

376
74
33-1
UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

U.E.R. DES SCIENCES DE LA TERRE

50376

1974

33-1

THÈSE

PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU

DOCTORAT DE TROISIÈME CYCLE

en

SCIENCES NATURELLES

MENTION GÉOLOGIE APPLIQUÉE

ETUDE DES FACIÈS DE LA CRAIE

et de

LEURS CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES

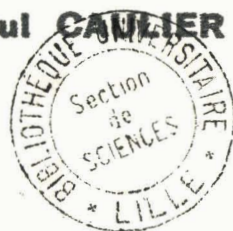
dans la

RÉGION DU NORD

PAR

Paul CAULIER

Commission d'examen



MM. A. BONTE

P. DEBRABANT

S. RAMON

G. BUSSON

G. CASTANY

Président

Examinateur

Rapporteur

Invité

Invité

Soutenue à Lille le 26 Février 1974

S O M M A I R E

	Pages
Liste des figures	6
Liste des planches	8
Liste des annexes	10
Avertissements	11
Avant-Propos	13
Introduction	17
 1ère Partie - STRATIGRAPHIE	 21
1.1. Données de stratigraphie régionale	23
1.1.1. Substratum	23
1.1.2. Cénomanién	25
1.1.2.a. Cénomanién inférieur	25
1.1.2.b. Cénomanién supérieur	26
1.1.3. Turonien	27
1.1.3.a. Turonien inférieur	27
1.1.3.b. Turonien moyen	27
1.1.3.c. Turonien supérieur	28
1.1.4. Sénonien	31
1.2. Documents B.R.G.M.	32
1.2.1. Système d'archivage	32
1.2.2. Différents types de sondages	32
1.3. Techniques quantitative et qualitative d'analyse des faciès	 34
1.3.1. Etude des caractéristiques physiques de la craie par diagraphies	 34
1.3.1.a. Méthode	34
1.3.1.b. Analyse	41
1.3.1.c. Corrélation	45
1.3.2. Techniques complémentaires de calage	48
1.3.2.a. Calcimétrie	48
1.3.2.b. Micropaléontologie	52
1.4. Corrélations générales	56
1.4.1. Entre les différentes méthodes	56
1.4.1.a. Corrélation diagraphies - calcimétries	57
1.4.1.b. Datation des diagraphies par micro- paléontologie	 58
1.4.2. Entre les sondages et forages	62
1.4.2.a. Cartes d'isobathes et d'épaisseurs .	63
1.4.2.b. Cartes de résistivité	66
1.4.3. Autres données acquises	71
1.4.3.a. Carte d'épaisseur des argiles du Gault	71
1.4.3.b. Carte des limites de dépôts des dif- férents faciès	 71
1.4.3.c. Problème du "tun" et de la "meule" .	72
1.5. Conclusion	
 2ème Partie - HYDROGEOLOGIE	 79
2.1. Données générales sur l'hydraulique souterraine	81
2.1.1. Distinction nappe - aquifère	81
2.1.2. Différenciation nappe libre - nappe captive .	82
2.1.3. Définition des caractéristiques de l'aquifère	83

	Pages
2.2. Documents B.R.G.M.	85
2.2.1. Données élaborées	85
2.2.2. Données brutes	86
2.3. Influence de l'aquifère sur l'écoulement des eaux souterraines	86
2.3.1. Carte d'épaisseur de craie mouillée	86
2.3.2. Méthode d'estimation de la transmissivité ...	87
2.3.2.a. Transmissivité obtenue d'après les pompages d'essai interprétés en ré- gime transitoire	87
2.3.2.b. Possibilité d'estimation rapide de la transmissivité	104
2.4. Répartition des perméabilités et corrélations entre paramètres physiques	108
2.4.1. Cartes de perméabilités et transmissivités ..	108
2.4.2. Distribution des perméabilités en fonction des facteurs géomorphologiques	111
2.4.2.a. Nappe libre : relation perméabilité- distance au drainage	111
2.4.2.b. Nappe semi-captive	116
2.4.2.c. Nappe captive : relation perméabili- té - distance à la limite de capti- vité	116
2.4.3. Relation perméabilité-faciès	122
2.4.3.a. Cénomancien	122
2.4.3.b. Turonien moyen	125
2.4.3.c. Sénonien - Turonien supérieur	130
2.5. Conclusion	135
3ème Partie - CONCLUSION GENERALE	139
3.1. Du point de vue théorique	141
3.2. Du point de vue pratique	141
BIBLIOGRAPHIE	145

LISTE DES FIGURES

	Pages
Fig. 1 -- Schéma des transgressions du Secondaire sur le socle primaire	24
Fig. 2 -- Découpage de la région en cartes au 1/50 000	33
Fig. 3 -- Schéma de principe des diagraphies électriques classiques	37
Fig. 4 -- Schéma pratique du dispositif d'enregistrement des normales	37
Fig. 5 -- Schéma de principe de la sonde latérale	37
Fig. 6 -- Schéma pratique du dispositif d'enregistrement de la latérale	37
Fig. 7 -- Schéma de principe du Latérolog 7	39
Fig. 8 -- Schéma pratique du dispositif d'enregistrement du Latérolog 7	39
Fig. 9 -- Comparaison des répartitions des lignes de courant d'une sonde normale et du Latérolog dans le cas d'une couche mince plus résistante que les formations adjacentes	39
Fig. 10 -- Exemple comparatif entre les enregistrements des dispositifs Polarisation Spontanée, Petite Normale, Grande Normale, Latérale ou Inverse, Latérolog 7; dans les formations dures (Kansas)	40
Fig. 11 -- Log fondamental "Les Rues des Vignes 4" d'après la C.F.P.	43
Fig. 12 -- Variations d'épaisseur d'un banc observées par diagraphies	44
Fig. 13 -- Calcimétries de Escalles - Fruges - Vimy - Bellonne : corrélation	50
Fig. 14 -- Micropaléontologie - répartition stratigraphique des espèces d'après MOORKENS	54
Fig. 15 -- Coupe lithologique du puits 10 d'Oignies et extension verticale de quelques espèces "guides" d'après J. MAGNE	55
Fig. 16 -- Série stratigraphique traversée par le puits n° 19 de Liévin. Interprétations d'après J. POLVECHE	61
Fig. 17 -- Hypothèse sur la formation du "tun" et de la "meule" d'après les diagraphies	74
Fig. 18 -- Aspect subjectif de la superposition à la courbe de THEIS	89
Fig. 19 -- Courbe de descente interprétée selon l'approximation de JACOB (calcul des paramètres T et S) .	92
Fig. 20 -- Courbe de remontée interprétée selon l'approximation de JACOB	94

Fig. 21 - Tableau résumé des méthodes d'interprétation .	100-101
Fig. 22 - Courbes théoriques de $D = f(\log t)$	103
Fig. 23 - Comparaison des valeurs de T déterminées en régime transitoire et par la formule $T = Q/D$	105-106
Fig. 24 - Graphique de la répartition des rapports T_{ap}/T_{ex} sur papier gaussien-logarithmique	109
Fig. 25 - Répartition des perméabilités en fonction de la distance au drainage (<u>Nappe libre</u> du Sénonien - Turonien supérieur, pompages interprétés en <u>régime transitoire</u>)	112
Fig. 26 - Répartition des perméabilités en fonction de la distance au drainage (<u>Nappe libre</u> du Sénonien - Turonien supérieur, <u>Débits spécifiques</u> $T = Q/D$) .	114
Fig. 27 - Répartition des perméabilités en fonction de la distance à la limite de captivité (<u>Nappe semi-captive</u> du Sénonien - Turonien supérieur, pompages interprétés en <u>régime transitoire</u>)	116
Fig. 28 - Répartition des perméabilités en fonction de la distance à la limite de captivité (<u>Nappe captive</u> du Sénonien - Turonien supérieur, pompages interprétés en <u>régime transitoire</u>) ($\log K = f(\log D.C.)$) .	118
Fig. 29 - Répartition des perméabilités en fonction de la distance à la limite de captivité (<u>Nappe captive</u> du Sénonien - Turonien supérieur, pompages interprétés en <u>régime transitoire</u>) ($\log K = f(D.C.)$)	119-120
Fig. 30 - Répartition des perméabilités en fonction de la distance à la limite de captivité (<u>Nappe captive</u> du Sénonien - Turonien supérieur, pompages interprétés en <u>régime transitoire</u>) ($K = f(\log D.C.)$) ..	121
Fig. 31 - Répartition des perméabilités en fonction de la distance à la limite de captivité (<u>Nappe captive</u> du Sénonien - Turonien supérieur, <u>Débits spécifiques</u> $T = Q/D$)	123-124
Fig. 32 - Relations perméabilité - distance au drainage ou à la limite de captivité (Nappes du Cénomanién et du Turonien moyen)	126
Fig. 33 - Relations perméabilité - faciès : nappe du Cénomanién	127-128
Fig. 34 - Diagraphies du forage de Fruges : nappe du Cénomanién	129
Fig. 35 - Relations perméabilité - faciès : nappe du Turonien moyen	131-132
Fig. 36 - Diagraphies des sondages du Diplodocus (Lille) : nappe du Sénonien - Turonien supérieur	133
Fig. 37 - Diagraphie et coupes du forage de la Sucrerie de Lillers	134

LISTE DES PLANCHES HORS-TEXTE

- PL O - Carte Michelin au 1/400 000 (sur contre-calque non relié).
- PL I - Carte d'implantation des forages et sondages (id).
- PL II - Carte de situation des coupes corrélées par diagraphies.
- PL III - Coupe I (So15 - Be1).
- PL IV - Coupe 2 (Be1 - Sa1).
- PL V - Coupe 3 (Nf1 - Ar2m).
- PL VI - Coupe 4 (Ar2m - S8).
- PL VII - Coupe 5 (Tu1 - So1).
- PL VIII - Coupe 6 (Me1b - He1).
- PL IX - Coupe 7 (He1 - Ba1).
- PL X - Coupe 8 (Arn - Ara).
- PL XI - Coupe 9 (Ara - Ro2b).
- PL XII - Coupe 10 (S9 - Sa1).
- PL XIII - Corrélation entre les différentes techniques de détermination employées et entre les différents sondages.
- PL XIV - Carte d'isobathes du substratum de la craie (toit du Primaire et toit du Gault).
- PL XV - Carte d'épaisseur du faciès Cénomaniens.
- PL XVI - Carte d'isobathes du toit du faciès Cénomaniens.
- PL XVII - Carte d'épaisseur du faciès Turonien inférieur.
- PL XVIII - Carte d'épaisseur du faciès Turonien moyen.
- PL XIX - Carte d'isobathes du toit du faciès Turonien moyen.
- PL XX - Carte d'épaisseur du faciès Turonien supérieur.
- PL XXI - Carte d'isobathes du toit de la craie sous recouvrement tertiaire.
- PL XXII - Carte de résistivité de la partie supérieure du faciès Cénomaniens et épaisseur correspondante.
- PL XXIII - Carte de résistivité du faciès Turonien inférieur.
- PL XXIV - Carte de résistivité du faciès Turonien moyen.
- PL XXV - Carte d'épaisseur des argiles du Gault.
- PL XXVI - Carte des limites de dépôts des différents faciès.
- PL XXVII - Le tun et la meule - Corrélations par diagraphies gamma-ray.

- PL XXVIII - Carte de résistivité et de radioactivité du "tun" et de la "meule".
- PL XXIX - Carte piézométrique de la nappe de la craie.
- PL XXX - Carte d'épaisseur de la craie mouillée.
- PL XXXI - Carte des valeurs de transmissivité et perméabilité d'après les pompages d'essai interprétés en régime transitoire.
- PL XXXII - Carte des valeurs de transmissivité et perméabilité d'après les débits spécifiques.

LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE I : Tableaux des coupes géologiques interprétées.
- ANNEXE IIa : Tableaux des corrélations par diagraphies.
- ANNEXE IIb : Résultats des calcimétries.
- ANNEXE III : Tableaux des résistivités déterminées par diagraphies.
- ANNEXE IVa : Valeurs de transmissivités : rapports $\frac{T_{ap}}{T_{ex}}$
- ANNEXE IVb : Valeurs de transmissivités classées par ordre de
grandeur croissante.
- ANNEXE V : Fiches de pompages d'essai interprétés en régime
transitoire (exemples).
- ANNEXE VI : Pompages d'essai interprétés en régime transitoire -
Conditions géomorphologiques.
- ANNEXE VII : Débits spécifiques - Conditions géomorphologiques.

AVERTISSEMENTS

Les planches hors-texte III à XIII figurant dans cet ouvrage à l'échelle du 1/1 000 (hauteurs) peuvent être consultées au Service géologique régional du B. R. G. M. à LEZENNES (59), à l'échelle du 1/200 ou du 1/500 selon les coupes (1 à 10). Il en est de même pour les coupes 11 à 28 (voir planche II et annexe IIa) qui n'ont pas été représentées ici.

Les planches hors-texte, XIV à XXI, XXV reproduites à l'échelle du 1/400 000, résultent de la réduction et de l'assemblage des cartes au 1/50 000 couvrant la région étudiée ; elles sont consultables à cette échelle au B. R. G. M.

De même, le répertoire complet des fiches de pompages d'essai interprétés en régime transitoire existe au B. R. G. M. ; seuls quelques exemples ont été donnés en annexe V.

AVANT - PROPOS

Depuis les études de J. GOSSELET sur "les assises crétaciques et tertiaires dans les fosses et sondages du Nord de la France" publiées entre 1904 et 1913, aucune actualisation des connaissances sur la craie de cette région n'a été réalisée. Il a donc semblé intéressant qu'une mise à jour soit faite compte-tenu de renseignements et de méthodes d'interprétation nouveaux.

- Monsieur le Professeur WATERLOT m'a initié à la stratigraphie régionale et à l'hydrogéologie.

- La géologie appliquée m'a été enseignée par Monsieur le Professeur BONTE qui de plus m'a conseillé dans la rédaction de ce travail.

- Monsieur SOULIEZ, directeur du Service géologique régional Nord - Pas-de-Calais du B. R. G. M. a facilité sa réalisation.

- Monsieur RAMON m'a suivi et conseillé et en collaboration avec Monsieur CREMILLE (B.R.G.M.) m'a inculqué les notions théoriques et pratiques de l'hydraulique souterraine.

- Avec l'aimable autorisation de Messieurs PAQUET et DEBRABANT (Institut de Géotechnique) j'ai pu suivre le cours de Monsieur BUSSON (Laboratoire de Géologie du Muséum National d'Histoire Naturelle) sur les diagraphies.

- L'étude détaillée de deux sondages récemment réalisés par les H. B. N. P. C. a pu être menée à bien grâce à Monsieur CHALART directeur du service géologique. A cette occasion, Messieurs MARLIERE et ROBAZINSKI (Faculté polytechnique de Mons) m'ont fait profiter de leurs connaissances approfondies sur le sujet.

A tous, j'exprime ma plus profonde gratitude.

Enfin, je n'aurai garde d'oublier les personnes qui parfois de façon discrète mais efficace m'ont apporté leur concours tant moral que matériel dans la réalisation de ce travail ; c'est-à-dire le personnel du service régional du B. R. G. M. que je remercie de sa gentillesse, son dévouement ; ainsi que celui des Sciences de la Terre.

INTRODUCTION

La présente étude consacrée aux faciès de la craie et à leurs caractéristiques, est scindée en deux parties.

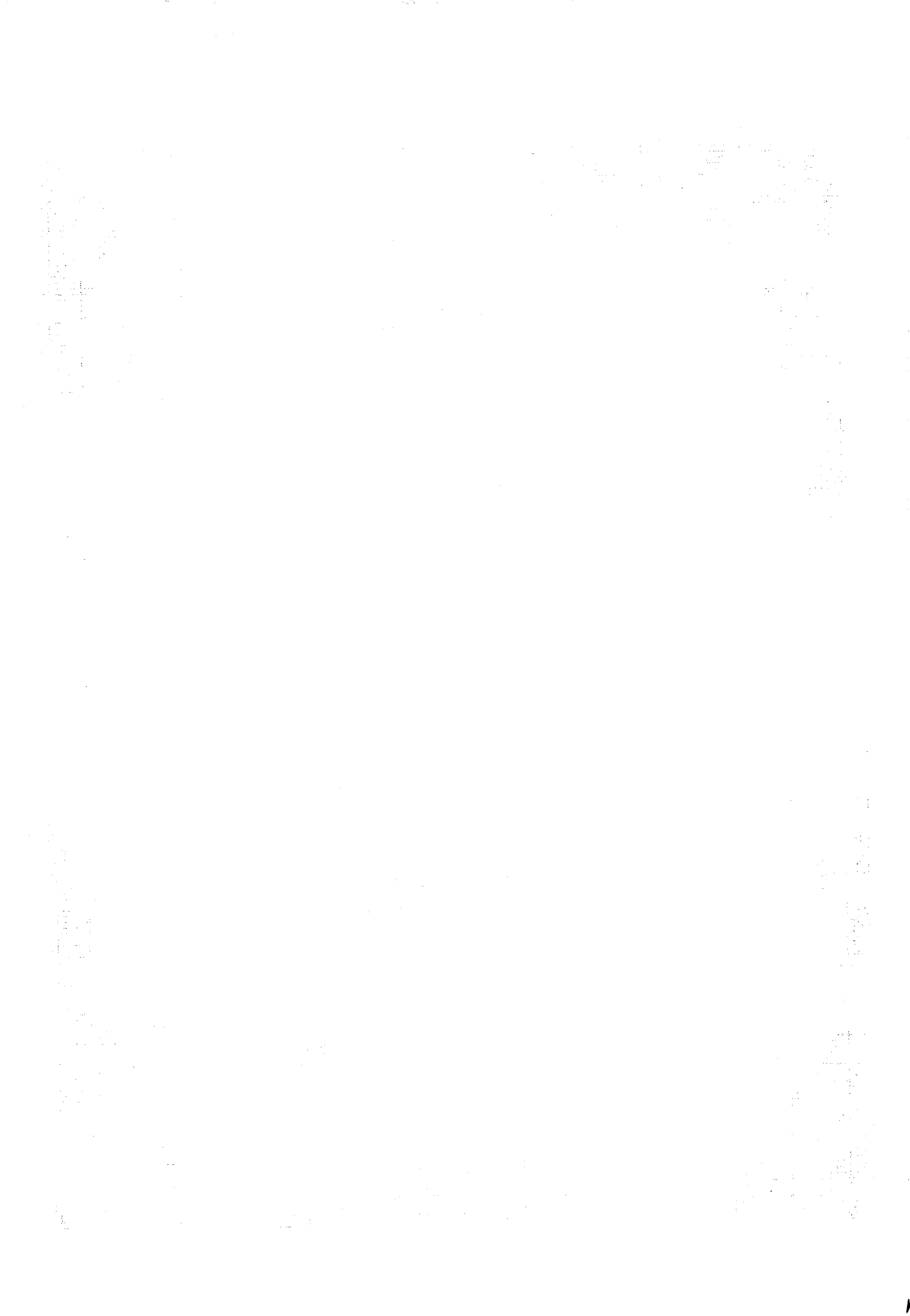
Elle se limite à la région comprise entre la frontière belge au Nord-Est, la côte au Nord-Ouest et à l'Ouest, la limite méridionale des départements du Pas-de-Calais et du Nord et une ligne approximative St Amand - Valenciennes - Le Cateau à l'Est.

- Dans la première partie, on passe rapidement en revue la stratigraphie régionale. A l'aide de calcimétries et de micropaléontologie on essaie de relier cette stratigraphie aux faciès, différenciés par l'interprétation des diagraphies et des coupes de puits de mines, sondages, forages.

A partir de l'ensemble de ces documents interprétés, des cartes d'isobathes et d'épaisseurs ont été dressées. La détermination de la résistivité d'après diagraphies, montre l'évolution des différents faciès à travers la région. Trois résultats annexes sont obtenus : une carte d'épaisseur des argiles du Gault, une carte des limites de dépôts des divers faciès et une approche du problème du "tun" et de la "meule".

- Dans la seconde partie consacrée à l'hydrogéologie, il est fait un bref rappel de définitions ayant trait à l'hydraulique souterraine. A partir des cartes précédemment réalisées et de la carte piézométrique, on établit une carte d'épaisseur de la craie mouillée.

L'interprétation de nombreux pompages d'essai donne matière à l'établissement de cartes de valeurs de perméabilités. Ces valeurs permettent la recherche d'une relation entre la perméabilité et les conditions géomorphologiques de gisement de la craie ou la résistivité de cet aquifère, ceci dans le but de déterminer les zones les plus perméables, par avance.



PREMIERE PARTIE

S T R A T I G R A P H I E

La région du Nord au Crétacé constitue la bordure d'une mer épicontinentale recouvrant le bassin parisien et qui entrera en communication avec une mer plus septentrionale au cours de cette période. Elle permet donc d'observer les transgressions successives sur le socle primaire qui devait constituer une surface pénéplanée.

1.1. DONNEES DE STRATIGRAPHIE REGIONALE

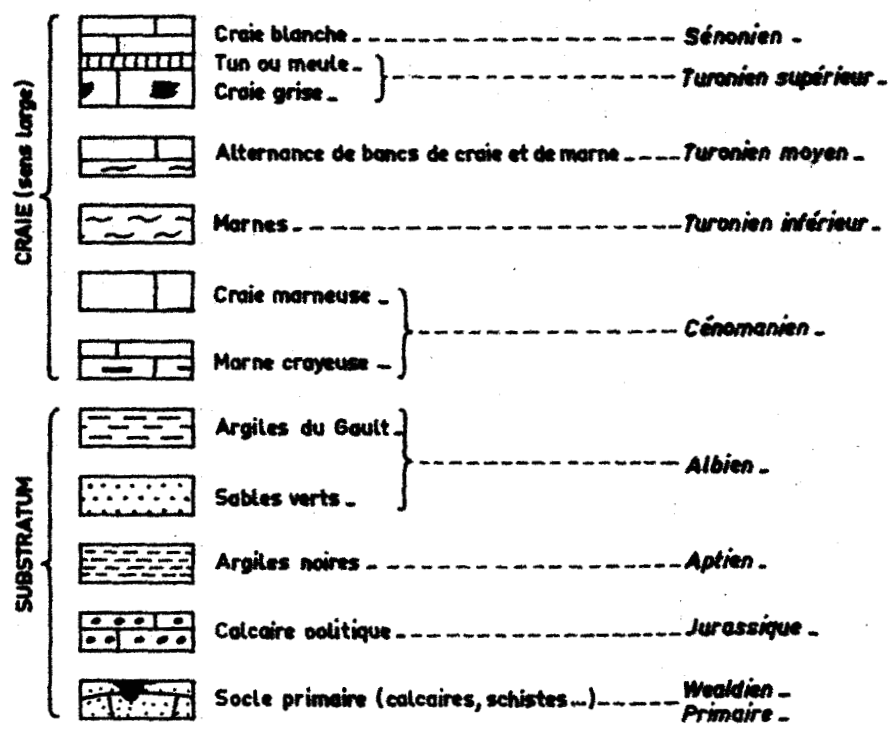
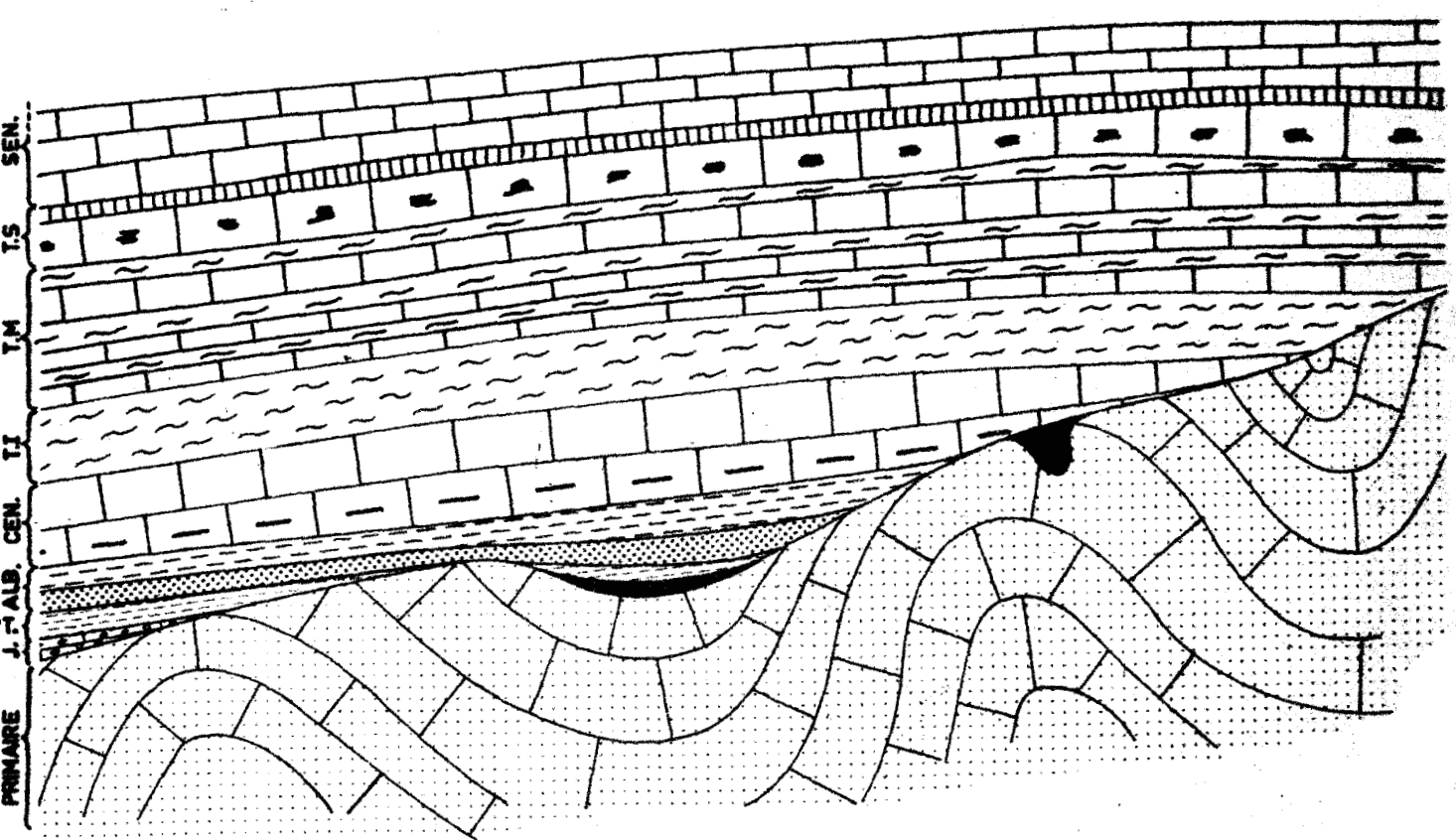
Ces données sont reproduites d'après 8c, 20, 29, 66a, 66b. Elles seront discutées à la fin de la première partie.

1.1.1. Le substratum

On donne le nom de substratum à tout ce qui est d'âge antérieur au Cénomaniens, c'est-à-dire les divers terrains sur lesquels repose la craie.

- Les terrains primaires d'âge Silurien à Westphalien (pour plus de détail voir 21) constituent le socle de la région du Nord, sur lequel ont transgressé les mers du Secondaire. (Fig. 1).

- Le Jurassique (faciès marneux, sableux, argileux ou calcaires) se trouve dans le Sud de la région et dans le Boulonnais, où il est continental pour la partie terminale.



— Schéma des transgressions du Secondaire sur le socle primaire —

Fig:1



- L'Aptien (argiles noires à Ostrea leymeriei et sables ferrugineux dans le Boulonnais ; marnes à plicatules dans le sud de la région) marque la base de la transgression crétacée.

- L'Albien est divisé en deux parties :

- . inférieure sous le faciès sables verts à Douvilleiceras mamillatum,
- . supérieure sous le faciès argiles noires du Gault à Inoceramus concentricus et argiles gris-bleu du Vraconien au sommet à Inoceramus sulcatus.

- Le Wealdien : faciès continental contemporain des faciès marins du Crétacé inférieur, tantôt sous forme d'argiles, ou de sables, d'épaisseur variable, se présentant souvent en poches excepté dans le Boulonnais où sa présence est assez constante.

1.1.2. Cénomanién

Dans le Boulonnais où il semble ne pas y avoir eu de retrait de la mer entre Albien et Cénomanién, on observe des galets roulés et des nodules de phosphates constituant le tourtia souvent qualifié de Cénomanién. Mais lorsqu'on progresse vers l'Est et le Nord-Est un âge Turonien inférieur puis Turonien moyen dans la région de Lille sont probables.

1.1.2.a. Cénomanién inférieur

- . Dans le Boulonnais on y distingue quatre zones :

- . la zone 1 qui est une marne sableuse et glauconieuse (1,50 m) avec des galets roulés et des nodules phosphatés dont l'apport semble dû à un maximum de transgression qui aurait ramené ces galets en pleine mer. C'est l'équivalent du tourtia du Pas-de-Calais cité précédemment.

. la zone 2 représentée par une craie glauconieuse à Acanthoceras laticlavius épaisse de 3 mètres.

. la zone 3 constituée par un petit banc de craie bourré d'éponges du genre Plocoscyphia meandrina.

. la zone 4 épaisse de 16 à 20 mètres, qui est une craie marneuse imperméable, bleutée lorsqu'elle est intacte car elle contient de la pyrite diffuse ; jaune crème à l'affleurement par altération de la pyrite en limonite. Les macrofossiles caractéristiques en sont Schloenbachia varians et Holaster subglobosus.

. Dans le bassin minier la base est un poudingue transgressif sur le socle primaire, épais de 5 à 6 mètres (correspond à la zone 1 du Boulonnais). Les galets sont bien arrondis, ils proviennent du socle (phanites rouges, grès houillers, calcaire carbonifère) et sont restés sur place. Les fossiles rencontrés sont Schloenbachia varians et Pecten asper.

Au-dessus viennent des marnes à reflet rougeâtre, ce sont des marnes crayeuses surnommées "dièves rouges".

1.1.2.b. Cénomancien supérieur

. Dans le Boulonnais c'est une craie blanche grisâtre de 20 mètres de puissance environ, un peu marneuse mais perméable, à Acanthoceras rothomagense, Holaster planus, Kingena lima, Anomya papyracea. On distingue à la partie supérieure un banc de craie marneuse à Actinocamax plenus.

. Dans la région houillère les faciès deviennent plus argileux et les marnes sont désignées sous le nom de "dièves blanches".

1.1.3. Turonien : divisé en trois parties dans le Nord de la France.

1.1.3.a. Turonien inférieur
.....

. Dans le Boulonnais il se présente sous le faciès de craie dure noduleuse jaunâtre, très fossilifère. Elle renferme de grandes ammonites : Acanthoceras nodosoïdes , Pachydiscus perampus accompagnant Inoceramus labiatus et Rhynchonella cuvieri (20 mètres d'épaisseur).

. En Artois il est représenté par une vingtaine de mètres de marnes plastiques plus ou moins verdâtres désignées sous le nom de "dièves vertes". Elles sont caractérisées paléontologiquement par Inoceramus labiatus surtout abondant à la base.

. Dans la région de Lille il n'est connu que par sondage au Sud-Ouest du Tournaisis ; c'est une marne argileuse bleu-verdâtre presque plastique (66 % d'argile) à Inoceramus labiatus aussi surnommée "dièves vertes". A la base du Turonien, quand celui-ci repose directement sur les terrains primaires, vient un conglomérat, à galets de calcaire dur, de quartz, de grès, assemblés par une marne verte très glauconieuse ; il est aussi désigné par le terme de tourtia.

. Dans le Cambrésis et les régions environnantes ce sont toujours des "dièves vertes" à Inoceramus labiatus, bleues ou verdâtres, grasses et onctueuses au toucher, mais dont la puissance varie de 20 à 40 mètres dans la partie orientale du Cambrésis et en bordure de la Thiérache.

1.1.3.b. Turonien moyen
.....

. Dans le Boulonnais il est représenté par une quarantaine de mètres de marnes blanc-crème renfermant des lits de craie marneuse compacte, sans silex, avec Terebratulina rigida, Inoceramus brongniarti.

. En Artois il est constitué par un ensemble de marnes crayeuses dont l'épaisseur est aussi d'une quarantaine de mètres. Elles ont été désignées sous le nom de "bleus". Mais cette teinte bleutée n'apparaît que dans les puits où la roche n'est pas altérée. A l'affleurement elles brunissent ou jaunissent légèrement, la teinte la plus courante étant le blanc mat. On observe une alternance de bancs marneux et de bancs de craie assez durs, plus ou moins réguliers qui dominent vers le sommet. Vers la base les niveaux marneux sont abondants et l'on passe insensiblement aux marnes ou "dièves vertes" du Turonien inférieur. Il est souvent difficile de fixer avec précision la limite séparant les deux niveaux, si l'on n'y a pas trouvé les fossiles caractéristiques. A la partie supérieure du Turonien moyen existe un niveau marneux à arborisations vertes qui constitue un repère stratigraphique assez constant. On y trouve comme dans le Boulonnais Terebratulina rigida et Inoceramus brongniarti.

. Dans la région de Lille comme en Artois ce sont des marnes argileuses tendres, gris-bleu, appelées "bleus" et contenant les mêmes fossiles. Elles alternent là aussi avec des bancs durs de craie marneuse, compacte et lourde, blanc-grisâtre à Inoceramus brongniarti.

L'assise a 10 mètres environ de puissance.

. Dans le Cambrésis et les régions avoisinantes c'est une alternance de bancs marneux et de bancs calcaires. Ces couches sont irrégulièrement réparties et ont une épaisseur qui oscille entre 10 et 20 mètres.

1.1.3.c. Turonien supérieur

. Dans le Boulonnais c'est une craie blanche à silex (10 mètres) formant le sommet des falaises, renfermant Micraster breviporus et Holaster planus.

. En Artois c'est la craie grise à Micraster leskei (breviporus) dont l'épaisseur est généralement comprise entre 10 et 15 mètres. En raison de cette faible épaisseur, ce niveau échappe souvent à l'observation. Cette craie est grisâtre, glauconieuse, d'aspect grenu ou noduleux. Par altération elle apparaît jaunâtre.

Un des caractères essentiels de cette craie est la présence de niveaux durcis désignés sous le nom de "meule". La "meule" peut être compacte, très dure, consolidée par cristallisation de calcite dans les pores de la craie. Elle peut constituer un banc homogène dont la surface est plus ou moins ondulée.

La craie turonienne marque le passage de la sédimentation marneuse à la sédimentation franchement crayeuse et la limite entre Turonien supérieur et Sénonien est souvent, en l'absence de fossiles, difficile à préciser. En effet des niveaux de craie grise se trouvent aussi bien au sommet du Turonien supérieur qu'à la base du Sénonien.

Dans la craie grise turonienne les silex généralement de forme irrégulière et de grande taille, présentent assez souvent une croûte (cortex) épaisse et de teinte rosée, mais cet aspect est loin d'être constant et ne peut être utilisé comme caractère distinctif du Turonien supérieur.

. Dans la région de Lille souvent désigné par le terme de "craie à silex". La limite entre les étages Sénonien et Turonien est marquée par la présence d'un banc de craie grise (1 mètre environ) dont les pores ont été comblés par de la calcite cristallisée pour donner une roche compacte, très dure, désignée sous le nom de "meule". Comme en Artois c'est un hard-ground formé aux dépens du banc supérieur du Turonien ainsi que le montre l'exemple du "tun" ; il s'agit du même banc de "meule" mais remanié et devenu congloméroïde, il comprend des blocs roulés de craie dont la surface est enrobée de phosphate de chaux à aspect porcelané, et parfois de glauconie très verte ; ces blocs sont plus durs que le ciment crayeux qui les englobe. Le Micraster leskei (breviporus) a été signalé dans les blocs de craie

remaniée et le Micraster decipiens dans la craie d'enrobement. Ce banc devrait alors être plutôt classé à la base du Sénonien mais on le place au sommet du Turonien supérieur par analogie à la "meule" qui, elle, reste turonienne et aussi par le fait que d'autres bancs moins importants de "tun" ou de "meule" peuvent exister plus bas dans la masse de l'assise.

Sous le "tun" de tête vient une craie grise sableuse et glauconieuse localement phosphatée (2 mètres environ) affleurant à Bouvines et observée au fond des carrières de Lezennes. Sous elle, la craie grise est chargée de nombreux et volumineux silex cornus noirs, entourés d'une croûte blanche bien développée (4 centimètres). Deux bancs minces de craie durcie ("meule" ou "tun") peuvent exister dans sa partie supérieure. La puissance de l'assise (7 mètres à Lezennes) peut atteindre jusqu'à 14 mètres.

. Dans le Cambrésis et les régions environnantes la craie à Micraster leskei comprend deux niveaux de nature pétrographique différente :

- le niveau inférieur est à l'état de craie blanche, riche en silex noirs qui constituent des lits ou des concrétions branchues (silex cornus), cette craie tendre et fissurée très aquifère ne dépasse guère une quinzaine de mètres d'épaisseur. Vers le bas elle passe progressivement aux marnes à Terebratulina rigida.

- le niveau supérieur est formé d'une craie grise contenant de nombreux grains de glauconie et des granules de phosphate de chaux. Par endroits la teneur en phosphate peut être si importante que la craie grise a été exploitée autrefois comme source de phosphate de chaux.

Dans la vallée de l'Escaut la craie grise devient plus dure et moins phosphatée ; elle contient aussi à la base des silex noduleux et en plaquettes ainsi que des rognons de marcassite. Cette craie plus résistante fut exploitée sous le nom de "Pierre d'Hordain".

L'épaisseur de la craie grise n'est que de 5 à 7 mètres.

