

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA STRUCTURE PROFONDE ENTRE LA PROVENCE ET LA CORSE

MURAOUR P., DUCROT J., MARCHAND J.P., CECCALDI X.

AVANT-PROPOS

Le présent travail a été réalisé pour le compte du Premier Ministre (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique).

Il nous est agréable de trouver ici l'occasion de remercier, une fois de plus, tous les organismes et toutes les personnes, et, en particulier, la Marine Nationale, le Vice-Amiral DUPONT et les Capitaines de Frégate DUPLEIX et PORCHIER, qui ont bien voulu nous faire profiter de leur aide matérielle sans laquelle il nous aurait été impossible de mener notre tâche à bonne fin.

De 1962 à 1965, nous avons effectué entre la côte provençale (région de Nice) et la Corse (Pointe de la Revellata, près de Calvi) une série de sondages sismiques par réfraction en vue d'étudier les structures géologiques profondes du bassin séparant la France de la Corse, bassin désigné souvent sous le nom de Mer Ligure. La présente note a pour objet d'exposer les résultats obtenus et d'en donner les premiers éléments d'interprétation.

SITUATION DES PROFILS

Les emplacements de ces profils sont indiqués sur la carte ci-jointe (figure 1) où ceux-ci sont numérotés de 1 à 5.

Le profil 1, d'une longueur de 11 km environ et de direction N-S, se place immédiatement au Sud du Cap Ferrat. Il comporte deux points d'enregistrement, l'un à terre (Cap Ferrat), l'autre en mer (chalutier Léda), et 18 tirs dont 7 inverses.

Les profils 2, 3 et 4 se situent approximativement sur l'alignement Nice-Calvi. Le profil 2 (20 stations de tir) s'étend jusqu'à 66 km du Cap Ferrat où avait été maintenu un poste d'enregistrement. Sur la "Calypso", mouillée par 2250 m de fond à 30 km de la côte niçoise, se trouvait également un poste d'enregistrement. Cependant, en raison d'une panne importante de l'enregistreur de ce poste en mer, les neuf premiers tirs furent enregistrés uniquement au Cap Ferrat.

Le profil 3 a été enregistré à partir d'un poste à terre, installé en Corse, au phare de la Revellata. Les tirs, 9 au total, ont été effectués par un escorteur rapide de la Marine Nationale. Le but de l'opération était de rechercher la discontinuité de Mohorovičić ; à cet effet, cinq explosions (grenades sous-marines de 200 kg) eurent lieu à environ 83 km, 78 km, 69 km, 56 km et 45 km. Les autres tirs, moins importants, étaient destinés à vérifier les mesures du profil 4.

Le profil 4 a été enregistré à partir d'un poste à terre disposé également à la pointe de la Revellata et de la "Calypso" mouillée par 600 m de fond à environ 6 milles du Cap. Son but était de compléter les données du profil 3. A cet effet, il avait été prévu de réaliser des tirs jusqu'à 50 km à partir du littoral. Malheureusement, les conditions atmosphériques s'étant fortement dégradées au cours du travail, les opérations de largage des charges devinrent dangereuses et, de ce fait, seule put être effectuée une longueur de profil de 30 km, comprenant 22 explosions. D'ailleurs une très forte houle se maintint pendant plusieurs jours, empêchant ainsi la reprise du travail.

Enfin le profil 5, long de 27 km, a été réalisé au centre du Bassin Ligure, selon la même direction NO-SE, mais légèrement à l'Ouest des précédents. Il comporte 13 tirs dont 4 inverses. Les enregistrements eurent lieu en mer, à bord de la "Calypso" mouillée par 2500 m de fond, d'abord à l'une des extrémités de la radiale (43° 10'N - 07° 22'E), puis à l'autre (42° 54' 5N - 07° 42' 5E), "l'Espadon" jouant le rôle de bateau de bouée.

* Travaux du Laboratoire de Géophysique Appliquée à l'Océanographie Faculté des Sciences de MONTPELLIER.

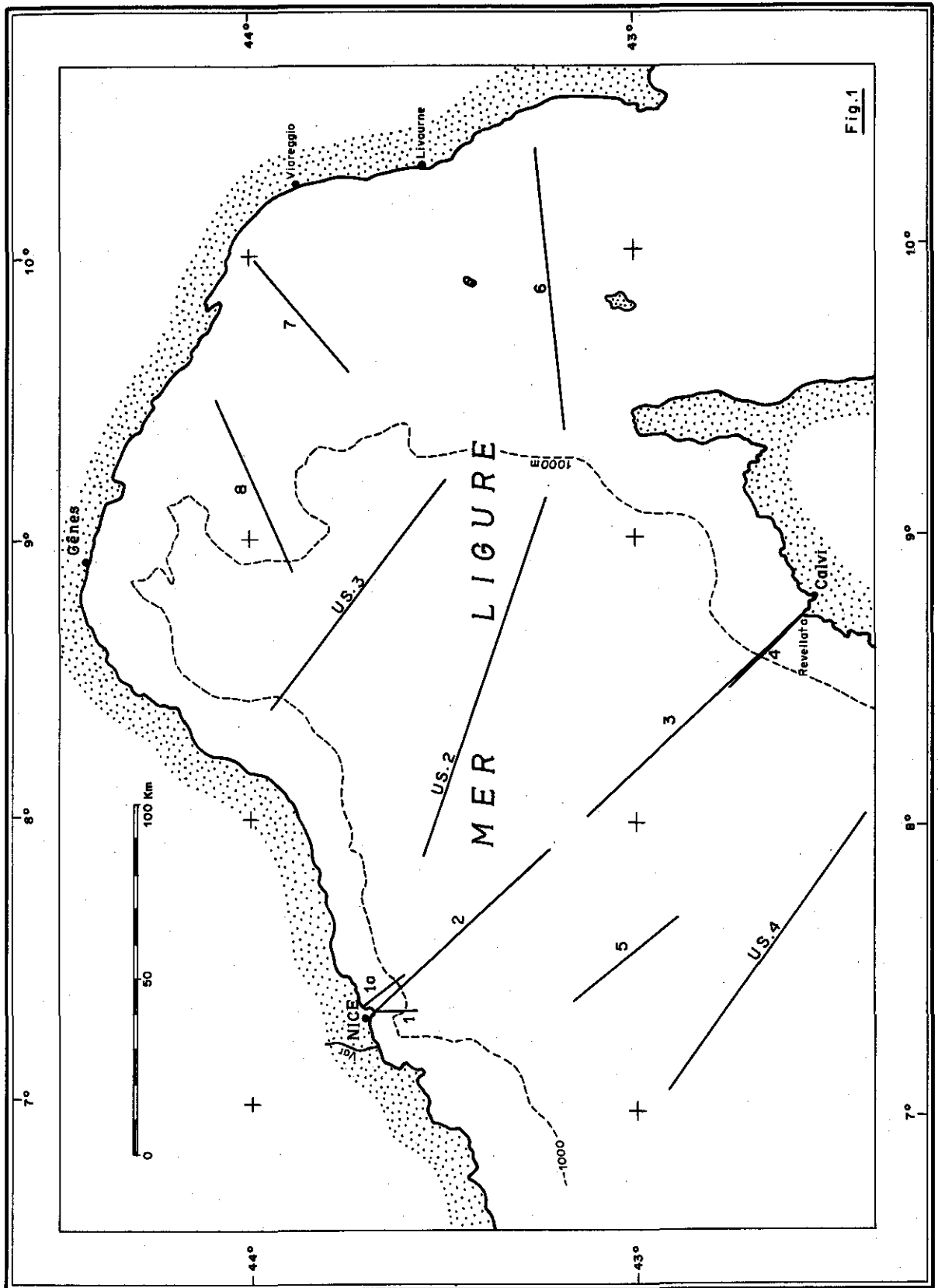


Figure 1 - Emplacements des différents profils (sondage-réfraction) effectués dans la Mer Ligurie : -1, 2, 3 ... = profils réalisés par le Laboratoire de Géophysique Appliquée à l'Océanographie de Montpellier. -US 2, US 3, US 4, = profils réalisés par l'Institut Océanographique de Woods-Hole (D. Falnquist).

