

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

**PROJET**  
**DE**  
**FIN D'ÉTUDES**

GC.0369

Titre Campagne de forages au Sine-Saloum  
(réalisation du projet Belge N° 320-4401)

---

Auteur M. BATHILY

Génie CIVIL

Date JUIN 1984

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à adresser nos plus sincères remerciements à Monsieur Robert Montulet, Fonctionnaire dirigeant du projet Belge N° 320-4401, pour toute son assistance sans laquelle il nous serait impossible de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons aussi à remercier vivement :

- Monsieur Abdoulaye Sene, Directeur de l'entretien et de la maintenance au ministère de l'hydraulique, Professeur à l'E.P.T, pour ses conseils et explications très enrichissantes qui nous ont permis de mieux nous orienter.
- Monsieur Mahauden le géologue du projet Belge
- Monsieur Suez, technicien au ministère de l'hydraulique affecté au projet Belge, qui nous a beaucoup aidé.
- Monsieur Dieng hydrogéologue à la DEH.
- Sans les nommer, nous remercions.
  - les employés de Franki-Forages
  - les ingénieurs de la DEH et de la DHUR qui ont bien voulu nous fournir de pertinents documents.

## SOMMAIRE

A travers ce projet de fin d'études intitulé "Campagne de forages au Jine - Saloum, nous nous sommes proposés d'analyser principalement les aspects techniques de la réalisation d'un forage d'exploitation mais aussi de leur interdépendance avec les aspects économiques et sociaux.

Cette analyse s'articule sur les points suivants :

- Exécution d'un forage d'exploitation au Rotary et à la bentonite
- Expérimentation des forages d'eau par les essais de puits.
- Rendement et performance des ouvrages.
- Qualité de l'eau des forages.
- Dimensionnement des forages d'exploitation.

Les forages qui illustrent cette étude sont ceux de Ouadiour, NGOYE, Djiffer et Djilor réalisés dans le cadre du projet Belge N° 320 - 4401 et captant la nappe captive des sables du Néostriézien au Sénégal.

Des visites hebdomadaires sur les chantiers nous ont permis de suivre les opérations et de recueillir les résultats des sondages. Pour chaque ouvrage étudié, nous donnons les coupes géologique et technique, les résultats des essais de débit et de l'analyse chimique de l'eau, la granulométrie à Ouadiour et Djiffer. Les cuttings des autres puits étaient encore humides.

# TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>Chapitre I</u> <u>Généralités</u>	3
1.1 Principaux aquifères du pays	4
1.2 Historique des forages du Sénégal	5
1.3 Répartition régionale des forages	6
1.4 Besoins en eau du Sénégal	6
1.5 Situation hydraulique au Sine-Saloum	8
<u>Chapitre II</u> <u>Technique de forage</u>	10
2.1 Appareils de forage	10
2.2 Types d'appareils de forage	10
2.3 Composition de l'atelier de forage	10
2.4 Description d'un appareil rotatif - "Fairing 2100"	10
2.4.1 d'outil ou Rock bit	13
2.4.2 des manes-tiges	13
2.4.3 Les tiges	13
2.4.4 La lige carrée	13
2.4.5 La tour ou derrick.	14
2.5 Efforts sollicitant la ligne de monde - point neutre	14
2.5.1 Suspension de la ligne de monde	14
2.5.2 d'outil repose sur le sol.	14

2.6	Avancement de l'outil	15
2.6.1	Poids sur l'outil	15
2.6.2	Débit de circulation de la boue	15
2.6.3	Vitesse de rotation	16
2.7	Le Fluide de circulation	16
2.7.1	Nature de la boue	16
2.7.2	de cake	16

<u>Chapitre III</u>	<u>Realisation d'un forage d'exploitation (Procédé Rotary)</u>	18
	Par Franki Forages - projet Belge 320-4401	
3.1	Phases successives d'exécution	18
3.2	Cimentation de l'espace annulaire 14" 3/4 - 10" 3/4	19
3.2.1	Opération de cimentation	19
3.2.2	Contrôle de l'opération de cimentation	20
3.3	Carottage électrique	20
3.4	Gravillonnage par circulation inverse	20
3.5	Cimentation de l'espace annulaire 8" 1/2 - 4"	21
3.6	Lavage à l'hexaméta phosphate de sodium	21
3.7	Pompage de développement - Air lift	23
3.7.1	Principes	23
3.7.2	Méthode	23
3.8	Essai de sable	23
3.9	Réception provisoire	24

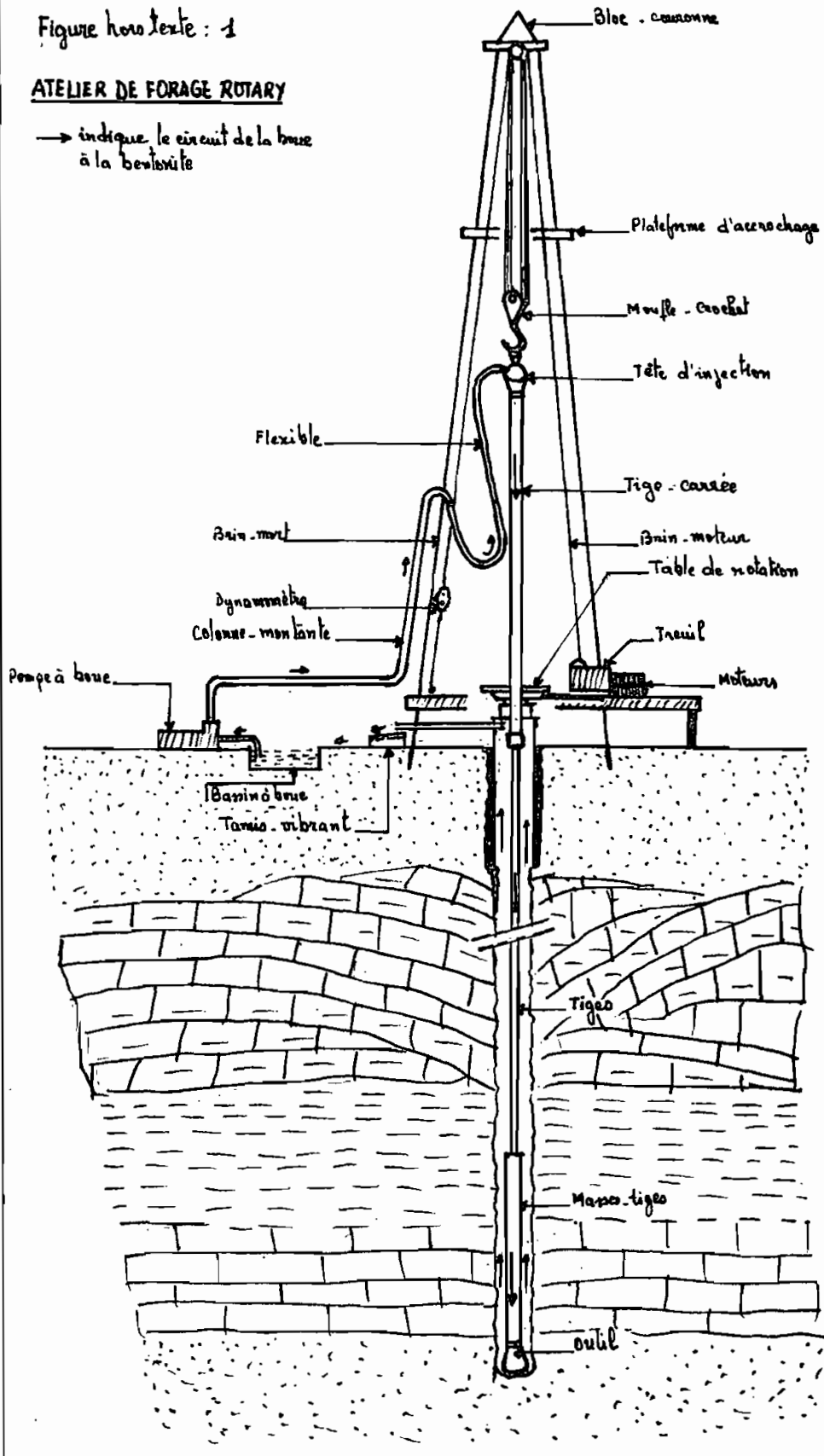
3.10	Difficultés rencontrées.	24
3.10.1	Pertes de boue - réalisation d'un bouchon	24
3.10.2	Forage au bord de la mer	24
3.11	Présentation des forages	26
<u>Chapitre II</u>	<u>Expérimentation des forages</u>	29
4.1	Essais de puits	29
4.2	Essais de pompage	29
4.3	Exécution des essais de puits	29
4.4	Mesures relevées au cours des essais de puits	31
4.5	Validité des essais de puits	34
<u>Chapitre V</u>	<u>Interprétation graphique des essais de puits</u>	35
5.1	Support théorique de l'interprétation graphique	35
5.2	Courbes rabattement spécifique - rabattement	36
5.3	Efficacité et Performance	42
5.4	Courbes rabattement - débit	44
5.5	Courbes rabattement - débit spécifique.	45
5.6	Pertes de charges anormales	46
<u>Chapitre VI</u>	<u>Résultats des analyses chimiques.</u>	59
6.1	Validité des résultats	59
6.2	Qualité des eaux.	61
6.3	Dangers de la fluoration	67

<u>Chapitre VII</u>	<u>Dimensionnement des forages</u>	70
7.1	Choix de l'équipement des forages.	70
7.1.1	Nature et dimensions des terrains	70
7.2	Choix proprement dit de l'équipement	73
<u>Conclusion</u>		79
<u>Discussion et recommandations</u>		81
<u>Annexes</u>		
A1	Interprétation graphique des essais de puits	83
A2	Exemple de choix du gravier et de la Crépine	84
A3	Carottage électrique	85
A5	Coupes (technique et géologique) présumées du forage de Dji Bor	
A4	Evaluation du coût du forage de Ouadiour	88
A6	Forage - puits	92
<u>Bibliographie</u>		93

Figure hors texte : 1

**ATELIER DE FORAGE ROTARY**

→ indique le circuit de la boue à la bestiole





## INTRODUCTION

A l'instar de tous les pays du Sahel, le Sénégal subit les effets douloureux de la sécheresse. Le déficit pluviométrique enregistré ces dernières années se traduit sur le plan socio-économique par une faible production agricole et un ravitaillement en eau potable difficile, en milieu rural surtout.

Au point de vue hydrologique, la rareté des pluies a causé une baisse du plan d'eau des nappes de surface et des nappes phréatiques. Il s'en est suivi un assèchement de la plupart des puits traditionnels qui exploitent ces nappes phréatiques.

Pour assurer une alimentation en eau pérenne aux ruraux, les autorités sénégalaises ont lancé une vaste campagne d'exécution de forages avec l'aide de pays étrangers.

Ainsi est né, de la coopération belgo-sénégalaise, le projet de réalisation de neuf (9) forages dits équipés, de six (6) forages-puits<sup>(1)</sup> et d'un forage dit légèrement équipé, dans la région du Fatick principale-ment et celle de Louga.

L'exécution de ce projet est confiée à la société Belge FRANKI, pour un montant total des travaux de deux cents cinquante millions de (250 000 000) francs Belges et un délai d'exécution de huit cents trente (830) jours de calendrier.

A travers ce projet de fin d'études, nous nous sommes proposés

<sup>2</sup>  
de faire un suivi de cette "campagne de forages" au "Jine-Saloum".

D'emblée il faut faire la différence entre forages d'exploitation et forages d'étude. Ces deux types de forage sont liés, mais ne sont pas d'égale valeur scientifique.

Dans le premier cas, le but poursuivi est la bonne réalisation technique de l'ouvrage aux moindres coûts et délais.

Le deuxième cas, d'un objectif beaucoup plus ambitieux, tente de faire une étude hydrogéologique qui débouchera sur l'établissement d'un programme d'exploitation rationnelle des eaux souterraines.

Nous situant dans le premier cas, notre étude se limitera à la technique des forages d'exploitation et à leur expérimentation.

Chaque forage est un cas d'espèce et doit posséder une fiche d'identification indiquant les coupes géologique et technique, les essais de puits, la courbe granulométrique du terrain aquifère et l'analyse chimique de l'eau.

L'appareil de forage est une sondeuse portable "Failing 2500". Il est du type rotary et utilise de la boue à la bentonite.

Capacité du "Failing-2500" : - 800 m avec tige 3" 1/2

- 1100 m avec tige 2" 7/8

- 1500 m avec tige 2" 3/8

(1) voir Annexe A6

## CHAPITRE 1

### GENERALITES

DEH : Direction des études hydrauliques.

BIRH : Bureau d'inventaire des ressources hydrauliques.

DHUR : Direction de l'hydraulique urbaine et rurale

OMS : Organisation mondiale de la santé

## 1.1 PRINCIPAUX AQUIFERES DU PAYS

On peut distinguer les nappes du quaternaire, du continental terminal (CT), de l'éocène, du paléocène et du maestrichtien.

### Quaternaire (Plan N° 5)

On y trouve :

- la nappe des alluvions du fleuve Sénégal,
- la nappe des sables du littoral nord de Saint Louis à Cayar.
- la nappe infra-basaltique de la presqu'île du Cap-vert,
- les lentilles d'eau douce des îles de l'embouchure du Saloum et de la basse Casamance.

### Continental Terminal (CT).

Le plan N° 5 montre les zones où le CT dispose d'un aquifère d'eau douce d'une épaisseur compatible à une exploitation par pompage.

Cette même figure met en relief l'existence de deux régions différentes séparées par l'isopièze zéro (0) m.

À l'Est de l'isopièze 0, l'aquifère accessible à une infiltration résiduelle peut contenir des réserves renouvelables (RE.RE)

À l'Ouest de l'isopièze 0, le plan d'eau devient profond et n'est plus atteint par l'infiltration résiduelle. Tout de même, l'aquifère dispose de réserves favorables à une exploitation.

### Eocène

Le plan N° 6 montre les limites des marno-calcaires éocènes susceptibles

d'emmagasiner une nappe d'eau potable, exploitable à faibles débits.

En dehors des marno-calcaires, le seul aquifère important est constitué par les calcaires karotiques du lutétien.

### Paléocène

Le plan n° 7 montre les limites des nappes des marno-calcaires paléocènes.

En dehors des régions de N'bour, des calcaires paléocènes du Horlet, de N'diass, des calcaires du compartiment de Sébikhotane l'aquifère est captif.

### Maestrichtien

Le plan n° 8 montre les limites de la nappe profonde des sables maestrichtiens. L'aquifère est constitué de sables, d'argiles ou d'intercalations de sables et d'argiles. La profondeur de son toit varie entre 100 et 500 m.

Les réserves mobilisables sont évaluées à 500 000 m<sup>3</sup>/j pour une période égale à 200 ans.

## 1.2 HISTORIQUE DES FORAGES DU SENEGAL.

("Repertoire des forages d'eau du Sénégal 1982", DEH)

1904 : premier forage exécuté ; 427 m de profondeur.

1923-1950 : exécution de 30 à 40 ouvrages.

A partir de 1950 le rythme d'exécution est de 10 forages/an.

1960 : 160 forages sont dénombrés.

1973 : 310 forages sont dénombrés.

1973, point culminant de la sécheresse, prise de conscience des pays sahé-liens de leur vulnérabilité vis à vis des aléas climatiques.

1974 : accélération du rythme d'exécution porté à 60 forages/an.

1977-1979 : 100 forages/an

1980-1982 : 60 forages/an

1982 : le nombre de forages répertoriés (exploitation + étude) est supérieur à 1000, dont 334, soit sensiblement le tiers, ont atteint la nappe profonde du maestrichtien.

### 1.3 REPARTITION REGIONALE DES FORAGES (BIRH - DEH - MINISTERE DE L'HYDRAULIQUE)

Voir tableau 1.1

### 1.4 BESOINS EN EAU DU SENEGAL (CONSEIL NATIONAL DU 31 JUILLET 1982. "POLITIQUE GENERALE DE L'HYDRAULIQUE AU SENEGAL".)

La population du Sénégal, estimée à 5,5 millions d'habitants, se répartit comme suit :

22% dans la région du Cap-vert;

18% dans les agglomérations urbaines de l'intérieur;

60% dans le monde rural.

En 1982, la consommation en eau du Sénégal est estimée à 220 000 m<sup>3</sup>/j soit 40 l/j/hab.

La région du Cap-vert, à elle seule, consomme 130 000 m<sup>3</sup>/j dont 80% proviennent de forages et le reste du lac de Guiers.

TABLEAU 1.1 : REPARTITION REGIONALE DES FORAGES (REPertoire des forages" - BIRH - D.E.H)  
1982

REGIONS	FORAGES	FORAGES_PUITS	PIEZOMETRES	FORAGES.PETROLIERS	TOTAL	SUPERFICIE (Kmc <sup>2</sup> )	POPULATION
CAP_VERT	71	-	77	27	175	550	975 933
CASAMANCE	50	-	76	9	135	28350	737 256
DIORBEL	50	30	6	1	87	4355	426 306
FLEUVE	62	43	32	1	138	44 117	521 695
SENEGAL-ORIENTAL	68	8	2	1	79	59 602	290 288
SENE-SALOUM	111	39	21	5	176	23 945	1 013 488
THIES	298	20	79	3	400	6601	683 176
LOUGA	94	48	24	7	173	29188	420 599
TOTAL	804	118	317	54	1363	196 708	5 703 017

**TABLEAU 1.1 : REPARTITION REGIONALE DES FORAGES (REPERTOIRE DES FORAGES" BIRH - D.E.H )**  
1982

REGIONS	FORAGES	FORAGES - PUTTS	PIEZOMETRES	FORAGES-PETROLIERS	TOTAL	SUPERFICIE (km <sup>2</sup> )	POPULATION
CAP_VERT	71	-	77	27	175	550	975 933
CASAMANCE	50	-	76	9	135	28350	737 256
DIORBEL	50	30	6	1	87	4355	426 306
FLEUVE	62	43	32	1	138	44 117	521 695
SENEGAL. ORIENTAL	68	8	2	1	79	59 602	290 288
SINE. SALOUM	111	39	21	5	176	23945	1 013 488
THIES	298	20	79	3	400	6601	683 176
LOUGA	94	48	24	7	173	29188	420 599
TOTAL	804	118	317	54	1363	196 708	5 703 017



TABLEAU 1.1 : REPARTITION REGIONALE DES FORAGES (REPertoire des forages" - BIRH - D.E.H)  
1982

REGIONS	FORAGES	FORAGES - Puits	PIEZOMETRES	FORAGES-PETROLIERS	TOTAL	SUPERFICIE (km <sup>2</sup> )	POPULATION
CAP_VERT	71	-	77	27	175	550	975 933
CASAMANCE	50	-	76	9	135	28350	737 256
DIOURBEL	50	30	6	1	87	4355	426 306
FLEUVE	62	43	32	1	138	44 117	521 695
SENEGAL ORIENTAL	68	8	2	1	79	59 602	290 288
SENE. SALOUM	111	39	21	5	176	23 945	1 013 488
THIES	298	20	79	3	400	6601	683 176
LOUGA	94	48	24	7	173	29188	420 599
TOTAL	804	118	317	54	1363	196 708	5 703 017

37 agglomérations urbaines de l'intérieur sont desservies par la SONES, pour une production journalière de  $40\,000\text{ m}^3$  dont 74% proviennent de forages et puits et le reste, du lac de Guiers.

Le secteur rural dispose de 1050 captages pérennes qui produisent  $23\,000\text{ m}^3/\text{j}$ ,  $365/\text{an}$ ; de 40000 puits (construction artisanale) produisant  $120\,000\text{ m}^3/\text{j}$  à  $100\,000\text{ m}^3/\text{j}$  selon les périodes. La consommation journalière en zone rurale est de  $7\text{ l/hab}$ .

En l'an 2000, les Sénégalais consommeront  $650\,000\text{ m}^3/\text{j}$ . Le secteur rural verra sa consommation portée à  $170\,000\text{ m}^3/\text{j}$ , sur une base de  $35\text{ l/hab/jour}$ .

### 1.5 Situation hydraulique au fine-sabum.

1982 population rurale 863000 habitants; consommation  $5900\text{ m}^3/\text{j}$   
population urbaine 178000 habitants; consommation  $7100\text{ m}^3/\text{j}$

2000 population rurale 1255000 habitants; consommation  $44\,000\text{ m}^3/\text{j}$   
population urbaine 296000 habitants; consommation  $20\,000\text{ m}^3/\text{j}$

La moyenne annuelle des pluies s'établit entre 700mm au Nord et 1000mm au Sud.

Malgré cette situation pluviométrique favorable, les ressources en eau propres à la consommation sont rares.

Les eaux superficielles du fine et du sabum sont excessivement salées; à l'ouest de la région, l'eau du macrobichien est fluorée et salée. Les cartes des au-

- Les aquifères ne sont pas bien connues.

N.B Parmi les principaux aquifères il faut ajouter celui des arènes granitiques du socle au Sénégal-oriental.

Les plans N° 5, 6, 7 et 8 sont tirés du document "Synthèse des études hydrauliques - Etat des ressources en Eau" D.E.H - B.I.R.H

Etudes cofinancées par l'USAID.

D'après ce même document

- L'éocène peut être exploité à un débit de  $25000 \text{ m}^3/\text{j}$  pendant 100 ans pour un abaissement de 10 m de la surface piézométrique.

- Le Paléocène peut être exploité à un débit de  $10000 \text{ m}^3/\text{j}$  pendant 100 ans pour un abaissement de la surface piézométrique de 40 m.

2.1. APPAREILS DE FORAGE

Les organes principaux d'un appareil de forage sont :

un outil pour percer;

un moteur d'entraînement de l'outil;

un moyen de suspension et de levage;

un système de transmission du mouvement à l'outil;

un moyen pour maintenir les parois du trou de sonde;

un moyen d'évacuation des débris de roches.