1.1.4. Sénonien

C'est au Sénonien que le faciès craie blanche à silex est réalisé dans toute sa pureté : la mer qui occupait le bassin de Paris devait être bordée de continents à relief usé, et peu agitée par les courants car la sédimentation pélagique y domine sur la sédimentation détritique. Il ne sera plus distingué de régions car le faciès est relativement constant en extension latérale. La stratigraphie n'est possible qu'à l'aide de fossiles. On y distingue :

- Le Coniacien (assise à Micraster decipiens (cortestudinarium)) est la craie blanche à silex proprement dite que l'on assimile souvent au Sénonien tout entier car c'est la seule partie qui soit conservée dans le Boulonnais et la région de Lille.

On distingue une partie inférieure (3 à 4 mètres) grise, grossière, légèrement phosphatée et glauconieuse dans les régions de Lille et de l'Artois. Dans le Cambrésis, la limite inférieure est soulignée par deux lits de craie congloméroïde, à galets de craie durcie et verdie, cimentés par une craie blanche tendre légèrement glauconifère.

Pour le reste de l'assise, les silex disséminés dans la masse sont souvent plus ou moins alignés. On trouve aussi des lits minces de silex disposés suivant la stratification et plus rarement des filets obliques. Elle est assez fossilifère et contient Inoceramus involutus, Echinoconus conicus.

- Le Santonien (assise à Micraster cor anginum) est la partie supérieure de la craie dans la région du Nord. Elle est très blanche, pure, fine, à cassure conchoïdale et ne renferme pas de silex (en Artois).

Dans le Cambrésis et les régions environnantes, la rareté de la macrofaune rend très difficile la reconnaissance stratigraphique de ce niveau d'avec le précédent. Ils sont groupés dans le même ensemble sur les cartes géologiques sous le nom de craie blanche sénonienne dont l'épaisseur atteint une cinquantaine de mètres.

- Le Campanien (assise à Actinocamax quadratus et à Belemnitella mucronata) est la craie phosphatée, dont quelques lambeaux ont été conservés dans l'extrémité Sud de la région et à Oignies. Elle est caractérisée par la présence en son sein de phosphate de chaux apparaissant dans la roche sous différentes formes : nodules vernissés, galets arrondis résultant du remaniement de certains nodules, grains disséminés, qui donnent à la roche une teinte brune.

C'est le niveau le plus élevé de la craie que l'on trouve dans la région.

1.2. DOCUMENTATION B. R. G. M.

1.2.1. Système d'archivage

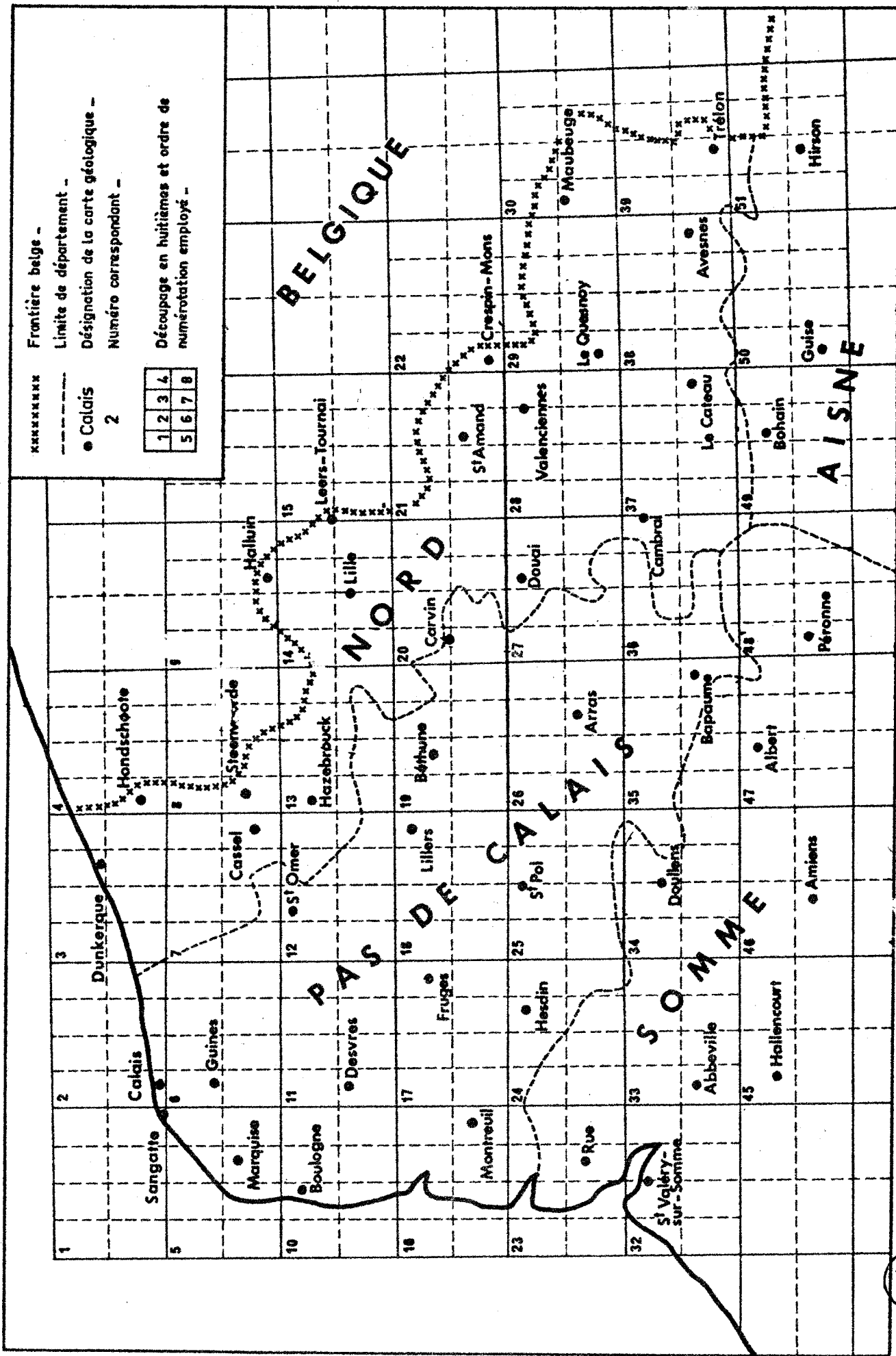
La France est divisée en cartes topographiques au 1/50 000 numérotées de 1 à 1 128 d'Ouest en Est, du Nord au Sud.

La région qui nous intéresse est représentée sur la figure n° 2.

Le numéro B. R. G. M. d'un ouvrage comporte trois volets : le numéro de la carte au 1/50 000, celui du huitième concerné et enfin celui d'entrée en documentation (par ordre chronologique). Par exemple 14-1-20 est le vingtième ouvrage du premier huitième de la carte de Lille.

1.2.2. Différents types de sondages (Pl. I)

. Les cores-drills ou sondages pétroliers ont été exécutés lors de la campagne de prospection de 1961 à 1965. La craie a été traversée très rapidement et les échantillons recueillis sous forme de boue ne sauraient apporter beaucoup de renseignements. A la fin de chaque sondage il a été enregistré une diagraphie électrique de résistivité ou quelquefois une diagraphie gamma-ray. Environ deux cents sondages traversant entièrement la craie sont ainsi répartis sur l'ensemble de la région (à l'exclusion du bassin houiller).



--- DÉCOUPAGE DE LA RÉGION EN CARTES AU 1/50000 ---

Fig: 2



. Les puits de mine et sondages houillers sont répartis essentiellement dans la région où on ne possède pas de diagraphies. Leur abondance et l'excellente description des coupes permettent de suivre les variations d'épaisseur des différents faciès.

. Les forages de recherche d'eau complètent utilement les deux premiers types de sondages en permettant de préciser le toit des marnes bleues du Turonien moyen, sur lesquelles s'arrêtent la plupart des forages d'eau. En outre depuis 1970, le B. R. G. M. a réalisé un certain nombre de diagraphies gamma-ray dans des ouvrages déséquipés.

. Les sondages de reconnaissance géologique ou géotechnique peu profonds pour la plupart et souvent localisés aux abords ou à l'intérieur des agglomérations importantes, ils permettent de préciser l'altitude du toit de la craie sous recouvrement tertiaire ou quaternaire.

1.3. TECHNIQUES QUANTITATIVES D'ANALYSE DES FACIES

Nous verrons successivement les différentes techniques employées pour la définition des faciès et de leur extension. Pour chaque technique employée on l'analyse après avoir défini la méthode, et on en déduit les corrélations possibles.

1.3.1. Etude des caractéristiques physiques de la craie par diagraphies

1.3.1.a. Méthode

. La diagraphie est l'enregistrement généralement continu d'un paramètre physique du ou des terrains considérés en fonction de la profondeur.

. Divers paramètres physiques peuvent être enregistrés. Ce sont par ordre d'importance :

- la résistivité

- la radioactivité naturelle : diagramme de rayons gamma (gamma-ray),
- la radioactivité provoquée : diagramme de neutrons (gamma-gamma),
- la vitesse du son (log sonique),
- la densité des terrains.

. Il existe en outre de nombreux autres types de diagraphies, dits diagraphies auxiliaires : diamètre du sondage, déviation par rapport à la verticale, ... etc.

. La mesure est :

- soit l'enregistrement d'un phénomène naturel :

- température,
- polarisation spontanée,
- rayons gamma.

L'appareil est alors passif.

- soit l'enregistrement d'un phénomène provoqué :

- résistivité,
- neutrons.

L'appareil est actif, il provoque le phénomène.

. De nombreuses méthodes de mesure de la résistivité ont été mises au point. On distingue :

- Les diagraphies de résistivité classiques : petite Normale, grande Normale, Latérale.

- Les diagraphies de résistivité focalisées : Latérolog 3, Latérolog 7, microlatérolog.

. La résistivité d'une roche est la résistance électrique à une température donnée d'un volume de cette roche ayant une longueur unité et une surface unité. Elle s'exprime en $\text{Ohm.m}^2/\text{m}$ ou $\text{Ohm.m}(\Omega.\text{m})$ et dépend essentiellement :

- de la lithologie,
- dans le cas de roches poreuses, de la nature des fluides qu'elles renferment et de leur salinité (résistivité de l'eau de formation).

- de la texture de la roche (à laquelle sont liés les phénomènes d'anisotropie) et éventuellement du pendage des couches vis-à-vis de la sonde.

Pour que cette diagraphie soit possible, le forage doit être rempli d'une boue conductrice permettant le passage du courant.

. Diagraphies de résistivité classiques :

Le courant est envoyé dans la formation par les électrodes A et B (fig. 3) et le potentiel mesuré entre les électrodes M et N fournit les valeurs de résistivité. Dans une formation homogène isotrope infinie les surfaces équipotentiellles qui entourent une électrode unique A sont des sphères.

Le potentiel entre une électrode M située sur une de ces sphères et l'électrode N à l'infini est proportionnel à la résistivité de la formation. La déviation enregistrée par le galvanomètre peut être étalonnée directement en résistivité.

- Sonde normale (fig. 4) : on envoie un courant pulsé ou alternatif (20 Hz) sous une intensité constante par les électrodes actives A et B. On mesure les différences de potentiel entre M et N. Le point d'application de la mesure est le milieu de la distance AM (AM est appelé l'espacement). Le rayon d'investigation de la sonde est du même ordre de grandeur que AM.

On distingue : - la petite normale : $AM_1 = 16'' \simeq 40 \text{ cm}$
représentée en trait plein sur les logs.
- la grande normale : $AM_2 = 64'' \simeq 1,62 \text{ m}$
représentée en tireté.

- Sonde latérale ou inverse (fig. 5) : dans ce dispositif les deux électrodes de mesure M et N sont voisines ; on mesure le gradient de potentiel entre ces deux électrodes. Dans la pratique on emploie le montage réciproque (fig. 6). On envoie le courant par les électrodes les plus proches et l'on mesure entre une électrode dans le sondage et une électrode éloignée. (Selon le principe de réciprocité des quadripôles on obtient les mêmes résultats). Le point de

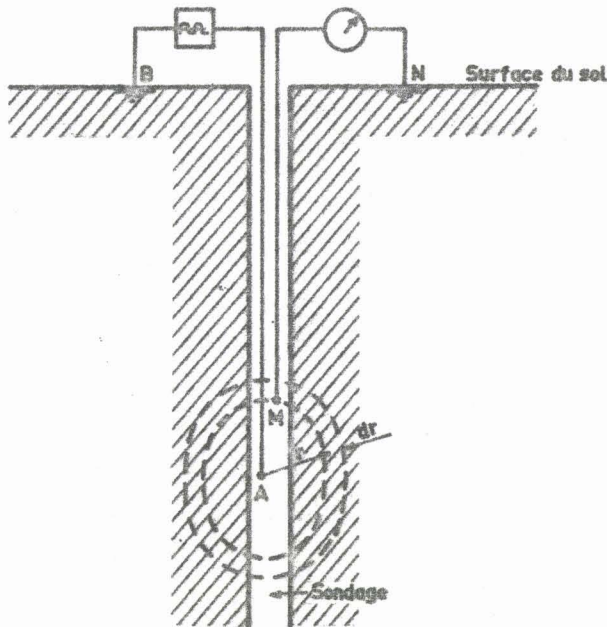


Fig. 3 - Schéma de principe des diagraphies électriques classiques -

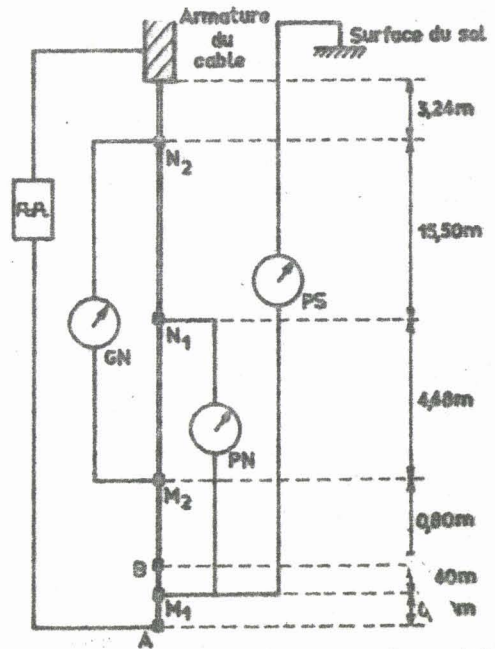


Fig. 4 - Schéma pratique du dispositif d'enregistrement des normales.

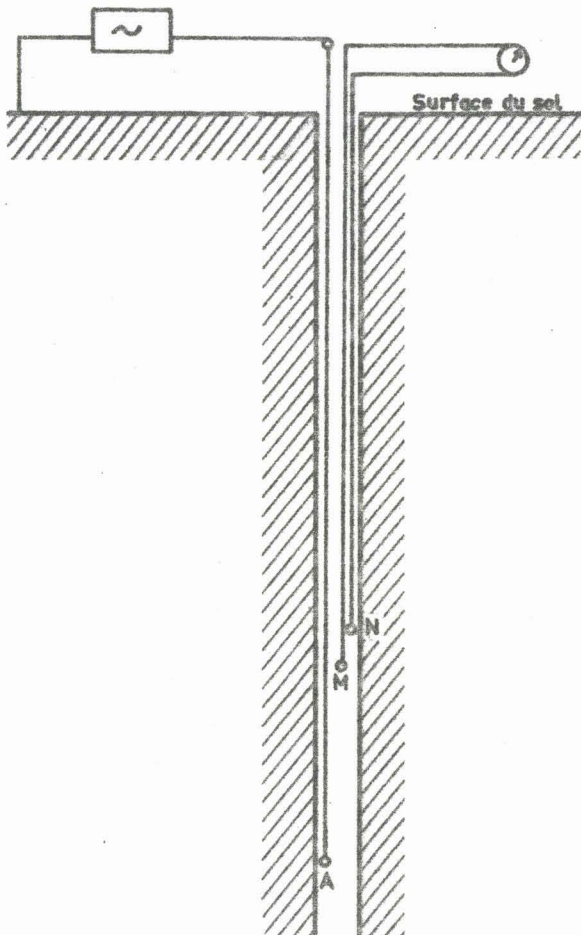


Fig. 5 - Schéma de principe de la sonde latérale -

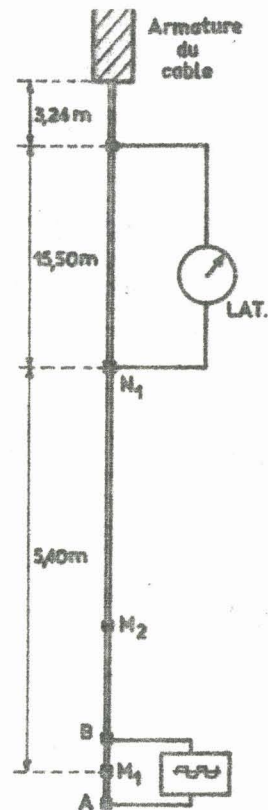


Fig. 6 - Schéma pratique du dispositif d'enregistrement de la latérale -

BUS LILLE

mesure est le milieu de AB (M_1). L'espacement de 5,70 m (18'8") a été normalisé.

. Diagraphies de résistivité focalisées :

Le Latérolog est enregistré par une sonde munie d'électrodes de focalisation ou "électrodes de garde".

On oblige le courant à s'écouler dans une tranche de formation bien déterminée (système de contrôle automatique).

Ce dispositif supprime l'effet perturbateur :

- de la colonne de boue, dans le cas d'une boue très salée ou de formations très résistantes,
- des couches adjacentes (important pour les couches minces). Il donne donc une résistivité vraie même pour les couches minces.

Trois dispositifs de Latérolog existent sur le marché :

- le Latérolog 3 : LL 3 enregistré seul $0 \cdot 0 = 12''$
- " " 7 : LL 7 " " $0 \cdot \frac{1}{2} = 32''$
- " " 8 : LL 8 avec induction $0 \cdot \rho_2 = 14''$

On ne parlera ici que du LL 7 le plus courant (fig. 7 et 8).

L'électrode A_0 est entourée par 3 paires d'électrodes symétriques $M_1 M_2$, $M'_1 M'_2$, $A_1 A_2$. Les électrodes de chaque paire sont reliées par un conducteur isolé.

On envoie par A_0 un courant d'intensité constante. Par A_1 et A_2 qui sont aux deux extrémités on envoie un courant de même polarité et dont le courant est ajusté pour que la différence de potentiel entre $M_1 M_2$ et $M'_1 M'_2$ soit égale à 0.

Le fait d'envoyer du courant par A_1 et A_2 revient à avoir des bouchons isolants qui empêchent le courant émis par A_0 de s'enfuir dans la colonne de boue ou dans le terrain adjacent. (fig. 9). L'épaisseur de la tranche de formation est du même ordre

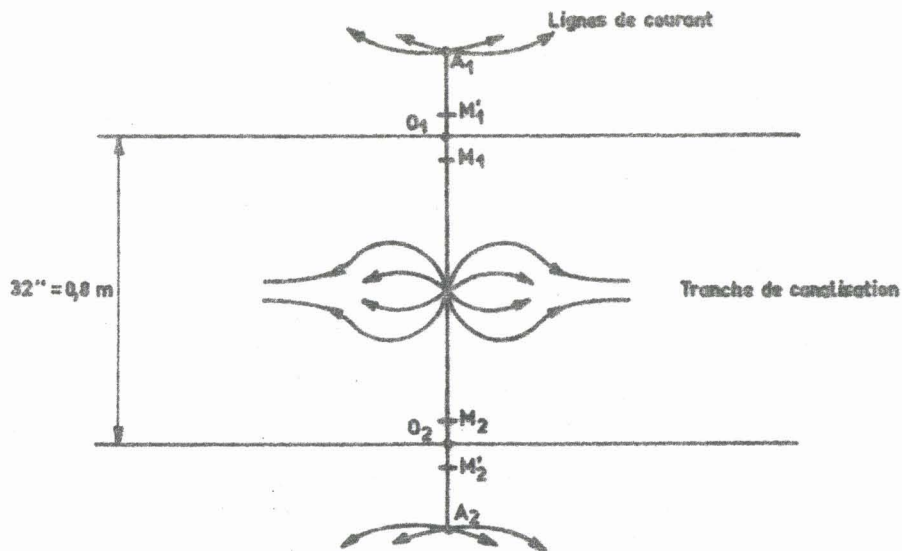


Fig:7_ Schéma de principe du Laterolog 7_

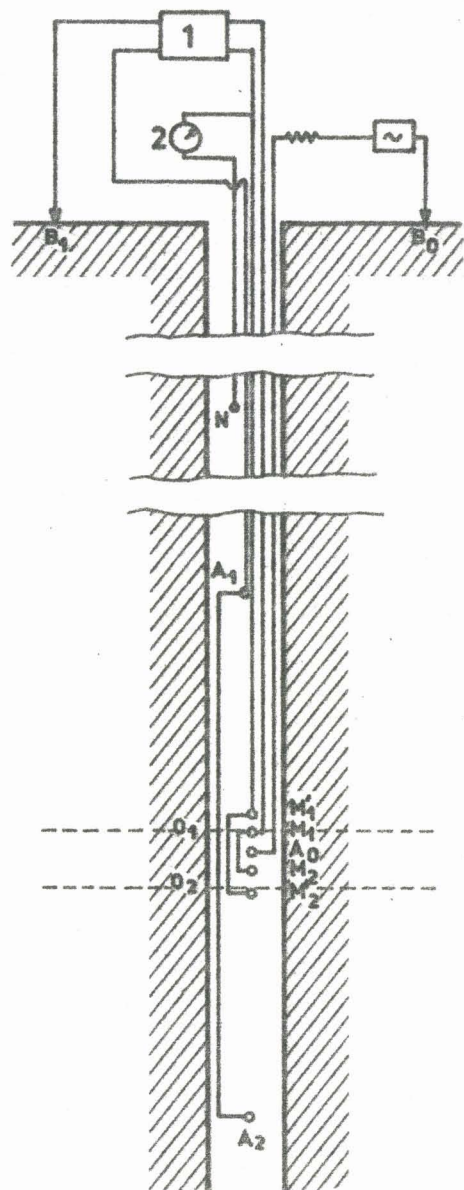


Fig:8_ Schéma pratique du dispositif d'enregistrement du Laterolog 7_

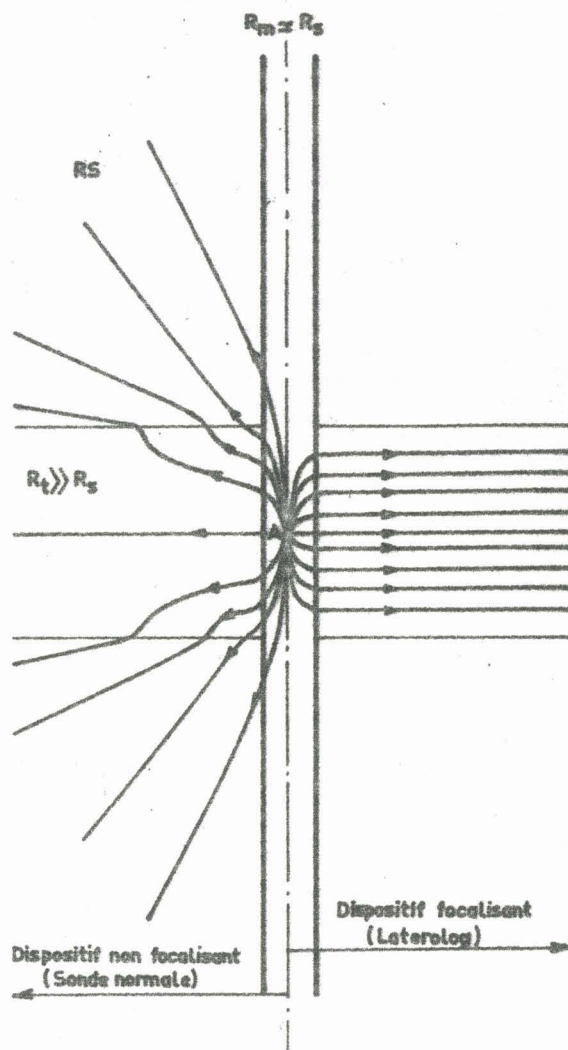


Fig:9_ Comparaison des répartitions des lignes de courant d'une sonde normale et du Laterolog dans le cas d'une couche mince plus résistante que les formations adjacentes _

que la distance $O_1 O_2 = 32''$ soit 0,80 m qui est le rayon d'investigation du LL 7. Ce rayon est utile pour la signification des pics du Latérológ par rapport à l'épaisseur des bancs.

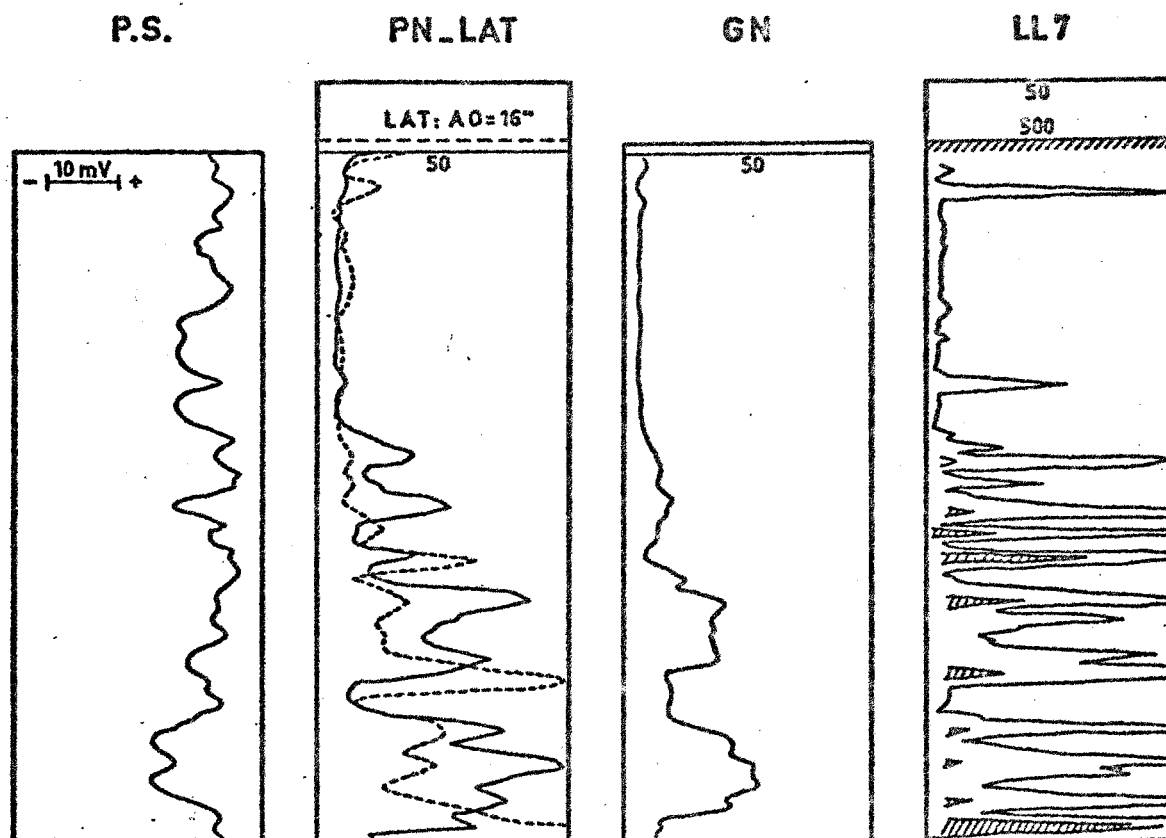


Fig:10_ Exemple comparatif entre les enregistrements des dispositifs Polarisation Spontanée (P.S), Petite Normale (PN), Grande Normale (GN), Latérale ou Inverse (LAT), Laterolog 7 (LL7), dans les formations dures (KANSAS)_

Sur la fig. 10 on s'aperçoit que la petite Normale est influencée par la zone envahie dans le cas de couches aquifères. Elle donne cependant une bonne différenciation entre bancs, confirmée ou complétée par les informations de la grande Normale et de la Latérale ; les deux premières, sinon les trois, sont le plus souvent enregistrées simultanément.

. La diagraphie gamma-ray consiste à détecter et à mesurer les radiations gamma dues aux éléments radioactifs naturels contenus dans les roches.

Alors que toutes les diagraphies précédentes doivent être exécutées en trou ouvert et rempli de boue, les diagraphies nucléaires peuvent être exécutées en trous tubés qu'ils soient secs ou remplis de boue.

Dans les formations sédimentaires les éléments radioactifs susceptibles d'émettre des rayons gamma sont le Potassium 40 ainsi que les éléments de la famille de l'Uranium et du Thorium.

La détection des rayons gamma se fait par interaction de ces rayons avec les atomes ou molécules à l'intérieur du compteur. Dans le passé on a utilisé le compteur Geiger et la chambre à ionisation. Actuellement on utilise exclusivement les compteurs à scintillations.

Plusieurs unités sont actuellement employées. Le tableau ci-dessous donne la correspondance entre ces unités.

1 Ra eq/t = 16,5 API
1 roentgen/h = 10 à 15 API

L'étalonnage se fait en enregistrant le rayonnement d'une source calibrée placée à une distance déterminée.

Sur un log il est également utile d'enregistrer le O électronique, le rayonnement d'ambiance (bruit de fond) ainsi que l'amplitude de la fluctuation statistique.

Les déflexions enregistrées sont fonction non seulement de la radioactivité des terrains mais aussi de celle de la boue, du diamètre du sondage, ainsi que du tubage lorsqu'il existe. Des abaques permettent de corriger l'effet de la boue, du diamètre, du tubage et du ciment.

1.3.1.b. Analyse - identification d'unités lithologiques

Dans le tableau ci-après sont donnés les ordres de grandeur de la résistivité et de la radioactivité pour les divers faciès étudiés.

LITHOLOGIE	RESISTIVITE	VALEURS EN Ω .m	RADIO- ACTIVITE	VALEURS EN A.P.I.
Argile	faible	2-20	élevée	30-90
Marne	moyenne (selon les rapports argile- craie	10-50	moyenne (mêmes raisons)	20-50
Craie	élevée	50-150	très faible	5-20
Glauconite	élevée	30 à 100 (selon le % de glau- conie et d'argile	très élevée	200
Tun	très élevée	150-300	élevée à très élevée	100-200
Meule	très élevée	150-300	élevée	50-90
Sable	moyenne (variable selon la salinité de l'eau	30-50	moyenne	15-40
Calcaire	élevée selon l'al- tération	100-1000	très faible	5-10

expression lithologique globale



Sur le log fondamental "Les Rues des Vignes 4"
n° B. R. G. M. 37-5-10, (fig. 11) parallèlement à l'enregistrement
diagraphique le foreur a décrit les faciès d'une façon assez pré-
cise : on en distingue 5 pour la craie.

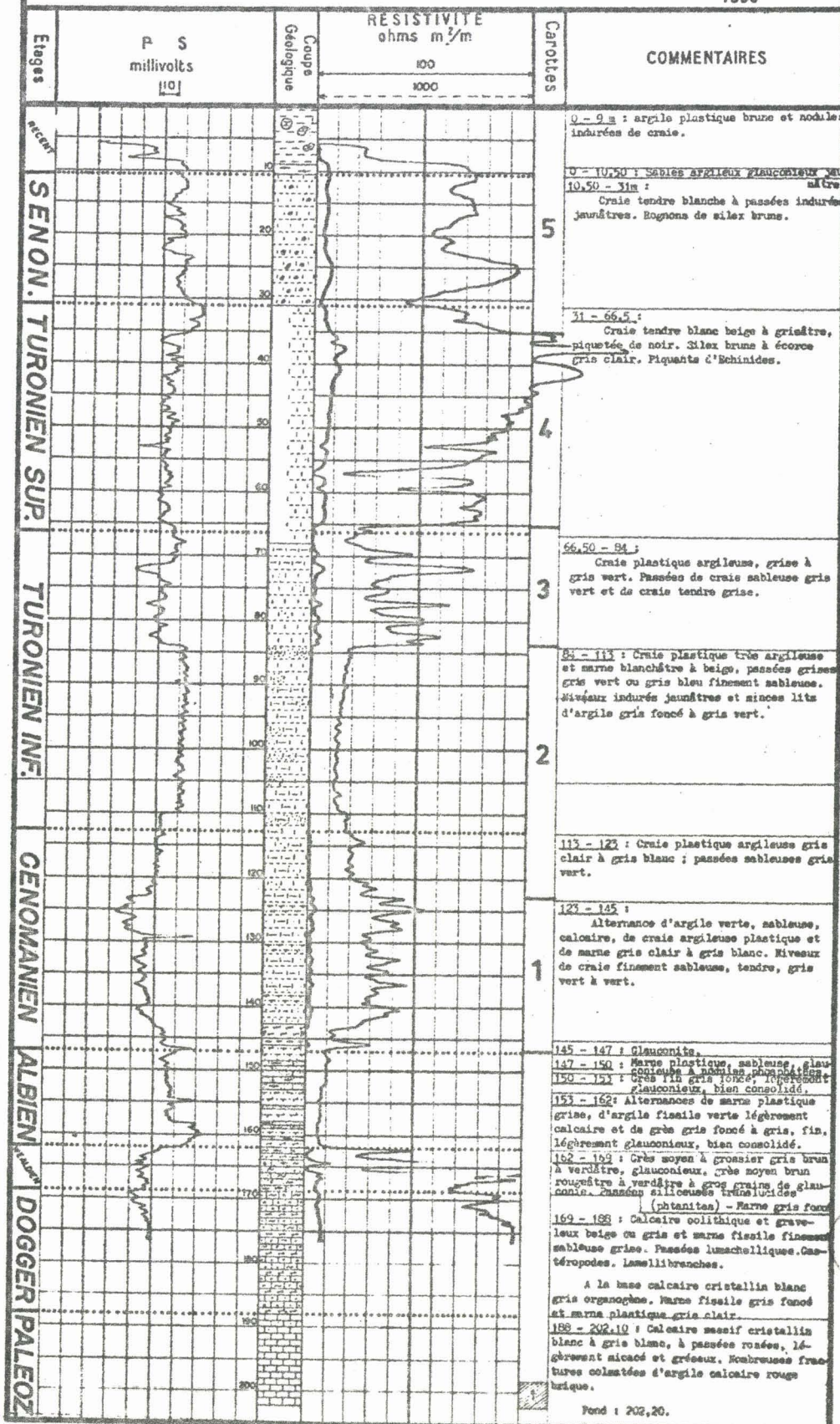
LES RUES DES VIGNES 4

Département:	Nord	X	663.238	Commencé le :	2/4/62
Commune:	Les Rues des Vignes	Y	261.785	Terminé le :	6/4/62
Contracteur:	C. G. G.	Z	139.800	Profondeur atteinte :	
Appareil:	Falling	1500	Z1		202,10 mètres

(D'après C.F.P)

Fig: 11

Echelle: $\frac{1}{1000}$



La diagraphie ne permet pas seulement d'identifier une unité lithologique, de situer avec précision la cote de son toit et de son mur et par conséquent d'en déterminer l'épaisseur. Elle peut aussi fournir une expression globale de la nature lithologique. Elle montre le régime discontinu de la sédimentation (alternance de bancs de craie et de bancs de marne pour les faciès 1, 3, 4 (dans sa partie inférieure) par contre le faciès 2 est homogène (craie plastique très argileuse) et les variations de résistivités de 5 peuvent être dues pour partie à l'altération.

La diagraphie permet une excellente localisation des bancs crayeux dans le faciès 3 et l'on verra que ces bancs se poursuivent sur une étendue assez importante. Lors des corrélations, on pourra remarquer que certains bancs crayeux ou marneux semblent disparaître, ceci est dû au fait que la mesure de résistivité est intégrée sur une distance égale à l'espacement ($e = 0,40$ m pour la petite normale) et selon que l'épaisseur du banc est supérieure, inférieure, ou égale à $e = 0,40$ m on aura les schémas suivants pour les courbes de résistivité : (fig. 12)

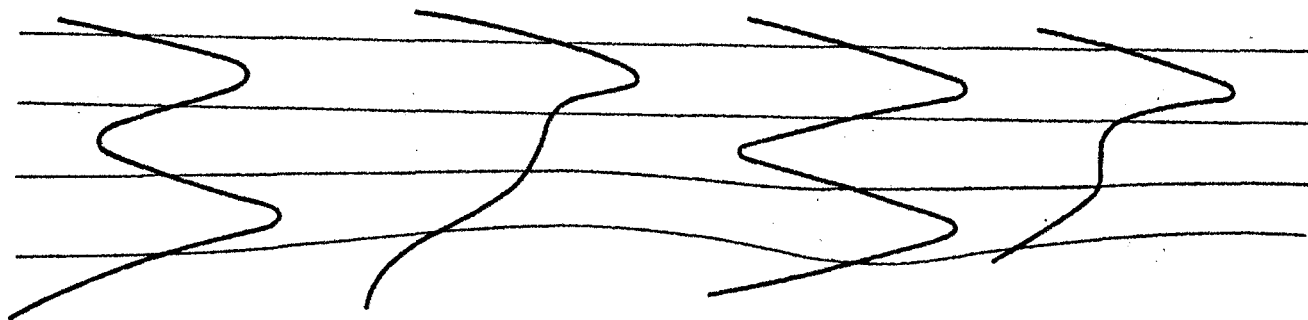


Fig: 12 _ Variations d'épaisseur d'un banc observées par diagraphies _

Si l'épaisseur du banc est inférieure à $e = 0,40$ m, seul le gradient de la courbe de résistivité sera modifié et l'on n'obtiendra pas de pic ni de creux.

Le substratum ici Albien a une résistivité faible ($10 \Omega.m$). Elle sera élevée dans le cas de grès, calcaire ou schistes du Primaire. Pour le faciès 1, la résistivité varie de 20 à $50 \Omega.m$, excepté le premier banc argileux.

Pour le faciès 2 elle est comprise entre 10 et $20 \Omega.m$. Pour le faciès 3, elle va de 15 à $75 \Omega.m$, pour le faciès 4 de 15 à $150 \Omega.m$, pour le faciès 5 de 50 à $90 \Omega.m$.