APPAREILLAGE ET TECHNIQUE D'ETUDE

Ayant déjà eu l'occasion d'exposer les techniques d'études employées et de décrire l'appareillage utilisé, nous nous contenterons uniquement de rappeler quelques points essentiels.

Pour les enregistrements à terre, qui avaient toujours lieu en bordure même du rivage, deux ou trois géophones furent disposés sur des affleurements de roches en place et un groupe de deux hydrophones en série fut immergé à proximité de ces géophones. L'emploi de ces hydrophones avait essentiellement pour but de capter l'onde directe transmise par l'eau.

Pour les enregistrements en mer, les bateaux furent toujours mouillés. Deux groupes d'hydrophones, suspendus chacun sous des perches anti-houle du type de Froude, furent utilisés et, dans la presque totalité des cas (profils 1, 2 et 4), un géophone en boîtier étanche, monté ou non sur un système à la cardan, a été placé sur le fond.

A terre comme en mer, la vitesse de déroulement du papier d'enregistrement était de 6,5 cm/s, ce qui permit une appréciation de lecture de l'ordre de 1/100 de seconde pour les temps d'arrivée des ondes directes et réfractées.

Le rôle du bateau boute-feu revint principalement à l'Espadon et à un escorteur de la Marine Nationale. Sur les profils, la localisation de chacune des stations de tir fut déterminée soit par radar, soit grâce au réseau RANA.

RESULTATS GEOPHYSIQUES

Profil 1, (figure 2)

Les résultats obtenus à partir des enregistrements à terre (Cap-Ferrat) et des enregistrements en mer (chalutier "Léda" mouillé à 800 m du Cap-Ferrat) des 11 tirs directs du profil 1 permettent de mettre en évidence deux formations dont les vitesses apparentes sont respectivement :

- 2,300 m/s (en mer)
- 3,750 m/s (en mer) et
- 3,800 m/s (à terre)

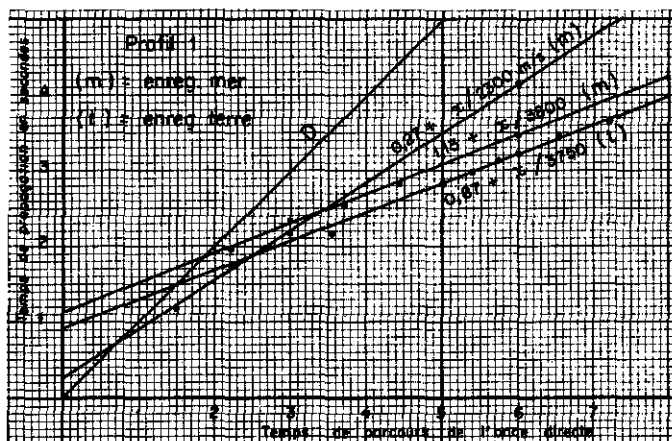


Figure 2 - Courbes temps-distance des tirs directs du profil 1. Afin de dissocier les courbes des enregistrements en mer et à terre, nous avons dû adopter pour ces deux points la même origine, bien qu'en fait ceux-ci étaient séparés par une distance de 825 m.

Les sédiments du fond, de vitesse présumée $V = 1,750$ m/s, n'ont pas été détectés, ni à terre, ni en mer. Les enregistrements des 7 tirs inverses effectués à partir du chalutier "Léda" n'ont permis d'obtenir des réfractés que sur le niveau le plus profond pour lequel une vitesse apparente de 3,800 m/s a été trouvée. Il nous faut toutefois noter que le profil des tirs inverses ne revouvre pas exactement celui des tirs directs. Il se situe, en effet, très légèrement à l'Ouest du précédent, ce qui eut pour conséquence d'augmenter l'épaisseur de la couche d'eau et de diminuer ainsi faiblement la pente moyenne du fond. Il en résulte que la valeur de 3,700 m/s adoptée

comme vitesse réelle pour la formation consolidée la plus profonde doit être considérée comme approchée.

Par ailleurs, au point d'enregistrement en mer situé à 800 m du Cap Ferrat, le toit de cette formation ($V = 3.700$ m/s) est à une profondeur d'environ 1.500 m, à compter de la surface. La profondeur d'eau étant de 300 m et les sédiments non-consolidés ayant une épaisseur d'une centaine de mètres, on peut estimer que la puissance de l'assise semi-consolidée ($V = 2.300$ m/s) est de l'ordre de 1.100 m.

Cependant, en considérant les courbes temps-distance obtenues à partir des enregistrements des tirs directs à terre et en mer, on s'aperçoit que les temps d'interception sont difficilement compatibles si l'on n'admet pas, entre le Cap Ferrat et la station d'enregistrement en mer, la présence d'un accident. Or, à la suite des données fournies par l'étude sismique de la basse vallée du Var, réalisée récemment par le B. R. G. M., une vitesse réelle de 4.200 à 4.900 m/s a été trouvée pour les calcaires jurassiques de la région. D'autre part, un sondage-réfraction (figure 1 profil 1b) que nous avons effectué dans la Baie de Beaulieu a permis de mettre en évidence une vitesse réelle de 4.600 m/s pour le bed-rock d'âge très probablement jurassique. Les séries calcaires du Cap Ferrat doivent, par conséquent, présenter des vitesses nettement supérieures à 4.000 m/s. De ce fait, les formations à 3.700 m/s peuvent être rapportées aux complexes marneux qui surmontent ces calcaires et pour lesquels il a justement été signalé, toujours dans la basse vallée du Var, des vitesses pouvant atteindre 3.700 m/s. Dans de telles conditions, à la station d'enregistrement en mer, située, rappelons-le, à 800 mètres au Sud du Cap-Ferrat, le niveau calcaire jurassique, qui n'a pu être atteint, se situerait à une profondeur supérieure à 1.500 mètres, que seule la présence d'une faille avec un rejet très important peut permettre d'expliquer. Lors d'une très prochaine mission, nous effectuerons dans cette zone de nouvelles études afin d'essayer de préciser l'ampleur de ce rejet.

