



Conseil Général des
Hauts-de-Seine

Version n° 1

Février 2010

Étude n° 09DRE040



Prospection géophysique Cité Scolaire Albert Camus à Bois-Colombes


SAFEGE
Ingénieurs Conseils

SIÈGE SOCIAL
PARC DE L'ÎLE - 15/27 RUE DU PORT
92022 NANTERRE CEDEX

RESUME

Le Conseil Général des Hauts de Seine a décidé de réaménager la Cité scolaire Albert Camus qui regroupe un lycée et un collège. Ces deux établissements devant être à terme séparés, des travaux de constructions de bâtiments sont prévus.

Or ce site a été en partie occupé par les usines HISPANO SUIZA, les bâtiments ayant été démolis et la Cité scolaire construite à sa place. Cependant l'étude géotechnique réalisée en janvier 2009 montre que les sables et graviers ont fait l'objet d'une exploitation à ciel ouvert dans certaines parties du site puis ces exploitations ont été remblayées de manière plus ou moins compacte. De plus HISPANO SUIZA a réalisé un certain nombre de galeries souterraines qui n'ont probablement pas été remblayées.

Pendant la dernière guerre, le site a subi de nombreux bombardements, provoquant un nouveau remaniement du sol et détruisant probablement en partie les galeries en provoquant des cratères larges et profonds.

Le but de cette étude est d'identifier clairement et de manière exhaustive, l'ensemble des galeries souterraines, sur la zone d'étude du projet (plateaux sportif et zone du futur collège).

L'étude a été réalisée selon deux méthodes géophysiques :

- ✓ La microgravimétrie
- ✓ Le radar géologique

Les mesures de microgravimétrie ont été réalisées sur l'ensemble du secteur concerné tandis que les mesures par radar géologique n'ont couvert que 45 mètres devant la cantine, zone où la présence de galerie est connue.

TABLE DES MATIÈRES

1 Zone de l'étude	1
2 Cadre géologique.....	2
3 Anomalie de Bouguer à l'échelle régionale.....	4
4 Atlas des carrières.....	5
5 Carte topographique et implantation des points de mesures	6
6 MICROGRAVIMETRIE.....	7
6.1 Généralités sur la microgravimétrie	7
6.2 Moyens utilisés et dépouillement des mesures.....	7
6.3 Calculs microgravimétriques.....	8
6.3.1 Corrections de dérive.....	8
6.3.2 Corrections liées au site.....	8
6.4 Mesures et interprétation	9
6.4.1 Organisation de la campagne de mesures.....	9
6.4.2 Anomalie de Bouguer – Anomalie régionale	10
6.4.3 Anomalie résiduelle.....	10
7 RADAR GEOLOGIQUE	13
7.1 Généralités.....	13
7.2 Moyens utilisés et dépouillement des mesures.....	14
7.2.1 Le géoradar de surface.....	14
7.2.2 Implantation des profils	15
7.2.3 Mesures et interprétation	16
8 Conclusions - recommandations.....	21
8.1 Conclusions	21
8.2 Recommandations	22

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1-1 : Plan de situation	1
Figure 2-1 : Carte géologique	2
Figure 3-1 : Carte de l'anomalie de Bouguer à l'échelle régionale	4
Figure 4-1 : Atlas des carrières	5
Figure 5-1 : Carte topographique et implantation des points de mesures.....	6
Figure 6-1 : Carte de l'anomalie de Bouguer – Anomalie régionale.....	10
Figure 6-2 : Carte de l'anomalie résiduelle	10
Figure 7-1 : Schéma d'illustration des altérations détectables par une auscultation de géoradar réalisée sur le chemin des collecteurs	14

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 **Figures**

Annexe 2 **Mise en œuvre de la microgravimétrie**

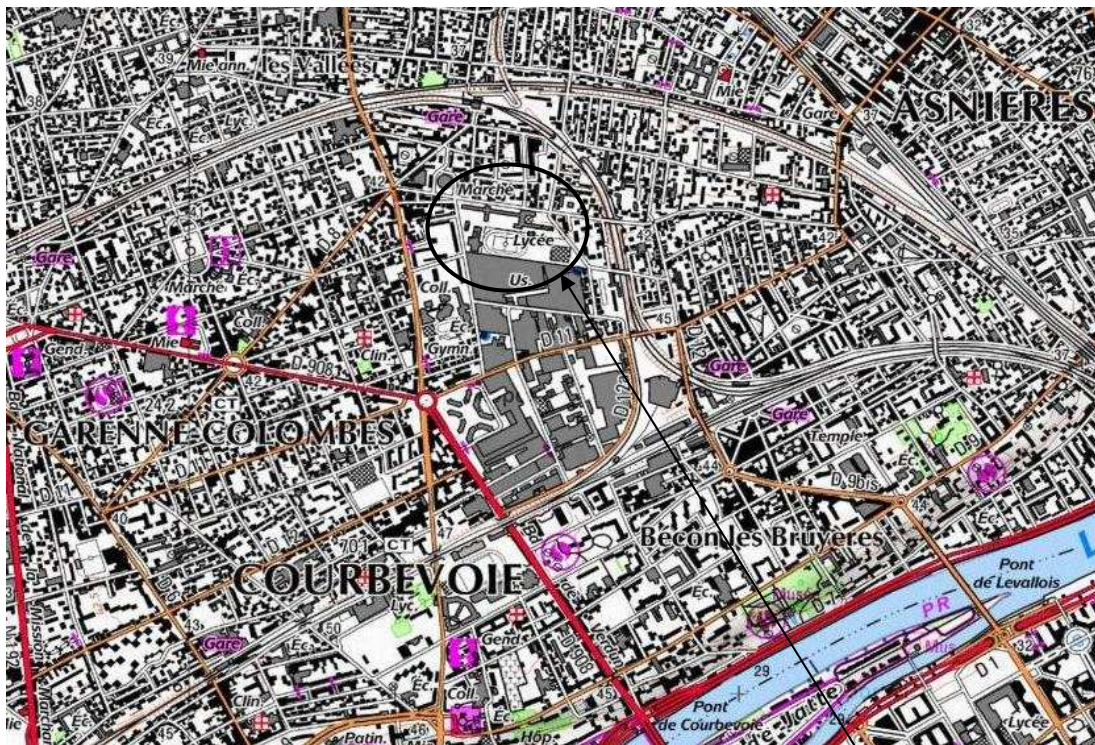
Annexe 3 **Mise en œuvre du radar géologique**

1

Zone de l'étude

La cité scolaire Albert Camus se situe dans le sud-ouest de la commune de Bois-Colombes (92). Le plan ci-après fait figurer la présence d'une usine au sud de la cité scolaire. Celle-ci a été détruite pour être remplacée par des immeubles résidentiels.

