

# POURSUITE D'UN RECIF DE MARBRE ROUGE PAR PROSPECTION ELECTRIQUE - PERSPECTIVE D'EXPLOITATION

par

GEERAERTS, Raoul <sup>1</sup> & NETELS, Victor <sup>2</sup>

## SUMMARY

Belgium has a long tradition in marble industry. The marble called "Rouge belge" is extracted from bioherms of the upper part of the middle Frasnian, the most important ones lying on the anticlinal axis of Philippeville.

The geological environment of these bioherms is very complex owing to the particular conditions of their formation, and subsequent folding and faulting. Other difficulties arising when studying these deposits result from the methods used in opening quarries and putting non valuable material to waste.

Research of buried reserves of limestone by geophysical methods (electrical resistivity measurements) is justifiable in the present economic context.

New companies are reopening quarries already worked in the past, because of the increasing interest in good quality marbles on the international market. This economic reality lead us to study the environment of the quarry "Maudoux Mousty" situated close to the village of Neuville (Namur Province - Belgium).

Electrical prospection allowed us to delimit the extension of the buried reef, its floor, the thicknesses of the overburden and of the calcareous mass itself.

This information, obtained by indirect methods, will be used to select the sites of the future drill-holes.

The examination of these borehole cores will permit a correct appreciation of the value of the deposit.

Finally, on the basis of the results obtained, we propose a methodology for developing a cheap and

rapid electric prospection method for limestone deposits extending around yet worked quarries.

## RESUME

La Belgique possède une longue tradition marbrière. Les marbres dits "Rouge belge" sont extraits de biohermes du sommet du Frasnien moyen. Les plus volumineux d'entre eux sont localisés sur l'axe anticlinal de Philippeville. Le contexte géologique environnant les biohermes est généralement très complexe et résulte des conditions propres à leur genèse et des plissements et failles les ayant affectés, mais il est aussi consécutif des travaux d'ouverture de la carrière et des mises à stérile. Cette complexité géologique et humaine et la variation de la nature du calcaire marbrier sont à l'origine de nombreux échecs d'exploitation.

La recherche des réserves enfouies de calcaire par des méthodes géophysiques (résistivité électrique) s'inscrit dans le contexte économique actuel. De nouveaux exploitants reprennent les carrières anciennement ouvertes et le marché international est redevenu porteur pour ce type de matériau. Cette réalité économique nous a conduit à travailler sur le site de la carrière Maudoux-Mousty située à proximité du village de Neuville (Province de Namur - Belgique).

La prospection électrique nous a permis de reconnaître et de situer le prolongement enfoui du récif, sa position basale, l'évolution de l'épaisseur des terrains de couverture et également la puissance de la masse calcaire. Ces informations obtenues par une méthode indirecte doivent servir de guide pour l'implantation de sondages carottés. Seule l'analyse des carottes prélevées permettra de déterminer la valeur marbrière de la masse calcaire repérée.

Ces résultats nous ont conduit à proposer une méthodologie de prospection électrique, peu onéreuse et rapide, des masses calcaires en cours d'exploitation pour marbre.

<sup>1</sup> Centre de Physique du Globe IRM-KMI, Avenue Circulaire 3 - B-1180 Bruxelles.

<sup>2</sup> Service Exploitation des Mines U.L.B., Avenue F.D. Roosevelt 50 - B-1050 Bruxelles

## KEY WORDS

Bioherm reef, quarry, Frasnian, Marble Rouge belge, Dinant Synclinorium, electric prospection, reef, resistivity.

## MOTS CLES

Bioherme, carrière, Frasnien, marbre Rouge belge, Synclinorium de Dinant, prospection électrique, récif, résistivité.

## 1. PRELIMINAIRE

Des dômes de calcaire massif dans un environnement schisteux sont exploités depuis des siècles en Belgique. Ils fournissent des marbres connus par leur nom générique "Rouges de Flandres" ou "Rouge belge" dont les principales variétés commerciales sont le rouge griotte, l'impérial, le byzantin, le rouge royal et le marbre gris. Des coraux coloniaux sont à l'origine de ces biohermes, qui composent, en partie, le complexe récifal dévonien dont l'apogée se situe au Frasnien. Une centaine de biohermes sont développés sur le bord Sud du synclinorium de Dinant et dans sa partie médiane, sur l'axe anticlinal de Philippeville. Là se situent les plus volumineux récifs dont certains sont actuellement exploités. La forme particulière des gisements en "chapeau de gendarme" ou "Napoléon", leur situation généralement enfouie, la variation rapide de qualité et d'aspect du matériau sont à l'origine de nombreux échecs d'exploitation.

