

Forage scientifique de Sancerre-Couy : les diagraphies dans le socle

Raymond MILLON ⁽¹⁾, Franck ZWINGELBERG ⁽²⁾

Mots clés : Diagraphie, Interprétation, Socle, Amphibolite, Ortho-gneiss.m
Cher département (Sondage GPF Sancerre-Couy), Bassin parisien.

Les diagraphies du socle dans les forages de Sancerre-Couy ont été réalisées en plusieurs étapes :

- octobre 1986 de 450 m à 1 250 m,
- avril 1987 de 450 m à 1 800 m,
- juillet 1987 : forage 1a de 1 800 m à 2 675 m,
- novembre 1987 : forage 1b de 1 800 m à 3 500 m.

Les tableaux synoptiques 1 et 2 donnés en fin du premier chapitre, (figure 11) montrent les méthodes et paramètres utilisés et les organismes ou sociétés qui ont fait ces diagraphies.

Première interprétation rapide des diagraphies (R. Millon et R. Vézat, 1988)

Cette interprétation a été faite en deux temps :

- dans la partie carottée du socle (950 à 1 800 m), caractérisation des principaux faciès de roches par leurs paramètres géophysiques extraits des diagraphies ;
- dans la partie carottée à 3 % (au-delà de 1 800 m), utilisation des résultats précédents pour aider à la réalisation du log pétrographique.

R. Vézat *et al.* (1988), avec l'appui des analyses chimiques de cuttings et des rares carottes recueillies, ont établi le log pétrographique du forage 1a entre 1 800 m et 2 700 m ; de même A.M. Hottin *et al.* (1988), avec en plus les résultats de l'étude minéralogique, a réalisé le log pétrographique du forage 1b de 1 800 m à 3 500 m.

Même dans la partie carottée, les diagraphies ont permis de préciser certaines limites pétrographiques là où le carottage n'était pas parfait et notamment pour les zones fracturées ou bréchiques.

Les principaux faciès pétrographiques observés dans la partie carottée du socle de Couy (950-1 800 m) sont les suivants :

- orthogneiss à biotite et grenat ;
- orthogneiss leucocrate ;
- amphibolites ;
- brèches, cataclasites, mylonites.

Pour mieux visualiser ces observations et les exemples qui suivent, le lecteur se reportera au log composite en tête de l'ouvrage.

Ces faciès ont des signatures différentes sur les diagraphies selon les paramètres étudiés. On note principalement que la composition de la roche influe sur le paramètre de radiométrie gamma (gamma-ray naturel) et que l'état d'altération et de fracturation est révélé par les paramètres de vitesse sonique, de résistivité, de densité et de porosité neutron.

C'est ainsi que les amphibolites ont un faible taux de rayonnement gamma (20-40 API) alors que les orthogneiss à biotite et grenat ont un taux dépassant 50 API ; les orthogneiss leucocrates ont un taux voisin de 100 API. Cette différence apparaît en relation avec la teneur en K⁴⁰ et donc avec la plus ou moins grande abondance de minéraux potassiques (feldspath notamment).

Les 400 m de gneiss, entre 1 127 m et 1 538 m, montrent bien une radioactivité 4 à 5 fois plus forte que les amphibolites voisines ; le contact amphibolite-gneiss à 1 127 m est particulièrement contrasté et démonstratif à cet égard.

L'altération et la fracturation ayant pour effet de faire baisser la vitesse sonique et la résistivité, on observe les variations suivantes :

	roche saine	roche altérée ou fracturée
Amphibolites	V = 6 – 6,2 km/s $\rho = 300 \text{ à } 2\,000 \text{ ohm.m}$	V $\leq$ 5 km/s $\rho < 120 \text{ ohm.m}$
Orthogneiss	V = 5,3 – 6 km/s $\rho = 200 \text{ à } 1\,000 \text{ ohm.m}$	V $\leq$ 4,5 km/s $\rho < 100 \text{ ohm.m}$

Il y a évidemment des roches plus ou moins altérées et/ou fracturées avec des propriétés intermédiaires :

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

(2) Université d'Aix-la-Chapelle, FRG.

ainsi, de nombreux passages d'amphibolites ont une vitesse de l'ordre de 5,5 km/s, intermédiaire entre un état sain et un état altéré.

Une autre propriété peut être encore déduite du contact amphibole-gneiss à 1 127 m :

- au-dessus, les amphibolites ont une vitesse de propagation maximum approchant les 7 km/s et une densité maximum de 3,1 ;
- en dessous, les gneiss ont une vitesse maximum de 6 km/s et une densité très constante voisine de 2,7.

Les brèches (cataclasites, mylonites) montrent une vitesse comprise entre 4 et 5 km/s et une résistivité variant entre 20 et 200 ohm.m ; exceptionnellement, certaines brèches présentent une vitesse élevée : 5,5, voire 6 km/s, probablement parce qu'elles ont été consolidées et recimentées.

Un exemple intéressant est la brèche puissante recoupée entre 1 366 et 1 373 m : elle se caractérise par une forte diminution de la vitesse et de la densité, mais aussi par une augmentation de la porosité. Le pic intense de radioactivité bien visible se situe dans l'éponte inférieure (1 374 à 1 376 m) constituée d'une roche hypovolcanique.

Ces relations entre les roches et leurs paramètres physiques peuvent être illustrées par des diagrammes croisés établis manuellement ; les paramètres les plus sensibles étant la vitesse sonique, la résistivité, la radioactivité naturelle et dans une moindre mesure la susceptibilité magnétique. L'exemple (fig. 1 et 2) des diagrammes (vitesse, densité) pour les amphibolites et les orthogneiss montre bien la possibilité de différencier ces roches au moyen de leurs propriétés physiques tirées des diagraphies.

Interprétation assistée par ordinateur (F. Zwingelberg, 1990)

Sous la direction de J. Wohlenberg (1), F. Zwingelberg a préparé un diplôme de géophysique appliquée en interprétant les diagraphies du forage Sancerre-

Couy 1a d'une manière systématique par ordinateur : utilisant les logiciels développés dans le projet « EFA-log » de l'Université d'Aix-la-Chapelle, il a réinterprété les diagraphies du forage 1a, lui aussi en deux étapes :

- étalonnage dans la partie intégralement carottée (950-1 800 m) dans le but de caractériser les divers faciès pétrographiques par leurs propriétés physiques mesurées à partir des diagraphies ;
- application des fourchettes de propriétés physiques à la partie peu carottée (1 800-2 700 m) de façon à déterminer le log pétrographique avec l'aide des informations préexistantes (analyses des cuttings, carottage partiel).

