

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

Service géologique régional

PAYS-DE-LA-LOIRE

10, rue Henri-Picherit

44300 Nantes

Tél.: (40) 74.49.00 - 74.56.75 - 74.94.49

Département hydrogéologie

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex

Tél.: (38) 63.80.01

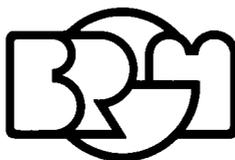
L'EAU SOUTERRAINE DANS LE MASSIF ARMORICAIN RÉGION BRETAGNE

Compte rendu de fin d'étude

par

H. TALBO et P. VAUBOURG

ANNEXES



Délégation générale
à la
recherche scientifique et technique

*ACTION CONCERTÉE : Valorisation des ressources
du sous-sol*

Décision d'aide n° 78.07.0752

Mars 1980

80 SGN 146 PAL

A N N E X E 1

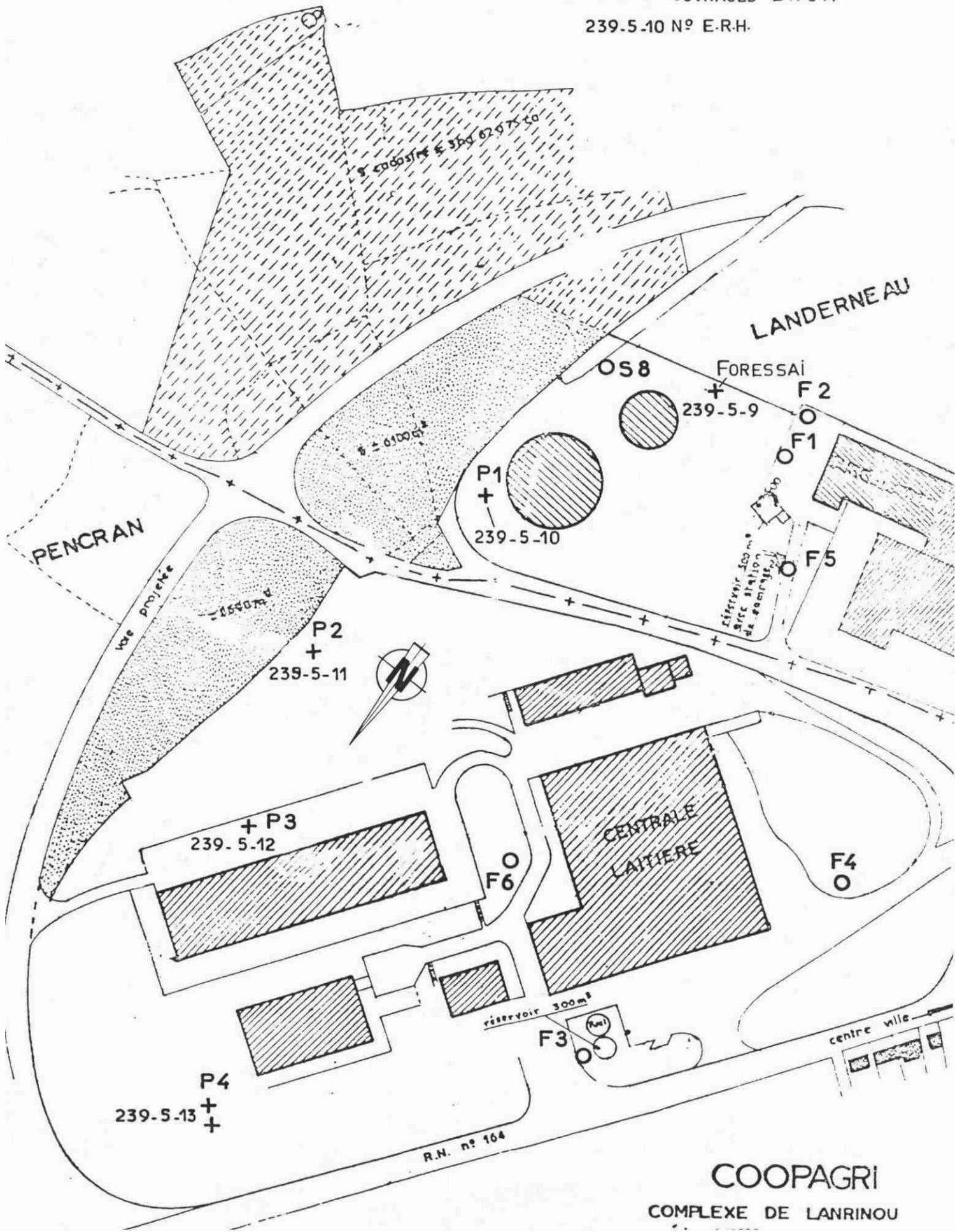
COUPES DES FORAGES

SITE 1 - LANDERNEAU - 29

O F2 OUVRAGES COOPAGRI

+ P1 OUVRAGES B.R.G.M.

239.5.10 N° E.R.H.



COOPAGRI

COMPLEXE DE LANRINOU

OUVRAGES PREEXISTANTS (Coopagri)

On ne dispose pas de coupes géologiques pour ces ouvrages, sauf les indications du foreur indiquant qu'ils avaient tous rencontré des "schistes noirs" et en général du quartz.

Renseignements connus

F1 - Profondeur 49 m

- première arrivée d'eau : 16 m
- débit instantané en fin de foration : 18 m³/h (indication foreur)
ou 35 m³/h (indication maître d'ouvrage)

On a retenu dans le texte la valeur la moins optimiste

- diamètre de foration (marteau fond-de-trou) : 140 mm
- équipement : PVC lanterné Ø 110 mm

F2 - Profondeur : 51 m

- débit instantané en fin de foration : 50 m³/h
- diamètre de foration (m.f.t.) 216 mm
- équipement : acier à lumières rectangulaires Ø 165 mm

F3 - Profondeur : 70 m

- première arrivée d'eau : 16 m
- débits instantanés en cours de foration : à 30 m - 16 m³/h
40 m - 20 m³/h
50 m - 30 m³/h
70 m - 40 m³/h
- diamètre de foration (m.f.t.) : 216 mm
- équipement : acier à lumières rectangulaires Ø 160 x 168 mm

F4 - Profondeur : 49 m

- débit instantané en fin de foration : 12 m³/h
- diamètre de foration (m.f.t.) : 140 mm
- équipement : PVC lanterné Ø 110 mm

F5 - Profondeur : 63 m

- première arrivée d'eau : 13 m
- débits instantanés en cours de foration : à 30 m : 6 m³/h
63 m : 9 m³/h
- diamètre de foration (m.f.t.) : 140 mm
- équipement : PVC lanterné Ø 110 mm

F6 - Profondeur : 70 m

- première arrivée d'eau : 32 m
- débits instantanés en cours de foration : à 49 m : 4 m³/h
61 m : 6,6 m³/h
70 m : 6 m³/h
- diamètre de foration (m.f.t.) : 140 mm
- équipement : PVC lanterné Ø 110 mm

Antérieurement à ces forages, un certain nombre de sondages avaient été réalisés au wagon-drill (marteau hors-trou). Ils sont rebouchés et les informations les concernant sont trop vagues pour être prises en considération, à l'exception de S8 qui subsiste :

- Profondeur : environ 25 m
- débit instantané en fin de foration : > 20 m³/h
- diamètre de foration (marteau hors-trou) : 92 mm
- équipement : tubage PVC Ø 50 mm sur quelques mètres

OUVRAGES REALISES DANS LE CADRE DU CONTRAT DE RECHERCHE

- FORESSAI - 239-5-9

Profondeur : 65 m

Coupe :

- 0,00 à 0,30 m - Terre végétale et remblai
- 0,30 à 1,80 m - Argile jaunâtre rubéfiée
- 1,80 à 14,00 m - Schiste noir très tendre avec quelques passages plus durs
- 14,00 à 32,00 m - Schiste noir fissuré riche en pyrite.
- 32,00 à 35,00 m - Schiste noir dur, filonnets de quartz blanc patiné par l'hydroxyde ferrique ; un peu moins de pyrite
- 35,00 à 38,00 m - Schiste noir moyennement dur avec rares cristaux de pyrite
- 38,00 à 41,00 m - id, mais plus dur
- 41,00 à 48,50 m - Schiste noir dur avec quelques passées plus tendres

48,50 à 50,00 m - id, mais tendre
50,00 à 59,00 m - Schiste noir dur avec quelques passées plus tendres
59,00 à 62,00 m - Schiste noir dur mais fissuré
62,00 à 65,00 m - id, mais avec un peu de quartz à cristaux pyramidés.

Débits instantanés en cours de foration

12 m - 1ère venue d'eau
14 m - 14 m³/h
32 m - 29 m³/h
37 m - 29 m³/h
40 m - 30 m³/h
52 m - 40 m³/h
59 m ≈ 60 m³/h
62 m ≈ 70 m³/h
65 m ≈ 80 m³/h

Diamètres de foration (m.f.t.) : 216 mm de 0 à 14 m
158 mm de 14 à 65 m

Equipement : tubage PVC plein Ø 171/180 mm de 0 à 13,75 m

- PI - 239-5-10

Profondeur : 59 m

Coupe :

0,00 à 0,50 m - Terre végétale et déblais
0,50 à 5,00 m - Schiste gréseux gris clair
5,00 à 8,00 m - Schiste gréseux dur grisâtre
8,00 à 14,00 m - Schiste gréseux grisâtre alternant avec des passées (notamment entre 8,50 à 9,00, 9,50 à 10,50, 11 à 12 et 13 à 14 m) de schiste graphiteux tendre
14,00 à 17,00 m - Schiste graphiteux avec quelques passées de schiste gréseux
17,00 à 20,00 m - Schiste graphiteux avec quelques filonnets de quartz blanc à traces d'hydroxydes ferrique.

20,00 à 38,50 m - Schiste noir relativement dur, à traces de chloritisation
38,50 à 40,50 m - Filon de quartz à cristaux pyramidés ; pyrite
40,50 à 41,50 m - Niveau scoriacé ; traces de minéralisation (sidérite?)
41,50 à 45,00 m - Micaschiste tendre gris clair
45,00 à 45,50 m - Nouveau niveau scoriacé id. ci-dessus
45,50 à 48,00 m - Schiste graphiteux, nombreux filonnets de quartz blanc
à cristaux pyramidés, riche en pyrite
48,00 à 49,50 m - Micaschiste très gras gris-clair
49,50 à 56,00 m - Schiste légèrement gréseux, gris, riche en quartz ;
pyrite
56,00 à 59,00 m - Quartzite très dur, très compact, gris, encore quelques
fissures.

Débits instantanés en cours de foration :

16 m - 1ère venue d'eau
31 m - 10 m³/h
45 m - 10,3 "
49 m - 11,1 "
52 m - 12,0 "
55 m - 12,5 "
59 m - 12,2 "

Diamètres de foration (marteau fond-de-trou) : 216 mm de 0 à 8 m
158 mm de 8 à 59 m

Equipement : tubage PVC plein Ø 152,4 / 160 mm de 0 à 14 m

- P2 - 239-5-11

Profondeur : 62 m

Coupe :

0,00 à 0,50 m - Terre végétale
0,50 à 5,00 m - Remblai
5,00 à 8,00 m - Schiste gris foncé à noirâtre totalement altéré en
argile ; traces d'humidité à partir de 6,50 m

- 8,00 à 14,00 m - Schiste altéré se débitant en blocs et plaquettes, riche en pyrite
- 14,00 à 15,00 m - Schiste très fissuré riche en pyrite ; l'eau est rouge vif ; le débit augmente très sensiblement
- 15,00 à 16,00 m - Niveau de schiste scoriacé très fortement aquifère
- 16,00 à 47,00 m - Schiste graphiteux gras moyennement altéré mais très fissuré se débitant en plaquettes dont toutes les coupures sont tapissées par de fins cristaux de pyrite
- 47,00 à 49,00 m - Nouveau niveau scoriacé
- 49,00 à 62,00 m - Schiste noir finement gréseux, moins altéré mais toujours fissuré avec quelques passées plus tendres (schiste graphiteux ?) notamment vers 52, 56 et 61 m. Peu de pyrite, pas de quartz

Débîts instantanés en cours de foration

13,5 m	-	1ère venue d'eau (2 m ³ /h)
14 m	-	8,5 m ³ /h
17 m	-	18,0 "
20 m	-	28,8 "
23 m	-	60,9 "
29 m	-	60,9 "
32 m	-	63,4 "
35 m	-	66,0 "
38 m	-	79,2 "
45 m	-	83,4 "
55 m	-	88,0 "
58 m	-	93,2 "
62 m	-	99,0 "

Diamètres de foration (marteau fond de trou) : 216 mm de 0 à 8 m
 158 mm de 8 à 62 m

Equipement : tubage PVC plein Ø 171/180 mm de 0 à 13 m

- P3 - 239-5-12

Profondeur : 59 m

Coupe :

- 0,00 à 1,00 m - Remblai
- 1,00 à 6,00 m - Argile gris-foncé, produit d'altération d'un schiste grisâtre
- 6,00 à 20,00 m - Schiste graphiteux altéré faiblement productif
- 20,00 à 33,00 m - Schiste graphiteux altéré riche en quartz hyalin (cristaux pyramidés) ; pyrite
- 33,00 à 42,00 m - Micaschiste très tendre, altéré ; eau grise laiteuse
- 42,00 à 59,00 m - Schiste fissuré riche en quartz laiteux assez fortement minéralisé : sidérite, pyrite

Débits instantanés en cours de foration : les débits n'ont pu être mesurés avec précision, ils ont été estimés à 2 m³/h vers 20 m de profondeur et 12 m³/h en fin de foration.

Diamètres de foration (marteau fond-de-trou) : 216 mm de 0 à 11 m
158 mm de 11 à 59 m

Equipement : tubage PVC plein Ø 171/180 mm de 0 à 12,8 m

- P4 - 239-5-13

Deux tentatives ont été faites, mais la méthode de foration utilisée (marteau fond-de-trou) n'a pas permis de descendre au-delà de 13 m

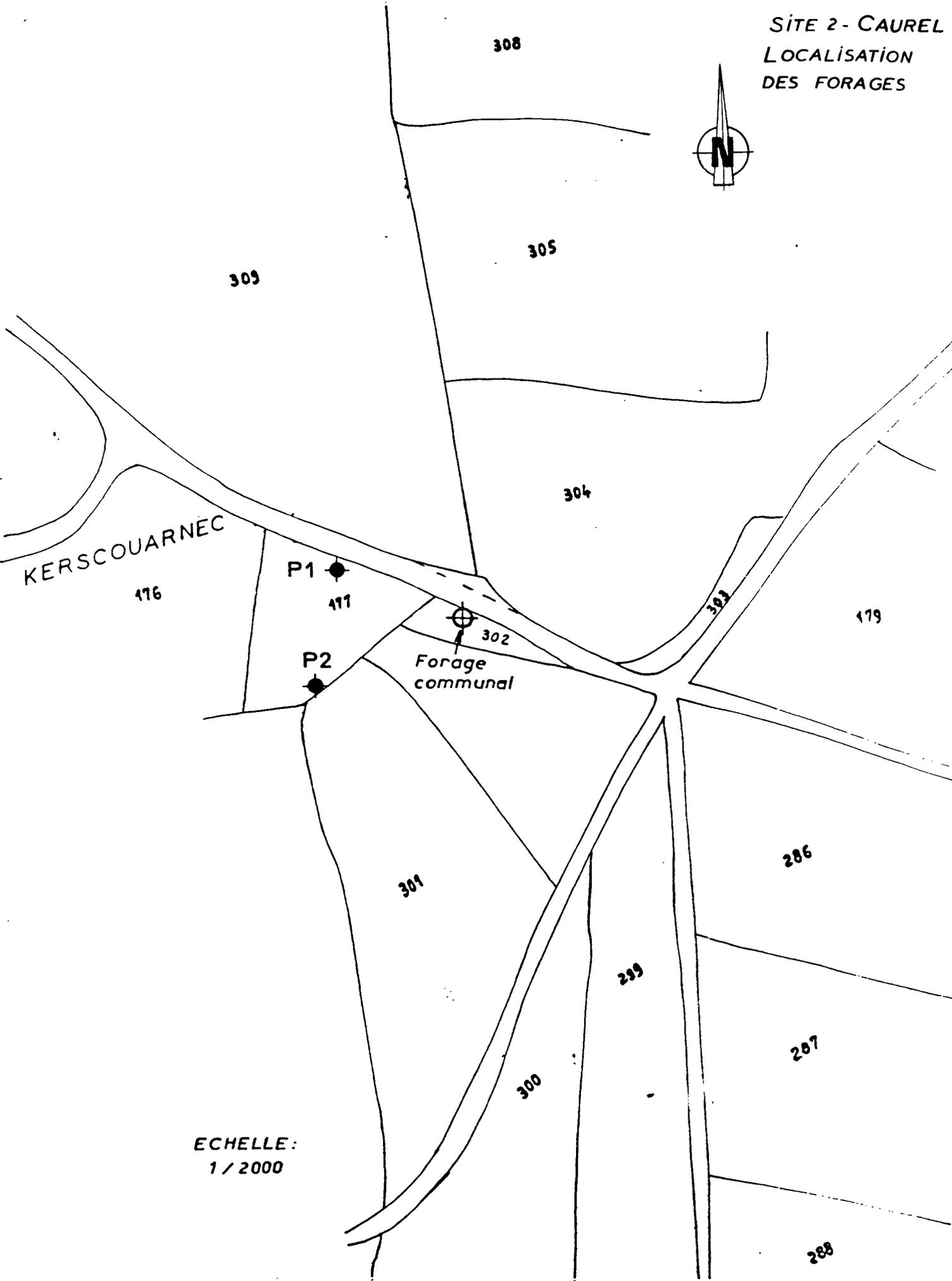
Coupe de la première tentative :

- 0,00 à 5,50 m - Argile rubéfiée mêlée de blocs (1 à 7 cm) de schiste gris traces d'humidité à 2 m ; lère venue d'eau vers 4 m
- 5,50 à 8,50 m - Argile marron-gris avec également quelques blocs comme ci-dessus
- 8,50 à 13,00 m - Argile grisâtre mêlée de menus blocs de schiste.

Coupe de la deuxième tentative : idem à ci-dessus, mais l'argile rubéfiée passe à 3,50 m sous un niveau à galets d'une ancienne terrasse de l'Elorn.

SITE 2 - CAUREL - 22

SITE 2 - CAUREL
LOCALISATION
DES FORAGES



ECHELLE:
1 / 2000

OUVRAGE PREEXISTANT

- Forage communal

Profondeur : 56 m

Coupe :

- 0,00 à 7,00 m - éboulis de pente
- 7,00 à 22,00 m - argile jaune sableuse
- 22,00 à 36,00 m - alternance de schistes et de grès quartzites - quartz abondant
- 36,00 à 38,00 m - quartz blanc laiteux
- 38,00 à 56,00 m - quartzo-phyllades gris noirs très durs

Débits instantanés en cours de foration :

- 17 m - 1ère venue d'eau
- 21 m - 0,5 m³/h
- 25 m - 5 "
- 33 m - 9 "
- 36 m - 18 "
- 53 m - 24 "

Diamètres de foration (marteau fond-de-trou) : 216 mm de 0 à 23 m
158 mm de 22 à 56 m

Équipement : tubage PVC Ø 112,5 x 125 mm, lanterné de 23 à 56 m

OUVRAGES REALISES DANS LE CADRE DU CONTRAT DE RECHERCHE

- P1

Profondeur : 43 m

Coupe :

- 0,00 à 1,00 m - Terre végétale, limon de coteau marron foncé
- 1,00 à 3,00 m - Schiste noirâtre altéré se débitant en blocs (1 à 15 cm) dans une argile gris-noir
- 3,00 à 4,00 m - Niveau gréseux de teinte rosâtre, quelques cristaux de quartz ; humidité et 1ère venue d'eau vers 4 m

- 4,00 à 9,00 m - Schiste noirâtre se débitant en blocs et plaquettes ; nombreux cristaux de quartz
- 9,00 à 15,00 m - Schiste gris-noir très fissuré
- 15,00 à 36,00 m - Alternance de schiste gréseux et de quartzite très dur, injecté de nombreux cristaux de pyrite
- 36,00 à 38,00 m - Schiste ardoisier noirâtre, nettement plus tendre, toujours riche en pyrite
- 38,00 à 43,00 m - Alternance de schiste gréseux, de grès quartzique et de quartzite très dur et très massif

Débits instantanés en cours de foration :

- 4 m - 1ère venue d'eau
- 5 m - 7,2 m³/h
- 15 m - 7,6 m³/h
- 20 m - 9,7 m³/h
- 25 m - 7,8 m³/h
- 28 m - 8,4 m³/h
- 31 m - 7,9 m³/h
- 34 m - 8,4 m³/h
- 36 m - 9,6 m³/h
- 39 m - 8,4 m³/h
- 43 m - 8,4 m³/h

Diamètres de foration (m.f.t.) : 216 mm de 0 à 14 m
158 mm de 14 à 43 m

Équipement : tubage PVC plein Ø 157 x 167 mm de 0 à 14 m

- P2

Profondeur : 47 m

Coupe :

- 0,00 à 5,00 m - Eboulis de pente
- 5,00 à 10,50 m - Schistes gris à rouille, altérés et fissurés
- 10,50 à 18,00 m - Quartzite noirâtre très dur
- 18,00 à 23,00 m - Schistes gréseux grès plus tendre
- 23,00 à 25,00 m - Quartzite dur, quartz hyalin

25,00 à 27,50 m - Niveau très fissuré à pyrite - argile

27,50 à 47,00 m - Alternance de schistes gréseux gris et de quartzites très durs.

Débits instantanés en cours de foration : les venues d'eau sont très faibles
le débit restant inférieur à
1 m³/h en fin de foration.

Diamètres de foration (m.f.t.) : 216 mm de 0 à 14 m

158 mm de 14 à 47 m

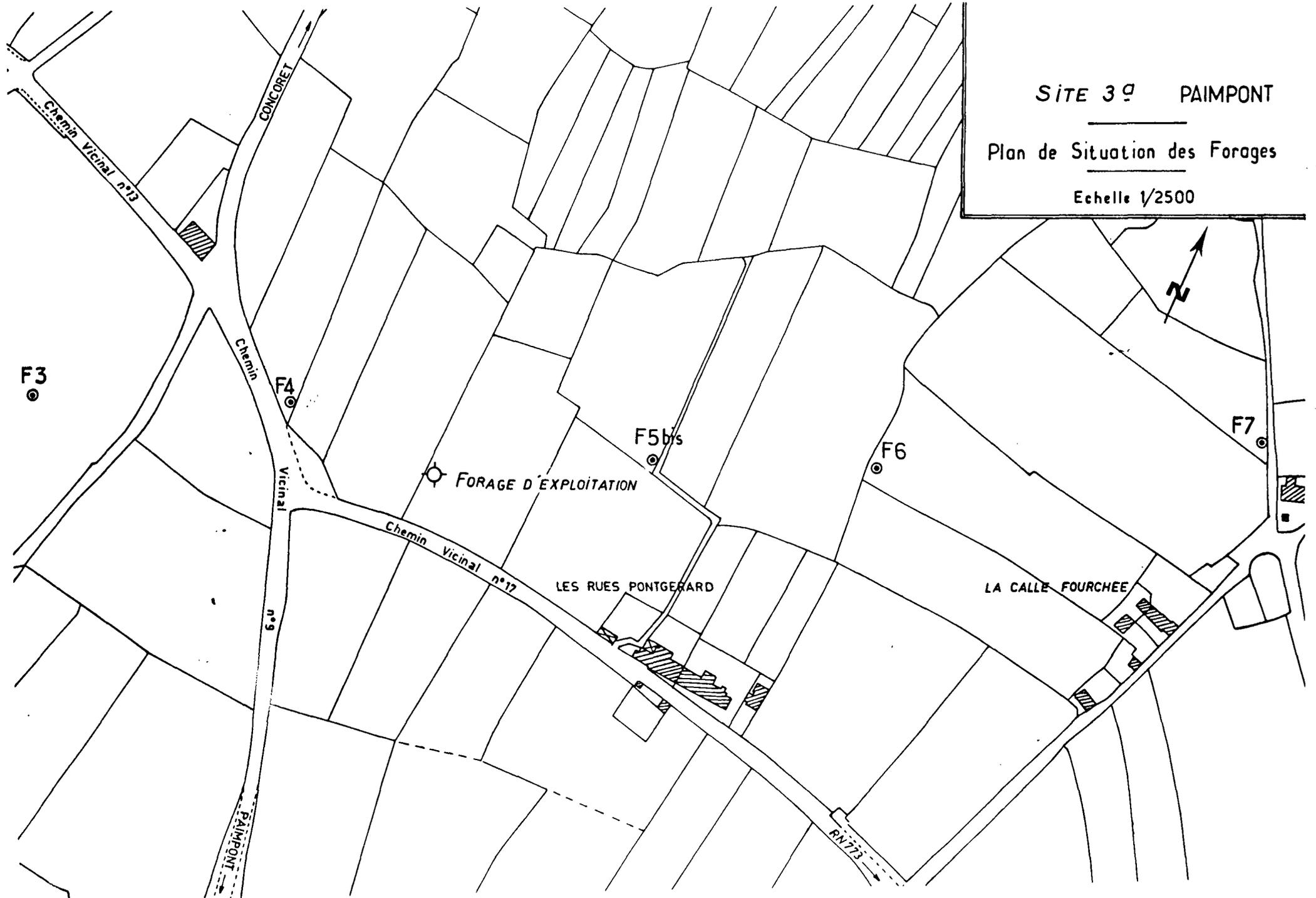
Équipement : tubage PVC plein Ø 157/167 mm de 0 à 14 m

SITE 3a - PAIMPONT - 35

SITE 3^e PAIMPONT

Plan de Situation des Forages

Echelle 1/2500



OUVRAGES PREEXISTANTS (syndicat intercommunal des eaux de la forêt de Paimpont)

Il n'y a pas eu d'ouvrage réalisé spécialement sur le site de Paimpont.

- F3

Profondeur : 79 m

Coupe :

- 0,00 à 14,30 m - Alternances de grès altérés et d'argile ocre
- 14,30 à 67,00 m - grès gris-verdâtre - alternances d'horizons durs et tendres, avec présence d'argile rouge - argile blanche entre 53,5 et 58 m
- 67,00 à 69,00 m - idem, mais prédominance des horizons durs

Débites instantanés en cours de foration :

- 21 m - 1ère venue d'eau
- 53 m - 11 m³/h
- 58 m - 13 "
- 67 m - 13,2 "
- 71,5 m - 15,8 "
- 76 m - 17,6 "

Diamètres de foration (m.f.t.) : 212 mm de 0 à 20 m
127 mm de 20 à 67 m
115 mm de 67 à 79 m

Équipement PVC Ø 110 mm de 0 à 56 m, lanterné de 5 à 57 m

- F4

Profondeur : 83,8 m

Coupe :

- 0,00 à 19,30 m - Alternances de grès altérés et d'argile jaune à rouge
- 19,30 à 51,00 m - grès durs gris-verdâtres, avec quelques passages plus

tendres - passage d'argile blanche à 44,5 m
51,00 à 76,00 m - alternances de grès altérés et d'argile
76,00 à 83,3 m - grès durs avec quelques petits passages altérés

Débits instantanés en cours de foration :

21,8 m - 1ère venue d'eau
40 m - 31,6 m³/h
44,5 m - 26,4 m³/h
52,9 m - 34 "
67 m - 29,7 "
80,5 m - 33,9 "
83,8 m - 33,9 "

Diamètres de foration (m.f.t.) : 212 mm de 0 à 20 m
127 mm de 20 à 83,8 m

Equipement : PVC Ø 110 mm, lanterné de 13 à 57 m

- F5 bis

Profondeur : 76 m

Coupe :

0,00 à 22,00 m - Grès d'abord blancs, puis gris, altérés mêlés à de l'argile jaune à rouge
22,00 à 49,00 m - idem avec quelques passages plus résistants
49,00 à 76,00 m - grès durs avec quelques petits passages tendres mêlés à de l'argile jaune.

Débits instantanés en cours de foration :

18 m - 1ère venue d'eau
31 m - 13,9 m³/h
35 m - 30,4 "
40 m - 30,4 "
41 m - 44 "
48 m - 33 "

58 m - 36,5 m³/h
64 m - 39,6 "
71,5 m - 36,5 "
76 m - 36,5 "

Diamètres de foration (m.f.t.) : 212 mm de 0 à 20 m
127 mm de 20 à 64 m
115 mm de 64 à 76 m

Equipement : PVC Ø 110 mm, lanterné de 20 à 64 m

- F6

Profondeur : 71,5 m

Coupe :

0,00 à 4,30 m - grès très altérés et argile rouge
4,30 à 9,70 m - grès gris-verdâtre, durs jusqu'à 8,30 m
9,70 à 40,00 m - alternances de grès durs et plus tendres mêlés à de
l'argile jaune à rouge
40,00 à 71,50 m - grès durs avec des petits passages altérés par fragments

Débits instantanés en cours de foration :

10,3 m - 1ère venue d'eau
27 m - 5,8 m³/h
32 m - 9,5 "
37 m - 13,2 "
41 m - 16,9 "
46 m - 19,8 "
49 m - 19,8 "
53,5 m - 23,7 "
58 m - 23,7 "
67 m - 23,7 "
71,5 m - 23,7 "

Diamètres de foration (m.f.t.) : 212 mm de 0 à 20 m
127 mm de 20 à 46,8 m
115 mm de 46,8 à 71,5 m

Équipement : PVC Ø 110 mm, lanterné de 1,5 à 37,5 m

- F7

Profondeur : 36 m

Coupe :

0,00 à 9,00 m - grès altérés, gris verdâtres jusqu'à 6,60 m, rouge à lie de vin jusqu'à 8,30 m, gris-verdâtre ensuite

9,00 à 36,00 m - grès durs gris-verdâtres avec quelques passages altérés - un passage gris-bleuté de 10,3 m à 12,2 m.

Débits instantanés en cours de foration :

17,5 m - 1ère venue d'eau

28 m - 5,2 m³/h

31 m - 7,9 m³/h

33 m - 6,6 m³/h

34 m - 7,2 m³/h

35 m - 7,2 m³/h

Diamètres de foration (m.f.t.) : 212 mm de 0 à 12 m
127 mm de 12 à 36 m

- Forage d'exploitation

Profondeur : 80 m

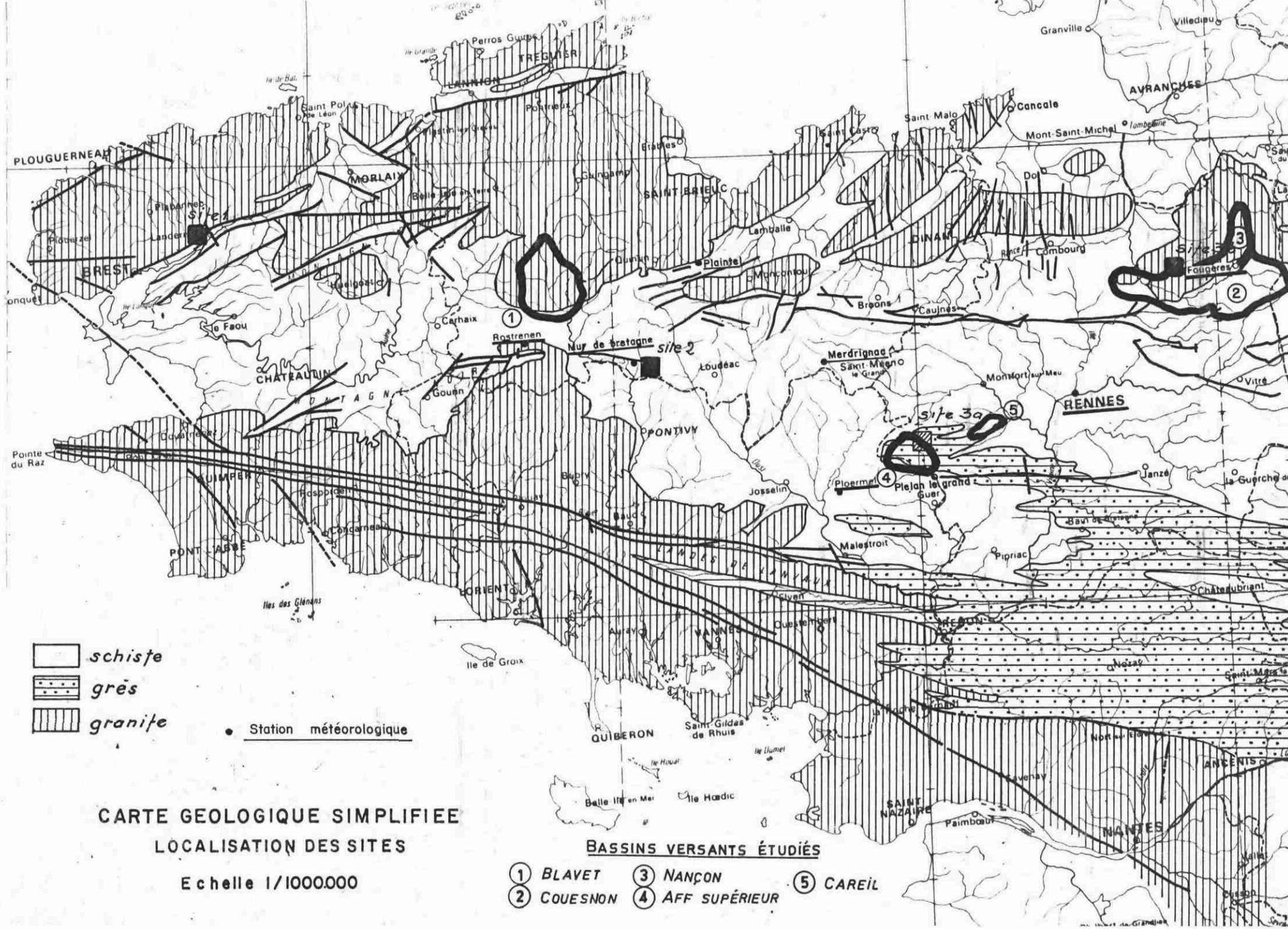
Coupe et débits instantanés non connus.

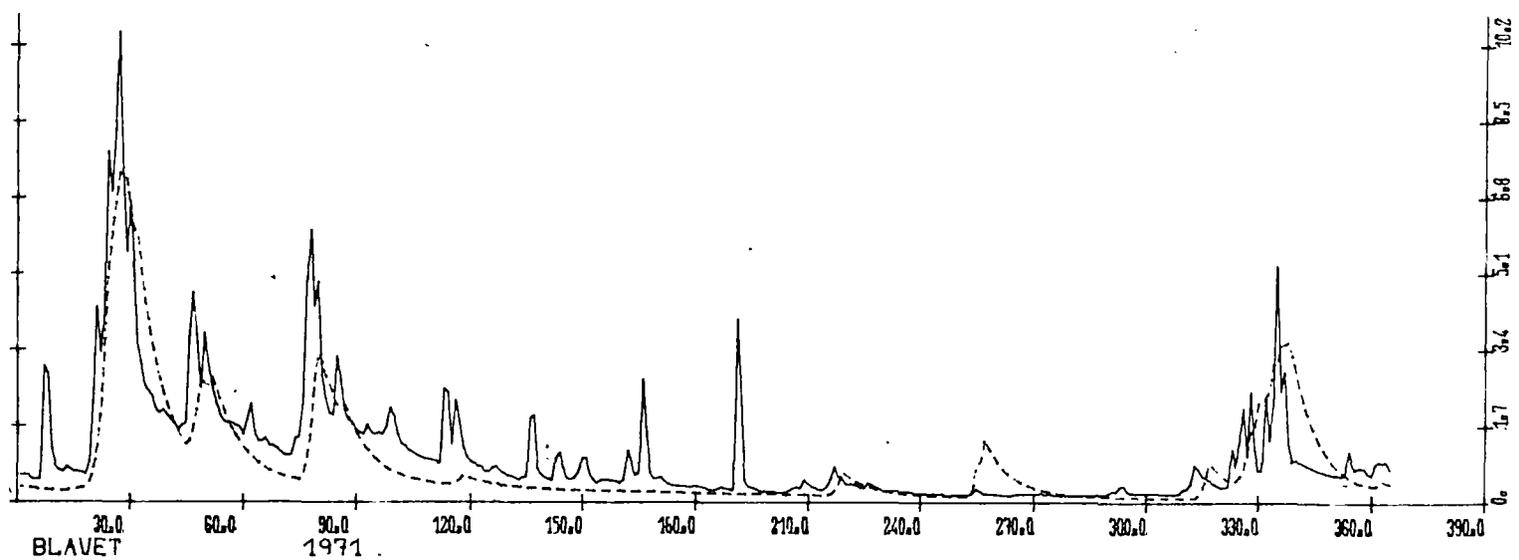
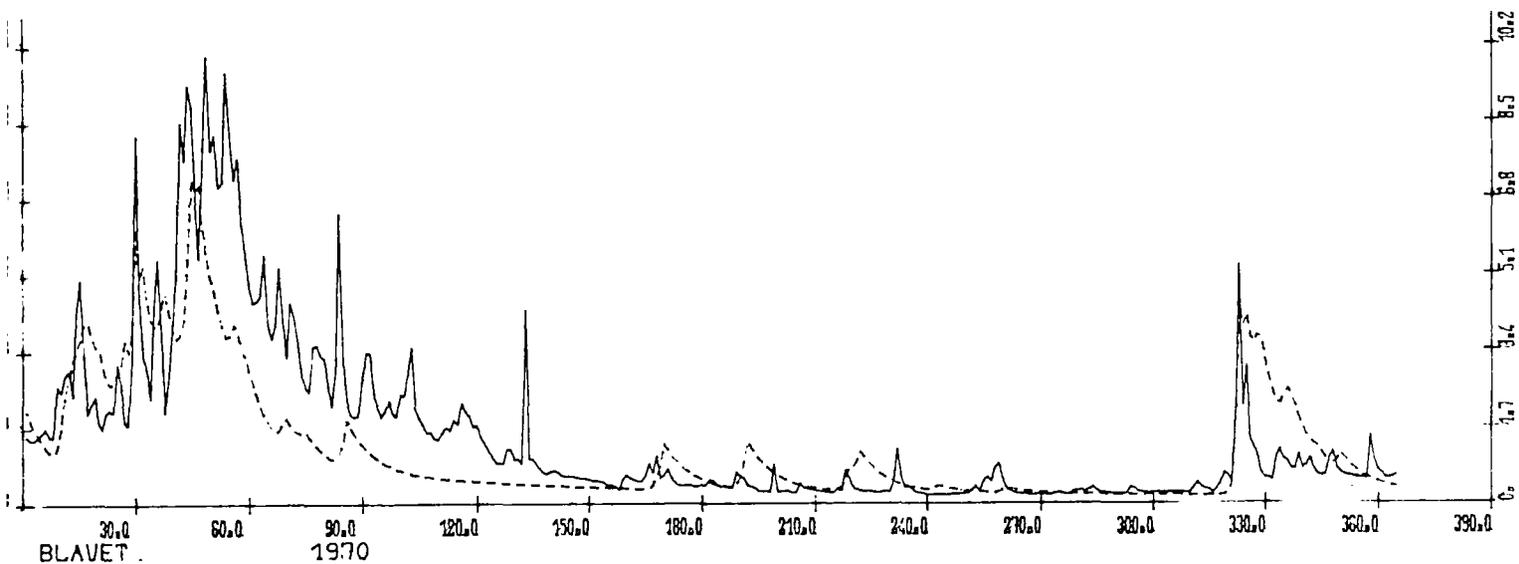
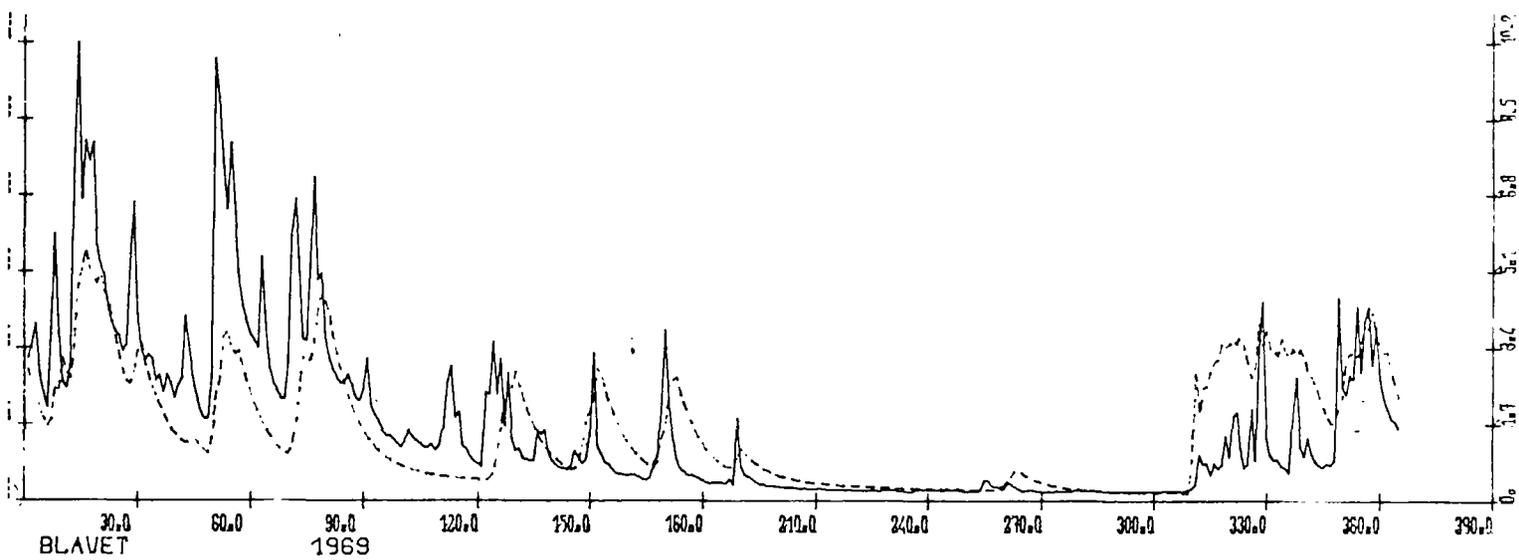
A N N E X E 2

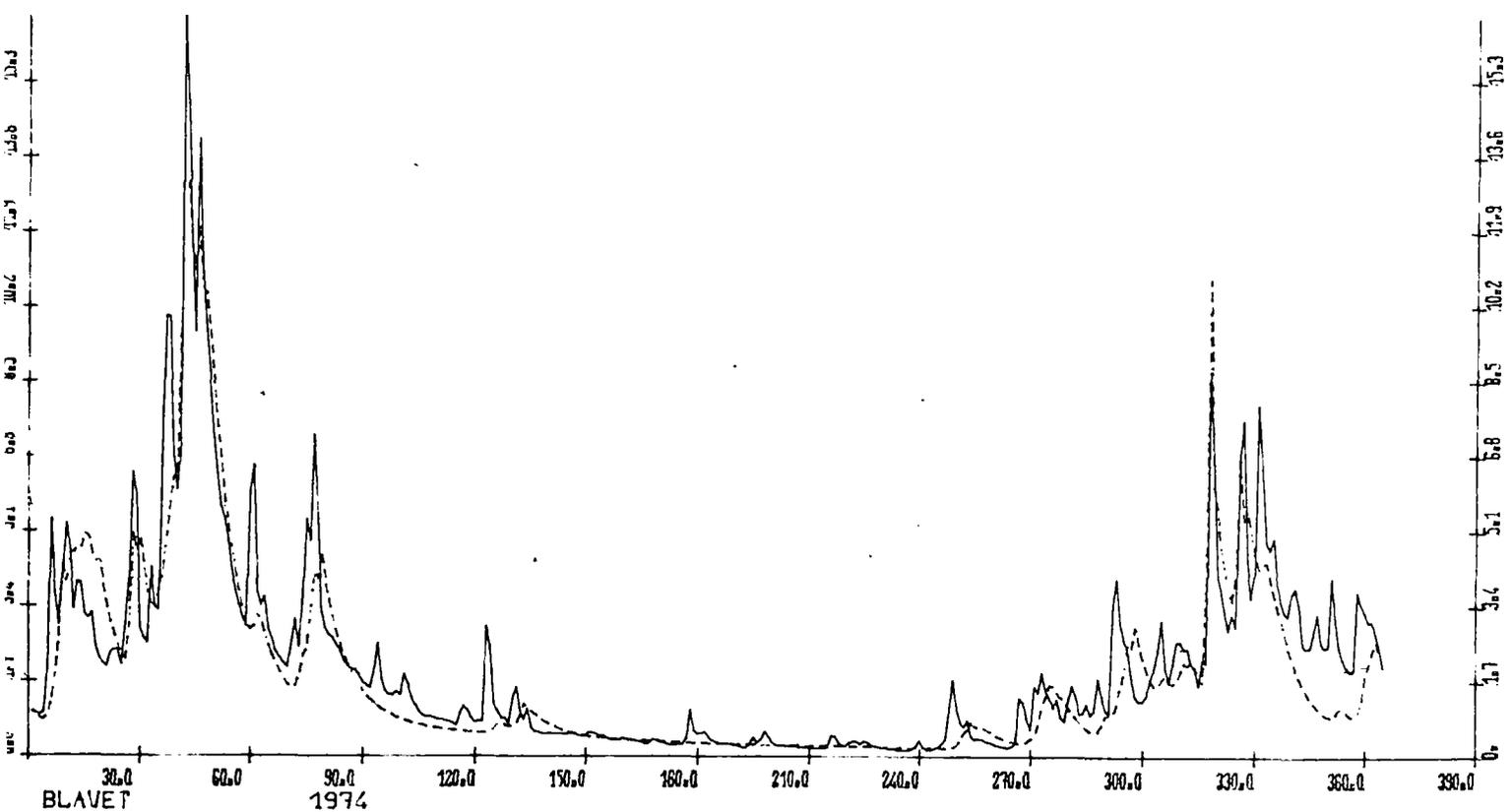
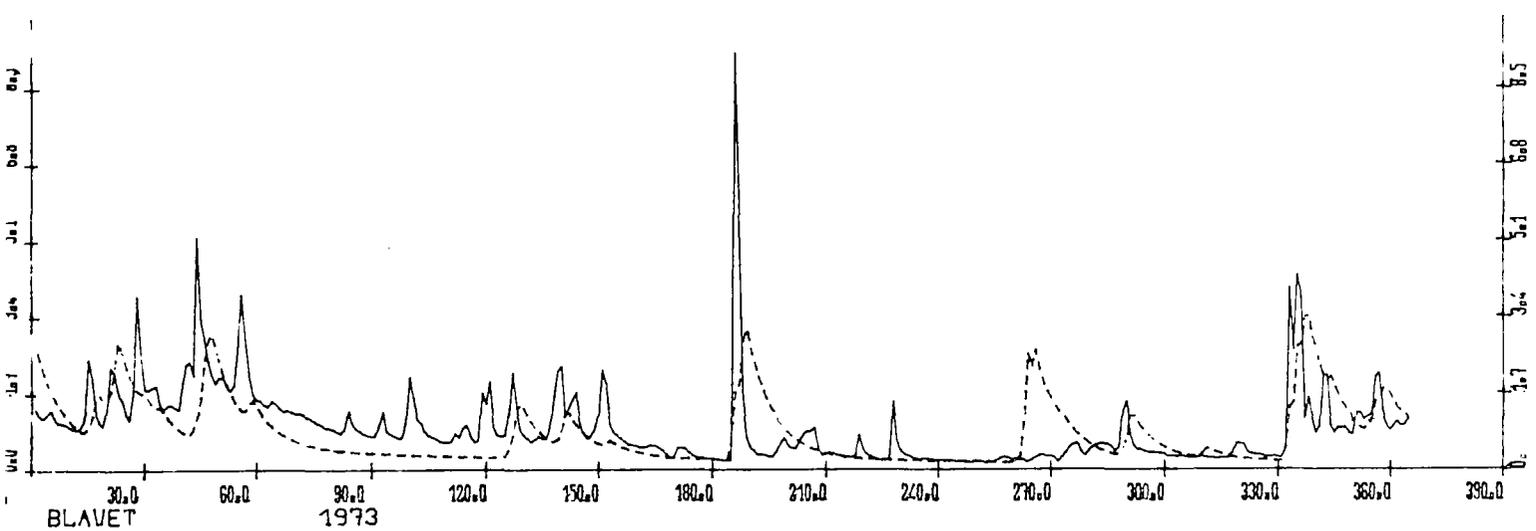
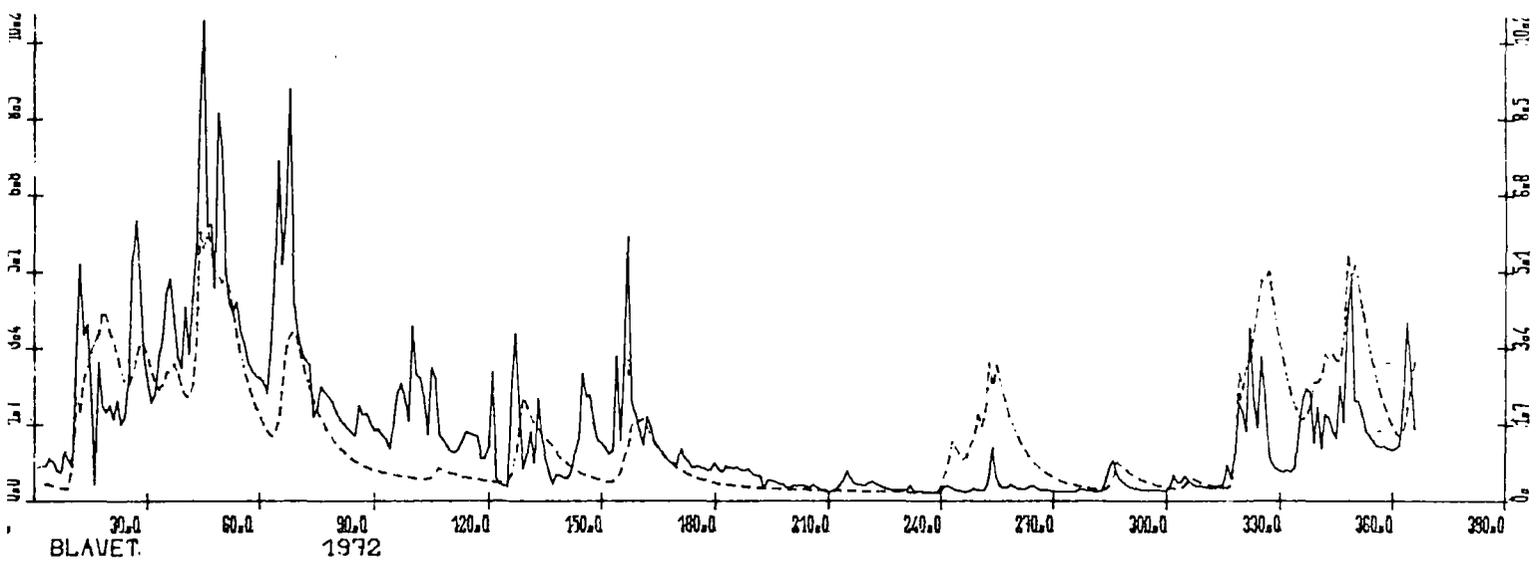
MODELE MERO

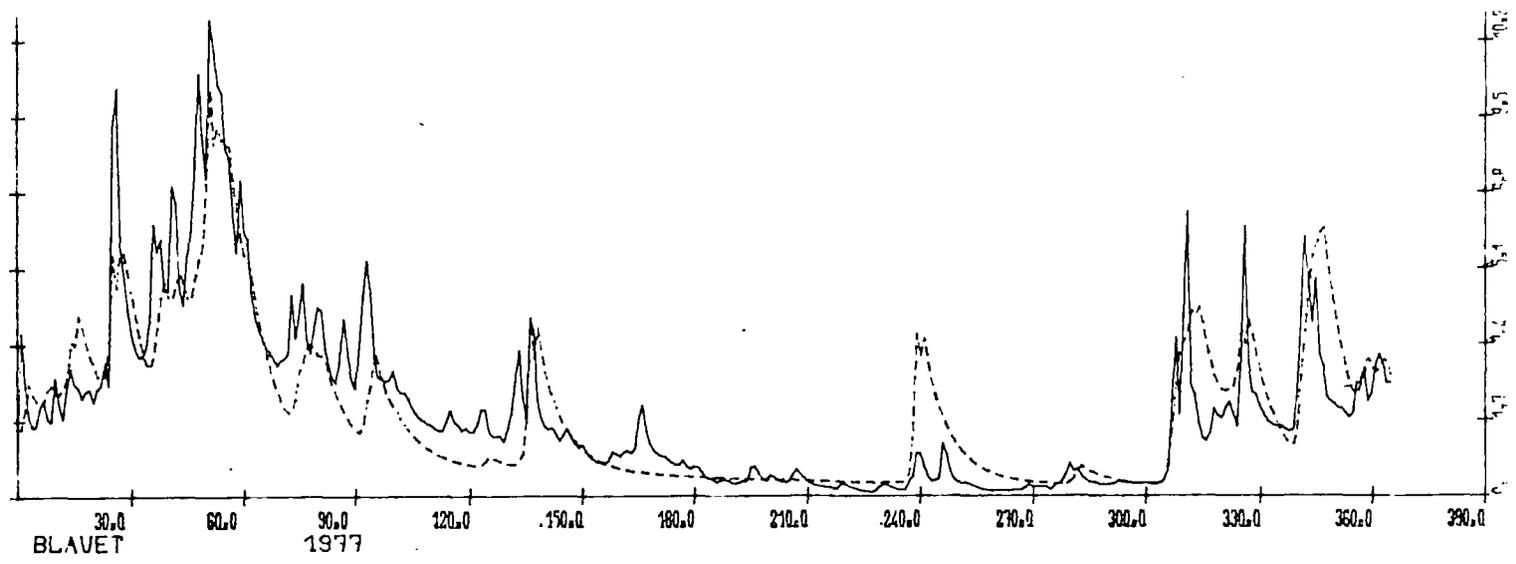
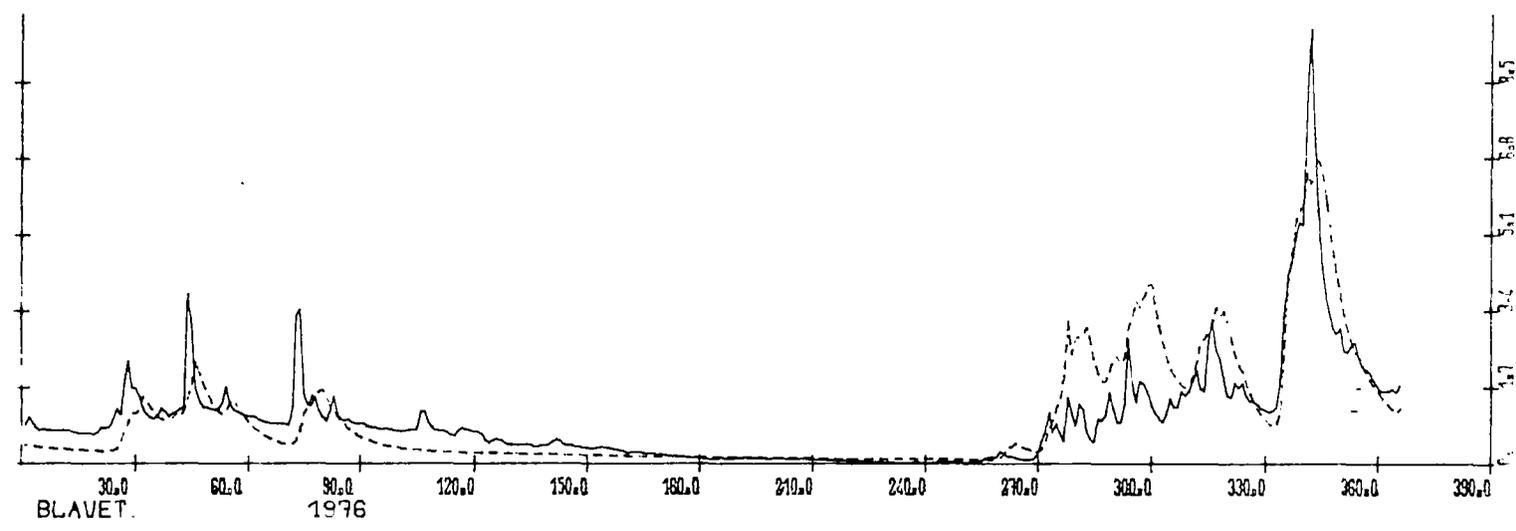
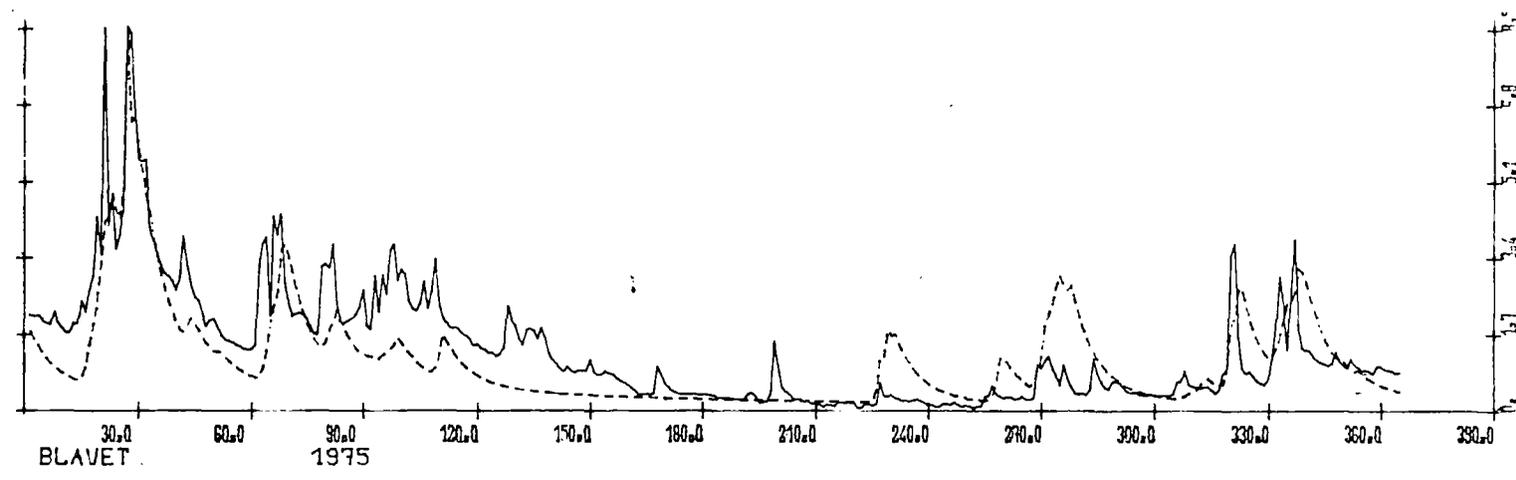
Carte de localisation : Bassins versants et stations
climatologiques

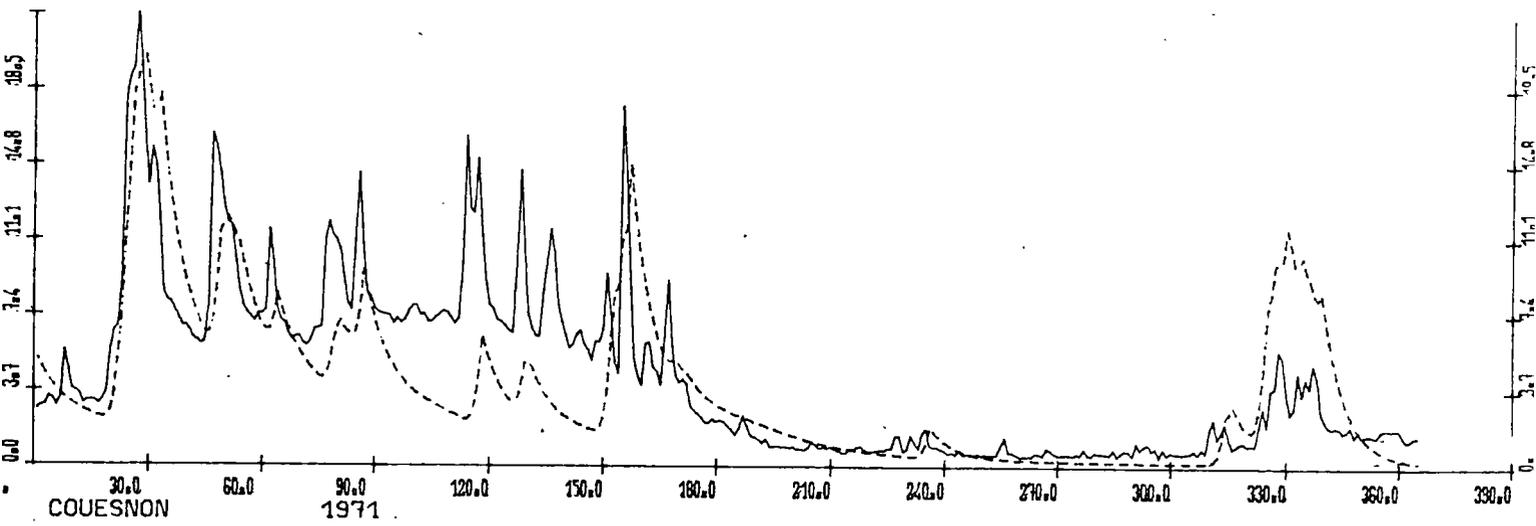
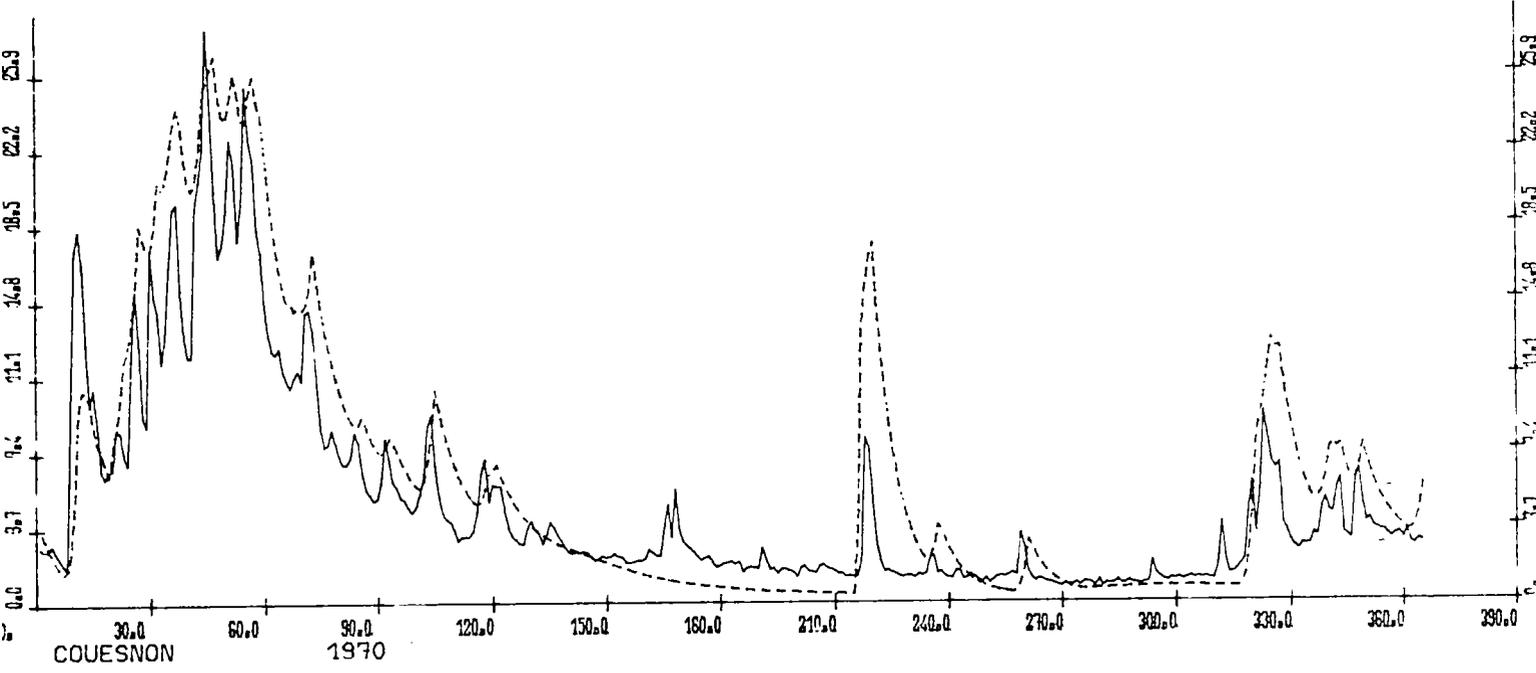
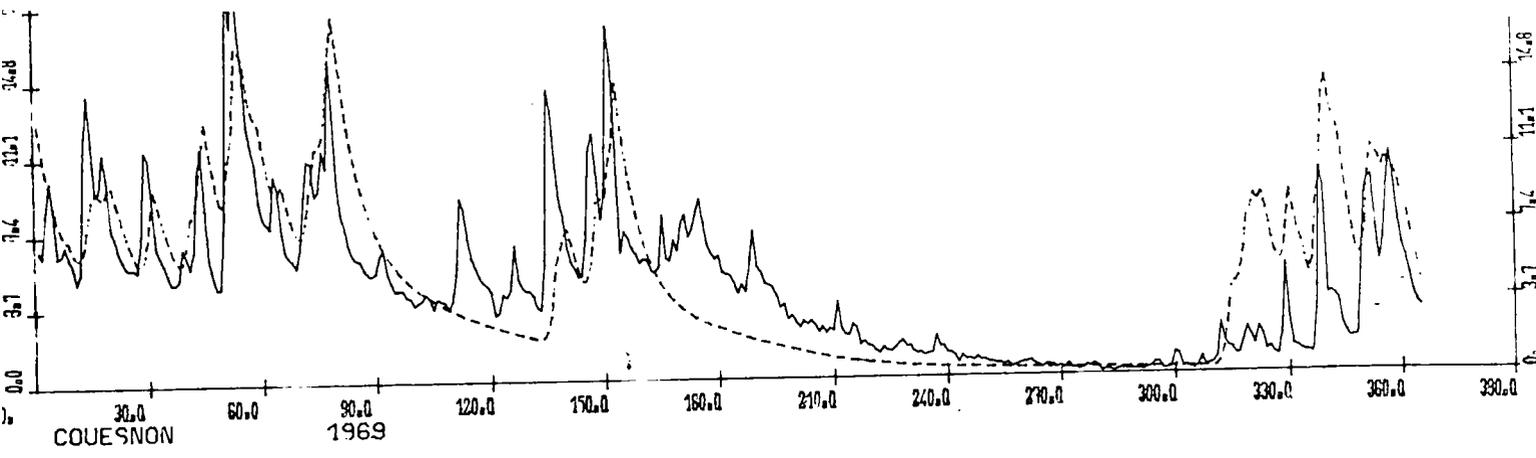
Hydrogrammes mesurés (traits pleins) et
calculés (traits interrompus)

