

Mémoires pour servir à l'Explication
des Cartes Géologiques et Minières
de la Belgique
Mémoire N° 26

Toelichtende Verhandelingen
voor de Geologische en Mijnkaarten
van België
Verhandeling N° 26

Le sondage d'HAVELANGE

Principales données et aspects techniques

par

GRAULICH J-M., LECLERCQ V. & HANCE L.

MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉCONOMIQUES
ADMINISTRATION DES MINES

Service Géologique de Belgique
13, rue Jenner
1040 BRUXELLES

MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN
BESTUUR VAN HET MIJNWEZEN

Belgische Geologische Dienst
13, Jennerstraat
1040 BRUSSEL

Mém. Expl. Cartes Géologiques et Minières de la Belgique	1989	N° 26	65 p. blz.	20 fig. tabl.
Toelicht. Verhand. Geologische en Mijnkaarten van België				

Le sondage d'HAVELANGE - Principales données et aspects techniques

GRAULICH, J-M. (1), LECLERCQ, V. (2) & HANCE, L. (3)

(1) Rue de Campine, 411 - B4000 LIEGE.

(2) FORAKY S.A., Place des Barricades, B1000 BRUXELLES.

(3) Service Géologique de Belgique, rue Jenner, 13 - B1040 BRUXELLES.

Abstract

The Famenne seismic campaign (1976-1978), which was carried out in the southern part of Belgium, east of the Meuse Valley, has identified a major subhorizontal reflector, marking an angular unconformity, which was thought to represent the Condroz Overthrust. The outcrop of this thrust fault to the north marks the front of the Variscan Orogeny.

The aim of the Havelange well was to reach the thrust fault and to determine whether the rockmass underneath was Caledonian or Hercynian, the latter possibility being not without economic interest.

The well starts within an Upper Devonian formation and then reaches Lower Devonian formations at 1920 m MD. These formations were found till the total depth at 5648 m MD. Palynological data showed the existence of three main faults, respectively at 4850 m MD, 4955 m MD and 5078 m MD. The position of these faults was controlled by different well geophysical data.

The present paper emphasizes the technical aspects of the drilling work, in connection with the geological formation constitution. The geological and geophysical data achieved are discussed.

Remerciements

Le Service géologique de Belgique remercie tous les collaborateurs scientifiques, dont les interventions ont permis d'éclaircir l'un ou l'autre des problèmes posés en cours de forage. Ce sont en particulier les Professeurs J. BRYSCH (Fac. Pol. Mons), D. LADURON (UCL), F. DIMANCHE (ULg) et M. STREEL (ULg), ainsi que Messieurs J. NAUD (UCL), Ph. STEEMANS (ULg) et G. VANDENVEN (Serv. Géol.).

Les figures ont été dessinées avec beaucoup de soin par Monsieur R. TROCH (Serv. Géol.). Madame M. VANBECELAERE et Monsieur A. DEVROU (Foraky) ont réalisé respectivement la dactylographie et les figures du manuscrit initial. La composition définitive a pu être réalisée avec l'aide de Messieurs J. VAN EYCK (Serv. Géol.) et H. WANLIN (C.T.I.). Nous leur exprimons notre plus vive reconnaissance.

C'est aussi avec un réel plaisir que nous évoquons les nombreuses personnes de la Société FORAKY qui, sous la direction de Monsieur Ph. DOM et des ingénieurs P. HIROUX et J. MERCIER, ont participé jour après jour à la réalisation du sondage d'Havelange :

Mrs G. DERA EVE et A. VIDES, chefs de chantier;

Mr M. GORA, inténdant de forage;

Mr K. NAIMI, technicien en fluides d'injection;

Mrs J. VERKAEREN, G. BUENO, M. TOUSSAINT, Y. VIVAR, M. MARQUEZ,... les chefs de poste, sans oublier les nombreux sondeurs qui ont composé les équipes et que nous ne pouvons tous nommer ici.

Last but not least, que soit remerciée également la famille J. BILLY de Nettinne, qui a mis à notre disposition les locaux nécessaires au stockage des échantillons.

Table des matières

Chapitre 1. INTRODUCTION	1
Chapitre 2. COUPE TECHNIQUE DU Puits ET PRINCIPALES ETAPES D'AVANCEMENT	3
Chapitre 3. LES DONNEES GEOLOGIQUES ET GEOPHYSIQUES	7
3.1 Description des cuttings et des échantillons de basket	8
3.2 Description macroscopique des carottes	10
3.3 Interprétation géologique	11
3.4 Remarques pétrographiques et minéralogiques	14
3.4.1 Description pétrographique des quartzites - G. VANDENVEN	14
3.4.2 Association minéralogique dans le microconglomérat à 5370 m - F. DIMANCHE Ulg	14
3.4.3 Analyse des grenats - D. LADURON, UCL	14
3.4.4 Présence de thorianite et de cobaltite dans une roche du sondage d'Havelange . JEDWAB, J., 1985. 14	14
3.4.5 La cobaltite des niveaux profonds du sondage d'Havelange - BERNARD, A. & JEDWAB, J., 1987. 14	14
3.5 Les diagraphies SCHLUMBERGER	15
3.6 Les données sismiques	16
3.7 Les données géothermiques	18
3.8 Niveaux à radioactivité élevée	20
3.9 Les venues de gaz	21
Chapitre 4. LES PROBLEMES TECHNIQUES	23
4.1 La traversée des schistes et grès emsiens	24
4.1.1 Les difficultés rencontrées	24
4.1.2 Technique adoptée	24
4.2 La traversée des quartzites praguais	26
4.2.1 Les difficultés rencontrées	26
4.2.2 Technique adoptée	26
4.3 La déviation du sondage	27
4.3.1 Généralités	27
4.3.2 La déviation du sondage d'Havelange	27
Bibliographie	31
Annexe A. DEROULEMENT DU SONDAGE D'HAVELANGE	33
Annexe B. Données techniques	39
B.1 Caractéristiques de l'installation de surface	40
B.2 Caractéristiques du matériel de forage	41
Annexe C. RAPPORT SUR LES OPERATIONS SISMIQUES DE TROU	43
C.1 Introduction	44
C.2 La campagne VSP 1982 (SCHLUMBERGER 1982)	44
C.3 Le VSP - standard 1984 (SCHLUMBERGER VSP 1984)	44

C.4 L'OVSP 1984 (SCHLUMBERGER OVSP 1984)	45
C.4.1 Comparaison du profil OVSP avec la sismique de surface et interprétation	45
C.4.1.1 Projection du sondage sur les profils.	45
C.4.1.2 Corrélation entre les profils OVSP et les profils sismiques 8 et 13	45
C.4.1.3 Interprétation	45
C.5 Les nouveaux traitements 1986-1987 (SCHLUMBERGER 1986-1987)	52
C.5.1 Le modèle géologique et le traitement VSP	52
C.5.2 Conversion temps-profondeur: les courbes de calibrage.	52
C.5.3 Le sismogramme synthétique	52
C.5.4 Transposition des données géologiques du sondage sur les profils sismiques de surface	56
C.6 Conclusions	57
Glossaire	59

Liste des illustrations

Figure 1. Localisation du sondage d'Havelange	1
Figure 2. Contexte géologique général du sondage d'Havelange	2
Figure 3. Coupes techniques du puits, réalisée et prévisionnelle	4
Figure 4. Courbe des avancements mensuels	5
Figure 5. Coupe géologique passant par le sondage	13
Figure 6. Diagraphies SCHLUMBERGER	15
Figure 7. Localisation des profils sismiques et des sources VSP	17
Figure 8. Gradient géothermique	19
Figure 9. Exemple schématique de diamètreur (caliper) au droit des schistes et grès emsiens	25
Figure 10. La déviation du forage et ses conséquences	28
Figure 11. Projection du sondage dans le plan horizontal	29
Figure 12. Courbe des profondeurs verticales corrigées	30
Figure 13. Modèle géologique utilisé par SCHLUMBERGER	47
Figure 14. Profil OVSP 1984	48
Figure 15. OVSP 1984 - Multi corridor stack	49
Figure 16. Projection du sondage sur le profil sismique n° 8	50
Figure 17. Projection du sondage sur le profil n° 13	51
Figure 18. Courbe temps - profondeur déduite du VSP et du SONIC	53
Figure 19. Profil VSP 1984 avec indication de la zone retenue pour le	54
Figure 20. VSP 1984, corridor stack.	55

Chapitre 1. INTRODUCTION

Le sondage d'Havelange, exécuté par FORAKY S.A. à la demande du Service géologique de Belgique, entre janvier 1981 et novembre 1984, a atteint la profondeur record en Belgique de 5648 m. La justification scientifique du sondage a été développée dans des publications antérieures (GRAULICH, 1980, 1982; STEEMANS & GRAULICH, 1986). Nous en rappellerons les grandes lignes.

Entre 1976 et 1978, le Service Géologique a fait exécuter, par la Société Prakla-Seismos, 182 km de profils sismiques en Famenne, dans un quadrilatère compris entre Assesse, Beauraing, Marche et Bois-et-Borsu (voir GRAULICH 1982). Cette campagne a révélé l'existence d'une discontinuité majeure, légèrement ondulée et inclinant faiblement vers le sud, confirmant ainsi les résultats du profil exécuté dans le Nord de la France (CLEMENT 1963). Peu après, un profil exécuté en Allemagne, près de la frontière belge (BERTELSEN & MEISSNER, 1979) allait rendre plus séduisante encore l'idée de l'unicité du Charriage du Condroz (BLESS, BOUCKAERT & PAPROTH, 1980). Ainsi, la Faille du Midi et son prolongement oriental, la Faille des Aguesse-Asse, se poursuivent en profondeur très loin au sud de leur ligne d'affleurement et délimitent un massif supérieur charrié, plissé et faillé (domaine à diffractions), d'un massif autochtone aux allures beaucoup plus tranquilles (domaine à réflexions).

Le sondage d'Havelange s'inscrit dans le contexte général de l'étude du Charriage du Condroz et avait pour objectif de traverser la discontinuité majeure reconnue sur les profils sismiques et de préciser la nature et l'âge des terrains autochtones. Le choix du site a été guidé par l'allure de la surface de discontinuité qui dessinait un dôme dans la région de Porcheresse (entité d'Havelange).

Le sondage porte le numéro 168 W/314. La localisation précise est donnée à la fig. 1. Le contexte géologique général est rappelé à la fig. 2.

Le présent travail rassemble les principales données géologiques et géophysiques qui ont été acquises, et met l'accent sur les aspects techniques du forage en relation avec la nature géologique des terrains traversés.

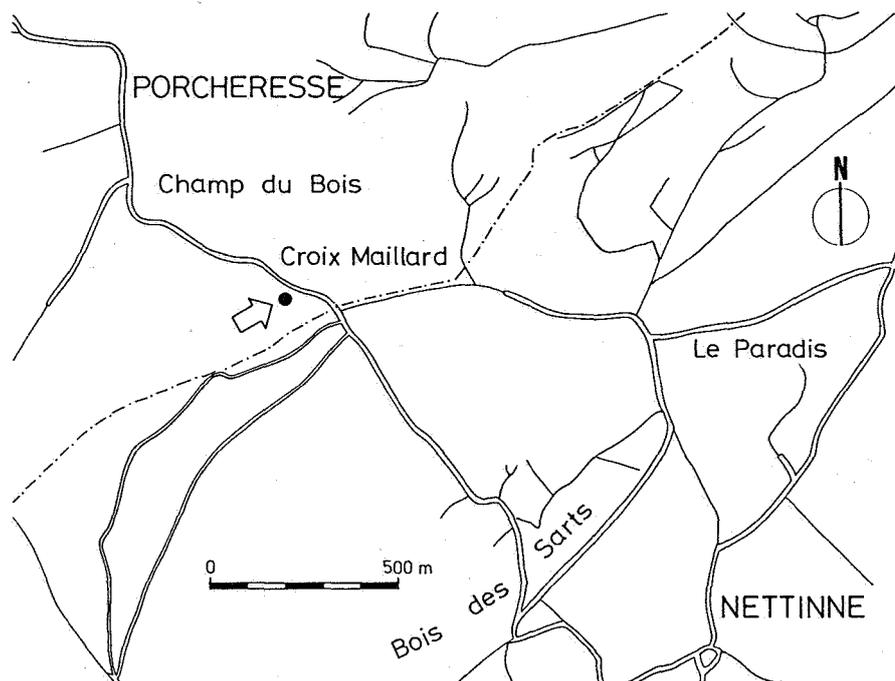


Figure 1. Localisation du sondage d'Havelange: Coordonnées Lambert 2 : X=212.583,18 ; Y=110.294,20 ; Z=286,05

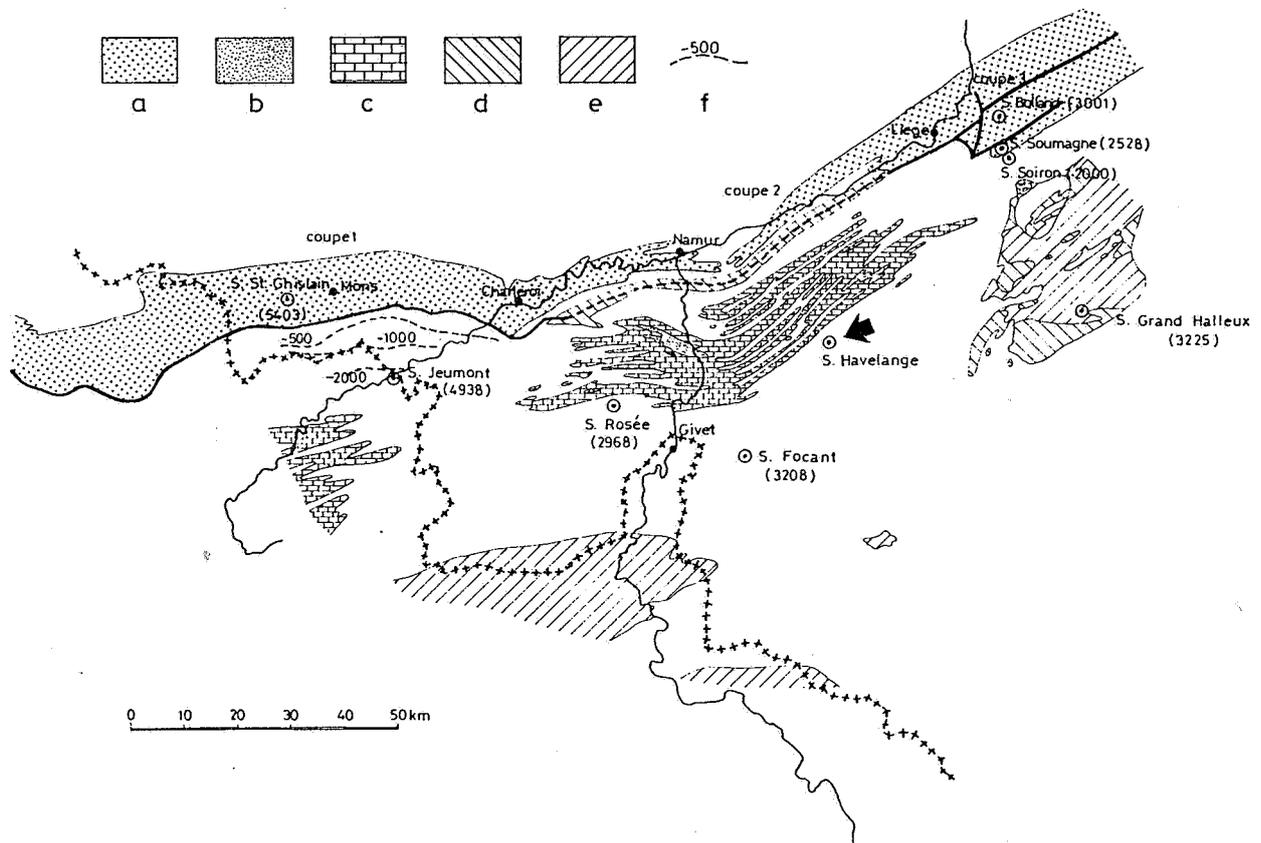


Figure 2. Contexte géologique général du sondage d'Havelange: a : Carbonifère; b : Namurien; c : Dinantien; d : Siluro-Ordovicien; e : Cambrien; d : la faille du Midi en profondeur. (extrait de STEEMANS & GRAULICH, 1986).

Chapitre 2. COUPE TECHNIQUE DU PUIITS ET PRINCIPALES ETAPES D'AVANCEMENT

(Figure 3 et Figure 4; annexes A et B)

Le sondage d'Havelange débute en janvier 1981 en diamètre 17"1/2. Il traverse, successivement et sans incident, les formations du Famennien (schistes et grès), du Frasnien et du Givetien (schistes, calcaires et dolomies). La profondeur de 1700 m est atteinte à la fin mai 1981, après un changement de diamètre à 1500 m. Un premier tubage de 13"3/8 de diamètre est descendu et cimenté jusqu'à 1500 m. Après rectification de la verticalité du puits entre 1500 m et 1700 m, le sondage reprend en diamètre 12"1/4, traverse l'Eifélien (Couvinien auct., calcschistes et grès) et pénètre à 1920 m dans les schistes rouges de l'Emsien. Etant donné l'épaisseur inattendue de la série schisteuse emsienne, le tubage de 9"5/8 de diamètre est descendu au maximum des possibilités techniques, jusqu'à 3015 m. Le sondage se poursuit alors en diamètre 8"3/8 et atteint la base des schistes emsiens vers 3862 m.

Dans l'intervalle 1920 m - 3862 m, la progression du sondage a été ralentie par de nombreuses opérations de reforage et de cimentation, qui traduisent l'instabilité des parois du puits dans les schistes et grès emsiens. Cet aspect sera développé dans le § 1. du chap. 4.

Le sondage traverse ensuite les schistes praguiens (Siegenien auct.) sans difficultés jusqu'à 4078 m et retardé par quelques incidents jusqu'à 4365 m (coincements, rupture, reforage,...). Sous cette profondeur, la rencontre d'un niveau quartzitique très dur provoque de nombreux coincements. Pour y remédier, un tubage 7" de diamètre, suspendu au pied du tubage précédent, est descendu jusqu'à 4436 m. Le sondage reprend en diamètre 6" et quitte les quartzites à 4553 m. Après une série schisteuse, un second niveau de quartzites est traversé entre 4690 m et 4778 m.

Les problèmes techniques posés par le forage des quartzites ont considérablement ralenti l'avancement du sondage (9 mois environ pour forer 413 m). Ce sera l'objet du § 2. du chap. 4.

Au-delà de 4778 m de profondeur, les travaux se poursuivent dans des formations nettement plus tendres, à l'exception d'un niveau particulièrement abrasif, compris entre 5450 m et 5484 m et formé d'un grès fin à grenats. Cependant, de nombreuses difficultés liées à la déviation du sondage (coincements, rupture du train de tiges,...) vont ralentir l'avancement et aboutir à l'arrêt du sondage à la profondeur de 5648 m, le 02 novembre 1985.

Le problème particulier de la déviation du sondage sera commenté dans le § 3. du chap. 4.

Après l'abandon des travaux, deux bouchons de ciment ont été mis en place : le premier entre 2795 m et 2930 m de profondeur; le second, juste sous le niveau du sol, sur une épaisseur de 9 m. Dans l'intervalle entre les deux bouchons de ciment, le puits a été rempli de boue barytée. Signalons aussi la présence, au fond du trou, d'un poisson de 688 m, dont la tête se situe vers 4960 m.