La méthodologie de ce travail peut être résumée sur un diagramme (fig. 3) où apparaît, cernée par un trait mixte, la partie originale de la thèse. En effet, l'étude couplée des carottes et des diagraphies effectuée par les géologues de GPF avait abouti à un premier log pétrographique, amélioré ensuite par les études de lames minces (A.M. Hottin *et al.*) pour donner le « Litholog élaboré ».

Les diagraphies utilisées sont exclusivement celles réalisées par la compagnie Schlumberger (2) :

- radioactivité : Gamma-ray (CGR), Thorium, Uranium, Potassium ;
- densité (RHOB), facteur photoélectrique (PEF) ;
- porosité neutron (NPHI) ;
- résistivité : latéolog (LLD), microlog focalisé (MSFL) ;
- sonique (DT) ;
- diamètre (BHC).

(les diagraphies magnétiques (GPIT modifié), température et P.S., n'ont pas été prises en compte).

Dans un premier temps, les données brutes de diagraphies ont été corrigées en ce qui concerne la profondeur, le diamètre et les effets de forage ; les données pétrographiques et les analyses de cuttings ont été saisies pour former une banque de données lithologiques, améliorée ensuite par la prise en considération des études de lames minces aboutissant au « Litholog élaboré ».

(1) Unité d'enseignement de géophysique appliquée ; Université technique de Rhénanie-Wesphalie d'Aix-la-Chapelle (Allemagne).

(2) Voir correspondance des notations sur la figure 11 de l'introduction.

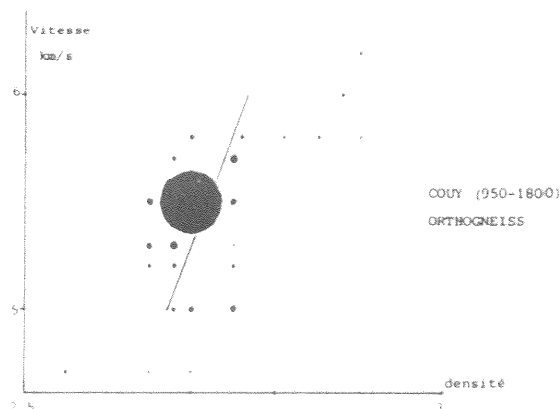
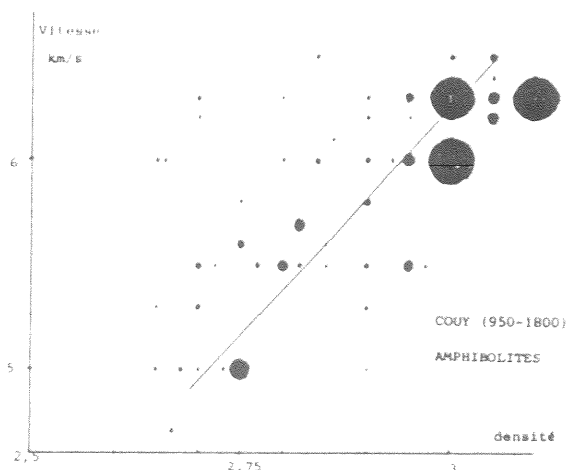


Fig. 1 et 2. - Diagrammes (vitesse, densité) pour les amphibolites et les gneiss.

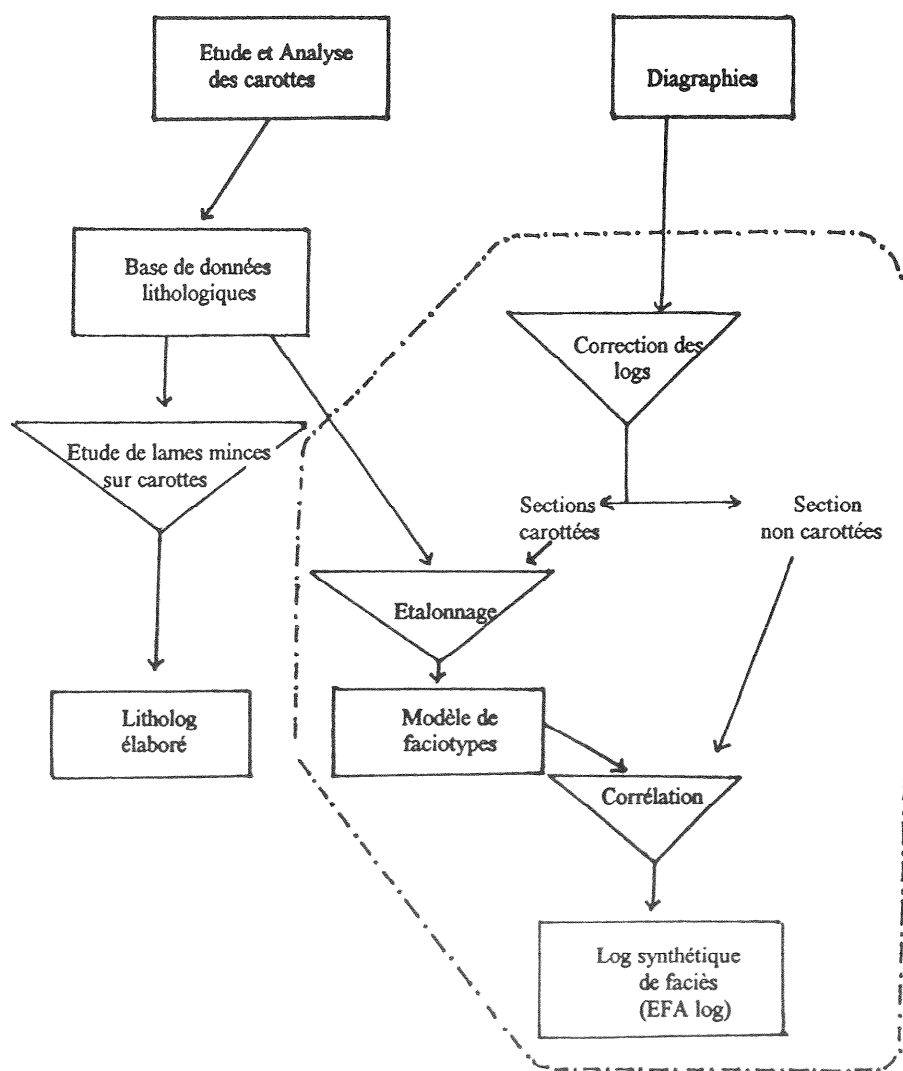


Fig. 3. - Diagramme montrant les principales étapes de l'interprétation des diagraphies du forage Sancerre-Couy 1a (d'après F. Zwingelberg).

