



DEUXIÈME COLLOQUE
SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL
ET SES APPLICATIONS
NICE - 5 AU 10 MAI 1969

19/ 1

LES HETEROGENEITES DU FOND
SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

Jean-Pierre MIZIKOS

Institut océanographique de Monaco

RESUME

Vitesses et atténuations sont des fonctions aléatoires.

Pour les premiers mètres de sédiments du plateau continental, leurs lois spatiales varient à chaque changement d'échelle. L'homogénéité statistique n'y existe pas toujours. La tectonique, donc la mécanique des roches, semble obéir à des lois assez simples à condition de raisonner par changement d'échelle.

ABSTRACT

Velocity and attenuation are random functions. The spatial laws of the first few meters of sediments of the continental shelf vary with each scale variation. The statistical homogeneity is not always found. Tectonics, therefore rocks mechanics, seem to obey rather simple laws on condition that the scale variation is considered.



LES HETEROGENEITES DU FOND
SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

La propagation du sonar, du fait de la fréquence de travail, n'est influencée que par les premiers mètres de sédiments du fond. Pour les sédiments du plateau continental, l'hétérogénéité est presque de règle. Elle résulte du processus d'érosion permanent du continent et de la multiplicité des facteurs qui entrent en jeu. On la découvre à toutes les échelles : hétérogénéité fondamentale des grains et des interstices, hétérogénéité régionale due aux failles, aux variations de faciès, etc.

Cette réalité semble défier les ressources de l'étude expérimentale et de l'analyse mathématique. En ce qui concerne la propagation acoustique, on essaye de la faire entrer dans le cadre de modèles simplificateurs : stratification horizontale, couches à vitesse uniforme, couches à variations de vitesses ne dépendant que de la verticale. De tels modèles peuvent convenir aux fonds océaniques, géologiquement plus uniformes, ou aux sédiments profonds, homogénéisés par la compaction et la "durée" géologique, dans une région tectoniquement calme. Ils perdent leur valeur pour les sédiments superficiels du plateau continental, comme le prouve, par exemple, l'étude des écarts entre les prévisions et les mesures de propagation des ondes acoustiques par petits fonds. Ces sédiments sont toujours poreux, saturés et souvent peu consolidés.

Les conclusions présentées s'appliquent à tous les milieux sédimentaires. En dépit des apparences, l'exposé ne s'éloigne pas trop du cadre de ce colloque : nous montrerons que le milieu sédimentaire doit être considéré comme aléatoire. Il est vraisemblable que les problèmes de propagation acoustique



LES HETEROGENEITES DU FOND SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

correspondants utiliseront des techniques de la théorie statistique de l'information.

LES MESURES DE VITESSE ET D'ATTENUATION

Un sédiment marin poreux est d'abord caractérisé, du point de vue acoustique, par la vitesse et l'atténuation des ondes longitudinales et transversales. Nous allons évoquer les principales techniques qui permettent de les mesurer, afin d'examiner la signification des résultats fournis.

1 - La sismique réfraction

Elle concerne la propagation d'ondes qui, sur une partie de leur trajet, suivent une surface de séparation entre deux milieux de vitesse différente. Cette méthode n'est applicable, théoriquement, que si la répartition des vitesses suivant la profondeur permet l'existence de phénomènes de réfraction totale. Elle compose des vitesses ponctuelles suivant un trajet situé sur la surface de séparation des deux milieux. Le résultat n'a de signification que rapporté à ce segment dont il est préférable de contrôler la largeur (à la limite de résolution près) en employant un dispositif de tir approprié. Cette méthode permet essentiellement de suivre une surface de réfraction, ou marqueur, et non de calculer les vitesses des couches.

2 - La sismique réflexion

Elle prend en considération les ondes qui parviennent à la surface du sol ou de la mer, après réflexion sur une surface de séparation de deux couches de vitesses distinctes. Elle renseigne surtout sur la structure géologique (stratifications, failles, etc.). En sismique terrestre, grâce à des dispositifs de tirs spéciaux, la détermination des vitesses verticales reste possible. Dans ce



LES HETEROGENEITES DU FOND SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

cas, le dépouillement repose presque toujours sur l'hypothèse d'un empilement de tranches de sédiments homogènes et isotropes, plus ou moins épaisses. La méthode de statistique des Δt (différence des temps d'arrivée à des récepteurs non équidistants de l'émetteur) fournit les valeurs de vitesse vraie et une loi de variation apparente suivant la profondeur. En mer, pour les sédiments profonds et en utilisant une couverture multiple, on effectue les calculs automatiquement par différentes méthodes (DAMOTTE & HEMON, 1968).

Souvent, du fait de l'anisotropie des couches, les vitesses horizontales obtenues par la sismique réfraction sont plus grandes que les vitesses verticales fournies par la sismique réflexion ou d'autres méthodes.

La détermination des caractéristiques acoustiques d'un fond marin à partir de la mesure du coefficient de réflexion constitue un cas particulier de la sismique réflexion. A la verticale d'un point de réflexion, ou pour un milieu stratifié dont les couches peuvent présenter des variations linéaires de propriétés, on sait calculer la fonction de transfert complexe du fond (HASTRUP, 1966).

En mer, la comparaison entre sondage sismique continu et carottage permet de calculer une vitesse moyenne. Cette vitesse est égale au rapport de la distance entre les deux réflecteurs supposés (mesurée sur la carotte) à la durée de trajet entre les deux réflexions correspondantes (mesurée sur l'enregistrement). Cette valeur moyenne constitue une abstraction si le volume sédimentaire compris entre les deux réflecteurs n'est pas homogène.