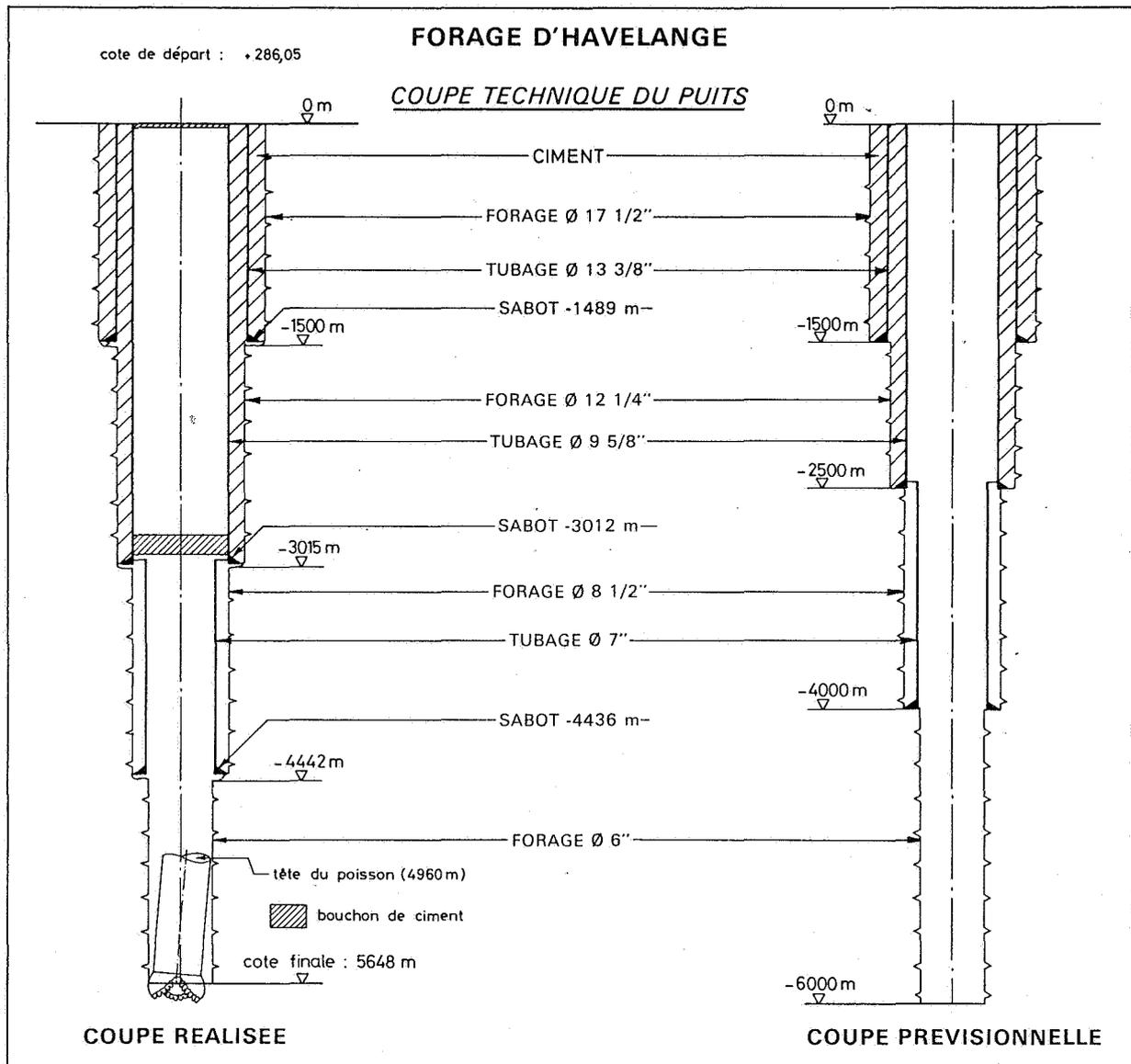


Figure 3. Coupes techniques du puits, réalisée et prévisionnelle

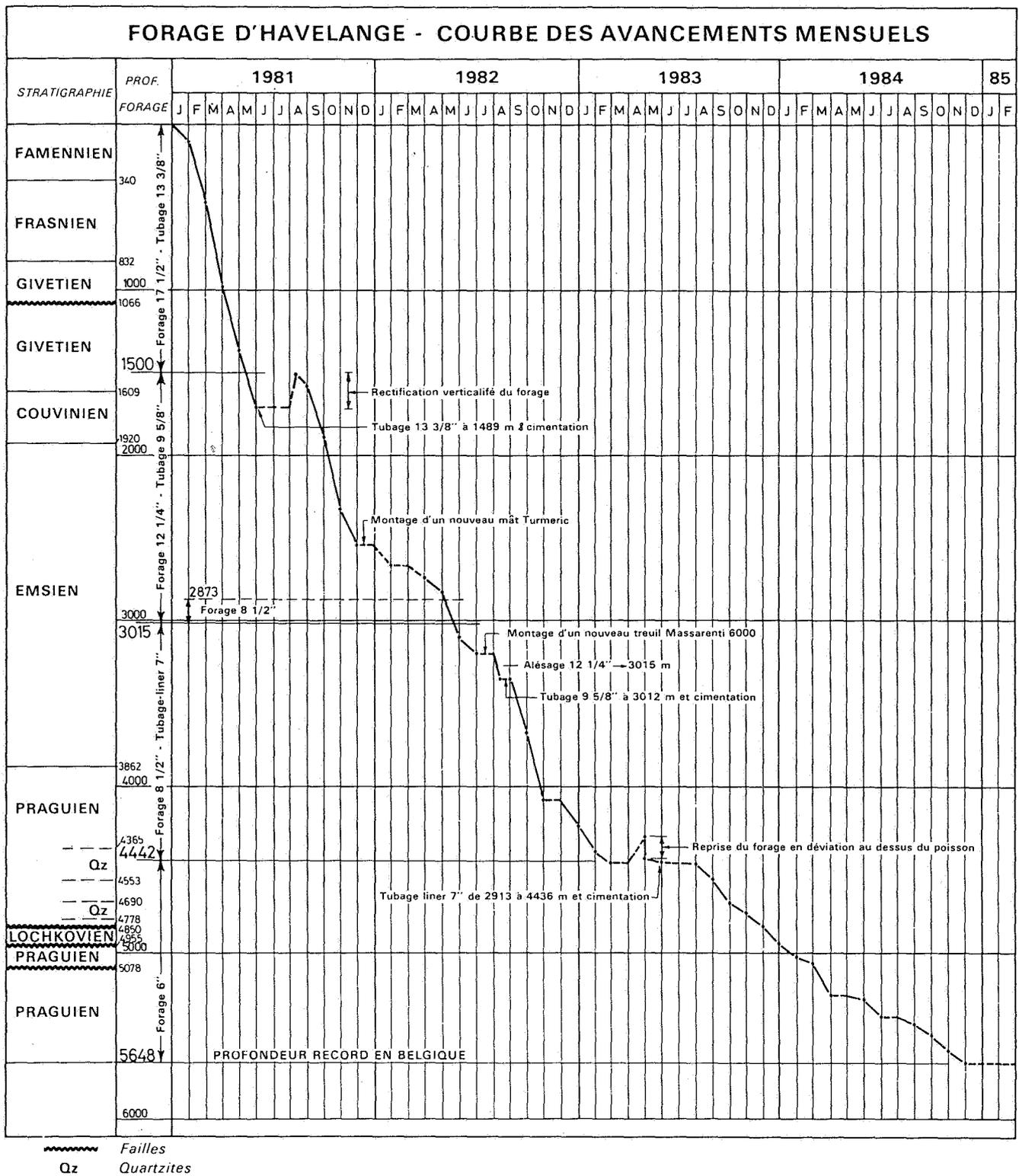


Figure 4. Courbe des avancements mensuels

Chapitre 3. LES DONNEES GEOLOGIQUES ET GEOPHYSIQUES

3.1 Description des cuttings et des échantillons de basket

Pour les quatre cent premiers mètres, on dispose d'un carottage continu effectué dans le forage de reconnaissance préliminaire. Voir à ce sujet INGELBRECHT (1981), HOUBAILLE (1982) et DREESEN (1984). Entre 400 m et 4455 m, les cuttings ont été échantillonnés tous les 5 m, ensuite tous les mètres jusqu'à 4605 m et tous les deux mètres jusqu'à la fin du forage. Les profondeurs renseignées ci-après sont déduites des diagraphies SCHLUMBERGER et sont donc parfois plus précises que le pas d'échantillonnage des cuttings.

Les résultats des analyses calcimétriques jusqu'à 1700 m complètent la description des cuttings. Ils ont été figurés dans un travail préliminaire (GRAULICH, 1982, planche 1).

<i>Profondeurs</i>	<i>Description</i>
De 400 m à 478 m	: Schistes gris clair et schistes verts; un banc de calcaire d'un mètre d'épaisseur à 450 m et un autre de deux mètres d'épaisseur à 468 m.
De 478 m à 530 m	: Alternances de calcaires et de schistes gris moyen; calcaires de 478 m à 480 m, de 484 m à 499 m, de 510 m à 520 m et de 525 m à 530 m.
De 530 m à 610 m	: Schistes noir à gris moyen, calcaireux à partir de 550 m environ.
De 610 m à 690 m	: Calcaire assez pur et légèrement dolomitique.
De 690 m à 745 m	: Dolomie grenue très pure, gris foncé à noire.
De 745 m à 800 m	: Calcaire fin noir, peu argileux; veines de calcite; pyrite dans la masse localement.
De 800 m à 835 m	: Calcschiste gris à noir avec calcite ou dolomite blanche.
De 835 m à 903 m	: Dolomie très pure gris moyen à gris foncé, devenant nettement calcaireuse vers la base; plages de calcite ou de dolomite blanche abondantes.
De 903 m à 935 m	: Calcaire gris moyen, argileux et dolomitique.
De 935 m à 965 m	: Calcaire un peu argileux et dolomitique, parfois pyriteux.
De 965 m à 1000 m	: Schistes noirs.
De 1000 m à 1070 m	: Calcaire légèrement argileux.
De 1070 m à 1113 m	: Calcaire dolomitique; dolomie calcaireuse localement.
De 1113 m à 1155 m	: Schistes noirs, calcaireux et dolomitiques.
De 1155 m à 1240 m	: Calcaire légèrement argileux et localement un peu dolomitique.
De 1240 m à 1275 m	: Calcschiste un peu dolomitique.
De 1275 m à 1400 m	: Calcaire gris, légèrement argileux et dolomitique.
De 1400 m à 1595 m	: Calcaire légèrement dolomitique, progressivement plus argileux vers la base; une intercalation de grès micacé noir vers 1580 m.
De 1595 m à 1608 m	: Calcschiste.
De 1608 m à 1655 m	: Calcaire de plus en plus argileux vers la base.
De 1655 m à 1675 m	: Grès micacé noir.
De 1675 m à 1705 m	: Calcaire avec schiste et grès micacé noir.
De 1705 m à 1890 m	: Grès micacé calcaireux, noir jusqu'à 1737 m environ, vert ensuite.
De 1890 m à 1905 m	: Schistes rouges.
De 1905 m à 1920 m	: Grès micacés verts.
De 1920 m à 3503 m	: Des schistes rouge lie-de-vin, parfois bigarrés (rouge et vert) forment la lithologie dominante. On note également :

- de nombreux bancs de grès ou de quartzites verts (de 1975 m à 1980 m, de 2120 m à 2132 m et de 2913 m à 2925 m);
- des quartzites blancs (de 3017 m à 3023 m);
- un niveau de micropoudingue (de 2335 m à 2690 m) incorporant un banc de quartzite vert-blanc (de 2438 m à 2443 m);
- quelques schistes et grès verts (aux environs de 2700 m);
- de rares échantillons de grès noir.

- De 3503 m à 3825 m : Alternances de grès verts, de schistes vert-jaune tendres, de schistes rouge lie-de-vin et de grès rouges.
- De 3825 m à 3858 m : Grès quartzitique grenu vert à blanc, avec un niveau de teinte rouge-vert aux environs de 3840 m.
- De 3858 m à 4375 m : Schistes gris noir incorporant de gros bancs (1 à 10 m) de quartzite ou de grès . Vers 4020 m, le "basket" a remonté des schistes gris-vert à nodules carbonatés. Niveaux de grès ou de quartzite (prof. en m) : 3957 à 3962; 3965 à 3966; 3970 à 3971; 3975 à 3980; 4005 à 4008; 4095 à 4105; 4145 à 4150; 4152 à 4154; 4185 à 4190; 4205 à 4210; 4220 à 4225; 4273 à 4282; 4320 à 4325; 4330 à 4332; 4336 à 4338; 4342 à 4344 (grès quartzitique gris-blanc); 4360 à 4375 (4 bancs de quartzite gris-blanc de 2 m d'épaisseur environ, en alternance avec des schistes).
- De 4375 m à 4553 m : Quartzite gris clair, parfois finement straticulé; massivement stratifié et très compact. Deux intercalations de schistes : de 4524 m à 4525 m et de 4530 m à 4533 m.
- De 4553 m à 4677 m : Alternances de schistes gris ou noirs et de quartzites gris clair. Les schistes présentent localement des lits tendres, gris argenté ou verdâtres (chlorite ?). Ils sont fortement tectonisés et se débitent en crayons. Les quartzites sont ponctués par de petits points noirs (magnétite ?) ou métalliques (pyrite ?). Ils sont traversés par des veines de quartz. Des veinules de schiste soulignent la stratification. Le "basket" a permis la récupération de rares échantillons de grès micacés finement stratifiés et de cristaux de quartz.
- De 4677 m à 4778 m : Quartzite gris clair massif.
- De 4778 m à 4935 m : La lithologie est essentiellement constituée d'alternances de schistes gris et de quartzites (4781 à 4785; 4795 à 4802; 4818 à 4841; 4878 à 4889). Des grès grenus gris foncé à noirs ont été rencontrés entre 4906 m et 4921 m environ. Entre 4921 m et 4935 m alternent des quartzites clairs et des schistes vert-gris. On note la présence locale de schistes verts, renfermant parfois des nodules carbonatés.
- De 4935 m à 5001 m : Schistes verts , plus gréseux de 4948 m à 4958 m et de 4985 m à 4990 m.
- De 5001 m à 5027 m : Quartzites gris-vert, parfois très clairs, avec localement du grès gris foncé grenu.
- De 5027 m à 5056 m : Alternances de schistes verts ou gris et de grès noirs.
- De 5056 m à 5078 m : Alternances métriques de grès verts ou gris et de schistes gris et verts.
- De 5078 m à 5289 m : Formation constituée essentiellement de schistes gris incorporant quelques bancs de grès, de quartzites ou de conglomérats. Plus précisément (prof. en m) : de 5086 à 5090; de 5092 à 5094; de 5116 à 5118; de 5155 à 5157; de 5175 à 5178; de 5197 à 5199; de 5220 à 5236; de 5243 à 5245; de 5246 à 5252; de 5264 à 5266; de 5273 à 5274; de 5275 à 5278. On note la présence locale de schistes gréseux verts, micacés, de schistes rouges et de grès verts micacés.
- De 5289 m à 5370 m : Formation essentiellement constituée de grès quartzitiques et de conglomérats alternant avec des schistes.
- De 5370 m à 5375 m : Voir description macroscopique des carottes, § 2.
- De 5375 m à 5450 m : Roche très gréseuse verte avec un peu de schistes noirs.
- De 5450 m à 5648 m : Roche sériciteuse très compacte, vert foncé à noire, à texture très fine; un léger rubanement vert-noir est parfois visible. Présence locale de petits grenats et de ponctuations blanches.

3.2 Description macroscopique des carottes

G. VANDENVEN, 1987

D : diamètre des carottes; R : récupération; i : inclinaison de la stratification en degrés.

<i>Profondeurs</i>	<i>Description</i>
De 4382,00 m à 4383,60 m :	Grès quartzitique vert, pauvre en micas; rares lits argilo-micacés. D : 101 mm; R : 50%; i : 90°.
De 4478,75 m à 4480,50 m :	Même faciès; fragments en sachets.
De 4730,90 m à 4736,70 m :	Grès quartzitique vert à fins limets plus riches en micas blancs et chlorite (?); roche parsemée de veinules (quartz et carbonate coloré). D : 85 mm; R : 100%; i : 78 à 90°.
De 4730,90 m à 4736,70 m :	Grès quartzitique vert, pauvre en micas; rares joints chlorito-quartzeux marquant la stratification; massif. D : 65 mm; R : 95%; i : 73 à 80°.
De 4739,00 m à 4739,40 m :	Grès quartzitique vert à lits plus sombres; massif. D : 89 mm; R : 83% + fragments; i : 80 à 85°.
De 4739,40 m à 4743,80 m :	Grès quartzitique vert à lits plus sombres très massif. D : 65 mm; R : 93%; i : 72 à 75°.
De 4743,80 m à 4748,30 m :	Même faciès. D : 65 mm; R : 98%; i : 78 à 88°.
De 4780,00 m à 4780,80 m :	Même faciès. D : 85 mm; R : 38%; i : 55°.
De 5000,00 m à 5001,50 m :	Grès quartzitique vert finement grenu. D : 63 mm; R : 41%; i : 65 à 70°.
De 5139,00 m à 5139,20 m :	Récupération nulle.
De 5240,30 m à 5243,90 m :	Grès quartzitique riche en veinules (quartz et carbonate rosé). D : 63 mm; R : 11%; i : non mesurable.
De 5243,90 m à 5246,40 m :	Même faciès; à la base, traces de pyrite (cuivreuse ?). D : 63 mm; R : 86%; i : 10 à 23°
De 5247,00 m à 5247,60 m :	Même faciès. D : 87 mm; R : 83%; i : 60°.
De 5370,00 m à 5375,00 m :	<ol style="list-style-type: none">1. Microconglomérat à gros quartz blancs, parfois roses, arrondis et "fragments rocheux noirs" subarrondis; à la base, 30 cm de phyllade vert très pâle.2. 35 cm de phyllade vert pâle à granules de quartz épars; s'il y a une schistosité, elle est confondue avec la stratification.3. Microconglomérat identique à la passée A, avec rares limets phylladeux vert pâle.4. Un fragment de phyllade vert pâle et de petits fragments de conglomérat à petits cristaux sombres (grenats ?). D : 65 mm; R : 60%; i : 15 à 18°.
De 5449,50 m à 5452,70 m :	Roche finement grenue compacte, vert très sombre, straticulée de lits noirs. D : 65 mm; R : 25%; i : 16 à 18°.
De 5528,00 m à 5532,00 m :	Même faciès; aspect microquartzite ou grès très finement grenu; quelques traces pyriteuses rousses dans la masse, ainsi que sur un plan de fracture; ponctuations sombres visibles à la loupe. D : 65 mm; R : 51%; i : 14 à 15°.

3.3 Interprétation géologique

Une coupe géologique passant par le sondage et orientée sensiblement NW-SE est présentée à la Figure 5. Elle tient compte des données de la pendagemétrie SCHLUMBERGER définissant la géométrie des couches entre 0 m et 1700 m et des valeurs des pendages non orientés, mesurés sur les carottes prélevées entre 4382 m et 5532 m.¹

Depuis la surface jusqu'à la profondeur de 4850 m, le sondage a traversé une série continue qui va du Famennien (Formation d'Esneux) au Praguien et qui est résumée ci-après. L'indication "(palyno)" signifie que la datation est confirmée par une analyse palynologique (STEEMANS, in STEEMANS & GRAULICH, 1986).

FAMENNIEN

- de 0 à 164 m : Formation d'Esneux, psammites stratoïdes
de 164 m à 344 m : Schistes de la Famenne avec les zones à *Palmatolepis crepida* et à *P. triangularis* (voir DREESEN 1984)

FRASNIEN

- de 344 m à 483 m : Schiste
de 483 m à 530 m : Calcaire (g)
de 530 m à 570 m : Schiste
de 570 m à 588 m : Schiste très noduleux (f)
de 588 m à 600 m : Schiste
de 600 m à 608 m : Schiste très noduleux (e)
de 608 m à 690 m : Calcaire (d)
de 690 m à 745 m : Dolomie (c)
de 745 m à 800 m : Calcaire (b)
de 800 m à 832 m : Schiste (a)

Les lettres entre parenthèses correspondent aux membres définis par M. COEN (1974) dans les régions d'Heure et de Sinsin proches du sondage.

GIVETIEN

- de 832 m à 995 m : Avec de haut en bas :
Dolomie (920 m)
Calcaire argileux (965 m)
Schiste (995 m)
de 995 m à 1066 m : Calcaire
FAILLE (Xhoris ?)