Les données lithologiques de la partie carottée du forage ont alors été confrontées aux diagraphies correspondantes : c'est la phase d'étalonnage qui permet d'assigner à chaque lithofaciès une fourchette de valeurs pour chaque paramètre physique étudié.

Pour arriver à ce premier résultat, des études particulières ont été effectuées pour vérifier la validité des données de diagraphies : par exemple, les diagrammes croisés (fig. 4 et 5) qui comparent les teneurs en potassium obtenues par géochimie et le log « POTA » et aussi les valeurs de densité mesurées sur carottes et sur le log « RHO B ».

De même, des histogrammes ont été tracés pour différencier certains faciès d'après leur réponse en diagraphie : ainsi pour les gneiss et amphibolites (fig. 6) où la coupure est une teneur de 5.4 ppm Th environ.

Pour chaque paramètre physique, il a été ainsi possible de définir une fourchette de valeurs concernant chaque faciès pétrographique :

- soit les valeurs extrêmes rencontrées,
- soit des valeurs avec une fourchette volontairement réduite (5 % dans l'exemple du tableau 1).

Cet étalonnage sur la partie carottée du forage a été réalisé d'abord manuellement pour obtenir un log com-

posite qui a servi ensuite de base pour une interprétation statistique.

Les résultats du tableau 1 peuvent être représentés sous forme de diagrammes (fig. 7) qui permettent une meilleure visualisation des propriétés physiques de chaque faciès.

La confrontation des limites lithologiques et des limites géophysiques déduites des diagraphies dans la partie carottée a permis d'établir le modèle des « lithofaciès » qui sert ensuite de base pour l'interprétation pétrographique de la partie non carottée.

Ce modèle repose sur un système simple constitué d'une série de questions successives en fonction des différentes valeurs mesurées des logs, classées selon un schéma déterminé en fonction des résultats du calibrage (fig. 8). La structure du modèle discriminatoire ainsi présentée dépend du nombre de lithotypes différenciés et/ou des limites choisies pour d'autres faciotypes d'après leurs caractéristiques physiques.

Ainsi pour distinguer les gneiss des amphibolites, des études empiriques effectuées par l'auteur donnent une valeur de coupure à 5.4 ppm pour le thorium (fig. 6). Le modèle distingue des zones avec des teneurs en thorium supérieures à 5.4 ppm qui consti-

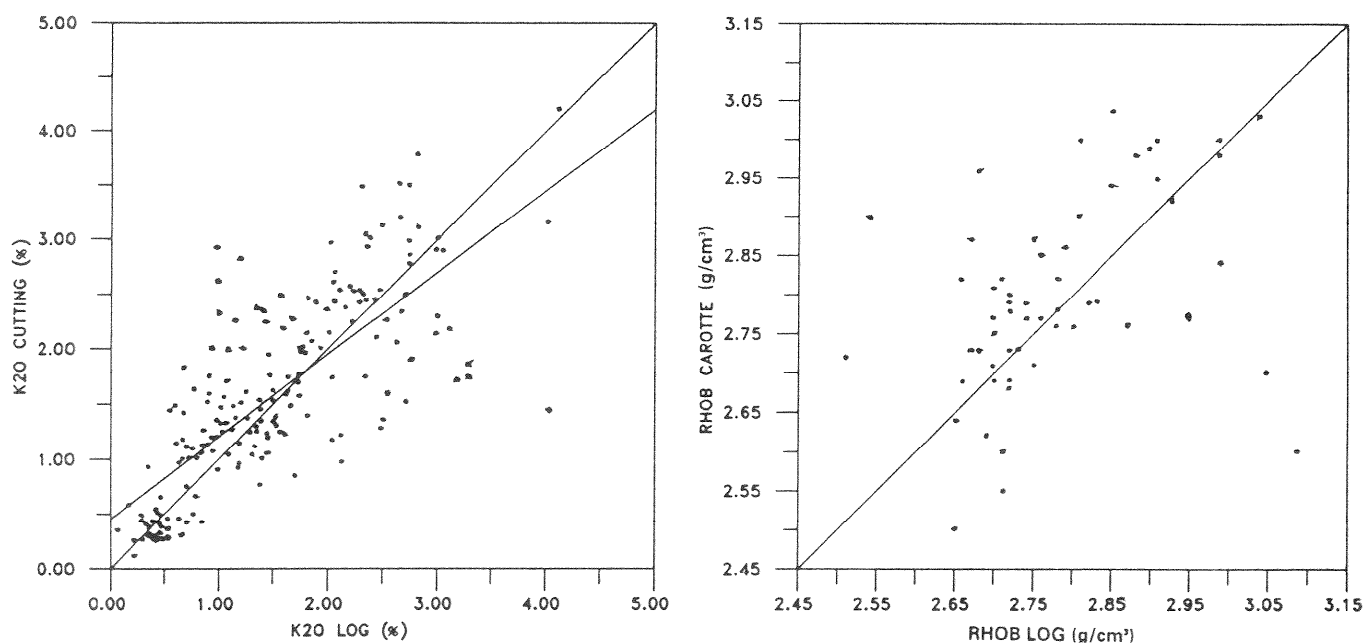


Fig. 4 et 5. - Comparaison des teneurs en potassium obtenues par géochimie et des données du log POTA, et valeurs de densités déterminées par des méthodes pétrophysiques comparées aux données du log RHOB.

tuent un log autonome. Ces zones sont présentées dans les six autres logs (POTA, RHOB, NPHI, CGR, MSLF et LLD). Il en résulte sept nouveaux logs qui ne concernent que les zones ayant une teneur supérieure à 5,4 ppm et, de prime abord, présentant un caractère gneissique. Le log POTA nouvellement constitué et délimité en zones par le questionnaire sur le thorium sert de point de départ au questionnaire suivant (à droite de la figure 8), avec une teneur en potassium (POTA) de plus ou moins 2,25 % (poids - %), etc. Le modèle donne, d'après le dernier questionnaire, des zones avec des paramètres caractéristiques (faciotypes) représentant les différents lithotypes (fig. 8).

