

I - GENERALITES

La partie sud-est du tracé du métro de la Communauté urbaine de Lille, conçue sur viaduc, passe à la périphérie d'une zone de carrières souterraines creusées au sein de la craie.

Lors de la reconnaissance préliminaire du projet de métro, le tronçon concerné avait fait l'objet d'une campagne de sondages et essais in situ qui avait décelé des secteurs à caractéristiques mécaniques médiocres (craie altérée avec infiltration de silt et présence de petits vides).

Le contexte local (carrières souterraines), les charges ponctuelles importantes induites par le projet, ainsi que la non définition, au stade de l'étude, de la position des piles du viaduc, ont conduit à réaliser une campagne microgravimétrique sur l'ensemble des 1 000 m du projet (exécution de 2 profils de mesure à une maille de 10 m x 10 m environ).

Compte tenu de la présomption de dissolutions dans la craie, pouvant se traduire par des contrastes de densité plus faibles qu'en présence de carrières, et donc des anomalies gravimétriques nettement moins importantes, une prospection très fine du terrain a été effectuée (appareil de mesures de haute précision, adaptation d'une nouvelle méthodologie de mesures et de traitement des résultats).

La note rédigée ci-après montre que la corrélation entre les 2 types d'étude a permis de valoriser les résultats obtenus antérieurement.

II - RECONNAISSANCE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

II.1 - CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le sous-sol de la zone d'étude, située au sud-est de la ville de Lille (Nord), se compose en règle générale d'un substratum crayeux, d'âge secondaire, recouvert par un limon des plateaux d'âge quaternaire. Toutefois le voisinage de formations argilo-sableuses d'âge tertiaire, au nord du projet, se traduit localement par la présence de lambeaux non érodés, intercalés entre les limons et la craie.

Ce contexte géologique laisse présumer l'existence de deux types d'anomalies dans le sous-sol :

- l'un naturel, consistant en une altération prononcée de la craie avec création de poches de dissolution comme ceci est fréquemment observé à la limite des formations crayeuses recouvertes par un manteau d'argile imperméable,
- l'autre artificiel, résultant du creusement de carrières souterraines pour exploitation de la craie comme pierre à bâtir ou pour la fabrication de chaux.