Profil 2 et 5 (figure 3 et 4)

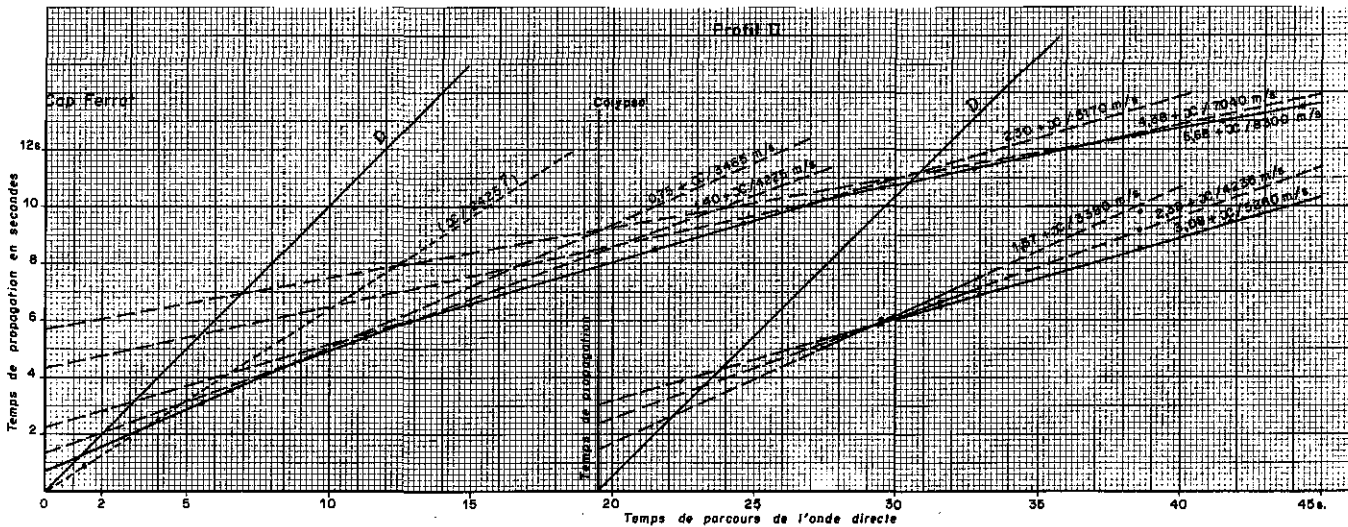


Figure 3 - Courbes temps-distance des enregistrements effectués à terre (Cap Ferrat) et en mer (Calypso) par 2.250 m de profondeur d'eau avec un géophone placé sur le fond.

Le profil 2 qui comporte, ainsi qu'il a été dit, un poste d'enregistrement à terre (Cap Ferrat) et un poste en mer (Calypso), permet de mettre en évidence 5 groupes de vitesses apparentes qui sont respectivement les suivantes :

- $G_1 = 3.465$ m/s (enregistrement à terre), 3.380 m/s (enregistrement en mer).
- $G_2 = 4.225$ m/s (terre), 4.235 m/s (mer).
- $G_3 = 5.170$ m/s (terre), 5.260 m/s (mer).
- $G_4 = 7.040$ m/s (terre)
- et $G_5 = 8.300$ m/s (terre)

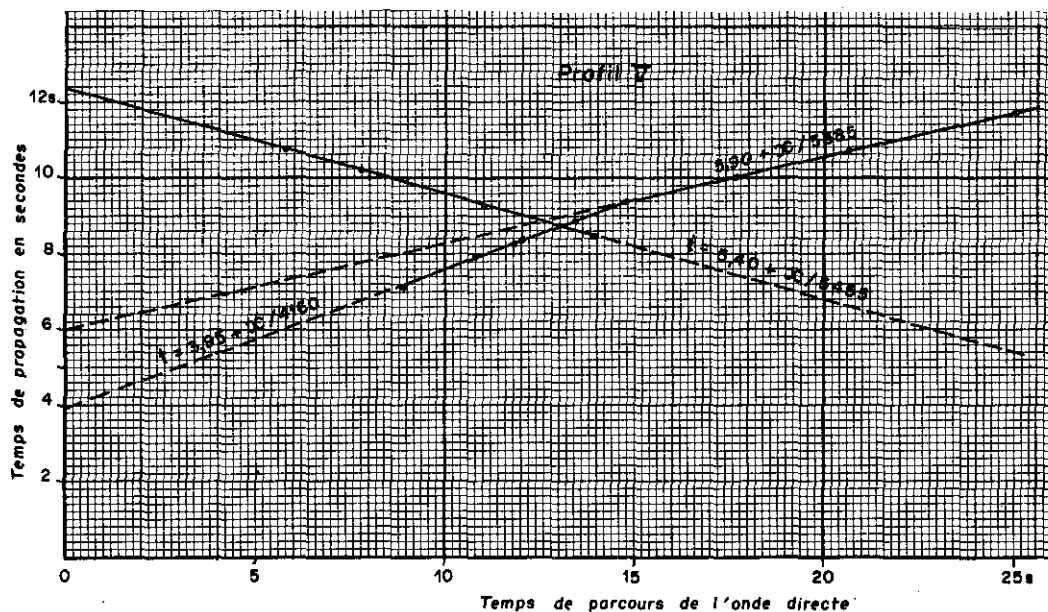


Figure 4 - Courbes temps-distance des tirs directs et inverses du profil 5.

A ces vitesses il faut encore ajouter celles des sédiments récents (1.750 m/s environ) qui constituent le fond et que nous n'avons pas détectés, ainsi qu'une vitesse de l'ordre de 2.300 à 2.400 m/s trouvée sur le profil 1 et présumée sur le profil 2 (terre).

Les vitesses des groupes 1 et 2 peuvent être considérées comme appartenant à des formations sédimentaires consolidées, que nous désignerons sous le terme général de "matériel supérieur" de la croûte. Les formations correspondant aux vitesses du groupe 3 seront identifiées sous le nom de "matériel intermédiaire" et celles correspondant aux vitesses du groupe 4 sous celui de "matériel inférieur". Quant aux vitesses du groupe 5 elles sont redevables aux matériaux du toit du manteau.

Le profil 5, bien que d'une longueur réduite, présente l'avantage de posséder des tirs inverses, permettant de préciser une vitesse réelle de 5.900 m/s pour le matériel intermédiaire. Il faut toutefois regretter l'absence de vitesses inverses pour le matériel supérieur, absence due au fait que le profil des tirs inverses ne comporte qu'un nombre réduit d'explosions.

Ces deux profils sont encadrés, au N-E et au S-O, par deux profils-réfraction intéressant uniquement la partie centrale du bassin et réalisés par l'Institut Océanographique de Woods-Hole sous la direction de D. Falquist (profils : US 2 et US 4, figure 1). Leurs résultats, comparables à ceux que nous avons obtenus, précisent les vitesses réelles de certaines formations et ont été largement utilisés pour les interprétations proposées ci-après.

A la suite des données que nous venons d'énumérer, on peut tenter de déterminer, au niveau du Cap Ferrat, la profondeur des différentes formations. Les calculs ont été menés en admettant que les couches sont parallèles et que la faille signalée au Sud du Cap Ferrat intéresse le matériel supérieur ainsi que le matériel intermédiaire. Son rejet n'ayant pu être précisé (cf. p. 6), nous lui avons attribué une valeur de 1.500 m, égale à celle qu'il a été possible de calculer pour son prolongement dans la baie de Beaulieu. Pour l'ensemble du matériel supérieur, le calcul nous a donné une vitesse moyenne de 3.800 m/s.

A partir de ces hypothèses, les profondeurs du matériel intermédiaire, du matériel inférieur et de la discontinuité de Mohorovičić sont respectivement égales à 2.100 m, 11.000 et 17.500 m. Notons que ces deux dernières valeurs représentent les profondeurs des toits de la formation "basaltique" (couche 3 de Hill) et du manteau aux demi-distances limites, c'est-à-dire à environ 20 et 25 km du point d'enregistrement à terre. Il en résulte donc que, sous le Cap Ferrat, leurs profondeurs respectives peuvent être sensiblement plus importantes (figure 5).

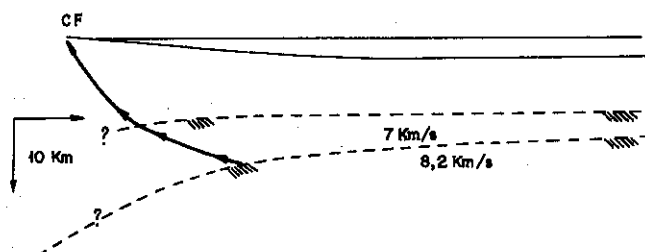


Figure 5 - Schéma montrant la profondeur des toits de la couche "basaltique" et de la discontinuité de Mohorovičić au centre du Bassin Ligure et au début de la marge continentale de la région niçoise.

