

Microgravimétrie

Caractérisation d'un ancien carreau de mine à Tamines

C. Schroeder, ULB

T. Nzali, CALCIS

V. BENES, GIMPULS

1. Introduction : méthode gravimétrique

- 1.1. Principe
- 1.2. Mesures et traitement
- 1.3. Résultats

2. Exemple de prospection microgravimétrique : caractérisation d'un ancien carreau de mine à Tamines

- 2.1. Projet
- 2.2. Prospection
- 2.3. Mesures
- 2.4. Résultats gravimétriques
- 2.5. Etalonnage par reconnaissances mécaniques

1. Introduction : méthode gravimétrique

1.1. Principe

La (micro)gravimétrie consiste à mesurer le champ de pesanteur terrestre.

On peut exprimer l'intensité de la pesanteur à la surface de la Terre par l'accélération d'un corps en chute libre.

Cette accélération est notée "g"

Elle est exprimée en m s^{-2} (ou m/s^2) dans les unités SI
mais l'unité pratique en microgravimétrie, encore utilisée, est le **gal = 1 cm/s²**.

(les résultats des mesures microgravimétriques sont souvent exprimés μgal ou en $\mu\text{m/s}^2$ (= 100 μgal)

g se déduit de la loi de l'attraction universelle (Newton) exprimant la force d'attraction **F** entre deux corps de masses **M1** et **M2** dont les centres de gravité sont séparés par une distance **r**

$$F = G \cdot \frac{M_1 \cdot M_2}{r^2} \quad (\text{F en N ou kg m s}^{-2})$$

G : Constante gravitationnelle (constante de gravitation universelle).

Dans les unités SI : $G = 6.67428 \cdot 10^{-11} (\pm 6.7 \cdot 10^{-15}) \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ($\text{N m}^2 \text{ kg}^{-2}$)



Isaac Newton
1642 - 1727
d'après
Marcel Gotlib
1934 - 2016

Accélération "g" due à la pesanteur

Sur un corps de masse m , la surface du sol, à une distance R_T du centre de gravité de la Terre, la masse M_T de la Terre exerce donc une force F

$$F = G \cdot \frac{m \cdot M_T}{R_T^2}$$

Cette force F est le "**poids**" avec

$$F = m \cdot g \quad (\text{deuxième loi de Newton})$$

d'où

$$g = G \cdot \frac{M_T}{R_T^2}$$

avec les valeurs du rayon de la Terre : $R_T = 6370 \text{ km} = 6370 \cdot 10^3 \text{ m}$ et de la masse de la Terre : $M_T = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$,
on a $g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ ou m/s^2 (ou 981 gals), valeur moyenne bien connue.
($g = 9,78 \text{ m/s}^2$ à l'équateur et $9,83 \text{ m/s}^2$ aux pôles)

En réalité la force exercée par la Terre est l'intégrale (triple) de la force $dF = G \cdot m \cdot \frac{dM}{r^2}$

exercée par une masse élémentaire de la Terre dM se trouvant à une distance r du corps sur lequel elle s'exerce.
 V étant le volume de la Terre, la force F exercée sur un corps de masse m vaut donc

$$F = \iiint_V dF \quad \text{avec} \quad M_T = \iiint_V dM$$

Ce qui, en pratique, signifie que

les masses les plus proches de l'instrument de mesure ont l'influence la plus importante sur la valeur de g en ce point.

1.2. Mesures et traitement

La détermination de g se fait avec un **gravimètre** qui n'est autre qu'un peson (dynamomètre) perfectionné. La variation de longueur du ressort est fonction de la variation du **poids**, donc de la **variation de g** .

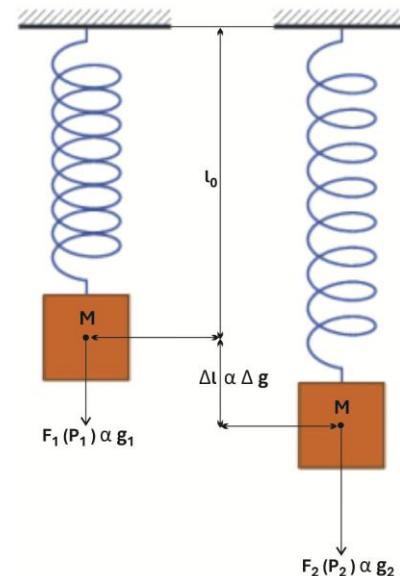
Les microgravimètres permettent de réaliser les mesures avec une *résolution de $1 \mu\text{gal}$ (soit 1 milliardième de la pesanteur)* et une *répétabilité de $5 \mu\text{gals}$* .

Les fabricants ne sont pas très nombreux.

Lacoste-Romberg et Scintrex sont les plus répandus (fusionnés depuis 2001 en Lacoste & Romberg Scintrex Ltd. , LRS). Il y a(vait) aussi Worden, Sodin etc.



Lacoste-Romberg Modèle D (ULg-LGIH - UCL-LGC)



Scintrex (LRS) CG-6

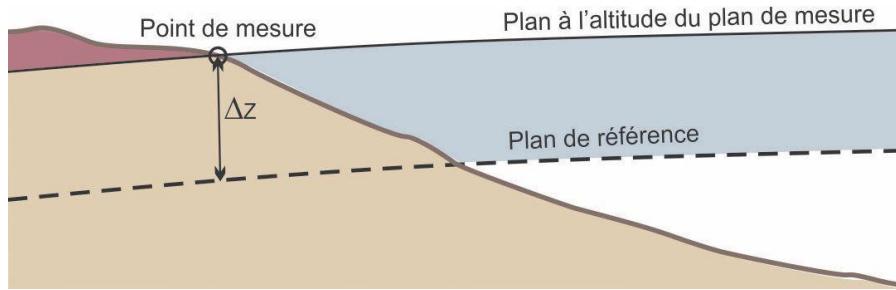


Les gravimètres utilisés ne mesurent donc pas la valeur absolue de **g** mais sa ***variation*** d'un point à l'autre. Peu importe car pour la prospection gravimétrique, ce sont uniquement les ***anomalies*** qui sont recherchées.

