que les méthodes de Nettleton et de Parasnis nécessitent toutes deux la présence de variations significatives du relief au sein de la zone étudiée, ainsi qu'une indépendance supposée entre les variations du relief et la densité du sous-sol.

Dans le cadre de ce dossier, une approche basée notre connaissance des matériaux géologiques en présence a été adoptée (point 2 de ce rapport), une densité de réduction « moyenne » de 1,8 g/cm³ a été adoptée pour le secteur d'étude et les terrains auxquels s'adresse la prospection microgravimétrique. Une densité de réduction alternative de 2,0 g/cm³ a été testée et n'a pas conduit à l'obtention de résultats significativement différents de ceux obtenus en choisissant une densité de réduction de 1,8 g/cm³ ;

- **corrections de terrain**, afin de compenser les effets des reliefs et structures anthropiques à proximité des points de mesure. Les corrections de terrain ont été réalisées dans un cercle de 22 km de rayon autour de chaque station. Concernant les effets des reliefs, ceux-ci ont été estimés au moyen de modèles numériques de terrain (MNT). Considérant la décroissance exponentielle du champ gravitationnel avec la distance, il importe que les MNT utilisés à proximité directe des stations soient les mieux résolus et les plus précis possibles (tout en gardant à l'esprit qu'une résolution élevée des MNT augmente considérablement – parfois de manière prohibitive – le temps nécessaire au calcul des corrections). Afin de répondre à ces contraintes, les corrections de terrain ont été calculées par l'imbrication de plusieurs modèles numériques de terrain (MNT) de résolution et précision décroissantes avec l'éloignement aux stations :
 - entre 1 et 250 m autour des stations, le MNT Lidar 2021-2022 du SPW (résolution planimétrique de 50 cm, précision altimétrique de 0,12 m) a été utilisé pour le calcul des corrections de terrain, avec une densité moyenne des matériaux de 1,8 g/cm³ ;
 - entre 250 et 750 m autour des stations, le MNT Lidar 2021-2022 du SPW rééchantillonné à la maille de 5 m a été utilisé pour le calcul des corrections de terrain, avec une densité moyenne des matériaux de 1,8 g/cm³ ;
 - entre 750 et 1500 m autour des stations, le MNT Lidar 2021-2022 du SPW rééchantillonné à la maille de 10 m a été utilisé pour le calcul des corrections de terrain, avec une densité moyenne des matériaux de 2,67 g/cm³ (densité moyenne des matériaux constitutifs de l'écorce terrestre) ;
 - entre 1 500 et 22 000 m autour des stations, le MNT GTOPO30 de l'USGS (résolution planimétrique de l'ordre de 1 km ; précision altimétrique de +/- 30 m) a été utilisé pour le calcul des corrections de terrain, avec une densité moyenne des matériaux de 2,67 g/cm³.

L'**Annexe 6** illustre les corrections de terrain calculées par l'intermédiaire des MNT précédemment détaillés pour l'ensemble des stations gravimétriques. Les valeurs de correction sont comprises entre **280 et 300 µGal**. De manière générale, les corrections de terrain les plus importantes correspondent aux stations positionnées au nord-est de la zone investiguée (encaissement plus prononcé lié à la paroi bétonnée bordant la parcelle).

Précision de l'anomalie de Bouguer

Afin d'évaluer le seuil de signification de l'étude (c'est-à-dire l'amplitude des anomalies gravimétriques au-delà de laquelle les erreurs inhérentes à la méthode ne peuvent plus, à elles seules, expliquer ces anomalies), il est nécessaire d'évaluer l'**erreur totale sur l'anomalie de Bouguer** pour chaque station. Cette erreur peut être envisagée comme la somme quadratique des erreurs élémentaires sur les variables intervenant dans son calcul :

$$\varepsilon_{AB} = \sqrt{\varepsilon_g^2 + \varepsilon_{g_{th}}^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_{CT}^2} \quad (3)$$

Le détail des erreurs élémentaires est le suivant :

- **erreur sur g (ε_g)**. Cette erreur est calculée sur la base de l'histogramme des écarts entre mesures effectuées (valeurs du champ de pesanteur corrigées de la hauteur du capteur et de la dérive instrumentale) au moins deux fois (non consécutivement) à la même station (reprises). Ces écarts donnent une indication de la **précision de l'étude**. Dans le cadre de ce travail, **30 reprises** ont été effectuées sur un total de 30 stations (soit **20 % des stations**), le plus souvent de manière aléatoire ou lorsqu'une mesure aberrante était soupçonnée.

L'analyse des reprises indique que leur distribution s'apparente à une gaussienne de moyenne proche de 0 (0,00064 mGal) (**Figure 2**). Par ailleurs, 90 % des reprises présentent un écart absolu inférieur ou égal à 0,011 mGal. Seules quatre stations présentent un écart absolu de reprise supérieur ou égal à 0,011 mGal (0,011, 0,013(2) et 0,014 mGal) (**Figure 3**).

L'histogramme des valeurs absolues des écarts de reprises, ainsi que le pourcentage cumulé associé à ces écarts (**Figure 3**), permettent de définir l'erreur moyenne de l'étude. Celle-ci se définit comme l'écart associé à un pourcentage cumulé de 68 %, correspondant statistiquement à l'écart-type d'une distribution gaussienne. Dans le cadre de cette étude, l'erreur associée à la mesure de g_{ε_g} est de **0,0056 mGal** (**Figure 3**) ;

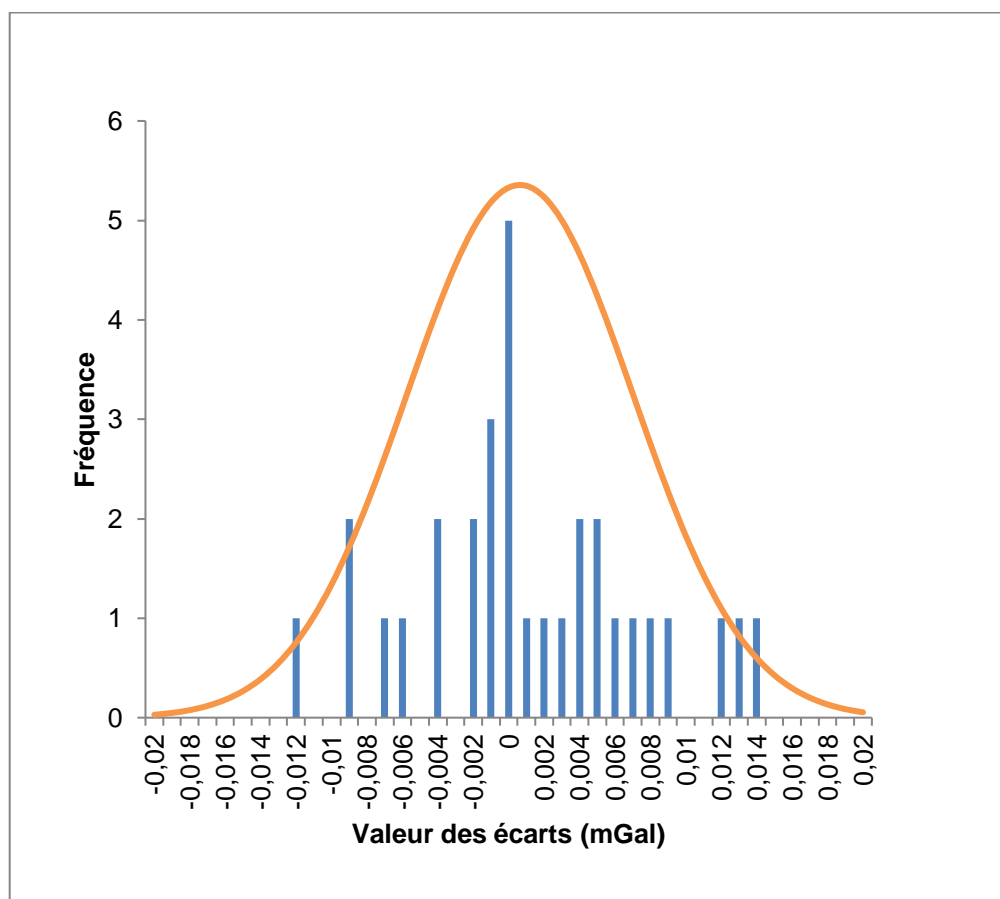


Figure 2 : Histogramme des valeurs des écarts de reprises (moyenne : 0,00064 mGal ; écart-type : 0,0064 mGal).

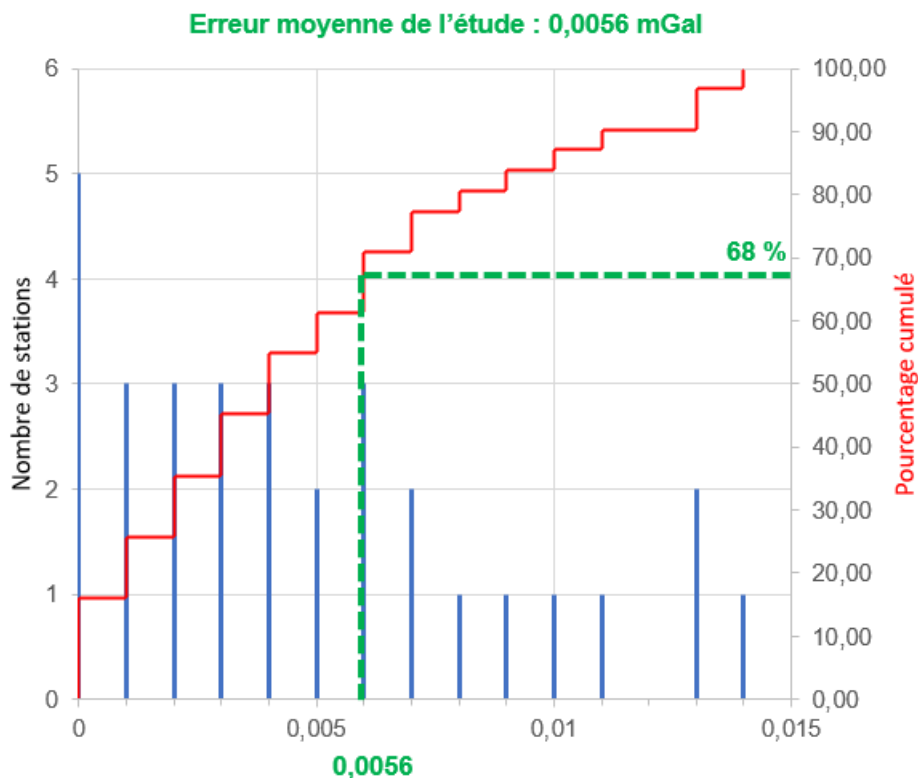


Figure 3 : Histogramme des valeurs absolues des écarts de reprises et pourcentage cumulé.