LES HETEROGENEITES DU FOND
SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

3 - Le carottage sismique

Il n'est réalisable qu'en terrain consolidé. Il s'agit d'une méthode directe de mesure de la vitesse verticale dans les couches. La mesure s'effectue dans un trou de sondage, entre une explosion et un sismographe, l'un d'eux se trouvant en surface, au voisinage de l'orifice, et l'autre au bas de la tranche de terrain sur laquelle on veut faire porter la mesure de temps. Des résultats, on peut déduire une courbe de vitesse apparente en fonction de la profondeur et la vitesse vraie pour chaque profondeur, en prenant la tangente à la courbe précédente. La méthode ne s'applique qu'à la mesure de vitesses dans des tranches de terrain épaisses.

4 - Le carottage continu de vitesse (ou C. V. L. ou diagraphie acoustique)

Il constitue un procédé de mesure de vitesse de propagation pour des tranches de terrain minces, employé dans les trous de sondage. Les résultats ne sont valables que pour un trou de diamètre constant, non tubé, et un appareil parfaitement centré.

A cette méthode peut être rattaché le piquet acoustique mis au point au Musée océanographique de Monaco (en cours de perfectionnement). Il permet actuellement de mesurer une atténuation moyenne verticale dans le premier mètre de vase, aux fréquences des transducteurs utilisés. (CHASSEFIERE & LEENHARDT, 1967).

5 - Les mesures sur échantillons de carotte

Il s'agit, soit de mesures de transmission, soit de résonance d'un volume. On n'obtient qu'une vitesse et une atténuation moyennes, sauf si l'échantillon est homogène.



LES HETEROGENEITES DU FOND
SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

6 - Les corrélations entre paramètres sédimentologiques et acoustiques

Il existe des relations théoriques ou empiriques entre porosité, grain moyen, tension de cisaillement, etc., d'une part, et vitesses et atténuations, d'autre part. On essaye généralement de corrélérer ces deux types de paramètres en groupant sur un même graphique des sédiments de nature et d'emplacement différents (figure 1).

Les sédiments proches de l'interface eau-fond peuvent être assimilés à des suspensions lorsque leur porosité dépasse 75 à 80 p. cent. La vitesse des ondes transversales y est nulle, celle des ondes longitudinales inférieure de 2 à 3 p. cent à celle de l'eau de mer. Elle peut être calculée approximativement avec les formules de WOOD (1941) ; d'URICK (1948), etc. L'atténuation résulte du frottement visqueux entre les particules minérales et l'eau, dont les déplacements s'effectuent à des vitesses différentes.

A un autre pôle sédimentologique, les sédiments saturés et fortement cimentés ou compactés, obéissent assez bien à la relation empirique suivante, qui représente une moyenne volumique (WYLLJE et al., 1956) :

$$\frac{1}{V} = \frac{\varphi}{V_f} + \frac{1 - \varphi}{V_m}$$

V représente la vitesse moyenne de l'agrégat fluide-minéraux, φ la porosité, V_f la vitesse dans le fluide (sensible à la température), / V_m la vitesse dans la matrice minérale.



LES HETEROGENEITES DU FOND
SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

Il n'existe pas de formule semblable pour l'atténuation qui dépend, en outre, de la fréquence.

Entre ces deux pôles, on rencontre toutes les possibilités de sédiments sous-consolidés. Leur vitesse augmente lorsque la porosité diminue et lorsque la compaction (donc l'enfouissement), ou la cimentation (processus sédimentologique assez aléatoire), augmentent. L'atténuation devrait diminuer avec la profondeur, mais on n'en possède aucune preuve expérimentale.

Conclusion

Les diverses méthodes de mesure fournissent principalement la vitesse des ondes longitudinales, plus rarement celle des ondes transversales et les atténuations. Les résultats obtenus dépendent de la fraction de sédiments étudiée, qu'il s'agisse de vitesse vraie, moyenne ou apparente et, par suite, de la méthode de mesure utilisée. On ne peut donc pas comparer ces résultats, ni les étendre à un volume quelconque, si le milieu n'est pas homogène à toutes les échelles. Or, les dépôts sédimentaires superficiels du plateau continental sont généralement hétérogènes, dans leur sédimentation comme dans leur structure.

LES FONDS DU PLATEAU CONTINENTAL

La comparaison d'analyses de carottes voisines révèle l'existence de modifications latérales dans la nature des sédiments, donc dans leur caractéristiques sédimentologiques et acoustiques (figure 2^x). On est en droit de s'interroger, alors, sur la signi-

x Figure aimablement communiquée par M. BELLAICHE, Station géodynamique de Villefranche-sur-Mer.



LES HETEROGENEITES DU FOND SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

fication d'une valeur moyenne.

Du point de vue structural, la stratification horizontale n'existe pas toujours, comme le montrent les figures 3, 4 et 5 et les variations de profondeur du réflecteur RA (contact des vases superficielles et du sable) sur la figure 2.

ESQUISSE D'UNE THEORIE DES VITESSES ET DES ATTENUATIONS DANS UN MILIEU POREUX

Les vitesses mesurées par une méthode quelconque représentent le résultat d'une composition spatiale de vitesses ponctuelles. Si le milieu est hétérogène, la loi de composition varie selon la méthode utilisée, et selon la position de l'émetteur et du récepteur. A l'intérieur d'une zone géographique donnée, on peut alors mesurer un grand nombre de valeurs de vitesses (ou d'atténuations) différentes qui représentent chacune le résultat d'une composition locale inconnue. Intuitivement, cette complexité du milieu, quand on cherche à le décrire, appelle un langage probabiliste. Voyons comment traduire cette conception du milieu sédimentaire en termes mathématiques. Une mise en forme mathématique semblable a déjà été développée par MATHERON (1967) pour la granulométrie (prise au sens large de géométrie des pores) et pour la perméabilité.