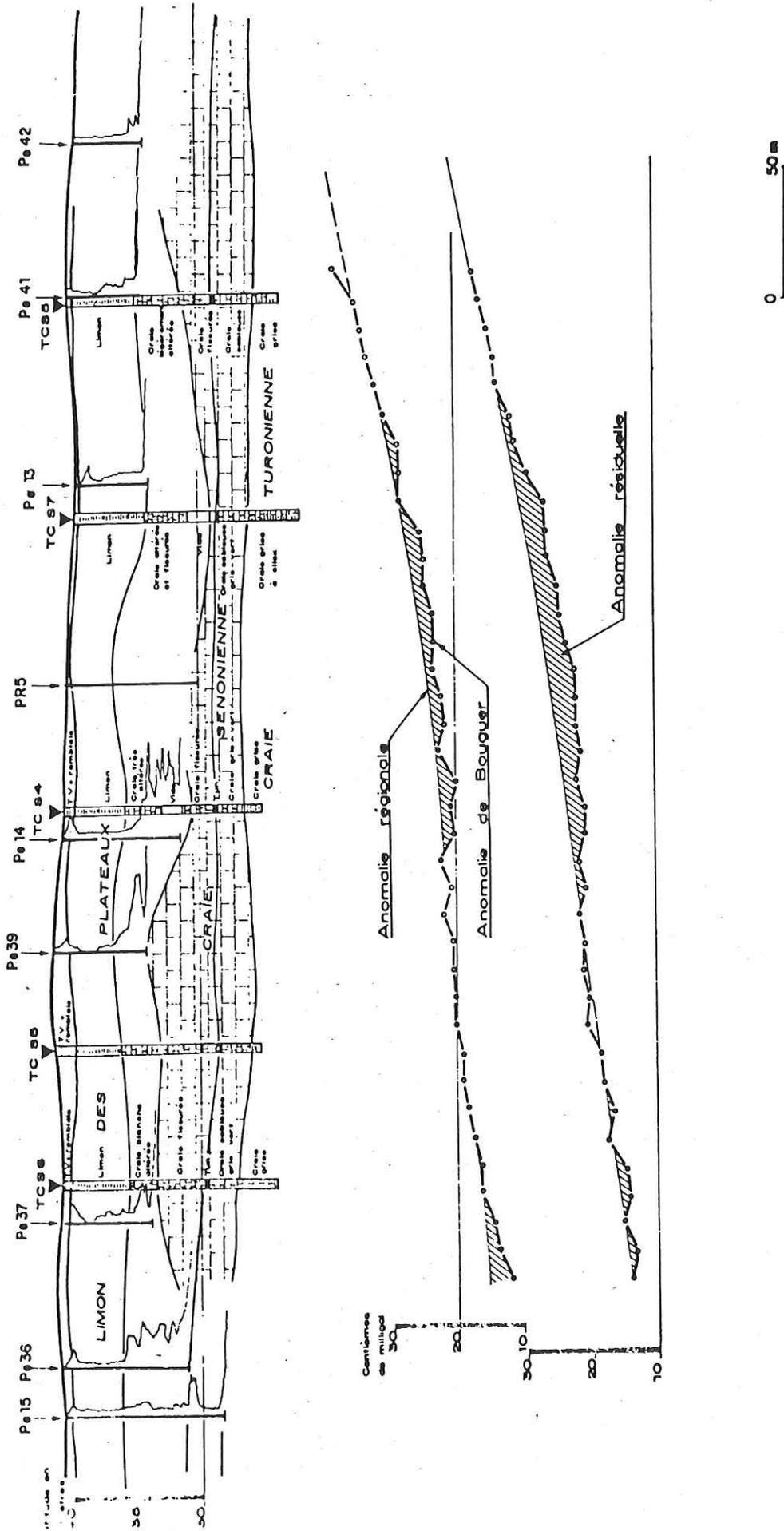


Figure 1 - Profil topographique et géologique

II.2 - PROGRAMME DE RECONNAISSANCE

Au stade du projet préliminaire, le tracé précis de l'ouvrage ainsi que la position exacte des piles du viaduc n'étant pas définitivement arrêtés, l'étude entreprise a essentiellement porté sur la définition de la structure géologique et géotechnique ; l'examen détaillé relatif aux cavités souterraines a été programmé ultérieurement en connaissance du tracé définitif.

La reconnaissance géologique et géotechnique a été entreprise par sondages mécaniques en carottage continu et par essai in situ de pénétration statique ou statique dynamique. Quelques sondages avec essais pressiométriques ont été également réalisés.

II.3 - FORMATIONS GEOLOGIQUES ET STRUCTURE DES COUCHES

. Les remblais et la terre végétale

Ces horizons sont présents sur l'ensemble du tronçon. Les remblais ont une épaisseur moyenne de 0,50 m à 1 m. Localement ils atteignent 2 à 3 m de puissance à la faveur de buttes artificielles ; dans ce cas ils sont constitués essentiellement d'un limon des plateaux remanié.

. Le limon des plateaux

Il se présente sous la forme de silt brun, soit argileux, soit sableux. Localement il prend une teinte verdâtre. Cette caractéristique est due au remaniement d'un recouvrement tertiaire qui n'a pas été mis en évidence sur le tronçon étudié mais qui subsiste encore en lambeaux dans le secteur (comme cela a pu être observé dans les fouilles creusées à l'occasion de la construction des immeubles environnants).

De plus, en pied du limon de plateaux et avant d'atteindre la craie blanche altérée, on note généralement la présence de plus en plus abondante de granules de craie.

L'épaisseur des limons varie de 2 à 3 m ; elle atteint localement 4 à 5 m. Les efforts de résistance de pointe enregistrés dans ces niveaux sont de l'ordre de 5 à 50 bars.

. La craie

Différents horizons doivent y être distingués :

- la craie blanche du Sénonien,
- le Tun du Turonien supérieur,
- la craie grise du Turonien supérieur.

La craie blanche, d'une épaisseur totale de l'ordre de 5 à 6 m, est observée sous 2 faciès différents.

+ La craie blanche altérée qui se présente sous forme de blocs et granules enveloppés dans une matrice silto-crayeuse en tête. Avec la profondeur, la taille des blocs augmente et la matrice crayeuse disparaît.

En pénétration statique cette craie altérée est caractérisée par des valeurs de résistance de pointe évoluant entre 50 et 350 bars.

Géographiquement deux secteurs ont été distingués : l'un où l'épaisseur de cet horizon est de l'ordre de 2 à 3 m et l'autre où la craie blanche altérée, nettement plus développée, constitue l'essentiel de l'horizon sénonien soit 5 à 6 m.