Une fois les mesures prises, il faut éliminer toutes les causes de variation de g "extérieures" c'est-à-dire autres que les variations de densité du sous-sol.

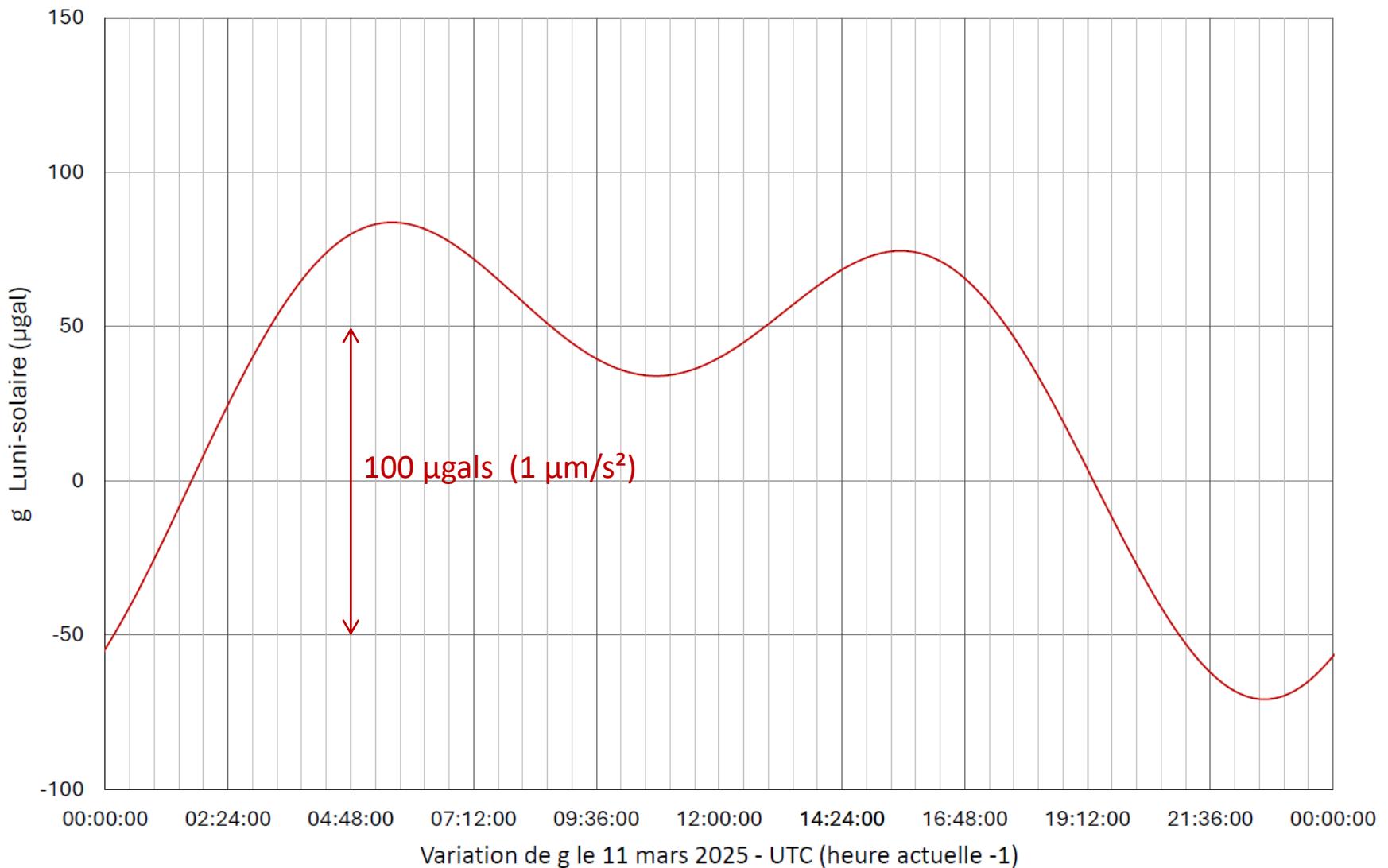
C'est le rôle des "**corrections**" qui prennent en compte, pour chaque point de mesure :

1. la latitude (sous 45°) : variation de 0.8 µgal par mètre en direction N-S
2. l'altitude : 2.2 µgals par centimètre
ce qui impose un lever topographique précis de chaque point de mesure
3. l'effet "topographique" (de relief) : prend en compte l'écart entre le plan horizontal de référence au niveau du point de mesure et la topographie réelle



4. l'influence des masses voisines, constructions, remblais etc.
Les deux dernières corrections peuvent parfois dépasser les 500 µgals

5. la variation de pesanteur au cours de la journée due à l'**effet luni-solaire** résultant de l'attraction de ces astres et de la marée marée terrestre (quelques dizaines de cm de variation d'altitude du sol par jour)



1.3. Résultats

Après ces corrections, on obtient l'**anomalie de Bouguer brute**.

Pour les besoins géotechniques, la variation de la pesanteur due aux structures géologiques "profondes" doit être éliminée pour ne conserver que les variations de pesanteur dues aux variations de masses (de "densité") du sous-sol proche.

Il est donc nécessaire de déterminer la **composante régionale** du signal gravimétrique.

Ceci peut se faire par diverses méthodes (réalisation d'antennes allant au delà du site étudié, lissage des mesures brutes etc.).

Après avoir déduit la variation régionale des valeurs de l'anomalie de Bouguer brute, on obtient l'**anomalie de Bouguer résiduelle** qui traduit les **variations de densité du sous-sol proche**.

Il ne "reste plus qu'à" relier ces variations de densité du sous-sol aux phénomènes géologiques ou anthropiques recherchés.