2.2. TYPES D'APPAREILS DE FORAGE

Suivant la constitution des organes principaux, on peut distinguer divers types d'appareils à forer, le résumé est donné dans le tableau 2.1

2.3. COMPOSITION DE L'ATELIER DE FORAGE

(Voir Figure hors texte :1)

L'atelier de forage au rotary est constitué des éléments suivants:

Un appareil à forer proprement dit

Une pompe à boue

Un tamis vibrant

Types d'appareils	Outils	Mouvement de l'outil	Système de transmission	Système de suspension et de levage	Système d'évacuation des débris de roche	Système d'entraînement de l'outil	Maintien des parois du trou
Battage ou Percussion	Lame en biseau	Alternatif de translation, chute libre	Câble - tiges pleines - tiges creuses	Tour	Cuillères - circulation d'eau	Balancier	- Tubage - Casing
Rotation	Couronne à diamant - prismes	Rotation continue lente	Tiges creuses	Derrick	Circulation d'eau ou de boue sous pression	Moteur électrique ou à explosion	Boue
Rotary	Trépan à molettes	Rotation continue rapide	Tiges creuses	Derrick	Circulation de boue sous forte pression	Moteur électrique ou à explosion	Boue
Turboforage	Trépan à molettes	Rotation continue rapide	Moteur directement accouplé à l'outil	Derrick	Circulation de boue à haute pression	(turboforeuse) Turbine hydraulique actionnée par une injection de boue	Boue
Sondage à air comprimé	Trépan à molette	Rotation	Tiges creuses	Derrick	Circulation d'air sous pression	Moteur électrique ou à explosion	Tubage

**TABLEAU 2.1 : APPAREILS DE FORAGE**

Deux bassins de décantation de la boue

Un groupe électrogène

Un atelier de réparation mécanique

Une chambre mobile (bureau et laboratoire)

Une citerne à eau

Des Engins lourds pour le transport du matériel

Un stock de ciment

Un stock de gravier

Un stock d'hexamétaphosphate de sodium

Un stock de bentonite

Des tubages et crépines

#### 2.4 DESCRIPTION D'UN APPAREIL ROTARY LA SONDEUSE PORTABLE "FALING. 2500"

On distingue de bas en haut :

d'outil ou rockbit

la ligne de sonde qui comprend les masses tiges et les tiges

la table de rotation  
la tige carrée ou Kelly

la tête d'injection

de derrick ou tour

de flexible

#### 2.4.1 L'outil ou rock bit.

Il existe sur le chantier plusieurs outils, de diamètre différent ( $18''\frac{1}{2}$ ,  $14''\frac{3}{4}$ ,  $8''\frac{1}{2}$ ). ce sont des outils à molettes (tricone) à axe incliné, montés sur des roulements à billes.

#### 2.4.2 des masses-tiges (drill-collars).

des masses-tiges sont des tubes cylindriques à paroi épaisse. Elles sont faites d'un acier, dont la charge de rupture est supérieure à  $80 \text{ kg/mm}^2$ . leur fonction principale est d'appliquer sur l'outil le poids nécessaire à son avancement et, d'empêcher par la même occasion le train de tiges de travailler en compression.

#### 2.4.3 des tiges (drill-pipes).

ce sont des tubes cylindriques en acier de limite élastique variant entre  $20$  et  $53 \text{ kg/mm}^2$ .

Elles ont pour rôle de communiquer le mouvement de rotation à l'outil et servent, en même temps, de conduite à la circulation de la boue.

des tiges sont conçues pour travailler uniquement en traction et en torsion.

#### 2.4.4 la tige carrée (Kelly).

C'est l'élément supérieur du train de tiges, en contact permanent avec la table de rotation.

### 2.4.5 du tour ou derrick.

Haute de 16 mètres environ, le derrick est fait d'un treillis métallique. Il facilite la suspension et le levage de la ligne de sonde par l'intermédiaire d'un treuil muni d'un câble de diamètre égal à  $3/4$ " de câble comprend un brin mort et un brin moteur et peut supporter un poids maximal de 60t.

## 2.5 EFFORTS SOLLICITANT LA LIGNE DE SONDE. POINT-NEUTRE.

La ligne de sonde est constituée des tiges et des masses-tiges.

Deux cas peuvent se présenter, en dehors de tout accident de trou est rempli de boue.

### 2.5.1 Suspension de la ligne de sonde.

Dans ce cas toute la ligne de sonde travaille en traction, la tige supérieure étant la plus sollicitée, limite le poids total du train de tiges à sa contrainte de rupture.

### 2.5.2 L'outil repose sur le sol.

Comme dit plus haut, le train de tiges ne doit pas travailler en compression, et pour le soustraire de cette dernière sollicitation, le point neutre doit se situer dans le train de masses-tiges au moment où l'outil repose sur le sol. Le point neutre est l'endroit où les contraintes de traction et de compression s'équilibrent.



L'avancement de l'outil dépend :

- du type de terrain,
- du poids sur l'outil,
- du débit de circulation de la boue,
- de la vitesse de rotation.

### 2.6.1 Poids sur l'outil.

Il dépend de la nature du terrain rencontré (dur ou tendre).

Pour contrôler le poids sur l'outil, le foreur dispose d'un dynamomètre ou Martin Decker qui donne la tension du brin mort. Cette tension n'est rien d'autre que le poids apparent de la ligne de sonde ou poids de la portion en traction.

Connaissant le poids qu'on veut appliquer sur l'outil et le poids réel de toute la ligne de sonde, on en déduit le poids à lire sur le Martin Decker. Rappelons que ce poids sur l'outil doit être une partie de celui des masses-tiges.

### 2.6.2 Débit de circulation de la boue.

Il doit être compatible à la nature du terrain foré. Dans les sables, par exemple, l'avancement de l'outil est rapide et les cuttings s'accumulent au même rythme; le débit doit être alors assez grand pour permettre une évacuation correcte des débris de roche.

### 2.6.3 Vitesse de rotation.

La vitesse de rotation de l'outil est fonction de la nature du terrain, mais aussi, elle doit être limitée pour éviter une usure des dents de l'outil lorsque celui-ci porte une charge importante.

Une vitesse moindre de l'outil, permet une meilleure désagrégation de la roche.

## 2.7 LE FLUIDE DE CIRCULATION (dans les forages Belges)

Il s'appelle boue et remplit d'importantes fonctions en forage:

- Maintien des parois du trou foré
- Evacuation des débris de roche ou cuttings
- lubrifier et refroidir l'outil
- Renseigner sur les zones à fissures importantes
- Faciliter le gravillonnage et la cimentation
- Empêcher l'irruption des eaux artésiennes

### 2.7.1 Nature de la boue

La boue est une suspension d'un produit colloïdal, la bentonite, dans l'eau.

### 2.7.2 Le cake.

Sous l'effet de la pression de la colonne de boue, généralement supérieure à celle des eaux souterraines, il se passe une filtration de fluide de circulation par les parois du trou de sonde. Les matières colloïdales en suspension

se déposent et consolident la formation. Le revêtement ainsi formé est appelé cake.

Les caractéristiques de la boue à la bentonite sur lesquelles le foreur doit agir constamment sont la densité, la viscosité et le pH.

La densité se mesure à l'aide de la balance Baroid qui en donne une lecture directe. Pour remédier à une densité trop forte ou trop faible, on ajoute respectivement de l'eau ou de la bentonite.

La viscosité se mesure à l'aide de l'entonnoir Marsh. Le temps mis pour remplir <sup>un récipient</sup> de volume connu (1,5l), donne directement la viscosité Marsh.

Le pH est déterminé en utilisant des papiers colorimétriques.

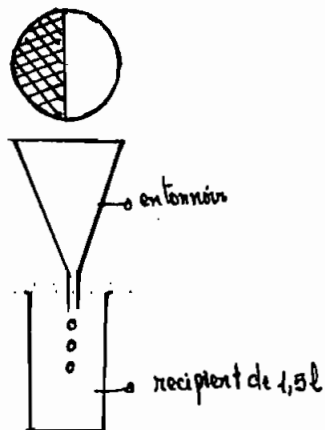


Figure 2.2 entonnoir Marsh

#### Mesure de la viscosité Figure 2.2

1. remplir le récipient de 1,5l.
2. verser dans l'entonnoir en bouchant avec le doigt l'orifice inférieur.
3. laisser l'entonnoir se vider dans le récipient en prenant le soin de chronométrer le temps de vidange, qui correspond exprimé en secondes à la viscosité.

Les caractéristiques de la boue peuvent varier avec le type de terrain.

On a constaté, sur le chantier, que la viscosité variait entre 32 et 40, tandis qu'une densité de 1,12 était fréquente.

3.1 PHASES SUCCESSIVES D'EXECUTION.

Installation de l'atelier de forage sur le site.

Forage du tube guide en 18" <sup>1</sup>/<sub>2</sub>; tubage en 16"; cimentation de l'espace annulaire.

Forage en 14" <sup>3</sup>/<sub>4</sub> de la chambre de pompage; mesure de la déviation et diamétrage; tubage en 10" <sup>3</sup>/<sub>4</sub>; cimentation de l'espace annulaire.

Le reste du forage est exécuté en 8" <sup>1</sup>/<sub>2</sub>; mesure de déviation et diamétrage suivi du carottage électrique.

Descente de la colonne de 4" munie de crépine de cimentation et de crépine de production.

Gravillonnage par circulation inverse.

Cimentation de l'espace annulaire 8" <sup>1</sup>/<sub>2</sub> - 4".

Lavage à l'hexamétaphosphate de sodium

Pompage de développement à l'air lift.

Essais de puits - prélèvement d'échantillon d'eau pour analyse chimique.

Essai de sable.

Réception provisoire du forage.

Évaluation du coût du forage (l'annexe A4 donne une illustration de cette étape avec les quantités réellement exécutées sur le site de Ouadimur).

## 3.2 CIMENTATION DE L'ESPACE ANNULAIRE $14^{3/4}$ - $10^{3/4}$

19

La cimentation répond à un double objectif :

- Rendre étanche l'espace annulaire pour éviter la contamination de la nappe exploitée, par celles qui se trouvent au dessus, et la pollution par les eaux de surface.
- Protéger (contre l'action corrosive) le tubage, et l'ancrer solidement dans le terrain.

### 3.2.1 Opération de cimentation

Elle commence par la détermination du volume de laitier de ciment à injecter dans l'espace annulaire.

Pour une densité donnée de laitier et du volume précédent, on peut, à l'aide des abaques dans le "formulaire du foreur", déterminer le poids de ciment et le volume d'eau à mixer.

La figure 3.1 indique le déroulement de l'opération.

Le mélange ciment-eau est fait dans un mixeur puis envoyé par pompage dans le tubage, rempli de boue et muni d'un caplet-antiretour à bille à sa base. Le laitier est poussé vers l'espace annulaire par un volume de boue égal au volume du tubage. Si l'opération s'est bien déroulée on doit voir apparaître en surface le laitier.

Après la prise du ciment, on peut continuer à forer.

### 3.2.2 Contrôle de l'opération de cimentation.

Pour s'assurer du remplissage de tout l'espace annulaire par le laitier, on effectue un contrôle par thermométrie. La réaction exothermique entre le ciment et l'eau provoque une élévation de température que l'on peut mesurer à l'aide d'une sonde thermoélectrique.

Les zones non cimentées pourront être reconnues par leur température relativement basse.

## 3.3 CAROTTAGE ELECTRIQUE

Les échantillons de terrain prélevés sur le tamis vibrant et de diverses profondeurs ne donnent pas de renseignements hydrogéologiques assez précis pour décider de la zone à capter.

Pour remédier à cette insuffisance, on effectue un carottage électrique. Les résultats de ce sondage sont les diagrammes de potentiel spontané (PS) de résistivité et de gamma ray. (Voir annexe A3)

## 3.4 GRAVILLONNAGE PAR CIRCULATION INVERSE

La figure 3.6 donne la courbe granulométrique du gravier utilisé

L'opération consiste à gravillonner l'espace annulaire autour de la crépine. Le déroulement de l'opération est schématisé par la figure 3.2

de gravier est mis en suspension dans une boue circulant suivant un chemin fermé:

La boue est envoyée dans le tubage  $10\frac{3}{4}$ , passe <sup>par</sup> les fenêtres du cône de suspension, longe l'espace annulaire  $8\frac{1}{2} - 4$ ". Arrivée au fond du trou, le gravier se dépose; la boue s'échappe par la crépine de production et remonte par la colonne de travail. L'opération est contrôlée par un manomètre qui indique au fur et à mesure une augmentation de la pression, résultant de la réduction de la section d'écoulement de la boue à travers la crépine.

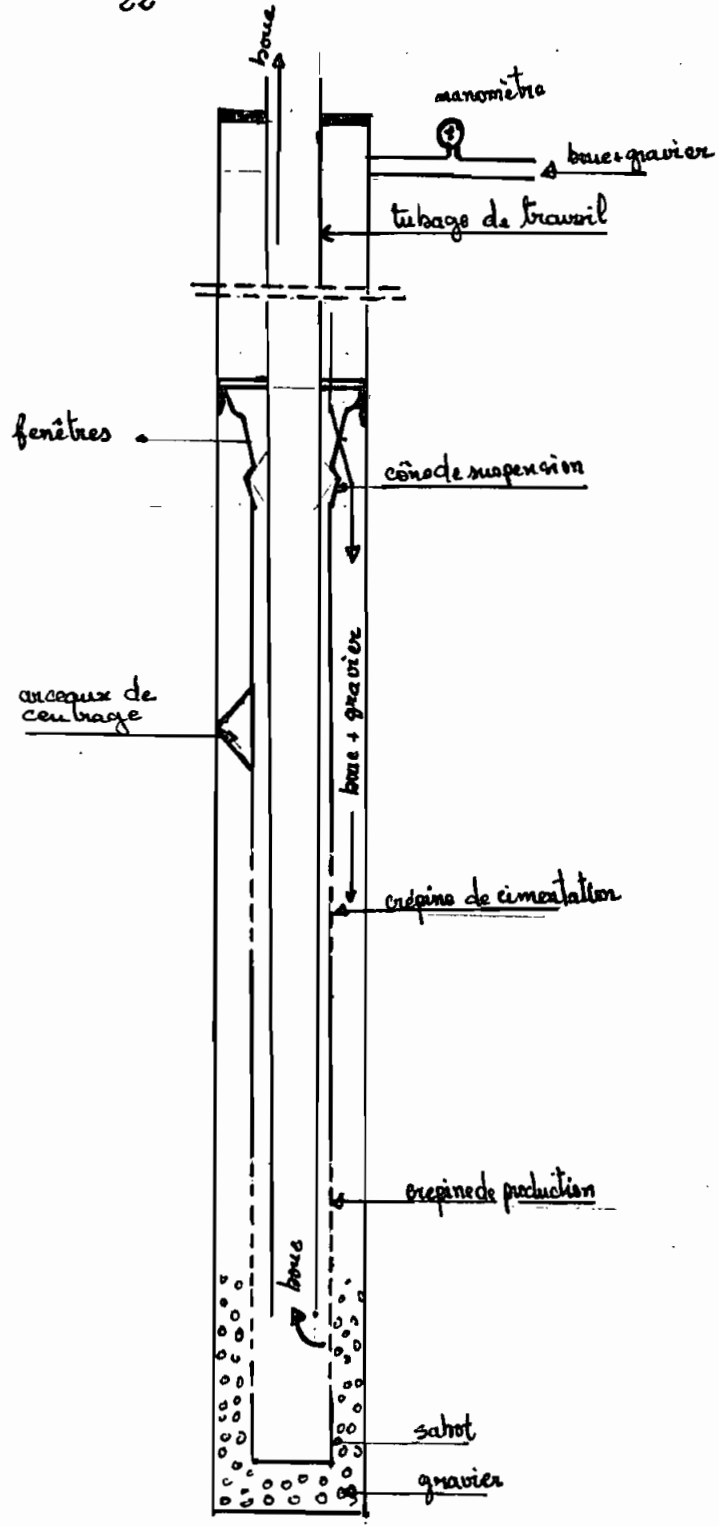
La fin du gravillonnage est indiquée par une augmentation brusque de la pression lue sur le manomètre.

### 3.5 CIMENTATION DE L'ESPACE ANNULAIRE $8\frac{1}{2} - 4$ ".

Pour éviter la contamination de la masse du maestrichtien par celle du Paléocène de qualité moins bonne, l'espace annulaire ( $8\frac{1}{2} - 4$ ") sera cimenté entièrement ou sur sa partie inférieure. La figure 3.3 illustre le déroulement de l'opération.

### 3.6 LAVAGE A L'HEXAMETA PHOSPHATE DE SODIUM.

Avant de procéder au pompage de développement, il faut éliminer le cake par un lavage à l'hexaméta phosphate de sodium.



FIG

FIG 3.2: gravillonnage par circulation inverse

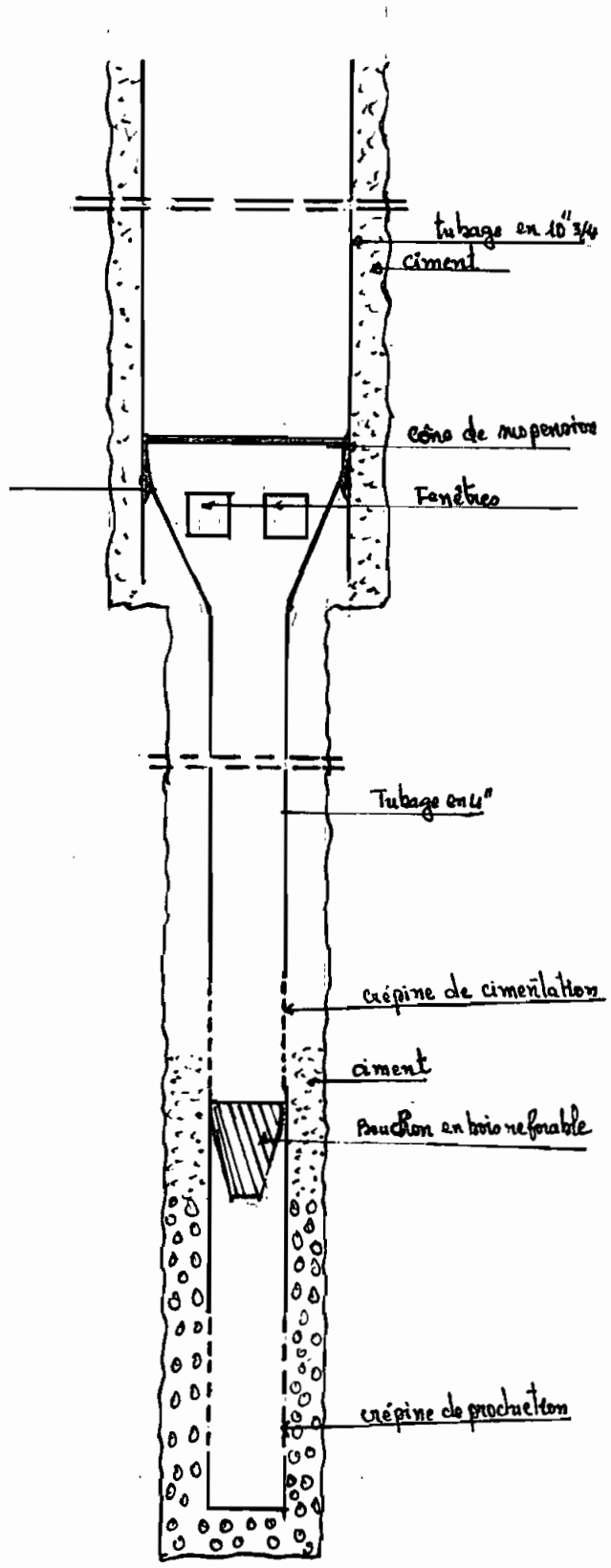


FIG 3.3 : cimentation de l'espace annulaire  
8 1/2 - 4"



### 3.7 POMPAGE DE DEVELOPPEMENT . AIR LIFT

#### 3.7.1 Principes

Cette opération a pour but d'améliorer l'hydraulique du terrain au voisinage de la crépine.

Il s'agit de retirer de la formation aquifère ses éléments les plus fins, d'obtenir un classement optimal des grains pour éviter un étranglement de l'écoulement responsable de l'apparition de la turbulence.

#### 3.7.2 Méthode.

L'opération consiste à alterner les phases de pompage à l'air lift et de soufflage brusque.

On peut considérer que le développement est terminé lorsque l'eau pompée ne contient plus de sable.

### 3.8 ESSAI DE SABLE

L'essai de sable a lieu après les essais de puits.

L'opération consiste à pomper au débit de réception selon la séquence suivante : trois (3) démarrages de trois quarts d'heure (45 mn) suivi chacun d'un arrêt de cinq (5) minutes.

Au cours du pompage, des échantillons d'un litre d'eau sont prélevés et examinés. Les tolérances exigées par le cahier des charges doivent être respectées ; à savoir une tache de sable de diamètre maximal égal à

4m et dont la taille des grains devra être inférieure à 1/10 mm.

### 3.9 RECEPTION PROVISOIRE

Pour que l'ouvrage soit jugé satisfaisant au point de vue d'exécution, il doit fournir sans problème le double du débit d'utilisation et respecter les prescriptions du cahier des charges relative à la tache de sable. Des pertes de charge n'étant pas considérées pour la réception provisoire.

### 3.10 DIFFICULTÉS RENCONTREES

#### 3.10.1 Pertes de boue - Réalisation d'un bouchon.

Des pertes de boue constatées en cours de forage signalent la présence de calcaires fissurés aquifères. Il va de soi que les pertes de boues importantes constituent un danger pour le forage. L'évacuation des cuttings devient difficile et l'outil risque de se coincer. Pour remédier à la situation, on arrête les opérations de forage et en injectant un coulis de ciment, on bouche les fissures. Après la prise du ciment, on peut continuer à forer.

#### 3.10.2 Forage au bord de la mer - Phénomène de la marée.

##### Le cas de Djiffen.

Sur le plan n° 9 on voit que Djiffen se situe à proximité de l'océan atlantique. La figure 3.10.2 montre l'équilibre existant entre les eaux douces du littoral et l'eau de la mer.

Le niveau de la mer n'est pas constant et connaît des variations au cours de la journée suivant la position de la lune et du soleil par

rapport à la terre. Cette fluctuation du niveau des eaux océaniques engendre un écoulement des eaux douces du littoral vers le continent ou vers la mer.

A Djiffar le premier trou exécuté fut abandonné à une profondeur de 49 m à la suite des difficultés rencontrées. A 33 m, il y'a eu des pertes totales et un bouchon en ciment fut réalisé. A 44 m, il y'a eu de nouveau des pertes totales; on injecta encore du laitier de ciment. Le forage fut repris après la prise du coulis, mais à 49 m il y'eut apparition d'une excavation autour du trou.

Toutes ces difficultés doivent être imputées à la prise lente du ciment normal de Rufisque utilisé par rapport à la période de la marée qui est de 12 heures environ.

A 10 m du premier trou abandonné, un autre fut foré mais en utilisant cette fois-ci du ciment à prise rapide (adjuvant 2% de  $CaCl_2$ ).

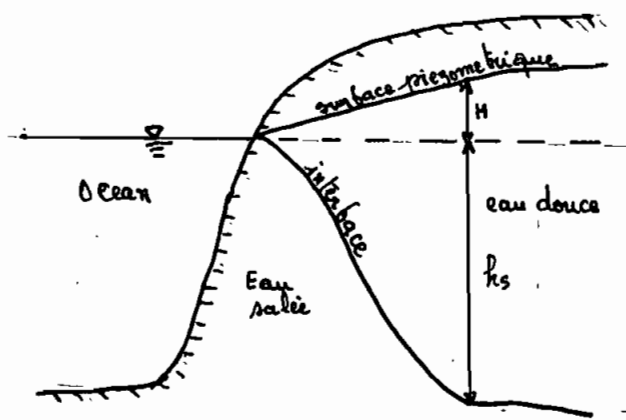


Fig 3.4 Equilibre eau douce - eau salée

Dans "traité pratique des eaux souterraines". Gastony;  $h_s = 40H$  cette loi de Ghyben - Herzberg suppose un équilibre hydrostatique.

