

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

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

GC. 0620

Titre Suivi et contrôle de l'exécution d'un  
forage d'eau

Auteur M. DIOP

Génie CIVIL

Date JUIN 1984

Ecole Polytechnique de Thiès

# PROJET

DE FIN D'ÉTUDES

SUIVI ET CONTRÔLE  
DE L'EXÉCUTION  
D'UN FORAGE D'EAU

Présenté par : MAKHMOUT DIOP

OPTION GÉNIE CIVIL

Directeur de projet : ROBERT MONTULET

A ma mère,

pour tous les efforts qu'elle a consentis pour moi.

A tous mes collègues de l'EPT

pour leur soutien moral et leur sympathie  
durant toute ma formation.

A mon confrère Mamadou Guèye, de sa

collaboration pour la confection de ce rapport.

# TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS	0
Sommaire	1
Introduction	2
CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS	3
I-1 l'eau dans le sol	3
I-2 données géologiques et hydrogéologiques	7
CHAPITRE II EXÉCUTION D'UN FORAGE	8
II-1 Introduction	8
II-2 Principe DE FONCTIONNEMENT d'une sondeuse rotative	9
II-3 -1 choix de l'OUTIL	11
II-3-2 Contrôle du poids SUR L'OUTIL	14
II-3-3 - Contrôle de la vitesse de rotation	14
II-4 Choix des Tubes	16
- détermination des diamètres	17
- résistance aux efforts de traction	18
- résistance aux efforts d'éclatement	

	Pages
- résistance au flambage et à la flexion	18
- résistance aux efforts d'écrasement	19
- perte de charge	20
II-5 LES FLUIDES DE FORAGE	21
- circuit de la boue	21
- nature de la boue	22
- rôle de la boue	23
- propriétés de la boue	26
- contamination de la boue	31
II-6 DIAGNOSTIC	32
- potentiel du sol	"
- Diamètre	"
- mesure de résistivité	33
- Interprétation des courbes	35
II-7 LE GRAVILLONAGE ET LE CHOIX DES CRÉPINES	36
- GRAVILLONAGE	"
- choix des CRÉPINES	38
II-8 LA CIMENTATION	41
II-9 LE DEVELOPPEMENT	43
II-10 ANALYSE DE L'EAU	46
II-11 ESSAIS DE POMPAGE	49
- essai de pompage sur un puits	50

	Page
- interprétation des courbes caractéristiques	56
- essai de "tache de sable"	59
- Calcul des pertes de charges turbulentes	60
- Reception	61
CHAPITRE III - Conclusion	63

Annexe :

	0
- Les nappes aquifères au Senegal	1- 4
- Exemple de coupes géologiques (Djferre)	5- 8
- Exemple de courbes (diagraphie)	9
- gravillonnage (schéma)	10
- Cimentation (schéma)	11
- quelques schémas de forage	12-14
- Tableaux : résultats des essais de débit	15- 17
- diagramme (émulseur air-lift)	18
- Abaque : perte de charge	19
- tableau : Analyse de l'eau	20
- diagramme d'analyse de l'eau	21
- Bibliographie	22

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma reconnaissance

A mon Directeur de projet : M<sup>r</sup> Robert Montulet :

- à la Direction des Etudes et Programmation (DEP),  
Dakar ; vacataire à l'École Polytechnique  
de Thiès, pour n'avoir ménagé aucun effort pour  
le bon déroulement et la réussite de ce projet.

A M<sup>r</sup> Mahauden : géologue du projet et  
contrôleur du chantier, pour sa disponibilité constante  
à répondre à toutes nos questions relatives à ce projet.

A M<sup>r</sup> PECHER, chef de chantier, pour sa  
contribution.

A M<sup>r</sup> A. Paris : professeur à l'E.P.T, de sa disponibilité,

Je voudrais enfin adresser mes remerciements

A tous les employés du chantier, de Djiffère,

A mes chers collègues de l'École Polytechnique de Thiès, de  
leur soutien moral dans une période difficile.

## SOMMAIRE

Le but de ce travail est de déterminer et de faire l'étude des différentes étapes de l'exécution d'un forage:

- choix de la machine de forage.
- choix des diamètres des tubes de la colonne.
- étude des fluides de forage
- échantillons géologiques et diagraphie
- analyse de l'eau.
- Cimentation.
- essai de pompage
- développement du forage.
- réception du forage.

Il s'agit ensuite de définir les différents paramètres à surveiller pour un contrôle efficace de l'exécution d'un forage en vue d'obtenir un ouvrage adéquat.

Et, enfin pour soutenir l'analyse théorique qui sera ainsi faite, nous choisirons le forage de Djiffère comme exemple de référence.



## INTRODUCTION

Le développement de tout pays passe nécessairement par la maîtrise de l'eau. En effet, l'existence, la performance des différentes branches ou secteurs économiques (industrie, agriculture) et la vie des populations restent essentiellement soutenues par un approvisionnement suffisant en eau de bonne qualité. Or, au Sénégal, un déficit pluviométrique persistant et une évaporation excessive ont largement réduit le potentiel en eau disponible à la surface et menaçant ainsi la survie des populations. Ceci fait de l'alimentation en eau, un problème crucial auquel une solution rapide et efficace doit être mise à jours. En fait, la quantité d'eau présente sur cette terre dépasse largement les besoins des peuplements, mais, en majeure partie la qualité de celle-ci nécessite des traitements parfois onéreux. Le traitement des eaux de surfaces très polluées ou la distillation des eaux de mer peuvent s'avérer très coûteux. Ainsi, devant la détérioration du potentiel en eau superficielle, la seule source capable d'assurer de manière efficace et pérenne la satisfaction des besoins en eau au Sénégal, s'avère être les ressources des eaux souterraines. - Le projet s'inscrit dans le cadre de l'exploitation des ces ressources. Il vise, en fait à définir et à adapter des méthodes d'exécution des ouvrages de captage, car de la bonne réalisation de ceux-ci, dépendent la quantité et la qualité de l'eau livré à la consommation.

## Chapitre I : GÉNÉRALITÉS

- L'exécution d'un forage d'eau nécessite la traversée d'une ou de plusieurs couches de terrains avant d'atteindre le gisement en cause souterraines ou nappes. La nappe est en fait la roche détentrice de l'eau exploitable.

- Ceci nous conduit donc à faire une étude sommaire de l'eau dans le sol et des caractéristiques des différentes roches traversées

### I.1 - L'EAU DANS LE SOL

- On a 3 types d'eau présents dans le sol: l'eau de rétention, l'eau pelliculaire, et l'eau gravifique ou de gravité.

Nous allons voir à partir de leurs propriétés, lequel de ces types d'eau est le plus apte à être exploitée à l'aide d'un ouvrage de captage.

#### a. L'EAU DE RÉTENTION

La molécule d'eau, de par son caractère polaire se fixe sur les cristaux grâce aux irrégularités électroniques des surfaces. C'est en fait l'eau adsorbée ou liée. Elle se présente dans le massif sous forme

d'eau hygroscopique ou d'eau pelliculaire.

L'eau hygroscopique est celle liée à la particule de sol par des forces d'adsorption. Elle ne peut se déplacer qu'à l'état vapeur. Sa quantité n'est pas constante, elle varie en fonction de la porosité, de l'humidité, de la température et de la pression de l'air.

L'eau pelliculaire, elle, entoure les particules de sol et leur eau hygroscopique d'une mince pellicule d'eau d'épaisseur variable. Elle peut se déplacer à l'état liquide par le jeu des attractions moléculaires des particules voisines.

Cependant, elle ne peut se déplacer par gravité, ne transmet pas les pressions hydrostatiques et ne peut être extraite que par centrifugation. C'est en fait l'eau d'adhésion.

#### b - L'EAU CAPILLAIRE

- c'est l'eau retenue dans les pores par les forces de capillarité. Elle se situe au dessus de la surface piezométrique et se maintient en équilibre par l'action de la tension superficielle.

Elle ne transmet pas la pression hydrostatique. Et, dépendamment de sa position par rapport à la ligne piezométrique, on peut avoir :

- l'eau capillaire isolée,  
qui n'occupe que partiellement les interstices ou vides, le reste étant occupé par l'air ou la vapeur. Elle ne se déplace pas sous l'action de la force de gravité.

- l'eau capillaire continue ou soutenue,  
qui remplit la totalité des vides laissés par les grains et subit l'action de la gravité

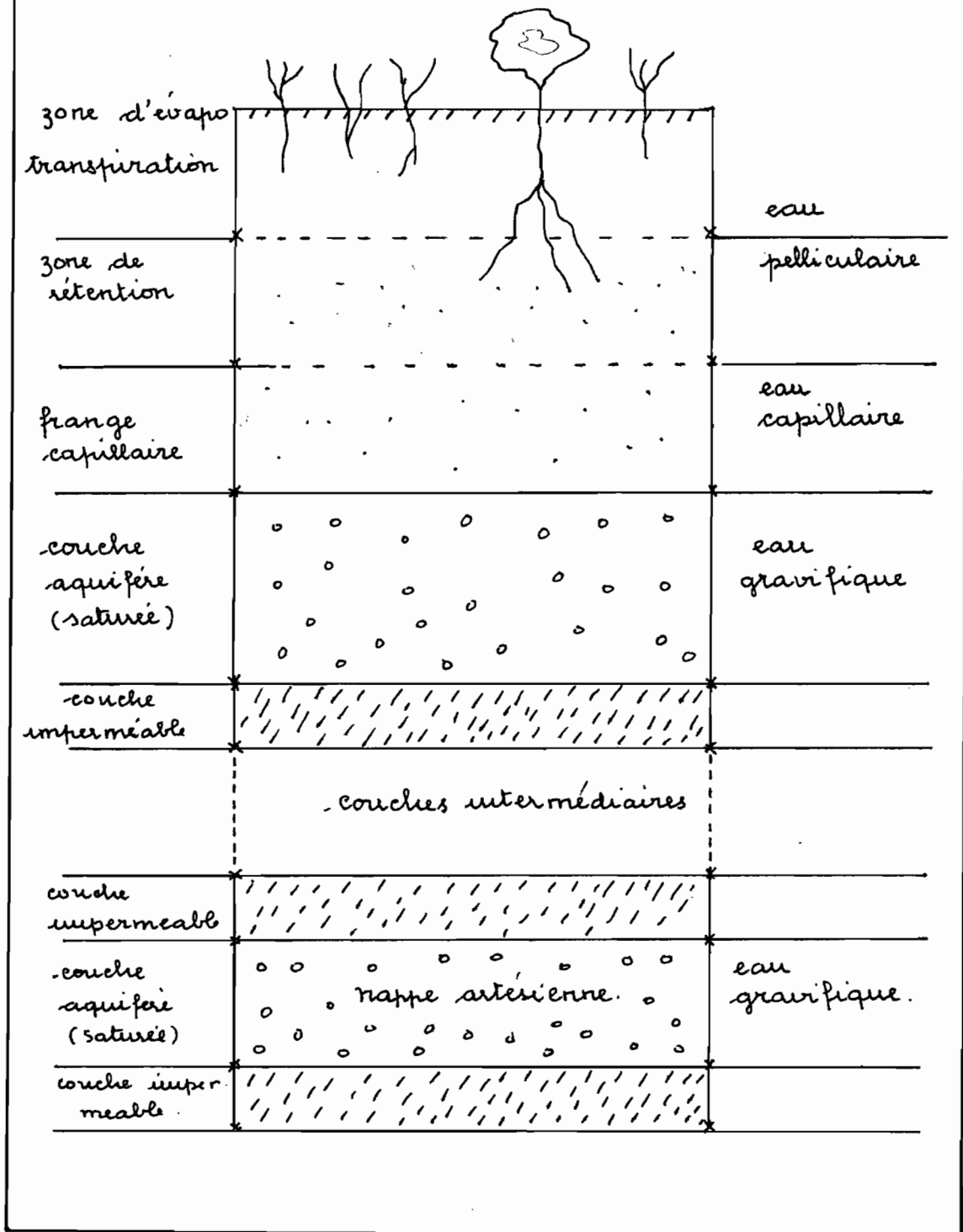
Il faut aussi noter que cette frange capillaire peut s'élever de 0 à 3 mètres au dessus de la ligne de saturation.

### C- EAU GRAVIFIQUE ou DE GRAVITÉ

Elle occupe les pores, interstices, fissures des roches. Elle se déplace par gravité et transmet la pression hydrostatique. Cette eau, à la différence des autres types d'eau, peut donc se déplacer dans les assises aquifères sous l'action des différences de pression. Elle constitue ainsi la partie active des eaux souterraines, celle exploitable à l'aide des ouvrages de captage (puits ou forage).

Sa capacité de retransmettre la pression fait que l'eau gravifique qui se trouve dans les nappes artésiennes s'élève dans le tubage, ce qui réduit de beaucoup la hauteur manométrique à vaincre par les pompes.

Fig-1      EXEMPLE DE  
 Schema DE RÉPARTITION DE L'EAU  
 DANS LE SOL



## I - 2      DONNÉES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES.

Le Sénégal est constitué d'un large bassin de sédiments reposant sur un sous-bassement constitué de roches métamorphosées ou intrusives.

L'étage quaternaire est composé de latérites et d'alluvions. Le tertiaire est représenté par les calcaires et les marnes du paléocène. Les roches du secondaire se limitent au maestrichtien, principalement formé de sables et de grès.

Au milieu de cette masse sédimentaire se trouvent plusieurs nappes aquifères dont les plus importantes se situent dans les sables du maestrichtien et les argiles du continental terminal. Et dans le cadre de la campagne de forage qui s'effectue au Sine-Saloum, on sera plutôt intéressé par les nappes se trouvant dans les calcaires du lutétien et les sables du maestrichtien.

L'aquifère du maestrichtien est artésienne et fournit les 70% des eaux souterraines exploitées. Il peut offrir environ  $500\,000\text{m}^3$  pour une durée estimée à 200 ans.

Pour la coupe géologique et la répartition des nappes avec leur capacité, voir respectivement les annexes, page: 5      et page 1

Enfin, disons que le Sénégal possède une réserve très importante d'eaux souterraines capable de réguler la consommation.

## CHAPITRE II

# EXÉCUTION D'UN FORAGE.

### II.1 - INTRODUCTION

En réalité, avant d'être captées, les eaux incluses dans les pores et les fissures du sous-sol ne constituent en fait qu'une ressource latente.

Et, la seule manière pragmatique de les exploiter est de creuser des puits ou des forages suivant des normes scientifiques. Nous disposons pour cela de méthodes telles :

- les sondeuses à percussion qui sont utilisées pour les forages dans les roches consolidées.
- les sondeuses rotatives. Elles conviennent à tous les types de terrain, plus particulièrement pour les roches meubles. Ainsi, cette méthode constitue de loin la plus adaptée pour le sous-sol sénégalais constitué essentiellement de roches sédimentaires. (non consolidées).

Cette méthode fera l'objet de notre étude dans ce projet. Elle consiste à effectuer le creusement ou la perforation par la rotation de l'outil (trépan) sous une injection de boue qui servira à remonter les déblais. Nous allons voir dans ce qui suit l'ensemble des opérations régissant l'exécution d'un forage.

## II-2 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE SONDEUSE ROTATIVE (OU FORAGE AU ROTARY).

Un outil monté au bout d'un train de sonde (tiges et masse-tiges creuses) est animé d'un mouvement de rotation de vitesse variable et d'un mouvement de translation verticale.

Une boue est injectée à l'intérieur des tiges et de l'outil. Elle sert à la remontée des déblais (cuttings) détachés du fond par cet outil. Cette boue est ensuite décantée dans des fosses ou bacs et devient apte pour une nouvelle réutilisation.

Elle est aspirée par une pompe à boue, puis injectée dans le train de tiges au niveau de la tête d'injection, qui est reliée à la pompe par un raccord et un flexible.

Cette tête d'injection est vissée au sommet de la tige supérieure par un filetage à gauche.

On sait qu'il existe une gamme très variée de trépan (outil), dépendant des fabricants

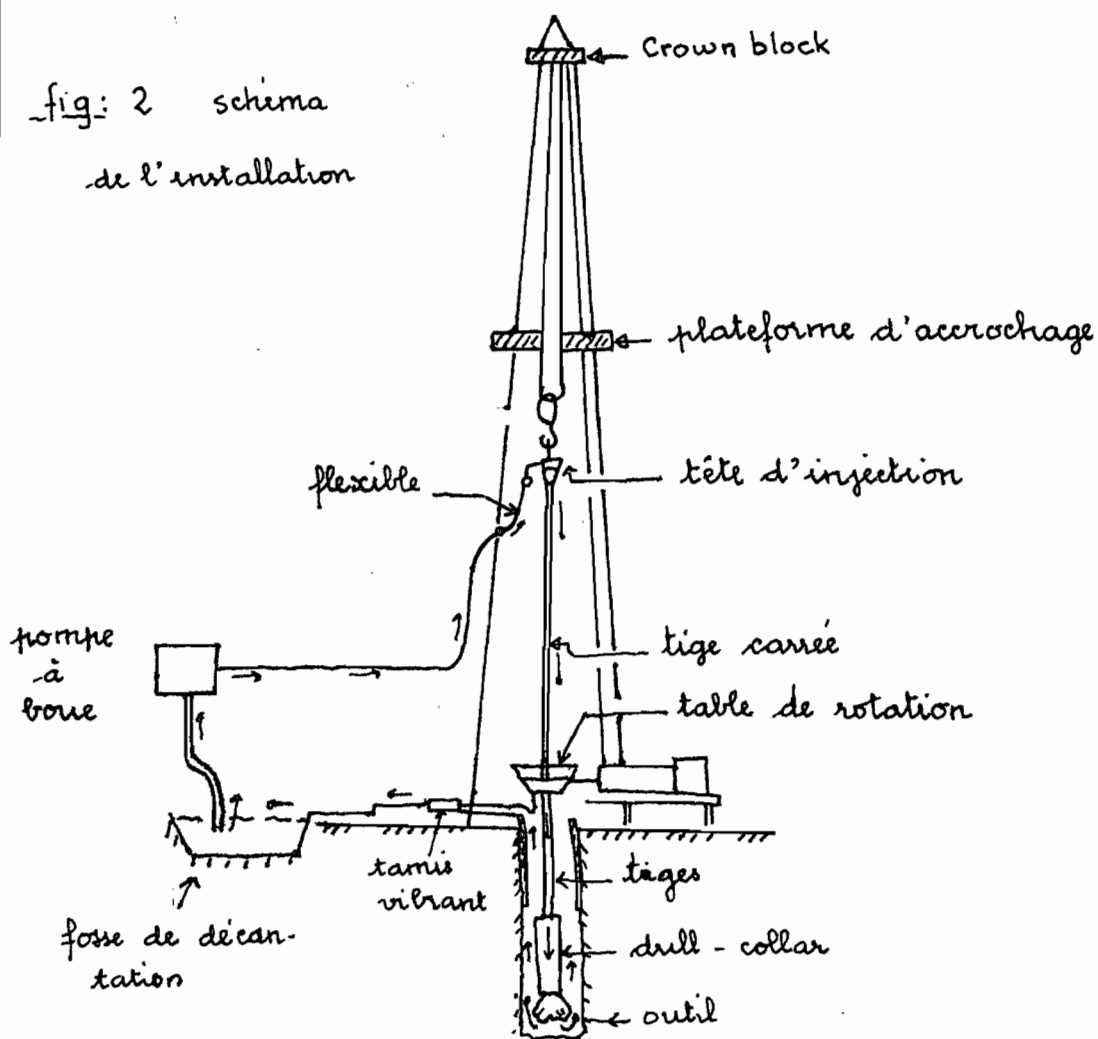
L'installation, dans son ensemble est composée de :

- un derrick ou mât
- un treuil
- une table de rotation



- 1 pompe à boue (ou à air éventuellement).
- 1 moteur électrique qui doit actionner tous les mouvements.
- 1 tête d'injection
- 1 tige carrée pour l'entraînement du train de tiges.
- 1 train de tiges : tiges et masse-tiges (drill collars) qui permettent à la table de rotation de communiquer son mouvement à l'outil et en même temps exercent le poids nécessaire pour l'avancement du trépan.
- Et des organes de commandes, de mesures et de contrôle.

fig: 2 schéma  
de l'installation



## II - 3 - 1 CHOIX DE L'OUTIL

Après la détermination de la coupe lithologique et les caractéristiques des différentes couches par des méthodes appropriées [essais sismiques, sondages de reconnaissance..., dans notre cas, le cumul des données, déjà existantes, et disponibles au laboratoire de géologie et mines ou au BRGM, a permis d'obtenir cette coupe], nous allons procéder au choix de l'outil (le trépan).