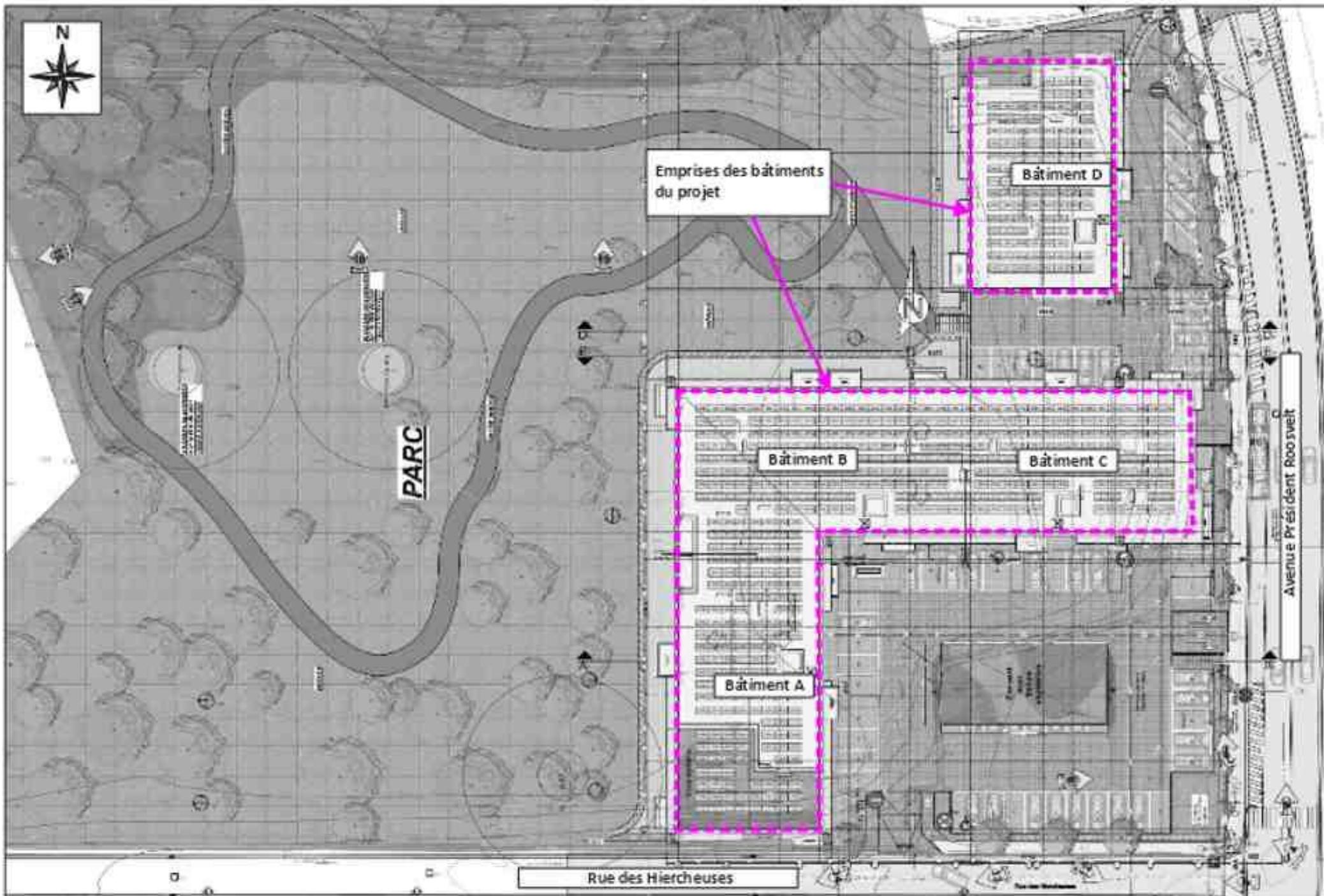
Des logiciels divers permettent de simuler l'effet gravitaire de volumes de densités et formes diverses.