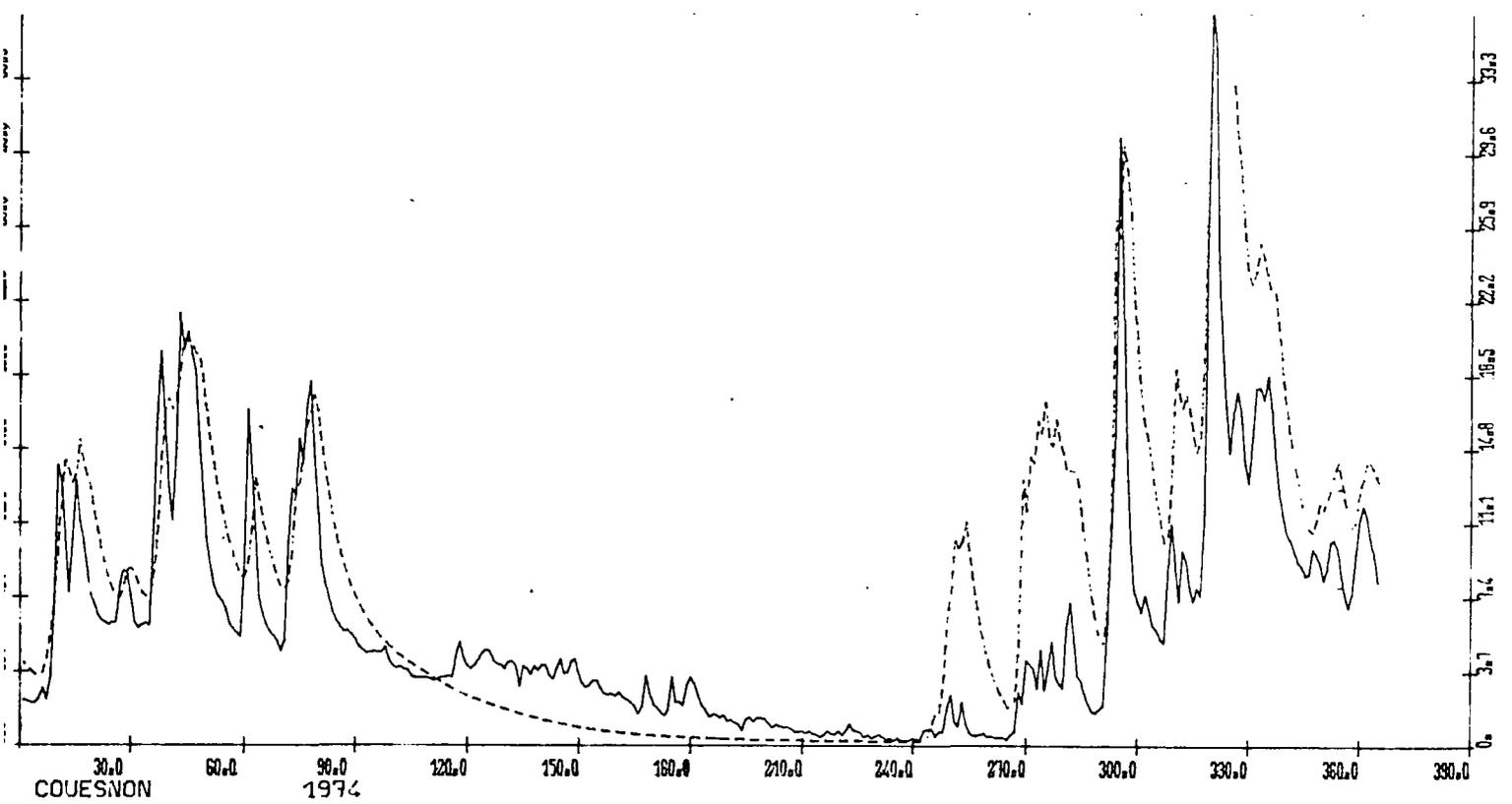
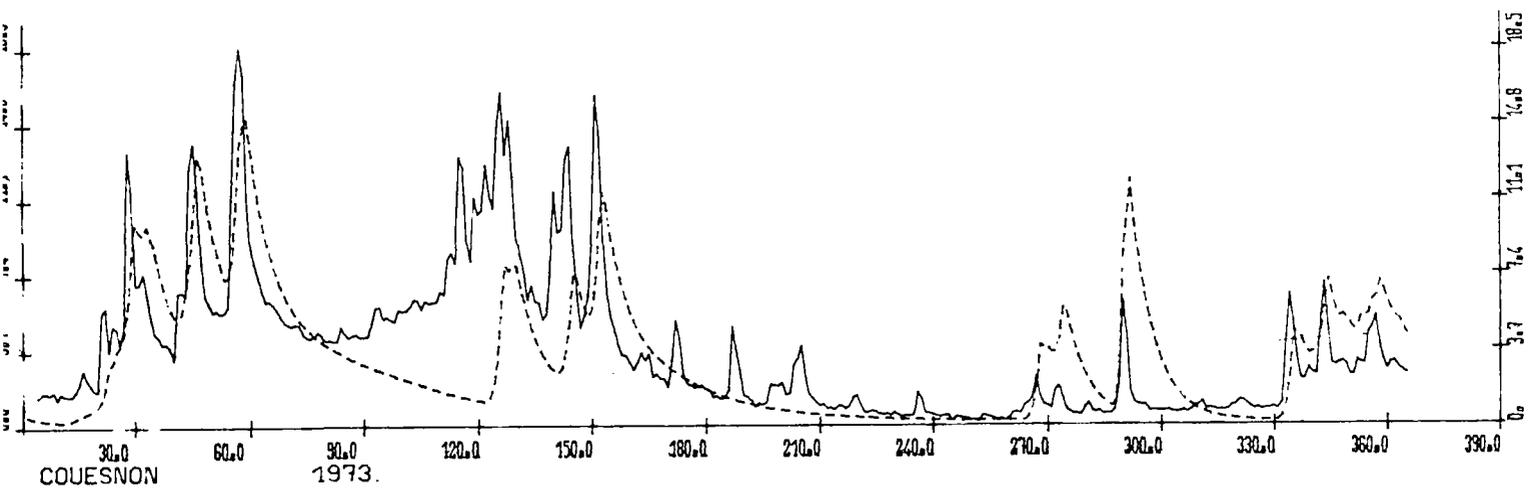
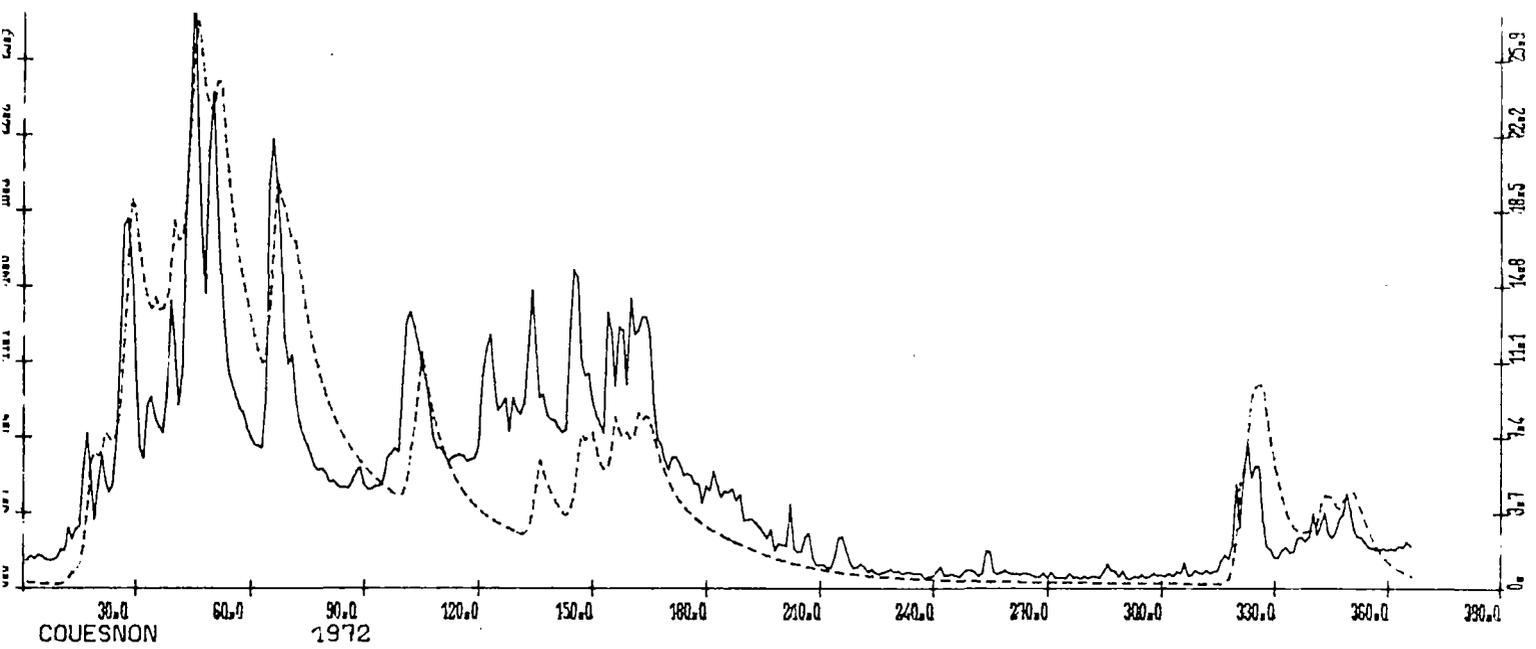


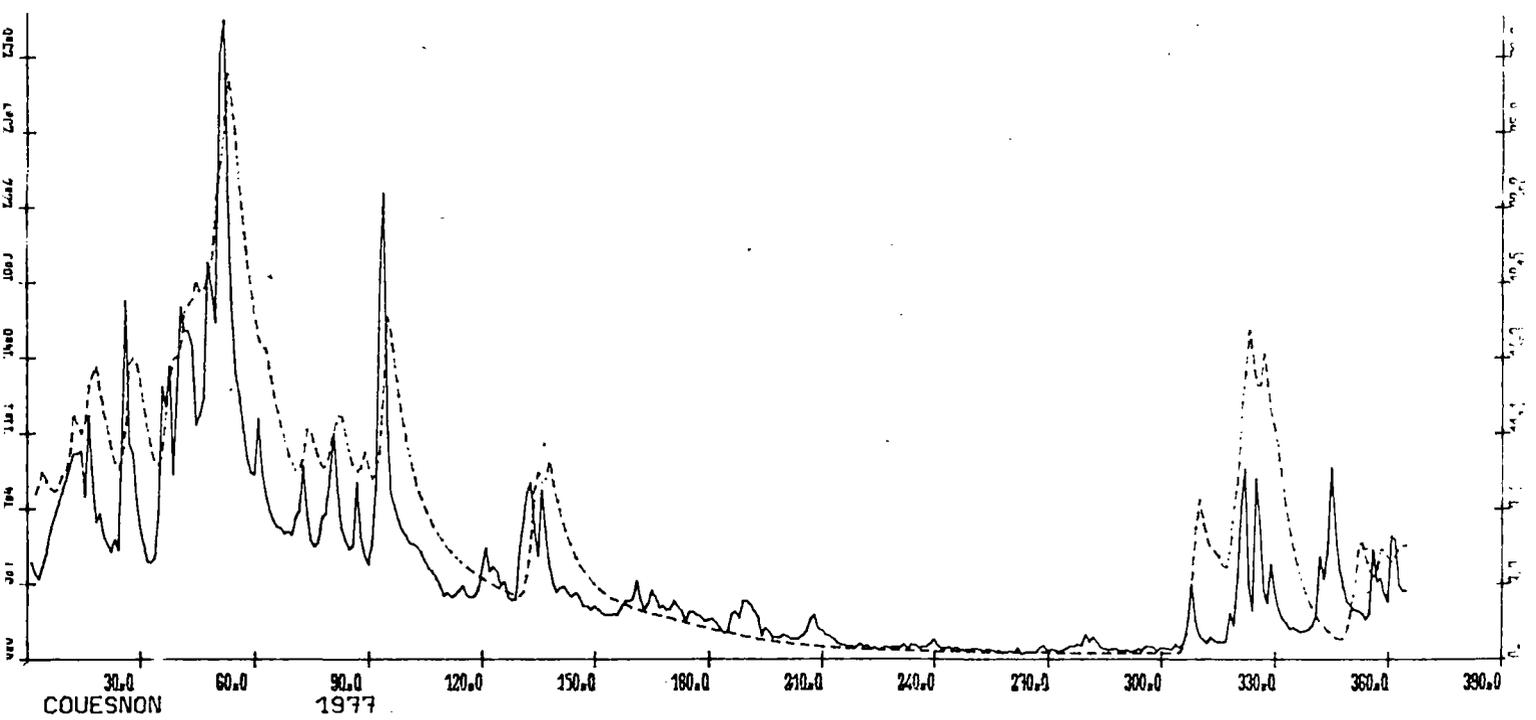
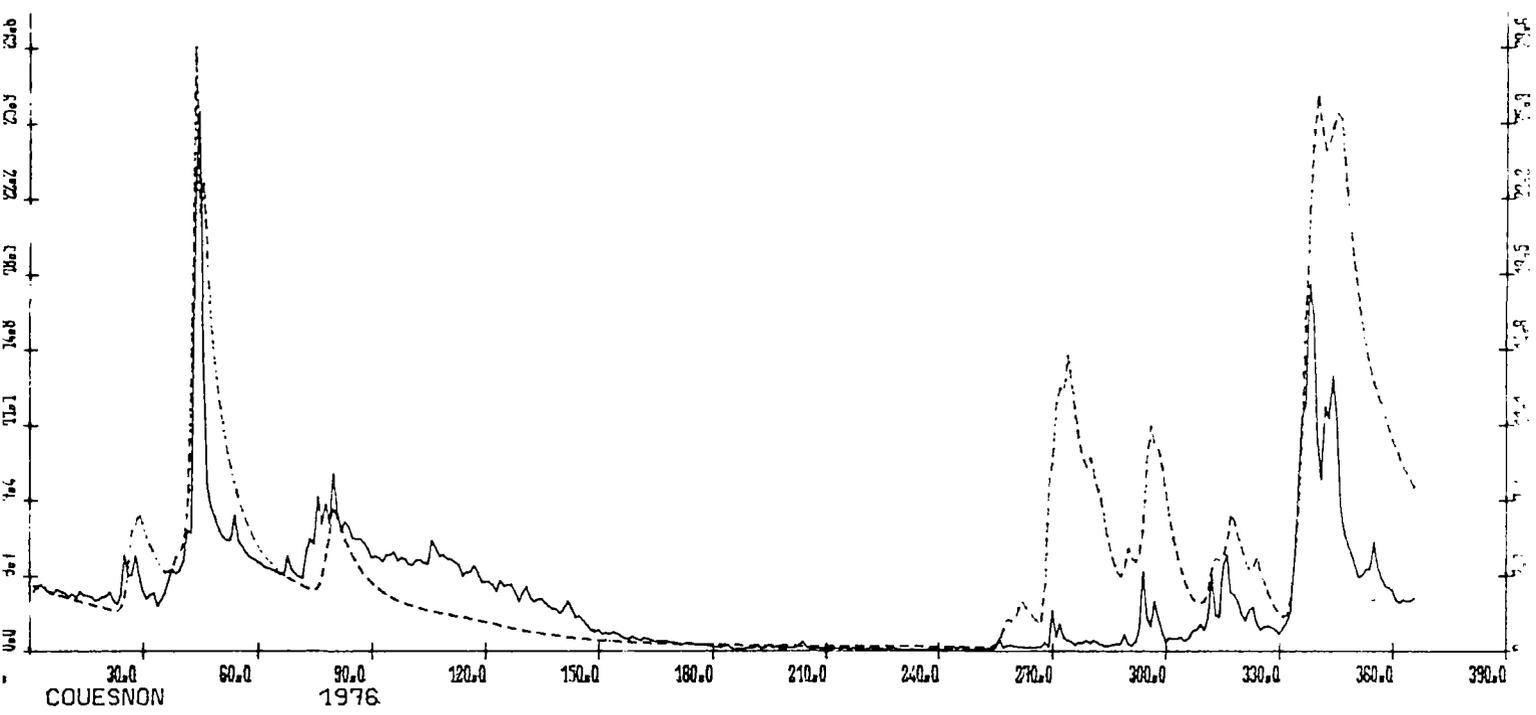
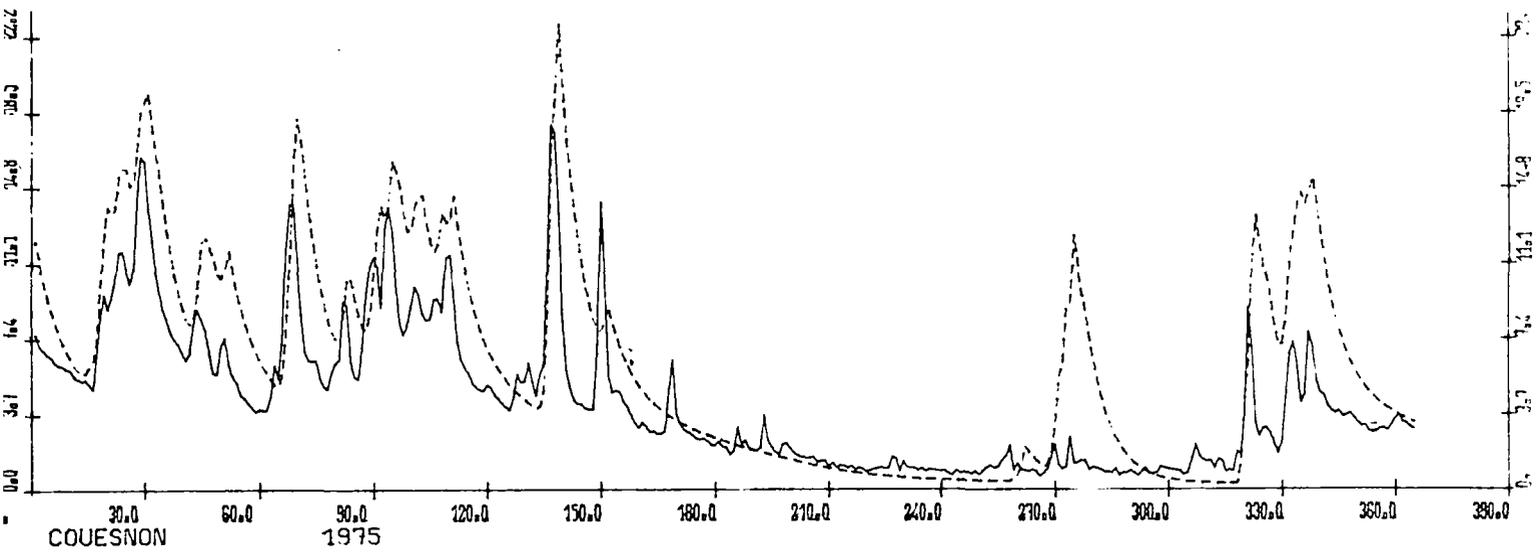


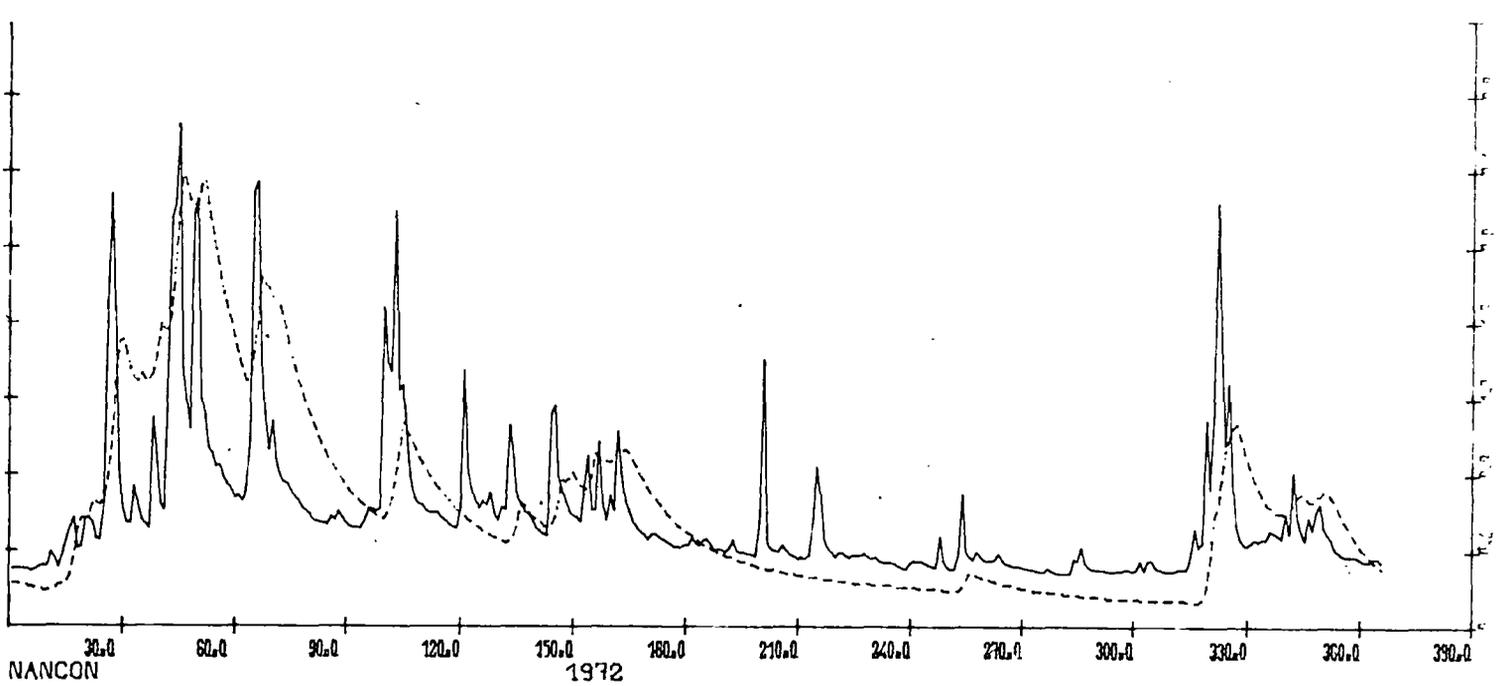
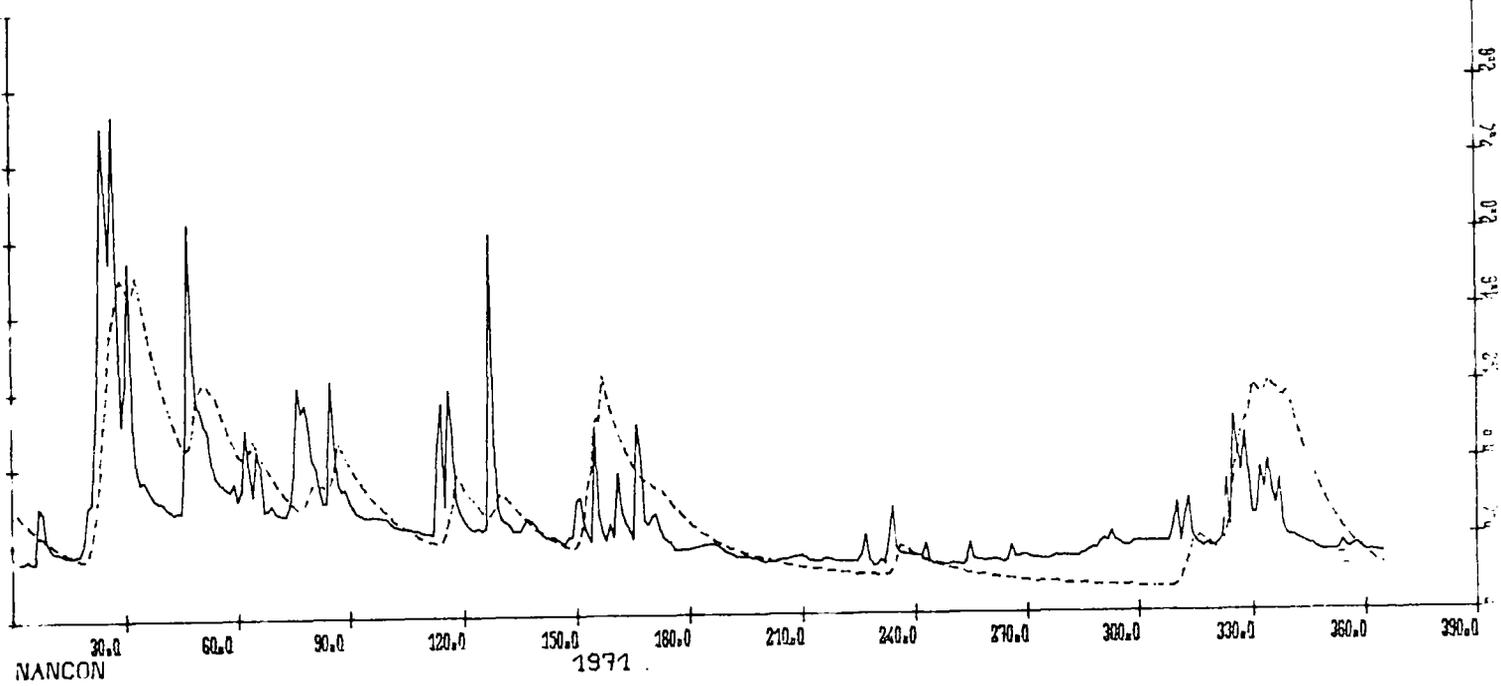
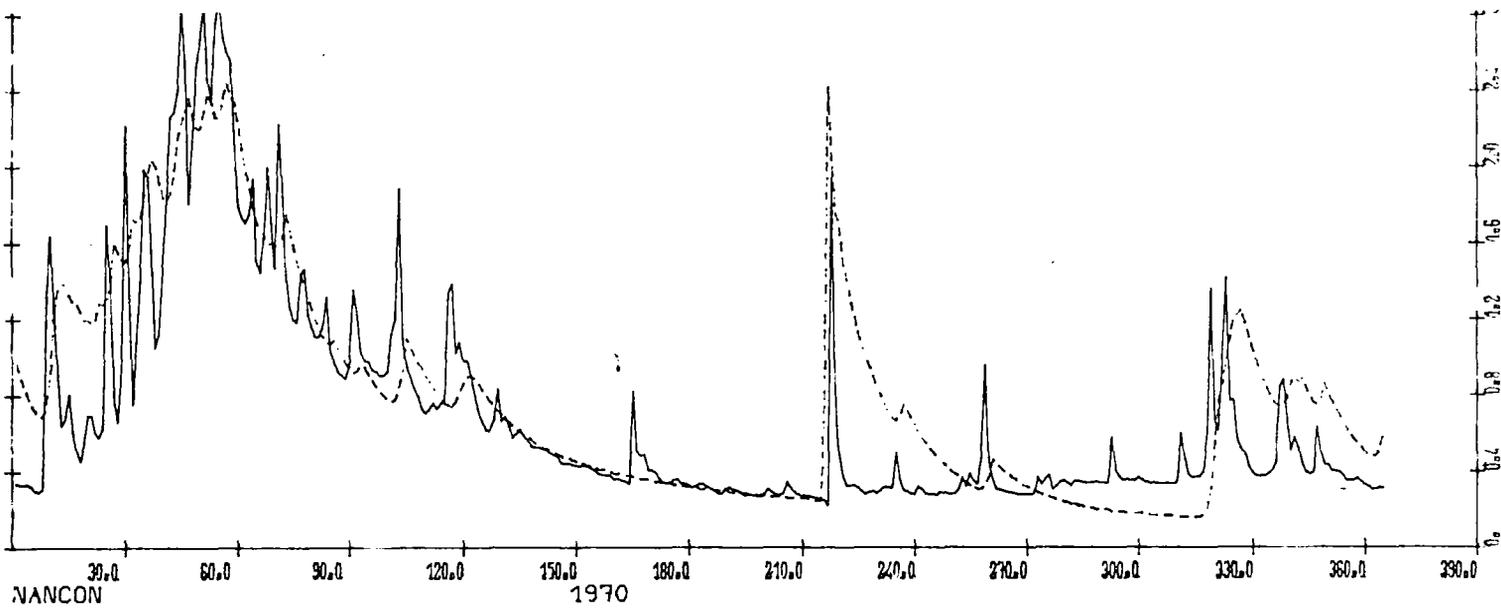


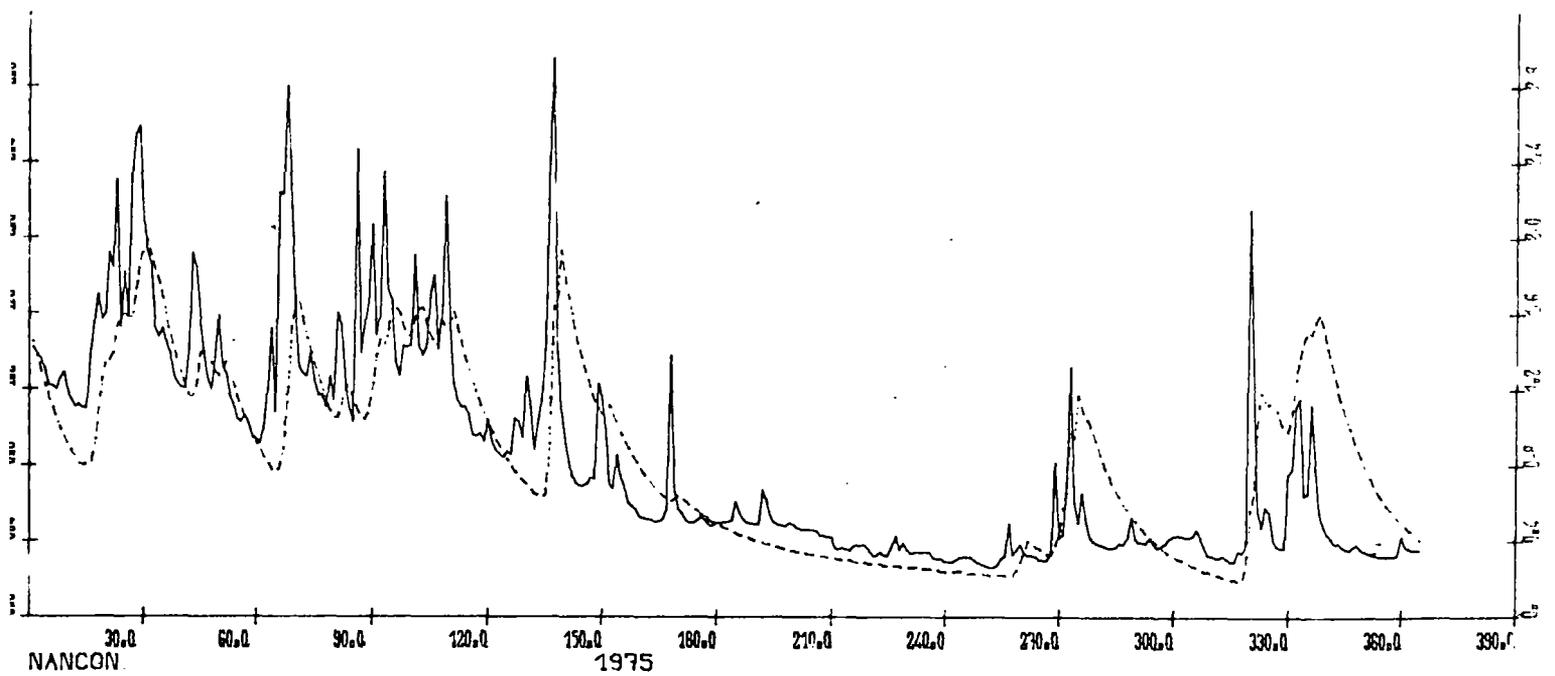
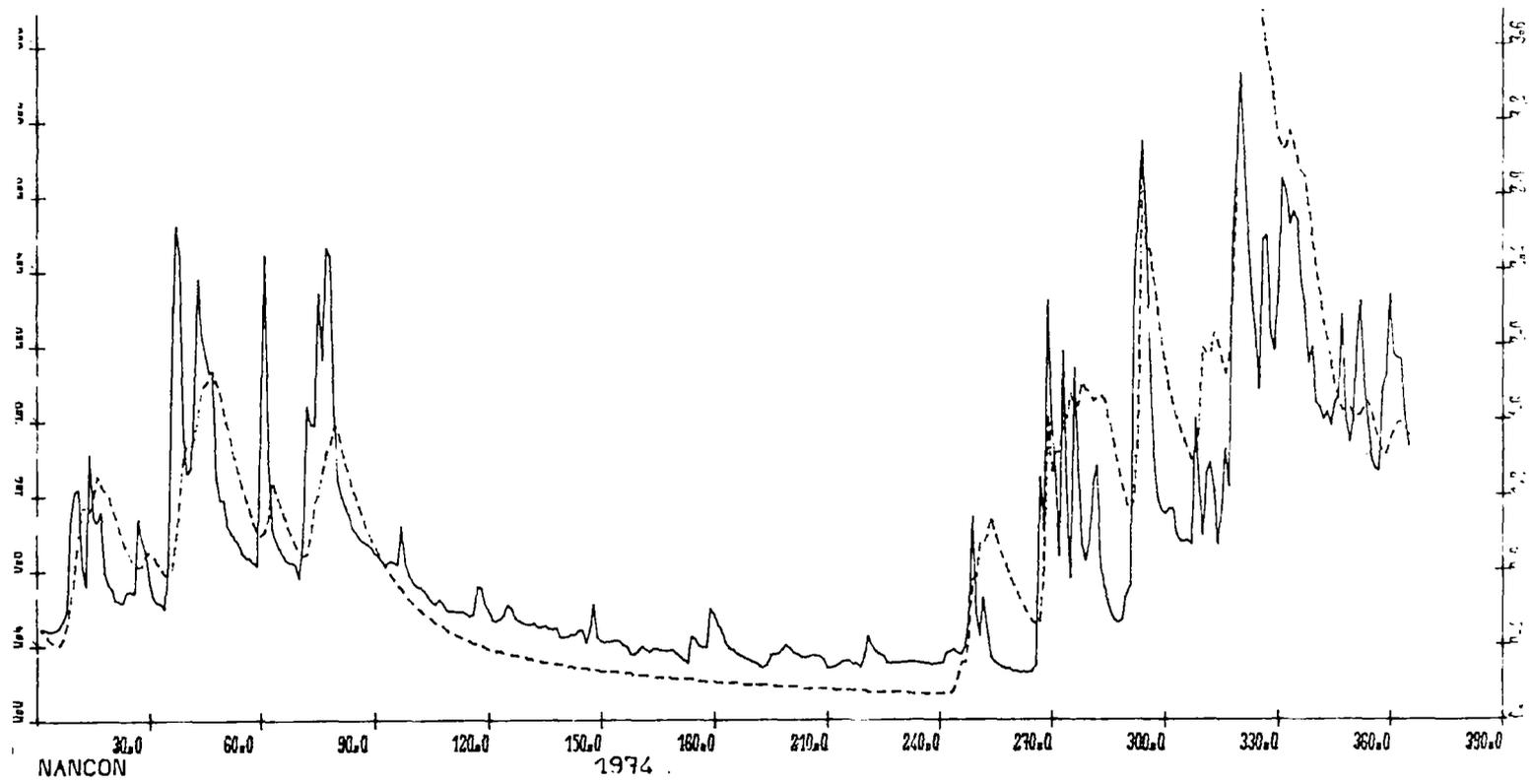
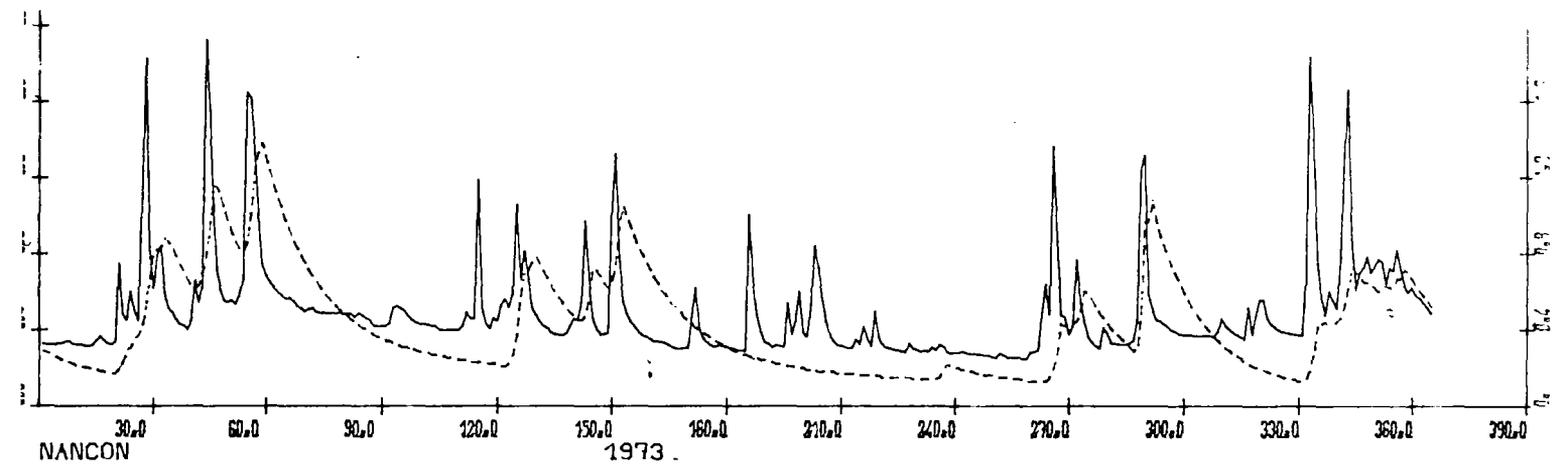


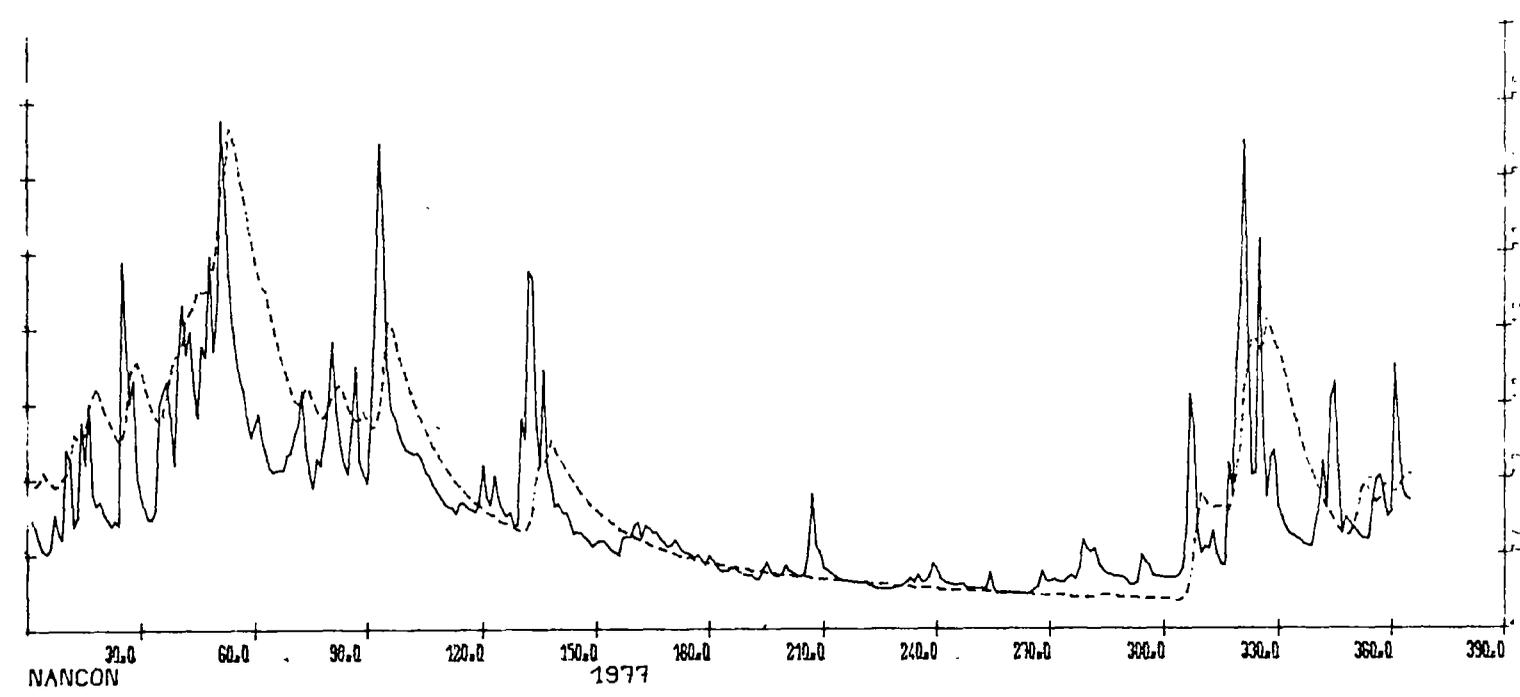
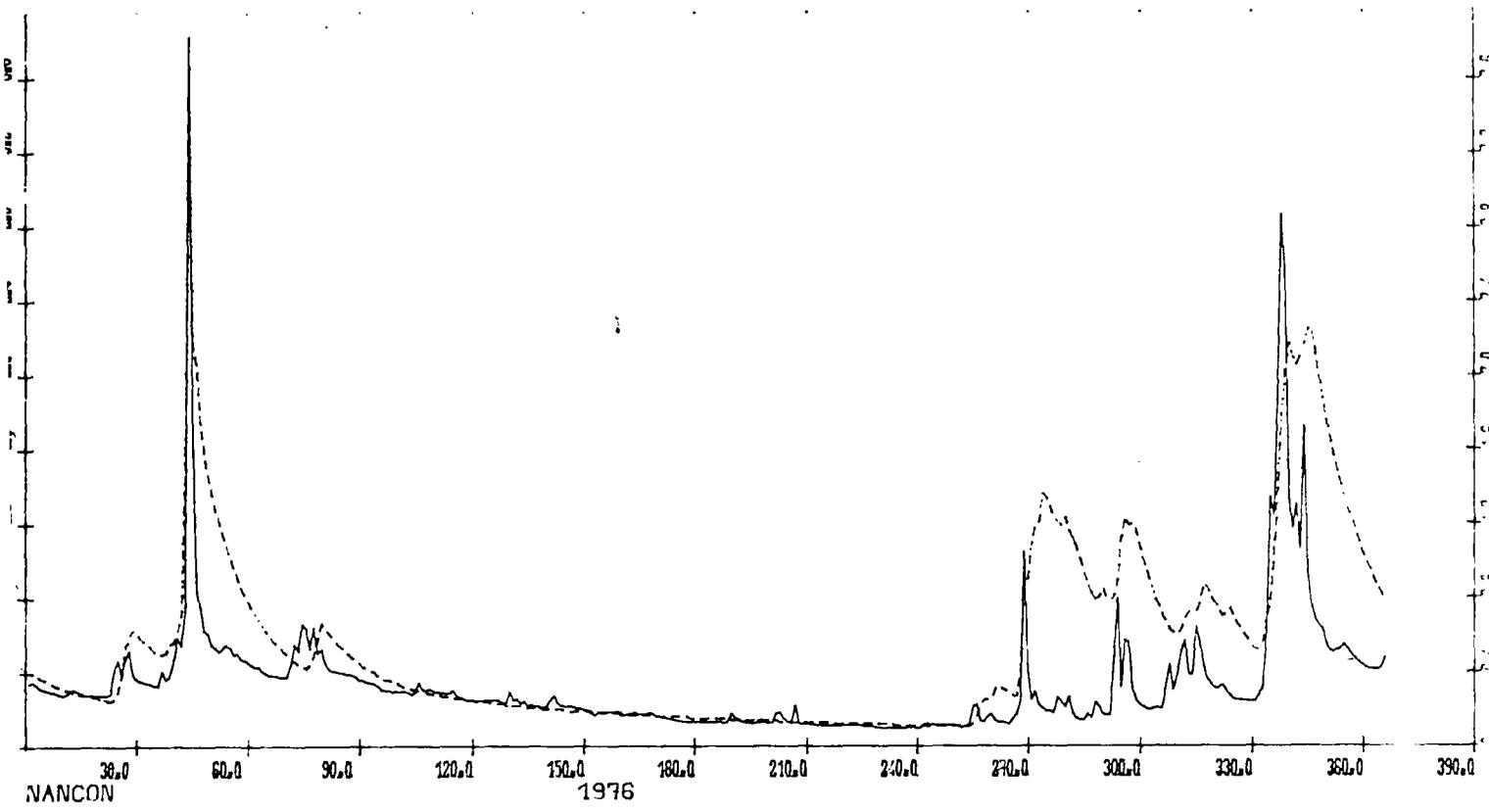


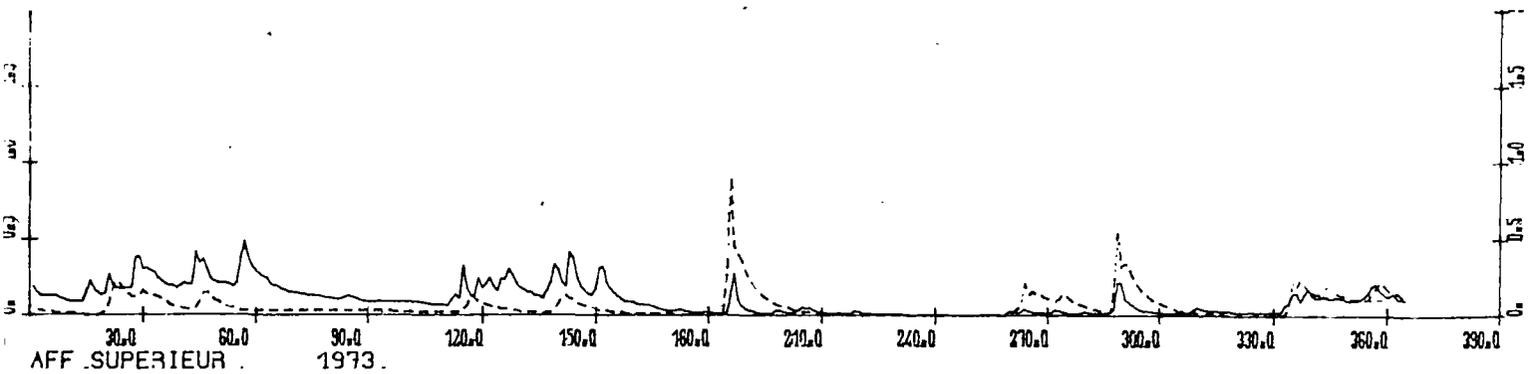
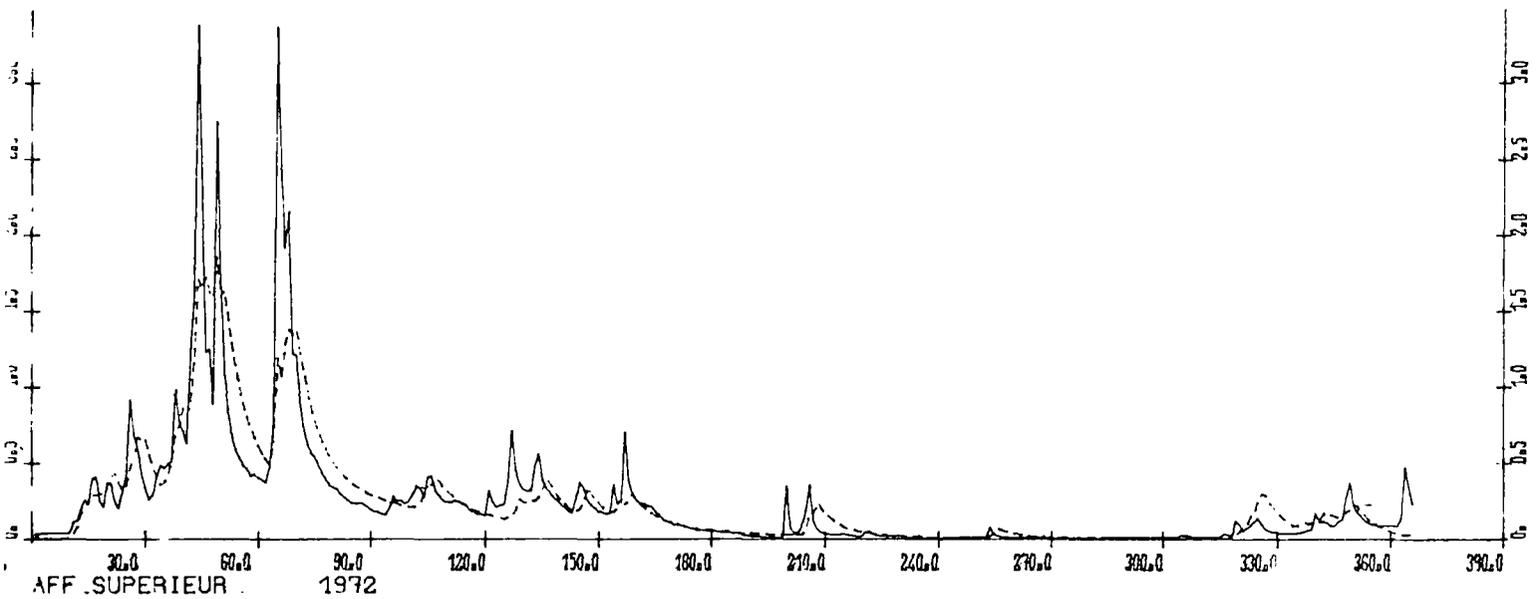
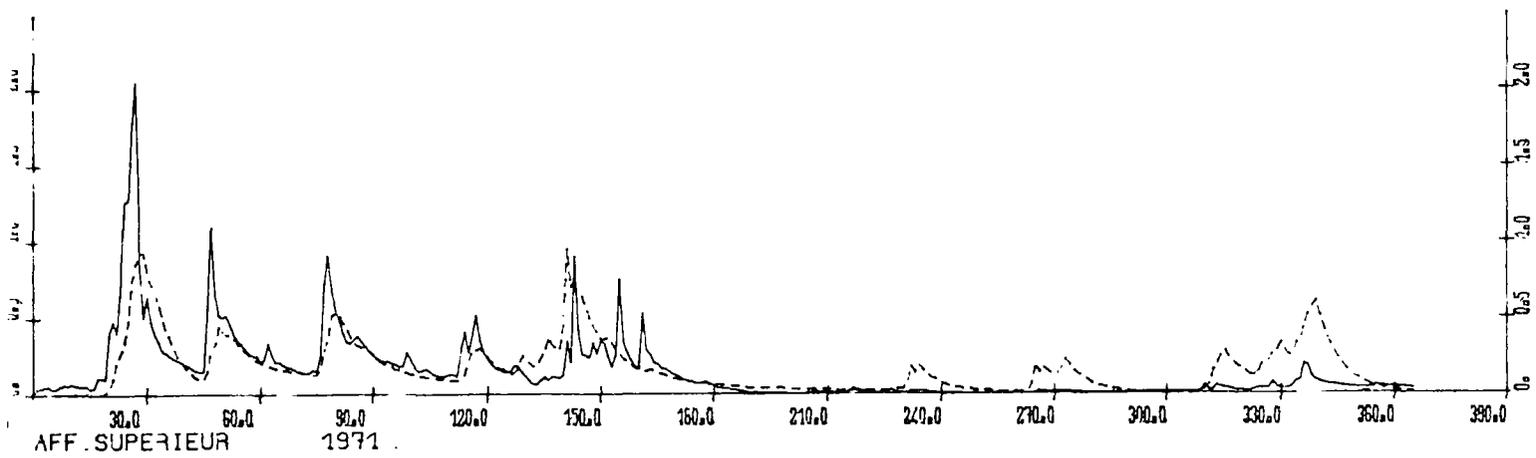
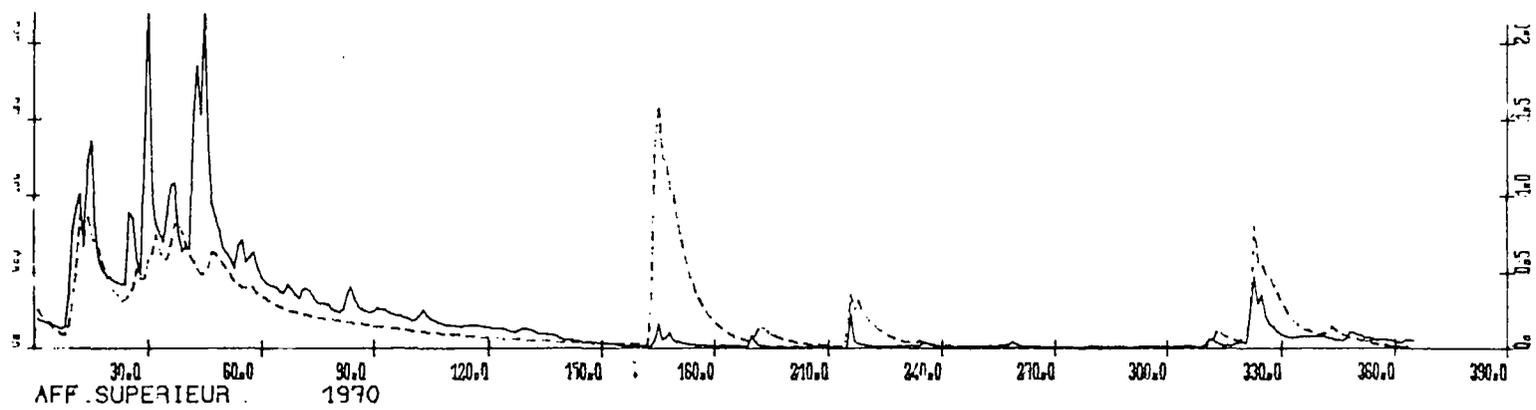


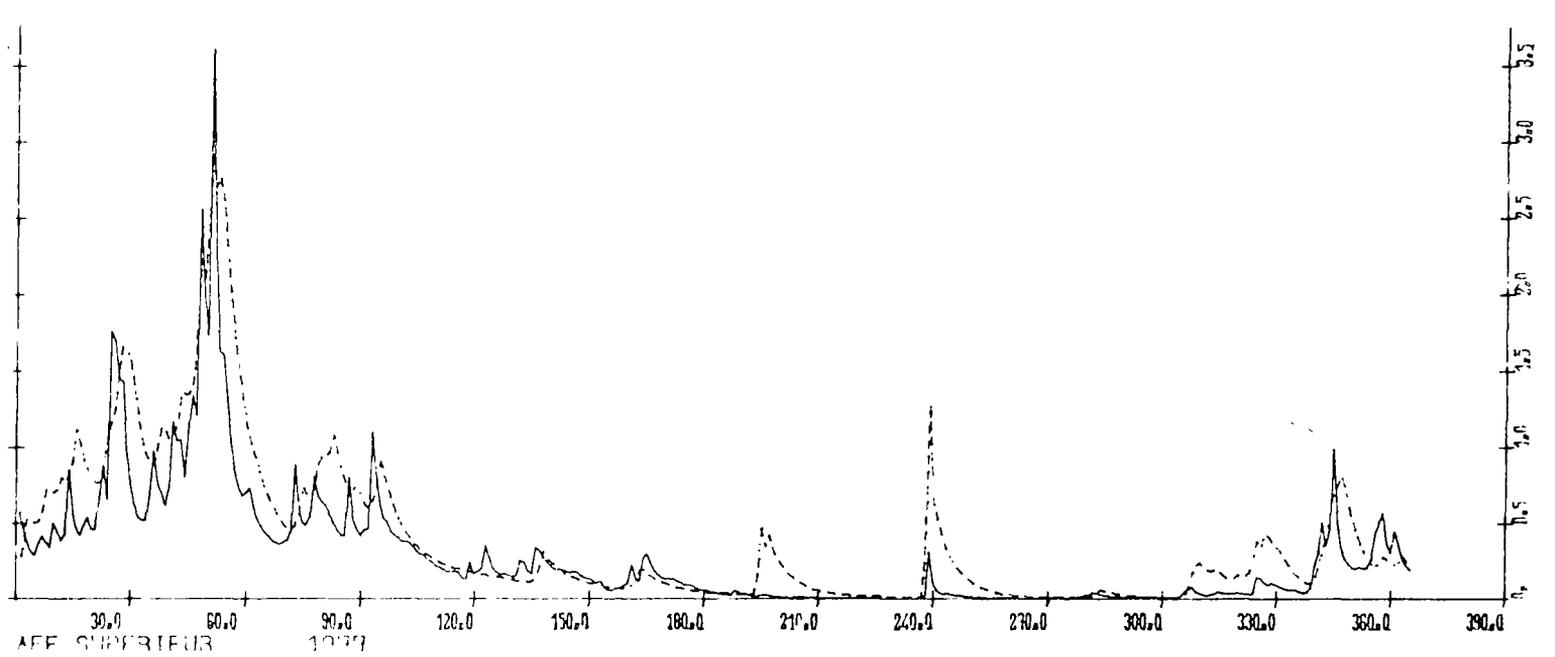
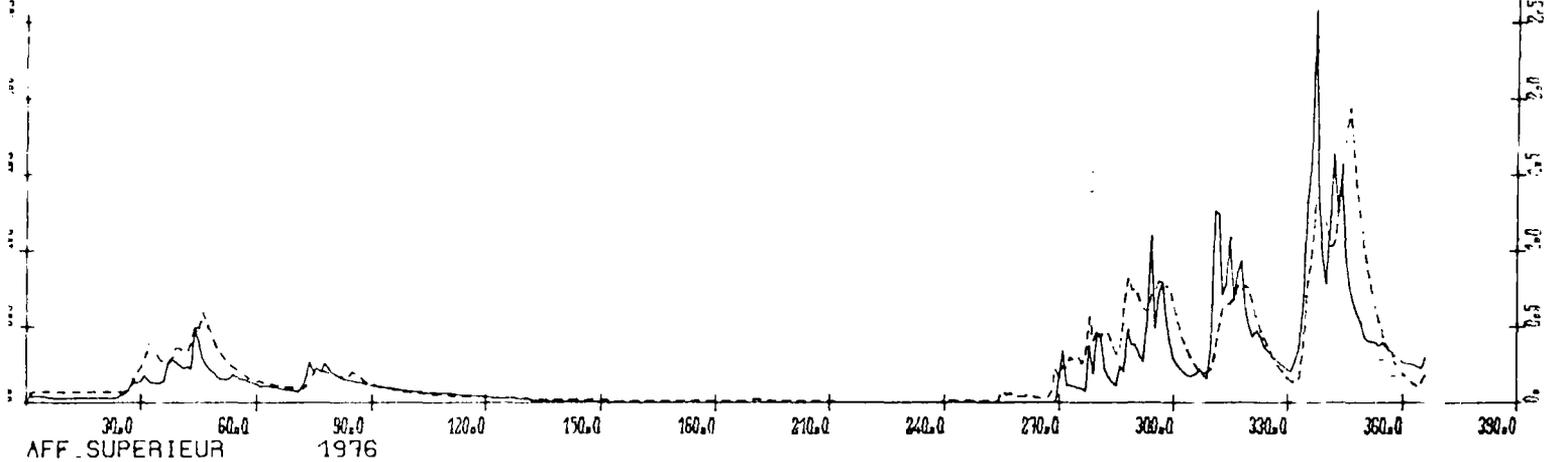
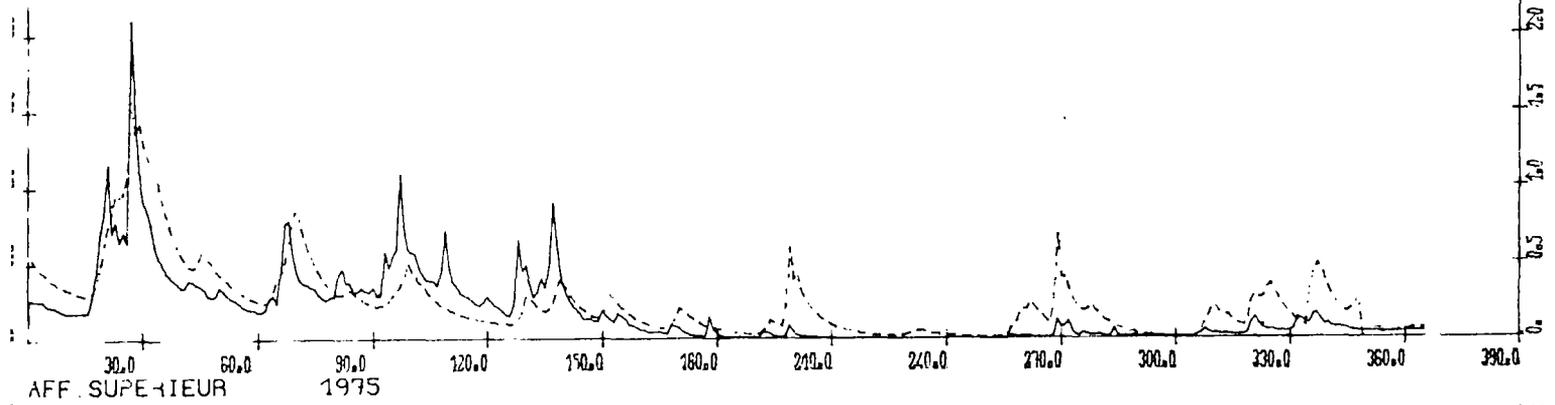
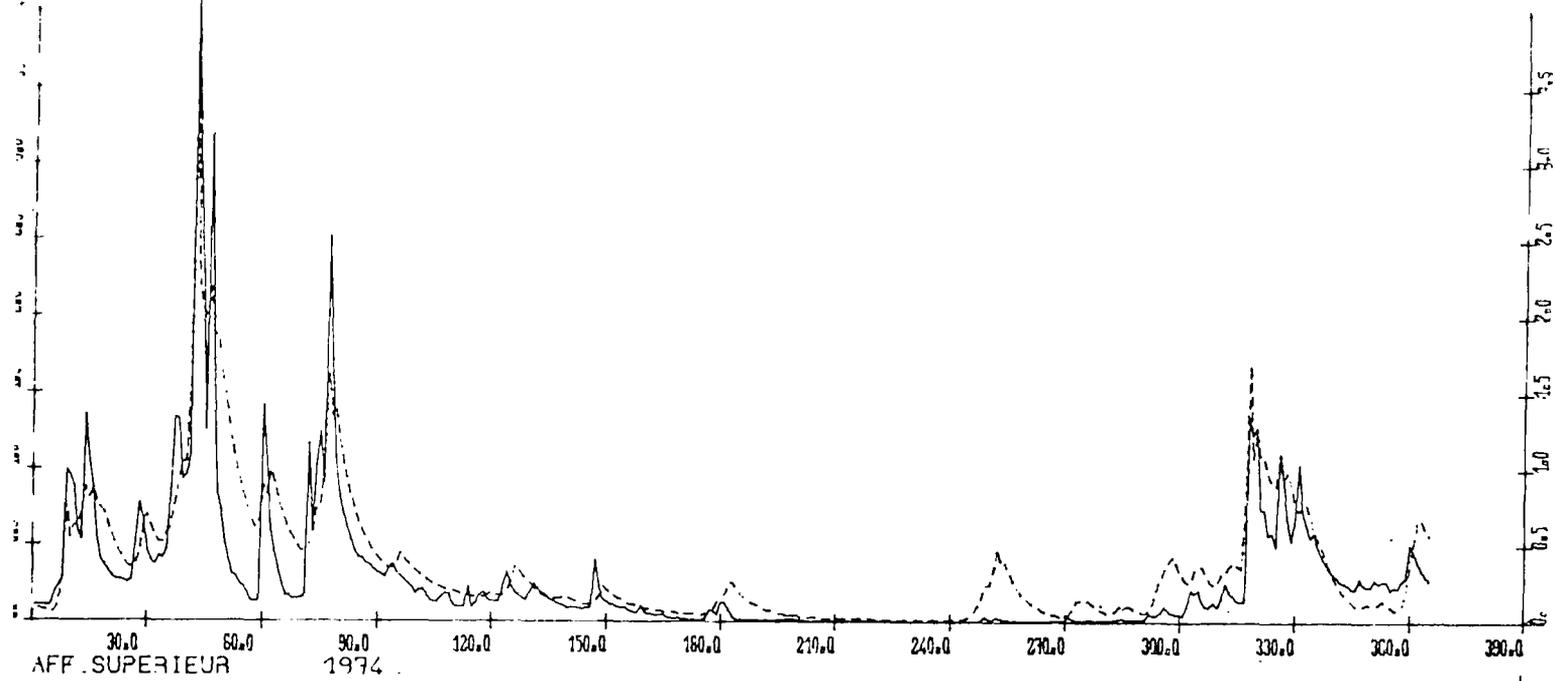