Au point d'enregistrement en mer (profondeur 2.250 m), situé à 30 km du Cap Ferrat, le toit du matériel intermédiaire est à environ 6.300 m de la surface de la mer, le matériel supérieur ayant ainsi une épaisseur voisine de 4.000 m. Il faut noter que le profil (US 2) réalisé par D. Falhquist, au N-E et à environ 14 milles du nôtre, a montré, dans sa moitié nord, que le matériel intermédiaire, de vitesse réelle 5.640 m/s, se trouvait à une profondeur de 6.700 m et que le matériel supérieur avait une épaisseur de 4.300 m environ pour une profondeur d'eau de 2.380 m.

Profil 3 et 4 (figure 6)

Ces profils concernent la moitié Sud-Est du bassin Ligure. Ainsi que nous l'avons signalé, le profil 3 comporte un nombre réduit de tirs. Il présente cependant l'avantage de bien définir la vitesse du matériel du manteau (8.200 m/s) par quatre enregistrements particulièrement satisfaisants. Les autres tirs sont trop espacés pour que l'on puisse tenir compte pour l'instant de leurs résultats, à l'exception toutefois des trois derniers qui se situent dans la région intéressée par le profil 4. Une nouvelle mission est prévue afin de compléter l'étude du profil 3.

Les tirs de profil 4 ont été enregistrés à partir d'un poste à terre installé à la pointe de la Revellata, et d'un autre en mer, (Calypso) à environ 6 milles du Cap. Ce profil, long d'environ 27 km, comporte 22 tirs qui débutèrent à un mille du rivage. Jusqu'à la Calypso une explosion eut lieu tous les 500 mètres, nous permettant ainsi sur cette première partie du profil d'obtenir des enregistrements inverses.

Entre la pointe de la Revellata et la Calypso, une seule formation fut mise en évidence avec des vitesses apparentes de 5.170 m/s et 5.670 m/s, soit une vitesse réelle de 5.420 m/s. Notons que les sédiments non-consolidés qui tapissent le fond de la mer n'ont pu être détectés en première arrivée, en raison de leur faible épaisseur.

Dans la seconde partie du profil, les tirs ayant repris à 1.500 m de la Calypso, on remarque les faits suivants :

- sur les enregistrements du poste à terre la formation mentionnée ci-dessus se continue avec une vitesse apparente de 5.170 m/s, mais avec un brusque accroissement (t_2) des temps de propagation qui décale l'hodochrone de 0,65 s ; le même phénomène se reproduit, avec cependant un peu moins d'ampleur, à partir du tir 19, la vitesse apparente prenant alors la valeur sensiblement plus faible de 4.310 m/s ;

- sur les enregistrements du poste en mer, est révélée la présence de deux niveaux réfracteurs dont les vitesses apparentes respectives sont de 2.830 m/s et 3.915 m/s.

Entre les tirs 1 - 14 situés avant la Calypso et les tirs 15 - 17 situés après la Calypso, la pente moyenne du fond est similaire, avec, cependant, un approfondissement brutal de 450 m entre les tirs 14 et 15 (figure 17). La correction sur les hodochrones de cette dénivellation de 450 m réduit " t_2 " de 0,29 seconde seulement. La différence de 0,36 s qui subsiste peut donc être attribuée à la présence d'une faille, dont le compartiment abaissé se situerait vers le large et à 1.250 m à partir du fond. De plus, étant donné qu'au point d'enregistrement Calypso, le profil inverse nous montre que la formation de vitesse 5.420 m/s n'est recouverte que par quelques mètres de sédiments (le temps d'interception correspondant à la tranche d'eau), on voit que la dénivellation topographique très marquée qui intéresse cette région est sans aucun doute redevable à la présence de la faille précitée. Dans de telles conditions, le rejet de cette faille peut être estimé à 1.700 mètres.

Entre les tirs 19 et 22, où une formation de vitesse apparente égale à 4.310 m/s a été trouvée (enregistrement à terre), la pente moyenne du fond a sensiblement augmenté, passant de 1° 21'

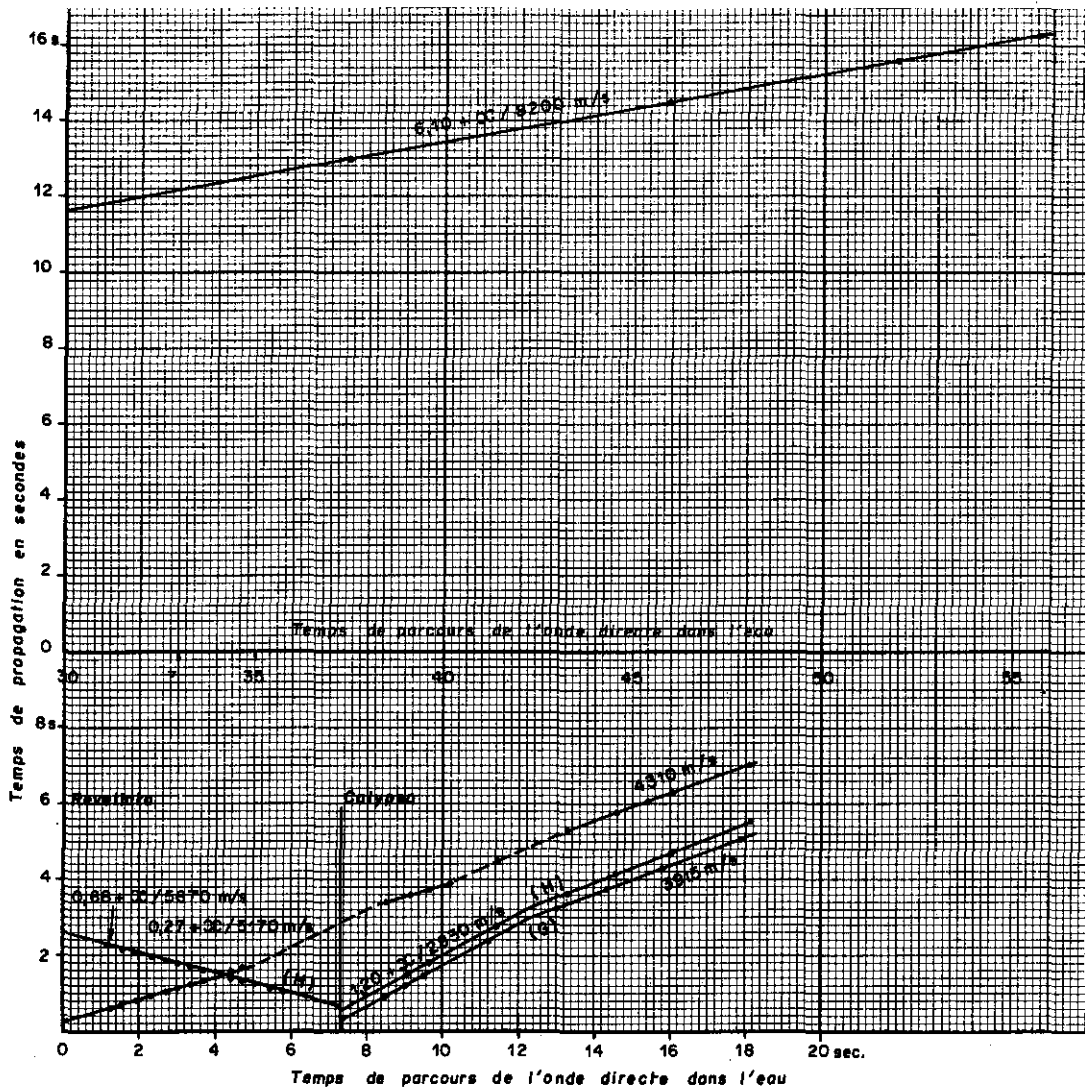


Figure 6 - Courbes temps-distance des profils 3 et 4.

a/ Profil 3 : courbe supérieure = enregistrements à terre, à la pointe de la Revellata (Corse), des quatre tirs les plus éloignés du poste d'enregistrement.

b/ Profil 4 : Enregistrements en mer : H = courbes obtenues à partir des hydrophones ; G = courbe obtenue à partir du géophone placé sur le fond et à 400 m environ des hydrophones.