Le déroulement du questionnaire et l'ordre de succession des questions (priorités des questionnaires) sont adaptés aux lithotypes du forage de Sancerre-Couy. La définition des priorités est déterminante pour la qualité des résultats. Afin d'améliorer la validité des différents faciotypes, on utilise dans un premier temps les logs les moins affectés par les effets des sondages et présentant la plus forte capacité de différenciation lithologique. Les logs THOR et POTA apparaissent comme particulièrement fiables pour les rattachements lithologiques, par rapport aux logs de densité (log RHOB) ou de porosité neutron (NPHI). Dans des domaines partiels, les logs CGR, LLD et MSLF permettent de bonnes discriminations. Les logs URAN, DT et PEF se prêtent moins bien à la différenciation des faciotypes existant dans le forage de Sancerre-Couy.

Les faciotypes du modèle sont comparés avec leurs homologues correspondants du litholog. Pour les passées de grande puissance, où les résultats du modèle diffèrent des indications univoques fournies par le litholog, il a fallu modifier ou affiner le questionnaire présenté. Quant à savoir quels paramètres ou priorités du questionnaire modifier, sans pour autant porter atteinte à la corrélation générale avec d'autres faciotypes, on peut résoudre cette question empiriquement

en optant pour une représentation sous forme de diagrammes croisés (fig. 10). L'application des progiciels WDS* permet de mettre en relation les données des différents logs. Les représentations des deux ou trois logs sur des diagrammes croisés donnent, avec les données discriminées des faciotypes du modèle, une vue d'ensemble des diagrammes les plus significatives pour délimiter les faciotypes.

C'est ainsi que le complexe leptyno-amphibolique recoupé par le forage de Sancerre-Couy a pu être différencié de façon significative en 14 faciotypes ; la liste en est présentée sur la figure 7. On y trouve :

- deux amphibolites, deux gneiss-amphiboliques et deux gneiss colorés qui se distinguent par un contenu différent en grenat,
- un gneiss intermédiaire,
- une amphibolite, un gneiss et un gneiss intermédiaire, altérés,
- un lamprophyre,
- un gneiss plus riche en potassium et un autre plus riche en quartz,
- une trondhjemite,
- une brèche.

Les diagrammes des sections peu carottées sont alors corrélées avec le modèle de faciotypes et l'on obtient, par application des logiciels précités, et en tenant compte des analyses de cuttings et de l'étude des rares carottes, le log synthétique de faciès (EFA log).

Les résultats sont présentés sur des planches couleur ; un extrait, en noir et blanc, est donné en figure 9, à titre d'exemple ; on y trouve, de gauche à droite :

* Progiciel fonctionnant sur ordinateur personnel et mis à disposition par Western Atlas International

	THOR (ppm)	POTA (Gew%)	RHOB (g/ccm)	NPHI (p.u.)	CGR (API)	LLD (ohmm)	MSFL (ohmm)	URAN (ppm)	PEF (bar/el)	DT (µs/ft)
FACIOTYPES										
Amphibolite 1a 1051 MW	0,3	0,23	2,82	8,1	7	70	41	0,0	3,5	46
	3,2	1,03	2,93	14,2	27	626	761	1,6	5,0	55
Amphibolite 1b à grenat 1784 MW	0,4	0,30	2,94	6,0	8	93	50	0,0	3,9	44
	3,1	1,02	3,08	15,0	25	1826	1564	1,6	5,6	52
Amphibolite 1c altérée 1763 MW	0,5	0,39	2,60	11,5	10	24	12	0,0	3,3	49
	6,2	1,80	2,89	22,9	48	411	419	2,6	4,9	67
Gneiss 2a amphibolique 492 MW	3,0	0,82	2,82	2,0	31	95	57	0,4	3,5	48
	7,8	1,76	2,92	13,8	56	15406	1823	2,6	4,9	55
Gneiss 2b amphibolique 97 MW	2,5	0,58	2,93	3,3	30	113	46	0,2	3,9	46
	7,1	1,46	3,04	13,6	46	9517	1735	10,9	5,4	55
Lamprophyre 3 57 MW	10,6	3,76	2,63	6,5	108	73	18	2,2	3,7	52
	25,0	4,28	2,79	14,8	176	922	793	7,4	4,8	61
Gneiss 4a dioritique 871 MW	1,2	0,50	2,62	2,5	15	62	18	0,3	3,0	49
	6,4	2,13	2,81	13,6	59	3627	1188	2,9	4,4	60
Gneiss 4b riche en grenat 75 MW	0,0	0,62	2,83	5,2	13	832	224	0,2	3,5	44
	3,7	1,11	2,93	9,7	28	4410	1856	3,6	4,6	50
Gneiss 4c granodioritique 1698 MW	6,8	1,56	2,63	3,6	53	55	29	1,0	3,0	51
	11,3	2,24	2,83	13,9	78	1445	1491	3,2	4,3	62
Gneiss 4d altéré 692 MW	5,6	1,03	2,38	9,2	41	20	6	0,9	2,7	53
	11,4	2,15	2,78	22,2	71	312	308	3,2	4,3	73
Gneiss 5a potassique 1219 MW	7,2	2,29	2,63	2,4	66	63	24	0,9	3,0	51
	13,4	3,16	2,84	13,2	101	1527	1336	2,9	4,0	61
Gneiss 5b quartzeux 143 MW	5,6	0,98	2,68	1,1	43	292	639	0,7	3,0	50
	10,4	1,48	2,80	9,9	65	14840	1935	2,6	3,9	53
Trondhjemite 5c 189 MW	6,0	0,72	2,37	0,6	41	37	4	0,9	2,1	51
	10,8	1,42	2,64	12,2	64	3176	1845	2,7	2,9	63
Brèche 6 46 MW	17,5	2,65	2,48	10,0	117	14	13	3,0	3,7	53
	57,2	5,96	2,74	21,9	294	542	232	10,3	4,8	104

Tableau 1. - Valeurs médianes des faciotypes du modèle discriminatoire. MW : nombre de valeurs mesurées qui déterminent le faciotype.

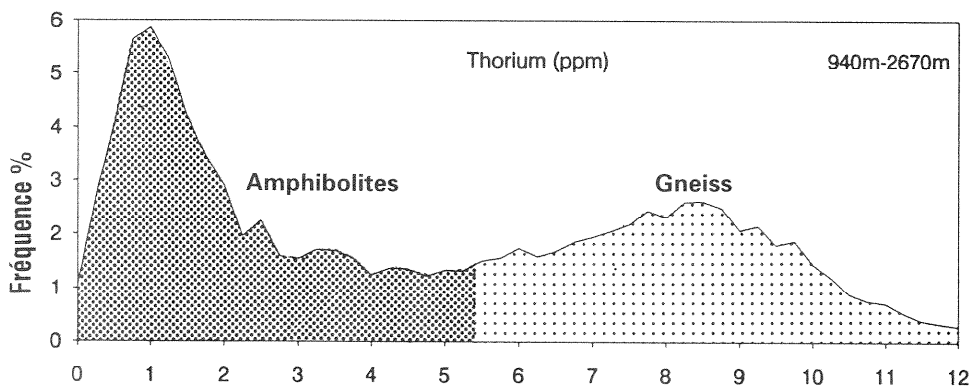


Fig. 6. - Histogramme avec différenciation grossière du gneiss et de l'amphibolite (teneur de coupure = 5,4 ppm).