3.11 PRESENTATION DES FORAGES

La situation géographique est donnée par le plan N°g pour chaque forage.

Forages	Ouadiour	N'goye	Djiffer	Djilor
Altitude en m (s.n.m)	+28	+7	0	+5
Aquifère capté	Naes	Naes	Naes	Naes
Profondeur totale (m)	334	282,5	315	301
Niveau statique en (s.n.s)	23	6,0	+1,30	1,8
Niveau dynamique en m (s.n.s) au débit de 40 m <sup>3</sup> /h	26,5	23,2	29,8	17,0
Coupe géologique et technique	PN° 1	PN° 2	PN° 3	PN° 4
Début du forage	20-7-83	04-10-83		15-02-84
Fin du forage	22-8-83	03-11-83		03-03-84
Mode d'exhaure	MT	MT	MT	MT
Débit d'utilisation (m <sup>3</sup> /h)	40	40	40	40
Courbe granulométrique	figure 3.5	-	-	figure 3.5
Volume de ciment utilisé bouche de ciment	8,86 m <sup>3</sup> -	8,72 m <sup>3</sup> -	10,2 m <sup>3</sup> (6,4 à 2,2)	9,0 m <sup>3</sup> (+2,5 à 1,5)
Volume de graviers utilisés	1,08 m <sup>3</sup>	1,37 m <sup>3</sup>	1,26 m <sup>3</sup>	1,87 m <sup>3</sup>

s.n.s : par rapport au niveau du sol - PN°1: plan N° 1

s.n.m: par rapport au niveau de la mer

Naes : macbrichtien

MT : moto-pompe

## COURBE GRANULOMETRIQUE

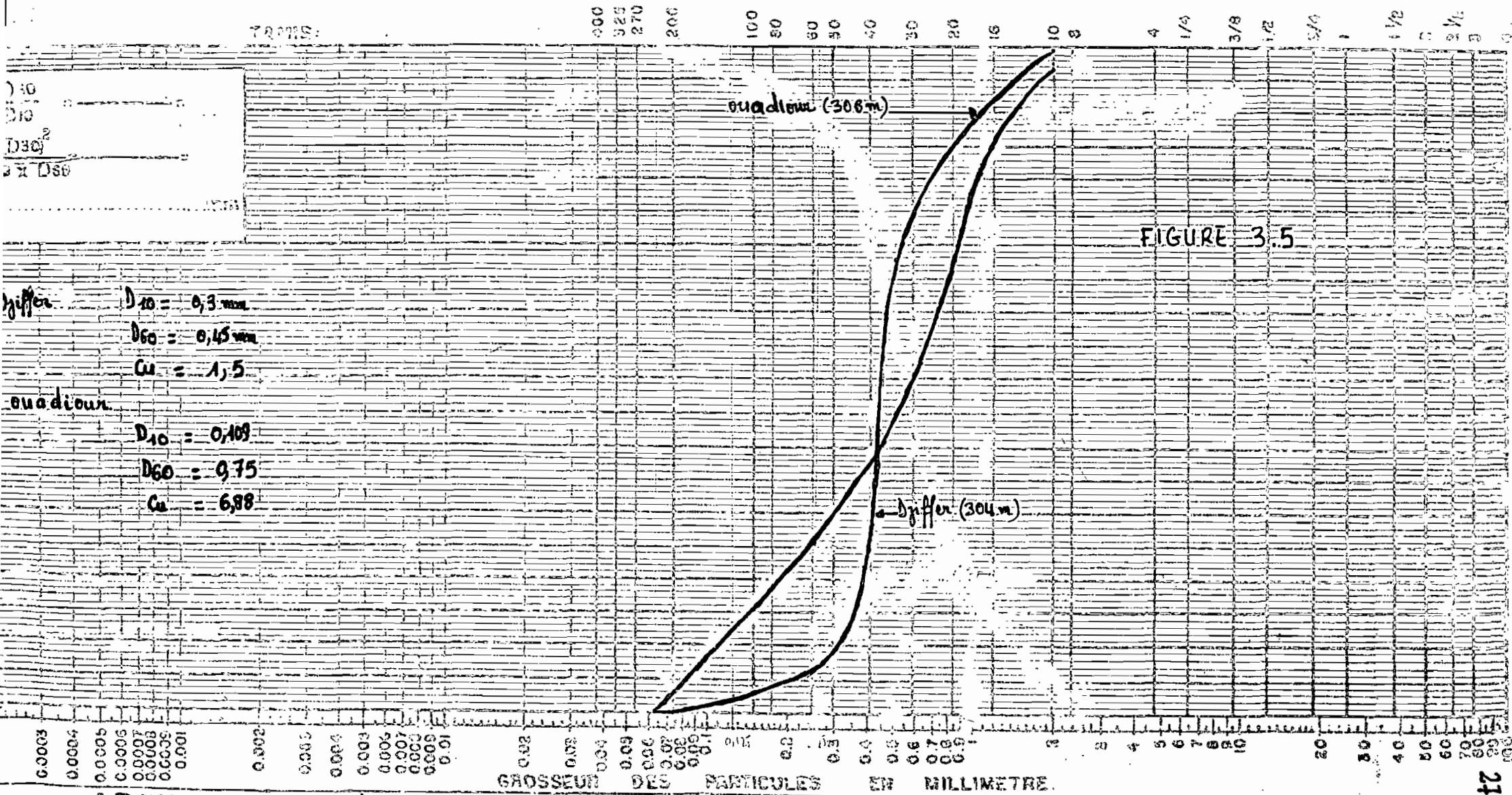


FIGURE 3.5

ARGILES	SILT	SABLE	GRAVIER
---------	------	-------	---------

## COURBE GRANULOMETRIQUE

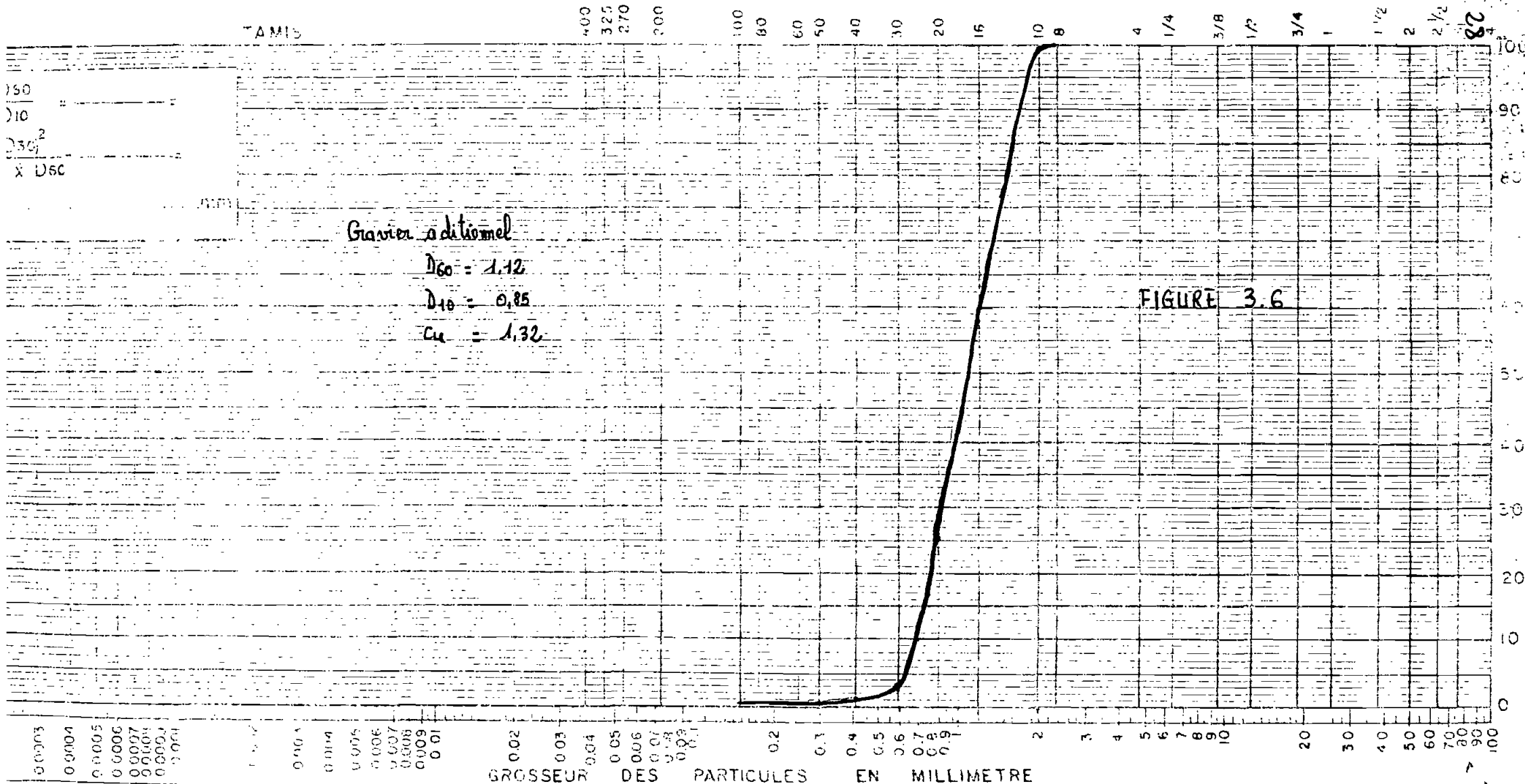


FIGURE 3.6

ARGILE  
LOIDES

SILT

SABLE

GRAVIER

28

L'expérimentation d'un aquifère ou du complexe aquifère-forage est dirigée par application des principes et méthodes du régime d'équilibre, ou ceux du régime de non-équilibre. Tout dépend de l'objectif qu'on s'est fixé.

#### 4.1. Essais de puits.

C'est des essais de courte durée appliqués à des forages d'exploitation sans piézomètre; en vue de déterminer leurs caractéristiques, de s'assurer de leur bonne réalisation technique et de choisir le type de pompe. Les essais de puits sont conduits par application des méthodes d'équilibre (ou régime permanent).

#### 4.2. Essais de pompage.

C'est des essais de longue durée, appliqués généralement à des forages d'étude sur des stations équipées en piézomètres. Le but principal est la détermination des paramètres hydrodynamiques d'un aquifère (coefficient, d'emmagasinement et transmissivité) en vue d'évaluer ses ressources en eau, et de planifier l'exploitation.

#### 4.3. Exécution des essais de puits.

##### Matériel

Matériel de pompage

Pompe à entraînement

Matériel de mesure de débits.

Les débits sont mesurés dans un fût de 300 l.

Instrument de mesure des niveaux dynamiques.

Une sonde électrique.

Déroulement des essais

Les essais de puits sont effectués par paliers de débit. Si  $Q$  est le débit d'utilisation du forage, on réalise les paliers suivants :

$Q/4$  ;  $Q/2$  ;  $3Q/4$  ;  $Q$  ;  $3Q/2$  ;  $2Q$ .

Les niveaux dynamiques sont mesurés à la cadence suivante :

- De 0 à 5 minutes : mesurer toutes les 30 secondes
- De 5 à 10 minutes : mesurer toutes les minutes
- De 10 à 60 minutes : mesurer toutes les 5 minutes
- De 1 h à 4 heures : mesurer toutes les 15 minutes
- De 4 heures à 10 heures : mesurer toutes les 30 minutes
- Au delà de 10 heures : mesurer toutes les heures

Les essais de débit effectués ont une durée maximale de quatre (4) heures en moyenne

Pour un palier de débit donné, le pompage est arrêté lorsque le niveau de l'eau dans le forage se stabilise. Aussitôt après on mesure la remontée de l'eau (ou battement résiduel) à la même cadence jusqu'au niveau statique.



des essais de puits sont réalisés par trois (3) hommes au moins.

- d'un manipule la sonde électrique,
- le deuxième note le rabattement atteint à un instant donné,
- le troisième mesure les débits.

#### 4.4 Mesures relevées au cours des essais de puits

Ces mesures sont compilées dans les tableaux 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4.

Nous ne donnerons pas le détail du pompage, mais seulement le rabattement atteint et la durée totale pour chaque palier de débit.

**TABLEAU 4.1 : FORAGE DE QUADIOUR**

Débit (m <sup>3</sup> /R)	Rabattement (m)	Durée (mn)	
		D	R
12,00	0,64	30	5
28,83	2,08	30	25
40,00	3,37	60	60
71,34	7,11	75	30
85,00	10,47	60	40

TABLEAU 4.2 : FORAGE DE NGOYE

Débit (m <sup>3</sup> /h)	Rabattement (m)	Durée (mn)	
		Descente	Remontée
10,30	4,17	120	60
20,76	8,90	60	60
30,00	12,75	90	60
38,57	16,75	90	60
57,00	25,32	90	60
81,00	37,18	120	120

TABLEAU 4.3 : FORAGE DE DJIFFER

Débit (m <sup>3</sup> /h)	Rabattement (m)	Durée (mn)	
		Descente	Remontée
10,00	6,18	50	
20,00	13,88	120	
30,00	20,90	120	
40,00	28,97	120	120
60,00	47,94	120	120
80,00	68,40	120	130

FORAGE DE DJILDR. : TABLEAU 4.4

Débit (m <sup>3</sup> /R)	Rabatement	Durée (mn)	
		Descente	Remontée
10,00	2,65	30	20
20,00	5,63	40	40
29,00	8,83	125	90
44,44	15,94	130	120
64,85	26,85	120	150
76,00	31,60	120	150

#### 4.5 VALIDITE DES ESSAIS DE PUIT

D'après Castany, dans Principes et méthodes de l'hydrogéologie, les essais de débit sont corrects lorsque les courbes caractéristiques réelles et théoriques se confondent. (superposition des figures 5.1 et 5.1' ; 5.2 et 5.2')

En appliquant ce principe dans notre étude, on peut dire que les essais de puits à Ngoye et à Djiffer ont été bien exécutés.

Concernant les forages de Ouadiour et Djilor, il y'a un décalage entre ces deux courbes.

Pour le cas spécifique de Ouadiour, nous pensons que les anomalies dans les essais de puits proviennent du fait que la pompe n'était pas encore maîtrisée par les opérateurs. C'est le premier forage réalisé dans le cadre du projet Belge.

La courbe (S versus Q) tracée sur papier bilogarithme ne donne pas une droite (voir figure 5.7). Ce qui nous pousse à croire d'avantage que les essais de puits à Ouadiour ne sont pas correctement exécutés.

Néanmoins nous en donnons une interprétation graphique, mais à titre descriptif uniquement.

\* Il s'agit de l'interprétation graphique de la formule  $Q = C \Delta^{\alpha}$  représentant une fonction exponentielle et établie par M. Goselin qui étudiait des puits artésiens en Tunisie ("Traité pratique des eaux souterraines").

INTERPRETATION GRAPHIQUE DES ESSAIS DE PUIITS.5.1 Support théorique de l'interprétation graphique.

Après la phase expérimentation, on passe à l'interprétation graphique des essais de puits dans le but de déterminer la performance et l'efficacité du forage.

Cette expérimentation étant conduite par application du régime d'équilibre, on fait alors appel à l'équation généralisée des puits en nappe captive exprimée comme suit :

$$\Delta = BQ + CQ^n \quad (5.1)$$

$\Delta$  : rabattement en mètres (m)

$Q$  : débit en  $m^3/h$

$B$  : facteur de pertes de charge linéaires

$C$  et  $n$  : facteur de pertes de charge turbulentes

A partir des mesures effectuées au cours des essais de puits, nous établissons pour chaque forage les courbes suivantes.

- Type I - courbe débit - rabattement ( $\Delta$  versus  $Q$ ) appelée caractéristique du forage.
- Type II - courbe débit spécifique - rabattement ( $\Delta$  versus  $Q/D$ )
- Type III - courbe rabattement spécifique - rabattement ( $\Delta$  versus  $\frac{\Delta}{Q}$ ).

Les courbes de type I sont portées par les figures 5.1 et 5.2

les courbes de type II sont portées par les figures 5.3 et 5.4

les courbes de type III sont portées par les figures 5.5 et 5.6

des tableaux 5.1 ; 5.2 ; 5.3 ; 5.4 donnent respectivement aux forages de Ouadiour ; Ngoye ; Djiffen et Djilor, les valeurs utilisées pour construire les courbes de type I, de type II et de type III.

## 5.2. Courbes rabattement spécifique - rabattement ( $\Delta$ versus $Q/Q$ ). Type II, figures 5.5 et 5.6

Ces courbes sont toutes des droites, obéissant à une loi linéaire de la forme  $\frac{\Delta}{Q} = B + CQ$ . Ceci permet de considérer  $n=2$  dans l'équation généralisée  $\Delta = BQ + CQ^n$  qui devient alors  $\Delta = BQ + CQ^2$ .  
Les paramètres B et C représentent respectivement l'ordonnée à l'origine et la pente pour ces droites. On peut les déterminer facilement.

### Forages de Ouadiour

$$B = 0,045$$

$$C = 9,68 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta = 0,045Q + 9,68 \cdot 10^{-4} Q^2$$

### Forage de Ngoye

$$B = 0,398$$

$$C = 8,19 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta = 0,398Q + 8,19 \cdot 10^{-4} Q^2$$

Forage de Djiffen

$$B = 0,582$$

$$C = 3,62 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta = 0,582Q + 3,62 \cdot 10^{-3} Q^2$$

Forage de Djilor

$$B = 0,202$$

$$C = 3,29 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta = 0,202Q + 3,29 \cdot 10^{-3} Q^2$$

Pour chaque forage on génère une courbe théorique ( $\Delta$  versus  $Q$ ) à partir de l'équation  $\Delta = BQ + CQ^2$  (figures 5.1' et 5.2')

Les tableaux 5.5, 5.6, 5.7 et 5.8 correspondent respectivement aux forages de Ouadiour, NGoye, Djiffen et Djilor.

Dans chaque tableau on trouve :

- Les coordonnées calculées qui ont servi à l'établissement de la caractéristique de chaque forage (calcul de  $\Delta$  en fonction de valeurs arbitraires de débit).
- Les valeurs du terme  $CQ^2$  responsable des pertes de charge turbulentes.
- Le rapport  $CQ^2/\Delta$  en pourcentage.
- \* Il s'agit de la caractéristique théorique.

TABLEAU 5.1 : FORAGE DE OUADIOUR

$Q$ (m <sup>3</sup> /R)	$\Delta$ (m)	$Q/\Delta$ (m <sup>3</sup> /R/m)	$\Delta/Q$
12,00	0,64	18,75	0,053
28,83	2,08	13,86	0,072
40,00	3,37	11,87	0,084
71,34	7,11	10,03	0,100
85	10,47	8,12	0,123

TABLEAU 5.2 : FORAGE DE NGOYE

$Q$ (m <sup>3</sup> /R)	$\Delta$ (m)	$Q/\Delta$ (m <sup>3</sup> /R/m)	$\Delta/Q$ (m/m <sup>3</sup> /R)
10,30	4,17	2,47	0,405
20,76	8,90	2,33	0,430
30,00	12,75	2,35	0,425
38,57	16,75	2,30	0,430
57,00	25,32	2,25	0,440
81,00	37,18	2,19	0,460



TABLEAU 5.3 : FORAGE DE DJIFFER

Q (m <sup>3</sup> /R)	Δ (m)	Q/Δ (m <sup>3</sup> /R/m)	Δ/Q (m/m <sup>3</sup> /R)
10,00	6,18	1,62	0,618
20,00	13,88	1,44	0,694
30,00	20,90	1,44	0,697
40,00	28,97	1,38	0,724
60,00	47,94	1,25	0,799
80,00	68,40	1,17	0,855

TABLEAU 5.4 : FORAGE DE DJILDR

Q (m <sup>3</sup> /R)	Δ (m)	Q/Δ (m <sup>3</sup> /R/m)	Δ/Q (m/m <sup>3</sup> /R)
10,00	2,65	3,77	0,265
20,00	5,63	3,55	0,28
29,00	8,83	3,28	0,304
44,44	15,94	2,79	0,36
64,85	26,85	2,41	0,414
76,00	31,60	2,40	0,420

\* TABLEAU 5.5 : FORAGE DE OUADIOUR

Q (m <sup>3</sup> /R)	Δ (m)	CQ <sup>2</sup> (m)	CQ <sup>2</sup> /Δ (%)
5	0,25	0,024	9,71
15	0,89	0,218	24,40
25	1,73	0,605	35,00
35	2,76	1,18	43,00
45	3,99	1,96	49,19
55	5,40	2,93	54,19
65	7,01	4,09	58,30
75	8,82	5,44	61,73
85	10,82	6,99	64,64

\* TABLEAU 5.6 : FORAGE DE NGOYE

Q (m <sup>3</sup> /R)	Δ (m)	CQ <sup>2</sup> (m)	(Δ/CQ <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> (%)
5	2,01	0,02	1,02
15	6,15	0,18	2,99
25	10,46	0,51	4,89
35	14,93	1,00	6,72
45	19,57	1,66	8,48
55	24,37	2,48	10,17
65	29,33	3,46	11,80
75	34,46	4,61	13,37
85	39,75	5,92	14,89

\* Caractéristique théorique

\* TABLEAU 5.7 : FORAGE DE DJIFFER

Q (m <sup>3</sup> /R)	Δ (m)	CQ <sup>2</sup> (m)	CQ <sup>2</sup> /Δ (%)
5	3,00	0,090	3,01
15	9,54	0,81	8,53
25	16,81	2,26	13,46
35	24,80	4,43	17,88
45	33,52	7,33	21,87
55	42,96	10,95	25,49
65	53,12	15,29	28,78
75	64,01	20,36	31,80
85	75,62	26,15	34,58

\* TABLEAU 5.8 : FORAGE DE DJILDR

Q (m <sup>3</sup> /R)	Δ (m)	CQ <sup>2</sup> (m)	Δ/CQ <sup>2</sup> (%)
5	1,09	0,082	7,54
15	3,76	0,740	19,67
25	7,09	2,056	28,98
35	11,08	4,03	36,36
45	15,73	6,66	42,35
55	21,03	9,95	47,31
65	27,00	13,90	51,49
75	33,62	18,50	55,05
85	40,90	23,77	58,12

\* caractéristique théorique

### 5.3 EFFICACITE ET PERFORMANCE DES OUVRAGES. (TABLEAU 5.9)

#### 5.3.1 PERFORMANCE

La performance d'un forage est mesurée par la capacité spécifique ( $Q/s$ ). Elle donne le débit qu'on peut tirer du puits pour un mètre (1m) de rabattement.

La performance dépend des paramètres de la nappe mais aussi de la construction du forage.

Le forage de Ouachour a une bonne performance comparativement aux forages de Djilor, N'goye et Djiffer qui ont des performances faibles. (voir tableau 5.9)

#### 5.3.2 EFFICACITE

L'efficacité d'un forage est mesurée par le rapport  $\frac{BQ}{\Delta}$  en %.  
Le terme  $BQ$  représente les pertes de charge linéaires dans l'aquifère.  
 $\Delta$  représente le rabattement total.