à 3° 54' (cf. figure 7 - L.R.T.). On peut donc penser que le matériel de la formation de vitesse apparente 4.310 m/s est identique à celui mis en évidence par les tirs précédents ($V = 5.170$ m/s), la diminution de vitesse étant uniquement redevable à une augmentation de son inclinaison qui se serait accrue dans les mêmes proportions que celle du fond. Si l'on corrige cette pente de 2° 33', la vitesse apparente du niveau consolidé devrait retrouver sa valeur initiale, à savoir 5.170 m/s. C'est ce que nous avons fait et les calculs nous ont donné une vitesse de 4.900 m/s, c'est-à-dire légèrement plus faible que la vitesse trouvée sur la portion de profil jalonnée par les tirs 1 à 17. Nous nous abstenons donc pour l'instant de porter un jugement sur la nature de ce matériel, de nouvelles études devant être faites dans cette région.

Il nous faut encore noter entre les tirs 15 - 17 et 19 - 22 (cf. graphique temps-distance) un brusque accroissement des temps de propagation de 0,53 s. Cet accroissement est en partie redevable à la rapide dénivellation topographique de 650 m (voir figure 7) que l'on observe entre ces deux groupes de tirs, mais il n'en demeure pas moins que, quelque soit le mode de réduction adopté

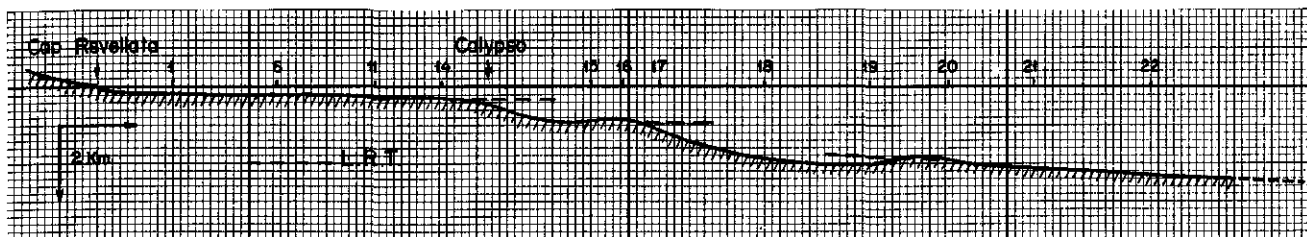


Figure 7 - Coupe topographique le long du profil 4. L.R.T. = Ligne de référence topographique.

en vue de corriger cette dénivellation, il subsiste une anomalie de plus de 1/10 de sec. Deux hypothèses sont alors possibles :

a/ Soit la formation de vitesse apparente 4.310 m/s est homologable à celle trouvée entre les tirs 1 - 17 avec une vitesse apparente de 5.170 m/s et une vitesse réelle de 5.420 m/s, une augmentation de son inclinaison étant seule responsable de la diminution de sa vitesse apparente. Dans de telles conditions, il nous faut admettre la présence d'une nouvelle faille entre les stations de tir 17 et 19, faille dont le rejet serait de l'ordre de 1.000 m, compte tenu de la dénivellation topographique de 650 m que l'on peut alors considérer comme redevable, au moins en majeure partie, à la présence de cet accident.

b/ Soit les formations de vitesse apparente 4.310 m/s et 5.170 m/s sont de nature différente. Dans de telles conditions, il nous faut admettre un arrêt brutal du matériel de vitesse apparente 5.170 m/s (vitesse réelle 5.420 m/s) entre les tirs 17 et 19, hypothèse à première vue peu vraisemblable, ou encore un approfondissement très important de ce matériel, approfondissement que seule la présence d'une faille peut expliquer. Si tel était le cas, le rejet de cette faille serait nettement supérieur à celui proposé ci-dessus. Cet important enfoncement du niveau de vitesse 5.420 m/s serait alors responsable du fait que, pour les tirs 19 à 22, nous n'ayons pas pu obtenir de réfraction sur ce niveau.

En conclusion, nous voyons que le profil 4 permet de mettre en évidence la présence, sur la pente continentale, d'une faille certaine, située à environ 6 milles du Cap Revellata et ayant un rejet de 1.700 m environ. A cette faille fait suite un second "accident" que l'on peut considérer pour l'instant comme également dû à une faille et dont le rejet serait au minimum d'un millier de mètres. Etant donné l'importance de ces phénomènes, de nouvelles études seront entreprises dans cette région dès le printemps 1966.

DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

A - Centre du bassin Ligure

Les diverses études séismiques effectuées dans le centre du bassin Ligure, entre la Provence et la Corse, et, en particulier, celle de D. Falquist, ont permis de montrer que la structure de la croûte était caractérisée par un amincissement de son matériel, la profondeur de la discontinuité de Mohorovičić se situant entre 13 et 14 km. Pour ce matériel, les vitesses de 8.000 m/s et de 8.300, 8.200 m/s ont respectivement été obtenues, la premières par D. Falquist, les secondes par nous-mêmes. Ces vitesses ne sont d'ailleurs qu'apparentes, à l'exception de celle observée par notre collègue américain sur son profil 4 (cf. US 4 - figure 1) où, comme il le souligne lui-même, la détermination de la vitesse apparente inverse (profil 4 - 7) reste cependant encore mal définie (Falquist, 1963 p. 75). Notons que le fait de rencontrer, dans une même région, des vitesses sensiblement différentes pour le matériel supérieur du manteau n'a rien de surprenant. Bien des exemples pourraient être cités. Ainsi D. Falquist précise que des vitesses de 7.800 m/s associées à des vitesses de 8.100 à 8.200 m/s ont été trouvées par Ewing et ses collaborateurs (1960) dans le bassin Colombien. De plus, on doit se rappeler que, si les tirs ont été effectués, dans tous les cas, dans la zone centrale du bassin, en revanche les enregistrements eurent lieu dans la zone centrale pour l'Institut de Woods-Hole et à partir du littoral provençal ou corse dans le cas de notre Laboratoire.

Le matériel inférieur de la croûte, ou couche III de Hill, appelée souvent "basaltique", a été trouvé par D. Falquist à une profondeur d'environ 10 km sur son profil 2 (cf. US 2 - figure 1) avec des vitesses de 6.800 à 7.100 m/s. Notons que pour des tirs effectués également dans la zone

profonde, mais marginale, du bassin et enregistrés sur le littoral provençal, nous avons déterminé une vitesse apparente de 7.050 m/s pour cette même formation.

Le matériel intermédiaire a été mis en évidence dans quatre profils avec des vitesses de 5.700 m/s (D. Falhquist US 2), 5.800 à 6.000 m/s (D. Falhquist US 4), 5.260 m/s (vitesse apparente Calypso p. 2) et 5.900 m/s (Calypso p. 4). Sa profondeur est de l'ordre de 6.500 à 7.000 m. Les résultats peuvent donc être considérés dans l'ensemble comme concordants. Enfin le matériel supérieur consolidé présente des vitesses de 3.400, 4.100, 4.200 m/s, les formations à 4.100 - 4.200 m/s constituant la plus grosse partie de cet ensemble.