Figure 1-1 : Plan de situation



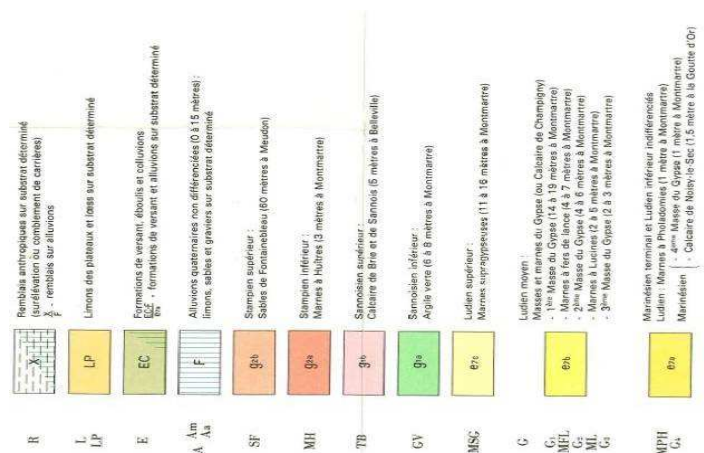
Zone de l'étude

Cadre géologique

Figure 2-1 : Carte géologique



Emplacement de l'étude

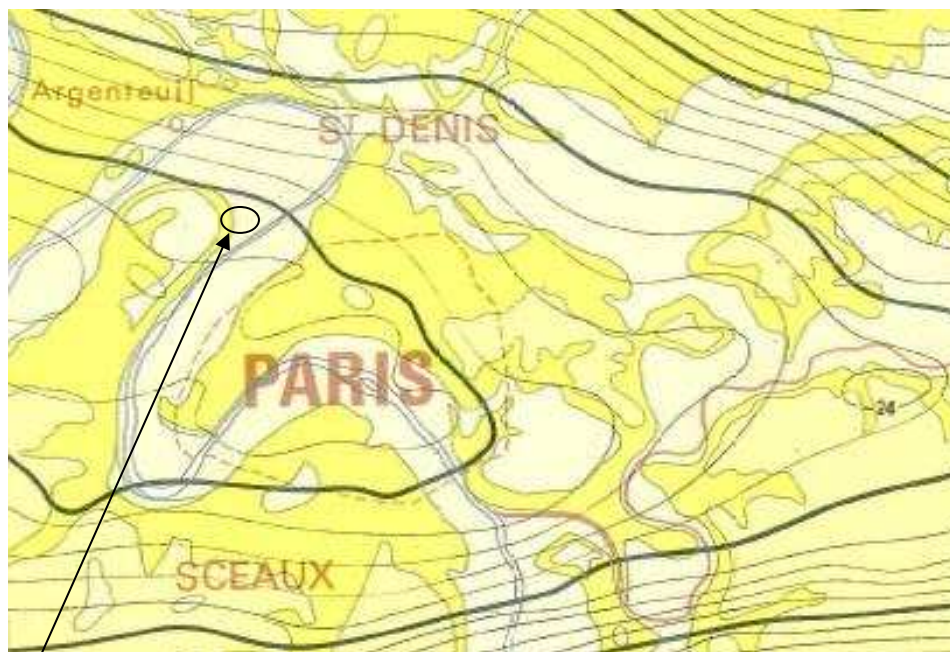


Le secteur d'étude qui est situé sur le Marinésien inférieur intitulé **Calcaire de Saint-Ouen et Calcaire de Ducy** et noté **e6b1** est recouvert par des alluvions quaternaires non différenciées (limons, sables et graviers). La formation constituée par les sables et graviers a pu être exploitée localement à ciel ouvert puis remblayée. D'autre part les bombardements subits sur le site de l'usine HISPANO SUIZA puis son démantèlement ont comme résultat la présence d'un terrain bouleversé mais qui se trouve masqué par la construction de la cité scolaire.

3

Anomalie de Bouguer à l'échelle régionale

Figure 3-1 : Carte de l'anomalie de Bouguer à l'échelle régionale



Pantin

Ci-dessus est présenté un extrait de la carte gravimétrique de la France. L'équidistance entre les courbes est de 1 milligal pour 10 kilomètres vers le nord-est soit 5 microgals pour 10 mètres vers le nord-est. Nous verrons plus loin dans le rapport que nous avons mesuré un gradient diminuant vers le nord, conforme à l'anomalie de Bouguer figurant sur la carte ci-dessus.

4

Atlas des carrières

Figure 4-1 : Atlas des carrières



Secteur de la cité scolaire

Ci-dessus est présenté un extrait de l'atlas des carrières souterraines édité par l'Inspection Générale des Carrières et concernant le secteur de Bois-Colombes sur lequel figure l'emplacement de plusieurs exploitations à ciel ayant été remblayée. Plusieurs indices d'exploitation sont situés dans la zone étudiée.

5

Carte topographique et implantation des points de mesures

Figure 5-1 : Carte topographique et implantation des points de mesures

Sur ce document figurent l'altitude des points de mesures en millimètres par rapport au point K80 qui a servi de base générale pour l'étude microgravimétrique. Nous pouvons remarquer que le stade présente un haut topographique en son centre, permettant l'écoulement des eaux pluviales vers l'extérieur. On remarque également la configuration inverse dans la cour du lycée, permettant à l'eau de pluie de se déverser dans l'avaloir présent à proximité du point U84.

Il est intéressant de noter à ce stade qu'il n'y a pas de corrélation entre la topographie et l'anomalie de Bouguer régionale et nous ne notons pas d'anomalie topographique marquée.

Nous avons reporté sur cette figure l'implantation des points de mesures microgravimétriques avec leur identification alphanumérique ainsi que la zone mesurée avec le radar géologique.

6

MICROGRAVIMETRIE

6.1 Généralités sur la microgravimétrie

Ce type de prospection consiste à effectuer à la surface du sol, à l'aide d'un gravimètre, des mesures relatives, très précises, de l'attraction du champ de la pesanteur, qui sont en relation directe avec les variations globales de masse existant dans le sous-sol. La présence, à faible et moyenne profondeur, de vides ou de terrains décomprimés, se marque par une diminution locale du champ de la pesanteur (anomalies dites "négatives"). A contrario, des excès de masse seront décelés "positifs" (remontée du substratum, zone injectée, minerais métalliques...).

6.2 Moyens utilisés et dépouillement des mesures

Les processus de mesures, de calculs et de corrections diverses sont décrits en annexe. Nous rappelons les points principaux suivants :

- ✓ Un maillage de base selon un carroyage théorique de 5 mètres de côté a été implanté sur l'ensemble de la superficie de l'étude au décamètre et reporté sur le fond de plan au 1/200^{ème}. Certains points ont été déplacés en fonction des plaques d'égouts ou des bâtiments.
- ✓ L'ensemble des relevés microgravimétriques a été rattaché au point de base K80, auquel est affectée arbitrairement la valeur 0 microgal.

Lors de cette mission 2 appareils ont été utilisés : les gravimètres LaCoste & Romberg modèle D, numéro 7 et 13 avec une précision de lecture de 1 microgal (environ le milliardième de g).

$$\begin{aligned}g &= 9,81 \text{ m/s/s} = 981 \text{ gals} \\1 \text{ gal} &= 1 \text{ cm/s/s} = 10^6 \text{ microgals}\end{aligned}$$

Dans cette étude, toutes les mesures sont exprimées en microgals.

Les mesures ont été effectuées :

- ✓ Par programmes imbriqués, d'une durée de 25 à 55 minutes, chaque programme commençant et finissant par des retours au point de base ou de sous-base pour contrôle de dérive ; deux mesures de point de base sont nécessaires avant et après chaque séquence, ceci pour pallier d'éventuelles erreurs de lecture.
- ✓ Lors de chaque programme, 1 ou 2 points d'un autre programme ont été repris à titre de contrôle (environ 19,4 % des points ont été repris dans cette campagne, ce qui est conforme aux prescriptions de l'AGAP). En réalité plus de 20 % des points ont été repris mais environ 1 % a été écarté des calculs statistiques à cause de micro chocs subits par les appareils. Les calculs statistiques nous donnent comme résultats sur les lectures une moyenne de 7 microgals et un écart-type de 5 microgals, ce qui est conforme aux prescriptions de l'AGAP.

6.3 Calculs microgravimétriques

Tout d'abord, les lectures instrumentales sont multipliées par 1,1636 (constante du ressort du gravimètre D7, ou 1,1205 (constante du ressort du gravimètre D13), afin de les transformer en microgals. Ensuite, les lectures subissent les corrections liées au gravimètre et à l'heure (corrections de dérive), puis les corrections liées au site.

6.3.1 Corrections de dérive

CORRECTION LUNI-SOLAIRE

Elle a été calculée à l'aide d'un programme de type astronomique, avant le démarrage de la mission.

DÉRIVE INSTRUMENTALE

Elle comprend une composante régulière de quelques microgals par heure, à laquelle peut s'ajouter une composante irrégulière, voire brutale, due à des petits chocs pendant le transport ou à des variations soudaines de température. Ces variations sont appréciées grâce aux retours périodiques au point de base, qui permettent de faire une première évaluation de la dérive. Une hypothèse de dérive est alors établie graphiquement, généralement en supposant une dérive instrumentale quasi linéaire entre les retours à la base.

6.3.2 Corrections liées au site

Ce sont les corrections d'altitude et de latitude. La nature des couches géologiques nous a conduits à adopter une masse volumique égale à 2.0 g/cm^3 (20 kN/m^3).

CORRECTIONS D'ALTITUDE

Elles prennent en compte la différence Z entre l'altitude du point et celle de la base gravimétrique, qui constitue un zéro relatif topographique; elles sont données par :

$$C = (0,3086 - 0,0419\sigma) Z$$

où C est en microgals et Z en millimètres. σ est la masse volumique des terrains de surface entre les points les plus hauts et les points les plus bas d'une même zone d'étude ; elle est exprimée en g/cm^3 .

Pour $\sigma = 2,0 \text{ g/cm}^3$ (20 kN/m^3), nous obtenons $C = 0,2248$ microgals/millimètre.

CORRECTIONS DE LATITUDE

A la latitude de la commune de Bois-Colombes, cette correction est de 0,81 milligal par kilomètre, qui est ajoutée à la valeur de Bouguer lorsque l'on se dirige vers le sud (l'isovaleur 0 microgal passe par le point de base).

Ces corrections faites, nous aboutissons à l'anomalie de Bouguer, directement reliée aux hétérogénéités de masse dans le sous-sol. Elle représente en chaque point la somme des variations de la pesanteur depuis la surface jusqu'aux couches profondes, par rapport à la base gravimétrique.

6.4

Mesures et interprétation

L'acquisition des données microgravimétriques s'est déroulée sur le terrain du 18 au 29 janvier 2010, les dernières vérifications ayant eu lieu le 4 février 2010.

6.4.1 Organisation de la campagne de mesures

Un réseau de 2 bases et sous-bases a été implanté afin de réduire le temps des programmes de mesures. Celles-ci sont listées ci-après :

bases	N°point	X	Y	Altitude (millimètres)	Corr. Latitude (μgal)	Bouguer (μgal)
générale	K 80	75	205	0	0	0
sous-base 1	Q 60	105	155	-680	-14	-6

Au total 1087 stations de microgravimétrie ont été implantées, mesurées et calculées.