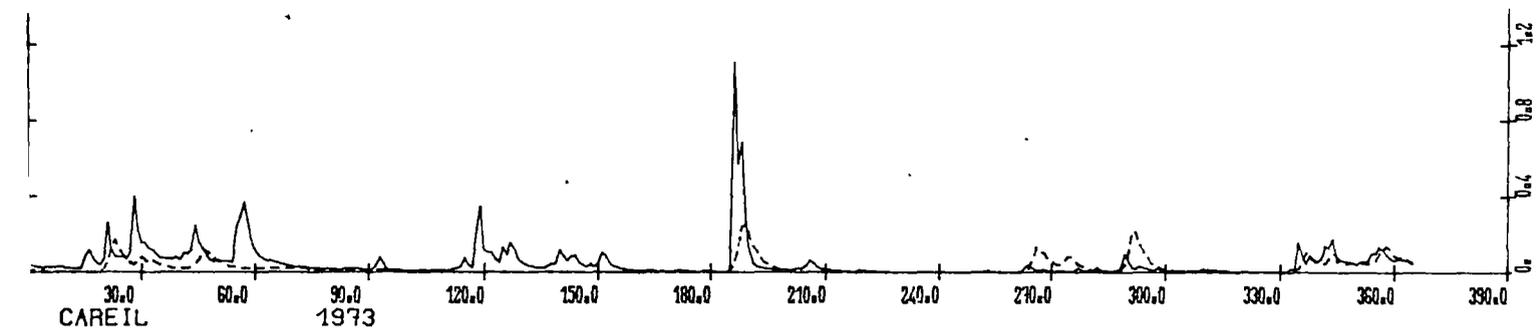
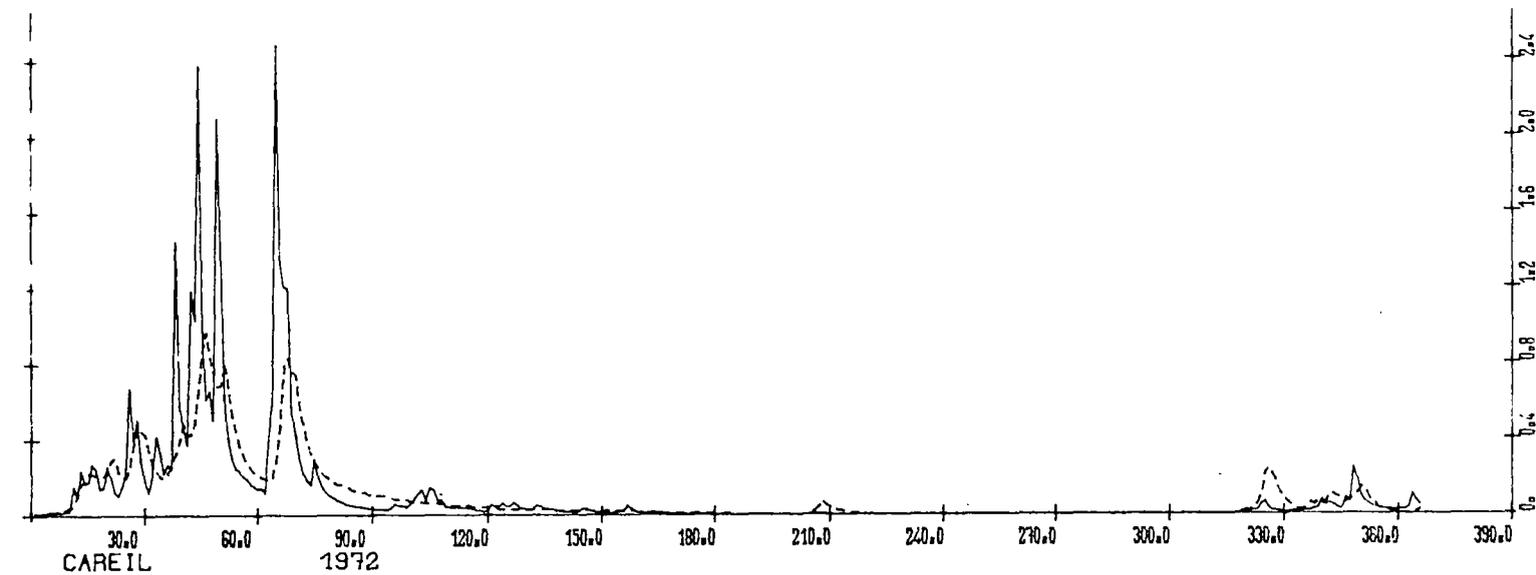
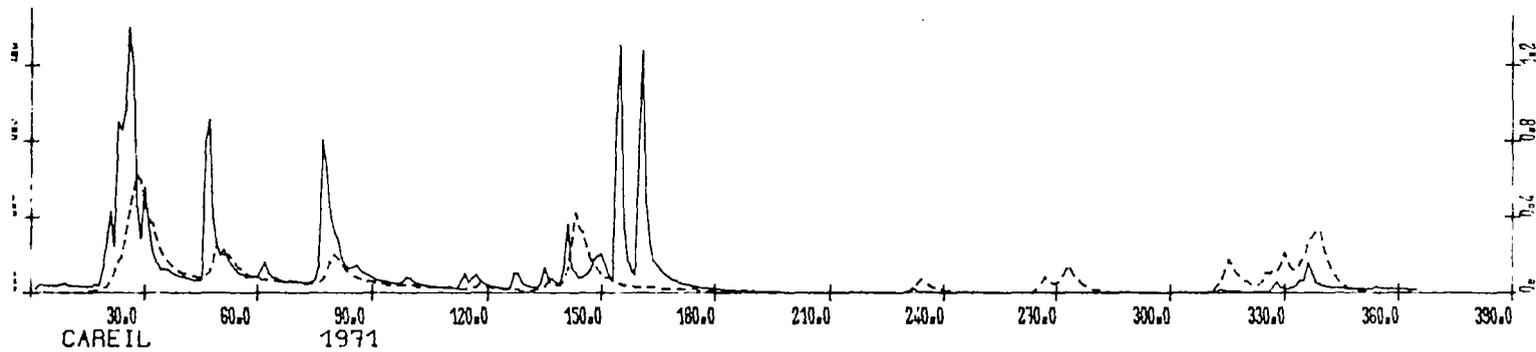
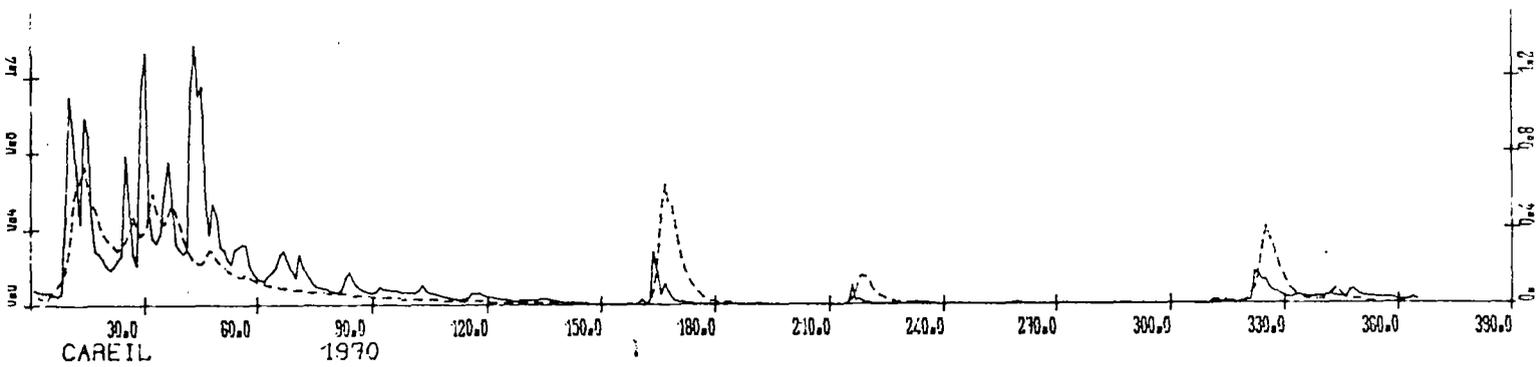


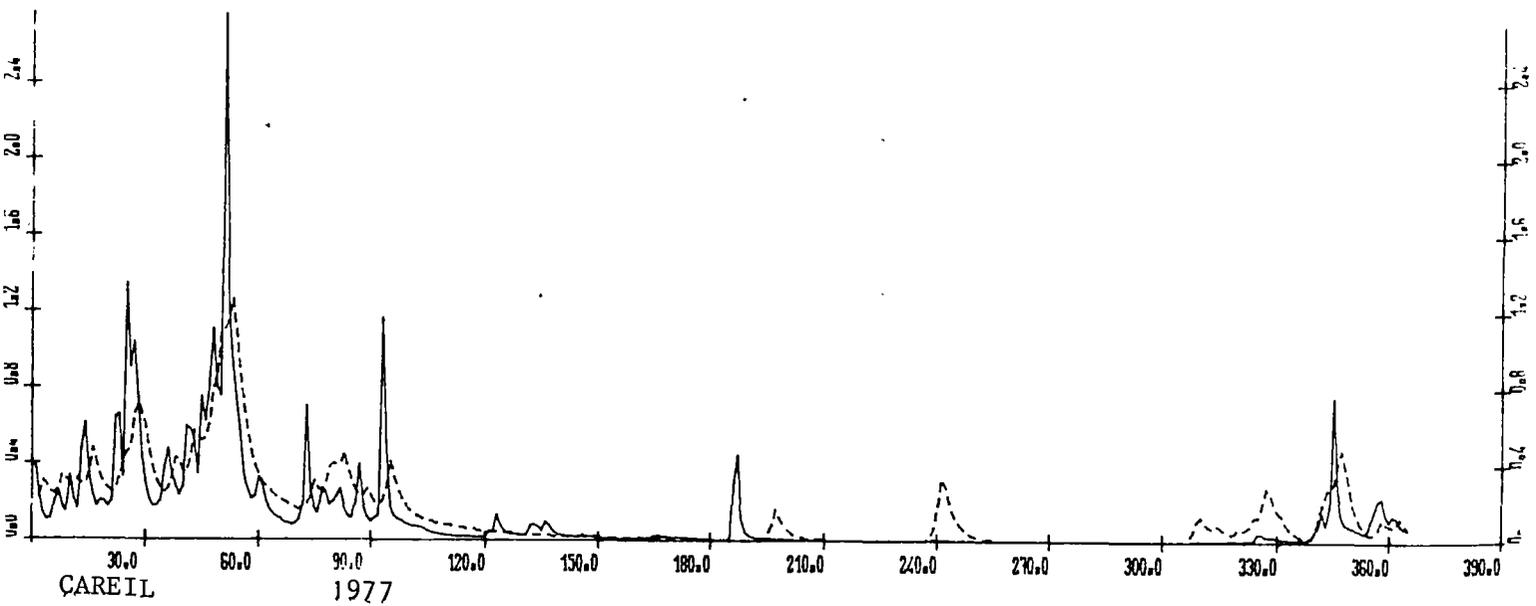
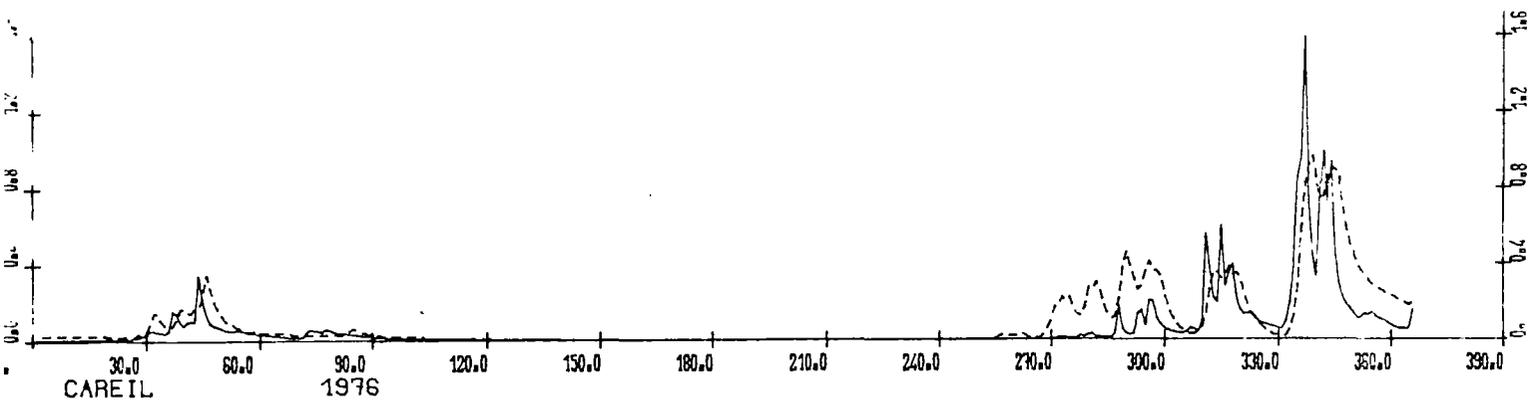
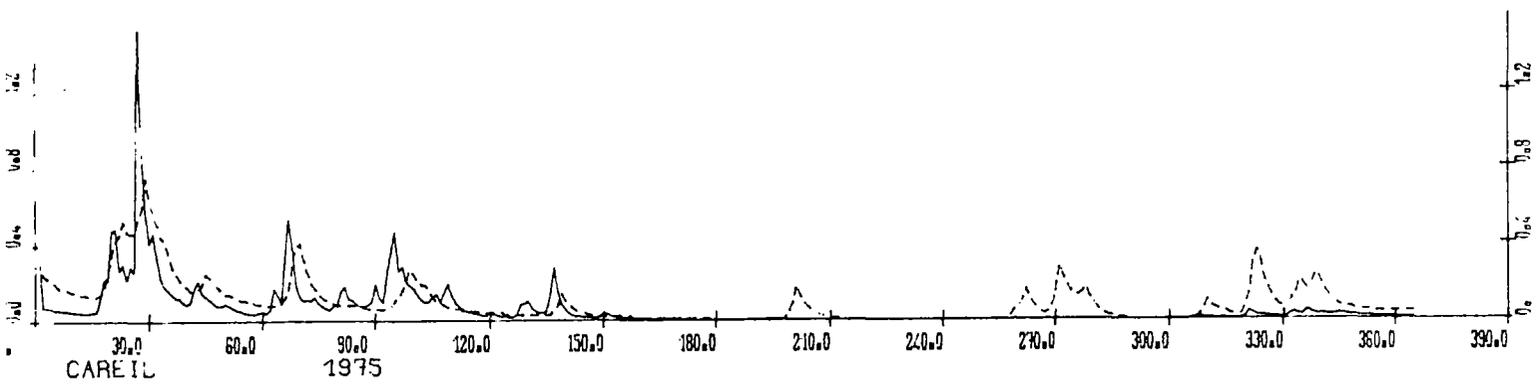
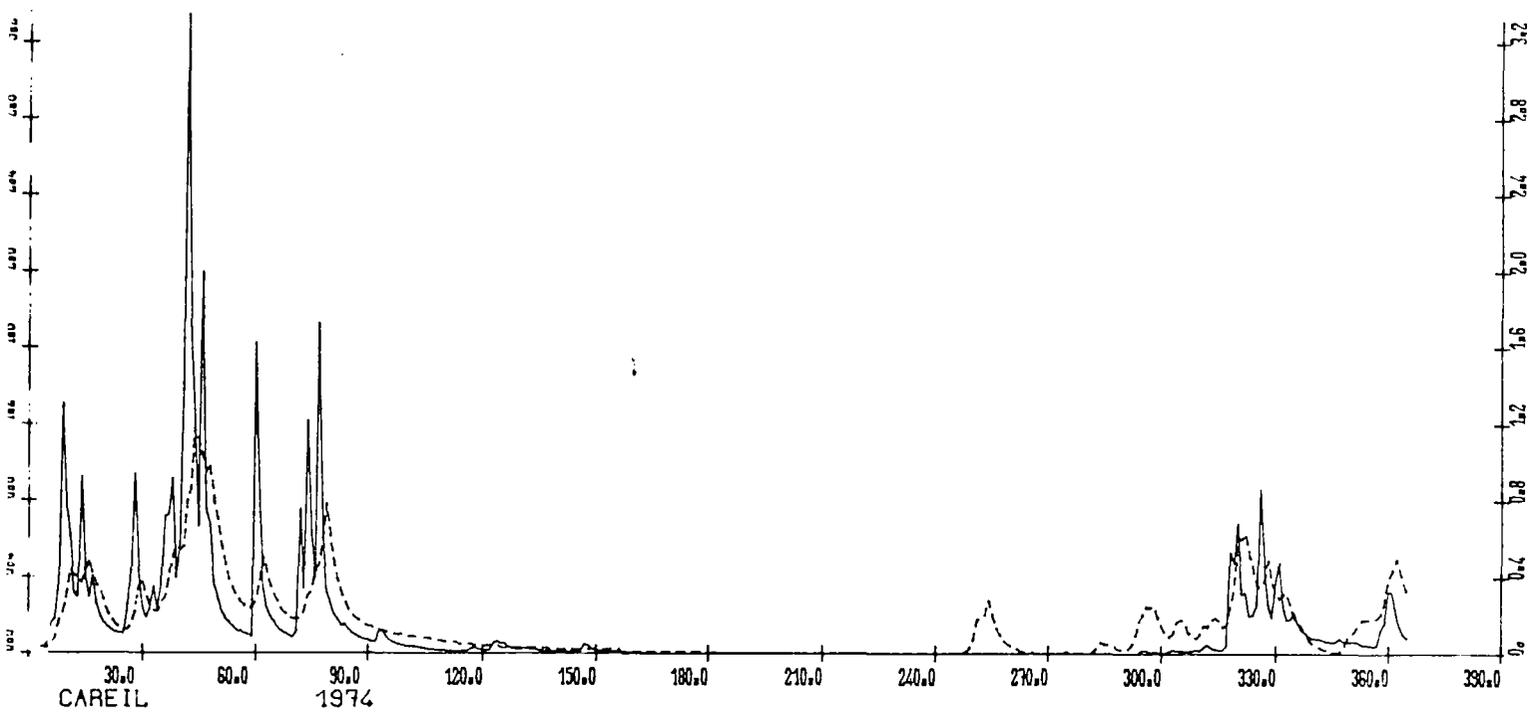












L'EAU SOUTERRAINE DANS LE MASSIF ARMORICAIN

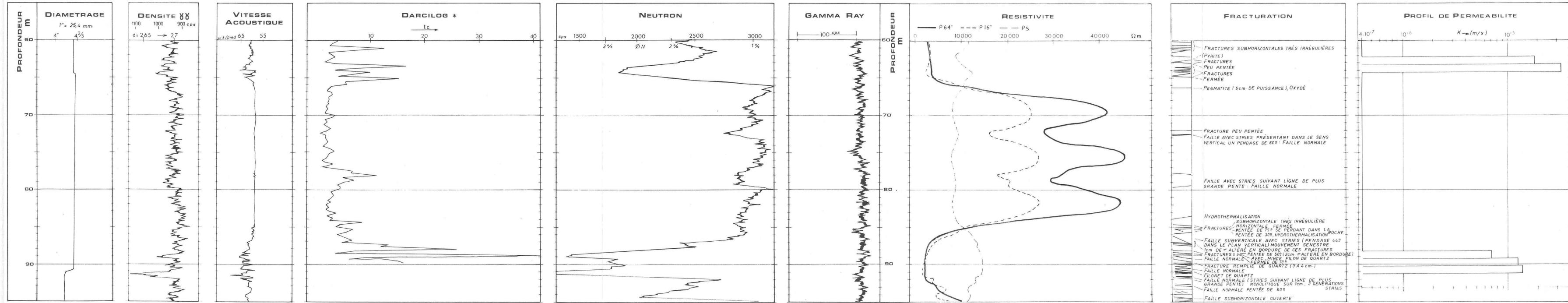
RÉGION BRETAGNE

DIAGRAPHIES
GRANITES

Site GRANITE DE FOUGERES

Forage Terrain

PLANCHE 1



L'EAU SOUTERRAINE DANS LE MASSIF ARMORICAIN

RÉGION BRETAGNE

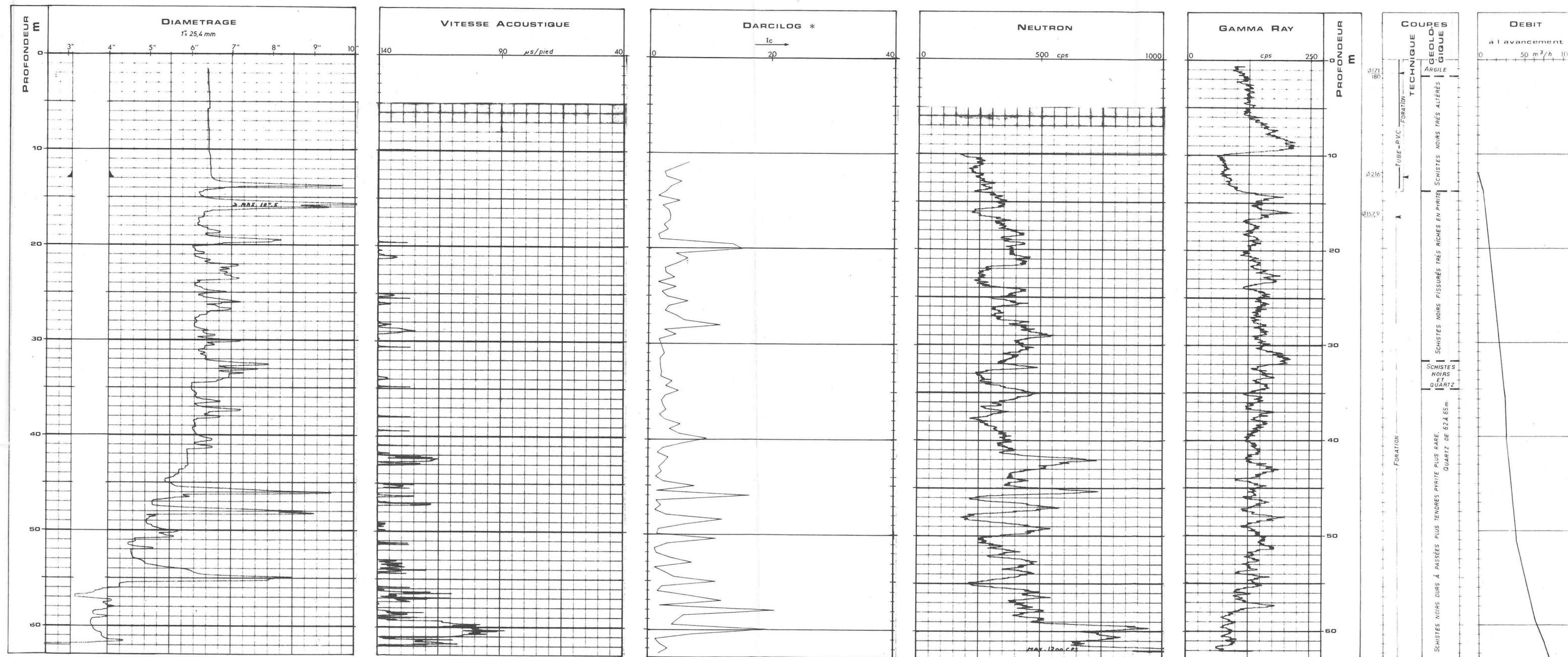
SCHISTES

DIAGRAPHIES

Site LANDERNEAU

Forage Essai

PLANCHE 2



cps=COUPS PAR SECONDE

L'EAU SOUTERRAINE DANS LE MASSIF ARMORICAIN

RÉGION BRETAGNE

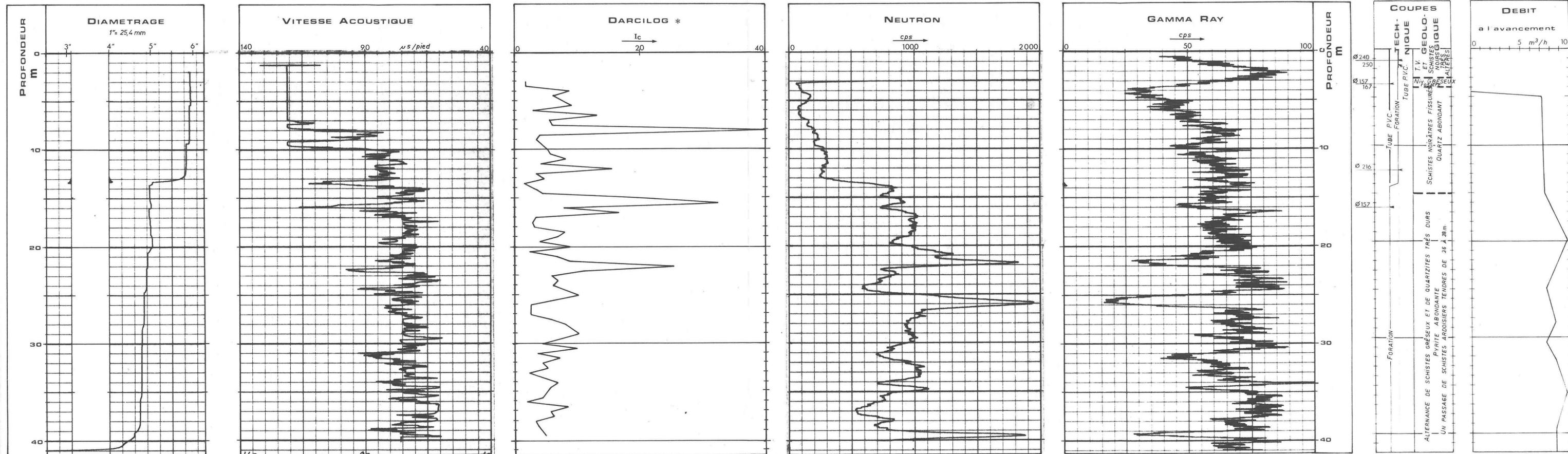
DIAGRAPHIES

SCHISTE ET GRÈS

Site CAUREL

Forage 1

PLANCHE 4



* MARQUE DÉPOSÉE I.F.P.

cps = COUPS PAR SECONDE

L'EAU SOUTERRAINE DANS LE MASSIF ARMORICAIN

RÉGION BRETAGNE

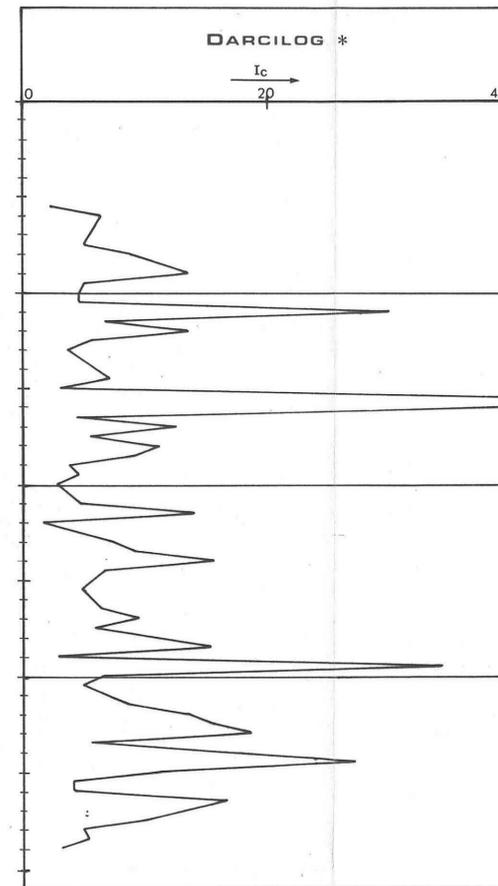
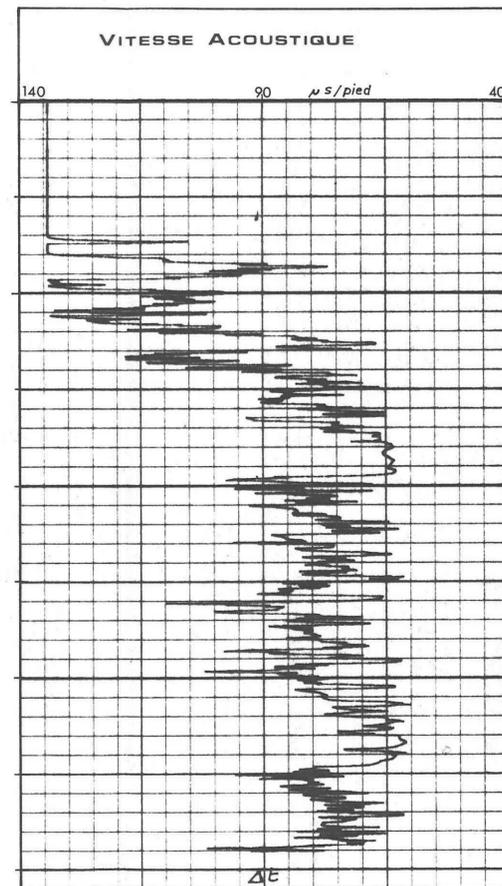
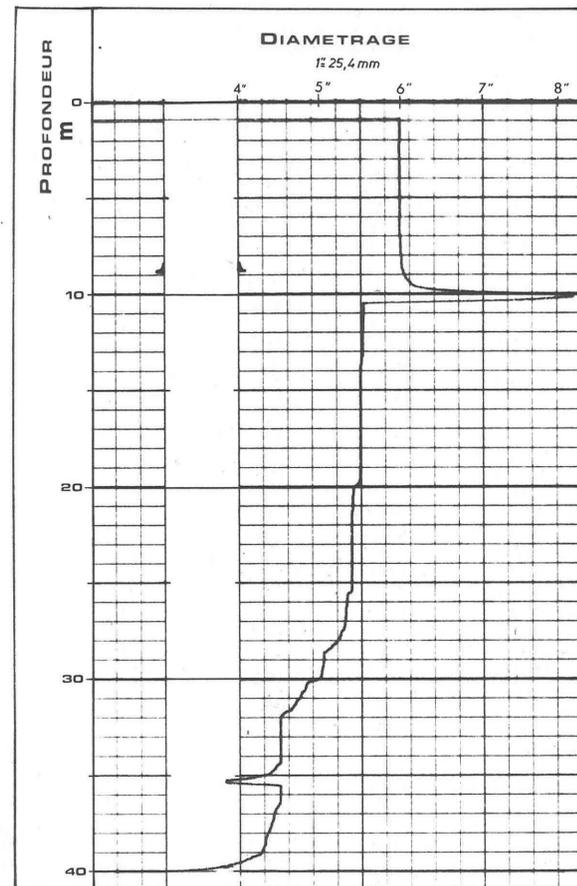
DIAGRAPHIES

SCHISTE ET GRÈS

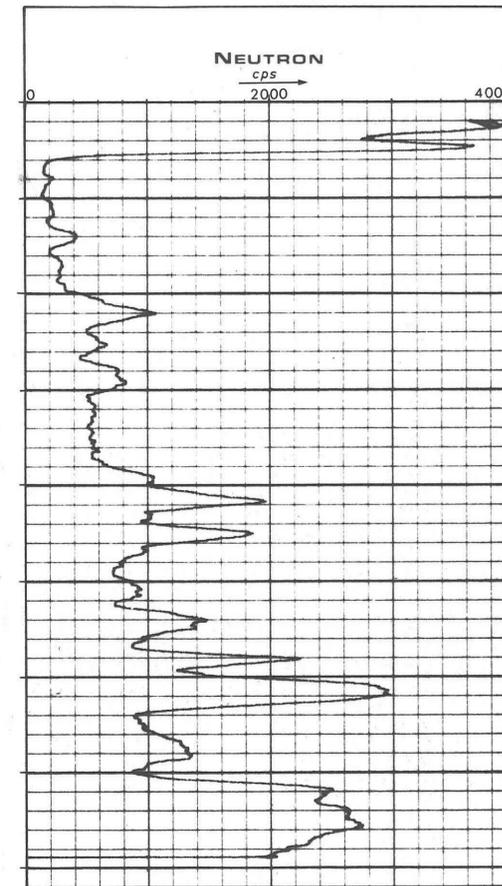
Site CAUREL

Forage 2

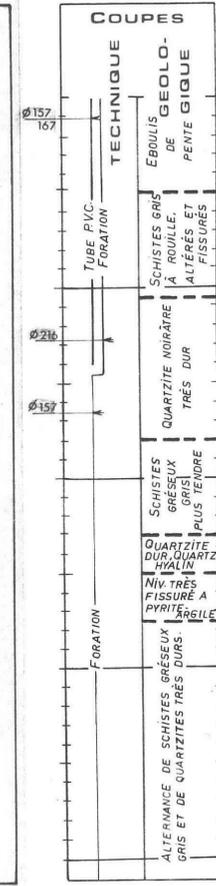
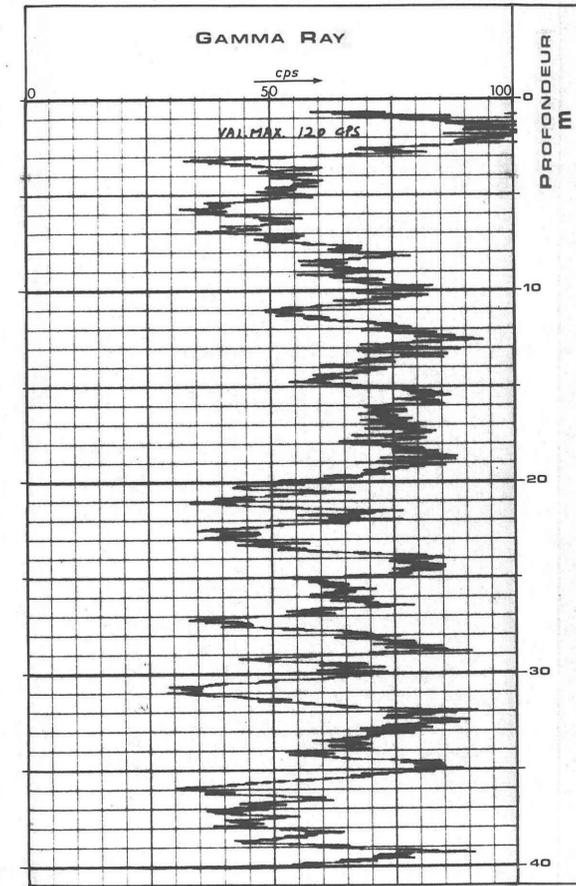
PLANCHE 5



* MARQUE DÉPOSÉE I.F.P.



cps = COUPS PAR SECONDE



DÉLÉGATION GÉNÉRALE A LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

L'EAU SOUTERRAINE DANS LE MASSIF ARMORICAIN

RÉGION BRETAGNE

DIAGRAPHIES

GRÈS

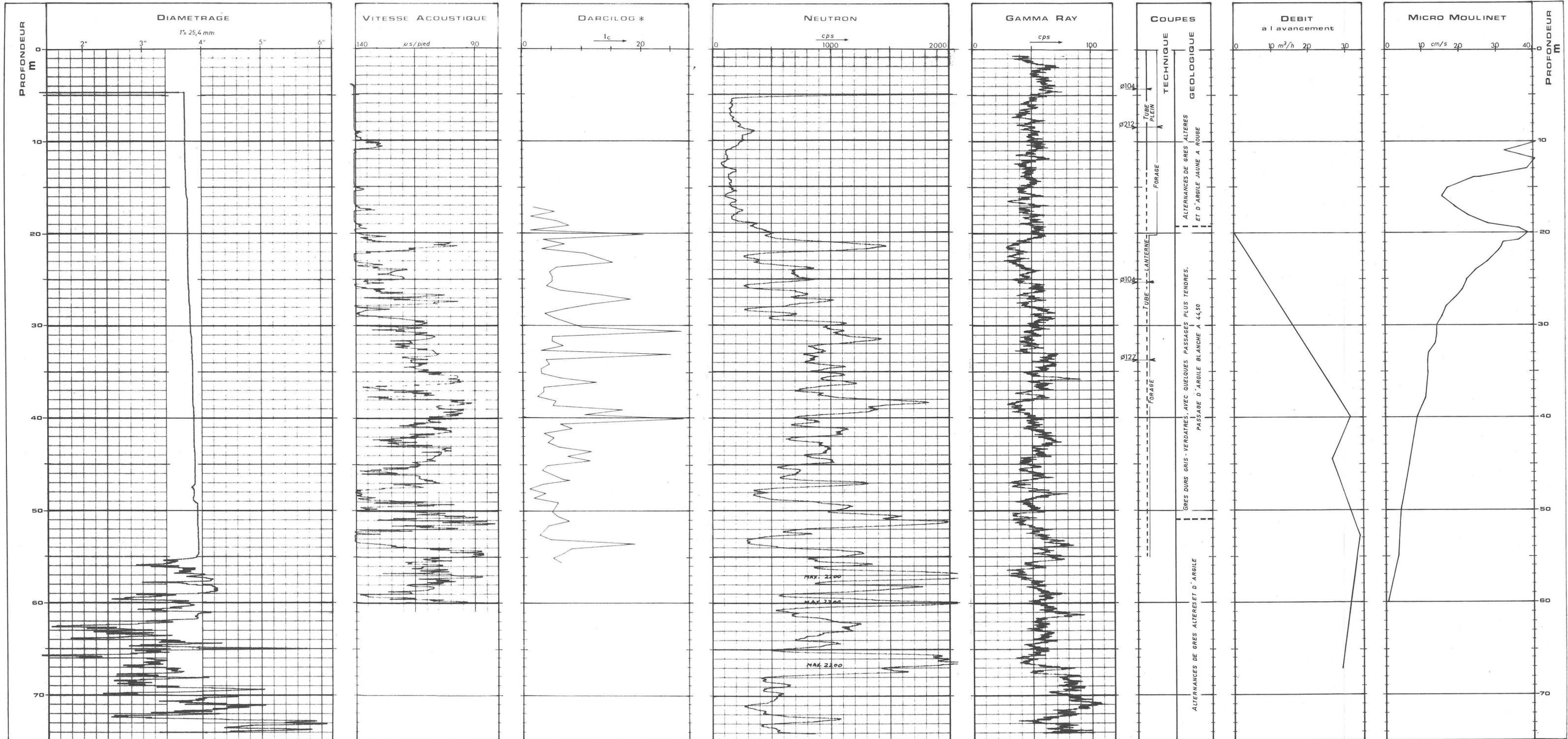
Site PAIMPONT

Forage 4

PLANCHE 6

Service géologique régional
BRETAGNE - PAYS-DE-LA-LOIRE

Département hydrogéologie



L'EAU SOUTERRAINE DANS LE MASSIF ARMORICAIN

RÉGION BRETAGNE

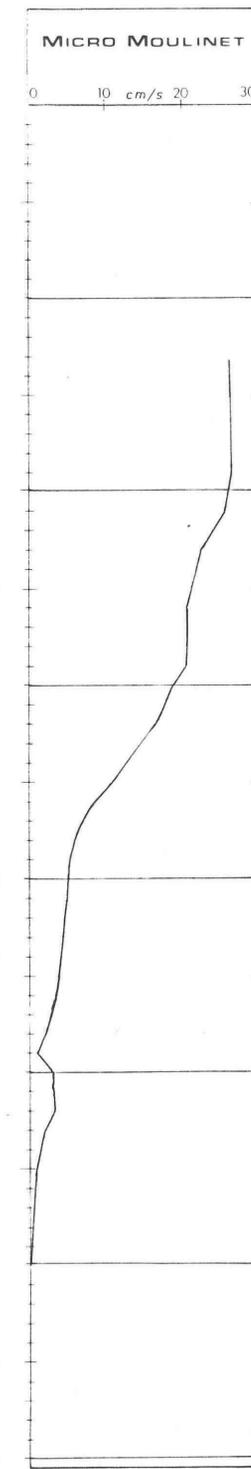
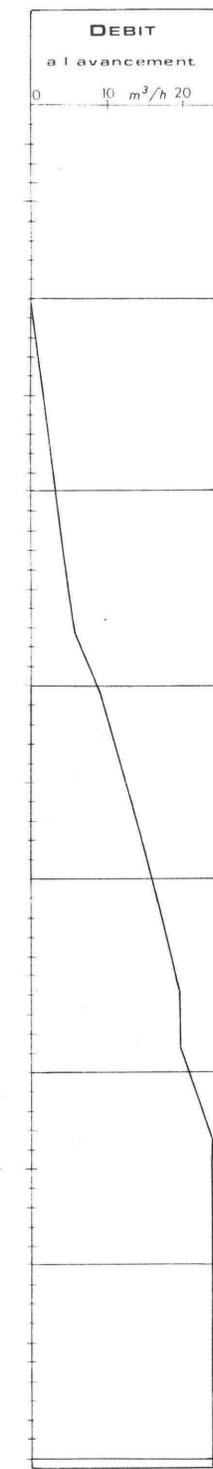
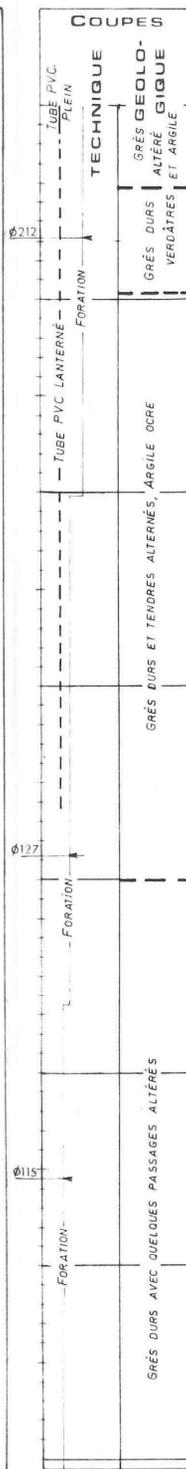
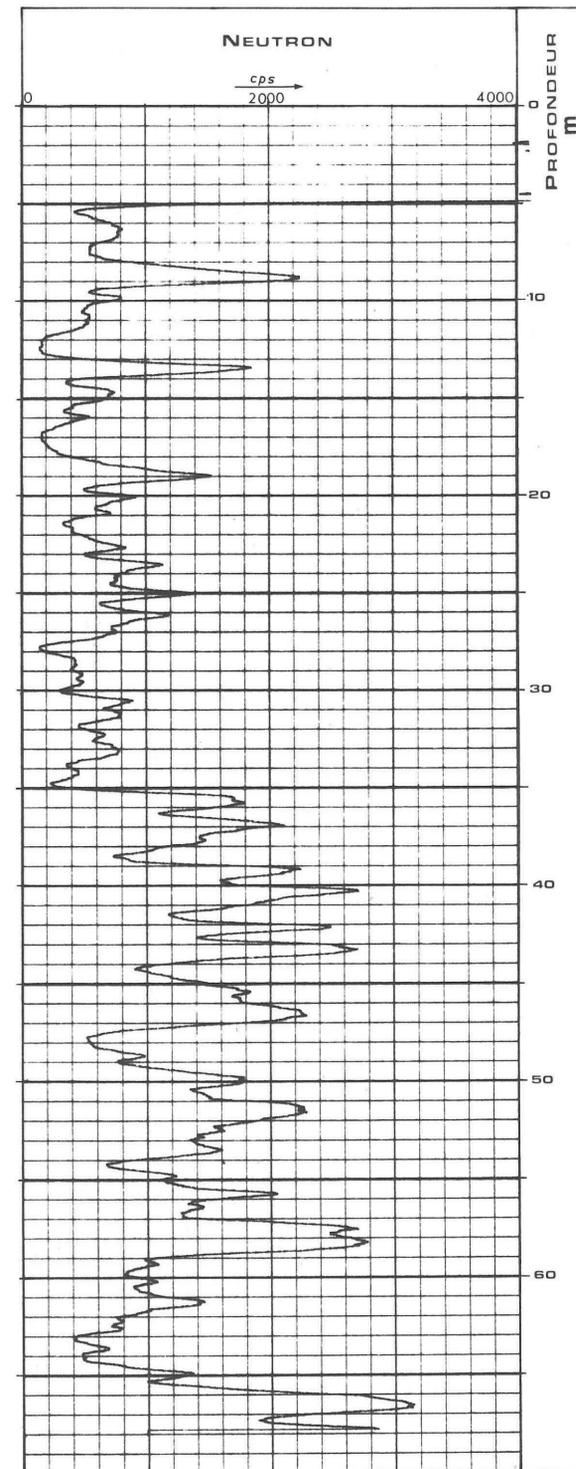
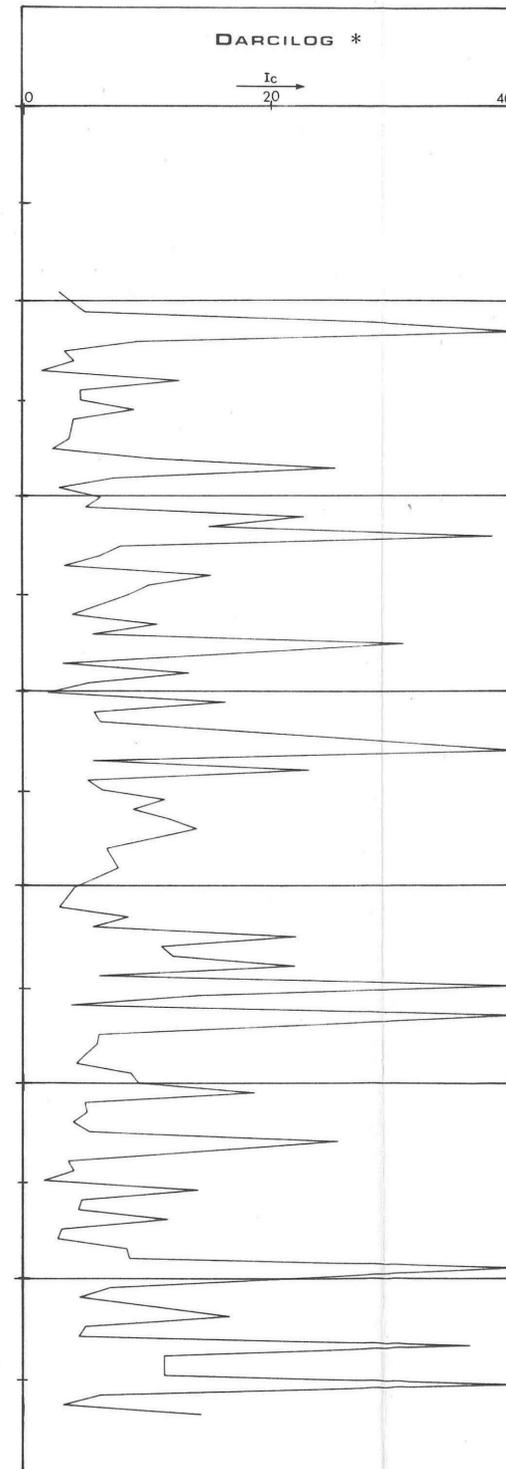
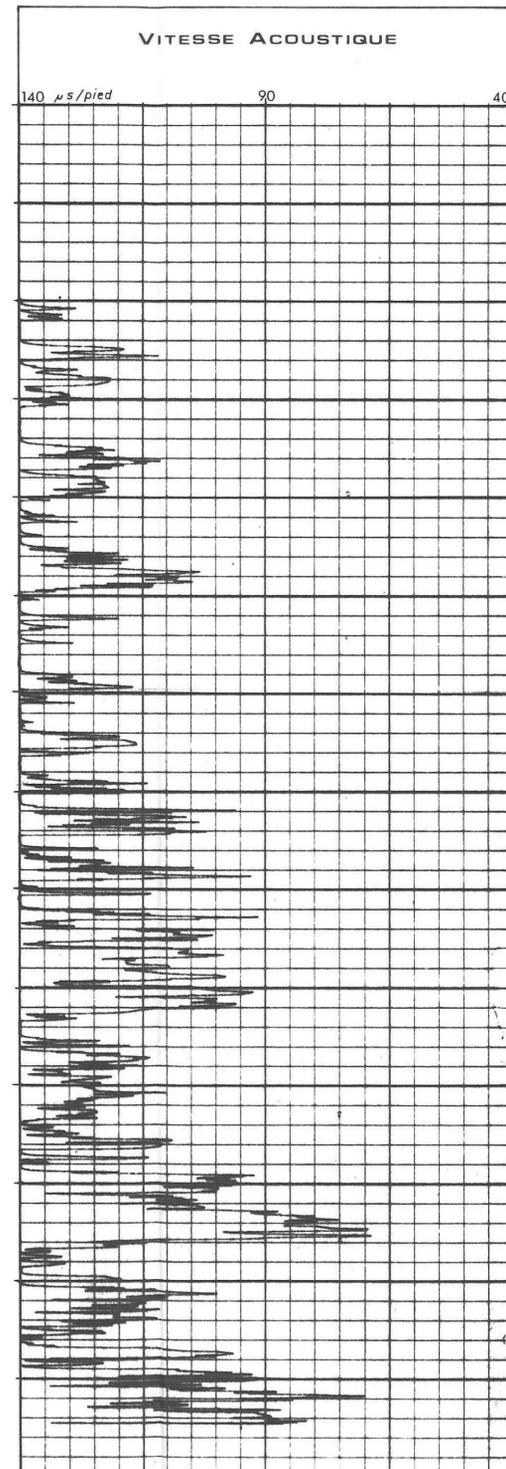
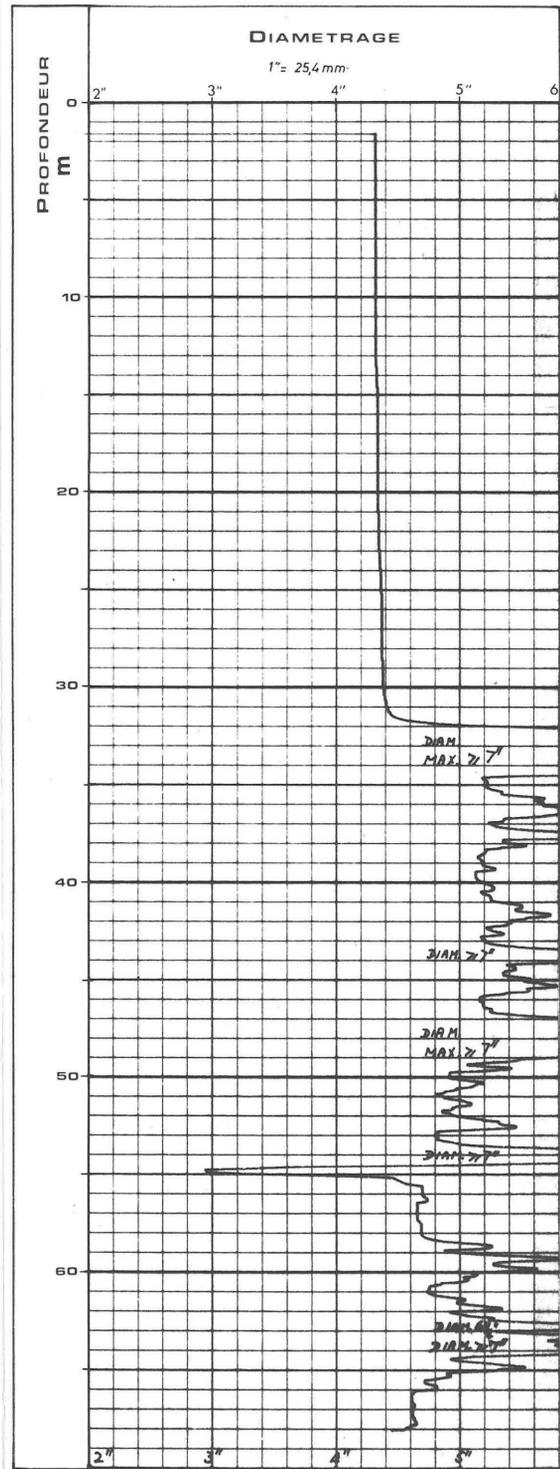
DIAGRAPHIES

GRÈS

Site PAIMPONT

Forage 6

PLANCHE 7



* MARQUE DÉPOSÉE I.F.P.

cps = COUPS PAR SECONDE

DÉLÉGATION GÉNÉRALE A LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

L'EAU SOUTERRAINE DANS LE MASSIF ARMORICAIN

RÉGION BRETAGNE

DIAGRAPHIES GRANITES

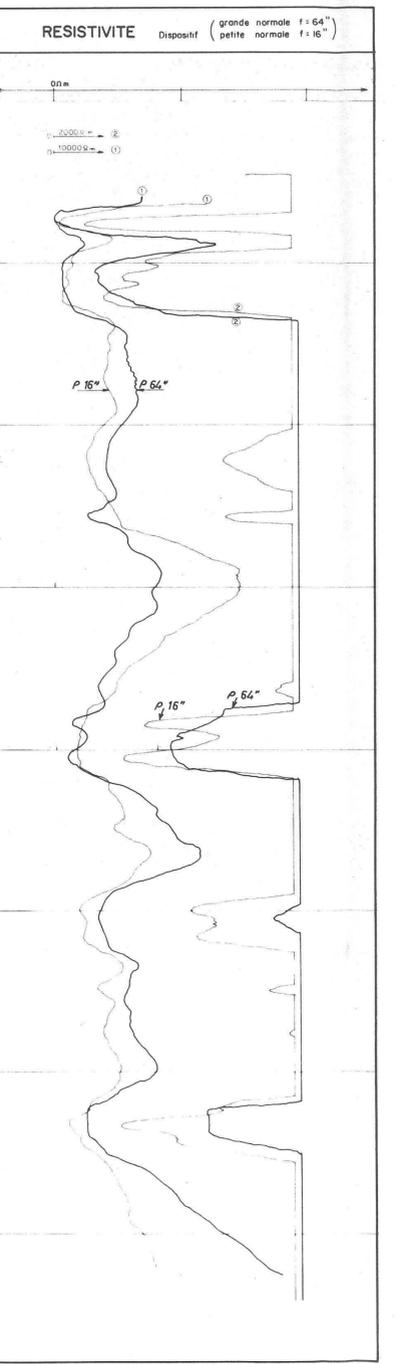
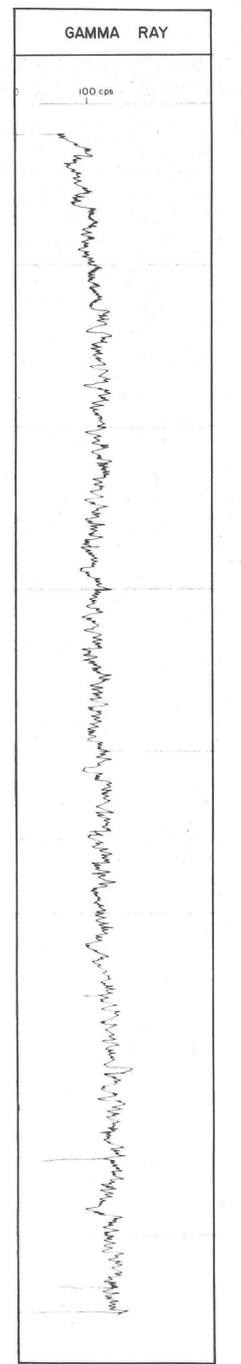
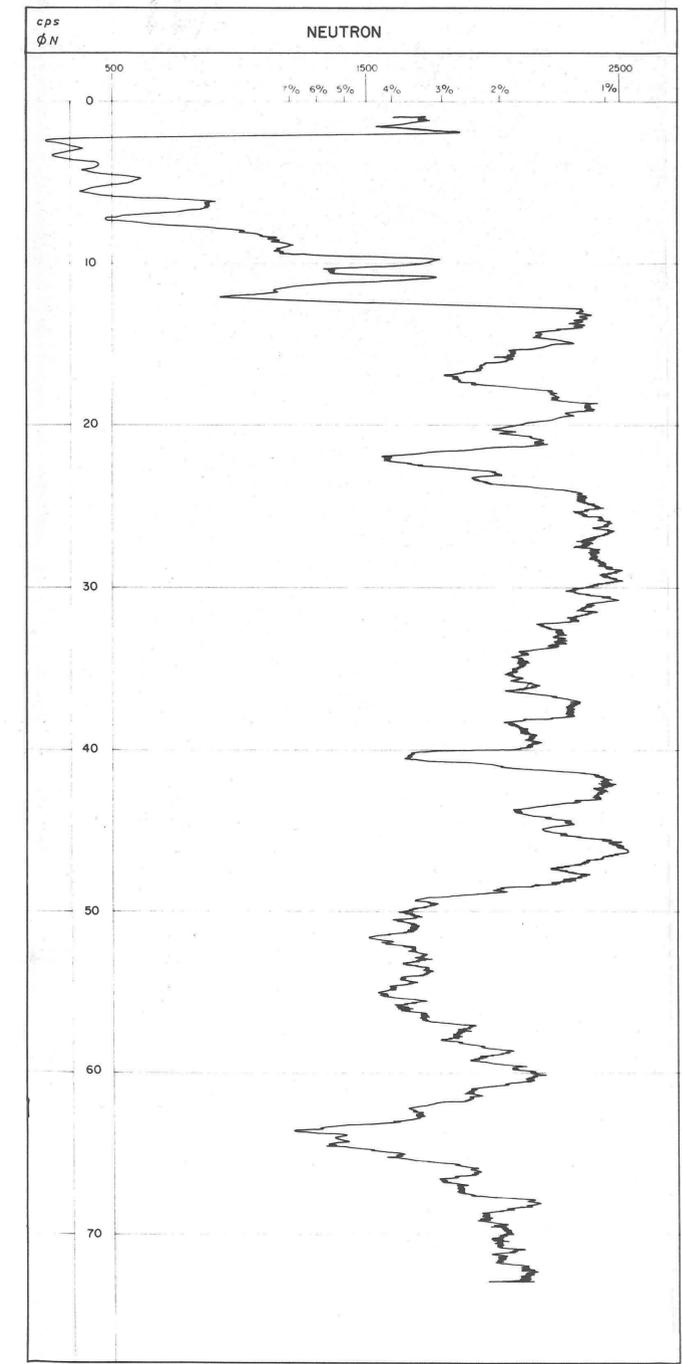
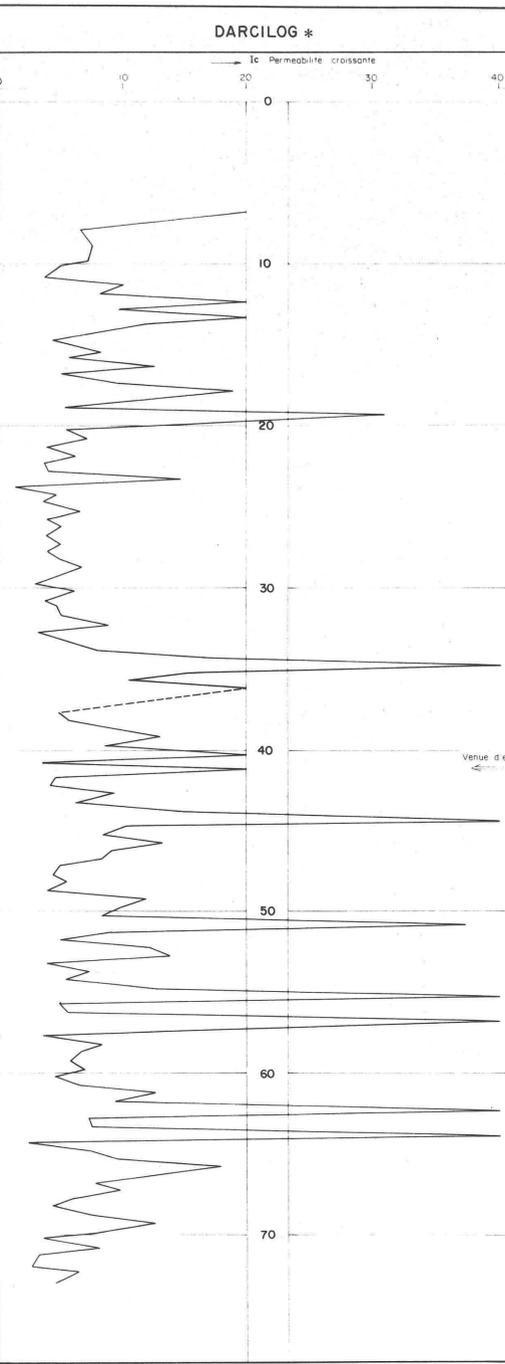
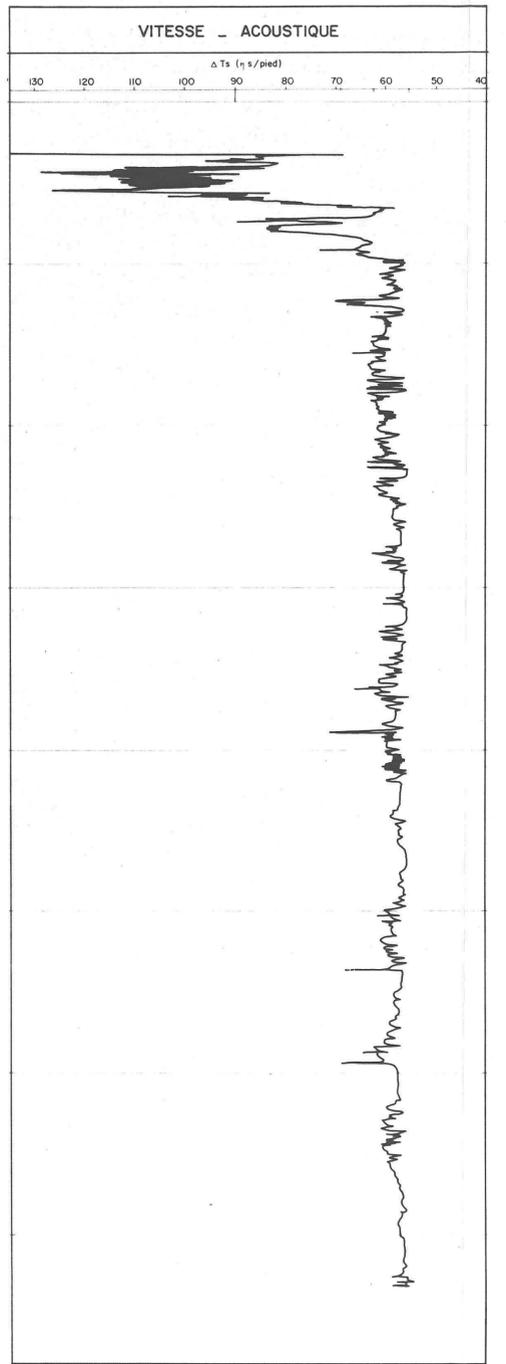
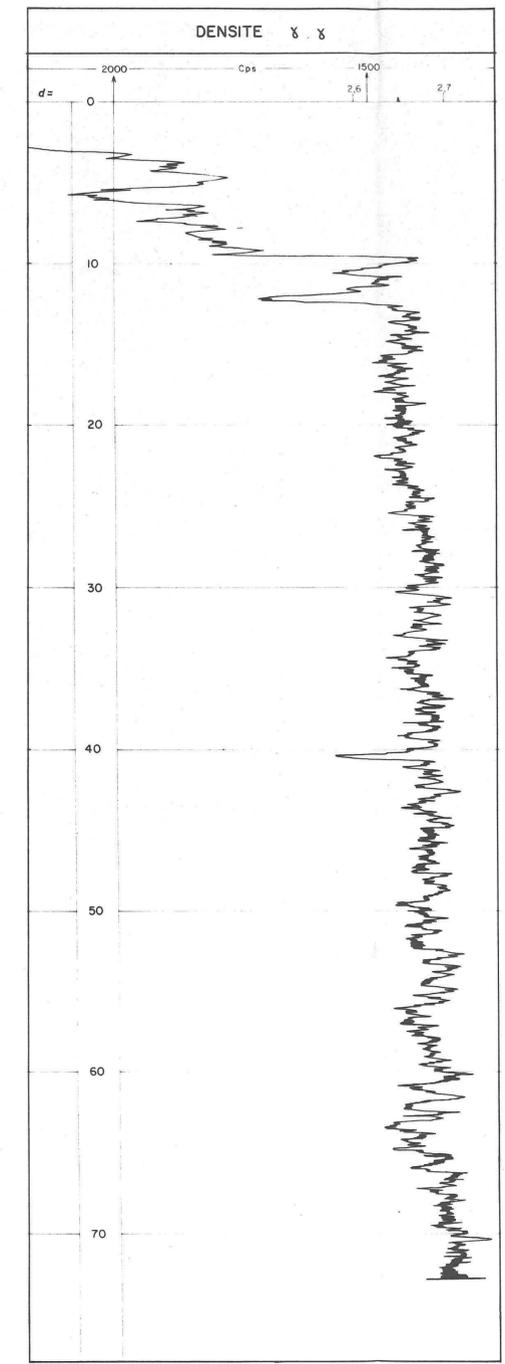
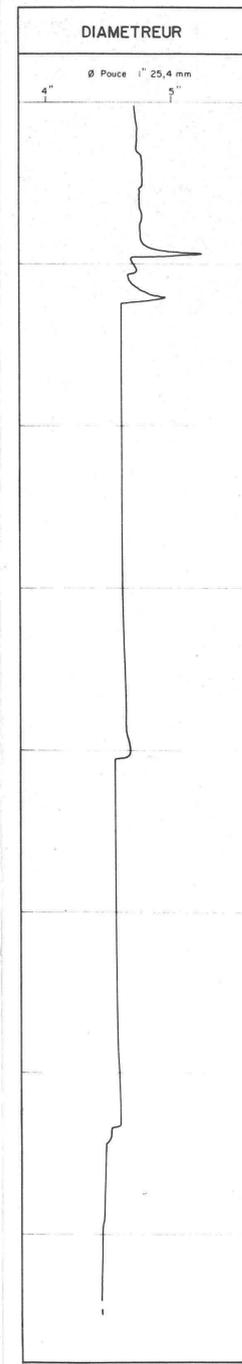
Site GRANITE DE FOUGERES

Forage F2

PLANCHE 8

Service géologique régional
BRETAGNE - PAYS-DE LA LOIRE

Département hydrogéologie



Prof (m)	Coupe technique	Coupe géologique	Description des formations
0			
2.00			Argile beige foncé
3.60			Arène granitique très argileuse
10.00			γ à biotite plus ou moins altéré
13.00			γ à biotite assez sain
19.00			γ à biotite altéré (zone faille)
30.00			γ à biotite assez sain
41.00			γ à biotite chloritisé cataclastique imprégné de sulfure
69.00			γ à biotite assez sain
76.00			γ à biotite sain

Prof (m) 0 10 20 30 40 50 60 70

Coupe technique: PVC Ø 41.80 mm, PVC Ø 41.80 mm, PVC Ø 41.80 mm, Tronau Ø 115 mm

* MARQUE DÉPOSÉE I.F.P.

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

Service géologique régional

PAYS-DE-LA-LOIRE

10, rue Henri-Picherit

44300 Nantes

Tél.: (40) 74.49.00 - 74.56.75 - 74.94.49

Département hydrogéologie

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex

Tél.: (38) 63.80.01

L'EAU SOUTERRAINE DANS LE MASSIF ARMORICAIN RÉGION BRETAGNE

Compte rendu de fin d'étude

par

H. TALBO et P. VAUBOURG



Délégation générale

à la

recherche scientifique et technique

***ACTION CONCERTÉE : Valorisation des ressources
du sous-sol***

Décision d'aide n° 78.07.0752

Mars 1980

80 SGN 146 PAL

R E S U M E

Les recherches d'eau souterraine en milieu de socle rencontrent un certain nombre de problèmes liés aux difficultés d'identification des zones fissurées (implantation de forages productifs) et aux incertitudes subsistant quant au modèle élémentaire d'écoulement et à son comportement ainsi qu'aux ressources (possibilités d'exploitation d'un forage).

Les sites d'étude, répartis dans trois départements bretons représentent les principales formations géologiques du Massif armoricain :

Site 1 - Finistère - Landerneau (schistes)

Site 2 - Côtes-du-Nord - Caurel (grès et schistes)

Site 3 - Ille-et-Vilaine - 3a Paimpont (grès)

3b Loysance (granite)

L'identification des zones fissurées a été envisagée à différentes échelles, locale à ponctuelle.

A l'échelle locale, l'association des méthodes photogéologiques et géophysiques (contrôlées par forages et diagraphies) donne des renseignements d'une fiabilité satisfaisante, surtout qualitatifs, mais aussi pour partie quantitatifs (données sur la géométrie des zones fissurées). Différents pompages d'essai ont été réalisés sur chaque site ; ils permettent de préciser les paramètres hydrodynamiques et de définir deux types essentiels de comportement..

A l'échelle ponctuelle, la comparaison des venues d'eau observées en cours de foration (débits instantanés) avec les informations issues de mesures au micromoulinet de forage, de diagraphies et des résultats des pompages d'essai, montre qu'elles sont représentatives au moins en première approximation, de la transmissivité de l'aquifère local et de la position des horizons perméables. Des séries de diagraphies différées ont été réalisées sur au moins deux forages de chaque site, des diagraphies et essais instantanés ont été pratiqués dans les granites.

Les résultats obtenus par les divers moyens et méthodes mis en oeuvre à différentes échelles d'investigation sont convergents et permettent ainsi de préciser les dimensions du Volume Elémentaire de Référence.

Le problème des ressources a été abordé au moyen d'un système de simulation hydrométéorologique (modèle MERO) comprenant une partie bilan et une partie transfert et permettant, outre le calcul des excédents (précipitations efficaces), une évaluation de la part propre aux eaux souterraines (ressources renouvelables) en autorisant une distinction entre infiltration et ruissellement.

Le modèle MERO a été appliqué à cinq bassins versants choisis en fonction de leur nature géologique et de la longueur des séries de données de pluie et de débit disponibles ; le Blavet (granite), le Couesnon (schiste et granite), la Nançon (granite) l'Aff supérieur (grès) et la Careil (grès et schiste).