GIVETIEN

- de 1066 m à 1152 m : Avec de haut en bas :
Dolomie (1083 m)
Calcaire argileux (1113 m)
Schiste (1152 m)

¹ La pendagemétrie SCHLUMBERGER ne donne des résultats fiables que dans des séries faiblement inclinées, ce qui n'est plus le cas sous 1700 m.

de 1152 m à 1596 m : Calcaire entrelardé de 3 niveaux de calcschiste
de 1596 m à 1609 m : Schiste

EIFELIEN (Couvinien auct.)

de 1609 m à 1703 m : Calcschiste
de 1703 m à 1920 m : Grès souvent vert

EMSIEN supérieur et moyen d'ASSELBERGHS

de 1920 m à 3503 m : Schiste rouge avec quelques bancs de quartzite clair et de micropoudingue

EMSIEN inférieur d'ASSELBERGHS

de 3503 m à 3862 m : Alternances de schiste vert, de schiste rouge et de quartzite vert et parfois rouge; à la base, un banc de quartzite grenu verdâtre à linéoles rouges

PRAGUIEN supérieur (Siegenien auct.) (palyno.) - Succession rappelant le faciès de Laroche d'ASSELBERGHS

de 3862 m à 4365 m : Schiste gris avec bancs de quartzite
de 4365 m à 4850 m : Quartzite gris avec bancs de schiste gris de 4553 m à 4690 m et de 4778 m à la base
FAILLE

LOCHKOVIEN (Gedinnien auct.) (palyno.)

de 4850 m à 4955 m : Schiste vert à nodules carbonatés
FAILLE

PRAGUIEN moyen et inférieur (palyno.)

de 4955 m à 5078 m : Schiste vert et gris avec bancs de quartzite vert, gris ou noir
FAILLE

PRAGUIEN supérieur (palyno.)

de 5078 m à 5648 m : Schiste gris avec bancs de 1 à 6 m de quartzite et de poudingue pisaire; quelques niveaux radioactifs (allanite ?) et niveaux métamorphiques à grenats sous 5450 m

Les 3 discontinuités mises en évidence par les datations palynologiques (4850 m, 4955 m et 5078 m) ont pu être confirmées par les données géophysiques du trou. Elles correspondent à une zone faillée dont GRAULICH (1980, 1982) a cartographié la limite supérieure et qui se raccorde à la discontinuité majeure mise en évidence par la sismique de surface. D'autre part, la corrélation entre les opérations sismiques de trou et la sismique de surface (voir Annexe C) montrent que la base de la zone faillée pourrait se situer vers 5450 m, soit sensiblement au contact avec les roches métamorphiques à grenats.

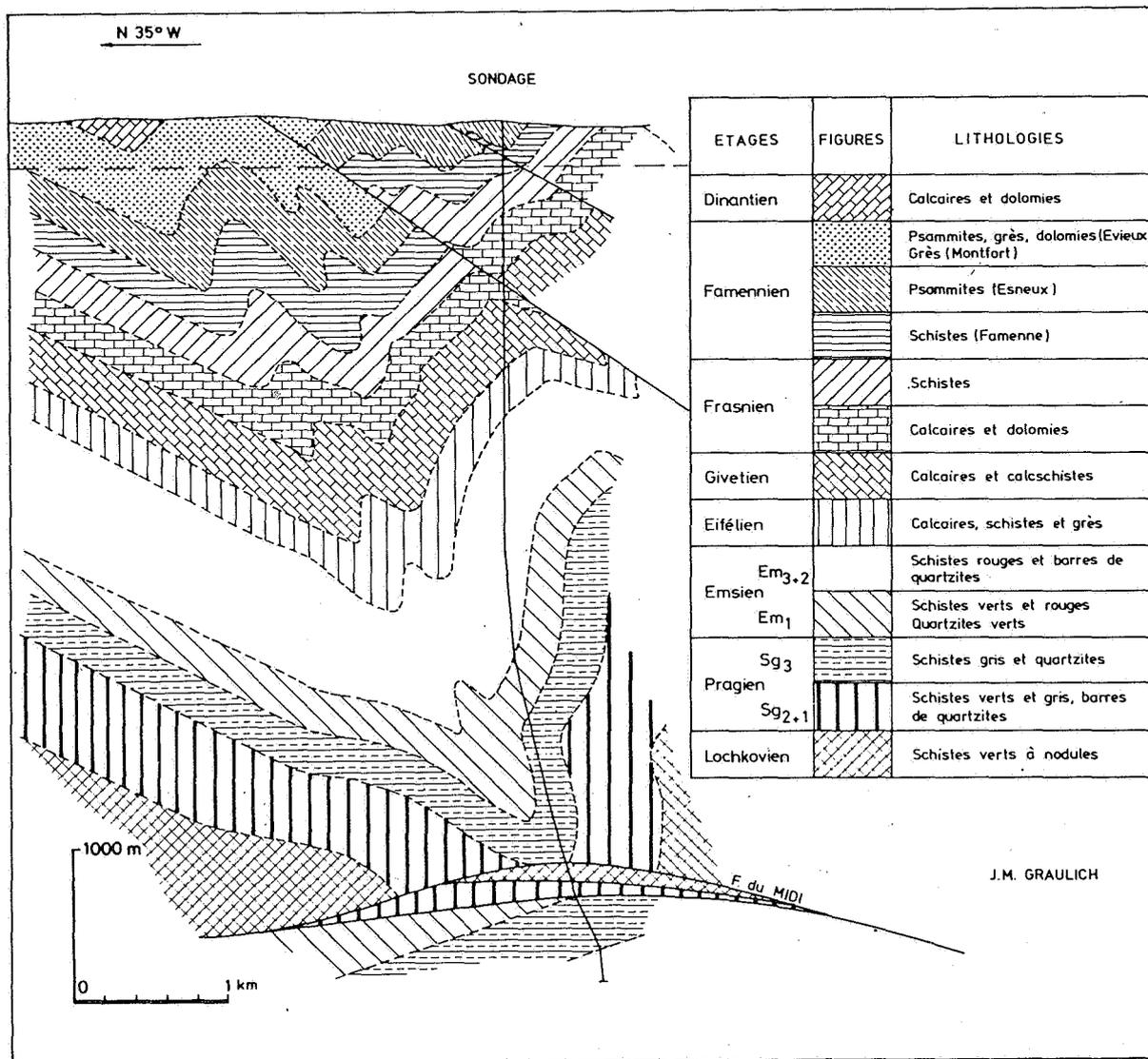


Figure 5. Coupe géologique passant par le sondage

3.4 Remarques pétrographiques et minéralogiques

3.4.1 Description pétrographique des quartzites - G. VANDENVEN

Echantillon prélevé à 4747 m.

Grès quartzeux essentiellement formé de grains de quartz soudés les uns aux autres sous l'effet de la compaction. Un très faible pourcentage de microphyllites (séricite, chlorite), emprisonnées dans le quartz de néoformation, témoigne d'un liant argileux ténu. Accessoirement apparaissent des zircons et des tourmalines. Quelques uns des ces minéraux présentent des formes idiomorphes ou des auréoles d'accroissement (cas de la tourmaline). On note encore la présence de quelques plages spathiques (dolomite ou calcite ?) intersticielles et de rares fragments de roche microquartzitique. La stratification est soulignée par des lits riches en micas (dont de la muscovite flexurée) et des minéraux denses. Ce plan prend des aspects "stylolithiques" engendrés par le développement d'un clivage de fracture embryonnaire.

3.4.2 Association minéralogique dans le microconglomérat à 5370 m - F. DIMANCHE Ulg

L'échantillon est essentiellement formé de quartz (+ de 80 %), parfois coalescents ou séparés les uns des autres par des phyllosilicates. On reconnaît les minéraux accessoires suivants : chlorite autigène, micas muscovite), allanite, tourmaline autigène (abondante), rutile autigène et grenat.

3.4.3 Analyse des grenats - D. LADURON, UCL

Des grenats trouvés dans des échantillons prélevés entre 5449,50 m et 5452,70 m et à 5530 m ont fait l'objet d'une analyse à la microsonde. Ce sont des almandins spessartinifères zonés. Le Mn augmente du bord vers le centre tandis que le Fe et le Mg diminuent.

3.4.4 Présence de thorianite et de cobaltite dans une roche du sondage d'Havelange . JEDWAB, J., 1985.

" Des inclusions microniques de thorianite ont été observées dans de l'allanite concentrée dans un niveau profond du sondage d'Havelange. Ce niveau radioactif d'âge vraisemblablement dévonien inférieur contient également de la cobaltite parfois aurifère. D'autres minéraux lourds sont encore à signaler : spessartine, ilménite Fe/Mn, galène et un tellure de Pb/Bi associé à la cobaltite."

3.4.5 La cobaltite des niveaux profonds du sondage d'Havelange - BERNARD, A. & JEDWAB, J., 1987.

Les auteurs décrivent la cobaltite qu'ils ont identifiée dans le sondage à 5449 m et à 5532 m.

3.5 Les diagraphies SCHLUMBERGER

Les diagraphies enregistrées dans le sondage d'Havelange ont fait l'objet d'un commentaire général par un des auteurs (GRAULICH, 1982, pp. 554 - 557). La Figure 6 reprend l'ensemble des enregistrements disponibles. Entre 5370 m et 5648 m, la présence du poisson a empêché la réalisation des diagraphies.

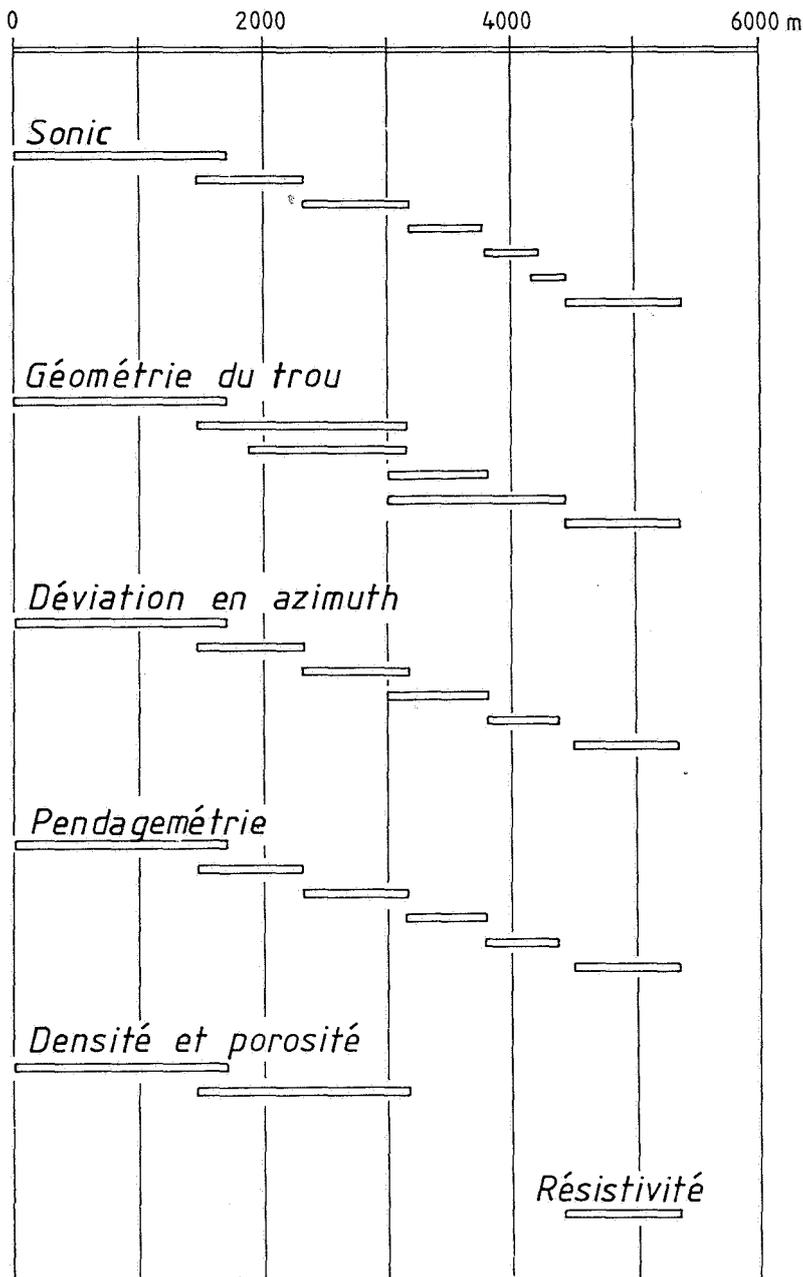


Figure 6. Diagraphies SCHLUMBERGER

3.6 Les données sismiques

Afin de permettre une meilleure corrélation entre les profils de surface et les données du sondage, plusieurs opérations sismiques de trou (Vertical Seismic Profile, VSP) ont été exécutées et traitées par Schlumberger.

Un premier essai a été réalisé en juillet 1982, alors que le sondage était à la profondeur de 3180 m. La source utilisée était une charge explosive. L'importance des bruits de fond et un niveau d'énergie trop bas limitent fortement l'interprétation du profil obtenu.

Deux essais ont été réalisés en juin 1984, alors que le sondage était à la profondeur de 5370 m (enregistrement entre 3100 m et 5364 m), en utilisant comme source un camion vibreur. Dans le premier cas, le camion était placé en position fixe à 169,5 m du trou dans la direction N 115° E (VSP standard). Dans le second cas, le camion était à 2890 m du trou dans la direction N 323° E (Offset VSP).

La Figure 7 reprend la trace schématique du sondage dans le plan horizontal, la position des sources VSP standard et OVSP 1984 et le tracé des profils sismiques de surface 7, 8 et 13 à proximité du sondage. Le sondage peut être projeté sur les profils 8 et 13 suivant la direction générale des couches en surface. Le plan de référence de la sismique de surface est + 150 m; celui des VSP est + 280 m.

L'interprétation des profils VSP et OVSP et leur corrélation avec les profils sismiques de surface font l'objet de l'annexe C (GRAULICH, VANDENBERGHE & HANCE).

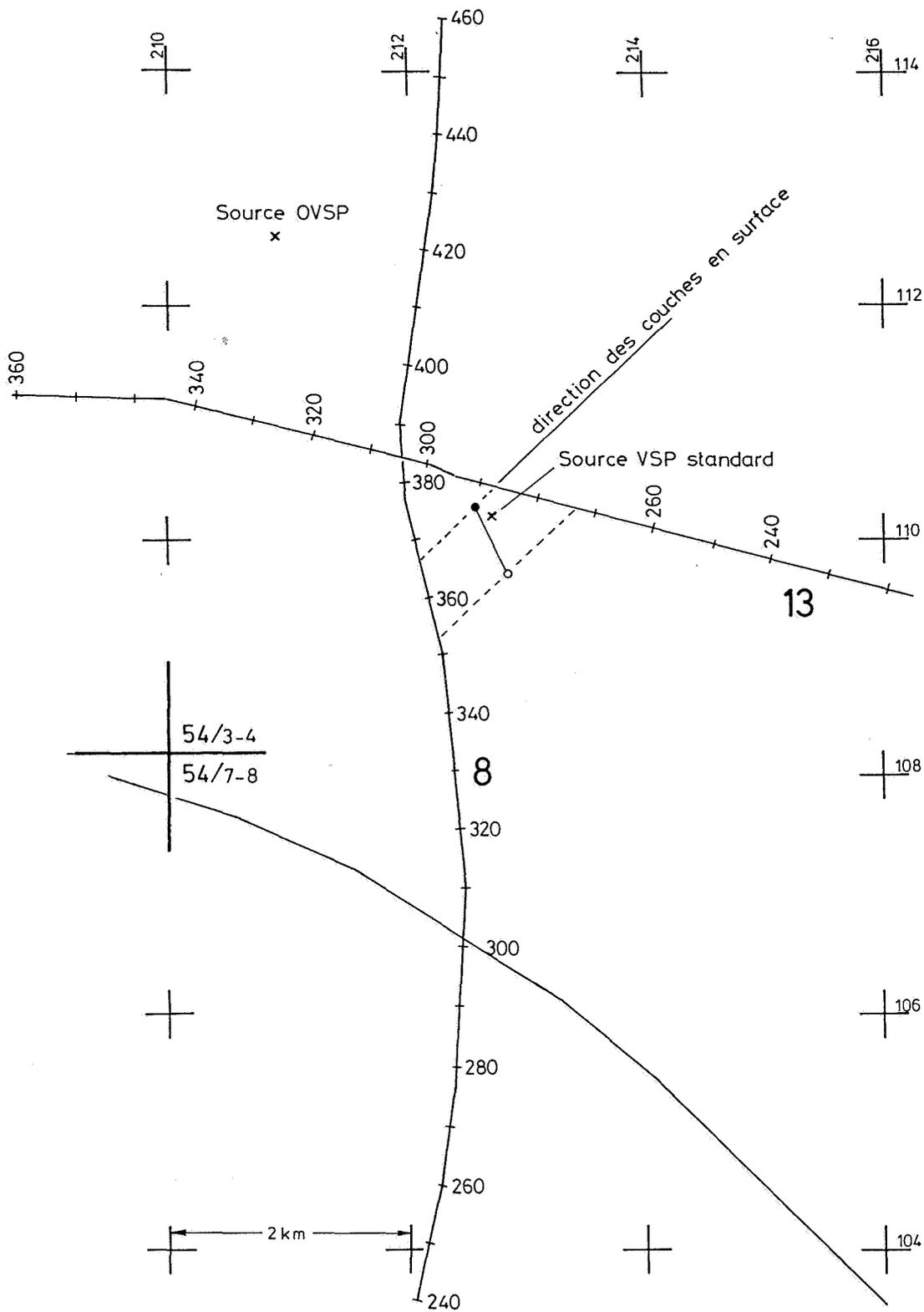


Figure 7. Localisation des profils sismiques et des sources VSP

3.7 Les données géothermiques

Les températures mesurées lors des opérations de diagrapie sont reprises dans le tableau 1. Elles ont permis la détermination du gradient géothermique qui est de l'ordre de 2°/100 m en moyenne (Figure 8).

DATE	PROFONDEUR	TEMPERATURE	DUREE DE REPOS DE LA BOUE AVANT MESURE (heures)
19 juin 81	1480 m	42°	80 h
2 juin 81	1706 m	44°	8 h
7 février 82	2322 m	48,3°	7 h 30
	2315 m	50°	10 h 35
1 juillet 82	3190 m	63°	10 h
	3189,5 m	64,4°	13 h 30
	3189 m	65,5°	17 h
		66,1°	20 h 30
26 novembre 82	3801 m	76,6°	10 h 45
10 février 83	4208 m	83°	19 h
10 février 83	4387 m	83°	14 h 30
19 mai 83	4442 m	92°	18 h
		93°	23 h
14 - 15 juin 84	5370 m	115°	19 h 18
		118°	21 h 59
		119°	30 h 06

Tableau 1. Températures mesurées lors des opérations de diagrapie.

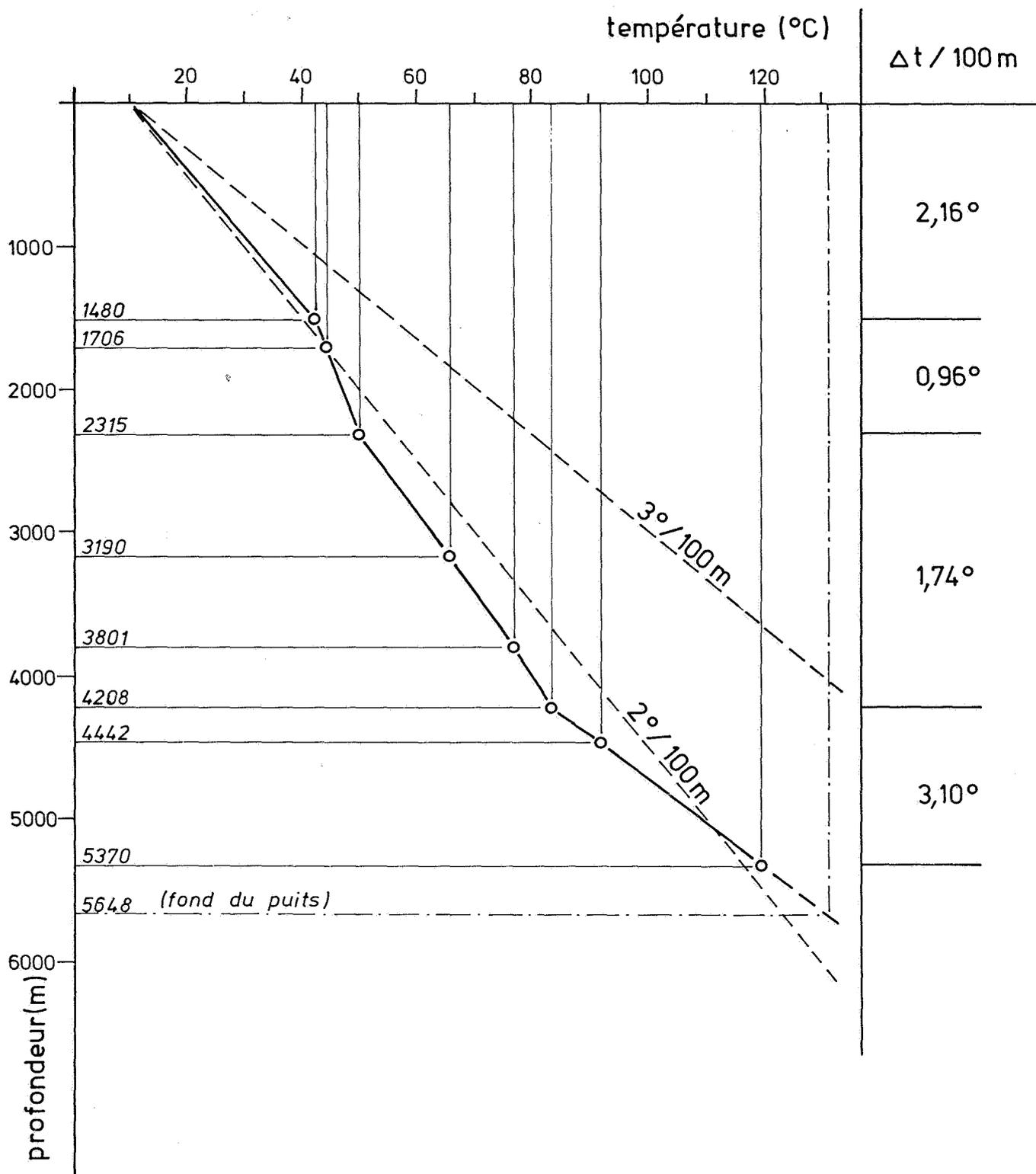


Figure 8. Gradient géothermique

3.8 Niveaux à radioactivité élevée

PROFONDEUR (m)	CONTEXTE GEOLOGIQUE	RADIOACTIVITE API (*)
1838 à 1840	EIFELIEN à faciès calcaro- et schisto-gréseux	202
		180
		187
1960	EMSIEN à faciès schistes rouges	165
3027	EMSIEN à faciès schisto-gréseux	225

Tableau 2. Contexte géologique des principaux niveaux radioactifs.

