

Forage scientifique de Sancerre-Couy : sismique de puits et réinterprétation de la sismique de surface

Pierre BALTENBERGER ⁽¹⁾, Béatrice de VOOGD ⁽²⁾, Raymond MILLON ⁽³⁾,
Alain PAUL ⁽⁴⁾, Tom O'ROURKE ⁽⁴⁾, Christian WEBER ⁽⁵⁾

Mots-clés : Levé sismique, Socle, Interprétation.
Cher département (Sondage GPF Sancerre-Couy), Bassin parisien.

Introduction

Les travaux de sismique aux abords du forage GPF de Sancerre-Couy ont été nombreux et variés : il est nécessaire de les rappeler et de les situer dans le déroulement du programme pour pouvoir comprendre la succession des interprétations effectuées :

1) sismique-réflexion faite par CGG pour le compte d'ESSO-REP en 1985 et retraitée par Prakla-Seismos en 1986.

Deux profils de vibrosismique intéressaient le projet GPF, que la société ESSO a gracieusement mis à la disposition du groupe de projet GPF (*cf. positions sur la figure 5 du chapitre Introduction*).

- profil E-W Cher 34, sur lequel le forage a été implanté
- profil N-S Cher 33 passant à 3,7 km à l'ouest du forage.

2) sismique-réfraction faite par le BRGM et l'IPG/CNRS (Garchy).

- profil de sismique réfraction N-S effectué avant l'implantation du forage.
- après l'exécution du forage, extension du profil précédent avec tirs inverses et nappe de récepteurs pour essayer de localiser un réflecteur profond (au-delà de 3 500 m).

3) profils sismiques verticaux (PSV) et obliques (PSO) effectués lors des opérations de diagraphies par la Société Schlumberger en 1987.

- PSV de 650 à 1 800 m et de 1 800 à 3 500 m.
- PSO, faits avec des départs (offsets) de 1 050 m vers l'est et 1 150 m vers le nord, sur un intervalle de profondeur de 1 400 à 1 800 m.

4) à titre expérimental :

- un PSV avec tirs au fond du forage 1bis et enregistrement sur une partie du forage 1.

- une tomographie sismique aux abords de l'interface socle-sédimentaire entre les forages 1 et 1 bis (tranche de profondeurs 900-1 100 m) : cette dernière opération a donné une image très locale du toit du socle autour des forages 1 et 1 bis (*cf. chapitre sur le Stéphanien*).

Le profil sismique Cher 34

La figure 1 montre le traitement initial du profil sismique-réflexion Cher 34, qui était destiné à représenter les couches sédimentaires (levé de type pétrolier pour ESSO). A cause du dispositif peu étendu et des vitesses élevées, la méthode CMP (common mid-point) avait du mal à discriminer les multiples dans le socle. La faiblesse des signaux réfléchis et la complexité des structures dans le socle rendaient la restitution peu fiable.

Maintes suppositions ont été ainsi faites sur les réflecteurs profonds horizontaux à 1,2 s, 2 s et 2,7 s temps double (profondeurs estimées respectives : 2 km, 5 km et 7 km).

Première réinterprétation combinée sismique de puits - sismique de surface (A. Paul *et al.*, 1988)

A l'issue de la première phase de forage (à ~ 1 800 m), on disposait donc, en plus du profil sismique Cher 34 retraité, d'un PSV et de 2 PSO (avec départ vers l'est et vers le nord) et des diagraphies de vitesse et de densité.

La réponse sismique synthétique élaborée à partir de ces diagraphies a permis de faire une comparaison avec la section migrée du profil sismique Cher 34 : si,

(1) CNRS, CRG Garchy.

(2) Université de Pau, IPRA, Pau.

(3) BRGM, SGN/Département Géophysique, Orléans.

(4) Schlumberger, Paris.

(5) BRGM, SGN/D, Orléans.

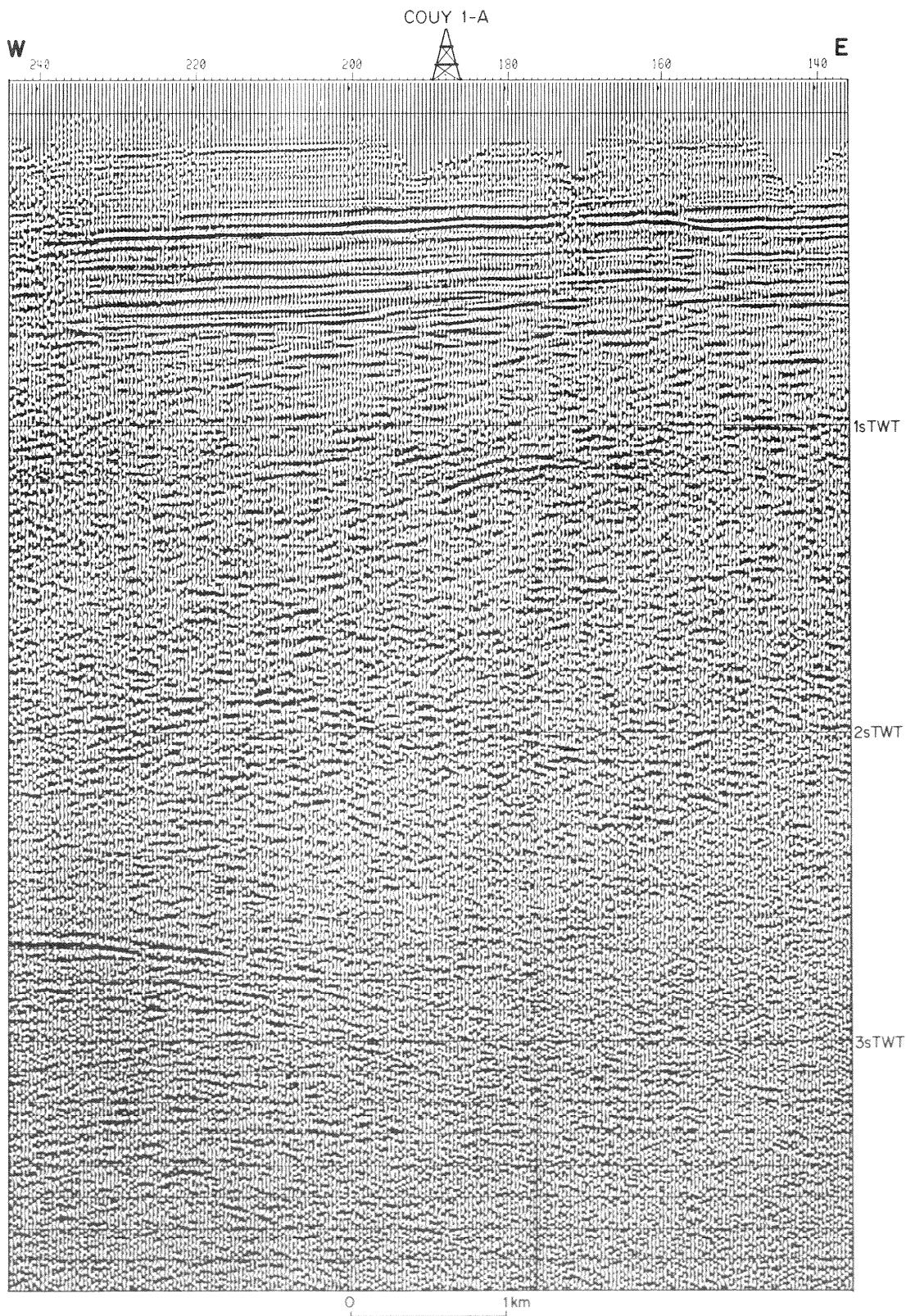


Fig. 1. - Traitement original, profil sismique Cher 34 (reproduit avec l'aimable autorisation de la Société ESSO-REP) (T. O'Rourke, C. Weber, 1990).

pour la couverture sédimentaire, l'identification des réflecteurs a pu être réalisée, il n'en a pas été de même à l'intérieur du socle sur cette section migrée : l'explication est que la méthode habituelle de traitement suppose les réflecteurs subhorizontaux alors que les foliations, les interfaces des divers types de roches, voire les

niveaux de brèches rencontrés par le forage dans le socle étaient fortement pentés. Ainsi, les horizons réflecteurs du socle, qui sont vus sur le PSV en parfait accord avec les contrastes donnés par les diagraphies, n'apparaissent absolument pas sur la section de surface.

Les réflecteurs identifiés dans le socle sont :

- 1 127 m : passage des amphibolites (lourdes) aux orthogneiss (légers).
- 1 240 m : à rapprocher d'un passage orthogneiss-amphibolite à 1 225 m.
- 1 365 m : zone bréchique 1 366 m à 1 373 m.
- 1 515 m : toit d'une passée d'orthogneiss (1 518 - 1 538 m) au sein d'amphibolites.

Le caractère réflecteur des horizons du socle semble lié plus que de coutume aux variations de densité des formations. Par exemple, vers 1 150 m, la densité décroît de 3 à 2,65 alors que le temps de transit ne varie que de 45 à 48 microsecondes par pied (variation de vitesse de 6 800 à 6 400 m/s).

Tous les contrastes constatés sur les diagraphies apparaissent sur le PSV et réciproquement. On en déduit donc que les conditions de trou n'affectent que très peu les lectures de densité et de vitesse, et que la réponse sismique du PSV traduit exactement les contrastes *in situ*. La réponse de la sismique de puits dans le socle est donc utilisable avec fiabilité.

Les réflexions présentées sur la figure 2, correspondent à une source située à la verticale du récepteur de fond du puits et à la projection verticale de l'énergie compressionnelle remontante. On met donc en évidence des horizons pseudo-horizontaux avec une incidence proche de la normale.

1. Interprétation des profils avec déport (PSO)

Déport vers l'est

La figure 3 représente la juxtaposition de la section de surface migrée avec la section donnée par le profil avec déport vers l'est. La composante verticale a été utilisée pour traiter l'énergie compressionnelle réfléchie par des horizons pseudo-horizontaux. La distance des points de réflexion par rapport au puits a été modélisée en extrapolant horizontalement le profil de vitesse déterminé dans le puits par le PSV vertical. La section du profil avec déport a été obtenue par une migration de Kirchoff avec un angle de recherche de 10°.