S O M M A I R E

RESUME	I
SOMMAIRE	
INTRODUCTION	1
1 - SITES D'APPLICATION DES RECHERCHES - TRAVAUX REALISES	4
11 - Site 1 : Landerneau (29)	4
12 - Site 2 : Caurel (22)	9
13 - Site 3a : Paimpont (35)	13
14 - Site 3b : Bassin expérimental de la Loysance (35)	17
2 - THEME 1	24
21 - Généralités	24
22 - Echelle locale et plus	26
221 - Examen qualitatif	26
222 - Aspect quantitatif - Pompages d'essai	38
23 - Echelle ponctuelle	58
231 - Venues d'eau, débits à la foration	58
232 - Mesures au micromoulinet de forage	62
233 - Diagraphies	68
234 - Slug-tests	86
3 - THEME 2-3	95
31 - Excédents calculés par la méthode de THORNTHWAITE	96
32 - Evaluation des ressources en eau souterraine - Modèle MERO	96
321 - Principe du modèle MERO	96
322 - Application du modèle MERO	100
33 - Critique des résultats	110
34 - Conclusions	111
4 - CONCLUSION GENERALE	114

BIBLIOGRAPHIE

116

ANNEXES :

Annexe 1 - Coupes des forages réalisés

Annexe 2 - Modèle MERO - Hydrogrammes calculés et observés

PLANCHES HORS TEXTE - DIAGRAPHIES

Site granite de Fougères - Forage témoin	PL 1
Site Landerneau - Forage essai	PL 2
Site Landerneau - Forage 2	PL 3
Site Caurel - Forage 1	PL 4
Site Caurel - Forage 2	PL 5
Site Paimpont - Forage 4	PL 6
Site Paimpont - Forage 6	PL 7
Site granite de Fougères - Forage 2	PL 8
Site granite de Fougères - Forage F7	PL 9

INTRODUCTION

La Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique a chargé le Bureau de Recherches Géologiques et Minières de réaliser des recherches sur les aquifères fissurés des massifs anciens, pour lesquels subsistent un certain nombre de problèmes, tant ponctuels que régionaux. Ces recherches doivent contribuer à valoriser les connaissances acquises dans le cadre des travaux d'Evaluation des Ressources Hydrauliques et d'aborder d'une manière plus objective les problèmes qualitatifs et quantitatifs propres aux eaux souterraines du Massif armoricain.

La notification hydrogéologique en milieu fissuré s'est d'abord orientée vers la mise au point de méthodes pour l'implantation de forages capables de fournir de bons débits. Tout naturellement le développement de l'exploitation des eaux souterraines conduit à se poser la question des ressources en eau. L'évaluation de ces dernières suppose entre autre une bonne connaissance des aquifères tant à l'échelle ponctuelle que régionale.

Les trois thèmes retenus pour la présente étude illustrent bien cette démarche :

- Thème 1 : Développement de techniques de reconnaissance sur une surface limitée. Définition du modèle élémentaire d'écoulement et analyse de son comportement.
- Thème 2 : Essai de définition de la ressource en eau en milieu fissuré. Relation entre ressources en eau souterraine et superficielle. Interférence des forages sur les ressources globales.
- Thème 3 : Mécanismes naturels d'infiltration et de drainage par les rivières.

D'un point de vue pratique, les thèmes 2 et 3 sont difficilement dissociables ; ils seront traités ensemble.

Trois sites d'étude répartis dans trois départements et correspondant à des formations géologiques différentes, ont été sélectionnés (cf. fig. n° 1). Ce sont :

- Site 1 : Finistère (29) Landerneau (schiste)
- Site 2 : Côtes-du-Nord (22) Caurel (grès et schiste)
- Site 3 : Ille-et-Vilaine (35) 3a - Paimpont (grès armoricains)
3b - Loysance (granite)

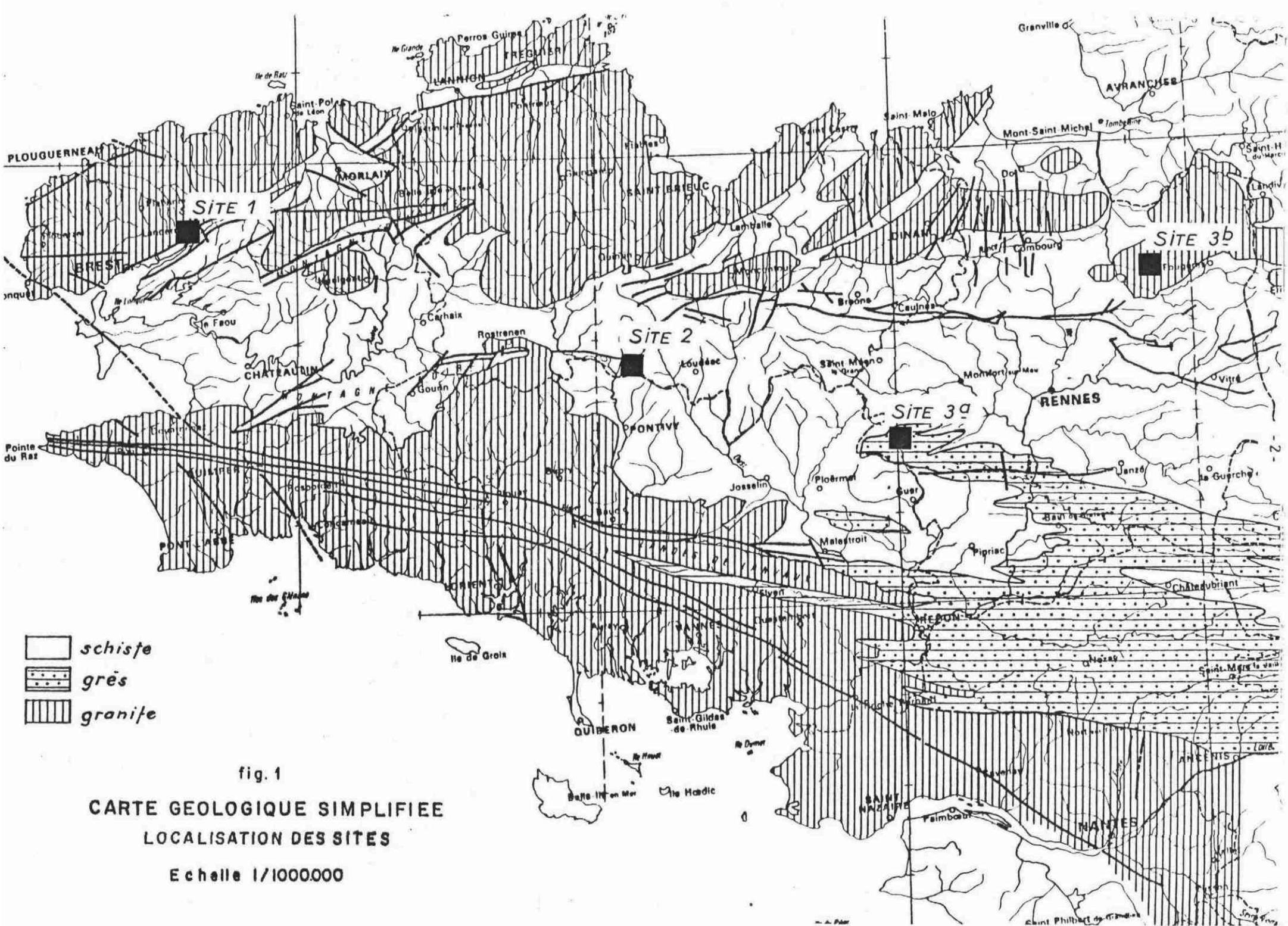


fig. 1

CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE
LOCALISATION DES SITES

Echelle 1/1000000

Avant d'entreprendre une description des travaux réalisés et la présentation des résultats obtenus, il paraît nécessaire de préciser en quels termes se posent les problèmes soulevés par l'étude des milieux fissurés et d'établir les liens existants entre les divers thèmes proposés.

Au thème 1, les méthodes développées visent à une définition du modèle élémentaire d'écoulement. Pour ce faire un certain nombre de paramètres doivent être définis et il faut savoir quelle est la dimension du volume élémentaire auquel ces paramètres sont applicables. Parmi ces paramètres à priori les plus importants, il faut citer le potentiel, la perméabilité, la porosité, l'emmagasinement. En milieu sédimentaire, les méthodes de détermination de ces paramètres sont assez bien maîtrisées et on dispose de méthodes d'interpolation. Par contre, en milieu fissuré, il convenait de définir les limites de validité des méthodes classiques, les moyens de les adapter ou même de développer de nouvelles méthodes plus spécifiques.

Dans le cadre des thèmes 2 et 3, la question des ressources devait être abordée de deux manières différentes :

- par le calcul à l'aide d'un modèle des ressources naturelles qui se distinguent des ressources exploitables qui, elles, tiennent compte des diverses contraintes pratiques et économiques. On a essayé également d'apprécier le rôle de la nature géologique des formations aquifères ;
- par le suivi de l'évolution d'exploitations existantes, afin de situer leurs interférences sur les eaux souterraines et superficielles. Ces exploitations sont développées à partir d'installations privées (commune, syndicat de communes, industrie) en place. On évitait ainsi les travaux préliminaires de réalisation de forages productifs et on bénéficiait des installations et moyens de pompage existants. En fait, ce dernier point n'a pas donné les résultats escomptés : l'exploitation de Landerneau a été interrompue alors que l'étude commençait à peine, pour ne reprendre qu'à une date ultérieure, non précisée, mais qui s'est révélée très postérieure à la fin de nos travaux ; à Paimpont, les pompages d'exploitation qui devaient être notables, de l'ordre d'une trentaine de m³/heure, à dû être réduit à 8 m³/h à cause d'arrivées abondantes de grains siliceux abrasifs. L'exploitation du forage de Caurel a eu lieu comme prévu, mais s'agissant d'une petite exploitation discontinue, l'objectif était essentiellement l'examen du comportement de la nappe soumise à des pompages cycliques.

1 - SITES D'APPLICATION DES RECHERCHES - TRAVAUX REALISES

11 - SITE 1 : LANDERNEAU (29)

11.1 - Localisation et cadre géologique

Le site de Landerneau est situé dans une zone où la tectonique cassante se traduit par un important réseau de fractures. Il est encadré au Nord-Ouest par la grande faille directionnelle de l'Elorn, au Nord-Est et au Sud-Ouest par deux failles de direction NW-SE (failles "type Kerforne") postérieures à la faille de l'Elorn qu'elles décrochent en nombreux endroits (cf. fig. n° 2 schéma géologique à 1/25 000).

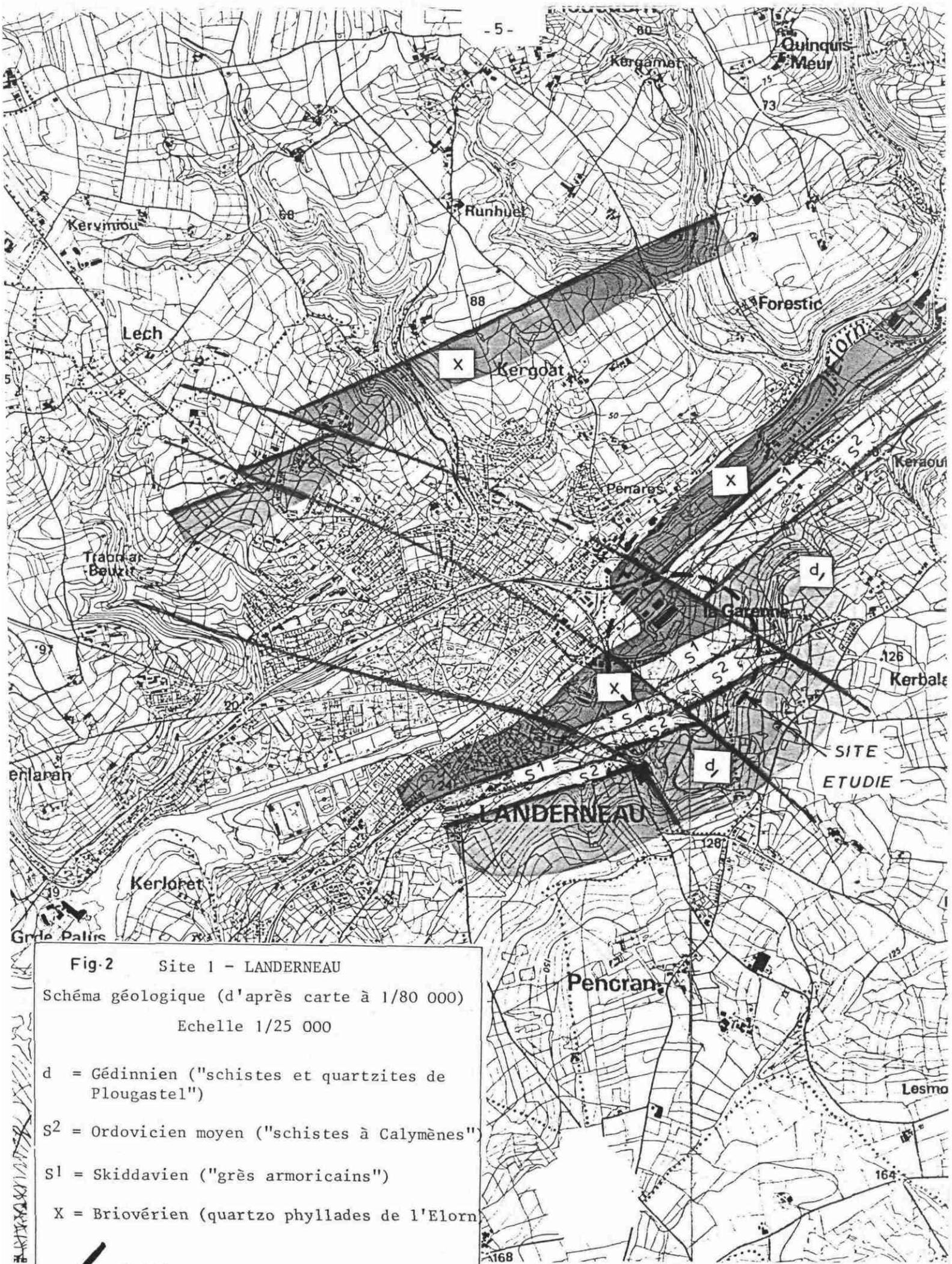
D'après la feuille géologique Brest à 1/80 0000, la moitié nord du site est constituée par les "quartzophyllades de l'Elorn", attribuées au Briovérien et où sont associés des niveaux schisteux, des niveaux gréseux et des niveaux avec alternance fine de pélites et de grès. Le "grès armoricain" - S1 (Skiddovien), reposant transgressivement sur le socle Briovérien est représenté par des quartzites blancs à niveaux psammitiques ; il est surmonté par les formations de l'Ordovicien moyen au Silurien, constituées essentiellement de schistes noirs, avec quelques intercalations gréseuses.

En fait, les sondages et forages n'ont rencontré que des schistes (dans l'hypothèse la plus probable, ils sont briovériens) et il faut admettre que le "grès armoricain" est en réalité situé plus au sud.

11.2 - Dispositif en place

La société COPAGRI dispose de deux groupes de forages (cf. fig. n° 3) :

- le groupe de surgélation, comprenant un forage de 6" (forage 2, profondeur 51 m, base de la formation aquifère non atteinte, débit instantané à l'origine : 50 m³/h) et deux forages de 4" (forage 1, débit instantané à l'origine : 18 m³/h et forage 5, débit instantané à l'origine : 9 m³/h).



Les forages du groupe de surgélation ont été exploités de mai 1977 à fin 1978 au débit moyen de 60-65 m³/h.

- le groupe de la centrale laitière, comprenant également trois forages : un forage de 6" (forage 3, profondeur 70 m, débit instantané à l'origine : 40 m³/h) et deux forages de 4" (forage 4, débit à l'origine : 12 m³/h et forage 6, débit à l'origine : 6 m³/h).

A partir de mai 1977, le groupe de la centrale laitière a été exploité pendant deux mois au débit global de 50 m³/h, puis le débit du forage 3 est tombé à 12 m³/h, vraisemblablement sous l'effet conjugué d'un colmatage (précipitation d'oxydes de fer) et de l'accélération du rabattement provoqué par l'atteinte des limites de l'aquifère par le cône de dépression. Jusqu'à fin 1978, le débit fournit globalement par les trois forages était de l'ordre de 25 m³/h.

Un certain nombre de sondages en petit diamètre avaient précédé ces réalisations ; ils sont tous rebouchés à l'exception du sondage 8 qui a pu être utilisé comme piézomètre.

A l'automne 1978, le niveau dynamique dans les forages exploités est descendu à environ 30 m sous le sol, dénoyant très vraisemblablement un niveau très pyriteux. L'oxydation des pyrites au contact de l'air a abaissé le pH de l'eau à 3 en même temps que la teneur en fer s'élevait à plus de 100 mg/l, obligeant à interrompre l'exploitation.

La recharge hivernale de la nappe a permis de retrouver une situation plus normale, mais l'eau, peu minéralisée, reste très riche en fer et son utilisation (essentiellement refroidissement) nécessite une installation de traitement (neutralisation - déferrisation) non encore réalisée. En outre, l'exploitation future devra être conduite avec plus de précautions.

- Qualité de l'eau - échantillon prélevé sur F2 le 26/9/79

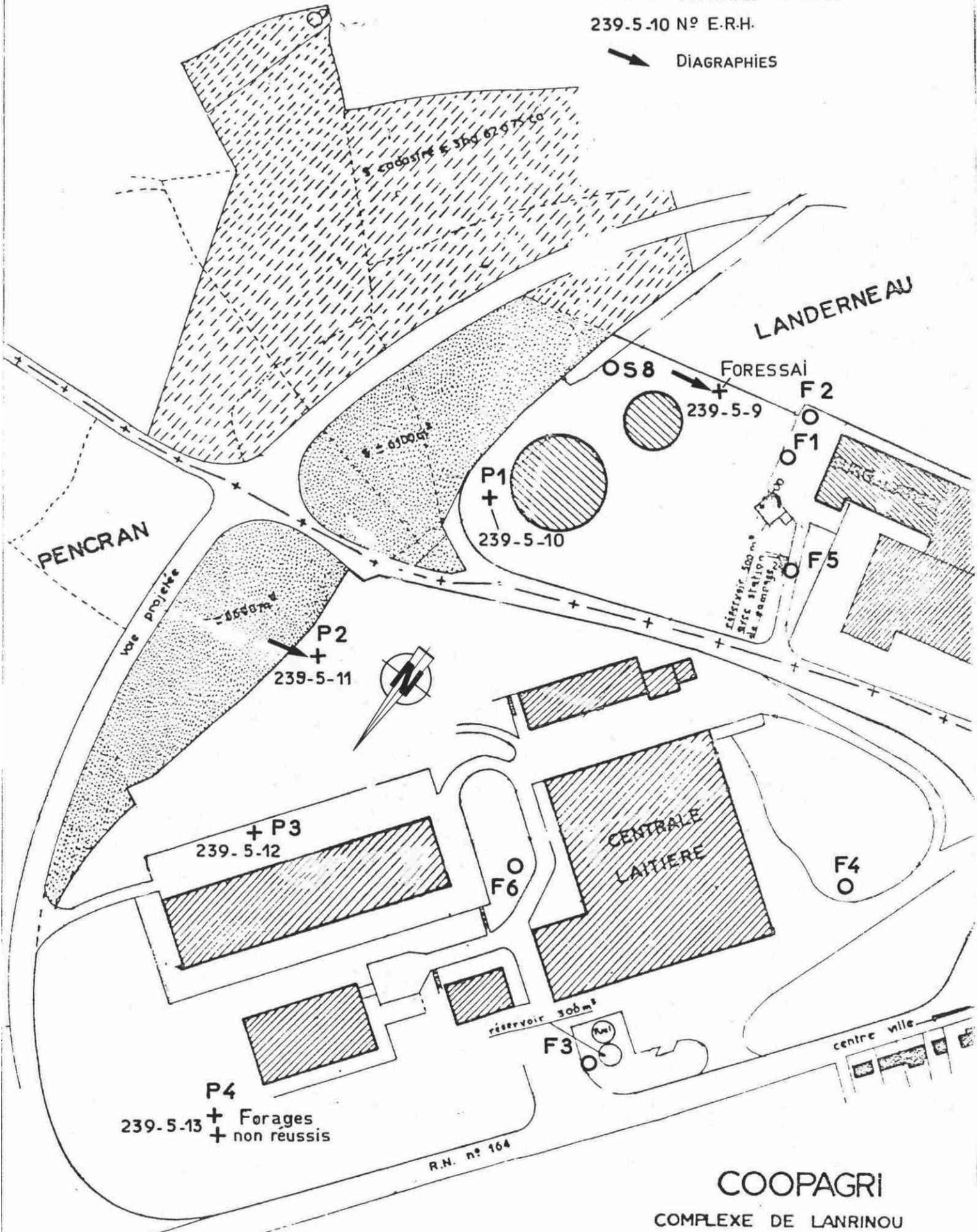
Résistivité (en Ω /cm à 20°C)	5805
pH	5,25
Oxygène cédé par KMnO ₄ en milieu alcalin	0,7 mg/l
Dureté totale	6,0 degrés français
TA	0 "
TAC	0,5 "
Silice	12 mg/l

O F2 OUVRAGES COOPAGRI

+ P1 OUVRAGES B.R.G.M.

239.5.10 N° E.R.H.

➔ DIAGRAPHIES



COOPAGRI

COMPLEXE DE LANRINO

1° CATIONS	mg/l	me/l	2° ANIONS	mg/l	me/l
Calcium, en Ca ⁺⁺	10	0,50	Carbonique, en CO ₃ ⁻⁻	0,0	0,00
Magnésium, en Mg ⁺⁺	8,5	0,70	Bicarbonique, en HCO ₃ ⁻⁻	6,0	0,10
Ammonium, en NH ₄ ⁺	≤ 0,05	0,00	Chlore, en Cl ⁻	24	0,67
Sodium, en Na ⁺	15,5	0,67	Sulfurique, en SO ₄ ⁻⁻	49	1,02
Potassium, en K ⁺	0,8	0,02	Nitreux, en NO ₂ ⁻	≤ 0,01	0,00
Fer, en Fe ⁺⁺	6,10	0,22	Nitrique, en NO ₃ ⁻	≤ 0,5	0,00
Manganèse, en Mn ⁺⁺	0,05	0,00	Phosphorique, en PO ₄ ⁻⁻⁻	≤ 0,02	0,00
Aluminium, en Al ⁺⁺⁺	0,19	0,02			

2,13

1,79

Recherches spéciales : métaux lourds à la dithizone : - Pb : 0,1 mg/l
 - Cu : 0,02 mg/l
 - Zn : 0,3 mg/l

- échantillons prélevés en fin de foration (Foressai P1 à P3)

	Foressai	P1	P2	P3
Résistivité cm à 20°C	3604	3906	4539	5995
Dureté totale ° français	10	7,5	6	4
Fer total mg/l	2	/	/	/
Mn ⁺⁺ mg/l	0	0,05	0,05	0,2
Chlorures Cl ⁻ mg/l	30	30	30	30

11.3 - Travaux réalisés

Cinq forages ont été réalisés (Foressai - P1 - P2 - P3 - P4) de façon à mieux explorer le secteur, préciser les relations entre les linéaments photographiques et la perméabilité du sous-sol, et à permettre les diagraphies différées impossibles à effectuer dans les ouvrages en place.

A l'exception de P4 qui, malgré deux tentatives n'a pu être mené à terme (argile impossible à forer avec les moyens mis en oeuvre : marteau fond-de-trou), les différents forages ont rencontré les mêmes terrains (cf. coupes en annexe).

Les diagraphies différées ont été exécutées dans "Foressai" et P2 et un pompage d'essai a été réalisé sur F2.

12 - SITE 2 - CAUREL (22)

12.1 - Localisation et cadre géologique

Le territoire de la commune de Caurel est situé sur les formations primaires constituant la bordure méridionale du bassin de Chateaulin (cf. schéma géologique, figure 4). Le site 2 est à 600 m au Nord du bourg et se trouve situé altimétriquement 70 à 80 m plus haut.

Le sous-sol est constitué par les phyllades et quartzites de Plougastel (Gédinien -d1) représentés par des quartzophyllades grossiers de couleur en général bleutée, alternant avec des bancs plus minces de quartzite vert. Les phyllades et quartzites de Plougastel, épais au total de 300 à 500 m, forment une barre résistante bien visible dans le paysage.

12.2 - Dispositif en place

La commune a fait réaliser un forage en 1977, destiné à renforcer son captage traditionnel situé à 400 m plus au sud et au débit devrnu insuffisant en été.

Profond de 56 m, le forage a traversé des argiles jusqu'à 22 m, puis des alternances de schistes et grès avec quartz très abondant jusqu'à 36 m, un filon de quartz de 36 à 38 m, puis des quartzophyllades noirs. En fin de forage, le débit instantané exhauré par l'action de l'air comprimé était de 24 m³/h.

L'ouvrage est exploité depuis en saison estivale à quelques dizaines de mètres cubes par jour. Son équipement (pompe, colonne d'exhaure et câble électrique) empêche la réalisation de diagraphies.

12.3 - Travaux réalisés

Cinq profils géologiques (trainés électriques) ont permis de préciser la signification des linéaments photographiques. L'exploration géophysique a été suivie par deux forages (P1 et P2) implantés l'un dans l'axe de la zone fissurée, l'autre en limite de cette zone. Une série de diagraphies différées a été effectuée dans P1 et P2. L'exploitation du forage communal a été suivie (limnigraphe OTT sur P1) de façon à connaître l'évolution de la nappe sous l'influence d'un pompage discontinu.

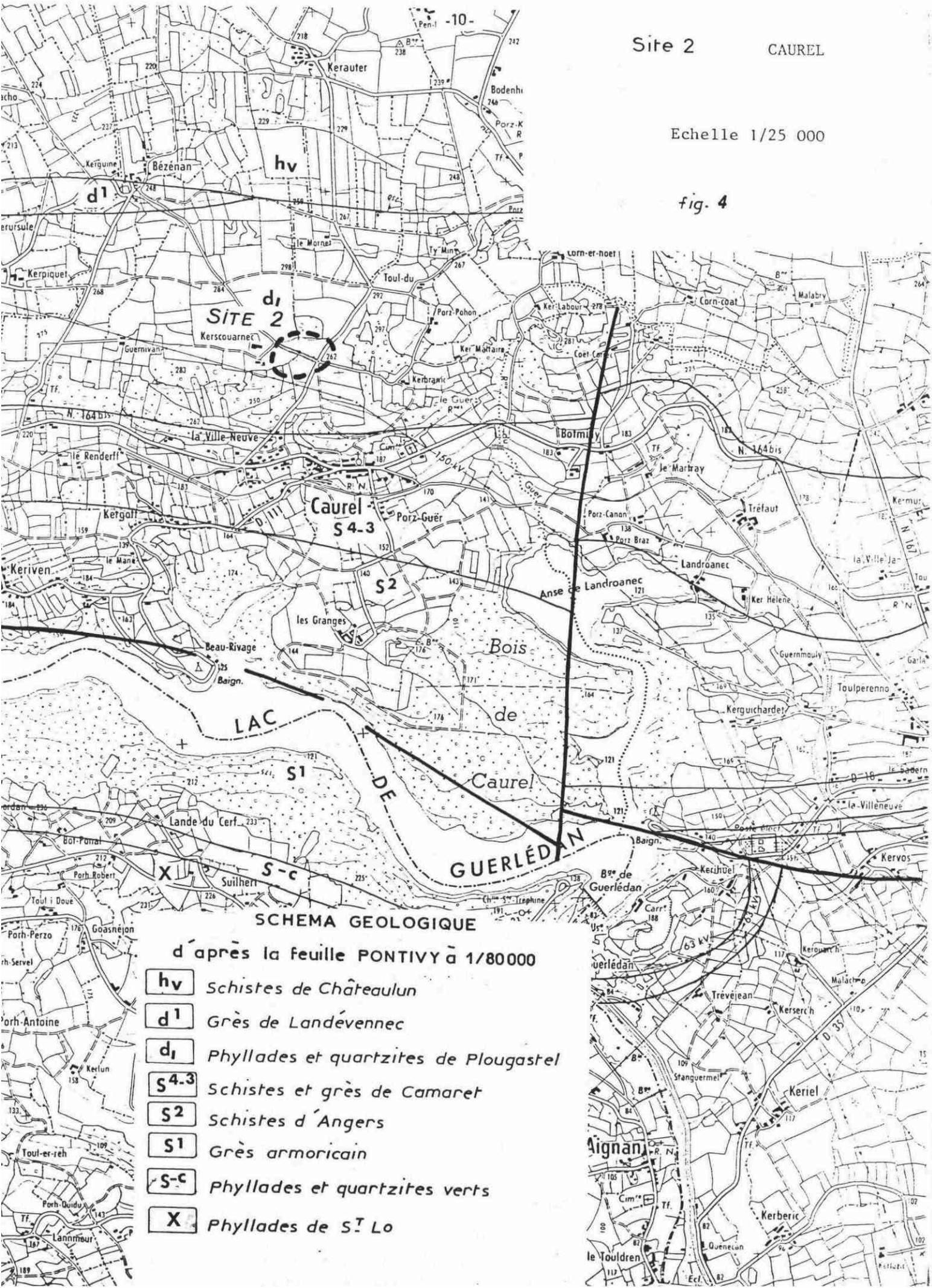
12.4 - Qualité de l'eau

La comparaison de deux analyses de l'eau du forage communal, au moment de sa mise en service (juillet 1977) et deux années après

Site 2 CAUREL

Echelle 1/25 000

fig. 4



SCHEMA GEOLOGIQUE

d'après la feuille PONTIVY à 1/80000

- hv** Schistes de Châteaulun
- d1** Grès de Landévennec
- di** Phyllades et quartzites de Plougastel
- S4.3** Schistes et grès de Camaret
- S2** Schistes d'Angers
- S1** Grès armoricain
- S-c** Phyllades et quartzites verts
- X** Phyllades de S1 Lo

(septembre 1979) montre que la composition chimique en est stable :

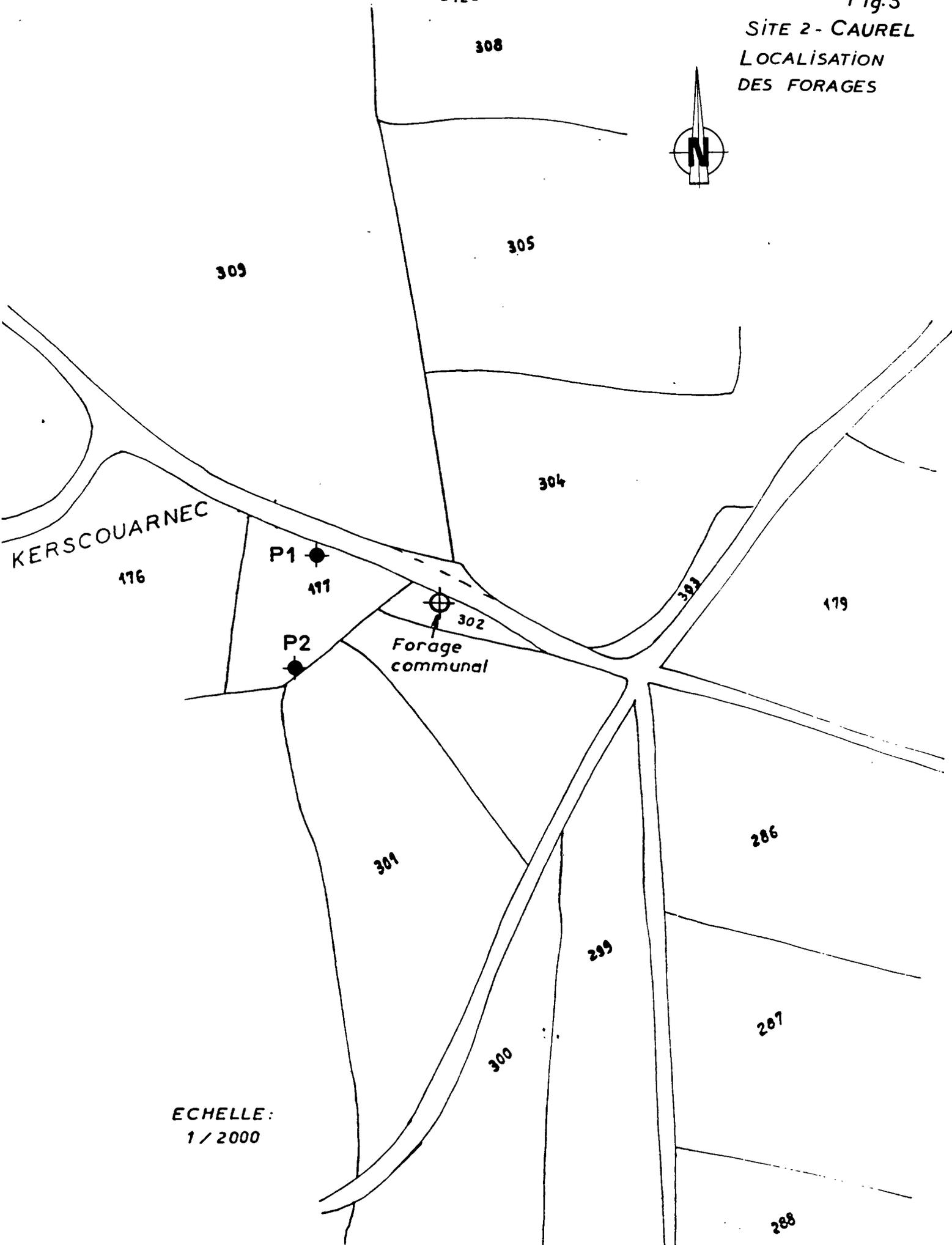
	Echantillon Juillet 1977	Echantillon Septembre 1979
Dureté en d° français	3	3,4
Résistivité Ω /cm à 20°C	8070	8355
pH	5,5	5,4
Fer mg/l Fe	0,1	0,12
Manganèse " Mn	0,1	0,05
Chlorures " Cl	30	22
Nitrites " NO ₂	0,02	0,01
Nitrates " NO ₃	42	24,2

Des analyses ont également été effectuées sur des échantillons d'eau prélevés à P1 et P2 en fin de foration :

	P1	P2
Dureté en d° français	4	7
Résistivité /cm à 20°C	4892	3506
pH	6,4	6,2
Fer mg/l Fe	0,7	2
Manganèse " Mn	0,05	0,7
Chlorures " Cl	30	115
Nitrites " NO ₂	0,02	0,7
Nitrates " NO ₃	26,4	51

Le mode de puisage (émulsion à l'air) peut modifier certains paramètres et ces valeurs doivent être considérées comme approximatives.

Fig.5
SITE 2 - CAUREL
LOCALISATION
DES FORAGES



ECHELLE:
1 / 2000

On voit cependant qu'en P1 la composition de l'eau est proche de celle du forage (dureté, chlorures) alors qu'elle en est notablement différente en P2.

13 - SITE 3a - PAIMPONT (35)

13.1 - Localisation et cadre géologique

A une quarantaine de kilomètres à l'ouest de Rennes, le site de Paimpont (35) est situé dans les "Grès armoricains" -S1- près de leur limite nord avec les "Schistes et Poudingues pourprés de Montfort".

Le massif de Paimpont appartient à l'unité de Guichen, masse de grès quartzite en gros bancs réguliers épaisse de plusieurs centaines de mètres et plissée en quatre ondes synclinales parallèles, dirigées d'WSW à ENE ; il constitue un dôme important dont les altitudes maximales sont voisines de 250 m.

La plus grande partie du massif de Paimpont est dans le bassin versant de l'Aff supérieur, contrôlé au "Pont du Secret" (station S.R.A.E. J. 860 24) depuis 1968.

13.2 - Dispositif en place

Cinq forages de reconnaissance, numérotés F3 à F7, réalisés au marteau fond de trou et un forage destiné à l'exploitation (renforcement des ressources du Syndicat des Eaux de la forêt de Paimpont), tubé en inox, existent dans la zone.

Profonds de 70 à 80 m (à l'exception de F7 qui n'a que 36 m), ces ouvrages n'ont pas atteint les schistes pourprés sous-jacents. Ils ont rencontré des grès, très altérés jusqu'à une vingtaine de mètres de profondeur, puis sains mais fissurés, avec quelques passages argileux. La roche est productive jusqu'à une profondeur comprise en moyenne entre 50 et 60 m.

13.3 - Travaux réalisés

Une série de diagraphies différées et des essais au micro-moulinet de forage ont été réalisés sur F4 et F6.

En complément au pompage d'essai de 36 heures qui avait été effectué antérieurement sur F5bis, des pompages courts ont été réalisés sur F3, F4, F6 et forage d'exploitation, ainsi qu'un pompage d'essai de longue durée sur le forage d'exploitation.

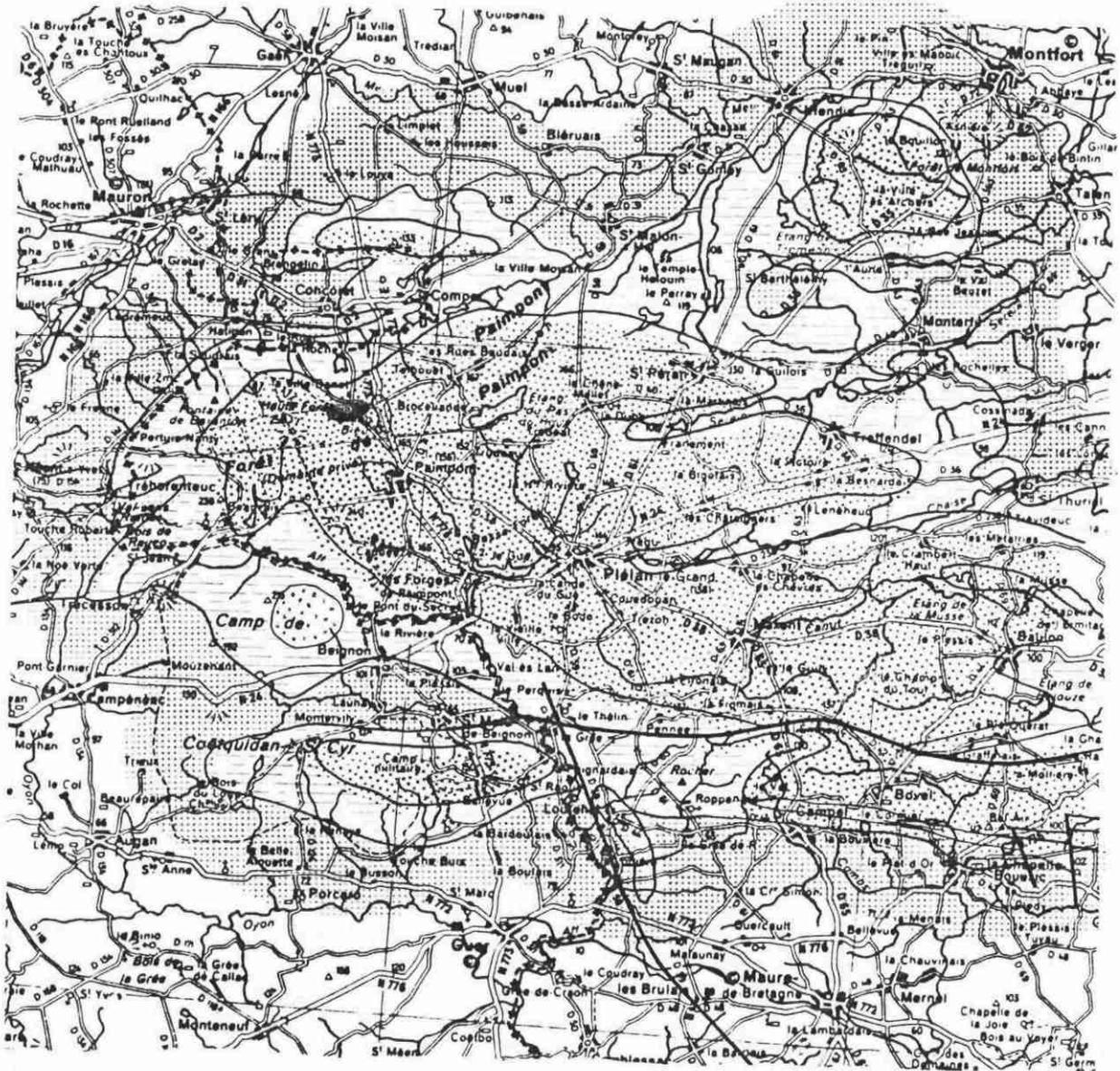
Site 3a : PAIMPONT

CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE

(d'après 1/320000)

(Echelle 1/200 000)

-  Grès Armoricaïn (Ordovicien)
-  Schistes pourprés (Cambrien)
-  Schistes (Briovérien)
-  Zone explorée



13.4 - Qualité de l'eau

L'eau issue des grès armoricains, formation essentiellement siliceuse, est caractérisée par une très faible minéralisation :

	F5 bis	Forage d'exploit.
Résistivité (Ω /cm à 20°C)	13 030	12 755
pH	4,8	6,05
Oxygène cédé par KMnO_4 en milieu alcalin mg/l	0,25	0,5
Dureté totale	1,25	2,0
TA	0	0
TAC	0,5	0,6
Silice	5,6	7,2
<u>Cations -</u>		
Calcium en Ca^{++}	2,5	3
Magnésium en Mg^{++}	1,2	3,0
Ammonium en NH_4^+	0	0,15
Sodium en Na^+	0	8,5
Potassium en K^+	0,85	0,9
Fer en Fe^{++}	6,01	5,3
Manganèse en Mn^{++}	0,02	0,13
Aluminium en Al^{+++}	0,25	0,08
<u>Anions mg/l</u>		
Carbonique en CO_3^{--}	0	0
Bicarbonique en HCO_3^{--}	6,1	7,3
Chlore en Cl^-	16	17
Sulfurique en SO_4^{--}	1,45	5
Nitreux en NO_2^-	0	0,09
Nitrique en NO_3^-	0,6	3,0
Phosphorique en PO_4^{---}	0	<0,02
Métaux lourds Pb	néant	<0,1 mg/l
Cu	néant	<0,02 "

SITE 3^a PAIMPONT

Plan de Situation des Forages

Echelle 1/2500

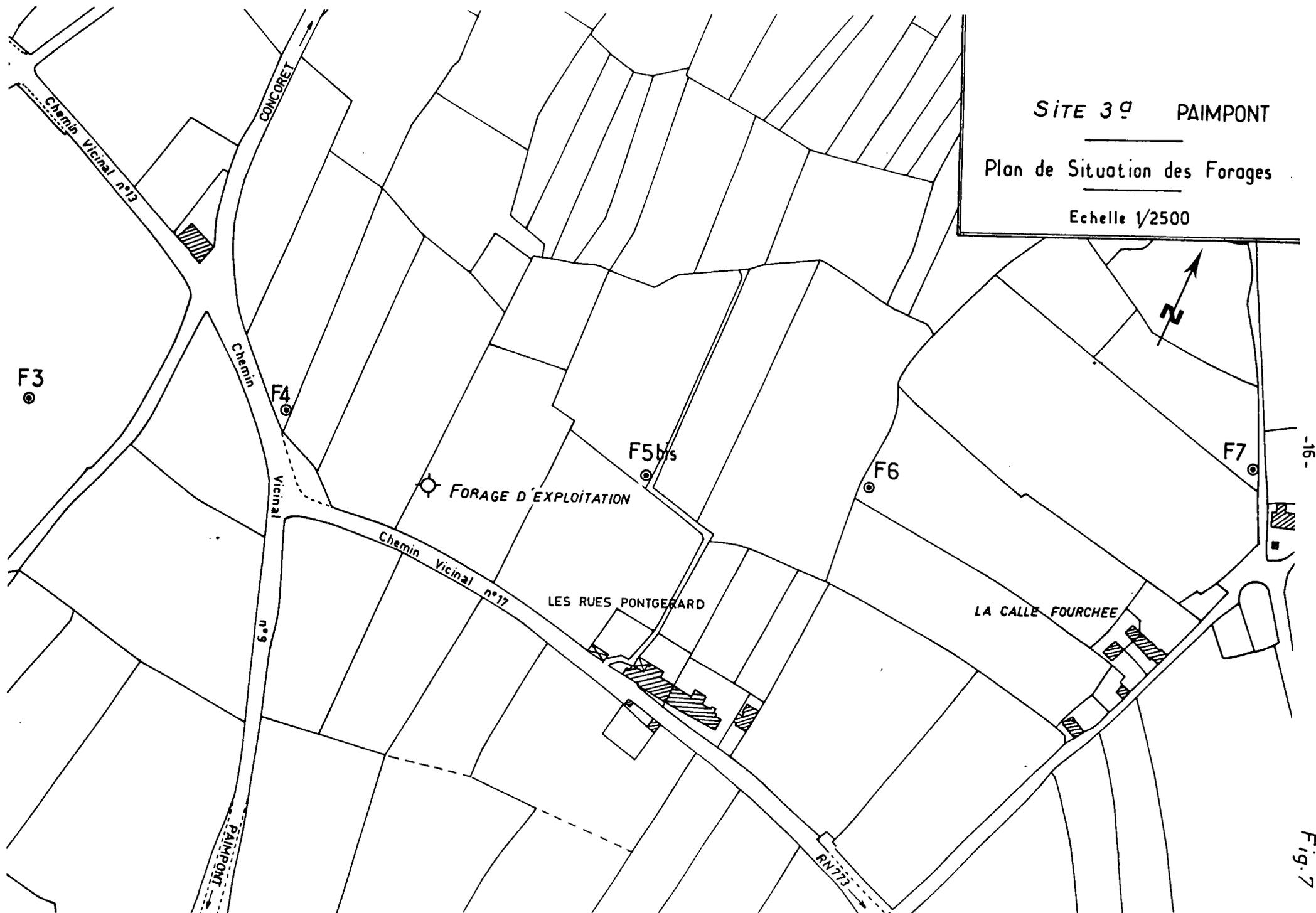


Fig. 7

14 - SITE 3b - BASSIN ESPERIMENTAL DE LA LOYSANCE (35)

14.1 - Localisation et cadre géologique (cf. Fig. n° 8 et 9)

La zone d'étude est située à 12 km au Nord-Ouest de la ville de Fougères, sous-préfecture de l'Ille-et-Vilaine.

La zone est délimitée par le bassin versant hydrologique de la rivière Loysance d'une surface de 81 km². Le débit du cours d'eau est contrôlé en continu par une station S.R.A.E. (n° J01440) installée au lieu-dit le "Moulin Neuf" depuis 1968.

Le bassin de la Loysance se trouve au Sud-Ouest d'un batholite composite de granite intrusif dans les formations briovériennes. La mise en place est pour l'essentiel tardicadomienne (596 millions d'années environ). Au contact du massif, le métamorphisme thermique se marque par l'apparition de cornéennes massives et de schistes à taches de cordiérite.

Deux types de granite sont représentés : le granite à biotite seule et le granite à biotite et cordiérite. Le granite à biotite est dominant sur la zone d'étude, le granite à biotite et à cordiérite n'affleurant qu'en bordure nord du bassin versant de la Loysance (région de Montours).

Des corps intrusifs se manifestent dans le granite. Ce sont principalement des filons de quartz et des dolérites. Les filons de quartz apparaissent bien dans la morphologie car ils forment des reliefs allongés très nets. Ces filons sont subverticaux. Les filons de dolérite sont absents de la zone d'étude mais s'expriment bien au Nord-Est du Massif.

Les granites présentent une altération classique en boules s'accompagnant d'une arénisation d'intensité variable. Les observations de terrain (carrières), les coupes de puits et de forages montrent que l'épaisseur des arènes varie de quelques mètres à 30 m. Les zones d'arénisation sont irrégulièrement réparties, et la grano-diorite à cordiérite semble plus vulnérable à l'altération. Enfin on observe un recouvrement discontinu et d'épaisseur variable (0 à 5 m) de limon loessoïde.

Dans toute la zone on peut distinguer deux types de fracturation :

- une fracturation syngénétique

Elle est soulignée par des venues filoniennes d'origine magmatique : aplites ou pegmatites. Une grande dispersion existe dans l'orientation de ces fractures. On peut toutefois relever trois grandes familles de fractures :

- . N 150° E pendage 80° NE
- . N 140° E " 12° NE
- . N 40° E " 82° NW

Ces fractures ont en général une épaisseur réduite, d'ordre centimétrique.

- une fracturation tardive

Elle est postérieure à la mise en place des granites. Cinq directions principales de fractures ont été relevées : N 150° E, N 30° E, N 80° E, N 110° E, N-S. Les directions N 150° E \pm 20° et N 80° E \pm 20° sont les plus fréquentes. Ces fractures sont en général subverticales.

Les fractures de direction N 150° E peuvent se disposer en relais et constituer de véritables couloirs de fracturation recoupant le massif. Ces couloirs d'une largeur de 500 m à 1 km délimitent des panneaux de largeur plurikilométrique montrant une densité de fracturation moins importante. Un grand accident N 30° E d'importance régionale coupe la zone d'étude sur sa bordure sud-est.

En conclusion, la zone d'étude appartient à un massif granitique régulièrement fracturé, où des couloirs de direction N 150°E à fortes densités de fracturation séparent des zones à densité de fracturation moyenne. Un de ces couloirs partage le bassin versant de la Loysance en deux moitiés d'importance sensiblement égale.

14.2 - Dispositif d'étude

Aucun travaux spécifiques n'ont été réalisés pour la présente étude. Nous avons pu bénéficier de réalisations existantes c'est-à-dire de la station de jaugeage du S.R.A.E. et de forages dont certains ont été équipés d'appareillage de mesures.

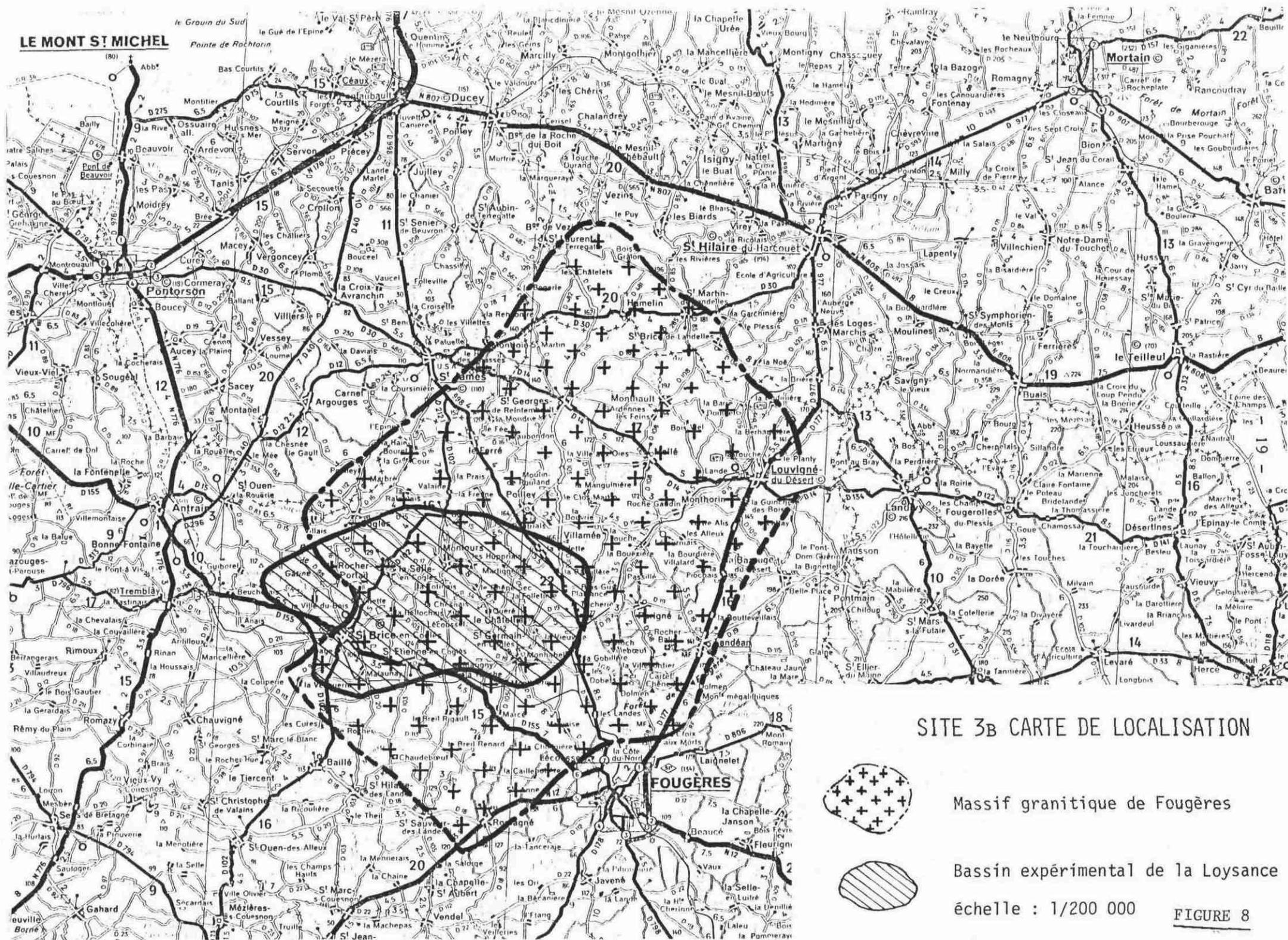
14.2.1 - Station de jaugeage S.R.A.E.
.....

La station de jaugeage S.R.A.E. (référence JOA440) contrôle un bassin versant d'une surface de 815 km² dont les 3/4 sont dominés par les granodiorites.

Les données disponibles permettent de noter que les débits d'étiage sont bien soutenus. Par exemple en août 1976, le module spécifique d'écoulement était de 1,53 l/s/km². Pendant le même temps le module spécifique d'écoulement était nul pour presque tout les cours d'eau du département dont la géologie des bassins versants est dominée par les schistes.

La moyenne des excédents calculée sur 10 ans (période 1966-1976) par la méthode de Turc est de 263 mm à Fougères et la moyenne pluviométrique pour la même période sur la même station est de 816 mm.

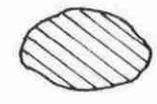
LE MONT S^t MICHEL



SITE 3B CARTE DE LOCALISATION



Massif granitique de Fougères



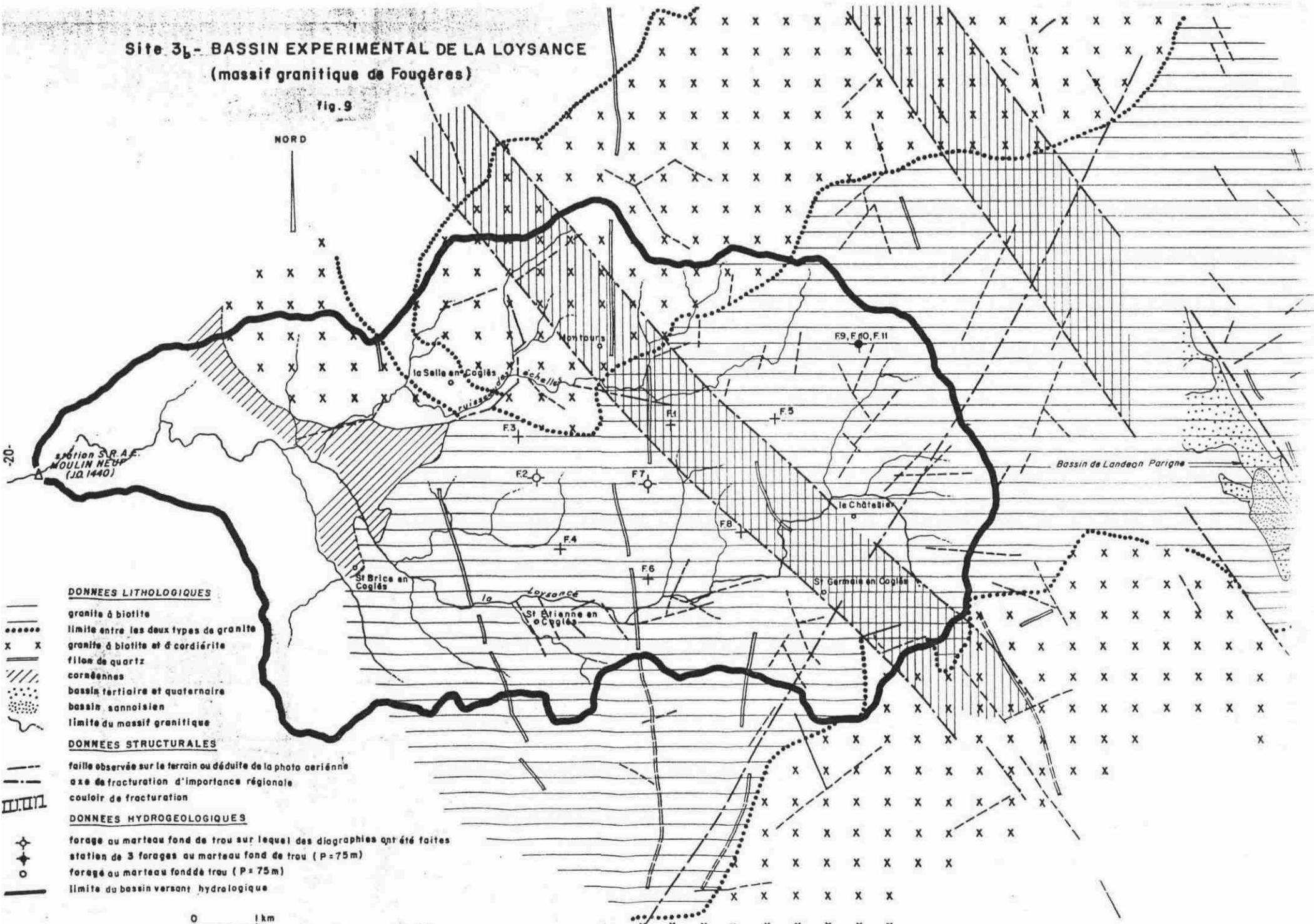
Bassin expérimental de la Loysance

échelle : 1/200 000

FIGURE 8

Site 3_b - BASSIN EXPERIMENTAL DE LA LOYSANCE
(massif granitique de Fougères)

fig. 9



DONNEES LITHOLOGIQUES

- granite à biotite
- limite entre les deux types de granite
- granite à biotite et à cordiérite
- filon de quartz
- cornéennes
- bassin tertiaire et quaternaire
- bassin sannoisien
- limite du massif granitique

DONNEES STRUCTURALES

- faille observée sur le terrain ou déduite de la photo aérienne
- axe de fracturation d'importance régionale
- couloir de fracturation

DONNEES HYDROGEOLOGIQUES

- forage au marteau fond de trou sur lequel des diagraphies ont été faites
- station de 3 forages au marteau fond de trou (P = 75m)
- forage au marteau fond de trou (P = 75m)
- limite du bassin versant hydrologique

0 1 km

Enfin il faut souligner que la ville de Rennes effectue des prélèvements au fil de l'eau à l'intérieur du bassin versant. Les publications du S.R.A.E. sont corrigées de ces influences amont.

14.2.2 - Forages de reconnaissance

Onze forages de reconnaissance d'une profondeur de 75 m existent sur la zone. Ils ont été au marteau-fond-trou. Les arènes sont masquées par un tubage PVC cimenté. Les forages sont en trou nu de la base des arènes jusqu'au fond. Les principales caractéristiques des forages sont rassemblées dans le tableau ci-après.

Sur deux forages (F2 et F7) une série de diagraphies ont été réalisées, ainsi que des slug-tests.

14.3 - Qualité de l'eau

Des échantillons d'eau ont été prélevés et analysés sur les forages F2 à F7 :

	pH	résistivité Ω /cm à 20°C
F2	6,6	4814
F3	6,4	5919
F4	6,7	6109
F5	5,9	6109
F6	6,5	6202
F7	6,4	5940

	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)
F2	16,6	5,1	18,1	1,6
F3	13,2	5,1	13,2	2,1
F4	13,8	2,8	15,0	1,6
F5	9,4	2,8	17,7	1,3
F6	14,0	2,9	15,1	1,4
F7	13,6	5,2	13,1	1,8

	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
F2	64	25	18	1,3
F3	58	18,5	10	6,4
F4	58	17	4	11,6
F5	24,4	26	2	24,4
F6	58	18	2	11,3
F7	58	17	10	6,8

Caractéristiques des forages existants ayant atteint la roche dure fissurée

N° du forage	Profondeur totale (m)	Débit à l'émulsion d'air m ³ /h*	Résistivité de l'eau à 20°C en Ω /cm	Ø du forage mm	Lieu-dit
F1	76,0	3,0	4 000	115	Chalonge
F2	73,00	10,0	5 550	115	La Sévinais
F3	70,0	12,0	6 650	115	Le Clos Neuf
F4	76,0	30,0	5 700	115	Les Primaux
F5	69,5	11,0	7 700	115	Loiselière
F6	76,0	10,0	5 700	115	La Bazillais
F7	76,0	18,0	6 650	115	Champ Juré
F8	75,0	8,0	6 650	115	La Fontenelle
F9	76,0	22,0	7 700	115	Ville Courte
F10	76,0	22,5	-	115	Ville Courte
F11	76,0	8,0	7 700	115	Ville Courte

* Débit à l'émulsion d'air obtenu en fin de foration c'est-à-dire avec un maximum d'immersion.

2 - THEME 1

21 - GENERALITES

Dans l'approche classique des écoulements en milieux géologiques, qu'ils soient poreux ou fissurés, les paramètres et variables qui décrivent le mouvement de l'eau sont en fait les moyennes prises sur un certain volume du milieu dit Volume Élémentaire de Référence (V.E.R.).

Les dimensions minimales de ce V.E.R. ou autrement dit l'échelle à partir de laquelle les paramètres, variables et équations sont valides doivent être telles qu'elles garantissent :

- la stabilité des paramètres physiques, en l'occurrence la perméabilité K , la porosité ϕ et les paramètres dérivés (emménagement notamment). C'est à dire que pour tout déplacement infinitésimal du volume élémentaire autour de sa position on doit obtenir sensiblement les mêmes valeurs de ces paramètres tandis que des valeurs considérées pour des volumes plus petits que le V.E.R. pourraient donner des valeurs dispersées

- la possibilité pratique de mesure des variables de l'écoulement en particulier la charge hydraulique. Réciproquement (surtout) cette condition définit les critères de réalisation d'une prise piézométrique en accord avec les hypothèses de base de la relation d'écoulement.

Dans cette approche dite dynamique les équations de l'écoulement dérivent de l'application des principes de conservation de la masse et de l'énergie à l'échelle du VER.

En particulier la vitesse de l'écoulement ou vitesse de Darcy est une grandeur vectorielle dont par définition, le flux à travers la surface limitant le VER est identique au flux en masse de l'eau à travers cette même surface. La relation de ce flux à la charge hydraulique qui en est le moteur est celui donné par la loi de Darcy

$$Q = \int_{\text{VER}} (K \text{ grad } H) \vec{d}\mathbf{n} \quad (\text{avec une convention de signe sur } Q \text{ à préciser})$$

avec $\vec{V} = K \text{ grad } H$ (Loi de Darcy)

Ces relations permettent en pratique de définir le paramètre structural du milieu K (perméabilité) et la vitesse de Darcy V à partir des seules variables mesurables in situ H charge hydraulique et Q débit (en masse).

Il est bien évident que la vitesse de Darcy est différente de la vitesse effective de l'eau à travers les vides du milieu conducteur. Leur seul point commun est de fournir le même flux à travers des surfaces extrêmement différentes : la surface totale du VER pour la première, la surface des vides (où se produit l'écoulement) pour la seconde.

$$Q = \int_{\text{vides du VER}} \vec{V}_e \, dn = \int_{\text{VER}} \vec{V} \, dn$$

et si pour les milieux poreux on admet couramment :

$$\vec{V}_e = \frac{\vec{V}}{w}$$

il est clair que cette relation doit être discutée pour les milieux fissurés en fonction de la morphologie du champ fissural. Il faut en outre s'attendre le plus souvent à une certaine anisotropie qui rendra nécessaire de considérer effectivement la nature tensorielle de la perméabilité.

Ces considérations théoriques permettent de faire apparaître l'importance des problèmes d'échelle dès que l'on aborde l'étude quantitative des milieux fissurés. Pour toutes les approches et méthodes considérées il faut bien rappeler l'échelle à laquelle on se place, c'est-à-dire le volume du milieu considéré.

Selon une terminologie issue largement de l'approche structurale nous distinguerons :

- l'échelle décimétrique ou métrique ou l'échelle ponctuelle
- l'échelle décamétrique ou hectométrique ou échelle locale
- l'échelle kilométrique ou plurikilométrique ou échelle régionale.

Outre ces problèmes d'échelle, la gamme de valeur des différents paramètres est souvent large. La porosité peut atteindre quelques % en zone de fissures ouvertes et être égale à quelque fraction de % au niveau d'une matrice rocheuse non fissurée. De même la perméabilité peut être aussi faible que 10^{-12} m/s dans la matrice rocheuse, et prendre des valeurs de 10^{-3} à 10^{-4} m/s dans les cas les plus favorables.

On voit donc que les méthodes d'identification de la fissuration et d'évaluation des paramètres qui y sont étroitement associés sont nécessairement nombreuses. Chacune d'elle intéresse un volume de terrain donné, donc s'adresse à une certaine échelle d'investigation, et couvre une gamme de valeur de paramètres qui lui est propre.

Dans le cadre de la présente étude, un certain nombre de méthodes ont été mises en oeuvre. Le tableau ci-dessous résume le programme réalisé.

Echelle d'investigation	Méthodes qualitatives	Méthodes quantitatives
ponctuelle	Diagraphie - Micromoulinet	Slug test (K) Diagraphie (\emptyset) et (K)
locale	Photo aérienne Géophysique	Pompage d'essai
régionale		Modèle global Ressources

22 - ECHELLE LOCALE ET PLUS

221 - Examen qualitatif

2211 - Photo aérienne
.....

En région très couverte par la végétation et les manifestations de l'activité humaine, la structure de la roche n'est que très rarement observable directement, à la faveur d'affleurements naturels ou artificiels. L'étude des photographies aériennes, le relief étant restitué par la vision stéréoscopique de deux clichés convenablement décalés dans l'espace, permet le repérage de linéaments ; les linéaments sont des alignements d'objets photographiques dont l'existence peut être liée à l'humidité du sol et à l'écoulement des eaux, notamment souterraines. Les linéaments peuvent être constitués par des éléments des formes du relief (portions rectilignes de vallées ou de thalwegs, ruptures de pentes...), par des variations dans la couleur du sol (une zone plus humide apparaît d'un grisé plus soutenu en photographie noir et blanc) ou dans la végétation naturelle.

Une faille, même importante, peut ne pas avoir de trace visible au sol et donc, n'être pas génératrice de linéament ; à l'inverse un linéament peut ne correspondre à aucune discontinuité du sous-sol. Cependant, une zone intensément fissurée sous l'effet de contraintes tectoniques, si ces fissures sont ouvertes (contraintes d'extension), sera le siège d'écoulements souterrains plus importants que dans son encaissant resté plus massif ; les phénomènes de subrosion (érosion sous l'action des écoulements souterrains) et de dissolution* y seront plus marqués et pourront amorcer une forme en creux, ensuite amplifiée par l'érosions s.s., mais restant alignée sur la fissuration originelle.

Quoiqu'il en soit, un linéament photographique ne constitue qu'une présomption de fracturation du sous-sol et donc de l'existence d'eau souterraine en quantité et débit exploitables.

Lors du repérage et du tracé des linéaments photographiques il faut s'efforcer de faire abstraction des formes et objets anthropiques. Le choix de l'échelle des clichés est également un problème important ; une échelle trop grande fournira une vision trop ponctuelle ne permettant pas de s'assurer de l'extension des zones fissurées supposées ; à l'inverse une échelle trop petite donnera une image globale de la région, mais ne permettra pas de passer du linéament photographique à l'implantation ponctuelle sur le terrain.

On a utilisé les clichés IGN à 1/25 000 ou 1/30 000 et on a pu comparer les images obtenues avec la "carte des linéaments de satellite" réalisée par WEECKTEEN dans le cadre des travaux du 26e Congrès géologique international qui est à l'échelle de l'ensemble du Massif Armoricaïn (Fig. 10).