Le choix de l'outil est un facteur très important, car de celui-ci dépend toute l'efficacité des installations, donc le coût de l'exécution.

Les tréfans les plus couramment employés sont les tricônes à 3 molettes dentées dont les axes sont écartés de 120°. Et, dépendamment de la nature du terrain, on a :

- pour les terrains durs : tricône à dents obtuses, courtes et rapprochées.
- pour les terrains moins durs : tricône à dents longues, pointues et écartées.
- pour les terrains tendres et argileux : on utilise des tricônes à dents longues avec des axes de cônes décalés par rapport à l'axe de l'outil. Le décalage permet une interpénétration des dents et favorise le nettoyage des espaces libres éventuellement bouchés de débris. En outre, la possibilité de rotation et de glissement des dents sur le fond du trou per-

met d'obtenir un raclage et un grattage parfait du fond.

On peut toutefois utiliser des buses pour améliorer le système. Il s'agit en fait d'une réduction des trous d'éjection de boue situés entre les molettes. La boue ainsi munie d'une plus grande force de pression est envoyée directement sur la roche, ce qui peut aider grandement l'action mécanique.

Il faut noter que l'on doit remplacer l'outil après chaque changement de terrain. Cette opération peut s'avérer très fastidieuse si on est en présence de strates minces et de duretés différentes, car elle nécessite la remontée et la descente du train de tiges à chaque fois.

Le rendement des trépanis est fonction de la vitesse de rotation et de la charge appliquée. Plus la charge est forte, plus la vitesse doit être réduite. Ainsi, il existe un rapport optimal entre la charge et la vitesse. Un manomètre permet de lire cette charge exercée. Et on peut la varier à l'aide de masses-tiges, qui doivent être placées immédiatement au dessus de l'outil de manière à ce que l'ensemble travaille en tension. En effet, si le train de tiges travaillait en compression du fait que les masses-tiges sont placées au sommet, il se produit des déformations suivies de ruptures.

Aussi, des précautions suffisantes doivent être apportées aux joints des masses-tiges, qui sont les points névralgiques car étant les moins épais du corps de la tige.

Cela nécessite une manipulation avec soin et un graissage abondant des joints. pendant le gerbage, les démanagements et les stockage.

Donc, un choix judicieux doit être effectué pour éviter un bris de l'outil ou une rupture de la tige pouvant entraîner l'abandon du forage ou l'utilisation de fraises spéciales pour tarander les épaves.

On utilise aussi des outils à lames pour les terrains ou formations sédimentaires compactes à structure fine et de dureté peu élevée. Mais, malgré les avancements intéressants qu'ils procurent, leur coût peu élevé, la possibilité de reforger et d'affûter les tranchants qu'ils sont les seuls à offrir, les foreuses se gardent bien de les employer, car ils ne conviennent pas à tous les types de terrain et provoquent des vibrations importantes qui se repercutent jusqu'à la machine.

On peut citer 3 types :

- queues de poisson . 2 lames
- Trois ailes,
- Pilote .

Le foreur doit donc être très vigilant et essayer de toujours mettre en adéquation le terrain traversé et l'outil utilisé pour éviter des surprises éventuelles dans l'exécution du forage.

## II - 3-2 CONTRÔLE DU POIDS SUR L'OUTIL

Le contrôle du poids sur l'outil s'opère par le dynamomètre (ou Martin - Decker). L'appareil donne le poids de tout ce qui est suspendu au crochet y compris celui du moufle inférieur. ( $= L$ )

$$L = C + M = nTs$$

$L$  = poids de la tête d'injection, de la tige carrée, du train de tiges, et des masses-tiges. ;  $C$  = poids du crochet  $M$  = poids du moufle

$T$  = tension du brin-mort indiquée par le dynamomètre.

$s$  = section du câble.

Pour connaître le poids sur l'outil, on procède comme suit.

- laisser toute la ligne de sonde en tension, l'outil ne reposant pas au fond. Le dynamomètre indique le poids de tout ce qui est accroché moins la poussée d'Archimède.

- descendre la ligne de sonde jusqu'à ce que l'outil touche le fond. Le dynamomètre indique le poids marqué précédemment moins le poids de l'outil. Ainsi, la différence entre ces 2 indications donne le poids réel appliqué sur l'outil.

## II - 3-3 CONTRÔLE DE LA VITESSE DE ROTATION

À chaque type de terrain, il existe une vitesse de rotation et un poids sur l'outil qui permettent d'obtenir un avancement adéquat. L'outil ne doit être chargé que par les masses-tiges et à 50 ou 75% de leur poids afin que le train de tige puisse rester en tension. On a :

• Pour les terrains tendres

- poids sur l'outil = 1700 à 900 kg par pouce de diamètre de.

de l'outil et la vitesse de rotation = 850 à 150 t/mn

• Pour terrains durs

- poids sur l'outil : 1400 à 1800 kg par pouce de diamètre de l'outil  
et la vitesse de rotation = 40 à 50 t/mn.

Les masses - tiges doivent être remplacées par des tiges normales au fur  
et à mesure de l'avancement (augmentation du train de tiges).

## II.4 CHOIX DES TUBES

-choisir, c'est sélectionner, et cela présuppose une connaissance parfaite des paramètres qui régissent le phénomène. C'est ainsi que dans le choix des tubes, on va successivement étudier :

- le diamètre
- la résistance mécanique
- les pertes de charge.

### 4 - a Détermination des diamètres.

Le choix des diamètres est surtout conditionné par l'encombrement de la pompe, qui est fonction du débit. Et différents auteurs ont eu à effectuer des expériences et à publier des résultats de débit en fonction des diamètres et vice-versa.

On se propose de présenter quelques tableaux.

<u>Débits</u> ( $m^3/h$ )	<u>Diamètres</u> (pouce)
< 22	6" "
17 à 40	8
35 à 90	10
80 à 150	12
140 à 200	14
190 à 300	16

Tableau : 1. Diamètres en fonction du débit

Le tableau est obtenu des travaux du " Ground water development course " de l'Université de Minnesota.

Tableau: 2 Diamètre en fonction du débit

Diamètres intérieurs min. pouce	Débits maxima $m^3/h$
4"	3
6"	50
8"	140
10"	250

Il faut cependant signaler que le tableau 4-1, tient compte des pertes de charge. et que l'expression des diamètres en pouce vient du fait que les expériences dans ce domaine ont été effectuées aux USA.

#### 4-b Résistance aux efforts de traction.

Le tubage doit résister à la traction, car lors de la mise en place, chaque élément introduit dans l'ouvrage subit le poids de toutes les colonnes situées en dessous de lui.

La résistance à la traction d'un élément est fonction de la nuance de l'acier, de l'épaisseur et du diamètre. Cependant, lors de la descente des différentes colonnes, la poussée d'archi-



-mède peut être très bénéfique car elle réduit les efforts de traction. Cette réduction peut être appréciable si le fond des tubes est maintenu fermé lors de la descente dans la boue.

#### 4-c Résistance aux efforts d'éclatement.

Les colonnes doivent résister aux pressions intérieures centrifuges dues à la boue (ou éventuellement l'eau) située à l'intérieur de celles-ci.

La pression critique est donnée par :

$$P = \frac{2 e R}{D} \quad \text{en kg/cm}^2$$

$e$  = épaisseur du tube (cm)

$D$  = diamètre intérieur (cm)

$R$  = résistance du métal ( $\text{kg/cm}^2$ ) =  $0.6 F_y$

$F_y$  = limite élastique.

#### 4-d Résistance au flambage et à la flexion

La rupture par flambage ou par flexion peut éventuellement se produire si la colonne repose au fond sur un obstacle ou s'il y a un défaut de rectitude du trou du forage.

Donc, le contrôle de la rectitude et de la verticalité est nécessaire si l'on désire obtenir un ouvrage fonctionnel. Il existe plusieurs méthodes, qui permettent cette mesure, qui seront développées <sup>és</sup>.

ultérieurement.

On obtient les dimensions et les poids de chaque colonne à l'aide des tables (valeurs normalisées).

Cependant, le cahier de charge de la campagne de forage, prescrit les diamètres suivants :

- de 0 à 10  $\longrightarrow$   $D = 18'' \frac{1}{2}$
- de 10 à la cote de base de la chambre de pompage  
 $\longrightarrow D = 14'' \frac{3}{4}$
- de cette cote à la profondeur finale  $\longrightarrow D = 9'' \frac{5}{8}$  ou  $8'' \frac{1}{2}$

#### 4 - e Résistance aux efforts d'écrasement

Les efforts se manifestent lorsque l'on vide la colonne remplie de boue pour la mettre en condition d'exploitation ou lorsqu'on fait descendre la colonne avec un bouchon.

La résistance à l'écrasement, est fonction inverse du rapport  $D/e$ , (diamètre sur épaisseur).

efforts d'écrasement = poussée des terres (P) + forces hydrostatiques dues aux eaux de la nappe (F)

on a :

$$P = K_0 \gamma_s H$$

$$F = \gamma_{\text{eau}} \times h$$

$\gamma_{\text{eau}}$ ,  $\gamma_s$  poids spécifique de l'eau et du sol.

H = profondeur du trou ; h = épaisseur de nappe traversée

sée.

$K_0$  = coefficient de poussée des terres au repos.

$$= \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi_c}{2} \right) \quad \text{d'après ROWE}$$

$$= \frac{\nu}{1 - \nu}$$

$\nu$  = coefficient de poisson

$\phi_c$  = angle de frottement interne.

Le choix du tubage dépend aussi des pertes de charge, qui peuvent s'évaluer d'après la formule de PRONY.

4 - f : Perte de charge

$$\frac{1}{4} \cdot D \cdot j = .00001733V + .0003483V^2$$

$D$  = diamètre intérieur du tuyau. (m)

$V$  = vitesse de l'eau (m/s)

$j$  = perte de charge par mètre de longueur (m/m).

## II.5 - LES FLUIDES DE FORAGE

Le fluide de forage, généralement utilisé en forage au rotary est la boue à la bentonite. Son importance et sa performance lors de la traversée de terrain difficile n'est plus à démontrer.

Cependant, son utilisation nécessite une maîtrise parfaite des ses propriétés, car elles-ci requièrent un contrôle efficace et assidu. Un manquement éventuel à la surveillance de son comportement peut engendrer de grandes avaries à savoir: coincement, blocage du train de tiges et de l'outil.

Or, ces incidents peuvent entraîner une perte totale de l'ouvrage ou une perte de temps considérable.

### 5 - a Circuit de la boue

Au fur et à mesure que l'outil (le trépan), avance dans le massif rocheux, la boue est mise en circulation selon un circuit la permettant de remplir ses fonctions essentielles. On a :

- aspiration dans les bacs ou fosses par la pompe.
- refoulement de la pompe par la tuyauterie (rigide ou flexibles) jusqu'à la tête d'injection
- circulation du haut vers le bas à l'intérieur du train de tiges jusqu'aux ouvertures confectionnées dans le trépan.
- circulation du bas vers le haut dans l'espace annulaire (entre les tiges et le terrain)

- circulation dans les canaux de décantation jusqu'aux fosses à boue, d'où la boue sera aspirée par les pompes.

### 5-b NATURE DE LA BOUE

L'instabilité de la boue, due au fait qu'elle est un mélange (et non une solution) nous oblige à mieux connaître sa composition.

La boue est un mélange colloïdal c'est à dire une suspension d'argiles dans de l'eau. Les argiles étant des particules très fines, s'hydratent en présence d'eau et forment une substance gélatineuse ou visqueuse, le gel.

Le changement de structure engendre une augmentation de volume importante. Le volume peut devenir 12 à 30 fois celui initial, ce qui est très recherché dans le comportement de la boue.

Cependant, il faut signaler que toutes les argiles ne sont pas aptes à la confection des boues de forage.

Par exemple, les argiles courantes qui sont des mélanges kaoliniques ne sont utilisables qu'après rajout de carbonate ou de phosphate de soude.

Car, à l'état naturel, elles sont plus ou moins calciques, et leur gonflement dans l'eau, ainsi que leur dispersion, est meilleur dans un milieu sodique.

Aussi, lorsque le pourcentage de kaolinite devient grand, les cakes formés sur les parois sont trop épais. Les produits commercialisés sous le nom de bentonite sont des argiles gonflantes de constitutions minéralogiques diverses. Ce sont des matéri-

aux de chose, mais leur prise exorbitante fait qu'ils ne sont utilisés qu'en faible pourcentage dans le mélange.

On les mélange à de la boue ordinaire à raison de 1 à 2%, pour améliorer la tenue de l'eau, et de 3 à 4% pour éviter les éboulements dans les terrains meubles. On ajoute aussi des additifs pour rendre ce mélange (eau-bentonite) compatible avec le terrain ou la pression des nappes, ou encore pour offrir à la boue ses caractéristiques initiales qui se sont altérées du fait d'une utilisation prolongée.

Les boues sont caractérisées par plusieurs propriétés. Et, dans le déroulement d'un chantier d'exécution de forage, l'utilisateur est amené à connaître toutes ces propriétés et les paramètres qui les régissent pour un contrôle efficace.

### 5\_c RÔLE DE LA BOUE

La boue de forage sert à :

- remonter les déblais, ou "cutting" coupés par l'outil au fur et à mesure de l'avancement.
- lubrifier et refroidir l'outil
- maintenir les cutting en suspension en cas d'arrêt pour éviter un blocage de l'outil au fond du trou
- équilibrer les pressions hydrostatiques des nappes aquifères rencontrées.
- faciliter et contrôler les opérations de mise en place du

gravier additionnel et de cimentation.

- consolider les parois du forage par un dépôt de "cakes"
- renseigner sur la nature du terrain rencontré.
- augmenter la capacité abrasive de l'outil par le jet à la sortie des événements (avec utilisation de duses).

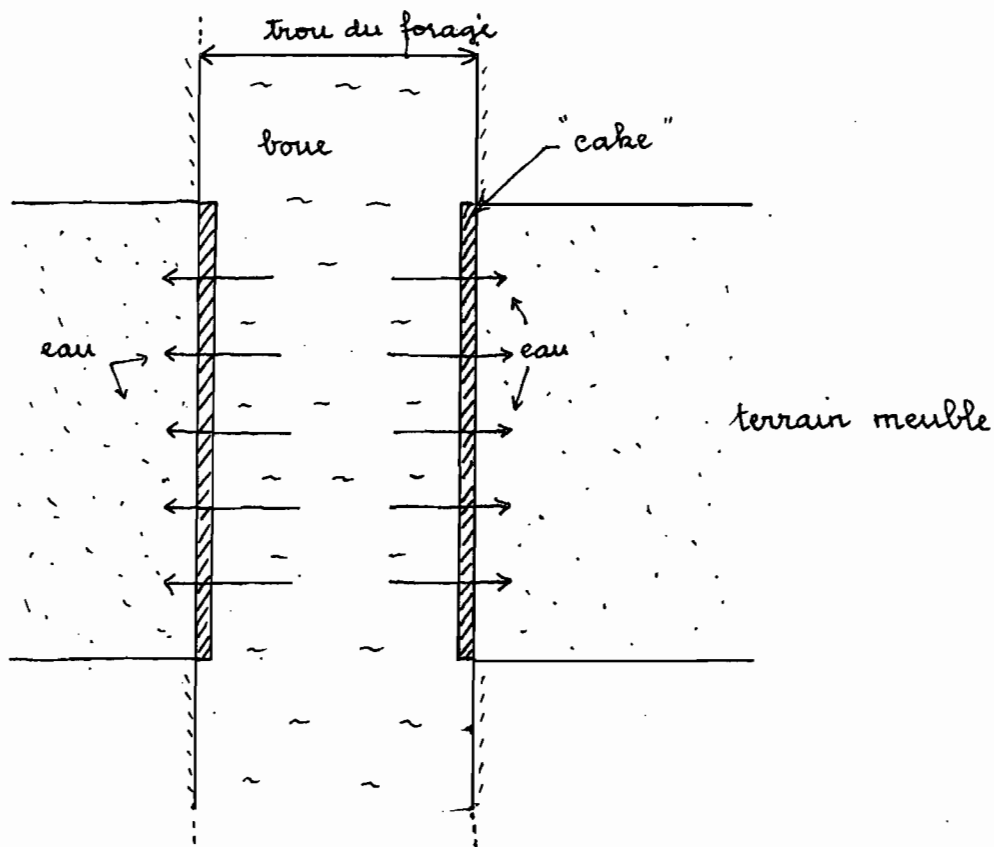


fig. 3 - DÉPOT DE CAKES

La formation de "cakes" est obtenue par un dépôt de substances solides contenues dans la boue sur les parois après que l'eau libre se soit infiltrée dans la roche perméable.

Un dépôt trop important de cakes est cependant déconseillé car il peut entraîner des difficultés de retrait de l'outil pendant

les manœuvres de routine (augmentation des tiges, changement d'outil ... etc).

Il faut signaler qu'à l'endroit où la crépine doit être posée, le cake doit être éliminé pour permettre à l'ouvrage de travailler efficacement. Il s'agit en effet de racler ou de scarifier les parois de forage avec des outils appropriés. Cette opération doit être faite rapidement et juste avant la mise en place de la crépine pour éviter des éboulements éventuels.

Pour enlever ce dépôt, on peut utiliser des procédés chimiques. Il faut traiter le cake avec des acides appropriés (HCl à 15%, ou HF) ou des phosphates de soude (hexamétaphosphates, pyrophosphates ...)

En vue de rendre plus efficace le traitement chimique, on peut ajouter à la boue une assez forte proportion de calcaire.

Ce rajout n'est pas nécessaire dans notre cas (forage de Jiffère) car la traversée de la couche marne-calcaireuse a permis l'obtention de la quantité désirée.

En effet, la dissolution du calcaire contenu dans le cake entraîne sa désagrégation et le dépôt devient plus facile à enlever. On peut aussi remplacer la boue à la bentonite par une boue spéciale à l'amidon juste au moment du raclage et avant de mettre en place la crépine.

Le dépôt amidonné sera ensuite détruit et enlevé par :

- Hydrolyse à l'aide d'un acide approprié.



— l'action de bactéries en autant que le milieu (PH, température) favorise leur formation et leur développement.

Il faut noter que le traitement chimique présente l'avantage de dissoudre une portion des matériaux fins argileux de la roche encaissante. Ainsi il favorise l'opération de développement.

#### 5. d - PROPRIÉTÉS DE LA BOUE

Pour remplir les différentes fonctions qui lui sont assignées, la boue doit posséder certaines caractéristiques spécifiques.

Et, le foreur est appelé à contrôler la faculté opérationnelle de cette boue c'est à dire la pérennité des propriétés.

#### La densité

Elle est fonction de la concentration de la suspension. Une boue dense favorise l'ascension des matériaux coupés, par l'outil, dans l'espace annulaire.

Elle permet de maintenir un trou de forage dans un terrain friable ou de vaincre les pressions hydrostatiques dues à l'intrusion d'une nappe d'eau. Une densité appropriée peut favoriser la traversée de terrain difficile sans problèmes majeurs. L'augmentation de densité se fait en élevant la concentration par un rajout de produits lourds.

On utilise pour cela de l'hématite, de la pyrite, de la sidérite, de la galène ou de la barytine. On est limité

dans le processus de densification par la capacité de la pompe à pomper de la boue épaisse.

Si la boue est trop dense, on obtient un cake trop épais avec des risques de blocage. Dans ce cas une dilution s'avère nécessaire, mais elle doit s'effectuer de manière homogène et en surveillant les autres caractéristiques.

Par contre si elle a une densité trop faible, le cake formé devient trop mince et il y a des risques d'éboulement et d'éruption lorsqu'on rencontre une nappe artésienne.

On procède alors à une opération d'alourdissement. Et des abaques appropriées sont disponibles pour déterminer la quantité nécessaire à rajouter pour obtenir une densité donnée (voulue).

En moyenne, on maintient la boue à une densité de 1.2.

### LA VISCOSITÉ

La viscosité est une propriété essentielle de la boue. En effet, elle lui permet d'évacuer les déblais et de consolider les parois. Elle doit être suffisante pour que les petites particules à évacuer puissent se maintenir en suspension et que la boue reste appliquée aux parois.