(*) 100 API correspondent à 6 g éq.Ra/t; valeurs obtenues par la diagraphie Gamma Ray (G.R.).

3.9 Les venues de gaz

Au cours des travaux de forage, le chromatographe, installé sur le circuit à boue à la sortie du puits, a enregistré à deux reprises la présence de gaz hydrocarbure dans les boues. Le premier indice s'est manifesté le 12 décembre 1983, après un week-end, pendant 7 heures environ, alors que l'outil reforait les formations comprises entre 4764 et 4873 m. Le deuxième indice a été enregistré pendant 30 min. environ, le 13 février 1984, en forage cette fois, à la profondeur approximative de 5039 m. Des échantillons de basket prélevés à cette profondeur ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse et en phase liquide. La présence principale de méthane, d'éthane et de butane a été mise en évidence ainsi que celle d'autres dérivés de poids moléculaire plus élevé, mais non déterminés et en plus faible concentration.²

A partir de la profondeur de 4466 m environ, des bouchons de fond ont été détectés au chromatographe, lors de la remise en circulation des boues, après un temps de repos de plusieurs dizaines d'heures. Au-delà de 5250 m ces enregistrements sont perturbés par de multiples manoeuvres nécessaires pour changer d'outil.

Après la décision d'arrêt définitif du forage, la pression sur les parois du puits a été progressivement diminuée afin de permettre aux zones ou fissures productrices de libérer des venues de gaz susceptibles de préciser l'ampleur des indices détectés au cours des travaux. Les opérations se sont déroulées en 2 étapes comptant chacune 2 paliers :

1. remplacement de la boue de densité 1,2 par de l'eau claire de densité 1,02;
2. abaissement progressif du niveau d'eau dans le puits par retrait partiel du train de tiges.

Une double venue de gaz (2 pics au chromatographe) a été enregistrée à chaque palier de la deuxième étape. Deux constatations doivent être soulignées. D'une part, la venue la plus importante correspond au plus long temps de repos de l'eau de circulation. D'autre part, le même espace de temps environ s'est écoulé entre la remise en circulation de l'eau et l'enregistrement au chromatographe lors des deux derniers paliers. Ces éléments nous amènent à penser que ces venues pourraient correspondre à des formations productrices de gaz, mais de très faible perméabilité. Les bouchons de fond auxquels il a été fait allusion pourraient avoir la même signification. Notons encore que les venues enregistrées grâce à une diminution de la pression sur les parois du puits sont beaucoup moins importantes que celles observées au cours du forage.

² Analyse effectuée par J.NAUD au Laboratoire de Minéralogie et de Géologie Appliquée de Louvain-La-Neuve.

Chapitre 4. LES PROBLEMES TECHNIQUES

Le lecteur intéressé trouvera à l'annexe B les principales caractéristiques techniques de l'installation de surface et du matériel de forage utilisé.

La plupart des problèmes techniques qui ont été rencontrés lors de l'exécution du forage d'Havelange sont inhérents à la géologie des terrains traversés; ils sont commentés ci-après.

4.1 La traversée des schistes et grès emsiens

4.1.1 Les difficultés rencontrées

Le sondage d'Havelange a traversé les formations de l'Emsien entre 1920 m et 3862 m. La lithologie est essentiellement schisteuse, mais de nombreux bancs métriques à plurimétriques de grès quartzitiques y sont interstratifiés. Les schistes sont affectés de nombreux plans de débit (stratification, schistosité, fractures) qui confèrent une grande instabilité aux parois du puits. Des éboulements importants sont apparus dès la première instrumentation; ils provoquent la formation de caves qui s'agrandissent progressivement et mettent en saillie les bancs plus résistants. Le puits acquiert alors un profil en sablier, schématisé à la Figure 9, qui entraîne de multiples difficultés :

- coincement de l'outil au cours des manoeuvres de remontée;
- endommagement d'outils neufs, qui au droit des zones cavées viennent plus ou moins brutalement buter sur un éperon gréseux;
- accumulation de cuttings dans les parties cavées du puits, au-dessus des bancs de grès, par perte de vitesse des boues de forage ascendantes; la chute soudaine des cuttings peut parfois provoquer le coincement de l'outil et de la garniture de forage;
- accumulation des éboulements schisteux au droit des éperons gréseux, imposant à tout nouvel outil de nombreuses passes de reforage avant d'atteindre le fond du puits.

4.1.2 Technique adoptée

Afin de stabiliser les parois du puits, presque toute la hauteur des schistes et grès emsiens a été cimentée. Certaines passes ont dû l'être à plusieurs reprises, en raison du frottement de la garniture de forage sur les parois. L'opération de cimentation se déroule par passe de 200 à 300 m en plusieurs étapes :

- descente du train de tiges à la base de la passe à cimenter;
- injection d'un bouchon de ciment dont le volume est calculé sur la hauteur de la zone cavée que l'on désire cimenter;
- remontée du train de tiges;
- pause nécessaire pour la prise du ciment (24 à 48 h);
- reforage du ciment;
- reprise du forage.

La coupe technique du puits indique la mise en place d'un tubage 9"5/8 à 3012 m. Seule une partie de l'Emsien est alors isolée puisque le forage ne le quittera que vers 3862 m. En plus, les problèmes d'éboulements troubleront la progression du forage jusqu'à 4436 m, cote à laquelle le liner 7" sera finalement descendu. Il convient d'expliquer ici pourquoi le tubage 9"5/8 n'a pas été posé à 2500 m comme prévu et pourquoi il a été mis en place avant que le sondage n'ait quitté les schistes et grès emsiens.

Pour orienter son choix vers l'appareil de forage susceptible d'atteindre les profondeurs prévues, le foreur doit dessiner une coupe technique prévisionnelle tenant compte des données géologiques disponibles et des objectifs recherchés. Pour le sondage d'Havelange, cette coupe prévoyait un tubage 9"5/8 à 2500 m, profondeur à laquelle les schistes et grès emsiens auraient dû être traversés (Figure 3 à la page 4). Le tubage 9"5/8 est particulièrement important car il est destiné à supporter le BOP (Blow Out Preventer- obturateur du puits avec commande à distance) en cas de venue de gaz. Il fallait donc qu'il soit parfaitement cimenté au terrain et que les 300 m inférieurs au moins soient situés dans une roche saine. A 2500 m malheureusement, le puits se situait toujours dans l'Emsien, avec des parois fortement cavées. Pour éviter de poser le tubage trop tôt, le forage a été poursuivi avec l'espoir d'atteindre la base de l'Emsien avant les 3000 m. Hélas ce n'était pas encore le cas à 3300 m et il fut décidé de descendre à 3000 m, une colonne de tubage 9"5/8, ce qui représentait une limite technique pour l'installation de surface.

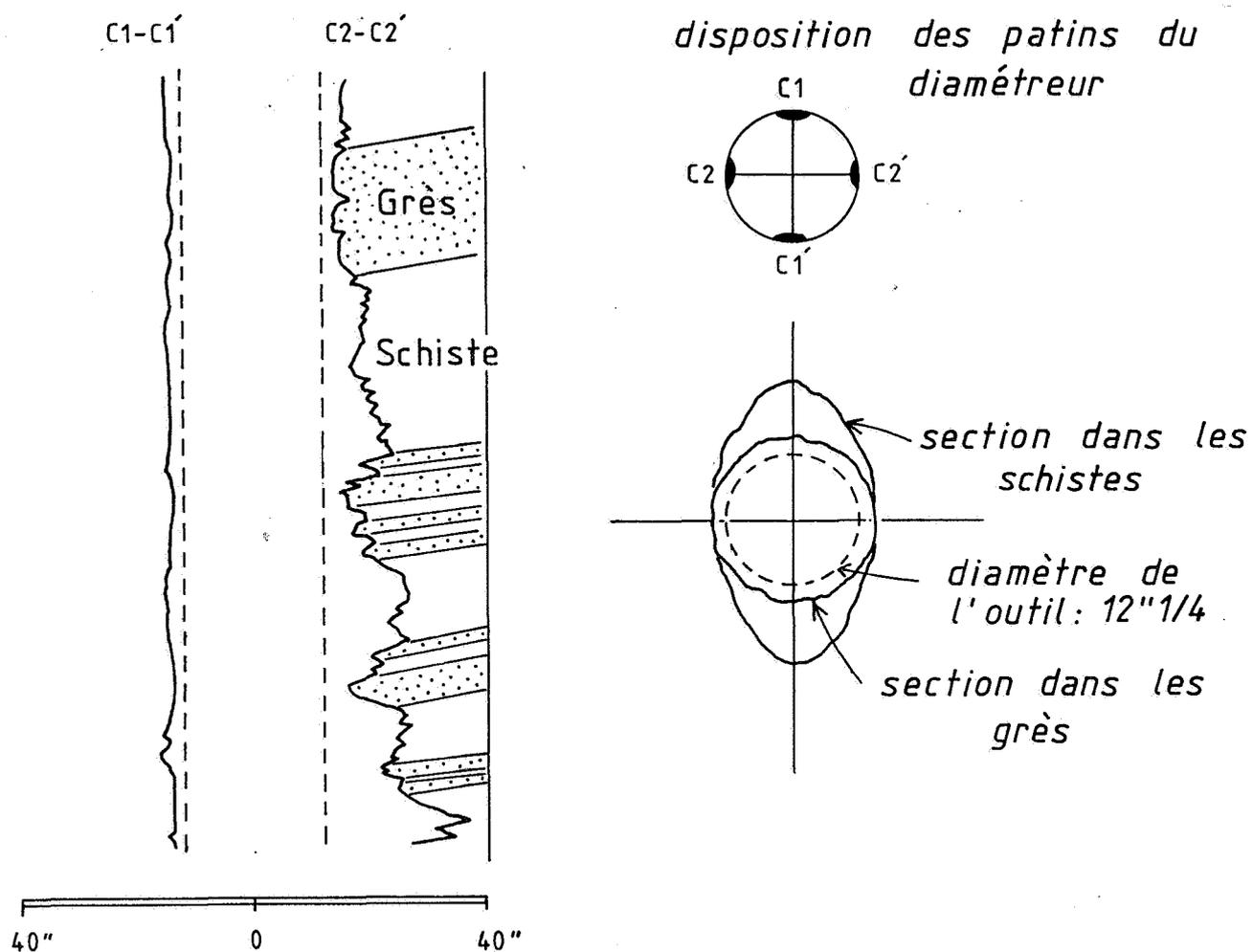


Figure 9. Exemple schématique de diamètreur (caliper) au droit des schistes et grès emsiens

4.2 La traversée des quartzites praguiens

4.2.1 Les difficultés rencontrées

La traversée des quartzites massifs, rencontrés entre 4360 m et 4553 m et entre 4690 m et 4778 m, avec des vitesses d'avancement de l'ordre de 0,25 à 0,5 m/h, a considérablement freiné la progression du sondage. A 4440 m, le tubage 7" est descendu pour vaincre l'instabilité des parois du puits; il limite à 6" le diamètre des outils utilisés au-delà.

La forte abrasivité des quartzites se traduit par l'usure anormale des outils - durée de vie de quelques heures pour 30 à 40 h normalement - avec perte de diamètre (trou cône), ce qui impose le reforage de chaque passe. La résistance mécanique exceptionnelle des quartzites (compression simple : 3000 à 3500 kg/cm²)³ qui refusent d'éclater sous la contrainte de l'outil, provoque la rupture du sommet des cônes et parfois de cônes entiers et leur perte au fonds du puits.

Chaque changement d'outil nécessite 15 h de manoeuvre. Quelques heures sont nécessaires pour reforer la passe précédente. Parfois les fragments d'outil tombés au fond du puits doivent être récupérés par une instrumentation appropriée, avec 1 ou 2 manoeuvres aller-retour. Après moins de 10 h de forage, l'outil doit de nouveau être remplacé alors que le puits n'a progressé que de 3 à 4 m.

4.2.2 Technique adoptée

Les outils 6" utilisés à Havelange sont les outils à pastilles en carbure de tungstène les plus résistants (type J 55 - F5) que l'on puisse trouver, dans ce diamètre, sur le marché pétrolier. L'adoption d'un diamètre 8"1/2 aurait offert un plus grand choix d'outils performants. Pour tenter d'améliorer les performances de ces outils, tous les paramètres de forage ont été modifiés les uns après les autres (poids sur l'outil, vitesse de rotation, débit des boues, diamètre des duses...), mais sans succès probant. Il a été envisagé d'autres techniques, comme le forage à la turbine (NEYFOR). Des tentatives de forage à la couronne ou à l'outil diamanté (DIAMANT BOARD, CHRISTENSEN) ont eu lieu, mais sans obtenir un meilleur rendement.

De façon à éviter certains accidents au cours de la traversée des quartzites, la garniture de forage a été adaptée aux conditions du trou, par l'intercalation des éléments suivants :

- 3 stabilisateurs à diamants (DIAMANT BOARD) et un *near-bit stabilisateur* situé directement au-dessus de l'outil (DOWELL- SERVCO) pour limiter l'usure des tiges et *drill-collars*, et pour maintenir le diamètre du trou;
- un *earthquaker jar* ou *coulisse de battage* (DOWEL) qui permet en cas de coincement de l'outil ou de la garniture de forage, de se dégager immédiatement;
- un *shock absorber* (DOWELL, SERVCO) pour réduire les chocs pouvant se répercuter sur l'outil et l'endommager.

Tous ces éléments spéciaux de garniture sont loués à des sociétés de service telles que DOWELL, SCHLUMBERGER et SERVCO.

³ Analyse effectuée par N. NSENGA (sous la direction de J. BRYSCH) au Département des Mines de la Faculté Polytechnique de Mons.

4.3 La déviation du sondage

4.3.1 Généralités

La déviation d'un sondage peut se traduire par un changement d'inclinaison par rapport à la verticale, mais également par un changement de direction ou d'azimuth. Elle peut être imputée à deux phénomènes :

1. La rotation de l'outil et la pression qu'il exerce sur le terrain;
2. Le choix par l'outil du "chemin du moindre effort". L'outil a tendance à attaquer la roche perpendiculairement au plan de débit (stratification ou schistosité) si celui-ci est inférieur à 45° par rapport à l'horizontale. Si le débit est redressé, l'outil a tendance à glisser sur ce plan et à lui rester plus ou moins parallèle.

La déviation, que ce soit en direction ou en azimuth, entraîne de multiples problèmes, qui en s'additionnant, peuvent aboutir à l'abandon des travaux (Figure 10). Une déviation progressive et constante en direction ne pose pas de problème majeur. Par contre, une déviation irrégulière, avec un profil en ligne brisée ou *dog-leg*, perturbe fortement et peut remettre en cause la poursuite des travaux. Cette situation traduit des changements brutaux de la direction et de l'inclinaison des plans de débit.

4.3.2 La déviation du sondage d'Havelange

Le sondage d'Havelange s'est heurté à la majorité des problèmes présentés à la Figure 10

La Figure 11 donne la projection du sondage dans le plan horizontal.

Le sondage présente une faible inclinaison (3° environ) jusqu'à 3000 m, mais un brusque changement d'azimuth a eu lieu vers 2200 m. Sous cette profondeur, l'azimuth SSE est conservé, tandis que l'inclinaison augmente de façon régulière jusqu'à atteindre 28° à 5250 m, avec cependant quelques *dog-legs*, dont un vers 3500 m, deux à 4400 m et 4600 m et deux autres entre 5000 m et 5500 m.