6.4.2 Anomalie de Bouguer – Anomalie régionale

Figure 6-1 : Carte de l'anomalie de Bouguer – Anomalie régionale

Elle constitue le premier document issu des mesures et représente en plan les valeurs de l'anomalie de Bouguer, toutes corrections faites, y compris les immeubles, les caves, les réseaux... Toute masse latérale (immeubles) ou manque de masse latérale (caves) a une influence sur la mesure de l'attraction de la pesanteur. Nous avons développé lors de l'étude de la pyramide de Kheops une série de programmes de corrections de masses latérales. Celui que nous avons utilisé lors de cette étude s'appelle PRISM[®]. Nous avons donc modélisé les immeubles et les caves. Nous avons également pris en compte les différents réseaux présents.

Nous avons pris comme densité moyenne pour les maisons $0,2 \text{ g/cm}^3$. Concernant les caves un contraste de 2 g/cm^3 a été utilisé.

On peut observer dès ce stade des déformations très importantes dans les courbes de l'anomalie de Bouguer. Apparaissent de nombreuses anomalies fermées et quelques zones de gradients très importants.

Sur cette carte, nous avons superposé l'anomalie régionale, qui est un lissage de l'anomalie de Bouguer. Ce lissage correspond à l'échelon local aux variations gravimétriques considérées comme normales, en relation avec l'influence des structures géologiques profondes.

Globalement, le gradient de l'anomalie régionale est décroissant du nord allant de +26 microgals à -36 microgals. Il n'est pas en corrélation avec la topographie ce qui est l'indice d'un bon choix de la valeur de la densité choisie pour le calcul du Bouguer.

La connaissance des anomalies de Bouguer et régionale va nous permettre de calculer l'anomalie résiduelle.

6.4.3 Anomalie résiduelle

Figure 6-2 : Carte de l'anomalie résiduelle

L'anomalie résiduelle est définie par la relation :

$$\text{Anomalie résiduelle} = \text{Anomalie de Bouguer} - \text{Anomalie régionale}$$

Elle représente les anomalies gravimétriques restant après l'élimination de l'anomalie régionale et met en évidence les zones a priori anormales (anomalies dites négatives), liées à un déficit de masse dans le sous-sol à faible et moyenne profondeur.

Cette dernière anomalie, caractérisant les déficits de masse situés à faible et moyenne profondeur, peut être en relation avec plusieurs causes :

- ✓ Variations de l'épaisseur et de la densité des terrains de surface.
- ✓ Variations de faciès au sein des couches intermédiaires (altération, fissurations...).
- ✓ Présence de vides naturels ou anthropiques.

En premier lieu, tous les secteurs où les valeurs de l'anomalie résiduelle sont supérieures à -10 microgals (non coloriés sur la planche n° 6-2) pourraient être considérés comme a priori sains au moment de la prospection. Les secteurs où la valeur de l'anomalie résiduelle atteint ou dépasse $+20$ microgals pourraient correspondre à la présence d'anciennes fondations compactes ou proche de la surface.

En second lieu, plusieurs anomalies apparaissent sur la planche n° 6-2. Elles y apparaissent en rouge tramé. On distingue avec netteté la présence des galeries devant la cantine (lignes 104 à 112). Par contre, aucune anomalie ne se distingue entre les anomalies A et B, indiquant que le réseau de galeries a été soit remblayé soit effondré puis remblayé dans ce secteur.

L'anomalie B se prolonge vers l'est jusqu'au point Q 100 puis prend la direction du sud vers le point J 96 en formant un angle droit. Nous sommes probablement en présence d'un prolongement des galeries connues.

L'anomalie C couvre la partie centrale de la zone étudiée, tandis que l'anomalie D est présente dans sa partie est. Ces 2 zones sont séparées par un axe positif partant du point B 46 et allant jusqu'au point ZA 64.

L'anomalie E se distingue au sud-ouest du site, inscrite dans le polygone [A 70 – C 80 – C 90 – B 94 – A 94]

✓ Principe de la modélisation des anomalies

Une modélisation parallélépipédique simple à deux dimensions avec extensions latérales infinies de ces structures prend en compte son étendue, son amplitude maximale et ses gradients de bordure.

Des gradients de bordure importants peuvent signifier des causes proches de la surface lorsque les anomalies sont peu étendues. Il faut souligner aussi que les gradients de bordure d'une même anomalie ne sont pas toujours symétriques, ce qui induit, pour une anomalie étudiée, deux profondeurs possibles et plusieurs épaisseurs données par la modélisation parallélépipédique. De plus, la modélisation centrera l'anomalie à une certaine profondeur, mais, selon le contraste de densité adopté (plus il est important, plus les terrains seront décomprimés), il s'ensuivra que les épaisseurs données par le modèle seront donc différentes (plus les terrains seront décomprimés, plus la tranche de sols concernés par ces désordres sera faible).

A titre d'exemple, 50 % de vide à 10 mètres de profondeur sur 2 mètres de hauteur, ou un vide franc (100 % de vide) de 1 mètre de hauteur à la même profondeur conduisent à une anomalie d'amplitude et d'extension identique.

✓ **Étude des anomalies**

L'ensemble des modélisations effectuées sur les secteurs anormaux donnent les résultats suivants.

Les anomalies A et B situeraient un réseau de galeries entre 4 et 6 mètres de profondeur, avec certaines parties plus ou moins effondrées et/ou remblayées.

Les anomalies C, D et E concerneraient d'anciennes exploitations des sables et graviers sur une profondeur variable allant de 6 à 8 mètres, les secteurs les plus profonds correspondants aux minimums gravimétriques mesurés. Les formes sont irrégulières, indiquant un remblaiement très hétérogène et les minimums gravimétriques pourraient correspondre à des cratères de bombes remblayés.

7

RADAR GEOLOGIQUE

7.1 Généralités

Le radar géologique utilise la propagation et la réflexion d'ondes électromagnétiques de hautes fréquences pour l'exploration des couches superficielles. Il est composé de deux antennes : émettrice et réceptrice.

L'antenne émettrice envoie des ondes électromagnétiques de très brève durée, à des fréquences variant de quelques dizaines de MHz à quelques GHz. Quand les ondes rencontrent une limite entre deux milieux de constantes diélectriques différentes, une partie de leur énergie est réfléchiée, tandis que l'autre pénètre plus profondément. Les ondes réfléchies sont captées en surface par l'antenne de réception permettant de tracer un graphique temps-distance appelé radargramme.

La profondeur d'investigation dépend de beaucoup de facteurs tels que la fréquence et la puissance d'émission, ainsi que la constante diélectrique des milieux traversés.

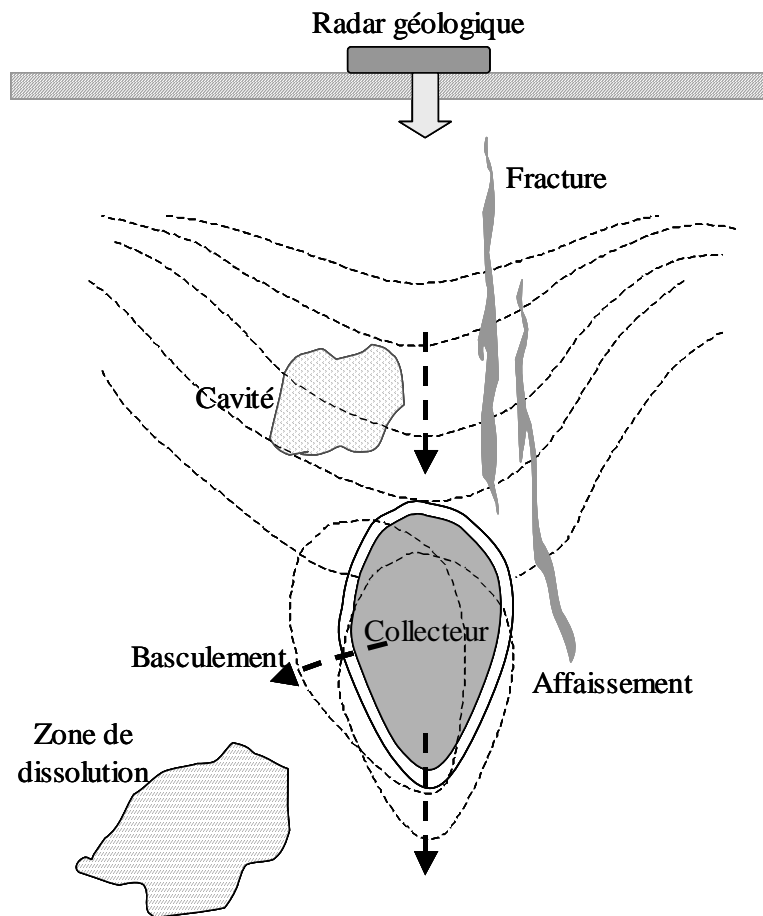
Cette méthode d'investigation peut fournir de renseignements sur trois variables différentes des matériaux, à savoir :

- ✓ La permittivité diélectrique (ϵ_r) : capacité d'un milieu à se polariser. Elle est reliée à la teneur en eau.
- ✓ La conductivité (σ) : plus elle augmente et plus le signal est atténué.
- ✓ La perméabilité magnétique (K) : faculté d'un matériau à produire un champ magnétique.

