

N° d'ordre : /DSTU/2020



## MEMOIRE

Présenté

à



L'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCCEN  
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCES DE LA  
TERRE ET DE L'UNIVERS  
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Pour obtenir

## LE DIPLÔME DE MASTER PROFESSIONNEL

Spécialité

**Géo-Ressources**

par

Ousseina MODY ISSAKA

---

**DETECTION DES CAVITES SOUTERRAINES DANS UN MILIEU  
URBAIN : CAS DU MILIEU KARSTIQUE DE BOUDJELIDA  
(WILAYA DE TLEMCCEN)**

---

Soutenu le 30 septembre 2020 devant les membres du jury :

Salamet MAHBOUBI, MC (B), Univ. Tlemcen  
Boualem BOUYAHIAOUI, Maître de Recherche (A), CRAAG  
Abbas MAROK, Professeur, Univ. Tlemcen  
Kamar Eddine BENSEFIA, MA (A), Univ. Tlemcen

Président  
Encadreur  
co-Encadreur  
Examineur

## DEDICACES

*A Mon très cher Papa;*  
*A Ma très chère Maman;*  
*A Mes deux familles : Celle du Niger et celle de l'Algérie ;*  
*A Mes amis(es) ;*  
*A Tous ceux que j'aime*

*«La science ne renverse pas à mesure ses édifices ; mais elle y ajoute sans cesse de nouveaux étages et, à mesure qu'elle s'élève davantage, elle aperçoit des horizons plus élargis.»*

Berthelot

## SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS</b>	3
<b>RESUME</b>	4
<b>ABSTRACT</b>	5
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	6

### Premier chapitre : **CADRE GENERAL DE L'ETUDE**

<b>I. RAPPEL SUR LA PROSPECTION GRAVIMETRIQUE</b>	7
<b>A. Définition</b>	7
<b>B. Principe</b>	7
<b>C. Anomalie de Bouguer (AB)</b>	8
1. Attraction et potentiel gravitationnel	8
2. La valeur théorique du champ de la pesanteur	10
3. Les corrections gravimétriques	10
3.1. Correction instrumentale	10
3.2. Correction des effets de marées	11
3.3. Correction de latitude	11
3.4. Correction de Faye (d'Air libre)	12
3.5. Correction de Bouguer	12
3.6. Correction topographique	12
3.7. Isostasie et la correction isostatique	13
4. Choix de densité	15
4.1. Méthode de mesure sur échantillon	15
4.2. Méthode de Nettleton	15
4.3. Méthode de Parasnis	15
5. Calcul de l'Anomalie de Bouguer	16
<b>D. Domaine d'application</b>	16
<b>II. OBJECTIFS, ACQUISITION DES DONNEES ET TRAITEMENT</b>	16
<b>A. Objectifs</b>	16
<b>B. Acquisition des données</b>	17
1. Levé gravimétrique	17
2. Coordonnées des stations	19

3. Réalisation des mesures et détermination des valeurs de la pesanteur	20
<b>C. Traitement</b>	20
<b>III. RAPPEL SUR LA KARSTIFICATION</b>	21
<b>A. Définition</b>	21
<b>B. Relation karsts/cavités</b>	22
<b>IV. CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE</b>	22
<b>A. Cadre géographique</b>	22
1. Localisation de la zone d'étude	22
2. Localisation et superficie du site d'étude	23
<b>B. Cadre géologique</b>	23
1. Description géologique de la zone d'étude	23
2. Description géologique du site d'étude	24

## Deuxième chapitre : **ANALYSE DES DONNEES**

<b>I. ETABLISSEMENT DES CARTES GRAVIMETRIQUES</b>	25
<b>A. Carte d'anomalie de Bouguer</b>	25
<b>B. Séparation des anomalies</b>	27
1. Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 1	27
2. Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 2	28
3. Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 3	29
4. Cartes des prolongées	30
<b>II. CALCUL DES CONTRASTES DE DENSITE ET DES FORMES GEOMETRIQUES DES CORPS</b>	33
<b>III. SYNTHESE DES RESULTAS ET DISCUSSION</b>	34
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	35
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	37
<b>LISTES DES FIGURES</b>	39

## REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie ALLAH, l'Omniscient, le sage, pour tous les bienfaits qu'il m'a accordé. Parmi ces bienfaits, il m'a donné la force, le courage et la volonté de poursuivre mes études, mais surtout la santé pour que je puisse réaliser ce modeste travail de mémoire master.

Mes remerciements vont particulièrement à l'égard de mon encadreur, Monsieur **Boualem BOUYAHIAOUI**, Maître de recherche au CRAAG et mon co-encadreur, Monsieur **Abbas MAROK**, Professeur à l'université de Tlemcen, pour m'avoir proposé ce sujet et d'en avoir assuré le suivi. Merci Monsieur pour votre orientation et vos encouragements. Bref, merci pour cette chance que j'ai eu à travailler avec vous, car j'ai énormément appris.

Mes remerciements s'adressent aussi à Madame **Salamet MAHBOUBI**, Maître de conférences classe (B), d'avoir accepté de présider ce jury.

Je tiens à remercier Monsieur **Kamar Eddine BENSEFIA**, Maître-Assistant classe (A) et responsable du Master professionnel « Géo-Ressources » qui a toujours été présent pour ses étudiants. Merci aussi d'avoir bien voulu examiner ce manuscrit.

Un très grand merci aux ingénieurs du CRAAG : **Yasser BAYOU**, **Islam TOURECHE** et **Mohamed BENDALI** avec qui j'ai effectué les campagnes d'acquisition des données et qui m'ont beaucoup aidé à comprendre le principe de la méthode utilisée.

Qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde reconnaissance à Madame **Fatiha HADJI**, Madame **Lamia MAHI-YEBDRI**, Monsieur Choukri **SOULIMANE CHOUKRI**, Monsieur **Mustapha BENADLA** ainsi qu'à tous les enseignants qui nous ont tenu et guider depuis le début de ce périple chemin qui est d'acquérir le savoir.

Je ne partirais pas sans avoir remercié tous mes camarades de classe. Ça reste une expérience, et comme le dit Géorgiens : « *La sagesse et l'expérience sont les doux fruits de la vieillesse* ».

Merci à tous.

## RESUME

Dans un milieu karstique, l'existence de vides est souvent matérialisée par le comblement éventuel des sols par des matériaux de remplissage peu dense, et se manifeste à la surface par des affaissements, des zones altérées et des zones décomprimées. Ainsi, la présence de ces vides peut induire d'énorme désordre surtout en milieu urbain où le risque est beaucoup plus important.

Dans cette optique, notre travail consiste à détecter la présence des cavités souterraines (vides) dans un site urbain de Boudjelida (Nord du chef lieu de Tlemcen). Les résultats des mesures micro-gravimétriques, nous ont permis d'établir une panoplie de cartes

d'anomalies gravimétrique (carte d'anomalie de Bouguer, cartes des résiduelles, cartes de la prolongée). Ces cartes de la prolongée qui mettent en évidence la forme et l'amplitude des différentes anomalies, montrent une anomalie négative profonde et isolée. Par ailleurs, la structure causative de cette anomalie négative présente une largeur de 8 m, une épaisseur de 2.5 m, son toit est situé à une profondeur de l'ordre de 0.5 m. La modélisation montre que le déficit de masse n'est pas une cavité pure (densité de  $2.1 \text{ g/cm}^3$ ). Ce déficit de masse serait dû à un ensemble de petites zones de faibles densités.

**Mots-clés:** Prospection gravimétrique, Cavité, Milieu urbain, Boudjelida, Tlemcen.

## ABSTRACT

In a karstic environment, the existence of voids is often materialized by the eventual filling of soils with low density fill material, and manifests itself on the surface by subsidence, altered areas and decompressed zones.

Thus, the presence of these voids can induce enormous disorder, especially in urban areas where the risk is much greater. In this perspective, our work consists in detecting the presence of underground cavities (voids) in an urban site of Boudjelida (North of the chief town of Tlemcen). The results of the

micro-gravimetric measurements, allowed us to establish a set of gravity anomaly maps (Bouguer anomaly map, residuals maps, extension maps). These maps of the prolongation, which highlight the shape and amplitude of the different anomalies, show a deep and isolated negative anomaly. Furthermore, the causative structure of this negative anomaly is 8 m wide and 2.5 m thick, and its roof is located at a depth of about 0.5 m. Modeling shows that the mass deficit is not a pure cavity (density of 2.1 gcm<sup>3</sup>). This mass deficit would be due to a set of small areas of low densities.

**Key-words:** Gravimetric prospection, Cavity, Urban environment, Boudjelida, Tlemcen.

## INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, l'Algérie a connu de grands chantiers de construction d'habitats et d'immobilier de différents types et formes. Cependant ces derniers ne sont pas toujours à l'abri des conséquences que peuvent entraîner la présence des cavités qu'elles soient d'origine anthropiques ou naturelles. Ces cavités une fois oubliées, représentent un risque d'effondrement potentiellement très destructeur en milieu urbain surtout lorsqu'elles sont situées en zones sismique ou en présence d'eau d'infiltration comme c'est le cas de notre zone d'étude.

Afin de prévoir ces risques, il est donc indispensable en premier lieu d'identifier et de cartographier le site en question pour ensuite localiser les cavités susceptibles d'en être la cause.

Dans le présent travail, on se propose de mettre en œuvre la méthode de la micro-gravimétrie (l'application de la gravimétrie en sub-surface) afin de cartographier la présence d'éventuelles cavités dans le sous-sol. Cette méthode géophysique est la plus utilisée actuellement et la mieux adaptée pour la recherche des cavités en milieu urbain ou en zone industrielle, car elle est indépendante des effets électromagnétiques environnants. Il s'agit ici de mesurer, traiter, interpréter et modéliser les données issues d'un levé gravimétrique dans une assiette de terrain située dans la zone de Boudjelida (Nord du chef lieu de Tlemcen).

Après une introduction générale, nous avons organisé notre mémoire en deux (2) chapitres, étoffés par une conclusion générale.

-le premier chapitre est consacré au cadre général de l'étude, avec un rappel donné à la méthode de prospection utilisée.

-le deuxième chapitre constitue l'ossature de notre sujet. Il a pour objectif d'établir des cartes gravimétriques, avec l'identification et la caractérisation (formes, épaisseurs, profondeur...) des anomalies gravimétriques.

-A la fin de ce chapitre, une synthèse des résultats, accompagnée d'une discussion sera donnée.

Premier chapitre : **CADRE GENERAL DE L'ETUDE**

# Premier chapitre : **CADRE GENERAL DE L'ETUDE**

## **I. RAPPEL SUR LA PROSPECTION GRAVIMETRIQUE**

### **A. Définition**

La gravimétrie mesure les variations de l'accélération de la pesanteur à la surface de la zone à étudier (Parasnis, 1985). Cette méthode consiste à mesurer ces variations, puis à appliquer aux valeurs brutes un certain nombre de corrections pour éliminer l'influence des autres corps, de la rotation et de la forme de la terre et des effets topographiques locaux. Ceci pour faire ressortir que les anomalies dues aux variations de densité du sous-sol (McGrath et *al.*, 2002). Ces variations de densité dans le sous-sol peuvent être dues à différentes causes, à l'exemple de :

- la présence de cavités;
- la présence de minerais;
- les hétérogénéités géologiques et lithologiques;
- les décompressions.

Notons que la micro-gravimétrie quant à elle est l'application de la gravimétrie en sub-surface (e.g. la profondeur d'investigation étant de quelques mètres à quelques dizaines de mètres). Ces caractéristiques font d'elle la méthode géophysique la mieux adaptée pour la recherche des cavités en milieu urbain ou en zone industrielle, car elle est indépendante des effets électromagnétiques environnants. Comme elle est aussi utilisée dans le domaine du Génie Civil pour la recherche des cavités. Cette méthode présente comparativement, les avantages déterminants suivants :

- une méthode non destructive : aucune altération du site;
- une méthode légère: un opérateur peut travailler de manière autonome;
- une méthode indépendante des effets électromagnétiques environnants.

### **B. Principe**

Les mesures sont effectuées à l'aide de gravimètres relatifs (mesure l'une des grandeurs de l'accélération, temps ou distance) et basées soit sur une méthode dynamique (mesure du temps d'oscillation d'un capteur en mouvement) soit sur une méthode statique (mesure de la variation d'équilibre d'un capteur maintenu par des forces élastiques). Ces appareils ne mesurent pas la valeur absolue du champ de pesanteur, mais la différence de pesanteur entre deux points ( $\Delta g$ )(figure 1).