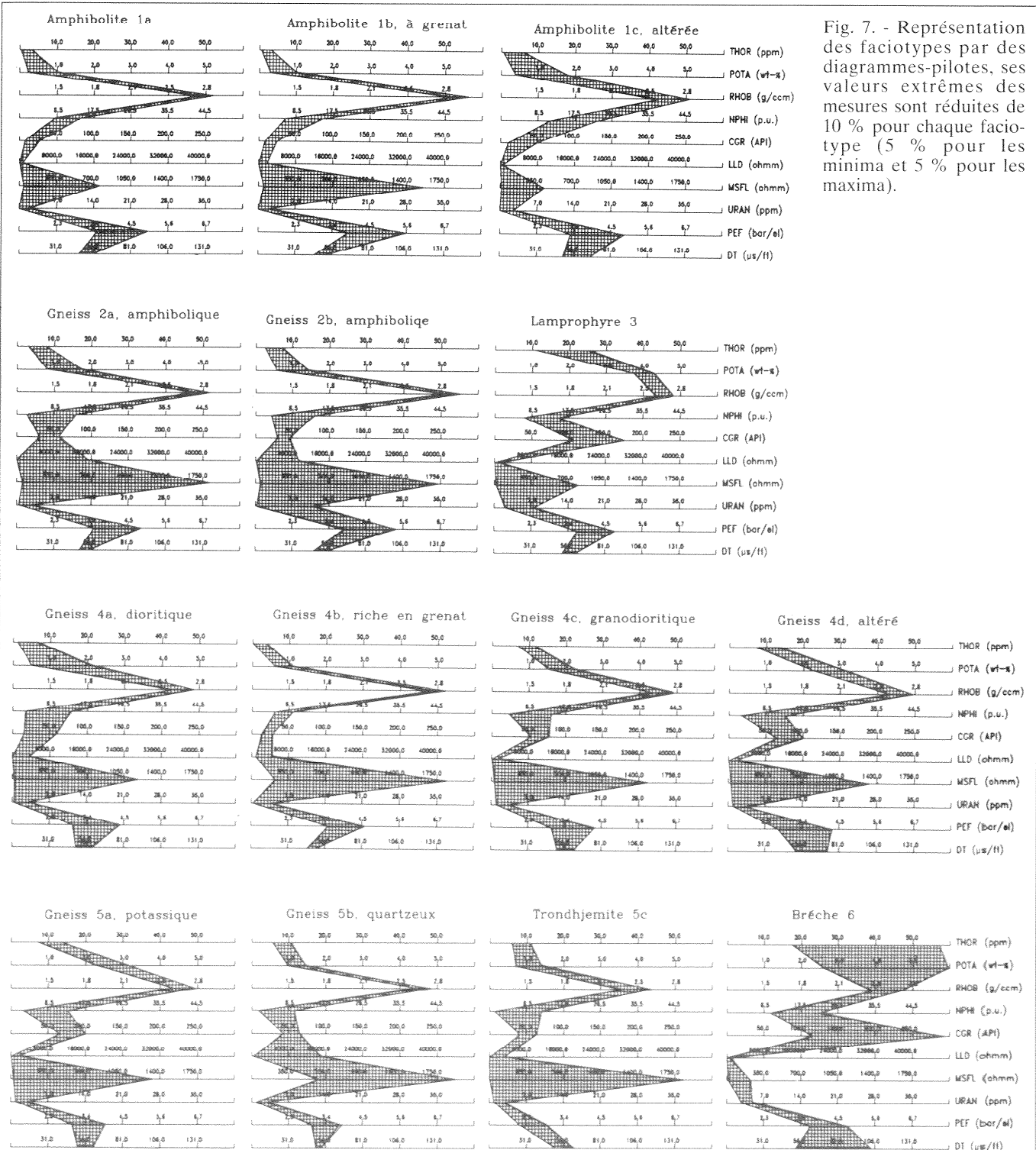


Fig. 7. - Représentation des faciès par des diagrammes-pilotes, ses valeurs extrêmes des mesures sont réduites de 10 % pour chaque faciès (5 % pour les minima et 5 % pour les maxima).

- le litholog initial avec indication de la récupération de carottes,
- le litholog élaboré,
- le log synthétique de faciès (EFA log),
- le modèle de faciotypes avec indication du log diamètre,
- l'échelle de profondeur et le log composite.

Entre le litholog élaboré et le log synthétique de faciès, des barrettes indiquent la bonne (ou mauvaise) corrélation, ce qui permet de juger la validité de la méthode de traitement :

- dans la partie carottée, 69 % des faciotypes distingués par les diagraphies conviennent aux lithotypes correspondants ; il n'y a pas lieu de s'étonner de cette réussite incomplète car les paramètres purement physiques mesurés par les diagraphies ne sont généralement pas en relation univoque avec les critères chimiques, minéralogiques et structuraux utilisés pour l'étude pétrographique des carottes,

- dans la partie peu carottée, cette proportion tombe à 43 %.