Dans le volume 1 - rapport final du projet "l'hydraulique rurale à Douga et Casamance", Décembre 1983, le bureau d'ingénieurs conseils BALFOURS, Lonche (assigné par l'overseas development administration) considère que l'efficacité de base d'un puits doit s'élever à 70% au moins, pour une exploitation économiquement viable.

Une efficacité de 100% implique des pertes de charge dans la crépine et le

le bage, nulle ou négligeable. Ce qui s'exprime par la relation :  $\Delta = BQ$   
( $CQ^2 \approx 0$ ).

Les forages de N'goye et Djilor ont des efficacités supérieures à 70%,  
tandis que les puits de Ouadiour et Djilor ont des efficacités moindres.

### Remarque

Nous attirons l'attention du lecteur sur la signification de la performance  
telle qu'on vient de la déterminer. En effet la capacité spécifique varie en  
fonction du temps de pompage et du débit, et n'a donc qu'une valeur instan-  
tanée dans cette étude.

Seul un pompage de longue durée peut donner une idée assez précise sur le  
rendement des ouvrages.

**TABLEAU 5.9 EFFICACITE ET PERFORMANCE.**

Forages	Débit de reception $Q_R (m^3/R)$	Rabatement $\Delta (m)$	Performance $\frac{Q}{\Delta} (m^3/R/m)$	$BQ$ (m)	Efficacité $BQ/\Delta$ (%)
Ouadiour	40,00	3,37	11,87	1,8	53,41
N'goye	38,60	17,23	2,24	15,36	89,16
Djiffen	40,00	28,97	1,38	23,28	80,36
Djilor	44,44	15,94	2,79	8,06	50,56

PROJET DE FIN D'ETUDES

TITRE : CAMPAGNE DE FORAGES AU SINE-SALDUM  
(Realisation du projet Belge N° 320-6601)

AUTEUR : MOUSSA BATHILY ELEVE INGENIEUR  
EN 5<sup>e</sup> ANNEE GENIE-CIVIL E.P.T

DIRECTEUR DU PROJET :

Monsieur Robert Montulet vacataire à L'E.P.T

CO-DIRECTEUR

Monsieur Abdoulaye Sène vacataire à L'E.P.T

## 5.4 Courbes rabattement-débit ( $\Delta$ versus $Q$ )

Type I - Figures 5.1 et 5.2

Ces courbes représentent les caractéristiques des quatre (4) puits étudiés. Elles ne mettent pas en évidence l'existence d'une portion linéaire (correspondant à de faibles rabattements) et d'une portion parabolique (exprimant la disproportionnalité entre débit et rabattement).

Aucune de ces courbes ne permet pas la détermination graphique du débit critique.

Néanmoins on peut déterminer le rythme d'extraction qui s'adapte à la qualité technique de chaque ouvrage.

Ceci revient à considérer le débit qui génère une efficacité supérieure ou égale à 70%. Au delà de ce débit, on estime que l'ouvrage fonctionne en régime dénoyé.

<u>Forages</u>	<u>Rythme d'extraction (capacité technique)</u>
Duachoua	25 m <sup>3</sup> /h
Ngoye	85 m <sup>3</sup> /h
Djiffer	60 m <sup>3</sup> /h
Djilor	30 m <sup>3</sup> /h

## 5.5 Courbes rabattement - débit spécifique (à voir sur $\frac{D}{2}$ )

Type I - Figures 5.3 et 5.4

L'allure concave que présente la courbe des puits de Ouachour (Figure 5.3) est une autre illustration des pertes de charges anormales et excessivement grandes; en accord avec les valeurs calculées du tableau 5.5

La courbe du puits de Djilor (Figure 5.3) indique des pertes de charge importantes.

La courbe du forage de N'goye est une droite presque verticale, qui montre un débit spécifique constant, caractérisant un puits en nappe captive, avec des pertes de charges réduites. (Figure 5.3)

La figure (5.4) illustre le puits de Djiffen par une droite oblique caractérisant une nappe semi-captive avec de légères pertes de charge.

En résumé, on peut retenir que les forages de N'goye et Djiffen ont des qualités techniques acceptables.

À Djilor et à Ouachour, les puits ont des qualités techniques moins bonnes; les pertes de charge dues à l'équipement représentent un pourcentage élevé du rabattement total.



## 5.6 PERTES DE CHARGE ANORMALES

### 5.6.1 Incidence sur l'exploitation

Le terme  $CQ^2$  représente les pertes de charge anormales imputables au dimensionnement et à la réalisation technique de l'ouvrage.

Les tableaux 5.5 ; 5.6 ; 5.7 et 5.8 mettent en évidence l'augmentation de ces pertes de charge avec le débit.

Pour les forages de Ouachour et Djilor, elles dépassent les 30% admissibles en considérant une efficacité de base de 70%.

Pour un débit de réception de  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ , les pertes de charge s'élèvent à (en valeur relative) :

46,3% pour le forage de Ouachour

7,08% pour le forage de Ngoye

20,00% pour le forage de Djiffer

40,76% pour le forage de Djilor

Ces pertes de charges devenues excessives peuvent imposer une limite au débit d'utilisation dans le but d'une exploitation économique.

Ces quelques indications mettent en relief tout l'intérêt qui réside dans le choix judicieux du gravier, de la crépine et du tubage en fonction du débit d'utilisation ; mais aussi de la justesse des prévisions faites sur la nature des terrains à capter.

## 5.6.2 \* Composition des pertes de charge anormales

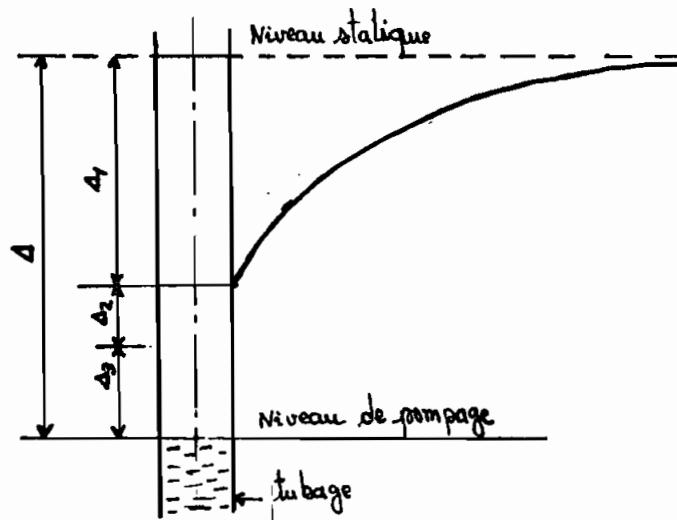
47

Les pertes de charge anormales comprennent :

- les pertes de charge dues au tubage ( $\Delta_2$ )
- et les pertes de charge causées par la partie captante (cripines + graviers)

( $\Delta_3$ ) .

Figure 5.7 : Pertes de charge



$$\Delta = \Delta_1 + (\Delta_2 + \Delta_3) = BQ + CQ^2$$

$\Delta$  : pertes de charge totales .

$\Delta_1$  : baisse de pression de la nappe (BQ) ou rabattement laminaire

( $\Delta_3 + \Delta_2$ ) : baisses de pression propres à la circulation de l'eau dans le système de captage. ( $CQ^2$ )

\* Prospection et exploitation des eaux souterraines . Costantini

### 5.6.3 CALCUL DES PERTES DE CHARGE DUES AUTUBAGE

Les pertes de charge dues au tubage comprennent les pertes de charge causées par la friction et les pertes de charge singulières résultant de l'élargissement.

#### 1. Pertes de charge dues à la friction.

On les estime en utilisant l'équation de Darcy-Weisbach.

$$h_f = \frac{f L V^2}{D \times 2g}$$

$h_f$  : pertes de charge dues à la friction en m

$L$  : longueur du tubage en m

$D$  : diamètre du tubage en m

$V$  : vitesse de l'eau dans le tubage en m/s

$g$  : accélération gravitationnelle ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )

$f$  : coefficient fonction de  $Re$  et  $E/D$ .

$E$  : rugosité =  $0,0015$  pour de l'acier étiré

$Re$  : nombre de Reynolds =  $\frac{VD}{\nu}$

$\nu$  : viscosité cinématique de l'eau =  $0,804 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  à  $30^\circ\text{C}$

#### 2. Pertes de charge dues à l'élargissement

$$^* \Delta H = \frac{K V^2}{2g}$$

$\Delta H$  : pertes de charge en m

\* Notes de Cours de Roger Labonite et Gilles Patry E.P.M

$V$  : vitesse d'approche de l'eau, ici  $v_1$  en m/s

$K$  : coefficient qui dépend du rapport des diamètres  $\frac{D_1}{D_2}$

$K$  est donné par le tableau 5.10, tiré des notes de cours en hydraulique urbaine de Roger Labonite et Gilles Potry E.P.M.



Tableau 5.10

$D_1/D_2$	$K$
0,1	1,0
0,2	0,9
0,4	0,7
0,6	0,4
0,8	0,2

### 3 Forage de Djilor : calcul des pertes de charges dans le tubage.

Le facteur de friction  $f$  est déterminé à partir du diagramme de Moody donné dans Water Resources Engineering Linsley/Franzini, 3<sup>ème</sup> édition.

Les pertes de charge calculées pour les différents débits d'essai ont été données par le tableau 5.11.

$h_{f1}$  : pertes de charge dans le tubage de 4"

$h_{f2}$  : pertes de charge dans le tubage de 10 3/4"

$h$  : pertes de charges totales dues au tubage

À partir des termes  $h_{f1}$  et  $h_{f2}$ , on peut calculer les pertes de charge par mètre de tubage qui seront les mêmes pour tous les autres forages qui ont des tuyaux de diamètres identiques et de même nature.

On peut donc évaluer les pertes de charge dans les autres puits :

En consultant le tableau 5.41, on se rend compte que les pertes de charge dues au tubage sont amplifiées par les deux faits suivants :

- la petitesse du tuyau de 4" (petit diamètre)
- et la grande longueur du tuyau de 4".

#### Forage de Djilor

Les pertes de charge causées par la partie <sup>capotante</sup> sont plus grandes que celles dues au tubage.

Pour un débit de  $45 \text{ m}^3/\text{h}$  :

$$CQ^2 = 6,66 \text{ m} ; \Delta_2 = 2,38 \text{ m} \text{ et } \Delta_3 = 4,28 \text{ m}$$

#### Forage de Djiffer

Pour un débit de  $45 \text{ m}^3/\text{h}$

$$CQ^2 = 7,33 \text{ m} ; \Delta_2 = 3,43 \text{ m} ; \Delta_3 = 3,9 \text{ m}$$

#### Forage de NGoye

Pour un débit de  $45 \text{ m}^3/\text{h}$

$$CQ^2 = 1,66 \text{ m} ; \Delta_2 = 1,48 \text{ m} ; \Delta_3 = 0,18 \text{ m}.$$

TABLEAU 5.11 PERTES DE CHARGE DUES AU TUBAGE FORAGE DE DJILOR

$Q$ ( $m^3/k$ )	10	20	29	44,44	64,85	76,00
$h_{f1}$ (m)	0,19	0,74	1,30	2,28	5,47	7,34
$h_{f2}$ (m)	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	0,015	0,03	0,07	0,09
$\Delta H$ (m)	$4,4 \cdot 10^{-3}$	0,02	0,04	0,07	0,19	0,26
$h$ (m)	0,20	0,77	1,36	2,38	5,73	7,69

$h_{f1}$  : pertes de charges dans le tuyau de 4"

$h_{f2}$  : pertes de charge dans le tuyau de 10" 3/4

$h$  : pertes de charge totales pour un debit donne.

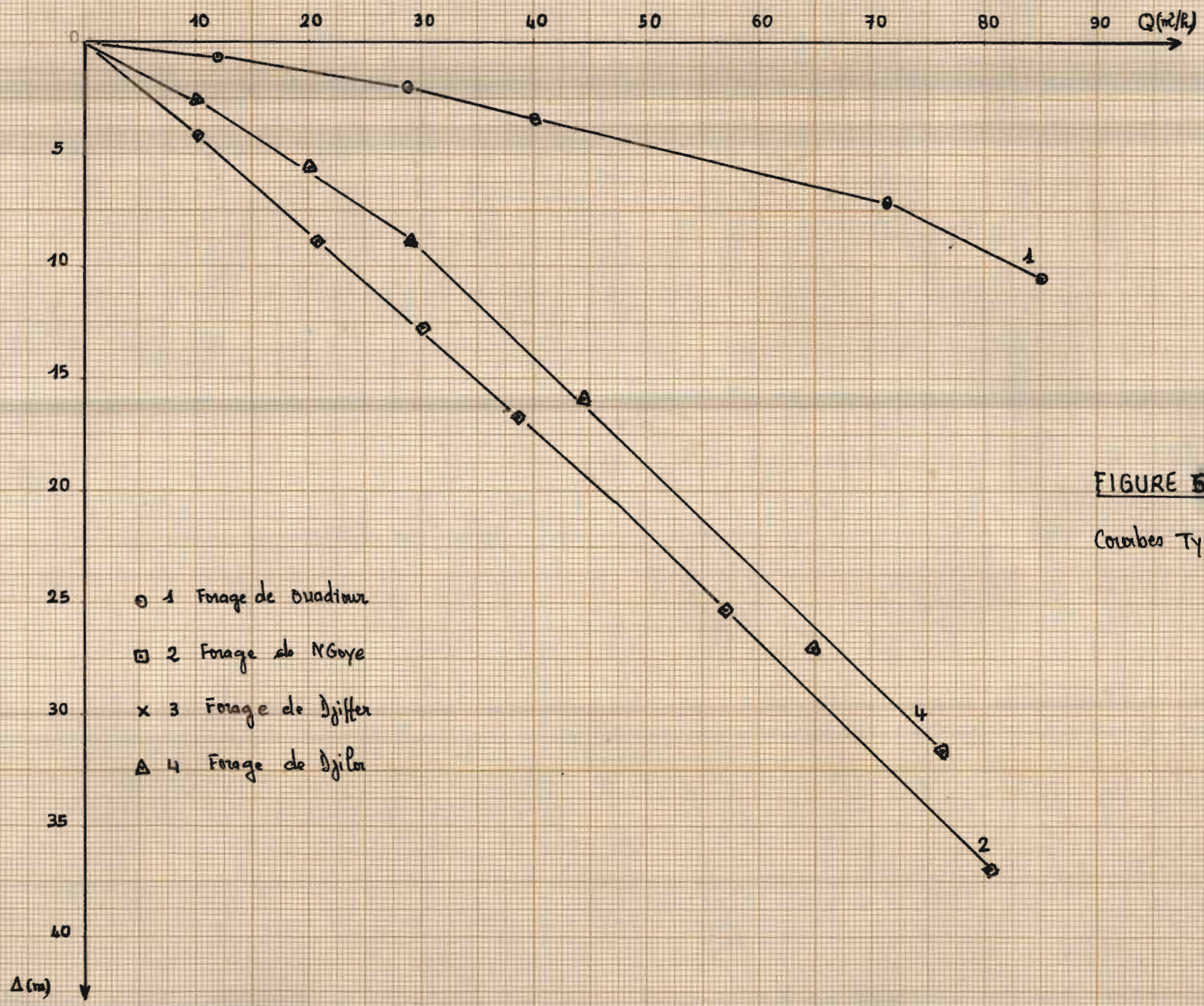


FIGURE 5.1  
Corabes Types I

- 1 Forage de Ouadiour
- 2 Forage de NGoye
- × 3 Forage de Djiffen
- △ 4 Forage de Djilou

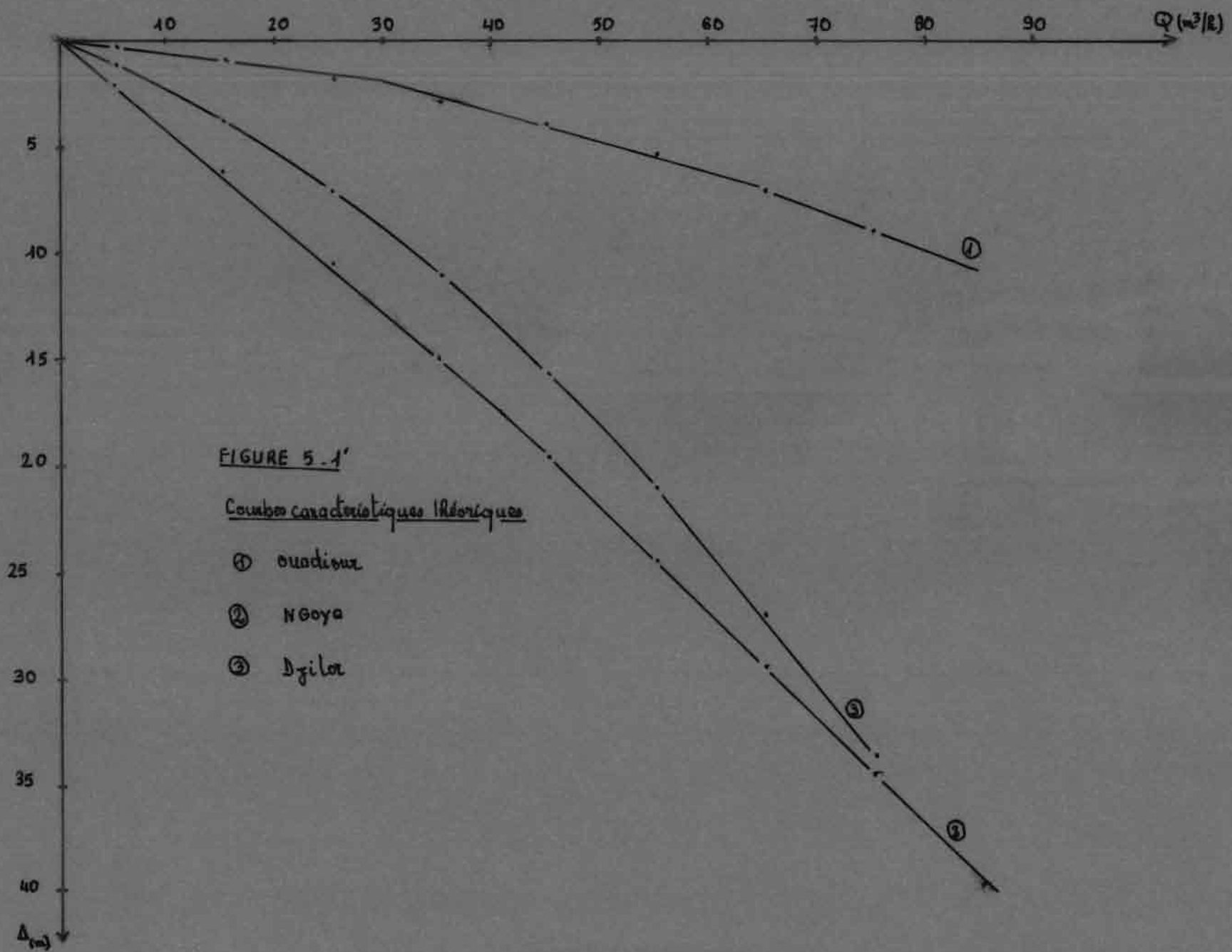


FIGURE 5-1'  
 Courbes caractéristiques théoriques

- ① ouadiour
- ② NGoya
- ③ Dzilar



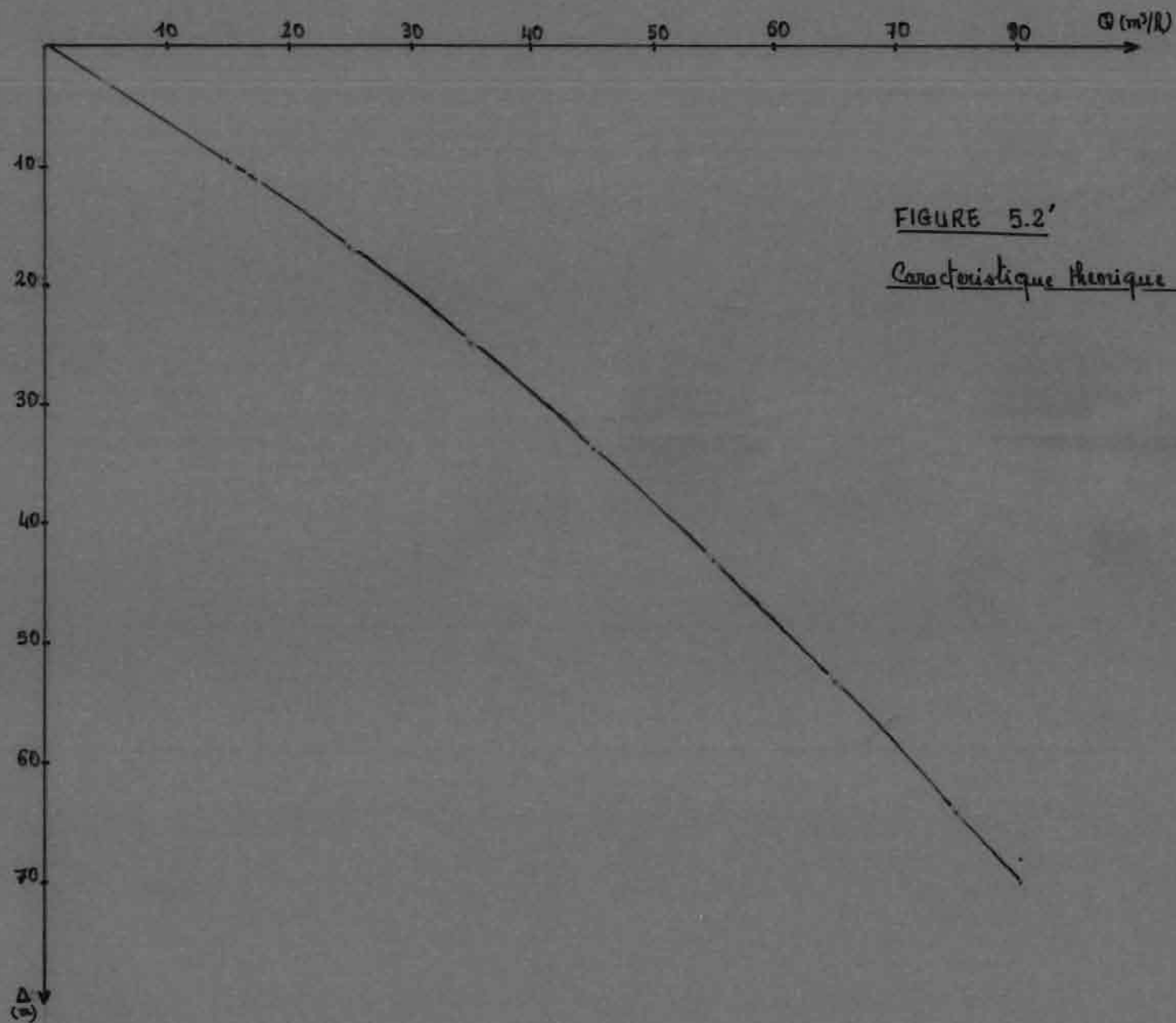


FIGURE 5.2'