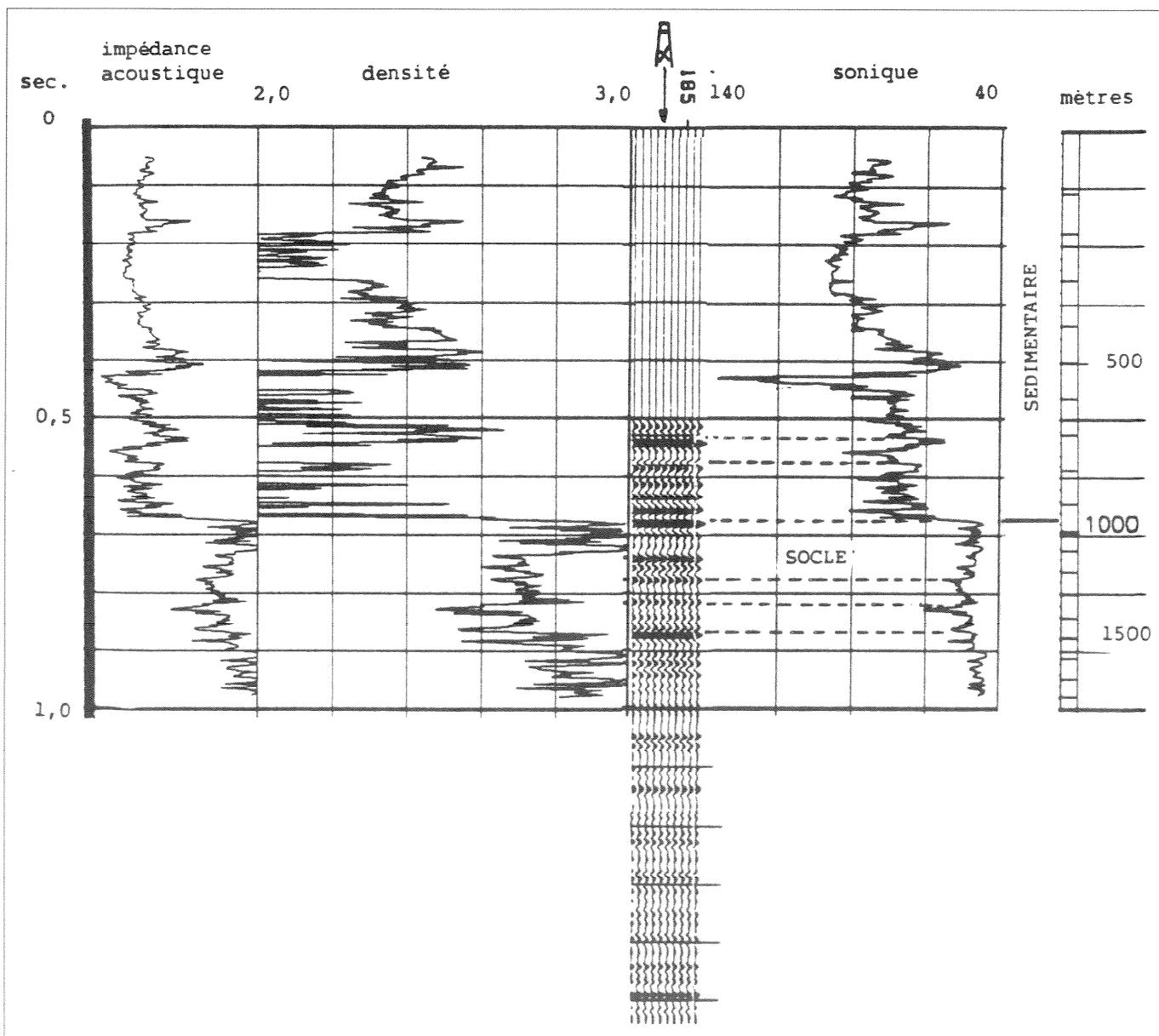


Fig. 2. - Corrélation entre diagraphies et sismique de puits (PSV) (A. Paul *et al.*, 1988).

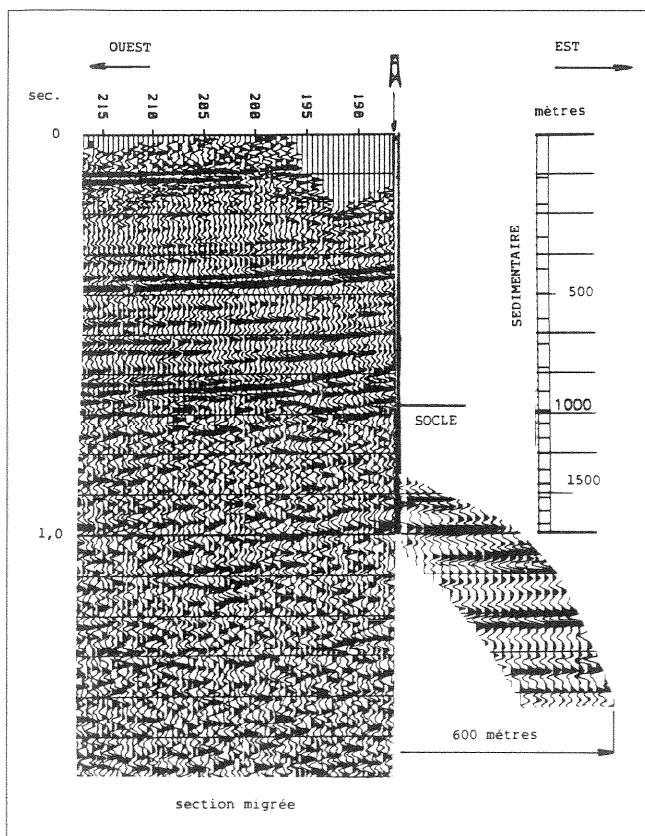


Fig. 3. - Première corrélation proposée entre le PSO à déport est et la section migrée (reproduite et traitée avec l'aimable autorisation de la Société ESSO-REP) (A. Paul *et al.*, 1988).

Le déport de la source en surface est de 1 050 m. Avec une modélisation en couches horizontales, la figure 3 représente le domaine exploré. On suit alors la dérive des horizons sur une distance d'environ 400 m au niveau du fond du sondage, et une distance d'environ 600 m à une profondeur équivalente à 1,4 s/temps double (s.TD.). Avec l'hypothèse de cette modélisation, on rejoint l'hypothèse de la migration de la sismique de surface, mais l'on a cette fois des capteurs sismiques à l'intérieur du socle à proximité immédiate des horizons observés. On s'affranchit donc des déformations du champ d'ondes provoquées par le passage du sédimentaire au socle. D'autre part, les altérations du signal dans les couches de surface n'ont plus aucune importance, puisque l'ondelette directe ainsi que ses multiples sont observés au passage devant les capteurs avant la réflexion sur les horizons du socle plus profond.

On note la corrélation des réflecteurs à 0,9 s, 1 s et 1,1 s.TD. (soit 1 600 m - 1 800 m et 2 000 m environ) qui ont donc une extension vers l'est.

Déport vers le nord

La seconde opération, le profil avec déport vers le nord, est représentée par la figure 4. Le mode d'acquisition et les hypothèses pour le traitement sont identiques à ceux utilisés pour le déport est.

La juxtaposition de la sismique de surface et du profil avec déport ne constitue plus un plan. On doit considérer dans la représentation un changement d'azimut de

90 degrés au niveau du puits. En effet, il n'y a pas de section sismique de surface d'axe S-N passant par le puits.

Le déport de la source est cette fois de 1 150 m. Le domaine d'investigation latérale est donc du même ordre de grandeur que dans le cas précédent, c'est-à-dire de l'ordre de 600 m vers une profondeur équivalente à 1,4 s. TD.

On retrouve encore la bonne corrélation pour les réflecteurs à 0,9 s, 1 s et 1,1 s.TD. Pour les deux premiers groupes, il semble y avoir un décrochement à 200 m au nord du forage (approfondissement vers le nord).

Les séries plus profondes entre 1,1 et 1,3 s.TD. donnent aussi une bonne cohérence entre le déport est et le déport nord à condition de considérer un amincissement d'environ 20 m entre les profondeurs 1,1 et 1,2 s.TD.

Une conclusion certaine à ce stade est que des réflecteurs pseudo-horizontaux corrélables à plusieurs kilomètres de distance sont présents dans le socle à une profondeur équivalente à un temps compris entre 0,9 et 1,1 s.TD. (1 600 - 1 800 m). Ces horizons ont un pendage remontant légèrement vers l'est et présentent une cassure descendante à proximité immédiate vers le nord. La géologie ne permet pas de les identifier : les brèches tardi-tectoniques, un moment suspectées, ne peuvent être la cause de ces réflexions car elles sont trop pentées (45°) et trop peu puissantes.

Ces résultats sont issus d'une méthode traditionnelle tendant à mettre en évidence les réflecteurs proches de l'horizontale. Si l'on veut situer des interfaces proches de la verticale, d'autres méthodes doivent être utilisées.

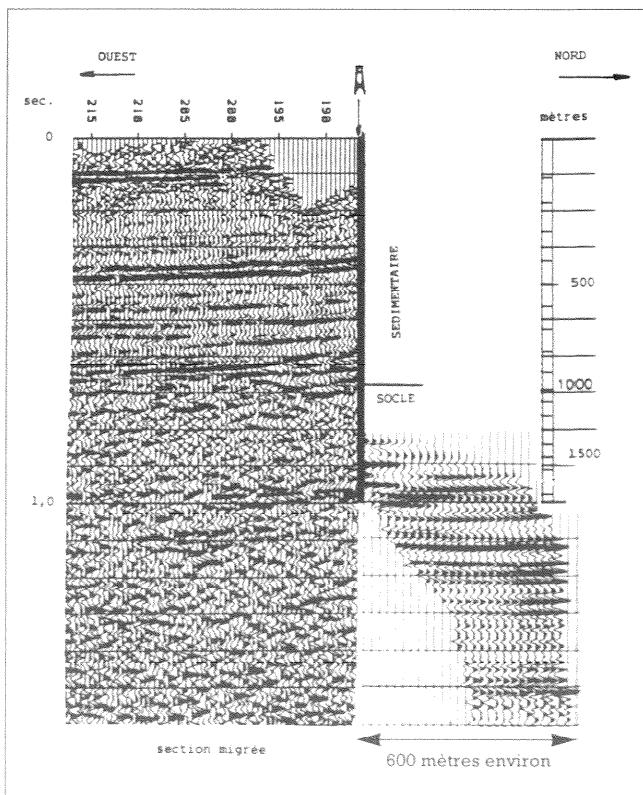


Fig. 4. - Première corrélation proposée entre le PSO à déport nord et la section sismique migrée (A. Paul *et al.*, 1988).

2. Recherche de réflecteurs pseudo-verticaux dans le socle à partir d'un profil avec déport vers l'est

Le profil avec déport vers l'est indique nettement de puissants réflecteurs pseudo-verticaux très proches du puits. Une migration de Kirchoff avec un modèle de vitesse homogène à 6 000 m/s donne l'image de la figure 5.

On a donc deux horizons positionnés à environ 70 à 100 mètres du puits. L'horizon n° 1 correspond à une diminution d'impédance acoustique et le n° 2 à une augmentation. Ceci pourrait donc correspondre à un sillon d'environ 30 mètres de large avec une très nette diminution de vitesse et de densité.

Le procédé de migration n'est pas fiable aux limites du domaine et seule la partie centrale est à considérer. Il est cependant indéniable que ces deux interfaces pseudo-verticales existent : elles pourraient correspondre à une bande de gneiss au sein des amphibolites.