## 2. BUT

Pratiquement tous les biohermes wallons ont fait l'objet d'une exploitation. Après un abandon presque total de la production de marbre rouge en Belgique, on assiste depuis quelques années à la reprise d'activité des exploitations pour répondre à une demande croissante. Les gisements très importants sont rares et la valorisation de cette matière première à haute valeur ajoutée doit être tentée en intégrant plusieurs excavations voisines, constituant chacune un front de taille, dans un ensemble formant "la carrière". La géologie classique ne fournit pas un moyen sûr pour déterminer l'orientation du bioherme, les variations de pente et l'épaisseur des terrains d'enfouissement. Dans ce contexte, le calcul des réserves de calcaire en place reste très imprécis. Nous avons cherché à développer une méthodologie de prospection simple, facile d'emploi et peu onéreuse pour déterminer les directions de prolongement d'un massif partiellement exploité. L'application de cette méthode de prospection aux gisements en activité, par exemple, permettra de choisir correctement le lieu d'implantation de sondages carottés pour reconnaître la valeur marbrière du calcaire.

Nous avons cherché à répondre aux questions suivantes :

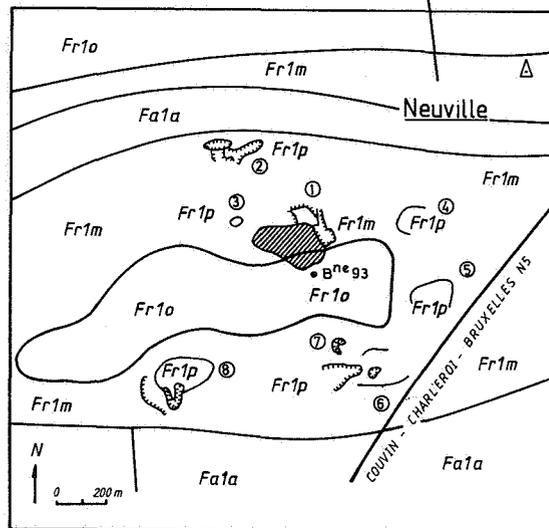


Figure 1 : Carte géologique d'après la carte géologique de la Belgique - Planchette n° 182 - Froidchapelle-Senzeille (Mourlon, 1902).

Légende :

### Etage Famennien

Fa1a : Assise de Senzeilles : schistes souvent verdâtres parfois noduleux. *Rhynchonella omaliusi* (RO). *Cyrthia murchisoniana* (CM).

### Etage Frasnien

Fr1p : Marbre rouge et gris  
Fr1o : Calcaires stratifiés, massifs ou noduleux  
Frly : Dolomie  
Fr1m : Schistes divers, assez souvent noduleux. *Rhynchonella cuboides*.

### Gisements de marbre rouge :

1. Carrière Maudoux-Mousty
  2. Carrière Les Bulants
  3. Carrière n° 3
  4. Carrière aux Mouchons
  5. Tiène Baudet
  6. Carrière Balle de l'Est
  7. Carrière Balle de l'Ouest
  8. Carrière Tapoumont
- Zone prospectée

- détermination de la position du bioherme, c'est-à-dire quelle est l'inclinaison de la surface basale du dôme ;

- détermination de la direction du prolongement de la masse calcaire ;
- détermination de l'évolution de la courbure de l'enveloppe externe limite de la masse calcaire et par conséquent l'évolution de l'épaisseur du recouvrement schisteux ;
- détermination de l'importance de la zone de transition.

Soulignons aussi la complexité géologique des sites à prospecter :

- un récif présente en son sein et à ses abords des faciès lithologiques très différents : calcaire massif construit, schistes noduleux, schistes, calcaire en bancs se succèdent et parfois même s'interdigitent ;
- les exploitations anciennes ont bouleversé la topographie originelle surtout par les dépôts de déblais ainsi que par la construction de bâtiments.

### 3. PRESENTATION DU SITE

#### 3.1. Localisation géographique

Nous avons retenu la carrière Maudoux-Mousty à Neuville. L'environnement géologique complexe du site ainsi que la reprise de l'exploitation sont à la base de ce choix. Le village est situé dans la province de Namur, au S.O. de Philippeville, à l'Ouest de la route nationale N.5 reliant Charleroi à Philippeville et à Couvin.