S'il ne se pose guère de problème pour l'identification du matériel de vitesse égale ou supérieure à 8.000 m/s (roches supérieures du manteau) ou encore du matériel de vitesse 6.800 à 7.100 m/s (dit "basaltique", ou mieux "couche III"), il n'en est pas de même pour le matériel des formations intermédiaires (5.800 à 6.000 m/s) et supérieures (3.400 à 4.200 m/s). La vitesse sismique des premières fait sans aucun doute penser à du matériel granitique, mais à la suite de Raitt et de bien d'autres auteurs (cf. figure 8), on peut remarquer que cette gamme de vitesses se rapporte à une grande variété de roches, allant des roches sédimentaires aux roches métamorphiques, éruptives (cf. Hill 1957 et Raitt 1954) et plutoniques, fait qui incite à beaucoup de prudence dans l'attribution de ces vitesses à un type de roches.

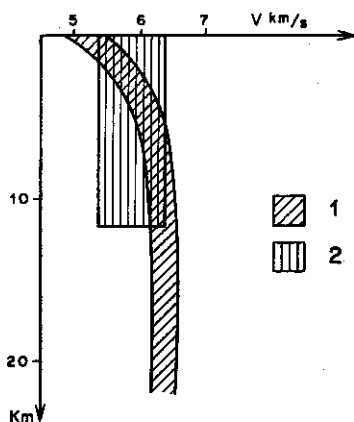


Figure 8 - Comparaison, à la suite des résultats obtenus par sondage sismique en Eurasie (d'après Birch), des vitesses (ondes longitudinales) en fonction des profondeurs, pour des roches de la famille des granites (1) et de la partie supérieure de la croûte (2).

Quant aux vitesses rencontrées dans les formations supérieures, on doit se contenter de dire qu'elles appartiennent à des roches consolidées probablement sédimentaires. Ici encore il est délicat de conclure, car une vitesse de 4.200 m/s peut aussi bien être redevable à des roches sédimentaires consolidées (grès, calcaires ...) qu'à des roches métamorphiques (schistes ...). Etant donné que les vitesses de l'ordre de 4.200 m/s ont été déterminées pour des matériaux relativement profonds, il semble préférable de les rapporter à des roches sédimentaires, tout en soulignant la fragilité de ce critère.

B - Marge continentales du bassin

Deux études intéressent la marge continentale du Bassin Ligurien :

La première se situe sur la marge provençale où nous avons à nouveau distingué des formations supérieures, intermédiaires et inférieures, leurs profondeurs ayant été mentionnées plus haut (cf. p. 8). Le complexe supérieur groupe des séries dont les vitesses s'échelonnent de 2.300 m/s à plus de 4.000 m/s, vitesses auxquelles il faut encore ajouter celle des sédiments meubles du fond.

Ainsi que nous l'avons déjà suggéré en nous rapportant aux travaux de Géologie marine menés par M. Gennesseaux dans la région de la Baie des Anges, ou encore aux études sismiques effectuées par le B.R.G.M. dans la basse Vallée du Var, les vitesses de 2.300 m/s (apparente) et 3.700 m/s (réelle) peuvent être rapportées à des ensembles marneux d'âge très probablement tertiaire. Quant aux séries de vitesse apparente 4.225 m/s, on peut raisonnablement penser qu'il s'agit de matériel calcaire d'âge secondaire semblable à celui que l'on rencontre tout autour du littoral niçois. En effet, les études sismiques de la basse Vallée du Var ont montré que les ho-

rizons calcaires d'âge jurassique présentaient des vitesses réelles allant de 4.200 à 4.900 m/s. De plus, un profil-réfraction, long d'environ 15 km mené à partir de la Baie de Beaulieu, en direction du Sud-Est, avec l'aide d'un bateau enregistreur, de trois bouées sismiques et d'un poste à terre, nous a permis de déterminer une vitesse réelle de 4.600 m/s pour le bed-rock, ce qui autorise à le rapporter aux formations calcaires qui encerclent la baie de Beaulieu, (cf. Marchand, Ceccaldi, 1966).

Lors du profil 2, la vitesse de 4.225 m/s, (enregistrements du poste à terre) est déterminée à partir des tirs s'échelonnant sur la pente continentale. On peut donc admettre que les formations calcaires secondaires s'étendent jusqu'au pied de cette pente, Mais nous pensons devoir insister sur le fait que rien n'autorise à homologuer ces séries aux séries consolidées, de vitesses apparentes semblables, trouvées dans la zone centrale du bassin (P 2 Calypso), leurs vitesses réelles étant, en effet, sensiblement différentes : 4.600 m/s dans la Baie de Beaulieu pour des séries superficielles et 4.100 à 4.200 m dans le centre du Bassin pour des séries à 4.000 m de profondeur (cf. D. Falquist).

En revanche, l'examen des hodochrones du profil 2 obtenus à partir des enregistrements à terre et en mer indiquent que, dans le cas du matériel intermédiaire de vitesses apparentes 5.170 m/s (terre) et 5.260 m/s (mer), il s'agit de la même formation qui s'étend du littoral provençal jusqu'au centre du Bassin. En effet, pour les deux hodochrones, les stations de tirs se situent dans la zone centrale et se recouvrent. Ainsi que nous l'avons fait remarquer précédemment (p. 13), il n'est pas possible de conclure, à partir des vitesses apparentes signalées ci-dessus ou des vitesses réelles des profils 5 et US 2, sur la nature du matériel qui leur correspond. Cependant, comme le note D. Falquist, certains faits pourraient inciter à penser qu'il s'agit de matériel granitique. En effet, sur un profil sismique réalisé depuis Briançon en direction du Sud vers Nice, J. P. Rothé (1958) a mesuré une vitesse de 6.070 m/s à une profondeur d'environ 2.000 m, vitesse que l'on ne peut attribuer qu'à des séries granitiques*. C'est précisément à une profondeur analogue que se situe le toit de notre formation intermédiaire (P 2 terre).

Rappelons enfin qu'une importante faille, d'un rejet minimum de 1.500 m, entaille la partie supérieure de la marge continentale provençale. La seconde étude, effectuée sur la marge continentale corse, a montré que celle-ci est essentiellement caractérisée par la présence d'une formation de vitesse réelle 5.420 m/s bien définie sur la première partie du profil 4 par 14 tirs et 23 enregistrements. Jusqu'à l'isobathe -500, ce matériel de vitesse 5.420 m/s n'est recouvert que par une mince couche de sédiments non-consolidés qui s'amincit depuis le tir 1 jusqu'au point d'enregistrement Calypso ; on peut donc raisonnablement penser qu'il est de nature granitique, comme les formations qui affleurent dans la région de Calvi et qui constituent notamment la pointe de la Revallata où était disposé notre poste d'enregistrement. A partir des fonds de 500 m, ce même matériel s'approfondit par le jeu d'une faille dont le rejet est de l'ordre de 1700 m. Il est alors recouvert par d'épaisses séries sédimentaires (cf. hodochrone figure 6). Un second accident, que nous qualifierons pour l'instant de "faille probable", intéresse encore cette zone, vers les fonds de 1.500 m.

A la suite de ces observations, il est logique d'admettre que le matériel intermédiaire (V = 5.700 à 6.000 m/s), trouvé dans le centre du Bassin entre 6.500 et 7.000 m de profondeur, se raccorde aux séries granitiques (V = 5.420 m/s) de la marge continentale corse, l'écart entre ces deux groupes de vitesses pouvant très bien s'expliquer par la différence de profondeur où se situent les observations.