Site 1 - Landerneau (Fig. 11)

La région de Landerneau est sillonnée de linéaments pluri-kilométriques anastomosés, groupables en trois familles de directions principales ; chaque direction est accompagnée ou complétée par des linéaments, en général de moindre extension, qui lui sont perpendiculaires et qui pourraient correspondre à des fractures de réajustement.

La photo satellite montre essentiellement un linéament SW-NE, correspondant vraisemblablement à la faille de l'Elorn. Sur les clichés à 1/25 000 on retrouve cette direction, avec un linéament centré sur l'Elorn et des répliques au NW et au SE. Le linéament de l'Elorn s'infléchit en amont et prend une direction W.S.W - E.N.E., que l'on retrouve de façon assez constante. Ces deux familles de directions sont complétées par des

* Les actions de dissolution ne doivent pas être négligées, même pour des roches réputées peu solubles : si on imagine qu'une source débite en permanence seulement 2 litres/seconde d'une eau ne contenant que 50 mg/l de résidu sec, après 5 millions d'années (Pliocène, époque des derniers rejeux importants ayant affecté le Massif armoricaïn), c'est 6 millions de m³ de matière solide qui auront été ainsi évacués.

CARTE DES LINEAMENTS DE SATELLITE

(Landsat 1 et 2)

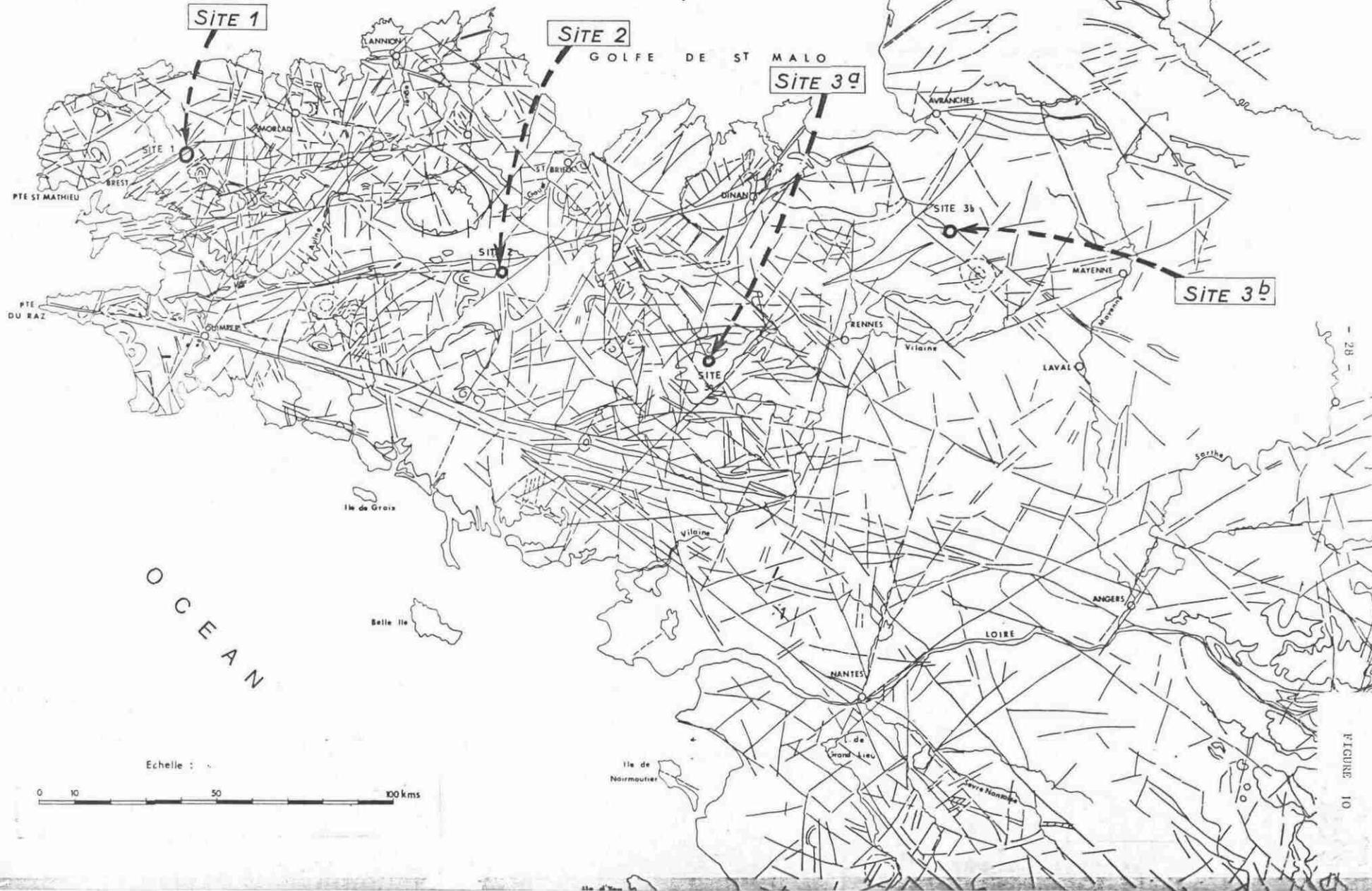


FIGURE 10

linéaments qui leur sont orthogonaux (ou peu différents des directions perpendiculaires). Deux linéaments passant par la ville et encadrant le site au nord et au sud sont peut être indépendants des systèmes précédents ; leur direction est W.N.W. - E.S.E. et quelques linéaments presque perpendiculaires sont discernables.

Le site lui-même est encadré par des linéaments de chacune de ces directions principales ; il est probablement traversé par certains, mais l'occupation et le remaniement des sols à ce niveau ne permet pas de le distinguer.

Site 2 - Caurel (Fig. 12)

Sur la photo satellite, le site 2 est situé à proximité d'un étroit couloir de linéaments W.S.W. - E.N.E. (localement E.W.) qui se relaient pratiquement de la Pointe du Raz à Avranches, découpé par quelques transversales proches de nord-sud.

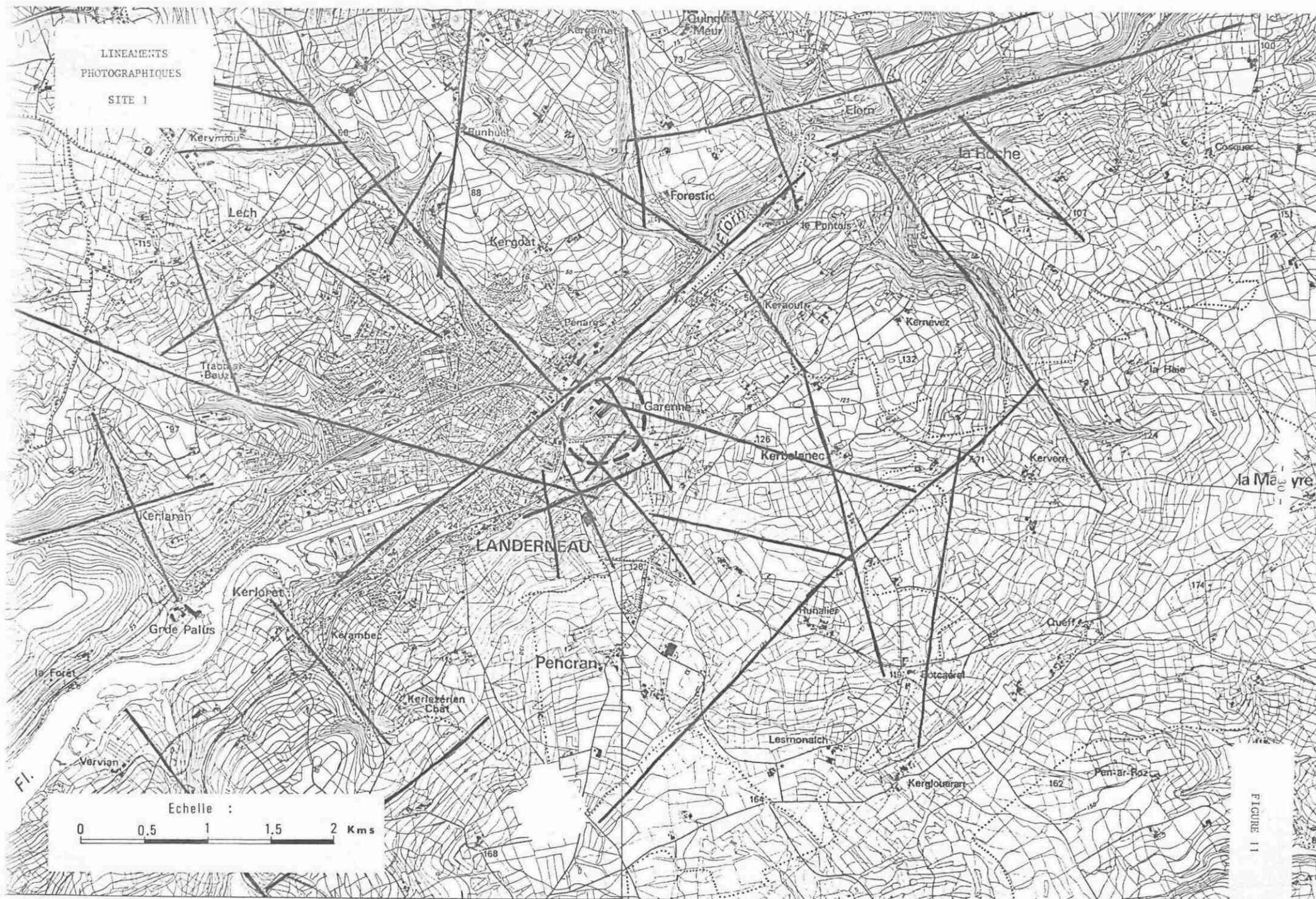
Les directions E-W et W.S.W - E.N.E. se retrouvent sur les clichés à 1/25 000, notamment au niveau du bourg de Caurel et entre le village et le lac de Guerlédan ; quelques répliques, d'extensions assez limitées sont visibles plus au nord. Les transversales N.S sont également d'extensions limitées en général.

Une deuxième famille de direction est marquée par les linéaments NW-SE. Le site de Kerscouarnec est situé dans la zone de confluence des trois linéaments dont d'ailleurs seul le linéament N-S est bien marqué sur les photographies (mais le secteur étudié est tout à fait à l'amont du linéament).

Site 3 - Paimpont (Fig. 13)

A l'échelle de la région (photo satellite), le site de Paimpont est sur le tracé d'une série de linéaments NW-SE qui malgré un certain nombre d'interruptions, se suivent de St Brieuc à la Loire. Que ces linéaments (certains d'entre eux) correspondent effectivement à des failles est démontré par l'existence sur leur trajet de bassins tertiaires, bassins effondrés ou ont été piégées des formations sédimentaires éocène à pliocène : sables pliocènes d'Illifaut au N-W, de Loutehel, Les Brulais, St Seglin, Pipriac au SE. Encore plus au sud-est, cette même famille de linéaments est jalonnée par les gisements tertiaires plus importants de Langon, Saffré et Nort-sur-Erdre.

A l'échelle du 1/25 000, la présence d'un couvert végétal dense (forêt de Paimpont) ne laisse discerner que les linéaments liés au relief. Ceux-ci ont des directions pouvant aller de SW-NE à SE-NW, parfois groupés en épis. Bien que d'orientations variables, les linéaments peuvent se relayer et constituer des systèmes de direction générale N-W - S-E.



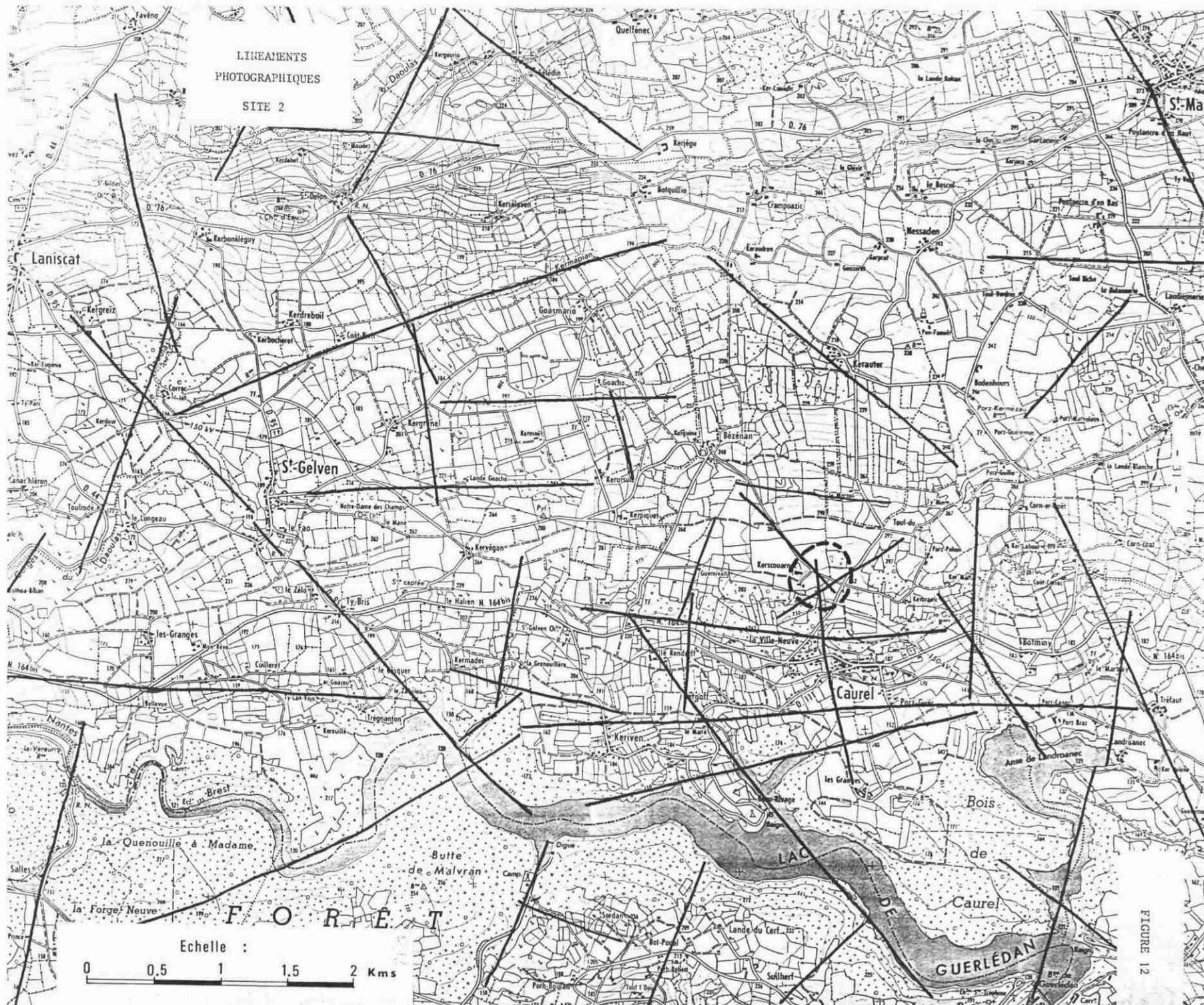


FIGURE 12

Un tel système passe par la zone étudiée et l'étang de Paimpont ; un autre paraît exister plus à l'Est (passant par l'étang du Pas du Houx).

2212 - Géophysique

Des essais ont été réalisés à Landerneau et Caurel par les méthodes électriques (sondages et trainés). La résistance d'une roche au passage du courant électrique diminuant lorsque sa teneur en eau augmente, l'existence sur un profil ou une série de profils géophysiques d'une discontinuité électrique, peut correspondre à une discontinuité dans la structure de la roche (fissuration) sous réserve qu'il ne s'agisse pas d'une variation géologique de faciès. Il convient de remarquer qu'une plus grande teneur en eau (résistivité moins grande en géophysique électrique) peut être emmagasinée dans des produits d'altération argileux (altération elle-même facilitée par la fissuration) et n'est donc pas automatiquement synonyme d'une perméabilité plus forte.

Site 1 - Landerneau

Les essais n'ont pas fourni de résultats significatifs : en sondage électrique, lorsque $AB/2$ augmente, la résistivité apparente tend très vite vers zéro. Les phénomènes sont masqués par les horizons supérieurs (argiles et schistes très altérés) très conducteurs. La géophysique (électrique) est inopérante dans ce cas (cf. diagramme de SE - Fig. 14).

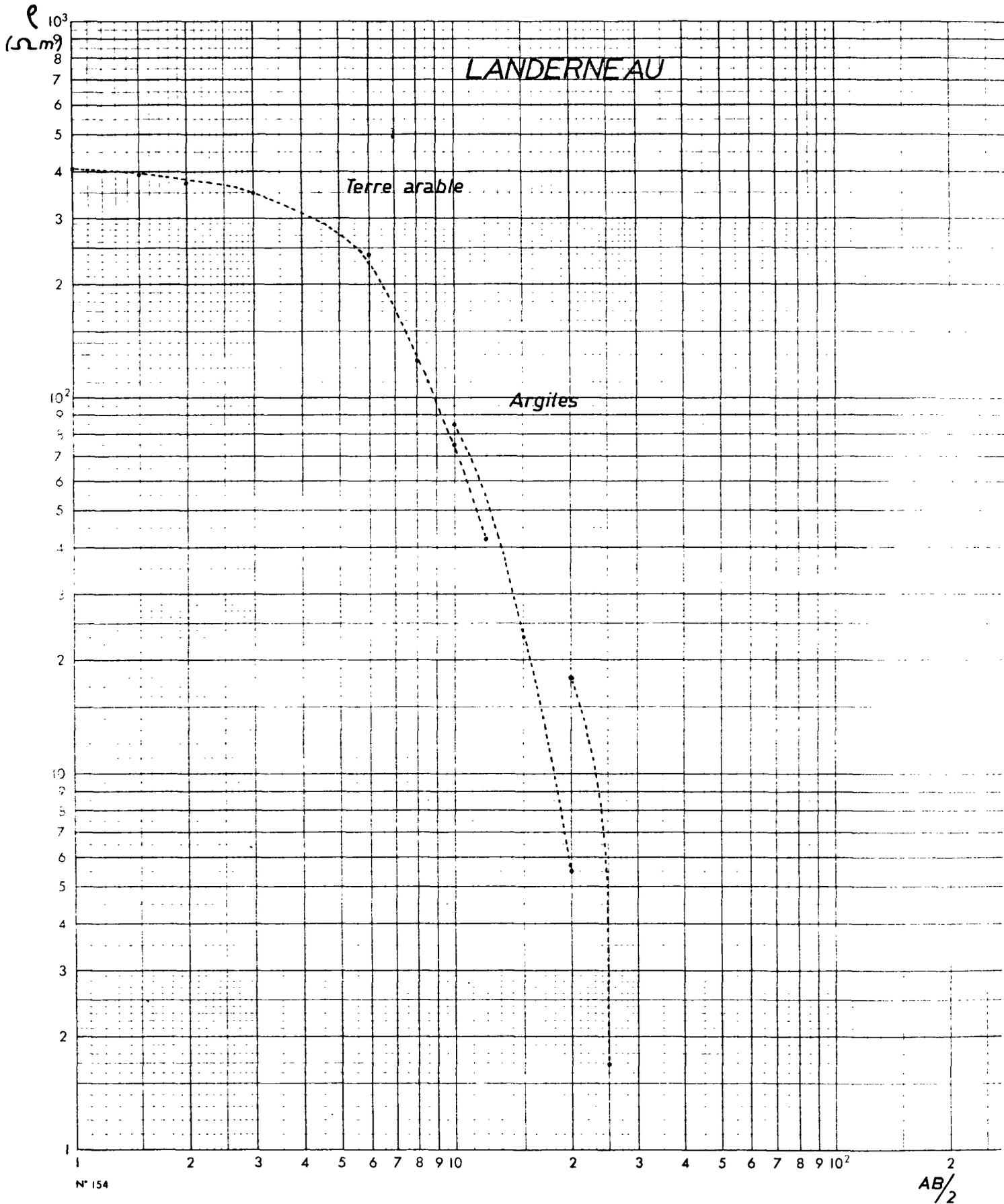
Site 2 - Caurel (plan et diagrammes - Fig. 15 à 17)

Cinq profils de 200 m chacun ont été réalisés (trainés électriques, pas de 10 m), disposés au mieux (cf. plan schématique ci-après) pour recouper les linéaments photographiques, compte tenu des difficultés pratiques de terrain (accès, pentes...).

Les profils 3 et 4 recoupent le linéament S-W - N-E. Ils montrent des variations de résistivité, mais ces variations sont très progressives, sans discontinuité marquée. Ces deux profils ont une allure très comparable à celle du profil 2 réalisé dans une zone sans linéament. On peut en conclure que ce linéament SW-NE est un simple objet photographique, sans correspondance au niveau du sous-sol.

Par contre, les profils 1 et 5 enregistrent des discontinuités électriques tout à fait semblables. Leurs valeurs sont légèrement différentes (variations de 300 à 1100 m au profil 5, de 1200 à 2600 m au profil 1) mais leurs amplitudes sont comparables et leurs formes parallèles, avec 2 points bas (stations 9 et 18 au profil 5, stations 7 et 18 au profil 1) encadrant un léger dôme. En interpolant entre ces points, on trace un

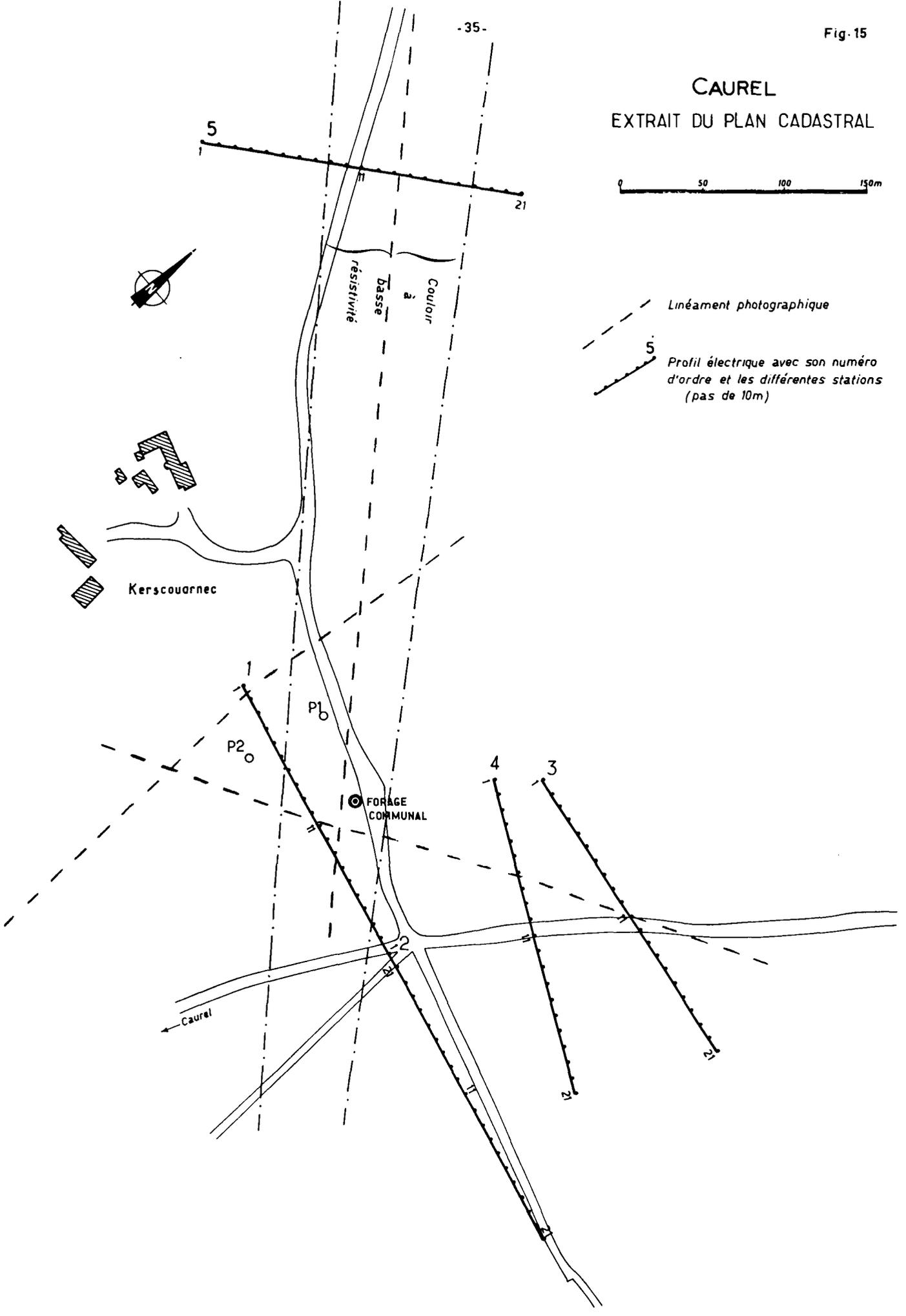
FIGURE 14



CAUREL EXTRAIT DU PLAN CADASTRAL



--- Linéament photographique
 5
 Profil électrique avec son numéro d'ordre et les différentes stations (pas de 10m)



CAUREL

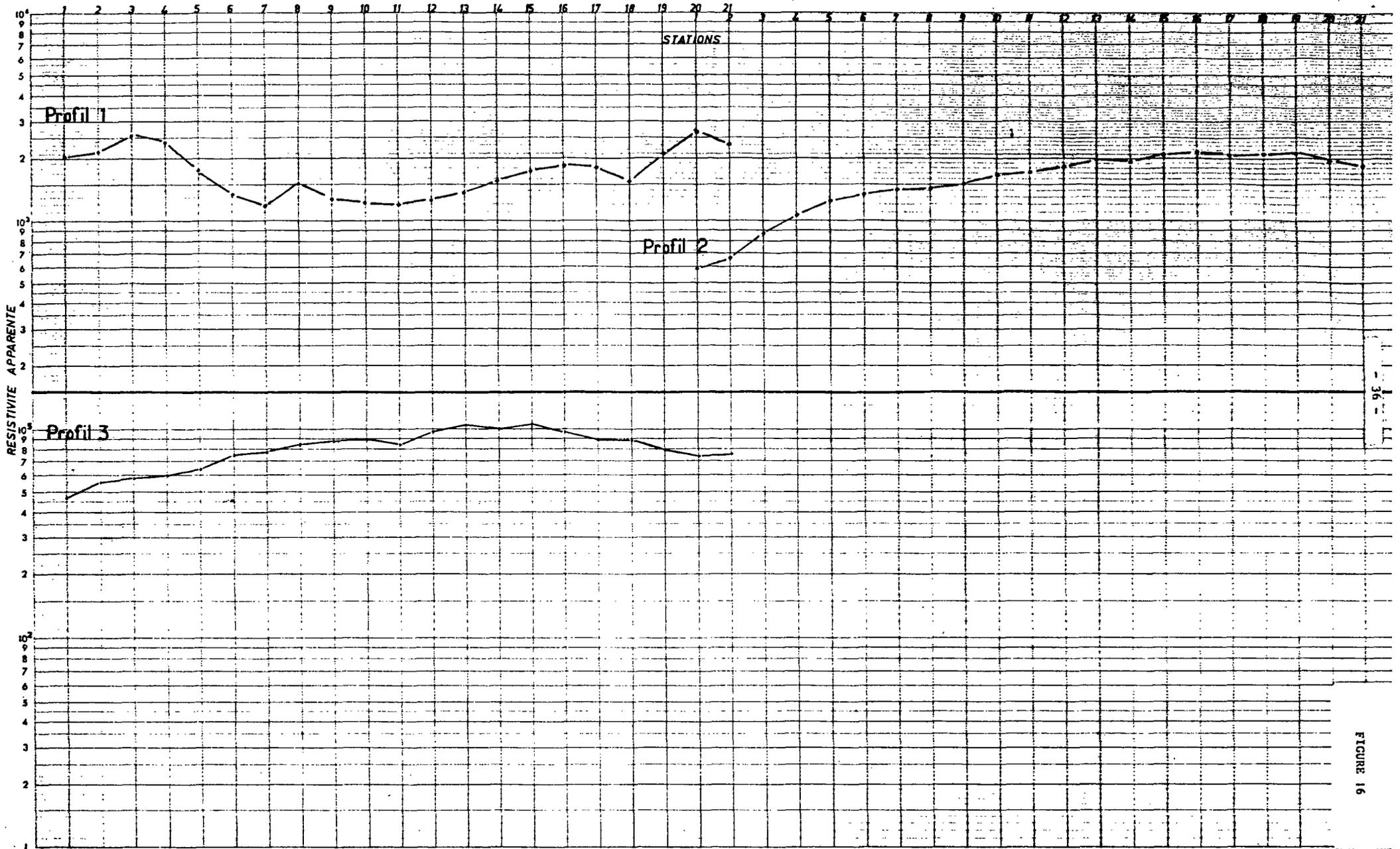
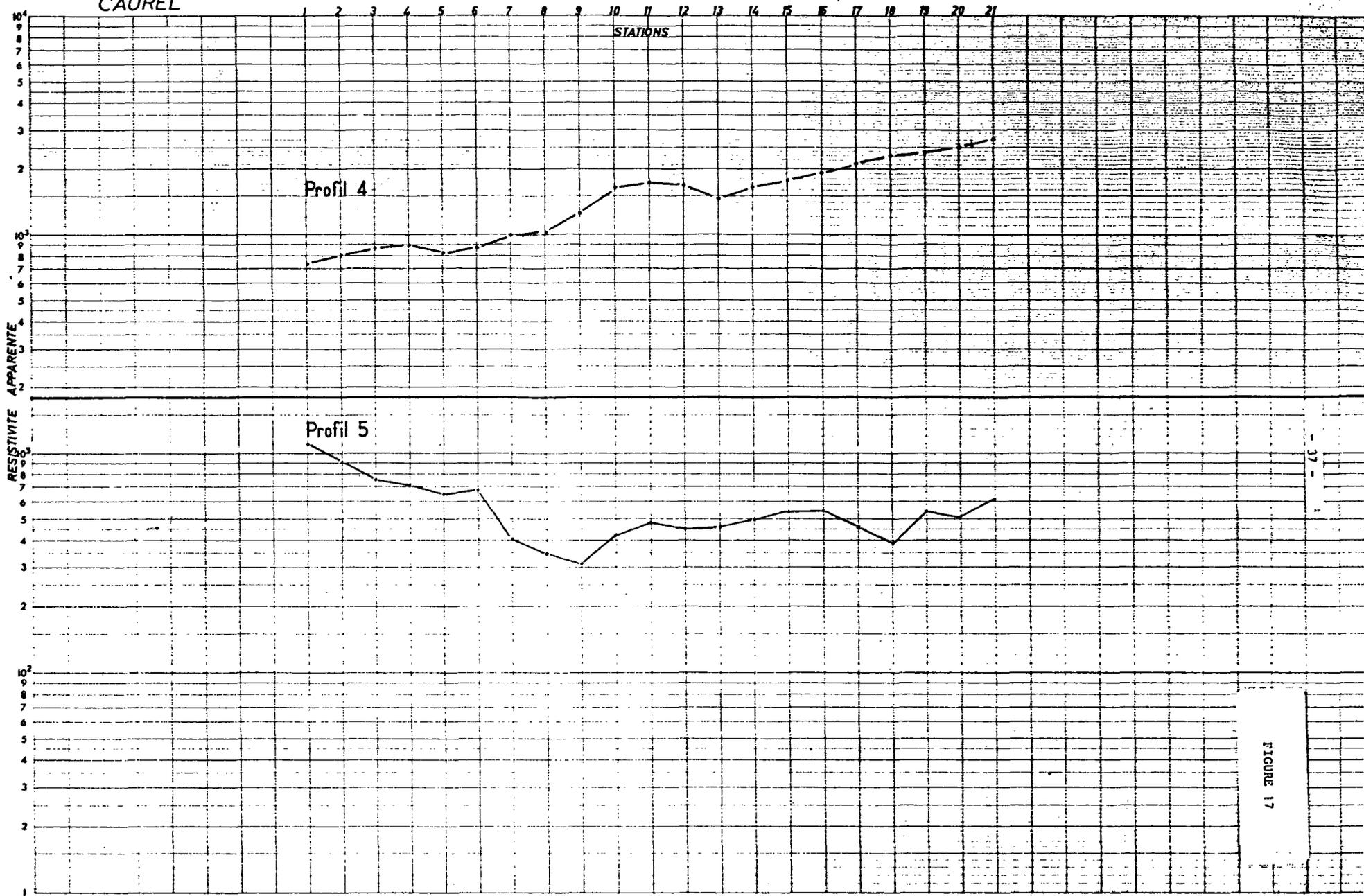


FIGURE 16

CAUREL



- 37 -

FIGURE 17

couloir à basse résistivité (relative) dont l'axe est précisément constitué par le linéament NW-SE qui se trouve ainsi confirmé. La largeur du couloir est de 50 à 100 m (il semble se fermer vers le SE) ; les observations permises par les trois forages réalisés sur le site montrent qu'il s'agit bien d'un couloir de fissuration : roches fissurées et productives au forage communal et à P1, pratiquement pas de fissuration et productivité négligeable à nulle à P2.

Remarques : il n'a pu être réalisé de profil en travers du linéament nord-sud en raison des contraintes de terrain ; zone boisée, pente forte et falaise à l'W (entre P2 et Kerscouarnec).

Conclusion

Ces procédés géophysiques -ici électriques- lorsqu'ils sont applicables peuvent préciser les approches plus globales (photo aérienne). Les résultats restent qualitatifs : on ne peut traduire en terme de perméabilité des variations de résistivité ; la géophysique permet cependant, dans les cas favorables, d'éliminer d'une exploration par sondages mécaniques certains linéaments photographiques et d'estimer, lorsque les données sont positives, l'extension latérale des zones fissurées, critère de choix important lors de l'implantation de forages d'eau.

222 - Aspect quantitatif - Pompages d'essai

2221 - Comparaison de résultats obtenus par des méthodes dont
.....
les échelles d'investigation sont différentes
.....

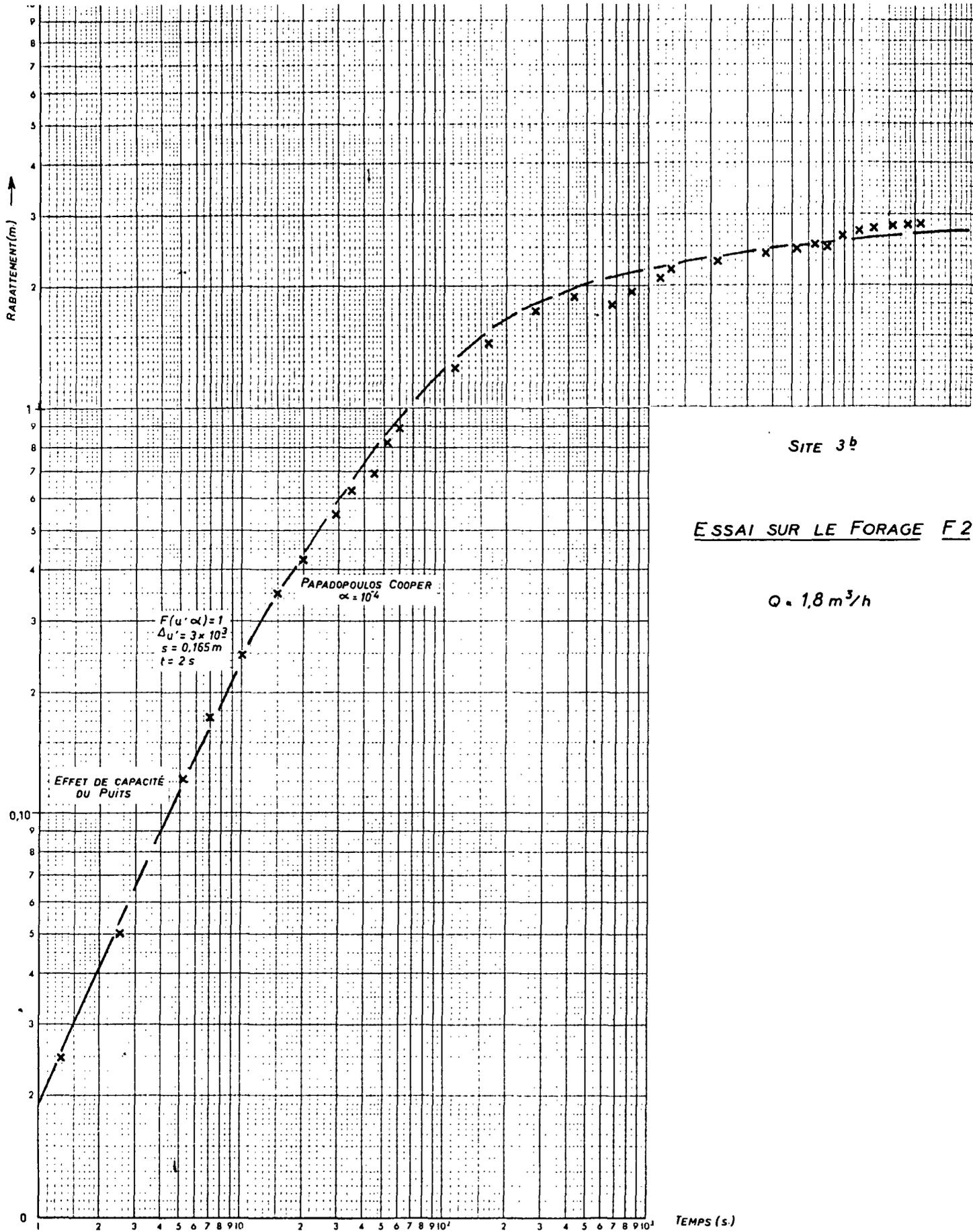
Un pompage d'essai intéresse en général des volumes de terrain importants : l'aquifère sur tout ou partie de son épaisseur et sur un rayon pluridécamétrique à kilométrique autour du puits de pompage. Il est intéressant de comparer les résultats obtenus par ces méthodes globales avec ceux issus de méthodes spécifiques permettant l'exploration du réservoir uniquement aux environs immédiats de l'ouvrage (temps de pompage très courts, du type "impulsion" : slug-tests) et/ou de tranches d'aquifère (slug-tests entre packers, micromoulinet).

Au site 3b, un pompage d'essai de $2,1 \cdot 10^4$ secondes et au débit de 1,8 m³/h a été réalisé sur le forage F2 (Fig. 18).

Les rabattements en fonction du temps ont été reportés en coordonnées bi-log. La première partie de la courbe montre une pente 1, témoignage d'un effet de capacité. La méthode d'interprétation retenue est celle proposée par PAPADOPOULOS - COOPER*. La superposition de la courbe

* 1967 - T.S. PAPADOPOULOS et H.H. COOPER - Drawdown in a well of large diameter - Water Resources Research. VOL 3. N° 1.

FIGURE 18



expérimentale à la courbe type ($\alpha = 10^{-4}$) permet d'obtenir une valeur de transmissivité $T = 2,4 \cdot 10^{-4}$ m²/s, proche de celle déduite de l'interprétation du slug-test effectué sur le même forage et intéressant la totalité de l'ouvrage : $T = 6,2 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

Au site 3a, des mesures au micro-moulinet ont été effectuées sur les forages F4 et F6, qui ont également fait l'objet de pompages d'essai (360 minutes à 11,8 m³/h sur F4 - 360 minutes à 11,8 m³/h sur F6).

Le micro-moulinet permet d'estimer la perméabilité K par tranches successives de terrain, la somme de ces perméabilités élémentaires devant constituer la transmissivité de l'aquifère. Les pompages d'essai fournissent des courbes de descente dont la première partie peut être identifiée avec la courbe type de Theis (cf. plus loin) ce qui permet d'en déduire les valeurs de transmissivité :

	somme des K micro-moulinet	transmissivité globale pompage d'essai
F4	$7,2 \cdot 10^{-4}$ m ² /s	$5,3 \cdot 10^{-4}$ m ² /s
F6	$4,4 \cdot 10^{-4}$ m ² /s	$3,1 \cdot 10^{-4}$ m ² /s

Ces données tendent à montrer que la taille du Volume Elémentaire de Référence est au moins d'ordre pluri-décamétrique à hectométrique.

2222 - Pompage d'essai
.....

Site 1 - Landerneau

Un pompage d'essai de 4 320' (72 h) au débit constant de 60 m³/heure a été réalisé sur le forage d'exploitation de Coopagri (forage équipé en 165 mm intérieur), avec observation des fluctuations piézométriques au forage et aux piézomètres P1 (r = 17 m) P2 (r = 80 m) et P3 (r = 110 m).

Le report des points obtenus en coordonnées bilog montre, au forage d'essai (Fig. 20) :

- un effet de capacité jusqu'à environ 4' de pompage
- une portion de courbe, de 4' à 80', superposable à la courbe standard (Theis)
- une fin de courbe s'éloignant de la courbe de Theis sous l'effet d'une, puis de plusieurs limites étanches

au piézomètres P1 et P3 on observe des dispositions analogues : une première partie de courbe superposable à la courbe de Theis, puis l'influence d'une limite étanche à partir d'environ 3 300' à P3 et de 80' à P1. A P1, à partir de 360', des effets de limites supplémentaires apparaissent.

Les mesures faites au piézomètre P2 ne paraissent pas interprétables, l'amplitude totale de ses variations piézométriques restant inférieure à 0,3 m.

En utilisant les parties de courbes non influencées par la première limite étanche on peut définir les valeurs suivantes :

	T m ² /s	S
forage d'essai	4,7 . 10 ⁻³	—
P1	4,7 . 10 ⁻³	4,4 . 10 ⁻³
P3	3,7 . 10 ⁻³	3,7 . 10 ⁻²

Ces transmissivités sont cohérentes, mais il y aurait une forte anisotropie d'emmagasinement (nappe semi captive vers P1 et libre vers P3 ?).

L'influence de la première limite étanche peut être déterminée par l'application de la "théorie des images" telle que décrite par FERRIS : l'influence d'une barrière étanche limitant latéralement l'aquifère sur les rabattements dus au pompage est identique à la superposition des effets conjugués du forage réel produisant un débit Q et du "forage image" symétrique du forage réel par rapport à la limite et débitant avec le même débit + Q. :

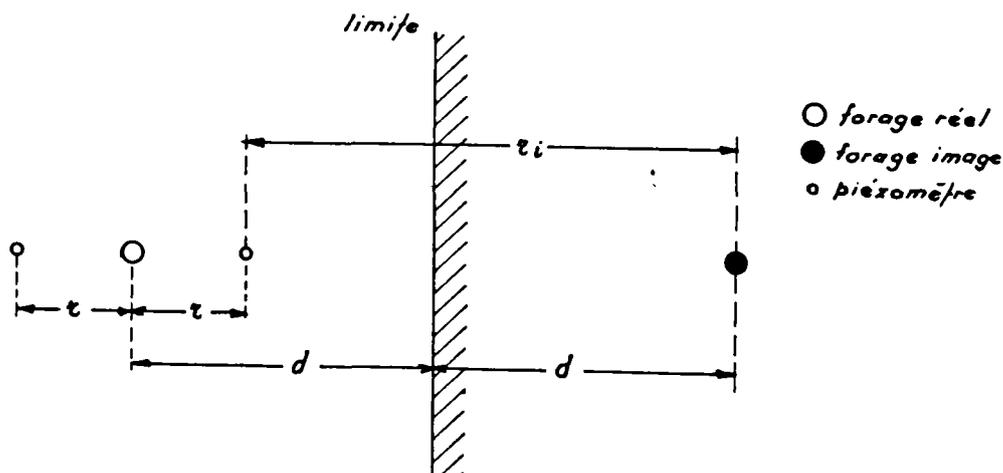
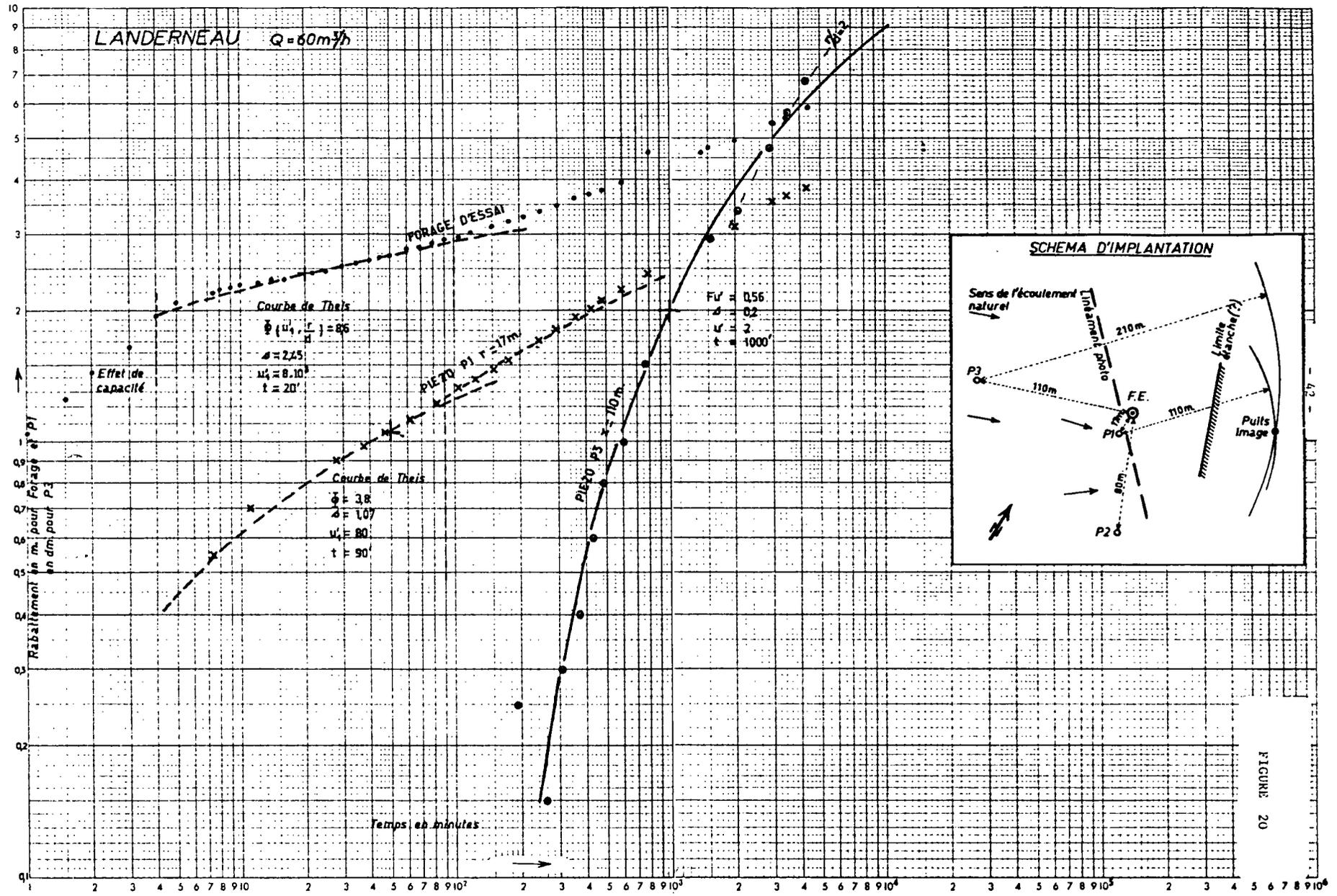


Fig. 19 - Illustration de la théorie des images



En coordonnées bi-logarithmiques, dans le cas particulier d'un piézomètre situé sur un axe perpendiculaire à la limite (figure 19) on a, s étant la somme des rabattements S1 et S2 provoqués respectivement par le forage réel et

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \phi \left(u'1, \frac{r}{d} \right) = \frac{0,08 Q}{T} \phi \left(u'1, \frac{r}{d} \right)$$

$$\text{avec } u'1 = \frac{4 T t}{r^2 S}$$

Cette fonction a été calculée et, par superposition de la courbe expérimentale avec la courbe théorique convenable, on obtient r/d d'où d, r étant connu.

En coordonnées semi-logarithmiques, le temps d'intersection t_i de la courbe du début de pompage (non influencée par la limite) avec celle de la nouvelle courbe, permet de chiffrer approximativement la distance à la limite, en admettant en première approximation, qu'à cet instant t_i , le rabattement s_2 dû au forage image est égal à zéro.

Dans le cas général :

$$r_i = 1,5 \sqrt{\frac{T t_i}{S}}$$

si on dispose de plusieurs piézomètres, on peut espérer déterminer la position du puits image et donc de la limite.

Dans le cas d'un puits de pompage pour lequel r est négligeable par rapport à d

$$d = 0,75 \sqrt{\frac{T t_i}{S}}$$

En appliquant ces méthodes à l'essai de Landerneau :

- à partir des données du forage d'essai, en considérant comme coefficient d'emmagasinement la valeur obtenue à P1 ($S = 4,4 \cdot 10^{-3}$), $d = 53$ m

- à partir des données des piézomètres, r_i (P3) = 210 m et r_i (P1) = 110 m. Par simple construction graphique on détermine une position possible pour le puits image (cf. schéma d'implantation) à environ 100 m du forage d'essai, ce qui porterait la limite étanche à environ 50 m du forage d'essai, valeur très cohérente avec la précédente.

- dans ce cas, P3 est sur un axe passant par le forage d'essai, pratiquement perpendiculaire à la limite et on peut y appliquer la méthode bi-logarithmique : la fin de la courbe expérimentale se superpose avec la courbe théorique pour $r/d = 2$, soit ($r = 110$ m) $d = 55$ m.

L'ensemble de ces résultats convergent, il semble que l'on puisse admettre que la première limite étanche dont l'effet se fait sentir au pompage est située à 50 - 55 m à l'W du forage d'essai ; sa direction locale est relativement peu différente d'une parallèle au linéament photographique.

Ceci confirmerait que le linéament vu en photo interprétation est bien la trace au sol d'une zone fissurée (couloir de fissuration) dont la largeur, au niveau du forage d'essai est d'au moins 160 m (50 m vers l'W et au moins 110 m -distance FE-P3- vers l'Est), schéma à nouveau très cohérent avec ce qu'on peut connaître des conditions géologiques locales.

Site 2 - Caurel

Deux séries d'essai ont été réalisées :

- un pompage de 1440' (24 h) sur le forage communal, au débit de 17,3 m³/h (graphique Fig. 21)
- l'enregistrement à P1 (x = 60 m) des pompages réalisés sur le forage communal du 11/08 au 4/09/1979 (P2 n'a pas réagi de façon cohérente à ces pompages) : en moyenne 6 heures de pompage par jour au débit de 7 m³/h, soit un débit moyen, pondéré à la totalité de la période considérée, de 1,75 m³/heure (graphique Fig. 22).

Le deuxième essai peut être interprété en considérant soit le débit pondéré (1,75 m³/h) et le temps réel écoulé depuis la mise en route des pompages (bi-log et semi-log), soit le débit réel (7 m³/h) et des "temps fictifs" déduits de l'aspect cyclique des pompages (semi-log uniquement) (graphique Fig. 23).

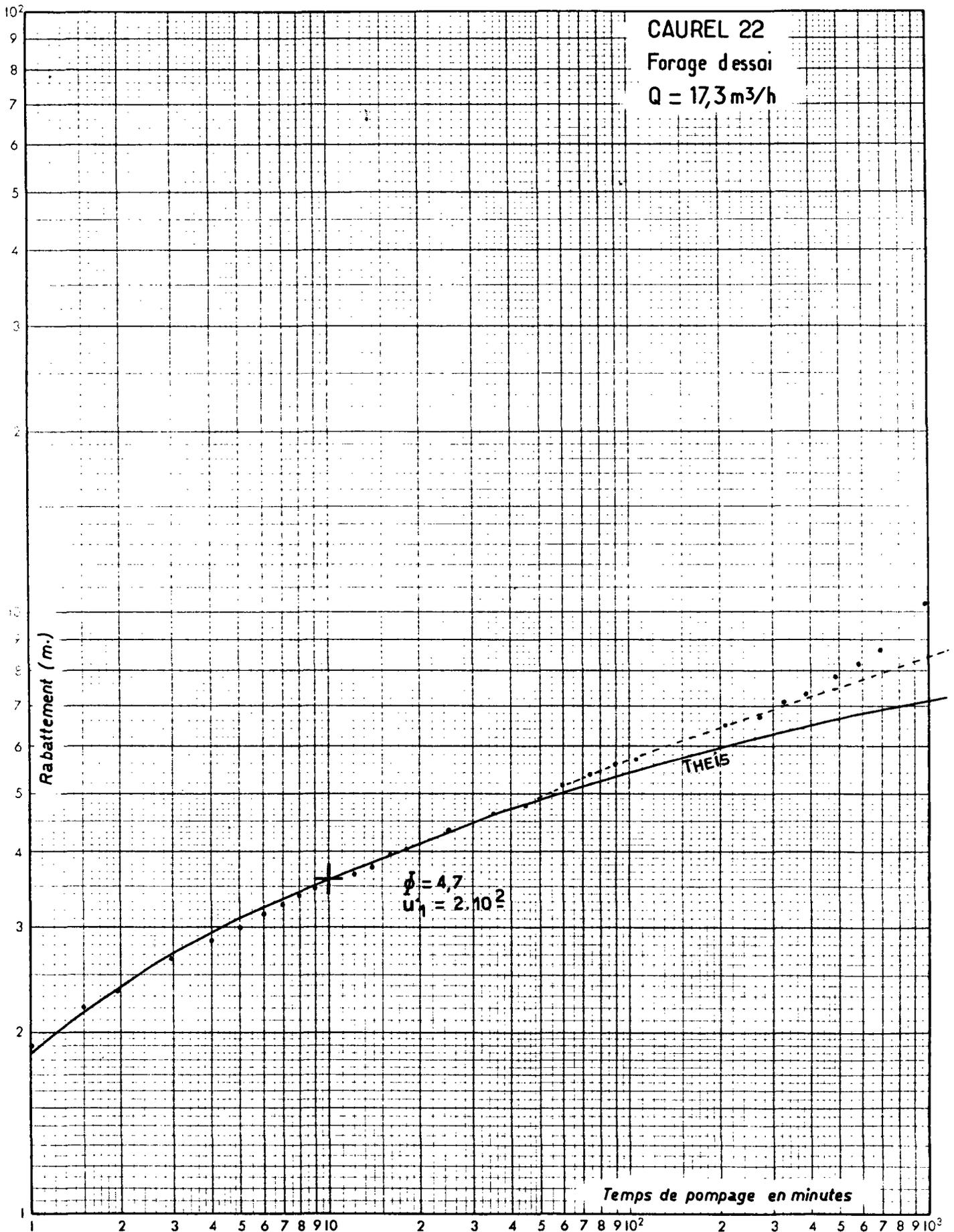
Les courbes semi-log et bi-log ($s = f/\log t$) et $\log s = f(\log t)$ montrent, comme à Landerneau des réactions pouvant être attribuées à des effets de limite étanche :

la première partie des courbes est identifiable à une courbe théorique (droite de Jacob ou courbe de Theis) dont la courbe expérimentale s'écarte (après 45' au forage, après 10 heures au piézomètre) pour se superposer à un effet de "limite étanche". A partir d'environ 3 000 minutes au forage et 65 heures (temps réel) au piézomètre, le rabattement est constamment accéléré, témoignant de réflexions multiples sur au moins deux "limites étanches" (les parois du couloir fissuré, vraisemblablement).

Les premières parties des courbes permettent de déterminer les valeurs suivantes :

* 1973 - P. PEAUDECERF. Méthode d'interprétation des données de pompages périodiques - note technique inédite.

FIGURE 2.1



CAUREL (22) Piézomètre P1 - r = 60 m

Pompages du 11/08 au 4/09/1979

Débit moyen = 1,75 m³/h

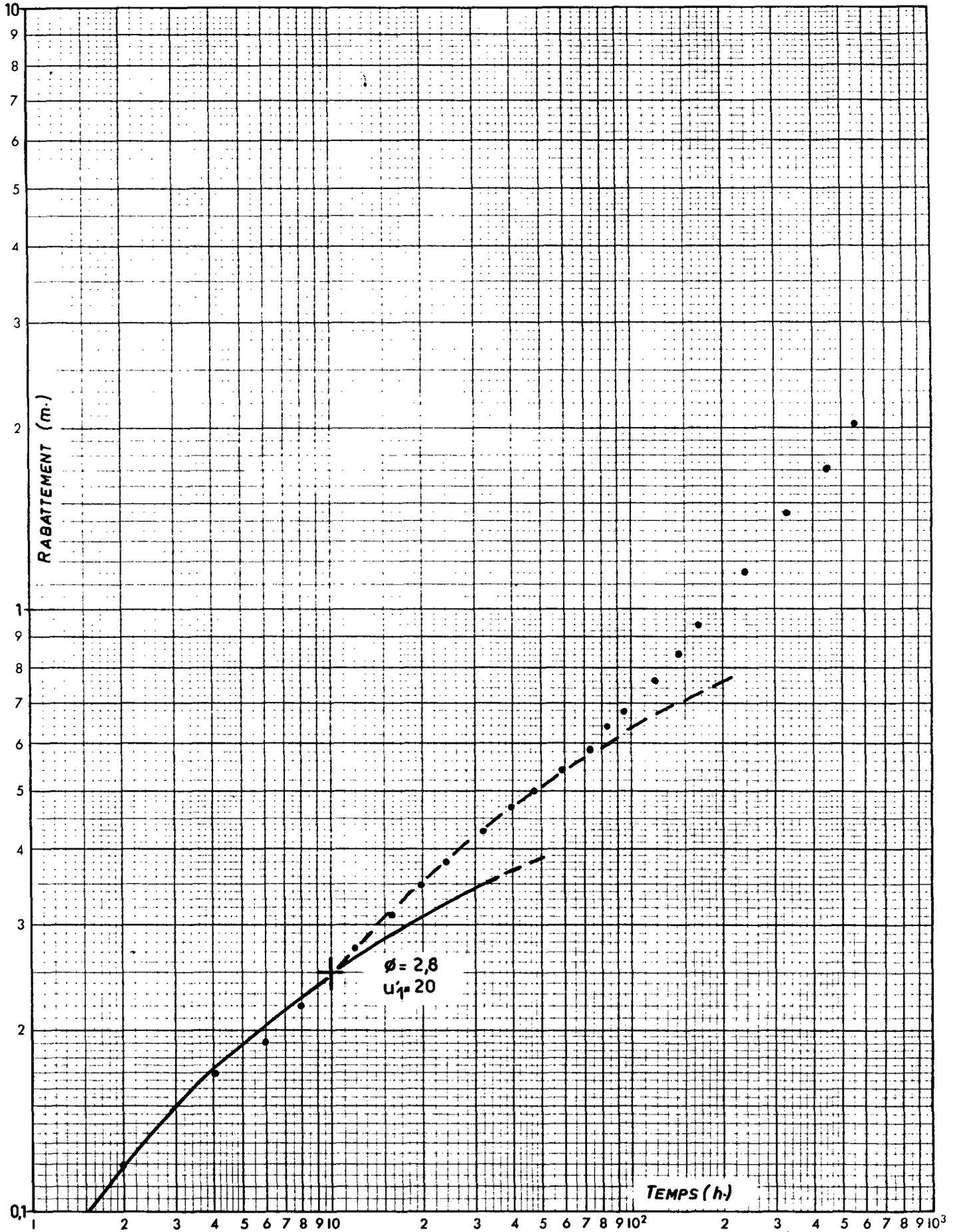
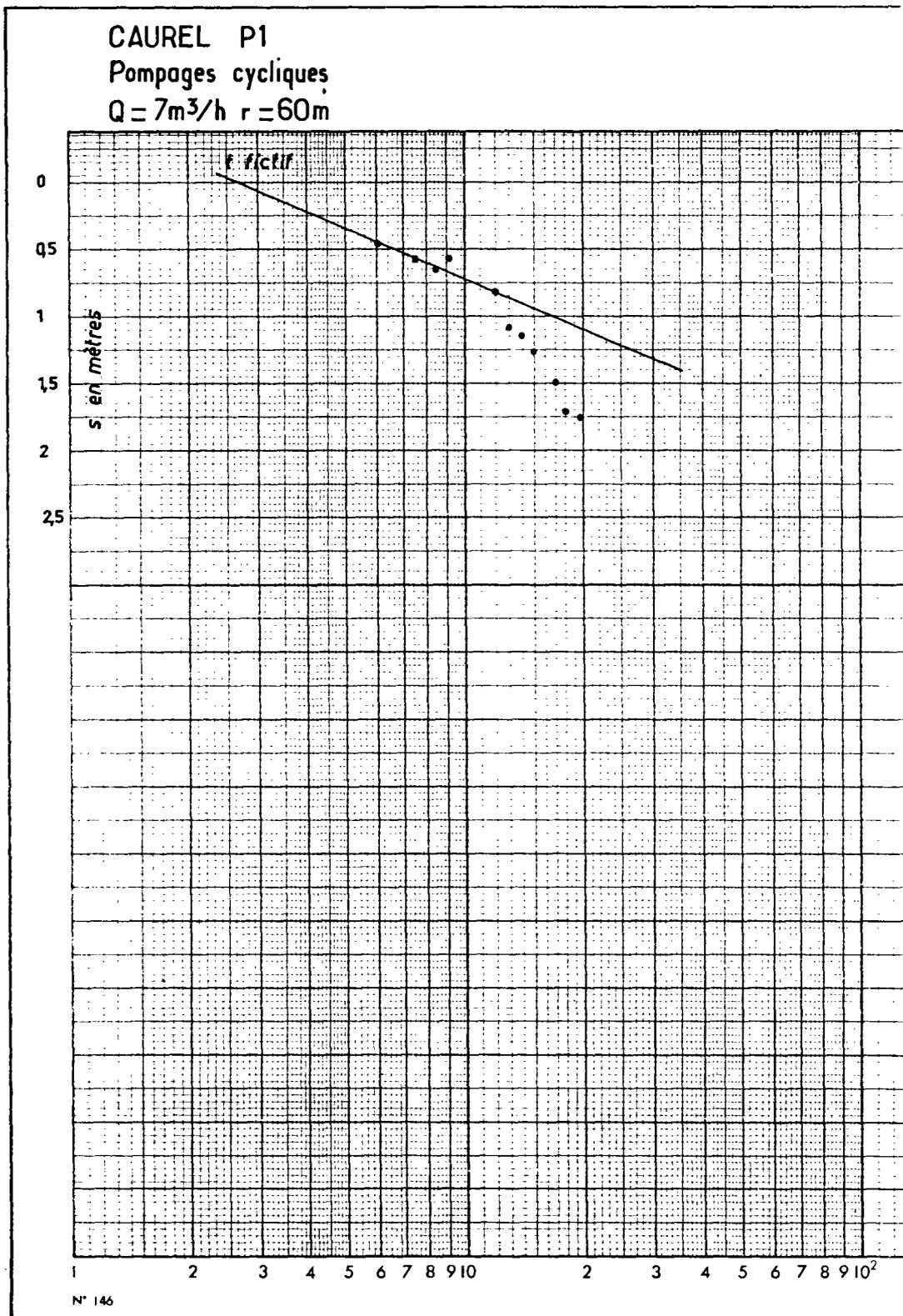


FIGURE 23



	Forage	Piézomètre r = 60 m	
		Q = 1,75 m ³ /h t réel	Q = 7 m ³ /h t fictif
T m ² /s	5 . 10 ⁻⁴	4,3 . 10 ⁻⁴	2,7 . 10 ⁻⁴
S		8,6 . 10 ⁻⁴	1,6 . 10 ⁻³

Pour la première limite étanche, le calcul donne :

- à partir du forage, d = 30 m

- à partir du piézomètre, r_i = 200 m, ce qui pourrait correspondre (cf. Fig.24) à une limite située à environ 70 m du forage.

La concordance n'est pas parfaite mais, compte tenu du caractère approché des méthodes d'interprétation notamment les pompages cycliques, cela n'est pas incohérent avec les autres données (couloir à basse résistivité tel que déterminé par géophysique).

Site 3 - Paimpont

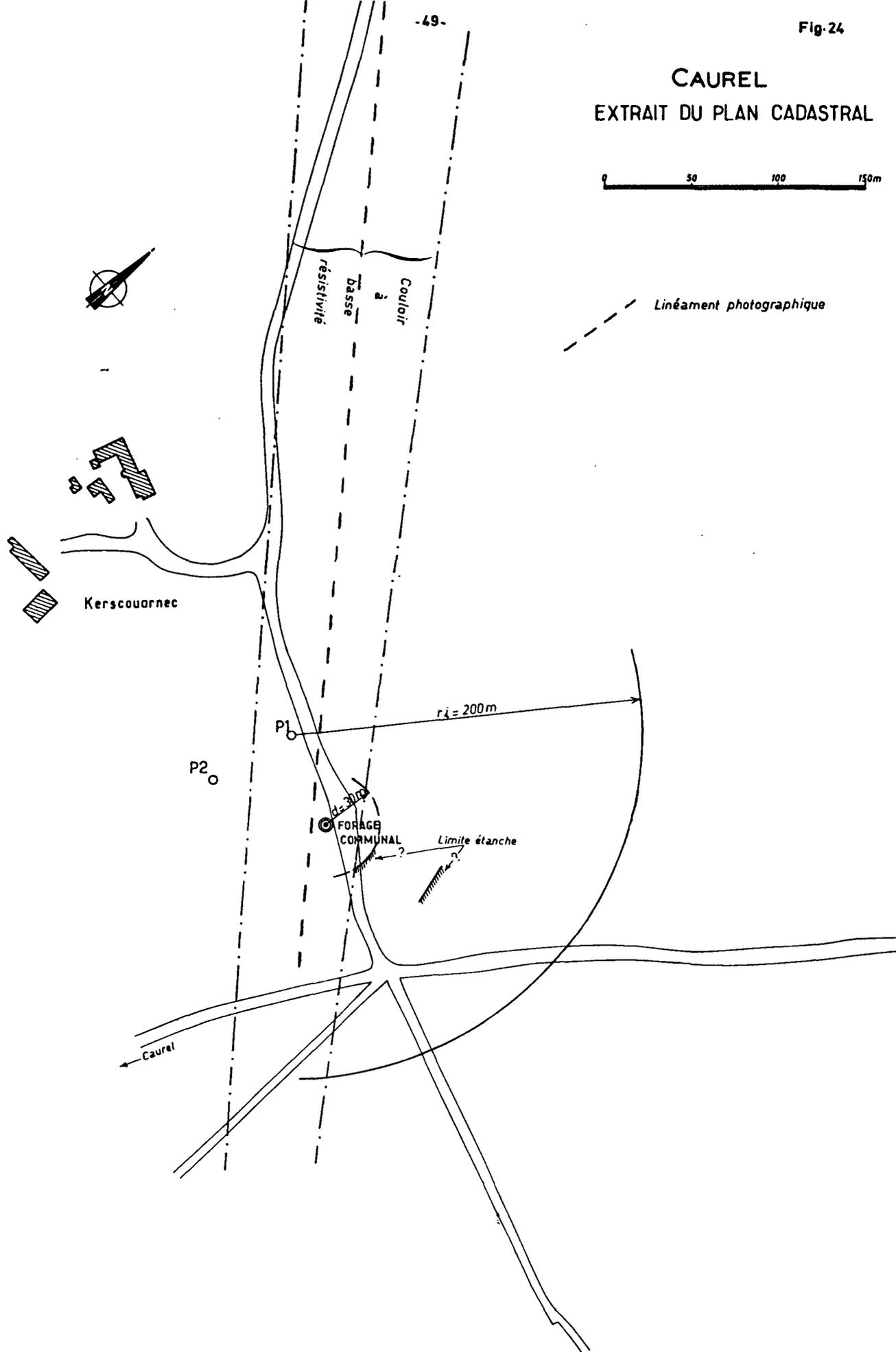
Trois séries d'essai ont été réalisés

1 - Essai de 36 h à 17 m³/h dans F5 bis, avec observation dans les piézomètres F4 (r = 195 m), F6 (r = 120 m) F7 (r = 320 m) et F7 (r = 330 m) (graphique Fig. 25).