Les antennes de géoradar à hautes fréquences explorent le premier mètre du milieu à ausculter avec une excellente résolution alors que les antennes basses fréquences ont une résolution plus faible.

La figure suivante illustre certaines anomalies recherchées par les investigations au moyen de passage d'un géoradar.

Figure 7-1 : Schéma d'illustration des altérations détectables par une auscultation de géoradar réalisée sur le chemin des collecteurs



7.2 Moyens utilisés et dépouillement des mesures

7.2.1 Le géoradar de surface

Le choix d'une antenne de fréquence 100 MHz a été défini en fonction de la profondeur des galeries connues. En effet, cette antenne est en théorie la plus adaptée à une analyse de la structure du sol jusqu'à une profondeur moyenne de 4 m à 5 m sur cette zone d'étude.

Le calcul de la permittivité du milieu est donné par la formule : $\epsilon_r = (c / v)^2$, où :

- ✓ ϵ_r est la permittivité du milieu traversé,
- ✓ c est la vitesse de la lumière soit $3E^8$ m/s,
- ✓ v est la vitesse de propagation de l'onde radar dans le milieu.

La constante diélectrique du secteur a été calculée sur une hyperbole présente sur le profil A et correspondant au passage du collecteur d'eau pluviale dont on connaît la profondeur et la taille

Le calcul nous a conduits à prendre comme constante diélectrique du milieu la valeur de 16.

7.2.2 Implantation des profils

Un total de 12 profils a été mesuré répartis comme suivant :

Profils mesurés dans le sens est-ouest :

Profil A	de B 90 à B 110
Profil B	de E 90 à E 110
Profil C	de H 90 à H 110
Profil D	de K 90 à K 110
Profil E	de N 90 à N 110
Profil F	de PQ 90 à PQ 110 (le long de la haie, plus proche du profil Q)

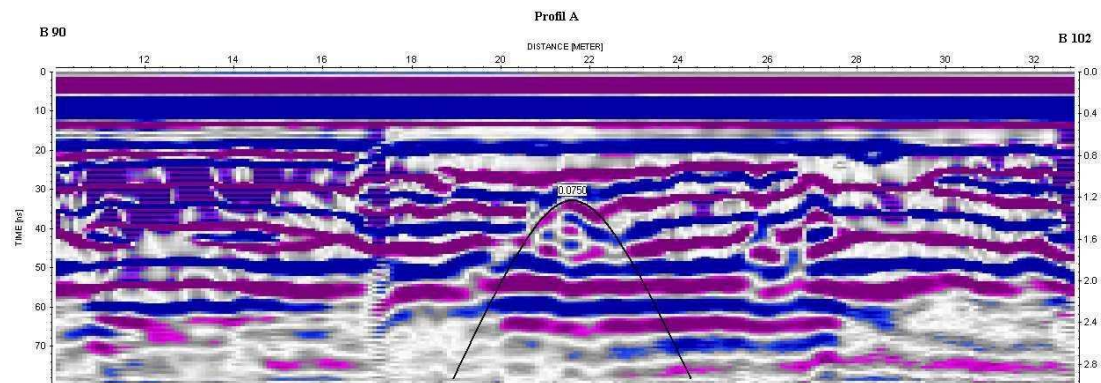
Profils mesurés dans le sens sud-nord

Profil G	de A 94 à PQ 94
Profil H	de A 98 à PQ 98
Profil I	de A 102 à PQ 102
Profil J	de A 108 à PQ 108
Profil K	de A 111 vers PQ 111
Profil L	de A 112 à Q 112

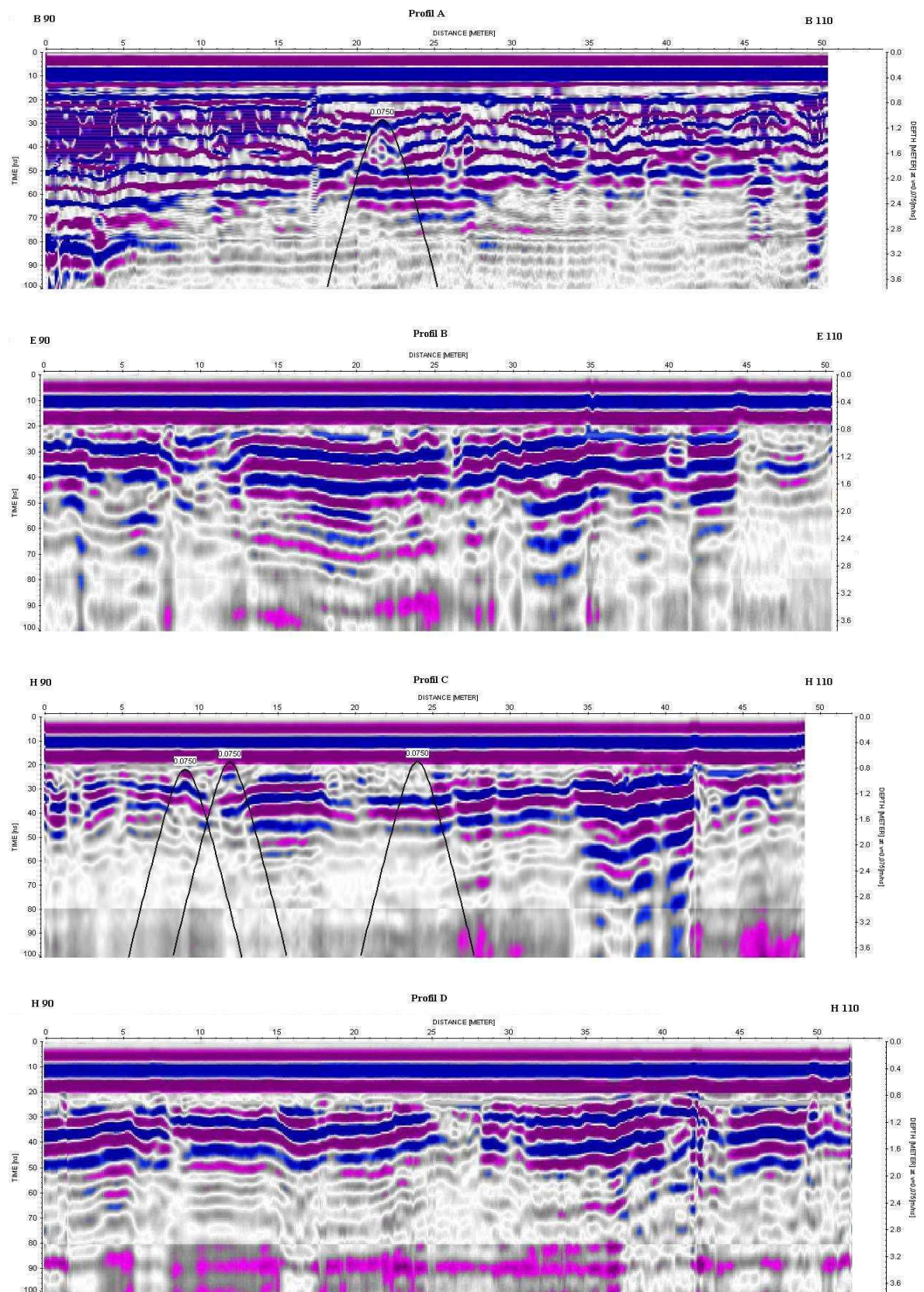
La zone de l'étude étant probablement constitué dans les premiers mètres de terrains sablo-argileux saturé en eau, la pénétration de l'onde radar est très faible (entre 2,5 et 3,5 mètres).