La courbe de la Figure 12 permet de déduire les profondeurs verticales corrigées à partir des profondeurs mesurées dans le sondage

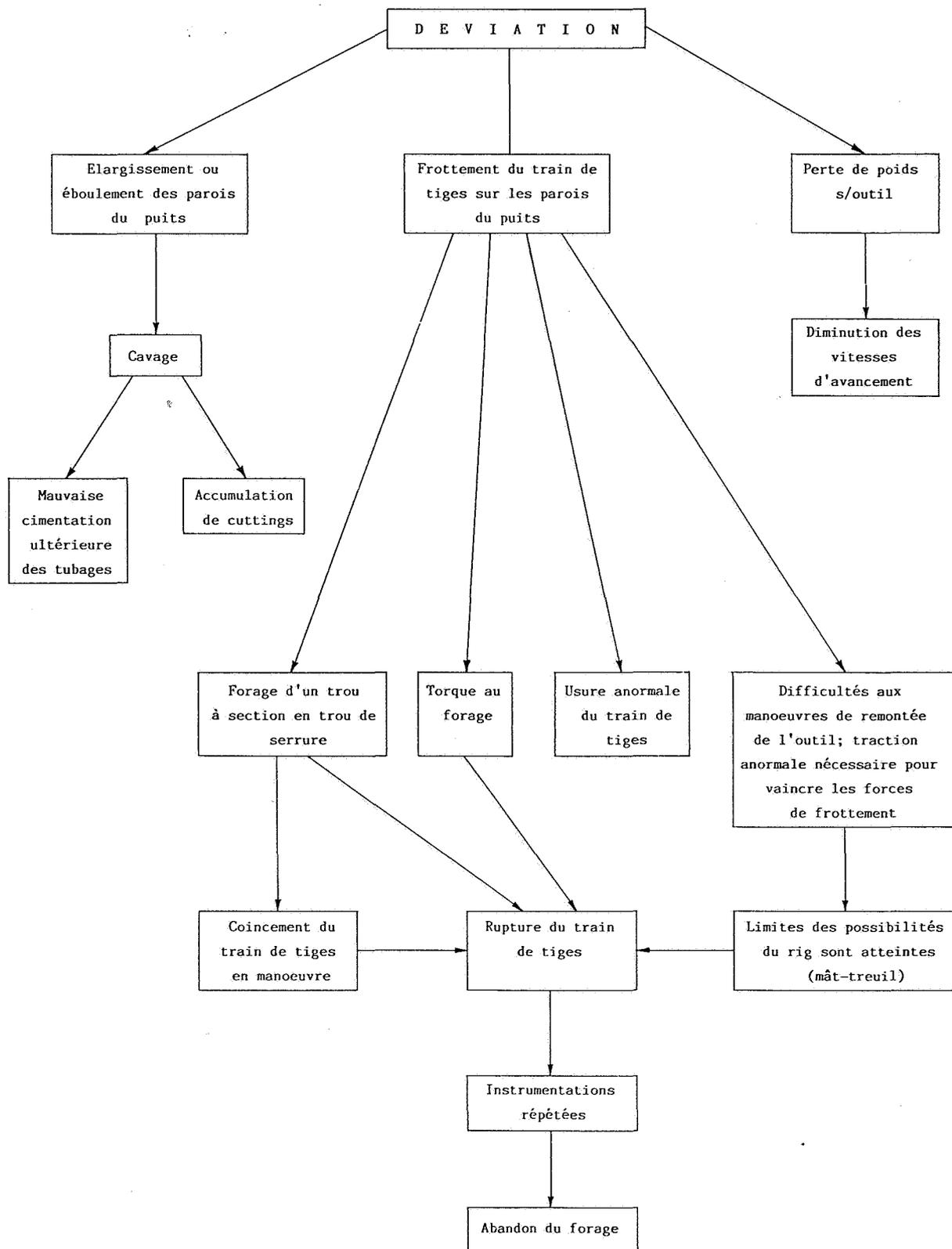


Figure 10. La déviation du forage et ses conséquences

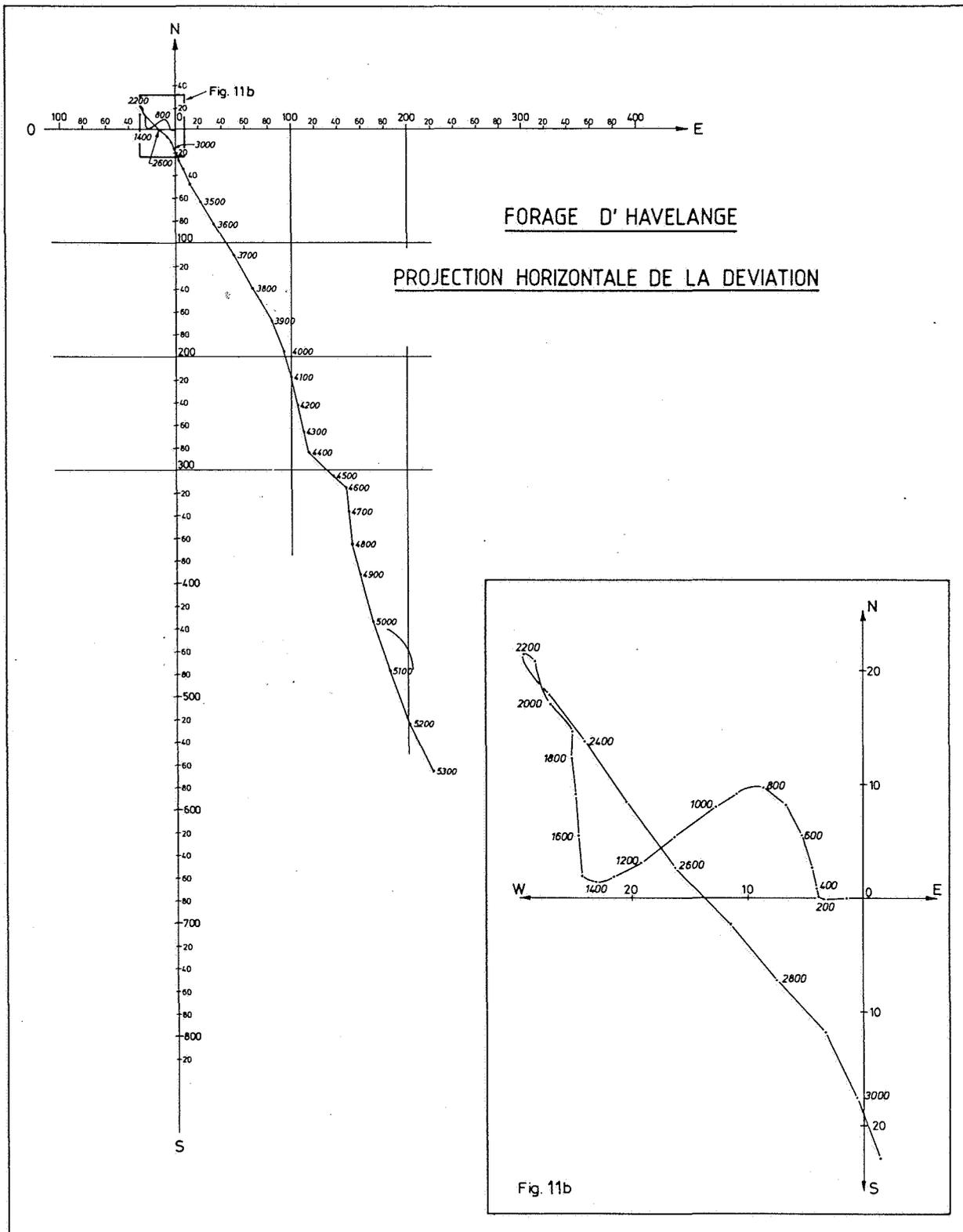


Figure 11. Projection du sondage dans le plan horizontal

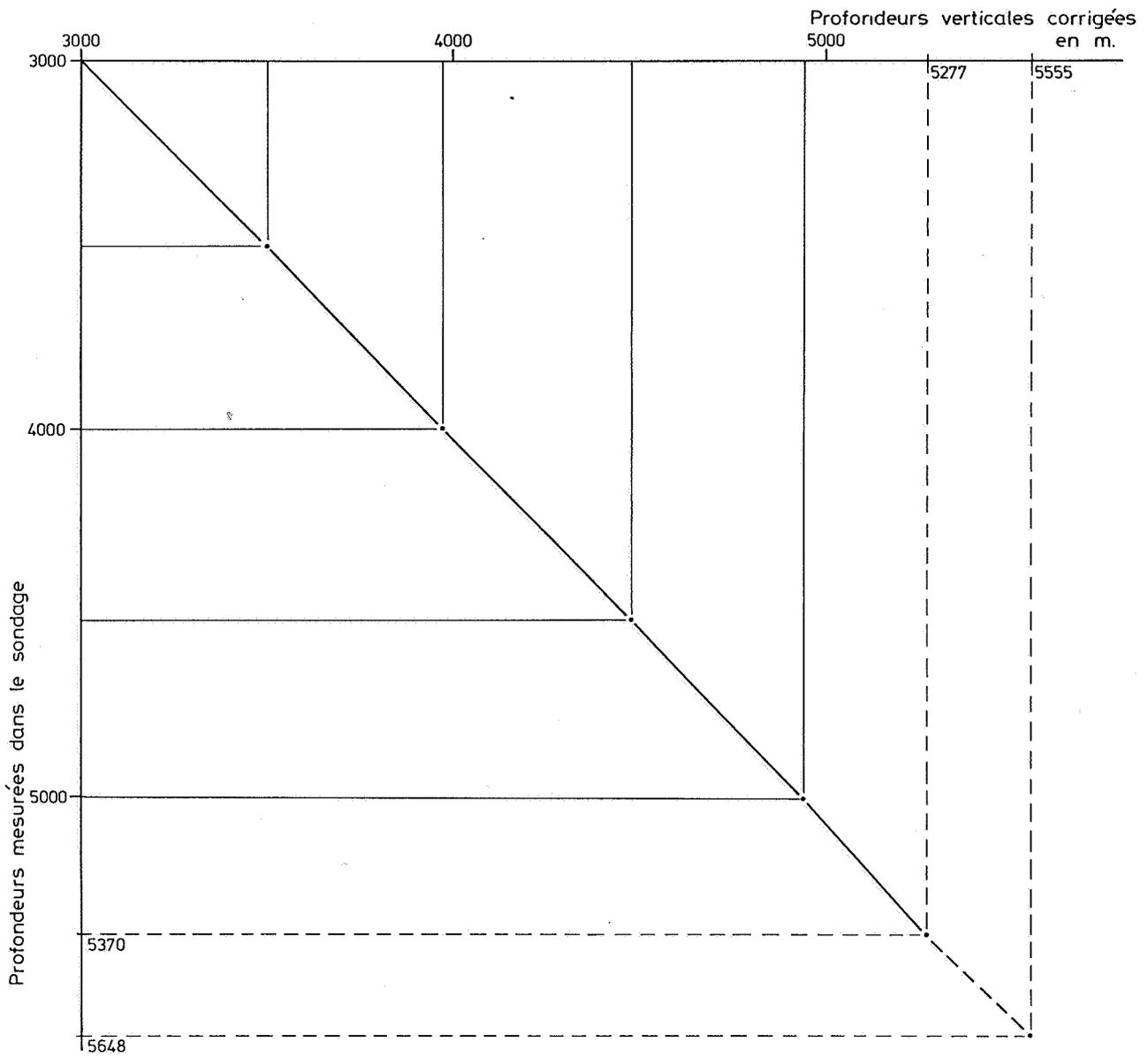


Figure 12. Courbe des profondeurs verticales corrigées

Bibliographie

- ASSELBERGHS, E., 1946.** L'éodévonien de l'Ardenne et des régions voisines. Mém. Inst. Géol. Univ. Louvain, 14 : 598 p.
- BARTELSSEN, H. & MEISSNER, R., 1979.** Exploration of deep tectonics of the Rheno-Hercynian zone by combined reflection-refraction measurements. E.A.E.G., 1979 meeting at HAMBURG, F.R.G.
- BERNARD, A. & JEDWAB, J., 1987.** La cobaltite des niveaux profonds du sondage d'Havelange. Bull. Soc. Belge Géol., 96,2 : 145 - 148.
- BLESS, M.J.M., BOUCKAERT, J. & PAPROTH, E., 1980.** Pre-Permian around the Brabant Massif in Belgium, the Netherlands and Germany. Meded. Rijks Geol. Dienst, 32-1/4 : 1 à 13.
- CLEMENT, J., 1963.** Résultats préliminaires des campagnes géophysiques de reconnaissance dans le permis de recherches "Arras-Avesnes" de l'Association SHELL Française - PCRBSAFREP. Objectifs du forage profond de Jeumont. - Marpent n° 1. Ann. Soc. Géol. Nord, LXXXIII : 237 - 241.
- DREESEN, R., 1984.** Stratigraphic correlation of famennian oolitic ironstones in the Havelange (Dinant basin) and Verviers boreholes (Vesdre massif) (upper Devonian, Belgium) Bull. Soc. Belg. Géol., 93 : 197 - 211.
- GRAULICH, J.M., 1980.** Les structures profondes en Famenne constituent-elles des réservoirs de gaz? Revue Générale du Gaz, 4 : 165 - 172.
- GRAULICH, J.M., 1982.** Le sondage d'Havelange (Champs du Bois). Ann. Mines de Belgique, 6, 545 - 561.
- HOUBAILLE, C., 1982.** Contribution à l'étude des caractères lithologiques, physiques et biostratigraphiques des roches au voisinage de la limite Frasnien-Famennien dans le sondage d'Havelange, Focant et Soumagne. Mém. lic. Univ. de Liège. (*)
- INGELBRECHT, L., 1981.** Lithologische en biostatigrafische studie van de proefboring van Havelange (S-rand van het bekken van Dinant). Mém. lic. Katholieke Univ. Leuven. (*)
- JEDWAB, J., 1985.** Présence de thorianite et de colbatite dans une roche du sondage de Havelange. Miscell. Géol., VI - 2,3.
- MONTJOIE, A., 1965.** Contribution à l'étude du Givetien d'Aisne. Ann. Soc. Géol. Belg., 88 : B125 - B149.
- STEEMANS, Ph. & GRAULICH, J.M., 1986.** Etude palynologique de la partie profonde du sondage de Porcheresse Havelange (Province de Namur, Belgique). Ann. Soc. Géol. Nord, juillet : 77 - 83.
- (*) travaux inédits déposés à la bibliothèque du Service Géologique de Belgique, rue Jenner 13, à 1040 BRUXELLES.

Annexe A. DEROULEMENT DU SONDAGE D'HAVELANGE

Année 1980

- Eté Un petit appareil de forage s'installe sur le site du chantier le long de la route, pour carotter les quatre cents premiers mètres de terrain. Il s'agit d'une reconnaissance pour apprécier la tenue des formations de surface, détecter d'éventuelles fissures aquifères et surtout évaluer le niveau de base des calcaires dévoniens afin de fixer la cote du sabot du tubage 13"3/8.
- Préparation de l'aire de forage.
- Décembre Arrivée des premiers camions.

Année 1981 (219 jours travaillés)

- 03 janvier Le mât *Ideco Full View Junior* est levé.
- 19 jan. - 03 fév. Les premiers mètres sont forés au marteau fond de trou (percussion) en diamètre 15", et ce jusqu'à 100 m, puis le trou est alésé en 17"1/2.
- 04 fév. - 13 mai La phase de forage en 17"1/2 atteint 1500 m.
- 14 mai - 02 juin *Diagraphies SCHLUMBERGER* suites auxquelles une déviation progressive du forage de 9° par rapport à la vertical est constatée entre 1500 m et 1700 m.
- Descente du tubage 13"3/3 à 1489 m et cimentation.
- 04 juin - 05 juil. Rectification de la verticalité du forage.
- 06 juil. - 02 août Chantier en congé.
- 03 août - 16 sept. Rectification de la verticalité du forage.
- 17 sept. - fin nov. Poursuite du forage en 12"1/4 de 1700 m à 2532 m, avec quelques reforages. Epaisseur des formations de l'Emsien supérieure aux prévisions et décision d'atteindre les 3000 m pour descendre le tubage 9"5/8.
- 01 - 15 décembre Montage d'un nouveau mât (*Turmeric*) permettant de descendre le tubage 9"5/8 à 3000 m, et capable d'atteindre l'objectif des 6000 m.
- 16 - 31 décembre Reprise du forage en 12"1/4 et nombreux reforages pour atteindre le fond à 2532 m.

Année 1982 (324 jours travaillés)

- 01 - 16 janvier Nombreux reforages et forage en 12"1/4 de 2532 m à 2667 m.
- 16 - 24 janvier Instrumentation à 2667 m.
- 25 jan. - 06 mai Reprise du forage en 12"1/4 de 2667 m à 2873 m. Apparition de problèmes de tenue des parois du puits, dus au débitage des roches en dièdres délimités par la stratification verticale et la schistosité inclinée à environ 55° vers le sud, ce qui provoque des éboulements fréquents et entraîne de nombreuses cimentations des parois du puits et maints reforages.
- 06 mai - 30 juin forage en diamètre 8"1/2 de 2873 m à 3188 m, avec :
- 03 - 13 juin : instrumentation double avec repêchage de molettes d'outil et de garniture coincée à 3118 m.
 - 19 - 28 juin : reforage et repêchage de ferraille.
- 01 - 02 juillet *Diagraphies SCHLUMBERGER* + *Vertical sismic profile (V.S.P.)* à 3180 m.

03 juil. - 02 août	Chantier en congé.
02 - 17 août	Reprise du forage en 8"1/2 de 3188 m à 3331 m.
18 - 27 août	Alésage en 12"1/4 de 2873 m à 3015 m.
28 août - 11 sept.	Pose du tubage 9"5/8 à 3012 m et cimentation. Reforage des bouchons de ciment. Reforage du bouchon de ciment de fond (3075 m à 3331 m).
12 sept. - 28 oct.	Forage en diamètre 8"3/8 de 3331 m à 4078 m.
28 oct. - 09 déc.	Coincement et rupture du train de tige à 4078 m. Instrumentation très complexe avec intervention de sociétés de service : SERVCO, SCHLUMBERGER, NOWSCO, avec : <ul style="list-style-type: none"> ▪ le 18 novembre : récupération d'une partie du <i>poisson</i> (les tiges 3"1/2); ▪ les 25 et 26 novembre : <i>Diagraphies</i> SCHLUMBERGER; ▪ le 30 novembre : récupération de la totalité du <i>poisson</i> (<i>drill-collars</i> et l'outil).
10 - 23 décembre	Forage en 8"3/8 de 4078 m à 4224 m.
23 déc. 1982 - 03 jan. 1983	Chantier en congé.

Année 1983 (255 jours travaillés)

04 - 07 janvier	Rupture de la garniture de forage à 4224 m en reprenant le fond et instrumentation.
07 - 15 janvier	Reforage de 4103 m à 4224 m. Forage de 4224 m à 4227 m avec ensuite reforage de 4159 m à 4227 m.
15 - 26 janvier	Forage en 8"3/8 de 4227 m à 4382 m. Entrée dans les quartzites vers 4360 m.
27 jan. - 09 fév.	<i>Diagraphies</i> SCHLUMBERGER.
11 - 16 février	Forage en 8"3/8 de 4383,60 m à 4432 m dans les quartzites.
17 - 21 février	Reforages et ramonages nombreux (de 4410 m à 4432 m; de 4377 m à 4432 m), problèmes de coincements et manoeuvres difficiles.
21 - 26 février	Forage en 8"3/8 de 4432 m à 4466 m dans les quartzites.
26 fév. - 03 avr.	Instrumentation longue et difficile, dont les principales étapes sont résumées ici : <ul style="list-style-type: none"> ▪ essai de décoincement à l'explosif (SCHLUMBERGER) - non-réussi; ▪ détermination du point de coincement; ▪ <i>back-off</i>: sectionnement de la première tige au-dessus des <i>drill-collars</i> - réussi; ▪ <i>fraisage</i> de la tête du <i>poisson</i> à 4313 m; ▪ essai de <i>repêchage</i> des <i>drill-collars</i> avec <i>overshot</i> et <i>coulisse de battage</i> (<i>Halliburton</i> et <i>Tri-state</i>) - non-réussi; ▪ décision de se mettre au-dessus du <i>poisson</i> et de forer en déviation : <ul style="list-style-type: none"> - fraisage sans poids - non-réussi; - essai d'amorçage de la déviation avec <i>hole-opener</i> - non-réussi; - cimentation de la tête du <i>poisson</i>; - descente d'une turbine, reforages de 3680 m à 4304 m.
03 - 06 avril	Amorce de la déviation à la turbine, de 4303 m à 4314 m.
07 avril - 17 mai	Forage en déviation en 8"3/8 de 4314 m à 4442 m, avec :

- du 25 avril au 09 mai : à 4418 m, rupture de la garniture et instrumentation (repêchage, rechute, nouveau repêchage, reforage et nettoyage du puits, nombreux fraisages);
- du 07 avril au 17 avril : essai de forage avec le *marteau fond de trou* de DIAMANT BOARD (de 4314 m à 4381 m).

19 mai

Diagraphies SCHLUMBERGER.

20 - 23 mai

Pose du *liner* 7", ancré à 2915 m avec *sabot* à 4436 m.

Cimentation en 2 étages (1 DV à 3836 m).

Pause pour la prise du ciment.

28 mai - 03 juil.

Chantier en congé.

04 - 09 juillet

Reforage de 700 m de ciment restés dans les tubages.

Forage en 6" difficile de 4442 m à 4466 m, le long de l'ancien *poisson (drill-collars)* laissé au fond.

Fraisage de 4463,50 m à 4465,80 m pour passer la cote du pied de l'ancien *poisson*

02 août - 21 déc.

Forage en 6" de 4466 m à 4931 m, avec :

- nombreux problèmes liés au choix des outils pour forer cette roche quartzitique extrêmement résistante (3000 à 3500 kg/cm²) :
 - usure anormale des outils et donc instrumentations nombreuses;
 - faible durée de vie des outils (max. 10 h) entraînant de nombreuses manoeuvres;
 - vitesses d'avancement réduites à 0.30 à 0.50 m/h;
- quelques passages schisteux rencontrés au cours des mois de septembre et de décembre;
- le 12 décembre, un INDICE DE GAZ est enregistré au chromatographe pendant environ 7 h, en reforage dans des schistes gris, à la sortie du banc de quartzite massif, entre 4764 m et 4873 m;
- quelques passes de quartzite ont été carottées.

22 déc. - 02 jan.

Chantier en congé.

Année 1984 (223 jours travaillés)

03 janvier

Reforage de 4923 m à 4930,80 m.

04 - 10 janvier

Forage en diamètre 6" de 4930,80 m à 4973,90 m.

11 - 17 janvier

Arrêt du chantier pour entretien mécanique.

17 - 23 janvier

Forage en diamètre 6" de 4973,90 m à 5115,80 m, avec carottage de 5000 m à 5001,50 m.

24 jan. - 06 févr.

Reforage à 1,50 m du fond; rupture de la *garniture* et de la garniture de *repêchage*

Instrumentation avec intervention des sociétés de service :

- DOWEL : *jar* (outil de battage);
- SERVCO : *overshot, taraud* (outils de repêchage);
- MEIKO : détermination du point de coincement et essai de décoincement à l'explosif - réussi.