- **erreur sur g_{th} ($\varepsilon_{g_{th}}$)**. Cette erreur est fonction du positionnement de chaque station en latitude. Les positions ayant été levées au DGPS/Station totale (précision 3D inférieure à 0,02 m), l'**erreur sur g_{th} est négligeable** ;
- **erreur sur l'altitude (ε_z)**. L'erreur sur l'altitude est directement liée à la précision altimétrique du levé topographique. Celui-ci ayant été réalisé au DGPS/station totale, une imprécision de 0,03 m sur l'altitude est estimée (0,02 m d'imprécision associée à la mesure au DGPS/station totale + 0,01 m d'imprécision liée à la mesure de hauteur de trépied au moyen d'un mètre pliant). Pour des terrains de densité de 1,8 g/cm³, ε_z s'élève à **0,007 mGal** ;
- **erreur sur les corrections de terrain (ε_{CT})**. L'erreur sur les corrections de terrain est liée :
 - à la résolution des MNT utilisés (plus la maille du MNT est fine, au mieux les variations du relief sont restituées) ;
 - à la précision des MNT utilisés ;
 - au positionnement en x, y et z des stations gravimétriques.

Plusieurs définitions de l'erreur sur les corrections de terrain existent. Nous en listons 3 ci-dessous à titre d'exemple :

1. ε_{CT} = 20 % de la correction de terrain maximale de l'étude (Bouvier et Baron, non daté, précédemment cité, p.40) ;
2. ε_{CT} = 10 % de la différence entre la correction à la station concernée et la correction minimale de l'étude (Portal, A., Jacob, T., Beaubois, F., Grandemange, A., Maurice, B., Roussez, G., Dugrillon, D. 2020. *Inventaire des cavités souterraines d'origine anthropique dans le centre-ville historique de Limoges [87]. Détection des cavités souterraines par microgravimétrie. Rapport final BRGM/RP-70067-FR*. Accessible via : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-70067-FR.pdf>) ;
3. ε_{CT} = 20 % de la différence entre la correction à la station concernée et la correction minimale de l'étude (Jacob, T., Beaubois, F., Prunet, T., Baltassat, J.M., Thuon, Y. 2016. *Recherches des vides par microgravimétrie dans le quartier de l'Hôtel de Ville à Reims [51]. Rapport final BRGM/RP-66081-FR*. Accessible via : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-66081-FR.pdf> ; Jacob, T., Yart, S., Closset, L., Ardito, L., Masson, F. 2021. Recherche de cavité par couplage de microgravimétrie et scan laser 3D au droit de l'église Notre-Dame de Montmorillon [86]. Rapport final BRGM/RP-70958-FR. Accessible via : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-70958-FR.pdf>).

Nous considérons la première méthode présentée comme problématique, dans la mesure où celle-ci dépend de l'étendue de la zone jugée significative pour la définition des corrections de terrain autour de chaque station : plus cette zone est importante, plus l'erreur sur les corrections de terrain est élevée.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de définir l'erreur sur les corrections de terrain de la manière suivante :

- ε_{CT} = 20 % de la différence entre la correction maximale et la correction minimale de l'étude.

Cette définition est jugée conservatrice et s'inspire des définitions 1) et 3) précédemment exposées.

Sur la base des considérations précédentes, et tenant compte d'une différence de 0,0173 mGal entre les corrections de terrain maximale (0,3027) et minimale (0,2854) de l'étude (**Annexe 6**), une **erreur de 0,003 mGal sur les corrections de terrain** est définie.

L'**erreur totale sur l'anomalie de Bouguer ε_{AB}** calculée en chaque station de mesure suivant l'équation (3) et les termes précédemment détaillés **est de 0,0096 mGal**.

Le **seuil de signification de l'étude** est défini comme deux fois l'erreur totale sur l'anomalie de Bouguer, ε_{AB} soit **0,019 mGal**. Un niveau de confiance supérieur à 95 % peut être associé aux anomalies dont l'amplitude est supérieure au seuil de signification et concernant au moins trois stations contigües.

3.6. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION DES MESURES GRAVIMÉTRIQUES

1.1.1. Anomalie de Bouguer, anomalie régionale et anomalie résiduelle

L'anomalie de Bouguer traduit les variations de densité sous la surface du sol. Ces variations peuvent être superficielles ou profondes. Les valeurs élevées de l'anomalie de Bouguer indiquent la présence de matériaux denses, tandis que les valeurs faibles caractérisent des matériaux de densité plus réduite.

L'anomalie de Bouguer relative au secteur d'étude, obtenue par interpolation des valeurs obtenues à chaque station de mesure (mode d'interpolation choisi : krigeage), est présentée à l'**Annexe 7**. La carte présente un dynamique de 0,14 mGal, avec un clair gradient sud-ouest/nord-est. Les valeurs les plus élevées de l'anomalie de Bouguer sont localisées au nord et correspondent au point haut de la zone d'étude.

Afin de permettre une appréciation des courtes longueurs d'onde liées aux variations de densité peu profondes, il est nécessaire d'appliquer à l'anomalie de Bouguer un filtre permettant de s'affranchir des effets liés aux terrains profonds (grandes longueurs d'onde constituant l'anomalie dite « régionale »). De manière générale, la définition de l'**anomalie régionale** est une tâche rendue délicate par le manque de connaissance relatif à la structure et à la densité des terrains profonds. Afin de pallier cette difficulté, l'anomalie régionale est fréquemment approximée par un « lissage » de l'anomalie de Bouguer. Le résultat de ce lissage, obtenu par application d'un filtre « passe bas » en chaque point de la carte d'anomalie de Bouguer (interpolation polynomiale de degré 1), est présenté à l'**Annexe 8**.

L'**anomalie résiduelle (Annexe 9)** est finalement obtenue en soustrayant l'anomalie régionale (**Annexe 8**) de l'anomalie de Bouguer (**Annexe 7**) (cette opération revient à appliquer un filtre « passe-haut » à l'anomalie de Bouguer). Le choix des modes d'interpolation et de lissage appliqués aux anomalies de Bouguer et régionale étant, dans une certaine mesure, subjectif, il convient de souligner que l'information fournie par la carte d'anomalie résiduelle est avant tout qualitative.

L'anomalie résiduelle présentée à l'**Annexe 9** montre une dynamique de 0,045 mGal. Le gradient régional sud-ouest/nord-est évident sur la carte d'anomalie de Bouguer (**Annexe 7**) est effectivement atténué sur ce document. Les anomalies positives (marquant la présence de zones de forte densité) ne faisant pas l'objet de cette étude, celles-ci ne sont pas discutées plus en détail.

1.1.2. Identification et caractérisation des anomalies négatives

L'examen de l'**Annexe 9** indique la présence de deux principales anomalies négatives, dénommées A1-A2. Leurs caractéristiques sont reprises au **Tableau 1**.

Anomalie	Nombre de stations concernées (amplitude > seuil de signification)	Amplitude maximale (μGal)	Commentaire	Fiabilité	Anomalie significative ?
A1	0	15	9 stations contigües avec amplitude > 10 μGal, deux reprises entachées d'une erreur de 9 et 11 μGal	Élevée	Non
A2	0	10	8 stations contigües avec amplitude > 7	Élevée	Non

			μGal, 1 reprise pour une station (écarts : 4 μGal)		
--	--	--	--	--	--

Tableau 1 : Détail des principales anomalies négatives détectées au sein de la zone d'étude

Une **anomalie négative est dite significative lorsque son amplitude est supérieure au seuil de signification (soit 0,019 mGal) de l'étude sur au moins 3 points de mesure adjacents** (point 4.5.4. de ce rapport). L'examen du **Tableau 1** indique qu'aucune des anomalies **présente une amplitude supérieure au seuil de signification de l'étude.**

Le seuil de l'étude étant en grande partie liée au mode de définition de l'erreur sur les corrections de terrain (cf. point 3.5. de ce rapport), nous notons qu'une définition moins conservatrice de celle-ci (10 % au lieu de 20 % de la différence entre les valeurs maximale et minimale de la correction de terrain totale) ne permettrait toujours pas de définir les anomalies comme significatives. L'amplitude des anomalies reste inférieure au seuil de signification de l'étude, quelle que soit la définition de l'erreur sur les corrections de terrain (10 % ou 20 % de la différence entre les valeurs maximale et minimale de l'étude).

4. TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE (WENNER)

4.1. PRINCIPE

Cette méthode est basée sur la mesure de résistivité apparente du sous-sol. Deux électrodes servent à l'injection de courant tandis que deux électrodes permettent une mesure de différence de potentiel. Pour une intensité connue, la résistivité de la portion de sol ciblée peut être déterminée.

La **Figure 4** illustre le dispositif utilisé pour les mesures en mode Wenner, caractérisé par un espacement constant entre les électrodes de courant (A, B) entourant les électrodes de potentiel (M, N).

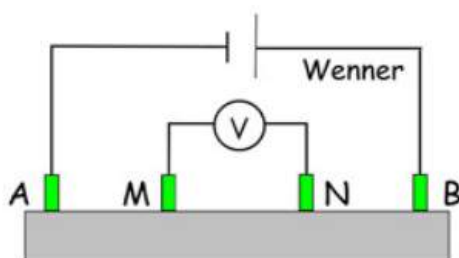


Figure 4 : principe du dispositif en mode Wenner

Dans la tomographie électrique, ce dispositif est répété un grand nombre de fois pour divers espacements, ceux-ci étant directement en relation avec la profondeur des lignes de courant générées. En pratique, les électrodes sont disposées en ligne selon un espacement déterminé, en fonction de la profondeur d'investigation et de la résolution désirées.