Cependant, une boue trop visqueuse sera difficilement épurée par la décantation dans des bacs. Aussi, la viscosité augmente les pertes de charge. Et, pour mainte-

nir la viscosité d'une boue, on ajoute généralement des phosphates ou des tanins (extraits d'écorces d'arbre).

Elle est maintenue en moyenne entre 40 et 45 secondes MARSH, et se mesure à l'aide de viscosimètre (MARSH, STORMER).

Il faut enfin dire qu'une viscosité trop forte peut éventuellement entraîner des difficultés de pompage ou des possibilités de coincement pendant les arrêts de circulation et que trop faible, elle risque de bloquer l'outil du fait de la séparation de ses éléments constitutifs ou de permettre une perte de boue trop importante par infiltration.

Dans ce dernier cas, il faut ajouter de la bentonite, de l'amidon ou de la fécule pour réhausser la viscosité.

### LA THIXOTROPIE

La thixotropie est la propriété des suspensions argileuses de se prendre en masse, quand elle ne sont pas agitées.

Ainsi, il est préférable de maintenir constamment la circulation dans un forage, même en cas d'arrêt momentané.

Cette propriété permet, par la formation de gel à chaque interruption de l'avancement, le maintien des sédiments, les empêchant de retomber et de bloquer l'outil.

Mais, la thixotropie ne doit pas être trop forte afin de permettre la reprise de la circulation de la boue dès le démarrage des travaux. Elle est liée avec la viscosité et peut être

améliorée par les mêmes adjuvants.

Il faut signaler que les propriétés de la boue sont affectées si elle est polluée par les déblais de terrains traversés ou les nappes d'eau rencontrées. Les terrains et les eaux salées peuvent entraîner la floculation, de même que le gypse ou l'anhydrite.

### FILTRAT - "YIELD-VALUE" - PH

Le filtrat représente ce qui passe à travers un filtre, en l'occurrence ici le terrain naturel. Le filtrat de la boue est l'eau libre contenue dans celle-ci.

Si il est trop important alors le cake forme devient mince, et il ya des risques d'éboulement. Par contre si le filtrat est faible, le cake est épais, et on risque de se retrouver avec une formation aquifère colmatée. Donc il s'avère logique de toujours effectuer un mélange adéquat qui permette d'obtenir une boue dont les qualités ne compromettent pas l'exécution du forage.

On peut ajouter à la boue de l'amidon, de la fécule ou de la cellulose colloïdale quand le filtrat devient 'élevé'.

Dans le cas contraire on procède à une dilution. Cependant, toutes ces opérations doivent être effectuées minutieusement avec une surveillance stricte des autres caractéristiques.

Le PH est un paramètre qu'il faut surveiller de très près.

Il faut pour cela effectuer des mesures, (à l'aide de PH mètre ou de papier indicateur), d'une manière périodique. Il doit être maintenu entre 7 et 9.5 sinon les argiles en suspension risquent de flocculer, entraînant une perte de viscosité et une augmentation anormale de la teneur en eau libre.

On peut donc dire que si le PH de la boue est supérieur à 11, on est en présence d'une boue contaminée par le ciment ou l'eau de la formation. On utilise des polyphosphates, acides pour abaisser le PH, ou neutre si le PH est inférieur à 7.

La tension limite de cisaillement d'un fluide plastique ou "yield value" est celle au-dessous de laquelle le fluide cesse de s'écouler et se comporte alors comme un solide.

Elle doit être connue pour éviter un blocage systématique des outils dans le puits.

Il faut aussi éviter une teneur en sable trop élevée, car cela risque de conférer à la boue des propriétés nocives au fonctionnement des appareils tels que les pompes à boue car qu'elle érode rapidement.

Enfin, disons que le foreur doit nécessairement avoir les connaissances requises pour mener à bien toutes ces opérations car le contrôle de tous ces paramètres est extrêmement délicat.

## 5-e: CONTAMINATION DE LA BOUE

Dans ce passage nous allons étudier les principales causes de l'altération des propriétés de la boue et les conséquences qui peuvent en découler.

Les propriétés d'une boue peuvent être largement modifiées par la nature des déblais de terrains traversés ou par les qualités des différentes nappes rencontrées. En terrain argileux, les déblais peuvent augmenter considérablement la concentration de la boue, et changer toutes ses caractéristiques. En effet, les sédiments fins ( $\ll 70\mu$ ) peuvent provoquer la coagulation de la boue et augmenter, et la viscosité, et la thixotropie.

La traversée des terrains et nappes salées peut entraîner la flocculation de la boue à la bentonite. On recommande dans ces cas de prendre des boues à l'huile émulsionnée. Elle est obtenue en ajoutant à notre boue (eau + bentonite) 5 à 25 % de gaz-oil et un émulsifiant organique.

Il faut noter que cela permet de lubrifier les parties mécaniques du circuit.

Par contre, les sables des terrains sableux risquent de donner à la boue un pouvoir d'érosion, ce qui va réduire la durée de vie des équipements. -

- On se débarrasse des grains grossiers par tamisage.

## II - 6 DIAGRAPHIE

- C'est un procédé qui permet d'explorer, d'ausculter un forage non encore tubé, sur toute sa hauteur. Elle sert à mesurer:

- le potentiel du sol
- la résistivité électrique des terrains traversés
- la radiation (Gamma naturel)
- les températures
- le diamètre du forage

### 6-1 POTENTIEL DU SOL

Le potentiel du sol varie avec la nature du terrain. On mesure la différence de potentiel ( $\Delta V$ ) entre l'électrode mobile descendue dans le trou et celle reliée à la surface. Des variations de tensions provoquées par les changements de terrains sont mesurées et restituées sur un graphique à l'aide d'un appareil traceur. C'est donc, une méthode de reconnaissance des terrains mis à nus par l'outil.

### 6-2 DIAMETRE

La détermination du diamètre après passage de l'outil est fondamentale, car il n'est pas toujours égal au diamètre de l'outil. Il peut être supérieur sur certain portion s'il y a des éboulements localisés. Il peut être aussi inférieur si le dépôt de "cakes" est trop important. La connaissance du diamètre final permet d'estimer la valeur de l'espace annulaire afin d'évaluer avec exactitude la quantité de ciment.

### 6-3: MESURE DE RÉSISTIVITÉ

Il s'agit d'effectuer la mesure de la résistivité des couches de terrain traversées. La résistivité est généralement élevée, de l'ordre de 100 000 fois plus grande que celle des métaux purs.

Les minéraux qui constituent les roches, sauf de rares exceptions comme le graphite ou les sulfures métalliques, sont des isolants parfaits.

La résistivité dépend de:

- la nature lithologique des roches
- la teneur en eau
- la composition chimique de l'eau.

Or, on a que la résistivité de l'eau est fonction de sa teneur en sels dissous qui influence le degré d'ionisation, donc agit sur la conductivité électrolytique. Ainsi celle d'une roche, encaissante dépend aussi des mêmes paramètres.

Un sable est en principe non conducteur puisque constitué de grains isolants (quartz - calcaire). Mais en réalité une roche contient presque toujours de l'eau de rétention (adsorbée), et le courant peut alors circuler par cette eau conductrice.

#### DISPOSITIF DE MESURE { P

##### PRINCIPE :

On crée un champ électrique continu ou alternatif d'intensité  $I$  dans le trou, entre 2 électrodes A et B.

En général, on utilise un courant continu de quelques ampères.

La différence de potentiel  $\Delta V$  créée par ce champ est mesurée



à l'aide de 2 électrodes M - N (ligne de mesure), l'extrémité M étant descendue dans le trou.

En milieu isotrope, homogène et d'infinie profondeur, le courant circule radialement vers l'extérieur, symétriquement dans

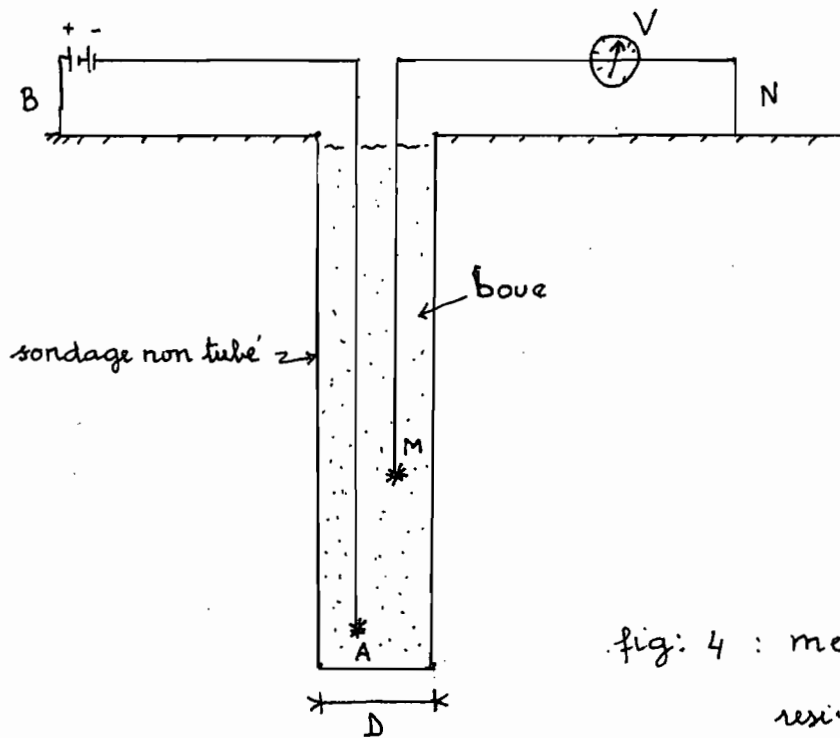


fig. 4 : mesure de la résistivité

toutes les directions et les surfaces équipotentielles sont des sphères successives concentriques

D'après la loi d'Ohm on a  $\Delta V = RI$

Le volume délimité par 2 cercles concentriques présente une section transversale de  $4\pi r^2$ , une longueur  $\Delta r$ , une résistivité  $\rho$

$$\Delta V = \frac{I \cdot \Delta r \cdot \rho}{4\pi r^2} \quad \text{or } V_A \text{ est nul } (=0).$$

$V_N = 0$ , on mesure  $V_M$ ... et on a  $r = AM$  espacement du dispositif donné de mesure.

Par intégration on obtient 
$$V = I \times \frac{\rho \times r}{4\pi r^2} = \frac{I\rho}{4\pi r}$$

et  $\rho = 4\pi r \frac{V}{I}$ , et le facteur  $4\pi r$  est constant pour chaque dispositif  $\rho = f\left(\frac{V}{I}\right)$

En pratique, les électrodes mobiles sont regroupées dans un même appareil appelé sonde électrique. Les variations de potentiel  $V$  sont enregistrées sur des graphiques en fonction de la profondeur et on obtient un diagramme de carottage électrique.

Ceci constitue donc le principe de mesure de la résistivité, et le type d'appareil diffère d'un fabricant à l'autre.

#### 6-4 INTERPRÉTATION DES COURBES.

Les diagrammes obtenus doivent être déchiffrés et interprétés. La courbe de potentiel donne une idée sur la nature géologique des couches et fixe grâce à l'échelle verticale leur position. La courbe de résistivité renseigne sur la teneur en eau des formations.

On a une faible résistivité pour les argiles et pour les formations aquifères douces (sables, grès, graviers, calcaires) la résistivité est élevée et le potentiel faible. Les couches aquifères salées ont une résistivité faible, potentiel négatif très important.

Les terrains à forte densité ont une forte résistivité et un potentiel semblable à celui des argiles.

Enfin, on recommande de remplir le trou du forage de boue ou d'eau pour pouvoir obtenir des courbes correctes et interprétables.

## II - 7 LE GRAVILLONAGE ET LE CHOIX DE CRÉPINES

L'introduction de gravier additionnel représente une opération très délicate car pouvant entraîner des incidents graves, si des précautions nécessaires ne sont pas prises. Aussi, l'installation de crépines est nécessaire lors d'un captage dans les roches meubles (sables argileux, alluvions) ou consolidées mais peu cohérentes (calcaire, grès peu cimenté). Nous allons faire l'étude des ces 2 types d'opérations et déterminer leur impacts sur le fonctionnement de l'ouvrage de captage.

### 7-1 : LE GRAVILLONAGE

L'utilisation de gravier s'avère nécessaire pour un captage dans une nappe composée de sables fins ou à granulométrie uniforme. Le gravillonnage nous permet de mettre une crépine aux ouvertures beaucoup plus larges et il en résulte une augmentation du débit spécifique. Le gravier utilisé doit être propre et siliceux (non calcaireux) et les dimensions sont déterminées à partir de l'analyse granulométrique du terrain aquifère ; il doit être calibré et acidifié au préalable.

L'adjonction de gravier est recommandée chaque fois que le rapport  $\frac{d_1}{d_2}$  sera inférieur ou égal à 3. Ainsi pour une granulométrie très étalée, il n'est pas toujours utile d'en rajouter. (car  $\frac{d_1}{d_2} > 3$ ). (-voir fig 5)

On peut construire par point la courbe granulométrique du gravier à employer en procédant comme suit :

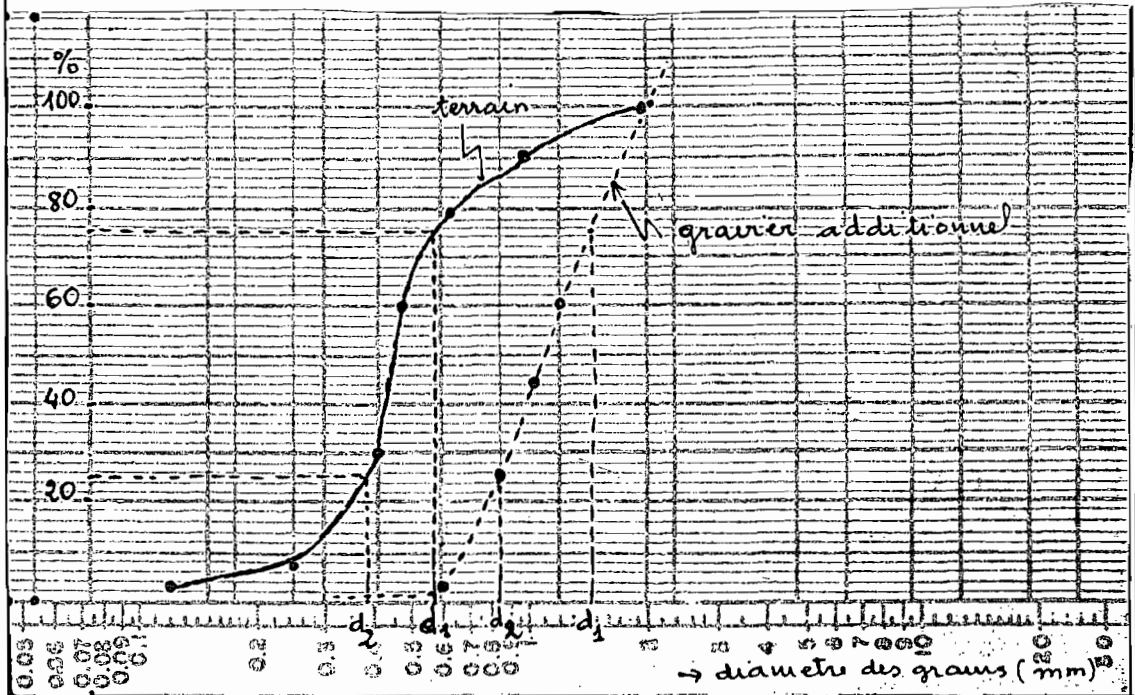
- relever sur la courbe granulométrique de l'échantillon de terrain le diamètre  $d_2$  et le multiplier par 4 ou par 6, s'il s'agit d'un sédiment isométrique ( $\frac{d_1}{d_2} \leq 3$ ) ou dispersé, respectivement.

La valeur trouvée sera le diamètre du gravier ( $d_2$ ). La courbe passant par ce point et ayant un coefficient  $\frac{d_1}{d_2} = 2.5$  définit la granulométrie du gravier, c'est à dire sa courbe représentative.

Les caractéristiques du gravier étant déterminées, il s'agit maintenant de procéder à sa mise en place.

Il faut surtout éviter le phénomène de séparation ou ségrégation, c'est à dire une tendance des gros granulats à se séparer des fins.

fig: 5 courbes granulométriques



$d_1$  = diamètre à 75%

$d_2$  = diamètre à 25%

Pour les forages en rotary, avec utilisation de fluide en circulation, on peut utiliser un mécanisme simple permettant l'introduction du gravier, le "cross over tool". On inverse le sens de circulation de la boue, remplie de gravier additionnel qui sera retenu au voisinage de la crépine. (voir schéma Page 10 - Annexe)

## 7-2: CHOIX DES CRÉPINES

La crépine constitue la partie captante de l'ouvrage et est caractérisée par le diamètre de ses ouvertures, qui sont déterminées en fonction de la granulométrie du terrain aquifère.

Les ouvertures doivent être prévues assez larges pour que les particules les plus fines puissent la traverser, car leur élimination va améliorer la perméabilité globale.

Les caractéristiques de la crépine conditionnent fortement la production et la longueur du forage. Le but essentiel est de limiter les pertes de charge lors de l'exploitation. Et pour cela il faut éviter:

- l'augmentation de la vitesse d'écoulement à l'entrée
- la turbulence
- le colmatage
- l'incrustation et la corrosion.

Le diamètre de la crépine est fixé en fonction des pertes de charges. La longueur de la crépine doit être légèrement supérieure à la puissance de la couche aquifère captée. La longueur minimale,

$L$ , est donnée 
$$L = \frac{Q}{\pi D v_c}$$
 avec  $v_c = 65 \sqrt[3]{k}$  la vitesse critique de l'eau (m/s)  $K = \text{perméabilité}$

$D = \text{diamètre de la crépine (m)}$   $Q = \text{débit } m^3/h$

L'élément primordial d'une crépine est la perforation, mais elle doit être compatible avec la résistance mécanique. La surface des perforations "S", en  $cm^2$  de vide par mètre linéaire de crépine, doit être assez grande pour éviter que la vitesse critique d'écoulement

d'écoulement souterraines (.03 à .08 m/s), soit atteinte

$$S = \frac{Q}{v}$$

$v$  = vitesse d'entrée de l'eau dans la crépine.

Mais, on estime que pendant la vie de la crépine, la moitié de la section efficace d'ouverture est obstruée par les grains de sable. Ainsi, on multiplie la valeur de  $S$  par 2 pour tenir compte de ce phénomène.

Le coefficient d'ouverture ou % des vides =  $\alpha$

$$= \frac{\text{surface de perforation}}{\text{surface totale}}$$

Exemple: Pour les crépines Johnson  $\alpha = \frac{e}{e+h}$

La largeur des ouvertures (slot) est calculée en fonction des diamètres des grains du terrain aquifère. Par exemple, pour un développement naturel, il faut extraire 60 à 80% des grains de la roche. Le diamètre "d" des ouvertures de la crépine doit donc être compris entre le  $D_{60}$  et  $D_{80}$  du terrain.

$$D_{60} \leq d_{\text{crépine}} \leq D_{80}$$

Néanmoins, il faut apporter une correction dépendamment des caractéristiques granulométriques c'est à dire s'il y a prépondérance ou non de gros grains.

- s'il y a prépondérance de gros granulats de 25 à 45%, on prend le  $D_{60}$  et le  $D_{50}$  comme valeurs limites

- si les grains fins prédominent (gros grains < 20%), on a

$$d = D_{60} \text{ ou } D_{50}$$

- Pour un massif filtrant artificiel (TERZAGHI) on peut prendre

$$d = D_{85}$$

Les crépines se présentent sous plusieurs formes suivant les caractéristiques des trous. On peut avoir des trous circulaires, rectangulaires, ou des fentes verticales ou horizontales.

Il faut noter que les caractéristiques de l'eau obtenues après analyses (agressivité) permettent de déterminer le type de matériel adéquat pour la crépine afin d'éviter une corrosion qui réduirait la durée de vie de l'ouvrage.

Il existe des crépines en acier inoxydable et en plastique (chlorure de polyvinyle). Plusieurs fabricants ont mis au point des crépines standardisées disponibles sur le marché.

Enfin, disons que la mise en place de la crépine doit se faire après avoir raclé le "cake" et effectué les opérations de diagraphie qui permettent de localiser l'endroit le plus favorable.

- Dans le cas de captage dans les sables du maastrichtien, le tubage est constitué par un enroulement en hélice sur une armature de génératrices d'un fil profilé quasi triangulaire d'une épaisseur de base d'au moins 1 mm.