F5 bis et F6 (piézomètre le plus proche) montrent des évolutions parallèles : une première partie de courbe identifiable à une courbe théorique et s'en écartant (après 100' à F5bis et 250' à F6), avec une pente plus faible (inverse d'un effet de limite). Les autres piézomètres montrent des pentes homogènes, mais dont la valeur est du même ordre de grandeur que la deuxième partie des courbes observées à F5 bis et F6. A ce stade on ne peut savoir si la transmissivité de l'aquifère est plus élevée en F4 - F3 et F7 ou si l'éloignement de ces ouvrages au forage d'essai (F5 bis) est responsable du non enregistrement des premières parties des courbes de descente.

2 - Essais courts sur F3 - F4 - F6 et forage d'exploitation - Ces essais, d'une durée de 3 à 6 h montrent tous des réactions analogues à ceux observés précédemment à F5 bis et F6. Cependant, à F4, le palier (deuxième partie de courbe) est à peine amorcé ; par ailleurs, F3 étant en partie comblé, les mesures ne sont pas représentatives de l'aquifère total - cf. graphique F4 et F6 - Fig. 26.

CAUREL EXTRAIT DU PLAN CADASTRAL



3 - Essai de longue durée (1 120 h) au Forage d'exploitation au débit moyen de 8 m³/h, avec enregistrement à F4 (r = 80 m). Le report des points (s.t) mesurés, en coordonnées bilogarithmiques ou semi-logarithmiques montre : une première partie de courbe (jusqu'à environ 300 heures) dont la pente est du même ordre à celle des deuxièmes parties des courbes des essais précédents. On peut penser que la première pente est oblitérée par l'éloignement du piézomètre - cf. graphique Fig. 27.

Une deuxième partie de courbe, à pente plus marquée, homologue de la première pente des essais précédents.

L'analyse de cet ensemble d'essais semble nous autoriser à assimiler le système aquifère de Paimpont à une nappe semi-captive avec une éponte semi perméable à emmagasinement non négligeable, la couche semi perméable étant placée entre la couche aquifère testée et une couche pratiquement imperméable. L'apport par la couche semi-perméable provoque alors un ralentissement temporaire de l'évolution des rabattements.

La couche aquifère principale est caractérisée par T et S et la couche semi-perméable par S', K' et b' (ou $\frac{K'}{b'}$ paramètre de drainance).

Il n'existe, pour le moment, que des solutions mathématiques partielles pour représenter l'écoulement dans la couche principale (en début et en fin de pompage)

1 - On peut utiliser les solutions proposées par Hantush* (et tabulées par lui) pour déterminer :

T au pompages effectués sur chaque ouvrage (stade initial des pompages)

S à F6 utilisé comme piézomètre ou premier essai

T et S + S' au pompage de longue durée mesuré sur F4 utilisé comme piézomètre (stade final de pompage)

On en déduira S' et $\frac{K'}{b'}$

HANTUSH : au stade initial de pompage : $s = \frac{0,08 Q}{T} H(u' \beta)$ ou $H(u' \beta)$
est une intégrale tabulée en fonction de $u' = \frac{4Tt}{r^2s}$ et

$$\beta = \frac{r}{4} \sqrt{\frac{s' K'}{T S b'}}$$

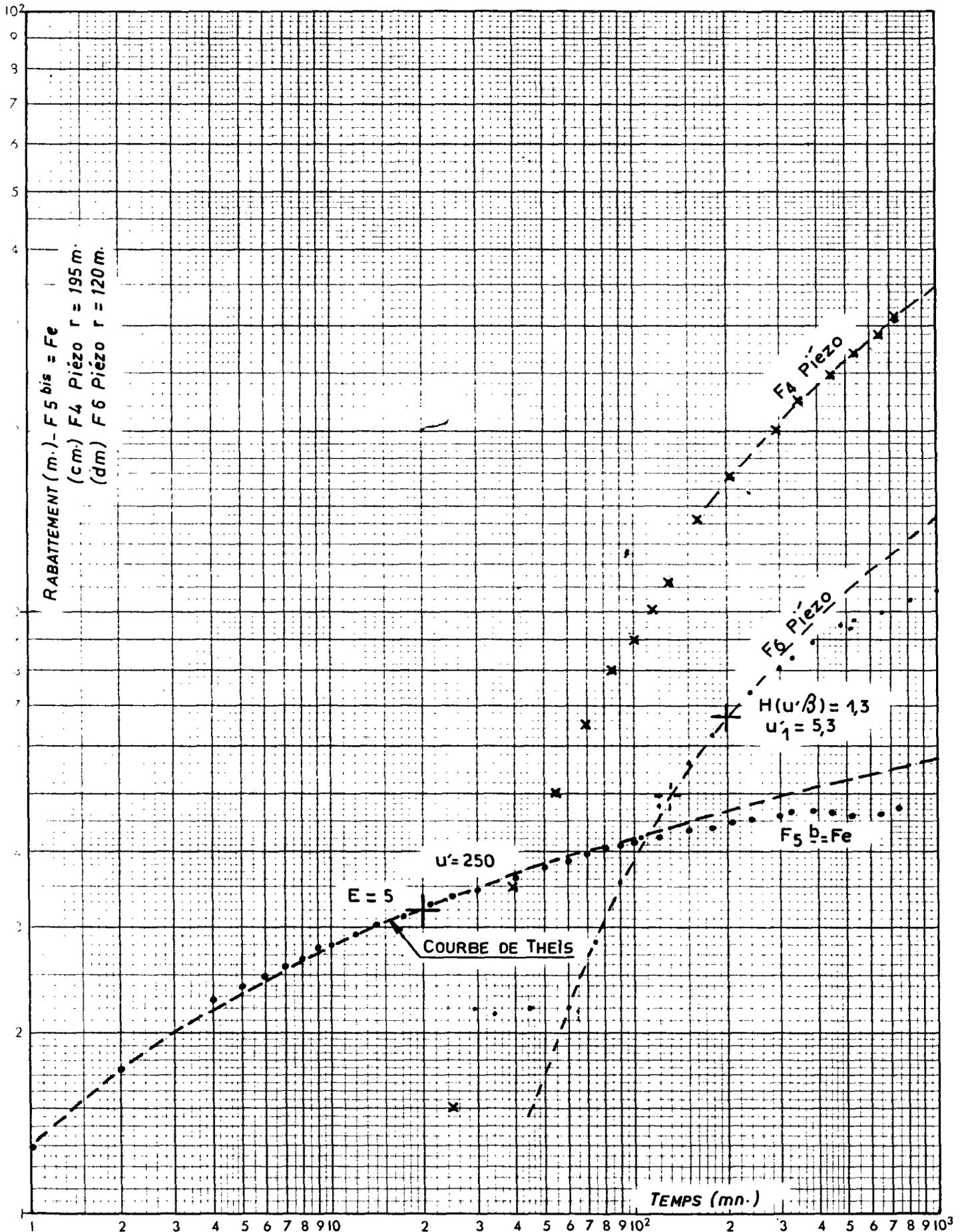
Au stade final de pompage, $s = \frac{0,08 Q}{T} F(u''')$ où $F(u''')$
est une intégrale tabulée, avec $u''' = \frac{4Tt}{r^2s}$

Q = 17 m³/h

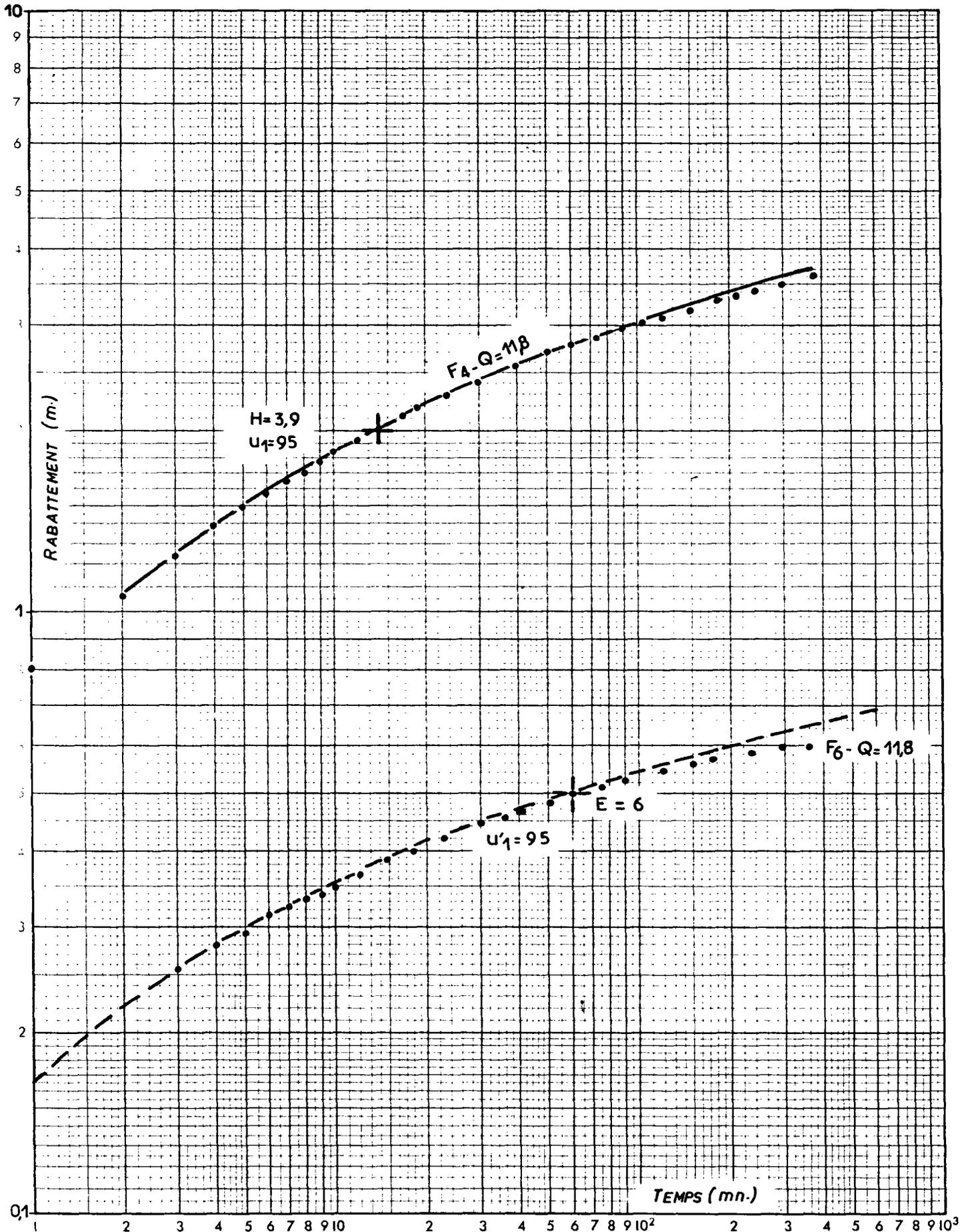
F6 - r = 120 m

F4 - r = 195 m

PAIMPONT - Pompage sur F5 bis



pompages sur chaque forage
courbes pour F4 (Q = 11,8 m³/h) et
F6 (Q = 11,8 m³/h)



Transmissivité (en m²/s)

	<u>stade initial</u>	<u>stade final</u>
F3	0,7 . 10 ⁻⁴ (valeur douteuse - cf. plus haut)	
F4	5,1 . 10 ⁻⁴	3,5 . 10 ⁻⁴
F6 (forage d'essai)	3,1 . 10 ⁻⁴	
F6 (piézomètre)	7,3 . 10 ⁻⁴ ($\beta = 1$)	
F5 bis	5,9 . 10 ⁻⁴	
Forage d'exploitation	2,5 . 10 ⁻⁴	

Coefficient d'emmagasinement

$$S = 4,5 . 10^{-4}$$

$$S + S' = 1,9 . 10^{-4}$$

$$S' = (S + S') - S = 1,8 . 10^{-2}$$

Paramètre de drainance

En utilisant t , β et S donné par F6 et $S + S'$ donné par F4 (stade final du pompage de longue durée), on obtient

$$\frac{K'}{b'} = 1,9 . 10^{-8} \text{ avec } K' \text{ en m/s}$$

2 - On peut utiliser la solution proposée par BERKALOFF dans le schéma dit de la "strate conductrice", avec l'observation du pompage de longue durée sur F4 (graphique Fig. 28).

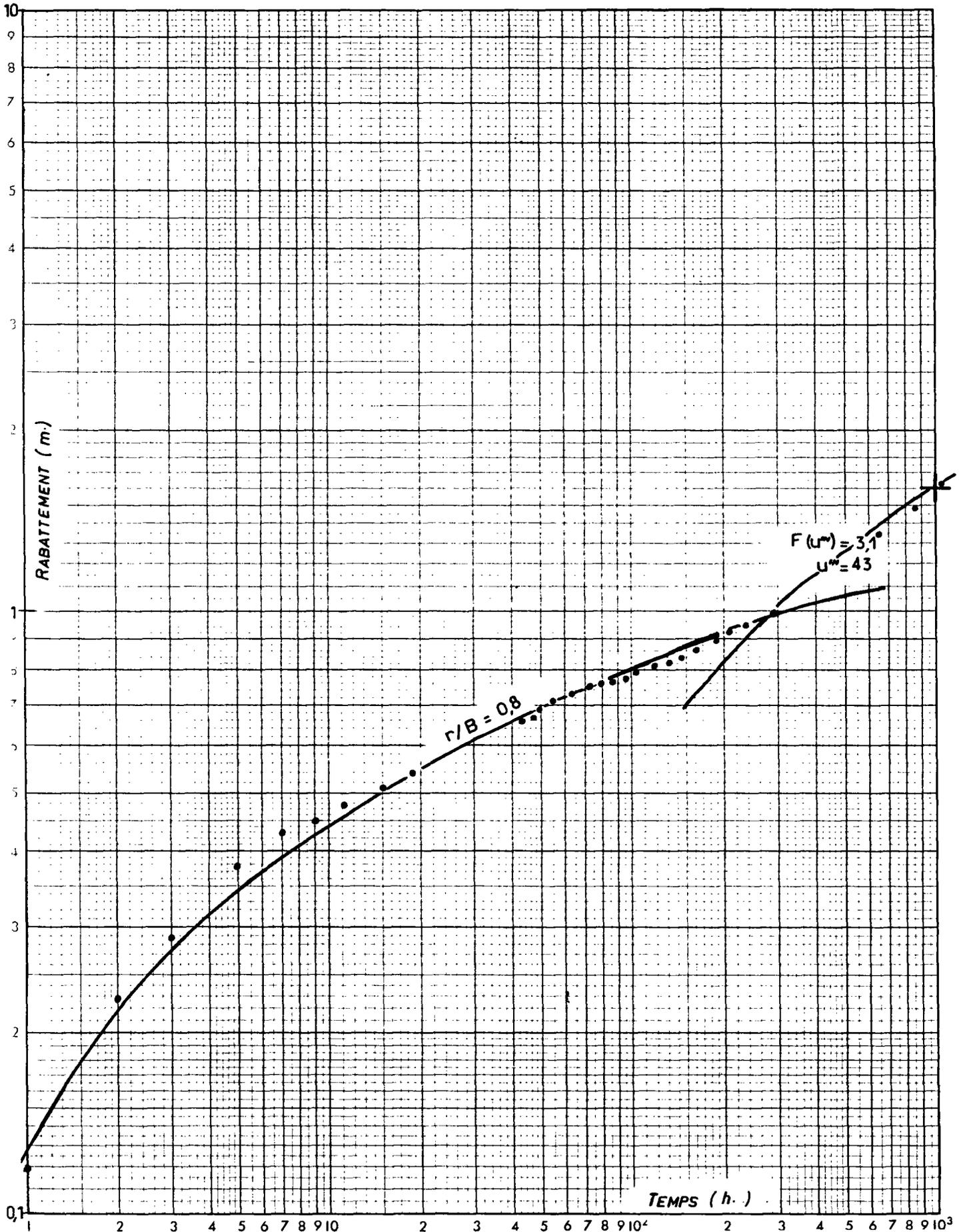
La couche magasin (semi-perméable) est définie par

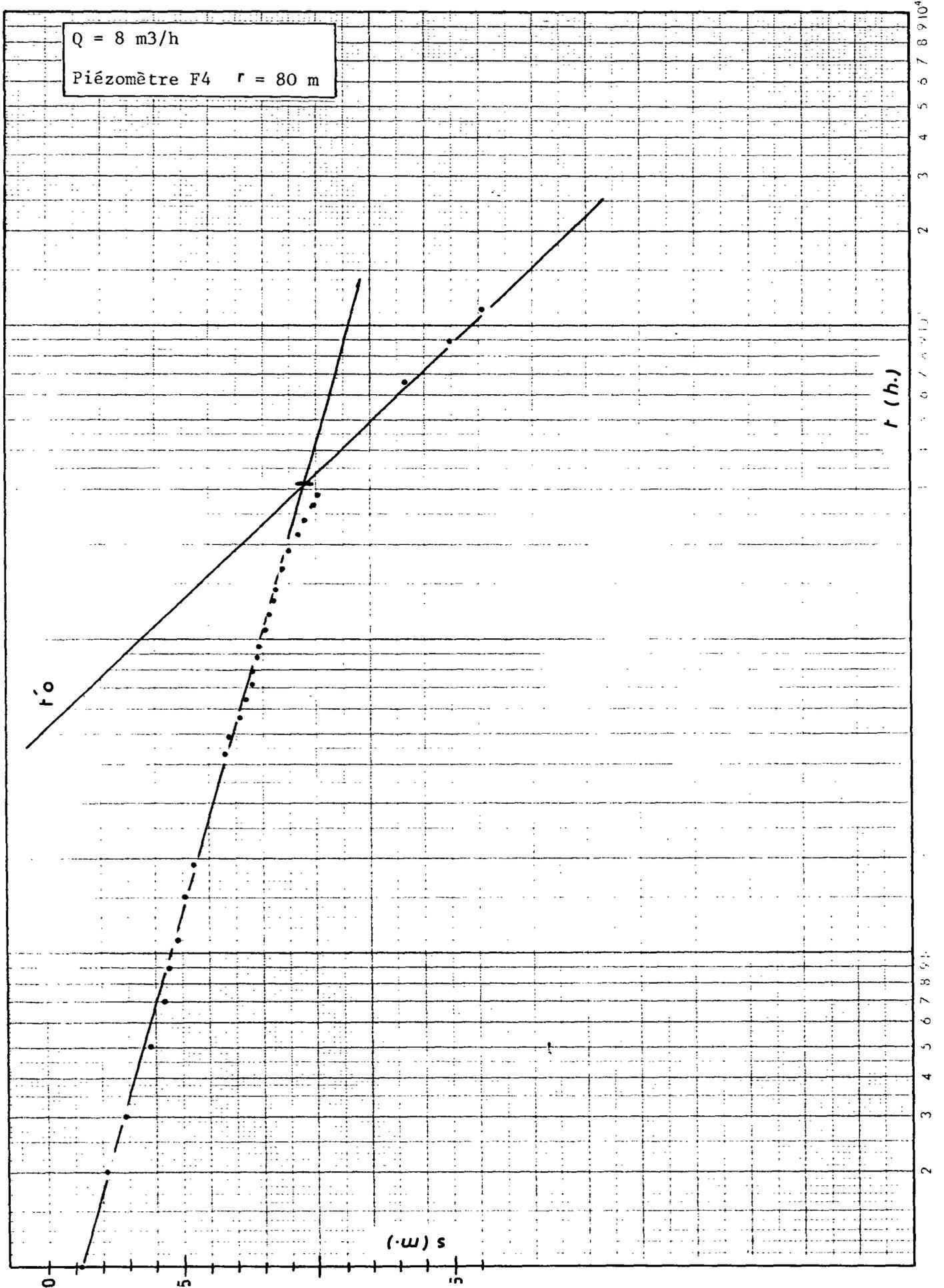
S' = coefficient d'emmagasinement total

$$\sigma = \frac{K'}{b'} = \text{paramètre de drainance}$$

Pompage d'essai de longue durée sur
forage d'exploitation

Courbe de descente à F4 - (r = 80 m)





la strate conductrice est caractérisée par

T = transmissivité hydraulique

S = coefficient de la réserve immédiatement mobilisable, supposé nul ou négligeable

On obtient :

$$T = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S' = 2,2 \cdot 10^{-2}$$

$$\sigma = \frac{K'}{b'} = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ (K' en m/s)}$$

3 - Enfin, en utilisant une méthode similaire à celle de BOULTON pour tenir compte du débit retardé dû à l'égouttement dans les nappes libres (théorie moins rigoureuse que celle de HANTUSH et résultats donc plus approximatifs), on obtient

- à F6 (utilisé comme piézomètre) : $r/b = 0,4$, soit pour $r : 120 \text{ m}$, $B = 300$ et $\frac{K'}{b'} = 7,9 \cdot 10^{-9}$ (K' en m/s)

- à F4 (pompage de longue durée) : $S' = 1,8 \cdot 10^{-2}$ et $\frac{K'}{b'} = 3,3 \cdot 10^{-8}$ (K' en m/s)

Tous les résultats sont très cohérents entre eux et tendent à démontrer la validité des schémas de HANTUSH et/ou de BERKALOFF (qui en est d'ailleurs dérivé) appliqués au site de Paimpont.

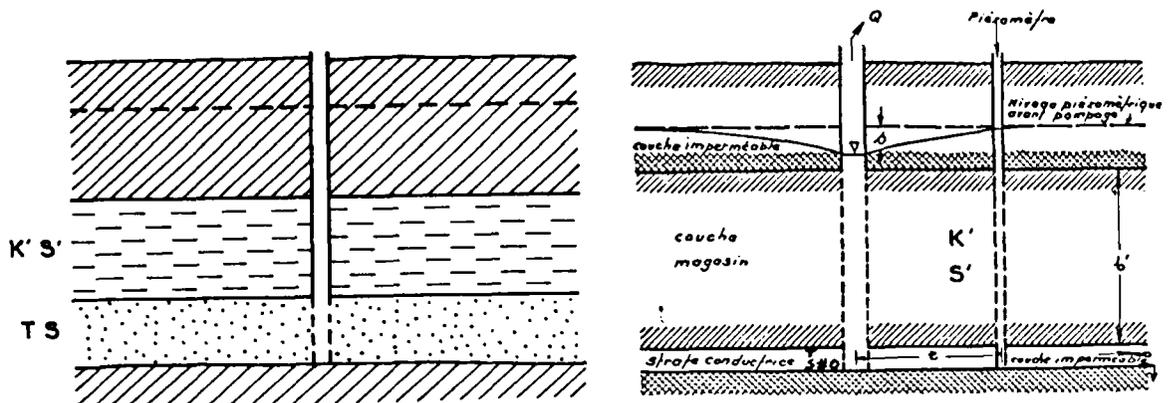


FIGURE 29

HANTUSH - nappe semi-captive avec éponte semi-perméable

BERKALOFF - nappe captive avec une strate conductrice d'eau privilégiée

CONCLUSIONS

L'identification par photos aériennes des zones fissurées fournit des données intéressantes et constitue, en tous cas, une approche indispensable pour la recherche d'eau. Certains linéaments n'ont pas d'origine hydrogéologique (2 linéaments sur trois à Caurel) et le fait d'orienter l'implantation d'un forage vers les secteurs de convergence de plusieurs linéaments paraît, de ce point de vue, susceptible de limiter les risques d'échecs. Aux trois sites étudiés en détail, aux linéaments, ou à certains des linéaments discernés en photo aérienne, correspond bien un sous-sol constitué de roches fissurées.

La géophysique, lorsqu'elle est applicable, apporte des compléments notables, de deux façons : elle permet d'éliminer d'une exploration mécanique forcément onéreuse ceux des linéaments qui ne donnent pas de réponse au procédé utilisé et elle permet d'estimer l'extension de la zone fissurée. Ses données ne sont que qualitatives et ne peuvent permettre d'hypothèse quant à la perméabilité des terrains.

Les zones où la fissuration conductrice est développée se présentent en première analyse avec des formes allongées (couloirs) dont le linéament photo peut représenter approximativement l'axe - c'est le cas aux trois sites de Landerneau, Caurel et Paimpont. Les dimensions latérales de ces couloirs sont variables : 50 à 100 m seulement à Caurel, plus de 160 m à Landerneau et au moins 650 m à Paimpont (distance séparant les deux sondages extrêmes S3 et S7).

L'analyse du comportement des nappes influencées par les pompages d'essai semble montrer qu'à l'intérieur du couloir fissuré, l'aquifère garde des caractéristiques (approximativement) homogènes et constantes : le V.E.R. est de dimensions pluri-décamétriques à pluri-hectométriques. De ce fait, les méthodes et schématisations utilisées pour rendre compte des écoulements dans les aquifères classiquement reconnus comme tels, semblent bien rendre compte convenablement, malgré les simplifications qu'elles supposent, des écoulements en milieu fissuré.

Cependant, les couloirs aquifères ont des extensions souvent réduites et les phénomènes de réflexions multiples sur plusieurs limites étanches (parois de couloir) peuvent, en accélérant le rabattement, diminuer considérablement les possibilités d'exploitation (cas de Landerneau et surtout de Caurel). En conséquence, au moment de la recherche appliquée de points d'eau, il convient de considérer que l'extension latérale de la zone fissurée (rôle éventuel de la géophysique pour cette estimation) est un critère au moins aussi important que la valeur de la transmissivité de l'aquifère proprement dit.

23 - ECHELLE PONCTUELLE

231 - Venues d'eau, débits à la foration

La méthode de foration utilisée (marteau fond-de-trou) dont l'air comprimé est le moteur, constitue un dispositif de pompage permanent par effet d'émulsion (air-lift). A sa sortie du forage en cours de réalisation, l'eau peut être canalisée et son débit mesuré (temps de remplissage d'un récipient de contenance connue par exemple). Les débits ainsi mesurés fournissent des informations ponctuelles et qualitatives sur la perméabilité des terrains explorés et sur l'emplacement des venues d'eau principales.

2311 - Débits instantanés en fin de foration
.....

Lorsqu'un forage est terminé, que les horizons aquifères soient entièrement traversés ou que l'arrêt des travaux à la profondeur atteinte soit décidé pour toute autre raison, on maintient en général l'émulsion quelques instants (10 à 30') avant de remonter le train de tiges et l'outil, afin de nettoyer le forage.

Le débit ainsi obtenu est un débit instantané dans la mesure où il n'est maintenu qu'un temps relativement court (le temps d'émulsion final augmenté du temps de foration continue l'ayant précédé) ; il ne peut fournir d'information que sur l'environnement immédiat du trou foré et ne peut faire préjuger des réactions de la nappe à l'échelle locale.

Ce débit est lié à un certain nombre de paramètres souvent difficiles à maîtriser et variables d'un point à l'autre

- paramètres liés aux outils : diamètre du taillant, encombrement des tiges de foration, débit d'air du compresseur et pression de service
- paramètres liés au dispositif de pompage air-lift : hauteur de relevage et rapport de submergence (rapport de la hauteur de la colonne d'air à la hauteur de la colonne d'eau).
- paramètres liés à l'aquifère : forage complet ou non (horizons conducteurs entièrement traversés ou non), puissance des horizons conducteurs, niveau sous le sol de la surface piézométrique, perméabilité (transmissivité) de l'aquifère.

A Paimpont, on dispose de trois forages : F4 - F5 bis et F6, pour lesquels on connaît à la fois le débit instantané en fin de foration et la transmissivité de l'aquifère à leurs environs immédiats et où les conditions sont très comparables : profondeurs comparables, même outil et même compresseur utilisés, terrain conducteur entièrement traversé (de 10 - 20 m jusqu'à 50 - 60 m), niveau de la nappe non influencée entre 5 et 7 m de profondeur. A F3 on connaît également le débit instantané en fin de foration et la transmissivité mais les autres conditions sont un peu différentes : aquifère non entièrement traversé à 79 m, niveau de la nappe non influencée, à 13 m sous le sol, et par ailleurs, essai de pompage non entièrement représentatif (toute la partie inférieure du forage est rebouchée).

Le graphique ci-dessous montre une corrélation évidente entre le débit instantané et la transmissivité pour les forages F4 - F5 bis et F6 où les diverses conditions sont comparables.

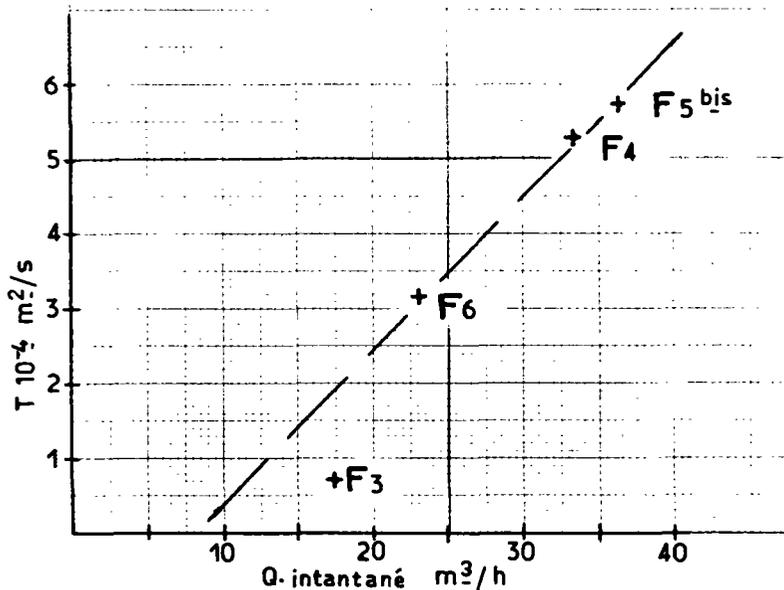


FIGURE 30 - Paimpont - relations entre débits instantanés et transmissivité

Dès que l'un ou l'autre des paramètres est modifié de façon sensible, les couples de valeurs Q instantané - Transmissivité s'écartent de cet ajustement (F3 à Paimpont - Cf. graphique - Forage communal à Caurel : Q inst. = 24 m³/h pour T = 5 . 10⁻⁴ m²/h - Forage d'exploitation à Landerneau : Q inst. ≈ 50 m³/h pour T = 4,7 . 10⁻³ m²/s) qui n'a de représentativité que très locale.

Néanmoins, au niveau d'un site, l'ordre de grandeur des débits instantanés mesurés en fin de foration peut donner une image qualitative et approximative de l'hétérogénéité du secteur.

Ainsi, à Landerneau, on peut distinguer de façon très schématique une zone "plus conductrice" (Q ≳ 20 m³/h) et une zone "moins conductrice" (Q ≲ 20 m³/h). On remarquera (cf. plan ci-après) l'effet de la proximité des linéaments photo sur le débit instantané des ouvrages (dont il faut souligner qu'ils sont de diamètres et de profondeurs différents).

L'effet maximum paraît se produire à proximité des croisements des 2 linéaments SE-NW avec le linéament SW-NE, alors que le croisement des linéaments situé le plus au nord du site se manifeste par une augmentation de la teneur en argile (cf. Fig. 31).

2312 - Débits à l'avancement

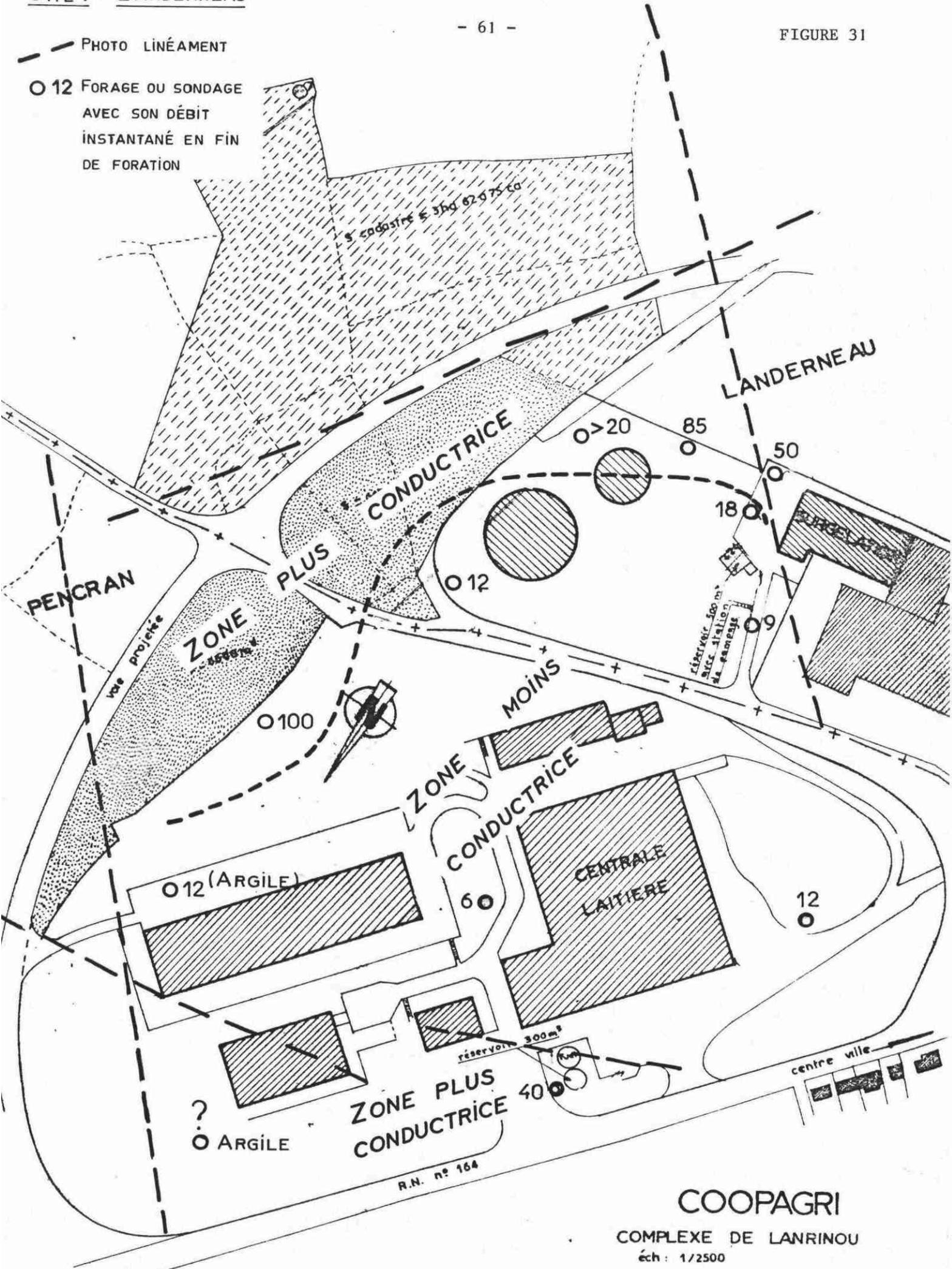
Lorsque le dégagement des cuttings s'effectue normalement l'évolution à mesure de l'approfondissement de l'ouvrage du débit exhauré par l'action de l'air comprimé peut renseigner sur l'emplacement et l'importance des principales venues d'eau. Cependant, un certain nombre de facteurs peuvent nuire à la représentativité des données obtenues :

- temps de pompage : tant que la foration se poursuit, le pompage par émulsion est permanent ; à chaque fin de tige de forage (dont la longueur est en général de 3 m), l'admission d'air est interrompue le temps nécessaire aux manoeuvres permettant le rajout d'une tige, ce qui permet à l'eau d'affluer et de remplir plus ou moins le trou. Au redémarrage de l'outil, le débit se trouve ainsi très exagéré ; on remédie en partie à cet inconvénient en ne tenant compte que des débits d'exhaure mesurés lorsque chaque tige de forage est presque entièrement descendue mais, même alors, les temps de pompage correspondant peuvent être très différents (les niveaux ne pouvant être mesurés, il conviendrait de ne comparer que des débits fournis après des temps d'émulsion comparables) : de quelques minutes à plus de deux heures selon la dureté des terrains :

- effet de développement : l'émulsion à l'air comprimé est un moyen de pompage énergique qui, à mesure que l'ouvrage s'approfondit peut avoir un effet de développement certain sur les horizons supérieurs en débarassant les fissures des cuttings qui pouvaient y avoir été introduits. Ce développement, augmentant la perméabilité des terrains au voisinage immédiat du trou augmente les débits exhaurés et risque de faire croire faussement à la présence de nouveaux horizons productifs

--- PHOTO LINÉAMENT

○ 12 FORAGE OU SONDAGE
AVEC SON DÉBIT
INSTANTANÉ EN FIN
DE FORATION



COOPAGRI

COMPLEXE DE LANRINOU

éch : 1/2500

- effet de submergence : le rapport de submergence (cf. plus haut) augmente théoriquement avec l'approfondissement jusqu'à être maximum lorsque le forage atteint la base de l'aquifère, ce qui devrait augmenter artificiellement le débit exhauré. En fait, pratiquement, on se trouve dans des conditions de débit d'air telles (la plupart des compresseurs fournissent 20 m³/minute) que, sauf peut être pour les débits très importants (supérieurs à 50 m³/heure), les règles du pompage air-lift classique ne s'appliquent pas totalement et il semble que l'effet de submergence n'apporte que des perturbations limitées.

Sur les graphiques Fig. 32 on a comparé pour F4 bis et F5 (Paimpont) les données obtenues par la mesure des débits à l'avancement avec celles fournies par le micromoulinet. Les résultats sont exprimés en pourcentages cumulés de débits fournis (débits à l'avancement) ou absorbés (micromoulinet, le mouvement de l'eau étant alors créé par injections). On voit que les débits à l'avancement donnent une image quelque peu déformée de la réalité : de 20 à 35 m à F4 bis, de 32,5 à 50 m à F6, les débits à l'avancement exagèrent la productivité des horizons successivement atteints, d'une quantité qui peut être voisine de 20 %. Au delà, la tendance s'inverse et le micromoulinet montre que les horizons inférieurs, sont plus productifs et plus profondément que ne le laissaient supposer les mesures de débit instantané en cours de travaux.

On peut considérer qu'en première approximation la mesure des débits à l'avancement fournit une image acceptable de la conductivité des divers niveaux, utilisable pour établir le plan d'équipement d'un forage et prévoir les possibilités de rabattement.

232 - Mesures au micromoulinet de forage

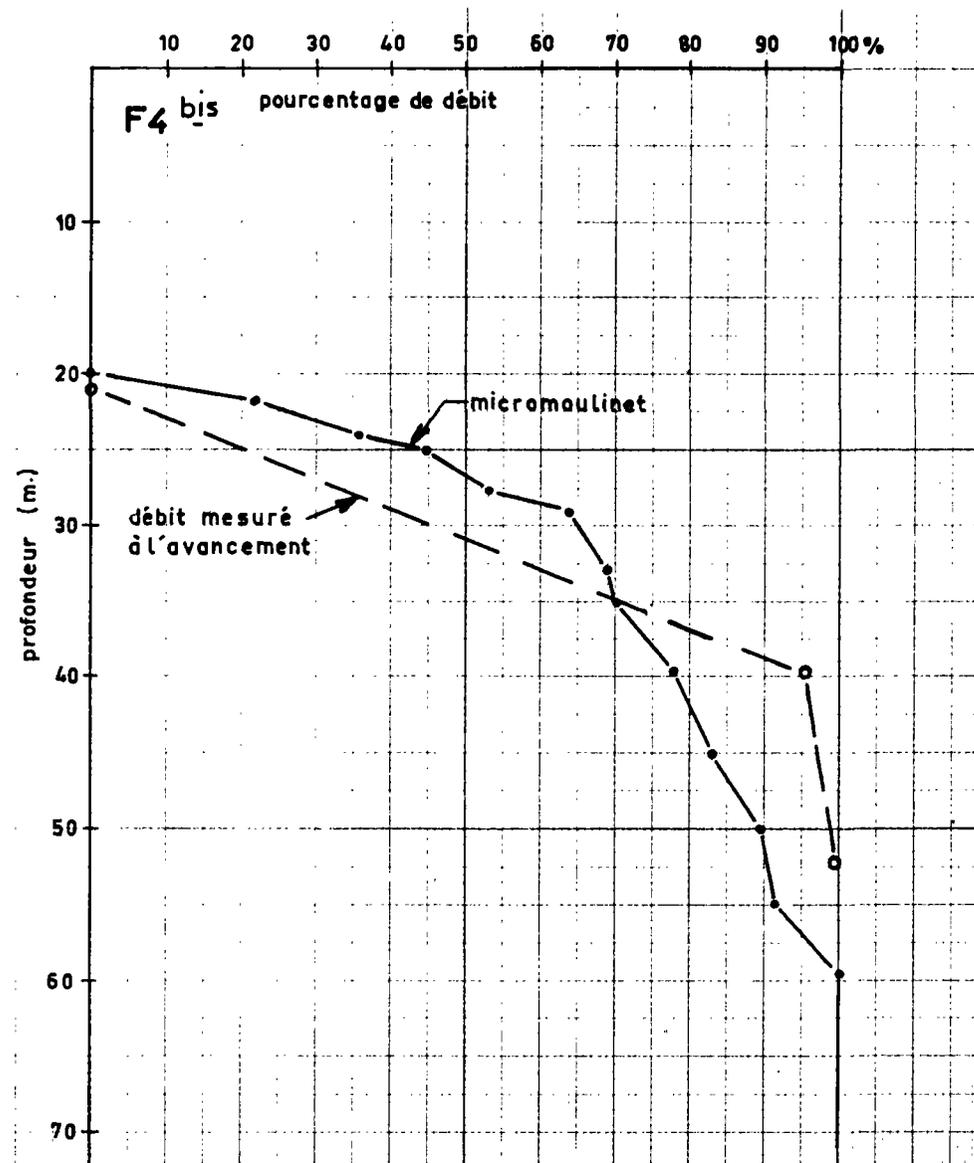
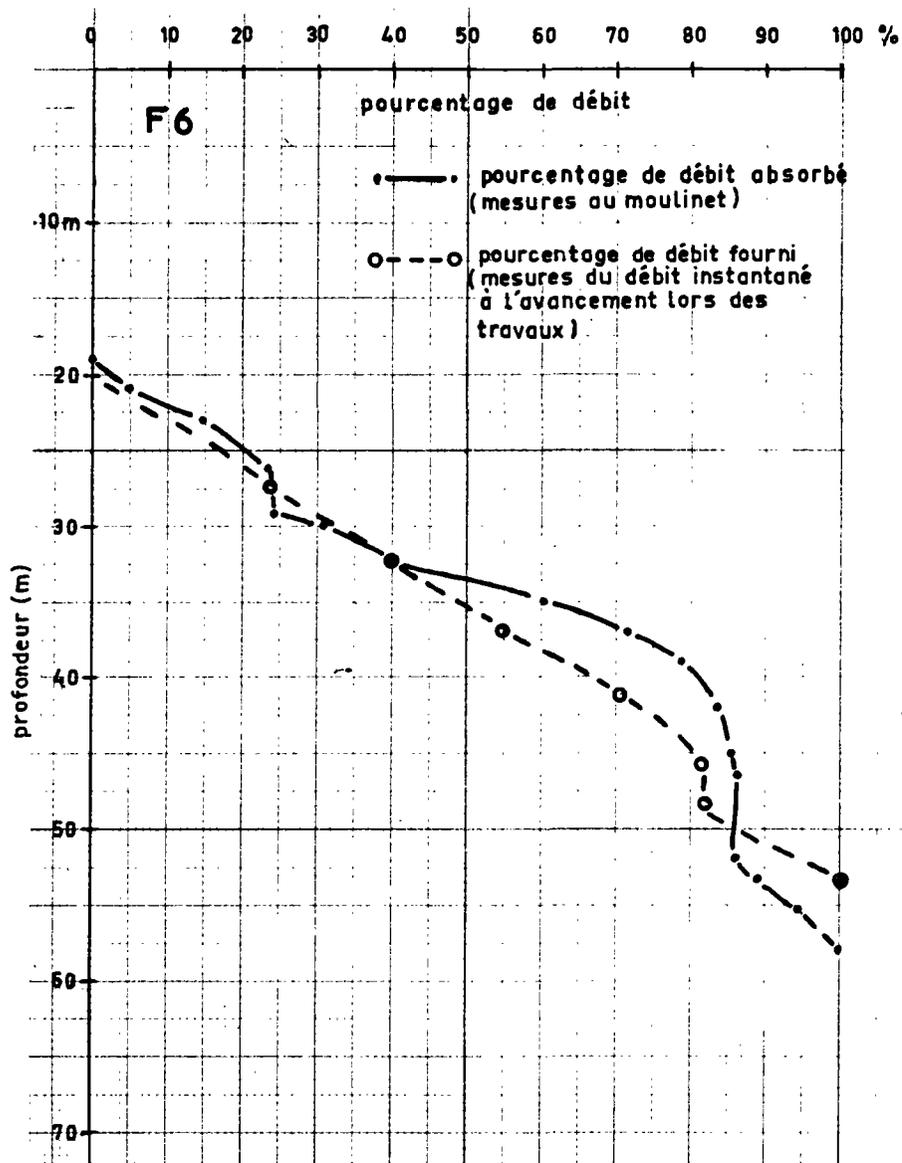
2321 - Généralités

L'utilisation d'un micromoulinet de forage permet de mesurer le débit du liquide ascendant ou descendant dans un forage, par la mesure de la vitesse du courant au centre du forage.

L'outil est un moulinet hydrométrique à hélice, maintenu verticalement dans l'axe de l'ouvrage par un système centreur et de guidage approprié et suspendu à un câble contenant les conducteurs, lui-même manoeuvré par un treuil.

La vitesse de rotation de l'hélice est enregistrée en surface par un compteur totalisateur d'impulsion et permet de restituer, par l'étalonnage connu de l'hélice, la vitesse réelle de circulation de l'eau au niveau où est faite la mesure. Cette vitesse, rapportée à la section détermine le débit. Le pas de mesures est réglable à volonté.

PAIMPONT



Le seuil de détection des hélices couramment utilisées est légèrement inférieur à 1 cm/s et la précision des mesures est de l'ordre du cm/s également.

En principe, on procède d'abord à une série de mesures "statique" (forage au repos) pour vérifier qu'il n'y a pas de circulations naturelles (échanges entre nappes) et, dans le cas contraire, les mesurer. Ensuite, on procède à une série de mesures "dynamique", l'eau étant mise en mouvement par pompages ou par injection.

La différence entre les deux enregistrements (courbe résultante) donne la variation de débit pour un rabattement (ou une charge) donné : la pente de la représentation graphique de cette dernière fonction est proportionnelle à la perméabilité des terrains étudiés ; ceci de façon approximative, dans la mesure où le rabattement (ou la charge) ne sont pas stabilisés (régime transitoire).

2322 - Essais réalisés

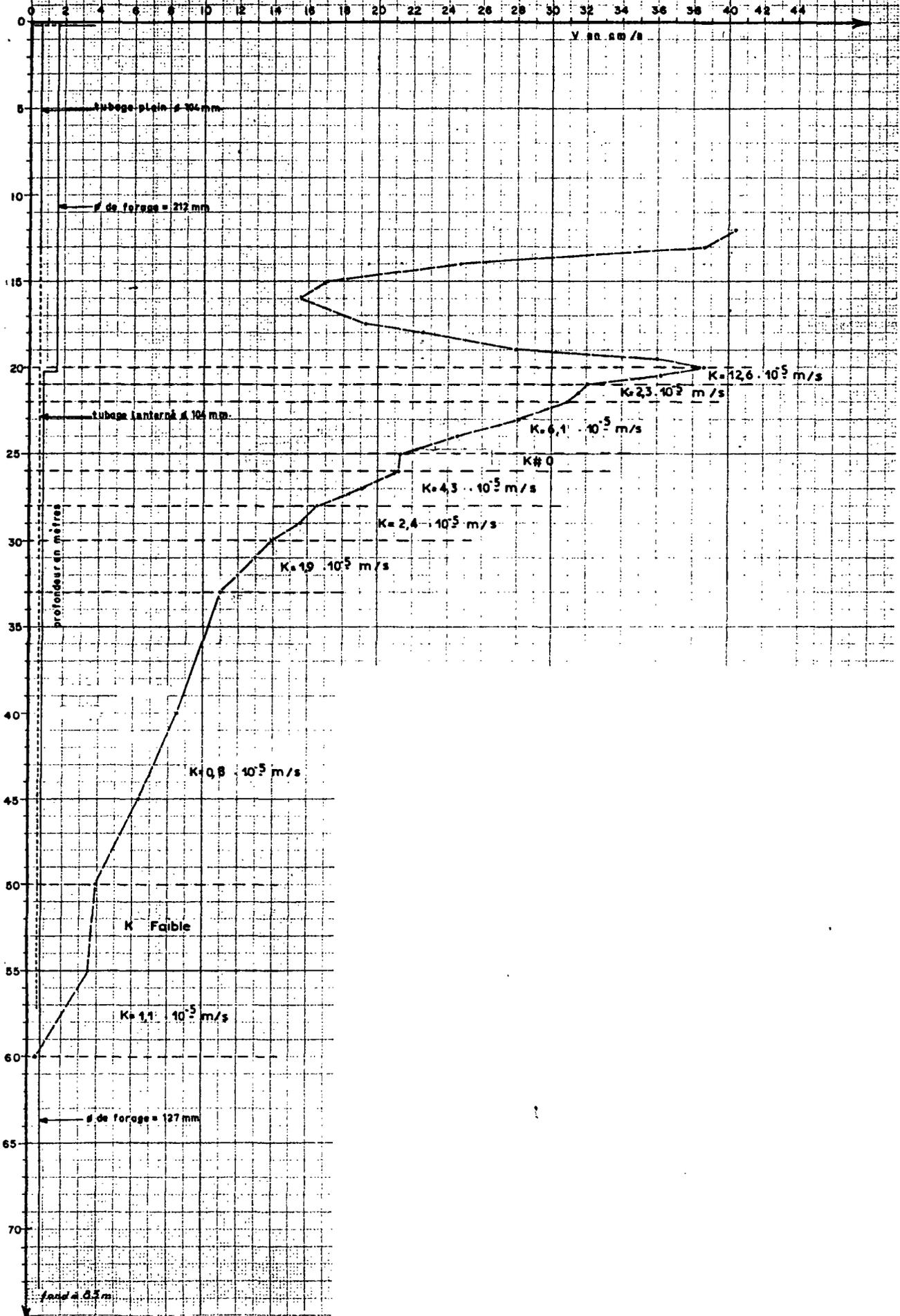
Deux séries de mesures ont été effectuées sur le site de Paimpont, dans les forages F4 et F6. Aux deux forages, les mesures statiques n'ont pas décelé de circulations dans la nappe au repos. Les circulations ont été provoquées par injection continue ($Q = 10,8 \text{ m}^3/\text{h}$ à F4 et $9 \text{ m}^3/\text{h}$ à F6), la pompe d'alimentation étant installée dans le forage F5 bis.

Les ouvrages étant tubés, on a considéré pour le calcul des débits, la section du tube ($\varnothing \approx 100 \text{ mm}$) mais il est visible, surtout à F6 que localement (crépinage plus ouvert et diamètre local du forage important), la circulation de l'eau s'effectue également entre le tubage et le paroi du forage. Les corrections tenant compte des variations de sections ne pouvant être faites (impossibilité de mesurer le diamètre réel du fait de la présence du tubage), on a été amené, pour F4, de considérer une courbe lissée (cf. graphique Fig. 33 et 34).

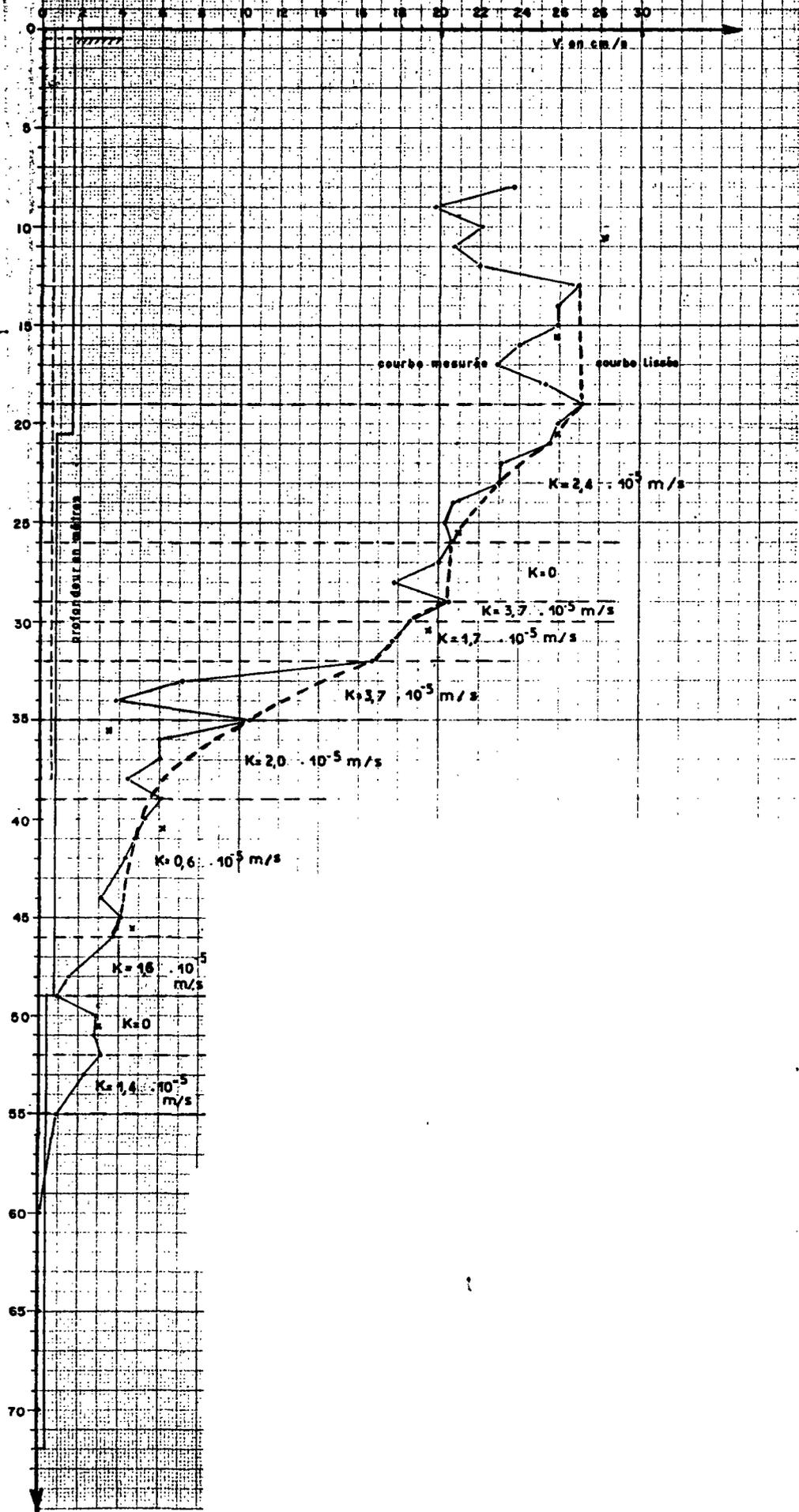
Les estimations de perméabilité ont été faites en tenant compte d'une charge moyenne de 4 m pour F4 et de 5 m pour F6.

Aux deux forages, les niveaux les plus perméables sont situés en tête de la tranche aquifère, sous les horizons de tête très altérés. A F4, on voit que les valeurs supérieures à $2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ne descendent pas au-delà de 30 m ; la tranche - 20 à - 30 m peut certainement être assimilée à la "strate conductrice privilégiée" de BERKALOFF. Sur la totalité de la hauteur des terrains conducteurs, l'éventail des valeurs de perméabilité va de $0,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ à $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. Au forage F6, l'hétérogénéité est moins marquée, si on excepte deux niveaux à perméabilité nulle ou très peu différente de zéro, K est compris entre 0,6 et $3,7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

Mesures du micro-moulinet sur le forage F.4 Q d'INJECTION = 108 m³/h z = 4 m



Mesures de micropolluant sur le forage F. 6 - D. d'INJECTION = 9 m²/h - 22,5 m



CONCLUSIONS

L'observation et la mesure des débits exhaurés par l'action de l'air comprimé en cours (débits à l'avancement) et en fin de foration fournit des informations sur les valeurs relatives des perméabilités ponctuelles (comparaison des débits instantanés obtenus aux divers forages d'une même zone) et sur la position des niveaux les plus conducteurs. Ces résultats sont cohérents avec ceux issus de méthodes plus précises (pompages d'essai, micromoulinet de forage) mais, cependant, ils nécessitent que la foration s'effectue dans de bonnes conditions de dégagement des cuttings, ce qui n'est pas le cas lorsque des couches argileuses sont rencontrées ; le micromoulinet de forage permettra alors, de façon relativement simple et rapide d'identifier les horizons perméables et de mieux prévoir l'équipement et les conditions d'exploitation des ouvrages.

233 - Diagraphies (échelle ponctuelle)

233.1 - Généralités

L'emploi des diagraphies différées, et à moindre niveau des diagraphies instantanées, en milieu sédimentaire fissuré est d'une pratique courante. Ces outils n'ont, par contre, pas connu le même développement en milieu cristallin. Le retard est dû à un ensemble de raisons dont les principales sont d'ordre technologique et physique. Par exemple les instruments du commerce permettent des mesures de résistivités en général inférieures à 1000 Ω m, mais les résistivités des roches cristallines peuvent atteindre 100 000 Ω m. Les roches cristallines ont des structures qui leur sont propres et les eaux sont en général très douces. Les diagraphies usuelles et leur interprétation doivent donc être adaptées.

Les spécialistes internationaux (cf. proceedings Gain Symposium Lawrence Berkeley Laboratory, juillet 1978) s'accordent sur le fait que les diagraphies doivent pouvoir très largement contribuer à la connaissance du milieu fissuré. Les premières expériences détaillées et importantes en milieu cristallin visant à la reconnaissance du milieu fissuré ont eu lieu en 1978 à Stripa (Suède) dans le cadre d'un projet scientifique américano-suédois. D'autres expériences sont actuellement en cours en Angleterre (Highlands).

En milieu de roche dure fissurée on peut écrire :

$$\begin{array}{ccccccc} \emptyset T & = & \emptyset F & + & \emptyset m \\ \text{Porosité totale} & & \text{Porosité de fracture} & & \text{Porosité de matrice} \end{array}$$

Pour l'hydrogéologue la porosité de fracture est la plus intéressante. La porosité de matrice offre moins d'intérêt, sa valeur étant souvent très faible. Un des objectifs des diagraphies est donc de permettre la distinction entre les zones fissurées poreuses pouvant être le siège de circulation d'eau souterraine et les zones compactes.

Dans le cadre du présent programme des diagraphies différées et instantanées ont été réalisées sur un certain nombre de forages dans chacun des sites (grès, schiste et granite). Une seule diagraphie instantanée a été enregistrée. Le programme réalisé est présenté dans le tableau A et les caractéristiques du matériel utilisé sont rassemblées dans le tableau B.

Tableau A - Diagraphies instantanées et différées réalisées

Site n°	Nom du site	Géologie	Forage	Diagraphies électriques grande normale et petite normale	Diagraphies nucléaires			Vitesse acoustique	Darcilog (1)	diamètre	Diagraphies instantanées Vitesse d'avancement
					gamma Ray	Neutron	gamma densimétrie				
1	Landerneau	Schiste	Forage essai		x	x		x	x	x	
			P ₂		x	x		x	x	x	
2	Caurel	Grès et schiste	P ₁		x	x		x	x	x	
			P ₂		x	x		x	x	x	
3a	Paimpont	Grès armoricains	F ₄		x	x		x	x	x	
			F ₆		x	x		x	x	x	
3b	Loysance	Granite	F ₂	x	x	x	x	x	x	x	
			F ₇	x	x	x	x	x	x	x	x

(1) Essai d'interprétation quantitative des ondes sonores.

Tableau B - Principales caractéristiques du matériel utilisé

Type de diagraphie	∅ ext. de la sonde mm	Emetteur	Détecteur	Distance Emetteur Détecteur	Vitesse d'enregistrement
** Résistivité 16" et 64" et PS					
* Gamma Ray	33	-	Na I	-	5 m/min.
* gamma densimétrie	34	CS 137 12 millicurie	Na I	33 cm	6 m/min.
* Neutron	34	Am Be 6 curie	He -3	55 cm	6 m/min.
* Vitesse acoustique	51	Magneto friction	Céramique	91 cm	6 m/min.
* Diamètreur	33	-	-	-	6 m/min.

* Matériel CEA - DAM

** Matériel BRGM

233.2 - Diagraphies différées. Résultats

. Sites 1, 2, 3a, Schiste et grès

Il convient de rappeler que les forages des sites 1, 2 et 3a ont été réalisés au marteau fond de trou. La tenue des parois n'a pas toujours été excellente ce qui a engendré de fortes variations de diamètre. La réponse de la plupart des diagraphies et plus particulièrement des diagraphies neutron, gamma gamma, gamma ray acoustique est étroitement liée au diamètre. Si ce dernier varie notablement l'interprétation quantitative ou qualitative devient délicate voir même impossible (planches 2 à 7). C'est pourquoi nous avons du nous contenter de présenter les résultats sous forme d'un tableau (voir tableau C) récapitulant les valeurs moyennes des mesures enregistrées pour les divers terrains reconnus.

. Site 3b Granite

Avant de présenter l'interprétation des mesures réalisées sur F2 et F7 il est intéressant de rappeler les résultats obtenus sur un forage témoin situé dans le même massif granitique mais en dehors de la présente zone d'étude. Sur ce forage de 100 m de profondeur et carotté en continu les enregistrements différés ont pu être comparés d'une part à un log de fracturation dressé à la suite de l'analyse des carottes, et d'autre part à un profil continu de perméabilité établi par injection entre deux packers distants de un mètre.

. Résultats qualitatifs obtenus sur le forage témoin

Un assemblage des enregistrements (voir planche n°1) fait bien apparaître les diverses corrélations possibles.

- log de fracturation

Les relevés relatifs à la fracturation ont été faits sur des carottes. On note deux zones plus fracturées (60 à 65 m et 84 à 85 m) à fracturation décimétrique et pluridécimétrique encadrant une zone compacte (65 à 84 m). La zone la plus intensément fissurée se situe entre 89 et 91 m. Peu de fissures sont ouvertes.

- profil de perméabilité

Ce profil a été établi à partir de mesures continues au pas de 1 m. Des injections positives ($K > 4.10^{-7}$ m/s) ont été notées à deux niveaux seulement 62-64 m et 88-91 m. Là les perméabilités sont égales à 10^{-5} m/s environ.

Tableau C - Diagraphies Site 1, 2, 3a Schiste et grès

Caractéristiques moyennes des formations

Site n°	Nom du site	Géologie	Forage	Neutrons c.p.s.	Gamma Ray c.p.s.	Vitesse acoustique $\mu\text{s}/\text{ft}$
1	Landerneau	Schiste	Fore essai	700 à 750	150	115 à +140
			P ₂	100 à 250	125	115 à +140
2	Caurel	Grès et schiste	P ₁	800	65	75
			P ₂	1500	75	75-80
3a	Paimpont	Grès armoricains	F ₄	750 à 1000	50	110 à +140
			F ₆	1000 à 1500	-	100 à +140

- diagraphies proprement dites

- résistivités 16" et 64". Polarisation spontanée (PS)

La gamme de résistivités mesurées est large. Les faibles valeurs mesurées sur la grande normale sont de l'ordre de 2000 Ω m et correspondent bien aux zones les plus fissurées. Quant aux fortes valeurs 30 000 Ω m et plus, elles sont associées au granite compact.

La résistivité de l'eau dans le forage et la formation (le forage a été réalisé avec l'eau contenue dans le même granite) est de 60 Ω m.

La PS n'apporte pas de renseignements très significatifs. En conclusion les diagraphies de résistivité discriminent bien les intervalles fracturés et intervalles exempts de toute fracturation.

- gamma Ray

L'enregistrement est très monotone et stable autour de 100 cps.

- neutrons

Un bon contraste existe entre les zones non fissurées (3000 cps) et les zones plus fissurées ($<$ à 2500 cps). Il existe une bonne corrélation entre les zones à bonne perméabilité repérées par essai Lugeon et les zones à faible absorption neutron.

- gamma densité

Le gamma gamma est également assez significatif. Les zones fracturées, donc à faible densité ($>$ à 1000 cps) se distinguent bien des zones non fracturées à forte densité (950 cps environ).

- vitesse acoustique

Cet outil discrétise bien les intervalles fissurés et non fissurés. Les zones compactes aux vitesses plus rapides (58 μ s/pied = 5250 m/s) contrastent avec les zones fissurées aux vitesses plus faibles (62 à 65 μ s/pied = 5000 à 4900 m/s).

Dans le forage témoin, la comparaison des diagraphies, de l'analyse de carottes et des résultats des injections entre packers est significative. Tous les intervalles à fracturation ouverte sont localisés par les diagraphies.

- résultats qualitatifs acquis sur les forages du bassin expérimental

Une interprétation des enregistrements réalisés sur les forages F₂ et F₇ est proposée en se référant aux résultats acquis sur le forage témoin. (Planches 8 et 9).

Ces deux ouvrages forés au marteau fond de trou ont recoupé d'abord une frange d'altération puis un granite à biotite plus ou moins fissuré sur toute leur hauteur. Les débits à l'émulsion en fin de forage sont respectivement de 10 m³/h pour F₂ et 18 m³/h pour F₇. La fissuration ouverte est donc a priori plus importante en F₇ qu'en F₂. Les résultats qualitatifs issus de l'interprétation faite pour F₂ et F₇ sont présentés dans le tableau D.

L'interprétation soulève les remarques suivantes :

- la limite altération-granite dur fissuré ou non est bien marquée sur toutes les diagraphies,

- les niveaux de fractures ouvertes repérés en cours de forage le sont également assez bien par diagraphies. Toutefois certains niveaux pourraient être retenus à partir de la seule observation des diagraphies, bien qu'ils n'aient pu être observés en cours de foration. Mais ces zones posant certains problèmes ne se singularisent en général que sur un seul enregistrement. On ne retiendra donc que les niveaux bien marqués sur plusieurs diagraphies (niveaux signalés entre parenthèses). Dans ces conditions on remarque qu'il existe une bonne correspondance entre les observations de terrain et les niveaux retenus suite à l'analyse des diagraphies.

- interprétation quantitative

A l'heure actuelle seules porosités et saturation peuvent être mesurées en continu grâce aux diagraphies. Nous nous intéressons ici à la porosité.

Des calibrations étaient disponibles pour les diagraphies neutronset gamma densité du forage témoin. Elles ont été ajustées pour tenir compte du changement de diamètre (115 mm au lieu de 96 mm). On a donc pu quantifier la porosité.

Il a paru également intéressant de présenter une méthode de traitement des ondes sonores qui pourrait conduire à l'évaluation de la perméabilité. Il faut insister sur le fait, que cette méthode a encore un caractère très expérimental.