L'emploi du langage probabiliste ne signifie pas que les propriétés du milieu se trouvent forcément distribuées par un caprice du hasard. Il constitue un outil permettant d'analyser les changements d'échelle. De la multitude des structures qui existent à l'échelle granulométrique, il permet de dégager une loi spatiale. A partir des différentes lois locales qui existent à cette échelle



LES HETEROGENEITES DU FOND
SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

on peut reconstituer celle qui s'observe à l'échelle supérieure. Un tel processus doit se poursuivre autant de fois qu'un changement d'échelle s'impose physiquement. Dans le cas de la théorie sur les perméabilités, MATHERON considère successivement un niveau microscopique (qui est celui des grains élémentaires), un niveau granulométrique (où règne l'équation de Navier), puis un premier niveau macroscopique (où se manifeste, ou non, la loi de Darcy).

On déterminera d'abord la genèse des vitesses de l'agrégat et des atténuations (encore mal connue), puis le domaine à l'intérieur duquel elles apparaissent comme des propriétés ponctuelles (échantillon de carotte, par exemple). A une échelle supérieure (lentille, fraction de couche, passée sédimentaire, couche entière, etc.), le milieu peut paraître homogène, c'est-à-dire qu'il existe une valeur moyenne invariante dans l'espace. La vitesse (ou l'atténuation) sera alors représentée par une fonction aléatoire, ergodique et stationnaire ; à cause de l'ergodicité, la valeur moyenne coïncidera avec l'espérance mathématique (constante) de la fonction. Elle dépendra de la loi spatiale des vitesses (ou des atténuations) ponctuelles, c'est-à-dire des valeurs prises simultanément en tous les points de l'espace. Le domaine de sédiment poreux correspondant sera donc statistiquement homogène ; ce caractère ne peut se rapporter qu'à une échelle suffisamment grande par rapport à celle des grains, où l'hétérogénéité est naturelle. L'homogénéité est donc liée à un domaine d'espace sédimentaire, à une échelle.

Lorsque l'homogénéité statistique n'existe pas, la valeur moyenne mesurée reste une variable aléatoire. Son espérance peut prendre n'importe quelle valeur à l'intérieur d'un intervalle borné



LES HETEROGENEITES DU FOND SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

ou non, suivant les conditions géologiques. Dans ce cas, il n'existe pas de valeur de vitesse ou d'atténuation permettant de décrire globalement la propagation et le milieu reste hétérogène.

Ces considérations s'appliquent à n'importe quel changement d'échelle. En ce qui concerne les vitesses et les atténuations, nous ignorons encore quelles sont les échelles à considérer, ainsi que les objets, structures et lois qui les caractérisent. L'étude expérimentale reste à réaliser. Les échelles des vitesses et des atténuations n'ont, à priori, aucune raison de coïncider.

JUSTIFICATION D'UNE THEORIE MATHEMATIQUE DE LA TECTONIQUE

La structure géologique du plateau continental est souvent complexe. Elle prolonge celle du continent, directement observable par le géologue. Les observations géologiques réalisées à terre, sur la côte, permettent d'ailleurs d'interpréter les résultats obtenus en mer par sismique réflexion. Je vais montrer brièvement que les phénomènes tectoniques n'obéissent pas aux lois du hasard, mais doivent être analysés mathématiquement à l'aide de la théorie des probabilités.

La plaine littorale de Castellón (figure 6), sur la côte méditerranéenne espagnole, s'ouvre à la jonction de deux systèmes tectoniques. Le premier est constitué par un rameau nord de la Chaîne Ibérique, la Sierra de Espadan, d'axe NE-SW, donc perpendiculaire à la côte (terrains triasiques et liasiques entourant Segorbe, sur le plan de situation de la figure 6). Le second correspond à l'extrémité sud de la Cordillère catalane, le Maestrazgo, d'axe NW-SE (terrains crétacés entourant Lucena del Cid) donc



LES HETEROGENEITES DU FOND
SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

parallèle à la côte. Ces deux systèmes, apparus à l'ère primaire, ont rejoué lors des mouvements alpins, donnant lieu à une tectonique cassante.

Le système catalan s'est converti en flexure continentale, faisant basculer par gradins relevés au NW des blocs de sédiments alignés NE-SW. Ces gradins sont évidemment jalonnés par de longues failles parallèles à la côte et correspondant probablement aux axes anticlinaux de la cordillère catalane. Sur la figure 6, elles se placent aux contacts anormaux du Primaire ou du Trias, avec le Crétacé ou les terrains plus récents (SW de Villafames, ligne Puebla Tornesa - Borriol, Desierto de las Palmas) Ces failles présentent un espacement dont la valeur semble fluctuer autour d'une moyenne. Il en est de même dans la plaine (tiretés A₁, A₂ et A₃ de la figure 7). Entre elles s'intercalent des alignements d'accidents (fractures, failles, ravins) coïncidant avec les anciens synclinaux catalans (alentour des tiretés S₁ et S₂ de la figure 7). Les traits structuraux précédents caractérisent l'ensemble de la région. L'influence du système ibérique se suit assez régulièrement depuis la Sierra de Espadan jusqu'à l'Ebre au Nord. Dans la plaine, diverses cassures matérialisent les charnières (zones de plus grande fragilité) des anticlinaux et synclinaux ibériques. Leur position présente, au-delà, vers le Nord, une relative périodicité. L'intensité des plissements s'atténue, en outre, à mesure que l'on s'éloigne vers le NE.