La disparition des faciès ainsi définis permettra d'apprécier l'âge plus ou moins tardif de la transgression sur le socle primaire.

1.3.1.c. Corrélations

On corrèle d'abord les pics remarquables des différentes courbes de résistivité placées côte à côte et pour des sondages le plus rapprochés possible.

Ces pics correspondent vraisemblablement à des épisodes sédimentaires ayant affecté l'ensemble de la région.

Les limites de faciès ont été placées pour les divers ensembles lithologiques, aux endroits où le gradient de résistivité était le plus fort.

On verra cependant que vers l'Ouest ces limites de faciès sont beaucoup moins tranchées, mais les pics dont il a été fait mention précédemment restant bien individualisés, il sera possible de déterminer encore des limites qui sont très certainement isochrones car elles sont comprises entre deux pics remarquables.

Toutes les diagraphies enregistrées lors de la campagne de recherche pétrolière, ainsi que celles de Vimy et de Bellonne enregistrées par le B.R.G.M. ont été corrélées. Les coupes figurées en trait plein sur la planche II (1 à 10) sont les planches hors-texte III à XII (voir annexe IIa). Nous en ferons un commentaire succinct. Les coupes figurées en pointillé peuvent être consultées au B.R.G.M.

Les argiles du Gault, lorsqu'elles étaient présentes ont été reportées sur ces coupes ; elles ont toujours une résistivité très faible, leur épaisseur est peu importante sauf en NF_1 (coupe 3 = Pl. V).

Les sables verts albiens et le Wealdien figurent sur certaines coupes, mais lorsque leur épaisseur était trop importante (cas de la coupe 8 = Pl. X) il n'en a pas été fait mention.

Le faciès 1, débute le plus souvent par un pic résistant, lorsqu'il repose sur les argiles du Gault. Sur les coupes 3, 4, 5, 6 (Pl. V, VI, VII, VIII), et plus particulièrement en Tu_1 , Beu_1 (coupe 5 = Pl. VII), Fn_1 (coupe 6 = Pl. VIII) sa partie inférieure a une faible résistivité, contrastant avec celle plus élevée de la partie supérieure. Entre ces deux zones, une troisième a résistivité croissante de l'inférieure à la supérieure. Ce faciès peut débiter par la partie supérieure reposant directement sur le Primaire (Nord de la région). Cette partie supérieure présente une résistivité plus faible en Fq_1 et Eq_1 (coupe 3 = Pl. V). Pour les épaisseurs on remarque des variations brutales entre deux diagraphies. Ces faits ressortiront mieux sur les cartes de résistivité (Pl. XXII, XXIII, XXIV) et d'épaisseurs (Pl. XV, XVII, XVIII, XX).

Le faciès 2, bien individualisé par sa faible résistivité, sauf en So_{15} (coupe 1 = Pl. III) où il est le faciès le plus résistant. Vers l'Est, sa résistivité est à peine supérieure à celle des argiles du Gault. A sa base et à son sommet on remarque quelques bancs plus résistants, récurrence du faciès précédent et

annonce du suivant. A l'Ouest, sa partie supérieure a une résistance élevée.

Le faciès 3 présente une alternance de bancs résistants dont l'épaisseur est importante vers l'Ouest, et de bancs peu résistants, à forte épaisseur vers l'Est, dont la résistivité est proche de celle du faciès 2, si bien que les diagraphies apparaissent à l'Ouest comme un ensemble résistant avec des creux et à l'Est un ensemble peu résistant avec des pics.

Sur les coupes 2 et 4 (Pl. IV et VI), on observe une diminution d'épaisseur vers l'Est, qui affecte surtout la partie inférieure de ce faciès.

Le faciès 4, qui peut être scindé en deux parties, l'une inférieure à résistivité moyenne, l'autre supérieure à résistivité élevée et caractérisée par un pic très résistant à son sommet dans la région de Lille.

Le faciès 5, à résistivité homogène et forte, à l'intérieur duquel il est par conséquent difficile d'effectuer des corrélations.

1.3.2. Techniques complémentaires de "calage"

1.3.2.a. Calcimétrie

La calcimétrie consiste à mesurer la teneur en carbonate de calcium d'une roche.

. Méthode

On attaque la roche à l'acide chlorhydrique dilué à 30 %, selon la réaction :



On mesure le volume de gaz carbonique dégagé dans des conditions normales de température et de pression au moyen d'un calcimètre Bernard.

Pour les roches à forte teneur en carbonate de calcium, 0,25 g de sédiment broyé réduit en poudre et passé vingt quatre heures à l'étuve à 110° C ont été employés, 0,50 g pour les roches à plus faible teneur, de manière à réduire l'erreur relative de lecture sur le volume de gaz carbonique dégagé. On peut estimer l'erreur absolue sur la détermination du pourcentage à $\pm 1\%$ (erreur de lecture $0,5 \text{ cm}^3 \times 1,6 = 0,8\%$ dans le cas où on prend 0,25 g de sédiment).

. Analyse

La falaise du cran d'Escalles et trois forages situés à Fruges, Vimy et Bellonne ont été étudiés par calcimétrie (pour le forage de Bellonne les mesures ont été effectuées au laboratoire d'analyses chimiques du B. R. G. M. à Orléans en 1961).

D'après ces mesures (annexe II b) des courbes ont pu être tracées (fig. 13), les valeurs sont très faibles pour le Gault (10 %). Une droite représentant la teneur 80 % permet de distinguer cinq faciès pour la craie sur la courbe de Vimy :

. Faciès 1 : pourcentage de carbonate de calcium compris entre 65 et 93 oscillant autour de 80 (alternance de bancs crayeux et marneux).

. Faciès 2 : pourcentage compris entre 40 et 65 sauf pour les cinq mètres supérieurs atteignant des pourcentages de 75 (donc valeurs toujours inférieures à 80).

C'est une alternance de bancs plus ou moins marneux.

. Faciès 3 : comme le faciès 1, pourcentages alternant de part et d'autre de 80, compris entre 65 et 90 (alternance de bancs marneux et crayeux).

. Faciès 4 : se distingue du faciès 3 par des pourcentages plus forts, compris entre 65 et 95, la partie inférieure oscille autour de 80. Pour la partie supérieure les pourcentages sont compris entre 90 et 95, excepté un lit marneux peu épais.

. Faciès 5 : c'est un faciès homogène, pourcentages compris entre 90 et 97 souvent voisins de 95.

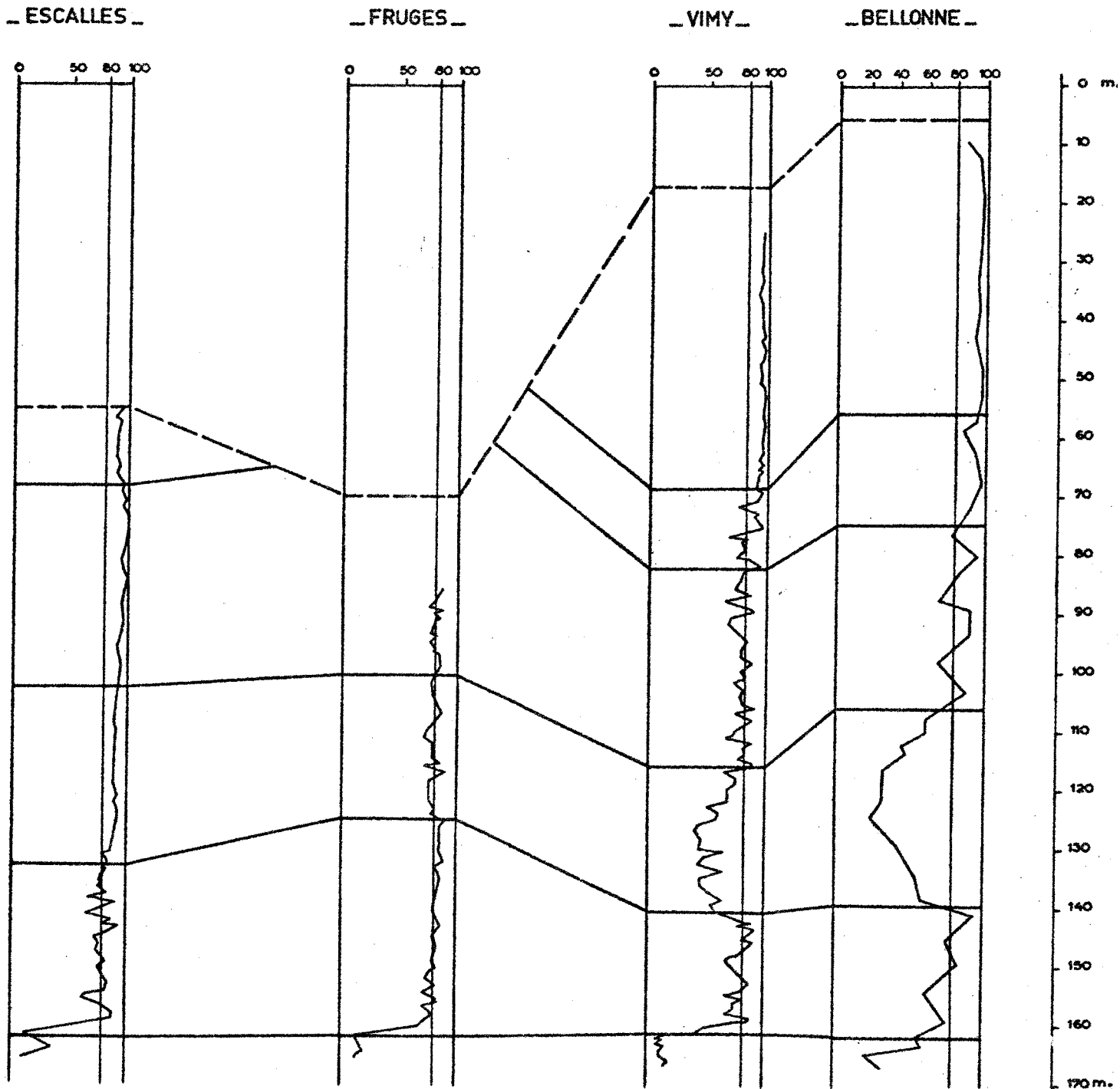
Donc comme les diagraphies, les calcimétries permettent, outre l'appréciation de la valeur absolue de la teneur en carbonate de calcium de distinguer des faciès homogènes et hétérogènes, avec toutefois une restriction due au fait que la courbe est extrapolée à partir de points (il faut donc que les échantillons soient suffisamment rapprochés ou choisis judicieusement), alors que la diagraphie est un enregistrement continu (mais à l'inverse, la valeur de résistivité n'est pas ponctuelle, elle intègre toujours une certaine épaisseur de terrain : 0,40 m dans le cas de la petite normale).

. Corrélations

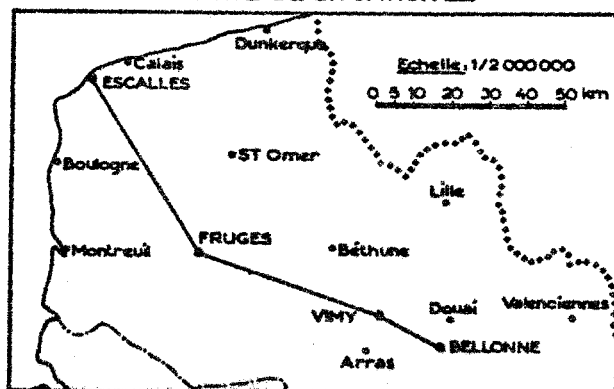
Les remarques qui viennent d'être faites pour les différents faciès de Vimy sont valables pour le forage de Bellonne (la courbe est un peu moins précise car il y a eu moins de mesures).

**_ CALCIMÉTRIES DE ESCALLES, FRUGES, VIMY, BELLONNE _
(CORRÉLATION)**

Fig: 13



_ CARTE DE SITUATION _



Pour le forage de Fruges : le faciès 1 est plus épais, on constate que les pourcentages de carbonate de calcium oscillent encore autour de la valeur 80 pour la partie inférieure ; la partie supérieure est plus homogène et le pourcentage est compris entre 80 et 90.

Le faciès 2 comporte une alternance de bancs marneux et crayeux, les pourcentages oscillent cette fois entre 70 et 90 souvent voisins de 80 (quelques valeurs supérieures), le faciès est donc nettement plus crayeux et homogène qu'à Vimy.

Le faciès 3 (on ne possède la courbe que de la partie inférieure) comporte lui aussi une alternance de bancs : pourcentages compris entre 75 et 90, quelques valeurs seulement inférieures à 80, il est donc un peu plus crayeux que le faciès 2.

On constate donc pour ce forage :

- une uniformisation :
- . à l'intérieur des faciès (alternances peu marquées) ;
- . entre les faciès : pratiquement tous les pourcentages pour les faciès 1, 2 et 3 sont compris entre 70 et 90.

Falaise du Cran d'Escalles :

Pour le faciès 1, les valeurs oscillent de 65 à 95 pour la partie inférieure (alternance de bancs marneux et crayeux). Ce faciès ressemble à celui de Vimy. Pour la partie supérieure, les pourcentages s'écartent peu de la valeur 80 (on ne possède pas de valeurs pour la partie tout-à-fait supérieure, impossibilité de prendre des échantillons, falaise dangereuse).

Remarque d'ordre paléogéographique : la partie inférieure du faciès 1 à Escalles et l'ensemble du faciès 1 à Vimy ne sont certainement pas des dépôts contemporains, mais représentent un faciès sensiblement identique déposé à une certaine distance de la côte (apports argileux encore importants par périodes).

Fruges se situant plus loin du rivage pour la partie supérieure du faciès, ressemble à celui d'Escalles (dépôts contemporains, plus d'apports de sédiments argileux).

Il semble donc que par périodes, le continent envoyait des sédiments argileux mais que ceux-ci ne dépassaient pas une certaine distance, par rapport à la côte ou étaient répartis par les courants dans certaines zones.

Le faciès 2 : pourcentages voisins de 90, il est encore plus homogène et plus crayeux qu'à Fruges.

Paléogéographie : les apports argileux venaient très certainement de l'Est et n'atteignaient pas cette région (une communication avec les mers boréales a aussi pu changer le sens des courants).

Le faciès 3 : pourcentages toujours supérieurs à 90 et même souvent à 95. L'alternance de bancs marneux et crayeux n'existe pratiquement plus. C'est le plus crayeux des quatre faciès pour ce forage.

Le faciès 4 : le passage du faciès 3 au faciès 4 se marque par une diminution du pourcentage en CO_3Ca qui reste voisin pour ce faciès de 90. Sur le terrain il se distingue par la présence de lits de silex.

1.3.2.b. Micropaléontologie

- Méthode

La microfaune contenue dans les sédiments, et principalement les foraminifères en raison de leur distribution souvent très large et de leur bonne conservation à l'état fossile, a apporté une aide précieuse aux stratigraphes. Selon Vergnaud-Grazzini C. : "les caractéristiques d'étagement et de distribution des formes benthiques ont généralement une signification de valeur locale ; des barrières naturelles, des changements dans les conditions de milieu peuvent constituer un obstacle à la migration de ces formes ou bien au contraire être la cause d'un renouvellement de faunes.

Les foraminifères planctoniques par contre ont non seulement une large distribution géographique mais aussi un cycle biologique court. Ces deux caractères associés en font donc un matériel remarquable pour les corrélations" c'est pourquoi par la suite il ne sera fait état que des foraminifères planctoniques.

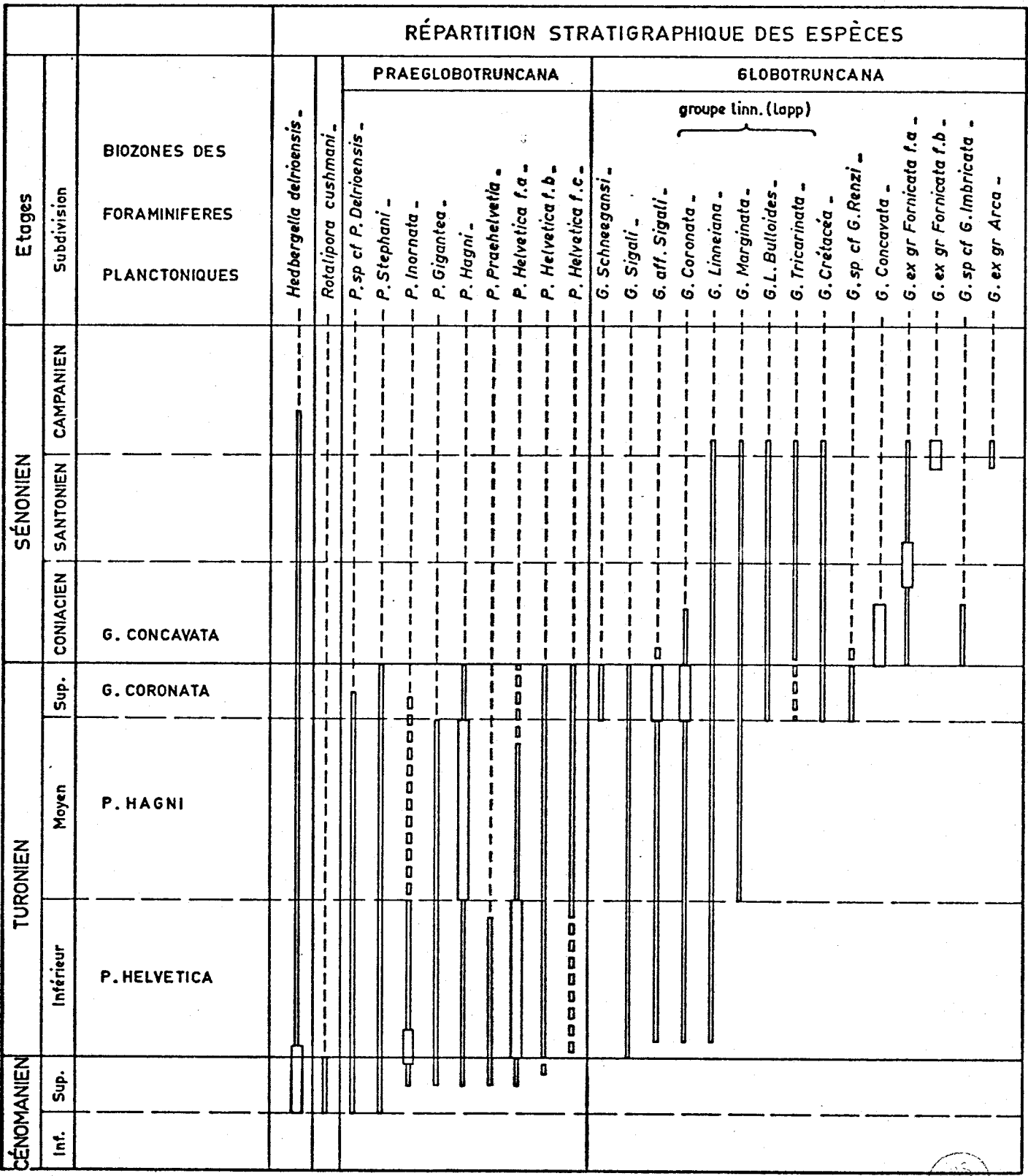
Quelques restrictions s'imposent cependant (toujours d'après C. Vergnaud-Grazzini) : les faunes du rebord et du talus continental ne reflètent pas exactement la composition des faunes planctoniques du large en raison principalement d'une stratification des espèces vivantes avec la profondeur.

Ces restrictions peuvent être valables pour le Cénomaniens et le Turonien inférieur dont les rivages étaient situés encore dans la région.

Les spécialistes en analyse micropaléontologique définissent des biozones caractérisées par une association faunistique et l'abondance relative de certaines espèces. Lors de la première conférence internationale sur les fossiles planctoniques T. L. MOORKENS a proposé une échelle stratigraphique qu'il a établie en Belgique. Son étude se localise surtout dans le bassin de Mons et dans la région de Tournai. Du Cénomaniens au Santonien, il différencie 5 biozones à l'aide des genres Relatipora, Praeglobotruncana et Globotruncana (fig. 14).

Cependant, la plupart des microfossiles ont une extension plus importante que la biozone qu'ils représentent. Ils sont caractéristiques grâce à une abondance de leur espèce dans leur biozone. Les différents étages du Crétacé qui avaient été définis par des macrofossiles ont ainsi été redéfinis par la microfaune.

D'autres auteurs ont étudié des séries crétacées du Nord - Pas-de-Calais sur des échantillons provenant du fonçage de puits de mine. On peut donner l'exemple de la fosse 10 d'Oignies étudiée par J. MAGNE (fig. 15).



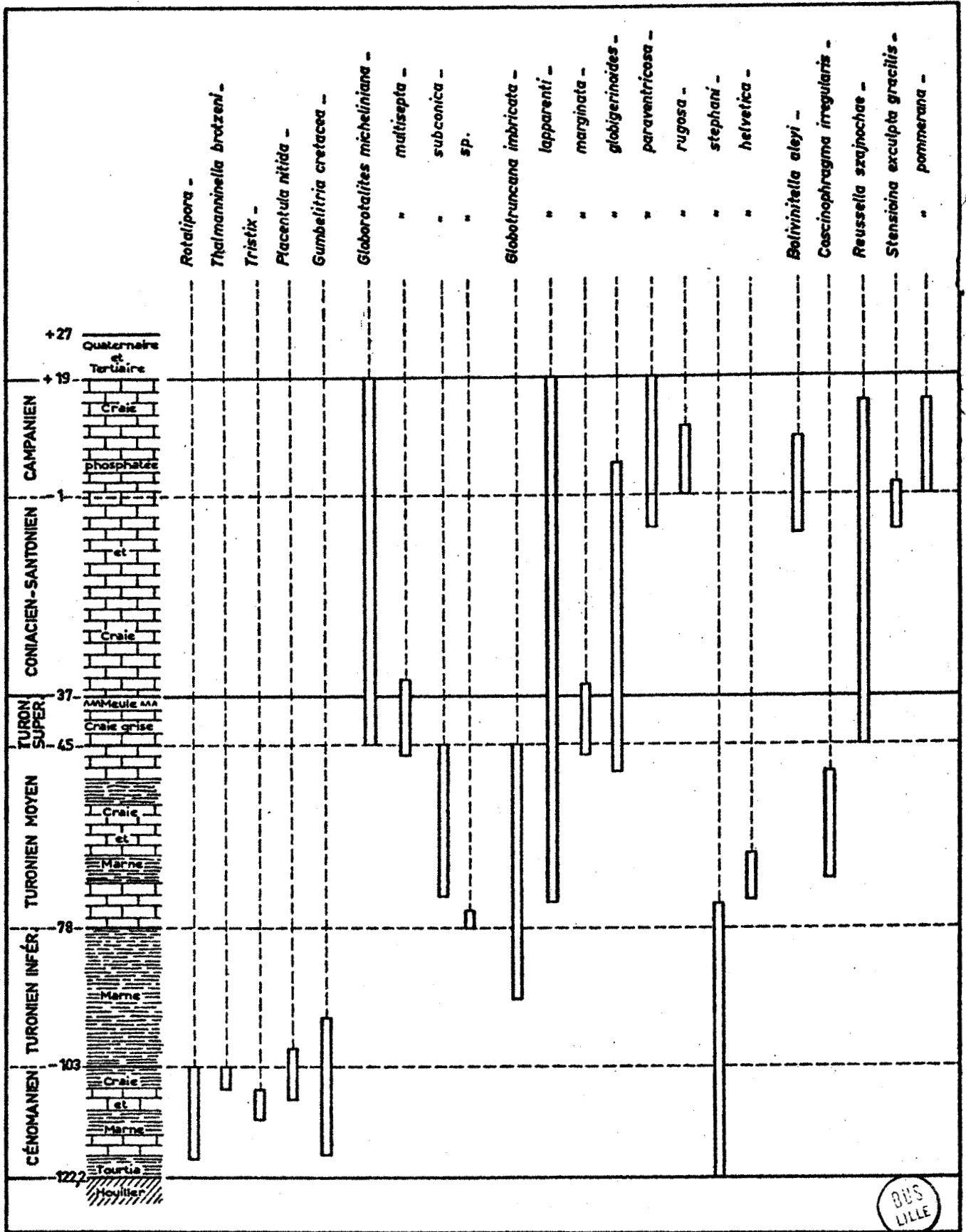
tiret interrompu = espèce assez rare . tiret mince = espèce commune . tiret large = abondance de l'espèce .



Répartition stratigraphique des espèces (les profils ne sont pas figurés à l'échelle)

(D'après MOORKENS)

Fig: 14



Coupe lithologique du puits 10 d'Oignies et extension verticale de quelques espèces "guides"
(D'après J. MAGNÉ)

Fig. 15

Les sondages de Bellonne et Fruges précédemment cités, ont été étudiés respectivement en 1961 et 1970 par MONCIARDINI C. Chef de la section micropaléontologie du département des laboratoires au B. R. G. M. à Orléans.

Il semble que le sondage de Bellonne ait été étudié très précisément. Il y a rencontré les faunes suivantes (voir Pl. XIII).

En résumé, les différents auteurs cités s'accordent sur les points suivants :

- Le Cénomaniens est très bien repéré avec Rotalipora cushmani qui semble ne pas exister dans la partie inférieure (peut-être dû aux conditions de milieu : proximité du rivage).

- La base du Turonien moyen serait marquée par une abondance relative des Globorotalites. Le Turonien inférieur, pour lequel aucune forme n'a été citée serait donc la zone comprise entre les deux. Ceci avait d'ailleurs été remarqué par J. POLVECHE. "L'absence de formes tels les Rotalipora cénomaniennes et les Globorotalites marqueurs du Turonien moyen - Sénonien sont les seuls critères, négatifs, mais sûrs, permettant de reconnaître le Turonien inférieur".

1.4. CORRELATIONS GENERALES

1.4.1. Entre les différentes méthodes (Pl. XIII)

Le tableau ci-dessous résume pour les différents sondages dont il a été fait mention, les différentes techniques d'analyse stratigraphique employées.

	ESCALLES	FRUGES	VIMY	BELLONNE	LES RUES DES VIGNES
Calcimétrie	x	x	x	x	
Diagraphie					
Résistivité		x	x	x	x
Gamma-ray		x	x		
Micropaléontologie	0	0	0	x	
Macropaléontologie	x		0		

0 : résultats à paraître

1.4.1.a. Corrélation diagraphies-calcimétries
Sondage de Vimy

De la planche XIII il ressort que la corrélation entre gamma-ray et calcimétrie est remarquable. Les valeurs faibles de radioactivité correspondent à de forts pourcentages en carbonate de calcium et inversement (la radioactivité est essentiellement due au potassium 40 contenu dans les argiles), pour la partie du log située entre 63,5 m de profondeur et la surface, il faut tenir compte du fait que le sondage était tubé.

D'après les abaques Schlumberger (log interprétation chart 1969, p. 21) le trou étant tubé en 6 pouces, le tubage ayant une épaisseur de 0,7 mm, la sonde employée un diamètre de 2 pouces, en supposant la sonde centrée et une densité de boue = 1,2, on trouve un rapport $\frac{\text{radioactivité corrigée}}{\text{radioactivité apparente}} = 1,4$.

La valeur de 75 % de carbonate de calcium à la profondeur de 58,80 m est celle d'un banc marneux verdâtre, très peu épais : 5 à 6 cm (correspond certainement à l'argile à arborisations vertes de A. Briquet : 13 a). Sa faible épaisseur d'une part (la sonde de radioactivité intègre sur 20 cm de hauteur) et le fait que le trou soit tubé, expliquent la moins bonne corrélation. Le pic situé à 56 m (à multiplier par 1,4) correspond à la partie supérieure de la meule qui est donc radioactive.

Pour le sondage de Fruges, la corrélation est aussi très bonne mais moins évidente au premier coup d'oeil car les contrastes sont nettement moins marqués qu'à Vimy (un tubage avait été posé entre 34 et 51 m pour éviter les éboulements).

La corrélation résistivité - calcimétrie est tout aussi remarquable que la précédente pour les sondages de Vimy, Fruges et Bellonne. La résistivité semble très sensible à la teneur en carbonate de calcium de la roche d'une part, (l'alternance de bancs marneux et crayeux du Faciès 3, ressort bien à Vimy par ces deux méthodes alors que la distinction de ces bancs sur les carottes sèches est très difficile), mais d'autre part pour la partie inférieure du faciès 1 de Vimy, et la partie supérieure de ce même faciès à Fruges, on constate que les pourcentages de carbonate de calcium et les valeurs de radioactivité restent sensiblement constantes alors que la résistivité croît graduellement de bas en haut, il faut donc faire intervenir un autre facteur que la teneur en carbonate de calcium, il peut s'agir d'une induration plus importante des bancs due à une diagenèse différente.

1.4.1.b. Datation des diagraphies par micro- paléontologie

Pour le forage de Fruges on constate que les pourcentages faibles de carbonate de calcium (10 à 20) entre 91 et 95 m correspondent à l'argile noire du Gault (Albien) qui est le substratum de la craie (on ne possède pas la courbe de résistivité pour cette partie ; mais on peut penser d'après la corrélation existant avec les calcimétries de Vimy, que la forme de la courbe doit être sensiblement identique).

Le pic radioactif observé sur les enregistrements gamma-ray correspond au niveau de glauconite situé au contact Albien-Cénomaniens, faciès de transgression (voir 42).

La zone immédiatement supérieure correspond au Cénomaniens, sa limite avec le Turonien inférieur déterminée par la micropaléontologie se situe 1 m au-dessus de la limite déterminée sur la courbe de résistivité, entre les deux faciès.

C. MONCIARDINI distingue un Cénomaniens inférieur correspondant à l'absence de Rotalipora cushmani, c'est un critère négatif. Cette absence peut être due à l'une des causes vues au paragraphe 1.3.2.b. Quant à la limite du Turonien inférieur - Turonien moyen elle est mal déterminée par la micropaléontologie (fréquence plus ou moins grande d'une espèce) et semble se situer environ à 2 m sous la limite de faciès déterminée par la résistivité et la calcimétrie.

Cette courbe de résistivité confirmée par la calcimétrie, se corrèle latéralement à celle de Vimy, et celle de Vimy à Bellonne, sondage sur lequel, comme nous l'avons vu au paragraphe 1.3.2.b. a été fait une étude micropaléontologique très précise par C. MONCIARDINI.

Cette corrélation par forages successifs, détermine une zone inférieure correspondant au Gault (zone des marnes très glauconieuses à rognons phosphatés sur la coupe lithologique).

Cette zone n'a pas été distinguée micropaléontologiquement (peut-être à cause de l'absence d'échantillons ?). La courbe de résistivité est confirmée par les faibles pourcentages de carbonate de calcium. Les limites des deux faciès situés au-dessus corrélées à partir des courbes de résistivité depuis Fruges, correspondent (à 0,50 m près) aussi aux limites micropaléontologiques Cénomaniens - Turonien inférieur et Turonien inférieur - Turonien moyen, on peut donc penser que ces faciès déterminés à partir des diagraphies de résistivité sont latéralement isochrones.

La légère différence entre la limite Cénomaniens - Turonien inférieur déterminée par diagraphie électrique ou par micropaléontologie à Fruges et à Bellonne est, semble-t-il, imputable au fait que le changement de microfaune n'interviendrait qu'environ 1 m plus haut. Juste au-dessus viendrait la zone à *Actinocamax plenus*, (voir 48 b).

J. POLVECHE (50) en association avec J. MAGNE avait d'ailleurs montré pour le puits de la fosse 19 à Liévin la presque concordance entre faciès et micropaléontologie pour cette limite, et le désaccord avec la détermination par macrofaune qui elle situe cette limite 10 m plus haut (fig. 16).

Dans la suite de notre étude, seule la limite de faciès qui correspond d'ailleurs pratiquement à la limite micropaléontologique (Fruges - Bellonne - puits 19 de Liévin) sera considérée et l'on pourra s'apercevoir qu'elle est toujours située entre ou juste après des pics caractéristiques très nets, bien corrélables, qui correspondent certainement à des épisodes sédimentaires affectant le bassin. Cette limite de faciès est donc probablement isochrone.

La limite Turonien moyen - Turonien supérieur est quelquefois un peu plus difficile à déterminer sur certaines courbes de résistivité, c'est le cas de Bellonne ; ceci est dû au fait que la partie inférieure du Turonien supérieur est encore un peu marneuse, mais sa résistivité d'ensemble est supérieure à celle du Turonien moyen ; cette limite se distingue très bien sur d'autres courbes de résistivité, le changement de faciès étant certainement moins progressif.

Le "tun" ou la "meule" qui se marquent par un pic, résistant ont toujours été rattachés au faciès qui leur était inférieur, alors que les microfaunes semblent s'éteindre sous le banc de "tun", tandis que d'autres faunes se développent ; le "tun" se rattacherait alors plutôt au Sénonien. C'est une question qui a toujours été très discutée (voir hypothèse de Monsieur WATERLOT G. au paragraphe 1.1.3.c.).

La courbe de résistivité de Bellonne, se corrèle très bien avec celle du Core-drill des "Rues des Vignes" (n° 37-5-10) courbe d'après laquelle on avait déterminé au paragraphe 1.3.1.b. cinq faciès caractéristiques pour la craie du Nord de la France.

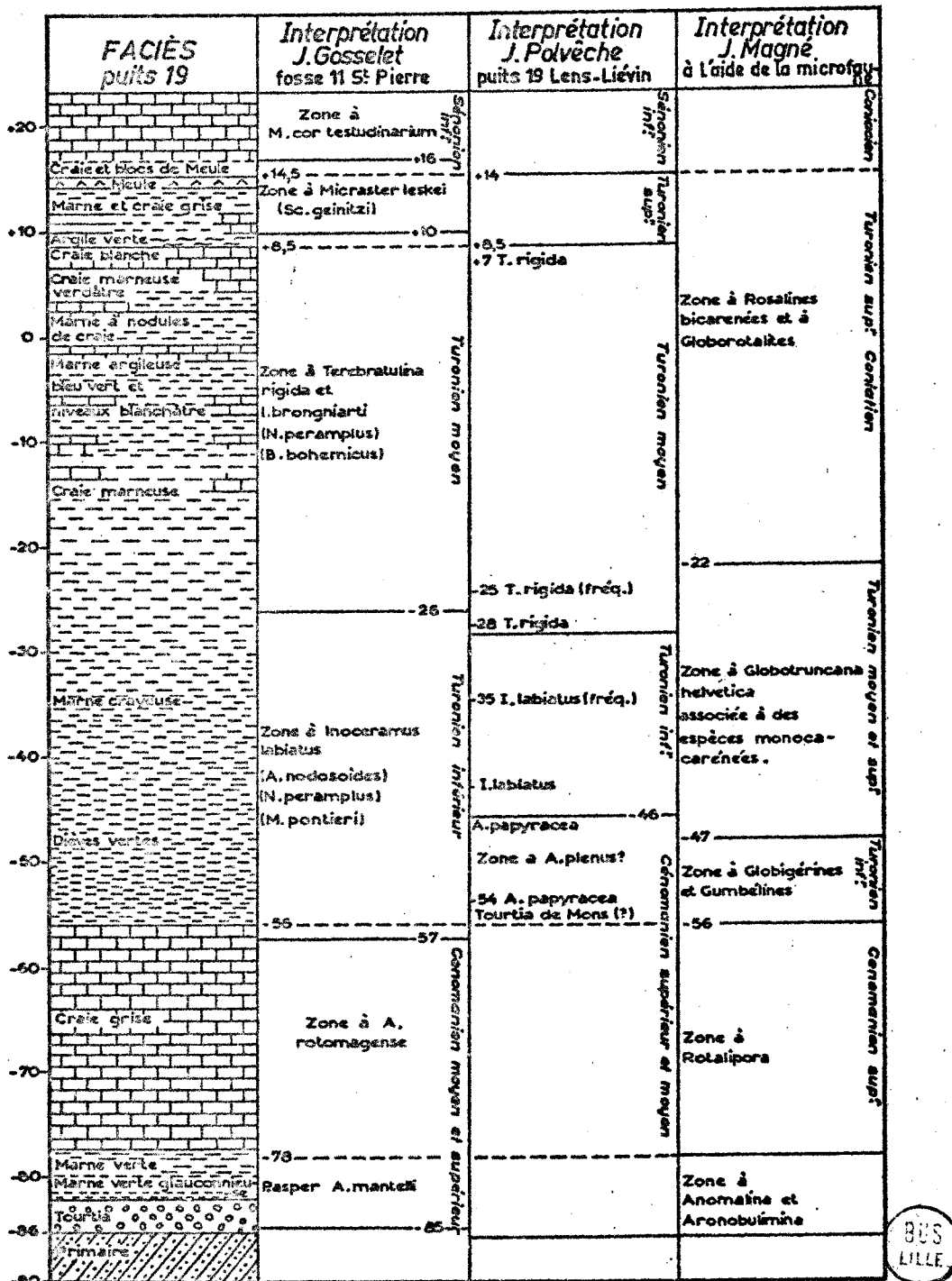


Fig:15 - Série stratigraphique traversée par le puits n° 19 de Lens-Liévin - Interprétations d'après J. POLVECHE -

(N.B: La fosse 11 St Pierre est proche du puits n° 19 de Lens-Liévin)



On peut dire d'après cette corrélation avec Bellonne, les faciès étant isochrones que le substratum est du Gault.

Le faciès 1 du Cénomaniens.

Le faciès 2 du Turonien inférieur.

Le faciès 3 du Turonien moyen.

Le faciès 4 du Turonien supérieur.

Le faciès 5 du Sénonien.

On pourra donc parler désormais, de faciès Cénomaniens, faciès Turonien inférieur ...

Sur le log récapitulatif de Bellonne, on peut remarquer la bonne corrélation qui existe entre la description lithologique et ces différents faciès déterminés par les diagraphies et datés d'après la micropaléontologie.

1.4.2. Entre les sondages et forages : cartes d'isobathes et d'épaisseurs

Sur la planche XIII, on voit :

- Une réduction d'épaisseur du faciès 1 Cénomaniens entre Fruges et Vimy, en même temps qu'une diminution de résistivité qui s'accroît vers l'Est (les rues de Vignes).