2. Application : caractérisation d'un ancien carreau de mine à Tamines

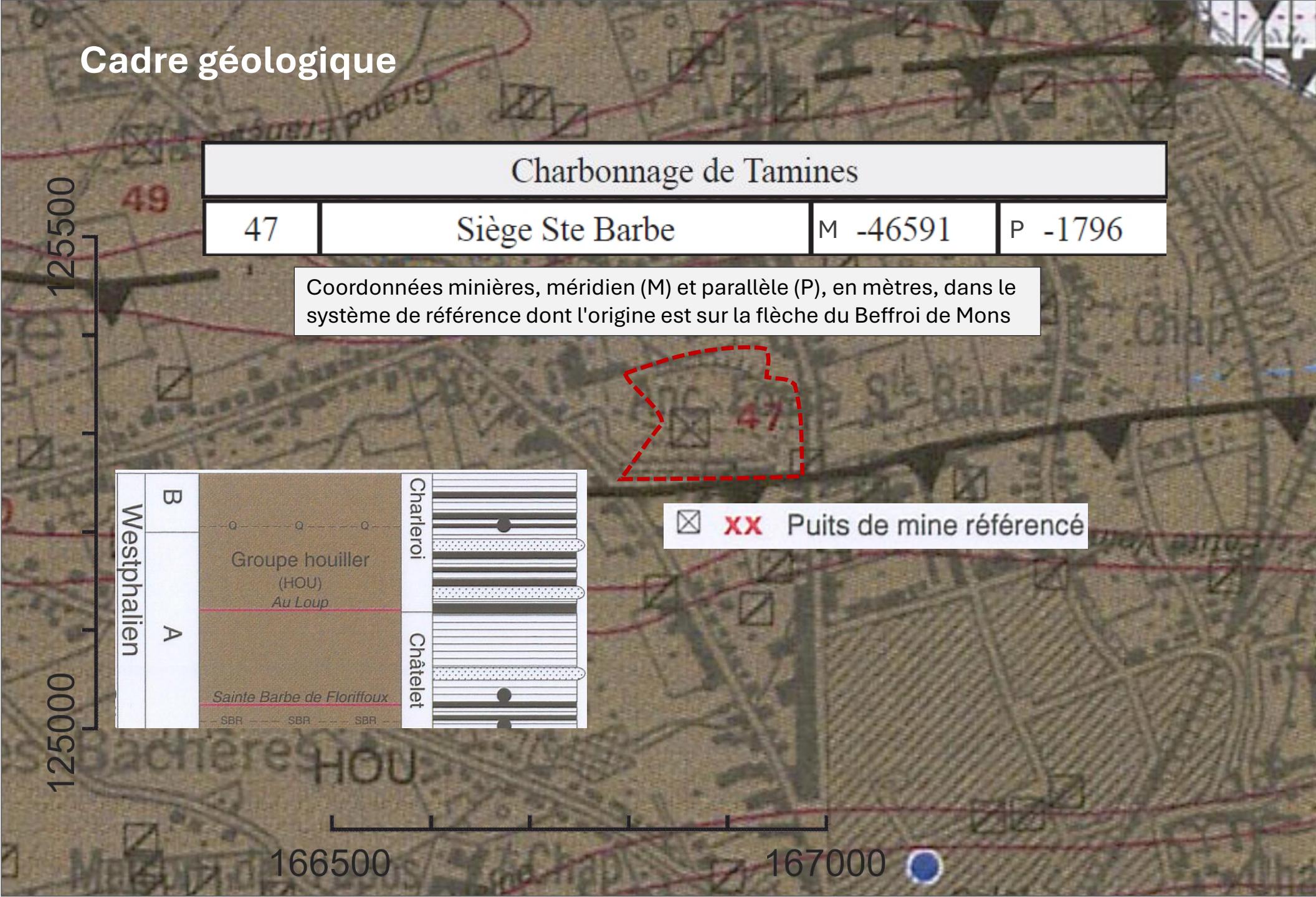
2.1. Projet

Ancien site Ste Barbe du Charbonnage de Tamines, envisagé par la société Galère pour la réalisation d'un ensemble immobilier (terrain en partie remblayé, sans bâtiments ni vestiges).





Cadre géologique



Problématique de l'aléa "Puits de mines"

La présence avérée de puits de mines ainsi que la possibilité de la présence d'autres puits

sont confirmées sur WalOnMap où les "zones de consultation" sont renseignées

avec possibilité de demander une Fiche d'Informations Sous-sol (FISs) normalisée

à

SPW-ARNE
Département de l'Environnement et de l'Eau (DEE)
Direction des Risques Industriels,
Géologiques et Miniers (DRIGM)
Service géologique de Wallonie