La géologie locale, comme par exemple autour du lieu dit El Sichar, possède un caractère propre (figure 7) différent de celui d'un autre lieu dit. Les accidents tectoniques observables sur un gradin basculé, ressemblent peu à ceux d'un autre gradin, qu'ils soient d'origine ibérique ou catalane. Sur la figure 7, seuls



LES HETEROGENEITES DU FOND
SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

sont représentés les détails les plus significatifs l'ensemble étant décrit par ailleurs. (MIZIKOS, 1965)

Il existe donc deux échelles auxquelles s'appliquent des lois tectoniques et, plus généralement géologiques, différentes. Il est possible de parler de lois puisque, pour cet exemple, plis et failles ne se distribuent pas au hasard. Par contre, on retrouve la nécessité d'une théorie probabiliste pour essayer d'expliquer les fluctuations et les changements d'échelle. L'importance géodynamique des transferts d'échelle a déjà été mise en évidence par GLANGEAUD (1962) pour les géosynclinaux, les croûtes et le manteau terrestres. La tectonique est liée aux paramètres de la mécanique des roches, dont dépendent les vitesses de propagation et les atténuations. On peut donc prendre modèle sur les conclusions de ce paragraphe pour bâtir une théorie de la propagation dans des sédiments hétérogènes.

CONCLUSION

Vitesses et atténuations doivent être représentées par des fonctions aléatoires. Leur processus de création, à l'échelle élémentaire, reste mal connu. Les espérances mathématiques des fonctions sont fondamentalement liées à une échelle spatiale ainsi que les propriétés mécaniques des roches, dont dépend la tectonique.

En ce qui concerne la propagation des ondes acoustiques, s'il existe une homogénéité statistique à une échelle donnée, on peut lui appliquer l'ensemble des théories et moyens expérimentaux habituels. Ceci est valable pour les fonds océaniques ou les roches non superficielles des bassins géologiques tectoniquement



LES HETEROGENEITES DU FOND
SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

calmes. Si, par contre, le milieu est hétérogène, il faut le considérer mathématiquement comme aléatoire. On ignore encore si les conditions physiques permettent ou non d'utiliser des équations différentielles linéaires aux dérivées partielles stochastiques que l'on sait résoudre actuellement. Un milieu sédimentaire aléatoire se rencontrera essentiellement dans des régions à tectonique accidentée et des sédiments superficiels du plateau continental. L'étude de tels milieux aléatoires constitue un nouveau champ de recherche ouvert à la collaboration entre géodynamiciens, sédimentologues, géophysiciens, acousticiens et mathématiciens.

BIBLIOGRAPHIE

- CHASSEFIERE (B.) & LEENHARDT (O.), 1967. - Mesures acoustiques et mécaniques dans les vases. Vie et Milieu, B, 18, / n° 1, pp. 1-32 (8 fig., 19 réf.).
- DAMOTTE (B.) & HEMON (C.), 1968. - Traitement de l'information sismique en océanographie. Comm. Coll. C. N. R. S. méth. sism. marine et cartes géol. sous-marine. Villefranche-sur-Mer. Réf. I. F. P. 16 196, 31 p. (20 fig.).
- GLANGEAUD (L.), 1962. - Les transferts d'échelle en géologie et géophysique. Application à la Méditerranée occidentale et aux chaînes péripacifiques. Bull. Soc. géol. Fr., 7, n° 4, pp. 912-961 (16 fig., 206 réf.).
- HASTRUP (O. F.), 1966. - Reflection of plane waves from a solid multilayered damping bottom. Saclant A. S. W. Res. Cent. La Spezia (Italie), tech. Rep. 50, 52 p. (19 fig., 5 réf.).



LES HETEROGENEITES DU FOND
SUR LE PLATEAU CONTINENTAL

- MATHERON (G.), 1967. - Eléments pour une théorie des milieux poreux. Masson et Cie, Paris, 166 p. (8 réf.).
- MIZIKOS (J. P.), 1965. - Etudes hydrogéologiques par la méthode des résistivités de l'Ouest de la plaine de Castellón (Espagne). Mem. Dipl. Ing. géophys. Inst. Phys. Globe, Strasbourg, 46 p. (7 fig.) (non publié).
- SHUMWAY (G.), 1960. - Sound speed and absorption studies of marine sediments by resonance method. Geophysics, 25, n° 3, pp. 659-682 (12 fig., 53 réf.).
- URICK (R. J.), 1948. - The absorption of sound in suspensions of irregular particles. J. acoust. Soc. Amer., 20, n° 3, pp. 283-289 (8 fig., 8 réf.).
- WOOD (A. B.), 1941. - A text book of sound. Bell & Sons, London, pp. 361-362.
- WYLLIE (M. R. J.), GREGORY (A. R.) & GARDNER (L. W.), 1956. - Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. Geophysics, 21, n° 1, pp. 41-70 (19 fig., 15 réf.)