- Un accroissement d'épaisseur du faciès 2 Turonien inférieur entre Vimy et Bellonne et en allant vers l'Est. La résistivité est nettement supérieure pour Escalles et Fruges (à l'Ouest).

- Une réduction d'épaisseur du faciès 3 Turonien moyen entre Vimy - Bellonne puis surtout entre Bellonne - les Rues des Vignes (réduction d'épaisseur des bancs résistants crayeux).

- Une augmentation d'épaisseur du faciès 4 Turonien supérieur en allant vers l'Est.

Cette coupe permet de se rendre compte de la variation d'épaisseur des différents faciès selon un trait de coupe et une direction donnée (2 dimensions).

Pour apprécier cette variation d'épaisseur dans l'espace (3 dimensions) il était donc nécessaire d'établir des cartes d'épaisseurs pour chaque faciès.

1.4.2.a. Cartes d'isobathes et d'épaisseur

 (Pl. XIV à XXI)

Pour ces cartes ont été utilisés les épaisseurs et cotes absolues (Ann. I) déterminées d'après les diagraphies. Mais comme nous l'avons vu au paragraphe 1.2.2., aucune diagraphie n'ayant été réalisée dans le bassin houiller, il a été nécessaire de relever les coupes des sondages et puits de mines creusés dans la région et de les interpréter. Cette interprétation a été faite d'après la lithologie, décrite par les foreurs pour les sondages et par les ingénieurs ayant suivi le fonçage pour les puits de mines (ces dernières descriptions sont souvent très complètes et distinguent en particulier dans le Turonien moyen les bancs crayeux et marneux). Cette description est certainement facilitée par le fait que la roche est mouillée (les différences de coloration ressortent alors plus nettement).

Vu la bonne corrélation lithologie - faciès du forage de Bellonne (situé à la limite sud du bassin minier) d'une part et la similitude des descriptions lithologiques de cet ouvrage avec les sondages houillers et puits de mines d'autre part, il y a tout lieu de penser que l'on peut rassembler sur une même carte ces renseignements d'origines différentes. L'ordre de précision peut être estimé à 2 ou 3 m pour les limites les plus difficiles à déterminer (Turonien inférieur - Turonien moyen et Turonien moyen - Turonien supérieur).

Les autres limites sont vraisemblablement précises et fiables (substratum - Cénomaniens, Cénomaniens - Turonien inférieur et Turonien supérieur - Sénomaniens dans le cas où il existe un banc de "tun" ou de "meule").

. Cartes d'isobathes

. Toit du substratum de la craie (Pl. XIV)

Cette carte représente dans la partie Nord-Est le toit du Primaire (ou du Wealdien en poches) et dans la partie Sud-Ouest le toit des argiles du Gault. Celles-ci sont transgressives sur le primaire ; et sur des terrains d'âge secondaire (Jurassique, Crétacé inférieur) vers le Sud.

L'allure générale actuelle de ce substratum est celle d'un anticlinal faillé longitudinalement, de direction Nord-Ouest, Sud-Est, prolongement du Boulonnais passant par l'Artois et s'ennoyant vers le Sud-Est. Il est alors relayé plus au Nord par l'axe anticlinal du Mélandois de direction Est-Ouest.

Entre les deux, une cuvette synclinale correspondant au bassin d'Orchies. Au Primaire devaient exister de profonds paléocreux dans la région de Douai.

. Toit du Cénomaniien (Pl. XVI)

On peut voir sur les tableaux figurant en annexe I que dans la région minière, de nombreux sondages donnent simplement la cote du toit du Primaire. Cette carte est donc relativement précise ; d'autre part, l'épaisseur du faciès Cénomaniien s'accroît de façon régulière du Nord au Sud. La carte du toit du Cénomaniien a donc été dressée en ajoutant l'épaisseur du faciès Cénomaniien à la cote du toit du Primaire ou du Gault. Cette carte est ainsi plus précise que celle qui aurait été obtenue en traçant les isobathes déterminées uniquement à partir des cotes des sondages comme nous le verrons par la suite. Il n'en sera pas de même pour la carte du toit du Turonien moyen.

Les paléocreux de la région de Douai se comblernt progressivement. L'axe du Mélandois n'a pas encore été atteint par la transgression cénomaniienne.

. Toit du Turonien moyen (Pl. XIX)

Le toit du Turonien moyen est le substratum de la nappe aquifère contenue dans le Sénonien et le Turonien supérieur, c'est à ce niveau que s'arrêtent les forages d'eau. On a donc des renseignements supplémentaires par rapport aux cartes précédentes, celle-ci sera donc plus précise que les précédentes, la densité des points étant plus grande.

L'allure générale est assez proche de celle du toit du substratum mis à part le fait que les paléocreux de la région de Douai sont comblés.

. Toit de la craie sous recouvrement tertiaire (Pl. XXI)

. Cartes d'épaisseurs

. Du Cénomanién

Elle augmente assez régulièrement et rapidement du Nord-Est vers le Sud-Ouest pour atteindre 70 m.

La côte avance de 20 à 25 km par rapport à celle de la mer albienne. Ce qui deviendra plus tard l'axe du Mélançois, devait déjà être un axe haut se prolongeant vers l'Ouest jusqu'à Lillers puis prenant une direction Nord-Est - Sud-Ouest les paléocreux de la région de Douai se comblent (surépaisseurs).

. Du Turonien inférieur (Pl. XVII)

Elle augmente irrégulièrement vers le Sud-Ouest pour atteindre 40 m. (forte augmentation dans la région de Béthune).

La côte avance de 3 à 10 km dans la région lilloise.

L'axe haut Nord-Est - Sud-Ouest du Cénomanién semble être devenu un sillon. Les paléocreux de la région de Douai paraissent à peu près comblés.

. Du Turonien moyen (Pl. XVIII)

Comme pour les faciès précédents elle augmente vers le Sud-Ouest (50 m au maximum). Forte augmentation dans la région de Béthune, ailleurs le gradient est faible par rapport à celui des faciès précédents.

. Du Turonien supérieur (Pl. XX)

Suite de rides et sillons dirigés grossièrement Est-Ouest, l'épaisseur maximale est de 30 m, souvent comprise entre 10 et 20 m.

1.4.2.b. Cartes de résistivité (Pl. XXII à XXIV)

Les sondages dans lesquels ont été faites les diagraphies de la craie ont un diamètre variant de 4"3/4 à 6". Il faudrait effectuer une correction des valeurs des résistivités pour les rendre comparables, mais compte tenu du fait que ces valeurs sont faibles et que les diamètres de forage sont peu différents, cette correction est négligeable.

Les valeurs de résistivité des différents faciès ont été appréciées à l'aide de la petite normale pour la plupart des sondages. Cette mesure est normalement influencée par l'invasion des terrains en place par le filtrat de la boue de forage.

Mais la boue ayant une densité de 1,1 et la profondeur n'étant jamais très importante, la différence entre la pression hydrostatique dans le forage et celle dans les terrains en place doit être assez réduite. Les phénomènes d'invasion sont en principe peu importants et nous négligerons leur influence.

Enfin les valeurs de résistivité de Bellonne foré en 7" et de Vimy foré en 6" ont été intégrées sans corrections aux différentes cartes de résistivité.

• Carte de résistivité de la partie supérieure du faciès Cénomanién (Pl. XXII)

La résistivité du faciès Cénomanién varie entre deux valeurs extrêmes. Pour établir cette carte, on a pris la valeur moyenne, de la partie supérieure du faciès (plus résistante que la partie inférieure) relativement homogène. L'épaisseur pour laquelle a été déterminée la valeur moyenne de résistivité a également été notée (représentée sur la carte par un trait fin pointillé). Ces divers renseignements figurent dans les tableaux en annexe III. La résistivité moyenne oscille entre des valeurs souvent voisines de 15 Ω .m dans l'Est de la région (Boussières) et une valeur isolée de 170 Ω .m à Bezinghem. Les valeurs immédiatement inférieures sont de l'ordre de 80 Ω .m.

D'une manière générale, on constate que la résistivité (qui correspond à la teneur en carbonate de calcium) croît du Nord-Est vers le Sud-Ouest et de l'Est vers l'Ouest. C'est-à-dire en s'éloignant du rivage.

Avec toutefois deux exceptions :

- La région comprise dans le triangle Campagne-les-Hesdin, St-Pol-sur-Ternoise, Auxi-le-Château, la résistivité diminue en allant vers le S. W. pour atteindre 17 Ω .m à Guigny.

- Dans l'Est de la région, un couloir à très faible résistivité (comprise entre 10 et 20 Ω .m) s'individualise. Il se trouve situé en face du golfe de Mons. On peut penser qu'il y a eu apport de sédiments argileux en provenance de cette région. En effet comme nous l'avons vu précédemment d'après R. MARLIÈRE (48 a, p. 352 à 357), cette partie supérieure du Cénomanién correspondrait à l'assise de St-Aybert qui se présente sous le faciès de marnes vertes à Bernissart en Belgique et aux fosses St-Aybert et Charles Boca à Douchy situées en France et décrites par R. DEHEE (1927 et 1925).

. Carte de résistivité du faciès Turonien inférieur
(Pl. XXIII)

Cette carte a été établie en reportant les valeurs minimales de résistivité du faciès. A la lecture des tableaux (annexe III) on peut constater que l'amplitude de variation de la résistivité pour ce faciès est faible, et en regardant les diagraphies on s'apercevra que cette valeur minimale représente la plus grande épaisseur du faciès, seuls quelques bancs résistants à la partie supérieure ou inférieure, marquant le passage aux faciès limitrophes plus résistants.

Cette carte est donc représentative de l'évolution générale latérale du faciès Turonien inférieur.

La résistivité minimale oscille entre 6 à 7 Ω .m dans l'Est de la région (Boussières) et 120 Ω .m à l'Ouest (Tubersent).

Cette valeur isolée nettement plus forte que celles immédiatement inférieures (95 Ω .m à Bezinghem puis 62 à Frencq et Villers-L'hôpital) pourrait paraître erronée ; mais il n'en est rien car cet accroissement de résistivité va dans le sens logique d'évolution des faciès en s'éloignant de la côte vers l'Ouest. D'autre part la valeur de résistivité déterminée pour la partie supérieure du faciès Cénomaniens pour ce même sondage de Tubersent n'est nullement isolée, au contraire elle s'intègre très bien avec les valeurs environnantes. C'est donc que le faciès Turonien inférieur est plus crayeux dans cette région qu'aux environs, sa valeur absolue de résistivité est d'ailleurs supérieure à celle du Cénomaniens qui présentait déjà un faciès relativement crayeux. (De même qu'à Escalles le pourcentage de carbonate de calcium est plus fort pour le Turonien inférieur que pour le Cénomaniens).

Il y a tout lieu de penser que cette remarque est valable pour la valeur également enregistrée à Bezinghem pour le faciès Cénomaniens. L'accroissement rapide de la valeur de résistivité dans ces zones plus crayeuses est certainement du au fait que quelques pour cent en plus de carbonate de calcium entraînent un accroissement important de la résistivité (ce que l'on peut pressentir d'après les corrélations verticales, résistivité-calcimétrie).

• Comparaison des deux cartes

La bande de résistivité 0-20 Ω .m est beaucoup plus large qu'au Cénomanién bien que la côte soit un peu plus loin vers le Nord. La ligne 20 Ω .m correspond sensiblement à celle de 40 Ω .m pour le Cénomanién. L'apport argileux en provenance du Nord-Est et surtout de l'Est devait donc être nettement plus important au Turonien inférieur qu'au Cénomanién.

Un couloir de résistivité inférieure à 40 Ω .m se maintient entre deux avancées l'une venant de l'Ouest et l'autre du Sud.

On remarquera que ces deux avancées résistantes étaient déjà présentes au Cénomanién mais moins évidentes car elles interrompent ce qui aurait pu être un couloir de résistivité inférieure à 50 Ω .m reliant la région d'Auxi-le-Château à faible résistivité, à celle qui se trouve plus au Nord.

Pour le Cénomanién comme pour le Turonien inférieur, l'avancée Ouest est nettement plus résistante que l'avancée Sud ; il semble d'ailleurs exister une troisième avancée Sud - Sud-Est qui se manifeste par quelques valeurs de résistivité supérieures à celles environnantes dans l'extrême Sud-Est de la région étudiée.

Cette diverticulation pourrait être expliquée par l'interruption de l'avancée sud par des sédiments argileux en provenance de la région de Mons.

• Carte de résistivité minimale du faciès Turonien moyen (Pl. XXIV)

La résistivité varie entre deux valeurs extrêmes (annexe III). Comme ce faciès est une alternance de bancs marneux et crayeux, la résistivité minimale correspond aux bancs marneux. On a dressé une carte des résistivités minimales qui sera donc comparable à celle des résistivités du Turonien inférieur, ces bancs marneux étant en quelque sorte des récurrences du faciès précédent.

D'autre part la valeur du rapport $\frac{\text{résistivité maximale}}{\text{résistivité minimale}}$ donne une idée de l'hétérogénéité plus ou moins accentuée de ce faciès.

En prenant la valeur 2 comme une valeur caractéristique de rapport, on pourra séparer deux régions ; l'une occidentale et sud-occidentale (interrompue par quelques diverticulations se propageant vers l'Ouest et le Sud à partir de St Pol-sur-Ternoise), où le faciès est relativement peu hétérogène (valeurs de rapport inférieures à 2 et pouvant aller jusqu'à 1,3 à Hucqueliers) et une province Nord-Orientale (valeurs de rapport supérieures à 2 et pouvant atteindre 6 dans la région de Lille).

Les bancs crayeux (résistivité forte) se propagent jusqu'au rivage. Il n'y avait donc pas d'apports terrigènes lors de leur formation.

Par contre les bancs marneux (faible résistivité) ne se propagent qu'à une certaine distance du rivage (voir la carte des valeurs minimales de résistivité (Pl. XXIV). Ils correspondent à des apports argileux continentaux. Il y aurait donc eu alternance de périodes humides (responsables de la présence d'argiles) et sèches (prédominance de carbonate de calcium jusqu'au rivage).

Comme au Turonien inférieur on remarque toujours les avancées Ouest et Sud ; (avancée Ouest toujours plus résistante), cette résistivité atteint 100 $\Omega.m$ à Bezinghem. Ces avancées ont un faciès peu hétérogène pour des valeurs minimales de résistivité supérieures à 50 $\Omega.m$ (ceinture du Boulonnais à l'Ouest, région de Pas-en-Artois, Avesnes-le-Comte au Sud).

Le couloir à faible résistivité entre les deux s'est déplacé un peu vers le Nord-Ouest. Il semble dû à des apports argileux en provenance à la fois de la région de Mons et de la région au Nord-Ouest de Lille.

1.4.3. Autres données acquises

1.4.3.a. Carte d'épaisseur des argiles du Gault (Pl. XXV)

Entre Montreuil et Cambrai, devait subsister une zone haute dont certaines parties émergeaient de la mer albienne. Dans les paléocreux de la région de Douai, l'épaisseur des argiles du Gault atteint 30 m. Une fosse devait également exister entre Guines et Cassel (épaisseur supérieure à 20 m).

1.4.3.b. Carte des limites de dépôts des différents faciès (Pl. XXVI)

Cette carte a été établie essentiellement à l'aide des diagraphies. Les corrélations diagraphiques mettent bien en évidence la réduction progressive d'épaisseur des faciès et leur disparition. (Dans le Sud de la région, ces divers faciès sont bien développés et ont été identifiés par les pétroliers).

Sur cette carte on constate :

- que des dépôts aptiens ont été conservés dans le Boulonnais et la région au Nord de Doullens.
- que la limite des sables verts ne semble guère dépasser celle du Jurassique (déterminée par les pétroliers : carte d'isobathes du toit du Paléozoïque 1965), sauf vers l'Est où ce faciès atteint les environs de Cambrai, Avesnes-le-Sec, Le Cateau.
- que les argiles du Gault par contre s'avancent nettement vers le Nord-Est jusqu'à une limite passant approximativement par Gravelines, St Omer, Lillers, Béthune, Douai, Avesnes-le-Sec.

C'est à cette époque que le dôme situé selon un axe Fruges-Montreuil séparant une province occidentale et une province méridionale (au Jurassique, à l'Aptien, à l'Albien (sables verts)

a été submergé mais il semble en subsister quelques paléocollines durant le Gault (absence de dépôts). Sur la carte d'épaisseur du Gault (Pl. XXV), on peut constater que la variation d'épaisseur différencie encore bien les deux provinces et que les dépôts sont peu épais sur cet axe, et absents en quelques points.

Cette individualisation des deux provinces est bien marquée dans la résistivité des faciès du Cénomaniens, Turonien inférieur et Turonien moyen.

C'est aussi à cette époque que les paléocreux primaires de la région de Douai et Aniche sont envahis par la mer et ont peut-être permis son cheminement vers le bassin de Mons.

- que le faciès Cénomaniens inférieur, déterminé par les diagraphies, (on a considéré comme Cénomaniens inférieur un faciès à résistivité très faible : environs 10 à 15 Ω .m, un peu plus forte que le Gault : 5 Ω .m, mais nettement inférieure à celle du faciès supérieur), s'avance nettement moins loin que le Gault, et même que l'Aptien dans la région de Doullens ; mais qu'il est présent à l'extrémité Sud-Est de la région étudiée (Le Cateau).
- que par contre le faciès Cénomaniens supérieur progresse fortement vers le N.E. par rapport au Gault. Son rivage devait suivre une ligne approximative Dunkerque-Lille-St Amand.
- que le faciès Turonien inférieur dans la région de Lille s'avance encore un peu plus vers le Nord.

1.4.3.c. Problème du "tun" et de la "meule" (Pl. XXVII et XXVIII)

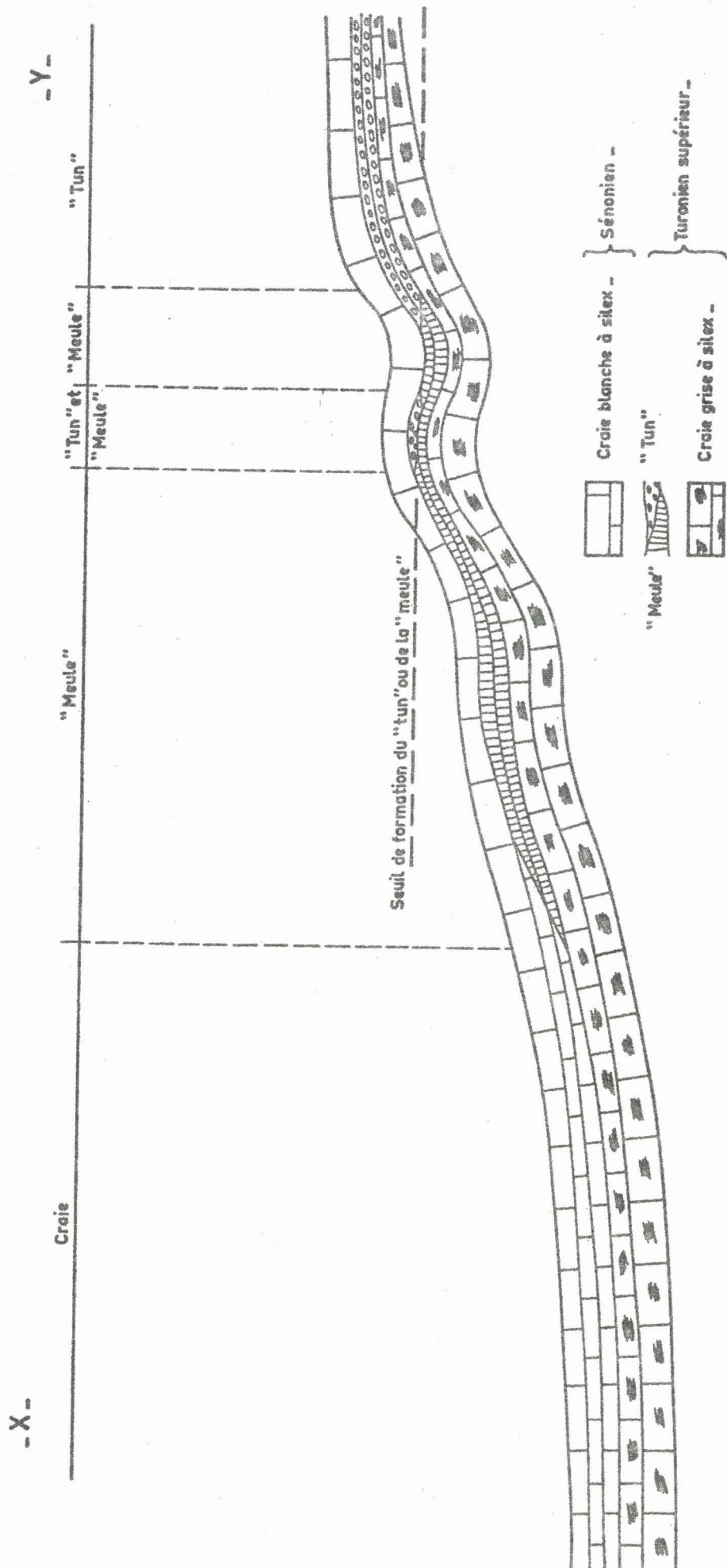
Ce problème sera simplement abordé (car il est très complexe et nous essaierons simplement d'y apporter quelques éclaircissements) à l'aide des diagraphes de résistivité et des diagraphies gamma-ray effectuées par le B. R. G. M., assez denses dans la région de Lille (Pl. XXVII). Il serait nécessaire parallèlement à cette étude par diagraphie de faire une étude pétrographique de ces faciès.

Dans ce qui va suivre, on désignera par "tun" un faciès renfermant des nodules de craie durcie, quelquefois entourés d'une patine verte et englobés dans une craie plus tendre, et par "meule" un faciès crayeux et phosphaté sans nodules, c'est une craie rêche, très dure.

Les diagraphies de résistivité et celles de radioactivité ont permis de dresser une carte se rapportant au "tun" et à la "meule" (Pl. XXVIII). On y a consigné d'une part : la résistivité et l'épaisseur de ce faciès. Les valeurs de résistivité déterminent quatre zones : la zone 0 à l'Ouest où la résistivité n'apparaît pas différente de celle de la craie, la zone 1 au Nord et vers le Nord-Est à résistivité relativement faible (inférieure à $100 \Omega.m$). Une zone 2 de résistivité intermédiaire (comprise entre 100 et $300 \Omega.m$) et une zone 3 au Sud à forte résistivité (supérieure à $300 \Omega.m$). Pour la radioactivité on a noté la valeur absolue de radioactivité maximale du "tun" ou de la "meule", mais comme les forages ne forment pas un ensemble homogène (diamètres, tubages, différents) il a paru plus logique de considérer la valeur du rapport radioactivité du "tun" ou de la "meule" sur radioactivité de la craie sénonienne sus-jacente (ce faciès étant relativement homogène et constant dans toute la région), l'épaisseur de ce banc a également été indiquée. On peut ainsi distinguer trois zones : une zone A vers l'Ouest où le "tun" n'apparaît pas ; une zone B au Nord et Nord-Est et une zone C au Sud avec un îlot dans la partie nord.

En effectuant un recoupement de ces deux types de mesures, on peut distinguer quatre zones dont les caractéristiques sont les suivantes :

- une zone OUA où la résistivité et la radioactivité sont celles de la craie ;
- une zone 1NB à résistivité faible et radioactivité forte ;
- une zone 2NB + 2NC à résistivité et radioactivité moyennes ;
- une zone 3NC à résistivité forte et radioactivité faible.



-- Allure du fond marin au moment de la formation du "tun" et de la "meule" --

Fig: 17



En considérant le fait que les nodules du "tun" sont entourés le plus souvent d'une patine verte essentiellement glauconieuse (minéral très radioactif) que la "meule" est une craie rêche, très dure (donc très résistante) et phosphatée ; et vu les constatations que nous venons de faire, on peut émettre l'hypothèse suivante :

Le "tun" serait très radioactif et faiblement résistant.

La "meule" serait peu radioactive (relativement par rapport au "tun" ; mais plus radioactive que la craie) et très résistante, avec tous les termes de passage progressifs entre ces deux faciès.

Ces faciès sont probablement dûs à une diminution de profondeur à la suite d'un soulèvement du fond ou d'une baisse de niveau marin.

Selon R. BROMLEY (cité par JUIGNET : 42), un processus de phosphatisation a lieu pour une bathymétrie variant entre 100 et 50 m.

Dans le cas présent du "tun" et de la "meule", on peut penser que la profondeur s'est réduite progressivement permettant la formation de phosphate et de glauconie et que vu les irrégularités du fond marin, certaines régions ont dû se trouver au-dessus d'un certain seuil pour lequel l'agitation due aux courants, marées, a été favorable à une reprise des bancs déposés et à la formation de nodules ; l'agitation des eaux étant un facteur supplémentaire pour la diagenèse de la glauconie. Dans les zones situées sous ce seuil a dû se former la "meule" par imprégnation et durcissement du banc crayeux supérieur. Plusieurs mouvements ayant pu se produire, on trouvera un ou deux bancs de "tun" (rarement trois) dans les régions au-dessus du seuil, quelquefois un banc de "meule" puis un banc de "tun" pour les régions à proximité du seuil ; et enfin un banc de "meule" pour les régions qui sont toujours restées sous le seuil (voir fig. 17).

1.5. CONCLUSIONS

Les diagraphies de résistivité sont un excellent outil de corrélation dans le cas de la craie du Nord de la France, par l'allure caractéristique de certains pics de résistivité (Pl. III à XII).

La calcimétrie met en évidence le fait que la résistivité est déterminée principalement par la teneur en carbonate de calcium, d'autres phénomènes pouvant se surimposer (induration) comme on le constate pour le sondage de Fruges.

La micropaléontologie permet de démontrer que les pics de résistivité corrélable à grandes distances, sont isochrones et que les limites de faciès déterminées à l'aide de ces repères correspondent aux étages géologiques du Cénomaniens, Turonien, Sénonien (Pl. XIII).

"La diagraphie permet donc d'identifier une unité lithologique, de situer avec précision la cote de son toit et de son mur et par conséquent d'en déterminer l'épaisseur".

Un relevé des coupes géologiques archivées au B.R.G.M. parallèlement aux indications fournies par les diagraphies a permis de dresser des cartes d'isobathes et d'épaisseurs des différents faciès. D'abord établies à l'échelle du 1/50 000, ces cartes ont été réduites et assemblées au 1/200 000. La carte au 1/200 000 étant réduite photographiquement au 1/400 000.

La carte des limites de dépôt des différents faciès (Pl. XXVI), si ces limites correspondent aux rivages successifs des mers du Crétacé montre que la région a dû être affectée de basculements qui ont modifié le rivage. Ces basculements ou soubresauts s'étant intensifiés à la fin du Turonien supérieur ("tun", "meule"). La progression plus ou moins régulière de la mer vers le Nord-Est corrélativement à une augmentation d'épaisseur de la tranche d'eau et à ces basculements, explique pour partie les variations d'épaisseur des différents faciès.

En effet, plus la tranche d'eau est épaisse, plus nombreux sont les organismes y vivant (jusqu'à une certaine profondeur) et donc la sédimentation des tests. Ces variations d'épaisseur peuvent être expliquées pour l'autre partie par la provenance et l'importance des apports argileux ou sableux.

Les cartes de résistivité montrent une diminution de la proportion relative des apports argileux par rapport aux carbonates vers le Sud-Ouest, c'est-à-dire en s'éloignant de la zone côtière. En effet la résistivité augmente régulièrement pour atteindre son maximum dans deux provinces, l'une à l'Ouest, l'autre au Sud, que l'on retrouve pour les faciès du Cénomaniens, Turonien inférieur et Turonien moyen.

Pour le Turonien supérieur et le Sénonien il n'a pu être dressé de carte de résistivité, mais sur les diagraphies (isolées) que l'on possède dans ce niveau, on constate que le faciès est toujours résistant et homogène, les calcimétries donnent un pourcentage de carbonate de calcium toujours supérieur à 90. Ce faciès crayeux est homogène à la fois dans l'espace et dans le temps.

DEUXIEME PARTIE

H Y D R O G E O L O G I E

C'est une application pratique de la première partie, néanmoins quelques rappels théoriques ont paru nécessaires.

2.1. DONNEES GENERALES SUR L'HYDRAULIQUE SOUTERRAINE

Le mot "hydrogéologie" sous-entend deux types d'observations :

- des observations géologiques qui sont le fait de la première partie ;
- des observations hydrologiques : pour déterminer la façon dont se fait l'écoulement des eaux souterraines.

2.1.1. Distinction nappe-aquifère

. Les eaux souterraines forment des nappes qui sont emmagasinées dans des roches poreuses fissurées que l'on appelle aquifères.

Le mot nappe implique une continuité.

. La facilité plus ou moins grande qu'accorde un milieu à se laisser traverser par un fluide est la perméabilité.

On distingue deux types de perméabilité : celle des roches meubles (continue et homogène) et celle des roches fissurées (discontinue).

La craie présente une perméabilité par fissures, mais celles-ci sont assez petites et assez denses pour que l'on puisse parler de perméabilité homogène et appliquer ses lois.

. On différencie la porosité totale mesurée par le rapport des vides au volume total de la roche de la porosité efficace mesurée ~~par~~ le rapport du volume d'eau utilisable contenu dans les pores ou fissures au volume total de la roche.

Comme nous étudions la circulation des eaux, cette porosité efficace nous intéresse seule, les argiles et par assimilation les dièves (60 % argiles) ont une grande porosité totale (jusqu'à 60 % du volume) mais l'eau comprise dans ces pores est fixée aux éléments de roches par des forces assez grandes pour l'empêcher de s'écouler. Les argiles et les dièves n'ont donc pratiquement pas de porosité efficace et sont imperméables.

2.1.2. Nappe libre - nappe captive

Dans la nappe libre l'eau souterraine n'occupe qu'une partie de l'aquifère comprise entre un substratum imperméable et une surface qui varie librement.

La surface libre est partout en équilibre avec la pression atmosphérique.

Dans la nappe captive l'eau souterraine occupe tout l'espace compris entre un mur et un toit imperméables. Sa côte maximale est donc toujours inférieure au potentiel.

. La surface supérieure de la nappe où est réalisé l'équilibre avec la pression atmosphérique s'appelle la surface piézométrique. Elle est représentée par des courbes de niveau qui sont en fait des courbes isopotentielles. L'énergie potentielle de l'eau en équilibre avec la pression atmosphérique est en effet représentée par sa côte d'altitude.

. Le modelé de cette surface, dépend d'une part de facteurs extérieurs et d'autre part de facteurs intrinsèques à l'aquifère.

2.1.3. Définition des caractéristiques de l'aquifère

. Loi de Darcy

H. Darcy en 1856, a étudié expérimentalement l'écoulement de l'eau à travers une colonne de sable. Pour cela il a utilisé des cylindres verticaux de 2,50 m de haut et 0,35 m de diamètre intérieur, remplis de sable sur une épaisseur e et sous une charge d'eau H .

L'écoulement est régi par la formule :

$$Q = K \cdot s_x \cdot \frac{H}{e}$$

Q = débit écoulé en m^3/s

H = charge hydraulique en m

s_x = surface de la section en m^2

K = coefficient de proportionnalité intrinsèque au terrain (perméabilité de Darcy) en m/s

e = épaisseur de la colonne de sable en m

$\frac{H}{e}$ = perte de charge par unité de longueur encore appelée gradient hydraulique $i = \frac{dh}{de}$

d'où $Q = K \cdot s_x \cdot \text{grad } H$ et $K = \frac{Q}{s_x \cdot i}$

Lorsque la perméabilité est isotrope l'écoulement se fait dans le sens du gradient hydraulique et lui est directement proportionnel. Les lignes de courant sont alors les lignes orthogonales aux courbes isopièzes (les lignes de potentiel). Dans le cas général la perméabilité est anisotrope, on parle alors du "tenseur K " et les lignes de courant ne sont plus perpendiculaires aux isopotentielles.

$$\vec{V} = -|K| \vec{\text{grad}} H$$

. La transmissivité (symbole T)

La loi de Darcy fait intervenir la section d'écoulement s_x qu'on peut remplacer par le produit $l.b$ (l = longueur de front, b = épaisseur d'aquifère).

d'où $Q = K.b.l.grad H = T.l.grad H$

Le produit $K.b$ est appelé transmissivité.

Elle a les dimensions d'une vitesse multipliée par une longueur (L^2T^{-1}) et s'exprime en m^2/s .

Remarque : La loi de Darcy n'est valable que pour des écoulements lents où les "filets" d'eau glissent les uns sur les autres sans provoquer de tourbillons.

. Le coefficient d'emmagasinement (symbole S)

L'aquifère joue également le rôle de réservoir d'eau par emmagasinement et restitution de fluide. L'eau peut s'accumuler, en nappe libre, dans les pores de la roche. L'emmagasinement est alors égal à la porosité efficace.

En nappe captive l'emmagasinement est assuré par la compression du complexe eau - matrice rocheuse. Il dépend alors évidemment de la porosité totale et de l'épaisseur de l'aquifère.

Le coefficient d'emmagasinement (symbole S) est une grandeur sans dimension ayant pour ordre de grandeur quelques pour cent en nappe libre et quelques dix millièmes en nappe captive.

Ces valeurs (T, K, S) sont obtenues par l'étude des courbes de variation de niveau d'eau en fonction du temps lors de pompages d'essai, compte tenu de certaines hypothèses sur la nature des écoulements et les limites.

Une bibliographie méthodique sur l'interprétation des données des pompages d'essai est citée dans le rapport B. R. G. M. n° 69 SGL 293 HYD "Interprétation des données des pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères. Aide-mémoire" par J. FORKASIEWICZ.

Dans la bibliographie citée à la fin de ce texte, les ouvrages ayant trait à l'hydrogéologie sont précédés d'une astérisque.

2.2. DOCUMENTS B. R. G. M.

Dans ce qui suit on entend par données brutes, des documents n'ayant pas donné lieu à une interprétation ou à une synthèse, mais pouvant fournir un ordre de grandeur de celle recherchée et par données élaborées les synthèses et interprétations disponibles au B. R. G. M.

2.2.1. Données élaborées

. Les cartes piézométriques sont dressées par interpolation linéaire à partir de niveaux piézométriques mesurés dans les puits et forages. Deux cartes hydrogéologiques à l'échelle du 1/50 000 ont été publiées par le B. R. G. M. (Douai et Valenciennes). D'autre part, une "carte de la surface piézométrique de la nappe de la craie dans la région du Nord" à l'échelle du 1/200 000 a été publiée en octobre 1965 (23). Il a paru intéressant d'en faire une mise à jour, possible à la suite d'études particulières. Ces zones sont entourées d'un cadre pointillé à l'intérieur duquel est inscrite l'année des relevés. Ils ont été réalisés en période d'étiage de la nappe (Pl. XXIX)

Dans la région de Fruges, il a été possible de distinguer les deux nappes du Turonien et du Cénomaniens (la première étant libre et la seconde essentiellement captive).

Elles présentent des niveaux et des sens d'écoulement parfois bien différents (52 e).

Les cartes piézométriques hydrogéologiques ne sont pas une fin en soi, si elles sont suffisamment précises, elles peuvent servir à établir des cartes de transmissivités relatives (47 a).

. Les pompages d'essai interprétés en régime transitoire étant suffisamment nombreux dans la région du Nord (52 f), un inventaire de ces derniers a été réalisé et les principales données ont été consignées dans une fiche type. Une centaine de fiches ont ainsi été établies (exemples en annexe V).

2.2.2. Données brutes

Ce sont des données archivées par le B. R. G. M. au titre de l'inventaire des ressources hydrauliques. On y trouve parfois la valeur du rabattement observé dans un forage pour un débit donné. Le rapport de ces deux grandeurs peut fournir comme on le verra au paragraphe 232 b un ordre de grandeur de la transmissivité.

D'autre part, les mesures prises au cours d'une quarantaine de pompages d'essai réalisés en régime transitoire se sont révélés interprétables. Les résultats ont été joints aux données du paragraphe 221.

2.3. INFLUENCE DE L'AQUIFERE SUR L'ECOULEMENT DES EAUX SOUTERRAINES

L'aquifère intervient par la perméabilité (K) mais aussi par l'épaisseur mouillée (b).

2.3.1. Carte d'épaisseur de craie mouillée (Pl. XXX)

En nappe libre c'est l'épaisseur (h) comprise entre la surface libre de la nappe et son substratum. Dans le cas de la nappe du Sénonien-Turonien supérieur, le substratum de cette nappe est souvent constitué par les marnes bleues du Turonien moyen qui ont généralement une perméabilité faible (de l'ordre de 10^{-5} m/s). Lorsque ces marnes viennent à l'affleurement, l'épaisseur de craie mouillée est alors nulle (mais il existe un niveau piézométrique dans les marnes bleues).

En nappe captive il s'agit de l'épaisseur (b) comprise entre le toit de la craie qui est alors surmonté d'une couche imperméable (le plus souvent l'argile de Louvil) et son substratum. Cette épaisseur, ne prend donc plus en compte la surface piézométrique qui est une surface fictive dans le cas d'une nappe captive.

La carte de l'épaisseur de craie mouillée a été dessinée au 1/50 000 puis réduite au 1/400 000.

2.3.2. Transmissivités - Perméabilités

Comme nous l'avons vu au paragraphe 22. on possède deux types d'informations sur la transmissivité.

2.3.2.a. Transmissivité obtenue d'après les pompages d'essai interprétés en régime transitoire

On dit que le régime est transitoire lorsqu'il évolue dans le temps à l'échelle de l'observation. Le pompage à débit constant dans un puits entraîne la formation d'un cône de dépression dans la nappe autour du puits dont la forme et l'étendue varient dans le temps.