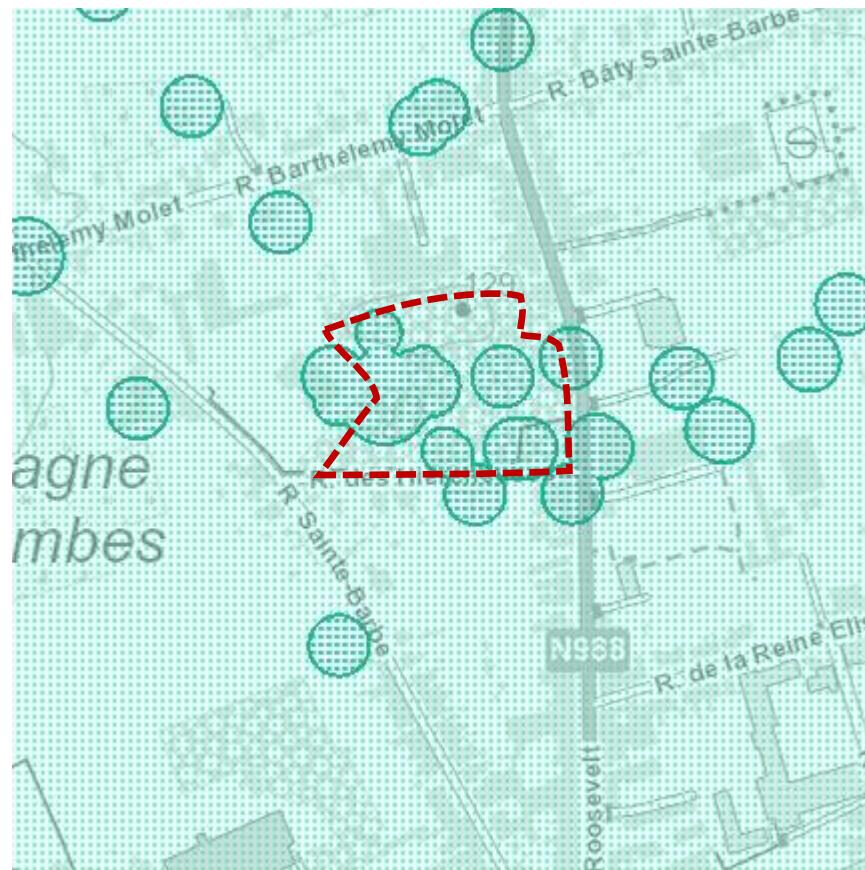
Présence de puits de mines

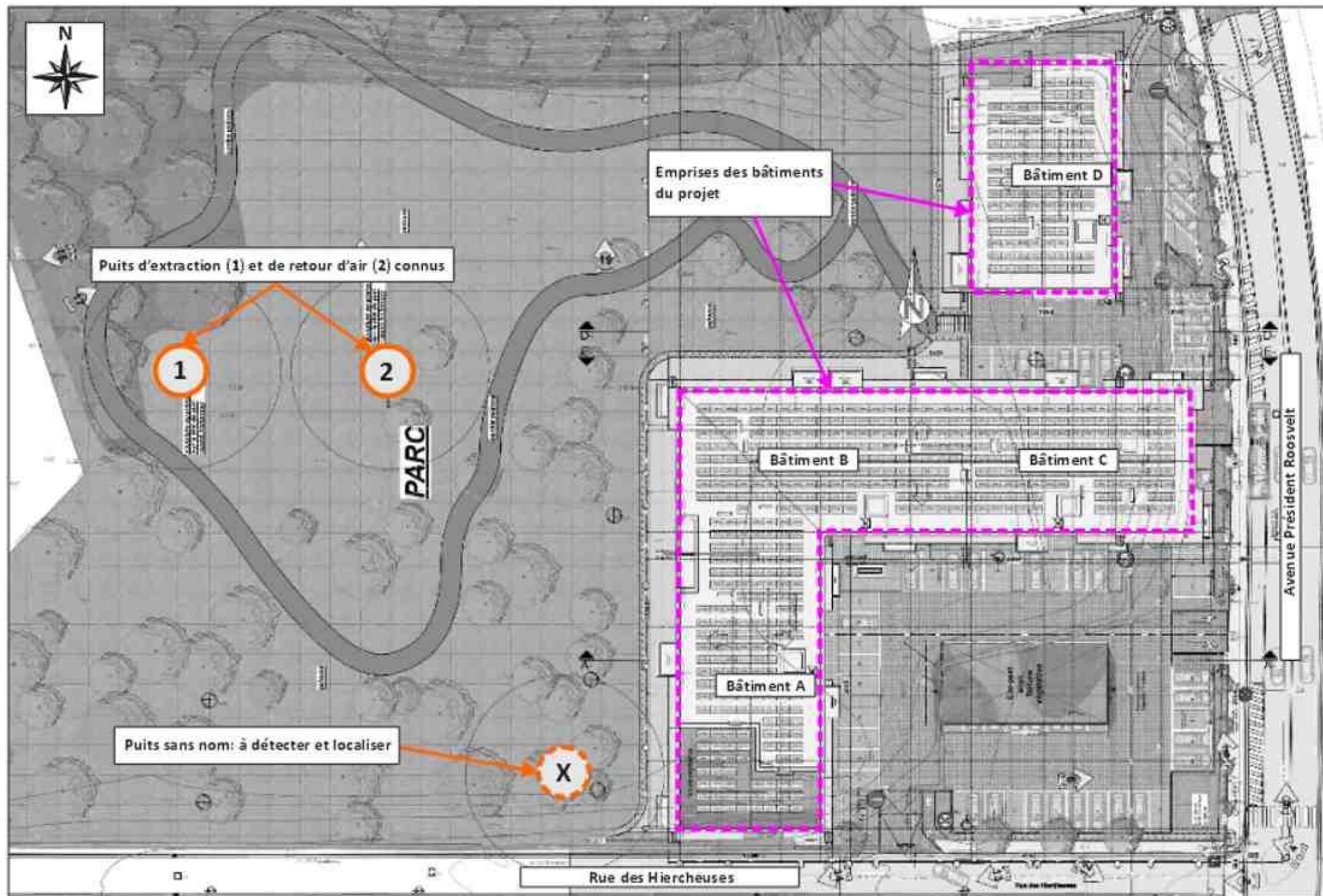


Présence de puits de mines

Présence potentielle d'anciens puits de mines

Présence potentielle d'anciens puits de mines





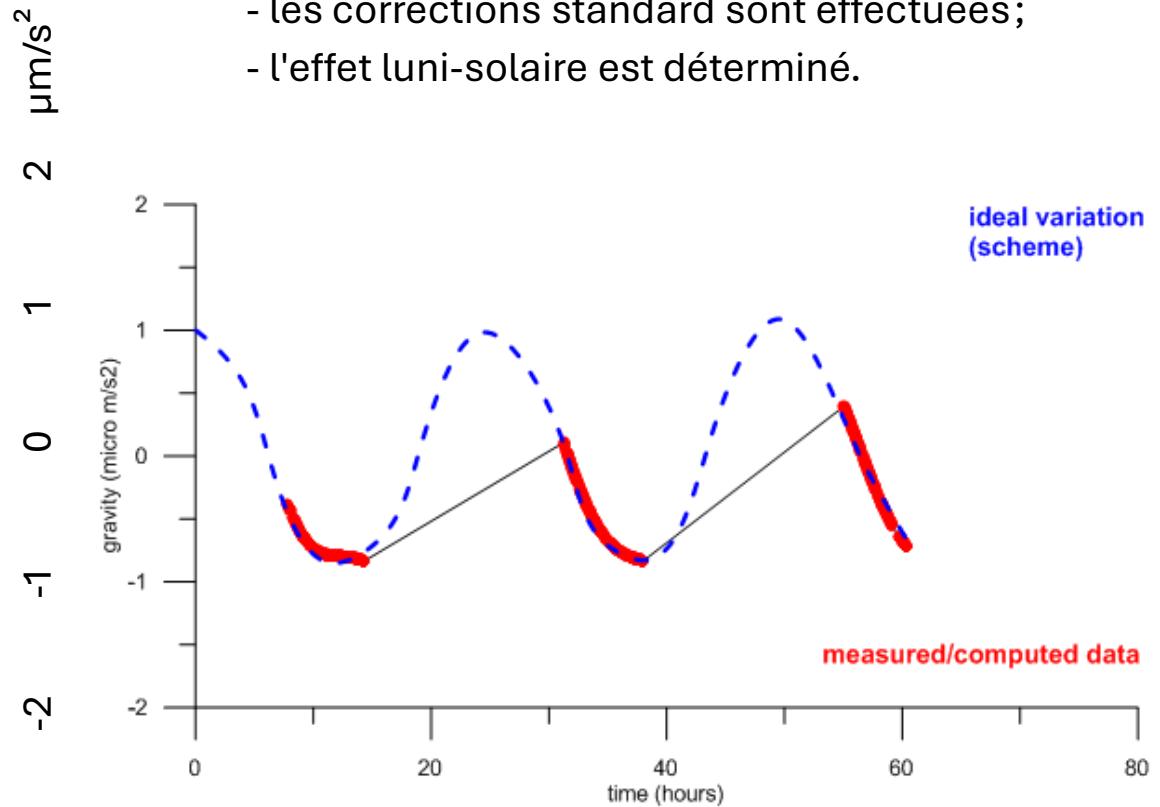
2.2. Prospection

- compte tenu de l'aléa "puits de mines", l'entreprise Galère demande une reconnaissance détaillée sur l'ensemble des emplacements prévus pour les constructions ;
- pour la détection de vides importants sous remblais, la prospection gravimétrique est tout indiquée ;
- cependant, avant de mettre la méthode en œuvre, une analyse du problème est effectuée pour déterminer si la méthode pourra fournir des résultats interprétables sans ambiguïté ;
- les dimensions des puits (6 m de diamètre, non remblayés en totalité) sont suffisantes pour provoquer une anomalie gravimétrique nettement détectable avec le gravimètre utilisé (estimée à quelques dizaines de µgals), même sous quelques mètres de remblais ;
- compte tenu de l'extension de l'effet gravitaire des puits, les points de mesure ont été implantés selon un maillage carré de 4 m ;
- comme un des puits repérés par le SPW est accessible (l'autre est recouvert de remblais peu accessibles), il est décidé de couvrir aussi cette zone à des fins d'étalonnage.