+ La craie blanche fissurée qui apparaît comme une craie massive de teinte blanche à grisâtre, pigmentée de glauconie en partie inférieure.

La fracturation de cette craie est relativement faible et les indices de fracturation (RQD) mesurés y sont supérieurs à 30 %. Par ailleurs, les résistances de pointe qui y ont été enregistrées lors des pénétrations statiques sont toujours supérieures à 350 bars.

Outre ces remarques générales sur la craie blanche, nous signalons la mise en évidence de plusieurs anomalies décelées par ces investigations ponctuelles (fig. 1) :

- la mise en évidence d'un petit vide au sein de la craie blanche altérée au sondage TCS₄ et d'un autre petit vide en profondeur dans la craie blanche fissurée au TCS₇,
- l'existence d'un niveau de craie médiocre en partie inférieure de la craie blanche fissurée dans le secteur des points P_e12 et TCS₂,
- une zone où la craie blanche altérée est particulièrement médiocre voire remplacée totalement par du silt (essais P_e15 et P_e21 par exemple).

Le Tun du Turonien supérieur assure la transition avec la craie blanche sénonienne sus-jacente. Il consiste en un niveau de craie indurée dont l'épaisseur est comprise entre 0,10 et 0,55 m. Cette couche souligne la structure géologique générale et permet de préciser le pendage très faible des horizons crayeux puisque la cote du Tun évolue de + 26 NGF au nord du projet, à + 32 NGF en partie sud du viaduc, long de 1 000 m environ.

La craie grise rencontrée à une dizaine de mètres de profondeur montre une homogénéité latérale relativement bonne à l'échelle du site.

L'assise a une épaisseur totale de 10 m environ et elle peut se subdiviser en 3 horizons dont les faciès se caractérisent comme suit.

- + Craie gris-vert glauconieuse et sableuse trouvée immédiatement sous le Tun.
- + Craie grise à terriers, gris-bleu, de 2,50 à 3,50 m d'épaisseur, et dont l'aspect massif se traduit par des indices de fracturation toujours supérieurs à 40 %.
- + Alternance de craie grise et de marne verte qui met en évidence la transition de l'assise crayeuse avec les marnes du Turonien moyen sous-jacent.

II.4 - POCHE DE DISSOLUTION ET CARRIERES SOUTERRAINES

Les poches de dissolution constatées lors du creusement des fouilles préalables à la construction des bâtiments environnants étaient nombreuses et importantes. Leur taille était variable mais certaines d'entre elles, qui atteignaient les assises du Turonien supérieur, correspondaient à une dissolution complète de la craie blanche sénonienne.

Au Sud-Est de Lille certaines des carrières souterraines, appelées catiches, sont creusées au sein de la craie blanche sénonienne. Elles ont globalement la forme d'une bouteille dont le goulot, étroit au niveau des sols de couverture, s'évase progressivement dès la rencontre de la craie altérée de tête, pour faire place au corps de la carrière creusé en cavité cylindrique subverticale au niveau de la craie rocheuse.

Ces carrières dont le diamètre atteint 5 à 8 m en pied et dont la hauteur totale est de 10 m ou plus, ont un volume de l'ordre de 100 m³. Elles sont généralement accolées et reliées entre elles en pied.

Après exploitation, la plupart de ces carrières ont été munies d'un bouchon en moellons de craie en partie inférieure du goulot. Le puits d'accès était ensuite comblé en limon afin de permettre la réutilisation de la parcelle comme terre cultivable.

D'autres carrières ont été remblayées gravitairement avec des matériaux divers (silts, ordures ménagères...).

La détection de ces catiches demande donc une méthode de prospection globale et de précision suffisante car elles peuvent ne pas comporter de vides francs (cas des catiches remblayées) et être de ce fait difficilement décelables.

III - PROSPECTION MICROGRAVIMETRIQUE

III.1 - PRINCIPE DE MESURE

Ce type de prospection consiste à mettre en évidence les variations relatives de densité du sous-sol.

Ces variations se traduisent en surface par des modifications de l'intensité du champ de la pesanteur, dont la composante verticale est mesurée directement au moyen d'un gravimètre.