Toutes les combinaisons de quatre électrodes sont ensuite réalisées pour obtenir un jeu de valeurs complet le long d'une coupe de terrain assimilée à un trapèze inversé. Les valeurs obtenues sont apparentes. Afin d'approcher les valeurs de résistivités réelles, une inversion combinant l'ensemble des mesures est réalisée.

4.2. APPLICATIONS ET LIMITATIONS

La méthode est notamment bien adaptée pour différencier les terrains meubles (résistivité faible), des terrains rocheux (résistivité élevée), ainsi que pour la mise en évidence de zones fracturées et/ou altérées.

Les limitations inhérentes à la méthode et à la technique d'interprétation sont les suivantes :

- la résolution de la méthode est fonction de l'espacement entre les électrodes. Un espacement important engendre des lignes de courant qui englobent une plus grande portion de sol, ayant tendance à moyenniser sa résistivité. Dès lors, la résolution décroît avec la profondeur ;
- la procédure d'interprétation suppose des lignes de courant rectilignes entre les électrodes et donc le long du profil. La région investiguée est donc supposée bidimensionnelle, alors que des influences latérales non mesurables peuvent intervenir ;

- une limite nette entre deux terrains ou matériaux de nature différente apparaît sur la tomographie comme une transition rapide et non comme une frontière franche ;
- cette méthode peut être inopérante lorsque le sol présente des résistivités très élevées ne permettant pas l'injection du courant électrique. C'est par exemple le cas des zones désertiques, ou de remblais d'épaisseur trop importante ;
- la qualité des données peut être altérée au voisinage de conduites ou de caves.

4.3. ACQUISITION DES DONNÉES, TRAITEMENT ET INTERPRÉTATION

L'équipement de mesure est constitué des éléments suivants :

- un résistivimètre-unité de contrôle pour l'injection d'un courant continu dans le sol, la sélection automatique des électrodes, la mesure du potentiel associé et l'enregistrement des données ;
- 64 électrodes métalliques ;
- Quatre câbles multiconnecteurs reliant les différentes électrodes au module de contrôle.

La longueur des profils tomographiques dépend de la résolution et de la profondeur d'investigation souhaitée. Le traitement de données contient les étapes suivantes :

- édition des données et élimination des valeurs aberrantes ;
- intégration de la topographie ;
- inversion numérique des données ;
- représentation des profils en résistivités réelles.

4.4. MISE EN ŒUVRE, RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS DES MESURES ÉLECTRIQUES

Mise en œuvre :

Le profil commandé a été réalisé le 17/10/2023. Sa localisation sur le terrain fut établie au moyen d'un GPS RTK (DGPS, TERSUS « Oscar »). Précision pluricentimétrique affichée par le fabricant). Le profil comportait 64 électrodes espacées de 1,5 m, pour une longueur totale de 94,5 m. Le profil a été orienté suivant une direction NNE/SSO (soit N°200Em).

Résultats et interprétation

Le résultat et les interprétations du profil électrique sont repris à l'**Annexe 10**. La pseudosection de résistivité apparente, non incluse à ce rapport, est disponible sur demande.

Notons que la localisation du profil électrique par rapport aux données à notre disposition (cadre géologique, zones de contrainte de la DRIGM, cadre hydrogéologique, photographie aérienne, etc.) a été réalisée au sein d'un SIG (QGIS). L'ensemble des données géoréférencées utilisées dans le cadre de cette étude sont également disponibles sur demande.

Les mesures réalisées ont permis d'identifier trois entités électriques sur base de leurs résistivités et de leurs géométries. La localisation et les épaisseurs détaillées des différentes entités pour chaque profil sont précisées sur les fiches techniques annexées à ce rapport. En résumé :

- **L'entité A** est directement présente depuis la surface, affichant une épaisseur variant entre 2 et 8 mètres. Les épaisseurs maximales se trouvent dans le premier tiers de la tomographie. Au centre du profil, cette entité est présente sous la forme d'une fine bande de 1 à 2 mètres d'épaisseur. Dans le premier tiers, elle forme une poche de très faible résistivité, autour de 35-60 ohm.m. De plus, elle est également observée à l'extrémité sud du profil, de part et d'autre d'une fine couche de l'entité B.
- **L'entité B** se développe au cœur du profil, à faible profondeur sous l'entité A. Elle se caractérise par une résistivité située entre 60 et 130 ohm.m. Cette entité forme une couche visible atteignant une épaisseur maximale de 12 mètres. Les épaisseurs minimales sont observées sur la partie sud du profil, où elle se présente sous la forme d'une bande au sein de l'entité A.
- **L'entité C** émerge dans le premier tiers du profil, en périphérie de la voirie bordant la parcelle étudiée. Cette entité est observée à faible profondeur et est caractérisée par des résistivités élevées, situées entre 130 et 220(+) ohm.m. Elle est entrecoupée par des poches de résistivité similaires aux entités précédentes. L'épaisseur maximale visible de cette entité est d'environ 4 mètres.

5. CONCLUSIONS

Dans le cadre d'une demande de permis pour la construction d'une habitation à Hautgné, 4140 Sprimont (Commune de Sprimont. Parcelle cadastrale : 4^e Division, Section A, n°202M), Monsieur SCHYNS nous a sollicité pour la réalisation d'une campagne de mesures géophysiques visant à préciser le risque karstique dans la zone de future construction.

Le contexte géologique du secteur d'étude indique son association à la Formation de Lustin, composée de calcaires coralliens métriques, entrecoupés par des niveaux de calcaires argileux plus fins. L'épaisseur de cette unité y est de l'ordre de 90 m.

L'examen bibliographique a identifié l'intégralité de la zone d'étude en zone de consultation de la DRIGM en raison de la profusion de phénomènes karstiques. Un total de sept phénomènes karstiques distincts a été recensé dans la périphérie. Le bien en question est situé dans une zone de contrainte forte, désignant un secteur où il est recommandé d'éviter, voire d'interdire de construire en raison de contraintes karstiques significatives.

Dans un tel contexte, des mouvements de terrain, plus ou moins prononcés, peuvent survenir en raison de l'évolution naturelle ou des impacts de l'activité humaine. Ces déplacements de matériaux ont le potentiel d'engendrer des affaissements ou des effondrements plus ou moins marqués en surface.

Afin de détailler ces risques, l'Université de Liège a mené une campagne de mesures géophysiques : Rapport n°X/68633 intitulé "Étude karstique à Hautgné". Cette étude a impliqué la réalisation de deux tomographies avec un espacement d'électrodes de 2,0 m, orientées NNO-SSE. Ces mesures ont apporté des clarifications concernant la présence de phénomènes karstiques dans la partie nord du site (aux abords de la rue) et ont indiqué leur absence au sud du profil électrique. De plus, il a été observé que la roche sous-jacente calcaire est probablement proche de la surface dans la partie nord et s'enfonce en profondeur vers le sud. Cette formation serait recouverte par des dépôts hétérogènes composés de matériaux meubles et de restes indurés appartenant à des formations carbonatées et schisteuses.

Cependant, il convient de noter que cette étude semble présenter des limitations en raison d'une imprécision concernant la localisation exacte des tomographies, avec un décalage d'une vingtaine de mètres entre le tracé de la tomographie sur le plan et sa longueur réelle. Cette imprécision rend difficile l'utilisation poussée de cette étude dans le cadre de ce rapport.

Cette étude a été complétée par la société FREMEN GEO le 20 – 22 septembre (Phase 1), le 10 – 11 octobre (phase 2) et le 17 octobre (phase 3) a consisté en la réalisation de :

- **phase 1 : réalisation de 90 stations de mesures microgravimétriques** couvrant la totalité de la zone d'étude selon un maillage étendu d'environ 5 m ;
- **phase 2 : réalisation de 60 stations de mesures microgravimétriques** implantées sur base des résultats précédents. Celles-ci ont été concentrées au droit des zones possédant une anomalie « significative ». Globalement, ces différentes stations étaient espacées d'environ 2 mètres ;
- **phase 3 : réalisation d'une tomographie électrique** au droit des anomalies résiduelles des deux phases précédentes.

Les résultats de ces mesures ont permis la mise en évidence des éléments suivants :

- L'étude microgravimétrique, **a permis de mettre en évidence l'existence, au sein de la zone investiguée, de deux anomalies négatives principales (A1-A2, Annexe 9). Aucune de ces anomalies ne peut être considérée comme significative selon la définition proposée par le Guide technique de l'AGAP et du BRGM** (amplitude supérieure au seuil de signification de l'étude sur au moins 3 points de mesure adjacents). Néanmoins, considérant le contexte de l'étude (présence de karsts), la définition partiellement subjective du seuil de signification des anomalies microgravimétriques et l'amplitude des anomalies, une tomographie électrique a été réalisée au droit de ces deux anomalies.
- Les résultats des mesures électriques, combinés à l'étude bibliographique, ont révélé la présence de trois entités électriques distinctes, identifiées sur la base de leurs résistivités et de leurs dispositions :
 - **L'entité A** se manifeste directement depuis la surface, présentant une épaisseur variant entre 2 et 8 mètres, caractérisée par des résistivités faibles, entre 35 et 60 ohm.m. Les épaisseurs maximales sont observées dans le premier tiers de la tomographie. Au centre du profil, cette entité se présente sous la forme d'une fine bande d'une épaisseur de 1 à 2 mètres. Il est probable qu'il s'agisse de terrains meubles, de nature mixte, composée de terrains superficiels et de terrains meubles tels que des sables, des argiles et/ou des limons.
 - **L'entité B** se développe au cœur du profil, à faible profondeur sous l'entité A. Elle se caractérise par une résistivité située entre 60 et 130 ohm.m. Cette entité forme une couche visible atteignant une épaisseur maximale de 12 mètres. Selon toute vraisemblance, sa nature peut être associée à des terrains meubles et/ou à des terrains partiellement indurés (altérés).
 - **L'entité C** émerge dans le premier tiers du profil, en périphérie de la voirie bordant la parcelle étudiée. Cette entité est observée à faible profondeur et se caractérise par des résistivités élevées, situées entre 130 et 220 ohm.m sur une épaisseur d'environ 4 mètres. Elle est entrecoupée par des poches de résistivité similaires aux entités précédentes. Cette entité est associée à la roche sous-jacente carbonatée de Lustin, probablement caractérisée par des poches « saines » et des poches fortement altérées, comme l'indique la présence de poches faiblement résistives.