Le rabattement (D) augmente en fonction du temps en tout point du cône de dépression. Dans le cas d'une remontée (après arrêt du pompage) le régime est également transitoire, le rabattement diminue avec le temps. De nombreuses méthodes d'interprétation ont été créées pour calculer T et S. Les conditions hydrogéologiques sont souvent complexes. Des hypothèses simplificatrices sont nécessaires ; en fonction de celles-ci on choisit le schéma-type qui semble s'adapter le mieux au cas considéré. On peut distinguer un schéma simple et des schémas plus complexes (schéma de Boulton, Hantush, Dagan, etc ...).

Nous décrirons en détail le schéma de base et donnerons un tableau présentant des schémas usuels plus complexes (fig. n° 21).

. Régime transitoire en nappe captive

. Théorie

L'équation de base de l'hydraulique souterraine est l'équation de diffusité :

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{S \partial H}{T \partial t}$$

H est le potentiel hydraulique dans l'espace x, y, z et t le temps.

C'est une équation différentielle du deuxième ordre, à coefficients constants. Dans le cas particulier d'un écoulement vers un puits en pompage, le mouvement est plan et centripète. On transcrit donc l'équation en coordonnées cylindriques. La solution utilise une fonction exponentielle intégrale de la forme :

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx$$

Cette fonction est connue et tabulée (les valeurs de W(u) ont été calculées pour différentes valeurs de u).

Muskat et C. V. Theis ont développé cette théorie de l'écoulement en milieux poreux vers 1937. Ils ont obtenu la loi suivante concernant le rabattement D du niveau d'eau dans le cas d'un pompage à débit constant :

$$D = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Q = débit en m³/s

S = emmagasinement

T = transmissivité en m²/s

t = temps en secondes

D = rabattement en m

r = distance au puits en m

(La formule anglo-saxonne utilise d'autres unités, les coefficients sont donc différents).

. Interprétation de pompages d'essai par
la méthode de Theis

La fonction $W(u)$ étant connue, la méthode d'interprétation consiste à comparer la courbe $D = f(t)$ à la courbe $W(1/u)$ (en coordonnées log-log) et en déduire T et S .

N'importe quel point des deux plans amenés en concordance donne le même résultat.

L'exactitude de la superposition dépend de caractères subjectifs et de l'estimation personnelle. C'est une source d'imprécision.

$$T = 0,08 \frac{Y_0 Q}{D_0}$$

$$S = \frac{4Tt_0}{r^2 x_0}$$

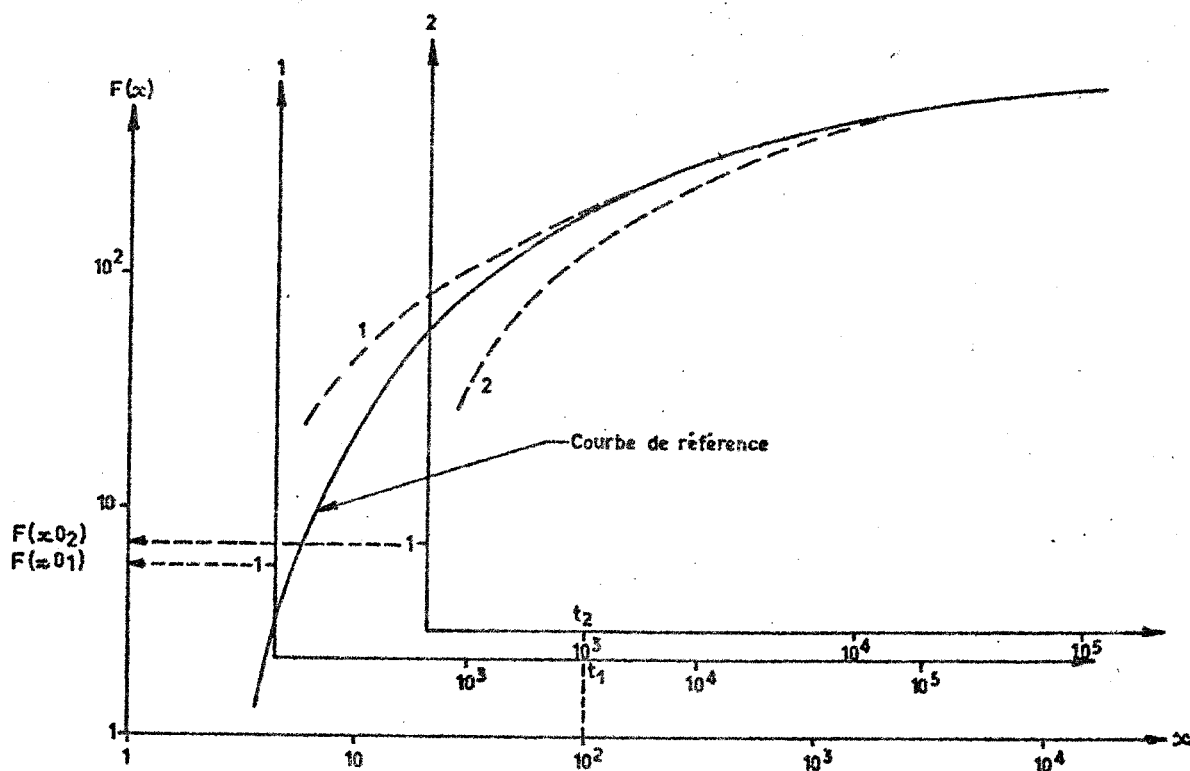


Fig: 18 _ Aspect subjectif de la superposition à la courbe de THEIS _

• Interprétation par la méthode de Jacob

Cette méthode graphique fait appel au développement en série de la fonction $W(u)$:

$$W(u) = A + \text{Log} \frac{1}{u} - \sum_1^{\infty} \frac{(-u)^n}{n \cdot n!}$$

Le terme \sum diminue très rapidement lorsque le temps de pompage croît, et devient infiniment petit d'ordre inférieur à $\text{Log} \frac{1}{u}$.

Lorsque $u \ll 0,1$, $W(u)$ est assimilable à $A + \text{Log} \frac{1}{u}$ et dans ce cas :

$$D = \frac{Q}{4\pi T} \left(A + \text{Log} \frac{1}{u} \right)$$

En chiffrant la valeur de A pour les unités MKS et en passant aux logarithmes décimaux :

$$D = \frac{0,183 Q}{T} \cdot \log \frac{2,25 Tt}{r^2 S}$$

Sur papier semi-logarithmique, $D = A \log Bt$ représente une droite de pente $A = \frac{0,183 Q}{T}$ et d'abscisse à l'origine $t_0 = \frac{1}{B}$.

C'est la représentation dans le temps de la variation du niveau piézométrique au point donné.

$$T = \frac{0,183 Q}{A} \qquad A = \frac{dD}{d \log t} \qquad S = \frac{2,25 Tt_0}{r^2}$$

Au début du pompage, les éléments du développement en série de $W(u)$ ne sont pas négligeables et la courbe du rabattement se trouve au-dessus de la droite de Jacob.

Lorsque la descente est perturbée par des variations de débit, on peut utiliser la représentation $D/Q = f(\log t)$ et on est ramené au cas :

$$\frac{D}{Q} = A' (\log Bt) \quad \text{donc} \quad T = \frac{0,183}{A'}$$

Des variations de transmissivité se traduisent par des variations de pente et d'abscisse à l'origine.

D'autre part, à un instant donné, le rabattement varie en fonction du logarithme de la distance au puits.

$$D = A \log \frac{C}{r^2} = A(\log C - 2 \log r) \quad C = \frac{2,25 Tt}{S}$$

Le graphique $D = f(\log r)$ représente donc par une droite le profil du cône de dépression en un instant donné.

. Remontée de pression après pompage

Pour l'étude de la remontée de pression après l'arrêt du pompage, on considère que "tout se passe comme si" au pompage initial se poursuivant, on superposait une influence inverse (injection au même débit).

Dans ce cas l'équation de remontée s'écrit :

$$D = \frac{Q}{0,08 T} (W(u) - W(u'))$$

Cette équation est en pratique inextricable (il faudrait tenter la superposition sur deux familles de courbes en T et T/S).

L'équation de Jacob s'écrit dans cette hypothèse :

$$D = 0,183 \frac{Q}{T} \cdot \log \frac{t}{t'} = 0,183 \frac{Q}{T} \cdot \log \left(1 + \frac{t}{t'}\right)$$

t = temps écoulé depuis le début du pompage

t' = temps écoulé depuis l'arrêt du pompage

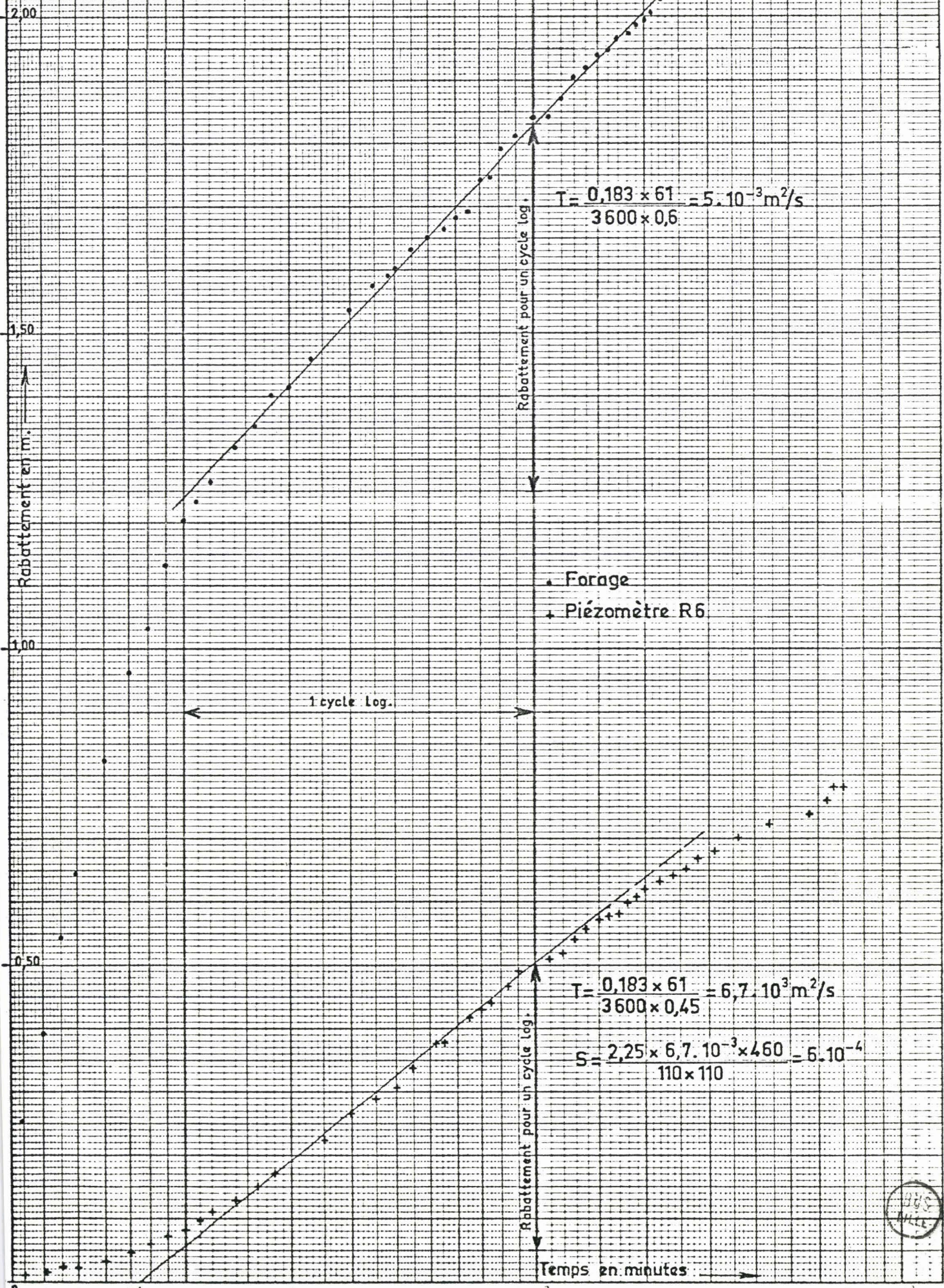
t_p = durée du pompage

Donc il suffit de reporter les rabattements résiduels en fonction de $\log \left(1 + \frac{t}{t'}\right)$.

Après un certain temps fonction de l'importance des déformations dues au puits de pompage, les rabattements observés se placent sur une droite de pente A et $T = 0,183 \frac{Q}{A}$.

— COURBE DE DESCENTE INTERPRÉTÉE SELON
L'APPROXIMATION DE JACOB —
(Calcul des paramètres T et S)

Fig: 19



BGS
MILL.

Les perturbations dues aux variations de débit n'existent évidemment pas en remontée.

La valeur de T obtenue par l'interprétation d'une remontée est donc de meilleure qualité que celle de la descente au forage.

Un exemple d'interprétation est donné par les figures n° 19 et 20.

Pour les nappes libres, il est couramment admis d'appliquer ces équations, valables en principe uniquement pour les nappes captives, dans la mesure où les variations de niveaux mises en jeu sont faibles par rapport à l'épaisseur h de la nappe (inférieures à h/10).

Pour $0,1 < D/h < 0,3$ on peut utiliser les "rabattements corrigés".

$$D_c = D_m - \frac{D_m^2}{2h}$$

D_c = rabattement corrigé

D_m = rabattement mesuré

Toutefois, aussi bien en nappe libre qu'en nappe captive, la mise en défaut de l'une des hypothèses d'application du schéma se traduira par des modifications de la courbe observée.

Ces modifications peuvent être dues :

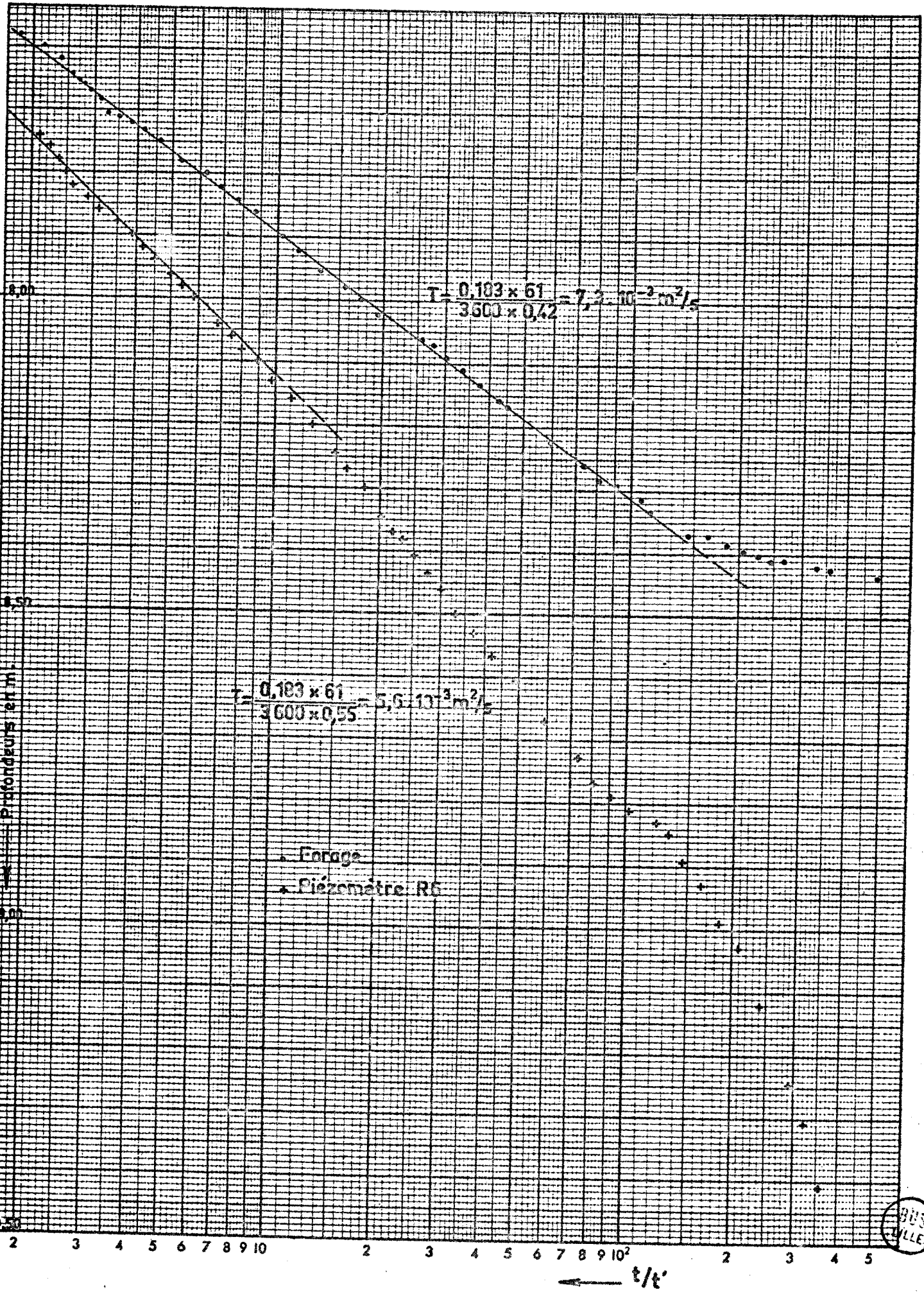
- à des causes liées au puits de pompage ou inhérentes à l'aquifère.

Les anomalies qui se manifestent dès le début du pompage ont pour causes les caractéristiques du puits de pompage ; ce sont :

. L'effet de capacité : le puits de pompage a un certain volume, une partie du débit prélevé provient donc de la vidange du puits. L'effet inverse se produit lors de la remontée ("effet de post-production"). On a donc une erreur systématique qui limite la validité de ces formules. Les formules classiques donnent le rabattement du puits à 2 % près dès que le temps de pompage est supérieur à la valeur :

- COURBE DE REMONTÉE INTERPRÉTÉE SELON L'APPROXIMATION DE JACOB -

Fig: 20



$$t_c = \frac{25 r_p^2}{T} \quad \text{pour le forage (} r_p \text{ étant le rayon)}$$

et

$$t_c = \frac{12,5 r_p^2}{T} \cdot \frac{D + D'}{D'} \quad \text{pour les piézomètres}$$

D étant le rabattement observé au puits

D' le rabattement observé au piézomètre au même instant.

Plus le rayon du puits est grand et la transmissivité faible, plus l'effet de capacité est fort et son influence durable. En pratique il convient donc de prolonger la durée de l'essai de pompage pendant un temps au moins égal à $10 t_c$.

• Les pertes de charge (ou "effet de puits", "effet pariétal", "skin effect" des auteurs de langue anglaise) la réalisation technique du forage et du dispositif de captage perturbe l'écoulement au voisinage de l'ouvrage. Il y a apparition en période de pompage d'une perte de charge dynamique qui s'ajoute au rabattement théorique.

$$D = \frac{Q}{4 \pi T} W(u) + H_p$$

↓ Rabattement théorique ↓ Perte de charge due au captage

Si l'on pompe à débit constant, la courbe des rabattements observés dans le puits, est simplement translatée d'une quantité égale à H_p , contrairement à l'effet de capacité du puits qui est un phénomène variable dans le temps et qui provoque des déformations des courbes aussi bien dans le puits de pompage que dans les piézomètres.

Il est possible de déterminer ces pertes de charge, H_p se décompose le plus souvent comme suit :

$$H_p = AQ + CQ^2$$

AQ = Pertes de charge linéaires, ex : colmatage

CQ^2 = Pertes de charge quadratiques : mises en vitesses anormales

donc
$$D = \underbrace{\frac{Q}{4 \pi T} W(u)}_{BQ} + AQ + CQ^2$$

et en régime stabilisé : $D = BQ + CQ^2$

Le coefficient B intègre les effets de l'écoulement selon Darcy dans la couche non perturbée et les effets de pertes de charge linéaires (colmatage).

En pratique $\frac{D}{Q}$ augmente avec Q. Possédant plusieurs valeurs de D en fonction de Q, relevées sur le puits après des temps de pompage suffisamment longs et égaux on peut construire le graphique de $\frac{D}{Q}$ en fonction de Q et obtenir les coefficients B et C.

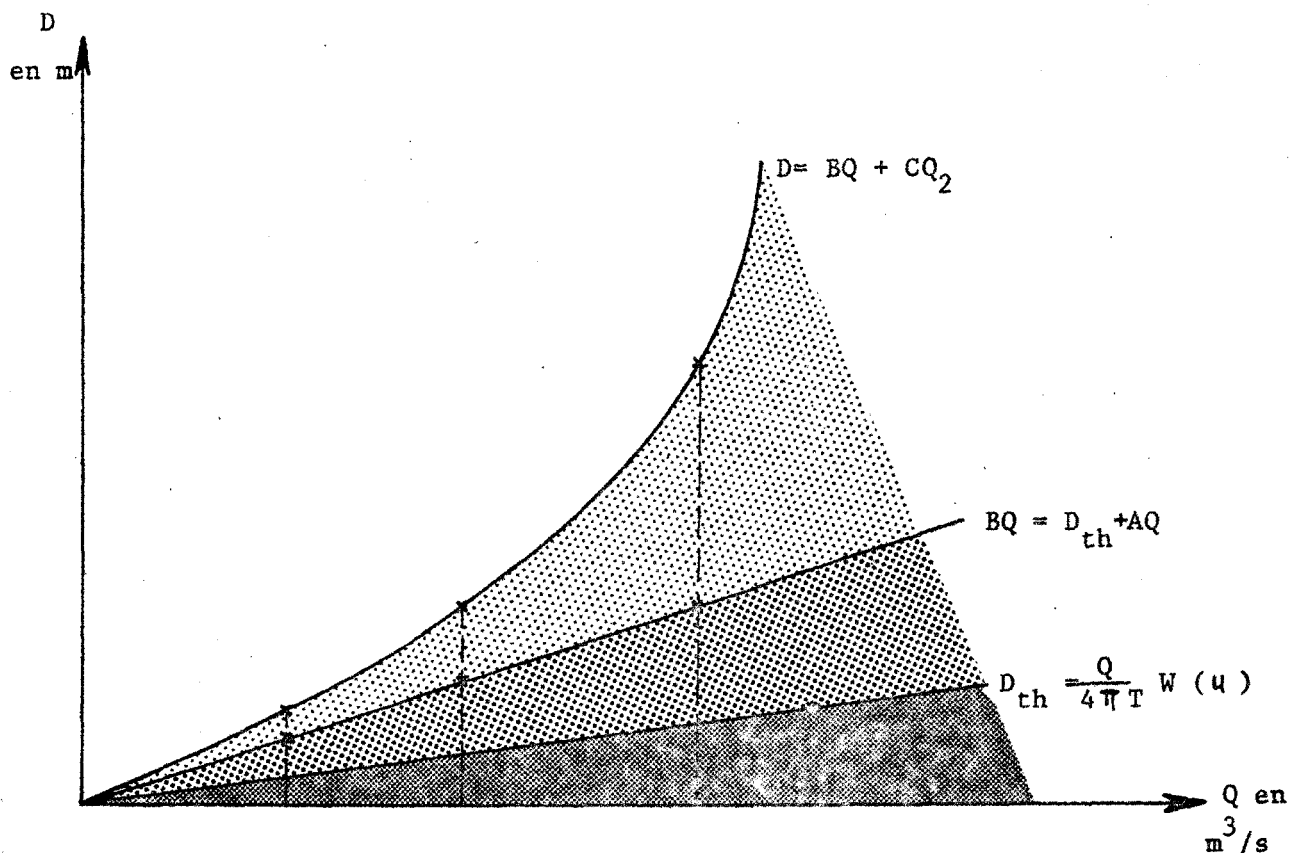
Une autre méthode de détermination des pertes de charge peut être appliquée lorsque le forage est équipé de plusieurs piézomètres (au moins 2). En effet, les rabattements aux piézomètres pour un débit Q, portés en fonction du rayon sur graphique semi-log doivent fournir des points alignés. L'extrapolation de la droite jusqu'à la valeur $r = r_p$ donne le rabattement théorique au puits en l'absence de pertes de charge soit D théorique. La différence (D observé - D théorique) donne une évaluation de la perte de charge, $AQ + CQ^2$ due au puits pour le débit Q correspondant.




Si deux essais de débit sont réalisés sur un forage avec au moins deux piézomètres :

- un de longue durée : permettant de déterminer le rabattement théorique dû au pompage à un débit Q, D_{th} étant proportionnel à Q, d'autre part pour $Q = 0$, $D = 0$, donc on détermine une droite passant par l'origine.
- un autre par paliers à des débits différents (au moins 3) permettant de déterminer B et C.

La combinaison des informations des deux pompages permet d'obtenir :

- le rabattement théorique dû au pompage ;
- celui dû aux pertes de charges linéaires (ex : le colmatage) ($BQ - D_{th}$) ;
- celui dû aux pertes de charges quadratiques (mises en vitesses anormales aux abords du forage).



-  Pertes de charges quadratiques (dus aux mises en vitesses anormales à l'abord du forage)
-  Pertes de charges linéaires (ex : colmatage)
-  Rabattement théorique dû au pompage

• La pénétration incomplète du puits dans l'aquifère

Dans un puits à pénétration complète, l'écoulement se produit essentiellement dans un plan (écoulement bidimensionnel).

Dans un puits à pénétration incomplète, l'écoulement est à trois dimensions. Il a été établi (MUSKAT et HANTUSH) que

LISTE ET SIGNIFICATION DES SYMBOLES UTILISES DANS LE TABLEAU

CI-APRES

<u>Unités M.K.S.</u>	<u>:</u>	<u>Symboles</u>	<u>:</u>	<u>Signification</u>
	:		:	
m^2/s	:	Q	:	Débit de pompage
s	:	t	:	Temps écoulé depuis le début du
	:		:	pompage
s	:	t'	:	Temps écoulé depuis l'arrêt du
	:		:	pompage
m	:	D	:	Rabattement
m	:	r	:	Distance au centre du puits de pom-
	:		:	page
m/s	:	K	:	Coefficient de perméabilité horizon-
	:		:	tale de la couche aquifère
m/s	:	K'	:	Coefficient de perméabilité verti-
	:		:	cale de l'éponte
m	:	b	:	Epaisseur de la couche aquifère semi-
	:		:	perméable
m	:	b'	:	Epaisseur de l'éponte semi-perméable
m^2/s	:	T = Kb	:	Transmissivité de la couche aquifère
	:	S	:	Coefficient d'emmagasinement de la
	:		:	couche aquifère
	:	S'	:	Coefficient d'emmagasinement de
	:		:	l'éponte semi-perméable
m	:	R	:	Rayon d'action du puits
	:	W(u)	:	Intégrale tabulée dite "Well func-
	:		:	tion" pour les aquifères non commu-
	:		:	niquant avec $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$
	:	$F(u') = W(\frac{1}{u})$:	$u' = \frac{4Tt}{r^2 S}$
	:	$F(u', \frac{r}{b})$:	Fonction de puits pour le système
	:		:	drainant
	:	$F(u', \frac{r}{d})$:	Fonction de puits pour le système
	:		:	semi-infini
	:	$K_0(x)$:	Fonction de Bessel modifiée de se-
	:		:	cond degré et d'ordre zéro
m	:	$B = \sqrt{\frac{Tb'}{K'}}$:	Facteur de drainance
s^{-1}	:	$\frac{K'}{b'}$:	Faramètre de drainance
	:		:	

<u>Unités M.K.S.</u>	<u>Symboles</u>	<u>Signification</u>
	:	:
	: $D_i = \frac{1}{2} D_{\max}$: Point d'inflexion de la courbe
	:	: $D = f(\log t)$ (on extrapole D maximum
	:	: d'après la courbe)
	: m_i	: Pente de la courbe au point déterminé
	:	: par D_i
	: t_i	: Temps correspondant à D_i
	: $\eta = \frac{S + S'}{S}$: Paramètre utilisé par Boulton
s/m ²	: α	: Coefficient exprimant la vitesse
	:	: d'épuisement de la réserve S'
m ² /s	: $\frac{1}{\alpha} = \frac{4t}{2}$: Indice de retard
	: $B' = \frac{\left(\frac{r}{B}\right) u'}{\sqrt{\frac{T}{\alpha S'}}}$:
m ² /s	: $u'_1 = \frac{4Tt}{r^2 S'}$: Phase postérieure au palier
	: $= \frac{u'}{\eta - 1}$:
	: $= \frac{4\alpha t}{2}$:
	: $\left(\frac{r}{B}\right)$:
s	: t_{wt}	: Temps au bout duquel l'effet du débit
	:	: retardé cesse d'influencer les rabatte-
	:	: ments
	: i	: Pente de la droite (en semi-log)
m	: d	: Distance à la limite



Fig:21

		PHÉNOMÈNE	SCHÉMA DE	SCHÉMA HYDROGÉOLOGIQUE	DESCRIPTION-PARAMÈTRES	NL	N.C	
K. ISOTROPE	NAPPE ALIMENTÉE	DRAINANCE	HANTUSH		Nappe libre réalimentée Eponge semi-perméable $K'-S'=0$ Nappe captive $K-S$ Substratum imperméable		X	
			BOULTON		Eponge imperméable Eponge semi-perméable $K'-S'≠0$ Nappe captive $K-S$ Substratum imperméable		X	
		EGOUTTEMENT	BOULTON		Retard à l'égouttement Nappe libre Substratum imperméable		X	
	NAPPE LIMITÉE	LIMITE A POTENTIEL CONSTANT			Alimentation par une rivière (Potential constant) Nappe libre Substratum imperméable		X	
		AUGMENTATION DE S	BOULTON		Pompage en nappe captive, dont le cone atteint la nappe libre	X	X	
		AUGMENTATION DE T			Augmentation de l'épaisseur	X	X	
		DIMINUTION DE T			Diminution de l'épaisseur	X	X	
	BARRIÈRE IMPERMÉABLE			Nappe libre ou nappe captive Barrière imperméable	X	X		
K. ANISOTROPE	ANISOTROPIE	DAGAN		Nappe libre ou nappe captive K_v : perméabilité verticale K_h : perméabilité horizontale	X	X		

K. ISOTROPE

NAPPE ALIMENTÉE

NAPPE LIMITÉE

BUS LILLE

Méthodes d'interprétation	Formules de base	Mode d'interprétation	Transmissivité	Emmagasinement	Autres paramètres	Remarques
Bilog de WALTON	$D = \frac{Q}{4\pi T} \cdot F(u', \frac{r}{B})$	Superposition en log-log	$T = \frac{0,08Q}{D} \cdot F(u', \frac{r}{B})$	$S = \frac{4T \cdot t}{r^2 \cdot u'}$	$B = \frac{r}{r/B}$ $\frac{K'}{b'} = \frac{I}{B^2}$	Toutes les courbes se terminent par un palier horizontal.
Semi-log de HANTUSH	$\frac{2,3 Di}{ml} = e^{r/B} \cdot K_0 r^{1/2}$	Analyse de la courbe semi-log - Tables -	$T = \frac{0,08Q}{D} \cdot e^{-r/B}$	$S = \frac{2T \cdot ti}{B \cdot r}$	$B = \frac{r}{r/B}$ $\frac{K'}{b'} = \frac{I}{B^2}$	
Bilog de BOULTON	$D = \frac{Q}{4\pi T} \cdot F(u', \frac{r}{B})$ $D = \frac{Q}{4\pi T} \cdot F(u', \frac{r}{B})$	Superposition en log-log	$T = \frac{0,08Q}{D} \cdot F(u', \frac{r}{B})$	$S = \frac{4T \cdot t}{r^2 \cdot u'}$ $S' = \frac{4T \cdot t}{r^2 \cdot u'^2}$	$\frac{1}{\alpha} = \frac{4T}{(\frac{r}{B})^2 \cdot u'}$	T identique avant et après le palier horizontal.
Semi-log de BERKALOFF	$D = \frac{0,183Q}{T} \cdot \log \frac{t_2}{t_1}$	Analyse de la courbe semi-log	$T = \frac{0,183Q}{I}$	$S = \frac{2,25 T \cdot t_0}{r^2}$ $S + S' = \frac{2,25 T \cdot t_0}{r^2}$	$\alpha = \frac{0,561}{t_0}$	
Bilog de BOULTON	$D = \frac{Q}{4\pi T} \cdot F(u', \frac{r}{B})$ $D = \frac{Q}{4\pi T} \cdot F(u', \frac{r}{B})$	Superposition en log-log	$T = \frac{0,08Q}{D} \cdot F(u', \frac{r}{B})$	$S = \frac{4T \cdot t}{r^2 \cdot u'}$ $S' = \frac{4T \cdot t}{r^2 \cdot u'^2}$	$B' = \sqrt{\frac{T}{\alpha \cdot S}}$ $\frac{1}{\alpha} = \frac{S' \cdot B^2}{T}$ $Twt = X \cdot \frac{1}{d}$	Palier horizontal.
Bilog	$D = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \theta(u', \frac{r}{d})$	Superposition en log-log	$T = \frac{0,08Q}{D} \cdot \theta(u', \frac{r}{d})$	$S = \frac{4T}{r^2} \cdot \frac{t}{u'}$		
Semi-log	$D = \frac{0,366Q}{T} \cdot \log \frac{2d}{r}$	Analyse de la courbe semi-log	$T = \frac{0,366Q}{D}$		$d = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{ti}{t_0}}$	Régime permanent après un temps assez long.
Semi-log	$D = \frac{0,183Q}{T} \cdot \log \frac{2,25T \cdot t}{r^2 \cdot S'}$	Analyse de la courbe semi-log	$T = \frac{0,183Q}{I}$	$S' = \frac{4T \cdot t}{r^2}$		Peut se confondre avec les 2 précédents schémas de Boulton.
Semi-log	$D = \frac{0,183Q}{T} \cdot \log \frac{2,25T \cdot t}{r^2 \cdot S}$	Analyse de la courbe semi-log	$T = \frac{0,183Q}{I}$	$S = \frac{4T \cdot t \cdot \alpha}{r^2}$		$0 < i_2 < i_1$
Semi-log	$D = \frac{0,183Q}{T} \cdot \log \frac{2,25T \cdot t}{r^2 \cdot S}$	Analyse de la courbe semi-log	$T = \frac{0,183Q}{I}$	$S = \frac{4T \cdot t \cdot \alpha}{r^2}$		$i_1 < i_2 < 2i_1$
Bilog	$D = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \theta(u', \frac{r}{d})$	Superposition en log-log	$T = \frac{0,08Q}{D} \cdot \theta(u', \frac{r}{d})$	$S = \frac{4T}{r^2} \cdot \frac{t}{u'}$		
Semi-log	$D = \frac{0,183Q}{T} \cdot 2 \log \frac{2,25T \cdot t}{r \cdot 2d \cdot S}$	Analyse de la courbe semi-log	$T = \frac{0,366Q}{D}$		$d = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{ti}{t_0}}$	$i_2 = 2i_1$

Superposition en log-log sur aboques

Voir la note de S. RAMON: A propos de la méthode de DAGAN. (52.a)



l'écoulement à trois dimensions se transforme en un type d'écoulement radial à deux dimensions se distinguant à peine d'un système purement radial à une distance égale ou supérieure à $1,5 b \sqrt{K_h/K_v}$.

Si le piézomètre est crépiné sur toute l'épaisseur de la formation aquifère, l'effet d'une pénétration partielle du puits est négligeable quel que soit son éloignement.

Dans le cas contraire, le piézomètre distant de $r < 1,5 b \sqrt{K_h/K_v}$ et pénétrant partiellement la nappe, la variation dépression-temps sera influencée par l'effet de la pénétration partielle du puits et les formules habituelles de Theis et Jacob ne seront pas applicables, tout au moins au début du pompage.

. Critères de choix de la méthode d'interprétation

L'interprétation connue par la construction des courbes de rabattement en fonction du log du temps (les déformations des courbes ressortent plus nettement en semi-log), l'allure des courbes obtenues nous guident dans le choix de la méthode d'interprétation (voir fig. 21). Le schéma de la fig. 22 représente un ensemble de courbes théoriques correspondant chacune à un des cas définis plus haut et traitable par une méthode particulière que l'on a décrit.

1. Aquifère se comportant pendant la durée de pompage comme un milieu infini.

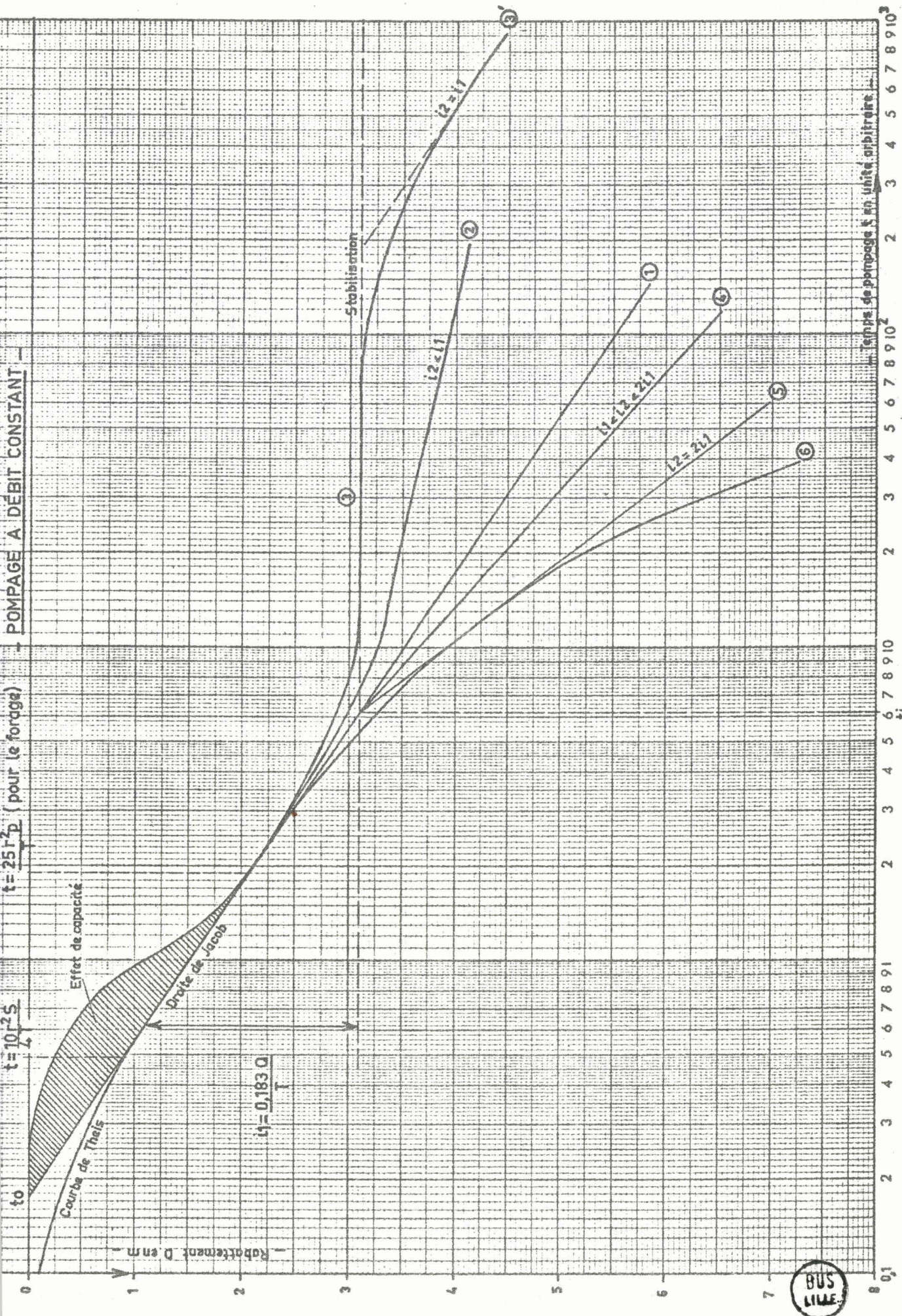
2. Augmentation de T à une certaine distance.