Si en un point, la valeur absolue du champ de pesanteur est connue (on l'appelle station de référence ou base), on peut alors calculer la valeur en l'autre point.

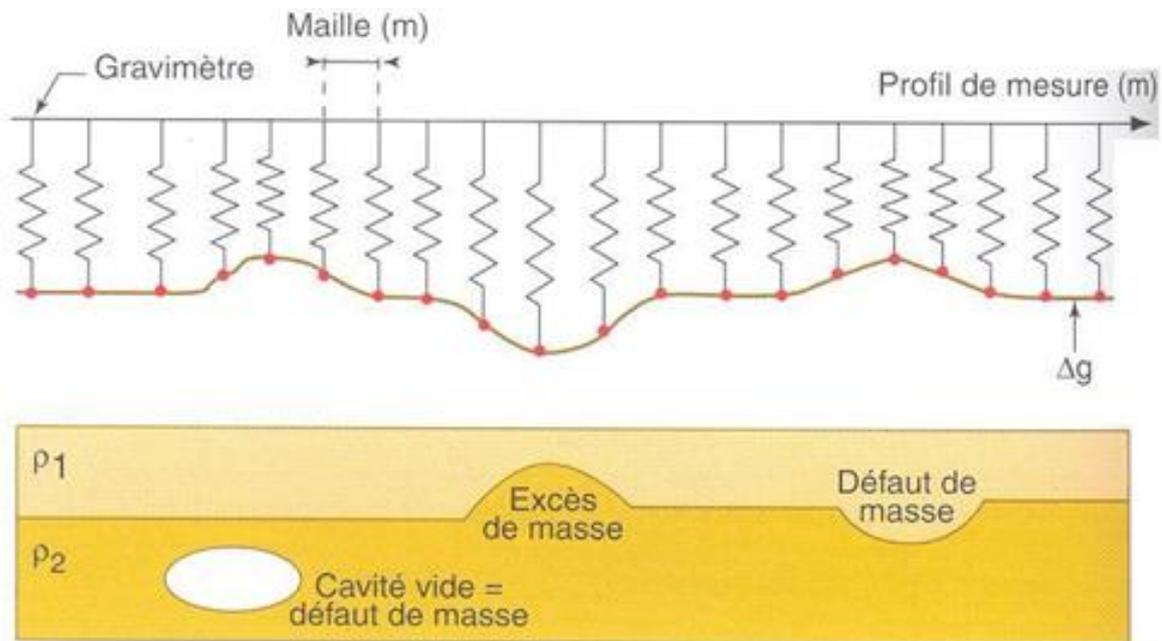


Figure 1: Le principe de la gravimétrie.

A noter que le gravimètre est un appareil de mesure très sensible surtout lorsqu'il subit une vibration du sol, pouvant entraîner des perturbations qui sont nettement visible par la vibration même de l'élément sensible (dans notre cas le ressort en quartz du gravimètre). Ces vibrations peuvent être causées par le vent, la température, la pluie ou tout simplement un engin qui passe à proximité du point de mesure.

Afin de déterminer les erreurs majeures de mesures et de la correction d'une dérive éventuelle, il est recommandé de réaliser au moins deux cheminements complets (mesures en boucle). Les mesures brutes doivent être corrigées d'un certain nombre de facteurs : correction à l'air libre, de plateau, de relief, de latitude, luni-solaire et instrumentale.

### C. Anomalie de Bouguer (AB)

#### 1. Attraction et potentiel gravitationnel

-L'attraction gravitationnelle est une attraction qui est proportionnelle à la masse de deux corps et inversement proportionnelle aux carré des distances  $r$  (figure 2). L'expression de la force de gravitation est donnée par la loi de Newton, qui est à la base de la gravimétrie. Cette loi stipule que la force entre deux particules de masse  $m_1$  et  $m_2$  est directement proportionnelle au produit des masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare (Telford, 1981). Son expression est donnée par l'équation:

$$\vec{F} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \vec{r}$$

Avec  $m_1$  et  $m_2$  deux masses séparées par une distance  $r$  ;  $G$  est la constante universelle d'attraction dans le système international (SI) ;

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{Kg}^2$$

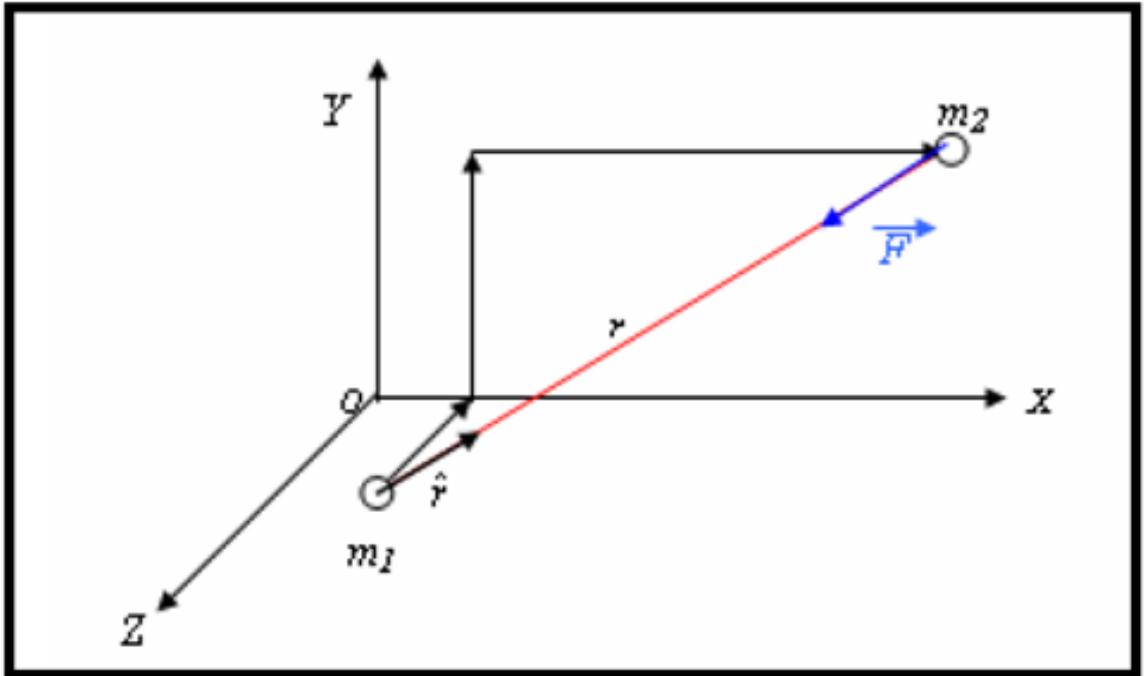


Figure 2: Représentation des deux masses ponctuelles  $m_1$  et  $m_2$  séparées par une distance  $r$  (d'après Telford et *al.* 1981).

-le Potentiel gravitationnel

On applique une force  $F$  à une masse  $m_2$  pour lui faire subir une accélération gravitationnelle  $\vec{g}$ . A noter que la force gravifique est un vecteur porté par la droite joignant les centres des deux masses (Telford et *al.*, 1981). En utilisant le principe fondamental de la dynamique l'accélération gravitationnelle sous la forme suivante:

$$\vec{g} = G \frac{m}{r^2} \vec{r} \quad (1.2)$$

La force qui engendre ce champ peut être dérivée de la fonction scalaire du potentiel. Ce dernier est donné sous la forme suivante:

$$U = G \frac{m}{r} \quad (1.3)$$

## 2. La valeur théorique du champ de la pesanteur

La valeur théorique de la pesanteur ne dépend que de la latitude ( $\phi$ ) sur l'ellipsoïde. Elle est donnée par la formule suivante :

$$g_{Th} = 97803185(1 + 0.00532024 \sin^2 \phi - 0.0000059 \sin^2 2\phi) \quad (1.4)$$

$\phi$ : c'est la latitude de la station en degrés

## 3. Les corrections gravimétriques

Nous savons à présent calculer la valeur théorique de la pesanteur en tout point de l'ellipsoïde. En général lorsqu'on fait des mesures gravimétriques, on ne se trouve pas sur cet ellipsoïde mais sur une surface différente. On doit impérativement tenir compte de la distance entre la surface où l'on connaît la valeur théorique du champ de la pesanteur et celle où l'on mesure. Pour cela, il faut comparer la valeur théorique et la valeur mesurée du champ de la pesanteur pour obtenir des anomalies gravimétriques qu'on pourra par la suite analyser et interpréter

Etant donné que la méthode de prospection gravimétrique appliquée aux études de sub-surface s'attache à détecter les variations de densité des terrains; il est donc nécessaire de calculer l'effet purement géologique en corrigeant tous les effets non géologiques.

### 3.1. Correction instrumentale

Les corrections instrumentales sont celles qu'il faut apporter aux mesures afin de compenser certaines erreurs dues à l'imperfection des appareils. Pour tout gravimètre, les lectures prises au même endroit changent légèrement en fonction du temps, à cause de l'effet de fatigue du ressort, ou de la variation de pression et de température (figure 3). En revenant prendre des lectures en une station de base à des intervalles de temps fixés, on arrive à estimer l'effet de la dérive (Bouyahiaoui, 2010).

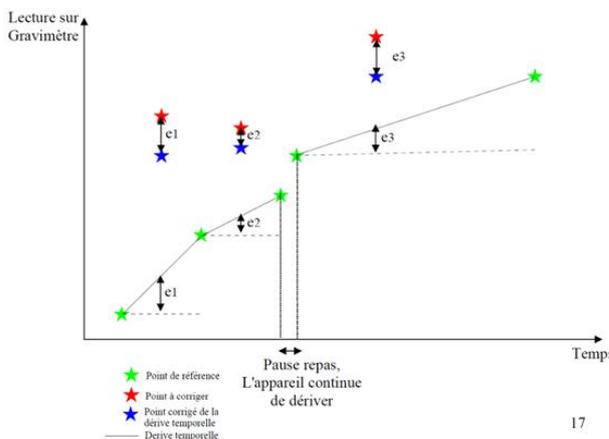


Figure 3: Principe de la correction de la dérive (d'après Bouyahiaoui, 2010).

### 3.2. Correction des effets de marées

Les marées terrestres sont les attractions qu'exercent les astres sur la terre. Les deux astres les plus attractifs sont le soleil et la lune. Ce phénomène peut soulever ou faire baisser localement la surface topographique. Cette variation peut atteindre 30 cm. Toutefois, il faut rappeler que les termes de marées dépendent de la position selon le temps de l'astre (planète) par rapport à la terre. Par conséquent, il définit la variation dans le temps du champ de pesanteur. Ces termes sont calculés à partir de développement en harmonique sphérique à l'ordre 2 de la différence de pesanteur entre la surface et le centre de la terre. Les constantes des harmoniques sont déterminées par moindre carré à partir des mesures en continue de g (Abtout, 2001). Actuellement, un module de calcul de ce terme est intégré dans le calculateur du gravimètre.

### 3.3. Correction de latitude

Cette correction n'est autre que la valeur théorique de la pesanteur au niveau de la station de mesure dont on a parlé plus haut. Pour cela, la connaissance de la latitude  $\varphi$  de la station de mesure par rapport à un modèle sphérique de la terre est nécessaire. Il existe plusieurs formules de calcul parmi lesquelles, nous citons :

Formule de 1930 :

$$GI = 978049 * [1 + 0.0052884 \sin^2 \varphi - 0.0000059 * \sin^2 (2\varphi)] \text{ (Blakely, 1995).} \quad (1.5)$$

Formule de 1967:

$$GI = 978031.846 * [1 + 0.005278895 * \sin^2 \varphi + 0.000023462 * \sin^4 \varphi] \text{ (Sheriff, 1984).} \quad (1.6)$$

Formule de 1984:

$$GI = 978032.67714 * [1 + 0.00193185138639 * \sin^2 \varphi / \text{sqrt}(1 - 0.00669437999013 * \sin^2 \varphi)] \text{ (Blakely, 1995).} \quad (1.7)$$

Où, GI est la valeur théorique de la pesanteur en milligals,

$\varphi$  La latitude de la station de mesure

Aussi d'après Dubois et Diamant (2001); la correction de latitude est donnée par la formule suivante:

$$g_{Th} = 97803185(1 + 0.00532024 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi) \quad (1.8)$$

$\varphi$ : est Latitude de la station.