Conclusion

Une première conclusion peut immédiatement être tirée de ces études. L'hypothèse d'un phénomène de flexure doit être abandonnée ; l'origine du talus continental, tant dans la région de Calvi que dans celle de Nice, réside plus vraisemblablement dans la présence des failles que nous avons mises en évidence. La morphologie flexurée, qui apparaît ici dans la topographie du fond, doit être seulement considérée comme une répercussion superficielle du jeu des effondrements.

Les données géophysiques obtenues dans cette région de la Méditerranée permettent, au premier abord, de mettre en évidence une configuration qui rappelle celle généralement admise pour

* Rappelons encore que le massif cristallin de l'Argentera-Mercantour se situe à environ 40 km au Nord de Nice et que les affleurements gneissiques de la montagne de Tanneron (Massif "Pyrénéo-provençal" des Maures - Esterel - Tanneron) se terminent à une vingtaine de kilomètres à l'Ouest de Nice (cf. Gèze B 1963 figure 1, p. 290).

les bassins océaniques. Cependant, ainsi que le note justement D. Falhquist, on remarquera que la couche d'eau est beaucoup plus faible et que l'épaisseur du matériel supérieur ($V = 3.000$ à 4.500 m/s) est nettement plus importante que dans les bassins océaniques. Par ailleurs, du point de vue structural, la nature de la couche de vitesse 5.700 à 6.000 m/s peut également être un facteur de différenciation entre la structure de la mer Ligure et celle d'un domaine purement océanique où le matériel de la couche (couche 2 de Hill) est considéré par la plupart des auteurs comme étant formé de sédiments consolidés, combinés ou non avec des roches volcaniques. C'est ainsi que T.F. Gaskell écrit au sujet de cette formation (p. 149) : "The material that covers the $6,7$ km/s layer appears to consist of soft sediments and of a hard rock (compressional wave velocity $4,3 - 5,8$ km/s)". It is possible that the hard rock ("layer 2") is volcanic in some parts of the oceans, and cemented sediment in others".

Dans la discussion des résultats, nous avons vu qu'il était difficile de se prononcer sur la nature du matériel intermédiaire détecté du côté provençal. Il n'en est pas de même du côté corse où il nous a été possible d'admettre que ce matériel intermédiaire était de même nature que les affleurements granitiques de la région de Calvi (cf. p. 16).

D. Falhquist fait remarquer que si le matériel intermédiaire appartient à des formations granitiques, il est alors nécessaire d'admettre, vu les données structurales que l'on possède dans les régions continentales qui entourent ce bassin, la présence d'importants décrochements dont les rejets devraient atteindre 2.000 à 3.000 m. C'est précisément des rejets de cet ordre, ou légèrement inférieurs, que nous avons mis en évidence sur le précontinent corse et provençal. On peut ajouter que ces failles ne sont probablement pas les seules à affecter ce niveau. Ainsi dans son profil 2 (cf. US 2, figure 1) et très approximativement vers le milieu de celui-ci, D. Falhquist a noté un déplacement vertical d'environ 3.000 m du toit de la formation de vitesse $5.670 - 5.990$ m/s, le bloc situé au N-O étant abaissé par rapport au bloc S-E. De plus, les enregistrements par réflexion effectués à l'aide du "Seismic Profiler" par les géophysiciens de Woods-Hole montrent clairement que cette région a été tectoniquement perturbée.

En conséquence, si le matériel intermédiaire au centre du bassin Ligure est effectivement identique à celui de la pente continentale corse, c'est-à-dire granitique (et c'est ce que nous nous emploierons à vérifier lors d'une prochaine mission), la structure de la mer Ligure pourrait alors être assimilable à une structure continentale dont elle se différencierait toutefois par un amincissement important de la croûte et donc par une profondeur beaucoup plus faible de la discontinuité de Mohorovičić. Enfin ce bassin est fortement perturbé du point de vue tectonique par d'importantes failles qui intéressent ses bordures nord (zone provençale) et sud (zone corse) sa partie médiane. L'ampleur des rejets trouvés pour chacune d'elles permet, de plus, de penser qu'il ne s'agit pas d'accidents localisés.

Si l'on considère à présent la bordure est du bassin, on s'aperçoit, à la suite des profils effectués par D. Falhquist au pied et en bordure de la marge continentale (US 3 figure 1) et de ceux que nous avons réalisés sur la plateforme italienne (MURAUOUR P. et GROUBERT E. - 1963), qu'il est délicat d'établir des corrélations entre les niveaux détectés, étant donné les caractères très différents des régions intéressées ainsi que les distances séparant ces profils (20 km entre US 2 et P 6, 45 km entre US 3 et P 7 et 25 km entre US 3 et P 8). Il nous faut cependant noter, sur les profils US 3, P 6 et P 7, la présence de formations dont les vitesses réelles sont respectivement de 5.400 m/s (US 3), 5.660 m/s (P 6) et 5.200 m/s (P 7). D'une part, dans les trois cas, les toits de ces niveaux sont peu profonds (entre 1.000 et 3.000 m) et par ailleurs, il s'agit très probablement de séries épaisses (plus de 10 km) puisqu'il n'a pas été possible à D. Falhquist et à nous-mêmes de les traverser malgré des tirs échelonnés jusqu'à 40 et même 50 km. Il est donc possible qu'il s'agisse, pour ces trois profils, du même niveau que nous avons rapporté, dans le profil P 6, à des matériaux métamorphiques, semblables à ceux que l'on trouve dans le Cap Corse, étant donné que le toit de cette formation remonte en direction du prolongement sous-marin de ce Cap.

Nous terminerons cette étude en faisant remarquer que des structures homologables à celles du bassin Ligure ont été trouvées par les géophysiciens soviétiques (P. Kosminskaya et V. Riznichenko - 1964) dans les régions profondes (1.000 à 2.000 m) de la Mer Noire et de la Mer Caspienne. Dans ces mers, on constate un amincissement de l'épaisseur de la croûte, tout au moins dans le cas de la Mer Noire, et la disparition de la couche intermédiaire, les formations supérieures dont

** En fait, des célérités pouvant atteindre jusqu'à 6.000 m/s ont été trouvées pour cette couche dans les domaines océaniques, comme, par exemple, dans l'Océan Pacifique, au S-E des îles Hawaï (cf. Raitt, 1963).

la vitesse n'excède pas 3.500 m/s reposant directement sur le matériel de vitesse 6.400 à 6.800 m/s (cf. figure 9). Il s'agirait, dans les deux cas, d'exemples frappants de structures particulières de la croûte terrestre dans des régions d'intenses effondrements (P.K. et V.R. p. 107). Soulignons enfin que D. Falquist, à la suite d'un profil séismique (D.F. 1963, profil 5, p. 79) réalisé à l'Ouest de notre zone d'étude, a noté un amincissement de la croûte encore plus marqué que dans le centre du Bassin Ligure. Dans cette région, l'épaisseur de la croûte n'est plus que de 10 km environ, tandis que le matériel intermédiaire semble avoir disparu, des formations de vitesse 4.700 m/s recouvrant directement le niveau des vitesses 6.600 m/s.

Ces différentes observations montrent la structure continentale de la croûte terrestre sous un nouvel aspect. On savait déjà que, par rapport au schéma typique des zones de plateforme (comme la plateforme russe, par exemple), la croûte s'épaissit considérablement dans les zones plissées. Les recherches de ces dernières années indiquent à présent que, dans les zones d'effondrement, on observe un amincissement du matériel crustal, allant parfois jusqu'à la disparition du niveau intermédiaire ($V = 6.000$ m/s environ). L'aspect général de telles zones se rapproche alors de celui des structures océaniques.