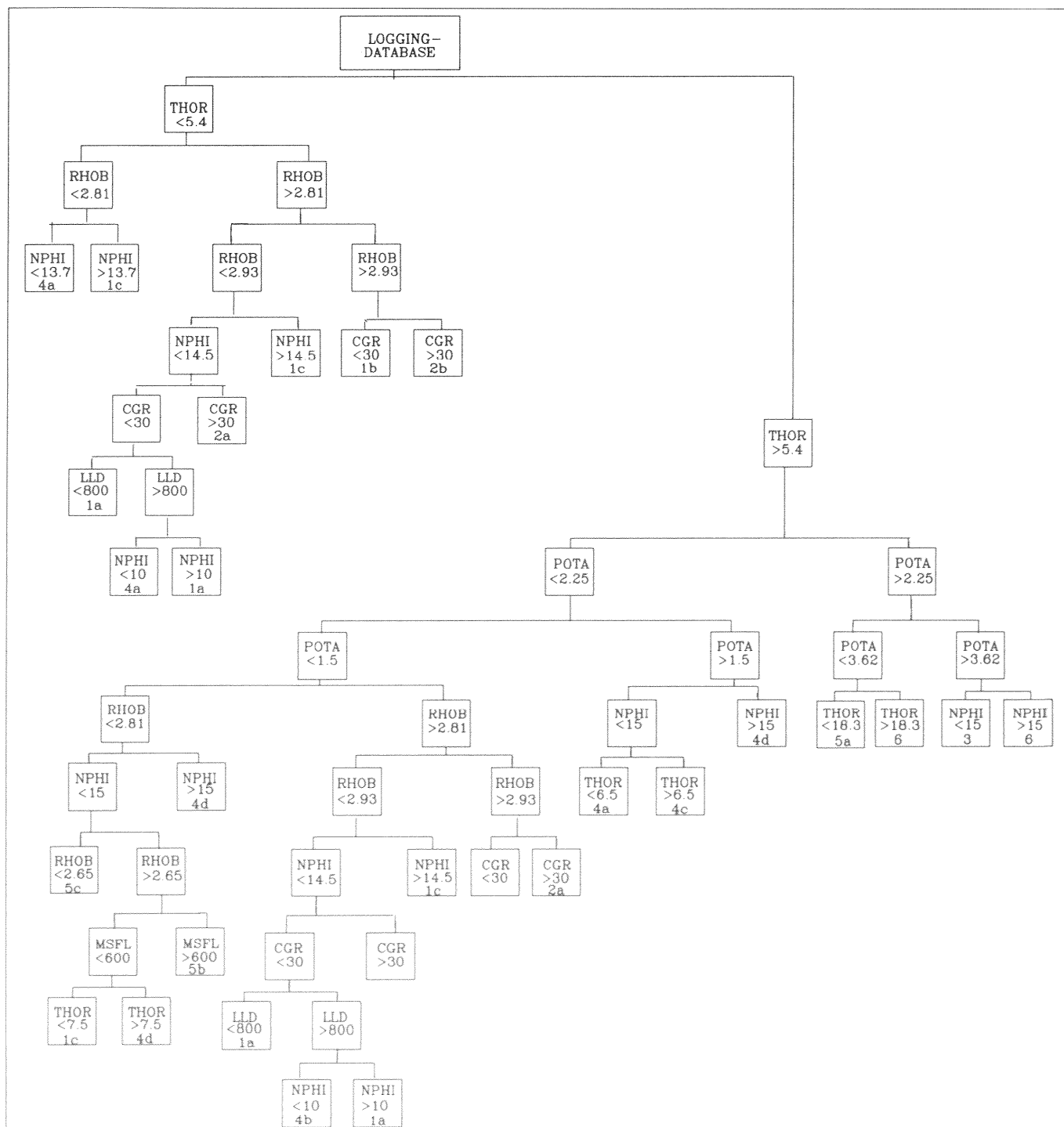


Fig. 8. - Organigramme du modèle discriminatoire pour les mesures obtenues par diagraphies.

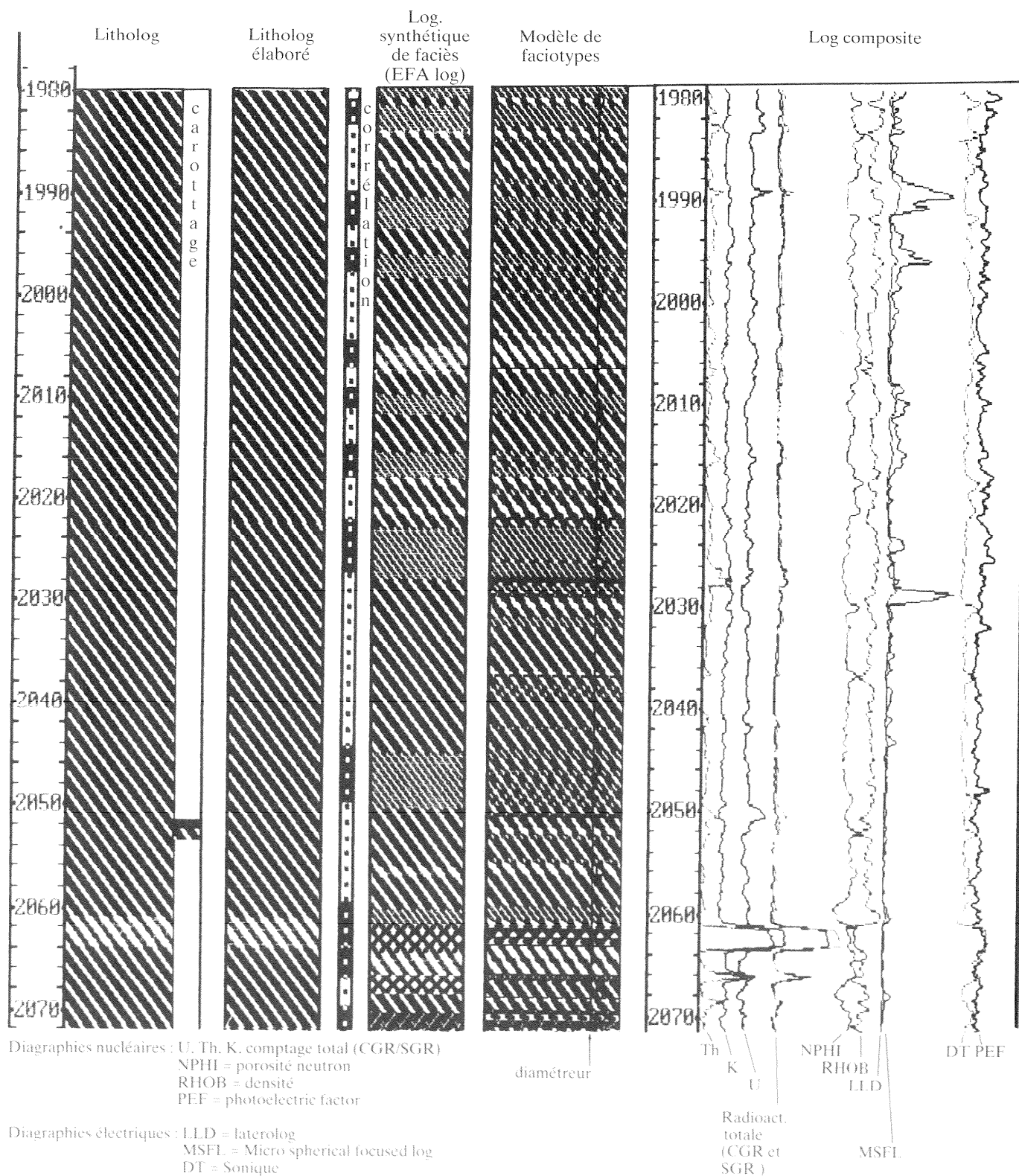


Fig. 9. - Interprétation des diagraphies du socle dans le forage de Sancerre-Couy 1a : « EFA-LOG » : extrait des planches couleurs du diplôme de F. Zwingelberg (1990).