Tableau D - Interprétation des diagraphies réalisées sur les forages P₂ et P₇

(localisation des zones fissurées)

		16" et 64"	Gamma Ray	Gamma densité	Neutrons	vitesse acoustique	Observations faites en cours de foration
Forage F ₇	Altération		très monotone (100 cps)	13 m	13 m	13 m	e = 13 m tubage PVC 0 - 10 m
	Zone fissurée			(22 m)	(22 m)	(22 m)	venue d'eau
				(29 m)	(33 m)		venue d'eau
				(31 m)	38 m		
				(47 m)	42 m		
		(45 m)	enregistrement perturbé	venue d'eau			
						Remarque : Zone très compacte au-delà de 45 m de profondeur.	
Forage F ₂	Altération	13,5 m	très monotone (100 cps)	13,0 m	13,0 m	13,0 m	e = 13 m tubage PVC 0 - 10 m
	Zone fissurée	(38-42 m)		22 m	(40,5 m)	(39 m)	venue d'eau
					49 à 56 m	53,5 m	
			63 à 65 m		59,5 m		

. évaluation de la porosité :

- résistivité

La porosité ϕ peut être évaluée en considérant le facteur de formation F, et la formule d'Archie. On a :

$$F \text{ (facteur de formation)} = \frac{R_f}{R_w} \quad (1)$$

avec R_f = résistivité de la formation en $\Omega \cdot m$

R_w = résistivité de l'eau en $\Omega \cdot m$

et $F = \frac{1}{\phi^m}$ formule d'Archie (2)

m est un facteur qui varie avec la cimentation. En milieu sédimentaire, à porosité intergranulaire sa valeur est comprise entre 1,8 et 2,2 pour des eaux de salinité supérieure à 8000 ppm.

En combinant les formules (1) et (2) on a :

$$\phi^m = \frac{R_w}{R_f}$$

Dans les roches cristallines la porosité est principalement concentrée dans les fractures ouvertes imprégnées d'eau douce. Il faut donc choisir un exposant m qui tienne compte de ces conditions. Un recensement des expériences publiées * indique que dans ce cas on est compris entre 0,85 et 1,2. Lorsque la roche n'est pas fissurée la porosité est plus proche du type intergranulaire. En tenant compte de la faible résistivité de l'eau, la valeur du coefficient m se situe alors autour de 1,6.

R_w est égal à $60 \Omega \cdot m$ dans tous les forages, et les valeurs de R_f sont prises sur la grande normale 64". Les résultats sont les suivants :

	Forage témoin	Forage F2	Forage F7
intervalle non fracturé $m = 1,6$	$R_f = 45\ 000 \Omega \cdot m$ $\phi_N = 1,5 \%$	$R_f = 30\ 000 \Omega \cdot m$ $\phi_N = 2 \%$	$R_f = 2000 \text{ à } 3300 \Omega \cdot m$ $m = 1,2$ $\phi_N = 3,5 \text{ à } 5 \%$
intervalle fracturé $m = 1,2$	$R_f = 3\ 000 \Omega \cdot m$ $\phi_N = 4,0 \%$	$R_f = 4\ 500 \Omega \cdot m$ $\phi_N = 3 \%$	

Les valeurs de porosité sont assez groupées pour le forage témoin et le forage F2. Au forage F7, la résistivité moyenne sur toute la hauteur du forage est beaucoup plus basse. Le granite serait donc dans ce cas plus fissuré comme le suggère le débit obtenu en fin de foration.

* WEED (H.C.) et al 1976 Time dependant electrical properties of rock solution systems - Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas.

- gamma densité

La porosité est donnée dans la formule :

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_a}{\rho_{ma} - \rho_e} \quad (3)$$

avec : ρ_{ma} = densité de la formation

ρ_a = densité apparente. Elle est lue sur l'enregistrement

ρ_e = densité du fluide $\rho_e \sim 1$

La médiane des valeurs de densité mesurées sur des carottes du forage témoin se situe autour de 2,70.

L'application de la formule (3) donne les résultats suivants :

	Forage témoin	Forage F2	Forage F7
Intervalle non fracturé	2,67 à 2,70 0 - 2 %	2,67 à 2,70 0 - 2 %	2,67 à 2,70 0 - 2 %
Intervalle fracturé	2,63 à 2,67 2 à 5 %	2,63 à 2,65 4 à 5 %	2,62 à 2,65 4 à 5 %

- neutrons

La correspondance teneur en eau en %, contre cps (coups par seconde), a été établie après calibration sur des blocs étalons de porosités connues et après vérification sur des échantillons de granite prélevés sur le forage témoin.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	Forage témoin	Forage F2	Forage F7
Intervalle non fracturé	1,0 à 1,5 %	1,0 à 1,5 %	1,0 à 2 %
Intervalle fracturé	2,0 à 6 %	4,0 à 5,0 %	4 à 6 %

- vitesse acoustique

La relation de WYLLIE (4) permet de calculer la porosité :

$$\frac{I}{V} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{1 - \phi}{V_{ma}} \quad (4)$$

avec ϕ porosité

V vitesse relevée dans la roche in situ

V_f vitesse du fluide interstitiel soit 1500 m/s environ pour une eau peu minéralisée

V_{ma} vitesse dans la matrice à porosité nulle

La vitesse de la matrice granitique est d'environ 5250 m/s. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de porosité calculées à partir de la formule de WYLLIE :

	Forage témoin	Forage F2	Forage F7
Intervalle non fracturé	V = 5000 à 5250 m/s $\phi = 0$ à 2 %	V = 5000 à 5250 m/s $\phi = 0$ à 2 %	V = 5000 à 5250 m/s $\phi = 0$ à 2 %
Intervalle fracturé	V = 4500 à 5100 m/s $\phi = 2$ à 6 %	V = 4500 à 4950 m/s $\phi = 2,5$ à 6,0 %	V = 4350 à 4700 m/s $\phi = 4,5$ à 8,0 %

. tentative d'évaluation de la perméabilité à partir de l'analyse des ondes sonores

Depuis 1960 les spécialistes ont utilisé l'acoustique pour tenter bien sûr de détecter la fissuration et surtout évaluer la perméabilité. L'analyse des résultats acquis jusqu'à ce jour (cf. F. LEBRETON 1978) conduit à la conclusion qu'après passage dans la roche ou tout autre milieu poreux, forme et amplitude d'un signal acoustique sont généralement affectées. Le signal représente donc une certaine "signature" caractéristique des propriétés physiques du milieu poreux. Sur cette base il a paru intéressant de considérer une grandeur, caractéristique de la forme du signal reçu mesurant l'influence d'un milieu dissipatif sur une impulsion émise de forme constante.

La forme usuelle d'un signal à sa réception et photographié sur oscilloscope est la suivante (fig. 35) :

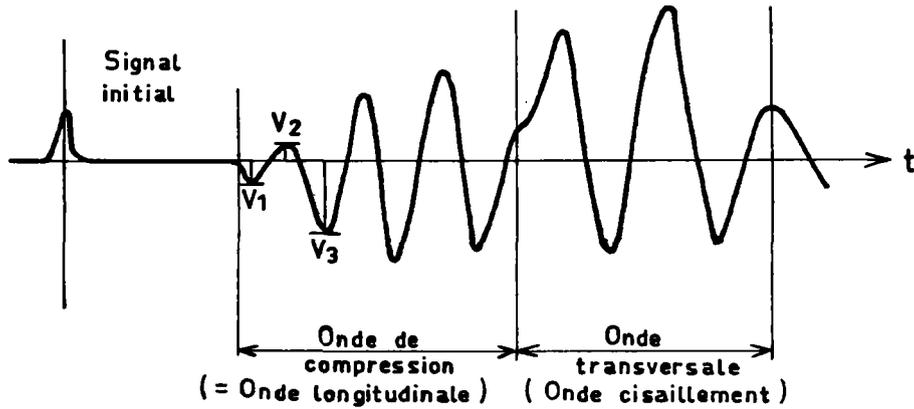


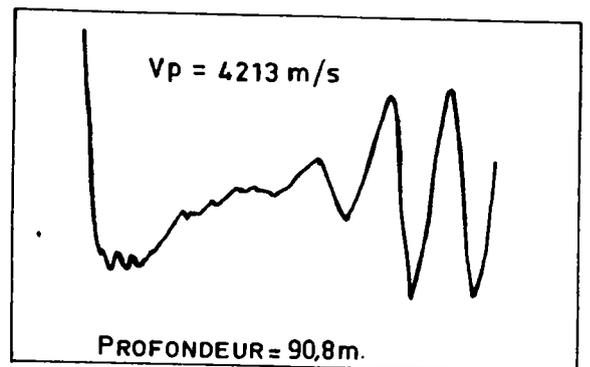
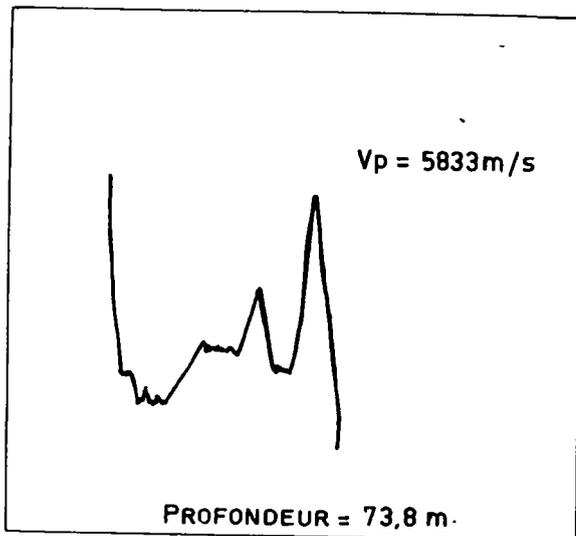
FIGURE 35 - Forme d'un signal sonore photographié sur oscilloscope .

La grandeur caractéristique (I_c) de la forme du signal reçu choisie dans l'onde compressionnelle est donnée par la relation :

$$I_c = \frac{V_2 + V_3}{V_1}$$

en appelant V_1 , V_2 et V_3 les amplitudes des trois premières anches de cette onde compressionnelle.

A titre d'exemple nous donnons ci-dessous copie de deux clichés pris sur le forage témoin.(Fig. 36).



Quelle est la signification de I_c ? Il a été montré expérimentalement que dans un milieu poreux saturé la dissipation augmente avec la perméabilité. I_c et la perméabilité semblent varier dans le même sens. Dans les seuls sondages où la perméabilité K est connue à partir de mesures sur carottes, l'examen des résultats montre que sa relation avec l'indice I_c semble être de la forme :

$$I_c = \alpha \log \frac{K_v}{\mu} + \beta$$

avec K_v = perméabilité mesurée suivant l'axe de la carotte
 μ = viscosité du fluide mouillant la roche
 α et β = constantes pour un appareillage et un forage donné

D'après l'expérience l'indice I_c varie de 0 à 40. Dans le cadre de la présente étude, les mesures ont été réalisées tous les 50 cm. La valeur calculée de I_c en chaque point et reportée sur un diagramme à échelle arithmétique en fonction de la profondeur permet de dresser un "Darcilog".

Un darcilog a été établi pour chaque forage et en particulier sur les forages F2 et F7. Si l'on compare les résultats obtenus à partir de l'interprétation des autres diagraphies et ceux donnés par le darcilog on remarque que ce dernier a tendance à montrer plus de fissuration qu'il en existe en réalité.

Du point de vue quantitatif les valeurs de I_c peuvent être rangées suivant deux groupes de valeur :

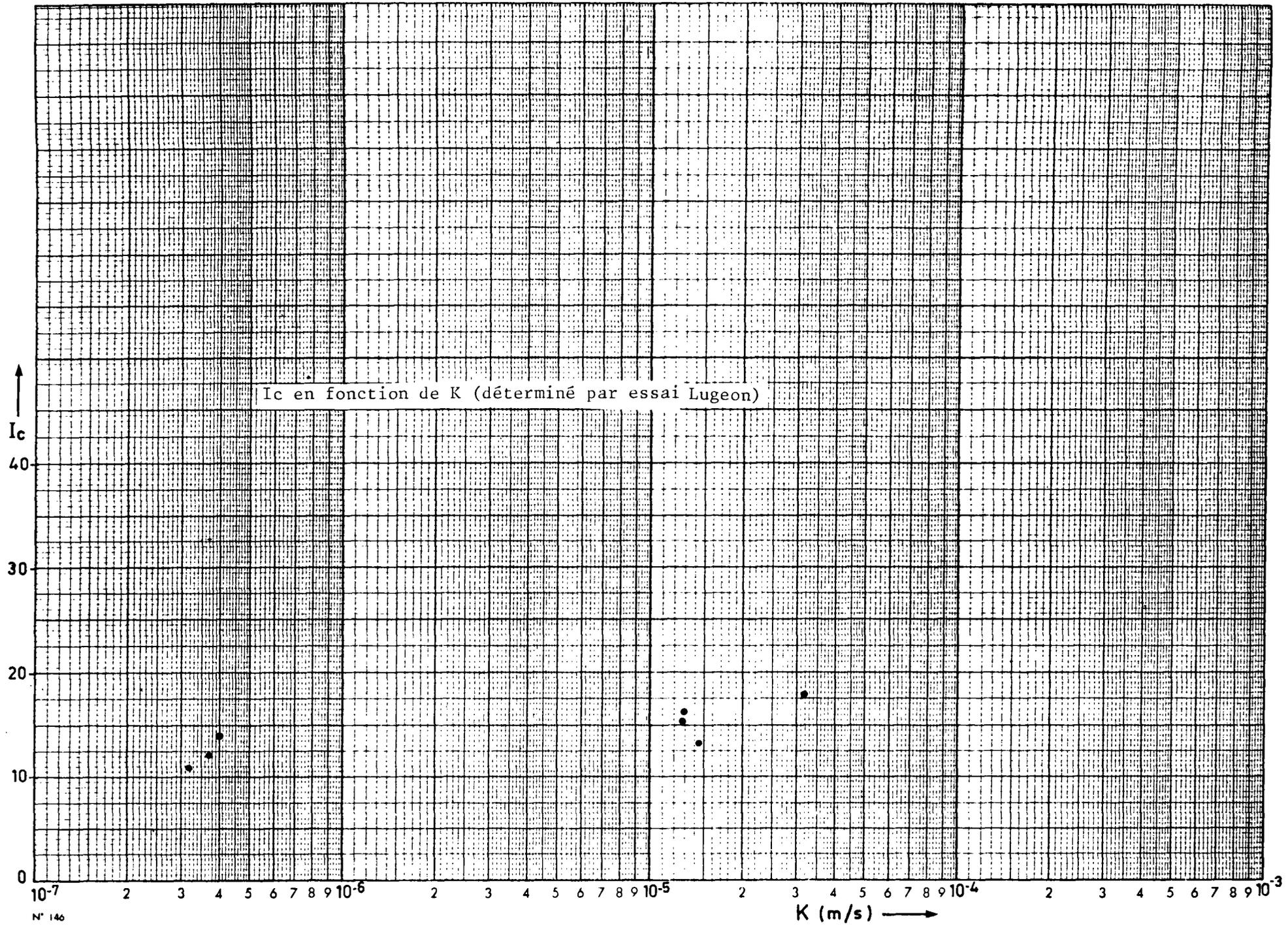
- les premières généralement inférieures à 10 correspondent aux intervalles non fissurés
- les secondes supérieures à 10 soulignent les intervalles fissurés.

L'étalonnage de l'indice I_c est seulement possible sur le forage témoin où des mesures significatives de perméabilité ont pu être obtenues à partir des essais Lugeon. Elles sont toutes relatives à des intervalles où I_c est supérieur à 10. On a reporté en coordonnées semi-logarithmiques les valeurs de I_c en fonction de K (fig. n°37). Le nombre de joints disponibles est trop faible pour que l'on puisse affirmer que l'expression reliant I_c et K est encore de la forme $I_c = a \log K + b$. Des mesures, plus nombreuses, sont nécessaires pour pouvoir juger objectivement de l'intérêt de la méthode.

333.3 - Diagraphies instantanées

1 - Définition

On appelle diagraphies instantanées l'enregistrement en fonction de l'avancement du forage, d'un paramètre lié à la machine en fonctionnement et à la formation traversée.



N° 146

2 - Choix d'une diagraphie instantanée

Une de ces diagraphies : la vitesse d'avancement paraît intéressante pour l'étude de la fracturation. En effet la vitesse d'avancement est non seulement liée à la dureté de la roche, elle est aussi fonction de l'existence de discontinuités (fissures, etc...) dans le terrain dont la rencontre devrait créer un gradient de vitesse significatif.

3 - Mesures et résultats

Un appareil de mesure de vitesse d'avancement - le Diagra For a été installé sur une machine marteau fond de trou pour enregistrer les vitesses d'avancement en cours de foration du forage F7. Dans la mesure du possible, la pression de fonctionnement de la machine marteau fond de trou a été maintenue constante. Ceci est important. En effet, la vitesse d'avancement est très dépendante de la pression. A titre d'indication la vitesse d'avancement double quand la pression passe de 6 à 10 bars. L'interprétation de l'enregistrement conduit aux résultats et aux remarques suivantes :

- variation lithologique

A partir de la coupe lithologique établie sur le terrain on distingue trois unités fondamentales :

- altération de 0 à 13,0 m
- granite plus ou moins oxydé de 13,0 à 47,6 m
- granite sain dur de 47,6 m jusqu'au fond.

Ces niveaux s'individualisent bien grâce aux vitesses d'avancement (voir fig. n° 38 à 40).

- altération 35 à 80 m/h
- granite oxydé 10 à 15 m/h
- granite sain dur 8 m/h

- localisation de la fracturation

Pour mieux juger quelle peut être la contribution de ce type de diagraphie il a paru utile de procéder à l'interprétation en deux temps. Tout d'abord il convient de vérifier que l'on retrouve les fissures bien identifiées en forage (venues d'eau) et confirmées par les diagraphies différées. Ensuite il faut estimer si les vitesses d'avancement seules peuvent apporter l'information souhaitée sur la fracturation.

. toutes les failles reconnues s'individualisent bien sur les enregistrements de vitesse d'avancement. L'interprétation ne pose pas de problèmes majeurs les "pics" marquant les augmentations de vitesse se situent à des niveaux de profondeur où le régime de foration est bien régulier (mi-tige). Comment interpréter l'importance des décrochements verticaux qui sont d'environ 10 cm ? En général les fissures ont des ouvertures de l'ordre du millimètre. La largeur du décrochement est très probablement due à la présence de zones décomprimées situées de part et d'autre de la fissure.

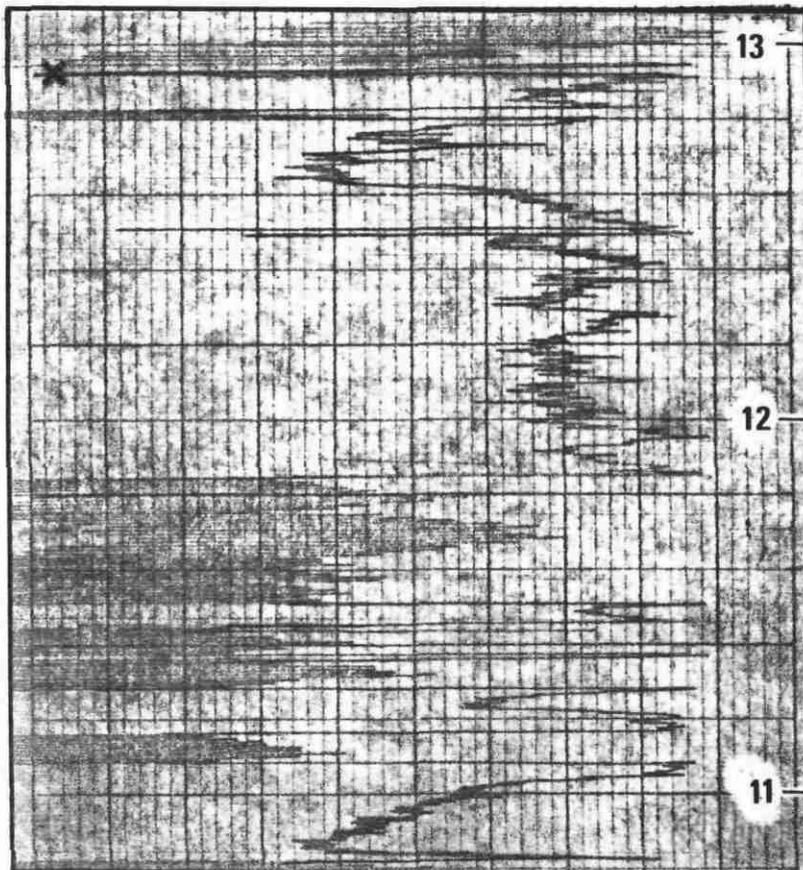
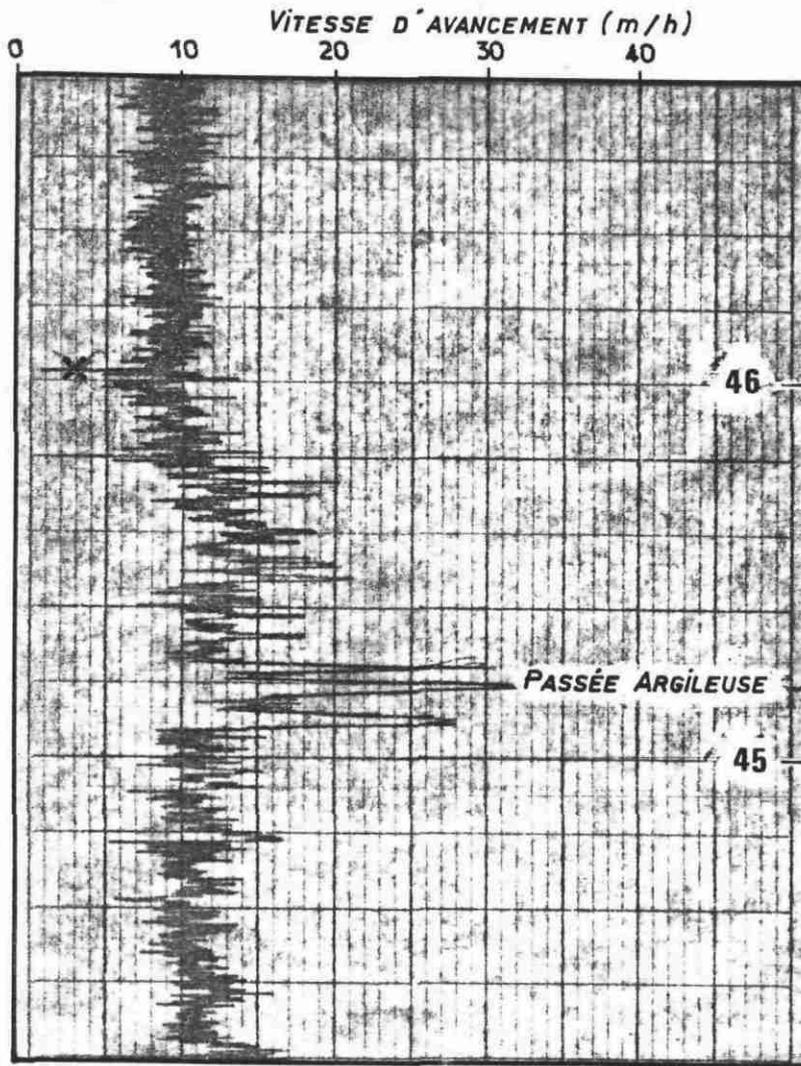
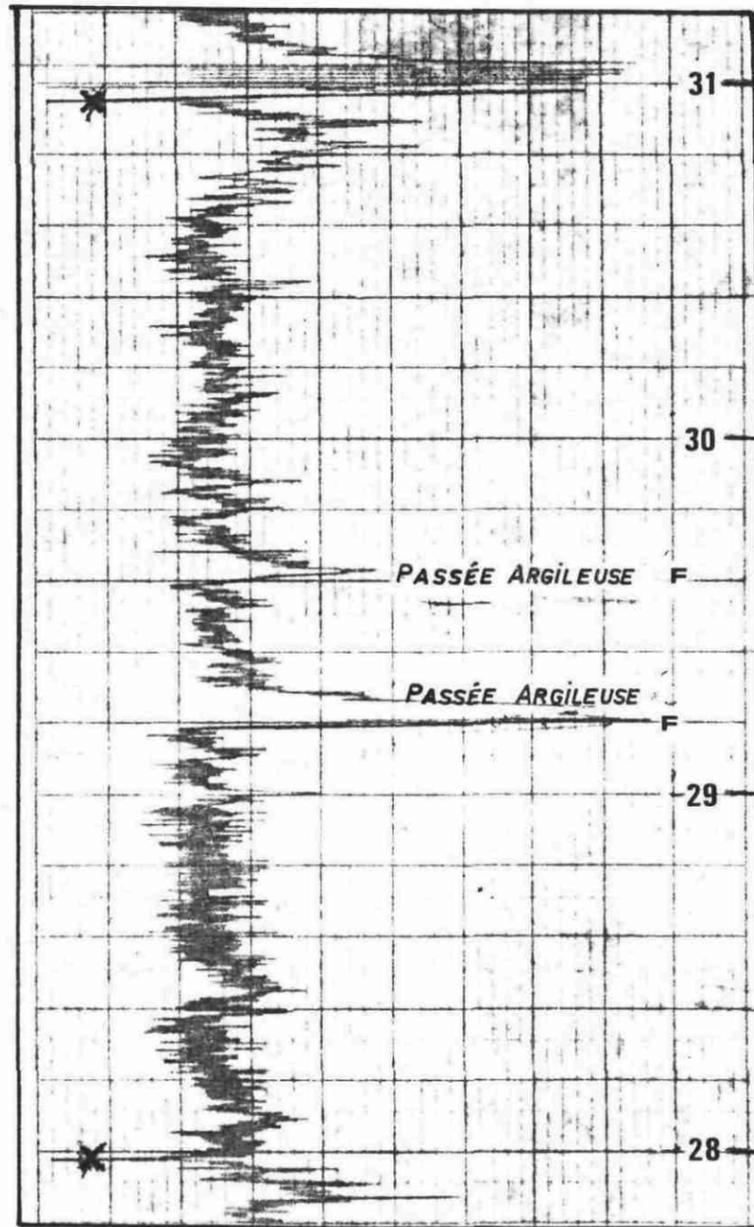
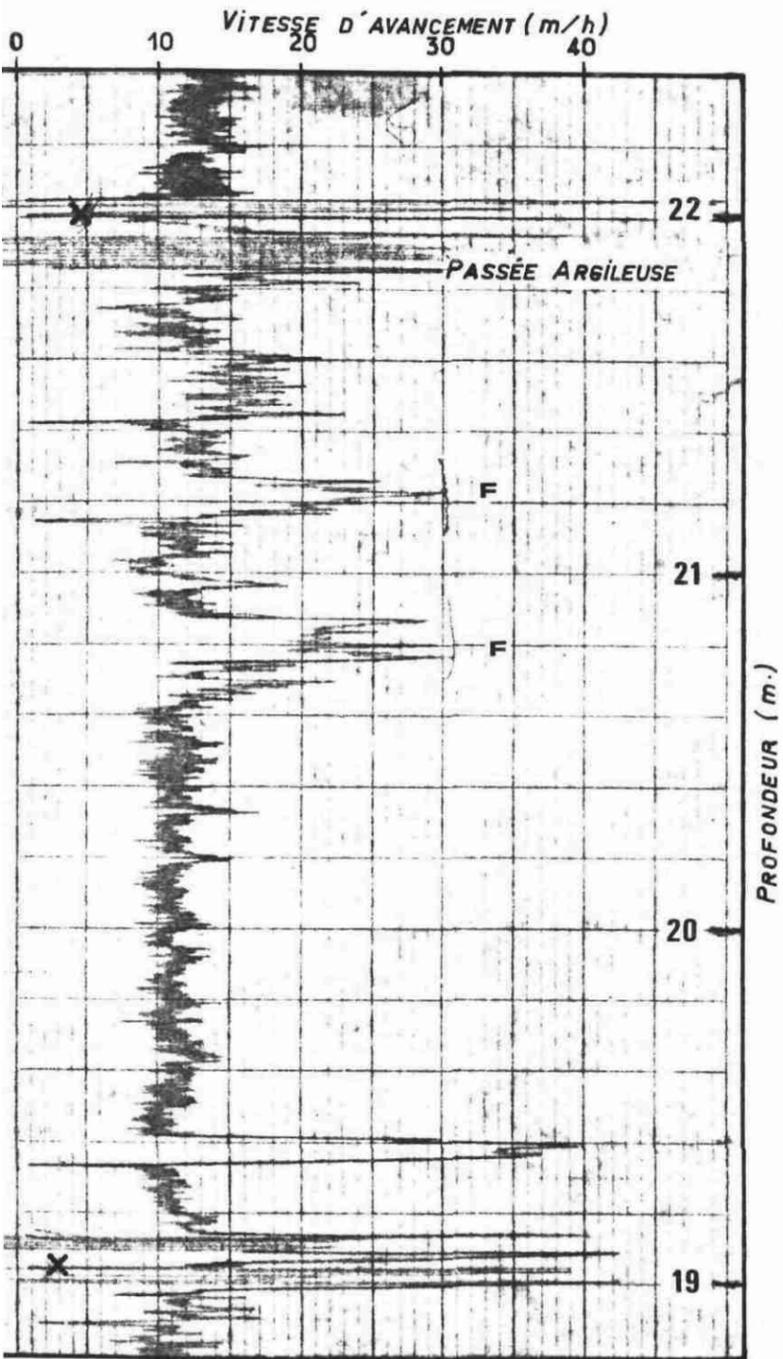
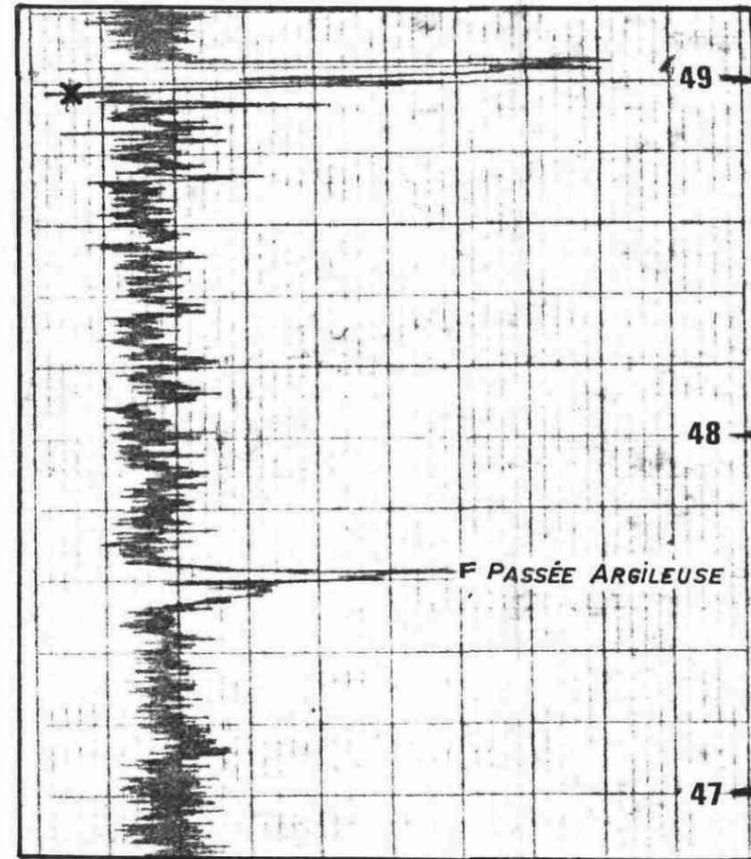


Fig. 39

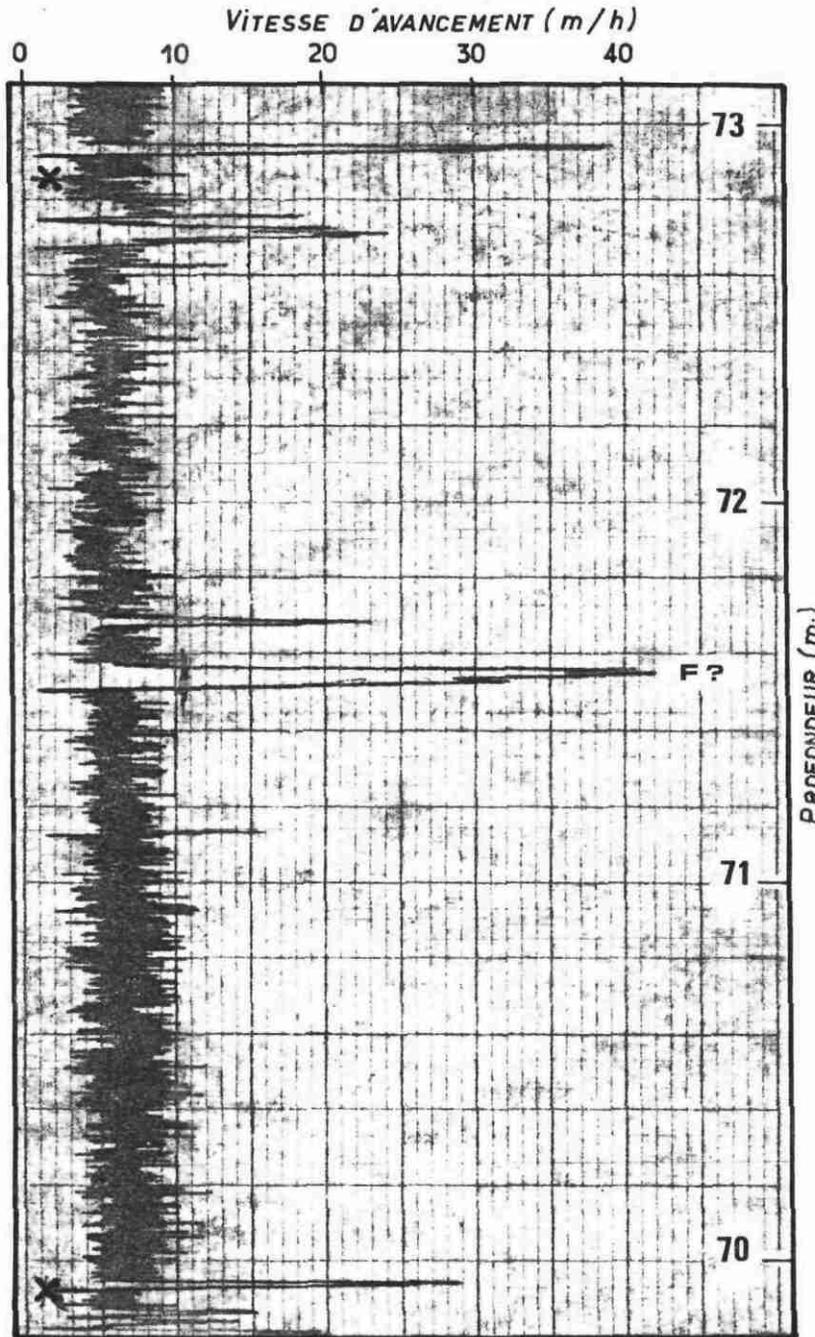


Forage F7
Diagraphie instantanée
Vitesse d'avancement



X CHANGEMENT DE TIGE

Forage F7
Diagraphie instantanee
Vitesse d'avancement



X CHANGEMENT DE TIGE

. des décrochements existent également au droit de zones reconnues comme non fissurées. Les décrochements situés près des fins de tige peuvent être le résultat de "bourrages" dus à l'accumulation de cuttings. En ce qui concerne les autres l'interprétation reste délicate, et on doit avoir recours à d'autres méthodes.

En conclusion les diagraphies instantanées peuvent apporter une contribution intéressante pour localiser la fissuration. Toutefois elles semblent moins fiables que les diagraphies différées. Elles doivent être employées conjointement avec d'autres moyens d'investigation.

233.4 - CONCLUSION

Au cours de cette étude nous avons pu vérifier que les diagraphies différées constituent un outil efficace pour localiser la fissuration ouverte recoupée par un forage, ceci au moins dans les granites, les conditions de trou dans les autres forages n'autorisant malheureusement pas une interprétation fiable tant qualitative que quantitative pour les schistes.

Les diagraphies neutron, gamma densité, acoustique, et de résistivité permettent une évaluation de la porosité. Dans le granite étudié la porosité est comprise entre 0 et 2 % dans les intervalles non fissurés et varie de 2 à 6 % dans les intervalles fissurés.

L'enregistrement de la vitesse d'avancement en cours de foration apporte d'intéressantes indications sur la dureté de la roche mais ne paraît pas devoir donner de manière sûre la localisation de la fracturation.

Enfin, la méthode d'estimation de la perméabilité à partir de l'analyse des signaux acoustiques a encore un caractère expérimental. De nombreuses mesures sont nécessaires pour vérifier la relation entre I_c et K qui est proposée.

234 - Slug - tests

1 - principe

L'essai consiste à suivre après une variation brusque du niveau (H_0) dans un forage l'évolution du niveau d'eau (H) en fonction du temps (t) (schéma Fig. 41).

La solution proposée par H. COOPER, JD. BREDEMUEFT et I.S. PAPADOPULOS (1967) pour un forage de diamètre fini est de la forme :

$$H/H_0 = F(\beta, \alpha) \text{ avec.}$$

$$\beta = \frac{Tt}{r_c^2}$$

r_c = rayon du puits au niveau du plan d'eau libre

T = Transmissivité de l'aquifère

t = temps depuis le changement de charge

$$\text{et } \alpha = \frac{r_s^2 S}{r_c^2}$$

S = coefficient d'emmagasinement de l'aquifère

r_s = rayon du puits au niveau de la couche aquifère

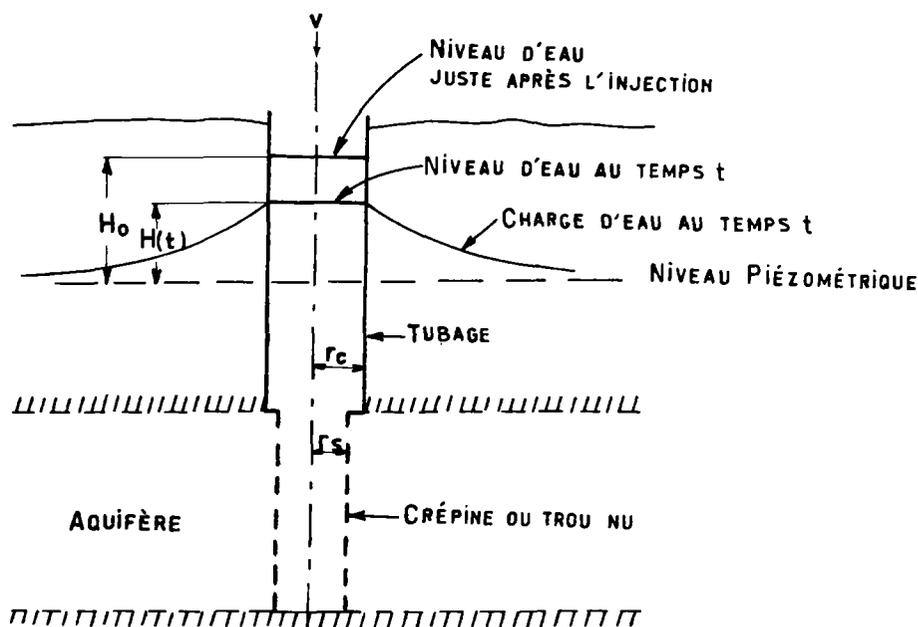


FIGURE 41 - Slug-test, schéma

Du point de vue pratique une méthode par abaque permet une interprétation rapide soit en coordonnées bilog, soit en coordonnées semi-log.

Ce type d'essai semble particulièrement bien adapté pour la mesure de T dans les milieux peu perméables.

2 - Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure n° 42. L'obturateur situé à la base du dispositif permet d'isoler les tranches de terrain aquifères d'épaisseur croissante. Sur un forage on peut donc réaliser une suite d'essais qui fourniront une indication intéressante sur l'évolution de la perméabilité avec la profondeur.

Un exemple d'enregistrement de la courbe expérimentale $H = f(t)$ est donné sur la fig. n° 43. On remarque sur ce diagramme que l'évolution des niveaux est très rapide (de l'ordre de 100 secondes dans l'exemple). L'enregistreur analogique utilisé permet d'apprécier sans difficultés des temps de l'ordre de la seconde.

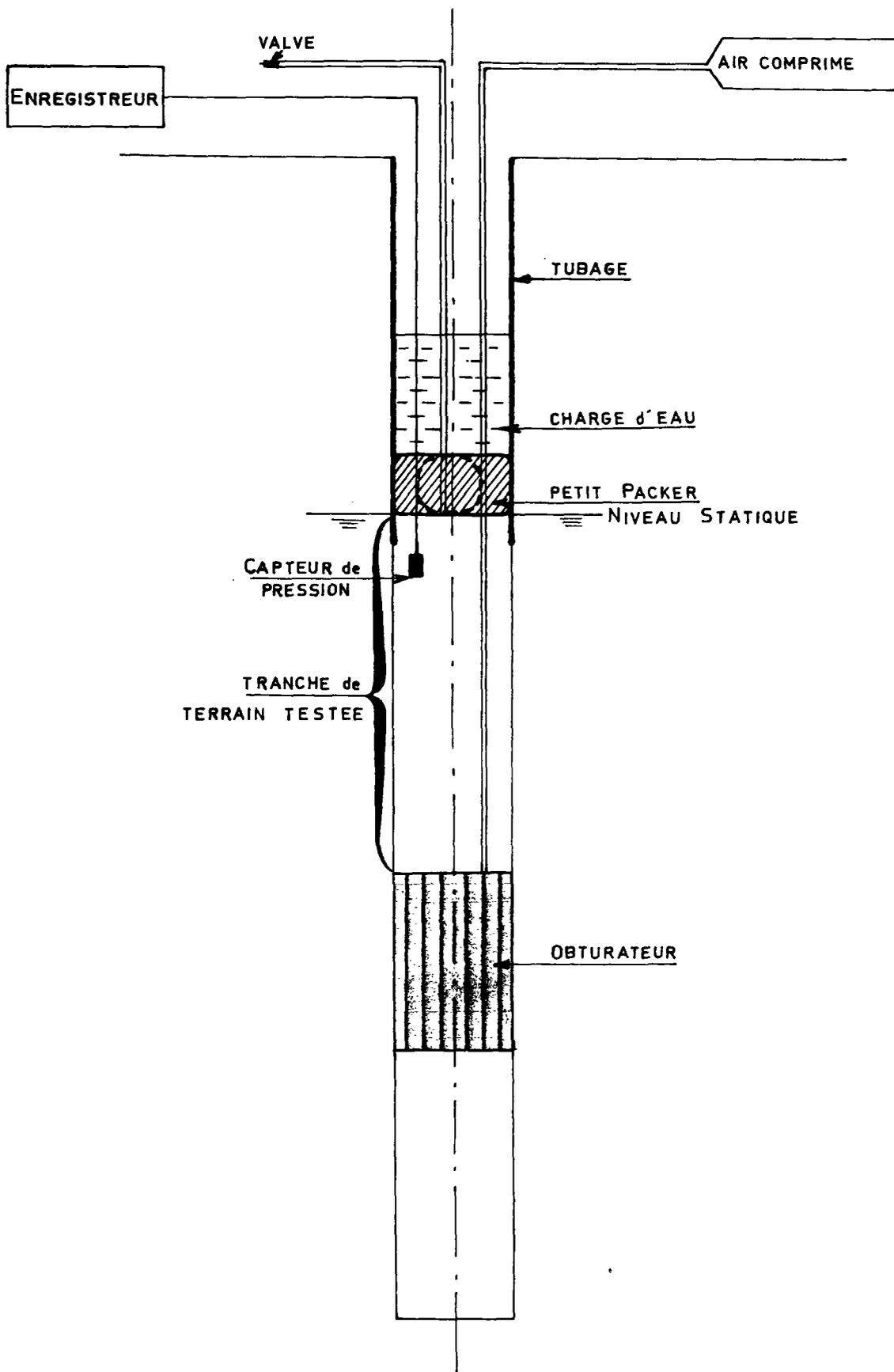
3 - Interprétation des essais

Des essais ont été réalisés sur les forages F2 et F7. Les courbes $H/H_0 = f(t)$, sur diagrammes bilog et semi log sont présentées sur les figures n° 44 à 47.

Le tableau E rassemble les résultats de l'interprétation. Les valeurs de T obtenues sont parfois très faibles (ex. forage F2, obturateur à 25 m, T moyen 5×10^{-6} m²/s). Sur les deux forages F2 et F7, les accroissements de T correspondent bien aux augmentations de débits notés en cours de foration. Il y a lieu cependant de souligner que la méthode n'a pas une grande sensibilité. Seules les variations importantes de transmissivité peuvent être identifiées.

SLUG TEST

DISPOSITIF EXPERIMENTAL



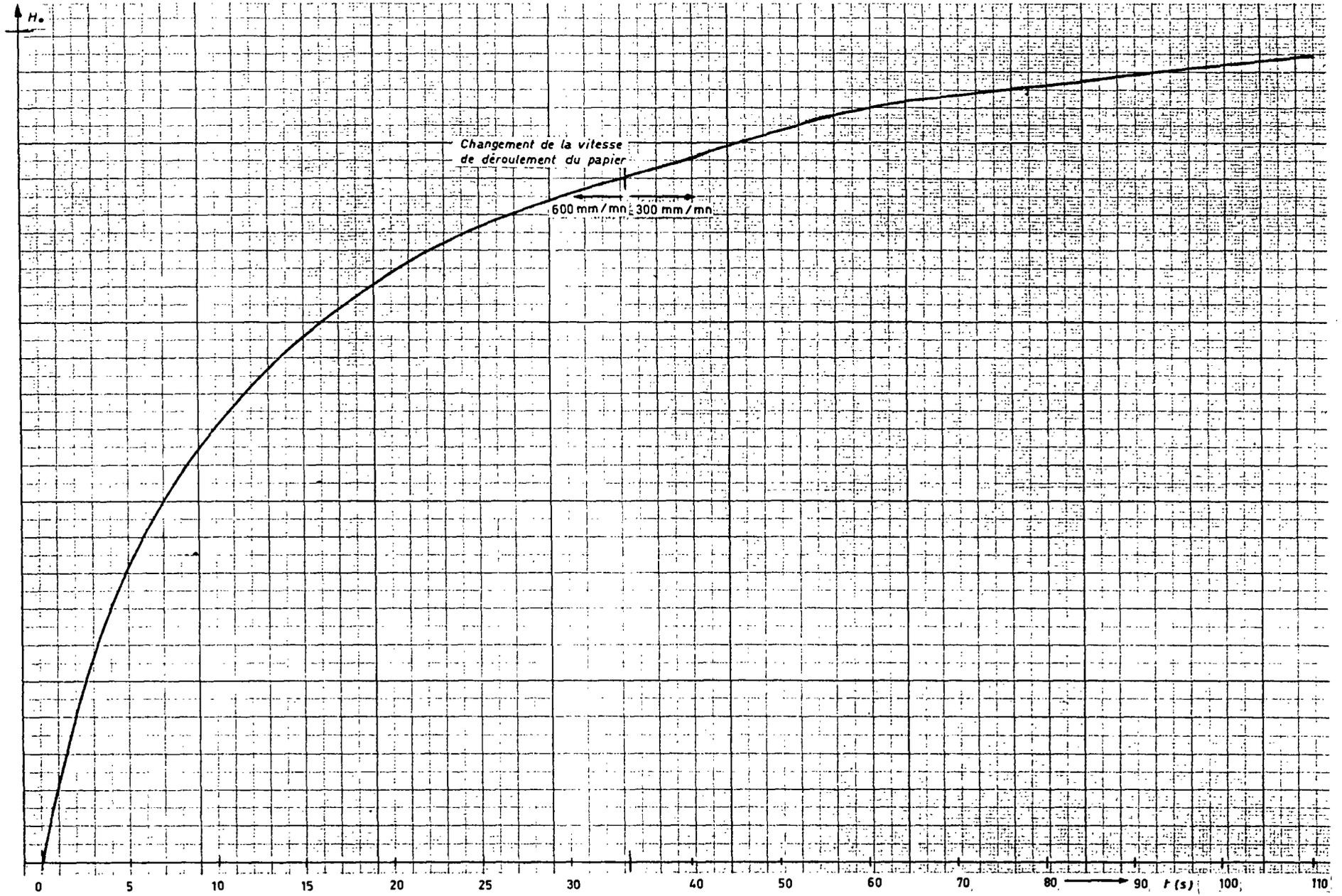
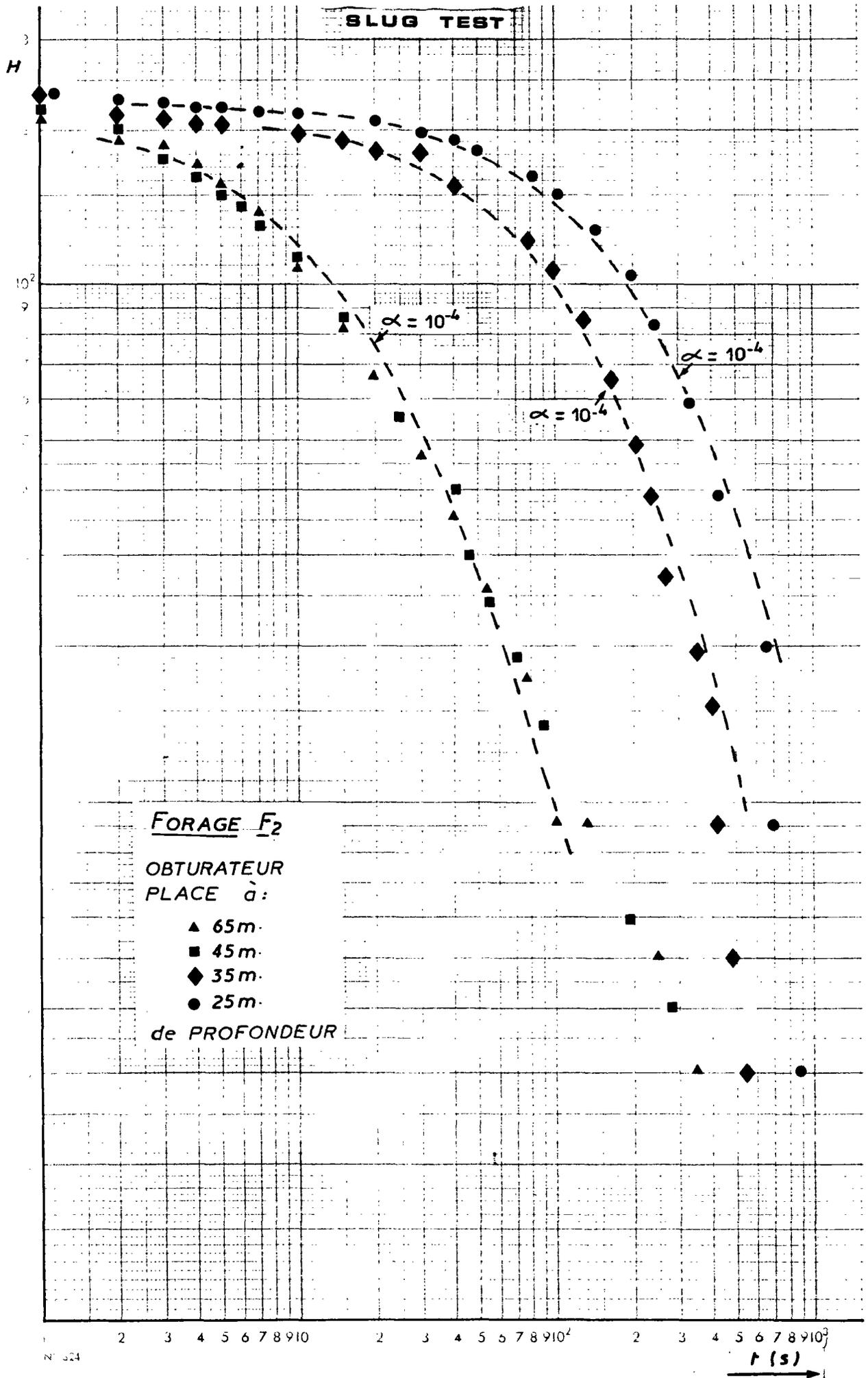


Tableau E - RESULTATS DES SLUGS TESTS

	Méthode Packer placé à m de profondeur	semibilogarithmique T en m ² /s	semilogarithmique T en m ² /s	Profondeur des principales venues d'eau
Forage F2	25 m	$4,7 \times 10^{-6}$	$6,1 \times 10^{-6}$	41 m
	35 m	$7,5 \times 10^{-5}$	$5,9 \times 10^{-5}$	
	45,85 m	$4,0 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-4}$	
Forage F9	40 m	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	21 et 30 m
	75 m	$1,2 \times 10^{-3}$	$9,4 \times 10^{-4}$	45 et 48 m



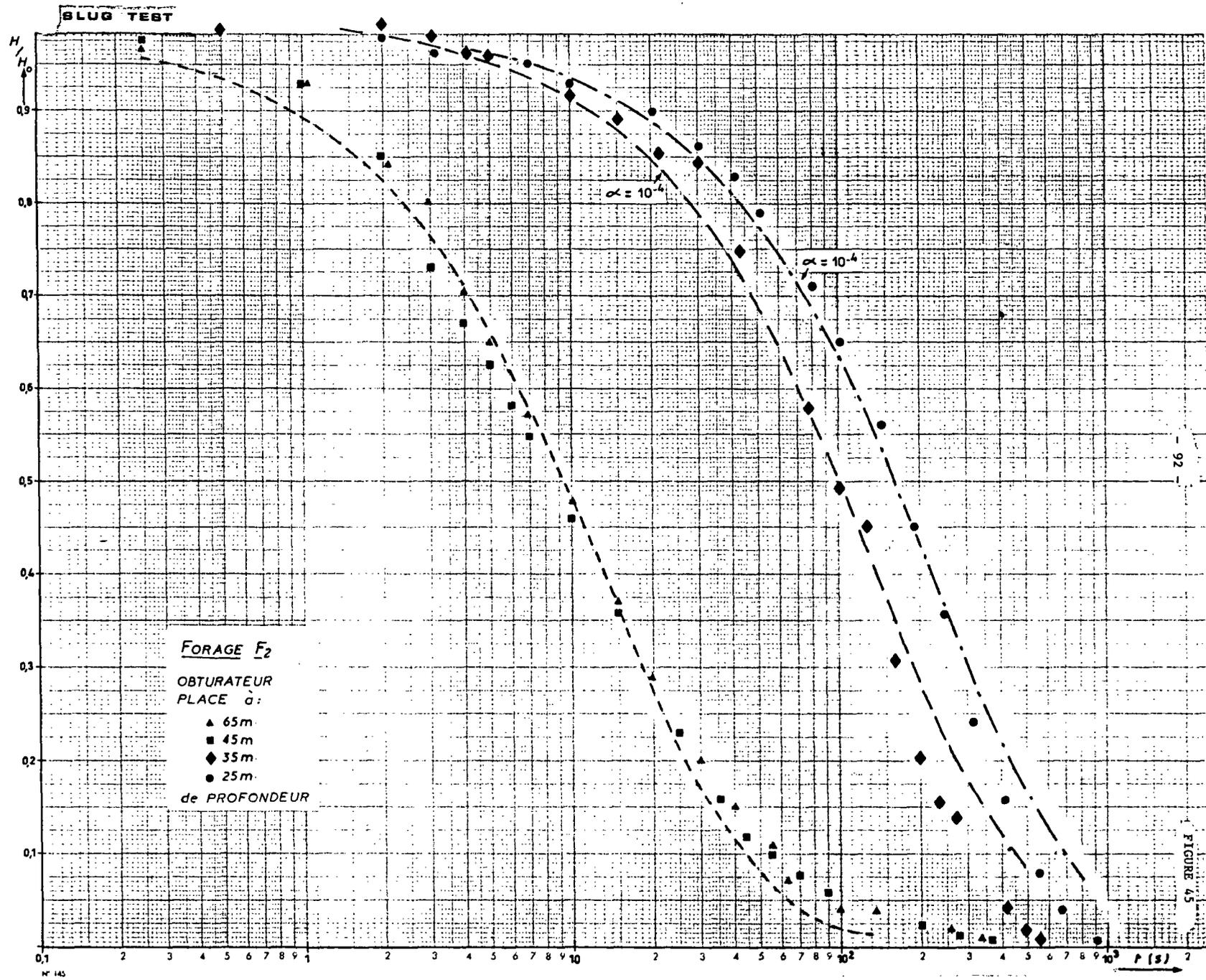
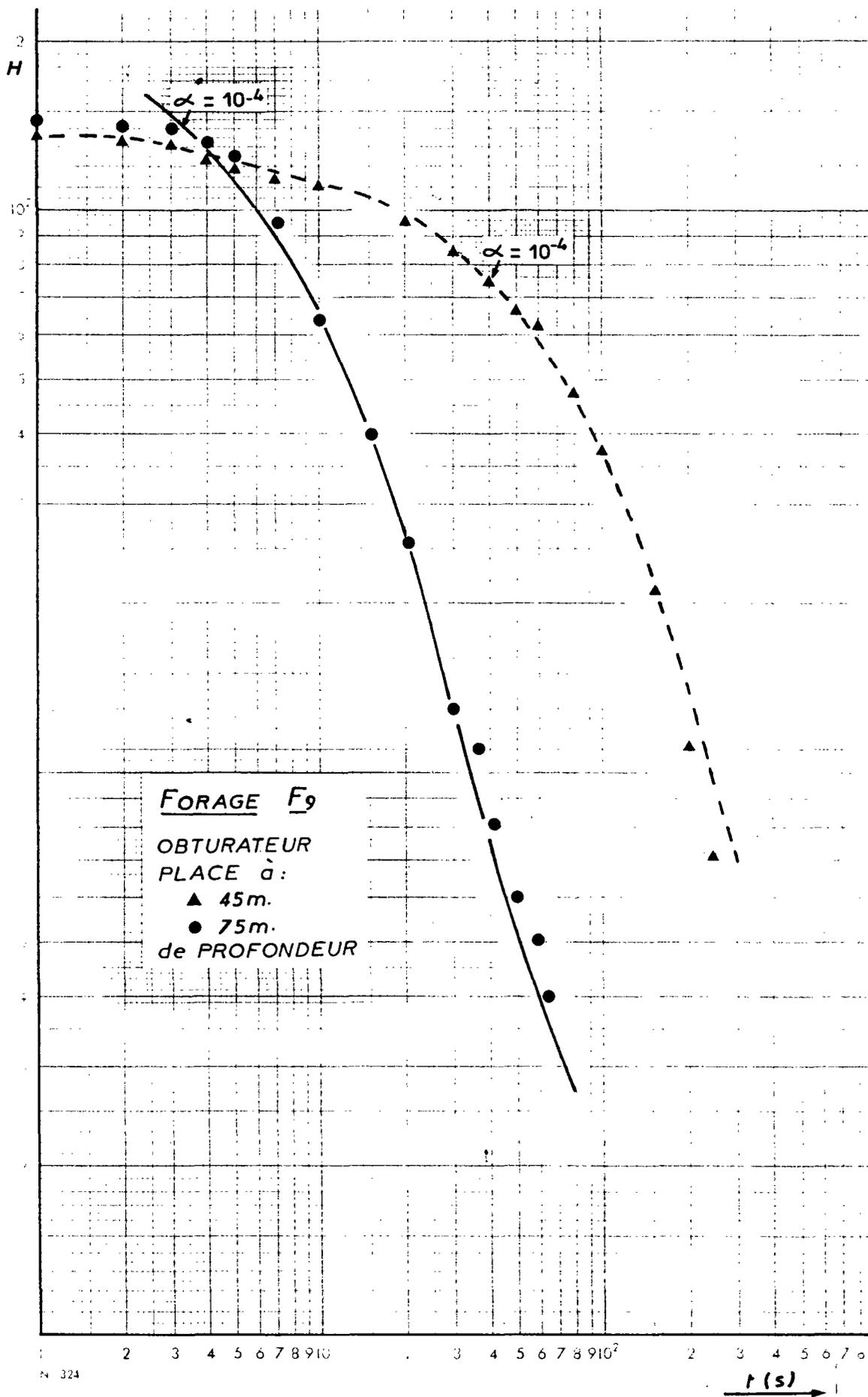
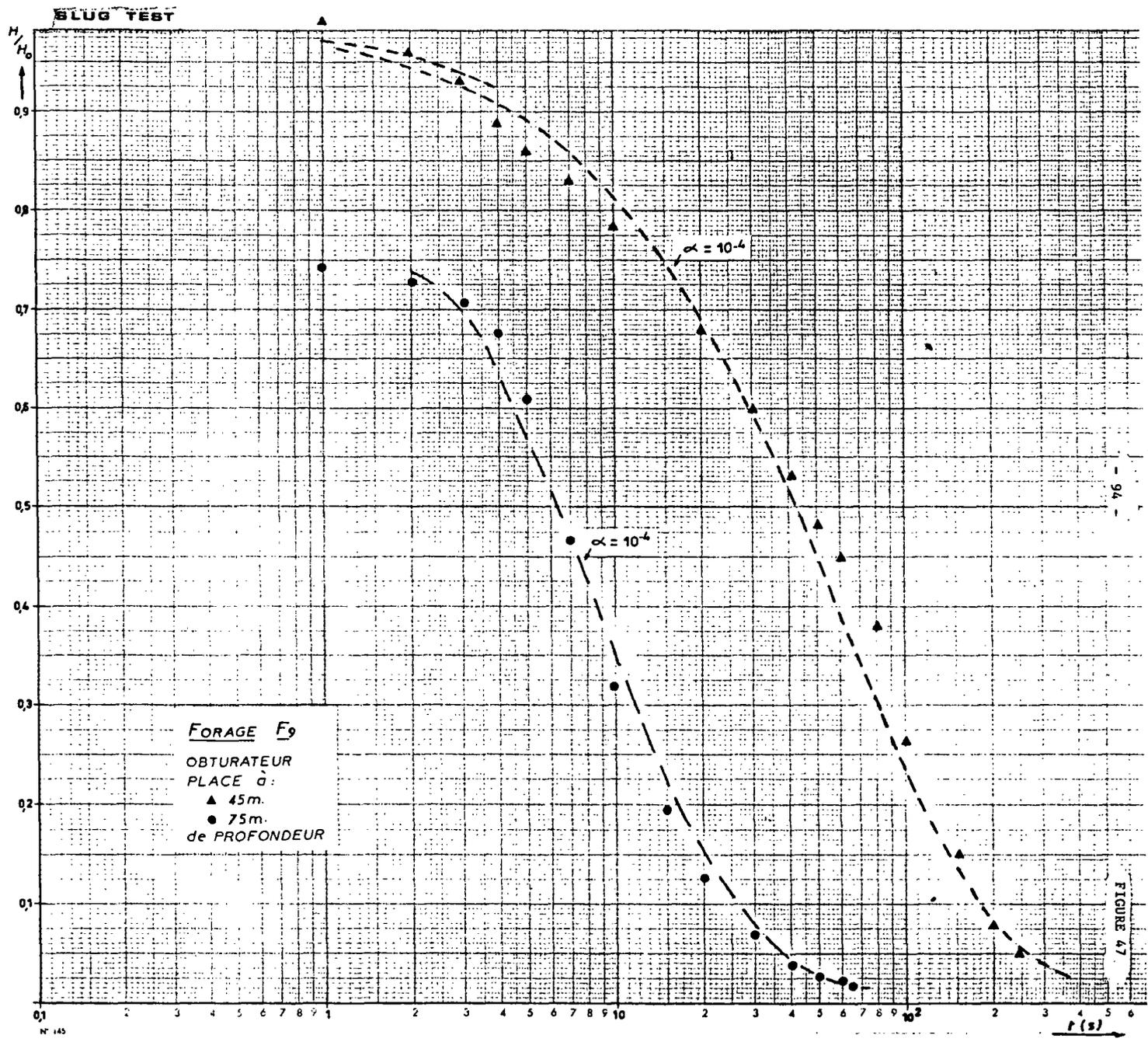


FIGURE 45

SLUG TEST





3 - THEME 2-3

L'existence d'eau souterraine en milieu fissuré du socle a été prouvée depuis plusieurs années. Ceci est fort bien illustré par l'analyse statistique (voir tableau ci-dessous) des productivités obtenues sur 632 forages du Massif armoricain.

Nature de la formation fissurée	Nombre de forages	Débits instantanés en m ³ /h							
		0-1	1-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30-40	> 40
Granite	271 %	13,1	45,0	17,7	11,4	6,3	4,8	0	1,5
Schiste	284 %	6,3	36,3	32,0	10,2	6,7	5,3	1,8	1,4
Grès	77 %	6,5	45,4	13,5	13,0	7,8	5,2	2,6	0
	632								

On voit que les résultats sont très comparables quelle que soit la formation géologique rencontrée.

Les succès ont conduit naturellement à une multiplication des forages. Par suite il est logique de poser la question des ressources en eau souterraine.

Les principales méthodes de calcul des ressources en eau renouvelables au moyen de modèles permettent le plus souvent de chiffrer l'excédent (ruissellement et infiltration), la part respective de ces deux termes étant difficile à apprécier. Il a donc paru intéressant d'essayer de lever en partie cette inconnue, c'est-à-dire d'estimer les ressources renouvelables propres aux eaux souterraines.

Nous avons employé deux modèles :

- le modèle de THORNTHWAITE qui permet de calculer les excédents
- le modèle MERO qui permet de calculer également les excédents, mais qui autorise aussi une évaluation de la part propre aux eaux souterraines.

31 - EXCEDENTS CALCULES PAR LE MODELE DE THORNTHWAITE

Le principe du modèle de THORNTHWAITE a été présenté dans le premier rapport d'avancement. Nous rappellerons les résultats en joignant la carte de la figure n° 48.

32 - EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE - MODELE MERO

321 - Principe du modèle MERO

Le modèle MERO est un système de simulation hydrométéorologique. Son principe de fonctionnement correspond au schéma général présenté sur la figure n°49. Dans sa conception actuelle le modèle comprend une partie bilan et une partie transfert.