#### 3.2. Historique de l'exploitation

La date de l'ouverture de la carrière est ancienne, mais pas connue avec exactitude. Nous savons qu'en 1777 le massif calcaire était inexploité (Ferraris). A la fin du siècle dernier, le propriétaire était la famille Mousty qui s'associa peu après à la famille Maudoux et la carrière prit tout naturellement le nom de Maudoux-Mousty. Elle produisait les variétés rouge griotte fleuri, rouge fleuri, griotte fleurie, rouge griotte vive flammée, rouge de Neuville, rouge royal rose. Après 1920, la S.A. Dejaiffe en devint propriétaire et l'exploita jusqu'en 1976 (Dumon, 1979). Depuis quelques années, la Marbrerie de Mazy S.A. commercialise les variétés Clair Neuville et Demi-foncé Neuville.

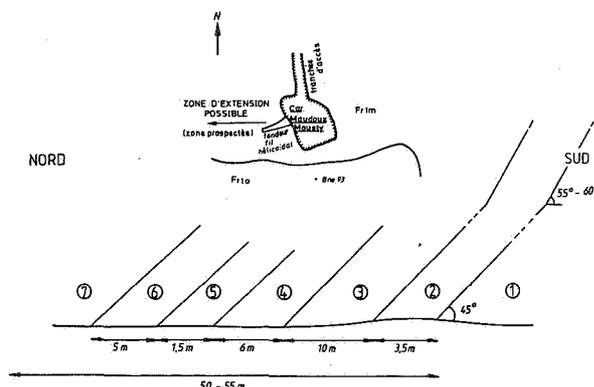


Figure 2 : Coupe schématique de la zone de transition dans la tranchée d'accès de la carrière Maudoux-Mousty.

Légende :

1. Calcaire massif récifal
2. Schistes en plaquettes décimétriques tordus et plissés avec intercalations de nodules calcaires de taille centimétrique et ferrifères.
3. Calcaires en gros bancs, à pseudo-nodules avec intercalation de lits schisteux d'épaisseur centimétrique.
4. Nodules calcaires agglomérés avec interstratification de niveaux schisteux se débitant en plaquettes centimétriques.
5. Calcaire massif grossier bréchique (en fragments métriques).
6. Schistes grisâtres très fracturés en plaquettes centimétriques.
7. Nodules calcaires grossiers agglomérés.

#### 3.3. Contexte géologique

Le récif Fr1p du sommet du Frasnien moyen (F2j Maillieux & Demanet, 1928) exploité à Neuville est localisé sur le flanc Nord de la terminaison occidentale de l'axe anticlinal de Franchimont qui va de Franchimont à l'Est, à la carrière Beau-Château à Senzeille à l'Ouest. De son extrémité orientale jusqu'au lieu-dit Vieux-Sautour l'axe est constitué de calcaire givetien. En cet endroit, il s'ennoie et réapparaît au Sud-Ouest du village de Neuville, sur environ 2 kilomètres ; ici, l'axe est formé de calcaire gris, stratifié du Frasnien (Fr1o) (Fig. 1). Adossé au calcaire gris (Fr1o au Sud, le bioherme est envasé par des schistes grisâtres noduleux Fr1m fortement fracturés. La zone de passage entre les schistes de recouvrement et le calcaire biohermal peut être observée dans la tranchée d'accès à la carrière (Fig. 2). La zone de passage a une puissance de l'ordre de 35 à 40 m. Les bancs qui la constituent inclinent régulièrement 45° Nord au niveau du sol de la tranchée. Quelques mètres plus haut, à proximité de la masse de calcaire construit, les bancs se redressent (inclinaison 55°-60°N), gardent leur régularité et épousent parfaitement le contact avec le calcaire. Des failles d'importance variable affectent la zone de passage et le bioherme ; elles ont une direction approximativement ENE-OSO et une pente Sud. Les plus importantes d'entre-elles facilitent l'exploitation. Comme elles sont gorgées d'eau, elles influenceront également le passage du courant