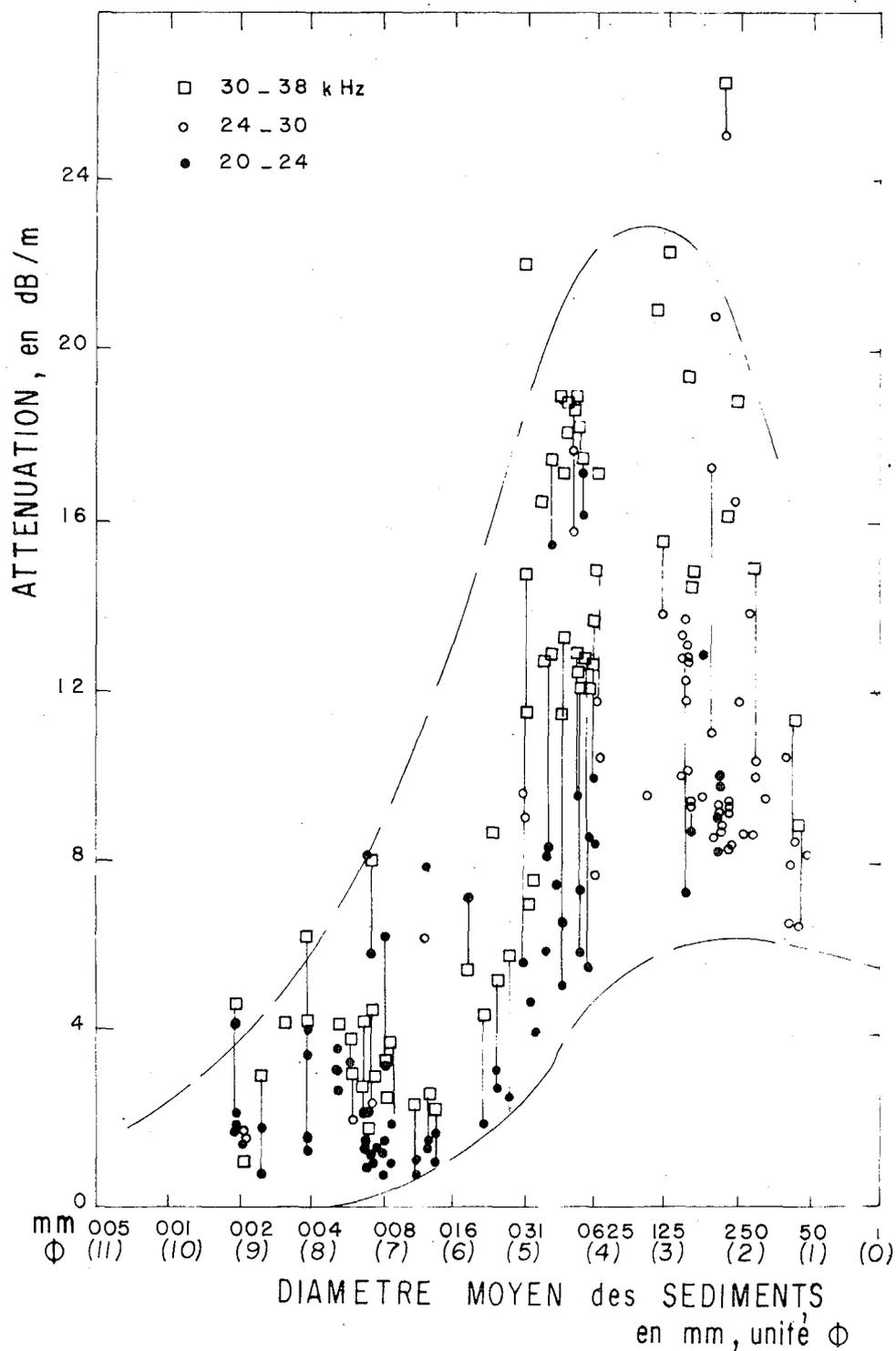
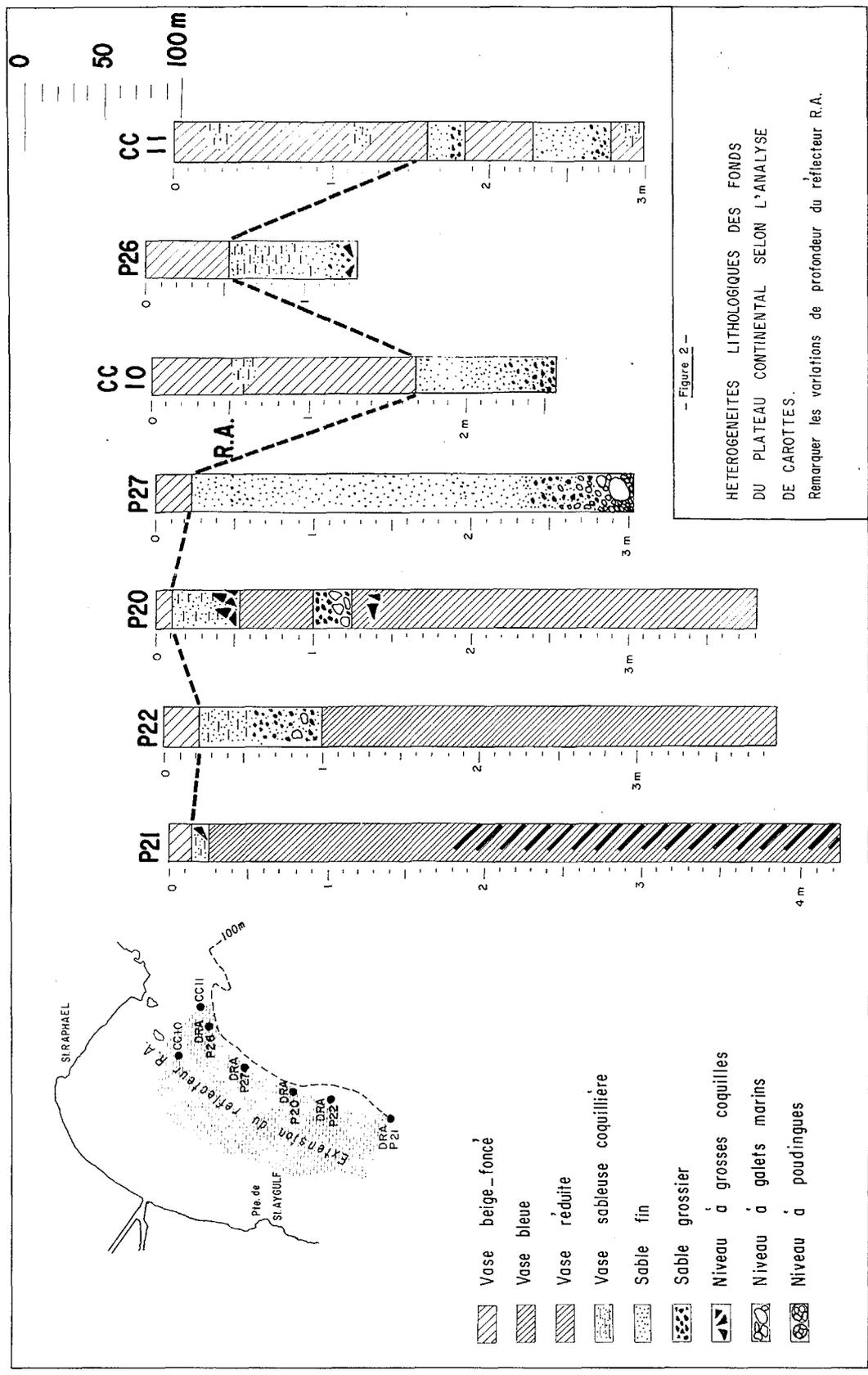