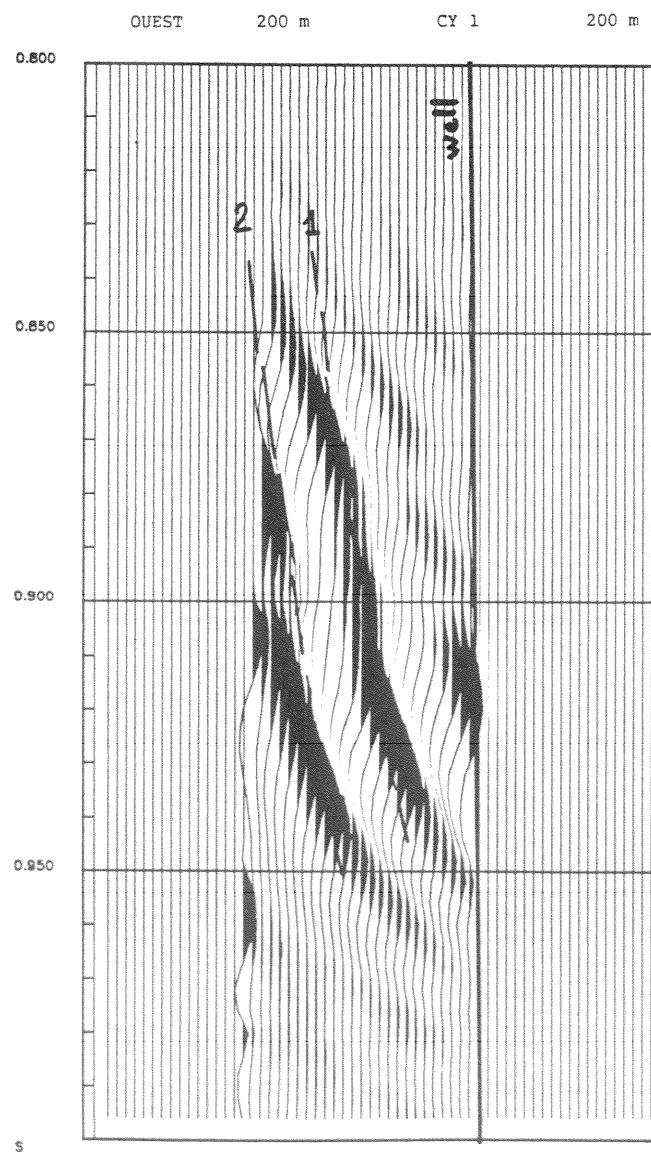


Fig. 5. - Champ d'ondes horizontales polarisées dans un plan vertical dirigé vers la source. Soustraction des ondes directes P et S. Migration de Kirchoff pour des plans de pendage entre 30 et 90 degrés (A. Paul *et al.*, 1988).

Seconde réinterprétation de la sismique-réflexion (T. O'Rourke et C. Weber, 1988)

Les résultats de la première réinterprétation apparaissent contradictoires avec les informations structurales apportées par les carottes, un réexamen critique de la sismique réflexion a été confié à J. Blanco et J. Ravat (SNEA-P) qui estimèrent que plusieurs facteurs paraissaient avoir pénalisé l'interprétation :

- rapport signal/bruit faible ;
- vitesses apparentes très proches entre les ondes descendantes et les ondes réfléchies, rendant leur discrimination difficile ;
- en raison du fort pendage des couches, les angles de réflexions sont voisins de l'angle critique, ce qui entraîne des phénomènes de réfraction.

Cette expertise a permis de décider les modalités d'un retraitement des PSV-PSO, confié à la société Schlumberger, comprenant trois opérations principales :

- utiliser l'**information supplémentaire**, provenant des mesures tridirectionnelles (polarisation), afin de renforcer les énergies réfléchies S et directe P par les sources profondes (fig. 6).
- séparer les ondes montantes et descendantes par un **filtrage de vitesse** qui rejette les énergies non désirées, au lieu de « forcer » a priori les résultats par exemple pour faire apparaître les pendages supérieurs à 45° (fig. 7).
- réaliser une **migration** suivant le champ de vitesse extrait du log sonique, en utilisant un modèle dépassant l'hypothèse des milieux traditionnels subhorizontaux.

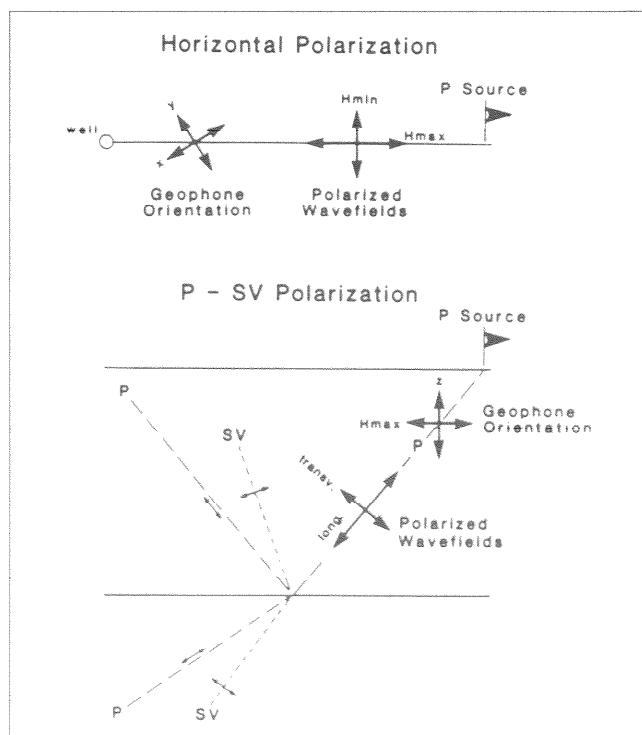


Fig. 6. - Polarisation des données triaxiales (T. O'Rourke et C. Weber, 1990).

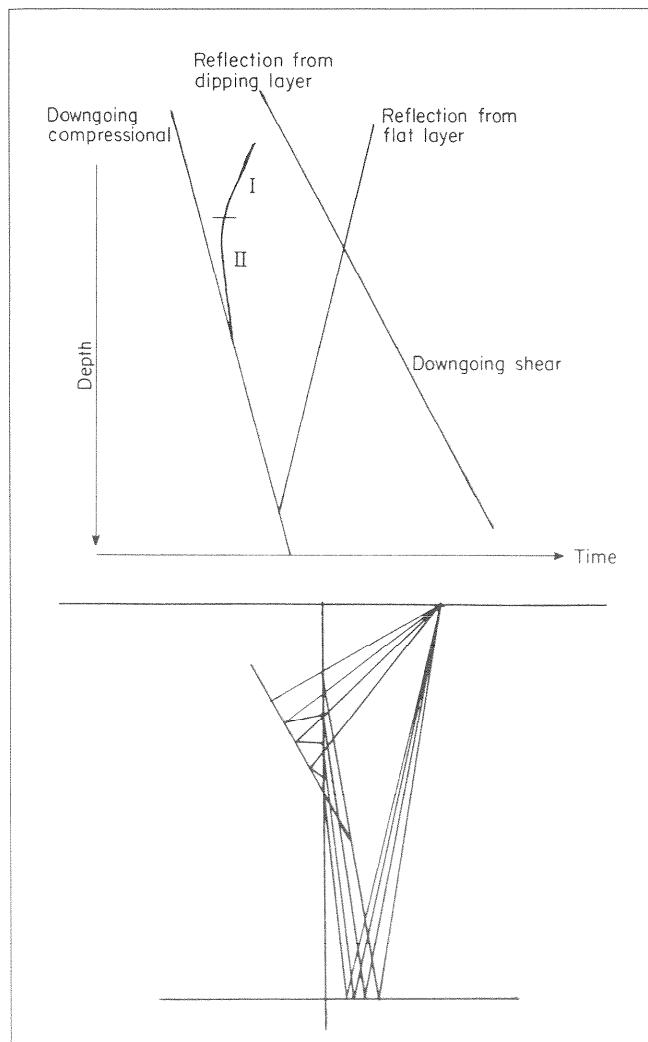


Fig. 7a et 7b. - Modèle de tracé de rais sismiques pour les couches à fort pendage (T. O'Rourke et C. Weber, 1990).

Il a été également décidé de retraiter parallèlement la coupe sismique de surface en intégrant les informations des PSV afin de guider le choix des vitesses et de fournir un opérateur de déconvolution. Une migration en cascade, avec un algorithme de second ordre, en différence finie à 45° , devait faciliter la mise en évidence des pendages les plus élevés.

Les principaux résultats de ce retraitement sont présentés sur les figures 8 et 9. D'une façon générale, les résultats sont, cette fois-ci, en bon accord avec les données du forage et font apparaître des informations nouvelles permettant une meilleure évaluation du contexte structural dans lequel se trouve le corps à l'origine de l'anomalie magnétique du bassin de Paris, dans sa terminaison méridionale.

Les principaux réflecteurs visibles sur le PSV correspondent bien à ceux du sismogramme synthétique calculé à partir du log de vitesse dans le puits. Si l'on excepte quelques fortes réflexions liées à des niveaux bréchiques épais (à 1 370 m et 3 400 m), on retrouve les principaux interfaces des différentes formations métamorphiques traversées :

- amphibolites/gneiss à 1 130 m
- gneiss/amphibolites à 1 540 m

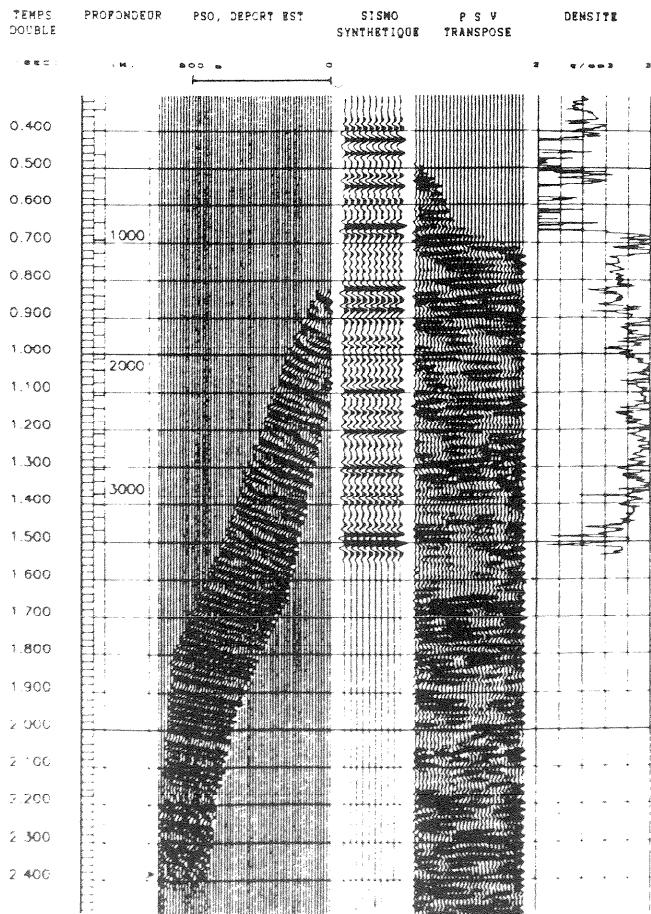


Fig. 8. - Résultats du traitement : corrélation entre le PSO à déport est, le sismogramme synthétique (« géogram »), le PSV transposé et le log de densité acoustique (C. Weber, 1988).