2.3. Mesures

- les mesures gravimétriques comportant 250 points sont réalisées par Calcis

- appareil Scintrex CG-6 ;
- les corrections standard sont effectuées;
- l'effet luni-solaire est déterminé.



la variation journalière sur le terrain est de l'ordre de 1 $\mu\text{m/s}^2$ (100 μgals)
(comparable à celle du 11 mars 2025).



Scintrex (LRS) CG-6

2.4. Résultats

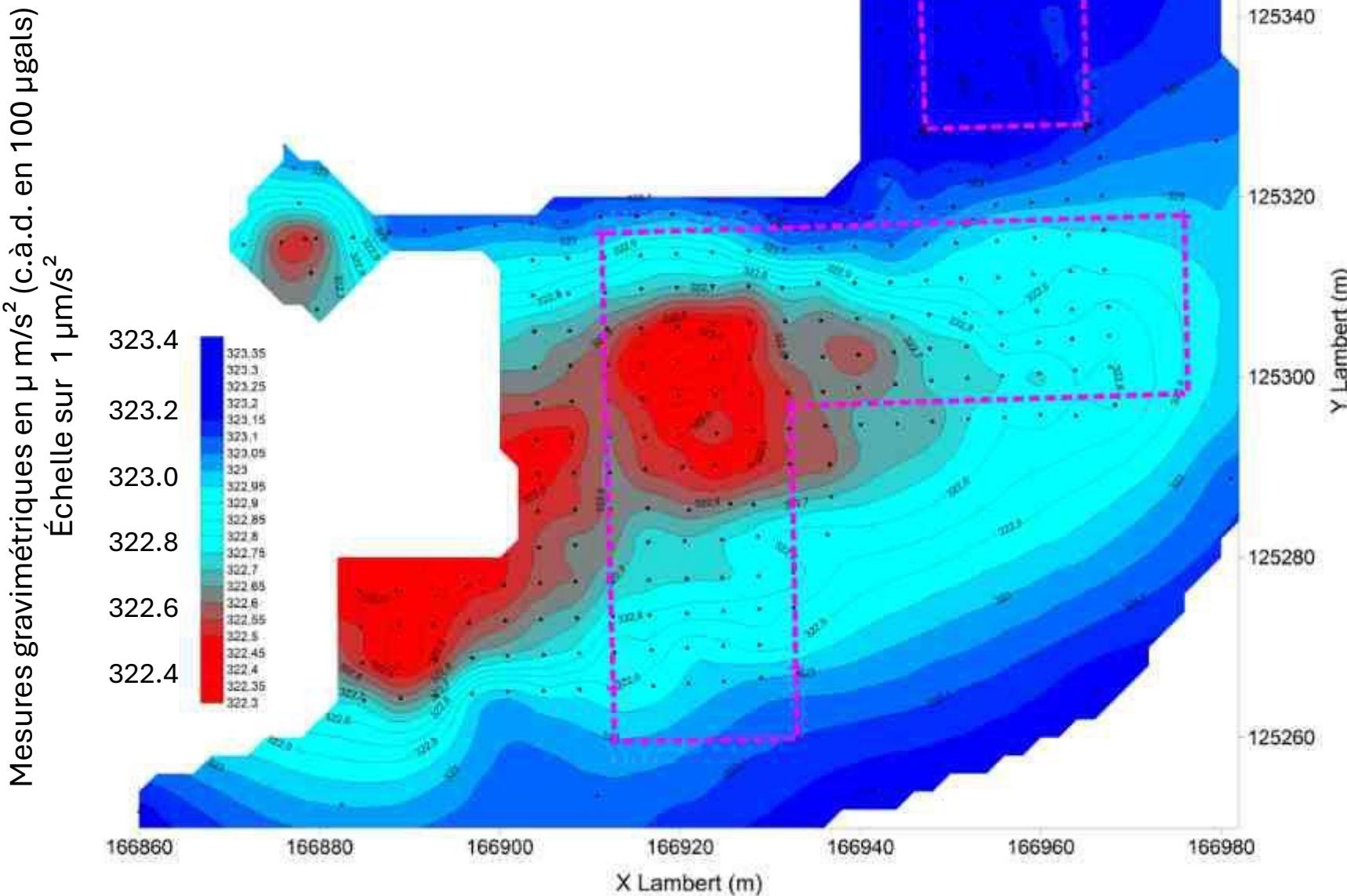
Carte d'anomalie de Bouguer brute

La carte présente les valeurs de "g" mesurées au gravimètre.

Les mesures sont faites avec une résolution de $0.01 \mu\text{m/s}^2$ et une répétabilité de $0.05 \mu\text{m/s}^2$.

L'écart entre les mesures extrêmes est de l'ordre de $1 \mu\text{m/s}^2$ (soit 100 µgals).

Cette valeur est significative et indique clairement qu'il y a des variations de densité dans le sous-sol proche.