- Dans le cas de captage dans les calcaires, le tubage crépine est du type à nervures repoussées présentant un coefficient d'ouverture d'au moins 10%.

La position de la crépine est fixée en tenant compte de la diagraphie

## II - 8 : LA CIMENTATION

- Elle consiste à remplir l'espace annulaire par un mélange à base de ciment pour rendre étanche cet espace et empêcher la pollution de la nappe captée. Elle permet aussi de maintenir solidement en place la colonne dans le terrain et de boucher des fissures sèches au cours de l'avancement.

Il faut noter qu'avant toute opération de cimentation, la rectitude et la verticalité doivent être vérifiées. La cimentation se fera en circulation directe avec un laitier de densité 1.9 (avec 46 litres d'eau pour 100 kg de ciment). Le tube guide et la colonne doivent être cimentés sur toutes leurs hauteurs. Cette cimentation est effectuée par injection sous pression du laitier de ciment à travers l'intérieur de la colonne à cimenter et par une remontée à travers l'espace annulaire. (voir Page 11 - Annexe)

Le problème fondamental de la cimentation réside dans la détermination des différentes proportions pour le mélange afin que les propriétés du ciment soient adaptées à celles de la boue de forage (viscosité + densité).

Pour réduire le temps de prise, on peut ajouter du chlorure de sodium, ce qui peut être avantageux quant à la durée de l'existence du forage ou si l'on est confronté à un problème de déplacement de nappe comme à Djiffère.

En effet, à Djiffère, le déplacement de la nappe, dû au décalage de marée entre le Saloum et l'Océan, cause un phénomène de



lessivage du ciment récemment coulé. Pour surmonter cette difficulté, il a fallu réduire le temps de prise du mortier.

La densité diminue avec l'adjonction de bentonite, car le mélange nécessitera beaucoup plus d'eau, tandis que la viscosité augmente parallèlement. Et pour relever la densité on peut ajouter du sable, de la barytine ou de l'arséniure de Fer. Ainsi on pourra maintenir la viscosité élevée afin de boucher les fissures sèches ouvertes dans les terrains.

Il faut signaler que les cimentations les plus solides sont celles qui sont réalisées avec un mélange pur de ciment Portland et d'eau.

Et avant de commencer les opérations, il est conseillé de bien nettoyer les parties à cimenter par lavage à l'eau afin de débarrasser les débris qui pourraient rompre l'homogénéité du coulis.

Il faut aussi prendre une précaution suffisante pour ne pas avoir à injecter du laitier de ciment dans la formation aquifère, et surtout laisser le ciment le temps de faire sa prise.

Pour une réussite de l'opération, il faut nécessairement que le volume de ciment injecté parvienne à remplir intégralement l'espace annulaire. Et pour cela on doit calculer le volume de ciment requis, puis le volume de boue qui permettra la mise en place du laitier de ciment. (Des abaques sont disponibles)

On doit aussi apporter beaucoup d'attention sur les temps de prise, car ils peuvent entraîner des problèmes de pompage surtout pour les ciments à prises rapides.

## II - 9 LE DÉVELOPPEMENT

Le développement est une opération qui consiste à extraire les particules assez fines pour traverser les orifices de la crépine, de façon à ne laisser autour d'elle que des éléments grossiers.

Cela permet d'envelopper la crépine d'une gaine filtrante naturelle, dont la finesse des éléments augmente régulièrement vers la périphérie.

Il a pour but d'augmenter la perméabilité du terrain adjacent à la crépine. Ce qui permet d'améliorer la capacité spécifique et d'éliminer les éléments fins et de stabiliser la formation. Avant d'effectuer le développement, il faut éliminer le "cake" laissé par la boue bentonitique. On distingue 5 moyens pour développer un forage :

- surpompage
- pompage alterné
- pistonnage
- développement pneumatique
- lavage sous pression

Le surpompage consiste à mettre le forage en production par un pompage à un régime supérieur à celui fixé pour l'exploitation. Cette méthode est simple mais pas très efficace.

Le développement par pompage alterné, est identique au surpompage mais avec des arrêts brusques de pompage, afin de pouvoir agiter fortement l'eau au fond de la crépine.

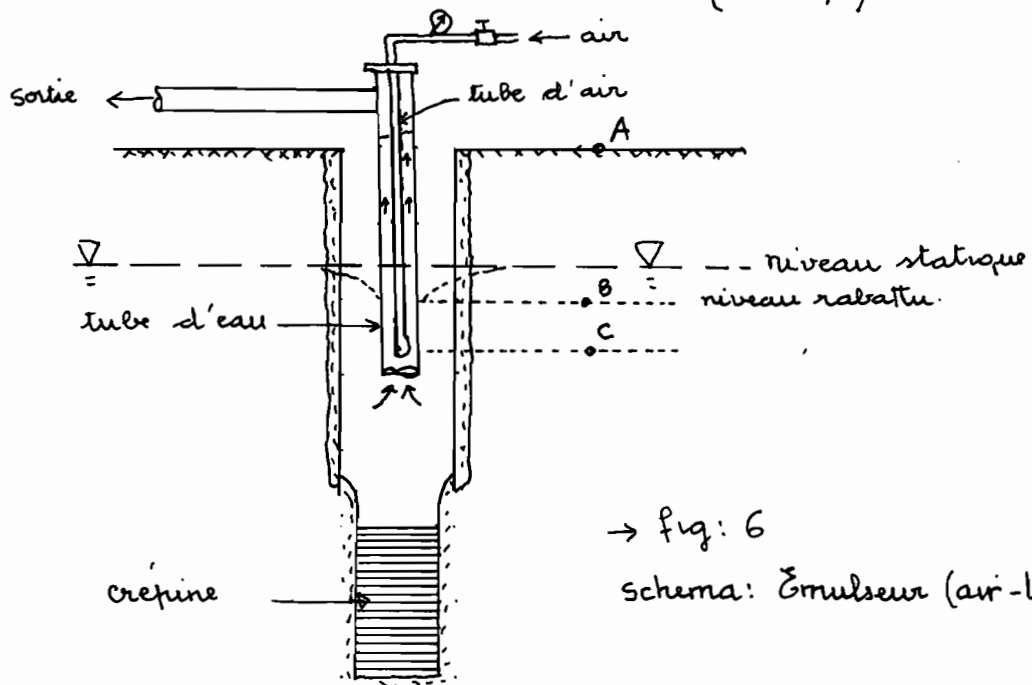
Le développement par pistonnage : on utilise un piston actionné verti-

calement dans les 2 sens à l'intérieur d'un forage tubé et crépiné. La dépression créée à la remontée, attire l'eau et les grains fins qui s'accumulent au fond et seront ensuite extraits par cueillérage. La descente du piston comprime la nappe et refoule les particules fines. On doit continuer l'opération jusqu'à ce qu'aucune venue de sable ne se produise.

Les différentes méthodes étant vues sommairement, nous allons étudier de manière plus approfondie celle du développement pneumatique, car elle est de loin la plus efficace si elle est bien adaptée et bien conduite.

Elle présente l'avantage de ne pas détériorer le matériel de pompage. Cette méthode consiste à injecter de l'air à la base d'une colonne descendue dans l'eau, l'émulsion ainsi créée diminue la densité de l'eau contenue dans cette colonne. L'eau monte dans la colonne. C'est la mise en production par "air-lift" ou émulseur avec une action de flux ou reflux provoqué par de grands volumes d'air introduits.

#### FONCTIONNEMENT D'UN ÉMULSEUR. (air-lift)



→ fig: 6

schema: Émulseur (air-lift)

Des expériences ont montré que pour que l'eau atteigne le niveau A, il faut avoir  $BC = 0.60 \times AC$ . ( $\Leftrightarrow AC = AB \times 2.5$ ).

La longueur totale du tube d'air doit être au moins égale à 2.5 fois la hauteur totale d'élevation (rabattement compris).

L'abaque (Page ) permet de simplifier les calculs relatifs au pompage par émulseur. Il sert à déterminer:

- la longueur totale du tube d'air
- la pression d'air au démarrage
- le volume d'air nécessaire et les diamètres du tube d'eau et d'air.

si l'on connaît le niveau rabattu au dessous du niveau du sol et le débit de pompage désiré.

## II - 10 ANALYSE DE L'EAU

L'eau livrée à la consommation humaine doit être potable. Et, pour remplir cette condition, elle ne doit pas être susceptible de porter atteinte à la santé de ceux qui la consomment.

Les eaux souterraines sont en général, bien protégées et peuvent être naturellement pures. Mais il sera, quand bien même, effectué une analyse qui se compose d'un examen physique et d'une analyse chimique.

### 10.1 - EXAMEN PHYSIQUE

- température de l'eau
- turbidité
- résistivité électrique
- PH, couleur, odeur et saveur

### 10.2 - ANALYSE CHIMIQUE

L'eau est un solvant et elle détient presque toujours des substances en solution. Il s'agit de déterminer quantitativement :

- les anions :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^{--}$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{F}^-$
- les cations :  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{F}^{++}$
- et les résidus sec à  $100^\circ\text{C}$ .

La détermination des ces ions permet de calculer :

- la dureté totale : la quantité de liqueur titré de savon nécessaire pour former une mousse stable avec cette eau.
- l'anhydride carbonique libre  $[\text{CO}_2]_{\text{litre}}$

D'après la formule de Tillman, on a :

$$[\text{CO}_2] = 10^{-\text{PH}} \times \text{Alcalinité} \times 2 \times 10^7 \quad (\text{mg/litre}) \text{ de } \text{CO}_2$$

On détermine aussi :

- l'hydrogène sulfuré. (mg/l)  $\text{H}_2\text{S}$
- l'oxygène dissous  $\text{O}_2$  mg/l.
- l'alcalinité = à la somme des concentrations suivantes
 
$$= [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{--}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+].$$

avec

$$[\text{HCO}_3^-] = \frac{\text{Alcalinité} + [\text{H}^+] - [\text{OH}^-]}{1 + 2K_2'/\text{H}^+} \quad \text{equiv. / litre}$$

$$\text{et } [\text{CO}_3^{--}] = \frac{2K_2' \times [\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}^+]} \quad \text{equiv. / litre}$$

$$[\text{H}^+] = 10^{-\text{PH}}$$

Pour un échantillon donné la quantité de cation (en milliequivalents) doit égaler celle des anions (en milliequivalents).

Il existe des normes qui fixent les concentrations admises selon les usages que l'on en fait.

Exemple: Le tableau (Annex. P20) donne les concentrations admises de substances toxiques

Il donne les concentrations acceptables et admissibles pour la potabilité.

On peut aussi voir en annexe les résultats de l'analyse de l'eau pour le forage de Djiffèrè - (voir Page 20 - Annexe)

Si, à l'issue des analyses, on se trouve en présence d'une eau ne remplissant pas conditions minimales de potabilité, on doit effectuer des

opérations de traitement - Il s'agit de faire un traitement de corrections chimiques (adoucissement - neutralisation - deferrisation - reminéralisation), d'effectuer des opérations de filtration, de décantation et de stérilisation.

La stérilisation peut se faire par le chlore ou par l'ozone. Toutes ces études visent à offrir à la consommation une eau ne présentant pas de danger pour l'organisme humain.

\* Pour les résultats de l'analyse chimique de Djiffere - voir Annexe Page 20 + 21.

Il faut signaler que les eaux fournies aux populations, ne respectent pas toujours les normes de l'O.M.S, mais il est préférable de fournir à la population une eau de qualité moindre que de ne pas leur en fournir du tout -

## II-11. LES ESSAIS DE POMPAGE

Les essais de pompage ont pour but d'étudier expérimentalement l'évolution des caractéristiques d'une nappe aquifère et de l'ouvrage de captage. Elles permettent de planifier les débits et temps de pompage pour ainsi éviter l'assèchement ou l'appauvrissement des nappes lors de l'exploitation.

Par les essais de pompage, on peut définir:

- les réglages optimum d'exploitation d'un forage: c'est à dire les débits et temps de pompage, de même que la position optimum de la pompe.
- les caractéristiques hydrologiques de la nappe aquifère:

- perméabilité
- transmissivité
- coefficient d'emmagasinement

Il s'agit en fait d'effectuer les mesures de temps, de profondeurs (niveaux - rabattement - remontées) et des volumes ou débits. Les temps sont mesurés à l'aide d'un chronomètre, et les profondeurs avec un nivoseope. Les volumes se mesurent par:

- la méthode du déversoir en V: avec courbe calibrée  $Q = f(H)$
- ou la méthode du tube horizontale diaphragmé: son équipement est basé sur la formule de Bernoulli  $Q = K S \sqrt{2 g h}$

$Q =$  débit ;  $K =$  coefficient fonction de l'équipement

$S =$  section du diaphragme ;  $h =$  hauteur de l'eau dans le tube

Il faut noter que la nappe à tester doit être isolée par cimentation d'une colonne au toit de l'aquifère.



Pour l'étude de l'ouvrage, nous utiliserons l'essai de pompage sur un puits, tandis que pour la nappe, il faut nécessairement l'installation de piézomètres, ce qui n'a pas été fait lors de cette campagne de forage. Nous allons donc faire l'étude sur un puits et donner un aperçu sommaire sur les puits équipés de piézomètres.

### 11 - 1 ESSAI DE POMPAGE SUR UN PUIT

Les types d'essais sont conduits par l'application de lois du régime d'équilibre, donc des hypothèses de DUPUIT.

Les résultats ne sont interprétables que si l'expérience a été faite en écoulement permanent, c'est à dire à débits et niveau constant. C'est la méthode par stabilisation. Ils permettent de construire les courbes : débit - niveau en fonction du temps de pompage ; rabattement - débit ; courbe de remontée.

On peut aussi obtenir des renseignements directs et approchés sur les facteurs régissant la productivité de l'ouvrage :

- la perméabilité
- les réserves et possibilités des nappes captées
- la fréquence et le volume de l'alimentation.

Le premier débit de pompage ou première stabilisation doit être plus faible pour les nappes à matériaux fins que pour celle à matériaux grossiers. Et, le rythme de pompage est imposé par la nature du terrain aquifère c'est à dire la séquence des débits et leur durée. Nous allons successivement l'étude séparée d'une nappe libre et d'une nappe captive. Et, le forage de byfferie servira comme exemple de pompage.

### 11-1-a. NAPPES LIBRES (PHRÉATIQUES)

Le but essentiel des essais de pompage par paliers est la construction expérimentale de la courbe caractéristique du forage. Or d'après Dupuit on a:  $Q = C_1(2H - \Delta)\Delta$ . Cette équation définit une parabole car étant de la forme  $y = ax^2 - abx$ . Les résultats des essais nous permettent de tracer les courbes:

$$- \Delta = f(t) \quad ; \quad - Q = f(t) \quad \text{et enfin} \quad \Delta = f(Q)$$

Exemples de courbe: Palier de pompage

temps de pompage

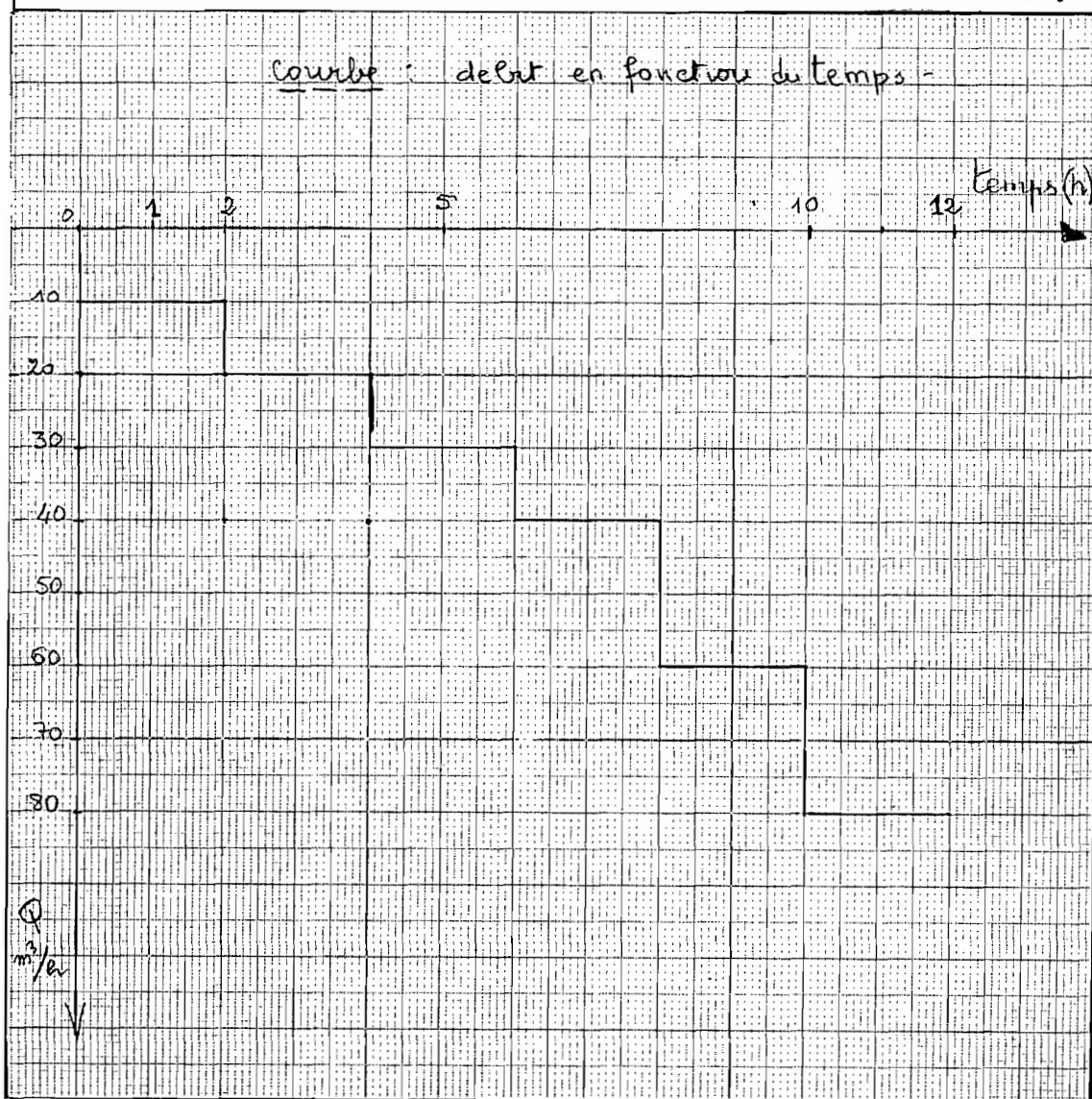
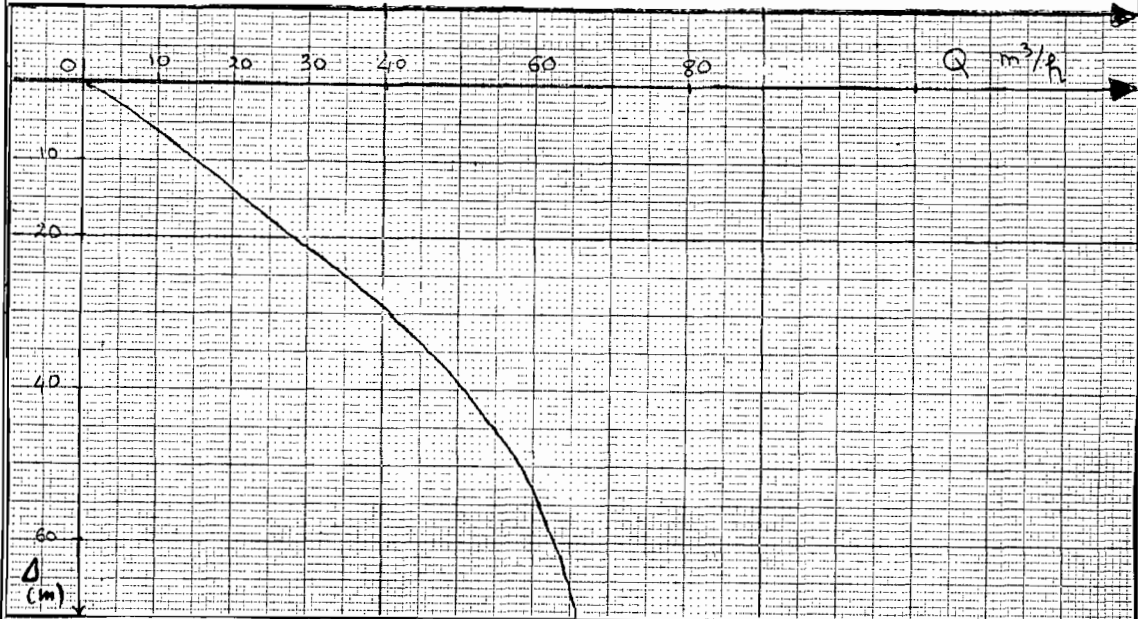


fig: 7 Paliers de pompage

Et l'allure de la courbe caractéristique en nappe libre se présente comme suit : fig: 8 courbe: débit - rabattement



Elle possède donc, une allure de parabole du 2<sup>e</sup> degré.