### 3.4. Correction de Faye (d'Air libre)

Elle permet d'éliminer l'influence de l'altitude (h) de la station, sans tenir compte des masses situées entre la station et le niveau de référence. La correction d'air libre est donnée par la relation suivante (Telford et *al.*, 1981):

$$\Delta_{AL} = 0.3086h \quad (1.9)$$

$\Delta_{AL}$ : Correction d'air libre calculée en mgals.

h: Altitude de la station de mesure en mètre

### 3.5. Correction de Bouguer

La correction de Bouguer tient compte de la couche de terrain située entre le point de mesure et le plan de référence que nous avons négligé lors du calcul de la correction d'Air libre. Elle est donnée par la relation (Telford et *al.*, 1981):

$$\Delta_p = 0.0419dh \quad (2.0)$$

$\Delta_p$ : Correction de Bouguer calculée en mgals

h: Altitude de la station de mesure en mètre

d: Densité moyenne de correction de la couche de terrain ( $g/cm^3$ ).

### 3.6. Correction topographique

Cette correction tient compte des irrégularités de la surface du sol à proximité de la station. Par exemple, des collines s'élevant (excès de masse), au-dessus de la station et des vallées (déficit de masse), situées au-dessous. Ces deux ondulations diminuent les lectures à cause de l'attraction au-dessus (collines) et du déficit d'attraction au-dessous (vallées). Il en résulte que la correction topographique s'ajoute toujours à la lecture. La réduction topographique consiste à ramener la mesure au point à ce qu'elle serait si la surface topographique était un plan horizontal passant par la station. Pour ce, il faut combler les vallées autour de la station, avec un terrain de densité d, et raser les collines avoisinantes comme si elles avaient la même densité.

Notons que La topographie est décomposée en petits volumes de formes géométriques simples, et de dimensions variables. Petits, proche de la station est de plus en plus grand lorsqu'on s'éloigne du point de mesure. Hammer a utilisé une portion de cylindre (figure 4).

Les différentes étapes à exécuter pour effectuer la correction consistent à:

-déterminer l'élévation moyenne de chacun des secteurs du cylindre à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT);

- prendre la différence positive ou négative entre l'élévation de la station considérée et chacun des secteurs ;
- calculer pour chaque secteur, et à l'aide de la table de Hammer, la correction à apporter (la correction est toujours positive quel que soit le signe).

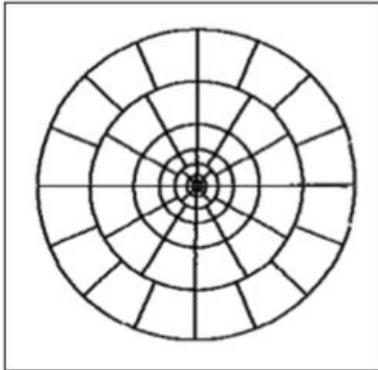


Figure 4: Réticule de Hammer.

### 3.7. Isostasie et la correction isostatique

Les anomalies de Bouguer mesurées représentent un caractère systématique. Elles sont négatives sur les montagnes et positives sur les océans. La théorie de l'isostasie explique cela par une origine profonde. (Sharma, 1986).

#### ➤ L'hypothèse de Pratt

Pratt (1855) a proposé une explication basée sur l'hypothèse que la densité des montagnes serait d'autant plus faible que la montagne serait élevée (figure 5). Cette hypothèse prise par la suite par Hayford (1911), conduit à un modèle de la partie externe du globe dans lequel les densités varient latéralement dans des colonnes en fonction de leur élévation par rapport au géoïde. (Dubois et Diamant, 2001).

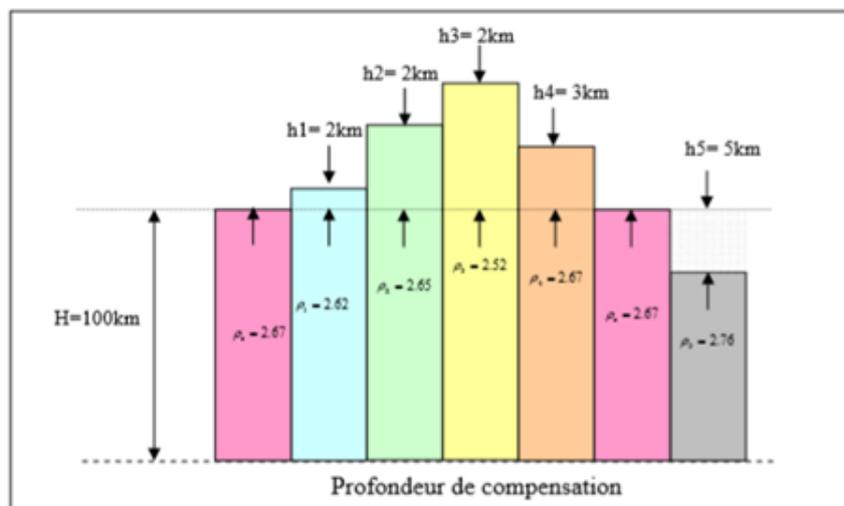


Figure 5: Modèle de Pratt (d'après Dubois et Diamant, 2001).

➤ L'hypothèse d'Airy

Airy suppose que la croûte terrestre est formée de radeaux de densité  $\rho_c$  flottants sur un magma visqueux de densité  $\rho_m$  (figure 6). D'après le principe d'Archimède, plus les montagnes sont élevées, plus leur racine est importante. La racine  $r$  et l'anti-racine  $ar$  sont données par les équations suivantes :

$$r = \frac{\rho_c}{\rho_m - \rho_c} h \quad (2.1)$$

$$ar = \frac{\rho_c - \rho_e}{\rho_m - \rho_c} p \quad (2.2)$$

Avec,  $\rho_c$ ,  $\rho_m$  et  $\rho_e$ , correspondant respectivement à la densité de la croûte, du manteau et de la mer.

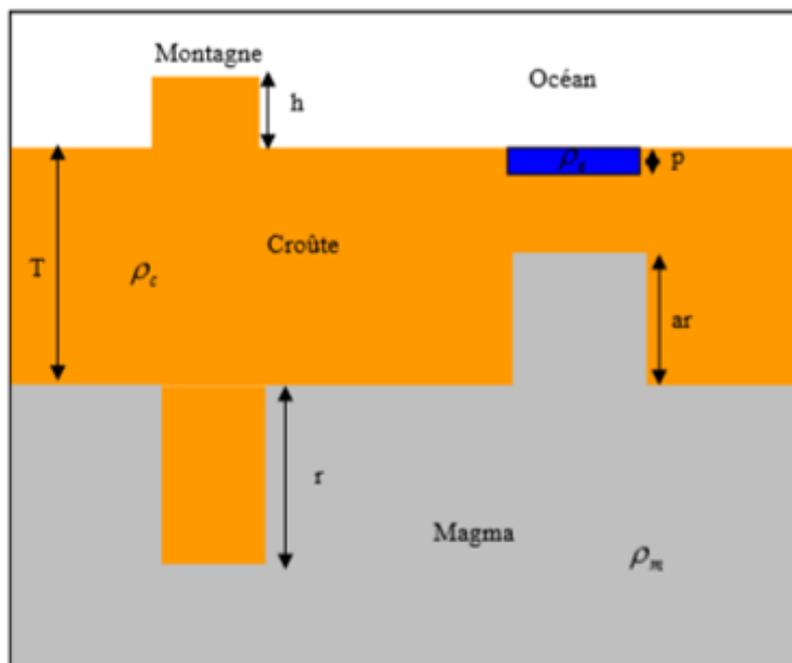


Figure 6: Schéma de l'hypothèse d'Airy  
(T représente l'épaisseur moyenne de la croûte terrestre).

L'anomalie isostatique  $\Delta I$  est donnée par la relation :

$$\Delta I = \Delta g_B + \Delta r \quad (2.3)$$

$$\text{Où } \Delta I = \Delta g_B - \Delta ar \quad (2.4)$$

$\Delta g_B$  est l'anomalie de Bouguer,  $\Delta r$  est l'anomalie créée par la racine des montagnes et  $\Delta ar$  celle créée par l'anti-racine des océans.

#### 4. Choix de densité

En effet plusieurs méthodes sont utilisées pour évaluer la densité à partir de mesures gravimétriques de terrain. Parmi elles, on distingue :

##### 4.1. Méthode de mesure sur échantillon

Elle consiste à mesurer la densité des roches sur des échantillons prélevés sur le terrain. Cette méthode représente les inconvénients suivants :

- les échantillons ne sont pas dans les mêmes conditions de température et de pression qui existent en profondeur;
- les échantillons sont altérés par les agents extérieurs, malgré toute l'expérience de l'opérateur qui les choisit,
- les échantillons peuvent ne pas être assez représentatifs de toute la zone étudiée.

##### 4.2. Méthode de Nettleton

Sachant que l'anomalie gravimétrique est indépendante de la topographie, une méthode graphique permet de déterminer la densité moyenne de correction par la comparaison des valeurs des anomalies gravimétriques et des altitudes. La méthode de Nettleton consiste à représenter sur la même figure, un profil topographique (on choisit une région à relief accidenté) et les profils d'anomalies gravimétriques qui lui correspondent, calculées avec plusieurs densités.

A noter que la meilleure valeur de la densité sera celle du profil gravimétrique qui représente le moins de corrélation possible avec la topographie (Nettleton, 1939). L'inconvénient de cette méthode réside dans son application restreint aux zones à reliefs accidentés.

##### 4.3. Méthode de Parasnis

Cette méthode analytique consiste à déterminer la valeur de la densité pour laquelle l'anomalie gravimétrique soit statistiquement nulle (Parasnis, 1985).

$$\Delta g_B = g_m + (0.3086 - 0.0419d)h + dT - g_{th} = 0 \quad (2.5)$$

$$g_m - g_{th} + 0.3089h - d\{0.0419h - T\} = 0 \quad (2.6)$$

T: la correction topographique par unité de densité (mgal / (g/cm<sup>3</sup>)).

La relation (2.6) peut se mettre sous la forme:

$$A = Bd$$

$$\text{Avec } A = g_m - g_{th} + 0.3086h$$

$$B = (0.0419h - T)$$

La pente de la droite  $A = f(d)$  par une régression linéaire, ce qui représente la valeur de la densité moyenne de correction.

## 5. Calcul de l'Anomalie de Bouguer

Les différentes corrections apportées aux mesures gravimétriques, par un choix primordial de la densité permet de calculer l'anomalie gravimétrique appelée Anomalie de Bouguer (AB). Il s'agit là d'un document de base pour toute étude gravimétrique. Sa relation est donnée par l'équation suivante :

$$AB = G \text{ mesuré corrigé} - G \text{ théorique} \quad (2.7)$$

Avec  $G$  mesuré corrigé =  $G$  mesuré  $-\Delta_{Al} + \Delta_p + \Delta_l + \Delta_T$

$\Delta_{Al}$  Correction à l'air libre

$\Delta_p$  Correction de Bouguer

$\Delta_l$  Correction de latitude

$\Delta_T$  Correction topographique

### D. Domaine d'application

Parmi les innombrables domaines d'application de la gravimétrie, nous pouvons citer:

- le Génie civil : c'est la recherche de vides peu profonds (anciennes carrières, galeries, cavités karstiques);
- les mines : il s'agit principalement de la recherche des filons et des amas massifs et denses;
- l'hydrogéologie : c'est le cas des zones karstiques qui présentent un potentiel hydrique important dans les formations carbonatées ;
- l'exploration pétrolière et gazière;
- l'environnement: objet ou cible à détecter;
- les sondages archéologiques.

## II. BJECTIFS, ACQUISITION DES DONNEES ET TRAITEMENT

### A. Objectifs

Dans ce travail, les principaux objectifs, nous amènent à :

- effectuer des mesures micro-gravimétrique sur un site urbain ;
- corriger et traiter les données des différentes campagnes de mesures;
- établir des cartes gravimétriques qui permettrons de mieux voir la répartition des masses dans le sous-sol;

- déterminer les caractéristiques (formes, dimensions et contraste de densité) de ou des anomalies recherchées;
- et enfin analyser et interpréter les résultats obtenus.

## **B. Acquisition des données**

La prospection gravimétrique s'est déroulée sur deux jours du le 24 au 25 février 2020. Le rendement de l'équipe est d'environ 90 mesures/jour. Pendant les travaux de prospection, les conditions de terrain ont été favorables au bon déroulement de l'acquisition des données.

Par ailleurs, la présence des remblais (partie orientale site d'étude) d'une part, et les creux causés par les fouilles d'autre part, ont perturbés, occasionnellement, le bon déroulement de l'acquisition.