Les résultats de cette interprétation combinée diagraphie-lithologie assistée par ordinateur montrent qu'un log synthétique de faciès pétrographique peut être établi à partir de diagraphies ; cependant il est nécessaire d'avoir un minimum de données lithologiques de base (sections carottées en continu, analyses

chimiques, analyses de cuttings) et un jeu très complet de diagraphies. Il faut néanmoins souligner que ce type d'interprétation ne peut s'appliquer ex abrupto à un autre site pour lequel un autre modèle discriminatoire devrait être mis au point à chaque fois.

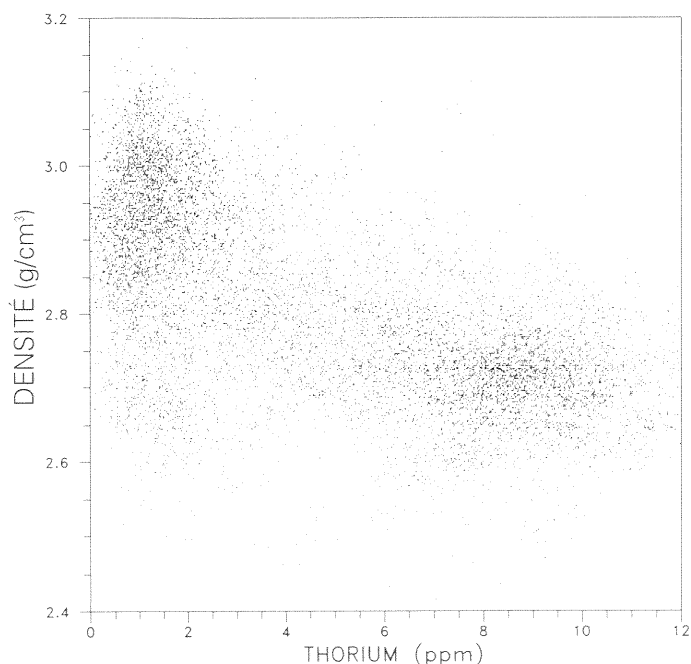


Fig. 10. - Diagramme croisé (densité, teneur en Th) : il montre l'existence de deux populations :
- amphibolites (lourdes et pauvres en Th),
- gneiss (légers et plus riches en Th).

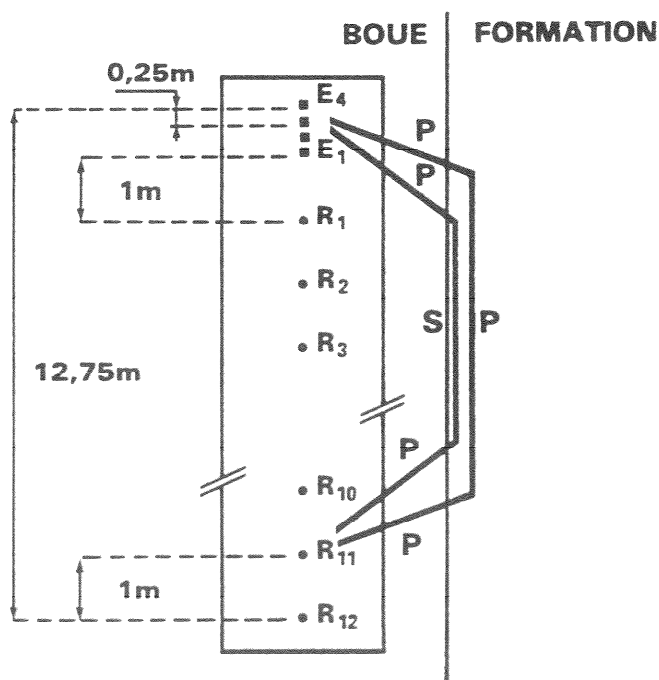


Fig. 11. - Schéma de l'outil EVA.

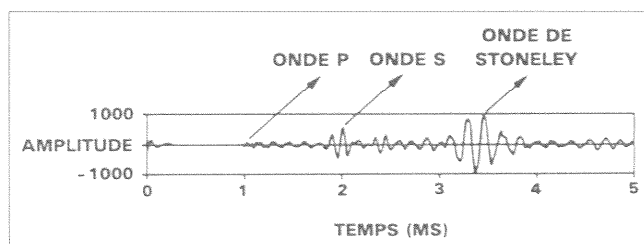


Fig. 12. - Exemple d'une trace enregistrée : trois types d'ondes (P, S, Stoneley) sont visibles.

Essais de caractérisation du socle avec la sonde EVA

(F. Mathieu, F. Schein, Ph. Staron, 1988, SNEA Paris)

La Société Nationale Elf-Aquitaine a effectué une expérimentation de la sonde EVA dans la partie carottée du socle afin d'étudier les possibilités de ces sondes dans des roches métamorphiques.

La sonde EVA (Évaluation des Vitesses et des Atténuations) est un dispositif acoustique multi-émetteurs et multi-récepteurs à enregistrement complet du signal.

Les diverses ondes enregistrées (P, S, Stoneley), répondent aux caractéristiques des terrains traversés (minéralogie, porosité, fracturation) et leur traitement donne accès aux vitesses, amplitudes et périodes qui sont à la base de l'interprétation (fig. 11 et 12).

Les logs EVA ont été recalculés à l'aide des enregistrements gamma-ray.

Le principal résultat de cette expérimentation est la mise en évidence des zones fracturées, ou poreuses et perméables, ou argilisées, à partir de l'atténuation des ondes S et Stoneley (voir fig. 13).

Conclusion

À la lumière des résultats de ces types d'interprétation des diagrapies pour reconstituer un log pétrographique, on peut se demander quelle stratégie il conviendrait d'adopter, dans ce domaine, lors de la réalisation de forages scientifiques.