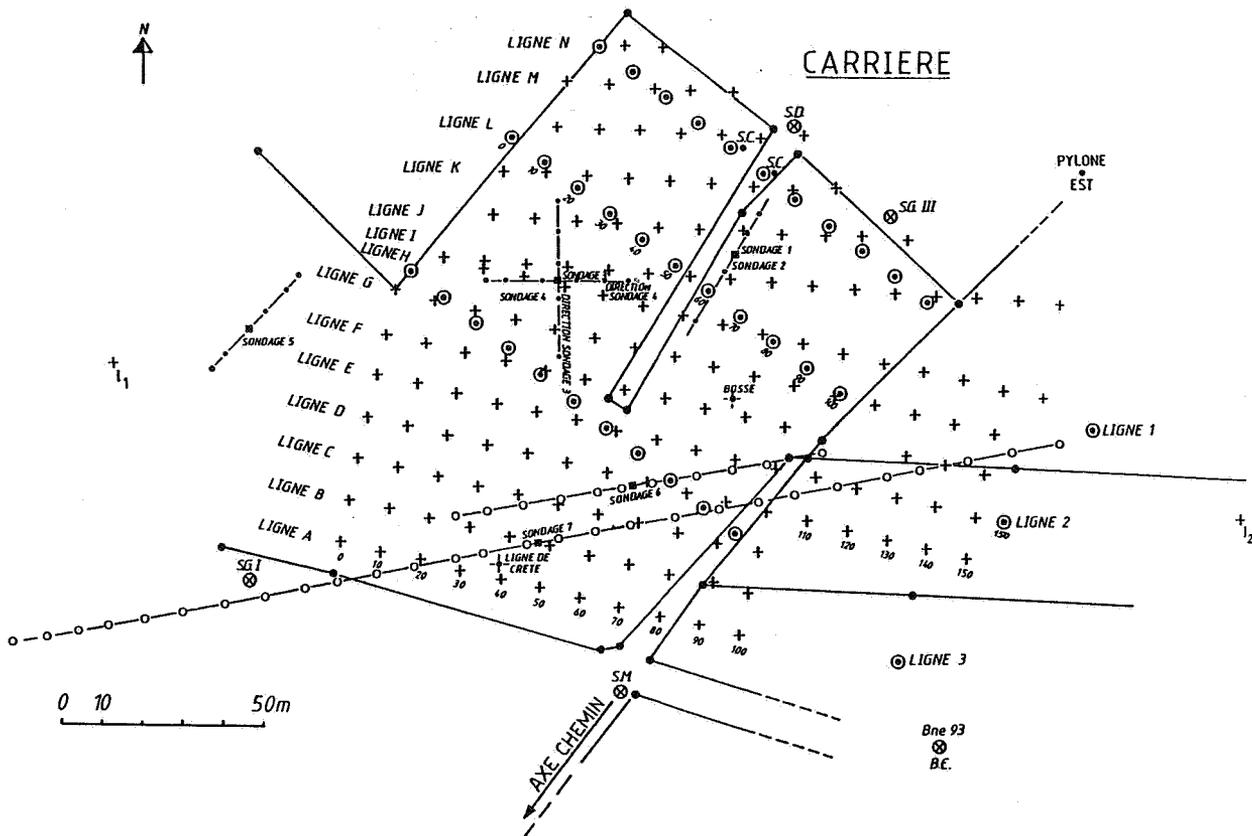


Figure 3 : Plan de situation des dispositifs expérimentaux.

Légende :

- Points levé topographique
- ⊗ Station mesure topographique
- S.C. (sondage - carotté)
- + Implantation électrodes  
Profil ligne 300 m
- ⊙ Implantation électrodes  
Profil ligne 150 m  
Traînée ligne 100 m
- Sondages
- Direction ligne d'implantation des électrodes des sondages.

lors de la prospection électrique. L'examen du bioherme, paroi, chemin d'accès, failles, allure des stromatactis et l'avis des carriers font supposer que le récif est en position de plateure. Il faut donc s'attendre à un contact anormal entre le calcaire stratifié Fr10 et les schistes Fr1m à l'endroit de l'axe de l'anticlinal. L'ouverture de la carrière est de forme rectangulaire 100 m (NNO-SSE) X 50 m et la profondeur atteinte est de l'ordre de 60 m. L'exploitation a été limitée au Sud-Est par l'inconstance de la qualité technique et esthétique du calcaire. Vers l'Est, un tunnel creusé à flanc de colline donnant autrefois accès au fond de la carrière a traversé quelques mètres de la zone de transition avant de pénétrer dans le calcaire massif. Le Sud-Ouest est la seule direction potentielle de développement du récif ; l'allure de la surface topographique tend à corroborer cette thèse. Vers l'Ouest, 2 sondages carottés (SC 1 et SC 2 - Fig. 3) distants de 20 m du bord de la carrière et séparés

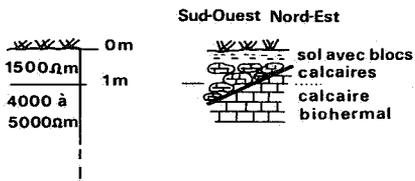
entre eux de 10 m ont atteint une profondeur de 17 m. Le premier mètre est composé de calcaire altéré, il est suivi du calcaire marbrier.