### **1. Levé gravimétrique**

Pendant l'acquisition, nous avons utilisé un micro-gravimètre de type Lacoste Romberg modèle D N°220 (figure 7). Ce modèle spécial dans la gamme des gravimètres est particulièrement approprié au type de mesures que nous avons effectué. Il répond tout à fait aux critères de précision pour une étude locale comme celle-ci. De précision instrumentale de  $1 \mu\text{gal}$  ( $1 \text{ m/s}^2 = 10^5 \text{ mgal} = 10^8 \mu\text{gal}$ ), ce gravimètre est muni d'un système de thermostatisation. Ce micro-gravimètre détient un ressort en quartz très sensible au vent, à la température, la pluie ou tous phénomènes vibratoires qui a lieu à proximité du site qui pourrait erroné les mesures. Le nombre de mesure acquise lors de cette campagne de deux jours est de 337 points avec un maillage d'approximativement 2 m entre les points. Toutes ces stations (points) de mesure ont été matérialisées à l'aide de craie blanche (figure 8).



Figure 7: Le gravimètre Lacoste Romberg (Modèle utilisé sur le terrain).



Figure 8: Matérialisation des points de mesures micro-gravimétrique sur terrain.

Pour suivre l'évolution de la dérive du micro-gravimètre et la qualité des mesures, nous avons remesuré une station connue en g avec une périodicité de 3 à 4 heures (figure 9). Pour cela, nous avons défini, dans la zone d'étude, une station de référence dans un endroit stable (rocher) et loin de toutes perturbations, la valeur de sa pesanteur est relative. De ce fait nous avons fait des mesures en boucle ou en circuit bouclés en effectuant la dernière mesure à l'emplacement de la première (station de base); ainsi que des mesures répétitives au même endroit à des moments bien séparés dans le temps. Les mesures en boucle permettent également d'estimer la dérive instrumentale qui est souvent dû à la fatigue du ressort ou au vieillissement de l'appareil. La répétition des mesures permet d'améliorer la précision.

Quant aux autres stations que nous appelons stations de détail, elles couvrent toute la zone d'étude. Elles sont espacées de 2 m. En effet le gravimètre ne va pas permettre de mesurer la valeur de la pesanteur mais une variation de celle-ci.

Par exemple, considérons deux point A et B; si on connaît la valeur absolue de la pesanteur en A, la mesure de la variation de la pesanteur entre A et B permettra de connaître la valeur de la pesanteur en B.



Figure 9 : Mesure gravimétrique sur terrain.

## 2. Coordonnées des stations

Les levés gravimétriques sont toujours accompagnés de levés topographiques de haute précision. Dans notre cas, nous avons utilisé un GPS Leica-GS10 bi-fréquence de haute pression. La détermination des coordonnées est extrêmement importante en gravimétrie, car non seulement ces coordonnées donnent la position des stations de mesure, mais elles sont aussi indispensables pour corriger la gravité. Les corrections de la gravité sont surtout sensibles à la variation de l'altitude. Une erreur importante de cette dernière lors des mesures, nous donnera de fausses valeurs corrigées de la gravité ce qui biaisera les informations recherchées. Il est important de souligner que pour chaque point de mesure gravimétrique, nous avons déterminé les coordonnées topographiques correspondantes. Dans ce travail, le matériel de positionnement par satellites utilisé est composé de trois récepteurs GPS : l'un fixe qui nous a servi de référence (figure 10) et les deux restants sont mobiles (figures 11 et 12).



Figure 10 : Récepteur GPS de référence.



Figure 11: 1<sup>er</sup> Récepteur GPS.



Figure 12: 2<sup>ème</sup> Récepteur GPS.

La technique du GPS utilisée ici est simple. Elle se résume à l'implantation d'un premier récepteur comme station de base (référence) et les deux autres comme des stations mobiles qu'on va déplacer d'un point de mesure à un autre, le long des profils couvrant toute la zone d'étude. La hauteur du trépied est mesurée à chaque point à l'aide d'un mètre ruban.

### 3. Réalisation des mesures et détermination des valeurs de la pesanteur

La pesanteur observée a été calculée en utilisant les différences relatives de la lecture de l'appareil, une fois celles-ci corrigées de la correction luni-solaire et de la dérive de gravimètre. La correction luni-solaire est calculée en introduisant le temps de mesure et les coordonnées géographiques de la zone d'étude. Ce calcul est basé sur la formule de Longman, 1959. Quant à la dérive du gravimètre, nous l'avons réparti proportionnellement sur toutes les lectures en fonction de l'heure d'observation. En totalité le levé gravimétrique est constitué de 337 points de mesure, dont 31 reprises, déterminés avec une précision de l'ordre de 10  $\mu$ gal.

### C. Traitement

Après avoir effectué les levés gravimétriques et topographiques, le traitement des données GPS et la réalisation des cartes ont été effectués respectivement grâce à deux logiciels à savoir:

-le logiciel de traitement *Geo-leica* pour obtenir le positionnement de tous les points de mesures corrigés en coordonnées géographiques et en coordonnées cartésiennes (UTM): fuseau 30N).

-le logiciel *Oasis montaj* pour établir les cartes gravimétriques.

### III. RAPPEL SUR LA KARSTIFICATION

#### A. Définition

De la région de Karst (en Croatie), le karst désigne un plateau carbonaté soumis à la dissolution. Fénelon (1965) présente le karst comme «toute région formée de roches calcaires où se retrouvent les caractères morphologiques du karst. Un karst peut comprendre en surface des canyons, des vallées sèches, des dolines, des lapiés, des poljés, des ouvalas, des hums et en profondeur des grottes et des cavernes (figure 13). Selon Gèze (1973) le phénomène de la karstification est l'ensemble des processus de genèse et d'évolution des formes superficielles et souterraines dans une région. En d'autres termes, c'est un phénomène d'érosion physico-chimique lié à la capacité des minéraux composant des roches carbonatées (calcite, dolomite et aragonite) d'être soluble dans des eaux enrichies en gaz carbonique CO<sub>2</sub> (Crochet et Marsaud, 1997).

Sur les chantiers de travaux publics, le terme karst employé dans le sens de cavité karstique est très discutable. Il englobe pour le mineur ou l'ingénieur tous les vides colmatés ou non qui ne sont pas des vides artificiels ou des vides dû à la décompression (Théron, 1973).

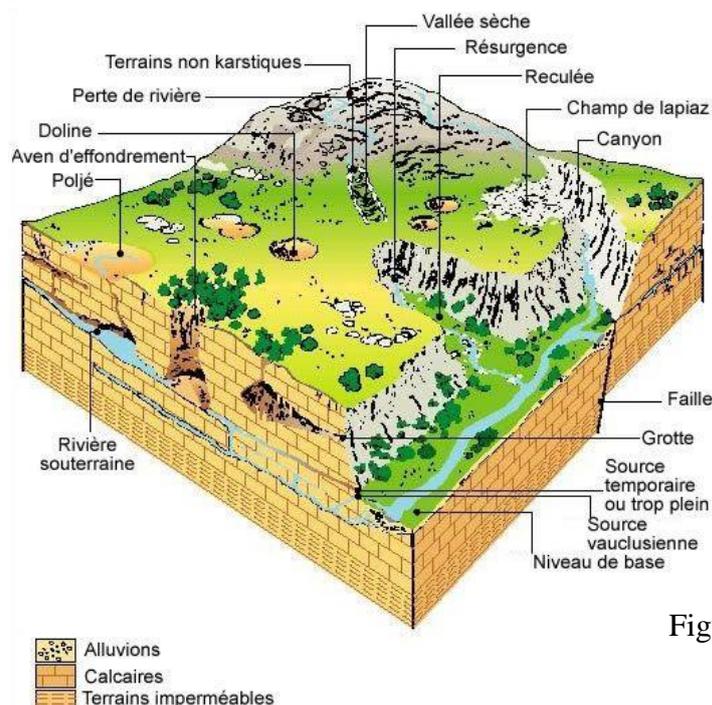


Figure 13 : Phénomène de karstification.

## B. Relation karsts/cavités

On distingue deux types de cavités. Les cavités naturelles et les cavités anthropiques. Les cavités anthropiques sont multiples et d'origine humaine. C'est l'exemple des carrières d'extraction, des galeries, des mines, des ouvrages militaires. Par ailleurs, les cavités naturelles sont créées par la dissolution de certaines roches sédimentaire en raison de la circulation de l'eau, formant ainsi des cavités de tailles très variable. Les cavités naturelles sont donc d'origine karstique. Plusieurs phénomènes liés à ces cavités d'origine karstique peuvent être identifiés in situ et peuvent considérablement affecter les constructions. Parmi ceux-ci, nous citons:

-les affaissements et les effondrements de terrain : ils concernent autant les cavités souterraines artificielles que les cavités naturelles. Ils peuvent rapidement apparaitre ou s'élargir pour au finale provoquer un effondrement brutal à la surface.

-l'érosion interne : l'infiltration de l'eau entraine des particules qui engendrent une modification des propriétés géotechniques des sols. Ce phénomène se manifeste également dans les drains karstiques qui se colmatent et se décolmatent en fonction de la vitesse de circulation des eaux.

## IV. CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

### A. Cadre géographique

#### 1. Localisation de la zone d'étude

La zone objet de cette étude est localisée à Boudjelida dans la wilaya de Tlemcen. Comme le montre la carte topographique (figure 14), elle est située entre trois Djebels à savoir : Djebel Oudjelida, Djebel Touma et Djebel el Horra.



Figure 14: Situation de la zone d'étude (carte de Tlemcen. Echelle 1 : 25 000).

## 2. Localisation et superficie du site d'étude

Situé à environ 5 km au Nord de la ville de Tlemcen, le site a pour coordonnées:  $34^{\circ}55'09.7''$  Nord  $1^{\circ}19'16.1''$  Ouest (fig.14). La superficie du site a été mesurée avec l'application mobile Google Earth (Figure 15). Elle est de  $1000 \text{ m}^2$  avec un périmètre de 137 m (figure 15).

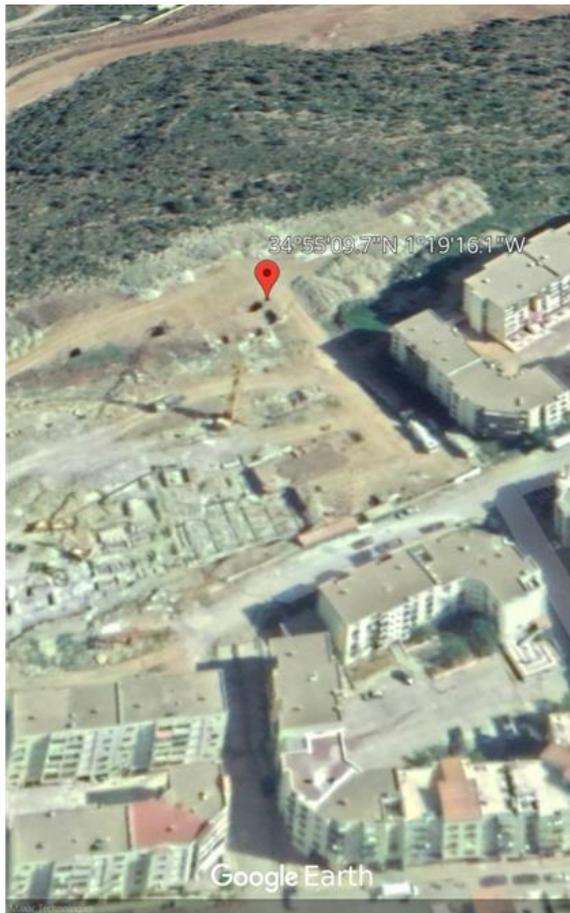


Figure 15 : Localisation du site (Google Earth).



Figure 16: Mesures de la superficie et du périmètre du site (Google Earth).

## B. Cadre géologique

### 1. Description géologique de la zone d'étude

Faisant partie de la marge septentrionale des Monts de Tlemcen au sens strict, la zone d'étude est constituée des formations carbonatées attribuées au Jurassique supérieur (figure 17). Il s'agit principalement de calcaires dolomitiques parfois bioclastiques « Dolomies de Tlemcen ».