3. Trois solutions sont à envisager :

- alimentation par une limite à niveau d'eau constant ; théoriquement la date d'apparition du palier croît comme le carré de la distance du piézomètre à la limite.

- communication entre deux aquifères (schéma de HANTUSH).

- communication entre deux aquifères suivant le schéma de BOULTON (dans certains cas le palier de Boulton peut dépasser la durée de l'essai faisant croire à une stabilisation de niveau).



— COURBES THÉORIQUES $D=f(\log t)$ —

Fig. 22

- théoriquement dans ces deux derniers cas le palier horizontal se produit au même instant dans tous les piézomètres.

3'. Si le palier n'est pas net, deux solutions seront envisagées :

- augmentation de S à une certaine distance ;
- communication entre deux aquifères suivant le schéma de Boulton.

4. Diminution de T à une certaine distance.

5. Limite imperméable à une certaine distance.

6. Plusieurs limites imperméables (le report des rabattements en fonction du temps donnerait une droite) ou diminution de la transmissivité avec le rabattement (nappe libre).

De ces valeurs de T obtenues par essai de débit, on déduit K moyen pour un mètre d'aquifère mais en réalité K varie selon la profondeur, avec la fissuration, avec le faciès, K n'est pas isotrope.

2.3.2.b. Possibilité d'estimation rapide de la transmissivité

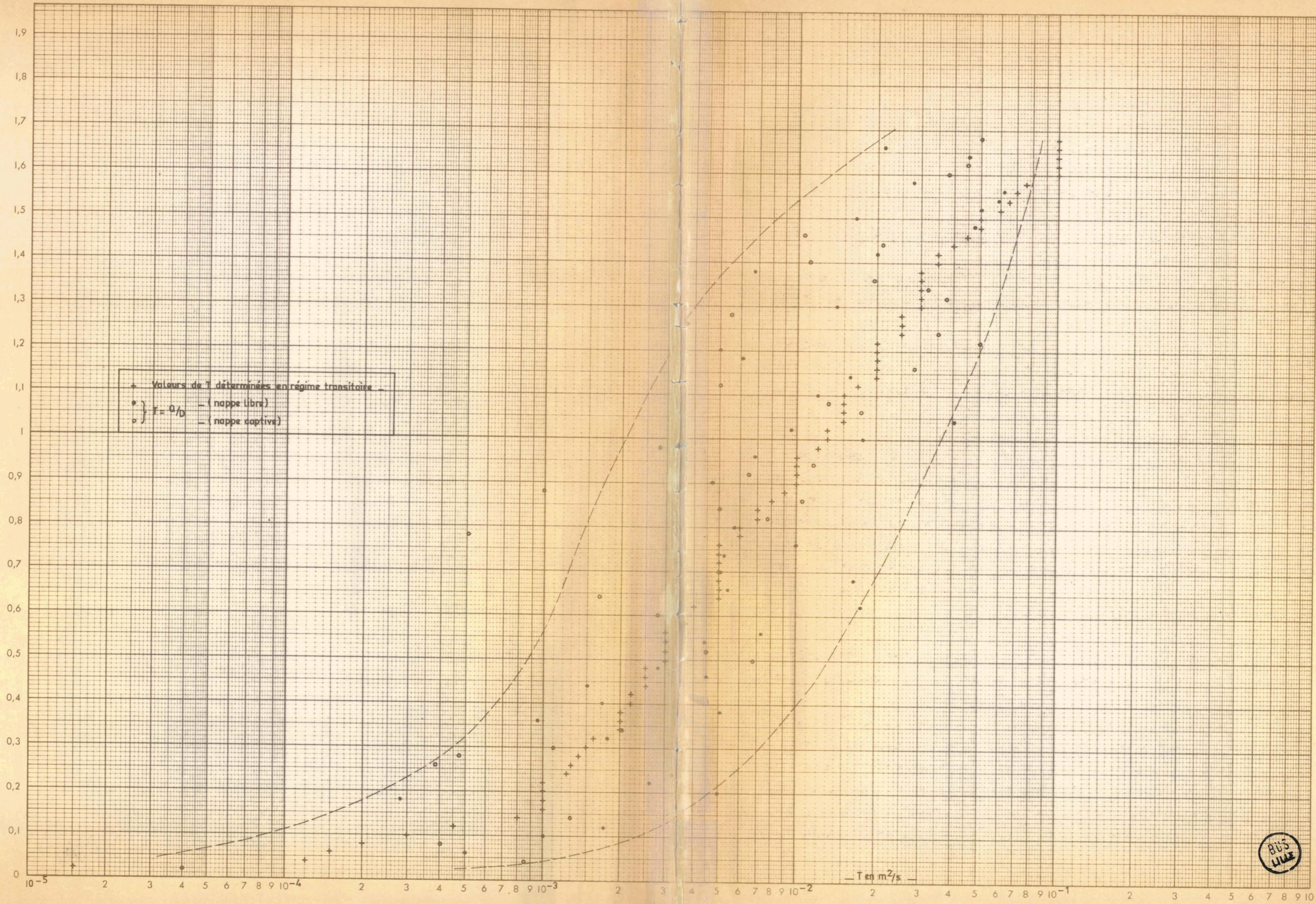
La formule de Dupuits applicable au régime permanent permet de calculer le rabattement théorique au puits (donc en l'absence de toutes pertes de charge) :

$$Q = 2,73 \frac{TD}{\log R/rp}$$

Cette formule théoriquement exacte pour les nappes captives est acceptée en nappe libre pour des rabattements faibles (en regard de l'épaisseur de la nappe).

Le rayon d'action R est généralement compris entre 100 et 300 m en nappe libre.

Fig: 23



Le rayon de l'ouvrage r_p varie de 0,1 à 1 m.

On en déduit pour la nappe libre :

$$2 < \log R/r_p < 3,5$$

et

$$0,7 < \frac{T D}{Q} < 1,3 \quad 0,7 \frac{Q}{D} < T < 1,3 \frac{Q}{D}$$

T est donc de l'ordre de grandeur de Q/D en nappe libre.

. Appréciation de la validité de cette formule

Les pompages d'essai interprétés en régime transitoire fournissent en principe une valeur exacte de la transmissivité (T_{ex}).

Pour ces pompages on a relevé les valeurs de Q (débit en m^3/H) et de D (rabattement en m) au bout de huit heures environ (moins lorsque le temps de pompage était inférieur) qui permettent de déterminer $T_{ap} = \frac{Q}{D}$. (Annexe IV a).

On a classé les valeurs de T_{ex} et T_{ap} correspondant par ordre croissant (Annexe IV b) et on les a reporté sur papier semi-log en conservant un écart constant (deux divisions) selon l'axe des ordonnées pour les différents pompages, T étant porté en abscisse selon une échelle logarithmique. Ce graphique (fig. 23) montre que les valeurs de $T_{ap} = Q/D$ sont comprises entre deux courbes formant un fuseau, ouvert en haut, autour des valeurs de T_{ex} , sauf pour les fortes valeurs de T_{ex} où ce fuseau se déporte vers la gauche.

Il semble donc que pour les valeurs fortes de transmissivité, la formule $T_{ap} = Q/D$ donne généralement une estimation par défaut.

Afin d'estimer les pourcentages de chances que l'on a d'évaluer T_{ap} plus ou moins exactement on a calculé les rapports T_{ap}/T_{ex} pour chaque pompage. Ces rapports classés selon un ordre de grandeur croissant se répartissent selon la loi log-normal de Gauss. On a utilisé à cet effet un papier gaussien-logarithmique (voir 52 b) les valeurs du rapport étant portées en abscisse selon une échelle log et les pourcentages

cumulés en ordonnée selon une échelle gaussienne ; le papier est conçu de telle façon que la courbe en cloche de Gauss se transforme en une droite. On voit donc (fig. 24) que les rapports suivent une loi log-normal de Gauss.

Les caractéristiques en sont les suivantes :

médiane $m = 0,88$

~~écart type s~~

~~$m + s = 2,3$~~

~~$m - s = 0,34$~~

68 % des valeurs du rapport T_{ap}/T_{ex} sont comprises entre $1/3$, $7/3$ et 95 % entre $1/6$ et 6.

On a vu que la valeur approchée de T est en fait comprise entre $0,7 Q/D$ et $1,3 Q/D$. Cette fourchette de rapports correspond à 25 % des cas.

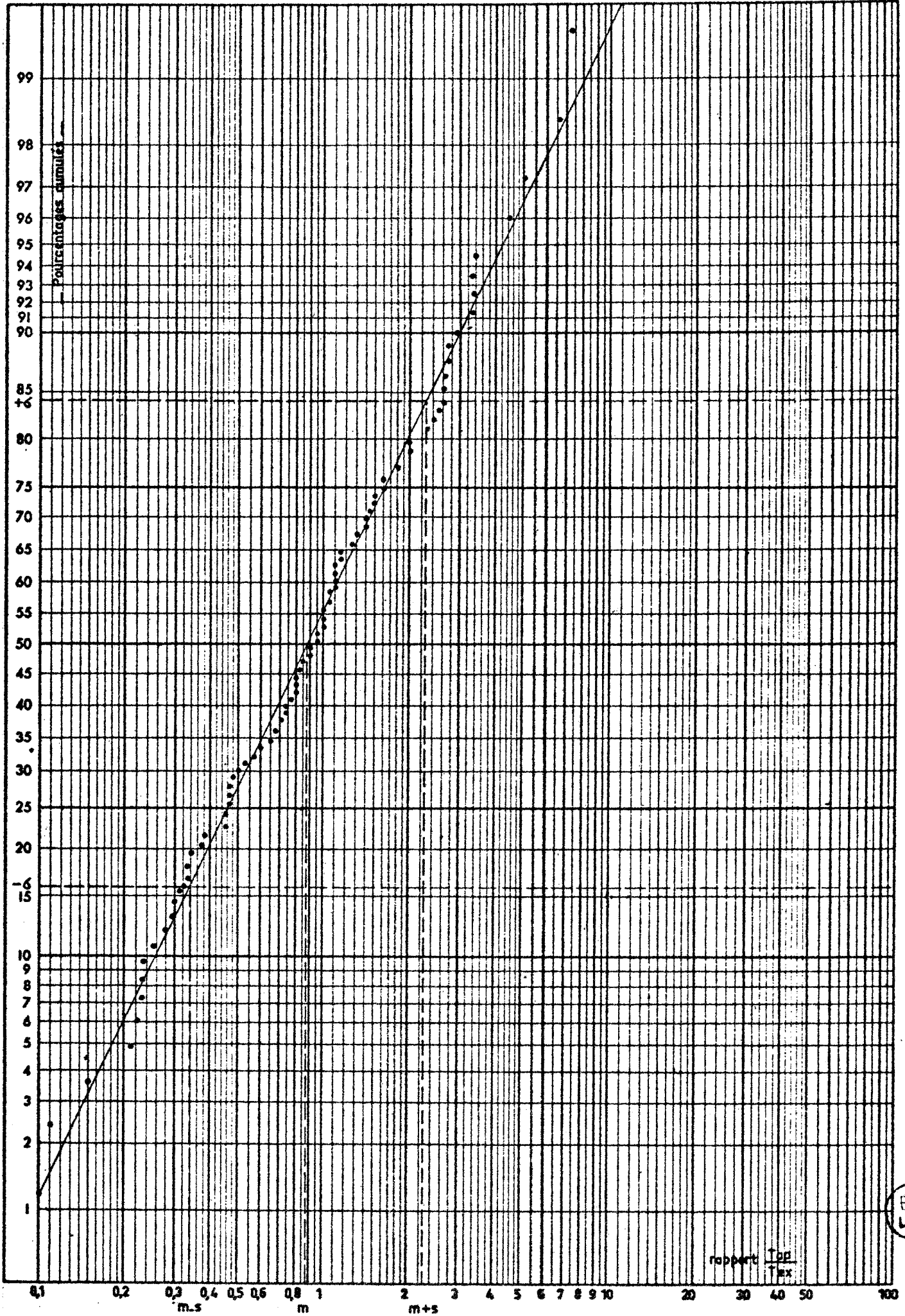
On constate que 35 % des valeurs sont inférieures à $0,7$, ce fait est vraisemblablement dû aux pertes de charges (D est surévalué) ou à la valeur de T_{ex} qui n'est peut-être pas fiable (voir fig. 30). 35 % des valeurs sont supérieures à $1,3$ (D est alors sous-évalué) ; on peut penser que le régime stabilisé ou proche de la stabilisation n'était pas atteint ou dans le cas contraire que l'estimation par la méthode de Jacob est en défaut soit parce que l'approximation n'est pas encore valable, soit que l'effet de capacité n'est pas négligeable.

Il ressort finalement de cette droite que dans plus des $2/3$ des cas on obtient ainsi facilement l'ordre de grandeur de la transmissivité, voire une bonne estimation de ce paramètre.

2.4. REPARTITION DES PERMEABILITES ET CORRELATIONS ENTRE PARAMETRES PHYSIQUES

2.4.1. Cartes de perméabilités et transmissivités

Fig: 24



rapport $\frac{T_{ap}}{T_{ex}}$

BUS LILLE

. Pompages interprétés en régime transitoire (Pl. XXXI)

Sur cette carte ont été figurés le réseau hydrographique et la limite de captivité de la nappe de la craie. Pour chaque forage testé, il a été indiqué les valeurs de transmissivité, perméabilité, emmagasinement (lorsqu'il a été déterminé).

Cette carte oppose, les valeurs de perméabilité, élevées dans les vallées ou à proximité de la limite de captivité, faibles sur les plateaux crayeux sans axes de drainage privilégiés, ou sous un épais recouvrement tertiaire.

Vu le nombre de points de mesure en égard à la superficie couverte, il eut été présomptueux de tracer des courbes de transmissivités, comme il a été possible de le faire pour la "nappe de la craie sous Lille".

. Débits spécifiques (Pl. XXXII)

Les valeurs de transmissivités obtenues de cette façon sont moins fiables, mais ceci est compensé par leur nombre beaucoup plus grand.

En outre, elles donnent un ordre de grandeur de la perméabilité dans des régions où on ne possède aucun pompage d'essai interprété en régime transitoire.

Cette carte confirme les constatations précédentes.

Nous venons donc de nous apercevoir sur ces deux cartes qu'il semble exister une relation entre la perméabilité et la distance au drainage (Vallée) dans le cas d'une nappe libre, ou la distance à la limite de captivité dans le cas d'une nappe captive.

Nous allons donc essayer de déterminer une relation plus précise entre ces paramètres et de voir s'il existe éventuellement d'autres facteurs susceptibles de modifier la perméabilité dans le cas de la nappe contenue dans le Turonien supérieur-Sénonien. Etant donné l'homogénéité du faciès, ce facteur n'intervient pas.

2.4.2. Distribution des perméabilités en fonction des facteurs géomorphologiques (nappe du Turonien-supérieur - Sénonien)

On appellera axe de drainage une vallée vers laquelle se fait l'écoulement de la nappe.

Sur les tableaux en annexe VI (pour les pompages interprétés en régime transitoire) et VII (pour les débits spécifiques) ont été notées la distance à la limite de captivité (pour les forages en nappe libre, la distance à la limite de captivité avec le signe moins quand ces forages n'en sont pas très éloignés. Ce sont souvent des forages pour lesquels la craie est déjà sous recouvrement tertiaire mais où la nappe n'est pas encore captive). De - 300 m à + 300 m de la limite de captivité, celle-ci étant déterminée plus ou moins exactement, on dira que la nappe est semi-captive. Cette limite fluctue avec le niveau piézométrique.

2.4.2.a. Nappe libre : relation perméabilité - distance au drainage

. Pompages interprétés en régime transitoire

Sur la figure 25 (coordonnées à échelles logarithmiques) on note une dispersion assez importante de l'ensemble des points. Mais on peut distinguer 3 catégories de valeurs en fonction de l'épaisseur de craie mouillée (h) :

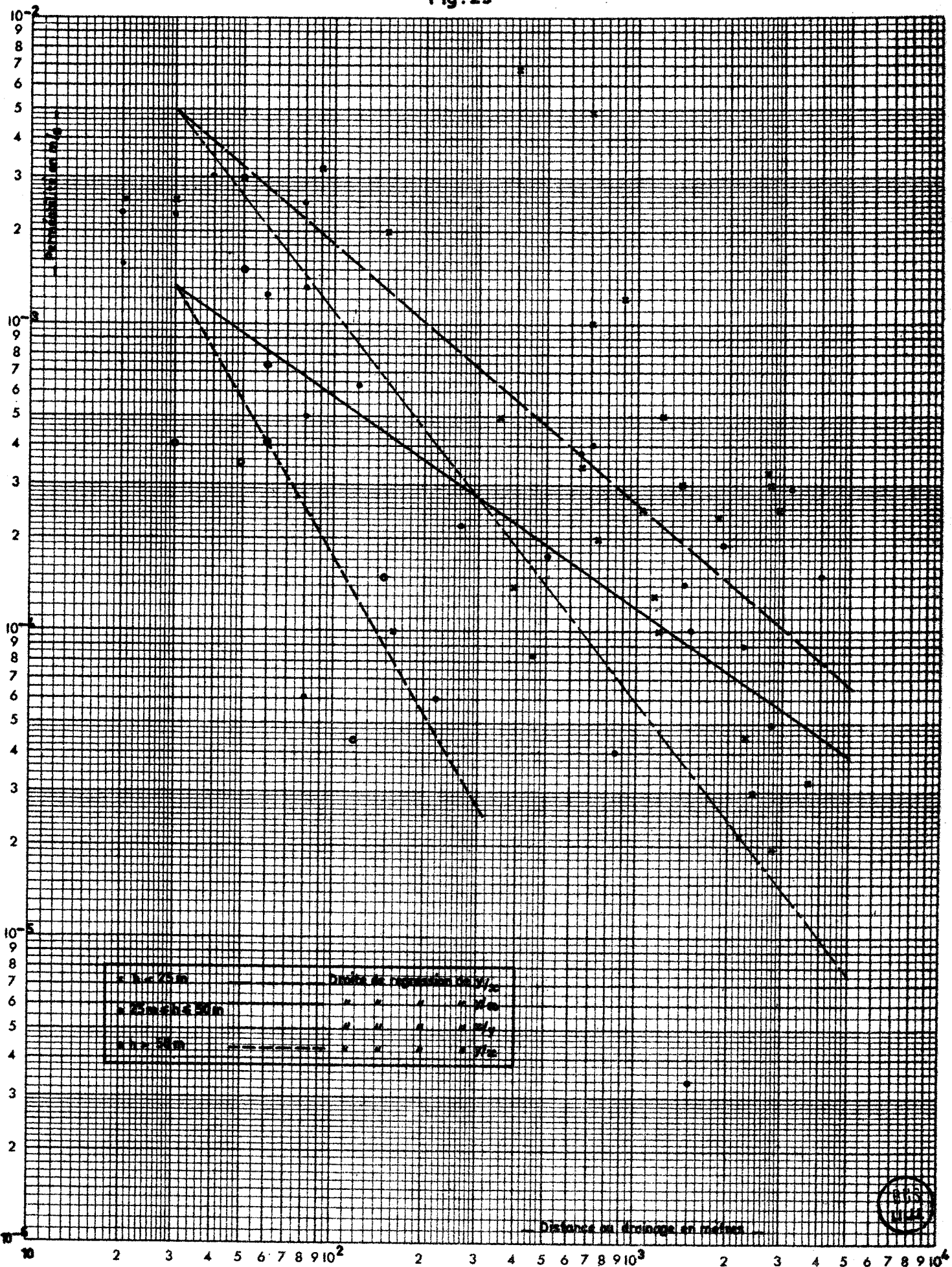
1ère catégorie	$h < 25$ m
2ème catégorie	$25 \text{ m} < h < 50$ m
3ème catégorie	$h > 50$ m

et on s'aperçoit que les fortes valeurs de perméabilité correspondent pour la majorité à $h < 25$ m et inversement les faibles valeurs à $h > 50$ m.

Ceci est d'ailleurs confirmé par le calcul des coefficients de corrélation r.

2. — RÉPARTITION DES PERMÉABILITÉS EN FONCTION DE LA DISTANCE AU DRAINAGE
 (Nappe libre du Sénonien-Turonien supérieur, pompages interprétés en régime transitoire) —

Fig: 25



Ensemble des valeurs (log des perméabilités et distances) :

$$r = - 0,59$$

pour $h < 25$ m $r = - 0,66$

pour 25 m $< h < 50$ m $r = - 0,72$

pour $h > 50$ m $r = - 0,83$

Rappelons que plus r est proche de 1 (ou - 1) plus forte est la liaison entre les deux paramètres.

Dans le cas présent, les points forment un nuage suggérant que lorsque D augmente, la valeur moyenne de K diminue.

On a également calculé les droites de régression théoriques ~~D (en m)~~ de la perméabilité K (en m/s) par rapport à la distance D (en m)

pour $h < 25$ m $\log K = - 3,5 - 0,85 (\log D - 2,9)$

pour 25 m $< h < 50$ m $\log K = - 3,54 - 0,68 (\log D - 2,45)$

pour $h > 50$ m $\log K = - 3,38 - 1,75 (\log D - 1,85)$

Pour 25 m $< h < 50$ m, on a calculé la droite de régression théorique de la distance (D en m) par rapport à la perméabilité (K en m/s) $\log D = 2,45 - 0,76 (\log K + 3,54)$.

Ces droites ont été reportées sur la fig. 25.

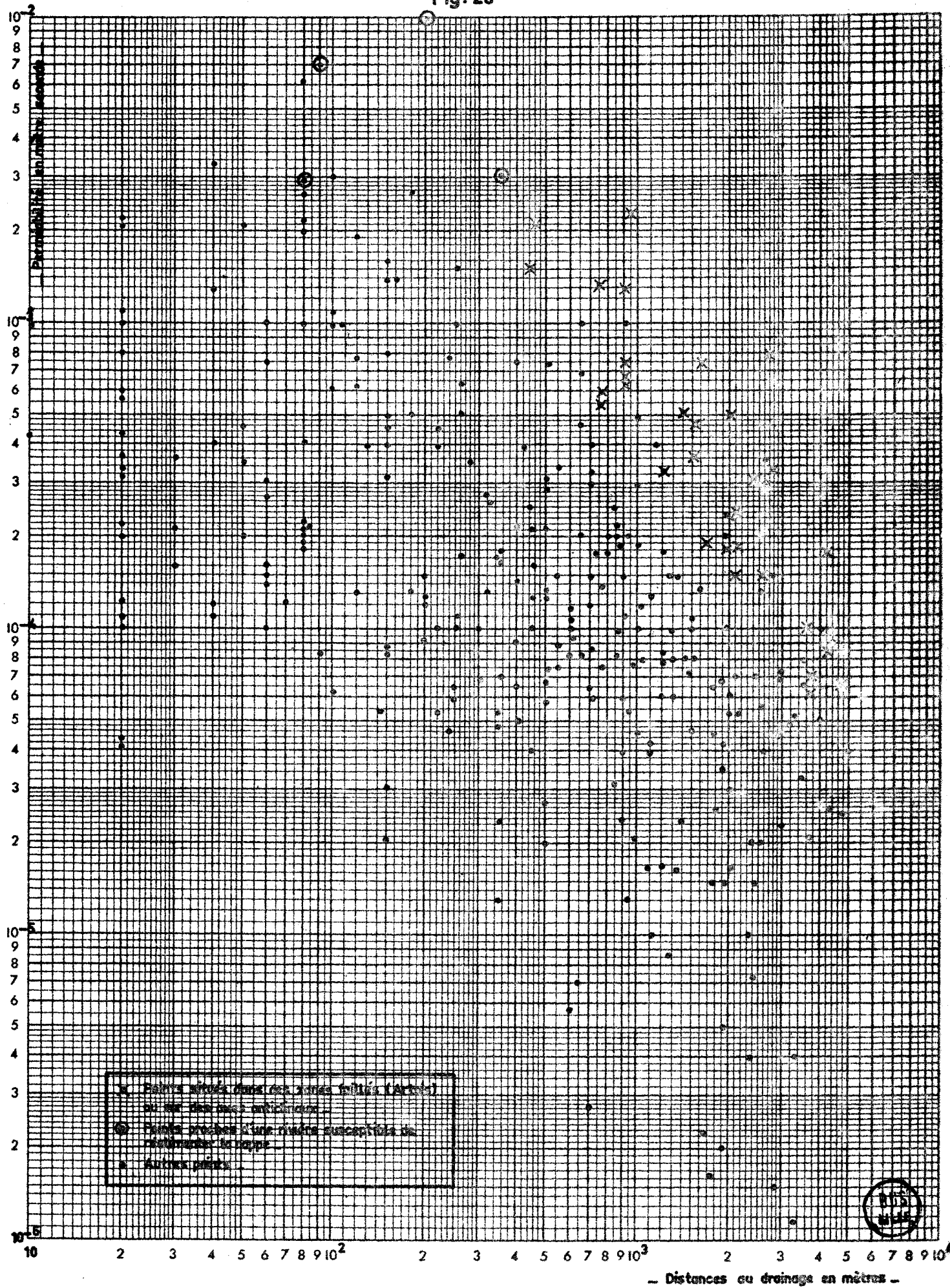
On peut admettre qu'il existe une relation entre la diminution de perméabilité et l'augmentation de la distance au drainage en nappe libre. D'autre part les droites de régression mettent en évidence la diminution de la perméabilité en fonction de l'épaisseur totale de craie mouillée.

. Valeurs de perméabilité d'après les débits spécifiques
(fig. 26)

Les valeurs de perméabilités sont évidemment moins précises que pour les pompages interprétés en régime transitoire. Cepen-

14. — RÉPARTITION DES PERMÉABILITÉS EN FONCTION DE LA DISTANCE AU DRAINAGE
 (Nappe libre du Sénonien-Turonien supérieur, Débits spécifiques $T = Q/D$) —

Fig: 26



dant la forme du nuage de points et leur densité relative à l'intérieur du nuage confirment l'interprétation précédente.

D'autre part on constate que la majorité des valeurs fortes de perméabilité pour des distances de plus de 500 m à l'axe de drainage sont situées dans des régions faillées (Béthune, Liévin, Mélandois) ou sur des axes anticlinaux (cartes de St-Pol, Bapaume, Doullens). De plus dans ces régions l'épaisseur de craie mouillée séno-turonienne dépasse rarement 25 à 30 m.

2.4.2.b. Nappe semi-captive (voir 2.4.2.)

• Valeurs de perméabilité d'après les pompages interprétés en régime transitoire

Sur la figure 27 on constate une diminution de la perméabilité lorsqu'on s'éloigne de part et d'autre de la limite de captivité. Il semblerait (mais on ne possède pas suffisamment de points pour l'affirmer, que les valeurs soient plus fortes du côté libre que du côté captif. Pour les forages en nappe libre situés entre 300 et 1 000 m de la limite de captivité mais sous recouvrement) les valeurs de perméabilité varient de $6 \cdot 10^{-5}$ à $7 \cdot 10^{-4}$ m/s.

• Valeurs de perméabilité d'après les débits spécifiques

Ces valeurs n'ont pas fait l'objet d'une figure particulière et sont reportées sur la figure 31 avec les valeurs en nappe captive.

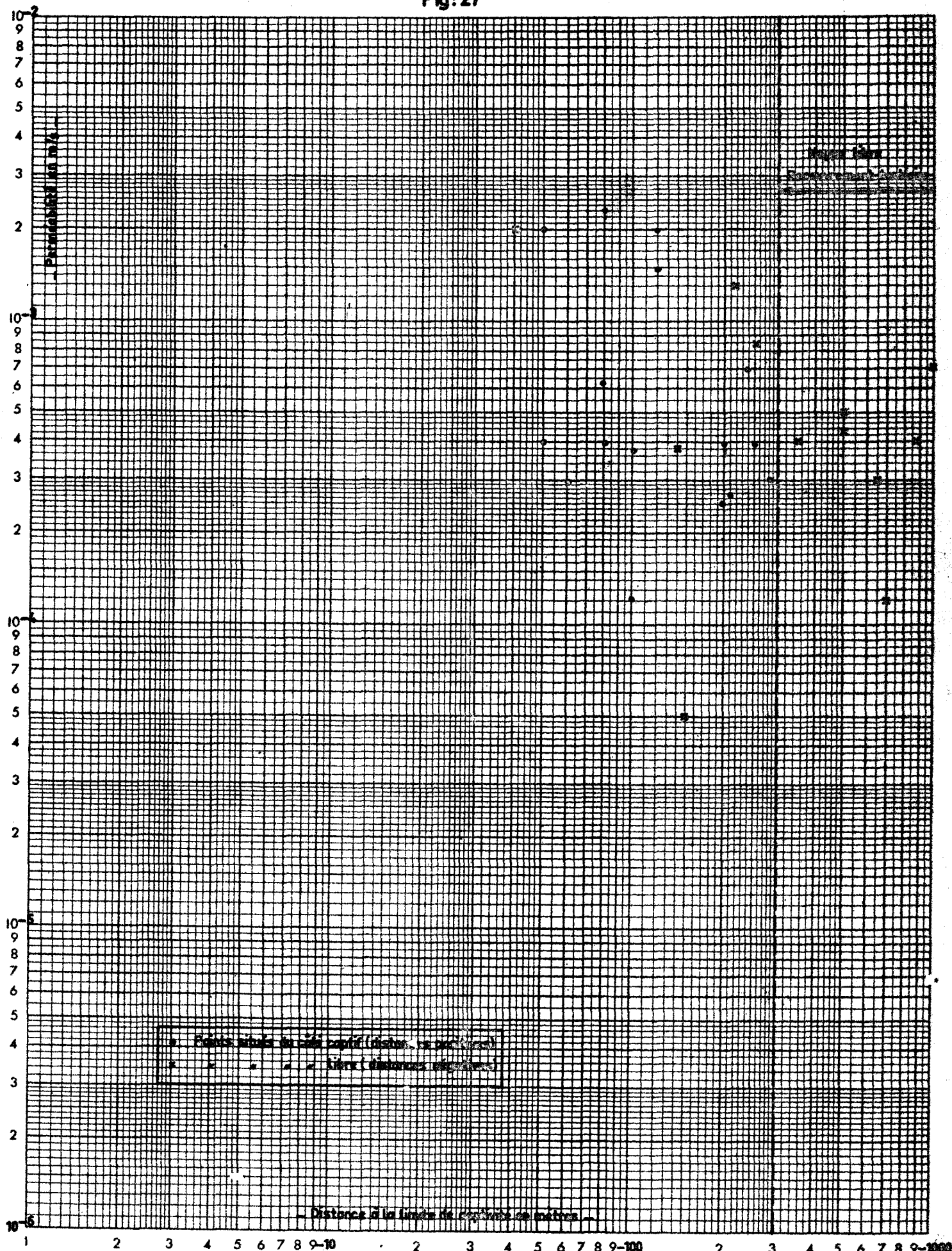
Elles s'échelonnent de $2 \cdot 10^{-5}$ à $5 \cdot 10^{-3}$ m/s.

2.4.2.c. Nappe captive : relation perméabilité - distance à la limite de captivité

D'après ce qui a été dit précédemment on considère uniquement les forages situés à plus de 300 m de la limite théorique de captivité.

16. RÉPARTITION DES PERMEABILITÉS EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA LIMITE DE CAPTIVITÉ
 (Nappe semi-captive du Sénonien-Turonien supérieur, pompages interprétés en régime transitoire)

Fig: 27



. Valeurs de perméabilité d'après les pompages interprétés en régime transitoire

Sur la figure 28, comme pour la nappe libre on a reporté le log de la perméabilité en fonction du log de la distance à la captivité. Le nuage de points est assez diffus. On peut grossièrement déterminer une droite de régression de K en fonction de D (distance à la limite de captivité). Mais pour une valeur déterminée de D, K peut varier dans un rapport de 1 à 100.

On a donc essayé de reporter (fig. 29) le log de la perméabilité en fonction de la distance à la limite de captivité mais en échelle arithmétique. Ce graphique permet de penser qu'il peut exister une relation entre le log de la perméabilité et la distance arithmétique à la limite de captivité. En effet on possède peu de points et ils sont très dispersés géographiquement (d'autres facteurs liés ou non à la distance à la limite de captivité interviennent certainement).

Enfin, on a reporté les valeurs de perméabilité (échelle arithmétique) en fonction du log de la distance (fig. 30). Il semble que ce graphique permette de déterminer une valeur maximale de la perméabilité en fonction de la distance à la limite de captivité entre 300 m et 10 000 m, cette droite-enveloppe a pour équation :

$$Y = -1,1 \cdot 10^{-3} \log x + 4,65 \cdot 10^{-3}$$

Y = K perméabilité en m/s

X = distance à la limite de captivité en m

. Valeurs de perméabilité d'après les débits spécifiques
(fig. 31)

Sur la carte du toit de la craie sous recouvrement tertiaire (pl. XX) on a pu remarquer un pendage assez fort dans la région Ouest (Calais, Guines, Cassel, St Omer) c'est pourquoi, on a a priori différencié les points situés dans cette région. On s'aperçoit (pour l'échantillon de points que l'on possède) que l'ensemble Z_1 (points figurés par une croix), se situe entre les deux droites parallèles z_1 et z'_1 alors que les points situés dans le reste de la région se situent au-dessus de la droite z_2 .

3. RÉPARTITION DES PERMÉABILITÉS EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA LIMITE DE CAPTIVITÉ
 (Nappe captive du Sénonien-Turonien supérieur, pompages interprétés en régime transitoire) ...