## 4. PROSPECTION GEOPHYSIQUE DU SITE

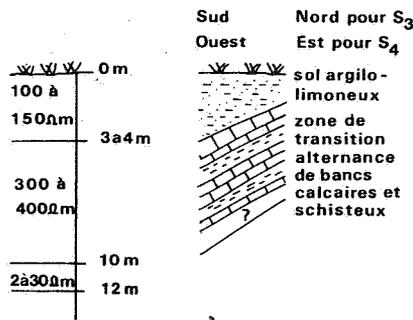
### 4.1. Choix de la méthode

Il nous est apparu que des mesures de résistivité permettraient de répondre à un maximum des questions énumérées au paragraphe précédent. Nous nous sommes servis d'un résistivimètre BISON 2350 B alimenté par une batterie automobile de 12 V CC convertis en 270 V. Cette modification de l'alimentation augmente le poids et l'encombrement de l'appareil, mais garantit un fonctionnement fiable durant plusieurs dizaines

## SONDAGES S<sub>1</sub> ET S<sub>2</sub>



## SONDAGES S<sub>3</sub> ET S<sub>4</sub>



## SONDAGE S<sub>5</sub>

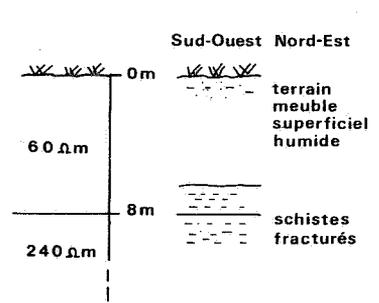


Figure 4 : Interprétation lithologique des résultats des mesures des sondages électriques S<sub>1</sub> à S<sub>5</sub> (tenant compte du dispositif LEE). Localisation des sondages voir figure 3.

d'heures. Le résistivimètre débite aux électrodes d'injection un courant basse fréquence (quelques Hertz) d'intensité constante (22 mA).

### 4.2. Mesures, résultats et interprétation

La recherche a comporté 3 phases successives (Fig. 3).

#### 4.2.1. Première phase :

Cinq sondages électriques (S<sup>1</sup> à S<sup>5</sup> - Fig. 3) ont été réalisés pour essayer de caractériser les terrains présents par leur résistivité et pour choisir l'écartement sensible du dispositif de mesure qui permettrait de suivre le massif de marbre par des trainées de résistivité. Les sondages électriques S<sup>1</sup>, (dispositif Schlumberger) et S<sup>2</sup> (dispositif Lee) ont été effectués suivant des lignes perpendiculaires à la paroi Ouest de la carrière et à proximité des sondages carottés SC 1 et SC 2. Les résultats obtenus sont concordants et sont confirmés par les sondages mécaniques : environ 1 m de terrain superficiel à résistivité de l'ordre de 1500 Ωm et ensuite le calcaire massif de résistivité égale à 4 à 5000 Ωm. Le dispositif de Lee montre que la couche à haute résistivité est atteinte plus rapidement vers la carrière et à proximité des sondages carottés SC 1 et SC 2. Les résultats obtenus sont concordants et sont confirmés par les sondages mécaniques : environ 1 m de terrain superficiel à résistivité de l'ordre de 1500 Ωm et ensuite le calcaire massif de résistivité égale à 4 à 5000 Ωm. Le dispositif de Lee montre que la couche à haute résistivité est atteinte plus rapidement vers la carrière et à proximité des sondages carottés SC 1 et SC 2. Comme nous devions nous attendre à de fortes dissymétries au cours des mesures, tous les sondages électriques ont été réalisés, suivant le dispositif de Lee. Deux sondages S<sup>3</sup> et S<sup>4</sup> centrés sur un même point et orientés suivant des directions orthogonales ont été faits au-dessus de ce que nous pensions être la zone de transition. Ils indiquent sous une couche de 3 à 4 m de résistivité de 100 à 150 Ωm la présence d'un terrain dont la résistivité est de 300 à 400 Ωm. Ces 2 sondages présentent une très forte asymétrie. Les branches ouest et Sud donnent des valeurs beaucoup plus faibles de résistivité que les branches nord et surtout est. Celles-ci semblent également montrer vers 10 m de profondeur, le passage à une zone à très faible résistivité égale de 20 à 30 Ωm. Un dernier sondage S<sup>5</sup> situé dans une zone basse et humide, certainement à l'extérieur du récif, a donné 8 m de terrain à résistivité égale à 60 Ωm recouvrant un terrain à 240 Ωm (voir fig. 4).

#### 4.2.2. Deuxième phase

Sur base des résultats de la première phase, nous avons décidé d'effectuer des mesures de résistivité suivant 3 lignes parallèles à la paroi ouest (lignes 1 à 3 - Fig. 3) :

- des trainées de mesure de résistivité avec un écartement entre électrodes de 10 m et un pas de mesure de 10 m. La profondeur d'investigation est du même ordre de grandeur que celle obtenue dans les sondages de la première phase ;
- des profils de résistivité en laissant les 2 électrodes d'injection de courant fixes et distantes l'une de l'autre de 150 m, et en déplaçant les électrodes de mesure, distantes de 10 m, d'un pas de 10 m. On peut estimer que la profondeur d'investigation est de 50 mètres.