Il est important de souligner une excellente concordance entre les résultats des tomographies électriques (résistivité) et les mesures gravimétriques, comme indiqué dans **l'Annexe 10**. Les terrains présentant une anomalie résiduelle positive, indiquant la présence de zones de forte densité, sont localisés au niveau de l'entité C, associée à la remontée de la roche carbonatée. À l'inverse, les zones présentant une anomalie résiduelle négative (déficit de densité) sont associées aux poches faiblement résistives de l'entité A.

De plus, les tomographies réalisées par l'ULG présentent une morphologie et une structure comparables à celle effectuée dans la présente étude. Il est toutefois important de prendre en considération la localisation approximative de ces premières tomographies.

Reprenant les objectifs de cette étude (préciser le risque lié à la présence de zones karstiques), il nous paraît possible de formuler les conclusions suivantes (précisons que compte tenu du caractère bi-dimensionnel des mesures électriques, ces constatations ne sont valides, pour les mesures électriques, que dans le secteur des profils. De plus, pour rappel, les méthodes géophysiques constituant des méthodes d'investigation indirectes, ces hypothèses ne pourront être confirmées que par la réalisation d'investigations directes complémentaires (des terrassements et/ou forages carottés par exemple) :

- La méthode microgravimétrique s'avère être une technique robuste pour la détection de contrastes de densité dans les premiers mètres du sous-sol. Cependant, sa sensibilité diminue en profondeur, particulièrement en cas de faibles contrastes de densités, comme c'est le cas pour des karsts comblés. **En tenant compte du seuil de signification défini dans la présente étude, il est raisonnable d'affirmer que la présence de karsts significatifs non remblayés (vide franc) est peu probable dans les ~3 premiers mètres de terrain sous la surface de mesure.**
- À l'échelle de la tomographie électrique, **aucune signature de vide franc n'a été mise en évidence**. Cependant, des **zones présentant des valeurs de résistivités faibles, vraisemblablement liées à des remplissages meubles**, sont observées et confirmées par des déficits de gravité non négligeables (indiqué par une anomalie résiduelle négative par la microgravimétrie).
- De plus, **les terrains plus résistifs situés en périphérie de la voirie semblent être associés à la remontée de la formation carbonatée sous-jacente. Néanmoins, ces terrains sont parsemés de poches de faible résistivité, apparentées à des structures karstiques**. Ces observations ont été confirmées d'une part par la campagne géophysique de l'ULG et d'autre part par la présente étude.
- **Il semble, dès lors, judicieux d'éviter d'implanter de futures constructions dans ces différentes zones.**

En résumé, en se basant sur ces conclusions et observations, il semble qu'il convienne d'éviter d'ériger toute construction dans la partie nord de la parcelle (et ce sur environ 30 m de profondeur). La zone présentant les caractéristiques les moins défavorables pour la construction d'une habitation semble converger vers la partie centrale-est de la parcelle, le long d'un axe reliant la maison 16 A et la piscine située à l'arrière de la maison 15 A, au niveau de l'entité B. Cependant, il est important de souligner que le risque ne peut être complètement exclu, compte tenu de la localisation de la zone d'étude dans une zone karstique connue et en constante évolution. Dès lors, il convient de rappeler les recommandations du SPW, précisant qu'une étude de stabilité spécifique à la future construction, prenant notamment en compte les conclusions de ce rapport, sera nécessaire à la conception de fondations spécifiques aux risques karstiques (risque de tassements différentiels, de dessiccation des argiles de remplissage, de la présence de cryptodolines,...).

6. AGRÉMENT

FREMEN GEO est agréé (n° d'agrément 052-19) par le SPW pour effectuer des forages et des équipements de puits dans les domaines d'activité suivant :

- Forage pour prise d'eau souterraine ;
- Reconnaissance géologique et prospection ;
- Implantation de piézomètres.

FREMEN GEO est agréé (n° d'agrément PS31DGS2020) par le SPW pour agir en qualité de Préleveur.

7. ASSURANCES

FREMEN GEO est couvert par une RC professionnelle de chez AR-CO s.c.r.l. sur base des Conditions Générales 214 et des Conditions particulières 214.

Le point de départ de la responsabilité décennale est fixé à la date de la réception provisoire qui vaudra agrégation des ouvrages.

FREMEN GEO n'assume pas les conséquences pécuniaires des erreurs et fautes des autres intervenants à l'acte de bâtir, en ce compris le non-accès à la profession et le non-respect de leurs obligations en matière sociale ou fiscale. En cas de fautes des édificateurs concourant au dommage, FREMEN GEO sera tenu à réparer uniquement les dommages causés par sa faute à concurrence du pourcentage correspondant au degré de sa faute par rapport aux autres édificateurs. Le maître d'ouvrage renonce à agir in solidum à l'égard de FREMEN GEO.

La responsabilité de FREMEN GEO pour vices cachés autres que graves prévus à l'article 1792 du Code civil s'étend sur une période d'un an (deux ans au Grand-Duché de Luxembourg) à partir de la réception provisoire. Ces vices doivent être dénoncés durant cette période.

Les parties s'interdisent toute citation en justice sans mise en demeure préalable.

En cas d'accident du travail, l'entrepreneur et ses ayants causes renoncent à tout droit et action à l'égard du maître d'ouvrage, de l'architecte, de FREMEN GEO et du coordinateur de sécurité, sauf si l'infraction ou l'accident a été causé par une faute intentionnelle. La présente clause constitue une stipulation pour autrui ; en conséquence, l'entrepreneur fait insérer la présente clause dans les contrats de sous-traitance et les contrats d'assurance légale des accidents du travail, dans les cas contraires, il garantit les dénommés ci-avant.

Annexe 1 : localisation de la zone d'étude sur Orthophotoplan

Légende :

— zone d'étude



EPSG:31370



FREMEN GEO S.R.L
Rue des combattants 33
4130 Esneux
Tél. +32 (0)474 85 94 30
info@fremen.be
TVA/BCE : 0735.551.790

Annexe 1 :

Localisation de la zone d'étude sur Orthophotoplan

Image de fond :

Extrait de l'orthophotos de 2021 (géodonnée du SPW - 06/08/2021)

Dossier :

P_2023_94_SCHYNS_Hautgné_phy

Dessinateur :

A. RYS

Echelle :

1:5.000

Maître d'ouvrage :

/

Date :

09-11-2023

**Format
Papier :**
A4

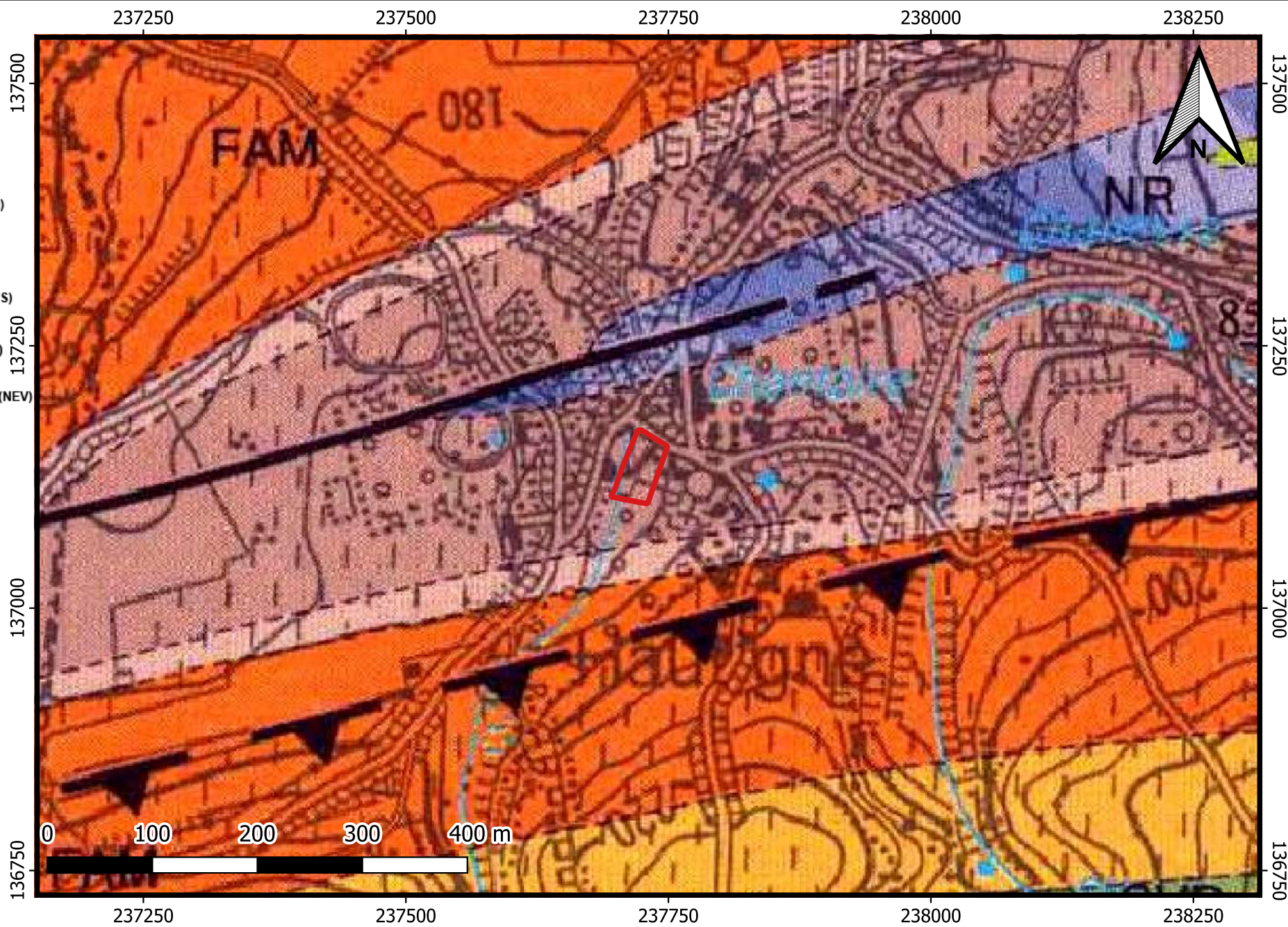
Annexe 2 : localisation de la zone d'étude sur la carte géologique