D'un point de vue théorique, pour une masse sphérique de rayon R et de densité σ_2 , située dans un milieu de densité σ_1 et dont le centre est situé à une profondeur Z, l'anomalie provoquée est donnée par la relation :

$$\Delta g = 2,8 \Delta \sigma \cdot R^3 \frac{7}{(x^2 + Z^2)^{3/2}}$$

avec Δg en 10⁻² milligal, $\Delta \sigma = \sigma_2 - \sigma_1$, x, Z et R en mètre (x étant la distance séparant le gravimètre du plan vertical passant par le centre de la sphère).

Avec un appareillage sensible à quelques microgals, on considère qu'une cavité est détectable à 100 % si elle fait apparaître une anomalie supérieure à 2 centièmes de milligal sur 3 points adjacents.

En tenant compte de ces critères, on constate, comme l'indique la figure 2, que des estimations sur la probabilité de détection d'une cavité sphérique, à une maille donnée, sont fonction de la dimension et de la profondeur de la cavité.

On admet généralement qu'une cavité non décelable avec un gravimètre microgal est de dimension trop petite ou se situe à une profondeur trop grande pour influencer le type d'ouvrage étudié. Cependant, une petite cavité non décelable d'un point de vue théorique est souvent détectée par la gravimétrie, du fait de la présence, dans bien des cas, de zones décomprimées dans les terrains surmontant la cavité.

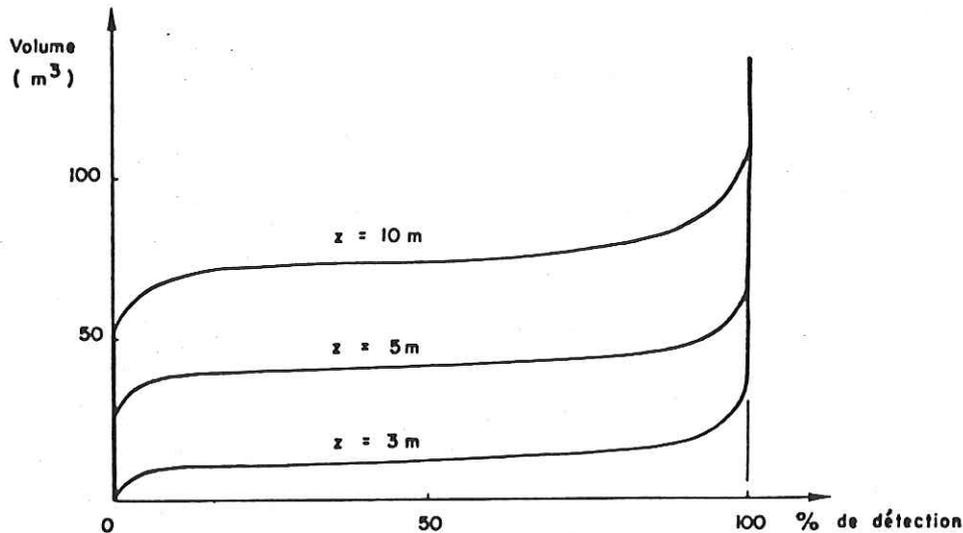


Figure 2 - Probabilité de détection d'une cavité sphérique - maille 5 x 5 m

III.2 - MISE EN OEUVRE DE LA PROSPECTION

III.2.1 - Définition du programme de reconnaissance

Le problème posé consistait à vérifier, sur l'emprise du projet, l'existence d'éventuelles carrières souterraines étendues dans la craie, ce qui a conduit, en premier lieu, à adopter une maille de prospection et un programme de reconnaissance adaptés à la dimension des vides recherchés et au type de projet.

Il a été réalisé deux profils parallèles de 1 000 m environ, avec des points de mesures espacés de 10 m, ainsi que 6 petits profils complémentaires pour préciser localement les anomalies décelées, soit un total de 268 stations gravimétriques.

Par ailleurs, compte tenu aussi de la présence d'éventuelles cavités de dissolution dans la craie, pouvant faire apparaître des anomalies plus difficilement décelables, il a été effectué une prospection très fine du terrain, en utilisant un appareillage de mesures de grande précision et en adoptant une méthodologie nouvelle de mesure et de traitement des résultats.

III.2.2 - Matériel utilisé

Les points de mesures ont été nivelés à l'aide d'un niveau automatique Wild Nak 1 avec une précision de 0,2 cm, afin de minimiser l'erreur sur la correction topographique à apporter (ensemble des points ramenés sur un même plan horizontal).