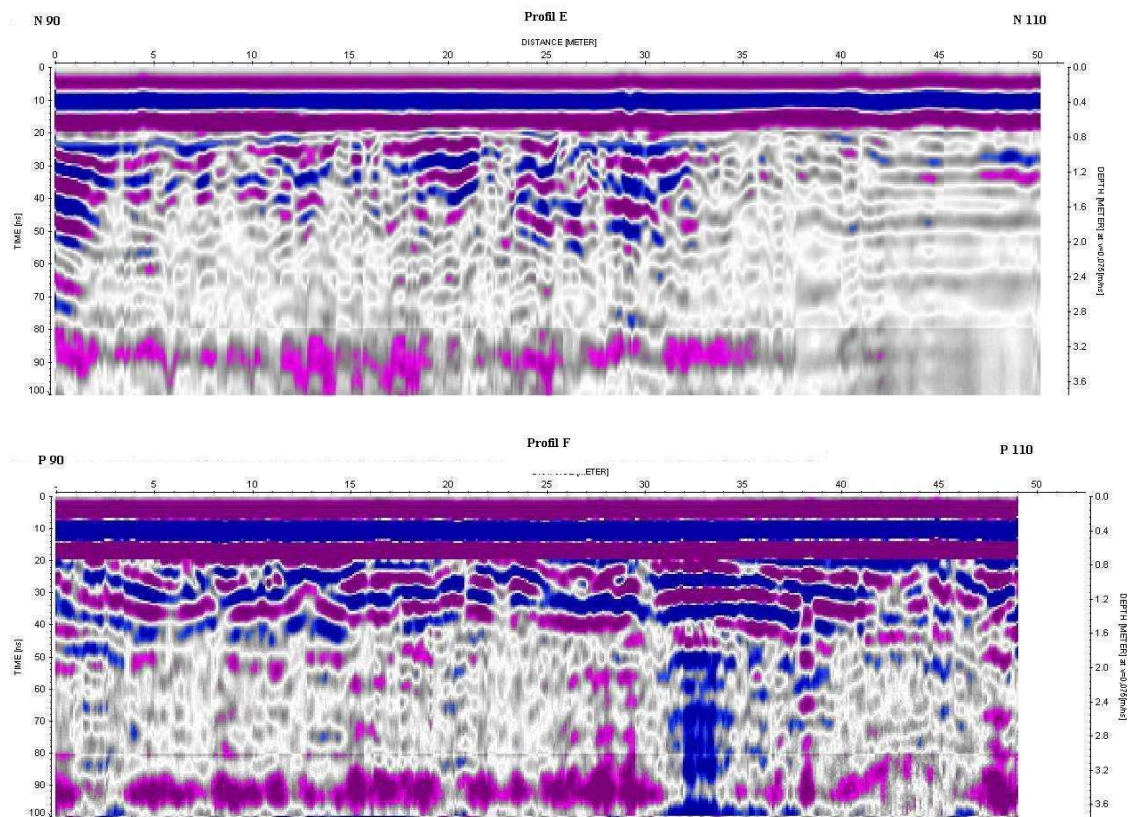
7.2.3 Mesures et interprétation

Profils A ayant servi au calcul de la constante diélectrique.



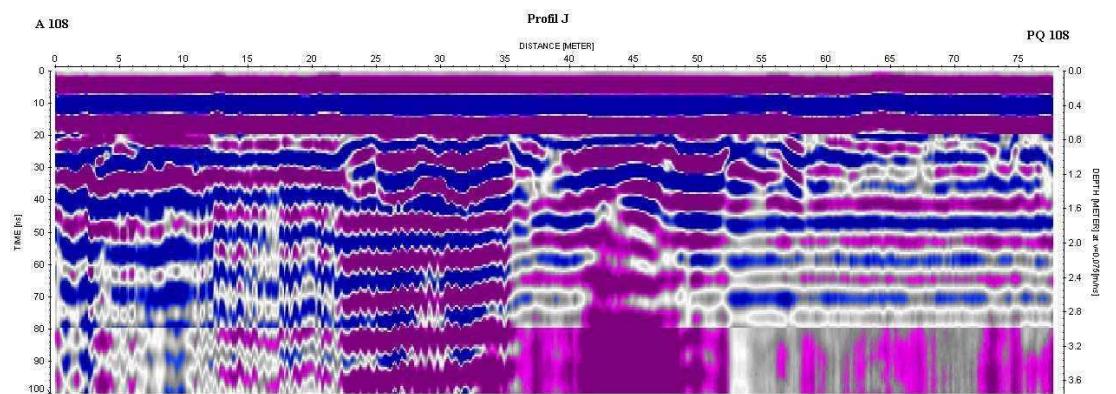
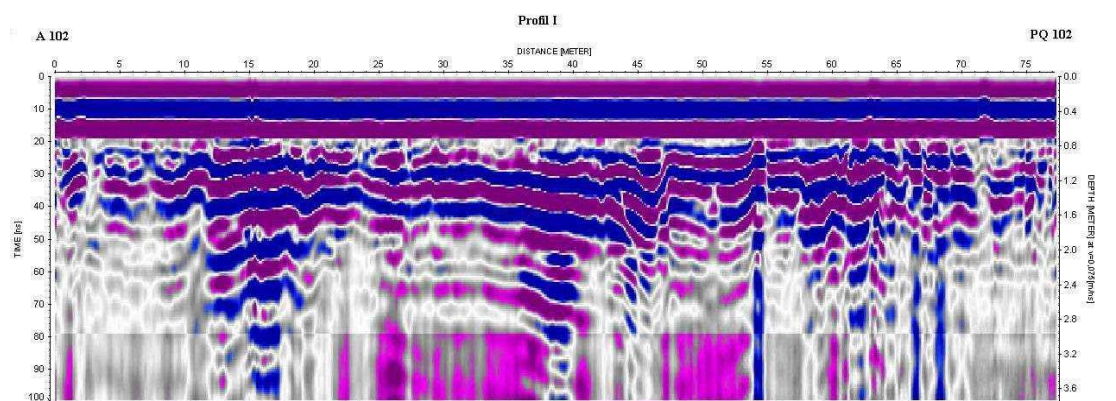
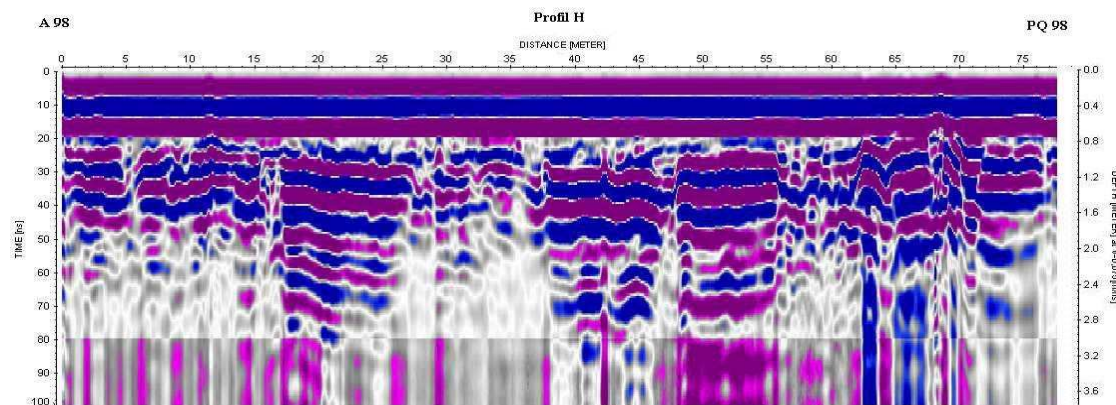
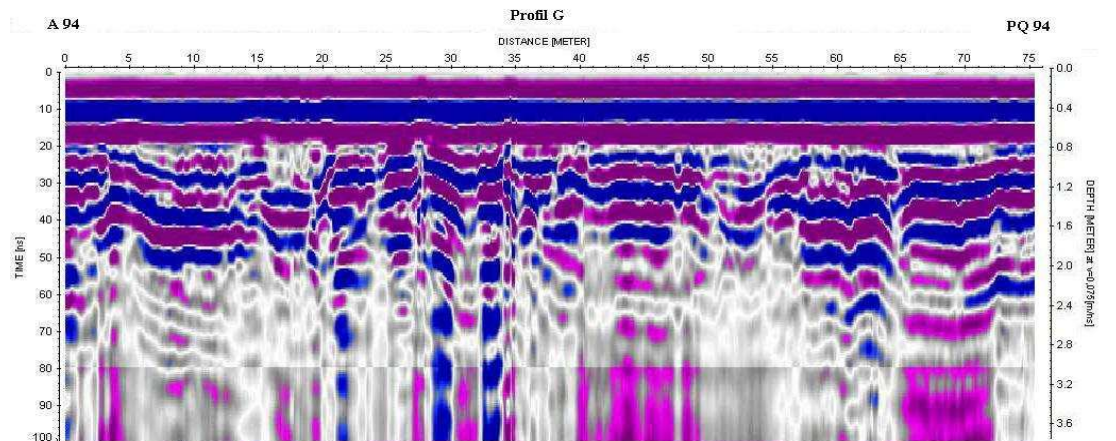
✓ Profils réalisés dans le sens est-ouest :