Légende :

— zone d'étude

Unités géologiques

- Formation d'Esneux (ESN)
- Formation de la Famenne (FAM)
- Formation d'Aisemont (AIS)
- Formation de Lustin (LUS)
- Formation de Nèvreumont (NEV)



EPSG:31370



FREMEN GEO S.R.L
Rue des combattants 33
4130 Esneux
Tél. +32 (0)474 85 94 30
info@fremen.be
TVA/BCE : 0735.551.790

Annexe 2 :

Localisation de la zone d'étude sur la carte géologique

Image de fond :

Extrait de la carte géologique 49/1-2 Tavier - Esneux

Dossier :

P_2023_94_SCHYNS_Hautgné_phy

Dessinateur :

A. RYS

Echelle :

1:5.000

Maître d'ouvrage :

/

Date :

09-11-2023







Format
Papier :
A4

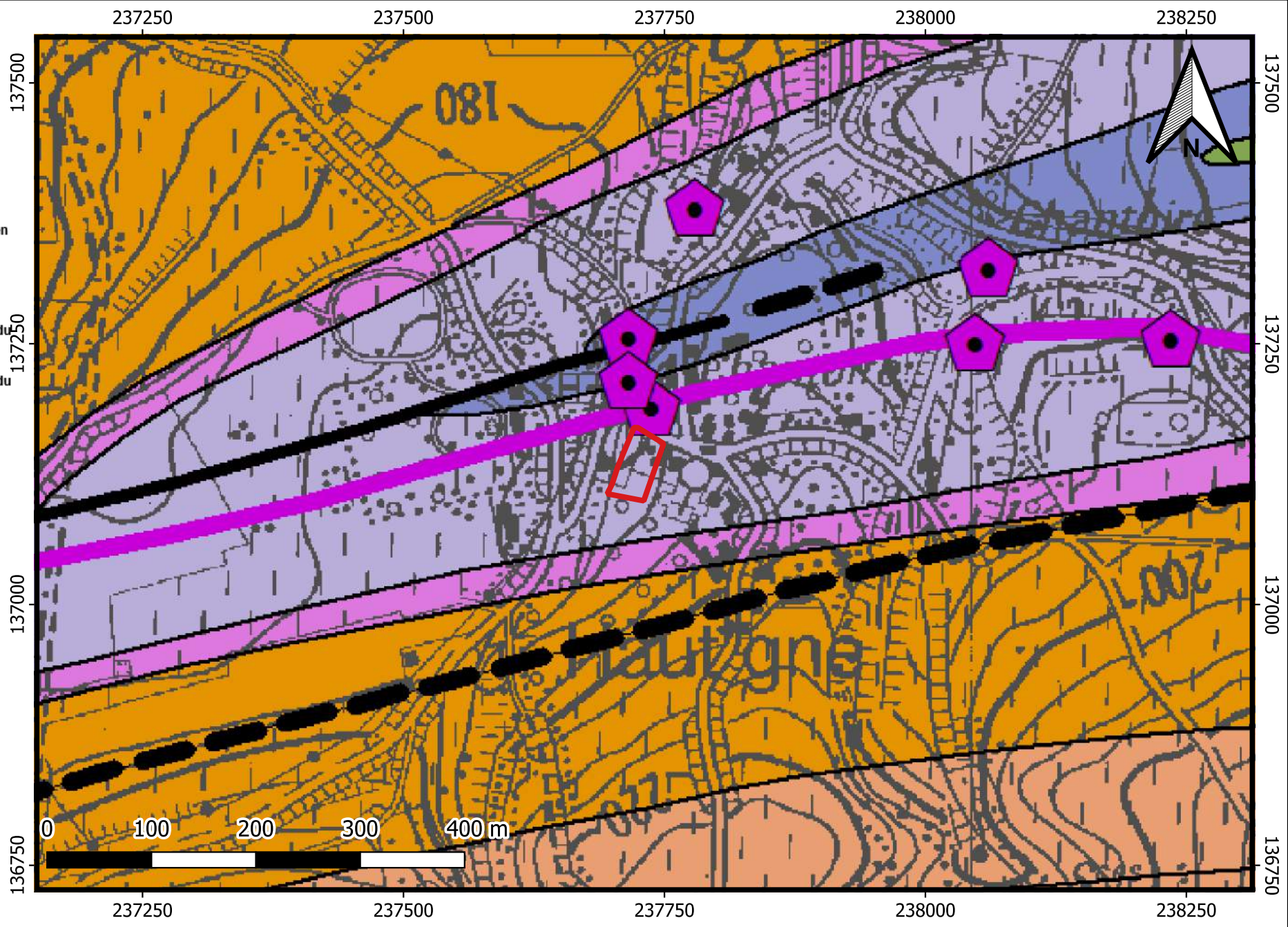
Annexe 3 : localisation de la zone d'étude sur la carte hydrogéologique

Légende :

— zone d'étude

Unités hydrogéologiques

-  Aquitard du Famennien
-  Aquiclude du Famennien
-  Aquitard du Frasnien
-  Aquifère des calcaires du Frasnien
-  Aquifère des calcaires du Givetien
-  Perte



EPSG:31370



FREMEN GEO S.R.L
 Rue des combattants 33
 4130 Esneux
 Tél. +32 (0)474 85 94 30
 info@fremen.be
 TVA/BCE : 0735.551.790

Annexe 3 :
 Localisation de la zone d'étude sur la carte hydrogéologique

Image de fond :
 Extrait de la carte hydrogéologique 49/1-2 Tavier - Esneux

Dossier :
 P_2023_94_SCHYNS_Hautgné_phy

Dessinateur :
 A. RYS

Echelle :
 1:5.000

Maître d'ouvrage :
 /

Date :
 09-11-2023

Format Papier :
 A4


Annexe 4 : localisation de la zone d'étude sur la carte pédologique


Légende :


— zone d'étude


Types de sols

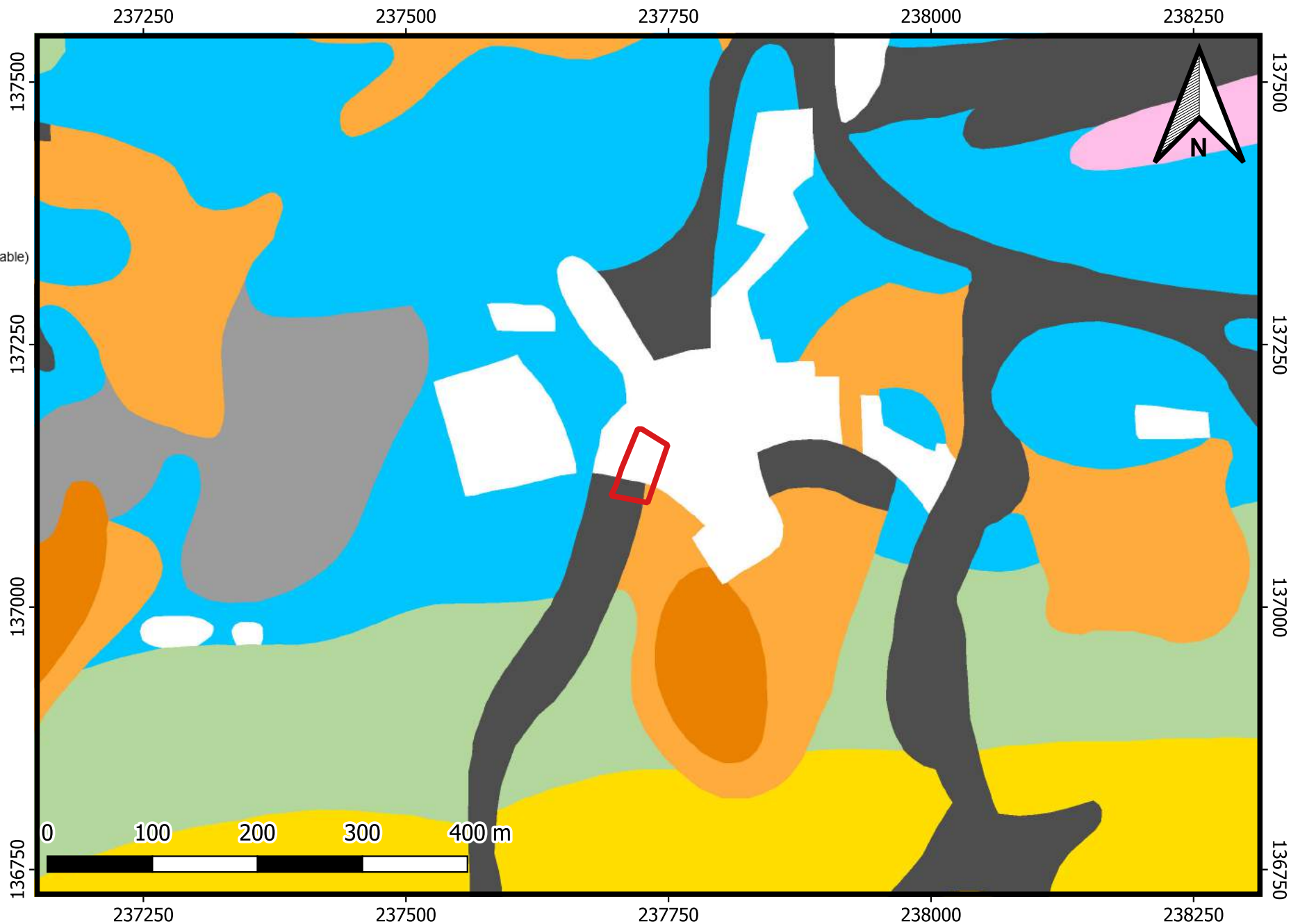
D.N : Drainage naturel

 Sols limono-caillouteux à Charge calcaire (D.N favorable)

 Sols limoneux (D.N favorable)

 Complexes de sols

 Sols artificiels ou non cartographiés



EPSG:31370



FREMEN GEO S.R.L
Rue des combattants 33
4130 Esneux
Tél. +32 (0)474 85 94 30
info@fremen.be
TVA/BCE : 0735.551.790