07 - 20 février

Forage en diamètre 6" de 5015,80 m à 5062 m.

Le 13 février, en forage à 5039 m, un indice de gaz est enregistré au chromatographe pendant environ une demi-heure.

Avancement lent, manoeuvres de remontée et non récupération de l'outil, du *basket* et du *totco*.

21 février - 24 mars	Instrumentation à 5062 m avec intervention des sociétés de service : <ul style="list-style-type: none">▪ DOWEL : <i>jar</i> (outil de battage);▪ SERVCO : <i>overshot</i>.
05 - 27 mars	Forage en diamètre 6" de 5062 m à 5240,30 m.
28 mars	Remontée de l'outil sans les molettes.
29 mars - 26 mai	Instrumentation à 5240 m : <ul style="list-style-type: none">▪ essai de fraisage; remontée de la garniture sans fraise;▪ essai de repêchage - non réussi;▪ fraisage du raccord du basket et de la fraise avec une autre fraise SERVCO - réussi.
07-09 mai	Carottage en diamètre 6" de 5240,30 m à 5246,40 m.
10 - 15 mai	Tiges trouées, manoeuvre aller-retour et reforage de la passe carottée.
16 - 28 mai	Forage en diamètre 6" de 5246,40 m à 5280 m avec quelques reforages.
28 mai - 03 juin	Instrumentation : garniture cassée à la rotation; repêchage avec matériel SERVCO.
04 - 13 juin	Forage en diamètre 6" de 5280 m à 5370,90 m avec des avancements rapides, mais difficultés aux manoeuvres.
14 - 16 juin	Diagraphies SCHLUMBERGER : <ul style="list-style-type: none">▪ logging électrique;▪ sismique VSP par vibroseis (camions vibrateurs), standard et offset. Constatation d'un brutal redressement de la déviation entre 5225 m et 5275 m où l'on passe de 28° à 18° par rapport à la verticale (<i>dog leg</i>).
17 - 19 juin	Carottage de 5370 m à 5375 m.
20 - 30 juin	Alésage et atténuation du <i>dog leg</i> au moyen de <i>stabilisateurs</i> chargés en carbure de tungstène.
02 - 29 juillet	Chantier en congé.
30 juil. - 03 août	Réception des tiges 3 1/2 reconditionnées pendant les congés. Constatation de mal-façon, un train de tiges de 3000 m environ inutilisable.
06 - 21 août	Chantier à l'arrêt dans l'attente de nouvelles tiges de forage.
22 - 23 août	Reprise des activités; <i>gerbage</i> de la nouvelle garniture de forage.
24 août	Forage en diamètre 6" de 5375 m à 5388 m.
27 - 29 août	Reprise au fond, <i>torque</i> et coincement. Essai de dégagement et rupture. Instrumentation avec intervention du matériel SERVCO.
30 août - 06 sept.	Forage en diamètre 6" de 5388,60 m à 5449,50 m.
06 - 11 septembre	Alésage et carottage de 5449,50 m à 5452,70 m.
12 - 15 septembre	Forage en diamètre 6" de 5452,70 m à 5468 m.

16 - 20 septembre	Manoeuvre de remontée et non récupération de l'outil, du porte-outil et de 8 <i>drill-collars</i> . <i>Instrumentation</i> à 5468 m comprenant 2 <i>overshot</i> SERVCO et 1 <i>taraud</i> .
25 sept. - 10 oct.	Forage en diamètre 6" de 5468 m à 5528 m.
11 et 12 octobre	Manoeuvres pour tiges trouées.
13 - 15 octobre	Reforage et carottage de 5528 m à 5532,60 m.
16 oct. - 13 nov.	Forage en diamètre 6" de 5532,60 m à 5648 m. Depuis la profondeur de 5450 m, le forage traverse des formations métamorphiques très dures, dans lesquelles les avancements sont extrêmement lents (2 à 4 h/m).
14 nov. - 19 dec. 84	Manoeuvre, reforage pour reprise du fond et rupture du train de tiges à 3058 m. <i>Instrumentation</i> : <ul style="list-style-type: none"> ▪ en novembre 1984, durant 11 jours, 7 manoeuvres aller-retour avec <i>taraud</i>, <i>coulisse</i>, <i>fraise</i>, <i>overshot</i>; on accroche le <i>poisson</i>, mais impossibilité de le dégager du fond; ▪ en décembre 1984, durant 18 jours, opération MEIKO : <ul style="list-style-type: none"> - essai de dévissage à l'explosif, juste au-dessus de l'outil; l'explosif ne passe pas jusqu'au fond, mais est arrêté dans les tiges à 4960 m; - rupture des tiges à l'explosif à 4960 m; il reste au fond un <i>poisson</i> de 688 m; - 8 manoeuvres aller-retour avec <i>fraise</i>, outil <i>rock-bit</i>, <i>overshot</i>; impossibilité de déterminer la cote exacte de la tête du poisson.
20 déc. - 02 jan. 85	Chantier en congé.
Année 1985	
janvier	Durant 6 jours, 3 manoeuvres aller-retour avec <i>overshot</i> , <i>rallonge</i> , <i>guide de recherche</i> , <i>taraud</i> ... Impossibilité de décrocher le <i>poisson</i> . Arrêt du chantier à cause du gel du 06 au 22 janvier.
24 janvier	Le Service Géologique de Belgique décide d'abandonner le puits.

Annexe B. Données techniques

B.1 Caractéristiques de l'installation de surface

Hauteur	Mât : 136 pieds (42 m); Passerelle d'accrochage : à 26 m du pied du mât. Substructure : 5 m.
Capacité	Mât : capacité nominale de 350 t.
Puissances	Treuil : 1500 cv (disponible 1200). Pompes : 800 et 650 cv.
volumes	Bacs à boue : 340 m ³ . Bourbier : 1000 m ³ environ. Puits à 3000 m : 347 m ³ théoriques, 510 m ³ environ réels (caves).
Poids	Garniture de forage suspendue au crochet : - à 3000 m (12"1/4) : 110 t; - à 5000 m (6") : 135 t. Colonne de tubage 9"5/8 descendue à 3000 m : - dans l'air : 236 t; - au crochet : environ 200 t (dans la boue).
Débit des pompes	1000 à 2400 l de boue par minute.
Consommation de mazout	1800 à 2500 l/jour, suivant les nécessités du forage.

B.2 Caractéristiques du matériel de forage

Nom de l'appareil	MAS 6000 - Rig n°7.
Treuil	MASSARENTI MAS 6000.
Moteurs du treuil	3 DETROIT DIESEL GM V12/71-N et 3 convertisseurs ALLISON TC 955.
Mât	BRAHNAM TURMERIC 136 pieds/777.000; capacité nominale de 350 t.
Table de rotation	CONTINENTAL EMSCO P 20 1/2 - 53 1/4.
Moufle mobile	CONTINENTAL EMSCO RA-44-5 350 t.
Tête d'injection	CONTINENTAL EMSCO L-300.
Pompes de forage	1. DRESSER IDECO T800; 2. OILWELL 220 P; 3. CONTINENTAL EMSCO DA 500.
Moteurs pompes	1. CATERPILLAR D-379-TA; 2. CATERPILLAR D-379-TA; 3. Compound treuil.
Bacs à boue	Circuit de mixing basse pression : 1 x 60 m ³ 2 x 32 m ³ 2 x 100 m ³ 1 x 18 m ³
Garniture standard	Drill-collars : 9"1/2, 8", 6"1/4, 4"3/4. Drill-pipes : 5"1/2, 5", 3"1/2.
Obturbateur de sécurité (BOP)	Fermeture : <ul style="list-style-type: none">▪ totale : 700 kg/cm² (série 10.000 PSI);▪ sur tiges : 700 kg/cm² (série 10.000 PSI);▪ sur tiges : 350 kg/cm² (série 5.000 PSI);▪ annulaire : 350 kg/cm² (série 5.000 PSI).

Annexe C. RAPPORT SUR LES OPERATIONS SISMIQUES DE TROU

GRAULICH J-M. (1), VANDENBERGHE N. (2) & HANCE L. (3)⁴

⁴ (1) Rue de Campine, 411 - B4000 LIEGE (2) Instituut voor Aartwetenschappen, Redingenstraat, 16bis - B3000 LEUVEN
(3) Service Géologique de Belgique, rue Jenner, 13 - B1040 BRUXELLES

C.1 Introduction

Les opérations sismiques de trou au sondage d'Havelange ont eu pour but d'établir un interface permettant de transposer les observations stratigraphiques, lithologiques et structurales du sondage sur les deux profils sismiques de surface passant très près du sondage. Il s'agit de deux profils de la campagne sismique réflexion "Famenne 1978" (**Prakla Seismos**), retraités par **BEB** en 1986. Cette transposition permettra d'attribuer une signification géologique plus sûre aux réflecteurs identifiés sur les profils sismiques.

Toutes les opérations VSP et OVSP ont été exécutées et traitées par **SCHLUMBERGER**.

Cette annexe discute l'interprétation des résultats et leur corrélation avec les profils sismiques de surface.

Les différents rapports sismiques peuvent être consultés au Service Géologique de Belgique.

C.2 La campagne VSP 1982 (SCHLUMBERGER 1982)

L'essai a été réalisé à l'aide d'un canon à air disposé dans le bourbier de surface alors que le sondage avait atteint la profondeur de 3180 m. Les positions des géophones entre la surface et 849 m n'ont pas été utilisées, en raison du niveau de bruit trop élevé. De plus, le contenu en énergie du profil VSP est très bas et les réflecteurs qui apparaissent représentent plutôt des effets de traitement indépendants du contexte géologique. Sans doute, l'énergie de la source est-elle dissipée dans le bourbier de surface.

C.3 Le VSP - standard 1984 (SCHLUMBERGER VSP 1984)

L'essai a été réalisé alors que le sondage était à la profondeur mesurée dans le trou dévié (MD) de 5370 m en utilisant comme source un camion vibreur. Des signaux ont été enregistrés entre 3100 et 5364 m. L'interprétation de ce profil est limitée car le traitement des données ne tient pas compte de la déviation du sondage. Les profondeurs renseignées sont donc des profondeurs MD et non des profondeurs verticales corrigées en fonction de la déviation du trou (VD). En plus, l'information contenue dans la diagraphie SONIC n'a pas été exploitée. Elle aurait permis une conversion optimale temps-profondeur du profil VSP.

C.4 L'OVSP 1984 (SCHLUMBERGER OVSP 1984)

La source était un camion vibreur, placé en position fixe à 2890 m du trou, dans la direction N323°E. Cette direction correspond approximativement à la direction du plan principal de forage (voir Figure 7 à la page 17). Les signaux ont été enregistrés entre 3480 m et 5365 m, alors que le sondage était à 5370 m de profondeur.

Le traitement doit faire intervenir un modèle géologique. En effet, étant donné l'espacement entre la source et le sondage, les points de réflexion sur un même horizon réflecteur seront répartis à différentes distances du sondage. Sur le modèle géologique retenu, on recherchera les trajets des ondes pouvant arriver à une position de géophone dans le trou (Figure 13 à la page 47). A chaque trajet, correspond un temps de parcours; on peut dès lors attribuer à chaque temps d'arrivée un trajet d'onde déterminé. Il est ainsi possible de retrouver dans le sous-sol le point de réflexion du signal enregistré et de déterminer la distance qui le sépare du puits. En reliant entre chaque trace les signaux issus d'un même point, on obtient des isolignes obliques (Figure 14 à la page 48). Chaque isoligne oblique est ensuite disposée verticalement à la position de son point d'origine sur l'axe des X et en conservant son temps d'arrivée sur l'axe des Y. La Figure 15 à la page 49 montre le résultat final. Ce profil se trouve dans le plan vertical orienté N323°E. Le modèle géologique utilisé par SCHLUMBERGER est celui représenté à la Figure 13 à la page 47. On reviendra plus loin sur le caractère très schématique de ce modèle. Comme tous les points de réflexion se trouvent au NW du sondage, la limite supérieure du profil OVSP au sud, représente l'image en temps du tracé du sondage (Figure 15 à la page 49).

C.4.1 Comparaison du profil OVSP avec la sismique de surface et interprétation

C.4.1.1 Projection du sondage sur les profils.

La corrélation entre les résultats des profils sismiques de trou et ceux de surface n'est pas immédiate. En effet, la trace du forage dans le plan horizontal se situe entre les traces des profils sismiques de surface 8 et 13 (Figure 7 à la page 17). Il faut donc estimer une direction moyenne des couches suivant laquelle la trace du forage pourrait être projetée sur les profils sismiques de surface.

D'après la carte géologique, la direction moyenne des couches en surface est de N47°E. La juxtaposition des profils 8 et 13 suivant leur point d'intersection permet de reconnaître des plans communs et d'en déduire la direction par projection stéréographique. La direction moyenne est alors de l'ordre de N70°E. On retrouve également cette valeur en reliant l'apex des structures anticlinales identifiées sur chaque profil.

Sur les profils 8 et 13, la trace du forage a été projetée suivant la direction des couches en surface, en indiquant un intervalle dont les limites correspondent à la fourchette de directions de projection possibles (N40°E à N80°E) (Figure 16 à la page 50 et Figure 17 à la page 51).

La largeur de la bande atteinte le long d'un profil sismique (zone de Fresnel) est fonction de la profondeur, du spectre de fréquences utilisé et de la vitesse sismique. A Havelange, la bande a une largeur de l'ordre de 1000 m (basses fréquences) à 580 m (hautes fréquences).⁵ Elle couvre donc la position du sondage.

C.4.1.2 Corrélation entre les profils OVSP et les profils sismiques 8 et 13

Avant de pouvoir comparer le profil OVSP aux profils sismiques de surface, il faut accorder les plans de référence. Le plan de référence de l'OVSP choisi par SCHLUMBERGER est + 280 m. Les 130 m de différence correspondent à $1 \text{ s}/4000 \text{ m} \times 130 \text{ m} = 0,0325 \text{ s}$, soit 65 ms en temps doubles. La vitesse d'intervalle de 4000 m/s est celle utilisée pour les corrections statiques de la campagne Famenne 1978.

Pour superposer l'OVSP aux profils sismiques (Figure 16 à la page 50 et Figure 17 à la page 51), il faut faire correspondre p.ex. 0,5 s sur l'OVSP avec 0,435 s sur les profils 8 et 13 et faire coïncider la position de la tête du puits, bien repérable sur les deux types de document sismique.

C.4.1.3 Interprétation

La partie NW de l'OVSP (Figure 15 à la page 49) contient des réflecteurs obliques différents de la géométrie obtenue par la sismique de surface et qui peuvent correspondre à des ondes de cisaillement (S). La genèse des ondes S à partir des ondes de compression (P) est favorisée par la présence de couches avec fort pendage comme c'est le cas sur une grande portion du sondage (Figure 5 à la page 13). Dans ce cas, l'angle critique d'incidence au-dessus duquel s'opère cette transformation est atteint plus facilement.

⁵ Voir à ce sujet SHERIFF, R.E. - Aspects of seismic resolution. in BERG, O.R. & WOOLVERTON, D.G. (Ed.) 1985., Seismic Stratigraphy II. An integrated approach. AAPG, memoir 39.

La partie SE du profil OVSP montre un réflecteur bien marqué vers 1,89-1,90 s. Quatre réflecteurs nettement moins nets sont également indiqués. Le réflecteur 1,89-1,90 s OVSP correspond à un réflecteur bien exprimé sur les profils de surface. C'est la base de la zone faillée dont GRAULICH (1980) a cartographié la limite supérieure.

La rareté des réflecteurs sur l'OVSP et sur les profils sismiques de surface est sans doute en relation avec le caractère localement très tourmenté du contexte géologique structural. Si celui-ci avait été plus simple, on n'aurait sans doute pas obtenu de meilleurs résultats, car le modèle géologique utilisé dans le traitement par SCHLUMBERGER ne correspond nullement à la réalité. On ne peut espérer mettre en évidence que des structures géologiques subhorizontales, telles qu'elles sont schématisées dans le modèle. C'est peut-être la raison du caractère marqué sur l'OVSP du réflecteur 1,89-1,90 s, identifié comme plan de discontinuité relativement plat.

Il serait illusoire d'interpréter plus en détail le profil OVSP, d'une part, en raison du modèle schématique utilisé et d'autre part, étant donné que l'information des logs SONIC n'a pas été exploitée.

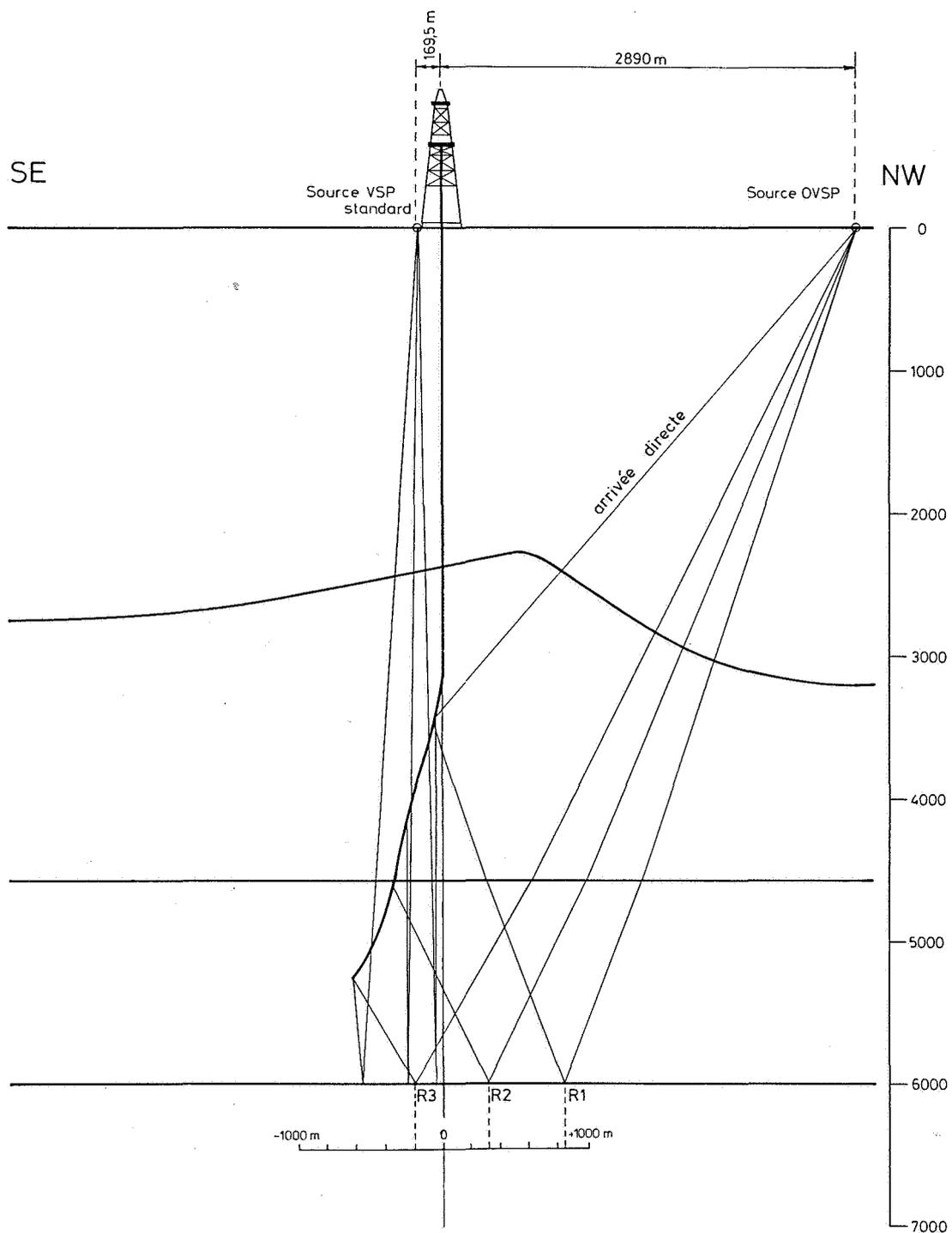


Figure 13. Modèle géologique utilisé par SCHLUMBERGER: Notez que les points de réflexion sur un même horizon (p. ex. R1, R2 et R3) se trouvent à différentes distances de l'axe vertical du sondage. Par conséquent, afin de pouvoir déchiffrer l'OVSP de la Figure 14 à la page 48, on recherche pour chaque trace de géophone, les points de réflexion correspondant à chaque temps d'arrivée. Les isolignes obliques de la Figure 14 relient les points de réflexion se trouvant à une même distance de l'axe vertical du sondage.