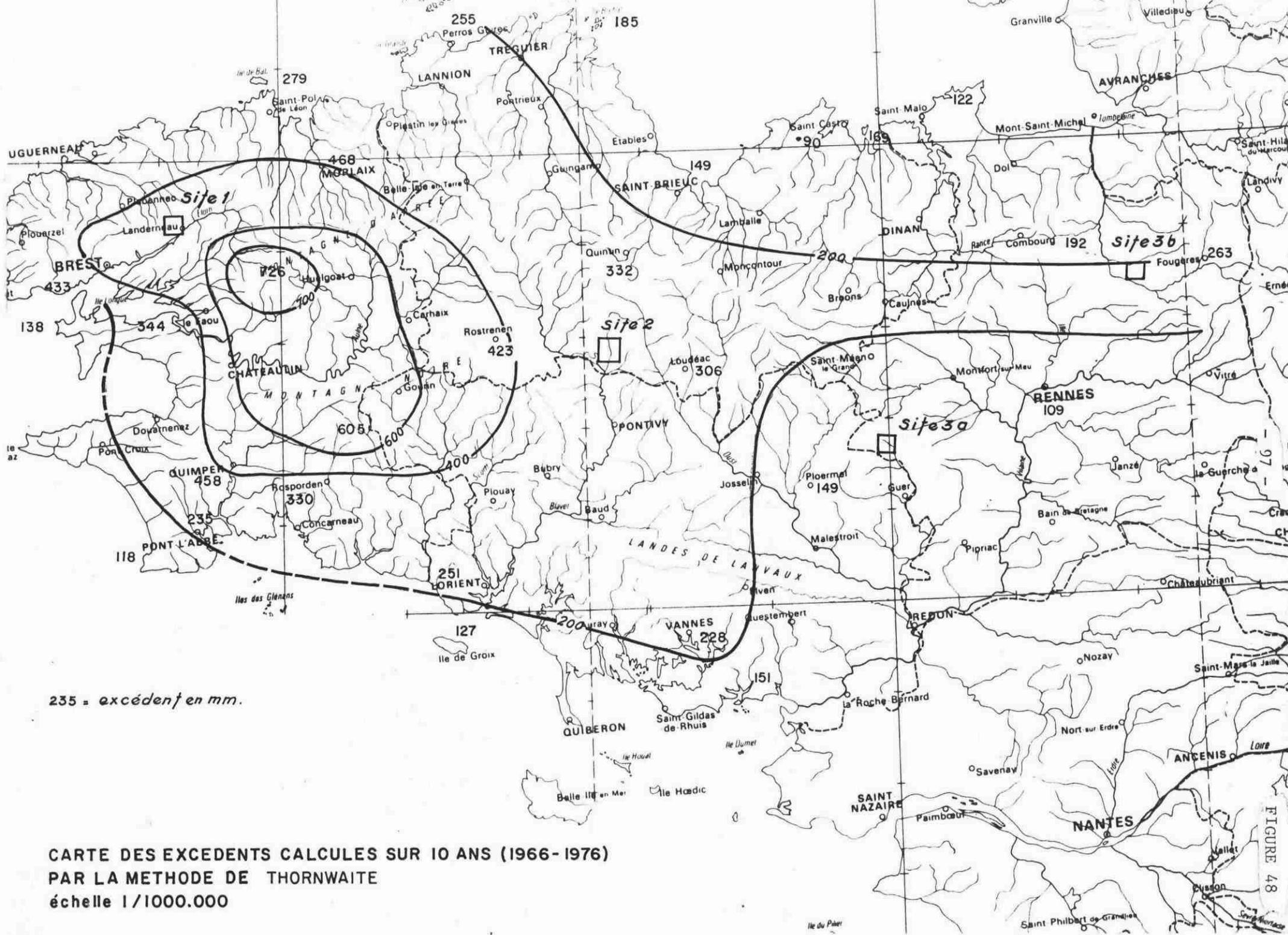
321.1 - Partie bilan

Cette partie permet de passer de la précipitation à l'état de remplissage des différents réservoirs.

On part de la pluie P_j du jour j qui rencontre un premier réservoir constituant l'interception de capacité maximale UST, soit U_{j-1} son niveau au jour $(j-1)$, on pose :

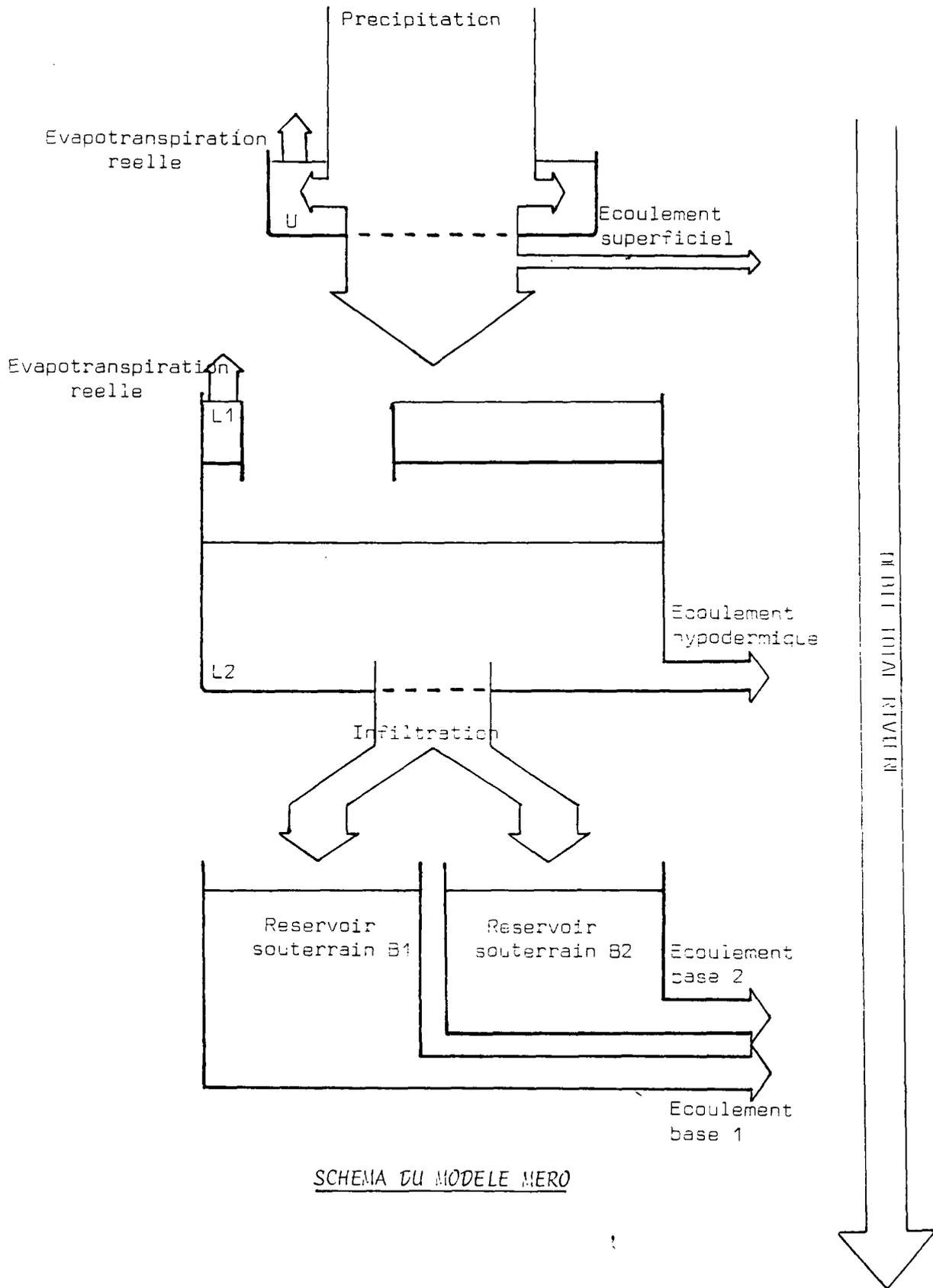
$$PN = P_j + U_{j-1} - EVP$$

où EVP représente l'évapotranspiration potentielle du jour j (cette évapotranspiration potentielle journalière est obtenue à partir d'une valeur moyenne décadaire qui s'augmente si la pluie est nulle ou qui se diminue s'il pleut).



CARTE DES EXCEDENTS CALCULES SUR 10 ANS (1966-1976)
 PAR LA METHODE DE THORNWHAITE
 échelle 1/1000.000

FIGURE 48



Si PN est inférieur ou égal à UST, la pluie est entièrement absorbée par interception et la quantité d'eau disponible pour le sol est nulle.

Si PN est supérieur à UST, le réservoir d'interception se sature et la quantité $PL = PN - UST$ est alors disponible au niveau du sol.

PL est alors comparé à des coefficients d'écoulement superficiel qui sont les seuils d'écoulement superficiel sur les terrains perméables (PO) et semi-perméables (QO).

Si les différences $PL - PO$ et/ou $PL - QO$ sont positives, un écoulement superficiel STPR se produit selon une certaine fonction de routage qui dépend de la saturation des terrains.

La différence $PL - STPR$ va alors servir à remplir les réservoirs L1 dans les terrains perméables et DL1 dans les terrains semi-perméables.

Lorsque L1 est saturé, l'excédent de $PL - STPR$ réalimente le réservoir L2 qui se vidangera par écoulement hypodermique ou par passage dans les réservoirs souterrains selon :

$$GW = L2^2 \times CL2 \times A$$

où GW est la recharge des nappes souterraines,

L2 le niveau dans le réservoir hypodermique,

CL2 est un coefficient de proportionnalité (compris entre 0.01 et 1.0),

A est un coefficient régulateur inférieur à 1 en étiage et égal à 1 en période humide.

Les niveaux des réservoirs DL1, $DL2 = L1 + L2$ et U sont diminués à chaque pas de temps d'une hauteur totale au plus égale à l'évapotranspiration potentielle.

321.2 - Partie transfert

Le débit calculé est égal à la somme du débit superficiel, du débit d'écoulement retardé, et du débit fourni par les deux réservoirs souterrains.

Dans le modèle MERO, ces quatre débits journaliers sont obtenus à partir de la même formule :

$$Q_i = H_i \times (1 - e^{-1/T_i})$$

$i = 1 \text{ à } 4$

où Q est le débit calculé en mm,

H est la hauteur d'eau disponible pour le ruissellement ou dans le réservoir pour les trois autres écoulements,

T_i est une "constante de temps de tarissement" de chaque type d'écoulement calculé à partir de l'hydrogramme (voir fig.50 un exemple de calcul de ces temps de tarissement).

Pour utiliser ce modèle, il faut connaître la pluie journalière et les valeurs d'évapotranspiration potentielle décadaire moyennes. Pour l'ajustement il est nécessaire de posséder aussi des séries concomitantes de débits journaliers.

322 - Application du modèle MERO

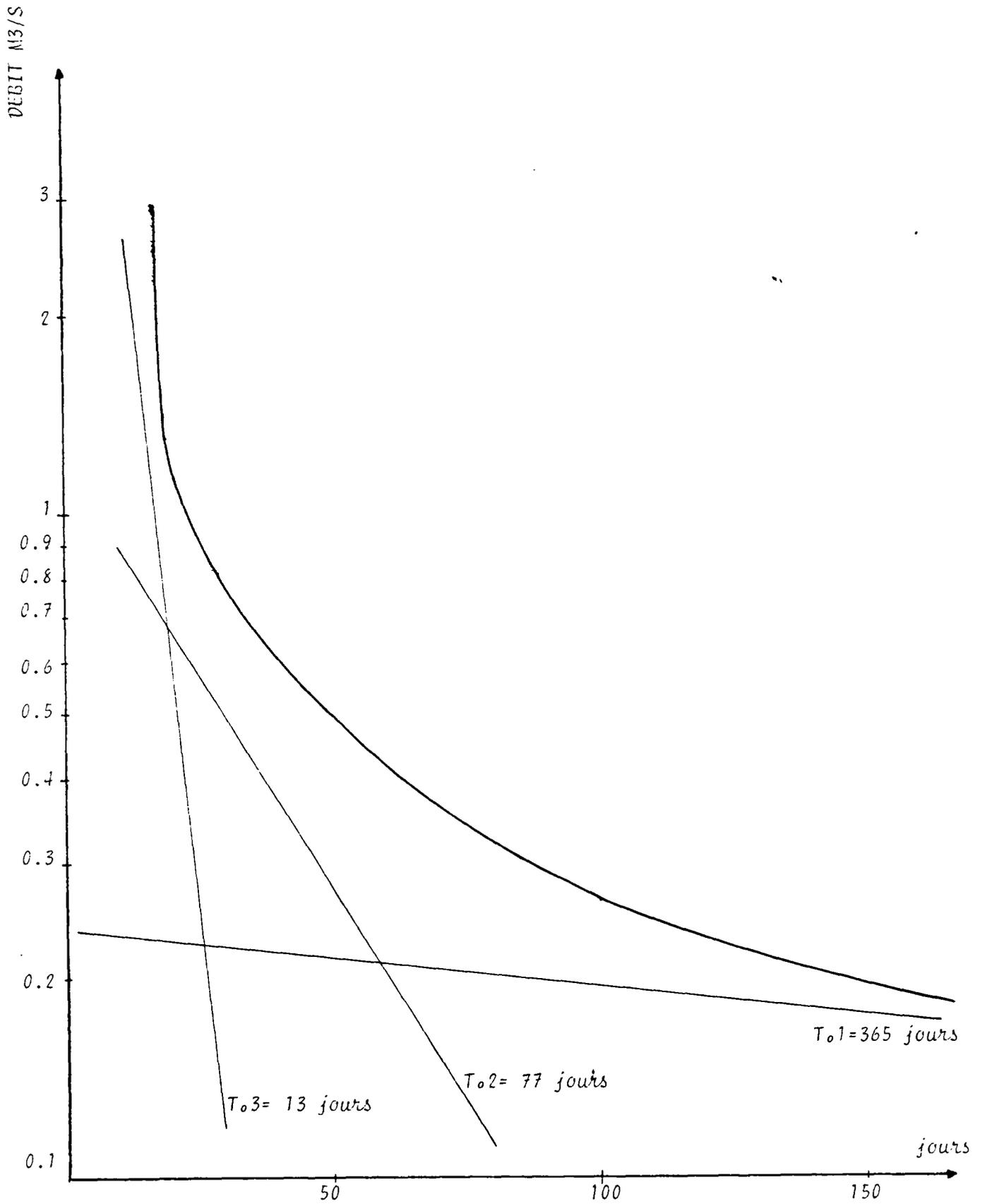
322.1 - Les données

Nous avons choisi des bassins, en fonction de leur nature géologique et possédant des séries de données de pluie et de débits les plus longues. Cela nous a conduit à retenir 5 bassins versants :

Bassin versant	Années d'observation des débits		Superficie du bassin versant	Nature géologique du bassin versant
(1) Blavet	1967	1977	140 km ²	Granite
(2) Couesnon	1967	1977	510 km ²	Schiste et granite
(3) Nançon (affluent du Couesnon)	1968	1977	50 km ²	Granite
(4) Aff supérieur	1968	1977	31 km ²	Grès
(5) Careil	1968	1977	14 km ²	Grès et schiste

En ce qui concerne les pluies, nous avons choisi trois postes pluviométriques situés sur ou à proximité immédiate des bassins versants. Les stations météorologiques retenues sont :

- MUR DE BRETAGNE pour le BLAVET,
- FOUGERES pour le COUESNON et le NANCON,
- PLELAN LE GRAND pour l'AFF supérieur et le CAREIL.



EXEMPLE DE CALCUL DES CONSTANTES DE TEMPS

DE TARISSEMENT : LE NANCON

L'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée par la formule de TURC appliquée à des valeurs décadaires de température et d'ensoleillement. Les données d'ensoleillement étant fournies par les stations de RENNES pour le calcul de l'ETP à FOUGERES et PLELAN LE GRAND, et de ROSTRENEEN pour le calcul à MUR DE BRETAGNE.

322.2 - Critique des données

322.21 - Précipitations (fig. n° 51 et 52)

L'utilisation d'un seul poste pluviométrique nécessitait de vérifier la validité de l'information pluie au poste de mesure. Pour cela nous avons utilisé la méthode du double cumul.

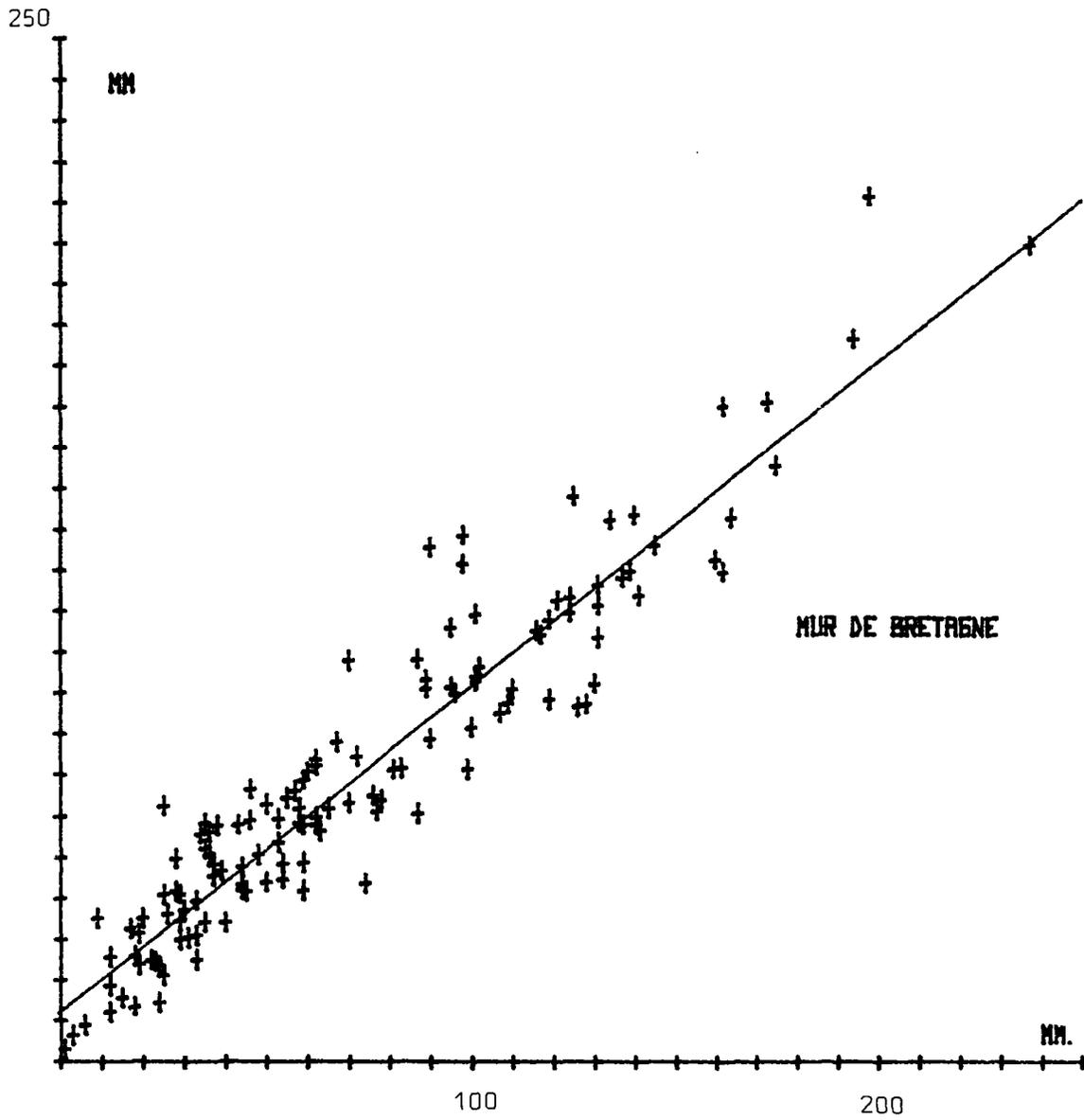
a) Méthode du double cumul :

Pour chacun des trois postes pluviométriques utilisés, nous avons choisi quatre autres stations voisines pour lesquelles nous possédons les données de pluie pour les mêmes périodes. Nous avons alors tracé la somme des précipitations annuelles de la station étudiée en fonction de la moyenne calculée pour les quatre stations proches de la même somme. Cela nous permet de voir qu'il ne s'est pas produit d'évènement anormal au niveau de la station pour la période étudiée.

Stations étudiées	Stations "témoins" choisies pour comparaison
Mur de Bretagne	Rostreneen Plaintel
Plélan le Grand	Merdrignac Ploermel
Fougères I	Fougères 2 Cancalle Merdrignac Rennes

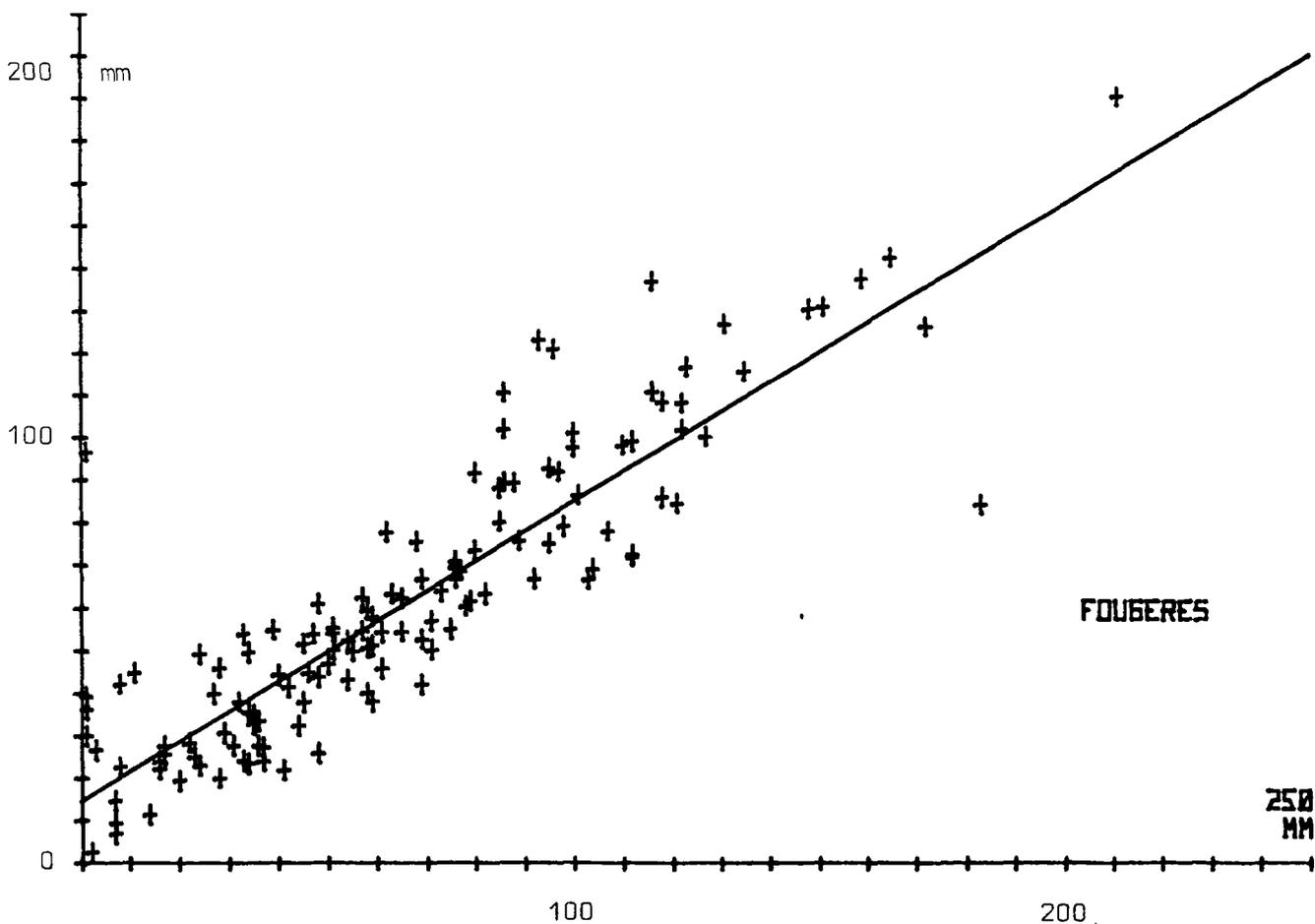
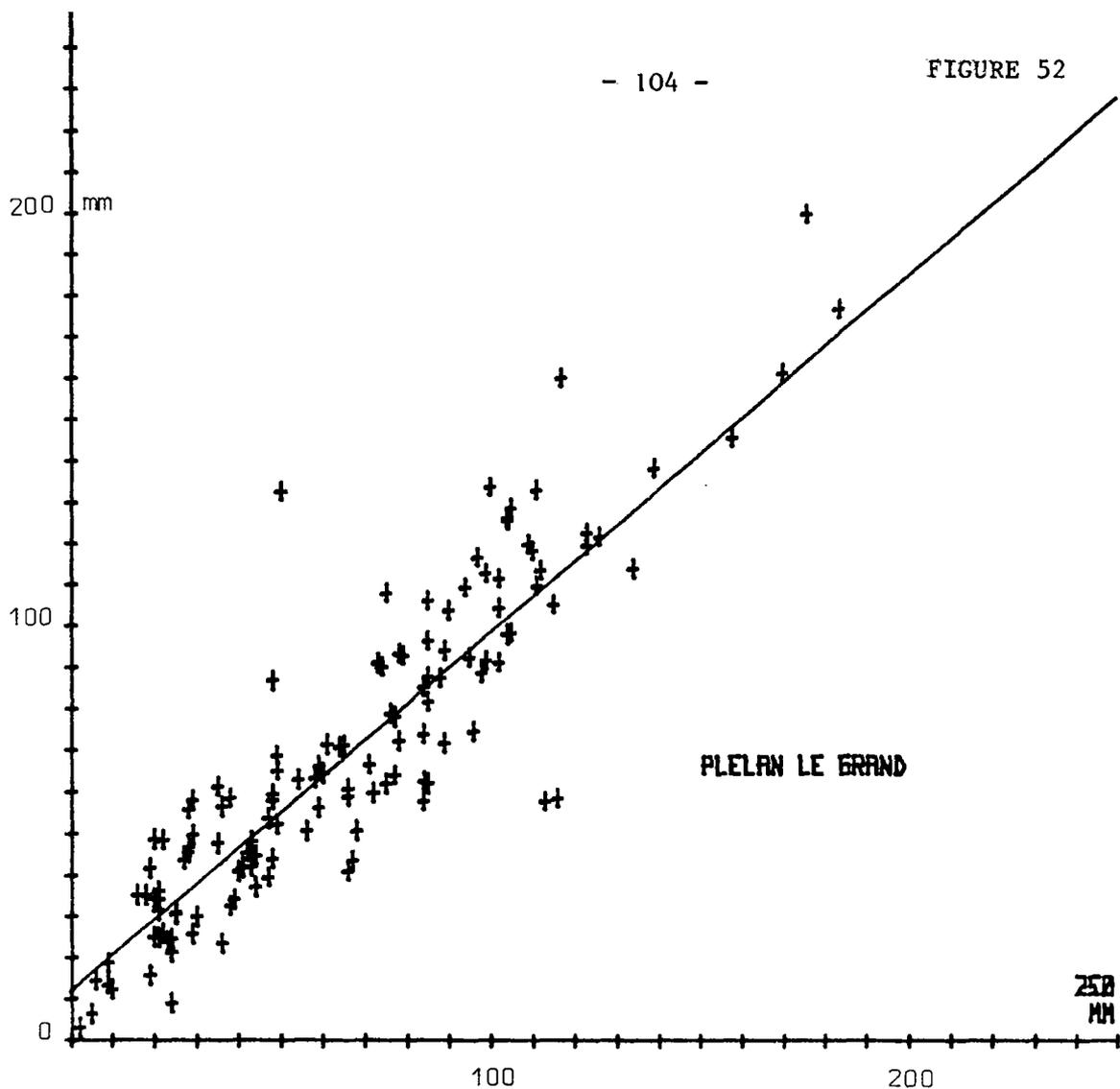
Coefficient de corrélation des sommes mensuelles de pluie entre les stations étudiées et les moyennes des stations "témoins" :

Mur de Bretagne	R = 0.95
Plélan le Grand	R = 0.91
Fougères	R = 0.88



axe des abscisses : somme mensuelle des pluies (mm) à la station étudiée

axe des ordonnées : moyenne des sommes mensuelles des pluies (mm) aux stations "témoins"



b) Corrélation entre stations

De même nous avons, pour chacune des trois stations, calculé les coefficients de corrélation des totaux, annuels et mensuels mesurés à la station en fonction des valeurs similaires calculées à partir des moyennes des quatre stations voisines.

Cela nous a montré qu'il existait une bonne corrélation entre les stations utilisées et leurs voisines. Dans certains cas, les données manquantes ont été complétées à partir des coefficients de régression linéaire calculés.

Stations étudiées	Stations voisines	Coefficient de corrélation linéaire
Mur de Bretagne	Rostrenen Plaintel	0,95
Plelan-le-Grand	Merdrignac Ploermel	0,91
Fougères 1	Fougères 2 Cancale Merdrignac Rennes	0,88

Au vu des résultats obtenus par ces méthodes, nous avons estimé que les données de pluviométrie étaient correctes pour les stations choisies.

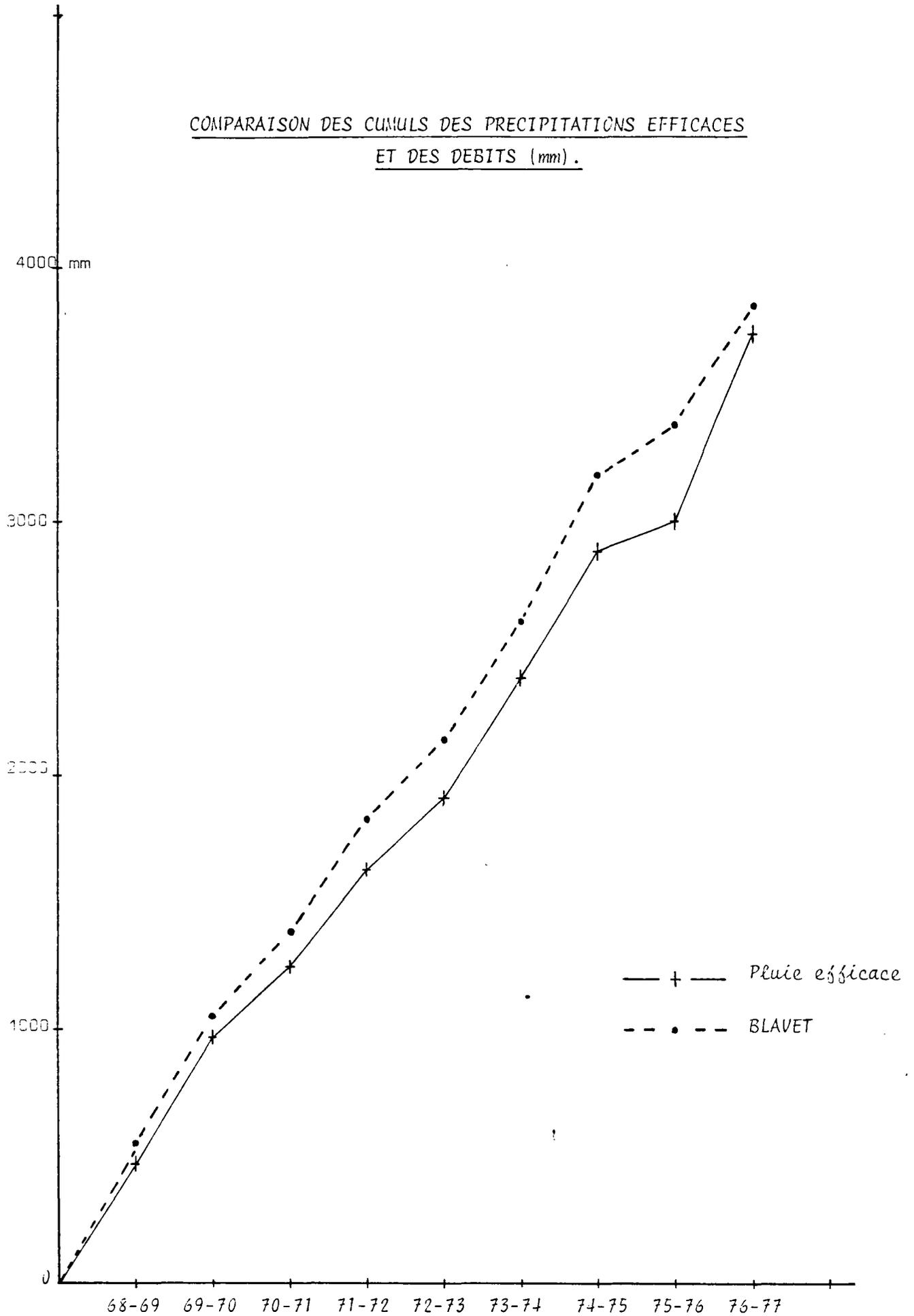
322.22 - Débits (fig. n° 53 et 54)

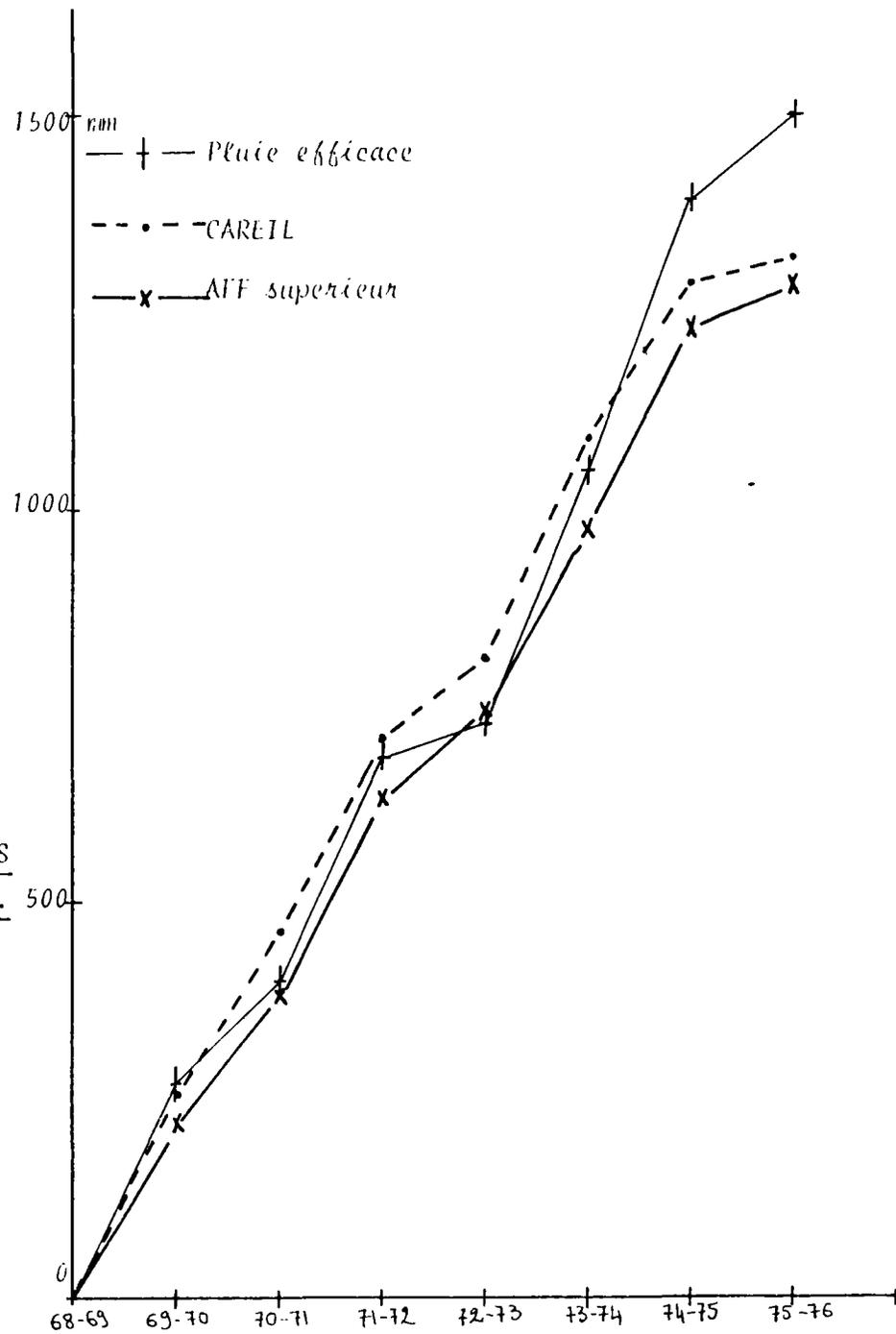
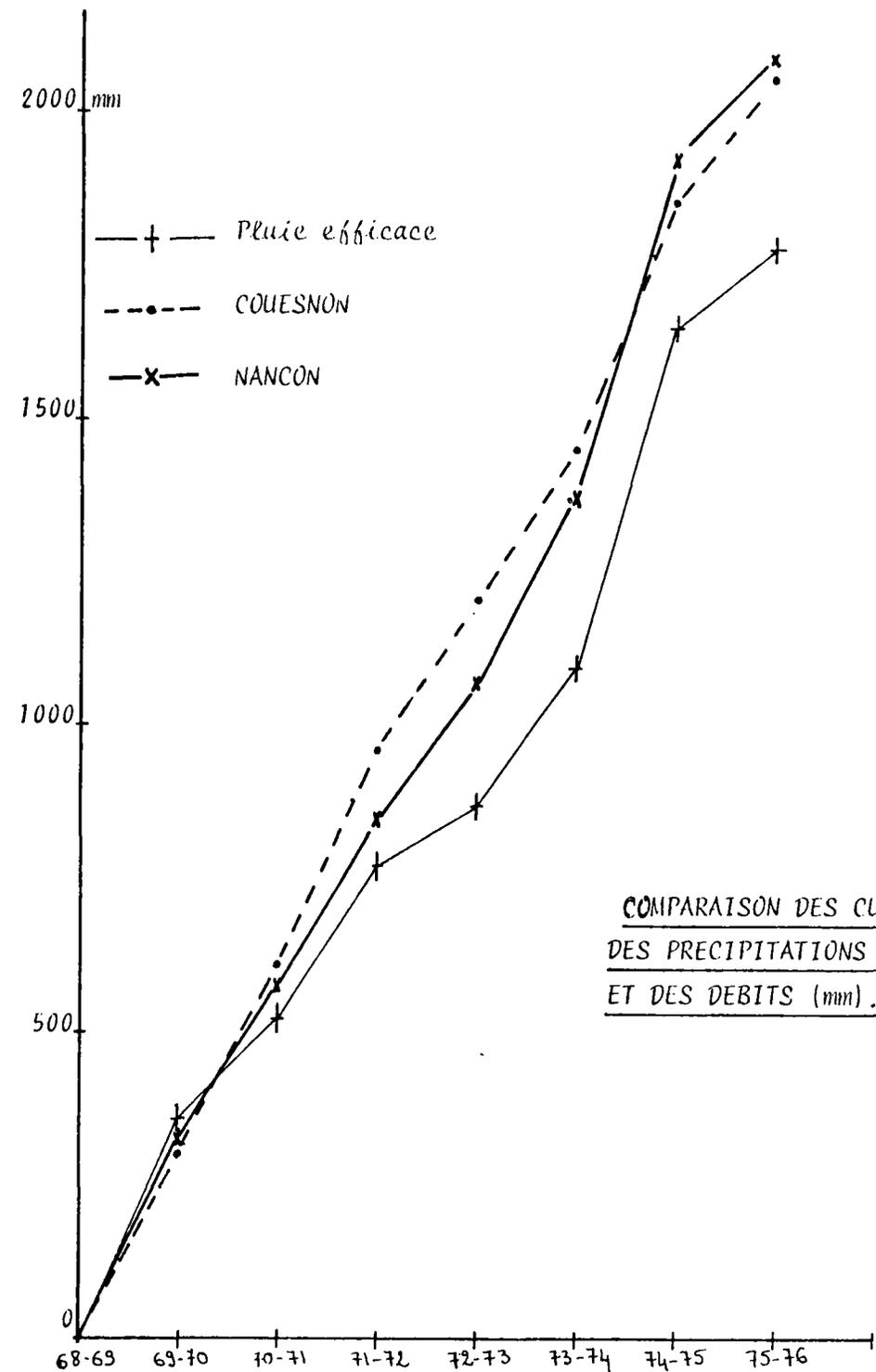
La critique des données de débits s'est faite à partir des hydrogrammes que nous avons tracé pour chaque année de mesure au pas de temps journaliers.

Nous avons enfin comparé les sommes cumulées des débits annuels avec les sommes cumulées des valeurs annuelles de pluie efficace calculée par la méthode de THORNTHWAITE avec l'évapotranspiration potentielle donnée par la formule de TURC mensuelle et avec une réserve facilement utilisable de 100 mm. Cela nous permet de voir si les débits sont compatibles avec la pluie efficace.

Sur leur ensemble les valeurs de débits présentent une certaine homogénéité qui permet de les considérer comme des données fiables donc sur lesquelles nous pouvons ajuster les modèles.

COMPARAISON DES CUMULS DES PRECIPITATIONS EFFICACES
ET DES DEBITS (mm).





322.3 - Méthodes d'ajustement

Le modèle MERO, dans la version utilisée pour cette étude, possède 22 paramètres. Ce sont :

- 4 valeurs de superficie : la surface totale du bassin versant,
la surface de l'aquifère principal A1
la surface de l'aquifère secondaire A2
la surface des terrains semi-perméables A3
- 4 constantes de temps de tarissement pour les réservoirs souterrains A1 et A2, l'écoulement retardé et le ruissellement,
- 5 capacités : celles du réservoir d'interception (avec un coefficient de variations saisonnières) et des réservoirs de la zone aérée (avec un coefficient de variations saisonnières),
- 5 paramètres pour calculer l'écoulement de surface sur les terrains perméables et sur les terrains semi-perméables,
- 2 paramètres commandant la vidange du réservoir intermédiaire dans les réservoirs souterrains,
- 2 paramètres pour moduler l'évapotranspiration.

Compte tenu d'observations faites lors de l'application du modèle sur les bassins versants choisis, certains paramètres nous sont apparus comme n'étant pas d'une très grande utilité. C'est ainsi que nous n'avons pas utilisé les coefficients de variations saisonnières, d'où diminution de 3 du nombre de paramètres ; de même nous avons laissé constants certains paramètres aux valeurs préconisées par l'auteur F. MERO dans la même région. Enfin nous avons utilisé les constantes de temps de tarissement calculées à partir des hydrogrammes.

Dans ces conditions seuls 9 paramètres restaient à ajuster lors des simulations.

L'ajustement s'est fait par comparaison graphique entre les débits journaliers calculés et mesurés (cf. annexes).

322.4 - Résultats

- Pluie efficace

On a constaté que l'écoulement superficiel était très faible à nul. Dans ces conditions la pluie efficace est égale à la somme des écoulements (hypodermique et souterrains).

Bassin versant	Nature géologique du bassin versant	Pluie efficace*
(1) Blavet	Granite	44 %
(2) Nançon (affluent du Couesnon)	Granite	43 %
(3) Couesnon	Granite et schiste	46 %
(4) Aff supérieur	Grès	27 %
Careil	Grès et schiste	28 %

On constate que l'on peut séparer l'ensemble des bassins en deux groupes : le COUESNON, le NANCON et le BLAVET pour lesquels la pluie efficace est supérieure à 40 % de la pluie brute et l'AFF supérieur et le CAREIL où celle-ci est inférieure à 30 % de la pluie.

- Répartition des écoulements

Pour comparer la répartition des écoulements nous avons tenu compte des vitesses de vidange des réservoirs dont le temps de tarissement était suffisamment long (de l'ordre de 7 jours). C'est pourquoi nous avons considéré dans certains cas comme écoulement lent l'écoulement des réservoirs B1 et B2 pour certains bassins et pour d'autres uniquement l'écoulement du réservoir B1.

Bassin versant	Nature géologique du bassin versant	Répartition des écoulements**
COUESNON écoulement rapide	Granite et schiste	94,4 %
écoulement lent (B1)		5,6 %
NANCON écoulement rapide	Granite	63 %
écoulement lent (B1 + B2)		36,7 %
BLAVET écoulement rapide	Granite	84 %
écoulement lent (B1)		16 %
AFF su- écoulement rapide	Grès	97 %
périeur écoulement lent (B1)		3 %
CAREIL écoulement rapide	Grès et schiste	96 %
écoulement lent (B1)		4 %

* Moyennes annuelles de la pluie efficace calculées sur n - 1 années d'observation, la première année servant à l'initialisation des réservoirs, rapportées aux pluies moyennes mesurées sur la même période.

** Les valeurs fournies sont des valeurs moyennes annuelles calculées sur n - 1 années d'observation et ramenées en % de la pluie efficace moyenne annuelle calculée sur la même période.

Si nous analysons ces résultats en tenant compte de la géologie, nous remarquons que les écoulements lents supérieurs à 15 % de la pluie efficace se rencontrent dans les bassins versants granitiques. Dans les bassins versants schisteux et gréseux, les écoulements sont inférieurs à 5 %.

La valeur légèrement supérieure observée pour le COUESNON pourrait s'expliquer par le fait qu'une partie de l'écoulement total provient d'affluent ayant des bassins versants purement granitiques : ex. le NANCON.

- Constante de tarissement

Constante de temps de tarissement (en jours)	Écoulement	COUESNON Granite et schiste	NANCON Granite	BLAVET Granite	AFF Sup. Grès	CAREIL Grès et schiste
T01	réservoir B1	300	365	230	70	49
T02	réservoir B2	19	77	25	36	8,5
T03	hypodermique	6	13	7	6	3
T04	superficiel	1	1	1	1	1

Les constantes de temps sont supérieures dans les bassins granitiques ce qui suppose des ressources plus importantes. La constante de temps relative à l'écoulement superficiel est difficile à évaluer à partir de l'analyse des hydrogrammes. Dans tous les cas elle est faible. Pour le calcul elle a été prise arbitrairement égale à 1 jour.

33 - CRITIQUE DES RESULTATS

Les résultats présentés sont issus de l'emploi d'un seul modèle appliqué à cinq bassins versants. Il serait ultérieurement intéressant de les confirmer par l'emploi de plusieurs modèles. Un plus grand nombre de bassins devrait être également étudié.

Enfin la différenciation des divers écoulements à partir de l'analyse des hydrogrammes est parfois difficile à faire. Des mesures piézométriques en des points situés près des rivières pourraient permettre de résoudre en partie cette difficulté.

34 - CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer la part des ressources renouvelables attribuables aux eaux souterraines. Pour ce faire un modèle conceptuel à paramètres de type pluie-débit où certaines caractéristiques entrant dans le calage du modèle ont un **rapport** direct avec la nature géologique des bassins versants a été appliqué à cinq bassins versants de rivière du Massif armoricain pour la période 1967-1977.

Nous avons mis en évidence une différence de rapport de la pluie efficace à la pluie brute en fonction de la nature géologique du bassin. La pluie efficace est plus importante sur les terrains granitiques que sur les terrains schisteux et gréseux. Cette différence peut s'expliquer soit directement par la géologie (les terrains non perméables facilitent la reprise de la pluie par évaporation) soit indirectement (le type de végétation étant fonction de la nature du terrain.

Il a été également montré que la répartition des écoulements parait liée à la nature géologique des bassins versants : il y a une plus forte proportion d'écoulement lent en milieu granitique qu'en milieu schisteux.

<u>Bassin versant</u>	<u>Géologie du bassin versant</u>	<u>Écoulement lent*</u>
Blavet	granite	7,2 %
Couesnon	schiste et granite	2,5 %
Nançon	granite	15,9 %
Aff supérieur	grès	1,0 %
Careil	grès et schiste	1,1 %

Un tableau récapitule les principales données chiffrées obtenues à partir de l'analyse des écoulements pour les cinq bassins versants.

* Moyenne de l'écoulement lent rapportée à la pluviométrie moyenne annuelle.

TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS

		MODELE MERO	MODELE TURC
<p align="center">COUESNON (schiste et granite)</p> <p>Débit moyen annuel mesuré (mm) = 279.7</p> <p>Pluie moyenne annuelle (mm) = 742.6</p>	Débit moyen annuel calculé (mm)	327.6	<p align="center">mm</p> <p>263 (station climatologique de Fougères)</p>
	Evapotranspiration réelle (mm)	419.3 = 56 % Pluie	
	Pluie efficace (mm)	324.6 = 44 % Pluie	
	Ecoulement hypodermique (mm)	218.7 = 67.5 % Pluie efficace	
	Ecoulement de base principal B1	18.3 = 5.6 % Pluie efficace	
	Ecoulement de base secondaire B2	87.3 = 26.9 % Pluie efficace	
<p align="center">NANCON (granite)</p> <p>Débit moyen annuel observé (mm) = 300.0</p> <p>Pluie moyenne annuelle (mm) = 747.3</p>	Débit moyen annuel calculé (mm)	326.1	<p align="center">mm</p> <p>263 (station climatologique de Fougères)</p>
	Evapotranspiration réelle (mm)	423.8 = 56.7 % Pluie	
	Pluie efficace (mm)	322.3 = 43.1 % Pluie	
	Ecoulement hypodermique	203.8 = 63.2 % Pluie efficace	
	Ecoulement de base principal B1	59.7 = 18.5 % Pluie efficace	
	Ecoulement de base secondaire B2	58.8 = 18.2 % Pluie efficace	
<p align="center">BLAVET (granite)</p> <p>Débit moyen annuel observé (mm) = 448.8</p> <p>Pluie moyenne annuelle (mm) = 839.3</p>	Débit moyen annuel calculé (mm)	401.9	<p align="center">mm</p> <p>423 (station climatologique de Rostrenen)</p>
	Evapotranspiration réelle (mm)	423.5 = 54 % Pluie	
	Pluie efficace (mm)	385.8 = 46 % Pluie	
	Ecoulement hypodermique	284.5 = 73.7 % Pluie efficace	
	Ecoulement de base principal B1	60.7 = 15.7 % Pluie efficace	
	Ecoulement de base secondaire B2	40.7 = 10.6 % Pluie efficace	

		MODELE MERO	MODELE TURC
<p>AFF SUPERIEUR (grès)</p> <p>Débit moyen annuel observé (mm) = 205</p> <p>Pluie moyenne annuelle (mm) = 743.5</p>	<p>Débit moyen annuel calculé (mm)</p> <p>Evapotranspiration réelle (mm)</p> <p>Pluie efficace (mm)</p> <p>Ecoulement hypodermique</p> <p>Ecoulement de base principal</p> <p>Ecoulement de base secondaire</p>	<p>mm</p> <p>215.6</p> <p>494.8 = 66.5 % Pluie</p> <p>202.1 = 27.2 % Pluie</p> <p>140.1 = 69.3 % Pluie efficace</p> <p>7.7 = 3.8 % Pluie efficace</p> <p>54.2 = 26.8 % Pluie efficace</p>	<p>mm</p> <p>149 (station climatologique de Ploërmel)</p>
	<p>CAREIL (grès et schiste)</p> <p>Débit moyen annuel observé (mm) = 205.8</p> <p>Pluie moyenne annuelle (mm) = 743.5</p>	<p>Débit moyen annuel calculé (mm)</p> <p>Evapotranspiration réelle (mm)</p> <p>Pluie efficace (mm)</p> <p>Ecoulement hypodermique</p> <p>Ecoulement de base principal</p> <p>Ecoulement de base secondaire</p>	<p>207.3</p> <p>509.8 = 68.6 % Pluie</p> <p>207.3 = 27.8 % Pluie</p> <p>132.6 = 64.3 % Pluie efficace</p> <p>8.1 = 3.9 % Pluie efficace</p> <p>66.0 = 31.8 % Pluie efficace</p>

4 - CONCLUSION GENERALE

La distribution des zones fissurées perméables est hétérogène, mais les dimensions du Volume Élémentaire de Référence -au sein duquel l'aquifère se comporte comme un milieu homogène aux paramètres stables- peuvent être au moins pluri-décamétriques à pluri-hectométriques. L'existence de limites multiples au V.E.R. est un des facteurs importants conditionnant les possibilités d'exploitation et dont, actuellement, les solutions théoriques ne sont pas connues.

L'identification des zones fissurées par les diverses méthodes utilisées fournit des données cohérentes entre elles aux différentes échelles d'investigation, indépendamment de la nature géologique des formations. Les linéaments décelés sur photographies aériennes n'ont pas tous pour origine des phénomènes d'ordre hydrogéologique, les procédés géophysiques peuvent alors permettre de lever les indéterminations : un linéament confirmé par géophysique correspond effectivement à une certaine fissuration du sous-sol, point vérifié par forages et diagraphies (granite principalement).

Les méthodes d'interprétation des pompages d'essai dérivées de la solution de THEIS permettent bien la détermination des paramètres hydrodynamiques lesquels (dans les limites du V.E.R.) varient peu dans l'espace (en un site donné). Du point de vue des comportements, on a pu noter que l'évolution des pressions en fonction des temps de pompage procédait de deux types de modèles : l'un avec effets de limites multiples (couloir fissuré), l'autre avec apports par drainance.

Les ressources en eau souterraine, à l'échelle du bassin, sont quant à elles, fonction de la nature géologique des formations concernées. Les évaluations à partir d'une modélisation globale sur cinq bassins versants bretons montrent que dans les conditions naturelles elles peuvent être estimées (écoulement lent) à environ 1 % des précipitations moyennes annuelles en milieu schisteux ou gréseux, 7 à plus de 15 % des précipitations moyennes annuelles en milieu granitique, et à une valeur intermédiaire en milieu mixte.

Les acquis auxquels aboutit le présent programme de recherche -très largement basé sur des essais de terrain- sont d'ordres théoriques (modèle de comportement d'aquifère) et méthodologiques, mais aussi pratiques et directement utilisables :

- la combinaison des techniques photogéologiques et géophysiques permet l'implantation de forages productifs avec des chances raisonnables de succès

- parmi les critères d'implantation, l'extension latérale du couloir fissuré paraît un paramètre essentiel
- les données de débit instantané obtenues en cours ou en fin de foration par les méthodes de battage rapide à l'air comprimé sont suffisamment représentatives de l'aquifère, au moins en valeur relative, pour permettre un certain nombre de décisions quant à l'équipement du forage et aux modalités de son exploitation (rabattement maximum).

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

RECHERCHES D'EAU SOUTERRAINE EN MILIEU DE SOCLE FISSURE - GENERALITES

- BISCALDI (R.) 1967. - Etude statistique des forages et carte hydrogéologique des régions à substratum éruptif et métamorphique en Afrique occidentale. - C.I.E.H., rapport B.R.G.M. DAK 67 A 14.
- SEMA (1967). - Etude des facteurs de succès des forages d'eau en région cristalline.
- PLOTE (H.) et MARTIN (G.) 1974. - Recherches hydrogéologiques dans les cercles de Kayes et Yellimane (Mali). Hydrogéologie de détail - Géophysique - Campagne de forage. - Rapport B.R.G.M. 74 DAK 002.
- MARTIN (G.) 1974. - Note sur la méthode de forage au marteau fond-de-trou. Application aux recherches hydrogéologiques. - B.R.G.M., note inédite.
- PLOTE (H.) 1975. - Recherche d'eau souterraine par sondage à l'air dans la Betana (Province de Tarfaya). - Rapport inédit.
- VAUBOURG (P.) 1975. - Etude hydrogéologique de la plaine de Tiznit. Campagne de reconnaissance par la méthode des sondages à l'air. - Rapport inédit.
- BEL (F.) 1975. - Note sur la technique de forage à l'air appliquée aux recherches d'eau souterraine. Expérience marocaine actuelle. - Note inédite.
- PLOTE (H.) 1975. - Résultats de la campagne de sondages à l'air dans l'Anti-Atlas occidental région d'Igherm (Province d'Agadir). - Rapport inédit.
- BEL (F.) 1975. - Utilisation de la foration à l'air pour la recherche d'eau souterraine au Maroc. - Note inédite.
- BENAMOUR (A.) 1975. - Utilisation de la géophysique pour la recherche d'eau souterraine dans les régions du socle cristallin. - C.I.E.H.

- BENAMOUR (A.) 1975. - Présentation de matériel de forage. - C.I.E.H.
- BERGER (J.) et ENGALENC (M.) 1975. - Hydrogéologie et géophysique appliquées à la recherche d'eau souterraine dans les roches cristallines fracturées. - C.I.E.H., GEOHYDRAULIQUE.
- GIRAUD (R.) et LENCK (P.) 1975. - Sur l'intérêt hydrogéologique majeur des zones de failles dans le socle métamorphique et éruptif de l'Afrique occidentale. - C.I.E.H., Faculté des Sciences Abidjan, (Côte d'Ivoire).
- SOLAGES (S.) 1975. - Etude comparative de deux modes de forages en Haute-Volta. - C.I.E.H., GEOHYDRAULIQUE.
- TALBO (H.) 1975. - L'eau souterraine dans le Massif Armoricaïn. Etat des connaissances - perspectives. - B.R.G.M., note inédite.
- VAUBOURG (P.) 1975. - Etude théorique sur la foration à l'air. Comparaison avec des observations de terrain. - B.R.G.M., note inédite.
- DOMINICI (R.) et HENG (B.) 1976. - Recherche d'eau souterraine par sondage à l'air dans la région de Bou Arfa - Figuig (Province de Figuig). - Rapport inédit.
- DOMINICI (R.) et HENG (B.) 1976. - Recherche d'eau souterraine par sondage à l'air dans la région de Khémifra pour l'A.E.P de cette ville. - Rapport inédit.
- DOMINICI (R.) et HENG (B.) 1976. - Reconnaissance hydrogéologique par sondages à l'air du plateau des Mouissate aux environs de Sidi Tiji (Province de Safi). - Rapport inédit.
- DOMINICI (R.) et HENG (B.) 1976. - Recherche d'eau souterraine par sondage à l'air de reconnaissance dans la région de Tamlet et Bel Raiada (Province de Figuig). - Rapport inédit.
- BUARD (C.) 1976. - Campagne complémentaire de la plaine de Tiznit. - Rapport inédit.
- PLOTE (H.) 1976. - Résultats de 19 sondages à l'air réalisés pour l'alimentation en eau potable de Tamanar (Province d'Essaouina). - Rapport inédit.

DUROZOY (G.) et TALBO (H.) 1976. - Première approche de l'estimation des réserves dans les roches anciennes. - Rapport B.R.G.M. 76 SGN 483 BPL.

TALBO (H.) 1976. - Eaux souterraines du Massif Armoricaïn. - Note inédite.

ARCHAMBAULT (J.), BOURGUET (L.), LAMBLIN (J.M.) 1977. - Ressources en eau des terrains anciens. Données techniques et économiques pour servir à leur mise en valeur. - Note inédite.

BLES (J.L.) 1977. - La fracturation des Roches. Observation et interprétation des fractures naturelles - Essai de mise au point des connaissances actuelles sur les fractures naturelles des roches dans les niveaux supérieurs de l'écorce terrestre. Rapport B.R.G.M. 77 SGN 248 GEO.

BRESSON (G.) 1977. - Technique et utilisation du marteau fond-de-trou pour la recherche et l'exploitation des eaux souterraines. - Note inédite.

TALBO (H.) et VAUBOURG (P.) 1977. - Méthodes de recherche d'eau souterraine en milieu fissuré - Etat des connaissances. Rapport B.R.G.M. 77 SGN 358 HYD.

Documentation technique sur le matériel de forage au marteau fond et hors de trou : ATLAS COPCO ; STENUICK - FRANCE.

PHOTOGEOLOGIE - TELEDETECTION

- LATTMAN (I.H.) 1958. - Technique of mapping geologic fracture traces and lineaments of aerial photographs. Photogramm. Eng. Vol 24
- WEECKSTEEN (G.) 1969. - Application de l'étude des photographies aériennes en géologie. B.R.G.M. 69 SGL 11 GEO
- REUL (K.) 1973. - Sur l'implantation de grands captages d'eau souterraines à l'aide d'analyse photogéologique de la tectonique. in ATTI 1 - Conf. Int. Planif. ACQUE. Palermo 1973 S.L.E.S.
- SCANVIC (J.Y.) 1977. - The french atlantic littoral and the massif armoricain- Part II - Géologie et tectonique. B.R.G.M. 77 SGN 052 GEO
- SCANVIC (J.Y.) et WEECKSTEEN (G.) 1978. - Carte sismo-tectonique des linéaments de la France - B.R.G.M. 78 SGN 127 GEO
- ASSOUMA (D.) 1978. - Apport de l'interprétation tectonique des photographies aériennes et étude statistique des forages d'eau en milieu fissuré - Plateau du Léon (Bretagne) - D.E.S. Université d'Orléans - Laboratoire de Géologie appliquée.

HYDRAULIQUE SOUTERRAINE - MODELE ELEMENTAIRE D'ECOULEMENT

- CASTANY (G.) 1963. - Traité pratique des eaux souterraines
- PAPADOPOULOS (I.S.) 1965. - Non steady flow to a well in an infinite anisotropic aquifer. Proceeding 1965, Dubrownik, symposium on hydrology of fractured rocks.
- EMSELLEM (Y.) 1967. - Les transferts de pression entre nappes et la drainance dans les aquifères hétérogènes - B.R.G.M. Chronique d'hydrogéologie - N° 11
- BERKALOFF (E.) et al 1968. - Formulaire de l'hydrogéologue - B.R.G.M. DS 66 A 24 et 68 SGL 202 HYD

- LOUIS (C.) 1974. - Introduction à l'hydraulique des roches - Bulletin du B.R.G.M. - Deuxième série - Section III n° 4
- FORKASIEWICZ (J.) 1972. - Interprétation des données de pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères - Aide mémoire B.R.G.M. 72 SGN 273 AME
- PEAUDECERF (P.) 1973. - Méthode d'interprétation des données de pompages périodiques - B.R.G.M. - Note inédite
- GRINGARTEN (A.C.) 1976. - Détermination des caractéristiques hydrauliques des massifs rocheux fissurés à l'aide d'essais de pompage ou d'injection en régime transitoire. B.R.G.M. 76 SGN 494 AME

DIAGRAPHIES

- DESBRANDES (R.) 1968. - Méthode et interprétation des diagraphies - Technip
- LEBRETON (F.) et al 1977 - Essais par diagraphies dans les milieux poreux pour évaluer l'influence de leur perméabilité sur des impulsions acoustiques. Colloque S.A.I.D. Paris Octobre 1977
- NELSON (P.) et al 1977. - Preliminary Report on Geophysical and Mechanical Borehole Measurements at Stripa. Lawrence Berkeley - Laboratory California
- Sté SCHLUMBERGER 1972. - Log interprétation - Vol 1 - Principes - charts.

SLUG-TESTS

- BERKALOFF (E.) 1968. - Diagramme de la dépression résiduelle dans un puits après un prélèvement brusque d'eau - BRGM

- COOPER (M.), BREDEHOEFT (J.D.), PAPADOPOULOS (S.) 1967. - Response of a finite. Diameter well to an Instantanea charge of water. Water Resources Research.
- COOPER (M.), BREDEHOEFT (J.D.), PAPADOPOULOS (S.) 1973. - On the analysis of "Slut test" data. Water Resources Research..
- DEGALLIER (R.) et DEMARSILLY (G.) 1977. - Détermination des paramètres hydrodynamiques par interprétation de variations brusques de niveau dans des puits - B.R.G.M. 78 SGN 028 HYD
- WILSON (C.R.), DOE (T.W.), LONG (J.C.S.) and WITHERSPOON (P.A.) 1979. - Low-flow, low-permeability, in largely impermeable rock - Proceeding of the NEA/IAEA Workshop. OECD Nuclearen Agency - Paris

RESSOURCES - RELATIONS ENTRE ECOULEMENT SOUTERRAIN ET ECOULEMENT DE SURFACE

- ANDRE (R.), TIERCELIN (J.R.). - Le choix entre les débits moyens mensuels, décadaires et journaliers pour les projets d'utilisation des ressources en eau. - La Houille Blanche, n° 8, 1976, pp. 657-660.
- BERGSTROM (S.). - Développement and application of a conceptual runoff model for scandinavian catchments. - LUND Département of Water Resources engineering, 1976, 134 p.
- BONNET (M.). - Méthodologie des modèles de simulation en hydrologie. - Thèse : Sciences : Nancy : 1978
- CHEMIN (J.). - Essai d'application d'un modèle mathématique conceptuel au calcul du bilan hydraulique de l'aquifère karstique de la source du Lez (région Nord de Montpellier). - Thèse : 3e cycle : Géologie appliquée : Montpellier : 1974.
- CORMARY (Y.), GUILBOT (A.). - Modèles déterministes de relations pluies-débits sur la Sioule. - Montpellier, Laboratoire national d'hydraulique, Groupe Hydrologie, 1969, 35p.

- CORMARY (Y.), GUILBOT (A.). - Etude des relations pluie-débit sur trois bassins versants expérimentaux. - Montpellier, Laboratoire d'hydrologie et d'aménagement des eaux, 1973, 33 p.
- COTTEZ (S.). - Applications hydrogéologiques de l'analyse des hydrogrammes de cours d'eau. Note préliminaire. - Orléans, B.R.G.M., 1967, rapport DS 67 A 42.
- DEGALLIER (R.). - Un modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains : le modèle SIMERO. - Bulletin BRGM, section III, n°3, 1972, pp. 23-42.
- GIRARD (G.). - Un modèle mathématique pour crues de fonte de neige et son application au Québec. - Cahiers de l'ORSTROM, série hydrologie, vol. 7, n°1, 1970, pp. 3-36.
- GIRARD (G.). - Essai pour un modèle hydropluviométrique conceptuel et son utilisation au Québec. - Cahiers de l'ORSTROM, série hydrologie, vol. 7, n°2, 1970, pp. 85-116.
- GIRARD (G.), MORIN (G.), CHARBONNEAU (R.). - Modèle précipitation-débits à discrétisation spatiale. - Cahiers de l'ORSTROM, série hydrologie, vol. 9, n°4, 1972, pp. 35-52.
- GUILBOT (A.). - Modélisation des écoulements d'un aquifère karstique (liaison pluie-débit). Application aux bassins de Saugras et du Lez. - Thèse, Université Montpellier, 1975.
- GUILLOT (P.). - Quelques remarques sur l'utilisation des modèles mathématiques pour la prévision en hydrologie et Météorologie. - International Symposium on Mathematical Models in Hydrology, juillet 1971, Varsovie.
- MAZENC (B.). - Etude de la recherche des aquifères fissurés de Bretagne. - Rapport de stage effectué au B.R.G.M., mai-juillet 1978.
- MERO (F.). - The MMO8 hydrometeorological simulation system. Basic concepts and operators guide. - Tel Aviv, avril 1978, 18 p.
- MOUGIN (G.), DUJARDIN (J.M.). - Les modèles déterministes de transformation précipitations-débits. - La Houille Blanche, n°4, 1972, pp. 303-310.

- LOUDIN (M.F.). - Séparation des composantes hydrologiques d'un cours d'eau. Application à l'Ellée (Bretagne Sud). - Thèse, 3e cycle, Paris, 1979.
- RAMBERT (B.). - Application de l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau à l'évaluation de l'écoulement souterrain. Rapport préliminaire. -Orléans ; BRGM, 1971, Rapport 71 SGN 389 HYD.
- RAMBERT (B.). - Application de l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau à l'évaluation de l'écoulement souterrain. Rapport n°2. Examen critique des divers procédés d'analyses utilisés sur les hydrogrammes de dix cours d'eau français. - Orléans, BRGM, 1972, rapport 72 SGN 371 AME.
- ROCHE (M.). - Point de vue matriciel sur un opérateur linéaire de transformation pluie-débit. - Cahiers de l'ORSTOM, série hydrogéologie, n° 2, 1965, pp. 21-37.
- ROCHE (M.). - Les divers types de modèles déterministes. - Cahiers de l'ORSTOM, série hydrologie, vol. 7, n° 4, 1970, pp. 39-65.
- ROSENBERG (M.). - Modèles explicatifs de précipitation et d'écoulement de surface. Etude hydrologique et statistique du régime des cours d'eau d'Israël. - Thèse : Sciences Physique : Grenoble : 1971.
- SAURIN (J.). - Application de deux modèles pluie-débit et d'un modèle pluie-nappe sur le bassin versant de l'Hallue. Application du modèle C.R.E.G. aux bassins de l'Aa, la Canche et la Lys. - Montpellier, Laboratoire d'Hydrologie, 1975, 142 p.
- THIERY (D.). - Application à quatre bassins hydrologiques des méthodes de prévision des étiages par convolution. - Orléans : BRGM, 1978, rapport 78 SGN 621 HYD).
- THIERY (D.), VAUBOURG (P.). - Estimation des ressources en eau souterraine des zones cristallines du Massif Armoricaïn. - 7ème réunion annuelle des sciences de la Terre, 1979, Lyon.
- TIERCELIN (J.R.). - Modèles probabilistes en hydrologie. - La Houille Blanche, n° 7, 1973, pp. 547-552.