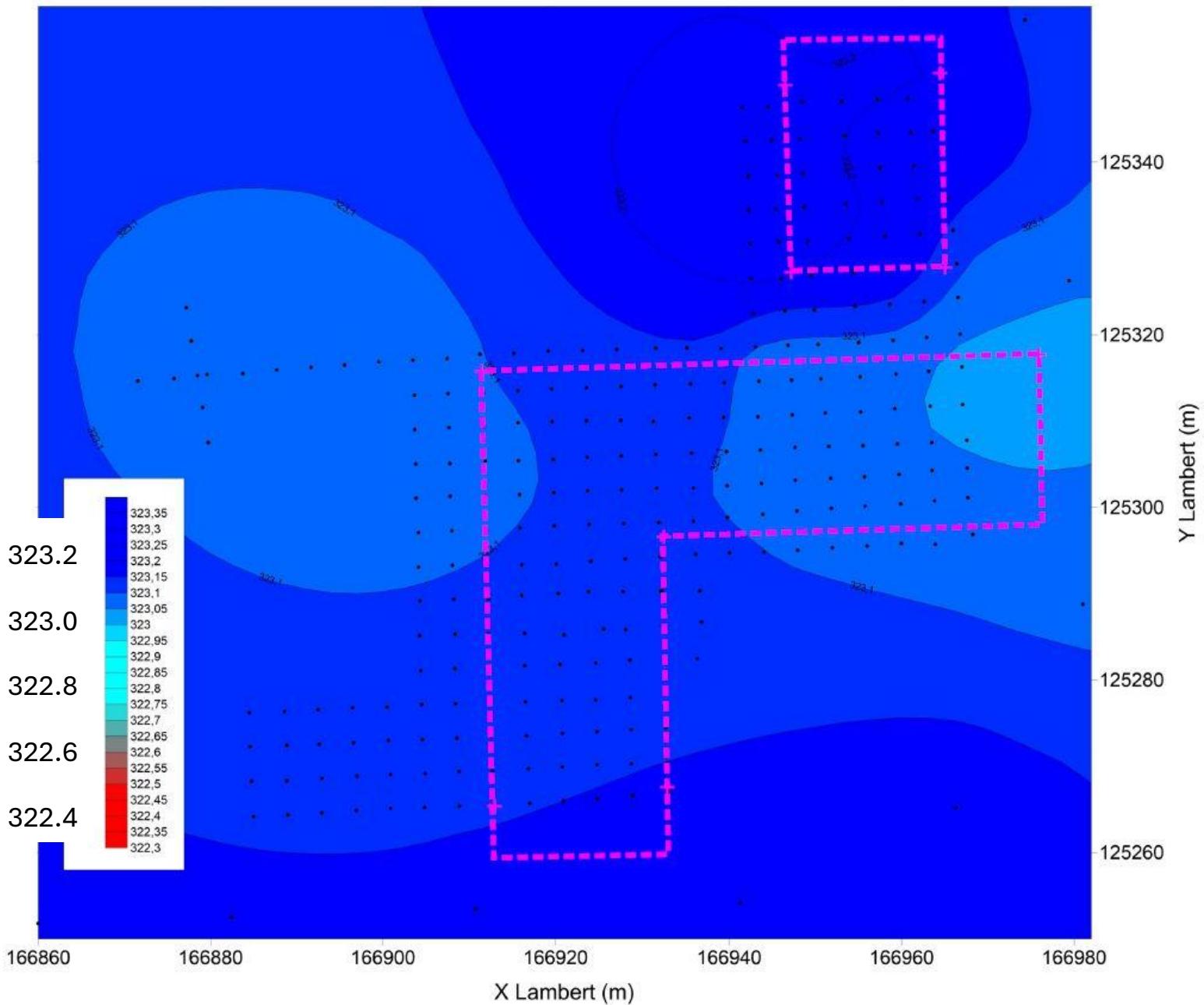
Variation régionale de la pesanteur

Les mesures de l'anomalie de Bouguer brute sont "lissées" par l'ajustement d'une surface sur le nuage de points de mesure.

L'ajustement dépendant des paramètres injectés dans le modèle, leur choix conditionne les valeurs de l'anomalie de Bouguer résiduelle (mais peu ou pas leurs variations relatives).

La qualité et l'expérience du géophysicien font la différence !

Mesures gravimétriques en $\mu\text{m/s}^2$ (c.à.d. en 100 μgals)



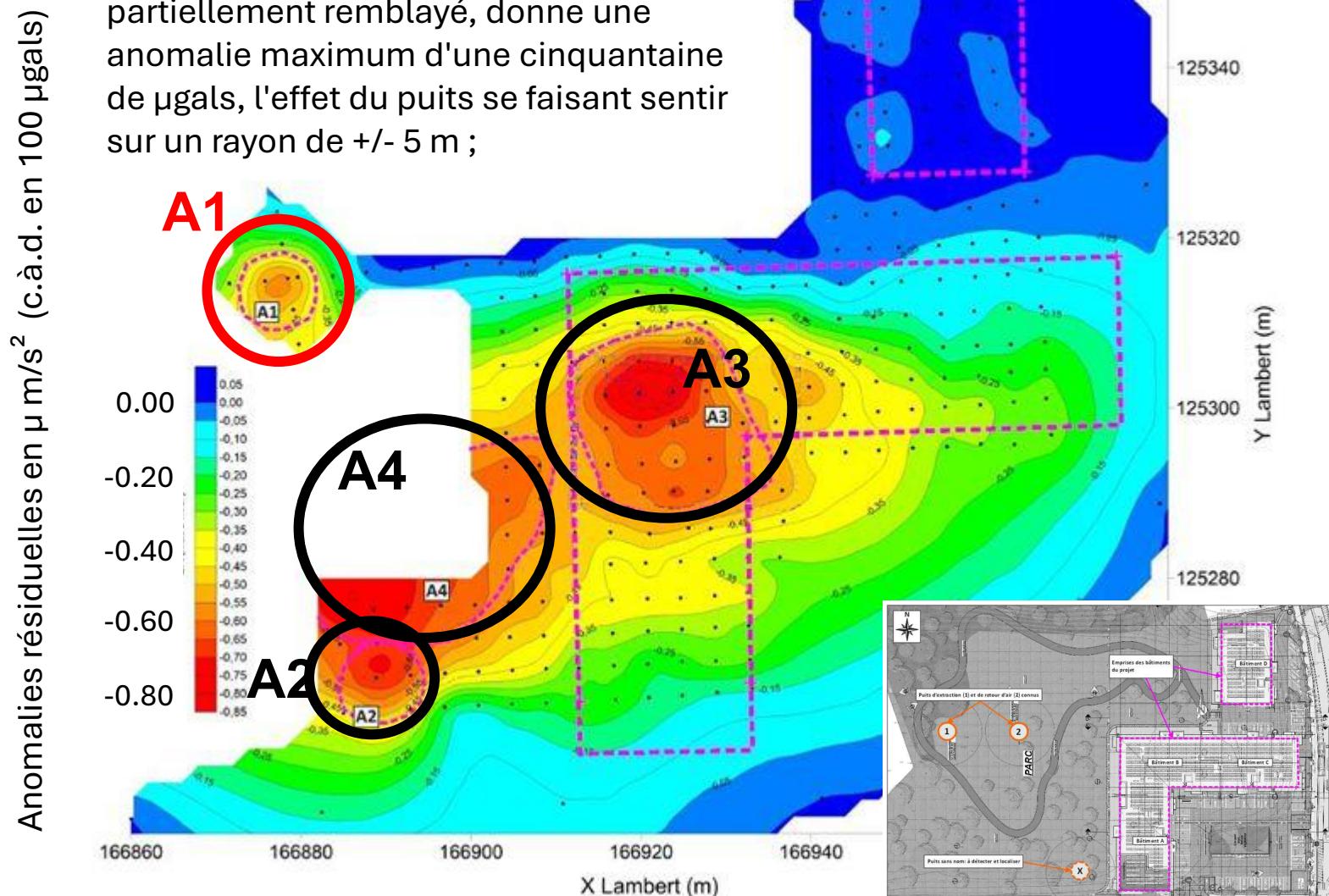
Carte d'anomalies résiduelles

Cette carte traduit les variations de densité du sous-sol proche.