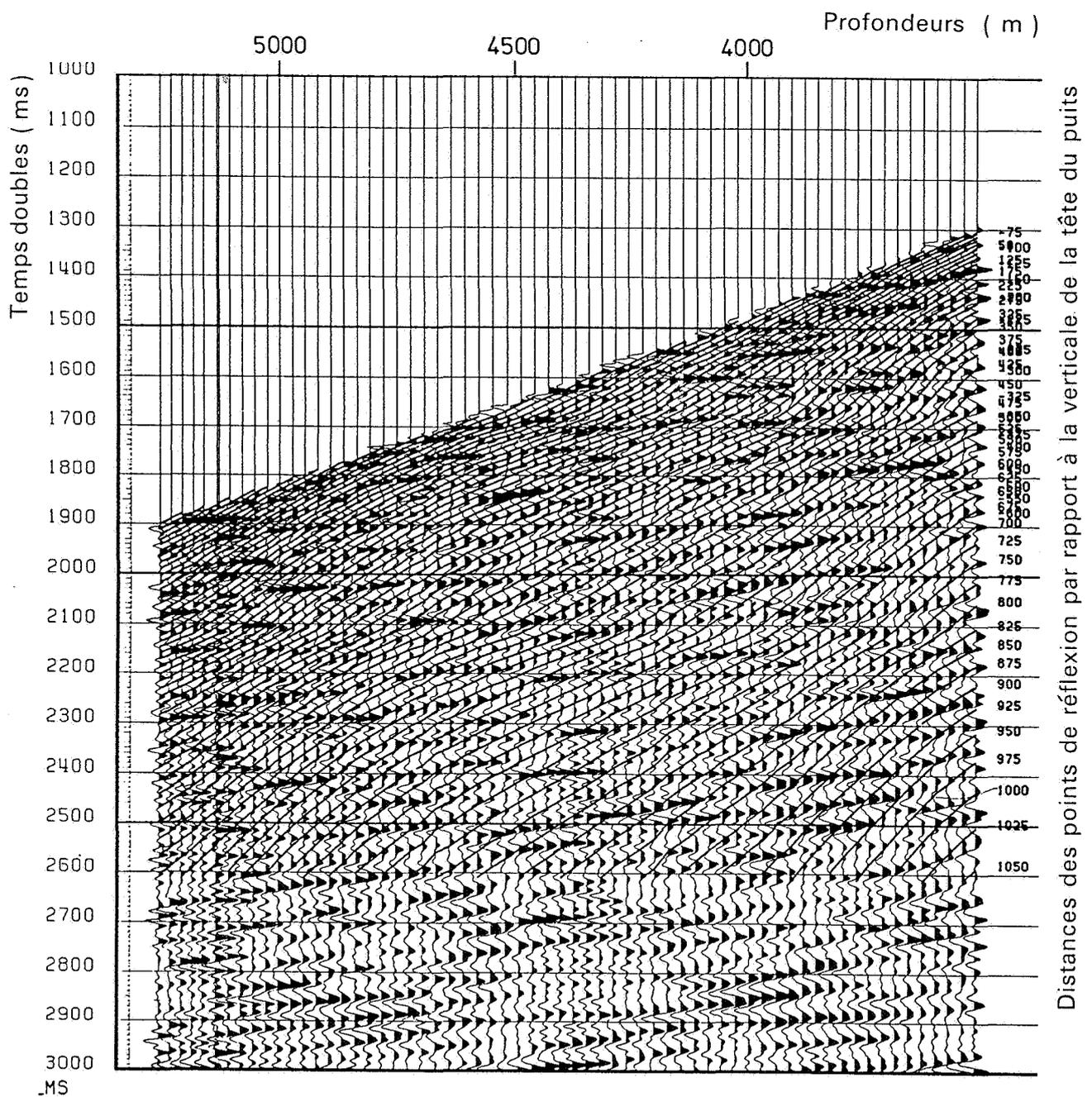


Figure 14. Profil OVSP 1984: Tracé des lignes d'égalité distance entre les points de réflexion et le puits.

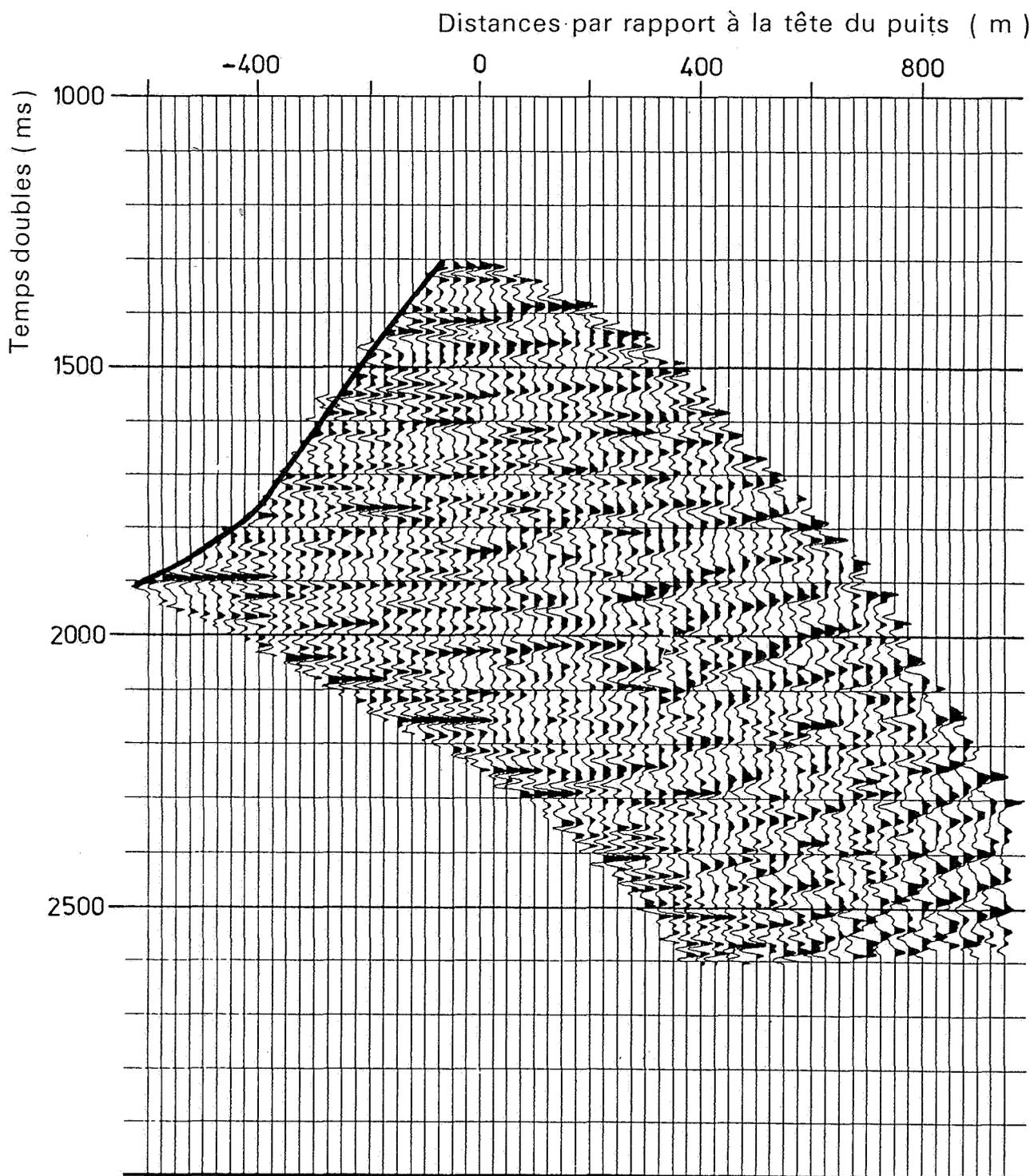


Figure 15. OVSP 1984 - Multi corridor stack: Sommmation le long des isolignes de la Figure 14

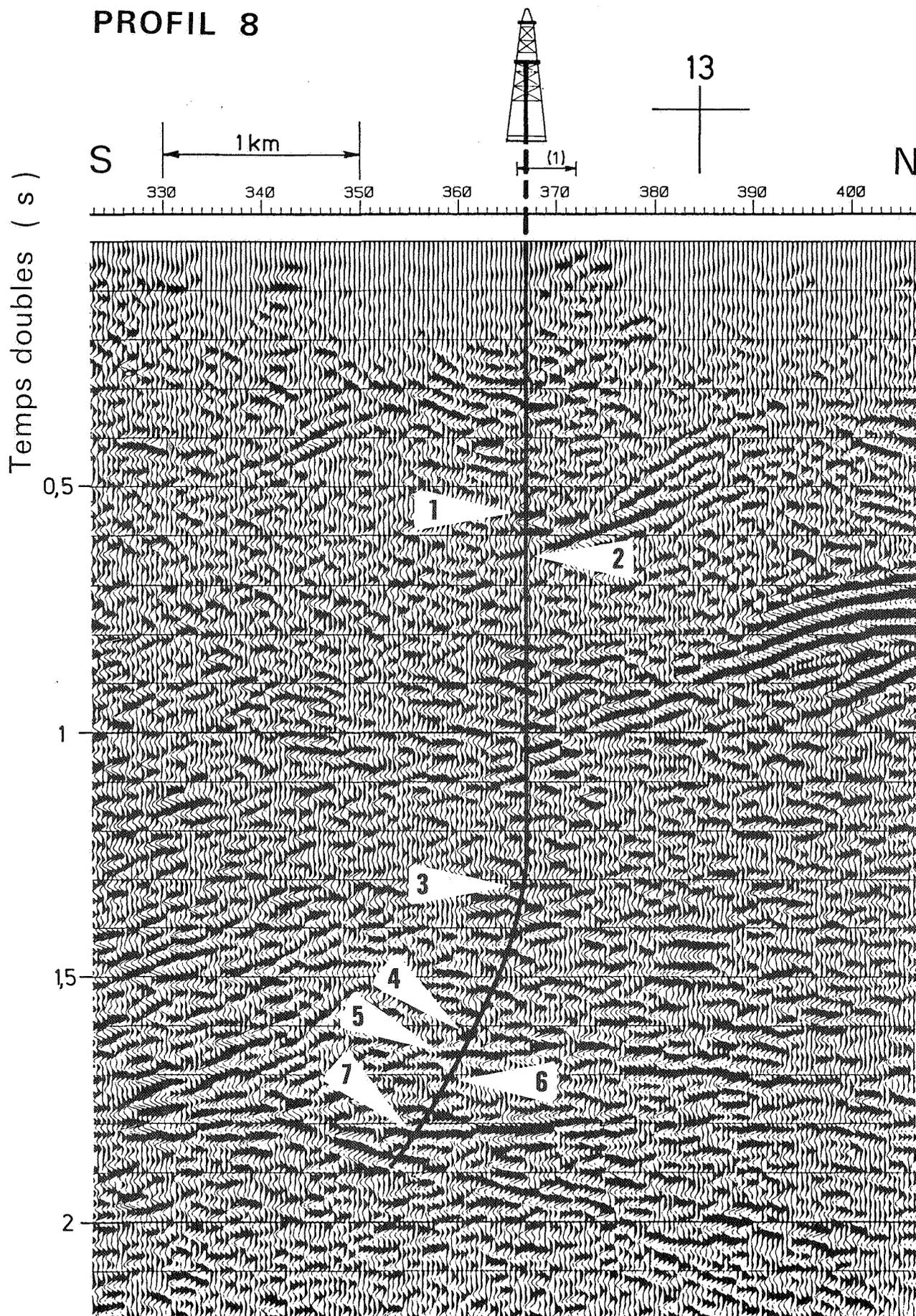


Figure 16. Projection du sondage sur le profil sismique n° 8: Pour la signification des réflecteurs fléchés, voir tableau n°3, p. 56.

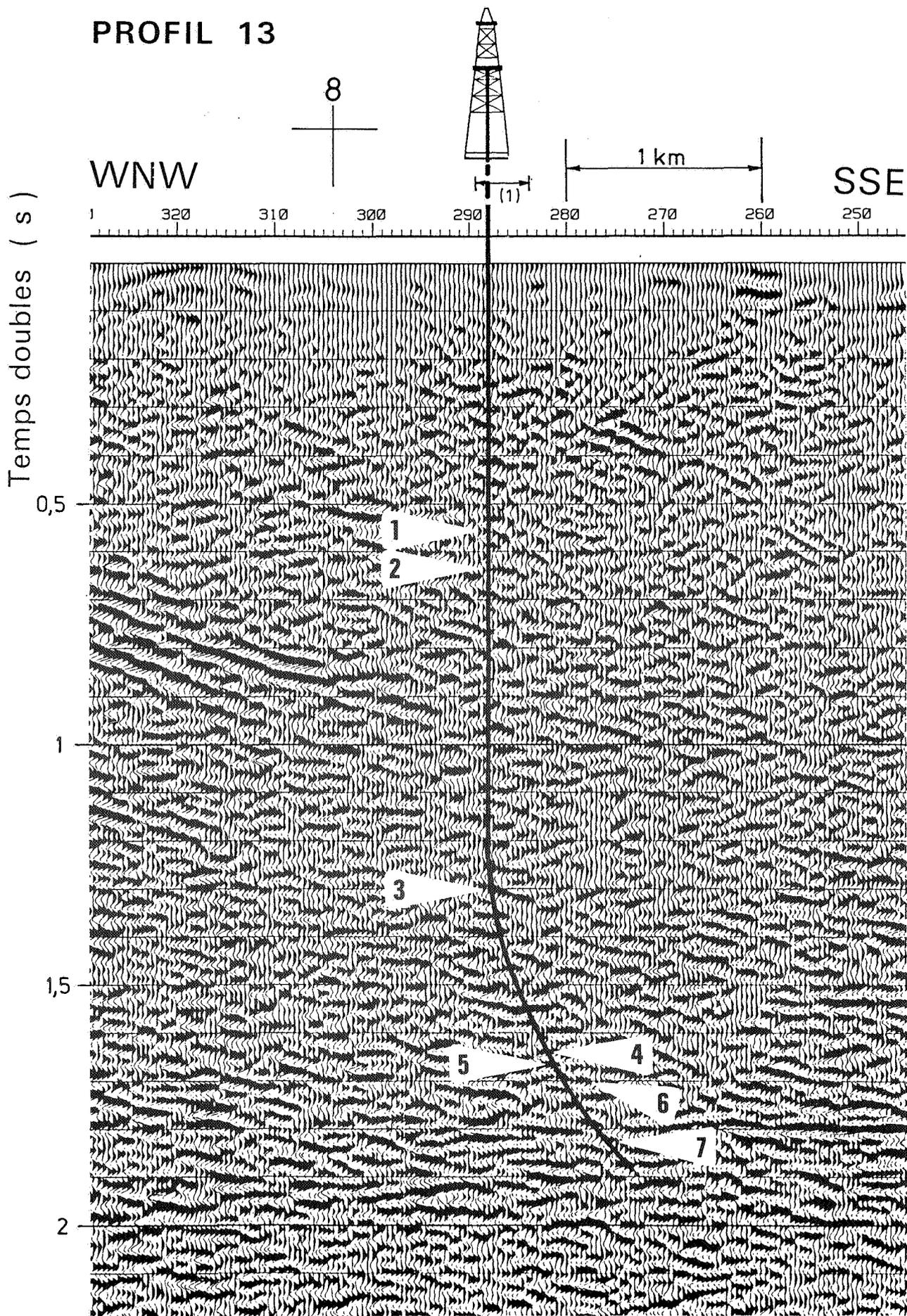


Figure 17. Projection du sondage sur le profil n° 13: Pour la signification des réflecteurs fléchés, voir tableau n°3, p. 56.

C.5 Les nouveaux traitements 1986-1987 (SCHLUMBERGER 1986-1987)

Rappelons le but des opérations sismiques de trou. Tout d'abord, l'image sismique de trou donne des informations à la fois sur la profondeur des phénomènes géologiques caractérisés par des contrastes acoustiques et sur les temps de parcours des ondes. Ensuite, l'OVSP permet une meilleure corrélation entre les profils sismiques de surface et les données de forage et par là, l'interprétation géologique des réflecteurs.

Pour obtenir de meilleurs résultats dans ce sens, de nouveaux traitements ont été mis en oeuvre par SCHLUMBERGER:

- une réinterprétation de l'OVSP avec un modèle géologique plus réaliste;
- un calibrage de l'information SONIC par les informations sismiques du trou;
- l'élaboration de sismogrammes synthétiques.

Dans le même temps, un nouveau traitement des profils de surface 8 et 13 de la campagne 1978 a été confié à la firme BEB (1986).

C.5.1 Le modèle géologique et le traitement VSP

Un profil géologique incorporant les informations de la cartographie de surface et la coupe du sondage a été construit par J.M. GRAULICH et est présenté à la Figure 5 à la page 13. Ce modèle serait trop complexe pour simuler le trajet des ondes de l'OVSP et SCHLUMBERGER s'est limité à retravailler le VSP standard. Le rapport contient les signaux originaux et les documents des différentes phases de traitement (données brutes, corrections d'amplitudes, filtrage FK pour éliminer les ondes de cisaillement, séparation des ondes descendantes et montantes). La présentation finale, en polarité normale et inverse, est zérophase - on admet que le résultat d'un traitement vibroseis est très proche d'une zérophase - et dans la fourchette de fréquences 15 à 55 Hz (traitement vibroseis de surface: 15 à 45 Hz). L'utilisateur de ces diagrammes doit savoir que les profondeurs indiquées sont des profondeurs de sondage (MD) qui peuvent être converties en profondeurs verticales (VD) à l'aide de la Figure 12 à la page 30.

C.5.2 Conversion temps-profondeur: les courbes de calibrage.

La calibration des diagraphies SONIC par les sismiques de trou, a permis de construire une courbe de conversion temps-profondeur. Cette courbe est donnée à la Figure 18 à la page 53 à partir de la profondeur de 2000 m; Elle est déduite du VSP. Sous la profondeur de 3180 m MD, dans le sondage dévié, les vitesses d'intervalle de la diagraphie SONIC sont utilisées, mais calibrées par les premières arrivées de la sismique de trou.⁶

C.5.3 Le sismogramme synthétique

Pour éliminer les multiples, une présentation en couloir (corridor stack) a été réalisée en sommant la bande comprise entre 20 et 120 ms dans le trajet du sondage (Figure 19 à la page 54 et Figure 20 à la page 55). Cependant, par comparaison avec l'OVSP, ce traitement n'a pas mis en évidence d'autres réflecteurs que celui déjà identifié à 1,89-1,90 s.

A proximité du sondage, le VSP est de meilleure qualité que l'OVSP.

⁶ SCHLUMBERGER, 1982. - Well evaluation developments, Continental Europe. pp 210 - 211.