- amphibolites/alternances gneiss-amphibolites à 2 110 m
- alternances gneiss-amphibolites/gneiss à 2 500 m
- gneiss/gneiss mylonitique à 3 130 m.

Le PSO avec déport à l'est montre de forts pendages vers l'est. Le pendage moyen (de l'ordre de 55°) est moins élevé que le pendage réel puisque le profil ne passe pas dans la direction de plus grande pente. À contrario, le PSO à déport nord, proche de la direction de foliation, n'indique pas de pendage majeur.

En dessous de la base du forage, les PSV montrent, à une profondeur moyenne correspondant à 1,7 s (temps double), soit environ 4 000 m, un ensemble de réflecteurs qui peuvent avoir une signification structurale importante.

Enfin le retraitement rend crédible l'interprétation du profil sismique de surface, même si des difficultés demeurent. Il est, en effet, possible de caler un certain nombre de réflecteurs sur ceux du sismogramme synthétique de puits ou du PSV transposé (fig. 9). La continuité horizontale d'un certain nombre d'entre eux pose cependant problème, puisqu'ils ne peuvent être assimilés à un interface repéré dans un ensemble de couches subverticales.

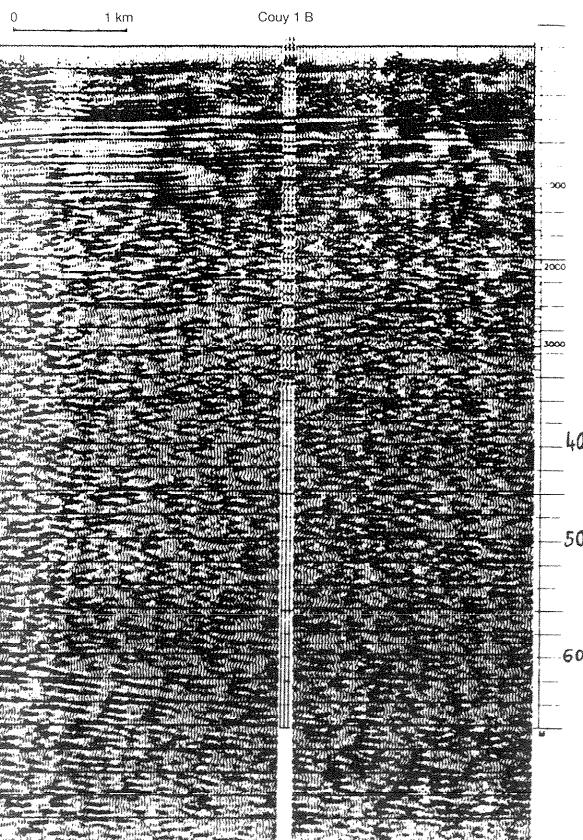


Fig. 9. - Résultats du retraitement : stack final, avant migration. Coupe sismique Cher 34 dans sa partie recoupant le forage, montrant les corrélations avec le sismogramme synthétique (C. Weber, 1988).

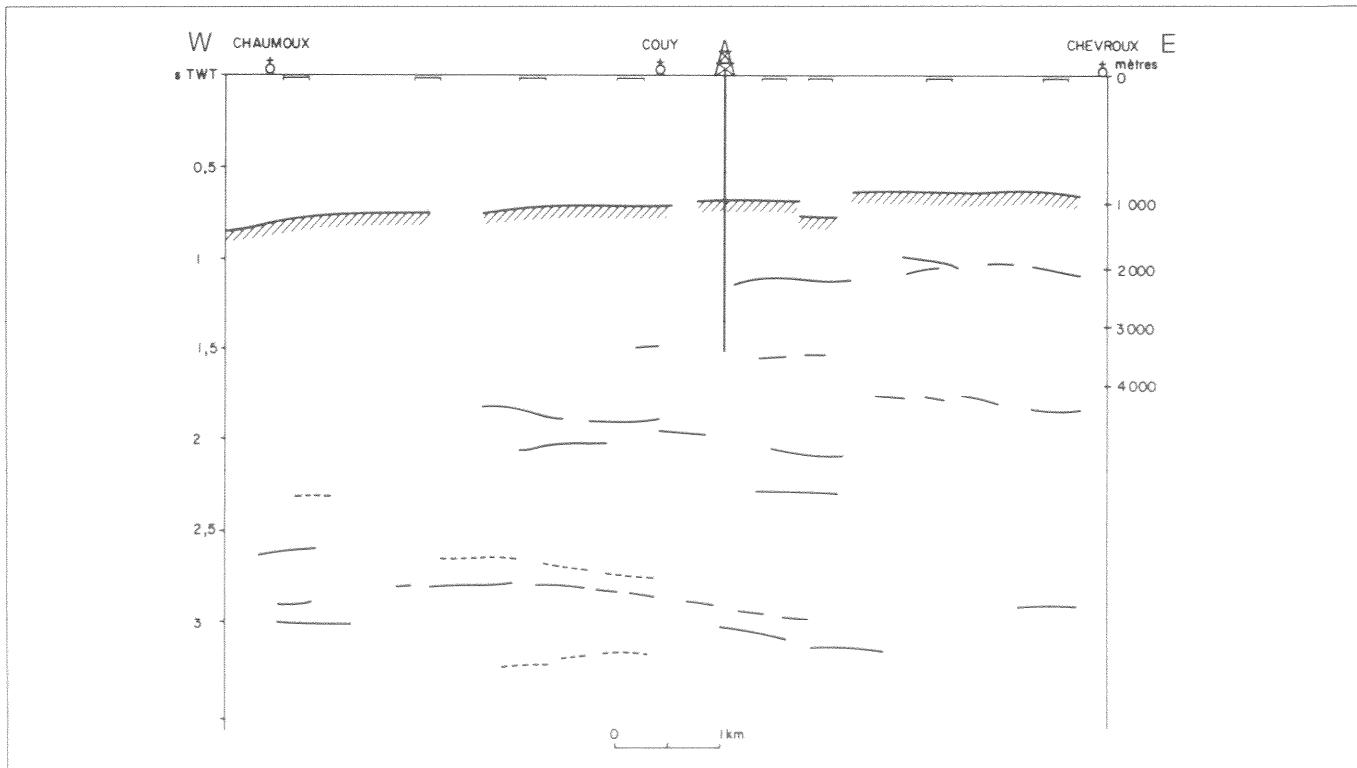


Fig. 10. - Principaux réflecteurs dans le socle après élimination des multiples (T. O'Rourke and C. Weber, 1988).

Retraitements des profils Cher 33 et 34 (B. de Voogd, A. Autran, C. Weber, 1992)

Les résultats de l'interprétation effectuée sur le profil E-W Cher 34 ont conduit à réétudier le profil N-S Cher 33 qui recoupe le profil précédent à environ 3,5 km à l'ouest du forage (l'implantation des profils Cher 33 et Cher 34 est donnée sur la figure 5 de l'Introduction).

Le retraitement et la réinterprétation des deux profils ont été faits cette fois sans utiliser les informations fournies par le forage. Il s'agissait de reprendre l'analyse des données de surface sans a priori. Les méthodes classiques de sismique réflexion à point milieu commun (acquisition et traitement) supposent des horizons proches de l'horizontale. De ce fait, les traitements classiques ont tendance à faire ressortir des alignements subhorizontaux, d'une réalité géologique parfois douteuse, au détriment d'éventuels réflecteurs pentés. Nous avons donc entrepris un examen soigneux des enregistrements de terrains, sur lequel s'appuie la réinterprétation de la section sismique retraitée.

L'examen des tirs bruts (fig. 11) conduit à deux observations essentielles.

- La plupart des tirs sont affectés par des bruits de surface qui masquent d'éventuelles réflexions (fig. 11 a). Ces bruits de surface sont particulièrement énergiques entre 15 et 25 Hz (train d'onde noté S). Le balayage des sources Vibroseis utilisées pour ces profils allait de 14 à 72 Hz, mais la partie utile ici pour imager le socle est limitée de 14 à environ 35 ou 40 Hz du fait de l'atténuation importante des hautes fréquences dans

la couche sédimentaire. Si en plus on note que l'intertrace était de 50 m, on voit qu'il est difficile de s'attaquer au bruit de surface sans détruire le signal ou avoir de sérieux problèmes d'aliasing. Pour s'affranchir de l'aliasing spatial qui limite sévèrement l'utilisation d'un filtre dans le domaine fréquence-nombre d'onde (f-k), B. de Voogd a appliqué le filtre f-k après avoir appliquée une correction de courbure arbitraire (NMO), qui est ensuite soustraite avant de continuer le traitement. Ceci a permis d'obtenir une amélioration dans la coupe finale, mais le résultat reste relativement médiocre.

- Sur les enregistrements ayant un bon rapport signal/bruit (fig. 11 b), des arrivées réfléchies sur des horizons pentés (symbole P) et des diffractions témoignent de l'existence de structures complexes dans la zone du forage. En l'absence d'un quadrillage sismique ou de sismique 3-D, la géométrie de ces structures est indéterminée.

Malgré les problèmes ci-dessus, un résultat nouveau et sans doute important ressort de cette étude : l'existence de structures du socle inclinées vers l'ouest (30° environ), immédiatement à l'ouest du forage de Sancerre-Couy (fig. 12). Ces réflecteurs peuvent être suivis depuis le toit du socle jusqu'à une série d'événements sismiques majeurs subhorizontaux observés entre 2,7 et 3 s.TD. (environ 7 à 8 km de profondeur). Cette zone fortement réfléchissante, qui avait été interprétée comme des écaillages de la croûte sur Cher 34, est également bien visible sur Cher 33. Elle peut être reliée au réfracteur rapide (7,4 km/s) déjà reconnu dans le secteur par la sismique-réfraction. Sa profondeur (environ 8 km) est de l'ordre de la profondeur calculée du sommet du corps magnétique profond (7-10 km) à l'aplomb du forage.