Caractéristique théorique du forage de Duffer

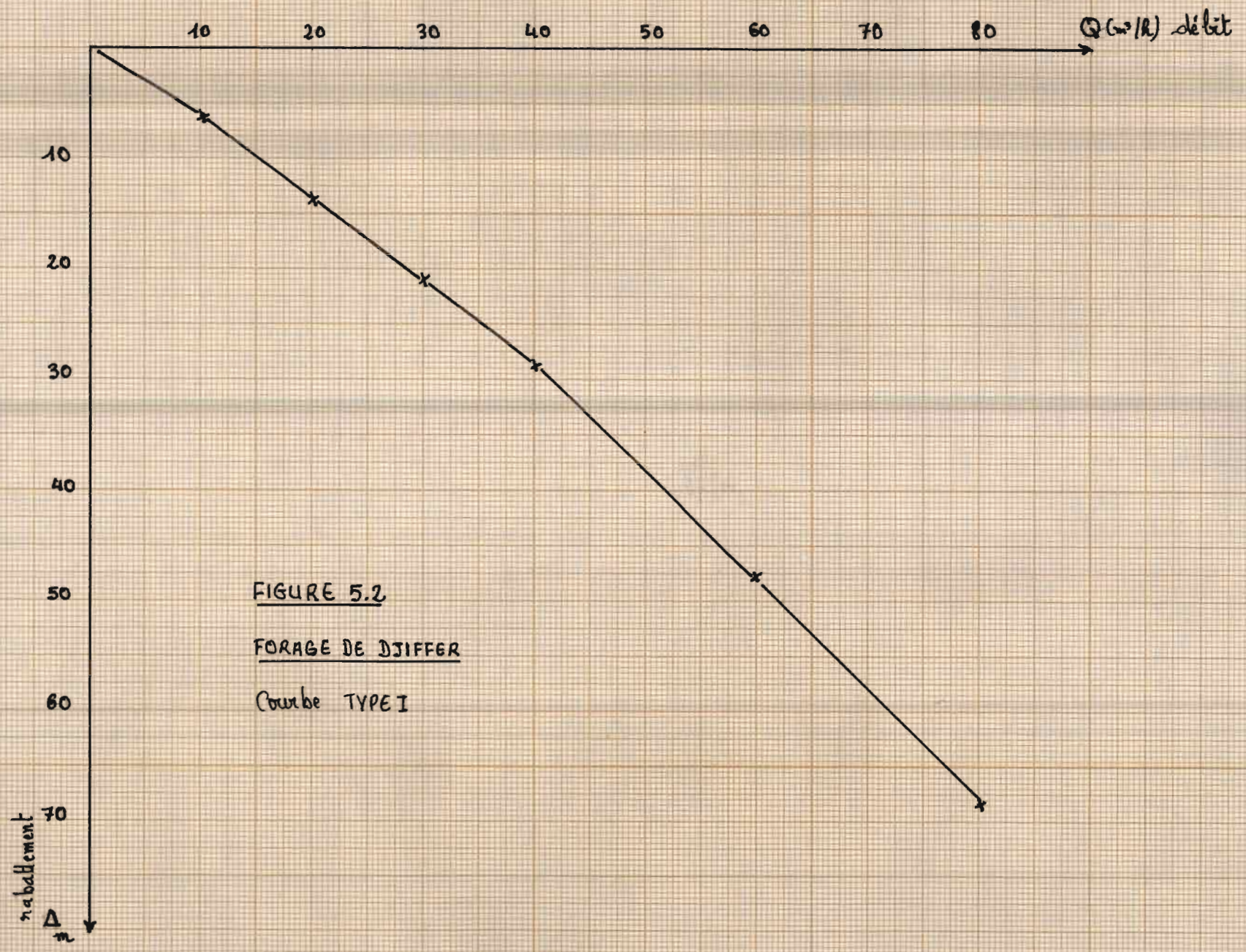
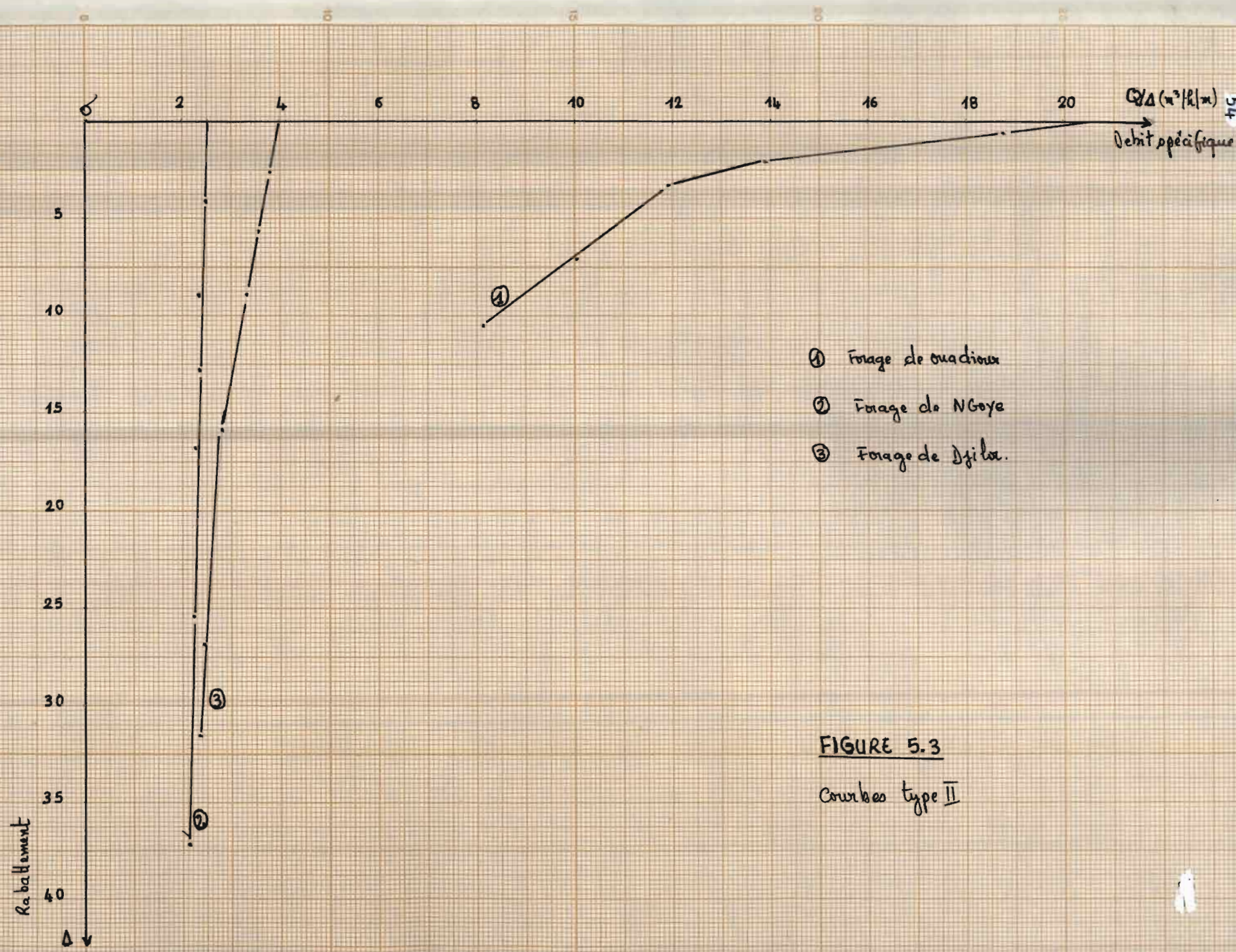


FIGURE 5.2  
 FORAGE DE DJIFFER  
 Courbe TYPE I



- ① Forage de ouadioux
- ② Forage de NGoye
- ③ Forage de Djilou.

**FIGURE 5.3**  
Courbes type II

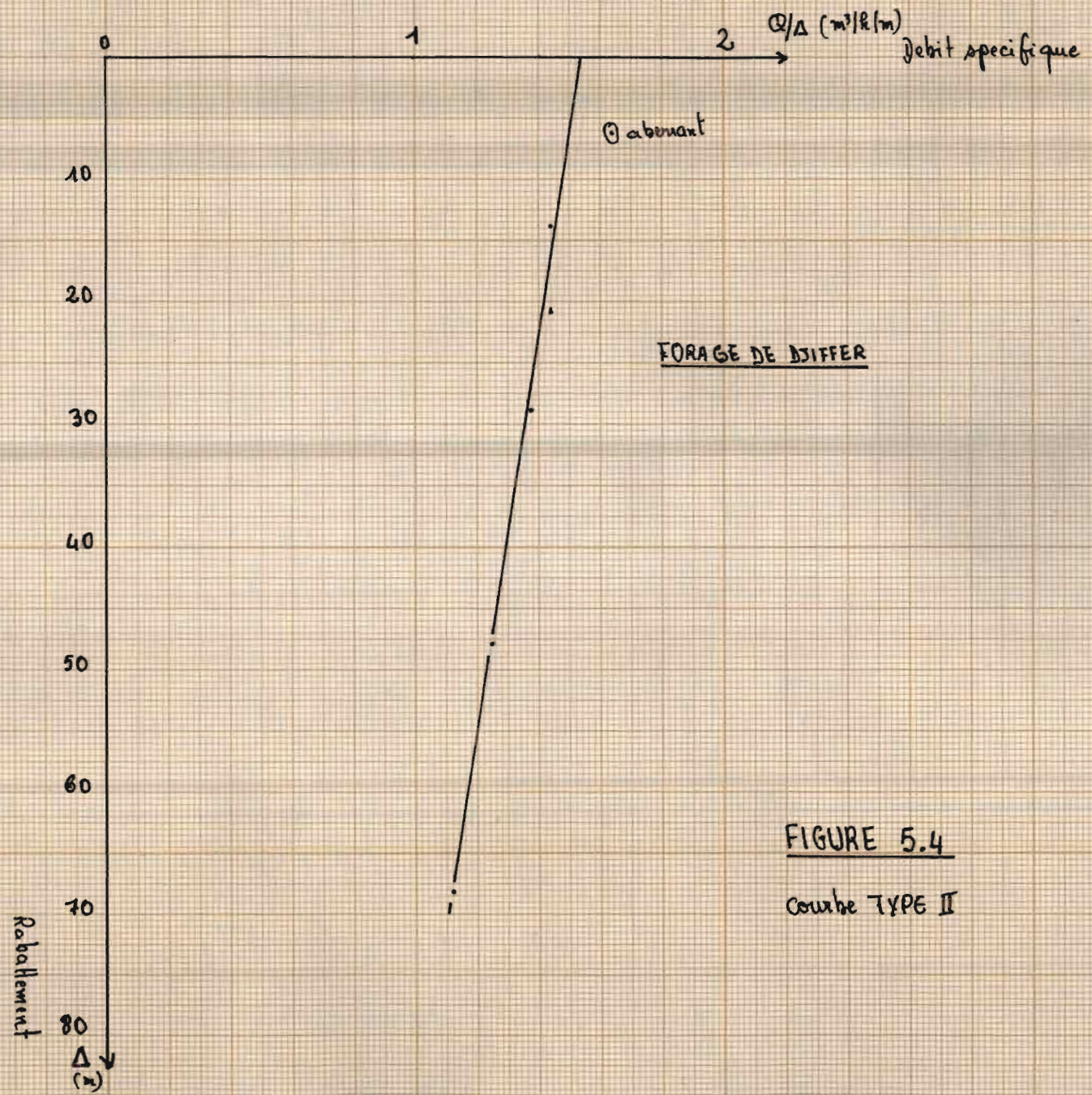


FIGURE 5.4  
 Courbe TYPE II

FIGURE 5.5

courbes type III

rabattement spécifique  $\Delta/Q$

0,5

0,4

0,3

0,2045  
0,20

0,1

0,045

0

10

20

30

40

50

60

70

80

90

Debit (m<sup>3</sup>/h)

⊙ aberrant

aberrant ⊙

21,3

0,07

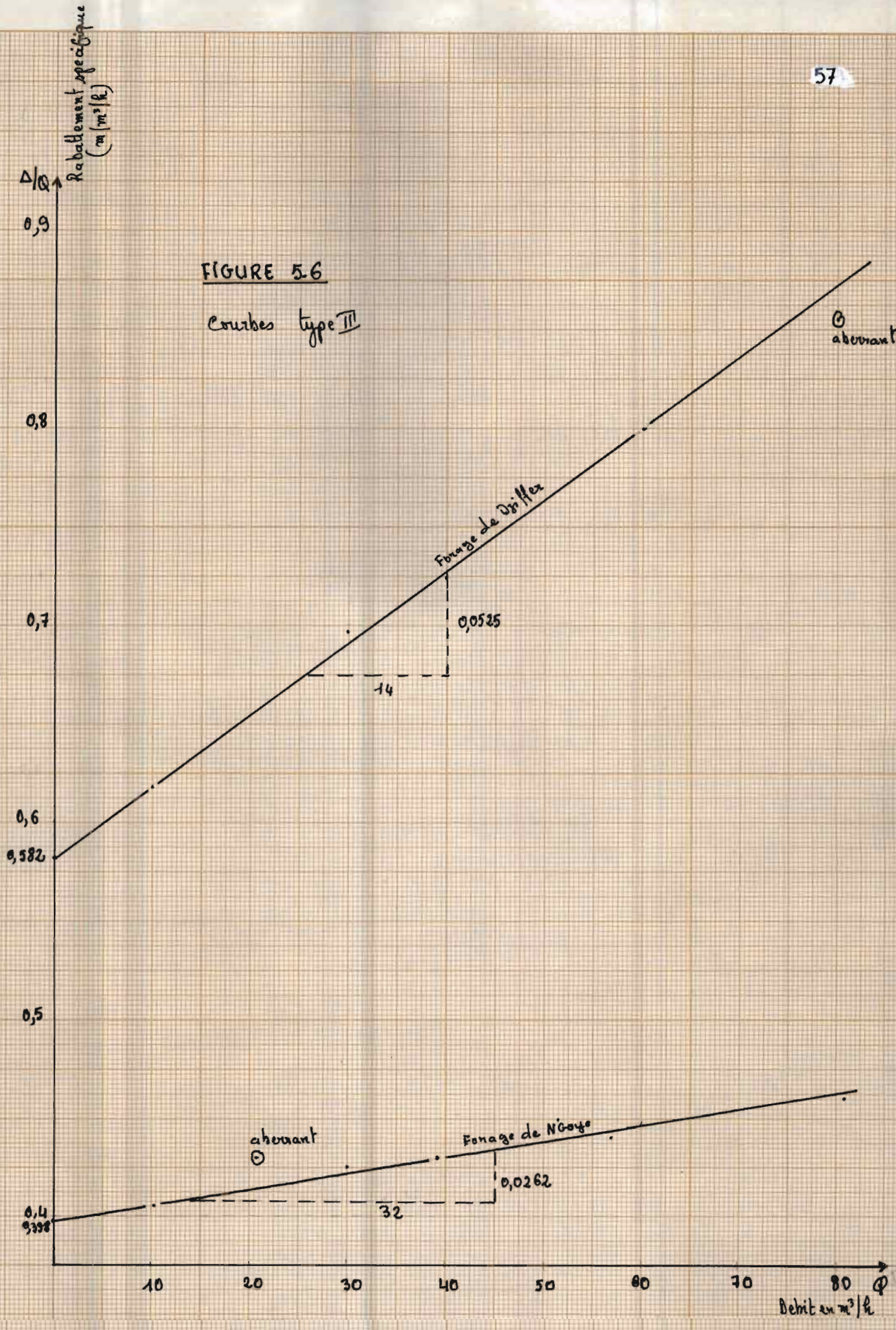
Forage de Dylex

⊙ aberrant

31

0,03

Forage de Ouadiour



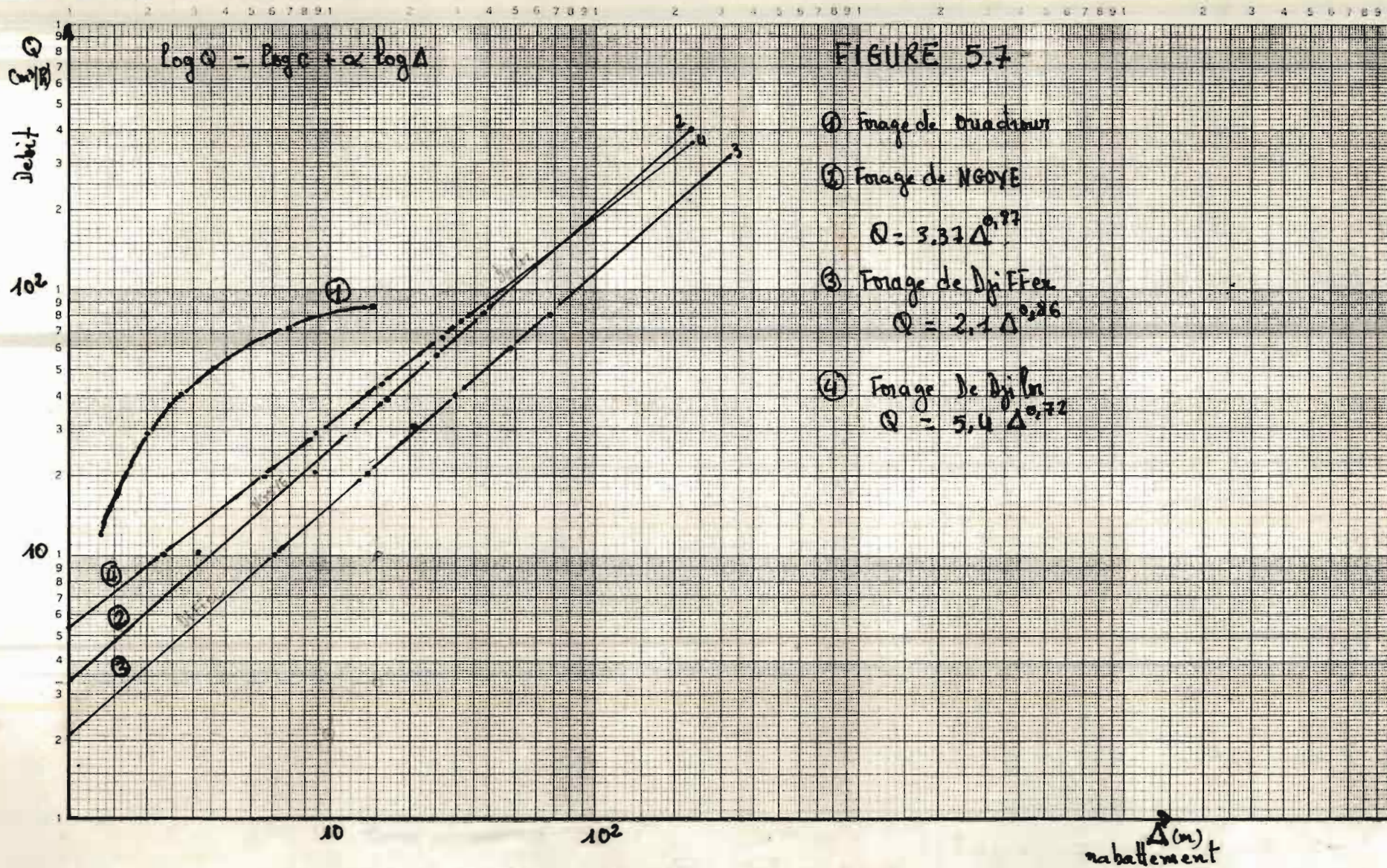


FIGURE 5.7

- ① Forage de Duachimur
- ② Forage de NGOYE
- ③ Forage de Djiffex  
 $Q = 2,1 \Delta^{0,26}$
- ④ Forage de Djiln  
 $Q = 5,4 \Delta^{0,72}$

Eau du forage de Ouadiour

$C$  = somme des quantités en réaction en milliequivalent (meq)

$n$  = quantité en réaction d'un élément chimique.

$$C = \sum n = 41,7$$

$$(\%) n' = \frac{n}{C} \times 100$$

$$n'(Ca) = \frac{0,5 \times 100}{41,7} = 1,2\%$$

$$n'(Cl) = 1260/41,7 = 30,2\%$$

$$n'(Mg) = 30/41,7 = 0,7\%$$

$$n'(SO_4) = 110/41,7 = 2,6\%$$

$$n'(Na) = 2000/41,7 = 4,8\%$$

$$n'(CO_3H) = 700/41,7 = 16,8\%$$

$$n'(K) = 10/41,7 = 0,2\%$$

$$n'(NO_3) = 0$$

$$n'(Fe) = 10/41,7 = 0,2\%$$

$$n'(F) = 10/41,7 = 0,2\%$$

$$\text{Totaux cations} = 50,3\%$$

$$\text{Totaux anions} = 49,8$$

Total en % des quantités en réaction = 100,1%

différence entre les sommes respectives des quantités en réaction

pour cent des anions et des cations = 50,3% - 49,8% = 0,5%

$$\frac{0,5}{100,1} = 0,5\% < 6\%$$

Les résultats de l'analyse chimique de l'eau du forage de Ouadiour, par le laboratoire de la direction des mines et de la géologie, sont valables.

Un calcul identique effectué pour les forages de N'goye Djiffer et Djilor donne respectivement des écarts de 0,33%, 0,16% et 0,21%. Ces écarts se situent dans les limites de validité.



- ditè admissible des résultats.

61.

## 6.2 QUALITE DES EAUX.

Si les populations rurales doivent disposer d'une quantité d'eau suffisante, et que les moyens soient mis en œuvre pour atteindre cet objectif, il ne faut pas non plus oublier que la qualité de l'eau est aussi importante que la quantité, sinon plus même.

Selon les Nations unies, plus de 25000 personnes sont tuées chaque jour par des maladies d'origine hydrique.

Pour améliorer le niveau de vie et de la santé de leurs populations, plusieurs pays ont élaboré des normes de qualité régissant l'eau.

Le Sénégal n'a pas encore établi des normes sur l'eau potable. Mais les critères de l'OMS y ont été adoptés.

Le tableau 6.5 donne les normes internationales de l'OMS.

Le constat général qui se dégage, après consultation des résultats des analyses chimiques, est la présence du fluor (F) en des taux élevés dans les eaux de ces forages.

La teneur en fluor de ces eaux dépasse de loin la dose admissible exigée par les normes de l'OMS (1,0-1,5 mg/l).

L'eau de chacun des quatre (4) forages étudiés, a été analysée par le laboratoire de la direction des Mines et de la Géologie.

Les résultats de ces analyses chimiques sont compilés dans les tableaux 6.1, 6.2, 6.3 et 6.4 respectivement pour les forages de Ouadiour, N'goye, Djiffen et Djilor.

Seuls les éléments chimiques et le pH, ont été déterminés; le titre alcalimétrique et le degré hydrotimétrique (dureté) n'ayant pas fait l'objet d'analyse.