Fig: 28

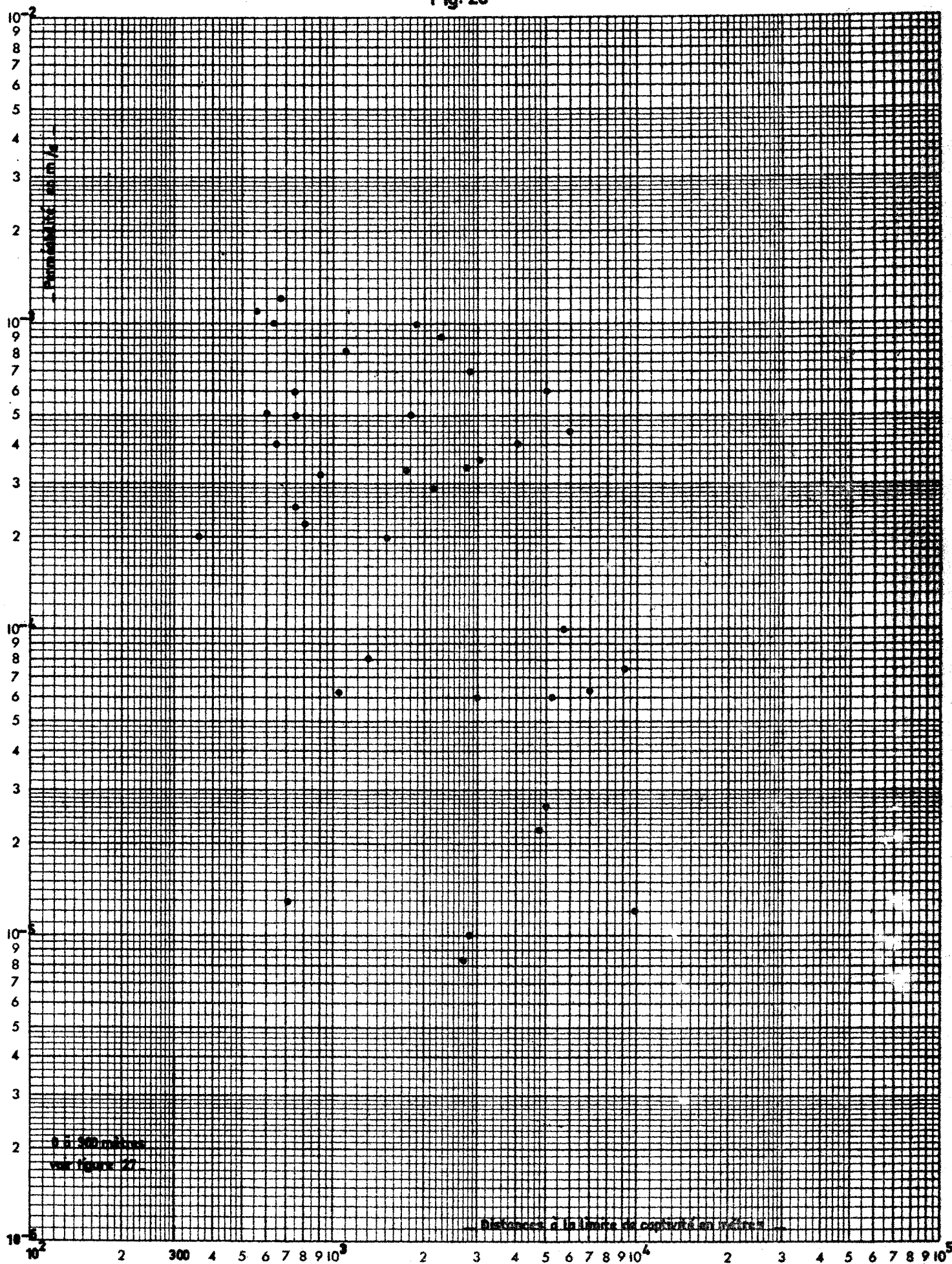


Fig: 29

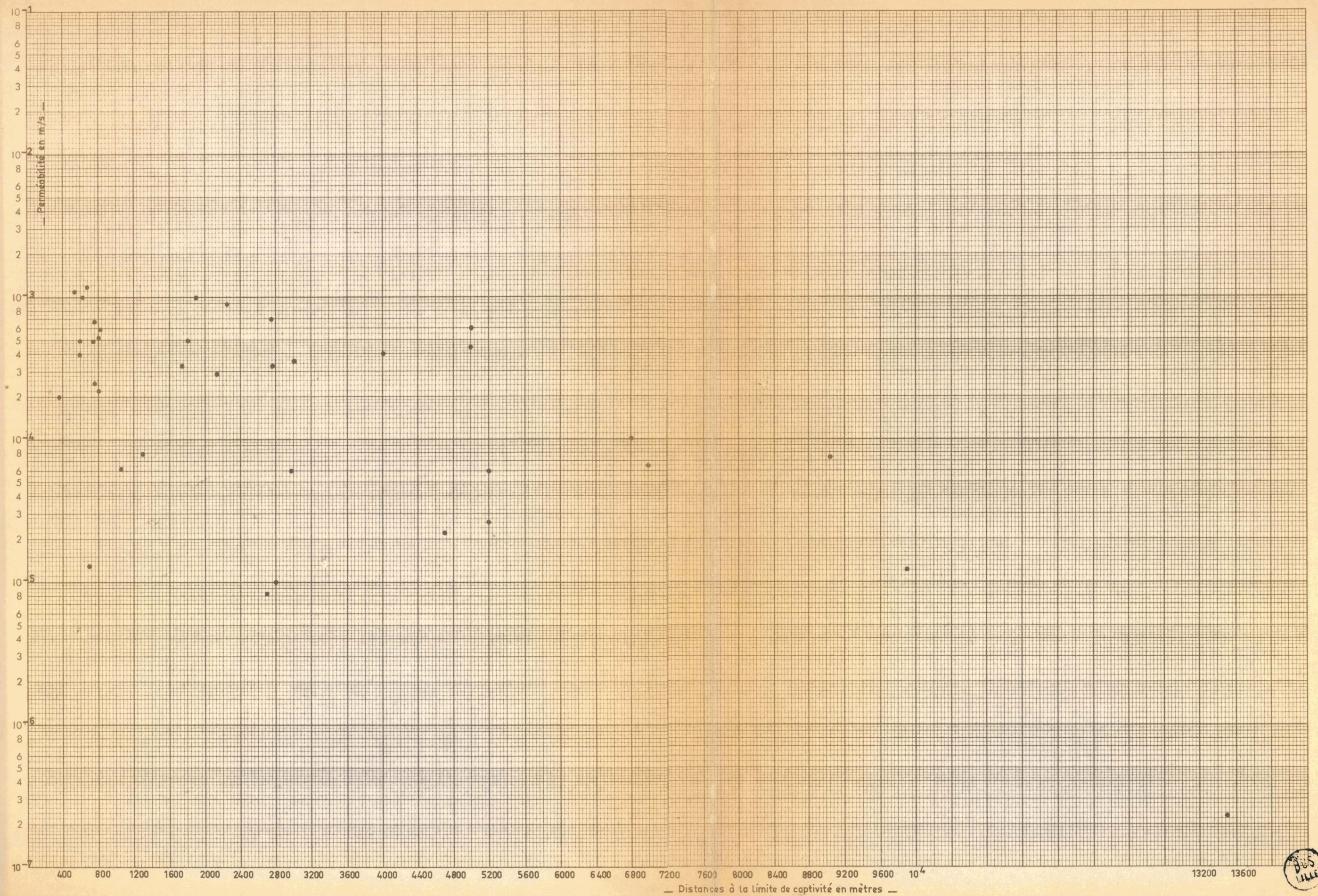
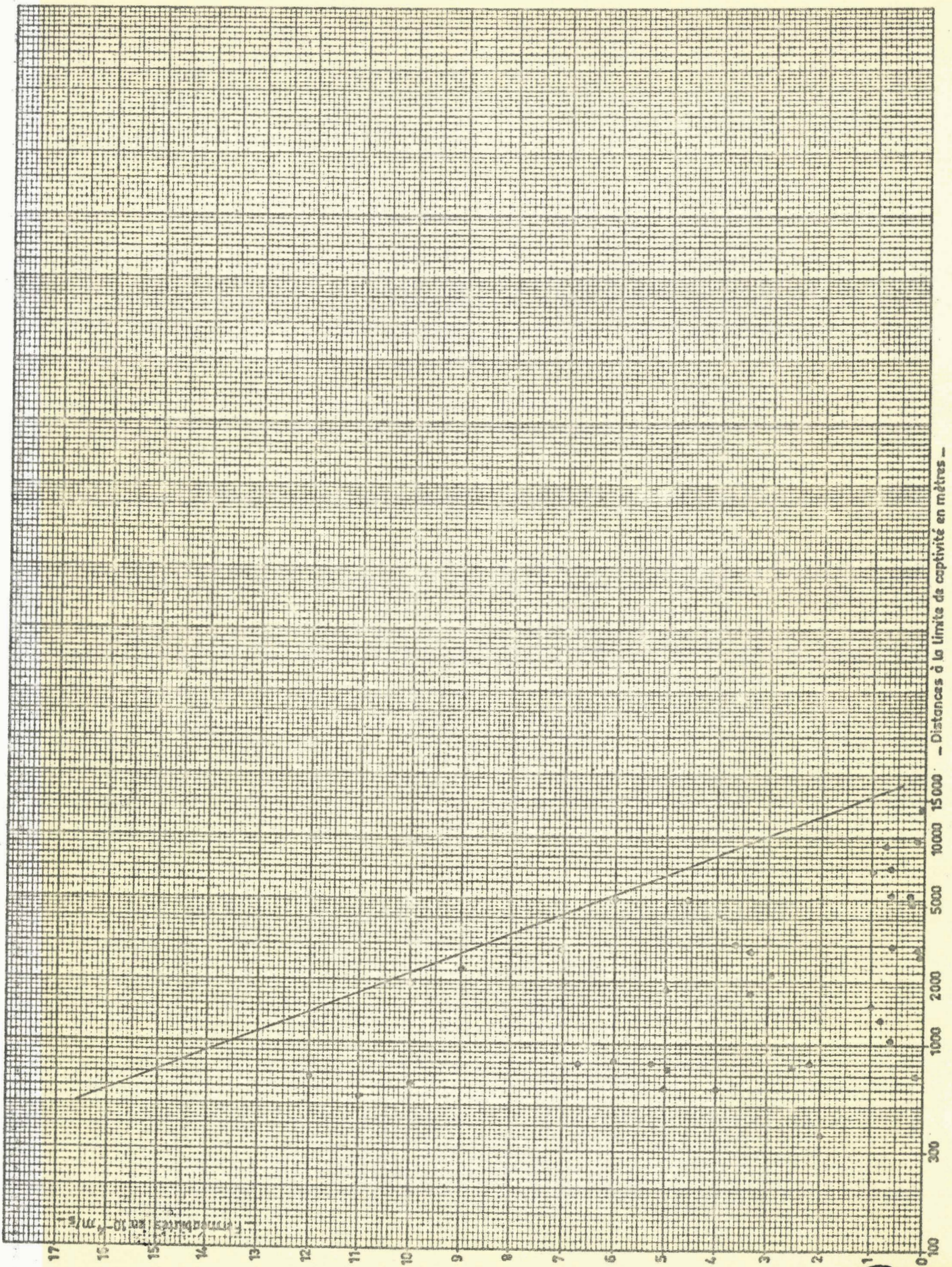


Fig: 30



Pour le reste de la région on a pu mettre en évidence une zone Z_3 de très fortes perméabilités compte-tenu de la distance à la limite de captivité. On remarque que ces points se situent essentiellement dans le Bassin d'Orchies et la région d'Hazebrouck (zones de subsidence).

Il semble donc qu'en nappe captive la diminution de la perméabilité est non seulement fonction de la distance à la limite de captivité mais aussi du pendage du toit de la craie (l'épaisseur de sédiments au-dessus de l'aquifère étant plus importante à distance égale comprime les fissures et diminue la perméabilité), et peut-être la tectonique.

2.4.3. Relation perméabilité - faciès

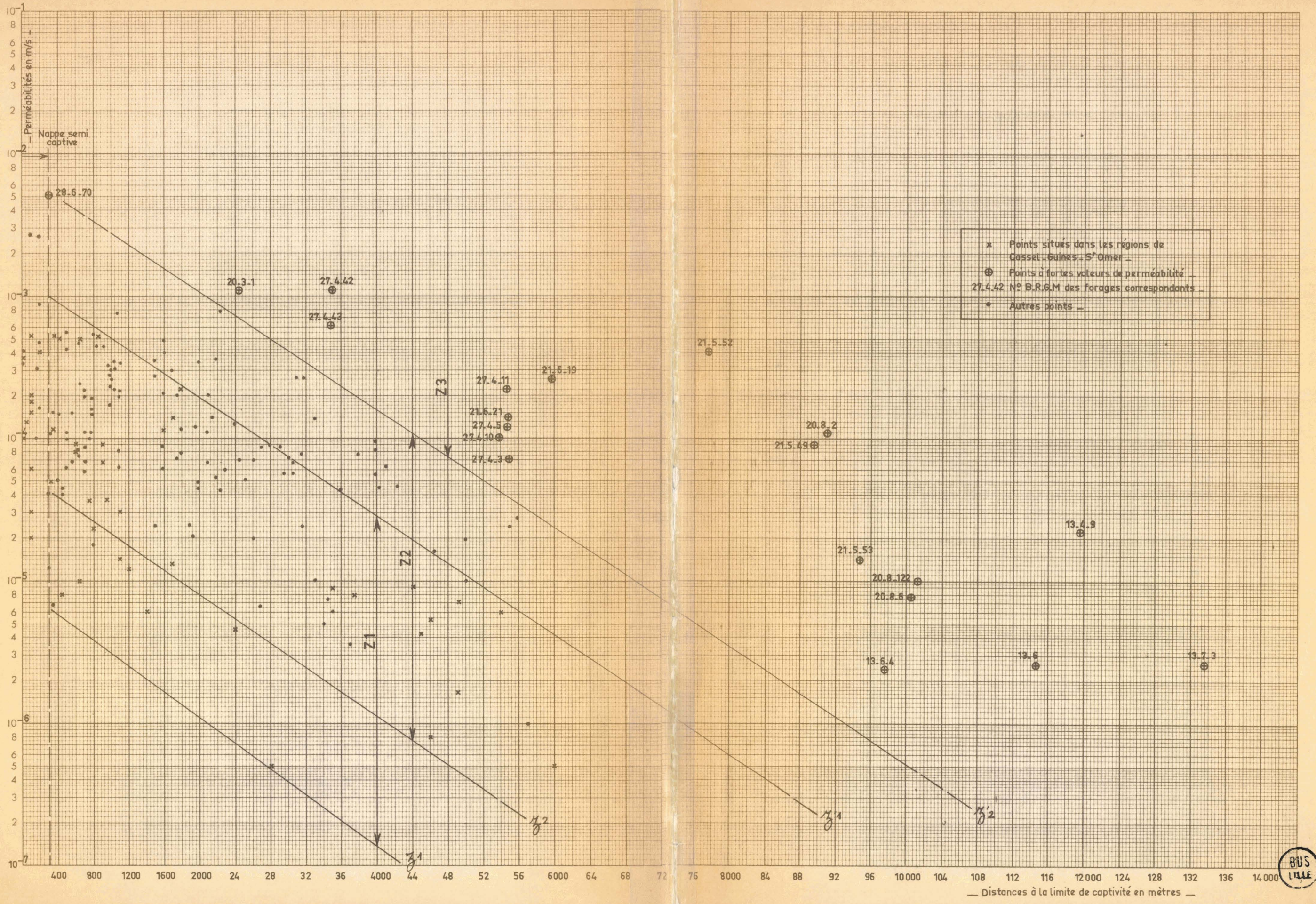
Y-a-t'il une relation entre la perméabilité et la résistivité déterminée par les diagraphies. Une remarque s'impose d'abord : nous venons de voir que pour la nappe du Sénonien-Turonien supérieur (dont le faciès est homogène dans l'espace) la perméabilité varie de façon assez appréciable avec la distance au drainage (en nappe libre) ou la distance à la limite de captivité (en nappe captive). Ce facteur géomorphologique intervient également pour les autres nappes.

2.4.3.a. Cénomaniens

On possède peu de valeurs de perméabilité (Fig. 32), six d'après des pompages interprétés en régime transitoire, et huit d'après des valeurs de débit spécifique. On constate qu'elles se répartissent en fonction de la distance au drainage entre deux droites C1 et C2 de pente sensiblement identique à celle des droites tracées pour la nappe du Sénonien - Turonien supérieur.

Si on reporte les valeurs de perméabilité sur la carte de résistivité du faciès Cénomaniens (Pl. XXII, fig. 33), on remarque que les valeurs de perméabilité supérieures à 10^{-3} m/s sont situées dans la zone ayant une résistivité supérieure à 80 Ω .m, les valeurs comprises entre 10^{-4} et 6.10^{-4} dans la zone 60 à 80 Ω .m,

Fig: 31



deux valeurs 10^{-4} m/s pour 50 Ω .m et une valeur 2.10^{-4} pour 45 Ω .m à Houdain. Cette valeur est estimée d'après un débit spécifique, elle est donc sujette à une approximation : un pompage en régime transitoire serait nécessaire.

Sur la bordure du Boulonnais, les deux valeurs faibles de perméabilité 5.10^{-5} m/s à Nesles et 8.10^{-5} m/s à Desvres proviennent du fait que la majeure partie du forage (sinon la totalité) se trouve dans le faciès marneux du Cénomaniens.

Dans l'Ouest et le Sud de la région, une drainance de l'aquifère supérieur du Turonien inférieur peut se manifester compte-tenu du changement de faciès et des valeurs de résistivité plus élevées de ce dernier. Ce fait a été observé sur le forage FC2 à Fruges (n° 17-4-97).

On possède pour ce forage un diagramme des vitesses d'écoulement en fonction de la profondeur qui permet de déterminer la perméabilité des principales zones productrices. Sa comparaison avec la diagraphie de résistivité effectuée sur le sondage P8A (n° 17-4-96) (situé à 100 m) met en évidence la productivité des bancs résistants par opposition aux bancs marneux totalement improductifs (fig. 34).

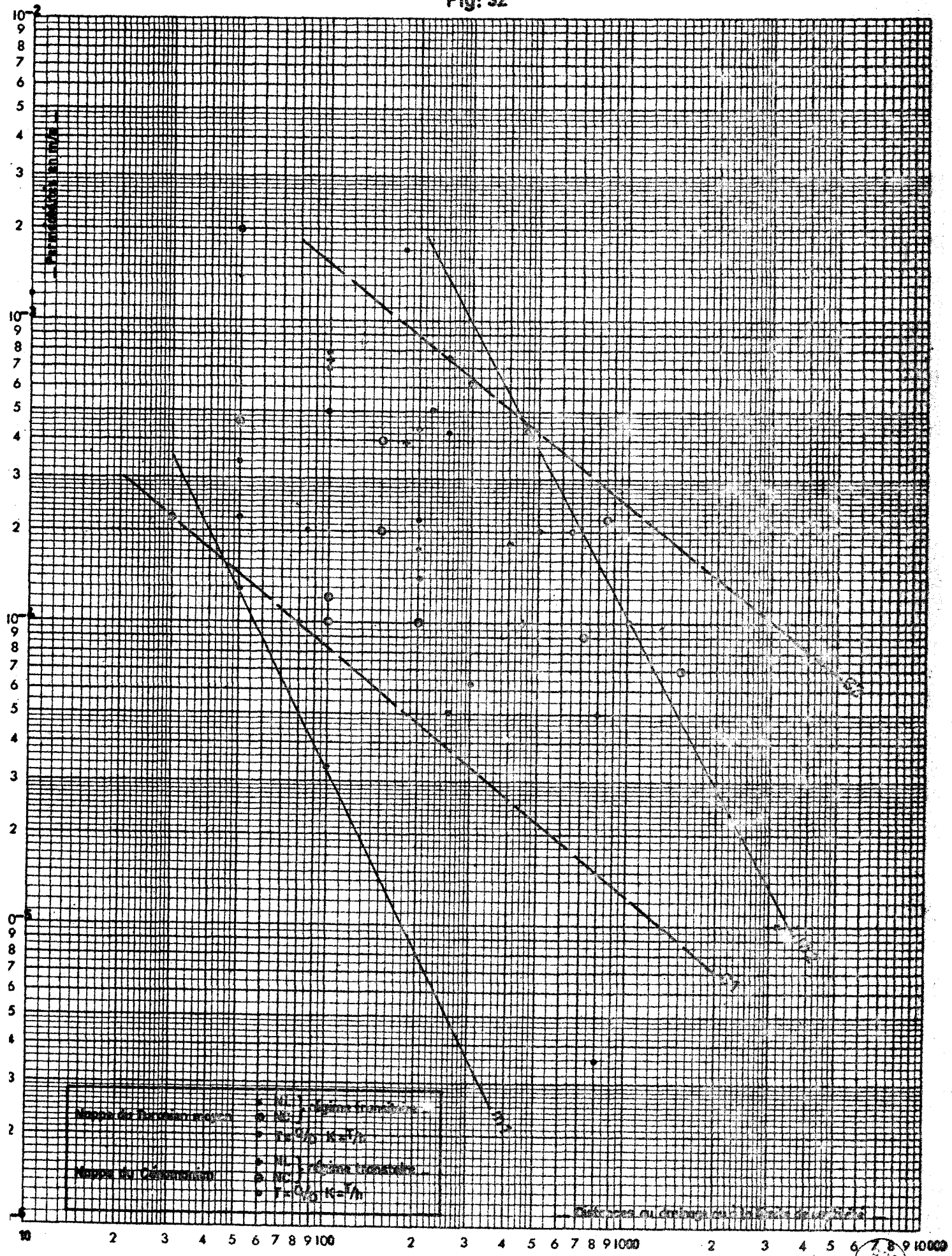
2.4.3.b. Turonien moyen

On ne peut discuter du Turonien inférieur, vu l'absence de valeurs de perméabilités, on peut cependant espérer des valeurs intéressantes dans l'extrême-Ouest et le Sud de la région étant donné les valeurs de résistivité (Pl. XXIII) supérieures à 60 Ω .m et la drainance qui se manifeste à Fruges pour une résistivité de 50 Ω .m.

Pour le Turonien moyen on possède une trentaine de valeurs de perméabilités dont seulement quatre d'après des pompages interprétés en régime transitoire. Pratiquement toutes sont en nappe libre.

On remarquera sur la figure 32, qu'elles se situent entre deux droites m1 et m2 dont la pente est 1,3 fois plus forte que pour la nappe du Sénonien-Turonien supérieur. Donc la perméabilité décroît plus rapidement lorsqu'on s'éloigne de l'axe de drainage.

Fig: 32

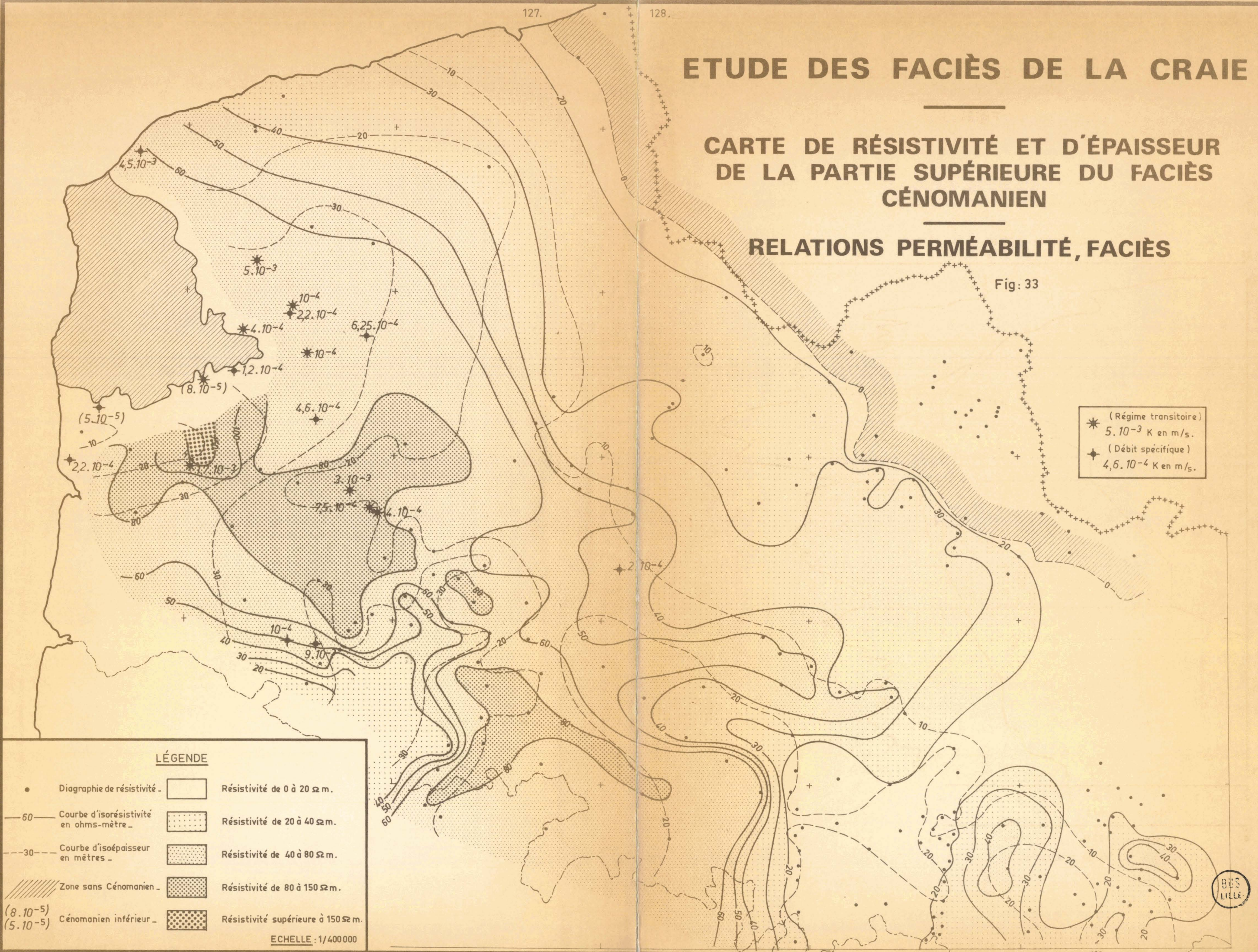


ETUDE DES FACIÈS DE LA CRAIE

CARTE DE RÉSISTIVITÉ ET D'ÉPAISSEUR DE LA PARTIE SUPÉRIEURE DU FACIÈS CÉNOMANINIEN

RELATIONS PERMÉABILITÉ, FACIÈS

Fig: 33



LÉGENDE

- Diagraphie de résistivité - Résistivité de 0 à 20 Ω m.
- 60 — Courbe d'isorésistivité en ohms-mètre - Résistivité de 20 à 40 Ω m.
- - - 30 - - - Courbe d'isoépaisseur en mètres - Résistivité de 40 à 80 Ω m.
- //// Zone sans Cénomaniens - Résistivité de 80 à 150 Ω m.
- (8.10⁻⁵) Cénomaniens inférieurs - Résistivité supérieure à 150 Ω m.
- (5.10⁻⁵)

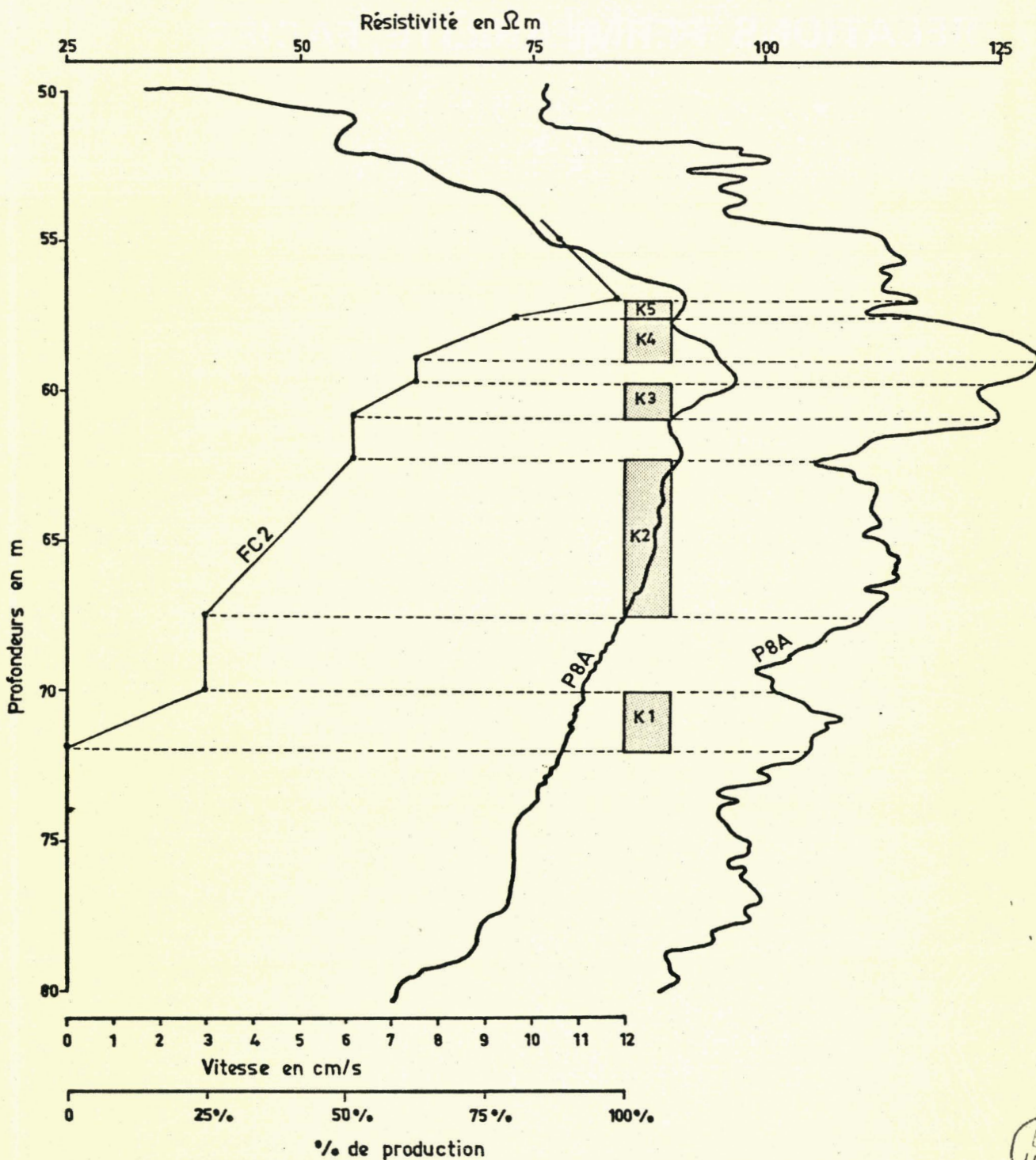
ECHELLE : 1/400000

- * (Régime transitoire) 5.10⁻³ K en m/s.
- ◆ (Débit spécifique) 4,6.10⁻⁴ K en m/s.

BUS LILLE

DIAGRAPHIES DU FORAGE DE FRUGES
 Nappe du Cénomanién

Fig: 34



Sur la figure 35 on peut cependant remarquer que les quelques valeurs de perméabilité inférieures à 10^{-4} m/s se situent dans des zones de résistivité inférieures à $30 \Omega.m$.

La plupart des valeurs supérieures à 10^{-4} m/s se trouvent dans la région ouest et sud-ouest pour laquelle la résistivité minimale du faciès Turonien moyen (c'est-à-dire la résistivité des bancs marneux) est le plus souvent supérieure à $40 \Omega.m$ avec un facteur d'homogénéité $\frac{\rho_M}{\rho_m} \ll 2$.

En allant vers le Nord-Est de la région, on ne trouve pratiquement pas de forage au Turonien moyen (la nappe du Sénonien-Turonien supérieur étant pratiquement toujours présente). Comme on l'a vu au paragraphe 1.4.2.b., la résistivité minimale diminue (les bancs marneux sont de plus en plus argileux) tandis que le facteur d'hétérogénéité devient supérieur à 2.

Les bancs crayeux se prolongent vers le Nord-Est mais leur épaisseur diminue corrélativement avec une augmentation de celle des bancs marneux. Leurs réserves aquifères sont donc probablement faibles, ils risquent de plus d'être colmatés par les bancs encaissants marneux.

2.4.3.c. Sénonien - Turonien supérieur

On remarque grâce aux enregistrements au micromoulinet que seule la partie supérieure (15 m environ) de la craie est perméable, bien que ces enregistrements aient été obtenus pour une nappe captive, ceci confirme ce qui a été observé d'après la figure 25 : "... les droites de régression mettent en évidence la diminution de la perméabilité lorsque l'épaisseur totale de craie mouillée augmente".

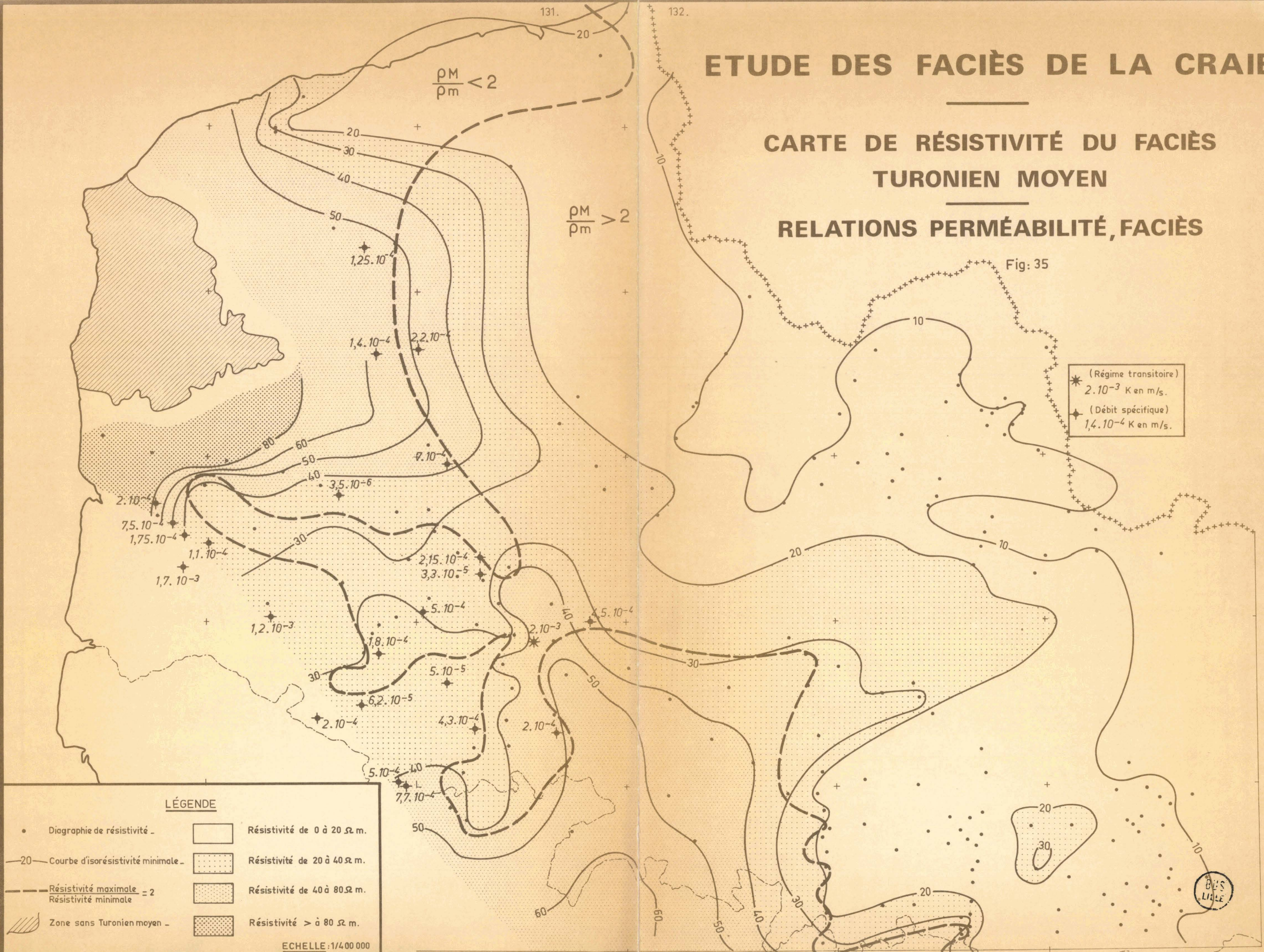
Un nombre plus important d'enregistrements au micromoulinet dans des forages traversant le Sénonien-Turonien supérieur permettrait probablement de dire que la perméabilité cesse (brutalement) dès que l'épaisseur de craie mouillée devient supérieure à 15 m.

ETUDE DES FACIÈS DE LA CRAIE

CARTE DE RÉSISTIVITÉ DU FACIÈS TURONIEN MOYEN

RELATIONS PERMÉABILITÉ, FACIÈS

Fig: 35



LÉGENDE

- Diagraphie de résistivité
- 20— Courbe d'isoresistivité minimale
- Résistivité maximale = 2
Résistivité minimale
- Zone sans Turonien moyen
- Résistivité de 0 à 20 Ω m.
- ▤ Résistivité de 20 à 40 Ω m.
- ▥ Résistivité de 40 à 80 Ω m.
- ▧ Résistivité > à 80 Ω m.