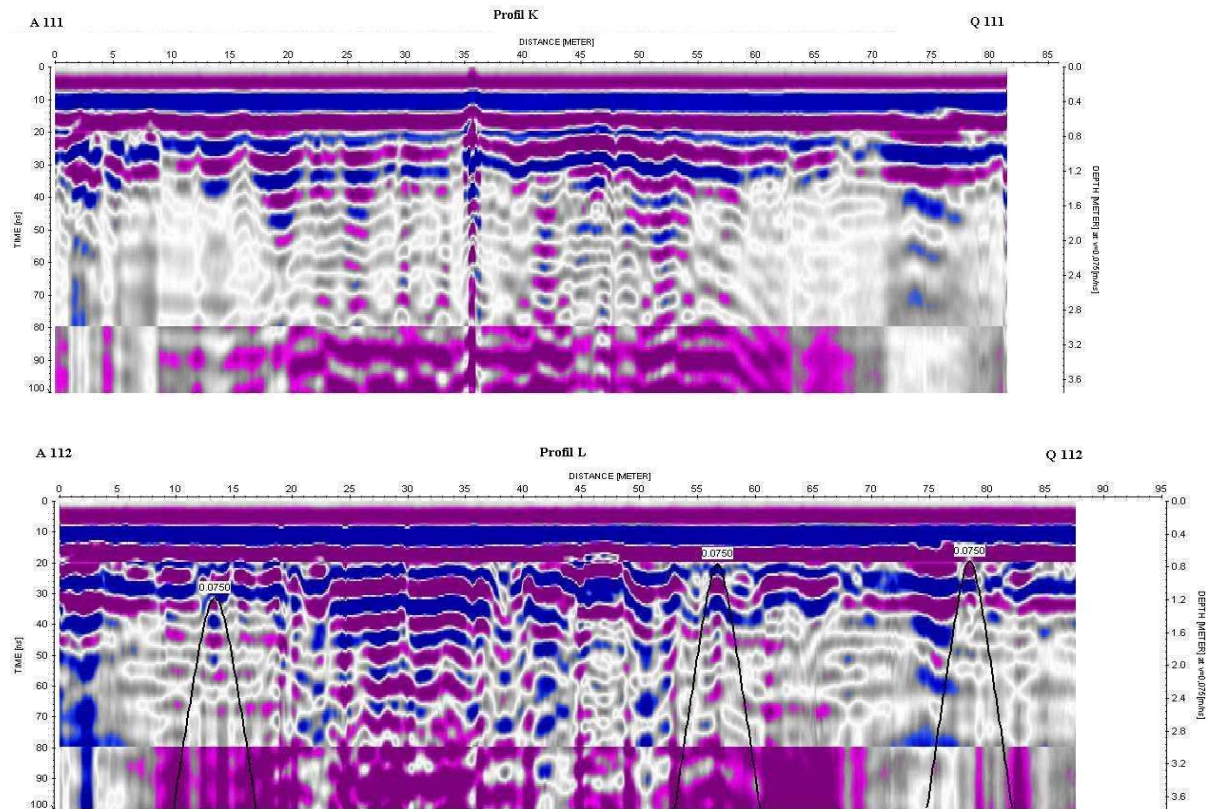




On peut constater que le signal est perdu vers 1,5 mètre de profondeur et même dans certains secteurs à moins d'1 mètre, à cause de la présence de terrains conducteurs en surface. Il n'y a pas d'interprétation possible sur ces radargrammes sinon observer une bonne corrélation entre les secteurs en anomalie en microgravimétrie et les secteurs de perte de signal sur les radargrammes (par exemple sur le profil E entre les points N 104 et N 110)

✓ Profils réalisés dans le sens sud-nord :





On peut faire les mêmes remarques que pour les profils réalisés dans le sens est-ouest.

Comme nous l'avons indiqué dans notre offre, le site présentant des terrains conducteurs à très conducteurs, le radar géologique n'a pas apporté d'information sur la présence des galeries recherchées.

8

Conclusions - recommandations

8.1 Conclusions

Une campagne géophysique a été réalisée dans la Cité scolaire Albert Camus à Bois-Colombes (92) afin de localiser les anciennes galeries souterraines devant la cantine et de localiser les anciennes exploitations de sables et graviers à ciel ouvert et remblayées depuis. 1086 stations microgravimétriques ont été implantées et mesurées et 12 profils de radar géologique ont été réalisés.

La microgravimétrie permet de tirer les conclusions suivantes :

Les secteurs où les valeurs de l'anomalie résiduelle sont supérieures à – 10 microgals (zones non coloriées sur la planche n° 6-2) pourraient être considérés comme a priori sains au moment de la prospection. Les zones fortement positives (valeurs supérieures de 20 microgals, coloriées en bleu sur la planche n° 6-2) pourraient correspondre à la présence de béton correspondant aux anciennes fondations de l'usine HISPANO SUIZA.

Pour information, nous soulignons ici le fait que la carte microgravimétrique est un document qui peut évoluer dans un sens défavorable dans le temps. En effet, des cavités de type karstique ou des carrières souterraines, même saines en ce moment, peuvent remonter vers la surface du sol, suite à des épisodes pluvieux importants et longs par exemple.

Cinq anomalies principales apparaissent sur cette étude.

Les anomalies A et B proches de la cantine correspondraient à la présence de galeries plus ou moins effondrées et/ou remblayées et situées entre 4 et 6 mètres de profondeur.

Les anomalies C, D et E seraient causées par la présence d'anciennes exploitations de sables et gravier ayant atteints 6 à 8 mètres de profondeur puis remblayées de manière très hétéroclite. De plus la présence de cratères également remblayés n'est pas à exclure.

8.2 Recommandations

Afin de lever l'indétermination inhérente à l'interprétation microgravimétrique, plusieurs causes non exclusives pouvant être à l'origine d'une même anomalie, nous recommandons un contrôle géotechnique par sondages destructifs avec enregistrements de paramètres (vitesse d'avancement, vibration réfléchie, poussée sur l'outil). Ils constituent un programme minimum, sont notés ▲ sur la planche n° 6-2, et sont consignés dans le tableau suivant :

N° point	Zone	X	Y	Anomalie résiduelle (μ gal)	Profondeur/TN (mètres)
E 108	A	45	275	-24	20
P 98	B	100	250	-25	20
L 96	B	80	245	-22	20
T 92	C	120	235	-27	20
O 68	C	95	175	-51	20
QR 68	C	107,5	175	-57	20
G 62	C	55	160	-42	20
*G 50		55	130	28	20
N 46	D	90	120	-43	20
S 36	D	115	-95	-51	20
C 34	D	35	90	-34	20
Q 26	D	26	105	-40	20

Tableau : Points de sondages préconisés

Le sondage marqué d'un astérisque * est utilisé comme sondage d'étalonnage.

Le bureau d'études géotechniques donnera son avis quant aux dispositions à prendre en vue de consolider ces secteurs si des problèmes étaient découverts.

Nous restons à la disposition du Conseil Général des Hauts-de-Seine pour tout complément d'information éventuel concernant cette étude.

ANNEXE 1

FIGURES

ANNEXE 2

MISE EN ŒUVRE DE LA MICROGRAVIMETRIE

MISE EN ŒUVRE DE LA PROSPECTION MICROGRAVIMÉTRIQUE

Équipement mis en œuvre

Les mesures de nivellement sont réalisées avec une précision meilleure que le centimètre, afin d'augmenter la qualité de la mesure brute, sachant qu'une erreur de nivellement d'un centimètre conduit à une erreur de l'ordre de 3 microgals sur la valeur brute. Ainsi, nous utilisons un niveau d'ingénieur de type WILD NAK24, ou équivalent.

Les mesures microgravimétriques seront réalisées à l'aide d'un microgravimètre de type LACOSTE & ROMBERG, Modèle D «Microgal». Le groupe SAFEGE possède trois appareils numérotés D7, D13 et D94, régulièrement entretenus et vérifiés.

Qualité des mesures :

Les mesures microgravimétriques sont effectuées avec une précision de lecture de l'ordre de 1 microgal. Globalement, la précision des mesures est de l'ordre de plus ou moins 5 microgals. La qualité des mesures est vérifiée par une reprise systématique de 10 à 20% des stations implantées environ, conformément au CODE DE BONNE PRATIQUE GEOPHYSIQUE, à l'élaboration duquel nous avons participé.

1. GENERALITES SUR LA MICROGRAVIMETRIE

Cette méthode de prospection est la plus couramment utilisée pour la recherche de cavités souterraines.

Elle consiste à mettre en évidence les déficits de masse existant dans le sol qui se traduisent en surface par une diminution locale de la valeur locale du champ de la pesanteur.

On mesure directement avec un gravimètre LACOSTE & ROMBERG modèle D, les variations relatives de la composante verticale de l'attraction de la pesanteur au microgal près (10^{-6} cm.s⁻²), soit une variation d'un milliardième de l'attraction de la pesanteur (10^{-9} g), avec pour valeur normale de la pesanteur :

$$g = 981 \text{ cm.s}^{-2} = 981 \text{ gals}$$

$$1 \text{ gal} = 1 \text{ cm.s}^{-2} = 10^6 \text{ microgals}$$

Le centième de milligal (10^{-8} g) ou le microgal (10^{-9} g), sont les unités généralement employées pour indiquer la grandeur des anomalies relatives à des cavités souterraines.

D'un point de vue théorique, l'influence d'une cavité peut-être calculée avec précision à partir de modèles de forme géométrique simple. Un exemple est donné ci-après dans le cadre d'un cylindre horizontal vide, dans un milieu de densité 2.