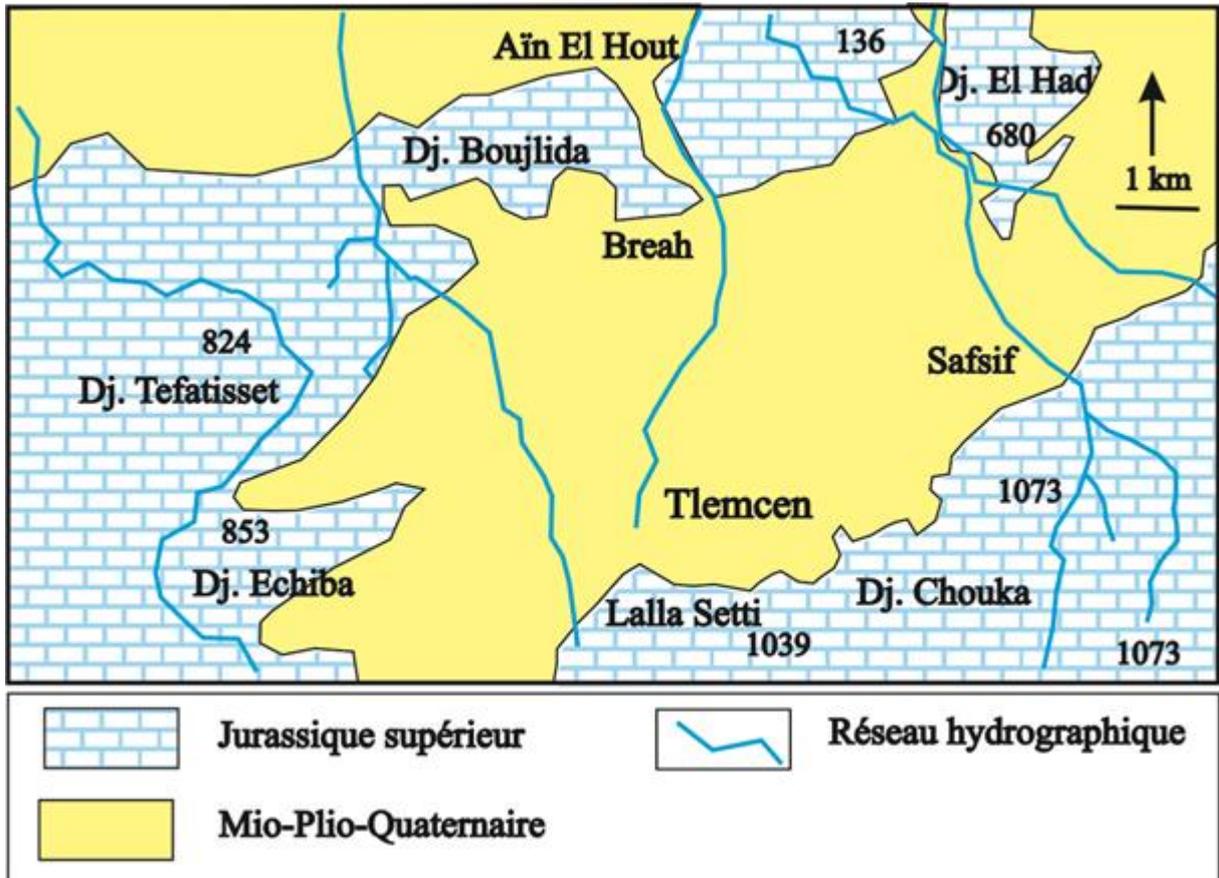


Figure 17 : Carte géologique de la zone d'étude (d'après Bensaoula, 2007).

## 2. Description géologique du site d'étude

D'après l'étude géotechnique réalisée en octobre 2019 par le laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (LTPO), l'assiette de terrain se trouve sur des calcaires grisâtres fragmentés, devenant compacts à partir de 2 m. Ils sont très peu cariés à partir de 7 m.

## Deuxième chapitre : **ANALYSE DES DONNEES**

## Deuxième chapitre : **ANALYSE DES DONNEES**

### **I. ETABLISSEMENT DES CARTES GRAVIMETRIQUES**

Les résultats gravimétriques ou anomalies gravimétriques sont l'image de la distribution des masses dans le sous-sol. Ces images ne traduisent pas directement la présence de masses ou de vides, mais plutôt la variation apparente de densité que crée cette masse ou ce vide. C'est donc par l'examen de cette répartition des densités qu'on attribuera aux anomalies observées leurs origines, telles que des cavités, décompressions, accident géologique, etc.

Comme il a cité plus haut, le traitement des données ont été effectuées grâce au logiciel *oasis montaj*, qui est un logiciel de géophysique ultra performant de cartographie et de traitement de données dites de potentielle (gravimétriques et géomagnétiques). Il convient de rappeler que les cartes d'anomalies gravimétriques sont les documents de base de toute interprétation en prospection gravimétrique. Leur interprétation a pour but de trouver la répartition de sources (e.g. les contrastes de densité et les géométries qui créent les anomalies observées en surface).

#### **A. Carte d'anomalie de Bouguer**

Une fois toutes les données gravimétriques brutes corrigées, on obtient une carte d'anomalie de Bouguer qui montre en générale deux caractéristiques (Chouteau, 2002), à savoir :

-les variations régulières et continues du champ gravitationnel sur de grandes distances appelées « anomalies régionales ». Elles sont produites par les hétérogénéités à grandes profondeurs ;

-les petites perturbations locales du champ gravitationnel qui sont petites en dimensions mais primordiales. Elles sont appelées « anomalies résiduelles » et sont produites par des structures superficielles. Elles sont superposées aux anomalies régionales.

La carte de l'anomalie de Bouguer a été tracée automatiquement en utilisant la méthode d'interpolation « minimum de courbure » (figure 18). Les valeurs de l'Anomalie de Bouguer sont comprises entre +135.724 à +136.058 mgal. La carte ainsi obtenue montre une croissance régulière des valeurs d'anomalie de Bouguer du sud vers le nord (figure 18).

La partie haute de la carte est caractérisée par la présence des anomalies de hautes valeurs (couleur rouge), alors que la partie basse est schématisée par des anomalies de basses valeurs (couleur bleu). A cette variation régionale de grande longueur d'onde, viennent se superposer des anomalies de petites dimensions distribuées aléatoirement sur toute la carte.

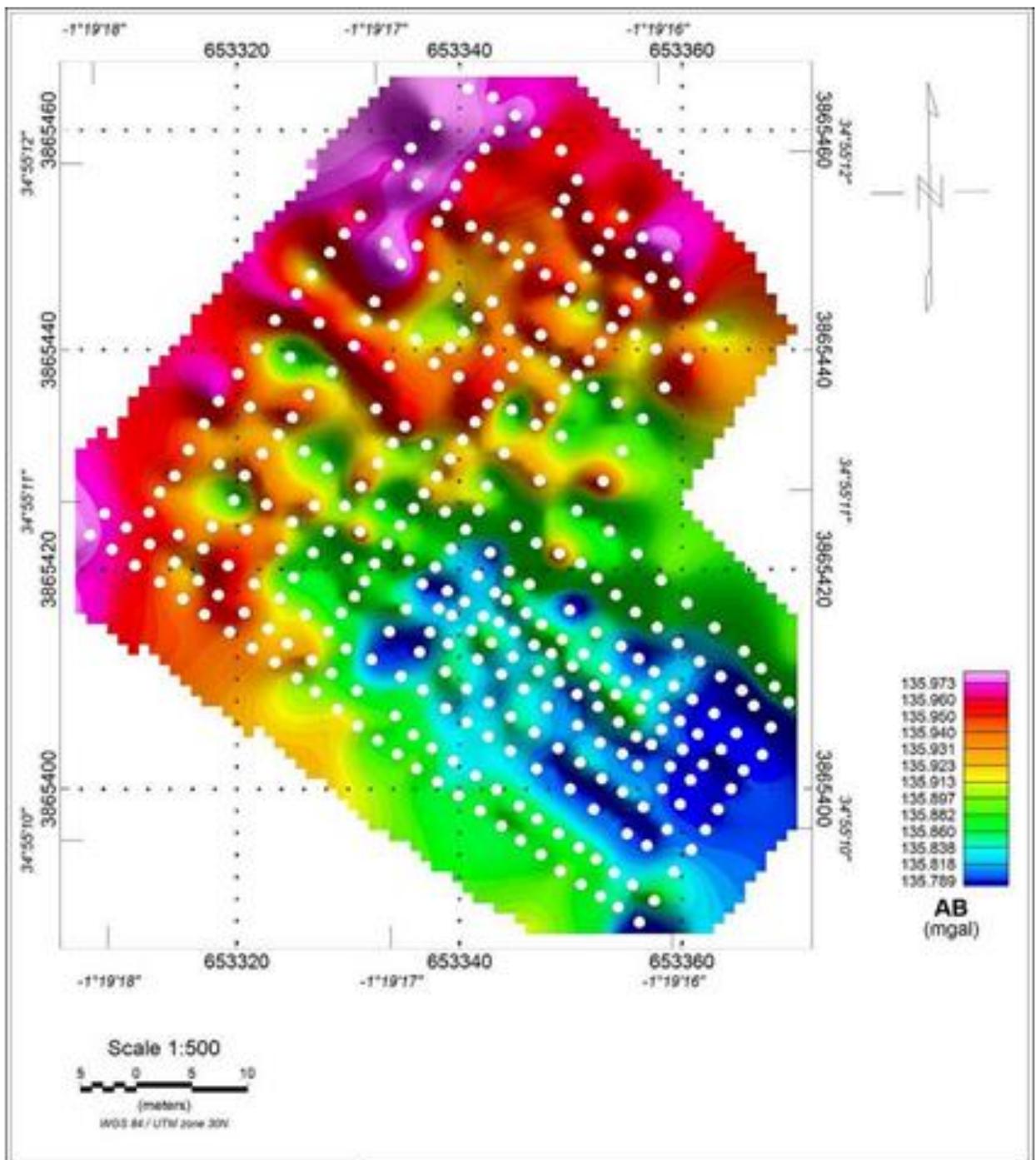


Figure 18: Carte d'anomalie de Bouguer  
(les points en blanc représentent les stations de mesure, densité 2.4).

Par ailleurs la carte d'anomalie de Bouguer regroupe tous les effets superficiels, semi profonds et profonds. Elle montre simultanément des anomalies dite 'régionale' et des anomalies dite 'résiduelle'. Ainsi :

-les anomalies régionales correspondent aux basses fréquences du signal total. Elles sont rehaussées pour étudier la structure du socle métamorphique ou magmatique d'un bassin sédimentaire.

-quant aux anomalies résiduelles qui correspondent aux hautes fréquences du signal total, elles sont analysées pour faire l'étude des structures géologiques de faible profondeur situées généralement dans la couverture sédimentaire.

Il est donc indispensable de séparer l'effet régional et l'effet résiduel. Selon le but recherché, il faut :

-Lisser et enlever les effets de surface pour ne retenir que les effets de profondeur (régionale).

-Lisser les effets de sources profondes et les soustraire pour obtenir les anomalies de surface (résiduelle).

Comme on est dans le domaine de la micro-gravimétrie, on va s'intéresser à l'effet résiduel (superficiel). Pour observer cette anomalie résiduelle, il est nécessaire de soustraire l'anomalie régionale de nos données (c'est-à-dire l'anomalie de Bouguer) en utilisant la méthode polynômiale à différents degrés. Cette technique fait approcher le champ mesuré par un polynôme en (x, y), dont le degré est choisi en fonction de la courbure désirée de la régionale.  $AB = R + S$ . Les résiduelles à différents ordres caractérisent la distribution de la densité dans le sous-sol et à différentes profondeurs.

## **B. Séparation des anomalies**

### **1. Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 1**

Rappelons que les anomalies résiduelles sont le résultat de la soustraction de l'anomalie régionale de l'anomalie de Bouguer. Elles représentent principalement les variations de densité au niveau de la croûte supérieure comprenant la variation d'épaisseur et de densité des roches sédimentaires qui reposent sur les roches du socle et aussi les contrastes de densités induits par les corps intrusifs.

Sur la carte d'anomalie résiduelle d'ordre 1 (figure 19), on observe des valeurs du champ de pesanteur variant entre -0.094 à +0.020 mgals. Les anomalies positives (en rouge) sont beaucoup plus présentes en bordure de la carte alors que les anomalies négatives (couleur bleu foncé, bleu clair et verte) sont concentrées au centre de la carte (avec une forte extension) et bien orientées selon un axe NW-SE. Les deux anomalies les plus importantes sont notées (Ano1 et Ano2, figure 19).

Les anomalies négatives reflètent la présence dans le sous-sol, des masses de faible densité à densité nulle (cas de cavités). Comme notre but est la détection de la présence d'éventuelles cavités, nous nous intéresserons uniquement aux anomalies négatives.