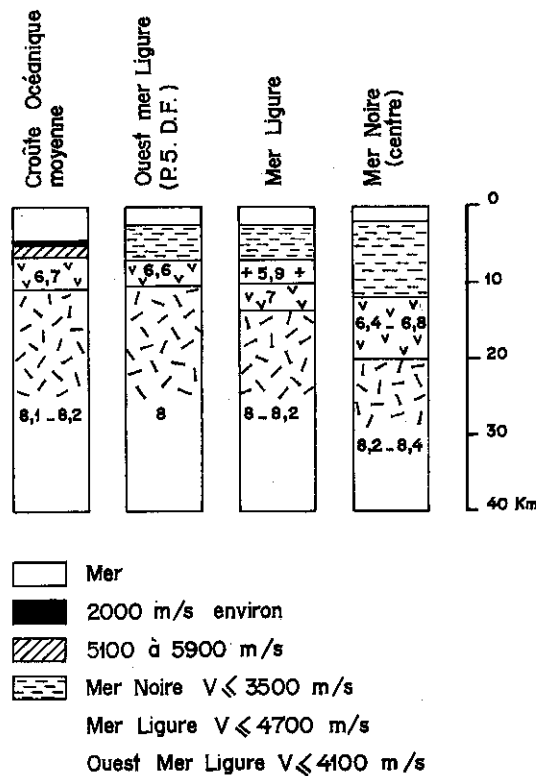


Figure 9 - Schémas montrant la structure de la croûte dans la Mer Noire, dans la Mer Ligure et dans un bassin océanique typique.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBOUIN J., MENNESSIER G., 1963 - Essai sur la structure de la Provence. Livre à la mémoire du Professeur P. FALLLOT, p. 45 - 98, 1 carte, 4 figure.
- BOURCART J., 1959 - Morphologie du précontinent des Pyrénées à la Sardaigne. Topographie et Géologie des profondeurs océaniques. Coll. C.N.R.S., 1958, p. 33 - 52, 10 figure.

- EWING J.I., 1963 - The Mantle Rocks - The Sea. Ideas and observations on progress in the study of the seas. Interscience publishers, N-Y., p. 103-109.
- FALHQUIST D.A., 1963 - Seismic refraction measurements in the Western Mediterranean Sea - Massachusetts, Institut of Technology.
- GENNESSEAU M., 1962 - Travaux du Laboratoire de Géologie sous-marine concernant les grands carottages effectuées sur le Précontinent de la région niçoise. Océanographie, Géologie et Géophysique de la Méditerranée Occidentale. - Coll. C.N.R.S. 1961, p. 177 - 181, 2 figure.
- GEZE B. 1963 - Caractères structuraux de l'arc de Nice (Alpes-Maritimes). Livre à la mémoire du Professeur P. FALLOT, p. 289 - 300, 1 carte, 5 figure.
- KOSMINSKAYA I. P., RIZNICHENKO Y. V., 1964 - Seismic studies of the Earth's crust in Eurasia. Research in Geophysics. M.I.T. Press, Cambridge, Massachussetts, Vol. 2, p. 81 - 122.
- MARCHAND J.P., CECCALDI X., 1966 - Etude par sondages séismiques des prolongements vers l'Est et l'Ouest des structures de la Baie des Anges. *Bull. Station Marine d'Endoume*.
- MURAOUR P., GROUBERT E., 1963 - Etude séismique par réfraction sur le Précontinent italien entre la Spezia et l'île Capraia. *Bull. Inst. Océan. Monaco*. Vol. 61, n° 1276.
- MURAOUR P., CECCALDI X., DUCROT J., MARCHAND J.P., 1965 - Etude séismique sur la pente continentale provençale (région Golfe Juan, Baie des Anges, Baie de Beaulieu). *C.R. Som. Soc. Géol. Fr.* fasc. 7, p. 228.
- MURAOUR P., MARCHAND J.P., DUCROT J., CECCALDI X., 1966 - Remarques sur la structure profonde du précontinent de la région de Calvi (Corse) à la suite d'une étude de séismique réfraction *C.R. Acad. Sc. Paris*.
- MURAOUR P., CECCALDI X., DUCROT J., MARCHAND J.P., 1966 - Sur la structure profonde entre la Provence et la Corse *C.R. Som. Soc. Géol. Fr.*, fasc. 9, p. 314 - 315.

PROFIL - I

temps en secondes - *tirs inverses

Enregistrements en mer

Enregistrements à terre

TIR	OD	OR	OD	OR
1	0,75	néant	non enregistré	
2	1,49	1,17		
3	2,22	1,74 - 1,98		
4	3,00	2,20 - 2,34	3,55	2,21
5	3,69	2,57	4,24	2,54
6	4,46	2,86 - 3,46	5,00	2,86
7	5,20	non enregistré	5,74	3,14
8	5,99	3,51	6,54	3,50
9*	0,674	néant	7,21	3,69
10*	1,53	"	6,52	3,46
11*	2,11	"	5,99	3,27
12*	3,06	"	5,38	3,05
13*	3,70	3,26	non enregistré	
14*	4,36	3,58	4,25	2,59
15*	5,06	3,84	3,75	2,43

OD = onde directe

OR = onde réfractée

N.B. - Tous les enregistrements ont été réalisés avec des géophones à l'exception des tirs inverses où nous avons utilisé des hydrophones.

PROFIL - II

temps en secondes

Enregistrements à terre
(Cap Ferrat)

Enregistrements en mer
(Calypso)

TIR	OD	OR	OD	OR		
1	1,41	0,89				
2	3,80	2,35				
3	5,56	3,16				
4	6,65	3,57				
5	9,00	4,61				
6	10,89	5,27				
7	11,36	5,40				
8	12,92	5,99				
9	15,01	6,61	4,60	3,53		
10	21,48	8,51	1,93	néant		
11	24,62	9,47				
12	27,45	10,24	7,90	5,10	5,35	
13	29,50	10,66	10,00	5,92	6,07	
14			12,06	6,54	6,67	6,90
15	32,80	11,39	13,44	6,90	7,17	7,54
16	36,16	12,07				
17a	38,33	12,56				
17b	38,36	12,53	19,09	8,57	9,23	9,86
18	38,65	12,55				
19	41,49	13,02	22,27	8,52		
20	44,31	13,55				

PROFIL - III

Enregistrements à terre - temps en secondes
(Corse)

TIR		OR
1	55,66	16,27
2	51,92	15,65
3	45,87	14,47
4	37,52	13,00
5	30,29	11,10
6	22,20	8,84
7	15,40	6,07
8	10,20 (?)	3,90
9	4,50 (?)	1,60

T. B. absent.

OD calculée à partir de la vitesse du bateau
boute-feu.

PROFIL - IV

Enregistrements à terre - temps en secondes

TIR		
1	1,29	0,62
2	1,62	0,73
3	1,98	0,81
4	2,34	0,94
5	2,69	1,03
6	3,06	1,14
7	3,41	1,25
8	3,77	1,35
9	non enregistré	
10	4,43	1,54
11	4,76	1,63
12	non enregistré	
13	non enregistré	
14	non enregistré	
15	8,52	3,40
16	9,09	3,56
17	9,70	3,74
18	11,49	4,52
19	13,27	5,29
20	14,63	5,77
21	16,05	6,27
22	18,13	6,97

PROFIL - V

temps en secondes - *tirs inverses

Enregistrements en mer

TIR	OD	OR
1	8,90	7,13
2	10,84	7,94
3	11,82	8,24
4	12,04	8,39
5	13,46	8,90
6	14,73	9,34
7	17,69	9,97
8	20,63	10,69
9	25,04	11,71
10*	11,67	8,49
11*	14,53	9,27
12*	17,82	10,23
13*	20,25	10,67