Il est clair qu'il est nécessaire de faire le maximum de diagrapies, même si l'on ne connaît pas, a priori, toutes les portées de leurs données : le coût des diagrapies est relativement peu important en regard de celui du forage, alors que les informations qu'elles apportent sont considérables. Ainsi les diagrapies d'imagerie de parois (BHTV, FMS, FMI) encore en développement lors du forage de Sancerre-Couy, complètent remarquablement et efficacement la panoplie à présent disponible, comme l'ont montré leurs utilisations dans les sondages GPF de l'Ardèche (Balazuc) ou dans celui du projet HDR (Hot dry rock) de Soultz.

Enfin il est nécessaire de les exploiter avec intelligence, que ce soit manuellement ou avec l'assistance de l'ordinateur ; même dans ce dernier cas, l'interpréteur doit piloter l'opération à l'aide de diagrammes croisés et d'histogrammes et adopter le modèle discriminatoire aux lithologies du site étudié ; toutes les informations obtenues par d'autres méthodes (analyses chimiques, études pétrographiques, etc.) doivent être prises en compte pour ce genre d'interprétation.

Par ailleurs, les diagrapies permettant de donner des valeurs numériques aux propriétés des roches « in situ », elles sont indispensables à l'interprétation des propriétés physiques mesurées à distance depuis la surface, ou au-dessus d'elle, et donc elles sont à la base des extrapolations contrôlées des données du forage, but de toute exploitation régionale de celui-ci.

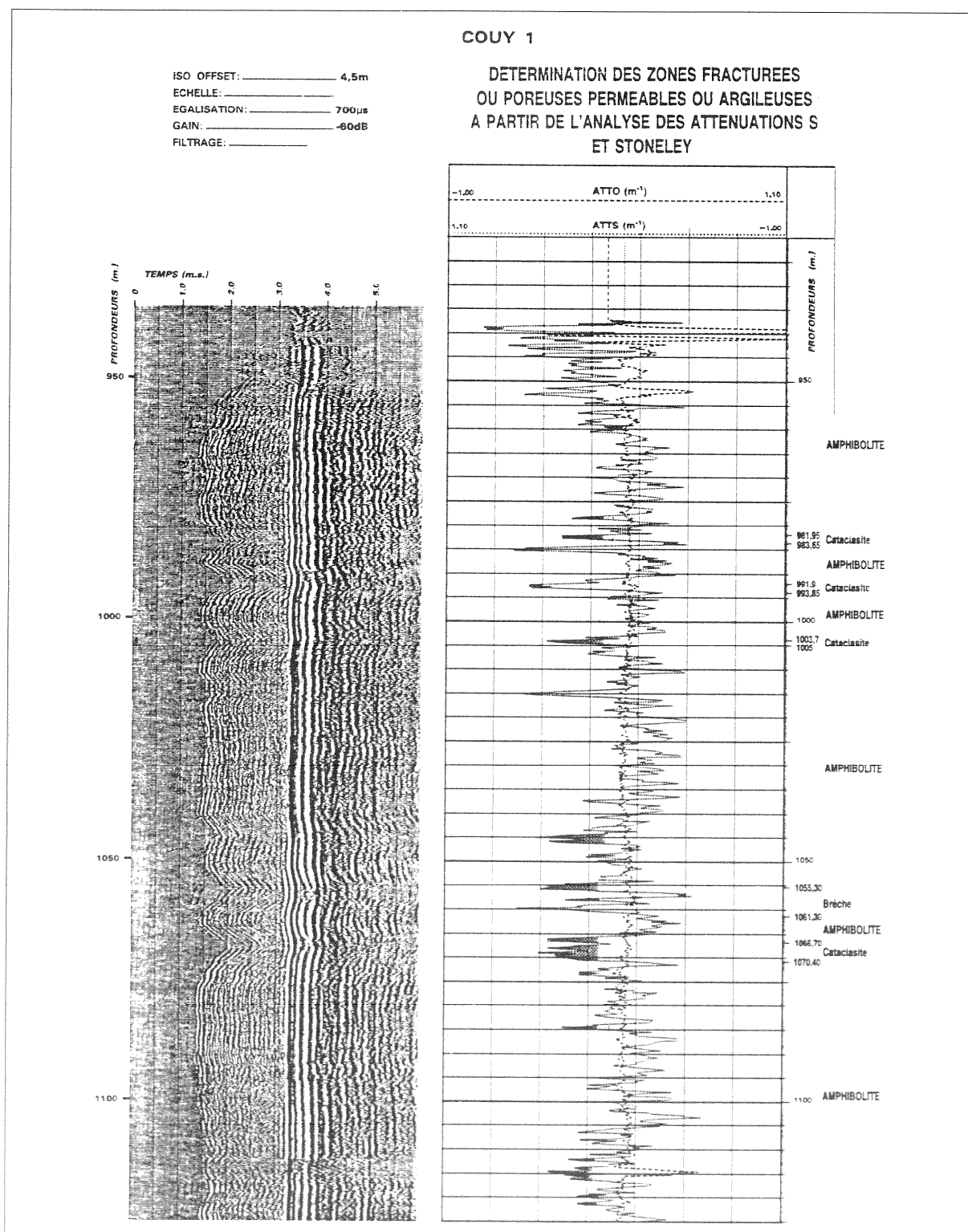


Fig. 13. - Détermination des zones fracturées ou poreuses, perméables ou argileuses, à partir de l'analyse des atténuations S et Stoneley.

Références

- HOTTIN A.-M., LAFORÉT C., VEZAT R., WYNS R., BALÉ P., BOUTIN B. (1988). - Description pétrographique des roches du socle dans le forage de Sancerre-Couy. Documents du BRGM, n° 137, pp. 99-114.
- MATHIEU F., SCHEIN F., STARON Ph. (1988). - Interprétation des données de diagraphies EVA dans le forage de Sancerre-Couy - Documents du BRGM, n° 138 - pp. 53-65.
- MILLON R. (1988). - Les roches du socle dans le forage de Sancerre-Couy. Propriétés physiques déterminées par diagraphies. Application à l'affinage du log pétrographique dans la partie non carottée. Documents du BRGM, n° 137, pp. 79-98.
- VEZAT R., HOTTIN A.-M., GAUTHIER G., MILLON R., NOGUEIRA (1988). - Techniques d'interprétation des analyses chimiques des cuttings du forage de Sancerre-Couy. Documents du BRGM, n° 137, pp. 67-78.
- ZWINGELBERG F. (1990). - Interprétation des diagraphies réalisées dans le socle du forage Sancerre-Couy la (France) - Thèse de l'Université d'Aix-la-Chapelle, 79 p.