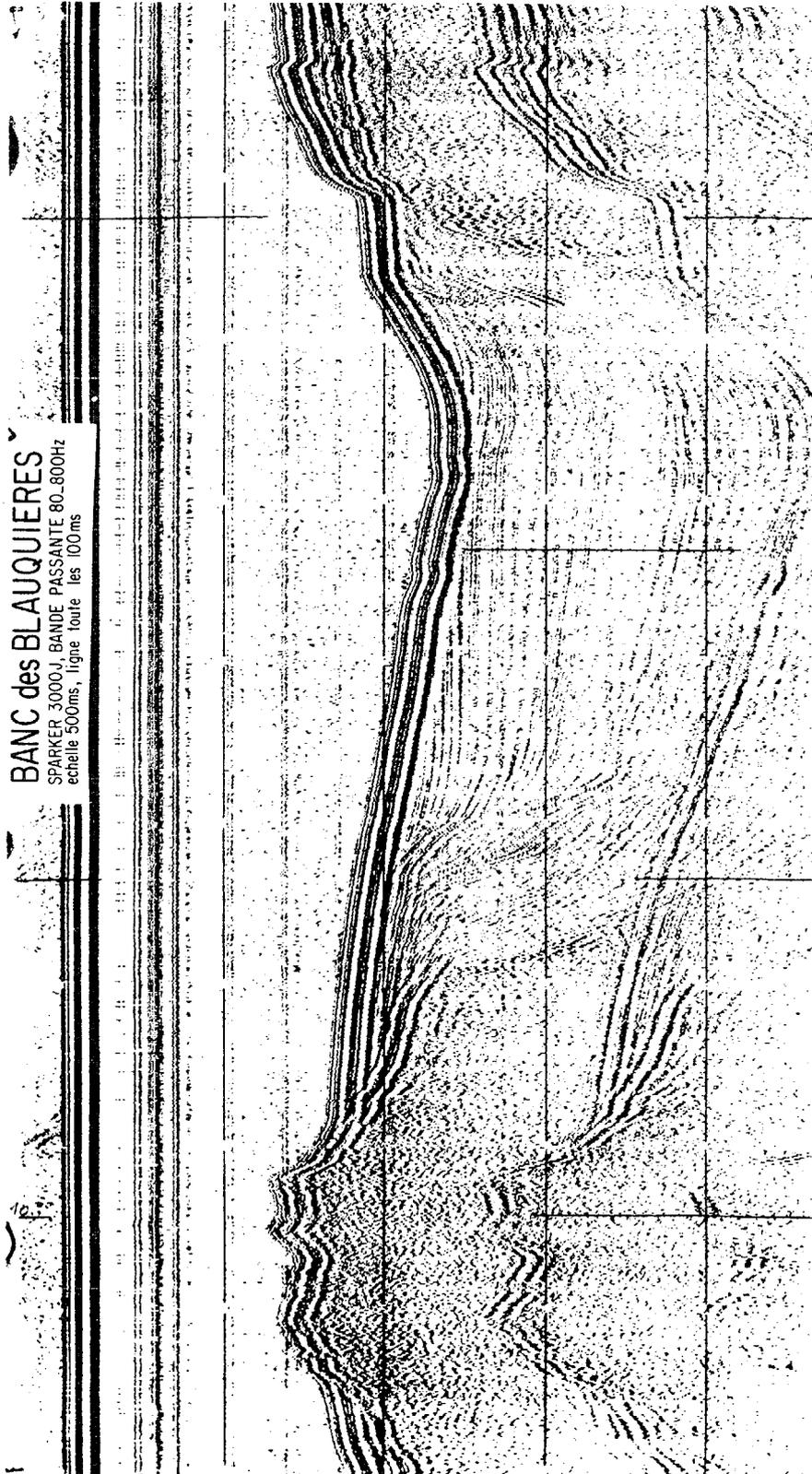
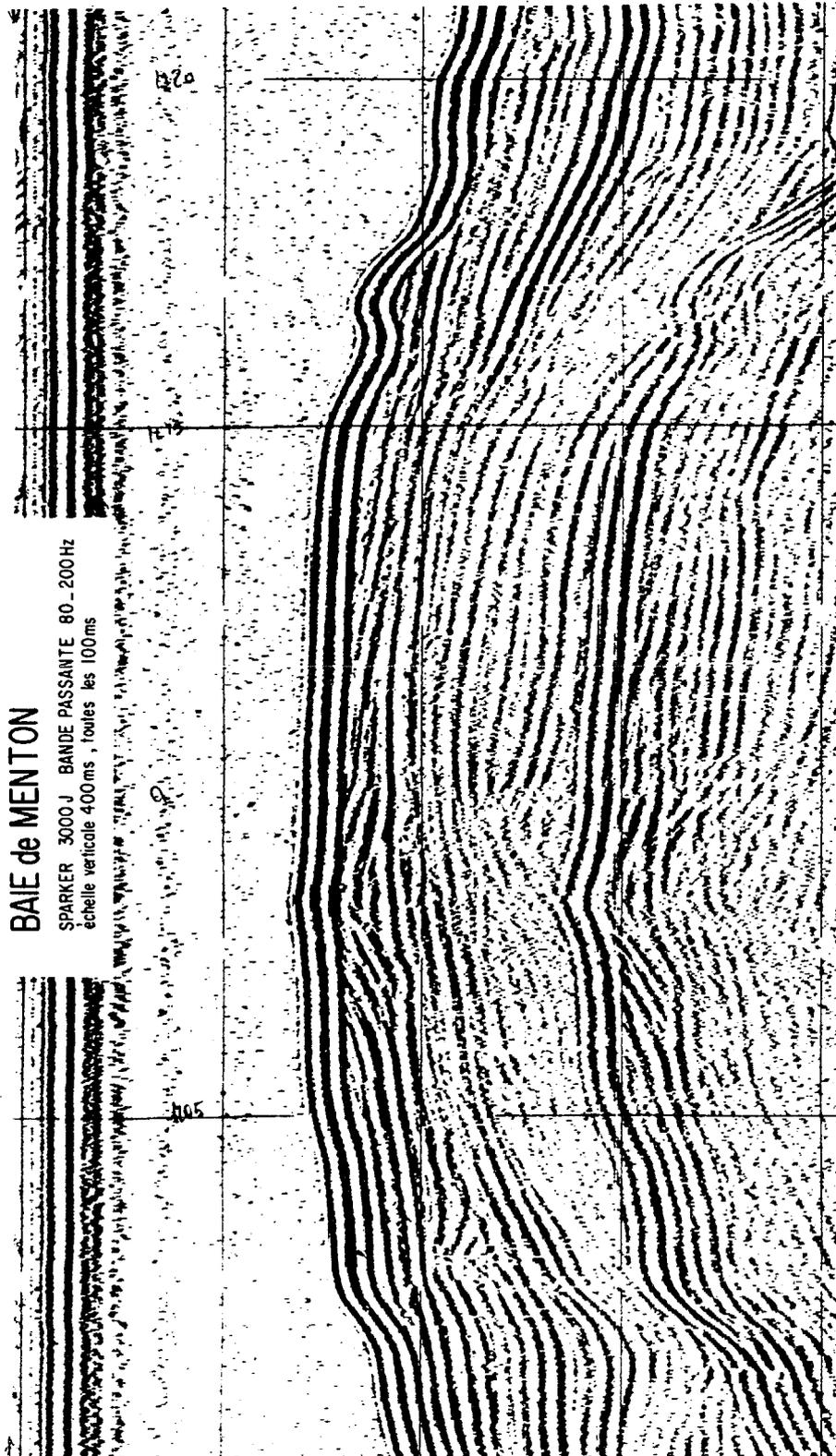