Les mêmes eaux, ont été analysées sur le chantier par le géologue du projet qui nous a appris que les résultats des deux analyses sont très proches l'une de l'autre.

### 6.1 VALIDITE DES RESULTATS

"Pour que les résultats soient considérés comme valables la différence entre les sommes respectives des quantités en réaction pour cent, des cations et des anions, ne doit pas dépasser 6% du total." D'après Castany dans - Prospection et Exploitation des eaux souterraines -.

Nous avons choisi l'eau du forage de Ouadiour pour illustrer les calculs de validité des résultats d'une analyse chimique.

## Critères de l'eau potable.

Par l'organisation mondiale de la santé (O.M.S)

Extrait du "Rapport de l'étude de plans de base du projet rural d'approvisionnement en eau à la République du Sénégal"

Mars 1983, par l'agence japonaise de coopération internationale.

TABLEAU 6.5 : critères de l'eau potable

Indicateur	Limite admissible	Indicateur	Limite admissible
NH <sub>3</sub> -N (mg/l)	0,5	Magnesium, Mg (mg/l)	50
NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	40	dureté totale en	
Chlorure (mg/l)	200	mg/l de CaCO <sub>3</sub>	100 - 500
colibacille	MPN < 10	pH	7,0 - 8,5
Cuivre, Cu (mg/l)	0,1	sulfate (mg/l)	200
Fer, Fe (mg/l)	0,3	Selenium, Se (mg/l)	0,05
Fluor, F (mg/l)	1,0	Cadmium, Cd (mg/l)	0,01
Plomb, Pb (mg/l)	0,1	Chlore résiduel (mg/l)	-
Zinc, Zn (mg/l)	5,0		
Chrome, Cr <sup>6+</sup> (mg/l)	0,05		
Arsenic, As (mg/l)	0,2		
Manganèse, Mn (mg/l)	0,1		
Phénol (mg/l)	0,001		
Calcium, Ca (mg/l)	75		

TABLEAU 6.1 ANALYSE CHIMIQUE EAU DU FORAGE DE QUADOUR

pH	7,9	
TENEUR PAR LITRE	mg	meq
Cl <sup>-</sup>	446,8	12,6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	50,9	1,1
CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	430,2	7,0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	—	—
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	42	0,0
F <sup>-</sup>	2,4	0,1
<b>TOTAL ANIONS</b>		<b>20,8</b>
Ca <sup>2+</sup>	10,0	0,5
Mg <sup>2+</sup>	3,4	0,3
Na <sup>+</sup>	461,1	20,0
K <sup>+</sup>	5,8	0,1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	40,1	0,0
Fe	1,8	0,1
<b>TOTAL CATIONS</b>		<b>20,9</b>
<b>EXTRAIT SEC</b>	<b>1200</b>	

**TABLEAU 6.2 ANALYSE CHIMIQUE EAU DU FORAGE DE NGOYE**

pH	8,2	
TENEUR PAR LITRE	mg	meq
Cl <sup>-</sup>	946,9	26,7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-	-
CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	646,8	10,6
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	< 2	-
F <sup>-</sup>	4,5	0,2
<b>TOTAL ANIONS</b>		<b>37,5</b>
Ca <sup>2+</sup>	19,2	1,0
Mg <sup>2+</sup>	6,8	0,6
Na	828,0	36,0
K <sup>+</sup>	7,0	0,2
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	< 0,1	0,0
Fe	0,5	0,0
<b>TOTAL CATIONS</b>		<b>37,6</b>
<b>EXTRAIT SEC</b>	<b>2248</b>	

TABLEAU 6-3 ANALYSE CHIMIQUE EAU DUFORAGE DE DJIFFER

pH	8,0	
TENEUR PAR LITRE	mg	még
Cl <sup>-</sup>	1788,6	44,7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	80,7	1,7
CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	732,3	12,0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	—	—
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	< 2	0,0
F <sup>-</sup>	2,2	0,1
TOTAL ANIONS		58,5
Ca <sup>2+</sup>	27,2	1,4
Mg <sup>2+</sup>	7,8	0,7
Na <sup>+</sup>	1297,9	56,4
K <sup>+</sup>	9,0	0,2
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	< 0,1	0,0
TOTAL CATIONS		58,7
EXTRAIT SEC	3400	

TABLEAU 6-4 FORAGE DE DJILOR - ANALYSE CHIMIQUE .

pH	8,4	
TENEUR PAR LITRE	mg	meq
Cl <sup>-</sup>	478,7	13,5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	25,0	0,5
CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	613,2	10,0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	18,0	0,6
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	22	0,0
F <sup>-</sup>	5,0	0,3
TOTAL CATIONS		24,9
Ca <sup>2+</sup>	15,6	0,8
Mg <sup>2+</sup>	1,7	0,1
Na <sup>+</sup>	552,0	24
K <sup>+</sup>	4,7	0,1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	20,1	0,0
Fe	0,2	0,0
TOTAL CATIONS		25
EXTRAIT SEC	1482	

Quadrour :	2,4 mg/l de $F^-$
Ngoye :	4,5 mg/l de $F^-$
Djiffer :	2,2 mg/l de $F^-$
Djilor :	5,0 mg/l de $F^-$
Teneur en fluor exigée par l'OMS : 1,0 mg/l	

L'eau du forage de Djiffer est fortement minéralisée avec une prédominance nette de chlorure de sodium ( $Na^+; Cl^-$ ). Résidu sec = 3400 mg/l

L'eau du forage de Quadrour a une teneur en fer (Fe) élevée 1,8 mg/l comparativement à la dose admissible qui est de 0,3 mg/l.

En définitive on retiendra que l'eau de ces forages est d'une mauvaise qualité, vu leur teneur en fluor excessive. Ces eaux utilisées à des usages domestiques pourraient compromettre la santé des populations.

### 6.3 DANGERS DE LA FLUORATION

La présence de fluor dans les eaux de consommation, mais en quantité faible (moins de 1 mg/l) peut-être bénéfique pour les populations. C'est une excellente prévention contre la carie dentaire.



Des études statistiques faites aux USA de 1936 à 1942, dans les régions où les eaux contiennent naturellement du fluor, ont montré que les populations sont moins sujettes à la carie dentaire.<sup>(4)</sup>

Ainsi est née la fluoration des eaux destinées à la consommation

### Les sels de fluor<sup>(4)</sup>

- Le fluor de calcium (fluorure) est inerte; il est relativement peu dangereux à l'état naturel et à faible teneur dans l'eau potable.

- Le fluor de sodium

D'après les recherches d'un dentiste anglais, le Docteur Charles Dillon; le fluor de sodium s'attaque aux os en perturbant le métabolisme phospho-calcique de l'ossification.

Selon le docteur Holman (Ecole nationale Galloise de médecine, Grande Bretagne) la fluoration de l'eau risque d'augmenter le cancer et son étendue.

<sup>(4)</sup> "Protection de la qualité des eaux et maîtrise de la pollution"  
Contrôle deversement d'eau polluée - par J.R. VAILLANT

Selon le professeur Steyn (Université de Pretoria): le fluor s'oppose aux processus d'oxydo-réduction des cellules, et il serait dangereux pour les femmes enceintes d'absorber des quantités même minimes de ce corps, car elles pourraient donner naissance à des enfants mal formés.

### DEFLUORATION

Pour le traitement de l'eau fluorée, on a jusqu'ici utilisé :

- des dérivés phosphatés
- des dérivés de l'aluminium
- des résines échangeuses d'ions.

Le « Defluoroz-2 » est un nouveau produit mis au point à l'Institut central de recherche de la santé publique à Nagpur (Inde).

7.1 CHOIX DE L'EQUIPEMENT DES FORAGES

Il s'agit de déterminer :

- les dimensions du gravier filtre
- l'ouverture de la crépine, son diamètre, sa longueur et sa position
- le diamètre du tubage d'exhaure

Pour faire ce choix, on doit connaître :

- le débit d'utilisation (de service)
- la nature et les dimensions du terrain que l'on veut mettre en production.

7.1.1 Nature et dimensions du terrain .

Pour obtenir ces données, on dispose de deux méthodes :

- soit faire un sondage de reconnaissance en petit diamètre;
- soit faire une étude par corrélation à partir des forages environnants, en intégrant les données géologiques et hydrogéologiques régionales.

### 7.1.2.1 Sondage de reconnaissance

C'est sans doute le moyen le plus sûr qui permet d'obtenir des données fiables, bases d'un choix correct de l'équipement des forages.

Castany, dans Prospection et exploitation des eaux souterraines, propose la succession des opérations suivantes pour l'exécution rationnelle d'un sondage d'exploitation.

- 1- Sondage de reconnaissance avec prélèvement d'échantillons de terrain et établissement de la coupe lithologique avec : localisation des couches aquifères.
- 2- Essais de nappe.
- 3- Analyse granulométrique des roches-réservoirs.
- 4 - Détermination de la granulométrie du gravier.
- 5 - Détermination des dimensions des ouvertures des crépines.
- 6 - Détermination de la surface de perforation de la crépine en fonction du débit prévu déduit de (2).

7 - Détermination du diamètre des crépines en fonction des données précédentes et de la pompe.

8 - Détermination du diamètre de la colonne ascensionnelle.

9 - Programme du forage d'exploitation : diamètre du forage et niveaux des crépines.

Le trou de sondage peut être équipé en piezomètre, ou devenir le forage d'exploitation après alésage.

#### 7.1.1.2 Obtention des données par Corrélation.

A défaut d'un sondage de reconnaissance, on peut se baser sur les études hydrogéologiques régionales disponibles dans les services techniques du ministère de l'hydraulique (DEH, DHUR). On peut aussi faire appel aux procès-verbaux, aux coupes géologiques et techniques des forages situés à proximité du site et exploitant la même nappe ; Enfin de tout document jugé utile.

On peut se servir, dans cette recherche de données, des cartes piezométriques, des cartes en courbe d'égal profondeur du toit de l'aquifère et des cartes chimiques. A l'aide des coupes géologiques des forages environnants, il est possible de constituer un profil lithologique sé-

- matique du site.

Après ce recensement de toutes les données pertinentes, des coupes prévisionnelles sont établies (géologiques et techniques). Et le chantier sera approvisionné en conséquence.

d'annexe A5 donne les coupes prévisionnelles du forage de Djitor

Cette deuxième méthode basée essentiellement sur des extrapolations, bien que réduisant les dépenses d'investissement, est entachée d'imprécisions quelque fois grossières.

Cette dernière situation peut conduire au choix d'un équipement (criepine et gravier surtout) non adapté aux caractéristiques réelles du terrain, (ces dernières n'étant connues que d'une manière très approximative) générant ainsi des conséquences fâcheuses dans la vie future de l'ouvrage (dépenses d'exploitation élevées).

#### 7.1.2 Débit d'utilisation

Le débit d'utilisation se détermine à partir des études socio-économiques.

### 7.2 Choix proprement dit de l'équipement.

#### 7.2.1 Gravier et criepine

Le rôle du gravier est de constituer un filtre autour de la criepine. Il doit refuser les éléments très fins mis en mouvement par la vitesse de l'eau.

A ce titre il doit être adapté aux dimensions du terrain aquifère

auxquelles il dépend étroitement comme le montre les règles ci-dessous.

Dans la publication N°7 de technique rurale en Afrique, intitulée Hydraulique pastorale, on trouve les règles suivantes.

1) Nécessité d'un massif de gravier dans les conditions suivantes :

$$d_{10} < 0,25 \text{ mm} \quad \text{et} \quad 1 < C_u < 5$$

$d_{10}$  = taille du tamis laissant passer 10% du poids de l'échantillon.

$C_u$  = Coefficient d'uniformité

D'après Allen Hazen  $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$

D'après Terzaghi  $C_u = \frac{d_{70}}{d_{20}}$

2)  $D$  = diamètre relatif au gravier

$d$  = diamètre relatif au terrain aquifère.

Conditions de Terzaghi dans les formations multigranulométriques.

a)  $\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4$

b)  $\frac{D_{15}}{d_{15}} \geq 4$

c)  $\frac{D_{60}}{D_{10}} \leq 2$

$C_u(\text{gravier}) < 2$  ;  $2,5 < C_u(\text{formation}) < 5$ .

3) Pour Johnson USA

$C_u(\text{formation}) < 2,5$

$D_0 = 7d_{10}$  ;  $\frac{D_{100}}{D_{10}} = 2$

4) Pour Johnson France

$D_{30} = 4 d_{30}$  formations monogranulométriques

$D_{30} = 6 d_{30}$  formations hétérogènes avec  $C_u < 2.5$

5) Règles de Truelsenqui

a)  $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 3$  : le gravier devra laisser passer 75% à 85% de la formation ; soit  $d_{75}$ .

b)  $3 < C_u < 5$  : le gravier devra laisser passer 90 à 95% de la formation ; soit  $d_{90}$ .

c)  $C_u > 5$  : danger d'éboulement des gros éléments après élimination des fins. On recherchera une formation de  $C_u$  au plus égal à 5 avec d'autres échantillons.

d'ouverture (e) de la cripe est liée à la granulométrie du gravier par les règles suivantes.

$e = D_{85}$  d'après Terzaghi.

$e = D_0 = 7 d_{10}$  d'après Johnson USA.

$e = D_{60}$  d'après Johnson France.



Dans le "forage d'eau", une œuvre de Albert Nabillot, publiée par Crépine Johnson - France S.A; on trouve d'autres règles.

Une illustration de ces règles est faite en annexe A2 avec les caractéristiques granulométriques du forage de Djiffen

### 7.2.2 Relation Débit - Diamètre - coefficient d'ouvertures de la crépine "Forage d'eau"

$$q = 3600 \times \pi \times v DC.$$

$$q = 11310 v DC \quad (7.1)$$

$v$  : vitesse de l'eau à l'entrée de la crépine en m/s.

$q$  : débit en  $m^3/h$  pour un mètre de crépine.

$D$  : diamètre extérieur en m de la crépine.

$C$  : coefficient d'ouverture de la crépine.  $C = e/(e+h)$

$e$  : ouverture de la crépine.

$h$  : largeur du fil enveloppe de la crépine.

Le débit théorique, donné par la formule 7.1 est obtenu en supposant une crépine plongée dans de l'eau pure. Donc il doit être multiplié par coefficient de réduction pour tenir compte des conditions réelles.

Ce coefficient de réduction peut varier de 0,5 à 0,75.

### 7.2.3 Longueur de la crépine (L)

Ayant déterminé ( $q$ ) par la formule 7.1 et connaissant le débit ( $Q$ ) auquel on veut exploiter l'ouvrage, par une simple division, on peut déterminer la longueur minimale de crépine.

$$L = \frac{Q}{q} \quad (7.2)$$

En augmentant la longueur de crépine, on diminue la vitesse de passage de l'eau à travers les crépines.

Castany dans "Prospection et exploitation des eaux souterraines" donne la formule suivante :

$$L = \frac{Q}{\pi D v_c} \quad (7.3)$$

$L$  : longueur minimale de crépine en mètres.

$Q$  : débit du forage en  $m^3/s$

$D$  : diamètre de la crépine en mètre.

$v_c$  : vitesse critique de l'eau en  $m/s$ ,  $v_c = 65\sqrt{K}$

$K$  : coefficient de perméabilité

### 7.2.4 Position de la crépine

Les crépines sont placées au niveau des couches les plus perméables déterminées par sondage électrique. On peut avoir des portions de crépine

séparées par des morceaux de tubage ou des crépines qui n'interferent pas avec un tubage. Le choix entre ces deux dispositions est dicté par la nature et l'épaisseur des différents faciès lithologiques de la zone de captage ainsi que la résistance mécanique des crépines.

Pour une couche homogène et épaisse, on peut adopter la deuxième disposition ; tandis que la première disposition convient à une zone à faciès multiples d'épaisseur réduite. Dans ce dernier cas, on peut avoir des portions de crépine de slot différent.

### 7.2.5 Diamètre du tubage d'exhaure

Le tableau 7.1 tiré de "Techniques rurales en Afrique" N°7 montre que le débit varie peu en fonction du diamètre creusé.

Le choix du diamètre des tubages est plutôt axé sur la considération des pertes de charge et de l'encombrement de la pompe.

TABLEAU 7.1 Relation débit - diamètre du forage

D	2D	3D	4D	5D	8D
q	1,129q	1,199q	1,259q	1,359q	1,439q

D : diamètre du forage

q : débit disponible

## CONCLUSION

Il ressort de cette analyse sommaire que les forages étudiés offrent d'une manière globale une eau de mauvaise qualité. Leur teneur en fluor élevée, dépassant largement les limites admissibles fixées par l'OMS, nous amène à les qualifier d'eau impropre à la consommation. Pour remédier à cette situation, il faudrait certes un traitement par défluoration. Mais vu les moyens très limités dont dispose le Sénégal, aussi bien en personnel technique qu'en ressources financières, nous ne pouvons considérer actuellement la qualité de l'eau comme critère d'évaluation des forages.

De l'étude des forages, il découle que les ouvrages de Ouadiour et Djibor ont des qualités techniques médiocres. Cette situation résulte, d'après le diagnostic que nous avons effectué, du choix d'un équipement non adapté (gravier, cuillère, tube de 4") à partir d'études par corrélation qui sont généralement aléatoires. Les forages de Ouadiour et Djibor ont respectivement des efficacités de 53,41% et 50,56%.

Ces faibles efficacités se traduiraient par une exploitation anormalement coûteuse. En effet, il faudrait d'avantage de carburant aux moto-pompes pour vaincre les pertes de charges.

Ces coûts supplémentaires évalués sur une période égale à la durée de vie de l'ouvrage (20 ans), indiqueraient certes une

exploitation non viable économiquement et un investissement inefficace.

En définitive il importe de percevoir, au delà de la dimension technique d'un forage, son impact sur les populations.

Cet aspect fondamental des projets d'hydraulique villageoise ne peut être évalué qu'à travers des études socio-économiques menées sur le terrain. Ce n'est pas le cas dans ce projet Belge qu'on peut considérer comme un projet clé en main.

## DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS.

L'investissement des fonds disponibles doit être le plus efficace possible afin que les frais d'exploitation et les charges récurrentes occasionnées puissent être supportés par l'état et les collectivités locales. Pour atteindre cet objectif, la réalisation d'un projet d'hydraulique rurale doit être épaulée par des études socio-économiques solides.

But des études socio-économiques.

1. Définir les zones prioritaires en matière d'approvisionnement en eau potable.
2. Évaluer les besoins actuels et futurs en eau; définir les paramètres de dimensionnement des forages.
3. Déterminer les revenus des populations rurales concernées, et définir un mode d'exploitation financier en conséquence.
4. Réaliser un ouvrage compatible avec le milieu physique et humain.

Il s'agit donc de trouver un équilibre stable entre les dépenses d'investissement et les dépenses d'exploitation.

Sous cet angle de vue, il serait avantageux que la construction des forages fasse l'objet d'une réglementation et d'un contrôle plus consistant par les services publics. De cette manière on évitera la

prolifération d'ouvrages non performants .

Clini nous recommandons dans les projets de forages à grosse enveloppe financière et intéressant des masses rurales importantes :

- de mener des études socio-économiques sur les rites et implantation des ouvrages et d'en faire dans le cadre de ce projet Belge.

- Des prélèvements d'échantillons par carottage mécanique dans les sables aquifères du maestrichtien ; le choix de l'équipement de captage se fera sur la base des résultats de l'analyse granulométrique dans le but d'atténuer le caractère aléatoire des études par corrélation.

- de tenir compte des pertes de charges anormales dans la réception proximale .

## ANNEXES

### A1. Interprétation graphique des essais de puits :

#### Courbes rabattement spécifique - débit. (Figure 1)

G. Castany dans Principes et méthodes de l'hydrogéologie, donne l'interprétation graphique suivante de l'équation généralisée des puits en nappe captive.

$$\Delta = BQ + CQ^n \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta}{Q} = B + CQ^{n-1}.$$

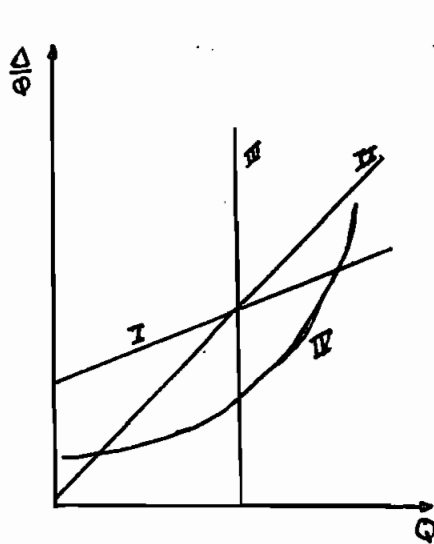


Figure 1

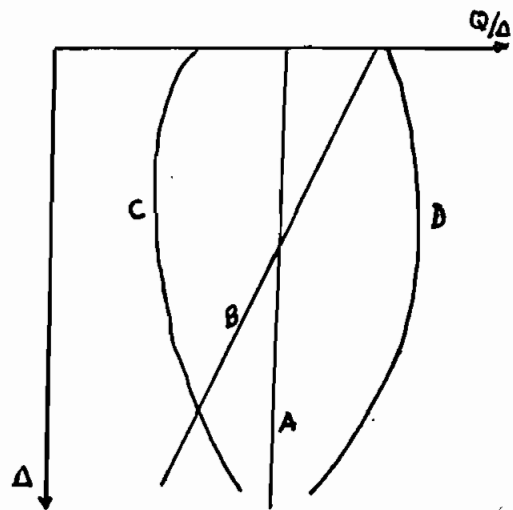


Figure 2

I :  $\Delta = BQ + CQ^2$

II :  $\Delta = CQ^2$  ; le régime turbulent domine dans l'aquifère et dans le puits

III :  $\Delta = BQ$  ; écoulement laminaire avec pertes dans le tubage et dans la crépine nulles ou négligeables.

IV :  $\Delta = BQ + CQ^n$  avec  $n = 3, 4, \dots$  ; courbe concave vers le haut.

#### Courbe rabattement - débit spécifique (Figure 2)

D'après G. Castany dans Traité pratique des eaux souterraines

A : qualifie un puit artésien à faible rabattement



- B : nappe libre pour des débits inférieurs au débit critique  
 C : puits artésien perturbé par des pertes de charge anormales  
 D : manque de débit définitif ou apparition d'un développement en cours de pompage.

## A2 Exemple de choix du gravier et de la crépine - Forage de Djiffé Méthode graphique donnée dans le "forage d'eau"

La figure 5 qui porte la courbe granulométrique du terrain apte pour le forage de Djiffé illustre la méthode pour déterminer la granulométrie du gravier additionnel qui avec une précision de  $\pm 8\%$ .