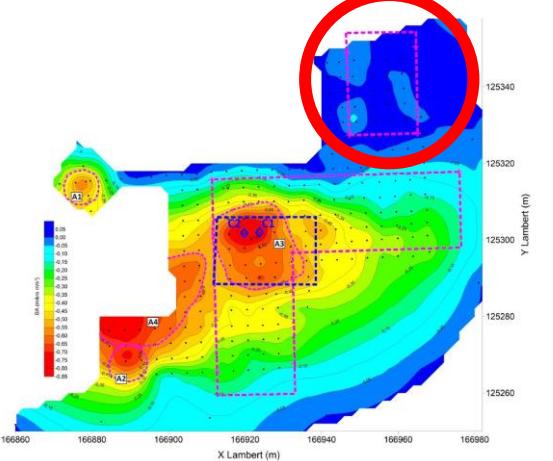
- dans la zone nord, le sous-sol est assez homogène, sans contraste de densité par rapport à la régionale ;
- deux anomalies, A2 et A4 (80 µgals) se marquent dans la zone sud-est. Elles pourraient correspondre au puits non identifié mais se situent en dehors de la zone à construire ;
- une forte anomalie A3 (80 µgals) est repérée dans l'emprise des bâtiments. Son intensité impose de vérifier l'origine de cet important déficit de pesanteur ;
- l'entreprise met à disposition les engins de terrassement nécessaires pour investiguer le sous-sol.

- les mesures au droit du puits identifié (A1) sont cohérentes avec l'objet investigué :

La modélisation d'un puits de 3 m de rayon et d'une vingtaine de m de profondeur, partiellement remblayé, donne une anomalie maximum d'une cinquantaine de µgals, l'effet du puits se faisant sentir sur un rayon de +/- 5 m ;



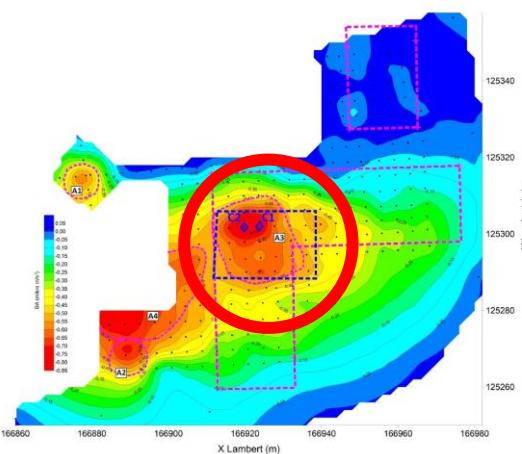
4. Étalonnage par reconnaissances mécaniques



Zone sans anomalie

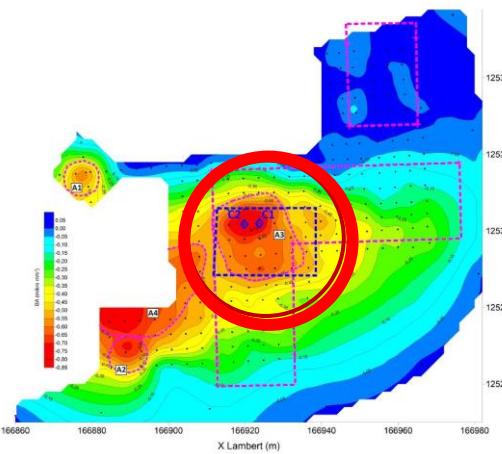


Anomalie centrale - déficit de gravité de $0.80 \mu\text{m}^2/\text{s}$ ($80 \mu\text{gals}$) - 1



constatation de l'existence d'un mur

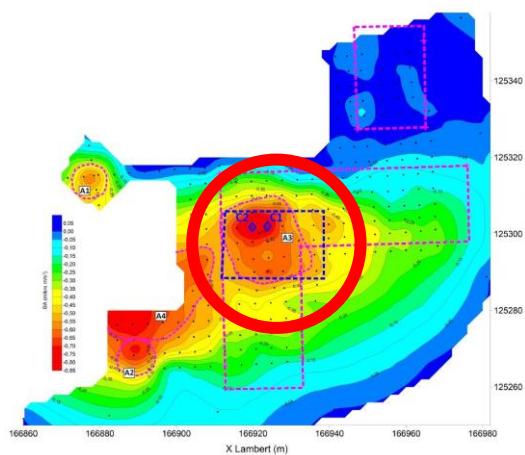
Anomalie centrale - déficit de gravité de $0.80 \mu\text{m}^2/\text{s}$ ($80 \mu\text{gals}$) - 2



dégagement de murs - découverte de galeries



Anomalie centrale - déficit de gravité de $0.80 \mu\text{m}^2/\text{s}$ ($80 \mu\text{gals}$) - 2





Anomalie centrale - déficit de gravité de $0.80 \mu\text{m}^2/\text{s}$ ($80 \mu\text{gals}$) - 3

Les galeries mènent à un réservoir souterrain, mal remblayé, ce qui explique l'ampleur et l'extension de l'anomalie détectée.

L'anomalie provoquée par un volume de dimensions $+/- 4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, de densité supposée valant 0.6 ($+/-$ le tiers de celle des terrains en place) et recouvert d'1 m d'épaisseur de terrains compacts est de l'ordre de $70 \mu\text{gals}$ et diminue en fonction de la distance de la même manière que les mesures.