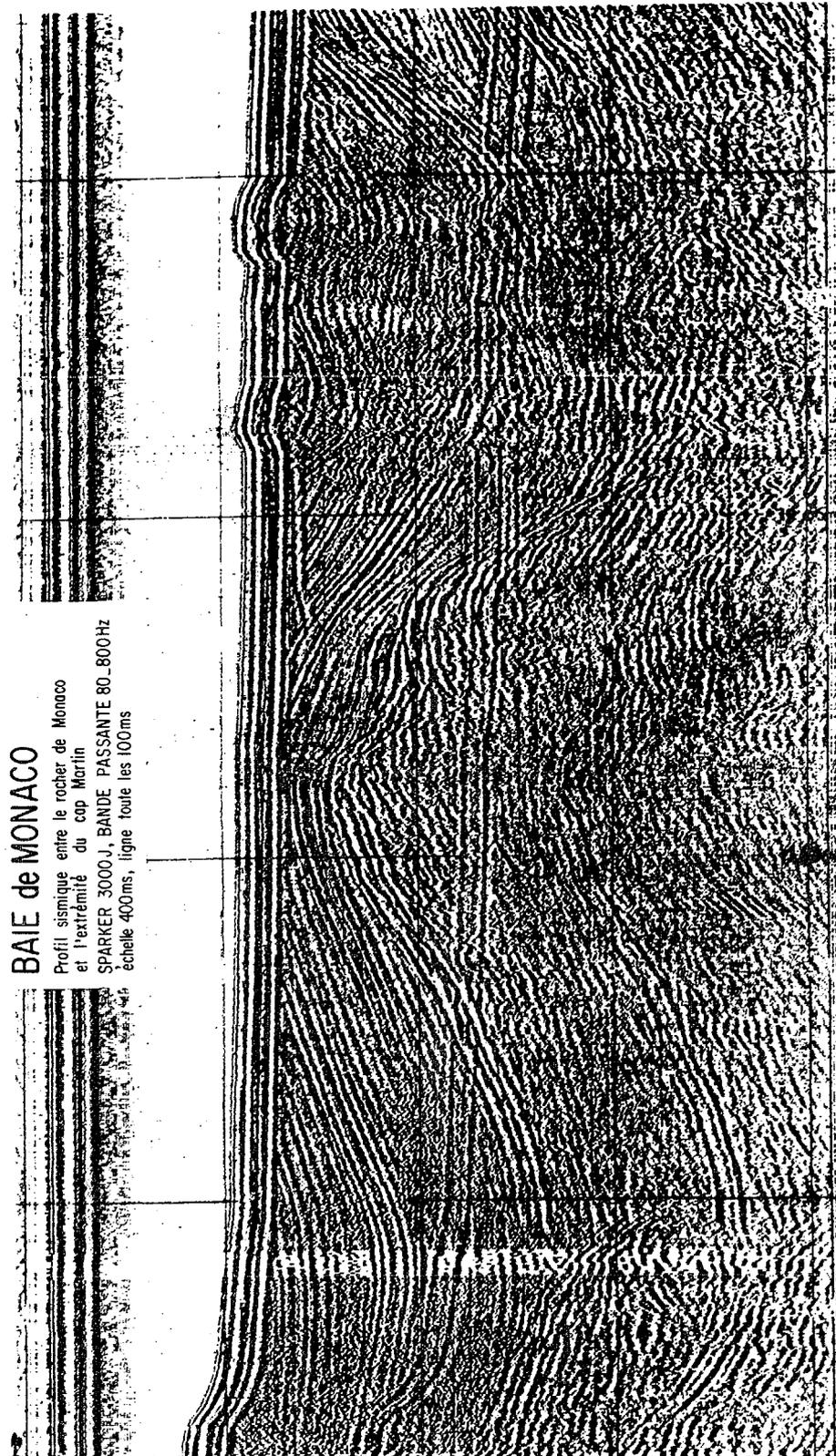
FIGURE 1.