Annexe 4 :

Localisation de la zone d'étude sur la carte pédologique

Image de fond :

Extrait de la ressource en ligne du SPW : Carte des Principaux Types de Sols de Wallonie 1/250000

Dossier :

P_2023_94_SCHYNS_Hautgné_phy

Dessinateur :

A. RYS

Echelle :

1:5.000

Maître d'ouvrage :

/

Date :

09-11-2023

Format
Papier :
A4

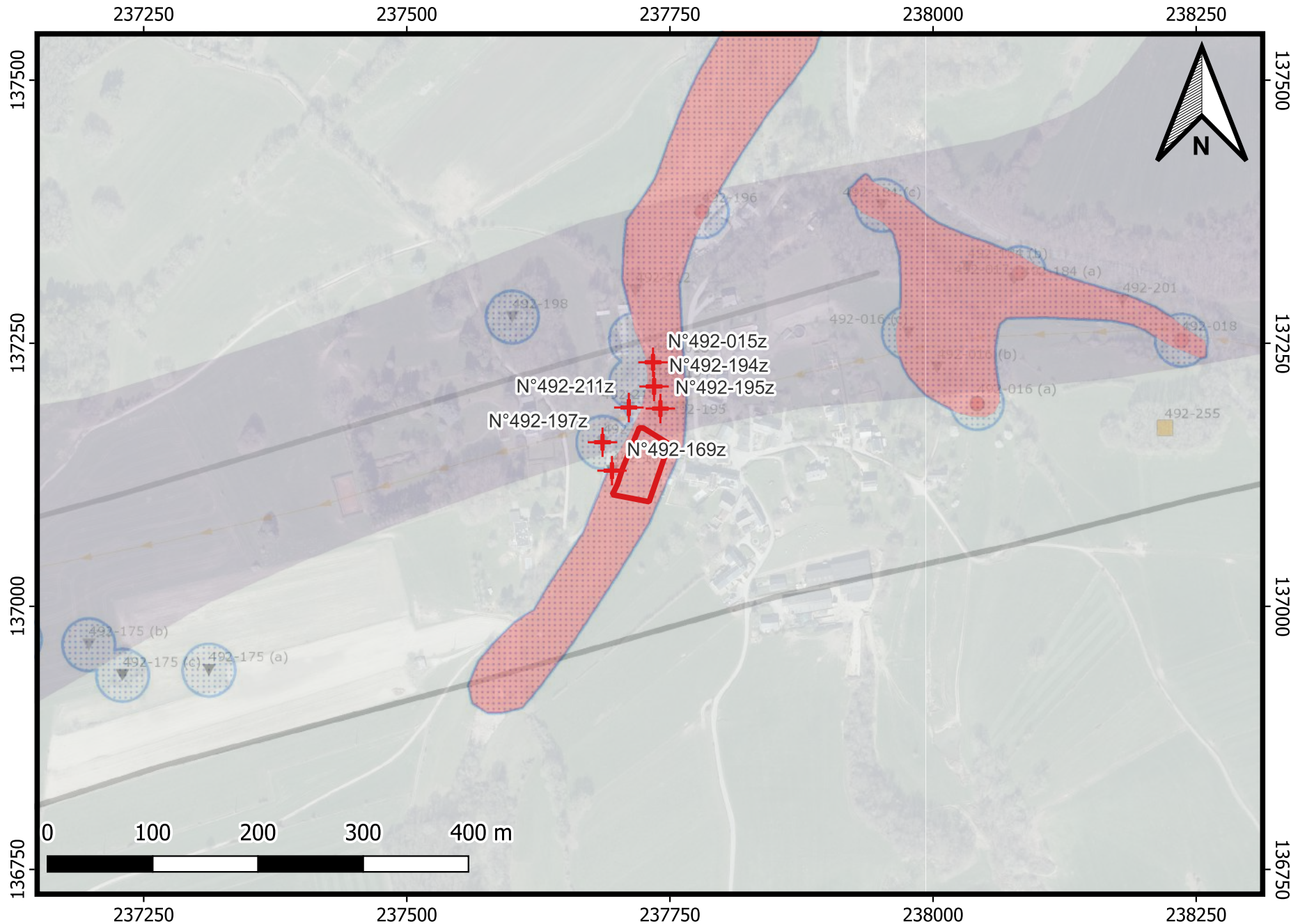
Annexe 5 : localisation de la zone d'étude sur la carte de la DRIGM

Légende :

- zone d'étude
- + karst identifiés



En rouge, cela indique une zone de contrainte karstique forte



EPSG:31370



FREMEN GEO S.R.L
 Rue des combattants 33
 4130 Esneux
 Tél. +32 (0)474 85 94 30
 info@fremen.be
 TVA/BCE : 0735.551.790

Annexe 5 :

Localisation de la zone d'étude sur la carte de la DRIGM

Image de fond :

Extrait des ressources en ligne du SPW : Zones de contraintes karstiques / Karst / zones de consultation de la DRIGM

Dossier :

P_2023_94_SCHYNS_Hautgné_phy

Dessinateur :

SA. RYS

Echelle :

1:5.000

Maître d'ouvrage :

/

Date :

09-11-2023

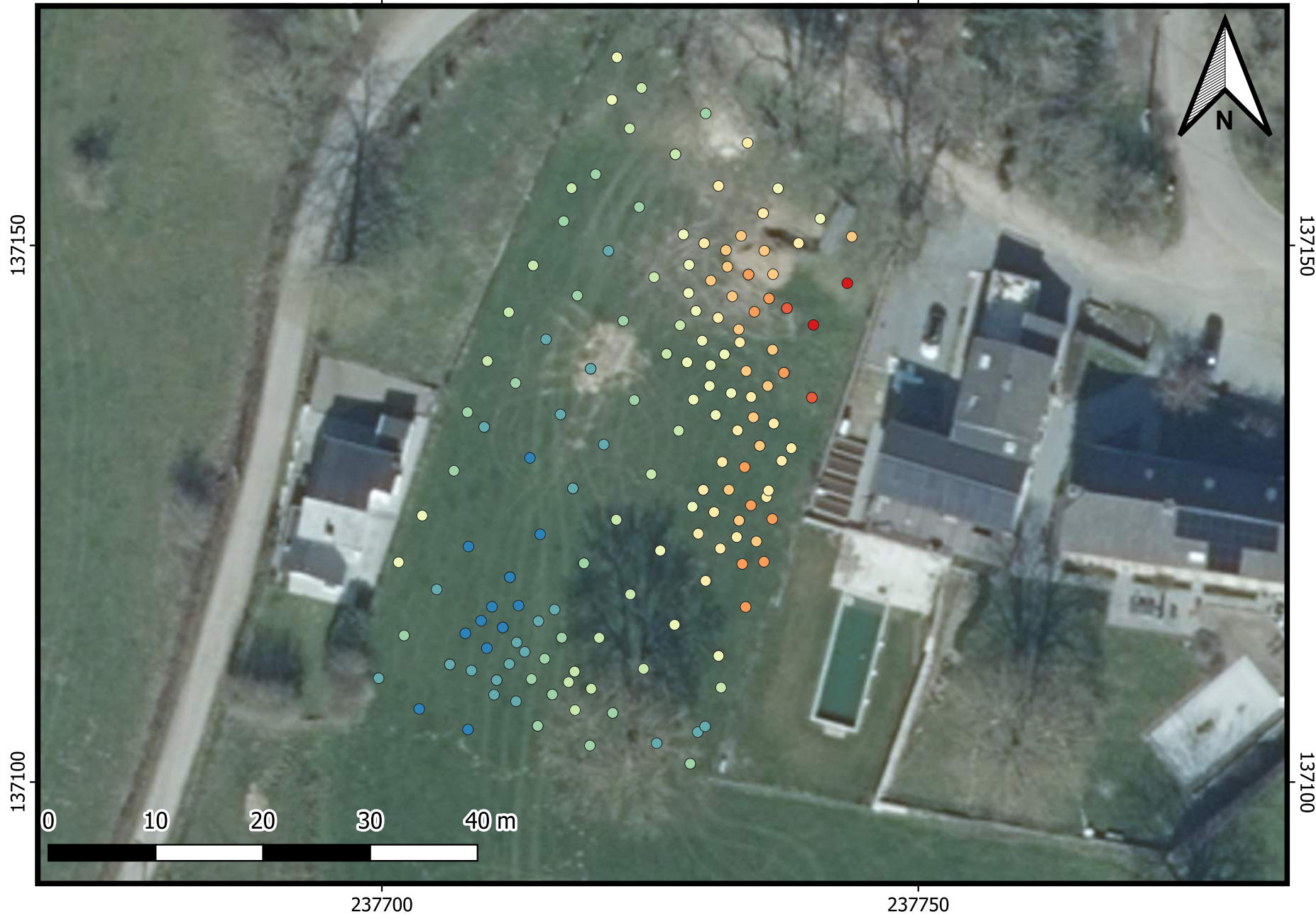
Format
Papier :
A4

Annexe 6 : microgravimétrie – Corrections topographiques

Légende :

(mGal)

- 0,2854 - 0,2865
- 0,2865 - 0,2877
- 0,2877 - 0,289
- 0,289 - 0,2902
- 0,2902 - 0,2919
- 0,2919 - 0,2932
- 0,2932 - 0,2945
- 0,2945 - 0,2961
- 0,2961 - 0,2985
- 0,2985 - 0,3027



EPSG:31370



FREMEN GEO S.R.L
 Rue des combattants 33
 4130 Esneux
 Tél. +32 (0)474 85 94 30
 info@fremen.be
 TVA/BCE : 0735.551.790

Annexe 6 :
 Corrections (mGal) liées aux variations topographiques présentes
 autour des points de mesure gravimétrique.