Les trainées donnent des résistivités apparentes variant de 1500 à 2100 Ωm pour la ligne 1, de 150 à 650 Ωm pour la ligne 2 et de 150 à 300 Ωm pour la ligne 3. On constate l'épaississement des mort-terrains vers le Sud-Ouest et on peut relever l'existence d'une crête à plus haute résistivité.

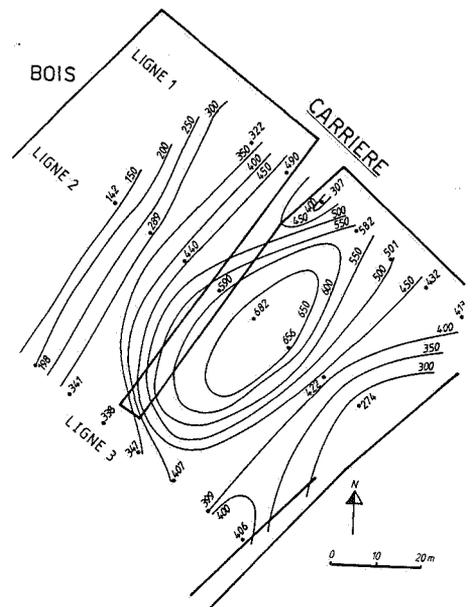


Figure 5 : Profils de mesures de résistivité. Ligne 150m. Carte d'équirésistivité. aΩ m).

Les résistivités apparentes mesurées par les profils varièrent de 100 à 700  $\Omega m$ . Le nombre de mesures, bien que peu important (24 pour plus de 5000  $m^2$ ), permet de visualiser une zone à haute résistivité (calcaire marbrier). Elle est bordée au Nord-Ouest par une zone à basse résistivité (schistes) et au Sud-Est par une zone à résistivité moyenne (calcaire gris stratifié ?) (Fig. 5).

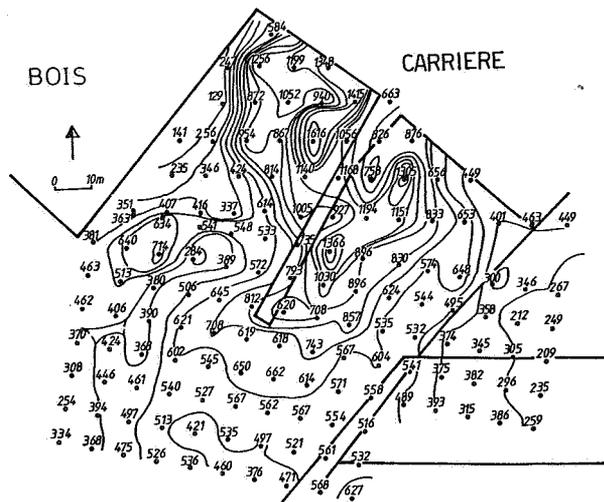


Figure 6 : Profils de mesure de résistivité. Ligne de 300 m. Carte d'équirésistivité à ( $\Omega m$ ).

#### 4.2.3. Troisième phase

Au cours de cette phase, les électrodes d'injection ont été placées à 300 m l'une de l'autre et les électrodes de mesures ont été placées aux noeuds d'un réseau carré de 10 m de côté couvrant le terrain à étudier. La profondeur d'investigation est de l'ordre de 80 à 100 m. L'utilisation d'un tel dispositif est d'opération facile (2 électrodes seulement à déplacer), mais exige une connaissance précise de la position relative des 4 électrodes pour

chacune des mesures. Les valeurs mesurées sont très faibles et le facteur de correction géométrique important. Une erreur de localisation influence donc fortement les résistivités apparentes calculées. C'est pourquoi un levé topographique détaillé a été effectué. Sur la carte de résistivité (Fig. 6) la prolongation du calcaire marbrier, à partir de la carrière, se marque par une zone de valeurs très chahutées, mais toujours élevées (supérieures à 500  $\Omega m$ ) qui atteignent localement 1600  $\Omega m$ . Au Nord, le gradient important, environ 1000  $\Omega m$  sur 10 m indique un contact à forte pente, semblable à celui observé dans la tranchée d'accès à la carrière. Vers le Sud-Ouest et le Sud, la pente est beaucoup plus douce.