Il faut aussi établir la droite de rabattement - débit spécifique.

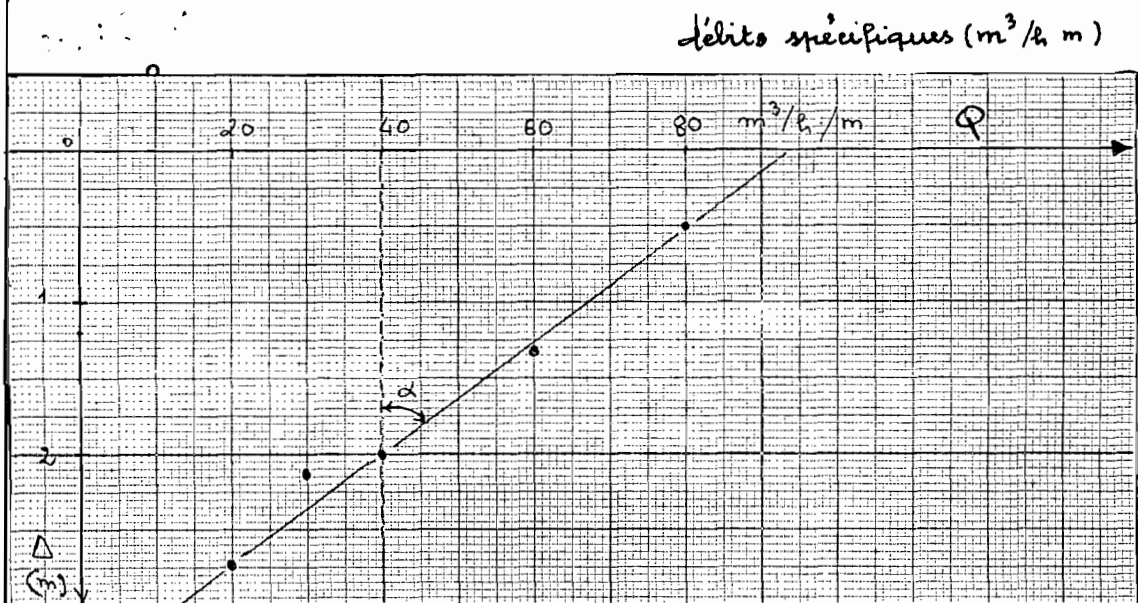


fig:9 Exemple de courbe : débit-spécifique - rabattement

### 11-1-b NAPPES CAPTIVES (ARTÉSIENNES)

Avec les nappes captives, aussi, on effectue les mêmes types de pompage. c'est à dire par paliers. Dans cette partie, nous pouvons nous référer à l'exemple du forage de Djiffère du fait qu'il est aussi artésienne.

Il s'agit d'effectuer, pour chaque débit un pompage jusqu'à la stabilisation et de relever les rabattements correspondants. On a donc pour de faibles rabattements une droite comme courbe caractéristique. Et l'écoulement de la nappe captive est régi par la formule :

$$Q = C \cdot \Delta \quad \text{le débit est proportionnel au rabattement.}$$

Pour des rabattements importants, l'écoulement vers le puits est régi par la loi :

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

ou

$$Q = C_x \Delta^\alpha$$

Nous allons nous appuyer sur des exemples de courbes théoriques afin de pouvoir mieux expliciter tous les phénomènes susceptibles de se produire et qui peuvent ne pas se manifester dans le cas du forage de Djiffère. néanmoins, toutes les courbes inhérentes à cet ouvrage seront données. Il faut noter que pour ces forages effectués dans le cadre de la campagne de forage au Sir-Saloum, la méthode d'exécution des essais de pompage est bien

- Établissement de la courbe rabattement - débit spécifique -

Pour de faibles rabattements, on obtient une droite parallèle à l'axe des ordonnées ( $\Delta$ ) et le débit spécifique est constant et indépendant du rabattement.

Si les rabattements deviennent importants, alors les débits spécifiques décroissent avec le rabattement, comme pour les nappes libres et leur évolution est représentée par une droite inclinée.

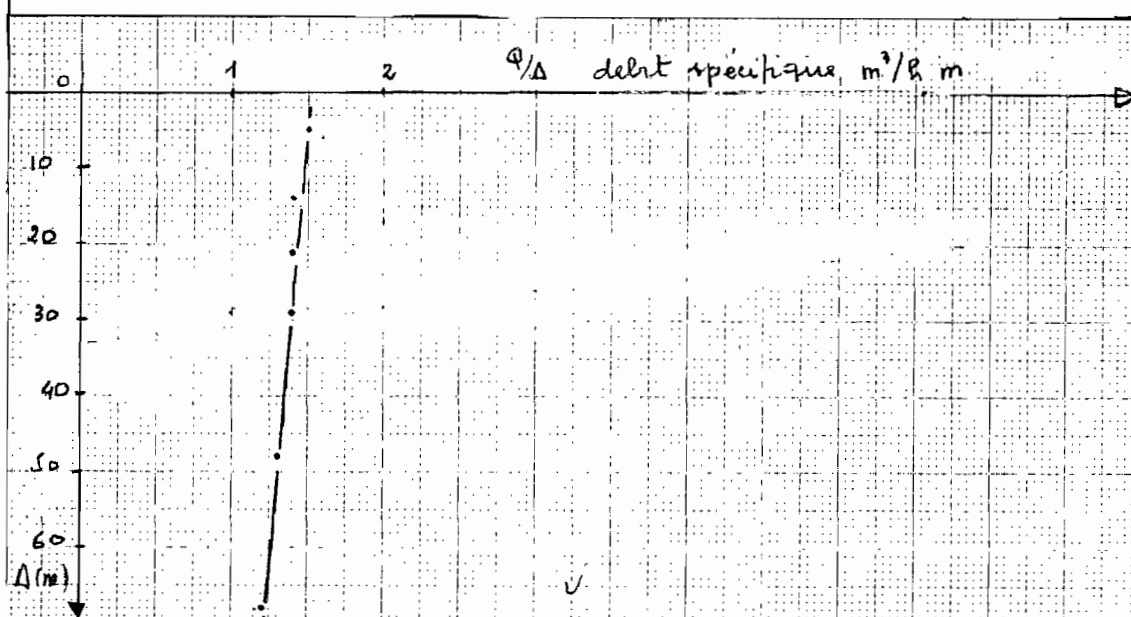


fig: 11. Courbe : débit - spécifique - rabattement (hyffère)

- Établissement de la courbe de remontée

Après arrêt du pompage, la nappe a tendance à reprendre son équilibre initial. On assiste à une remontée du niveau dynamique pour atteindre le niveau piézométrique initial.

Les niveaux peuvent être mesurés, à l'aide de NIVOSCOPE ou autres appareils appropriés, et à des intervalles définis.

- intervalles d'une minute durant les 10 premières minutes

d'application de la loi de Dupuit.

Une courbe parabolique peut indiquer soit une nappe libre soit une nappe captive, la droite caractérise spécifiquement une nappe captive. Car si le rabattement est trop important la droite s'incurve pour donner une parabole. Et le début de cette parabole ou la fin de la partie droite détermine pour une nappe libre un point de rupture A appelé POINT CRITIQUE. Ce point permet de déterminer le débit critique, débit qui ne saurait être dépassé de peur de se retrouver avec un rabattement excessif.

Le débit critique constitue donc la limite des débits d'exploitation.

- Pour une nappe captive, si la courbe caractéristique est une droite, la valeur de la constante  $C$  (capacité spécifique) est égale au coefficient angulaire.

$$C = \operatorname{tg} \alpha = \frac{dQ}{d\Delta}$$

Si, par contre on a une caractéristique de forme parabolique, les rabattements sont importants et on produit des vitesses d'écoulement trop élevées entraînant des pertes de charge dans les tubages et crépines. L'exploitation à ce débit est à déconseiller.

- On a  $Q = C \Delta^\alpha$  et on obtient sur un diagramme bi-logarithmique une droite dont la pente  $\beta$  permet de calculer  $\alpha$

$$\alpha = \operatorname{tg} \beta$$

La valeur de  $C$  est donnée par l'ordonnée à l'origine.

Nous allons ensuite faire l'interprétation de courbe: Rabattement-débit spécifique.

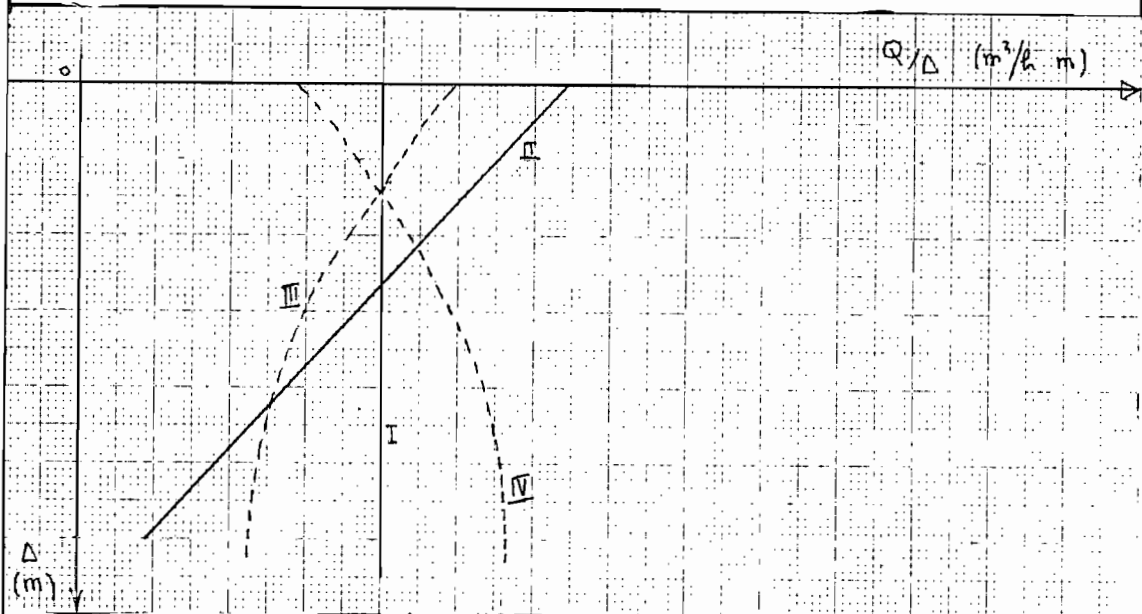


fig13 Exemple de courbes: débits spécifique - rabattement.

On peut avoir 4 cas :

- une droite parallèle à l'axe des rabattements . Le débit spécifique reste constant et on est en présence de puits artésiens à faibles rabattements.
- une droite oblique . Le débit spécifique diminue en fonction des rabattements. C'est le cas, d'une nappe libre avec un débit inférieur au débit critique
- Courbe à convexité dirigée vers l'axe des  $\Delta$  . On a un puits artésien perturbé par des pertes de charge anormales
- Courbe (cas 4) due à un essai defectueux.

En ce qui concerne la courbe de remontée, elle se compose de 2 zones: une branche inclinée et un segment à pente faible.

La branche inclinée traduit une remontée rapide du niveau dynamique - Ceci correspond au remplissage du trou et au rétablissement de l'équilibre hydrodynamique dans le voisinage immédiat du captage. La courbe à pente faible correspond au rétablissement de l'équilibre initial dans le cône de dépression créé par le pompage.

Si cette branche est courte, alors la nappe présente une bonne perméabilité et l'alimentation est importante - Le contraire correspond à une alimentation et une perméabilité très faibles.

### 11.3. ESSAI DE LA "TACHE DE SABLE"

Il s'agit de pomper à un débit  $Q$  et de déterminer la quantité de sable en suspension. Le sable sera mesuré par le diamètre et la granulométrie de la tâche obtenue au fond d'un échantillon d'un litre auquel on a imprimé un mouvement giratoire.

- On a les tolérances admises pour un débit  $Q$ :
- Après 4 à 5 mn de pompage, le  $D_{max}$  de la tâche doit être de 4 mm et le diamètre des grains doit être de  $\leq 1$  mm
- Après une demi-heure de pompage, l'eau devra être exempte de matière en suspension (sable ou argile).



## 11-4 CALCUL DES PERTES DE CHARGES TURBULENTES

On a que l'équation caractéristique d'un système de captage est de la forme  $S = BQ + CQ^n$

$BQ$  représente la baisse de pression de la nappe -

$CQ^n$  représente les baisses de pression propre à la circulation de l'eau dans le système de captage. On a un temps de pompage constant pour chaque cas. (3 débits)

$$S_1 = bQ_1 + cQ_1^n \quad S_2 = bQ_2 + cQ_2^n \quad S_3 = bQ_3 + cQ_3^n$$

$b$  = coefficient dépendant de la qualité de la nappe et du temps de pompage.

$c, n$  = paramètres de perte de charge turbulente.

Nous allons utiliser ici la méthode graphique.

### MÉTHODE GRAPHIQUE.

- Porter sur un système de coordonnées rectangulaires les valeurs de  $Q$  et  $S$ . ( $Q$  en abscisse). Les points doivent être alignés sur une droite sinon on a des pertes de charges anormales dans le système de captage.

- Calcul de  $n$ .

$$A = \frac{S_2 - S_1 a_1}{S_2 - S_1 a_2} = \frac{a_1^n - a_1}{a_2^n - a_2} \quad \text{avec } a_1 = \frac{Q_2}{Q_1}; a_2 = \frac{Q_3}{Q_1}$$

$A$  peut être calculé on a aussi

$\text{Log } A = \text{Log } (a_1^n - a_1) - \text{Log } (a_2^n - a_2)$ . On résout cette équation avec l'abaque (Page 19 - Annexe).

- On mesure en ordonnée la longueur de  $\log A$  (distance entre  $1 + A$ ).
- On recherche entre les 2 courbes  $(a_1^n - a_1)$  et  $(a_2^n - a_2)$ , l'écartement correspondant pour la valeur recherchée de "n".

\* Calcul de C

$$C = \frac{S_2 - a_2 S_1}{(a_1^n - a_1) Q_1^n}$$

, les différences sont déterminées à partir de l'abaque (Page 19 - Annexe)

\* \* - Calcul de b

$$b = \frac{S_1 - c Q^n}{Q_1}$$

$$\text{Le débit spécifique } Q/S = \frac{1}{b}$$

## 11-5 RÉCEPTION DU FORAGE

Lorsque toutes les règles d'exécution prescrites dans le cahier de charge ont été respectées et que les essais de pompage, de tache de sable et d'analyse de l'eau s'avèrent concluants, on passe à la réception provisoire du forage.

Et avant la réception définitive, l'entrepreneur peut être obligé d'effectuer un autre essai de pompage et d'autres tests chimiques. Si l'écart dépasse 5% des résultats initiaux, l'ouvrage exécuté pourra être rejeté ou le paiement diminué.

### CHAPITRE III - CONCLUSION

L'exploitation des eaux souterraines est d'une importance qui n'est plus nécessaire à démontrer. Mais, il est fondamental qu'elle s'accompagne de dispositions efficaces pour éviter l'apparition de perturbations dans les régimes d'écoulement ou la destruction prématurée des ouvrages de captage.

En effet, il s'avère nécessaire vu le rythme actuel d'implantation de puits et de forages, de mettre en place un système d'entretien permanent et efficace afin de pouvoir allonger la durée de vie des installations. Il faut aussi bien enseigner à la population, utilisatrice des systèmes de puisage, les conduites à respecter ~~les~~ devant les ouvrages en place.

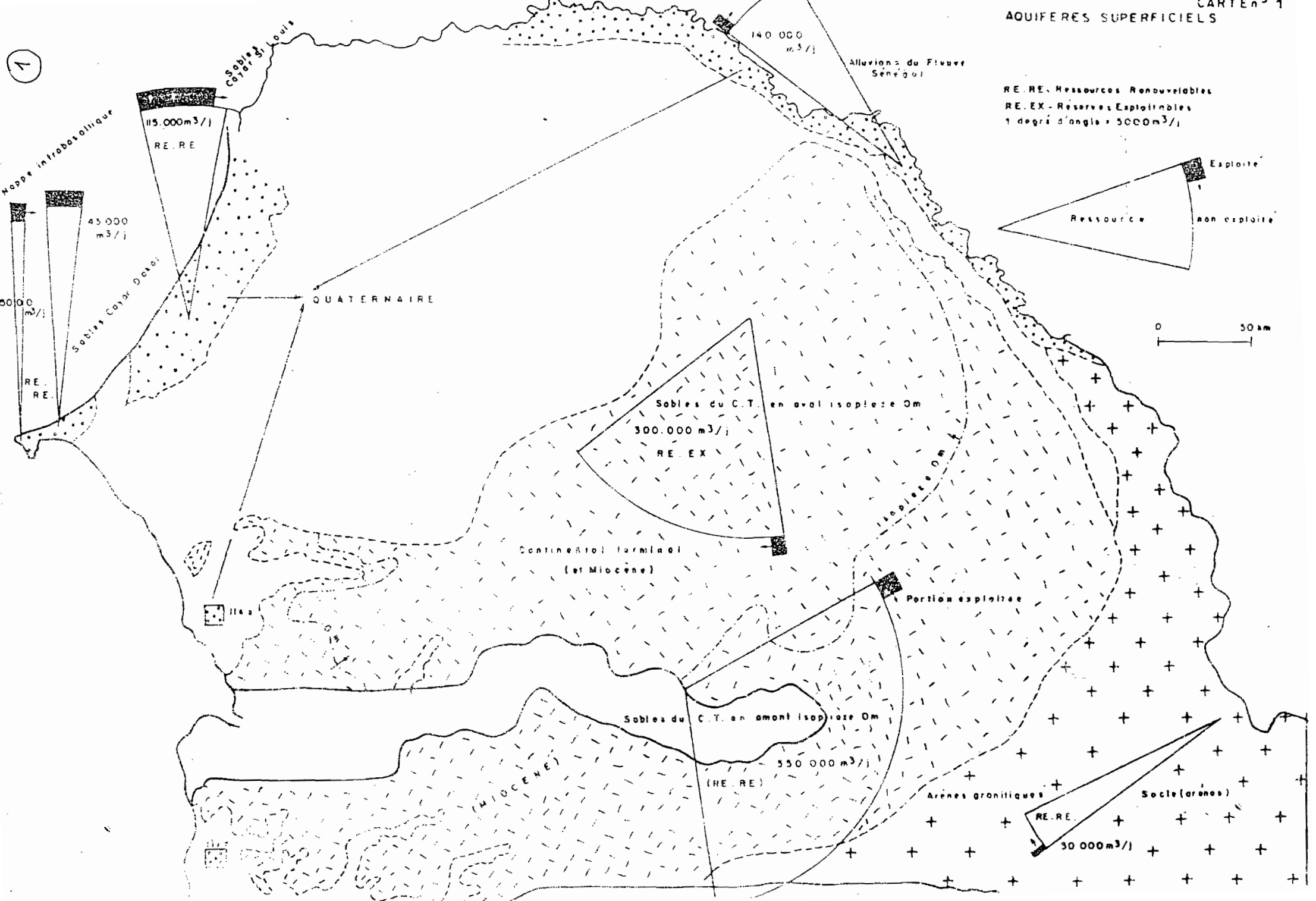
Aussi, vu le temps de recharge des nappes aquifères qui est excessivement long et le taux d'utilisation qui va croissant, les chercheurs sénégalais devraient s'atteler à faire l'étude de l'évolution des nappes. Ceci permettra en effet de mieux planifier l'exploitation et la consommation afin d'assurer à la population la pérennité d'une alimentation en eau suffisante pour leur bien être ou leur survie. On doit donc, à l'heure actuelle penser à la recharge des nappes et veiller surtout, avant de passer à la réception des forages, que toutes les spécifications techniques requises pour l'obtention d'ouvrages adéquates, soient mises au point. En effet, le coût élevé des forages requiert une durée de vie permettant d'obtenir des installations rentables.