Image de fond :
 Extrait de l'orthophotos de 2021 (géodonnée du SPW - 06/08/2021)

Dossier :
 P_2023_94_SCHYNS_Hautgné_phy

Dessinateur :
 A. RYS

Echelle :
 1:500

Maître d'ouvrage :
 /

Date :
 13-11-2023

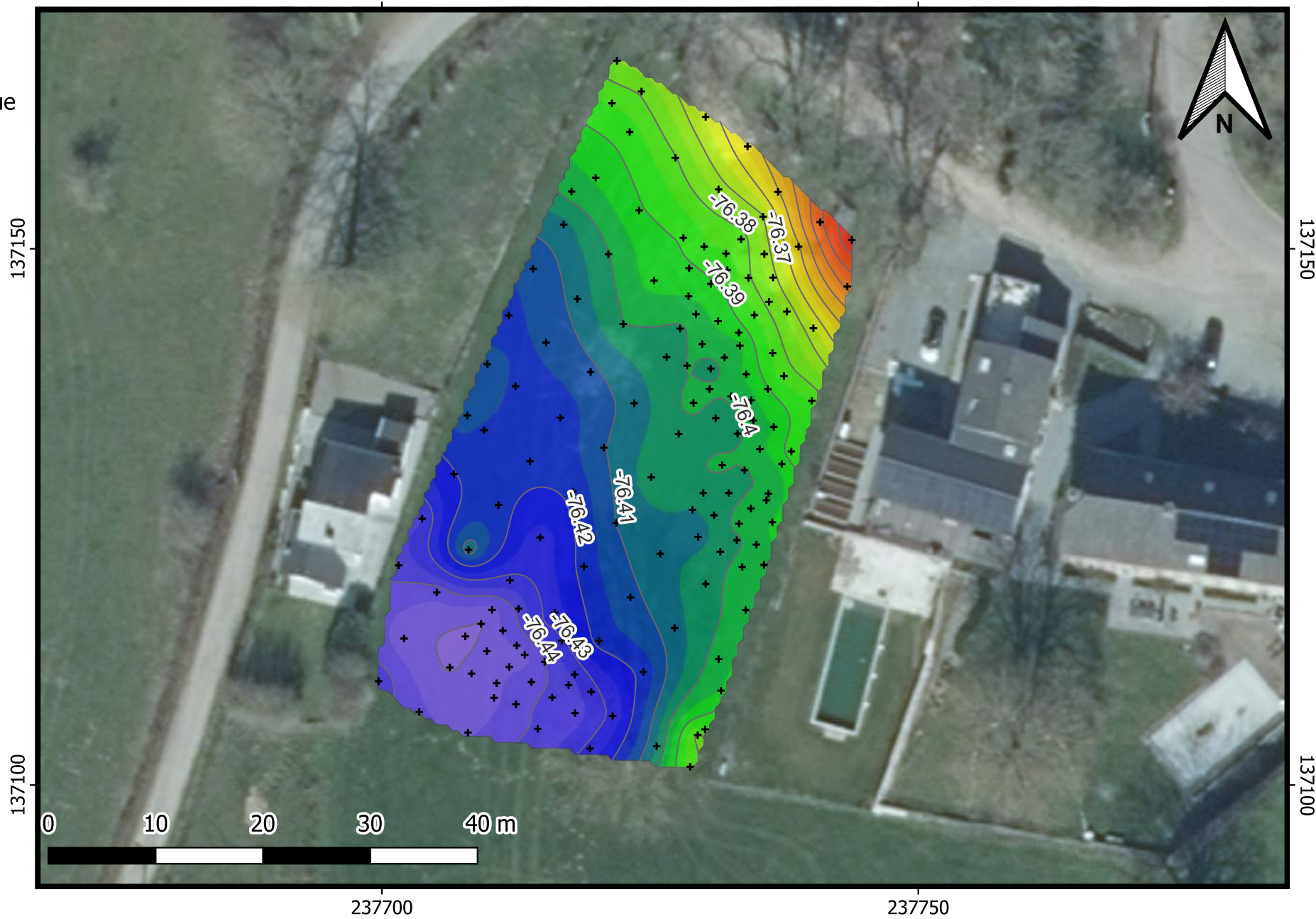
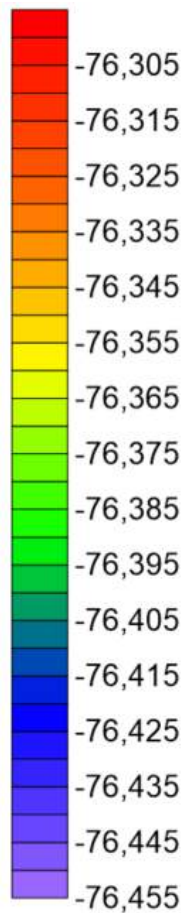
**Format
 Papier :**
 A4

Annexe 7 : microgravimétrie – Carte de l'anomalie de Bouguer complète

Légende :

- + Points de mesure microgravimétrique

(mGal)



EPSG:31370



FREMEN GEO S.R.L
 Rue des combattants 33
 4130 Esneux
 Tél. +32 (0)474 85 94 30
 info@fremen.be
 TVA/BCE : 0735.551.790

Annexe 7 :

Anomalie de Bouguer complète calculée pour une densité de réduction de 1,8 g/cm³ (méthode d'interpolation : Krigeage)

Image de fond :

Extrait de l'orthophotos de 2021 (géodonnée du SPW - 06/08/2021)

Dossier :

P_2023_94_SCHYNS_Hautgné_phy

Dessinateur :

A. RYS

Echelle :

1:500

Maître d'ouvrage :

/

Date :

13-11-2023

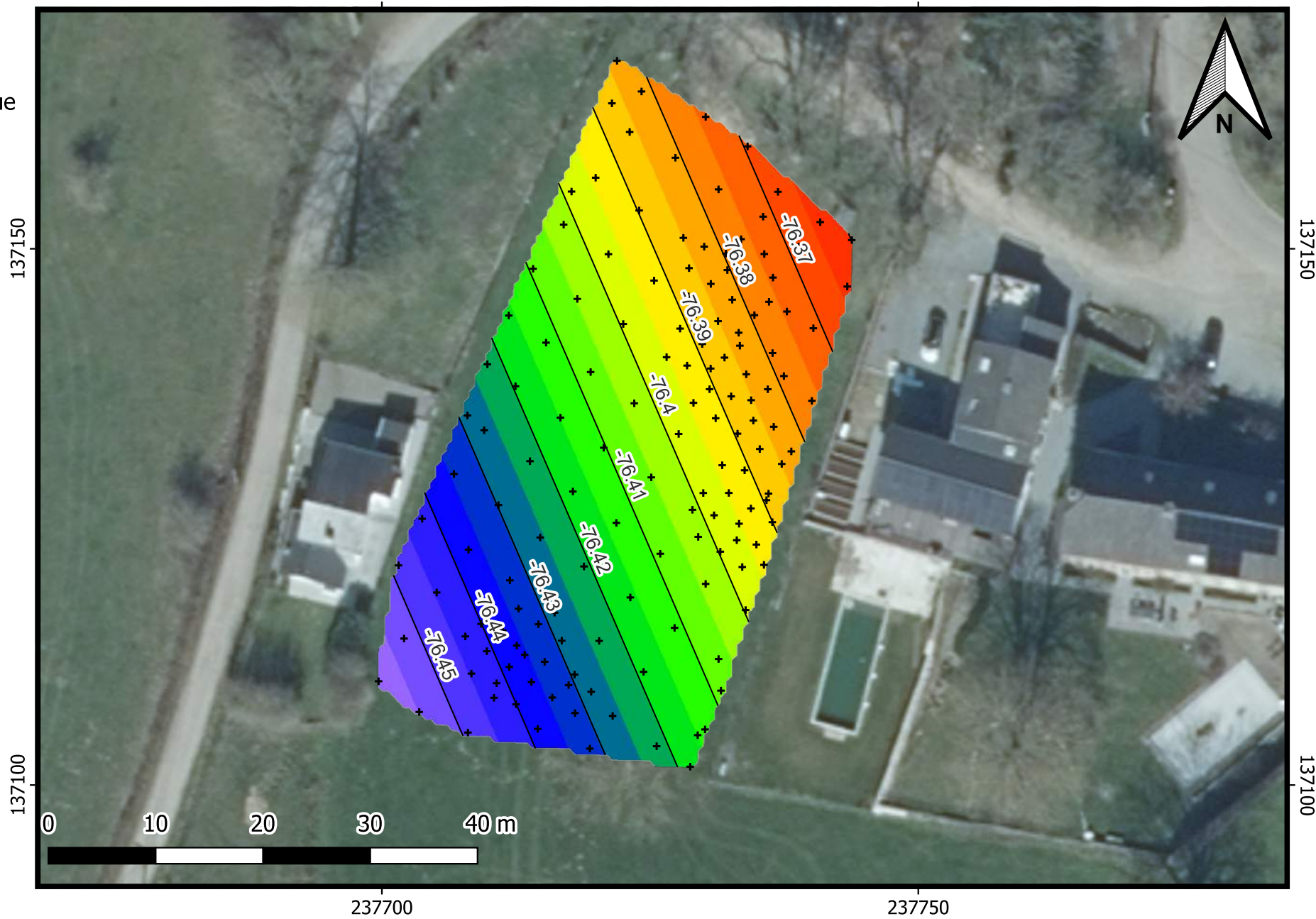
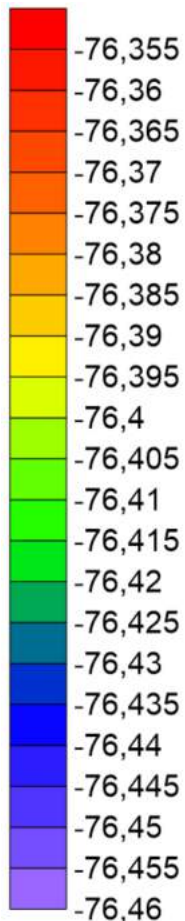
Format Papier :
A4

Annexe 8 : microgravimétrie – Carte de l’anomalie régionale

Légende :

- + Points de mesure microgravimétrique

(mGal)



EPSG:31370



FREMEN GEO S.R.L
 Rue des combattants 33
 4130 Esneux
 Tél. +32 (0)474 85 94 30
 info@fremen.be
 TVA/BCE : 0735.551.790

Annexe 8 :

Carte d'anomalie régionale obtenue par application d'un filtre passe-bas de type régression polynomiale de degré 1 à l'anomalie de Bouguer complète (masse volumique du terrain 1,8 g/cm³)

Image de fond :

Extrait de l'orthophotos de 2021 (géodonnée du SPW - 06/08/2021)