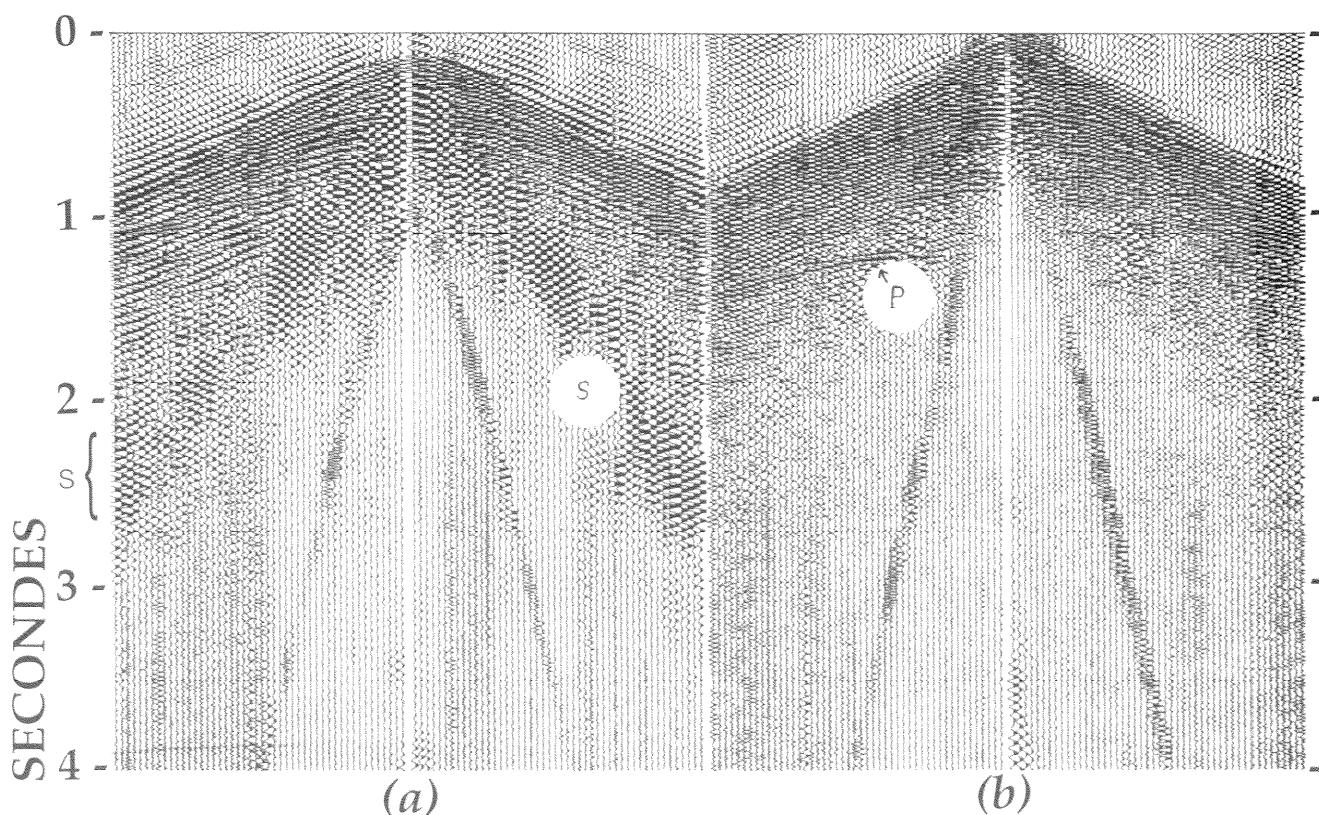


Fig. 11. - Enregistrements bruts du profil Cher 34 à proximité du forage.
(a) exemple de tir affecté par des bruits de surface (train d'onde noté S).
(b) exemple de tir avec réflexions sur horizons pentés ou diffraction (P).

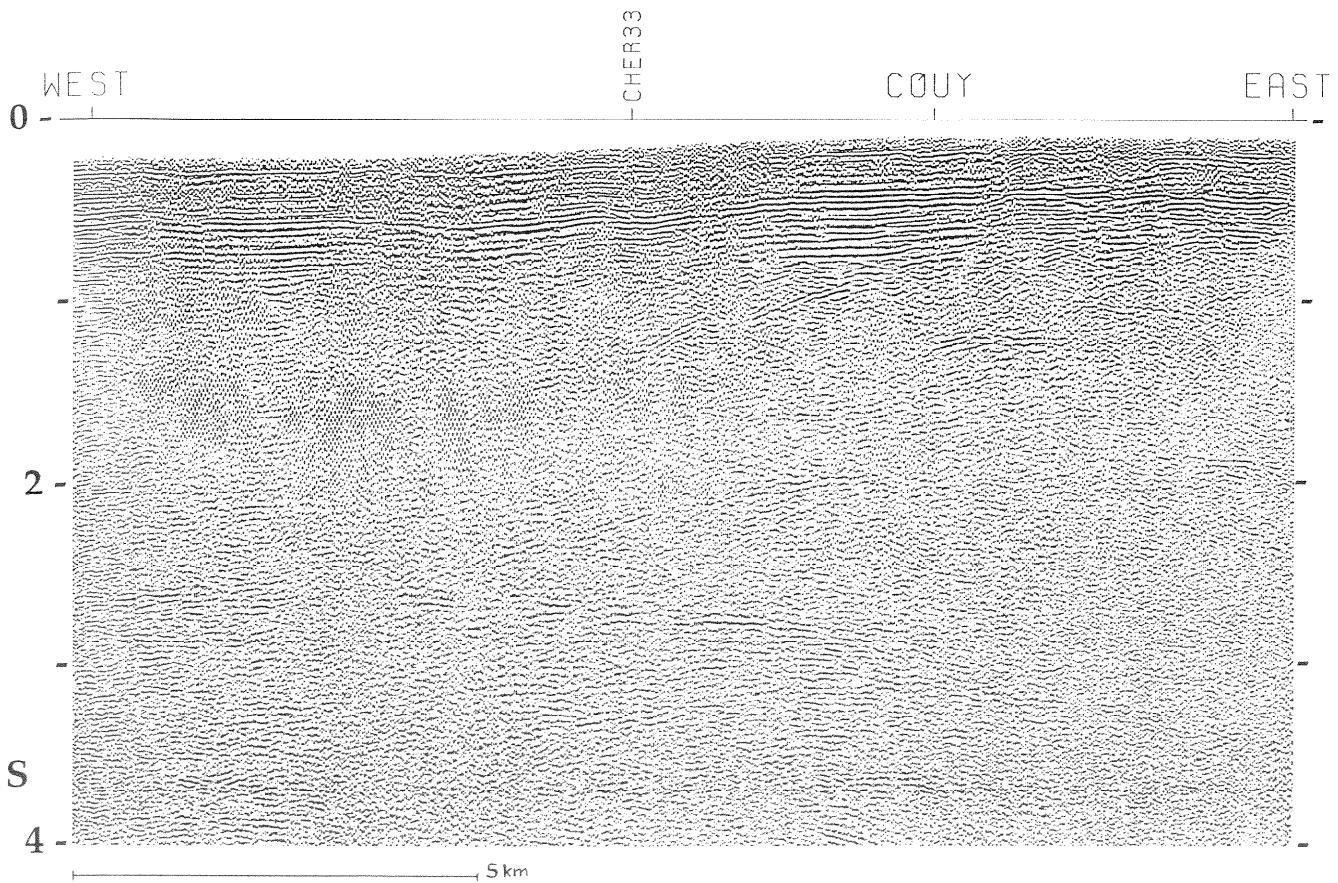


Fig. 12 a. - Stack Cher 34 sans filtre f-k.

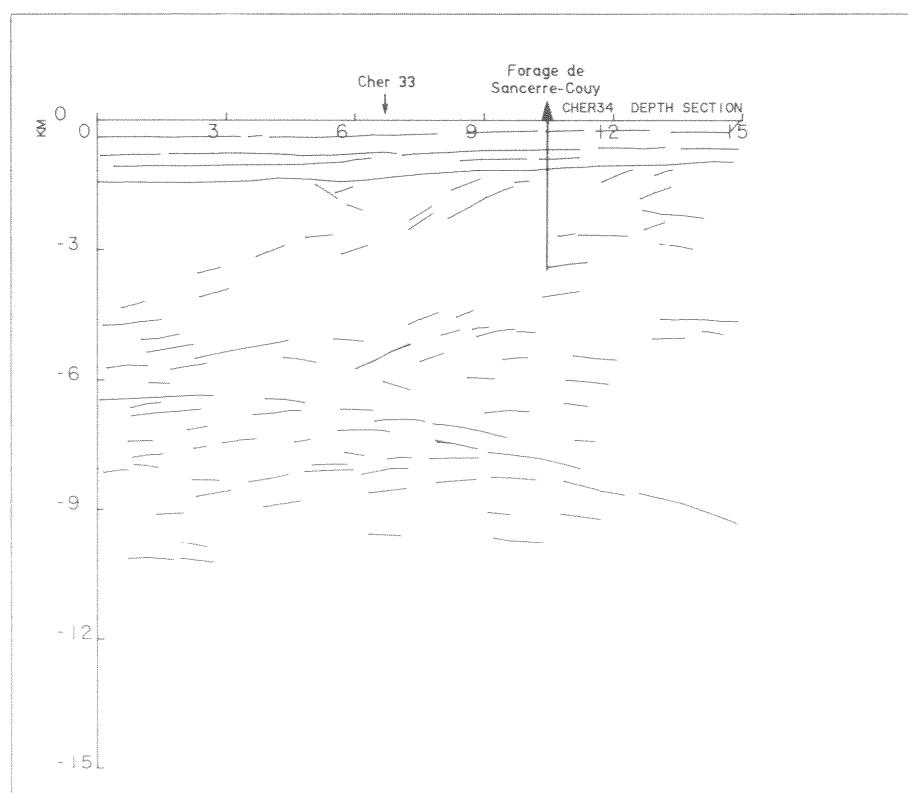


Fig. 12 b. - Principaux réflecteurs dans le socle (d'après le stack de la figure 12 a) (B. de Voogd *et al.*, 1992), sur coupe-profondeur.