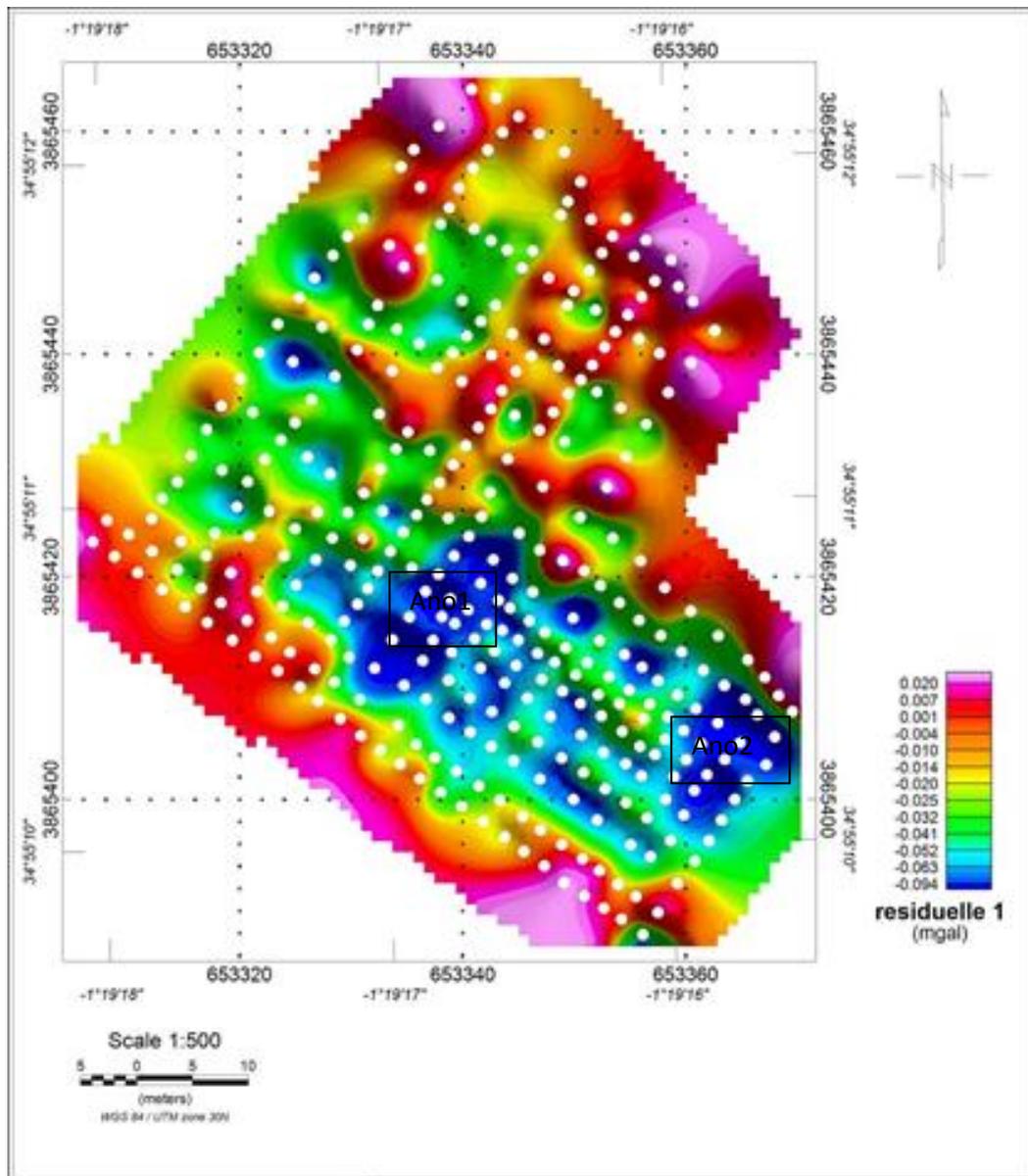


Figure 19 : Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 1.

## 2. Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 2

La carte d'anomalie résiduelle d'ordre 2 (figure 20) montre des anomalies plus superficielles que la résiduelle d'ordre 1. Elle présente des valeurs comprises entre -0.10 à +0.01 mgals. On remarque qu'elle est un peu similaire à la première carte (résiduelle d'ordre 1), sauf que sur celle-ci l'amplitude des valeurs négatives semblent avoir diminuée

contrairement aux valeurs positives qui quant à eux semblent avoir pris du terrain. L'amplitude des anomalies négatives de ces zones présentent des valeurs inférieures à 0.01 mgals. En conséquence, elles ne peuvent pas être liées à des cavités ou à des zones de faibles densités.

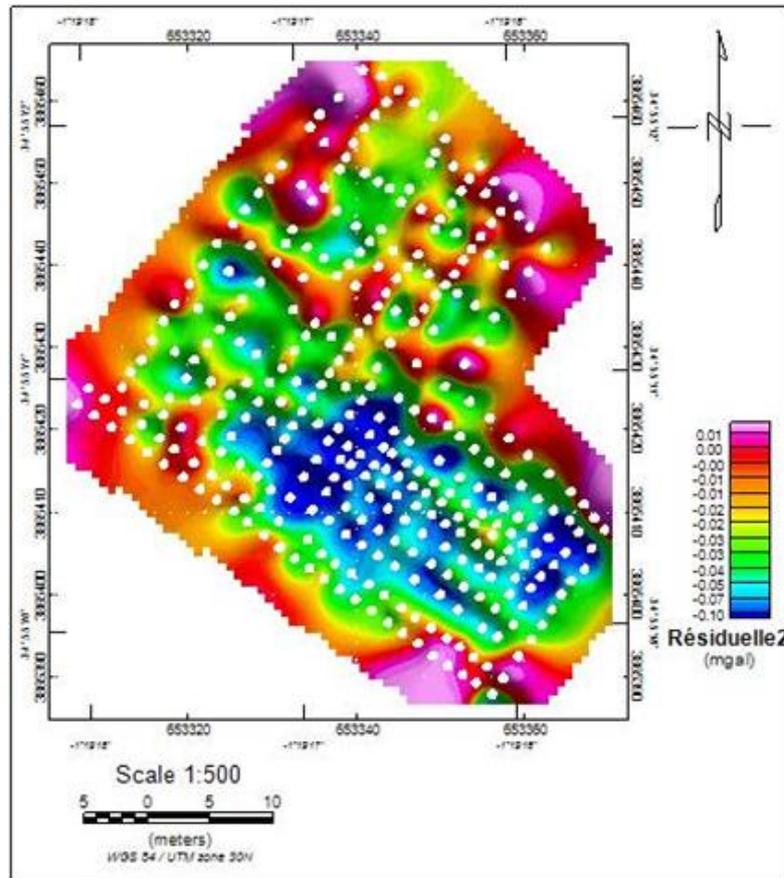


Figure 20: Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 2.

### 3. Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 3

La carte d'anomalie résiduelle d'ordre 3 montre les anomalies d'origine plus superficielle que les deux premières résiduelles (res1 et res2). Sur cette carte d'anomalie résiduelle d'ordre 3, on observe que les valeurs positives (couleur verte claire, orange, rouge et violet) occupent la quasi-totalité de la carte (figure 21). Les valeurs de la carte d'anomalie résiduelle d'ordre 3 varient entre -0.05 mgal et +0.05 mgal. Sur la carte, les valeurs négatives (en couleur bleu foncé, bleu clair) sont beaucoup plus restreintes et concentrées au sud. L'amplitude des anomalies négatives de ces zones présentent des valeurs inférieures à 0.05 mgals. En conséquence, elles ne peuvent pas être liées à des cavités ou à des zones de faibles densités.

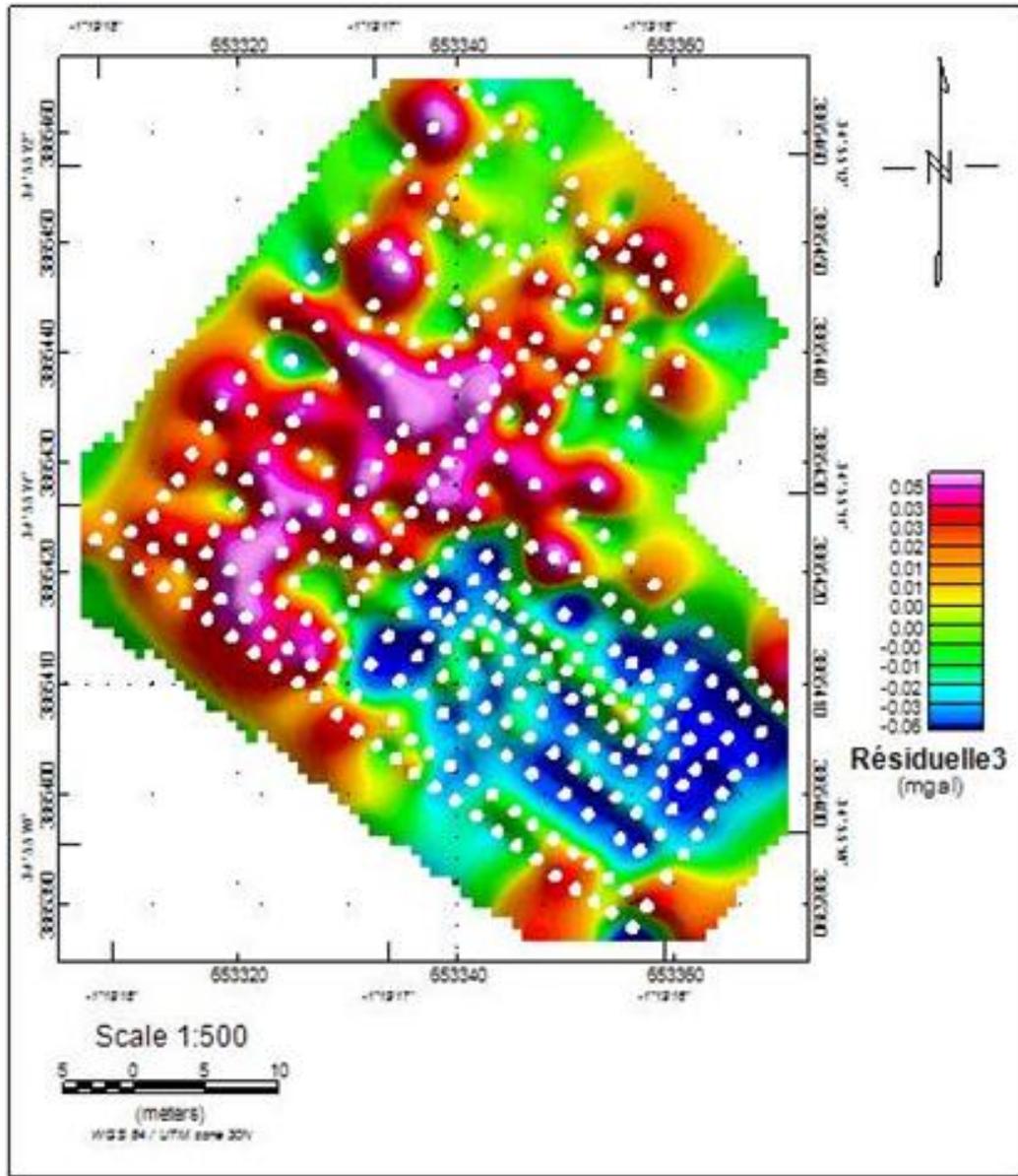


Figure 21: Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 3 (densité 2.4).

#### 4. Cartes des prolongées

Prolonger une anomalie observée sur une surface donnée revient à calculer la forme et l'amplitude de cette anomalie sur une surface située à une altitude différente. Lorsque le calcul est effectué sur une surface plus élevée que la surface d'observation, on parle de prolongement vers le haut (filtrage des courtes longueurs d'onde) et dans le cas contraire, il s'agit d'un prolongement vers le bas (filtrage des grandes longueurs d'onde).

Dans le cas de notre étude, on a réalisé les cartes de prolongées vers le haut c'est-à-dire qu'il y a eu filtrage des courtes longueurs d'onde. Ce filtrage permet d'atténuer l'effet des sources superficielles. Il a non seulement pour but de s'éloigner des sources génératrices des anomalies, mais aussi d'éliminer les bruits.

Ainsi la carte d'anomalie de Bouguer a été prolongée vers le haut à 2 m et 5 m (figures 22 et 23).