L'appareil qui a été utilisé pour les mesures gravimétriques est un gravimètre LACOSTE et ROMBERG, modèle D, à lecture électronique et affichage direct de la mesure, au microgal (10^{-9} g). L'appareil a été relié à un multimètre numérique, ce qui a permis une meilleure détermination de la position d'équilibre du mécanisme (mesure au 0) et de ce fait une précision de mesure de 2 à 4 microgals.

III.2.3 - Mode opératoire et traitement particulier des résultats

Il a été adopté une méthodologie particulière de prise de mesures sur le terrain.

Les points ont été relevés en quinconce, suivant des programmes imbriqués, permettant une meilleure détermination de la courbe instrumentale et luni-solaire, dont les variations au cours d'une journée sont de 5 à 10 centièmes de milligal. Ces rectifications de dérive sont réalisées sur le chantier par un programme de calculs sur un mini-ordinateur Compucorp.

Les corrections habituelles à apporter aux mesures (dérive instrumentale et luni-solaire, altitude, latitude) ont été effectuées sur cet ordinateur, qui a permis également à l'aide de programmes de réaliser des corrections spéciales de terrain (bâtiments, caves, etc.).

Dans certains cas (environnement topographique plus complexe) des corrections raffinées ont été effectuées sur un ordinateur plus puissant (Control Data 7600).

La figure 3 montre un exemple d'utilisation du programme TERCOR, spécialement adapté à la correction d'influence du relief latéral.

Cette méthode de calcul automatique sur ordinateur consiste à créer un modèle mathématique de la zone de mesure et de son environnement (tableau d'altitudes) à partir duquel on effectue plusieurs corrections :

- une correction raffinée dans une fenêtre F1 (7 x 7 points) centrée sur le point de mesure (point M par exemple) et où la topographie en chaque point de la fenêtre est décomposée en un empilage de parallélépipèdes élémentaires, pour lesquels on somme les influences de masse,
- une correction grossière sur l'autre partie du tableau (correction F2) où chaque parallélépipède est assimilé à un cylindre vertical pour lequel on calcule l'influence globale de masse,
- une correction lointaine, effectuée à l'extérieur du tableau où on admet une topographie régulière.

III.3 - RESULTATS

Un extrait des résultats des mesures est reporté sur la figure 1.

Cette figure comprend également une coupe géologique suivant l'axe du projet avec le report des sondages mécaniques réalisés (sondages carottés et essais au pénétromètre).

Les profils de l'anomalie de Bouguer (profils de mesures) montrent d'une manière générale une pente assez régulière qui épouse sensiblement le tracé de l'anomalie régionale (anomalie interprétée), indiquant l'influence de la structure géologique profonde.