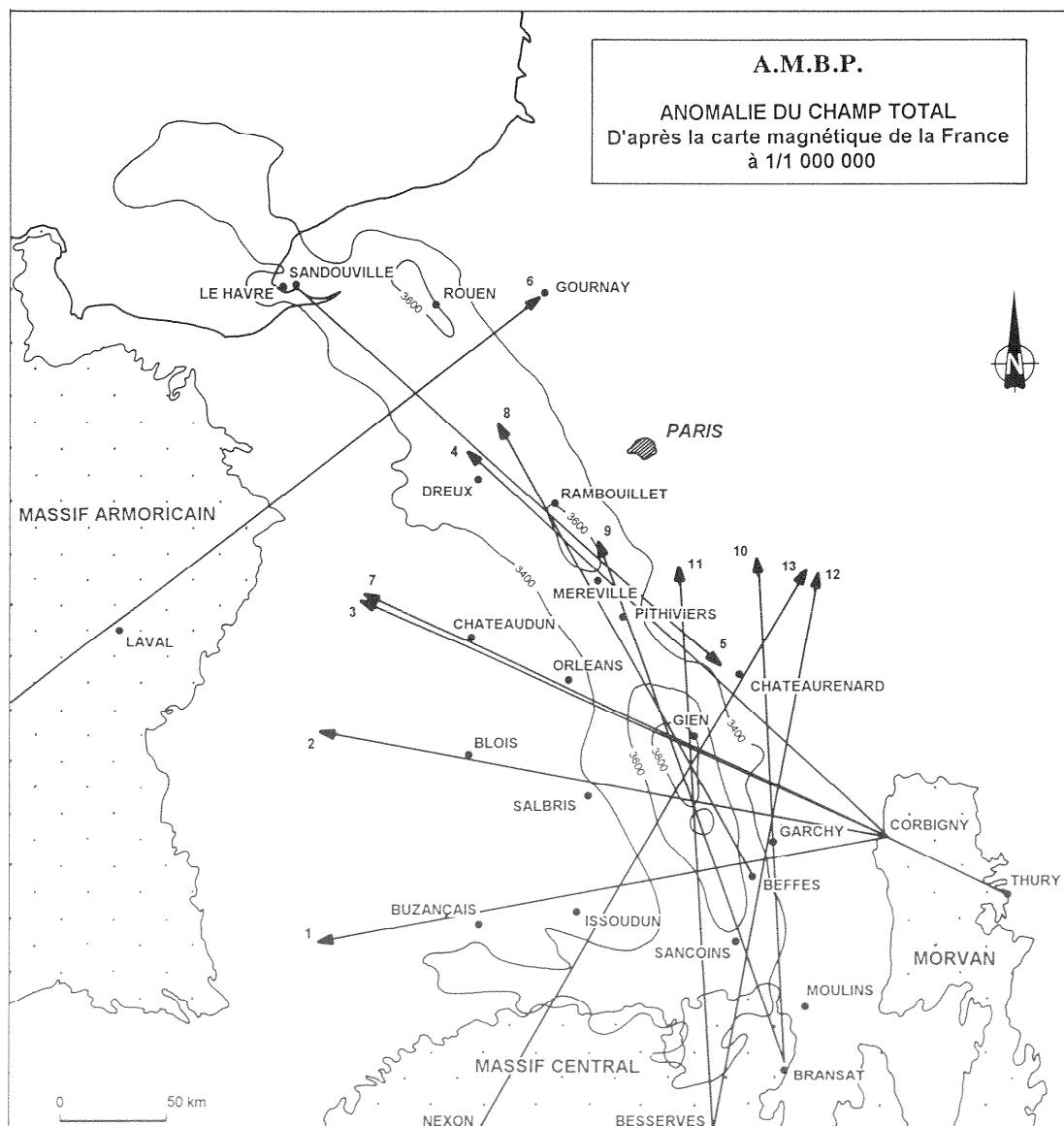


Fig. 13 a. - Situation géographique des profils de sismique-réfraction, et interprétation structurale simplifiée (profondeur du Moho) (A. Dupis *et al.*, 1984 et 1990).

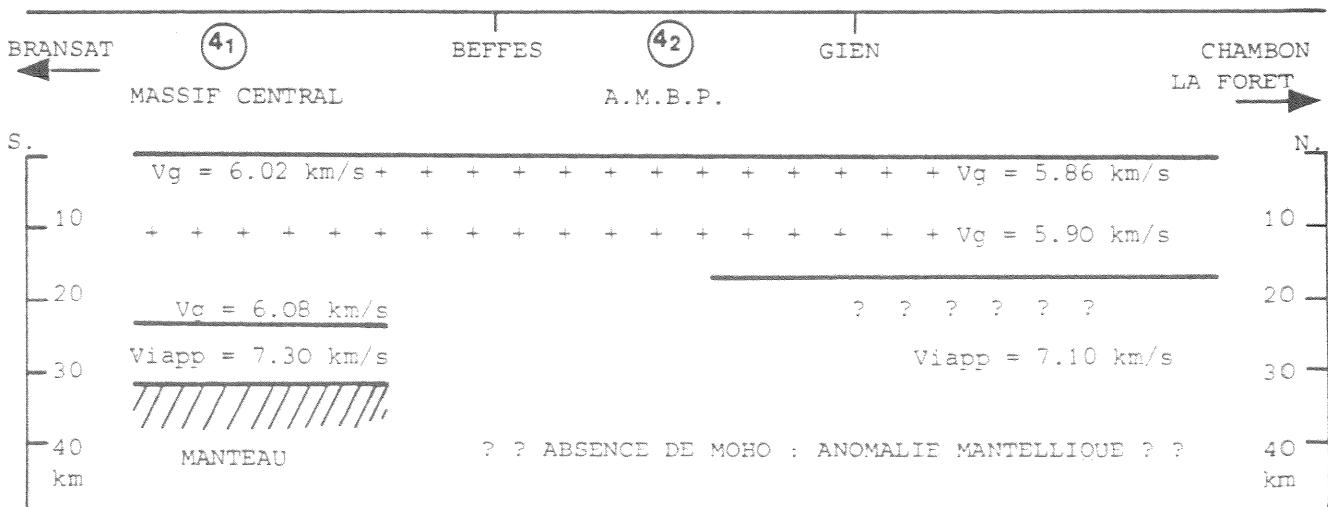


Fig. 13 b. - Coupe axiale de la partie sud de l'A.M.B.P. à partir des profils Bransat-Anomalie et Beffes-Chambon-la-Forêt (A. Dupis, P. Baltensberger, 1984).

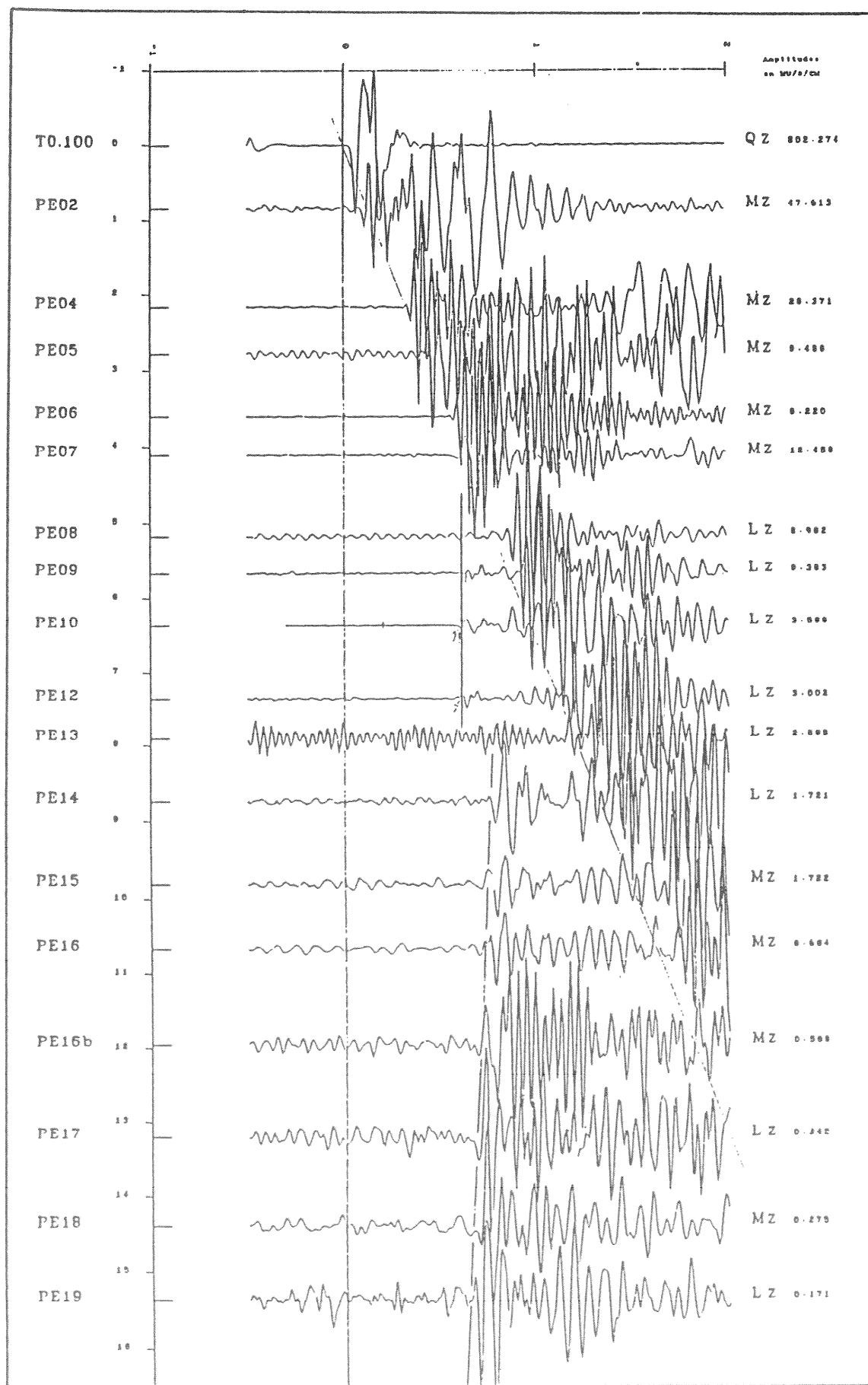


Fig. 14. - Profil PT 100 E (IPGP, septembre 1985). PE1 à PE7 = 1^{re} arrivées = onde P se propageant dans les couches sédimentaires. PE8 à PE12 = onde P réfractée dans le socle. PE14 à PE19 = réflexion grand angle à 4 km de profondeur.

D'autres réflecteurs, mais d'extension latérale plus limitée (1 à 2 km), sont visibles entre 1 et 2 s.TD. au voisinage du forage, mais n'apparaissent pas continus sous le forage, ce qui suggère l'existence d'une faille inverse très redressée qui affecterait le socle à cet endroit.

Sismique-réfraction - Sismologie expérimentale (P. Baltenberger, 1992)

Bien avant l'implantation du forage de Sancerre-Couy, des profils de sismique-réfraction dans la partie méridionale de l'anomalie magnétique du Bassin parisien avaient été réalisés avec, pour objet, l'investigation du toit du socle, l'étude de la croûte et du Moho.

Dès 1972, P. Baltenberger, à partir de treize profils (fig. 13 a) réalisés dans la partie sud de l'AMBP, (A. Dupis *et al.*, 1984) constate la présence dans toute la région étudiée, d'un milieu de type granitique dans la partie supérieure de la croûte, l'onde Pg étant bien observée sur les profils traversant la zone d'anomalie à des distances inférieures à une centaine de kilomètres.

L'onde Pn, bien observée entre 138 et 193 km sur un profil passant à l'est de l'anomalie entre le point de tir de Besserves (Puy-de-Dôme) et Auxerre, de même que sur le profil de Bransat (Allier) à Courson-les-Carrières (Yonne), est par contre absente sur les profils issus des mêmes points de tir et passant, entre Nérondes, Gien et Étampes, dans l'axe de la zone d'anomalie.

En outre, sur un profil issu de la carrière de Beffes en direction du NNW et traversant la zone d'anomalie sur une centaine de kilomètres, l'onde PmP, réflexion sur la base de la croûte, généralement observée à partir de 70 km avec de fortes amplitudes, est également absente.

L'absence de Pn et PmP dans l'axe de l'anomalie magnétique conduit à penser que cette dernière se superpose à une anomalie du Manteau supérieur.