ANNEXE.

AQUIFERES SUPERFICIELS

1

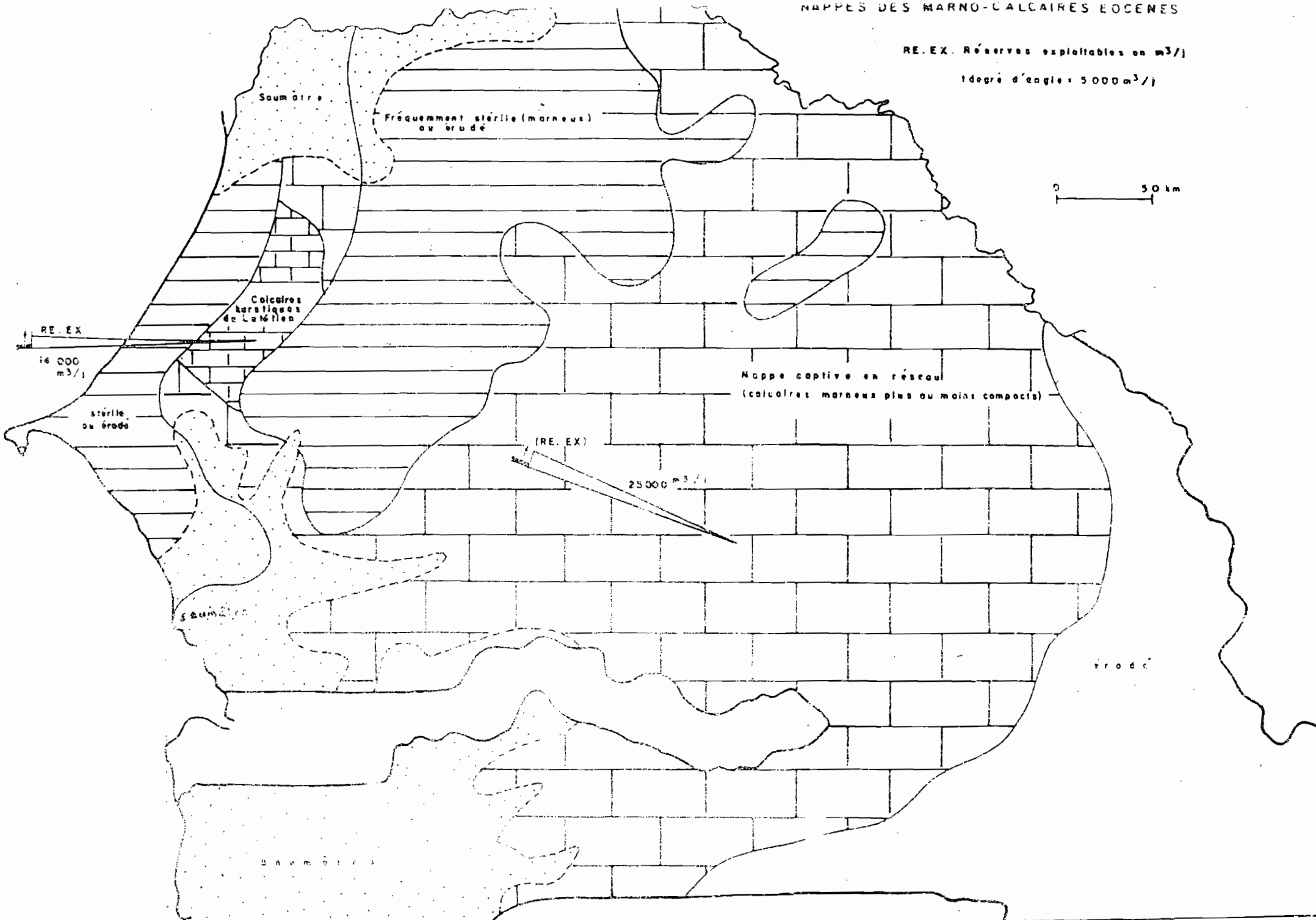
RE . RE - Ressources Renouvelables  
RE . EX - Réserves Exploitables  
1 degré d'angle = 5000m<sup>3</sup>/j



# NAPPES DES MARNO-CALCAIRES EOCENES

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

1 degré d'angle = 5 000 m<sup>3</sup>/j



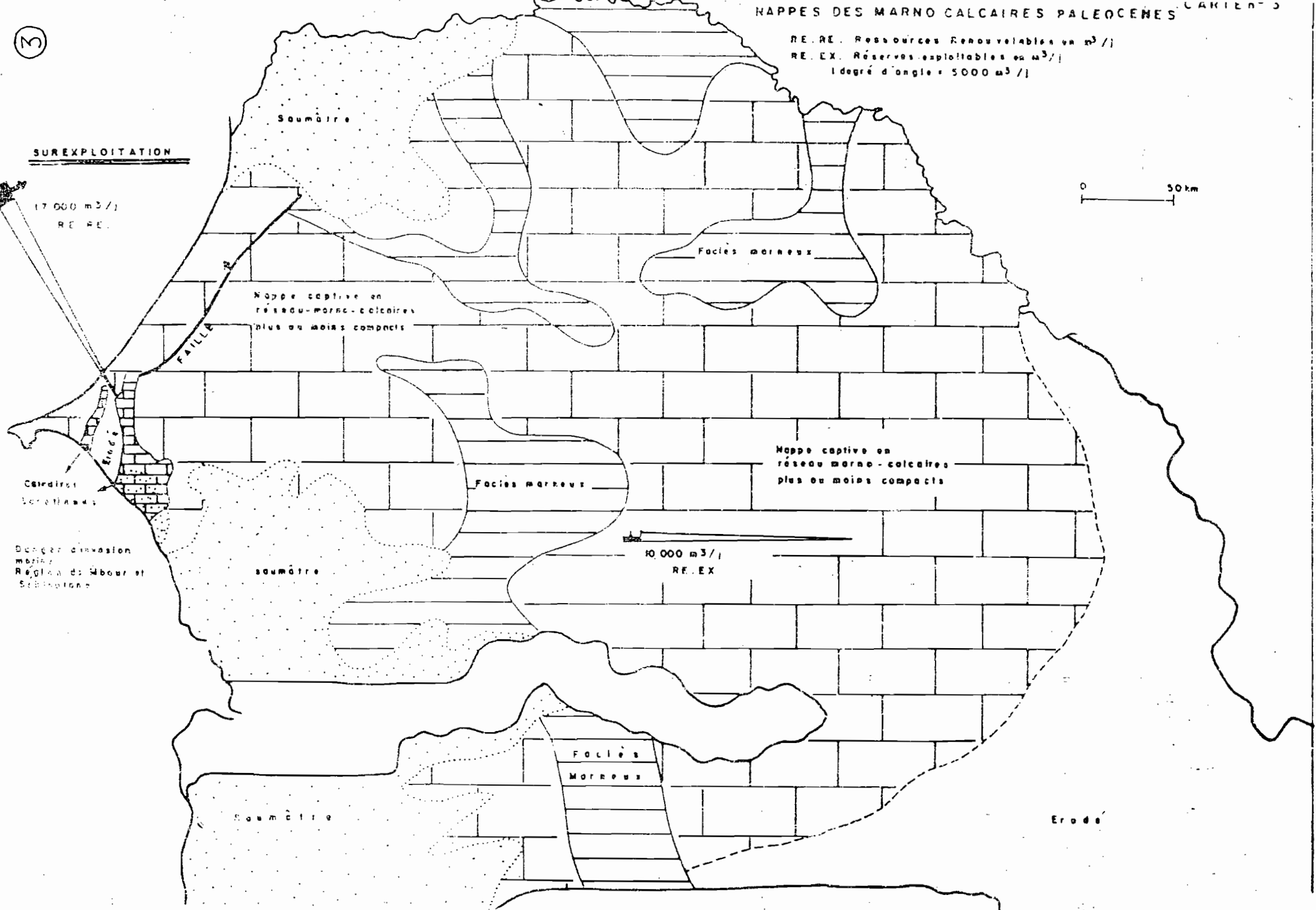
3

# NAPPES DES MARNO CALCAIRES PALEOCENES (ARTICLE 3)

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.



Cairières  
Scabieuses  
Danger d'invasion  
marine  
Région de Mbour et  
Sédouane

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

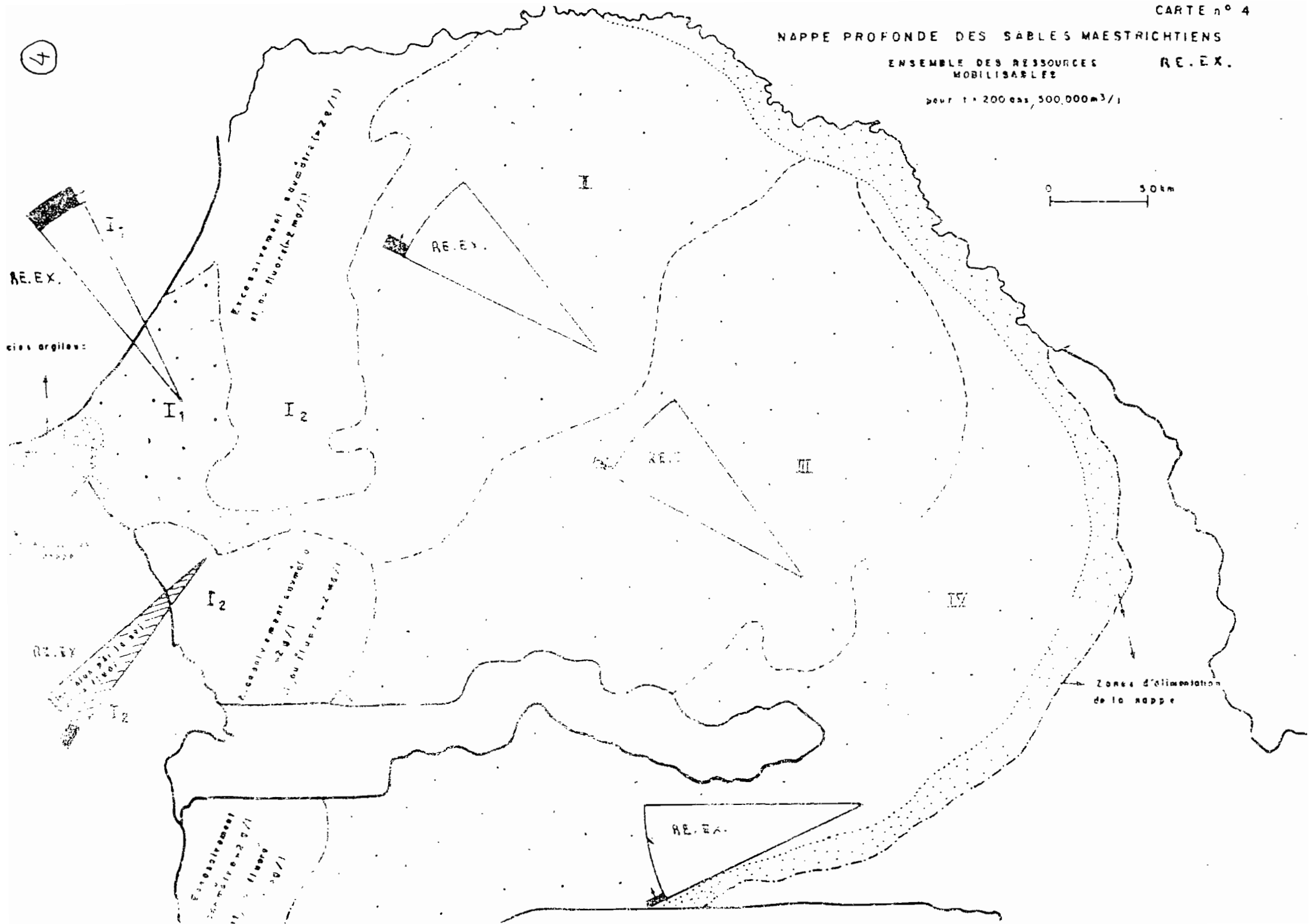
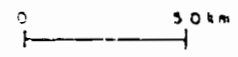
Erosé

4

# NAPPE PROFONDE DES SABLES MAESTRICHIENS

## ENSEMBLE DES RESSOURCES MOBILISABLES R.E.E.X.

pour 1 : 200 cas, 500.000 m<sup>3</sup>/l



Excès de fluorure (> 2 g/l)  
 et de fluorure (> 2 mg/l)

R.E.E.X.

I

I<sub>1</sub>

I<sub>2</sub>

R.E.E.X.

III

I<sub>2</sub>

IV

Excès de fluorure (> 2 g/l)  
 et de fluorure (> 2 mg/l)

Zone d'alimentation  
 de la nappe

R.E.E.X.

Excès de fluorure (> 2 g/l)  
 et de fluorure (> 2 mg/l)

R.E.E.X.

craie argileuse

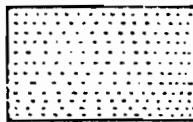
R.E.E.X.



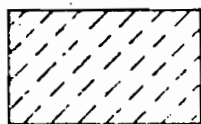
COUPES GEOLOGIQUES



SABLES



GRES



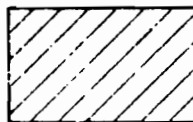
ARGILES



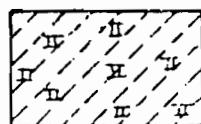
LATERITES



CALCAIRE



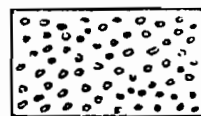
ARGILITES



MARNE



COQUILLES (de calcaire)

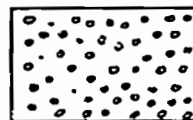


SILEX

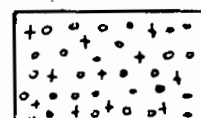
COUPE DES FORAGES



CIMENT

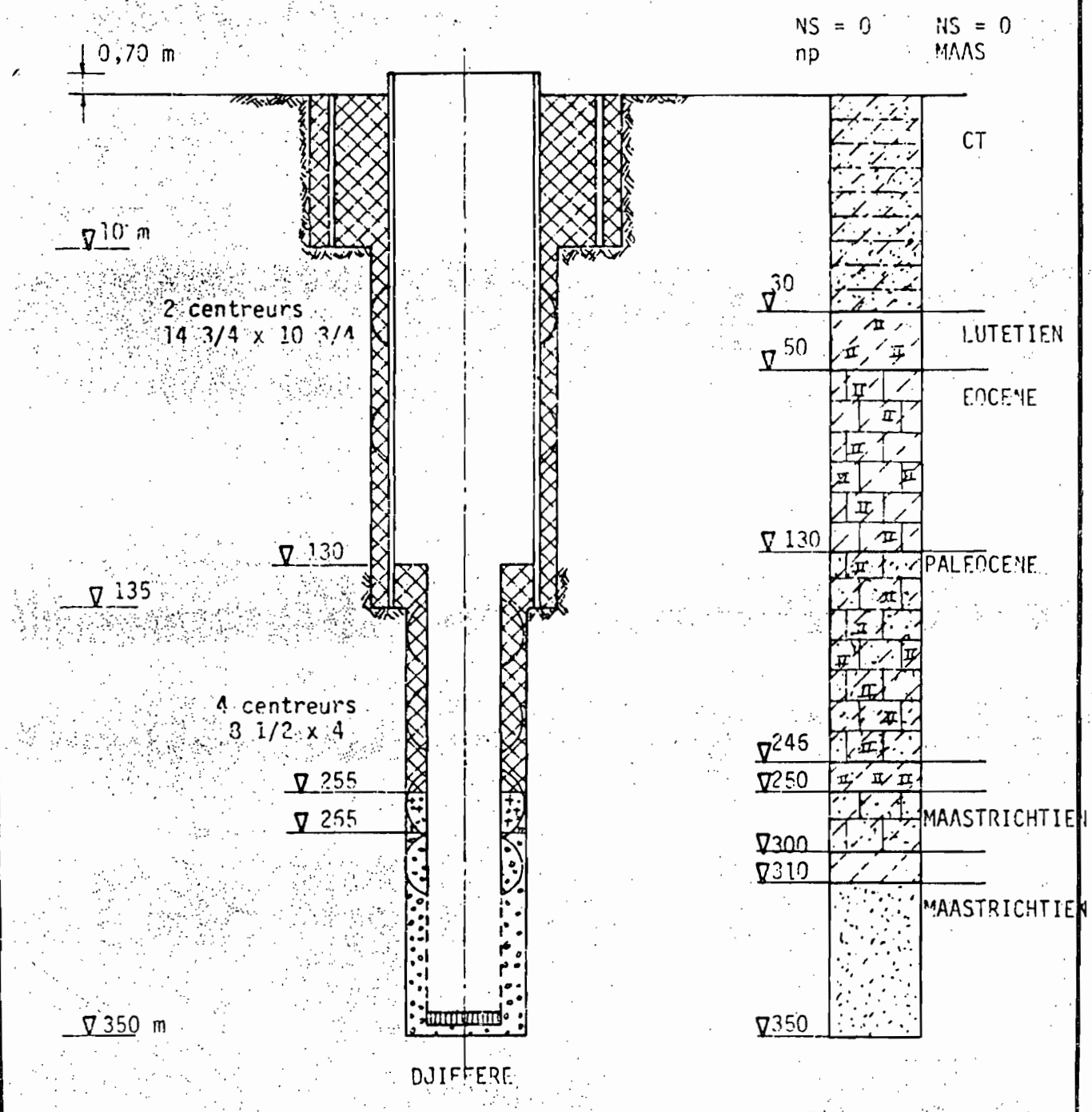


GRAVIER



CONCASSE DE BASALTE

Ø	FORAGE	Ø	TUBAGE	VOLUME EN LITRES				
				Ø F	Ø T	TROU	CIMENT	BASALTE + GRAVIER
18 1/2	10	16	10					
14 3/4	125	10 3/4	135,7	18 1/2	16	1734	437	-
8 1/2	215	4 LP	191 + 5	14 3/4	10 3/4	13780	7009	-
		4 cr	24	8 1/2	4	7371	3635	284 + 2417
TOTAL	350	tot	365,7					



## COUPE GÉOLOGIQUE : DJIFFÈRE

(détaillée)

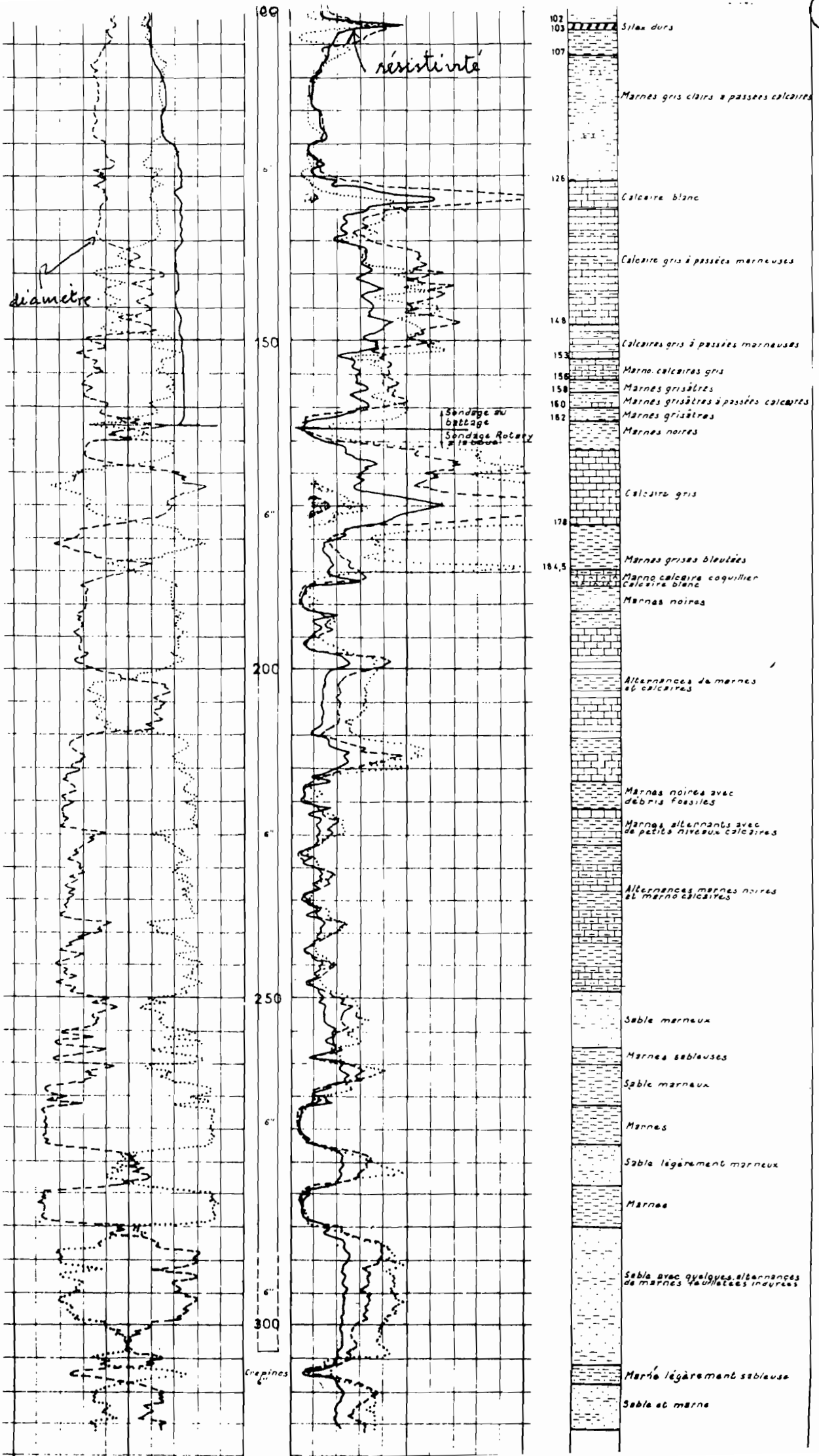
Les échantillons prélevés lors de l'exécution des forages ont permis de décrire la stratification des couches à Djiffère -

on a :