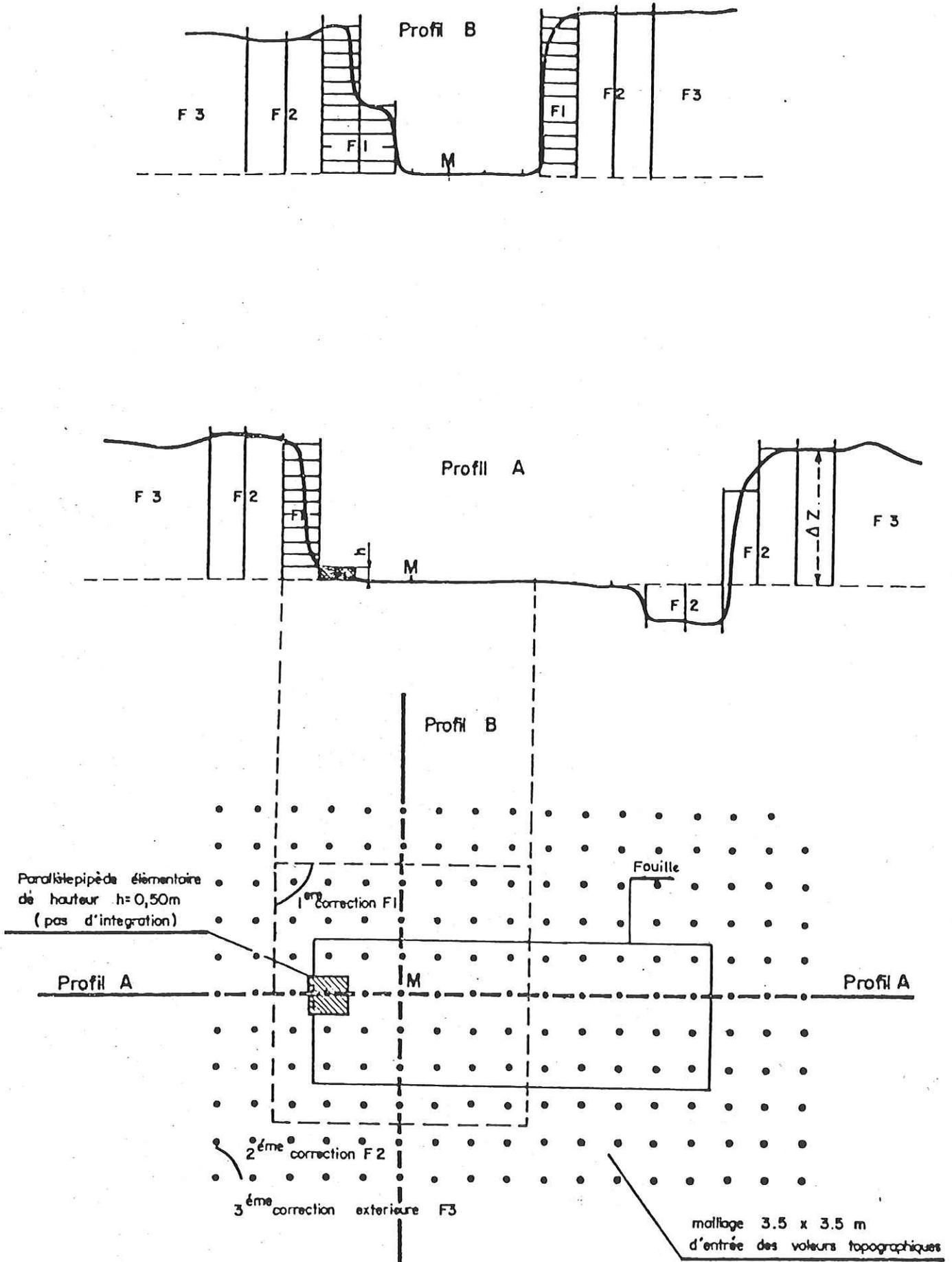


Figure 3 - Correction de terrain. Utilisation du programme TERCOR de calcul automatique

Le calage du profil régional a été effectué en fonction des résultats des sondages mécaniques réalisés (profil régional confondu avec le profil de Bouguer dans les zones jugées a priori saines).

La régularité des variations mesurées permet d'exclure l'existence d'anomalies importantes dans le terrain à faible et moyenne profondeur (influence de carrières souterraines étendues).

Il a été mis en évidence sur ces profils trois zones d'anomalies négatives très étalées (zones hachurées) indiquant des déficits de - 2 à - 4 centièmes de milligal, semblant en relation avec des variations géologiques locales.

IV - CORRELATIONS MICROGRAVIMETRIQUES - SONDAGES MECANIQUES

La couverture limoneuse est assez homogène et montre une épaisseur sensiblement constante. Elle semble peu influencer les mesures gravimétriques.

La formation crayeuse profonde (Turonien) apparaît également sans influence notable sur les mesures.

D'autre part la remontée progressive du Turonien vers le sud se traduit par une diminution des valeurs gravimétriques dans la même direction, qui se répercute essentiellement au niveau de l'anomalie régionale (pendage général du profil régional vers le sud).

En conséquence les trois zones d'anomalies observées semblaient être en relation avec des causes situées dans la tranche de craie sénonienne.

On a pu observer des corrélations très nettes entre ces trois zones d'anomalies gravimétriques et les trois zones d'anomalies mises en évidence, dans la campagne géologique et géotechnique initiale, par une diminution des paramètres mécaniques enregistrés :

- les seuls vides décelés (sondages TCS₇ et TCS₄) apparaissent au droit de l'anomalie la plus forte ;
- par ailleurs, les sondages et pénétromètres donnant des résultats médiocres se situent au centre des deux autres anomalies.

CONCLUSION

Cet exemple d'étude montre qu'il est possible, moyennant certaines connaissances du contexte géologique, de suivre des variations d'altération d'un horizon crayeux, par une prospection microgravimétrique très fine du terrain.

Ce programme de reconnaissance peut être utilisé pour une étude préliminaire, au stade d'un avant-projet, et dans le but d'orienter une campagne de sondages mécaniques ou de préciser les zones éventuellement suspectes.

x

x

x