Enfin, tous les profils sont caractérisés par la mise en évidence, aux distances généralement supérieures à 100 km, d'ondes longitudinales à vitesse intermédiaire entre celle du granite et celle du Manteau supérieur. La valeur moyenne des vitesses apparentes est de 6,7 km/s. La partie inférieure de la croûte comporterait donc un milieu dont la vitesse au toit serait voisine de 6,7 km/s.

Dans sa thèse, A. Boyer (1984) reprend et précise ces résultats après intégration de nouvelles données. Interprétant en tant que réflexions des arrivées secondes sur le profil Beffes → NNW, il situe à une profondeur de 17 km le réflecteur correspondant. L'essentiel des résultats des profils situés dans l'axe de l'anomalie magnétique est reporté sur la coupe de la figure 13 b.

En 1985, P. Baltenberger, étendant à la région de l'anomalie sa carte des isobathes du Moho, déjà obtenue pour le Nivernais et le Morvan (1971), note une remontée du Moho à l'approche de l'AMBP.

En septembre 1985 et mars 1986, après que l'extrémité sud de l'AMBP ait été choisie pour y faire un forage profond, des études plus détaillées en sismique réfraction sont réalisées par A. Hirn (I.P.G.P.), J. Peragallo et J. Perrin (BRGM), d'une part, et P. Baltenberger et N. Ghorbel (C.R.G.), d'autre part.

La première étude s'est déroulée en deux temps sur une bande axiale longue de 15 km et centrée sur Couy ; il s'agissait :

- dans la première phase, de déterminer l'épaisseur des couches sédimentaires sur le socle anté-permien et d'effectuer un sondage sismique pour trouver un éventuel marqueur rapide intra-socle ;
- dans la deuxième phase, de confirmer ce marqueur rapide par des tirs inverses et d'en rechercher l'extension avec des dispositifs d'écoute en nappes.

Le principal document, assemblage du profil PT100E (fig. 14, tir à Lugny-Champagne en septembre 1985), montre, après l'onde directe à 3,2 km/s, la réfractée au toit du socle avec une vitesse apparente voisine de 6 km/s. Le traitement situera le socle à 1,1-1,3 km de profondeur.

A partir d'une distance de tir de 8 km, s'alignent des arrivées de forte amplitude avec une vitesse apparente de 6,8 km/s. Traitées en ondes réfractées, on obtient (fig. 15) :

- un marqueur à la profondeur de 3 km environ si la vitesse vraie au toit du marqueur est de 6,7 km/s ;
- une profondeur du marqueur de 2,3 km seulement dans l'hypothèse où la vitesse vraie n'est que de 6,2 km/s.

Avec un point de tir décalé vers le nord, un profil sur le même axe a permis d'infirmer l'extension vers le nord de ce marqueur profond.

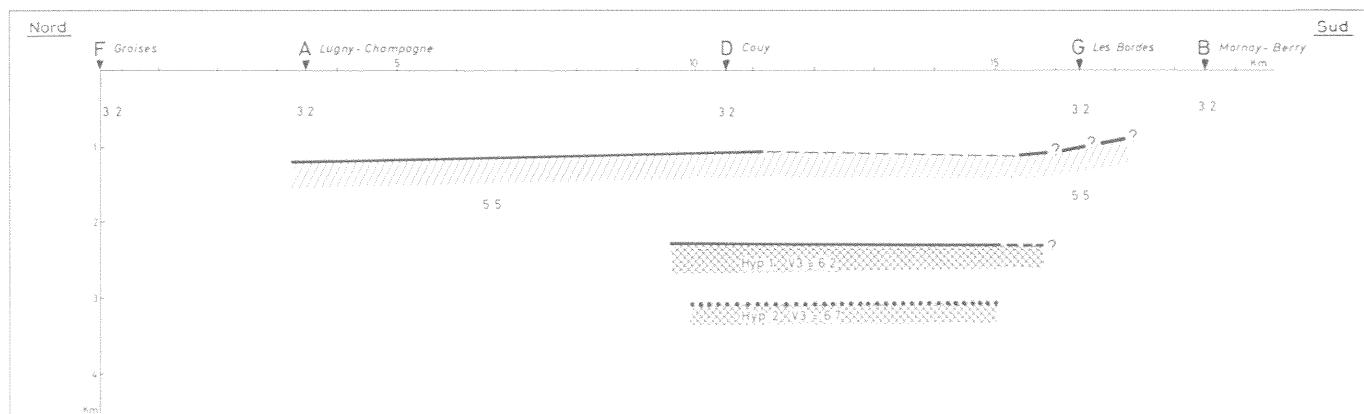


Fig. 15. - Coupe sismique interprétative à l'aplomb de l'AMBP. Vitesses sismiques en km/s (A. Hirn, J. Peragallo, J. Perrin, 1986).

La deuxième étude, complémentaire à la première, a d'abord, en 1985, réalisé trois profils transversaux (ouest-est), dont deux inversés à travers l'AMBP, le Val de Loire et le Nivernais.

Ils permettent à N. Ghorbel (1987) de distinguer deux types de socle, de part et d'autre d'une zone de contact à l'aplomb du canal latéral à la Loire : a) un socle « lent » à l'ouest, notamment dans la région de Couy, avec des vitesses des ondes longitudinales de 4,8 à 2 km/s seulement ; b) un socle à 5,8 km/s, probablement granitique, à l'est, dans le Nivernais (fig. 16).

Trois profils nord-sud réalisés dans la région de Couy ont également permis à N. Ghorbel :

- de situer le toit du socle, à quelques kilomètres au sud de Couy, à une profondeur de 1,0 km environ, valeur cohérente avec le résultat du forage ;
 - d'identifier des réflexions à grand angle sur un marqueur intra-crustal à 3,9 km de profondeur environ, la vitesse moyenne sur ce parcours oblique étant de 5,32 km/s (sédimentaire compris) ;
 - de reconnaître, au-delà de 16 km sur un profil nord-sud issu du point de tir de Lugny-Champagne, des arrivées d'ondes réfractées à 7,4 km/s de vitesse apparente (fig. 17). Une tentative d'interprétation avec ces valeurs donne un réfracteur à 3,9 km ; le réfracteur pourrait correspondre au réflecteur intra-crustal détecté ci-dessus.

Cependant les résultats du forage, poursuivi jusqu'à 3,5 km, n'ont pas permis de valider les hypothèses de position d'un marqueur intra-socle obtenues par le traitement en tant qu'ondes réfractées des arrivées à forte amplitude du profil PT 100E.

Ces dernières, prises en compte dans la réinterprétation de l'ensemble des données (P. Baltenberger et N. Ghorbel, 1988), apparaissent comme très cohérentes avec les ondes réfléchies observées par N. Ghorbel sur ses propres profils et permettent de consolider l'interprétation conduisant à l'existence d'un réflecteur situé à 3,9-4,0 km de profondeur, dont la localisation est également précisée (fig. 18).

Fig. 16. - Carte des isobathes du socle dans la région de Couy et le Nivernais, montrant la limite, le long de la vallée de la Loire, entre deux compartiments du socle ayant des vitesses d'onde P différentes (N. Ghorbel, 1977).

La vitesse moyenne de 5,32 km/s sur le trajet à grand angle de ces réflexions est en bon accord avec le modèle de croûte supérieure proposé par N. Ghorbel à partir des résultats de l'ensemble de ses profils :

Milieu 1	Sédimentaire	: V1 = 3,2 km/s	H1 = 0,95 km
Milieu 2	Socle	: V2 = 4,9 km/s	H2 = 0,85 km
Milieu 3	Socle	: V3 = 6,0 km/s	H3 = 2,00 km
Milieu 4	Milieu rapide	: V4 = 7,4 km/s	

Ce modèle place à 15,3 km le point de brisure V3/V4 et à 8 km la distance critique des réflexions sur le milieu V4, ce qui est conforme aux observations.

Une nouvelle étude, en juin 1988, menée conjointement par le BRGM et le CRG, à l'aide d'un profil

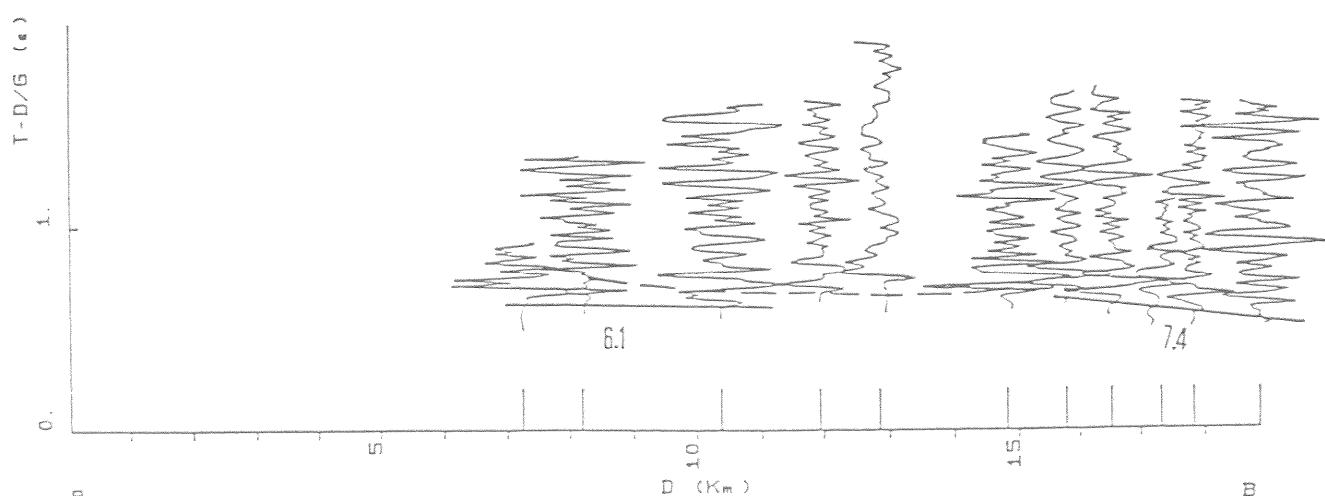
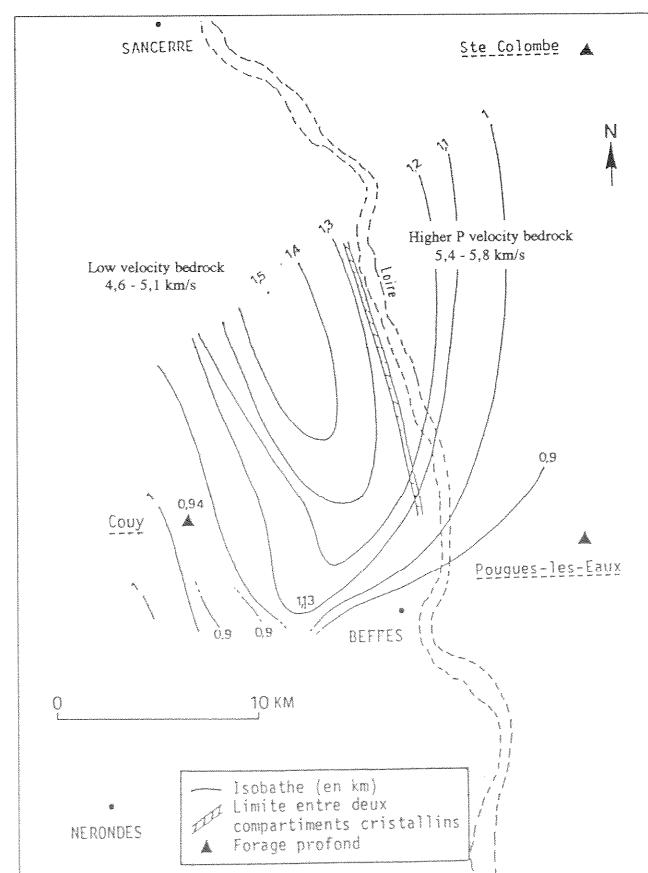


Fig. 17. - Profil sismique entre les points de tirs A et B (CRG, mars 1986) montrant l'onde réfractée ($v = 7.4$ km/s) à des distances de 14 à 19 km du point de tir A.