Cependant, l'expérience montre que bien souvent l'anomalie mesurée est supérieure à l'anomalie théorique :

- la cavité est souvent accompagnée de décompressions au sein des terrains sus-jacents. Cet état de fait se traduit par une remontée du déficit de masse vers le Terrain Naturel, qui est ainsi mieux perçu, et l'anomalie mesurée est plus forte,

- dans le cas de cavités liées à des circulations d'origine karstique, l'expérience montre que l'on ne détecte pas des anomalies isolées, en général, mais plutôt des axes et/ou des zones de moindre densité au sein du massif ausculté. Sur ces axes karstifiés, les déficits de masse les plus importants sont localisés à l'aplomb des anomalies gravimétriques les plus marquées.

La mesure gravimétrique se caractérise par l'intégration dans les anomalies de toutes les diminutions globales de densité créées par les variations dans les terrains de surface (remblais, surépaisseurs de terrains meubles, altérations, etc...).

2. PRINCIPE D'EXPLOITATION DES MESURES

Toutes les mesures sont effectuées par rapport à une base fixe, choisie arbitrairement. On y affecte généralement la valeur 0. On opère par retours séquentiels à la base, toutes les 30 à 40 minutes environ, de façon à suivre les variations diurnes de la "dérive globale de l'appareil", constituée de :

- la dérive spécifique à l'appareil de mesure,
- les variations expérimentales de la dérive luni-solaire,
- l'incidence de chocs éventuels (mécaniques et/ou thermiques).

Cette méthodologie permet d'établir une courbe de dérive en fonction de l'heure, correspondant à l'évolution de g , sur la base choisie, à tout instant de la période de mesure.

A l'aide de cette courbe, on procède en premier lieu à une "correction de dérive", ce qui permet d'obtenir la différence Δg entre la base gravimétrique et les stations.

Les valeurs ainsi calculées, sont ensuite corrigées de plusieurs influences :

- altitude de la station de mesure,
- latitude (forme ellipsoïdale de la Terre),
- densité des terrains de surface,
- éventuellement, influence des masses latérales (relief, ouvrages d'art, habitations, etc...).

La carte qui résulte de tous ces traitements s'appelle "**carte de l'anomalie de Bouguer**". C'est le seul document brut fourni par l'ensemble des mesures réalisées et réunissant toutes les informations enregistrées.

L'anomalie de Bouguer représente physiquement en chaque point de mesure, la valeur de g , l'attraction de la pesanteur, se rapportant uniquement aux influences du sous-sol.

Elle intègre deux types d'anomalies :

- **L'anomalie régionale**, indiquant les causes liées à la géologie profonde et faisant varier l'anomalie de Bouguer d'une manière continue et régulière.
- **L'anomalie résiduelle**, caractérisant les déficits de masse situés à faible et moyenne profondeur.

Cette dernière peut être en relation avec :

- des variations d'épaisseur et de densité des terrains de surface,

- des variations au sein des couches intermédiaires (altération, terrains fissurés ou décomprimés, etc...),
- des massifs injectés, donc plus denses que le contexte,
- la présence de cavités, vides ou remblayées.

$\text{Anomalie résiduelle} = \text{Anomalie de Bouguer} - \text{Anomalie régionale}$

L'anomalie résiduelle qui nous intéresse, est obtenue par filtrage adéquat, permettant d'éliminer l'anomalie régionale de l'anomalie de Bouguer.

L'anomalie régionale est calculée généralement par une méthode graphique en tenant compte du contexte géologique local (détermination de droites à grand rayon de courbure) et du gradient gravimétrique régional donné par des cartes à grande échelle.

Dans la plupart des cas, les mesures de terrain sont dépouillées à l'aide de calculatrices de poche, ou sur micro-ordinateur via le tableur Excel.

Il existe également des traitements les plus élaborés propres à SAFEGE :

- Corrections spéciales de relief (programme TERCOR) ;
- Cartes des variations de densité (programme FILT) ;
- Calcul d'une structure (programme MODCONG) ;
- Calcul d'inversion en densités (programme EMG®).

3. PRECISION DES MESURES MICROGRAVIMÉTRIQUES

Les mesures effectuées par un opérateur expérimenté, sont obtenues avec une précision de lecture de 1 à 2 microgals.

Dans des conditions normales de mesure (environnement calme, conditions climatiques favorables), l'écart entre deux mesures d'une même station est compris entre 0 et 5 microgals.

Tous les points montrant des écarts supérieurs à 5 microgals, ou faisant apparaître des anomalies supérieures à cette valeur au stade du dépouillement, font l'objet de vérifications très serrées (analyse de la courbe de dérive instrumentale, reprises supplémentaires, etc...).

L'obtention d'une telle précision nécessite une méthodologie de mesure particulière (programmes de mesures imbriquées, points repris plusieurs fois).

La vérification des mesures et la fréquence des reprises sont telles que les anomalies atteignant 1 centième de milligal (1 cmgal ou 10 microgals) ont toutes les chances de coïncider avec un déficit ou un excès de masse.

4. CORRECTIONS

4.1. - Correction topographique (ou correction de plateau)

Les variations d'altitude provoquent des variations dans les mesures par l'éloignement du centre de la terre d'une part, et par l'attraction des tranches de terrain comprises entre deux stations d'autre part.

Toutes les mesures sont donc ramenées à un même niveau de référence (celui de la base).

La correction à apporter est :

$$(0,3086 - 0,0419 \sigma) \Delta Z$$

avec σ = densité du terrain, exprimée en g/cm³

ΔZ = différence d'altitude entre la station et la base

Si ΔZ est en millimètres, la correction est en microgals.

Cette correction est très importante puisque pour des densités proches de 2g/cm³, elle dépasse 200.10⁻³ milligals/mètre. C'est ce qui impose un nivellement précis de chaque station.

D'autres corrections peuvent être faites, mais elles sont moins impérieuses que la précédente.

4.2. - Correction de latitude

Elle tient compte de l'aplatissement de la terre qui, du fait de son aplatissement aux pôles, provoque une diminution de g lorsqu'on va des pôles vers l'équateur. La force centrifuge due à la rotation de la terre tient une part négligeable dans cette correction.

En microgravimétrie, on prend généralement comme hypothèse la droite correspondant à l'isovaleur 0 microgal d'orientation ouest-est passant par le point de base. Si plusieurs sous-bases ont été implantées (prospections de terrains étendus), cette droite passera par la base générale choisie lors de la mission. La valeur de g diminuant des pôles vers l'équateur, les corrections pour l'hémisphère nord seront donc positives vers le sud et négatives vers le nord à partir de cette droite.

La variation de cette correction est de l'ordre de 8 microgals par tranche de 10 mètres.

4.3. - Corrections de terrain

Elles tiennent compte des influences latérales dues aux excès ou aux défauts de masse avoisinant la station.

Ces influences peuvent provenir entre autres de talus, de fossés, de canalisations, d'Ouvrages d'Art, d'habitations ou de caves.

L'intérêt de procéder ou non aux corrections de latitude ou de relief dépend de la nature et surtout de l'échelle du problème posé. L'influence de la latitude est continue et ne risque pas d'introduire, sur un profil rectiligne, d'accidents.

5. DESCRIPTION SOMMAIRE DE LA METHODOLOGIE

5.1. - Implantation des stations de mesure :

en voie, voirie,... : tache de peinture,

hors voirie : étiquette agricole, piquet en bois, tache de peinture

5.2. - Levé topographique X, Y, Z ou Z uniquement

5.3. - Mesure gravimétrique :

L'appareil de mesure a un volume réduit (0,20 x 0,20 x 0,20 m).

5.3.1. - mise en place de la coupelle de mise en station en aluminium fritté sur le sol, à l'aplomb du point de mesure,

5.3.2. - mise en station du gravimètre sur la coupelle à l'aide des niveaux à bulle. Cette opération est délicate et essentielle pour mesurer la composante verticale de l'attraction de la pesanteur,

5.3.3. - le dispositif de mesure, très sensible aux chocs de toute nature, est alors débloqué. Le fléau est amené délicatement à l'équilibre pour faire une lecture de zéro, correspondant à la position médiane de l'aiguille du galvanomètre,

5.3.4. - lorsque l'équilibre est atteint et que le fléau est stabilisé, la lecture est enregistrée, ainsi que l'heure de la mesure (dérive luni-solaire) ainsi que d'autres paramètres topographiques,

5.3.5. - le système est bloqué de nouveau pour pouvoir déplacer le gravimètre et changer de point de mesure.

L'ensemble de l'opération dure environ 3 à 7 minutes, selon les conditions de terrain. Elle peut être interrompue pour libérer l'emplacement à tout moment.

Des temps de mesures longs peuvent résulter de plusieurs causes :

- Terrains meubles, en phase de dégel,
- Vibrations parasites dues à des engins de chantier, aux circulations routières et ferroviaires proches (dans ce dernier cas, il faut fermer le mécanisme de mesures avant le passage d'un train),
- Vent fort,
- Secousses sismiques provenant de tremblements de terre locaux ou éloignés.