Un bon gravier doit avoir un coefficient d'uniformité égal à 2. le point D est fixé comme suit :  $BD = \frac{BC}{2-1} = BC$

D<sub>70</sub> (l'abscisse à 70% du gravier) = d<sub>70</sub> (l'abscisse à 70% du terrain aquifère)

Ceci nous donne le point A de la courbe granulométrique du gravier. La droite DA constitue la portion caractéristique du gravier additionnel. Retenons les valeurs des abscisses à 90% et à 40% ; soit BE = 1,08 mm et CF = 2,16 mm.

le gravier sera défini, comme suit : 10% d'éléments plus fins (en poids) que 1,08 mm et 40% d'éléments plus gros que 2,16 mm, avec une tolérance de  $\pm 8\%$ .

L'ouverture de la crépine ou slot est prise égale à l'abscisse à 90% de la courbe du gravier, soit environ  $43/1000'' = 0,043'' = 1,0 \text{ mm}$  ; slot 43.

### Calcul de la longueur de crépine.

cette longueur sera calculée pour un débit de 40 m<sup>3</sup>/h, une vitesse d'entrée dans l'eau dans la crépine de 1 cm/s et une hauteur du fil enveloppe de

2,28 mm (h), "Forage d'eau"

Pour une crépine de diamètre nominal 4"  
on trouve dans techniques rurales en Afrique N° 7

$\Phi_{ext} = 95\text{ mm}$  et  $\Phi_{int} = 76\text{ mm}$

En appliquant la formule on obtient

$$q = 3600 \pi r (0,01 r D) \times c \quad ; \quad c = \frac{e}{e+R} = 1,0 / (1,0 + 2,28) = 0,305 = 30,5\%$$

$q = 3,28 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  en eau claire.

longueur de crépine en eau claire =  $\frac{40}{3,28} = 12,20\text{ m}$

longueur réelle =  $12,20 / 0,75 = 16,27\text{ m}$ .

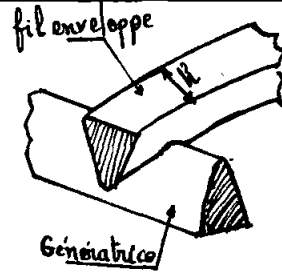


Figure 3 : Crépine Johnson

### A3 Carottage électrique.

Il consiste à mesurer deux grandeurs : la polarisation spontanée et la résistivité électrique des terrains traversés par le forage. Elles se mesurent dans un trou non tubé et rempli de boue au repos.

La courbe de polarisation spontanée (PS) permet de situer le toit et le mur des couches aquifères ou oléifères.

La courbe de résistivité renseigne sur la qualité et l'importance du fluide liquide de ces couches aquifères, donc leur hydraulicité. Elle est déterminée par les sondes normales, petite et grande.

des couches perméables se reconnaissent sur le diagramme de carottage électrique par des renflements.

la figure 4 illustre le dispositif de mesure de la résistivité.

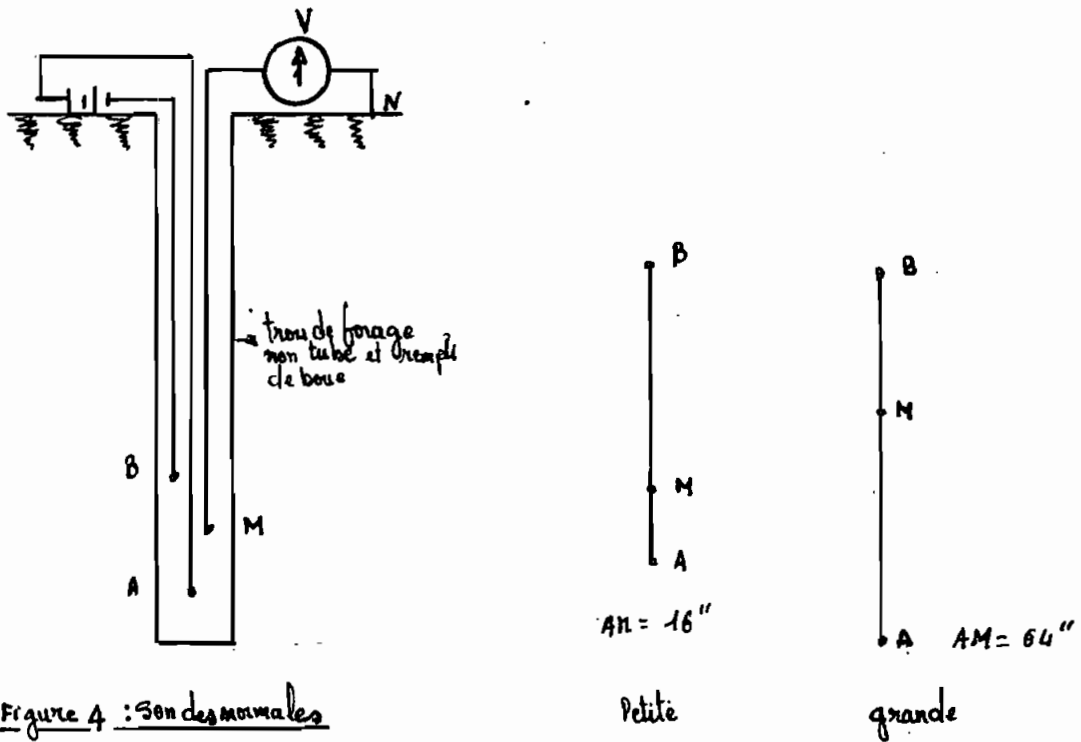
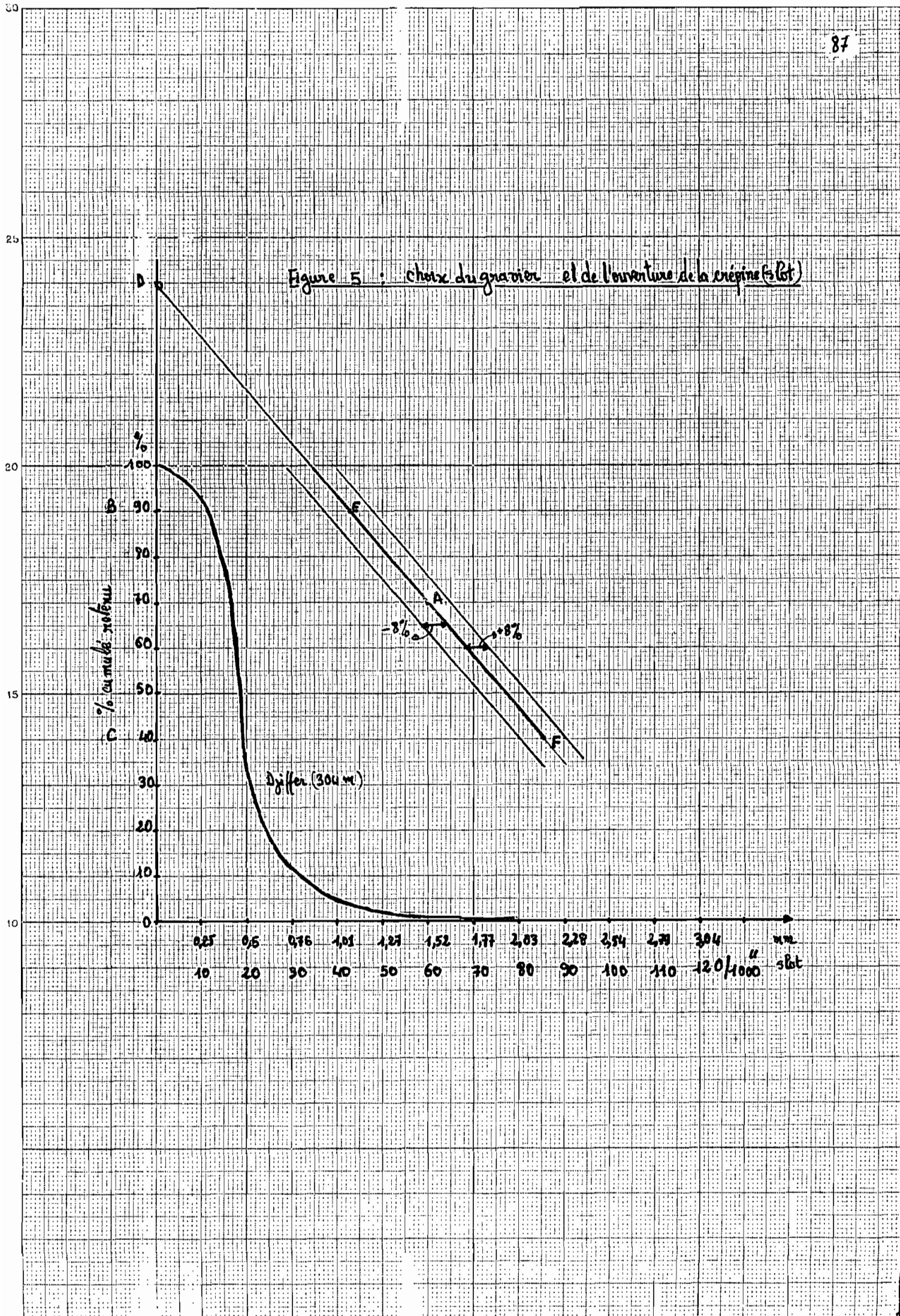


Figure 4 : Sondes normales

"La résistivité mesurée par la grande normale est plus élevée que celle de la petite normale dans les couches aquifères d'eau douce. C'est l'inverse avec des eaux souterraines salées". Prospection et exploitation des eaux souterraines. Gastany.

Figure 5 : choix du grainier et de l'ouverture de la crépine (Pot)



### EVALUATION DU COUT D'UN FORAGE (projet Belge N° 320.4401).

"D'après les quantités réellement exécutées, aux prix figurant dans le cahier des charges".

Exemple du puits de Ouadiour :

Designation des travaux et fourniture	unités	quantités réellement exécutées	prix unitaires en francs belges	prix total en francs belges
I.1 Transfert d'un atelier complet de forage. Europe vers Dakar.				* 7 491 950
I.1 bis De Dakar vers Europe				* 1 269 464
I.2 Transfert d'un atelier complet de forage d'un chantier à un autre ou rempli sur Dakar				
- sur route	Km	230	7 470	1 718 100
- sur piste	Km	1	8006	8006
I.3 Montage et démontage d'un atelier de forage	U	1	158 035	158 035
<b>II FORAGE</b>				
II.1 Diamètre 18" 1/2	M			
II.2 Diamètre 14" 3/4				
II.2.1 Continental terminal	M	32,5	4 719	155 317,5
II.2.2 Dans les marnes et argiles	M	84	5 681	477 204
II.2.3 Dans les calcaires	M	36	5 671	204 156
II.2.4 Dans les sables	M	2,5	5963	14 907,5
II.4 Diamètre 8" 1/2				
II.4.1 Dans les marnes et argiles	M	58	4 934	286 172
II.4.2 Dans les calcaires	M	59	4 931	290 925
II.4.3 Dans les sables	M	53	4 933	261 449
<b>III Diagraphie</b>				
III.1 Aménage et installation du matériel	U	3/5	45 000	27 000
1.2 Résistivité (SN et LN)	M	155	70	10 850
1.3 Polarisation spontanée (PS)	M	155	70	10 850
1.4 Gamma ray	M	315	70	22 050
III.2 Analyse d'eau en labo	U	1	13 699	13 699
III.3 Mesure de verticalité	M	315	141	44 415

\* Non comptabilisés dans le coût total

IV	Equipement				
IV.1	Fourniture sur chantier				
IV.1.1	Tube soudé pour eau $\phi$ nominal 400mm NBN 744	M	10	1832	18320
.1.2	Tube casing API 10" 3/4	M	161,6	3148	508716,6
.1.4	Tube API 4"	M	151,5	1094	165741
.1.5	Tube crépine à fentes continues acier inox 18-8 $\phi$ 4"	M	24,5	5829	142810,5
.1.7	Pièce de fond LP API 4"	P	1	4658	4658
.1.8	Centreurs à lame				
	1) Pour casing API 10" 3/4	P	3	3133	9395
	2) Pour tubes LP API 4"	P	3	2405	7215
IV.2	Préparation, descente et mise en place d'une colonne	M	348,7	737	256991,5
IV.3	Cimentation d'une colonne 1) par refoulement à travers la colonne	M <sup>3</sup>	8,86	1135	98656,7
IV.4	Mise en place d'un massif de gravier	M <sup>3</sup>	1,08	19276	20818,06
IV.6	Boucon mâle à visser pour casing API 10" 3/4	P	1	5150	5150
V.1	Fourniture de polyphosphate de soude	T	1	20678	20678
	Pompage d'essai				
	Installation du matériel	U	1	109904	109904
	Installation d'une conduite d'éva- cuation	M	10	14	140
xxIV.3	Groupe mot. pompe 40m <sup>3</sup> /h à 50 mCE	U	1	1925000	1925000
	TOTAL (francs Belges)				7091816,4 FB
	TOTAL (francs CFA)				49642715 CFA

Extrait du cahier des  
charges - Projet Belge 320-4401

COUPES PRESUMÉES

I. Situation géographique

- Région : Sine Saloum
- Département de : Foundiougne
- Arrondissement de : Djilor
- Coordonnées :
  - longitude : 16°20'00"
  - latitude : 14°03'32"
  - altitude : 5 m snm

II. Données hydrogéologiques

- Niveau statique de la nappe phréatique : - 0 m. sns
- Système hydraulique à capter : Maastrichtien
- Niveau statique du Maastrichtien : ± 0 m.sns

III. Propriétés chimiques de l'eau

- Nappe phréatique : Hyperchlorurée sodique
- Nappe Maastrichtienne : Chlorurée sodique (1 à 2 gr/l)

IV. Débit nécessaire

- 40 m<sup>3</sup>/h. (maximum de pompage d'essai 80 m<sup>3</sup>/h., niveau dynamique prévisible - 20 m sns)

V. Coupe lithologique présumée

- De 0 à 50 m : sables, sables argileux, latérites (C.T.)
- De 50 à 120 m : alternance de marnes, calcaires (Eocène)
- De 120 à 200 m : argiles (Eocène)
- De 200 à 220 m : série calcaro-marneuse (Paléocène)
- De 220 à 240 m : calcaires gréseux et argiles sableuses
- De 240 à 340 m : sables avec passées calcareuses (Maastrichtien)
- Profondeur à atteindre : 340 m sns.

VI. Schéma de forage

- De 0 à 10 m : Ø minimum 18" 1/2
- De 10 à 225 m : Ø minimum 14" 3/4
- De 225 à 340 m : Ø minimum 8" 1/2

VII. Equipement

- De 0 à 10 m : tube guide  $\varnothing$  nom. 400 mm. NBN 744 cimenté sur toute la hauteur
- De + 0,70 à 225 m : tube casing API 10" 3/4 cimenté sur toute la hauteur
- De 220 à 311 m : tube L.P. API  $\varnothing$  4"
- De 311 à 335 m : tube crépiné à fente continue  $\varnothing$  nom. 4"
- De 335 à 340 m : tube L.P. API  $\varnothing$  4" muni d'une pièce de fond.

L'espace annulaire 8"1/2 - 4" sera rempli de la manière suivante :

- de 340 à 255 m : gravier calibré
- de 255 à 245 m : concassé de basalte
- de 245 à 220 m : cimentation

VIII. Capacité des ouvrages d'emmagasinement :

Château d'eau : 100 m<sup>3</sup> /

Réservoir : 200 m<sup>3</sup>

IX. Capacité de la pompe

40 m<sup>3</sup>/h à 35 m CE

X. Adduction

1.300 m pour 4 bornes fontaines.



## A6 FORAGE. PUIIS (Figure 6)

Un forage peut être exploité par pompage ou par un puits sur forage. Dans le cas d'un forage-puits, l'eau ascendante de la nappe profonde à l'intérieur d'un tube de forage est collectée dans un puits à fond bétonné. L'eau est alors tirée du puits par les moyens traditionnels de puisage en poulies, cordes de bois et traction animale.

D'après Techniques rurales en Afrique N°7 : « Chaque fois que le niveau de rabattement d'une nappe dans un tube de forage se situe à moins de 40 mètres du sol, le forage est exploitable par un puits  $\phi 1,80$  m si le débit de rabattement est de 5 à 10 m<sup>3</sup>/heure, ou par un puits de diamètre 2,50 m utiles, si le débit de rabattement est de 10 à 20 m<sup>3</sup>/heure.

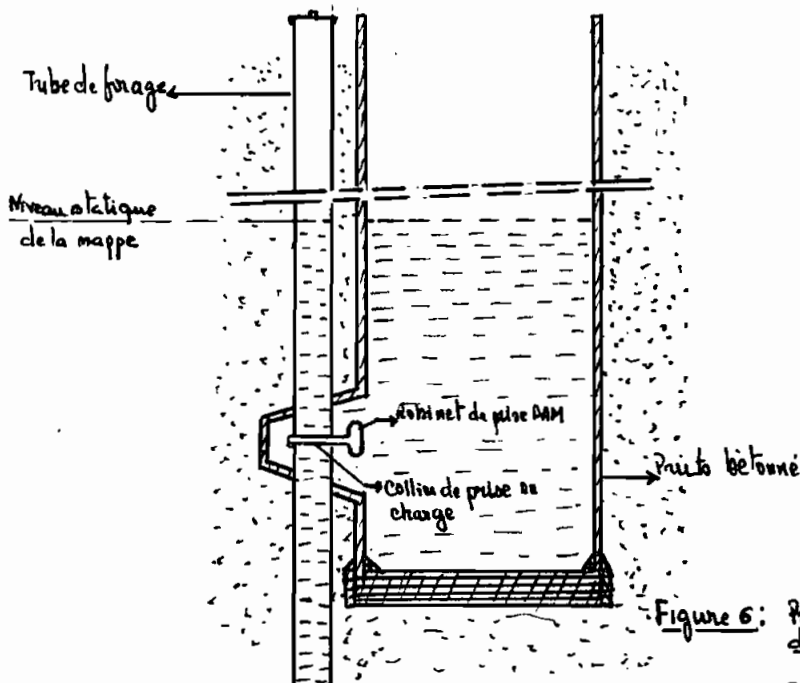


Figure 6: Puits d'exploitation d'un tube de forage

Système J. ROURE

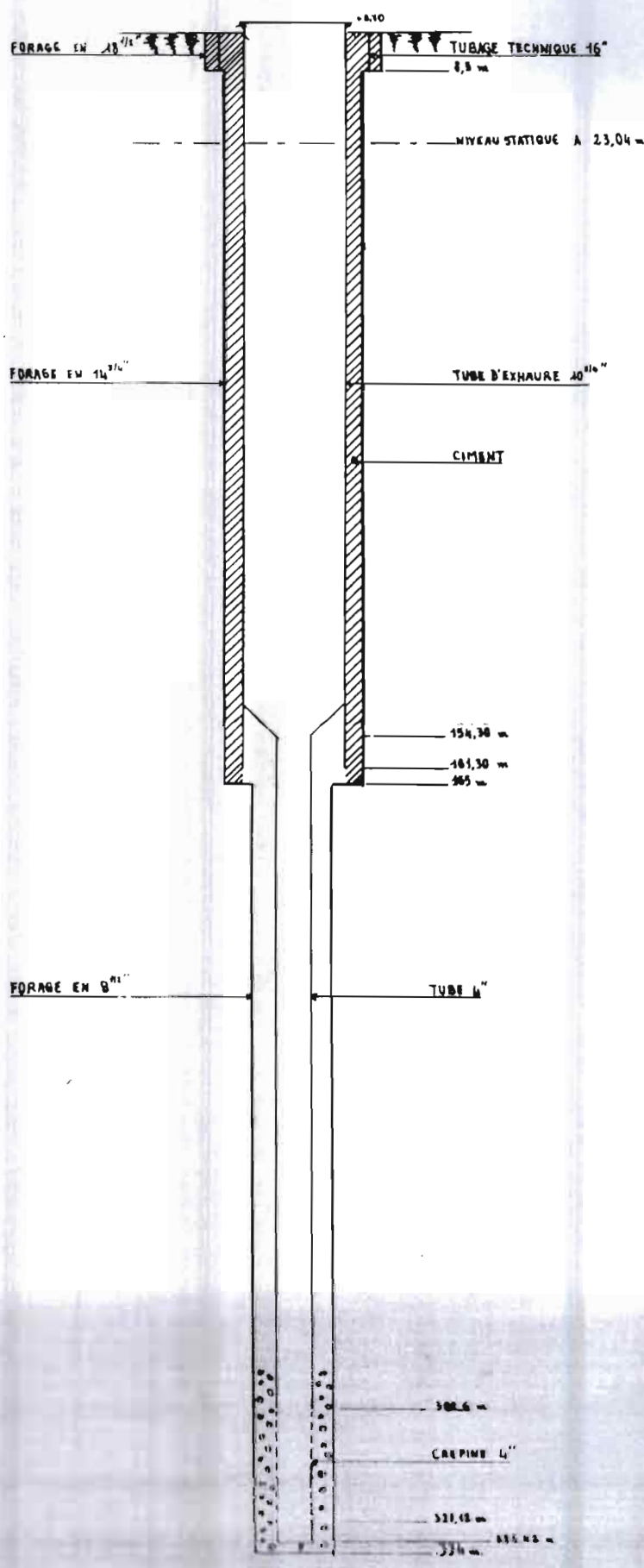
## BIBLIOGRAPHIE.

- 1 - G. Costany , Traite pratique des eaux souterraines , Dunod.
- 2 - G. Costany , Prospection et exploitation des eaux souterraines , Dunod.
- 3 - G. Costany , Principes et Methodes de l'hydrogeologie .
- 4 - J. Petouneux et R. Michel , Geologie du genie civil collection U  
- Armand Colin .
- 5 - Michael D. Campbell et Jay H. Lehr , Water-well technology,  
- Mc Graw-Hill Company Book.
- 6 - L. Huismans , Ground Water Recovery , University of Technology  
- Delft , Netherlands .
- 7 - Sylvain J. Pirson , Hand-book of well log analysis , For  
- oil and gas formation evaluation .
- 8 - Davis et Sorensen , Hand book of applied Hydraulics , Third edi-  
- tion Mc Graw-Hill.
- 9 - King et Brater, <sup>6th edition,</sup> V Hand-Book of hydraulics , Mc Graw-Hill .
- 10 - Chow , Handbook of applied hydraulics , Mc Graw-Hill .
- 11 - Etude des ressources en eau du littoral Nord entre Cayar et  
- Saint-Louis . 1974 . Projet Senegal PIP. 01 .
- 12 - Etude des eaux souterraines . Tome III , Nappe des forma-  
- tions secondaires et tertiaires du massif de Ndian et regions  
- environnantes . 1972 . OMS, Projet Senegal 3201 (Ex 22) .