- 0 - 12 m : sable marin grossier + coquilles.
- 12 - 16 m : coquilles multicolores.
- 16 - 18 m : sable coquiller
- 18 - 24 m : coquilles sableuses + latérite + marne.
- 24 - 25 m : coquilles latéritiques
- 25 - 33 m : marne rose
- 33 - 49 m : calcaire (jaune)
- 49 - 73 m : calcaire blanc + coquilles
- 73 - 80 m : calcaire blanc + latérite + coquilles
- 80 - 96 m : calcaire gris + silex noir + marne.
- 96 - 98 m : marno-calcaire + silex
- 98 - 100 m : marne grise + silex
- 100 - 128 m : marne noir + latérite noir + silex
- 128 - 129 m : marno-calcaire + latérite + silex.
- 129 - 132 m : calcaire siliceux
- 132 - 133 m : calcaire (gris)
- 133 - 175 m : calcaire + fossiles + feuillets d'argile.
- 175 - 205 m : calcaire
- 205 - 206 m : marne noir
- 206 - 211 m : calcaire

211 - 213 m :	marne noire
213 - 220 m :	calcaire marneux
220 - 246 m :	calcaire gris + fossiles
246 - 250 m :	sable fin + grès + silex + coquilles
250 - 258 m :	argiles silteuses
258 - 271 m :	sable brun
271 - 273 m :	argile
273 - 280 m :	sable fin
280 - 284 m :	argile
281 - 308 m :	sable fin (brun)
308 - 311 m :	banc d'argile
311 - 315 m :	sable (fin + grossier)

Exemple:  
Diagraphie



# GRAVILLONNAGE

DOC. 15a.

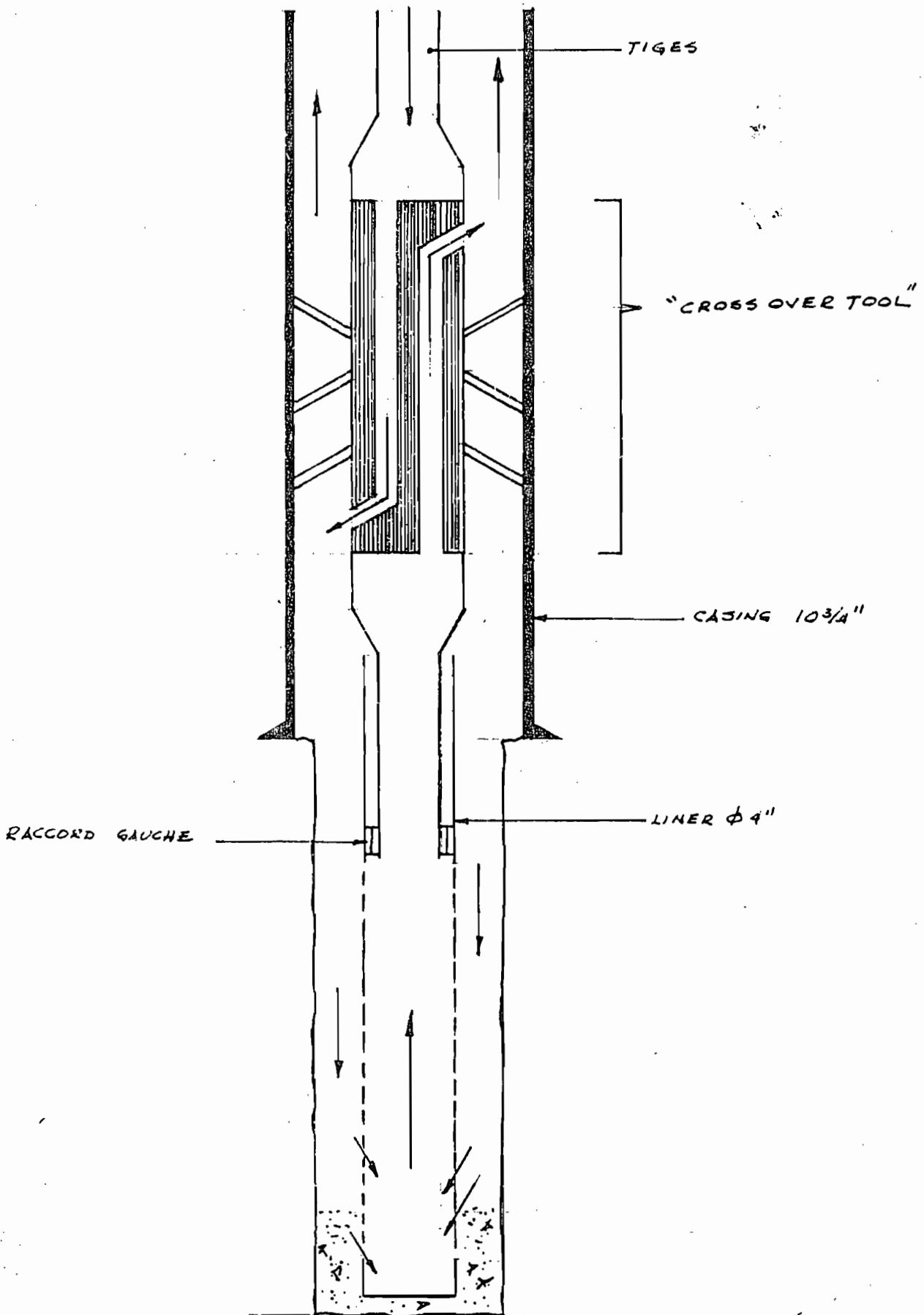


Fig. 1

# CIMENTATION

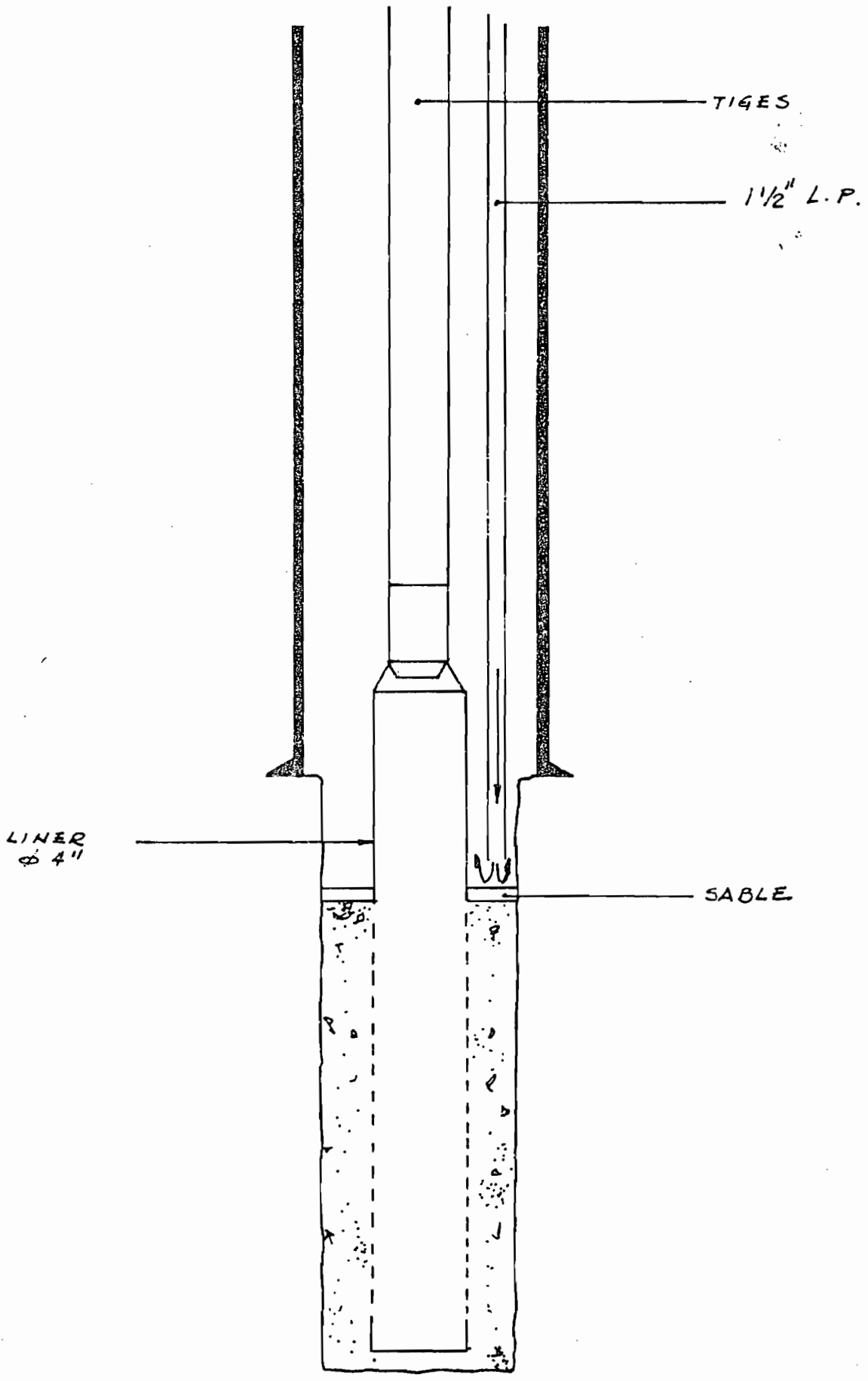
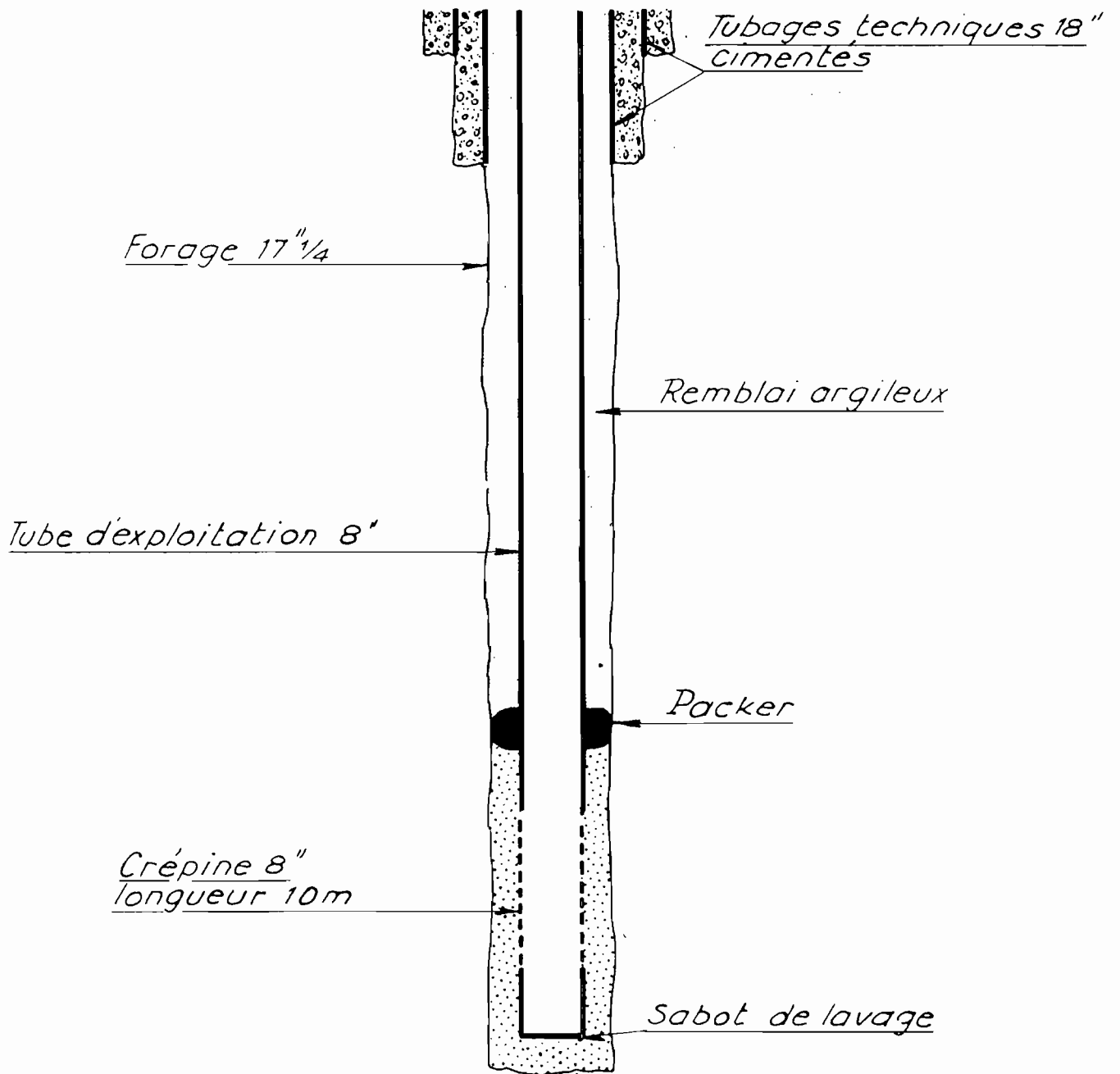


Fig. 2

# FORAGE 30 m<sup>3</sup>/h

Nappe phréatique du continental terminal.

SCHEMA

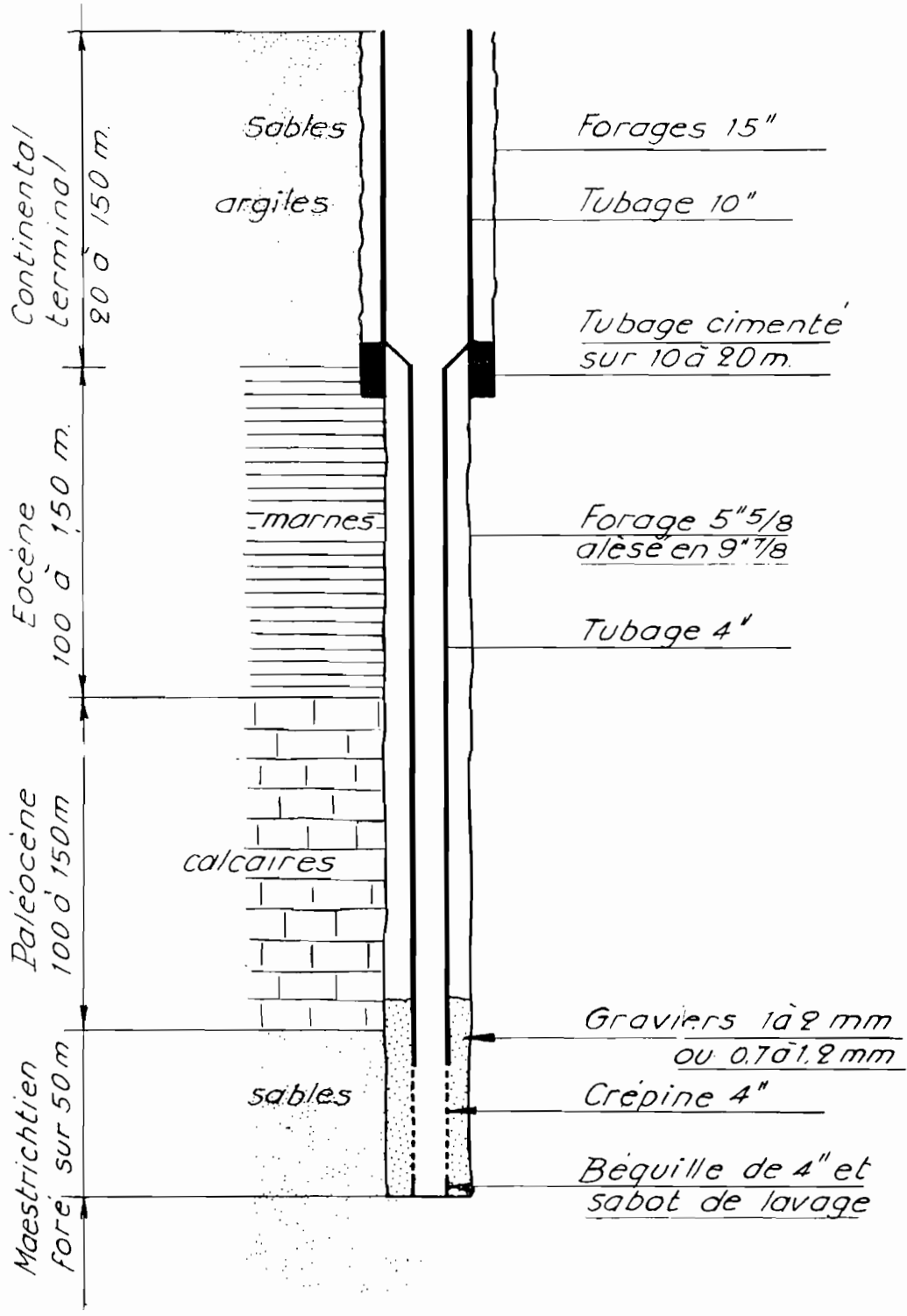




# FORAGES D'EXPLOITATION DU MAESTRICHTIEN

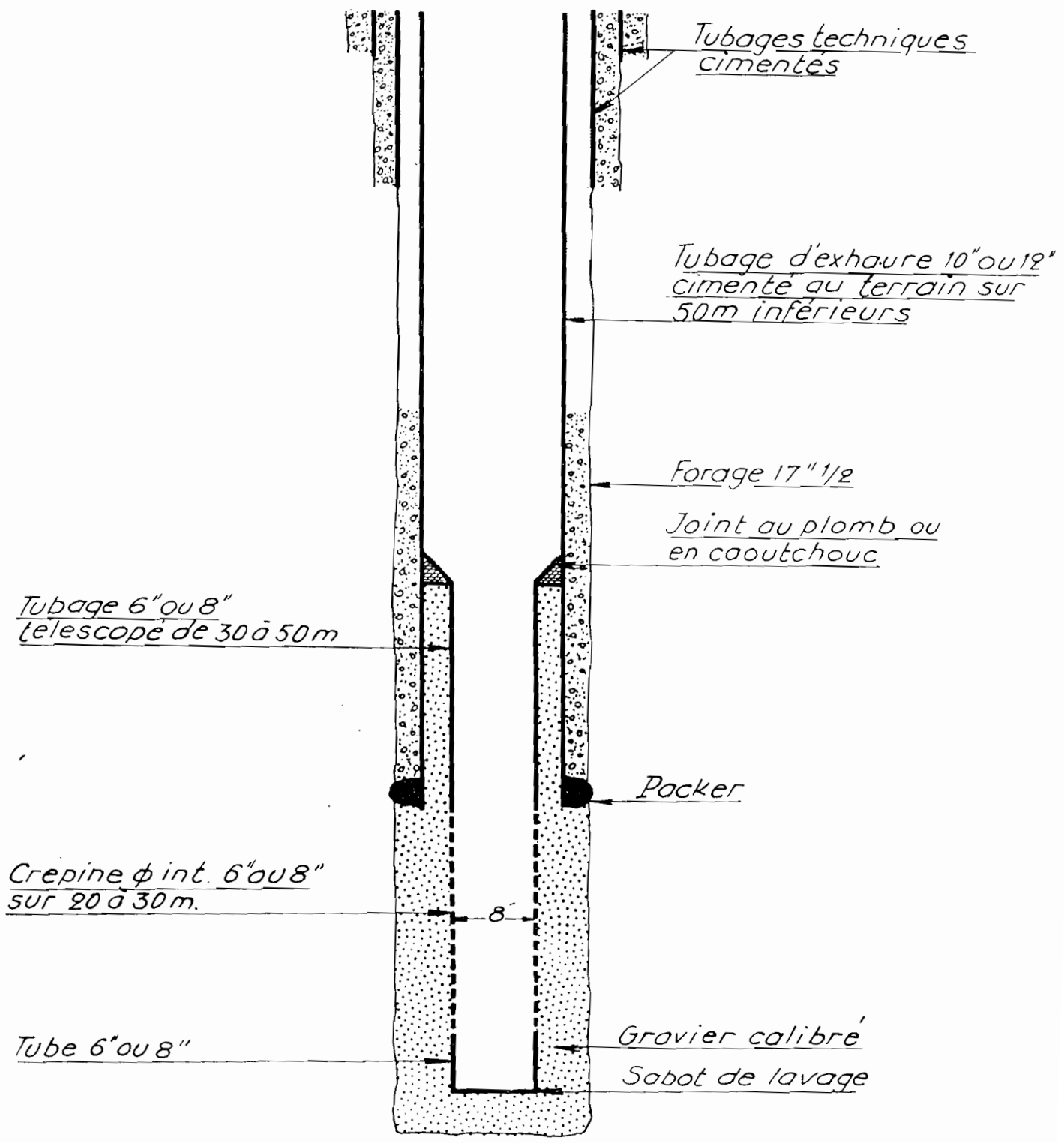
DEBITS D'ESSAIS 50 m<sup>3</sup>/h  
DEBITS D'EXPLOITATION 20 m<sup>3</sup>/h