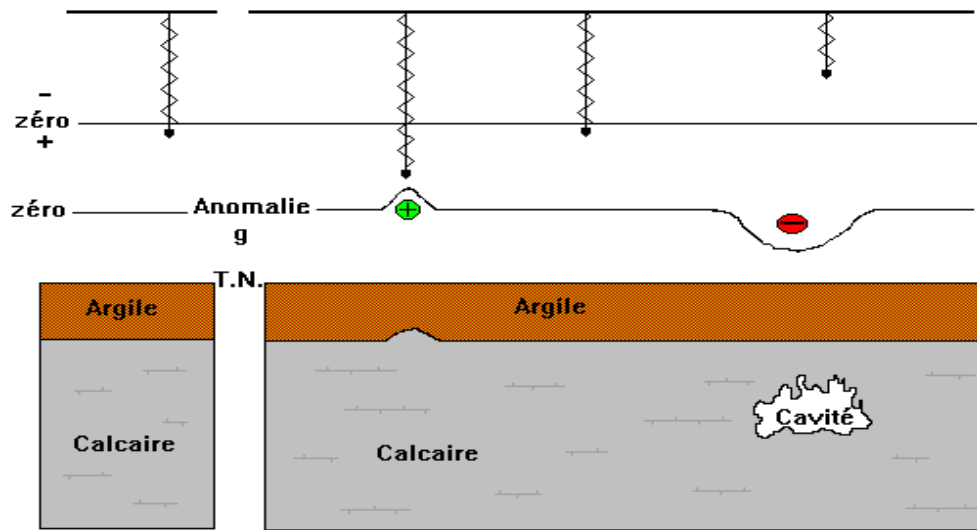
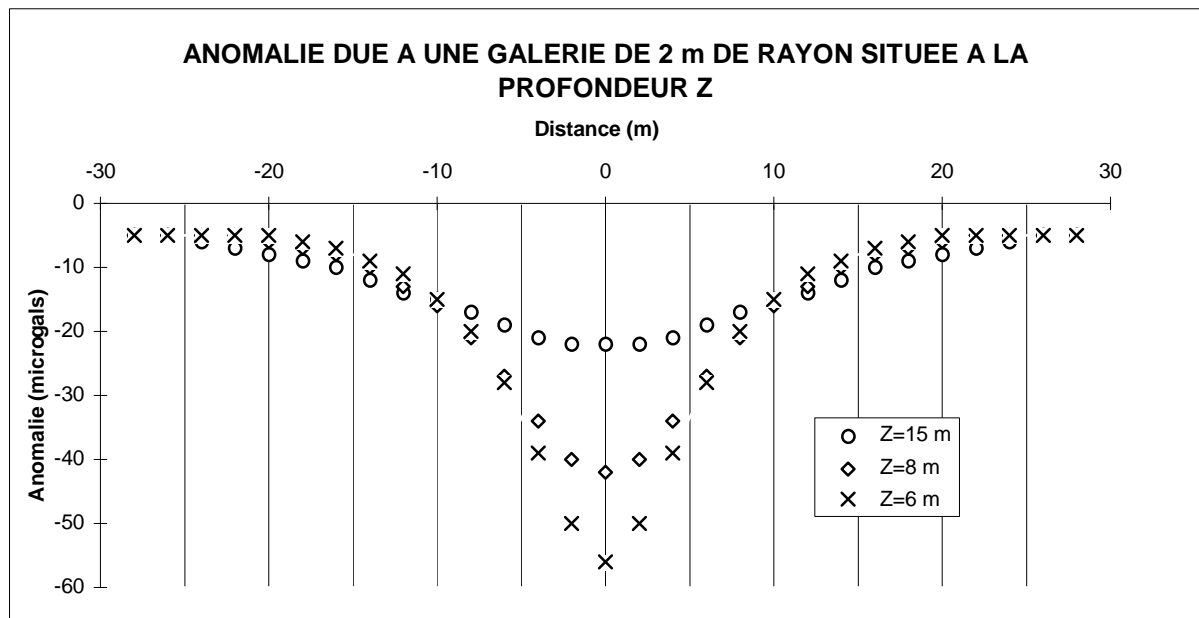


Schéma de principe de la microgravimétrie



ANNEXE 3

MISE EN ŒUVRE DU RADAR GÉOLOGIQUE

PROSPECTION PAR LA MÉTHODE RADAR GÉOLOGIQUE

PRINCIPES

Principe de la méthode

Une impulsion électromagnétique est émise par une antenne et se propage dans les matériaux. Dès qu'elle rencontre un changement dans les propriétés diélectriques du milieu, une partie de cette onde est réfléchiée et l'autre partie est transmise.

Ces changements dans les propriétés diélectriques correspondent à des discontinuités du sous-sol ou des structures construites (par exemple un vide où l'interface entre deux matériaux provoque la réflexion d'une partie de l'énergie vers la surface).

Après étalonnage, le temps écoulé entre l'émission et la réception de l'écho radar permet de calculer la distance entre la surface et la cible.

Principe de fonctionnement

L'impulsion d'onde radar est de très courte durée (1 à 5 nanoseconde), large bande et centrée sur une fréquence pouvant aller de 80 MHz à 2 GHz selon l'antenne utilisée.

Cette impulsion est envoyée dans le terrain avec une fréquence de répétition très élevée. Elle est radiée par une antenne se déplaçant régulièrement le long du profil.

Au niveau du récepteur, il y a reconstitution du signal haute fréquence en un signal basse fréquence.

Le nombre de traces par seconde sélectionné est généralement de 25 scans ou traces par seconde. Dans des cas exceptionnels, 256 scans/sec peuvent être sélectionnés.

Les échos sont le plus souvent captés au même point (émetteur et récepteur dans le même boîtier : technique monostatique) ou à une certaine distance du point d'émission (émetteur et récepteur séparés : technique bistatique).

MATÉRIEL

SAFEGE dispose de deux unités d'acquisitions développées par MALÅ Géoscience

- Un RAMAC GPR X3M, avec une antenne de 100 Mhz blindée et une antenne de 250 Mhz blindée



Antenne de 100 Mhz

- Un RAMAC CX 11, avec une antenne de 1,2 Ghz



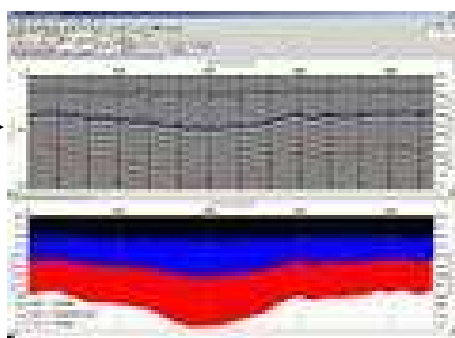
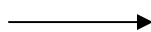
Toutes les autres gammes de fréquences peuvent bien évidemment être utilisé.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Le signal reçu est restitué sur un ordinateur (ou sur sa propre console pour le CX 11) permettant un suivi de l'acquisition et donc le contrôle de la qualité de la mesure. Les données sont ensuite traitées à l'aide du logiciel REFLEX 2D/3D.

Il en résulte une représentation des résultats sous forme de profils continus où l'axe horizontal représente la distance le long du profil, et l'axe vertical est l'axe des temps pour des données acquises depuis la surface ou dans les forages horizontaux.

Radargram



Interprétation

Exemple de traitement du signal

On a donc une coupe temps quasi continue, qui peut être transformée en coupe profondeur à condition de connaître les vitesses de propagation.

Ces vitesses de propagation sont généralement calculées à partir de forages d'étalonnage ou de contrôle des anomalies. Elles peuvent également être calculées à l'aide de tirs de vitesse (ou encore appelés mesures en réflexion grand angle) ou par des mesures par transparence (ou mesures en transmission).

La profondeur d'investigation dépend :

- de l'atténuation caractéristique du milieu,
- de la fréquence de travail.

L'atténuation est surtout fonction de la résistivité du matériau : plus la résistivité est grande, moins l'atténuation est forte.

La profondeur d'investigation décroît pour des fréquences croissantes.

Couramment la profondeur d'investigation est de 0 à 5 mètres.

Résolution

La précision absolue en profondeur peut être de l'ordre du centimètre.

La résolution en profondeur, c'est-à-dire la distance minimale entre deux cibles discernables l'une de l'autre, dépend de la longueur d'onde dans le milieu. Dans le meilleur des cas elle est de l'ordre de quelques centimètres.

MISE EN ŒUVRE ET DOMAINES D'APPLICATION

Les mesures peuvent être réalisées par un opérateur seul, en fonction des conditions de sécurité.

Les principaux domaines d'applications sont l'auscultation des routes et des pistes des aéroports, l'auscultation des réseaux d'assainissements, l'auscultation de murs pour en connaître leurs structures (ferraillées ou non par exemple).

Cette méthode n'est pas applicable dans les milieux conducteurs (résistivités inférieures à 50 ohm.m) ou en présence d'écran métallique. (Cf. fiche AGAP 92.1 EMA 31)