ECHELLE: 1/400 000

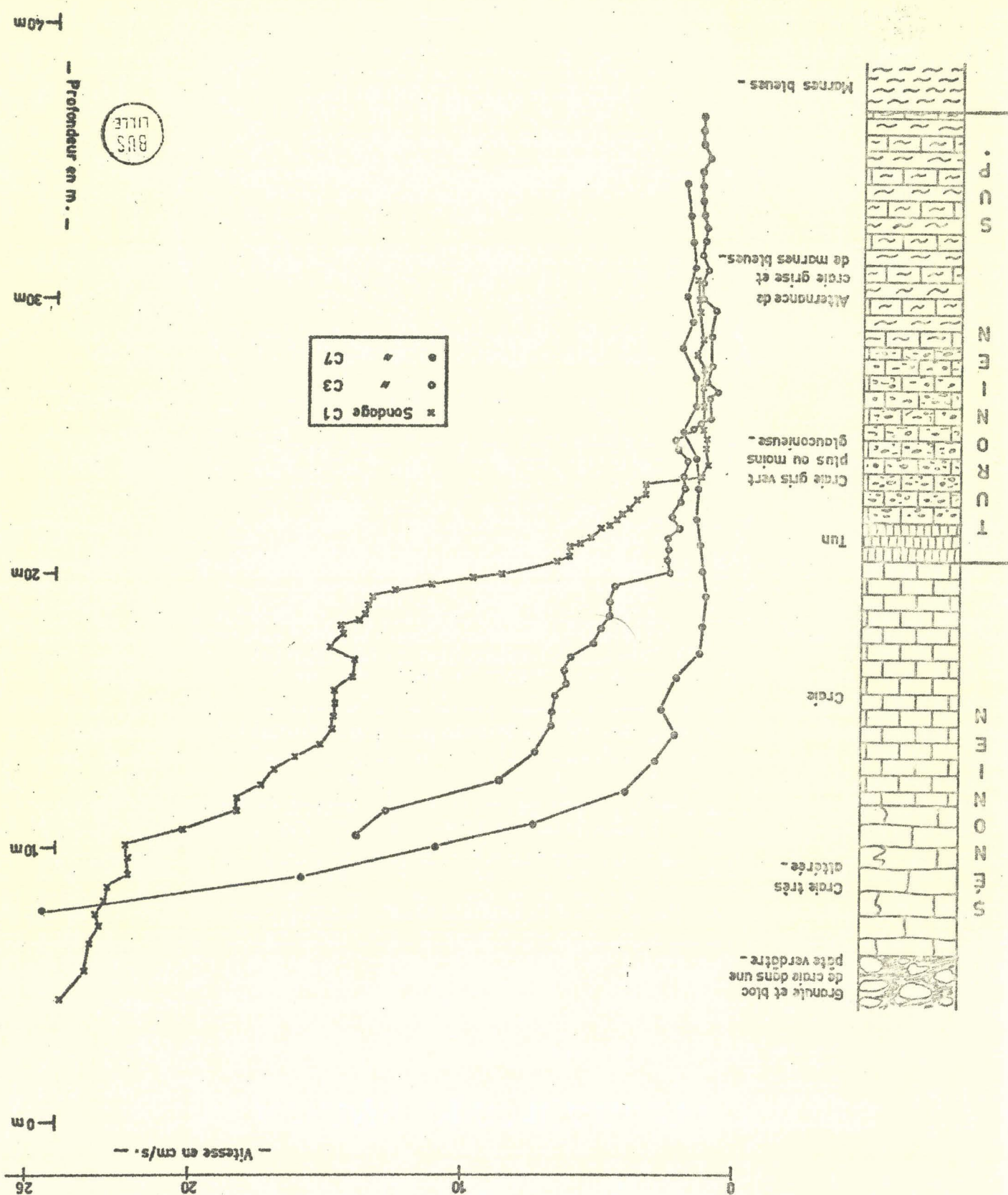
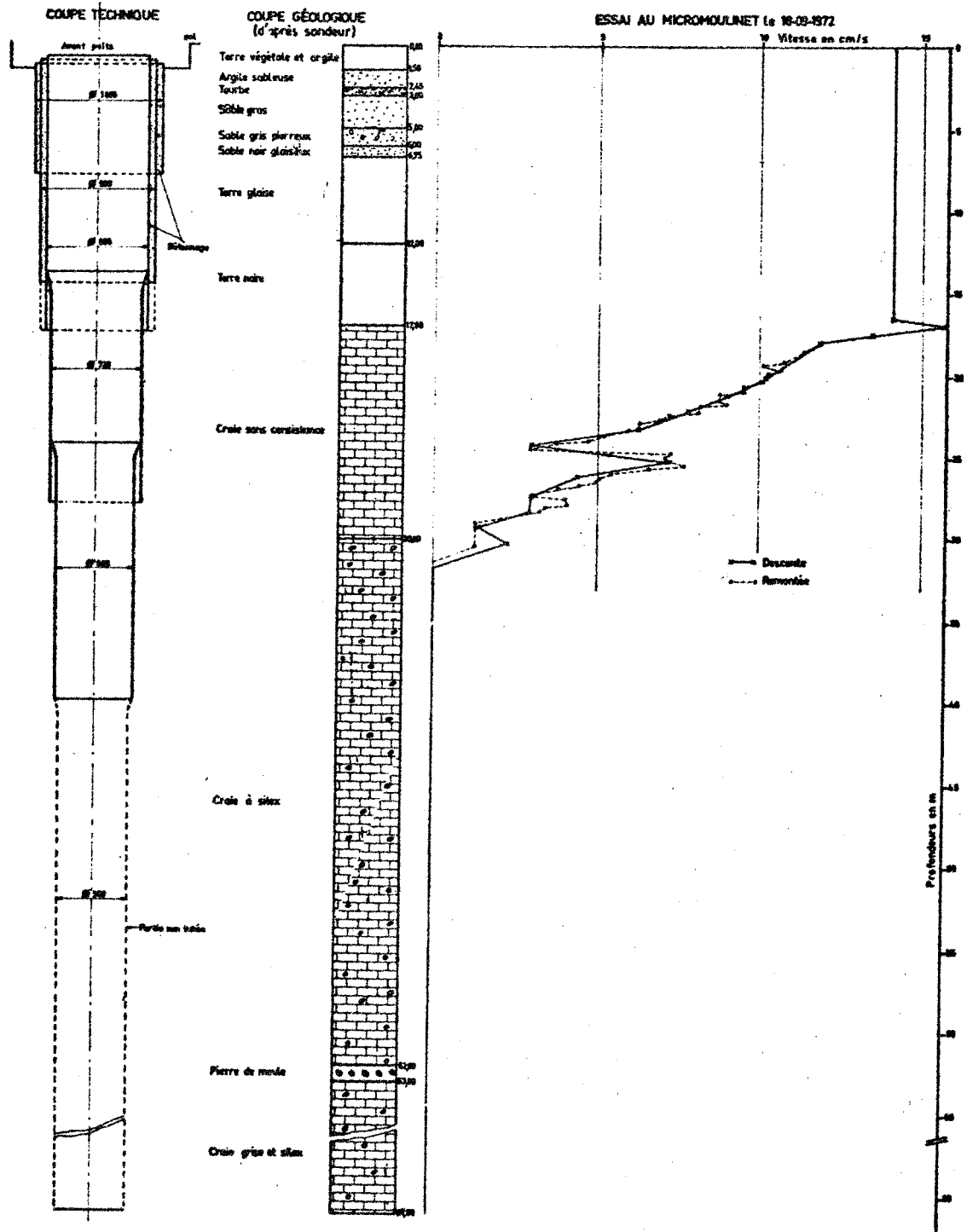


Fig: 36

— ENREGISTREMENTS AU MICROMOULINET SUR TROIS SONDAGES DU DIPLODOCUS (LILLE) —

— DIAGRAPHIES ET COUPE DU FORAGE DE LA SUCRERIE DE LILLERS —

Fig: 37



2.5. CONCLUSIONS

. La carte piézométrique (Pl. XXIX) est assez explicite en elle-même, nous dirons simplement qu'elle est une mise à jour de celle de 1965. Si les relevés n'ont pas été effectués la même année, ils l'ont toujours été durant la période d'étiage de la nappe.

. La carte d'épaisseur de craie mouillée (Pl. XXX) déduite de la précédente et de la carte d'isobathes du toit du Turonien moyen met en évidence une zone sans eau dans le Turonien supérieur - Sénonien au Sud-Ouest de l'axe de l'Artois. Un niveau existe cependant dans le Turonien moyen.

. Les cartes de transmissivités et de perméabilités, d'après les pompages interprétés en régime transitoire (Pl. XXXI) et d'après les débits spécifiques (Pl. XXXII) font ressortir des perméabilités élevées dans les vallées et au niveau de la limite Tertiaire - Secondaire en affleurement, ces deux conditions pouvant être réalisées simultanément (Vallée de la Deûle aux environs de Lille). La perméabilité diminue rapidement sous recouvrement tertiaire lorsqu'on s'éloigne de la limite d'affleurement de la craie.

. Pour le Turonien supérieur - Sénonien, la relation esquissée par les deux cartes précédentes entre la perméabilité et la distance au drainage ou à la limite de captivité est démontrée par les figures 25, 26, 30, 31. En outre la figure 25 montre que la perméabilité diminue, lorsque l'épaisseur de craie mouillée augmente, et la figure 31, lorsque le pendage de la craie sous recouvrement tertiaire est plus fort (région de Guînes).

Ce que suggère la figure 25 est prouvé par les figures 36 et 37 (enregistrements au micromoulinet), seule la partie supérieure de la craie est aquifère sur 15 ou 20 mètres. Donc lorsque l'épaisseur de craie mouillée (h) est supérieure, comme on divise la transmissivité T par h , la perméabilité $K = \frac{T}{h}$ est sous-évaluée.

. Les valeurs de perméabilités connues pour le Turonien moyen (fig. 32 et 35) se situent surtout au Sud-Ouest de l'axe de l'Artois, où la nappe du Turonien supérieur - Sénonien est absente.

Les perméabilités sont intéressantes dans les zones où la résistivité est supérieure à 40 Ω m et la distance au drainage peu élevée.

. On ne possède pas de valeurs de perméabilités pour le Turonien inférieur, mais au vu des constatations qui précèdent, on peut penser obtenir de bonnes perméabilités lorsque la résistivité est supérieure à 60 Ω m. (Pl. XXIII).

. Quant au Cénomanién, les figures 33 et 34 montrent que la résistivité est le facteur primordial influençant la perméabilité. La distance au drainage ou la limite de captivité jouant un rôle secondaire (fig. 32).

Les diagraphies corrélées du sondage de Fruges (fig. 34) font ressortir que seuls les bancs résistants sont perméables.

TROISIEME PARTIE

C O N C L U S I O N S G E N E R A L E S

Les enseignements qui ressortent de cette étude sont de deux ordres : théorique et pratique.

3.1. DU POINT DE VUE THEORIQUE (connaissance des faciès) :

- Les diagraphies (de résistivité en particulier) sont un outil de choix pour la détermination et la différenciation des faciès de la craie.

- De plus, elles donnent l'expression globale de la nature lithologique en montrant le régime continu (Turonien inférieur) ou discontinu (Turonien moyen) de la sédimentation.

- Enfin, les faciès étant déterminés, l'établissement de cartes de résistivité pour chacun d'eux montre leur évolution très régulière d'un pôle argileux vers un pôle crayeux.

3.2. DU POINT DE VUE PRATIQUE (Hydrogéologie) :

- Si une nappe existe dans le Turonien supérieur - Sénonien, l'implantation dans une vallée ou une zone proche de la limite Tertiaire - Secondaire est recommandée. Il semble inutile de creuser la craie sur une épaisseur aquifère supérieure à 20 m (fig. 25, 36, 37).

- Si la nappe se situe dans le Turonien moyen, le Turonien inférieur ou le Cénomanién, il convient en premier lieu d'implanter le forage dans une zone à résistivité élevée, la proximité d'une vallée étant un facteur favorable mais de second ordre. Dans le cas du Cénomanién, les diagraphies corrélées du forage de Fruges (fig. 34) démontrent qu'à l'intérieur du faciès seuls les bancs plus résistants sont aquifères.

La diagraphie présente donc un intérêt double :

- d'ordre général, associée aux diagraphies environnantes, elle permet une meilleure connaissance des faciès tant du point de vue géométrique (cartes d'épaisseur et d'isobathes) que

de leur évolution (cartes de résistivité).

- d'ordre particulier en déterminant les faciès et zones résistantes, a posteriori aquifères.

BIBLIOGRAPHIE

Les ouvrages cités ci-dessous dont le nom de l'auteur est précédé d'un astérisque (*) traitent d'hydrogéologie.

Liste des abréviations utilisées

- A.F.T.P. : Association française des techniciens du pétrole.
- B.R.G.M. : Bureau de recherches géologiques et minières.
- C.F.P. : Compagnie française des pétroles.
- C.O.P.E.S.E.P. : Compagnie des pétroles du Sud-Est parisien.
- D.E.A. : Diplôme d'études approfondies.
- E.N.S.M. : Ecole nationale supérieure des mines.
- I.F.P. : Institut français du pétrole.
- R.A.P. : Régie autonome des pétroles.
- S.N.P.A. : Société nationale des pétroles d'Aquitaine.

- * 1a - D'ARCY D. et ROUX J. C. avec la collaboration de BELPAUME D. (1966) .- Données géologiques et hydrogéologiques sur la feuille topographique au 1/50 000 de Doullens (n° 34). Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 66 A 11, 48 p., 10 fig., 8 ann.
- * 1b - D'ARCY D. (1970) .- Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin de l'Authie. Thèse 3ème cycle, Paris, 167 p., 7 ann., 6 pl.
- 1c - D'ARCY D. et ROUX J. C. (1970) .- Carte du toit des dièves en Picardie. Note B.R.G.M., P.N.O. 70/15, 5 p., 1 carte.
- 2 - BARROIS C. (1878) .- Mémoire sur le terrain crétacé des Ardennes et des régions voisines. Ann. Soc. géol. Nord, t. V, p. 227-487.
- * 3 - BELPAUME D., DASSONVILLE G., FONTENIER B., ROSSIGNOL F. et ROUX J. C. (1966) .- Données hydrogéologiques sur le territoire de la feuille topographique au 1/50 000 de Bapaume (n° 35). Rapport B.R.G.M., D.S.G.R., 66 A 17, 45 p., 7 fig., 11 ann.
- * 4 - BENCOMO C. (1967) .- Essai de pompage à débit critique dans un puits. Rapport B. R. G. M., D.S. 67 A 136, 21 p., 7 ann.
- * 5 - BERGIN J. P., DIEUDONNE A., LOUIS C. (1972) .- Diplococus. Etude géologique. Etudes mécanique et hydraulique du sol. Rapport B.R.G.M., 72 S.G.N. 235 N.P.A., 27 p., 9 ann.
- * 6a - BERKALOFF E. (1960) .- Calcul du coefficient d'infiltration dans certaines régions du Nord de la France. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXX, p. 273-274.
- * 6b - BERKALOFF E. (1963) .- Essai de puits, interprétation en nappe libre avec strate conductrice d'eau privilégiée. Rapport B.R.G.M., D.S. 63 A 18, 9 p.
- * 7a - BONNET M. (1969) .- Manuel d'hydraulique des systèmes de captage et drainage (1er fascicule). Rapport B.R.G.M., 69 S.G.L. 225 HYD., 29 p., 10 tabl., 4 pl.
- * 7b - BONNET M., FORKASIEWICZ J. et PEAUDE CERF P. (1970) .- Méthode d'interprétation de pompages d'essai en nappe libre. Rapport B.R.G.M., 70 S.G.N. 359 HYD., 37 p., 8 fig., 3 pl.
- 8a - BONTE A. (1961) .- Les concrétions siliceuses de l'Oxfordien-Argovien des Ardennes, le problème de la silice des roches sédimentaires. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXXI, p. 101-104.
- 8b - BONTE A. (1962) .- Les formations noduleuses et la reprise sous-marine des sédiments, dans "Phénomènes en relation avec les seuils". a) Les seuils et la sédimentologie. 87 ème Congrès des Sociétés savantes, p. 855-858, 2 fig.
- 8c - BONTE A. (1969) .- Le Boulonnais, dans Géologie du Nord de la France. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXXIX, p. 23-46, 2 fig. 1 ann.

- 9 - BOUROZ A. (1956) .- Contribution à l'étude des failles épi-crétacées de l'Artois. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXVI, p. 51-62.
- * 10 - BREMOND R. (1965) .- Contribution à l'interprétation des mesures de débit et de rabattement dans les nappes souterraines. Gauthier-Villars, Paris, 118 p., 54 fig., 4 ann.
- 11 - B.R.G.M. - D.S.G.L./G.P.H. (1968) .- La géophysique au service de la recherche des eaux souterraines. 8 p., 1 tabl.
- * 12a - B.R.G.M. (1966) .- Formulaire de l'hydrogéologue, 1er cahier. Rapport B.R.G.M., D.S. 66 A 24, 110 p.,
- * 12b - B.R.G.M. (1968) .- Formulaire de l'hydrogéologue, 2ème cahier. Rapport B.R.G.M., 68 S.G.L. 202 HYD., 78 p.
- * 12c - B.R.G.M. (1968) .- Hydrogéologie, méthodologie et études de synthèse, catalogue méthodique des rapports d'intérêt général du B.R.G.M. ; services d'hydrogéologie (1963 à 1967) et département d'hydrogéologie (1968). Rapport B.R.G.M., 68 S.G.L. 201 HYD., 19 p.
- 13a - BRIQUET A. (1919) .- Turonien supérieur et Sénonien inférieur dans le Nord de la France. Ann. Soc. géol. Nord, t. XLIV, p. 127-137.
- 13b - BRIQUET A. (1922) .- Carte tectonique de l'Artois et des régions voisines. Congrès géol. intern., XIIIème session, Belgique, p. 387-422, 6 fig., 1 pl.
- 14a - BUSSON G. (1969) .- Rôle et importance des diagraphies dans l'étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Sciences de la Terre, t. XIV, n° 3, p. 239-288, 25 fig.
- 14b - BUSSON G. (1971) .- Cours sur les diagraphies. Institut des Sciences appliquées (Géotechnique), Université des Sciences et Techniques de Lille.
- * 15 - CAMBIER P., DOUVRAIN P., LEROUX E., RICOUR J. et WATERLOT G. (1962) .- Inventaire des ressources hydrauliques des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Feuille topographique au 1/20 000 de Cambrai (n° 36), coupures 1-2-3. Données hydrogéologiques acquises à la date du 15 novembre 1961. Rapport B.R.G.M., A 1969, 31 p., 6 fig., 5 ann.
- * 16 - CARON B., CHATENET B., DELLERY B., LEVY A. et SOULIEZ G. (1960) .- Inventaire des ressources hydrauliques des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Feuilles topographiques au 1/20 000 de Guines 7-8 et Cassel 5. Données hydrogéologiques acquises à la date du 30 septembre 1959. Rapport B.R.G.M., A 1608, 39 p., 6 fig., 7 ann.
- * 17a - CASTANY G. (1960) .- Etude de l'infiltration. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXX, p. 277-281, 3 fig., 4 tabl.

- * 17b - CASTANY G. (1963) .- Traité pratique des eaux souterraines. Dunod, Paris, 657 p.
- 18 - CAULIER P. (1971) .- Corrélations par diagraphies dans le Jurassique et le Crétacé du Nord de la France. Caractéristiques hydrauliques de la nappe de la craie sous Lille. D.E.A. géologie appliquée, Lille, 65 p., 10 fig., 5 ann., 2 tabl.
- 19a - CAYEUX L. (1890) .- Mémoire sur la craie grise du Nord de la France. Ann. Soc. géol. Nord, t. XVII, p. 105-141, 1 tabl. 1 pl., 1 app.
- 19b - CAYEUX L. (1890) .- Forage de la ville d'Hazebrouck. Nouveaux documents sur la faune de l'Argile des Flandres. Ann. Soc. géol. Nord, t. XVII, p. 272-283, 1 tabl.
- 19c - CAYEUX L. (1890) .- Etude micrographique de la craie des environs de Lille. Dièves à *Inoceramus labiatus*. Ann. Soc. géol. Nord, t. XVII, p. 342-381, 1 pl.
- 20 - CELET P. (1969) .- Géologie du Cambrésis et des régions avoisinantes, dans Géologie du Nord de la France. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXXIX, p. 91-102, 5 fig.
- 21 - C.F.P., C.O.P.E.S.E.P., R.A.P., S.N.P.A. (1965) .- Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXXV, p. 273-281, 4 tabl.
- * 22 - CORNET G. (1971) .- Formation professionnelle. B.R.G.M., hydrogéologie, niveau II, 112p., 45 fig.
- * 23 - COTTEZ S. et DASSONVILLE G. (1965) .- Carte de la surface piézométrique de la nappe de la craie dans la région Nord (échelle 1/200 000). Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 65 A 49, 12 p., 1 carte.
- * 24 - CRAMPON N., KARCHE J.P., PROST A., SCHNEIDER J.L., TRENOUS J.Y., DELLERY B. et GALLE-CAVALLONI H. (1958) .- Inventaire des ressources hydrauliques des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Feuille topographique au 1/20 000 d'Arras (n° 26), coupures n° 3-4. Observations hydrogéologiques sur les eaux souterraines effectuées en septembre 1958. Rapport B.R.G.M., A 1385, 27 p., 8 fig., 5 ann.
- * 25a - CREMILLE L. et RAMON S. (1971) .- Cours d'hydrologie. Institut des Sciences appliquées (Géotechnique), Université des Sciences et Techniques de Lille.
- * 25b - CREMILLE L., DASSONVILLE G., RAMON S., SOULIEZ G. et WATERLOT G. (1970) .- Hydrogéologie dans la région du Nord. Ann. Soc. géol. Nord, t. XC, fasc. 4, p. 429-442, 7 fig.
- 26 - DANONNE R. et DESBRANDES R. (1968) .- Notions de diagraphies. Publ. de l'I.F.P., 55 p., 31 fig.

- * 27a - DASSONVILLE G., THEILLIER P. et WATERLOT G. (1963) .- Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 1er mai 1963 sur le territoire de la feuille topographique au 1/20 000 de Cambrai (n° 36), coupure n° 4. Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 63 A 41, 45 p., 15 fig., 4 ann.
- * 27b - DASSONVILLE G., DESOIGNIES J., ROSSIGNOL F., THEILLIER P. et WATERLOT G. (1964) .- Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 15 janvier 1964 sur le territoire des feuilles topographiques au 1/20 000 de St Amand (n° 21), coupures 3-4-7-8, Crespin (n° 22), coupures n° 1-5. Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 64 A 20, 44 p., 7 fig., 16 ann.
- * 27c - DASSONVILLE G. (1965) .- Etude hydrogéologique des bassins de la Selle et du Haut-Escaut. (Rapport préliminaire). Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 65 A 6, 49 p., 6 fig., 9 ann.
- * 27d - DASSONVILLE G., FONTENIER B. et ROSSIGNOL F. (1966) .- Données hydrogéologiques sur le territoire de la feuille topographique au 1/50 000 d'Arras (n° 26). Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 66 A 22, 46 p., 7 fig., 11 ann.
- * 27e - DASSONVILLE G. avec la collaboration de FONTENIER B., PLAT R., ROSSIGNOL F., SYSSAU A. et VIALA J. P. (1967) .- Données hydrogéologiques sur le territoire des feuilles topographiques au 1/20 000 et 1/25 000 de Guines 3-4-5-6-7-8, Cassel 5, Desvres 1 à 8, St Omer 1 à 8, Fruges 2-3-4-8, Lillers 1-2-5. Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 67 A 10, 69 p., 4 fig., 9 ann.
- * 27f - DASSONVILLE G., FONTENIER B. et LHEUREUX L. (1968) .- Mise à jour des données hydrogéologiques sur le territoire de la feuille topographique au 1/50 000 de Béthune (n° 19). Rapport B.R.G.M., 68 S.G.L. 103 N.P.A., 27 p., 3 fig., 5 ann.
- * 28 - DELANGHE P., DESOIGNIES J., ROSSIGNOL F. et WATERLOT G. (1964) .- Données hydrogéologiques et géologiques acquises en 1963-64 sur le territoire de la feuille topographique au 1/20 000 de Cassel (n° 7), coupures 6 et 7. Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 64 A 40, 22 p., 8 fig., 7 ann.
- 29 - DELATTRE C. (1969) .- Les grands traits géologiques de l'Artois, dans Géologie du Nord de la France. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXXIX, p. 79-90, 4 fig.
- * 30a - DELLERY B., RICOUR J., WATERLOT G. avec la collaboration de GALLE-CAVALLONI H. (1961) .- Essai de détermination du potentiel de la nappe de la craie dans la région de Calais (Pas-de-Calais). (Rapport préliminaire). Rapport B.R.G.M. A 1850, 43 p., 5 fig., 6 ann.
- * 30b - DELLERY B., LEROUX E., PIACZINSKI M., RICOUR J. et WATERLOT G. (1961) .- Inventaire des ressources hydrauliques des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Feuilles topographiques au 1/20 000 de Sangatte 8, Calais 5, Marquise 4, Guines 1-2. Rapport B.R.G.M., A 1949, 26 p., 7 fig., 6 ann.

- 31 - DESBRANDES R. (1968) .- Théorie et interprétation des diagraphies. Coll. "Science et technique du pétrole", n° 13, 1 vol., 545 p.
- * 32 - DESOIGNIES J., ROSSIGNOL F. avec la collaboration de FAURE A. et SANGNIER P. (1965) .- Feuille topographique au 1/20 000 de Lillers (n° 18) 3-4. Données hydrogéologiques et géologiques acquises à la date du 31 octobre 1964. Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 65 A 40, 23 p., 6 fig., 4 ann.
- 33a - DESTOMBES J. P. (1960) .- Déformation subies par les assises crétacées dans la partie septentrionale du Boulonnais. Un nouveau sondage profond à Escalles (cap Blanc-Nez). (Feuille de Marquise au 1/50 000). Extrait du Bull. Carte géol. France, n° 261, t. LVII, Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1959, 5 p., 2 fig.
- 33b - DESTOMBES J. P. et P. (1963) .- L'anticlinal des Quénocs, au cap Blanc-Nez (Pas-de-Calais). Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXXIII, p. 47-56, 3 fig., 1 carte.
- * 33c - DESTOMBES J. P., DEZWARTE J. M., NAPIAS J. C., ROSSIGNOL F. et SYSSAU A. (1968) .- Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 31/12/1967 sur le territoire du Bas-Boulonnais (Pas-de-Calais). Rapport B.R.G.M., 68 S.G.L. 077 N.P.A., 76 p., 10 fig., 8 ann.
- * 34a - DEZWARTE J. M., GALLE-CAVALLONI H., LEROUX E., RICOUR J. et WATERLOT G. (1958) .- Inventaire des ressources hydrauliques des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Feuille topographique au 1/20 000 de Valenciennes (n° 28), huitième de feuille n° 5. Observations hydrogéologiques sur les eaux souterraines effectuées en février et mars 1957 et mars 1958. Rapport B.R.G.M., A 1326, 22 p., 6 fig., 4 ann.
- * 34b - DEZWARTE J. M., GALLE-CAVALLONI H., LEROUX E., RICOUR J. et WATERLOT G. (1959) .- Inventaire des ressources hydrauliques des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Feuille topographique au 1/20 000 de Valenciennes (n° 28) coupures n° 1-2. Observations hydrogéologiques sur les eaux souterraines effectuées d'avril à décembre 1958. Rapport B.R.G.M., A 1441, 67 p., 14 fig., 7 ann.
- * 34c - DEZWARTE J. M., PLAT R. et SYSSAU A. (1965) .- Le Dôme du Mélantois. Données géologiques et hydrogéologiques. Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 66 B 5, 26 p., 9 pl.
- * 35a - EMSELLEM Y., DASSONVILLE G. et DEZWARTE J. M. (1964) .- Interprétation des essais de débit réalisés en 1960 et 1961 dans la vallée de la Sensée (Nord). Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 64 A 7, 33 p. 5 ann., 1 pl., 1 rapport annexe.
- * 35b - EMSELLEM Y. (1966) .- Les transferts de pression entre nappes et la drainance dans les ensembles aquifères hétérogènes. Chron. d'hydrogéologie, n° 11, p. 131-152, 9 fig.
- * 36a - FORKASIEWICZ J. (1969) .- Interprétation des données des pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères. Aide-Mémoire. Rapport B.R.G.M., 69 S.G.L. 293 HYD. 35 p., 4 fig., 5 pl., 1 table, 1 add.

- * 36b - FORKASIEWICZ J. (1970) .- Etablissement du programme des pompages d'essai. Rapport B.R.G.M., 70 S.G.N. 115 HYD., 16 p., 2 fig.
- * 37 - GERIN B. (1966) .- Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin de la Canche. Thèse 3ème cycle, Paris, 181 p., 28 tabl., 32 pl., 36 graph.
- 38 - GIGNOUX M. (1960) .- Géologie stratigraphique. 5ème édition complétée d'un addendum par Léon Moret. Masson, 759 p., 155 fig.
- 39a - GOSSELET J. (1902) .- Observations sur la sédimentation de la craie. Réflexions sur la craie congloméroïde et sur les bancs durcis et verdis. Ann. Soc. géol. Nord, t. XXXI, p. 63-79, 3 fig.
- 39b - GOSSELET J. (1904) .- Les assises crétaciques et tertiaires dans les fosses et sondages du Nord de la France (fasc. 1). Région de Douai, dans Etude des gîtes minéraux de la France, 141 p., 11 fig., 12 tabl.
- 39c - GOSSELET J. (1905) .- Les Assises crétaciques et tertiaires dans les fosses et sondages du Nord de la France (fasc. 2). Région de Lille, dans Etude des gîtes minéraux de la France, 98 p., 11 fig., 12 tabl.
- 39d - GOSSELET J. (1906) .- Nouvelles observations sur la sédimentation de la craie. La meule d'Auby et de Courcelles. Ann. Soc. géol. Nord, t. XXV, p. 125-132.
- 39e - GOSSELET J. et DOLLE (1907) .- Sur le terrain crétacique du Boulonnais et du Pays de Licques. Extrait du Bull. Soc. géol. France, 4ème série, t. VII, p. 506-511, 2 fig.
- 39f - GOSSELET J. (1911) .- Les assises crétaciques et tertiaires dans les fosses et sondages du Nord de la France (fasc. 3). Région de Béthune, dans Etude des gîtes minéraux de la France, 181 p., 27 fig., 15 tabl., 3 ann.
- 39g - GOSSELET J. (1912) .- Les assises crétaciques et tertiaires dans les fosses et sondages du Nord de la France (fasc. 4). Région de Valenciennes, dans Etude des gîtes minéraux de la France, 222 p., 58 fig., 13 tabl., 1 ann.
- 39h - GOSSELET J. avec la collaboration de DUBOIS G. (1922) .- Les assises crétaciques et tertiaires dans les fosses et sondages du Nord de la France (fasc. 5). Etude topographique du soubassement paléozoïque des assises crétaciques et tertiaires dans la région du Nord de la France, 120 p., 4 tabl.
- 40 - HOSSIN A. (1969) .- Interprétation des diagraphies en zone carbonatées et évaporitiques. Revue de l'A.F.T.P., n° 193, p. 47-69, 23 fig.
- 41a - INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES (1970) .- Hydrogeological map of the Chalk and Lower Greensands of Kent. Sheet 1 : Chalk, regional hydrological characteristics and explanatory notes.

- * 41b - INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES (1971) .- Borehole logging investigations in the chalk of the Lambourn and Winterbourne valleys of Berkshire. Research report, n° 5, 23 p., 12 fig., 2 pl., 2 app.
- 42 - JUIGNET P. (1971) .- Modalités du contrôle de la sédimentation sur la marge armoricaine du bassin de Paris à l'Aptien-Albien-Cénomaniens. Bulletin du B.R.G.M., (deuxième série), section I, n° 3, p. 113-126, 4 fig., 1 tabl.
- 43 - LEGRAND R. (1968) .- Le massif du Brabant. Mém. explicatif des cartes géologiques et minières de la Belgique, n° 9, 148 p., 9 fig., 5 pl.
- 44a - LEROUX E. et PRUVOST P. (1948) .- A propos du tunnel sous la Manche. Géologie du Pas-de-Calais. Extrait de "Travaux", juillet 1948, 15 p., 4 fig., 1 tabl.
- * 44b - Inventaire des ressources hydrauliques des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Feuille topographique au 1/20 000 de Valenciennes (n° 28), coupures n° 3-4. Observations hydrogéologiques sur les eaux souterraines effectuées d'avril 1956 à décembre 1958. Rapport B.R.G.M., A 1422, 38 p., 9 fig., 6 ann.
- * 44c - LEROUX E., RICOUR J., THEILLIER P. et WATERLOT G. (1961) .- Inventaire des ressources hydrauliques des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Feuille topographique au 1/20 000 de Valenciennes (n° 28), coupures 6-7-8. Données hydrogéologiques acquises à la date du 24 novembre 1961. Rapport B.R.G.M., A 1914, 44 p., 9 fig., 6 ann.
- 45 - MAGNE J. et POLVECHE J. (1962) .- Le Crétacé de la fosse 10 d'Oignies (Nord). Micropaléontologie et stratigraphie. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXXII, p. 127-134, 2 fig.
- * 46 - MANIA J. (1971) .- Contribution à l'étude de la nappe des sables landéniens en Flandres franco-belges et dans le bassin d'Orchies. Thèse 3ème cycle, Lille, 161 p., 29 fig., 43 tabl., 10 pl.
- * 47a - MARGAT J. (1963) .- Application des cartes hydrogéologiques à l'étude de la perméabilité et de la transmissivité des terrains aquifères. Analyse des surfaces piézométriques. Rapport B.R.G.M., D.S. 63 A 98, 18 p., 13 fig.
- 47b - MARGAT J. (1964) .- Notions générales sur l'hydraulique des puits. Guides pratiques d'hydrogéologie. Rapport B.R.G.M., D.S. 64 A 60, p. 1-89, 22 fig.
- * 47c - MARGAT J. (1971) .- Utilisation des réservoirs aquifères. Aide-mémoire sur les bases physiques de la gestion des nappes souterraines. Rapport B.R.G.M., 71 S.G.N., 414 HYD., 32 p., 15 fig.

- * 47d - MARGAT J. (1972) .- Evaluation des ressources hydrauliques. Méthode d'implantation d'un réseau piézométrique général. Rapport B.R.G.M., 72 S.G.N. 126 AME, 54 p., 21 fig.
- 48a - MARLIERE R. (1939) .- La transgression albienne et cénomaniennne dans le Hainaut. Thèse, Lille, p. 342-377.
- 48b - MARLIERE R. (1964) .- Aux confins cénomano-turonien ; la zone à Actinocamax plenus. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXXIV, p. 257-264, 3 fig.
- 48c - MARLIERE R. (1965) .- Les connexions du bassin crétacé de Mons au bassin de Paris. Extrait du Bulletin de l'Académie royale de Belgique, bulletin de la classe des sciences, 5ème série, t. LI, p. 604-615, 5 fig.
- 49 - OLRV A. (1903) .- Travaux d'exploitation et de recherche exécutés dans le bassin houiller du Boulonnais et dans la région comprise entre le bassin du Pas-de-Calais et la mer. Bull. des services carte géol. France, n° 100, t. XV, p. 335-465, 18 fig., 2 pl.
- 50 - POLVECHE J. (1960) .- Observations préliminaires sur le Crétacé supérieur traversé par quelques forages récents. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXIX, p. 190-202, 1 fig.
- 51 - POMEROL C. (1961) .- Existence de deux provinces pétrographiques dans le bassin de Paris à l'Albien et au Cénomanienn. Compte-rendu sommaire des séances de la Soc. géol. France, n° 10, p. 286.
- * 52a - RAMON S. (1970) .- A propos de la méthode de Dagan. Bulletin du B. R. G. M., deuxième série, section III, n° 1, p. 55-58, 2 fig.
- * 52b - RAMON S. (1971) .- Utilisation de la loi de Gauss en cartographie hydrochimique pour la mise en évidence des hétérogénéités. Rapport B.R.G.M., 71 S.G.N. 074 HYD., 5 p., 3 fig., 1 ann.
- * 52c - RAMON S. et DELOZE J. (1971) .- Etude de la nappe de la craie sous Lille (Nord) - (1er rapport). Position des nappes de la craie et des sables landéniens. Rapport B.R.G.M., 71 S.G.N. 183 N.P.A., 11 p., 1 fig., 4 ann.
- * 52d - RAMON S. et CAULIER P. (1971) .- Etude de la nappe de la craie sous Lille (Nord) - (2ème rapport). Caractéristiques hydrauliques de l'aquifère. Rapport B.R.G.M., 71 S.G.N. 222 N.P.A., 11 p., 4 ann.
- * 52e - RAMON S. et VOLCKCRICK E. (1972) .- Haute-Lys. Carte piézométriques des eaux souterraines en décembre 1971. Note B.R.G.M., 72 N.P.A. 03, 6 p., 2 fig.
- * 52f - RAMON S. et FUMERY J.M. (1972) .- Un cas d'application de la loi de 1935. Exemple de la région du Nord - Pas-de-Calais. Note B.R.G.M., 72 N.P.A., 017, 7 p., 2 fig.

- * 52g - RAMON S. (1972) .- Etude de la nappe de la craie sous Lille (Nord) - (3ème rapport). Conception du schéma hydrogéologique et élaboration d'un modèle mathématique général de simulation de la nappe à 600 mailles. Rapport B.R.G.M., 72 S.G.N. 026 N.P.A., 23 p., 4 fig., 12 ann.
- * 53 - RAMPON G., TROMPETTE J., BALTHAZARD J. et DEZWARTE J.M. (1959) .- Inventaire des ressources hydrauliques des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Feuille topographique au 1/20 000 de Cambrai n° 36. Coupures n° 5-6-7. Données hydrogéologiques acquises à la date du 30 septembre 1959. Rapport B.R.G.M., A 1551, 50 p., 11 fig., 6 ann.
- 54 - ROGEZ J.M. (1971) .- Bibliographie sur la craie orientée vers les problèmes de géotechnique. D.E.A., géologie appliquée, Lille, 31 p., 11 fig., 4 ann.
- * 55 - ROSSIGNOL F. avec la collaboration de DEZWARTE J.M. (1963) .- Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 1er octobre 1962 sur le territoire de la feuille topographique au 1/20 000 de St-Amand (coupures n° 1-2-5-6). Rapport B.R.G.M., D.S.G.R. 63 A 8, 53 p., 11 fig., 11 ann.
- * 56 - ROUSSELOT D. (1969) .- Introduction à l'hydrogéologie mathématique. Stage de recyclage organisé par l'E.N.S.M. Paris.
- 57 - SCHLUMBERGER (1969) .- Log interpretation charts. 76 p.
- * 58 - SCHNEEBELI G. (1966) .- Hydraulique souterraine. Eyrolles, Paris, 362 p., 178 fig.
- * 59 - SCHOELLER H. (1962) .- Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson, Paris, 642 p., 187 fig.
- 60 - SERRA O. (1970) .- Diagraphies et stratigraphie. Colloque sur les méthodes et les tendances de la stratigraphie. Comité français de Stratigraphie, 86 p., 41 fig.
- 61 - SOMME J. (1967) .- Tectonique récente dans la région de Lille : pays de Weppes et Mélantois occidental. Extrait de la Revue de Géomorphologie dynamique, n° 2.
- 62 - S. P. E. (1964) .- La prospection dans les sondages par les méthodes Schlumberger. 168 p..
- * 63a - TRUPIN G. (1964) .- Manuel pratique d'essai de pompage (régime transitoire). Guides pratiques d'hydrogéologie. Rapport B.R.G.M., D. S. 64 A 60, p. 90-156, 16 fig., 7 ann.
- * 63b - TRUPIN G. (1969) .- Manuel pratique de pompages d'essai. (2ème édition). Rapport B.R.G.M., 69 S.G.L. 258 HYD., 119 p. 16 fig., 5 photos, 7 ann.

- 64 - VERGNAUD-GRAZZINI C. (1968) .- Problèmes posés par l'étude géodynamique des microfaunes actuelles et son application à la stratigraphie, la paléoécologie, la paléoclimatologie, et la paléothermométrie. Chronique dans Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique, vol. X, fasc. 4, p. 397-406.
- 65 - VESSEREAU A. (1964) .- La statistique. Coll. "Que sais-je ?", Le point des connaissances actuelles, n° 281, 125 p.
- 66a - WATERLOT G. (1969) .- Aperçu géologique de la région de Lille, dans Géologie du Nord de la France. Ann. Soc. géol. Nord, t. LXXXIX, p. 67-77, 4 fig.
- 66b - WATERLOT G. (1969) .- Cours de stratigraphie, certificat de géologie historique. Université des Sciences et Techniques de Lille.
- * 66c - WATERLOT G. (1970) .- Cours d'hydrogéologie, certificat de géologie appliquée. Université des Sciences et Techniques de Lille.