SCHEMA



# FORAGE A GROS DEBIT

> à 100m<sup>3</sup>/h - 150 à 350 m.  
SCHEMA



RÉSULTATS DES ESSAIS DE POMPAGE  
 " forage de Djiffère "

$Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$			$Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$		
<u>Descente</u>	<u>Remontée</u>	<u>temps.</u>	<u>Descente</u>	<u>Remontée</u>	
2.50	6.18	0	0.0	13.84	
2.55	5.35	30 s	2.35	10.50	
3.53	2.58	1 mn	6.88	7.99	
4.3	2.10	1 <sup>m</sup> 30	8.45	6.05	
4.72	1.72	2 mn	9.60	5.85	
5.07	1.48	2 <sup>m</sup> 30	10.40	4.90	
5.31	1.30	3 mn	11.20	2.95	
5.50	1.15	3 <sup>m</sup> 30	11.45	2.75	
5.62	1.05	4 m	11.80	2.45	
5.71	.95	4 <sup>m</sup> 30	12.15	2.12	
5.79	.89	5 mn	13.35	1.90	
6.90	.85	6	12.68	1.52	
5.96	.80	7	12.89	1.46	
5.99	.78	8	13.01	1.33	
6.02	.75	9	13.10	1.24	
6.04	.73	10	13.18	1.18	
6.08	.72	15	13.35	.98	
6.13	.72	20	13.44	.85	
6.14	.71	25	13.49	.76	
6.145	.71	30	13.53	.74	
6.15	.71	35	13.57	.71	
6.16	.71	40	13.60		
6.17	0.71	45	13.63		
6.18	6.18	50	13.66		
6.18	6.18	55	13.68		
"	"	60	13.70		
"	"	75	13.75		
"	"	90	13.80		
"	"	105	13.84		
"	"	120	13.84		

$\frac{Q}{\Delta} = 1.6$

$\frac{Q}{\Delta} = 1.4$

Q = 30 m <sup>3</sup> /h			Q = 40 m <sup>3</sup> /h		
<u>Descente</u>	<u>Remontée</u>	<u>temps</u>	<u>Descente</u>	<u>Remontée</u>	
0,0	20.90	0,0	0,0	28.97	
.71	16.8	30s	8.30	22.00	
6.55	13.10	1 <sup>mn</sup>	13.50	16.90	
10.3	10.09	1 <sup>mn</sup> 30	16.8	13.30	
12.8	8.04	2 <sup>mn</sup>	19.54	10.75	
14.62	6.27	2 <sup>mn</sup> 30	21.38	8.55	
17.15	4.92	3 <sup>mn</sup>	22.75	7.10	
17.22	4.40	3 <sup>mn</sup> 30	23.80	6.10	
17.60	3.88	4 <sup>mn</sup>	24.50	5.20	
18.12	3.42	4 <sup>mn</sup> 30	25.10	4.65	
18.50	3.10	5 <sup>mn</sup>	25.58	4.25	
18.75	2.82	5 <sup>mn</sup> 30	26.15	3.67	
19.17	2.46	6	26.57	3.30	
19.42	2.45	8	26.85	3.05	
19.57	2.10	9	27.04	2.98	
19.68	1.92	10	27.18	2.75	
19.78	1.58	15	27.67	2.30	
20.02	1.44	20	27.82	2.12	
20.22	1.32	25	27.98	1.75	
20.28	1.24	30	28.08	1.83	
20.35	1.17	35	28.17	1.75	
20.39	1.14	40	28.23	1.68	
20.44	1.05	45	28.34	1.62	
20.50	1.05	50	28.43	1.55	
20.52	1.03	55	28.48	1.48	
20.55	1.01	60	28.53	1.45	
20.65	.95	75	28.67	1.32	
20.74	.90	90	28.81	1.24	
20.82	.85	105	28.87	1.14	
20.90		120	28.87	1.07	

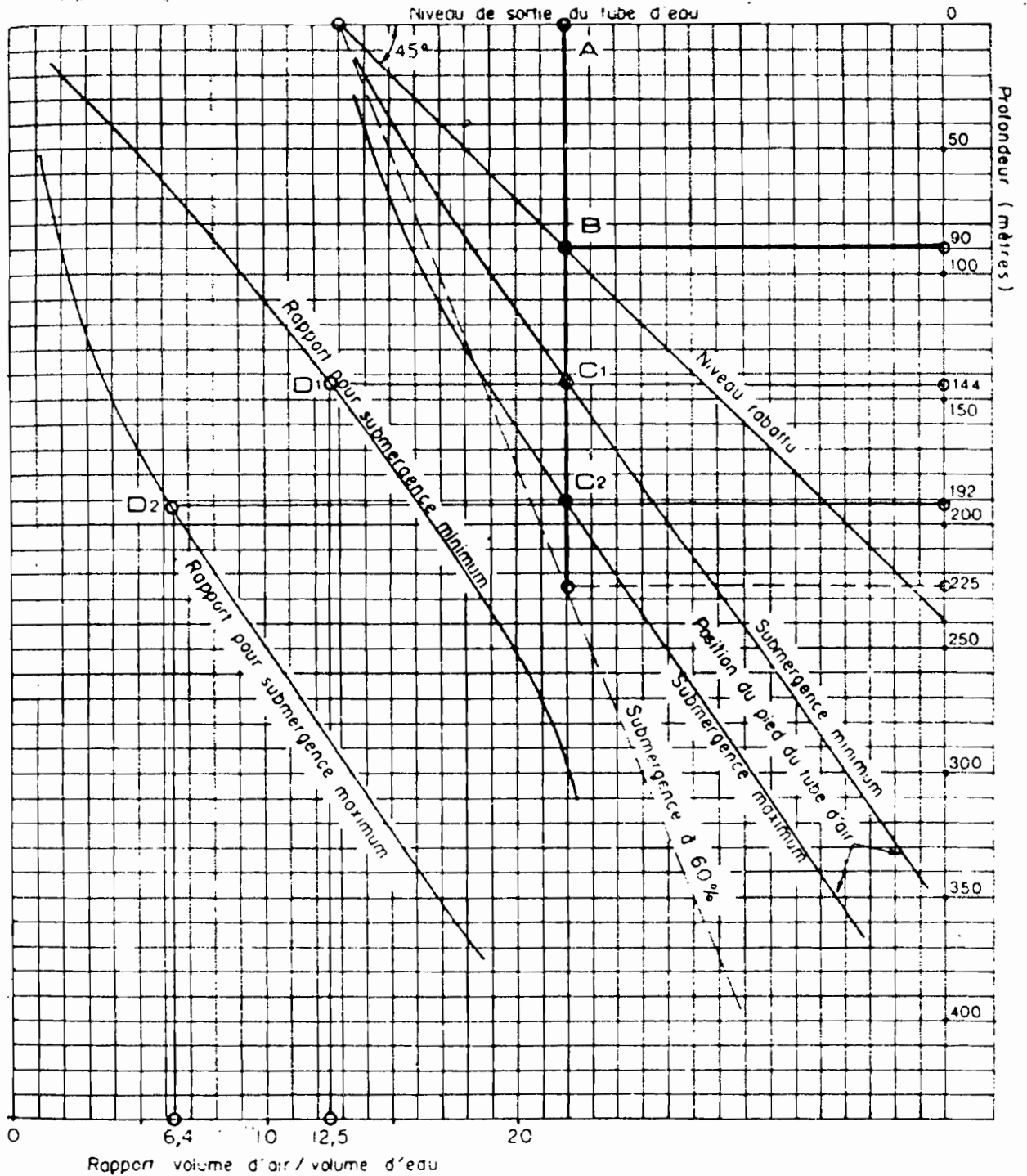
$Q/A = 1.4$

$Q/A = 1.4$

$Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$		$Q = 80 \text{ m}^3/\text{h}$	
<u>Descente</u>	<u>Remontée</u>	<u>temps</u>	
0,0	47.94	0,0	68.4
13.92	38.5	30s	57.7
23.35	29.6	1mn	50.3
28.40	23.0	1mn30	47.7
33.50	18.3	2mn	30.1
35.80	14.4	2mn30	24.1
38.15	11.80	3mn	19.0
40.0	10.0	3mn30	15.8
41.30	8.50	4mn	13.90
42.40	7.50	4mn30	10.90
43.10	6.05	5mn	9.80
44.15	5.23	6	9.20
44.85	4.70	7	8.40
45.20	4.34	8	6.75
45.52	4.08	9	6.38
45.70	3.87	10	6.01
46.24	3.36	15	5.70
46.50	2.97	20	4.85
46.74	2.75	25	4.35
46.88	2.52	30	3.98
46.98	2.38	35	3.75
47.10	2.23	40	3.50
47.20	2.12	45	3.31
47.30	1.99	50	3.20
47.35	1.88	55	3.05
47.42	1.84	60	2.91
47.56	1.52	75	2.81
47.71	1.49	90	2.29
47.83	1.35	105	2.11
47.94	1.25	120	1.88

$Q_{\Delta} = 1.3$

$Q_{\Delta} = 1.2$

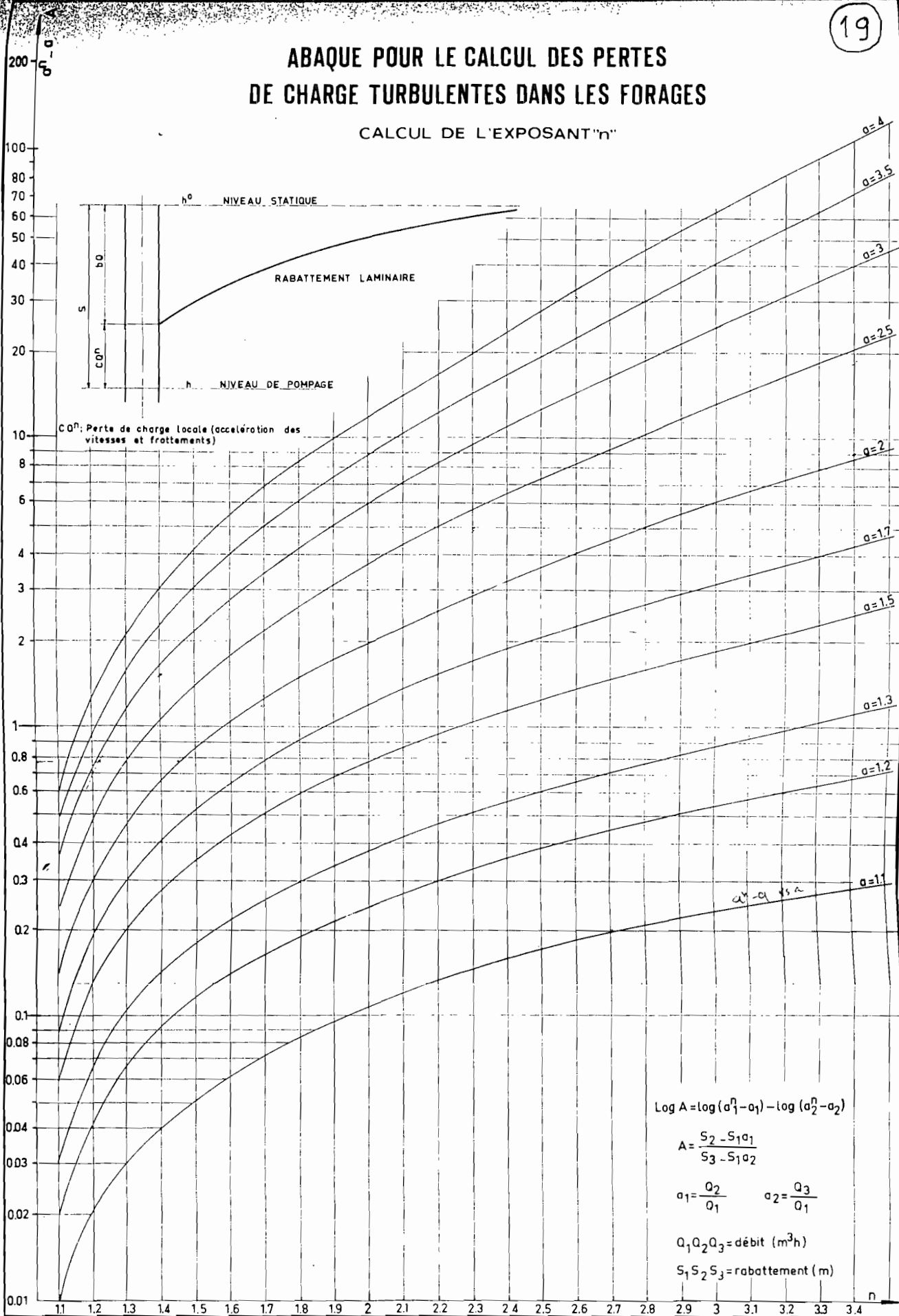


# PROJET DE POMPAGE PAR ÉMULSEUR (AIR LIFT)

Figure hors-texte 176-177

# ABACUS POUR LE CALCUL DES PERTES DE CHARGE TURBULENTES DANS LES FORAGES

CALCUL DE L'EXPOSANT "n"

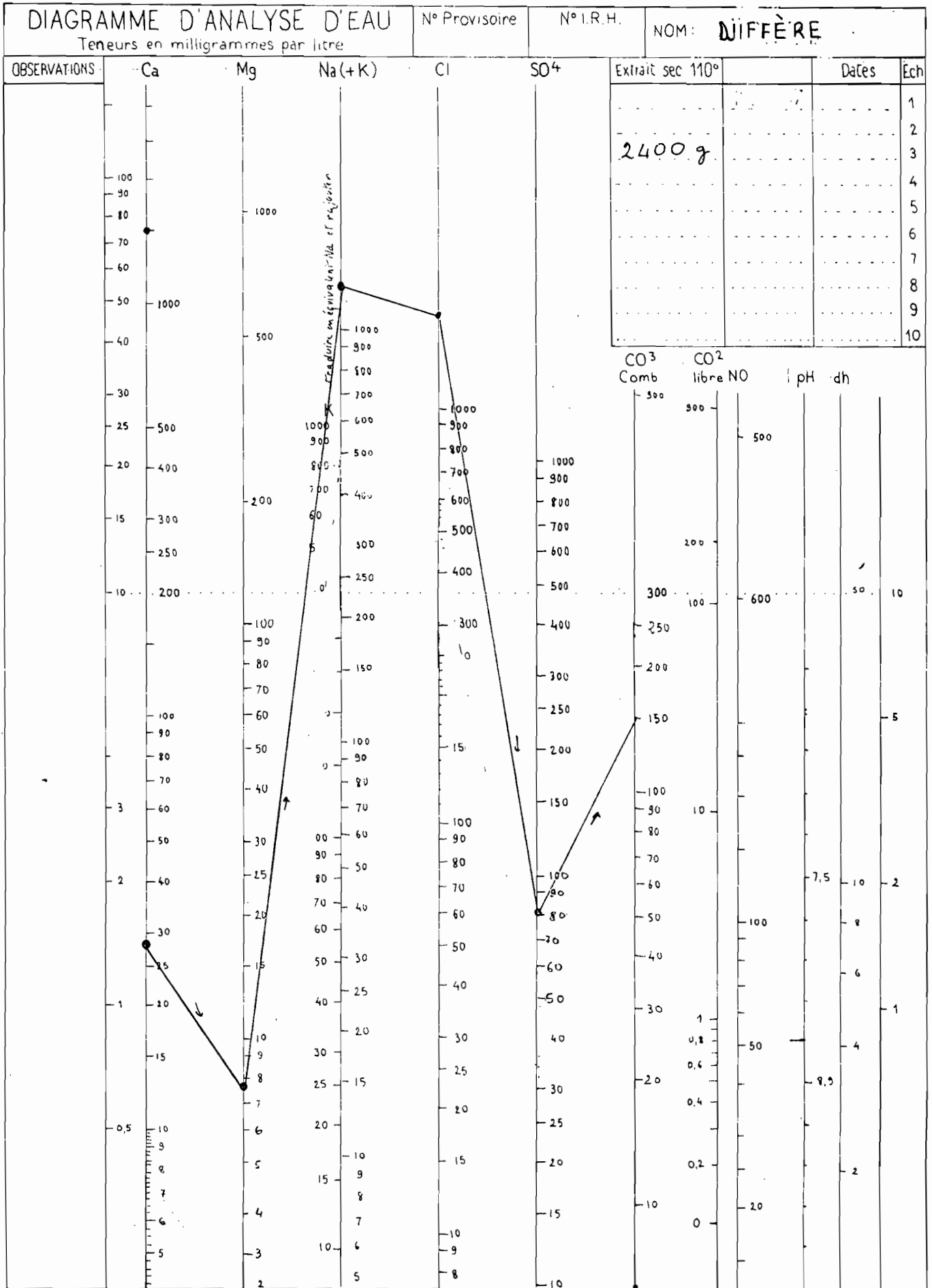


## ANALYSE DE L'EAU

Substances	concentrations - mg/l différente	Concentrations* mg/l NORNE - OMS
Cl <sup>-</sup>	1588.6	600
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	80.7	400
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	732.3	
CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	-	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<2	45
F <sup>-</sup>	2.2	1.5
Ca <sup>++</sup>	27.2	200
Mg <sup>++</sup>	7.8	150
Na <sup>+</sup>	1297.9	
K <sup>+</sup>	9	
NH <sub>4</sub> <sup>-</sup>	<.1	
rendu sec	2400	1500
PH	8	7.5 - 8.5
radioéléments	-	1000 pCi/l

\* Il s'agit de concentrations maximum admissibles.





## BIBLIOGRAPHIE

- [1] : JEAN PIMIENTA : " Le captage des eaux souterraines." EDITIONS - EYROLLES. 1972
- [2] : ALBERT MABILLOT : " le forage d'eau"  
Collection CREPINES JOHNSON
- [3] G. CASTANY : " Traité pratique des eaux souterraines"  
Collection DUNOD - 1967
- [4] G. CASTANY : " Prospection et exploitation des eaux souterraines"  
Collection DUNOD - 1968
- [5] C.R. COX : " Techniques et contrôle du traitement des eaux"  
OMS - GENEVE - 1967
- [6] " Techniques rurales en Afrique"  
BCEOM et I.E.M.VT