- 13 - Albert Nabillot, Le Forage d'eau, Geopne Johnson France S.A.
- 14 - Synthèse des Etudes Hydrauliques, Etat des ressources en eau, Etude cofinancée par L'USAID, 1983 - DEH.
- 15 - J.R. Vaillant, Protection de la qualité des eaux et maîtrise de la pollution, Contrôle deversement d'eau polluée, Collection du BCEOM, Eynolles.
- 16 - Water - wastes and Health in hot climates, Feachem, Mc Grawy Hill Editors.
- 17 - Water quality and treatment, A Handbook of public water supplies. Prepared by the American water work association Inc.
- 18 - Politique générale de l'hydraulique au Sénégal, Conseil national du 31 juillet 1982.
- 19 - Volume 1 - Rapport final du projet d'hydraulique rurale à douga et Casamance". Décembre 1983, le bureau d'ingénieurs Conseils Balfours. Londres.
- 20 - Techniques rurales en Afrique N° 7, Hydraulique Pastorale.
- 21 - Rapport de l'étude des plans de base du projet rural d'approvisionnement en eau à la République du Sénégal Mars 1983, Agence japonaise de Coopération internationale..
- 22 - Cahier des charges du projet Belge N° 320-4407 Approvisionnement en eau en zone Sahélienne

FORAGE DE DUADIOUR

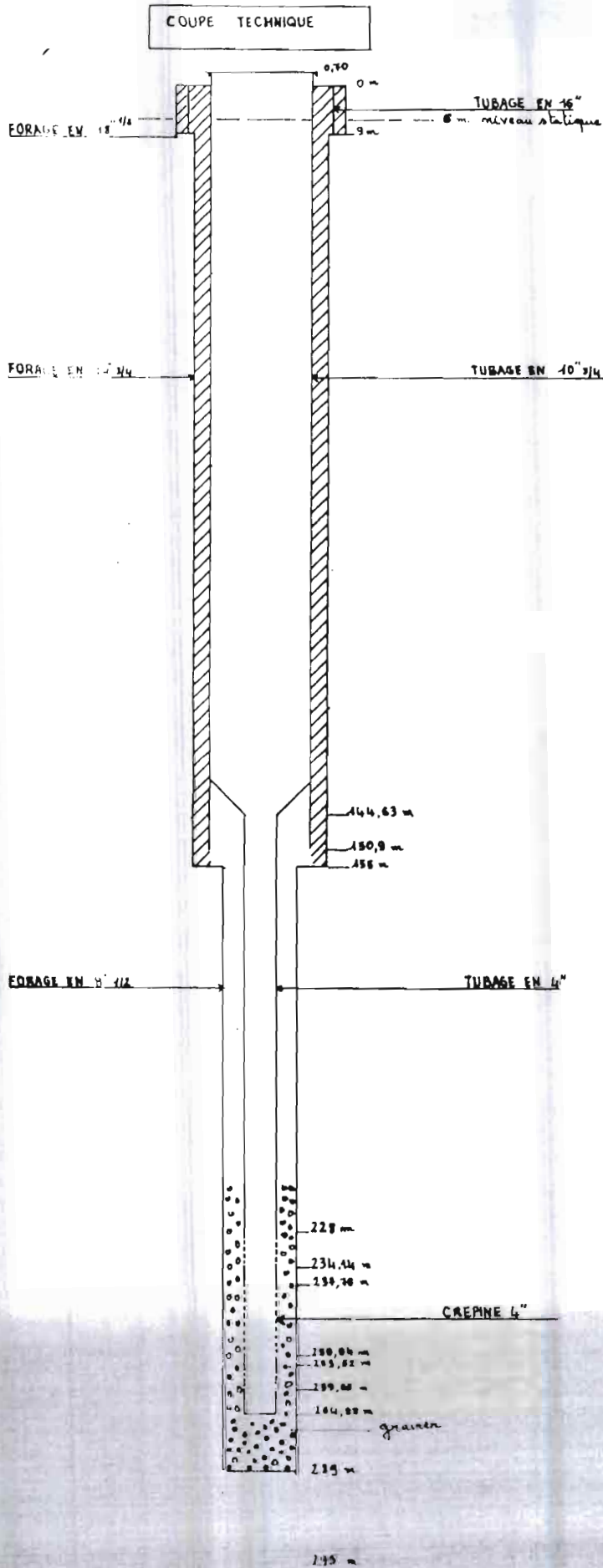
COUPE TECHNIQUE



COUPE GEOLOGIQUE PROFONDEUR (m) NATURE DES TERRAINS

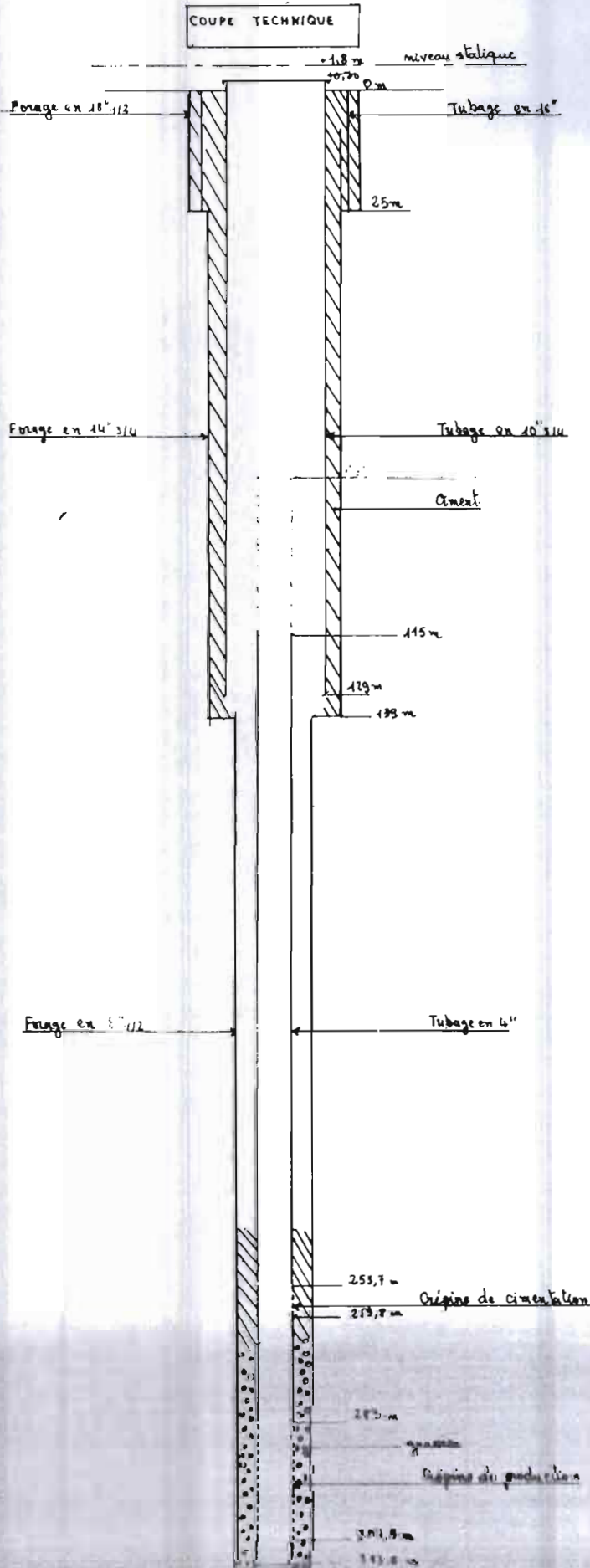
COUPE GEOLOGIQUE	PROFONDEUR (m)	NATURE DES TERRAINS
	0	
		sable ancien rose
	31	
	40	Latérite et argile jaune plastique
	49	Alternance de calcaire et marne jaune
	56	Calcaire à coquilles roses
		Argile et marne grise verdâtre
	79	
	92	Marne-calcaire, matière organique noire
		Calcaire coquilles un peu marneux
	108	
		Marne-calcaire gris
	140	
		Argile et marne grise verdâtre
	152	Lié de calcaire à MS
	167	Calcaire coquilles
	168	Marne et argile compacte
	171	Masse de calcaire et silice
	171	Marne et argile tendre
	175	Calcaire et argile
	182	Calcaire coquilles
	189	Calcaire tendre
	198	Marne noire et calcaire coquilles
	209	Marne-calcaire coquilles
		Calcaire gris légèrement marneux avec coquilles blanches
	211	
		Calcaire gris-blanc, peu de coquilles marneux à 219 m.
	234	
	242	Calcaire gris plus ou moins crudi
		Argile sableuse noire
	267	
		Argile noire à traces de sable moyen
	280	
		Sable moyen noir
	297	
		Sable moyen à silice
	304	Argile sableuse
		Sable fin à moyen noir
	334	

FORAGE DE NGOYE



COUPE GEOLOGIQUE	PROFONDEUR (m)	NATURE DES TERRAINS (d'après clichés)
	6	Sable ocreux rose
	10	Latérite et calcaire
	51	Argile jaunâtre avec passées d'argile - les
	67	Argile feuilletée de 30 à 40 cm; Passées de siltite de 15 à 25 m.
	67	Argile verte peu feuilletée
	99	Calcaire gris foncé, esquilleux avec traces de siltite.
	103	Calcaire légèrement ondulé.
	126	Calcaire gris et calcaire blanchâtre
	132	Calcaire très massives
	137	Calcaire gris et noir
	143	Masse avec passées de calcaire
	151	Calcaire gris foncé
	157	Calcaire blanc
	172	Mélange sable, calcaire, argile progressivement argileuse
	178	Le même mélange mais plus argileuse
	182	Sable brun argileuse
	197	Argile blanche à sable argileuse
	205	Sable très argileuse
	209	Sable brun légèrement argileuse
	214	Sable plus argileuse
	216	Sable très argileuse
	224	Sable brun légèrement argileuse
	228	Sable et argile (alternance)
	232	Sable très fin, gris foncé, argileuse
	250	Sable moyen brun, brunâtre et micellite argileuse, argile ocre (masses)
	286	Sable brun argileuse
	296	Argile ocre blanche

FORAGE DE DJIFFER

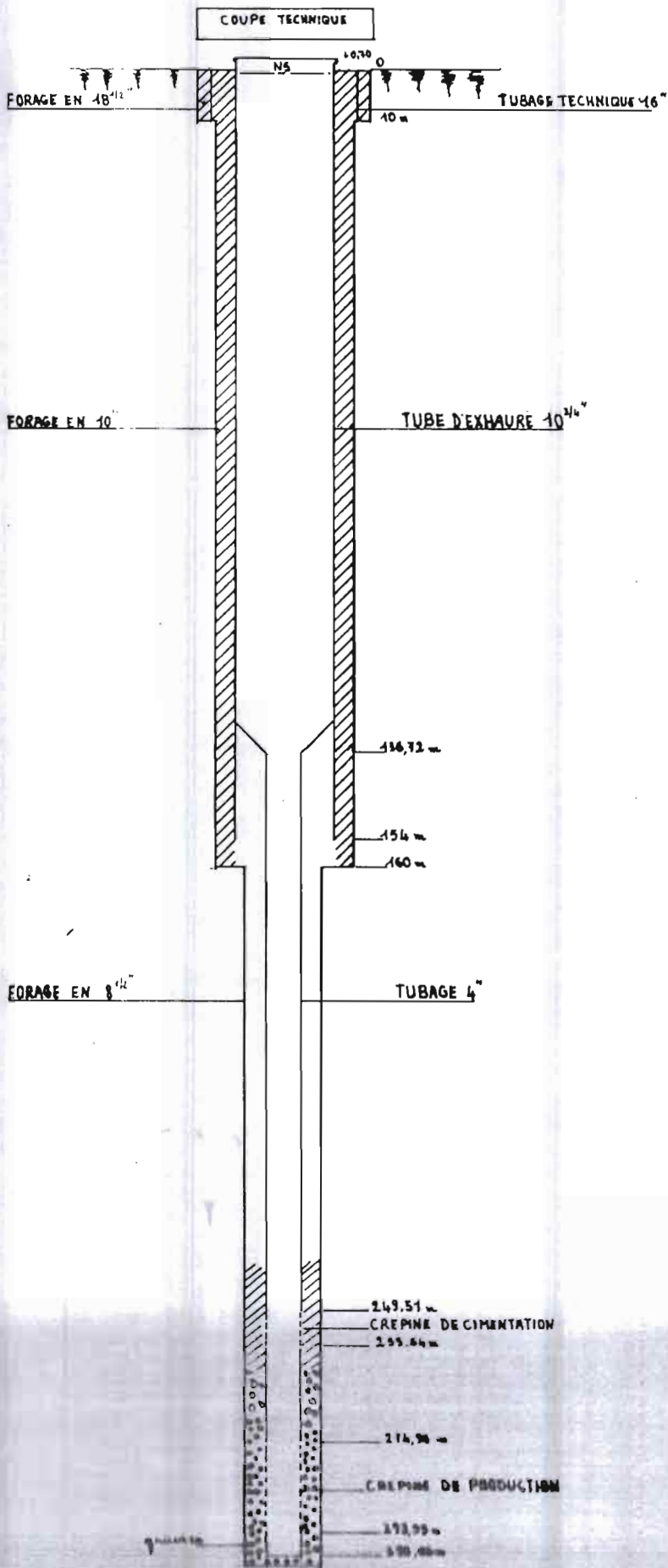


COUPÉ GÉOLOGIQUE	PROFONDEUR (m)	NATURE DES TERRAINS d'après cuttings
[Symbol]	12	Sable moyen grossier et coquilles multicolores
[Symbol]	16	Coquille multicolores sable coquilles
[Symbol]	25	coquille lauritique
[Symbol]	33	marne rose
[Symbol]	49	calcaire jaune
[Symbol]	73	calcaire blanc
[Symbol]	80	calcaire blanc
[Symbol]	100	marne calcaires
[Symbol]	128	marne roses et grises
[Symbol]	250	calcaires
[Symbol]	250	Sables argileux
[Symbol]	311	sables fins à moyens sables fins et moyens sables fins à moyens
[Symbol]	311	sables fins et moyens

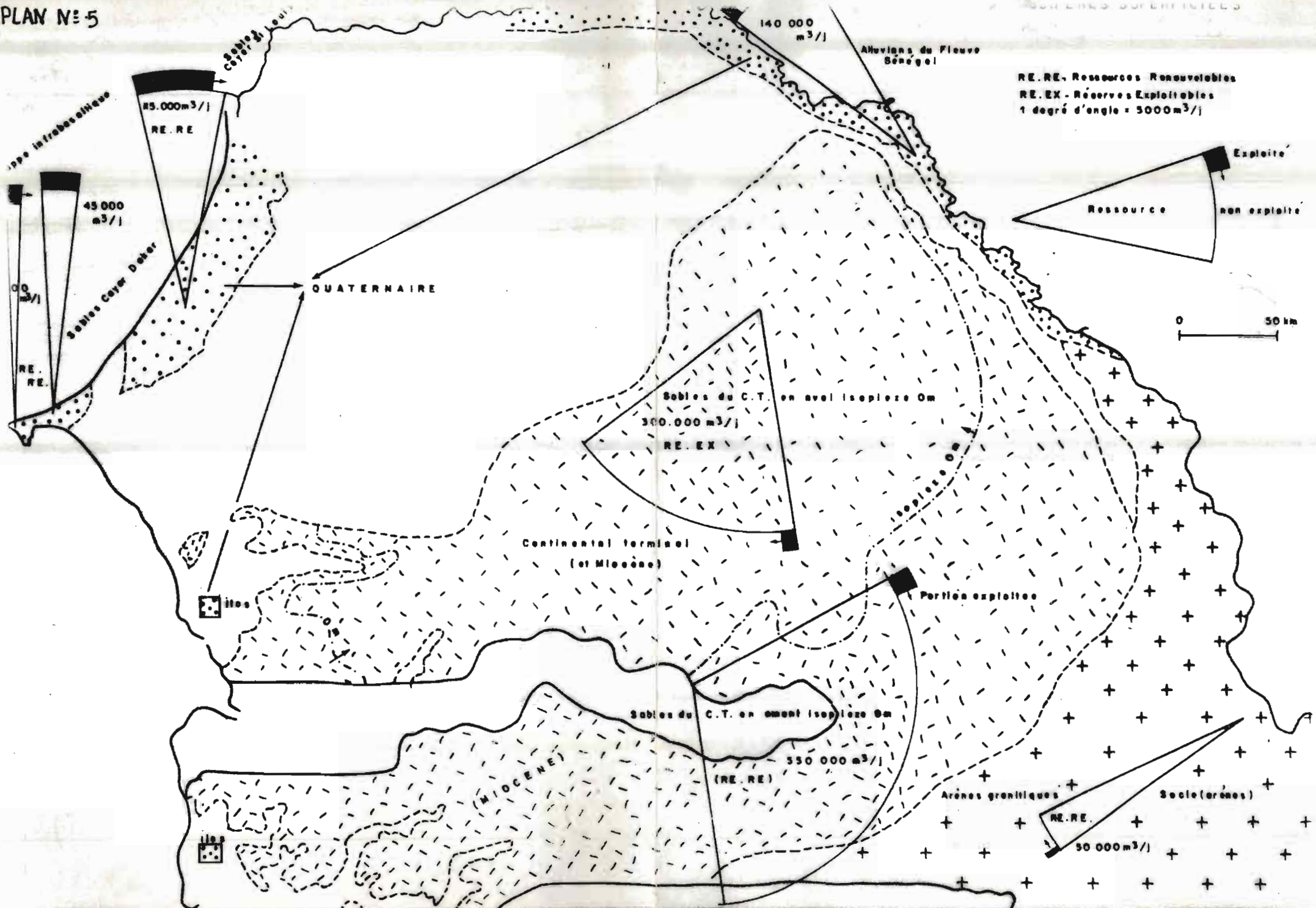
NS : niveau statique à 1,57 m

PLAN N° 4

FORAGE DE DJILDR



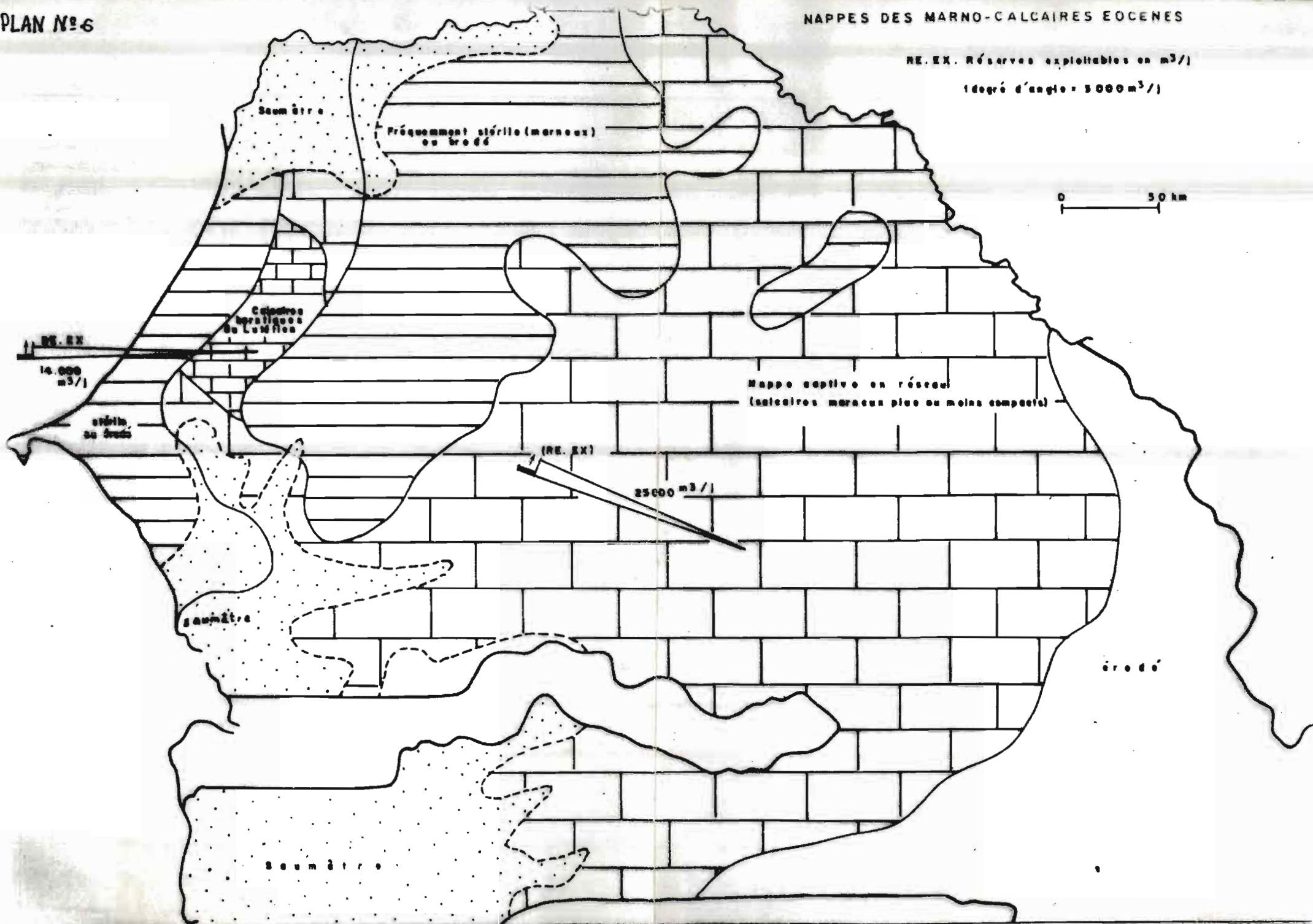
COUPE GEOLOGIQUE	PROFONDEUR	NATURE DES TERRAINS
	0	
	10	Sable noir
	12	sable latériteux jaune
	19	sable beige fin un peu latériteux
	20	sable argileux latériteux jaunâtre
	46	Calcaire jaune latériteux avec intercalation de marne plastique
	49	Marne noire légèrement calcareuse
	80	Calcaire coquilles jaunes légèrement latériteux, un peu marneux
	93	Calcaire gris-jaune légèrement marneux, latériteux
	109	Marne-calcaire gris-beige traces de latérite
	136	Marne gris-noire plastique Pas de traces de silice et d'argile feuilletée
	154	Argile noire à zones riches de calcaire gris et blanc de la silice
	165	Argile noire dure calcareuse
	214	Calcaire gris-noire devenant noir foncé à partir de 192 m
	245	Argile noire
	273	Sable fin avec lamelles et liques
	279	Sable argileux, argile plus consolidée de 260 à 280
	281	Sable noir argileux





RE. EX. Réserves exploitables en m<sup>3</sup>/l

(degré d'angle = 5000 m<sup>3</sup>/l)



RE. RE. Ressources renouvelables en m<sup>3</sup>/j  
RE. EX. Réserves exploitables en m<sup>3</sup>/j  
1 degré d'angle = 5000 m<sup>3</sup>/j

**SUREXPLOITATION**

17 000 m<sup>3</sup>/j  
RE. RE.

0 50km

Nappe captive en  
réseau-marno-calcaires  
plus ou moins compacts

Nappe captive en  
réseau marno-calcaires  
plus ou moins compacts

10 000 m<sup>3</sup>/j  
RE. EX

Catastrophe  
terrestre

Sanger direction  
moyen  
Région de Mbeur et  
Sabitane

saumâtre

Faibles marnes

Faibles  
Marnes

saumâtre

Erodé