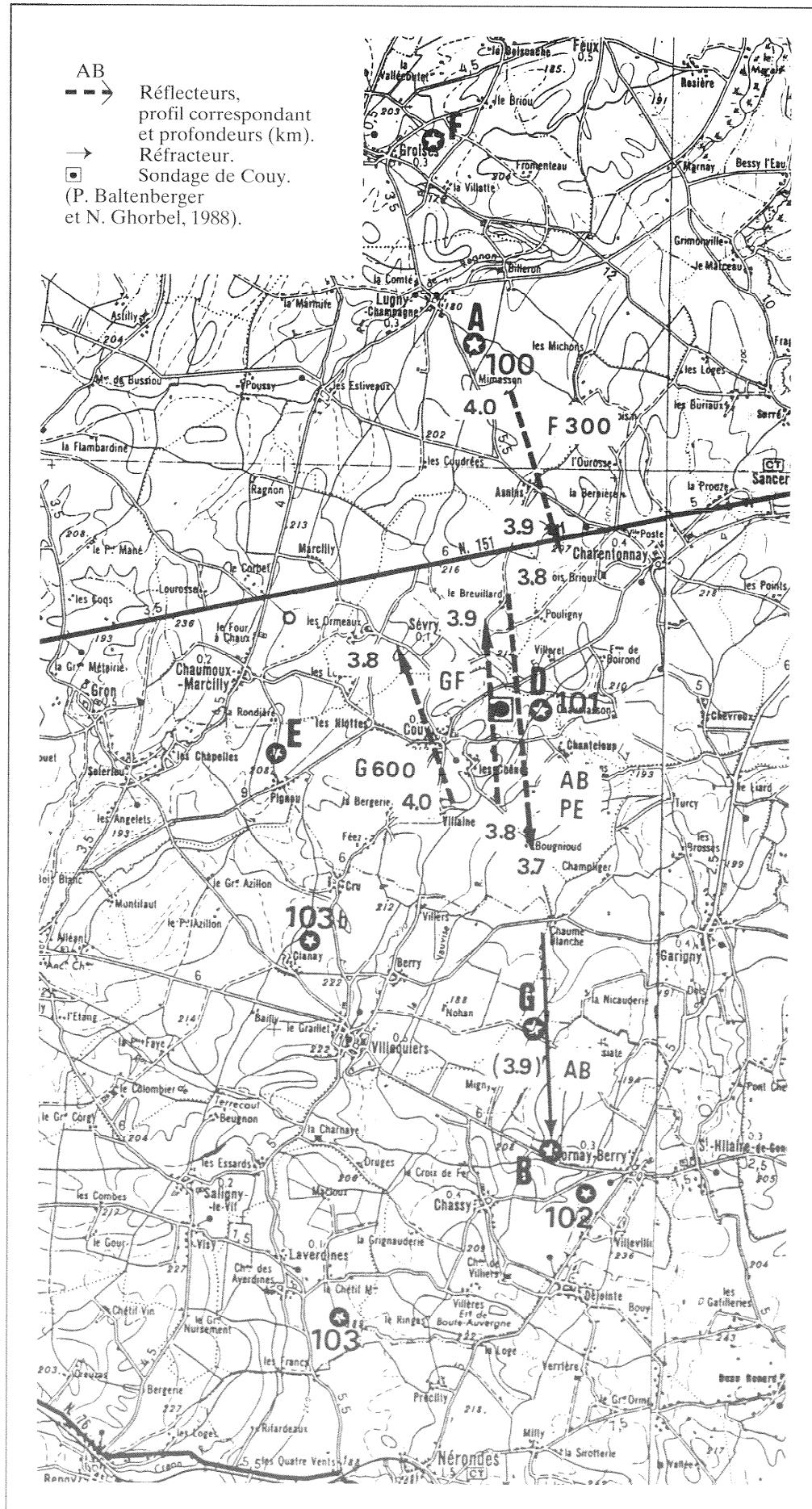


Fig. 18. - Localisation horizontale des éléments de marqueur profond.

inversé de 30 km de long centré sur Couy (P. Baltenberger et B. Bourgeois, 1988) avait pour objectif de vérifier l'existence du réfracteur profond et d'en préciser l'extension.

L'existence d'un corps rapide, dont le toit est situé à environ 4,0 km de profondeur, avec une vitesse de 7,3 km/s, est reconnue à partir de 2 à 3 km au sud du forage de Couy et se poursuit sur 10 km au moins dans cette direction.

En raison des incertitudes dans le tracé des dromochroniques, liées aux irrégularités du toit du socle, la limite nord du réfracteur est incertaine ; les variantes d'interprétation la localisent entre 2 km au nord et 3 km au sud du forage. L'étude a également montré un net approfondissement du socle, d'environ 0,5 km à 3 km au nord du forage.

Conclusion

L'expérience acquise dans l'interprétation des données de sismique réflexion autour du forage de San-

cerre-Couy montre l'inéquation des traitements standards à un contexte du socle métamorphique ; par contre des traitements spécifiques, pilotés par les données elles-mêmes et ne contraignant pas les résultats par un modèle fixé a priori, fournissent une approche satisfaisante de la réalité géologique. Dans ce même contexte, l'interprétation des profils sismiques de surface reste difficile, même en tenant compte de l'apport considérable que représente un bon calage sur des mesures de diagraphies.

La combinaison de la sismique réflexion et de la sismique réfraction a permis de définir la position des réfracteurs et/ou de réflecteurs et de déterminer les vitesses de part et d'autre de ces marqueurs : les deux plus intéressants à l'aplomb du forage de Sancerre-Couy sont les suivants :

- vers 4 km (selon la sismique-réfraction) ou 5 km (selon la sismique-réflexion), un marqueur d'extension limitée séparant deux milieux de vitesses 5,3 km/s (*cf.* le modèle de N. Ghorbel signalé ci-dessus) et 7,4 km/s (écaillage ?) ;
- vers 7 à 8 km (selon la sismique-réflexion), un réflecteur dont une partie pourrait coïncider avec le toit du corps magnétique principal.

Références

- BALTBENBERGER P. (1971). - Contribution à l'étude de la croûte terrestre dans le sud et le sud-est du Bassin parisien. *Bull. BRGM Fr.*, (2), n° 3, pp. 171-175.
- BALTBENBERGER P. (1972). - Étude sismique de la zone d'anomalie magnétique du bassin parisien. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **276**, (D), pp. 277-280.
- BALTBENBERGER P., GHORBEL N. (1988). - Nouvelles interprétations de données sismiques obtenues dans la partie sud de l'anomalie magnétique du Bassin parisien, en septembre 1985 et mars 1986. Documents du BRGM, n° 318, pp. 115-138.
- BALTBENBERGER P., BOURGEOIS B. (1988). - Nouvelle investigation sismique dans la région de Couy (Cher). Documents du BRGM, n° 138, pp. 259.
- BLANCO J. (1988). - Compte rendu de l'intervention de la cellule PSP au sein du projet Géologie Profonde de la France. Note interne SNEA(P) n° 306/88.
- BOYER A. (1984). - Étude de l'anomalie magnétique du Bassin de Paris par les méthodes sismologiques et magnéto-telluriques. Thèse 3^e cycle, Université Paris VI, 196 p.
- DE VOOGD B., AUTRAN A., WEBER C. (1992). - New insights on the origin of the Paris basin magnetic high from reprocessing of seismic reflection profiles near the Couy deep borehole. 6^e Symposium international, Continental Scientific Drilling Programs, Abstracts, Documents du BRGM, n° 213, p. 75.
- DUPIS A., BALTBENBERGER P., BOYER A. (1984). - Études sismiques et magnéto-telluriques complémentaires de l'anomalie magnétique du Bassin parisien. Documents du BRGM, n° 81-2, pp. 17-44.
- DUPIS A., BALTBENBERGER P., BOYER A., GHORBEL N., MARIE P., PETIAU G., SHOUT H. (1985). - Étude magnéto-tellurique et sismologique complémentaire de l'AMBp. Documents du BRGM, n° 95-2, pp. 47-79.
- DUPIS A., BALTBENBERGER P., FABRIOL H., GASMI M., GHORBEL N., SHOUT H., TERA A. (1990). - Contribution de la magnéto-tellurique et de la sismique à l'étude de l'anomalie magnétique du Bassin parisien. *Bull. soc. géol. Fr.*, (8), VI, n° 5, pp. 749-766.
- GHORBEL N. (1987). - Étude sismique et magnéto-tellurique du socle et de la couverture sédimentaire dans la partie sud de l'AMBp, le Val de Loire et le Nivernais. Thèse université P. et M. Curie, Paris VI, déc. 1987.
- HIRN A., PERAGALLO J., PERRIN J. (1986). - Investigation par méthode sismique de la partie sud de l'AMBp (région de Couy-Cher). Rapport BRGM 86 DT 015 GPH, juin 1986.
- MECHLER P., CHANET A. (1988). - Tomographie sismique. Interprétation des données acquises dans les forages de Sancerre-Couy. Documents du BRGM, n° 138, pp. 27-31.
- O'Rourke T. (1988). - Reprocessing of bore-hole and surface seismic well Couy 1b - Line Cher 34. Documents du BRGM, n° 138, pp. 245-258.
- O'Rourke T., WEBER C. (1990). - Reinterpretation of bore-hole and surface seismic data in metamorphic series (Sancerre-Couy). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), VI, n° 5, pp. 767-777.
- PAUL A., JEGOUZO M., MECHLER P., MILLON R., TRACK A., VEZAT R. (1988). - Forage de Sancerre-Couy. Signification des réflecteurs sismiques dans le socle. Documents du BRGM, n° 138, pp. 5-25.
- WEBER C. (1988). - Interprétation de la sismique-réflexion dans des séries métamorphiques : l'expérience du forage GPF de Sancerre-Couy (France). *Géochronique*, n° 28, pp. 16-18.