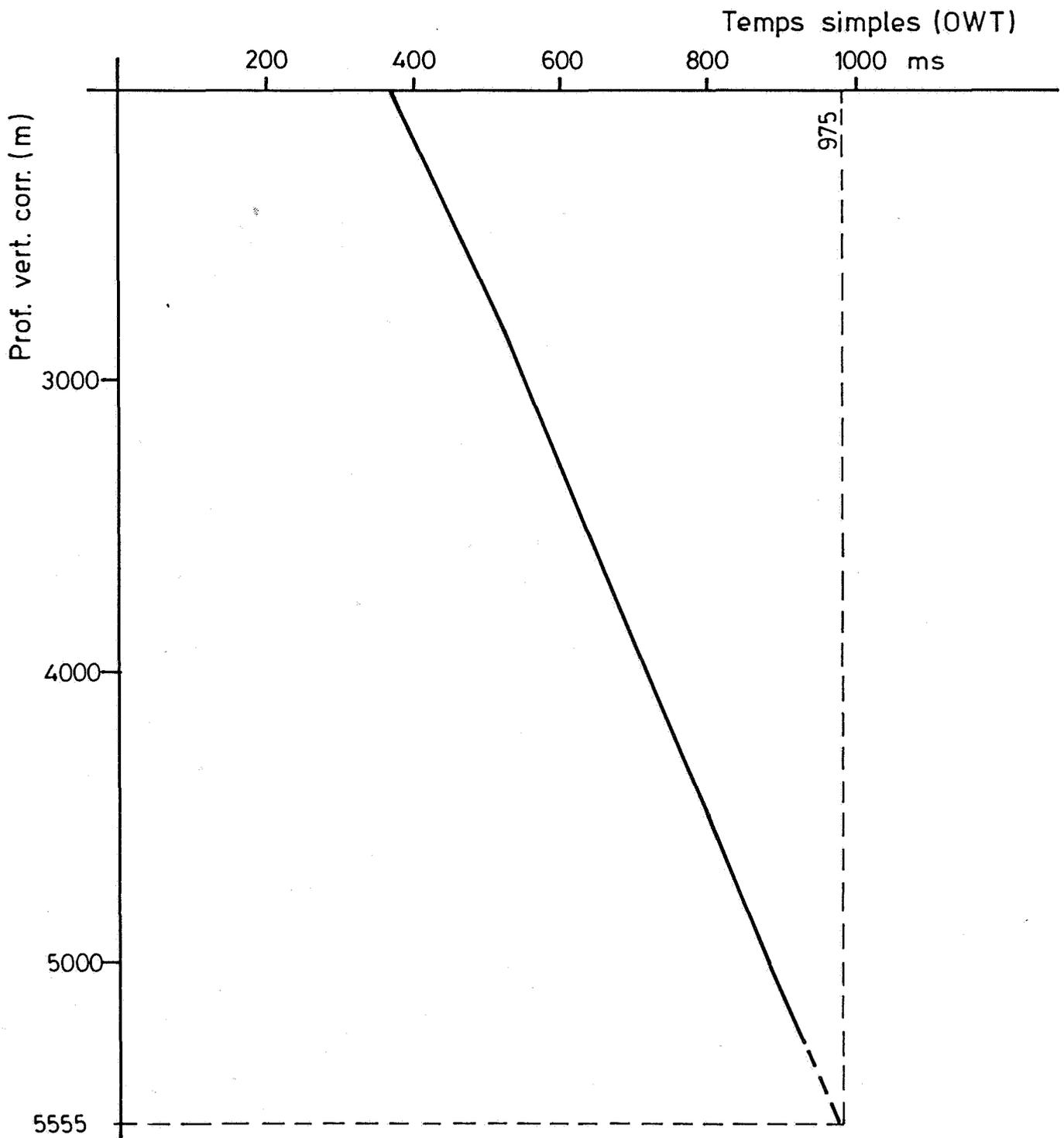


Figure 18. Courbe temps - profondeur déduite du VSP et du SONIC

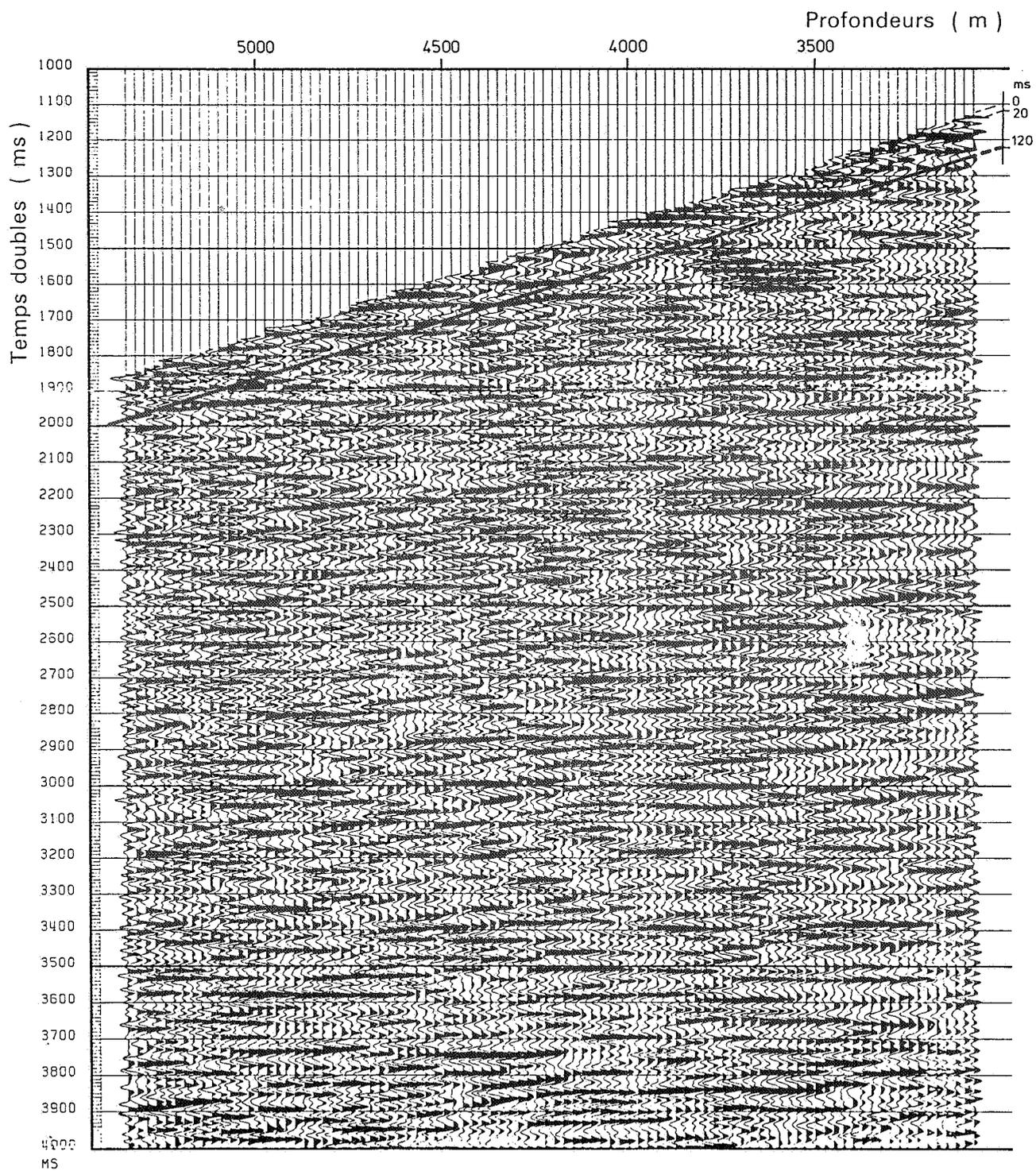


Figure 19. Profil VSP 1984 avec indication de la zone retenue pour le corridor stack.

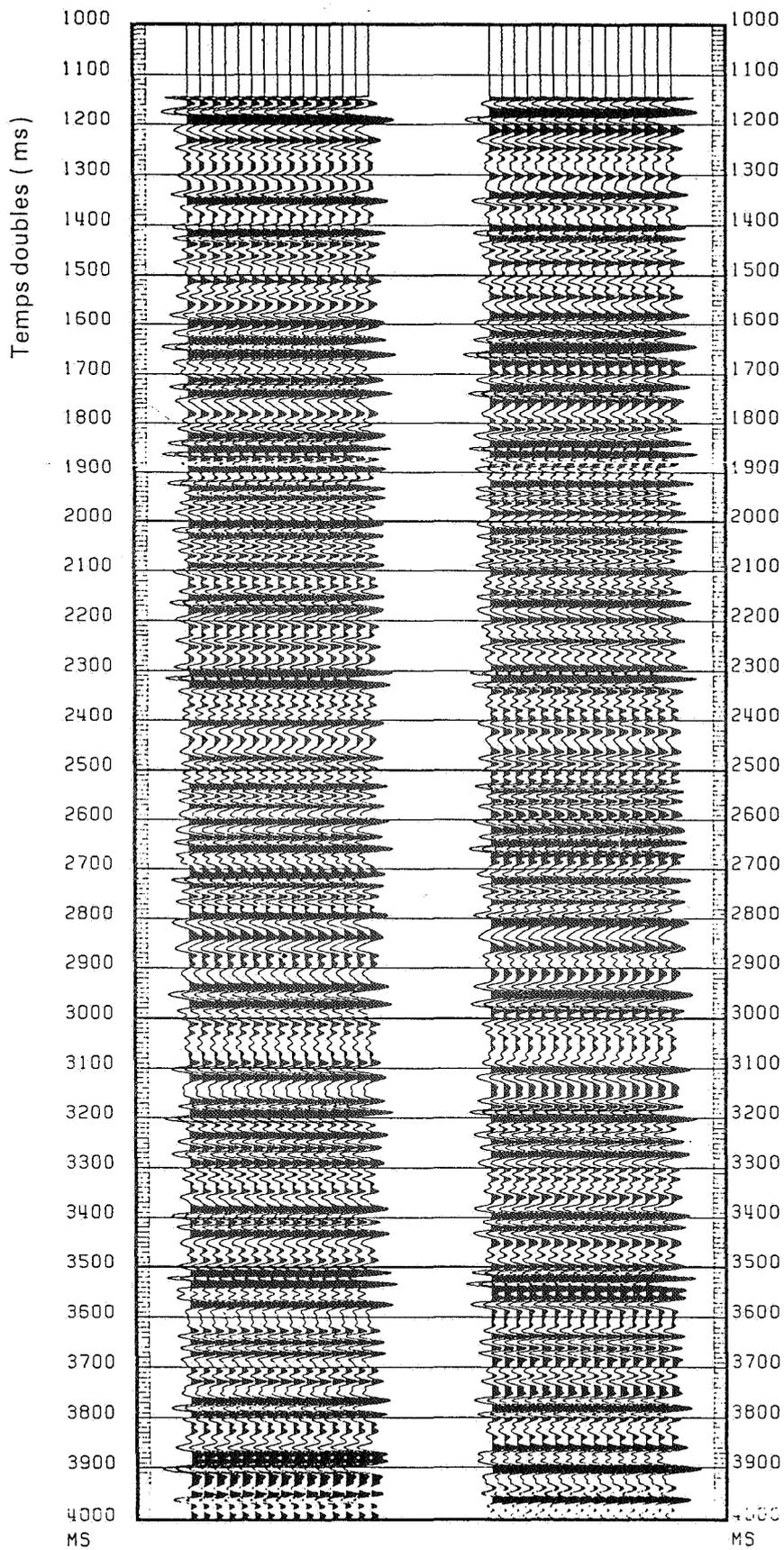


Figure 20. VSP 1984, corridor stack.

C.5.4 Transposition des données géologiques du sondage sur les profils sismiques de surface

Après l'examen de tous les documents sismiques, la procédure la mieux adaptée dans le cas d'Havelange semble être la suivante, par ordre chronologique:

- identifier en profondeur MD les phénomènes géologiques dans le sondage
- transformer MD en VD;
- en utilisant la courbe temps-profondeur corrigée, transformer VD en ms OWT (One Way Time)
- multiplier par 2 pour transformer OWT en TWT (Two Way Time)
- soustraire 65 ms pour amener les opérations sismiques de trou au même plan de référence que la sismique de surface = TWT surface.

Il est ainsi possible de vérifier si chaque phénomène géologique observé au cours du sondage peut être retrouvé sur la sismique de surface. Inversement, les géométries des profils sismiques peuvent être interprétées en termes géologiques, sur le plan structural et stratigraphique. Le tableau 3, la Figure 16 à la page 50 et la Figure 17 à la page 51 résument les résultats. La trace du sondage reportée sur les profils sismiques est celle observée sur le profil OVSP (Figure 15 à la page 49).

Repères sondage MD (m)	VD (m)	TWT - 65 ms = TWT surf. (ms)	Signification géologique
(1) 1703	1699,39	625 - 65 = 560	Contact calcschistes / grès eiféliens
(2) 1920	1919,3	705 - 65 = 640	Limite grès eiféliens / schistes emsiens
(3) 3862	3840	1383 - 65 = 1318	Contact entre une série à dominante schisteuse (Emsien) et une série plus quartzitique (Praguien; plus grande densité de réflecteurs sismiques)
(4) 4850	4799	1700 - 65 = 1635	Début de la zone faillée
(5) 4955	4898	1733 - 65 = 1668	Zone faillée
(6) 5078	5010	1770 - 65 = 1705	Zone faillée
(7) 5450	5357 (1)	1880 - 65 = 1815	Sommet des roches métamorphiques à grenats

Tableau 3. Transposition des repères géologiques du sondage en temps doubles.

(1) Dernière information de la géométrie du trou à 5370 m MD (5277 VD). Au delà, la déviation est faible; en admettant que le sondage est presque vertical, on peut déduire les profondeurs VD correspondant aux profondeurs MD > 5370 m. Ainsi, 5450 m MD correspond à $5277 + (5450 - 5370) = 5357$ m VD.

C.6 Conclusions

Les deux premières cotes délimitent vers le haut et vers le bas les grès de l'Eifelien. En particulier, le sommet de l'Emsien sur le profil 8 délimite deux zones sismiques: réflecteurs abondants au-dessus, peu d'énergie en-dessous. Cela correspond respectivement aux alternances de grès, calcaires et schistes de l'Eifelien et à la masse schisteuse de l'Emsien. Sur le profil 13, le sommet des grès eiféliens correspond à un réflecteur bien défini.

Le contraste schistes emsiens-quartzites praguiens correspond à deux faciès sismiques bien distincts sur les profils. Les réflecteurs sont particulièrement bien marqués au niveau des quartzites praguiens

Les trois réflecteurs, compris entre 4850 m et 5078 m MD, seraient des failles d'après les informations stratigraphiques et géophysiques du sondage. Sur les profils sismiques, cette intervalle correspond à une zone de transition par laquelle un massif à pendages fort redressés chevauche un massif aux allures plus tranquilles.

Le réflecteur à 1,89-1,90 s sur l'OVSP, ou 1,825 s sur la sismique de surface, correspond sans doute à la discontinuité majeure, qui délimiterait vers le haut un massif métamorphique, exprimé dans le sondage par les roches à grenats.

Glossaire

Accrochage: travail de l'accrocheur qui consiste à accrocher ou décrocher les tiges lors des manoeuvres à partir de la passerelle d'accrochage.

Ajout: action d'ajouter une tige (9 m) au train de tiges.

Alésage: élargissement du puits par reforage avec un outil de plus grand diamètre.

Annulaire: espace compris entre les tiges et les parois du puits, ou entre le tubage et les parois du puits, ou entre deux tubages.

Back-off: opération qui consiste à ébranler la garniture de forage au moyen d'une charge d'explosif descendue dans le train de tiges dans le but de le décoincer ou de permettre le dévissage des tiges à une profondeur précise.

Basket ou panier de sédimentation: placé au dessus de l'outil, il est destiné à recevoir les fragments de roche trop lourds pour être remontés en surface par le fluide d'injection et dont la chute risquerait de provoquer le coincement de l'outil.

BOP ou Blow Out Preventer: ensemble de vannes de sécurité destinées à fermer le puits rapidement et de façon étanche en cas de venue de gaz.

Boue de forage ou fluide d'injection: Il existe essentiellement deux types de boue:

- les boues à l'eau (douce ou salée) pour lesquelles la phase solide est une argile de type gonflante, la bentonite;
- les boues à l'huile composées d'une phase liquide qui est un mélange émulsionné eau-fuel, et d'une phase solide (argile) réduite. Ce type de boue est plus coûteux et n'est utilisé que dans des conditions très spéciales.

Injectée sous forte pression, la boue descend par l'intérieur des tiges, lubrifie l'outil et remonte par l'espace annulaire en entraînant les débris de roche. Au droit des formations perméables, la phase liquide ou filtrat s'infiltré, laissant sur les parois du puits une mince pellicule imperméable ou mud-cake composée de la phase solide bentonitique.

Casing ou tubage: colonne de tubes en acier, destinée à protéger les parois du puits.

Cave: élargissement du diamètre du trou de forage, provoqué par des éboulements des parois du puits.

Cônes: molettes équipant l'outil de forage appelé tricône ou rock-bit.

Coulisse de battage: élément inséré dans une garniture de repêchage et destiné à décoincer un train de tiges par chocs répétés ou battage.

Diagraphies: mesures et enregistrements continus des caractéristiques physiques des formations au moyen de sondes électriques descendues dans le puits au bout d'un cable.

Dog-leg: point d'inflexion dans l'inclinaison ou la déviation du forage.

Drill-collars ou masse-tiges: tiges plus épaisses, donc plus lourdes et plus rigides, destinées à appliquer un poids sur l'outil; seules les masses-tiges travaillent en compression sur l'outil.

Drill-pipes: tiges de forage travaillant toujours en traction, ce qui permet d'éviter les risques de flambage.

Duses: les passages d'eau prévus au niveau de l'outil de forage peuvent être rétrécis au moyen de duses de façon à augmenter la vitesse du fluide d'injection et la vitesse de forage en terrain tendre.

Fraise (fraisage): outil plein, chargé en matériel abrasif, utilisé pour broyer des morceaux de ferraille ou pour aplanir la surface libre d'une tige dont la rupture n'est pas nette.

Frein: commande principale de forage qui permet au sondeur d'ajuster en permanence le poids sur l'outil, ce qui constitue réellement l'action de forer.

Garniture de forage: voir train de tiges.

Gerbage ou dégerbage: activité qui consiste à composer (ou à décomposer) la garniture de forage au fur et à mesure de la descente (ou de la remontée) de l'outil.

Hole opener: outil d'alésage équipé de plusieurs molettes dentées et inséré dans la garniture de forage, au-dessus d'un outil de plus petit diamètre servant de guide dans un trou existant.

Instrumentation: opérations qui consistent à décoincer une garniture de forage, ou à repêcher du matériel perdu dans le puits (tiges rompues, molettes d'outils...).

Jar: voir coulisse de battage.

Liner: tubage suspendu au pied du tubage précédent et qui ne remonte donc pas jusqu'en surface.

Logging: voir diagraphies.

Manoeuvre: opération de descente ou de remontée du train de tiges en vue d'un changement d'outil de forage par exemple.

Marteau fond de trou: outil travaillant à la percussion (air comprimé).

Masse-tiges: voir drill-collars.

Moufle: dispositif de levage du train de tiges dans le mât.

Obturateur de sécurité: voir BOP.

Offset Vertical Profiling Seismic (OVSP): profil sismique réalisé:

- soit en disposant un géophone fixe dans le trou, avec déplacement de la source en surface.
- soit avec la source en surface éloignée du puits et des géophones à plusieurs niveaux dans le trou (cas d'Havelange).

Overshot: outil de repêchage cylindrique permettant de coiffer et d'accrocher un train de tiges, après rupture, de façon à le ramener en surface.

Poisson: tout objet perdu dans le puits, qui empêche la poursuite du forage, et dont la récupération conduit à une opération de **repêchage**

Repêchage: voir poisson.

Rock-bit ou tricône: outil de forage équipé de trois molettes à dents d'acier ou à pastilles en carbure de tungstène et dont la rotation broye la roche.

Sabot: pièce qui équipe le pied d'un tubage pour faciliter sa descente dans le puits et jouer le rôle de valve antiretour dans l'opération de cimentation de l'annulaire.

Sonic: diagraphie mesurant les vitesses acoustiques dans le trou.

Stabilisateur: élément de la garniture de forage dont le diamètre est proche de celui de l'outil de forage de façon à assurer la stabilisation du train de tiges et la verticalité du forage.

Shock absorber: amortisseur de chocs placé dans la garniture de forage et destiné à préserver l'outil des vibrations.

Taraud: outil de repêchage de forme conique.

Torque: effet de torsion auquel est soumis le train de tiges par frottement sur les parois du puits.

Totco: appareil de mesure de l'inclinaison du forage qui est descendu par l'intérieur des tiges au niveau de l'outil où la mesure s'effectue.

Train de tiges ou garniture de forage: ensemble de tiges visées les unes aux autres dont les deux fonctions principales sont de:

- permettre la circulation de la boue de forage depuis la surface jusqu'à l'outil, par l'intérieur des tiges;
- transmettre le mouvement de rotation, donné en surface, au tricône travaillant au fond du puits.

Tricône: voir rock-bit.

Tubage: voir casing.

Turbine: moteur de fond, actionné par la circulation de la boue d'injection, faisant tourner à grande vitesse un outil de forage (couronne pleine diamantée par exemple), tandis que la garniture de forage reste immobile ou en rotation lente.

Vertical Seismic Profiling (VSP): profil sismique réalisé avec la source (air-gun ou vibroseis) située en surface, à proximité immédiate du puits et en disposant les géophones à différents niveaux dans le trou.