La carte de l'anomalie de Bouguer prolongée à une hauteur de 2 m, montre la distribution des structures situées à une profondeur relativement faible (de l'ordre de 1 m). En d'autres termes, la tendance régionale commence à se dessiner avec une diminution régulière de champ de pesanteur du nord vers le sud (figure 22). Sur cette carte, nous constatons la disparition de la quasi-totalité des anomalies négatives observées sur la carte de l'anomalie de Bouguer, ce qui montre leurs caractères locaux et superficielles, à l'exception d'une seule petite anomalie isolée qui persiste. Cette anomalie négative (Ano1,) de faible amplitude et allongée dans la direction NE-SW est de faible extension. Il est à signaler qu'elle est située à l'aplomb de la cavité déjà détectée lors des excavations.

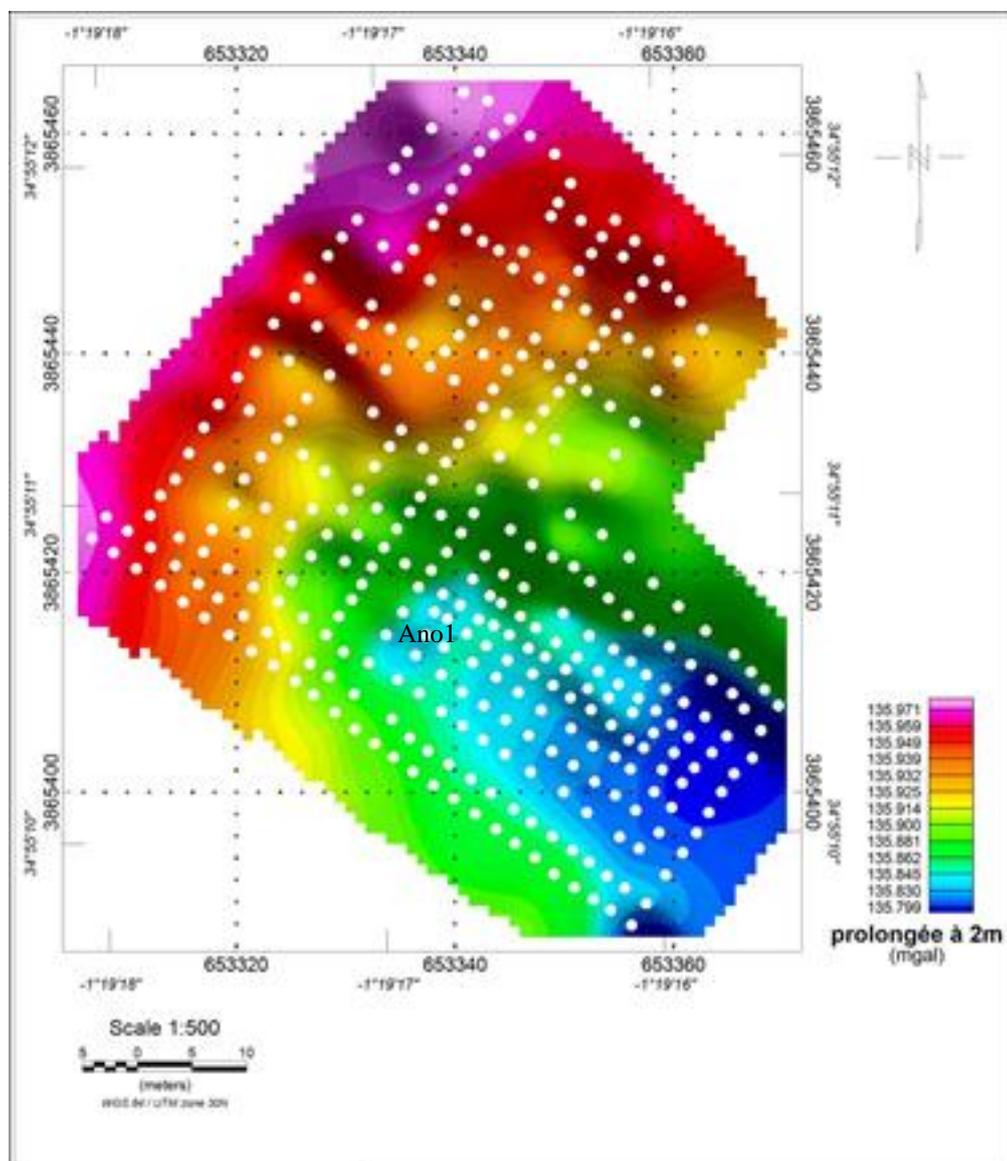


Figure 22 : Carte de l'anomalie prolongée à 2 m.

La carte de l'anomalie de Bouguer prolongée à une hauteur de 5 m montre la distribution des structures relativement profondes (figure 23). Sur cette carte, nous constatons la disparition de toutes les anomalies négatives observée sur la carte de l'anomalie de Bouguer (figure 18) et de la carte de l'anomalie de Bouguer prolongée à 2 m (figure 22).

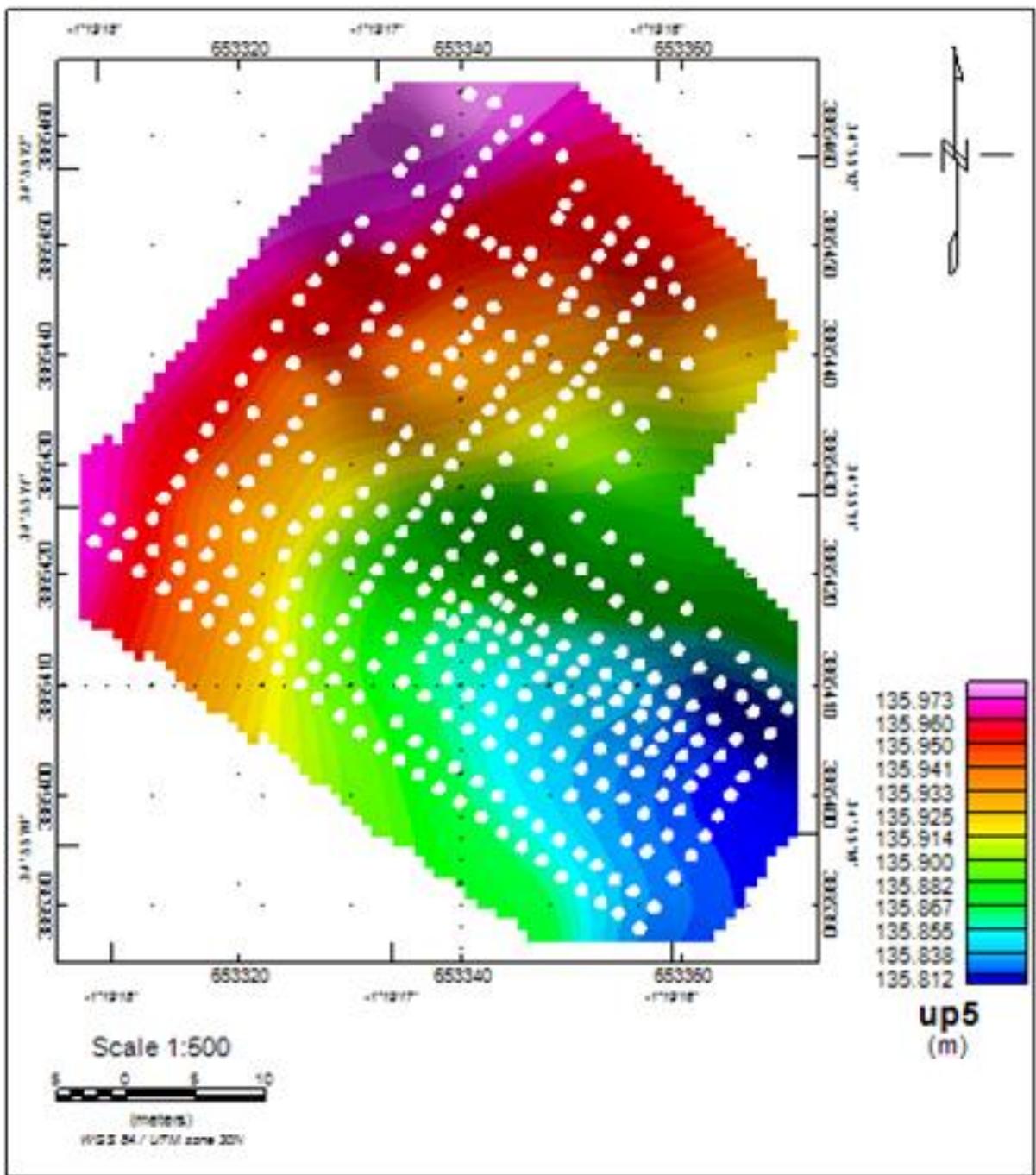


Figure 23 : Carte de la prolongée à 5 m.

## II. CALCUL DES CONTRASTES DE DENSITE ET DES FORMES GEOMETRIQUES DES CORPS

Afin de déterminer les caractéristiques (formes, dimensions et contraste de densité) des masses responsables de l'unique anomalie négative observée, nous avons utilisé la méthode analytique appliquée sur l'anomalie (Ano1, figure 24).

Le principe consiste à l'application des méthodes numériques complexes de modélisation et d'inversion afin de déterminer la forme et le contraste de densité des corps causatifs de l'anomalie négative observée. Cette modélisation est basée sur l'extraction de l'anomalie localisée (figure 24a). Dans cette optique, nous avons alors défini un corps de forme géométrique simple auquel nous avons attribué un contraste de densité. L'inversion de ces données ajuste au mieux les courbes mesurées (figure 24a) et calculées (figure 24b) en définissant le corps responsable de cette réponse. La figure 24c représente l'écart entre les deux cartes de l'anomalie (mesurée et calculée).

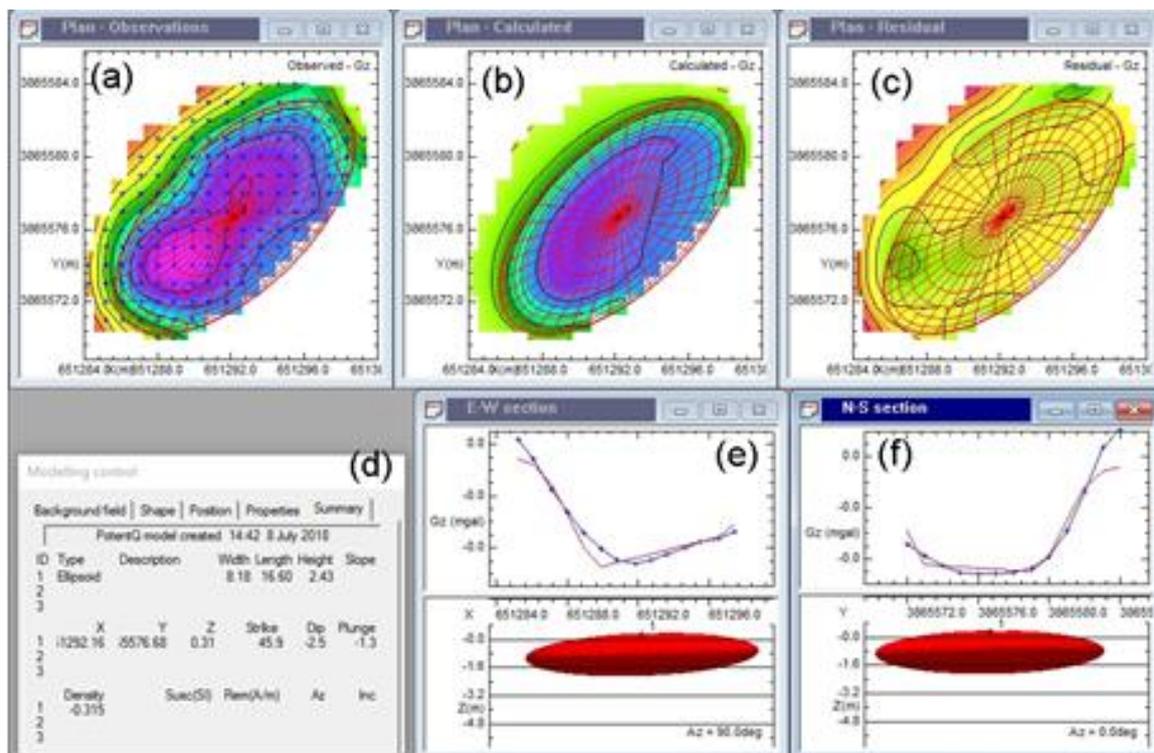


Figure 24: La modélisation 3D du corps responsable d'anomalie négative Ano1. (a) : l'anomalie Ano1 mesurée, (b) l'anomalie correspondante calculée, (c) l'écart entre l'anomalie mesurée et l'anomalie calculée, (d) résultat final de l'inversion, (e) section E-W passant par l'anomalie Ano1, la courbe bleue représente l'anomalie mesurée et la courbe rouge l'anomalie calculée et (f) section N-S passant par l'anomalie Ano en bleu l'anomalie mesurée et en rouge l'anomalie calculée. Le corps causatif de l'anomalie Ano est un ellipsoïde représenté en rouge sur (e) et (f) situé à une profondeur de l'ordre de 0.5 mètre avec un déficit de densité de  $0.3 \text{ g/cm}^3$

### III. SYNTHÈSE DES RESULTAS ET DISCUSSION

Pour la détection des cavités souterraines dans un milieu urbain: cas d'un milieu karstique (Boudjelida, Tlemcen), nous avons effectué une investigation géophysique suite à laquelle nous avons obtenu des données de 337 stations de mesures.