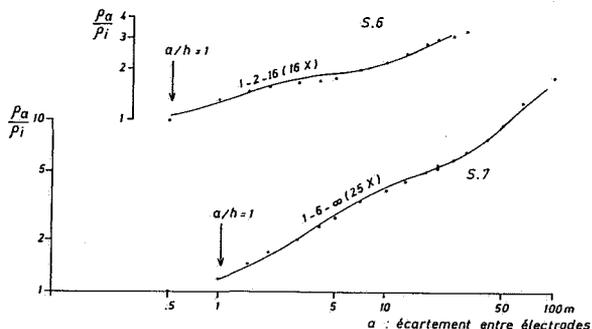
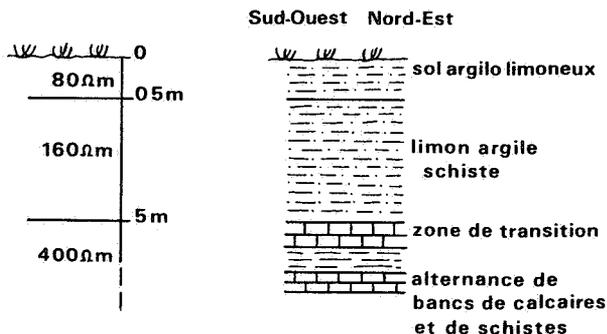


Figure 7 : Sondages électriques 6 et 7. Mesures de référence (European Association of Exploration geophysicists, 1979).

La flèche indique l'épaisseur du premier terrain, les chiffres au-dessus des courbes donnent les valeurs relatives des résistivités des couches reconnues, et le chiffre entre parenthèse fournit l'épaisseur de la seconde couche par rapport à la première.

La troisième phase a été complétée par des sondages destinés à calibrer les couches d'isoresistivité apparente. Le sondage S<sup>6</sup> donne 50 cm de terrain dont la résistivité est de 80  $\Omega m$ , puis

#### SONDAGE S<sub>6</sub>



#### SONDAGE S<sub>7</sub>

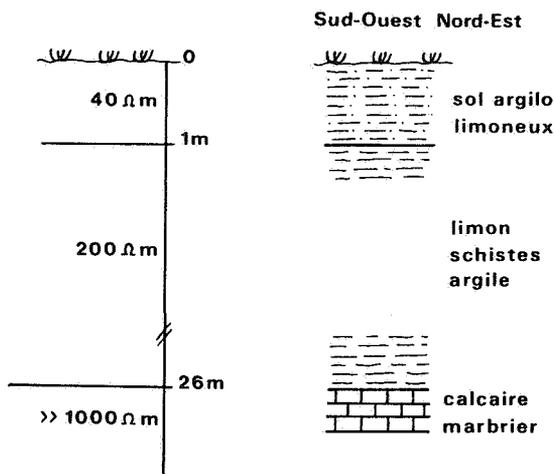


Figure 8 : Interprétation lithologique des résultats des mesures des sondages électriques S<sub>6</sub> et S<sub>7</sub> (tenant compte du dispositif LEE). Localisation des sondages voir figure 3.

4,5 m de terrain à 160  $\Omega$ m recouvrant un terrain caractérisé par une résistivité de 400  $\Omega$ m. Le calcaire marbrier (résistivité de l'ordre de 4000 à 5000  $\Omega$ m) n'a donc pas été reconnu avec une longueur de ligne de 100 m.

Le sondage S<sup>7</sup> donne une épaisseur de recouvrement d'1 m à résistivité égale à 40  $\Omega$ m, ensuite 25 m de terrains à résistivité de 200  $\Omega$ m pour atteindre une couche à résistivité très élevée (très supérieure à 1000  $\Omega$ m) (voir fig. 7 & 8). La profondeur à laquelle se trouve le calcaire compact doit être estimée avec prudence parce que les variations lithologiques latérales rencontrées sur les 300 m de ligne influencent les résultats.

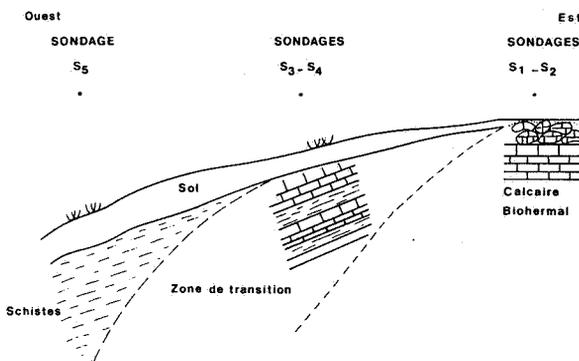


Figure 9 : Coupe lithologique passant par les sondages électriques S1-S2, S3-S4, S5 établie sur base des interprétations des résultats obtenus. Localisation voir figure 3.