Dossier :

P_2023_94_SCHYNS_Hautgné_phy

Dessinateur :

A. RYS

Echelle :

1:500

Maître d'ouvrage :

/

Date :

13-11-2023

Format
Papier :
A4

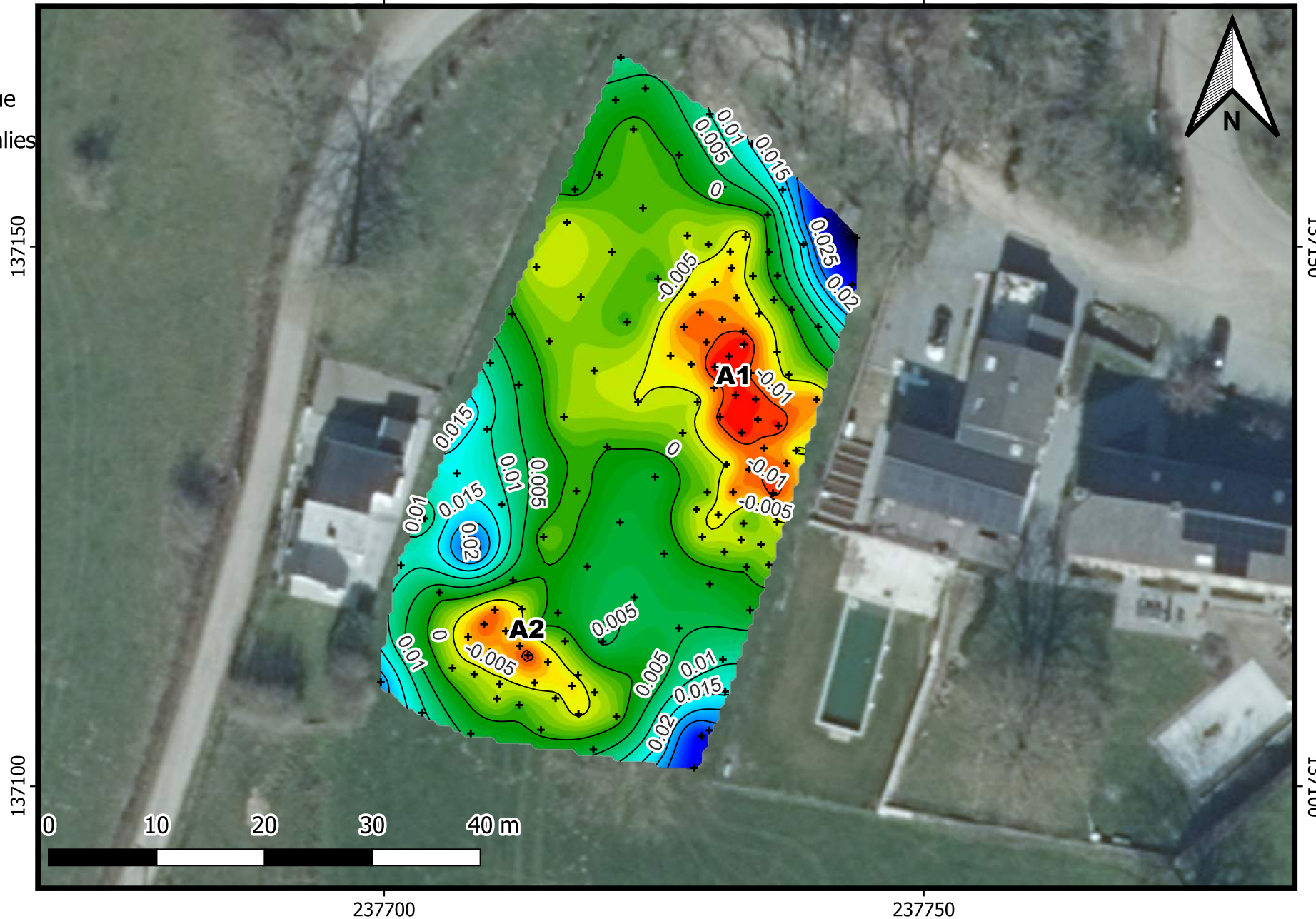
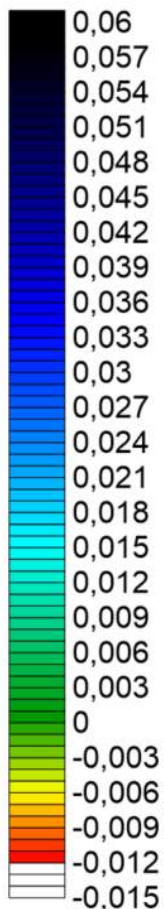
Annexe 9 : microgravimétrie – Carte de l’anomalie résiduelle

Légende :

+ Points de mesure microgravimétrique

A1 Principales anomalies négatives

(mGal)



EPSG:31370



FREMEN GEO S.R.L
Rue des combattants 33
4130 Esneux
Tél. +32 (0)474 85 94 30
info@fremen.be
TVA/BCE : 0735.551.790

Annexe 9 :

Carte d'anomalie résiduelle obtenue par soustraction de l'anomalie régionale (Annexe 8) à l'anomalie de Bouguer (Annexe 7) (masse volumique du terrain : 1,8 g/cm³)

Image de fond :

Extrait de l'orthophotos de 2021 (géodonnée du SPW - 06/08/2021)

Dossier :

P_2023_94_SCHYNS_Hautgné_phy

Dessinateur :

A. RYS

Echelle :

1:500

Maître d'ouvrage :

/

Date :

13-11-2023

Format Papier :
A4

Annexe 10 : tomographie électrique

Tomographie électrique TE01

Implantation



Données techniques

Date de réalisation des mesures : 17/10/2023
 Dispositif de mesure : Terrameter LS2
 Protocole de mesure : WennerXL
 Logiciel d'inversion : RES2DINV
 Espacement électrodes : 1,5 m
 Longueur totale du profil : 94,5 m

Coordonnées du profil

X début (m, Lambert 72) : 237752,280
 Y début (m, Lambert 72) : 137162,460
 X fin (m, Lambert 72) : 237694,411
 Y fin (m, Lambert 72) : 137087,205

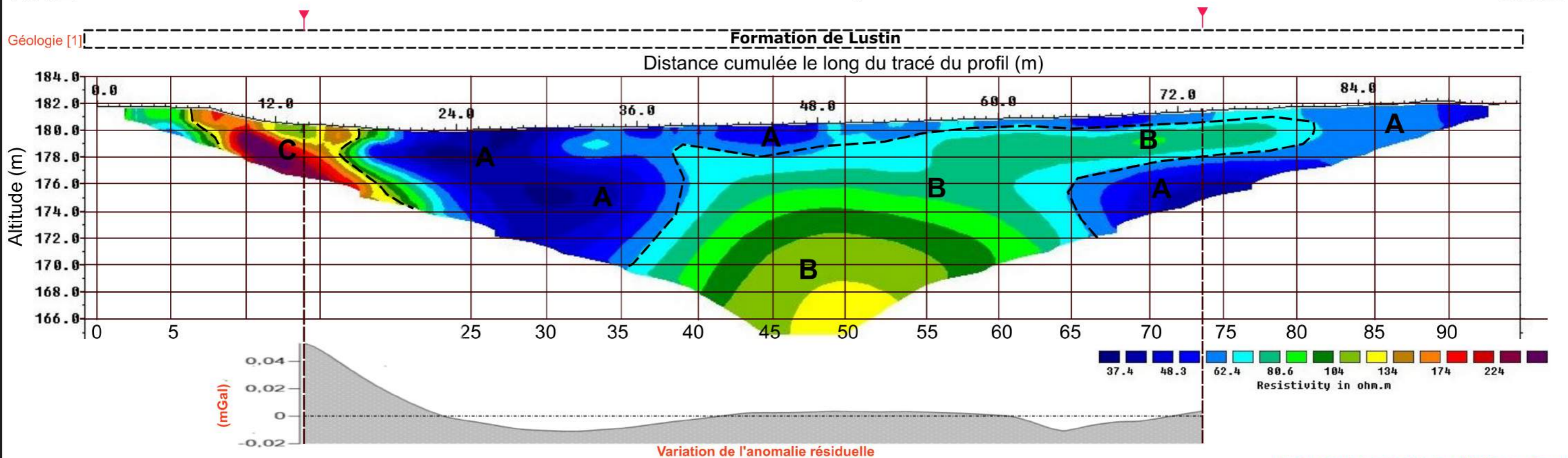
Légende

- Formation géologique recoupée
- Evolution de l'anomalie résiduelle
- Délimitation de la zone investiguée par microgravimétrie

NNE

Résultats et interprétation

SSO



Trois entités électriques identifiées :

- A :** Cette entité est présente en surface et en profondeur, s'étendant entre les cumulées 17,5 à 93 mètres. Elle est également observée sous l'entité B entre les cumulées 65 et 81,5 m. Son épaisseur varie de 2 à 8 mètres. Les épaisseurs les plus importantes sont observées entre les cumulées 17,5 et 38 (environ 8 m). Résistivité : entre 37 et 62 ohm.m.
- B :** Cette entité se trouve sous l'entité A, située entre les cumulées 35 et 83 mètres. L'épaisseur visible de cette entité est variable, allant de 2 à 12 mètres (épaisseur visible maximale). Résistivité : entre 62 et 130 ohm.m
- C :** Cette entité se trouve au nord du profil, située entre les cumulées 6,5 et 17,5 mètres. L'épaisseur visible maximale de cette entité est d'environ 4 mètres. Résistivité : entre 130 à plus de 220 ohm.m

Interprétation géologique des entités électriques

(à vérifier par observation directe via sondages, forages, etc.) :

- A :** Terrains superficiels à terrains meubles
- B :** Terrains meubles à terrains indurés (roche altérée)
- C :** Roche saine à altérée



FREMEN GEO S.R.L.
 Rue des Combattants 33
 4130 ESNEUX

Tél. +32 (0)474 85 94 30
 info@fremen.be
 TVA/BCE : 0735.551.790

ANNEXE 10 :
 Tomographie électrique TE01 : fiche technique

Dossier :
 P_2023_94_SCHYNS_Hautgné_phy

Format papier :
 A4