Graphique expérimental d'atténuation en fonction du diamètre moyen pour différents sédiments marins (d'après SHUMWAY 1960). Les traits verticaux relient les résultats obtenus à différentes fréquences pour un même échantillon.









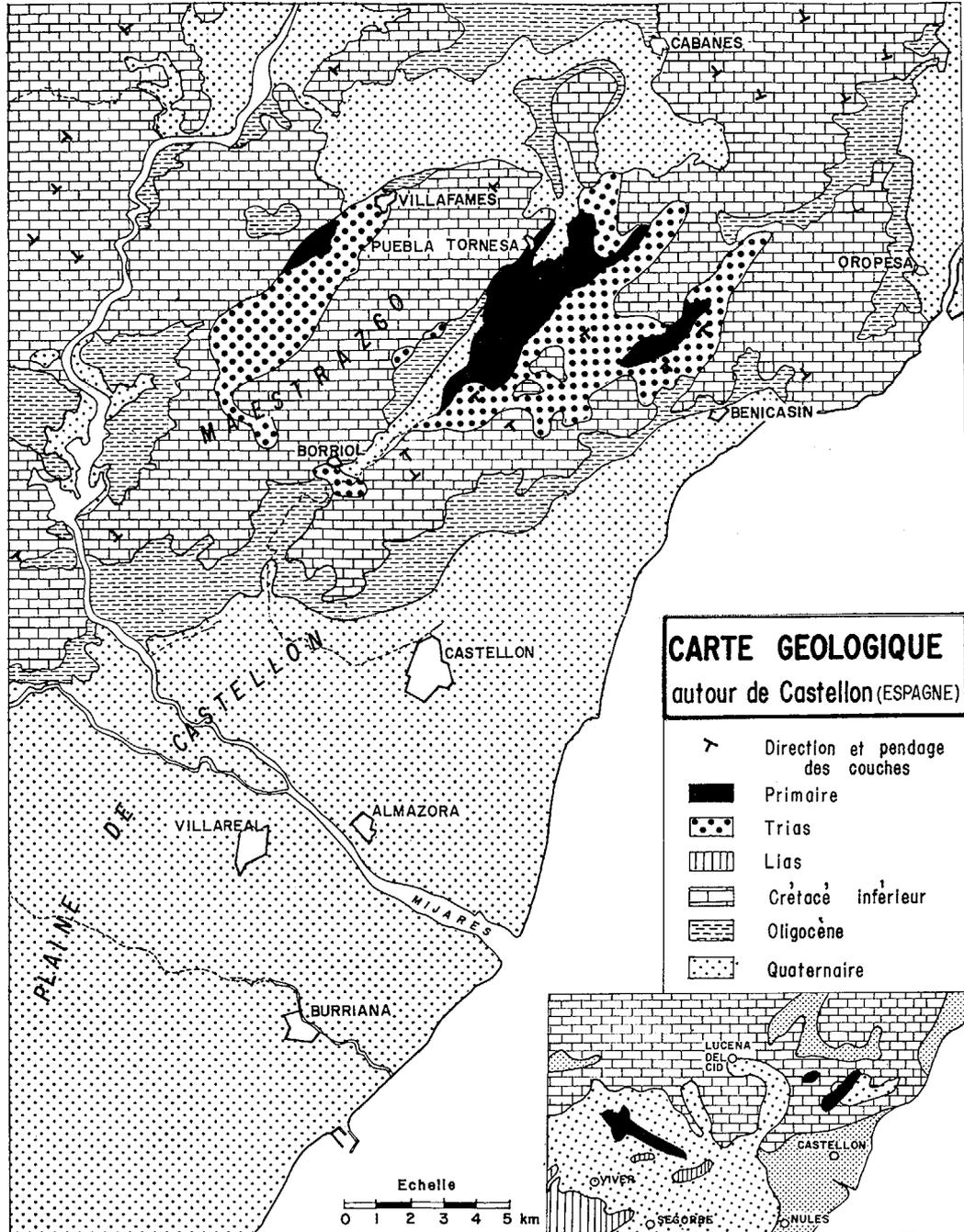


Figure 6