### 4.3. Synthèse

Nous avons aisément suivi le calcaire marbrier par l'emploi de la méthode électrique ; les terrains envasant le récif ont pu être caractérisés par des résistivités spécifiques. La succession des terrains dans le sous-sol est reconnue mais les profondeurs calculées ne sont qu'indicatives (voir fig. 9 & 10). D'autre part, nous avons démontré l'allure en plateau du récif et déterminé sa géométrie. Les résultats ont été atteints lors d'une campagne de 2 à 3 jours seulement.

Une multiplication des sondages électriques permettrait d'affiner les tendances aujourd'hui dégagées. Soulignons que notre but n'était pas de déterminer l'exacte géométrie du récif, mais de développer une méthodologie de prospection rapide et économique.

## 5. CONCLUSION

Le choix de la prospection électrique s'est révélé judicieux et a permis de répondre parfaitement aux questions posées. La géométrie du massif calcaire est définie et les prolongements enfouis reconnus. Outre la reconnaissance d'une masse de calcaire enfouie, cette méthode permet de situer correctement l'implantation des sondages carottés dont l'examen seul déterminera si le calcaire est

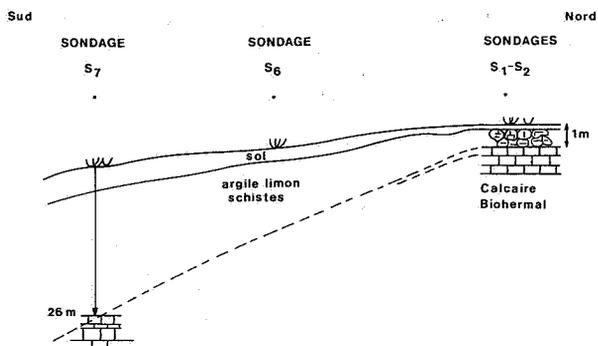


Figure 10 : Coupe lithologique passant par les sondages électriques S1-S2, S6, S7 établie sur base des interprétations des résultats obtenus. Localisation voir figure 3.

d'usage marbrier. Ces sondages demeurent indispensables parce que des mesures électriques ne nous renseigneront jamais sur la valeur esthétique du matériau reconnu ni sur ses possibilités de commercialisation. Remarquons que la crête topographique repérée dans le champ prospecté ne coïncide pas avec l'émergence à la surface du massif calcaire. Ceci confirme que l'étude de la topographie ne permet pas de définir la géométrie du récif enfoui.

Les étapes classiques d'une prospection électrique restent d'application dans le cas d'une étude spécifique des biohermes :

- constituer un dossier exhaustif reprenant les données bibliographiques, de terrain, ... relatif au site étudié (Netels & Vanbelle, 1981) ;
- reconnaître la géologie du site et de ses abords ;
- circonscrire les zones à prospecter ;
- définir les dispositifs expérimentaux de mesure, la direction des lignes ;
- réaliser un levé topographique ;
- effectuer la prospection électrique ;
- donner des informations pour permettre le calcul des réserves, donner des axes d'extension, guider l'exploitation et choisir les sites d'implantation des sondages carottés.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Professeur P. Dumont pour sa collaboration durant le levé topographique ainsi que l'équipe de chercheurs du Service Exploitation des Mines pour son aide durant la prospection électrique.

## BIBLIOGRAPHIE

- DUMON, P., 1979 - Essai sur les marbres rouges belges. Document non publié, 50 p. Serv. Expl. Mines U.L.Bruxelles.
- FERRARIS, J., 1777 - Carte de cabinet des Pays-Bas autrichiens. *Mémoires Historique, Chronologique et Economique, VII-9 pl. 101 (A<sup>9</sup>) 3*. Ed. Pro civitate Bruxelles 1965.

MAILLIEUX, E. & DEMANET, F., 1928 -

L'échelle stratigraphique des terrains primaires de la Belgique. *Bull. Soc. géol. Belg.*, 38: 124-131;

MOURLON, M., 1902 - Levés et tracés avec le concours L. de Bayet, de la carte géologique n° 182 Froidchappelle-Senzeille. *Commission géologique de Belgique*

NETELS, V. & VANBELLE, J.M., 1981 -

Possibilité de valorisation des ressources

marbrières de la bande calcaire méridionale du bassin de Dinant. *In* : Troisièmes Journées de l'Industrie Minérale (U.L.Bruxelles), Namur, 777-789.

European Association of Exploration Geophysicists, 1979 - Standard Graphs for Resistivity Prospecting.

Manuscrit reçu le 10 février 1989 et accepté pour publication le 5 octobre 1989.