Suite aux deux chapitres précédents, nous présentons ici une synthèse des résultats obtenus. Par la suite nous allons dégager les idées essentielles à retenir dans ce travail.

L'analyse de la carte de l'anomalie de Bouguer (figure 18) montre qu'il y'a une variation et une dispersion aléatoire des anomalies. Après séparation des effets à l'origine de ces anomalies, pour de meilleurs résultats, on observe un couple d'anomalies négative intéressante Ano1 et Ano2 sur la carte de la résiduelle1 (figure 19). Intéressantes, car ce sont les anomalies négative qui indique la présence de masse de faible densité donc de cavité souterraine. Les cartes de la résiduelle 2 et la résiduelle 3 (figures 20 et 21) vient compléter la première carte avec des nouveaux résultats qui démontre que les anomalies négatives observées Ano1 et Ano2 ne sont pas liées à de zones de faible densité (cavités). Par la suite, la carte de l'anomalie de Bouguer a été prolongée vers le haut à 2 m et 5 m (figures 22 et 23) afin de filtrer les courtes longueurs d'ondes et s'éloigner des sources génératrices des anomalies, pour pouvoir y voir plus claire et amélioré encore les résultats. Les prolongées à différentes hauteurs (2 m et 5 m) montrent respectivement une atténuation des petites anomalies pour obtenir une variation régulières à partir d'une prolongée à 3 m de hauteur. L'application de ce filtre montre que toutes les anomalies négatives observées sont situées à des profondeurs très faibles, à l'exception d'une seule anomalie isolée (Ano1).

Afin de quantifié ce résultat (déterminer la forme, la dimension...) (Ano1), nous avons appliqué une méthode de modélisation basée sur l'extraction de l'anomalie localisée.

En somme, l'assiette de terrain étudié ici présente une seule anomalie de faible densité, localisée et isolée (Ano1). La structure causative de cette anomalie négative présente une largeur de 8 m et une épaisseur de 2.5 m. Son toit est situé à une profondeur de l'ordre de 0.5 m. La modélisation montre que le déficit de masse n'est pas une cavité pure (densité de  $2.1 \text{ g/cm}^3$ ). Ce déficit de masse serait dû à un ensemble de petites zones de faible densité.

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Les méthodes d'investigation actuellement utilisées dans la détection des cavités souterraines en milieu urbain ne font que rarement appel aux mesures géophysiques pour des raisons souvent économiques.

Néanmoins avec la précision actuelle des appareillages, la méthode micro-gravimétrique a atteint une fiabilité plus ou moins importante permettant non seulement de rechercher les vides proprement dits mais aussi les vides créées par un certain nombre de phénomènes complexe comme les karsts.

Dans ce travail, l'étude micro-gravimétrique a pour but de mettre en évidence les anomalies négatives pouvant être liées à la présence de la vides souterrains d'origine karstique, s'ils existent. Ainsi, 337 stations ont été mesurées lors d'une campagne d'acquisition de deux jours. À base de ces données collectées, des cartes ont été établies. Ces cartes sont l'image de la distribution des masses dans le sous-sol:

- ✚ La carte d'anomalie de Bouguer obtenue, présente une variation croissante des valeurs de +135.724 à +136.058 mgal. On observe aussi des anomalies de petites dimensions distribuées aléatoirement sur toute la carte.
- ✚ Les cartes des anomalies résiduelles qui reflètent l'aspect superficiel des anomalies, nous montre globalement la présence de deux anomalies négatives importantes à savoir Ano1 et Ano2.
- ✚ Enfin, les cartes de la prolongée à 2 m et 5 m viennent améliorer et préciser les résultats précédents. La plus intéressante qu'est la prolongée à 2 m, nous montre une disparition de la quasi-totalité des anomalies observées sur la carte de l'anomalie de Bouguer ainsi que l'anomalie négative Ano2 observée sur la carte de la résiduelle, à l'exception d'une petites anomalie de faible amplitude et de direction NE-SW Ano1.

Afin de déterminer les caractéristiques (formes, dimensions et contraste de densité) des masses responsables de l'unique anomalie négative (Ano1) observée, nous avons appliqué la méthode analytique de modélisation et d'inversion sur l'anomalie. La modélisation 3D effectuée, nous montre que le corps responsable d'Ano1 est situé à une profondeur de 0.5 m, avec une largeur de 8 m, une épaisseur de 2.5 m et une faible densité de  $0.3\text{g/cm}^3$ . Etant donné qu'il ne s'agit pas d'une cavité pure (densité de  $2.1\text{ g/cm}^3$ ), ce déficit de masse serait dû à un ensemble de petites zones de faible densité.

Ce qui est très intéressant dans cette étude micro-gravimétrique est que l'anomalie négative détectée est située tout près d'une cavité qui avait déjà été détectée auparavant lors des excavations sur le site, ce qui augmente encore le pourcentage de certitude de la présence de cette anomalie.

Par ailleurs, et pour que cette étude soit fiable, les résultats doivent être complétés par les résultats de forage pour une certitude plus évidente.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abtout A.** (2001)- Campagne gravimétrique CG6, Tunisie, Office National des mines.
- Bensaoula F.** (2007)- Etude de la karstification à partir des données de forages: le cas des Monts de Tlemcen (Algérie). *Karstologia*, n° 24, pp. 15-24.
- Blakely R.J.** (1995)- Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University, press, 441p.
- Bouyahiaoui B.** (2010)- études de la croûte archéenne du môle In-Ouzzal (Hoggar Occidental) par la prospection gravimétrique : identification des sources par la transformée en ondelettes. Dipl. Magister, Univ., Boumerdès, 126 p.
- Chouteau M.** (2002)- Géophysique Appliquée I (Magnétisme-Gravimétrie), *Ecole Polytechnique de Montréal*.
- Crochet P. & Marsaud B.** (1997)-Approches conceptuelles de l'aquifère karstique. Problèmes méthodologiques et d'exploitation. *Hydrogéologie*, n°3, pp. 3-18.
- Duboi j. & Diamant M.** (2001)- Géophysique, Traité géophysique interne, Tome I, *Ed. Dunod*, Paris. 210 p.
- Fénelon P.** (1965)- Vocabulaire français des phénomènes karstiques. *Comité national de géographie*, collectif : pp. 3-6.
- Gèze B.** (1973)- Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie. *Ann., Spél.*, n°28/1, pp. 1-20.
- Hayford J.F.** (1911)- Les relations de l'isostasie avec la géodésie, la géophysique et la géologie. *Science*, Nouvelle série, n°33, pp. 199-28.
- McGrath R.J., Styles P., Thomas E. & Neale S.** (2002)- Integrated high-resolution geophysical investigations as potential tools for water resource investigations in karst terrain. *Environmental Geology*, n°42, pp. 552-557.
- Nettleton L.L.** (1939)- Determination of density for reduction of gravimeter observations. *Geophysic*. Vol. 4.

**Parasnis D.S.** (1985)- Principle of applied geophysics, *Chapman and Hall*, London.

**Pratt J.H. (1855)**-Sur l'attraction des montagnes de l'Himalaya et des régions élevées au-delà, sur le fil à l'aplomb en inde. *Transactions philosophiques de la Royal Society of London*, n° 145, pp. 53-100.

**Sharma P.V.** (1986)- Geophysycal methods in geology, second *Ed. Elsevier, New York*, 442p.

**Sheriff R.E.** (1984)- Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics 2<sup>nd</sup> Ed., 141 p.

**Telford W.M., Geldart, L.P. & Sheriff R.E.** (1998)- Applied geophysics, second *Ed. Cambridge University Press*, 770 p.

**Telford W.M. Geldart L.P., Sherrif R.E. & Keys D.A.** (1981)- Prospection Géophysique, Tome 4, Prospection Gravimétrique, prospection Magnétique, Exemples Combinés. *Presses Cambridge university*, 246 p.

**Therond R.** (1973)- Recherche de l'étanchéité des lacs de barrage en pays karstique. *Eyrolles, Paris*, 444 p.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Le principe de la gravimétrie	8
Figure 2	Représentation des deux masses ponctuelles $m_1$ et $m_2$ séparées par une distance $r$ (d'après Telford et <i>al.</i> 1981)	9
Figure 3	Principe de la correction de la dérive (d'après Bouyahiaoui, 2010)	10
Figure 4	Réticule de Hammer	13
Figure 5	Modèle de Pratt (d'après Dubois et Diamant, 2001)	13
Figure 6	Schéma de l'hypothèse d'Airy (T représente l'épaisseur moyenne de la croûte terrestre)	14
Figure 7	Le gravimètre Lacoste Romberg (Modèle utilisé sur le terrain).	17
Figure 8	Matérialisation des points de mesures micro-gravimétrique sur terrain	18
Figure 9	Mesure gravimétrique sur terrain	19
Figure 10	Récepteur GPS de référence	19
Figure 11	1 <sup>er</sup> Récepteur GPS	19
Figure 12	2 <sup>ème</sup> Récepteur GPS	20
Figure 13	Phénomène de karstification	21
Figure 14	Situation de la zone d'étude (carte de Tlemcen. Echelle 1 : 25 000)	22
Figure 15	Localisation du site (Google Earth)	23
Figure 16	Mesures de la superficie et du périmètre du site (Google Earth)	23
Figure 17	Carte géologique de la zone d'étude (d'après Bensaoula, 2007)	24
Figure 18	Carte d'anomalie de Bouguer (les points en blanc représentent les stations de mesure, densité 2.4)	26
Figure 19	Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 1	28
Figure 20	Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 2	29
Figure 21	Carte d'anomalie résiduelle d'ordre 3 (densité 2.4)	30
Figure 22	Carte de l'anomalie prolongée à 2 m	31
Figure 23	Carte de la prolongée à 5 m	32
Figure 23	La modélisation 3D du corps responsable d'anomalie négative An01	33

# MEMOIRE DE MASTER

**Type de Master : Professionnel**

**Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers**

**Filière : Géologie**

**Spécialité : Géo-Ressources**

**Titre du mémoire : Détection des cavités souterraines dans un milieu urbain : cas du milieu karstique de Boudjelida (Wilaya de Tlemcen)**

**Auteur : Ousseina MODY ISSAKA**

## Résumé

Dans un milieu karstique, l'existence de vides est souvent matérialisée par le comblement éventuel des sols par des matériaux de remplissage peu dense, et se manifeste à la surface par des affaissements, des zones altérées et des zones décomprimées. Ainsi, la présence de ces vides peut induire d'énorme désordre surtout en milieu urbain où le risque est beaucoup plus important.

Dans cette optique, notre travail consiste à détecter la présence des cavités souterraines (vides) dans un site urbain de Boudjelida (Nord du chef lieu de Tlemcen). Les résultats des mesures micro-

gravimétriques, nous ont permis d'établir une panoplie de cartes d'anomalies gravimétrique (carte d'anomalie de Bouguer, cartes des résiduelles, cartes de la prolongée). Ces cartes de la prolongée qui mettent en évidence la forme et l'amplitude des différentes anomalies, montrent une anomalie négative profonde et isolée. Par ailleurs, la structure causative de cette anomalie négative présente une largeur de 8 m, une épaisseur de 2.5 m, son toit est situé à une profondeur de l'ordre de 0.5 m. La modélisation montre que le déficit de masse n'est pas une cavité pure (densité de  $2.1 \text{ g/cm}^3$ ). Ce déficit de masse serait dû à un ensemble de petites zones de faibles densités.

**Mots-clés:** Prospection gravimétrique, Cavité, Milieu urbain, Boudjelida, Tlemcen.