RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DES RELATIONS EXTÉRIEURES

– COOPÉRATION ET DÉVELOPPEMENT –

FORAGE D'EAU

MATÉRIEL ET TECHNIQUES MIS EN ŒUVRE EN AFRIQUE CENTRALE ET DE L'OUEST

C.I.E.H.
Comité Interafricain
d'Études Hydrauliques

BURGÉAP
Étude et mise en valeur
des eaux souterraines

SPRUMONT JEAN
Atelier ÉCOLE de MÉCANIQUE
AGRICOLE de CAMP-PERRIN
B.P. 14
Les Caves - HAITI. WI

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DES RELATIONS EXTÉRIEURES
— COOPÉRATION ET DÉVELOPPEMENT —

Collection Techniques Rurales en Afrique

FORAGE D'EAU

MATÉRIEL ET TECHNIQUES MIS EN ŒUVRE EN AFRIQUE CENTRALE ET DE L'OUEST

par

C. DILUCA
Chef du Département
Hydrogéologie du CIEH

E. de REYNIÈS
Ingénieur
BURGÉAP

C.I.E.H.
Comité Interafricain
d'Études Hydrauliques

BURGÉAP
Étude et mise en valeur
des eaux souterraines

Tous droits d'adaptation, de traduction et de reproduction,
y compris la photographie et le microfilm, réservés pour tous pays.

© Ministère des Relations extérieures - Coopération et Développement - 1983

ISBN 2-II-084501-5

SOMMAIRE

Pages

Préface 11

Avertissement 13

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS

1.1 Aperçu général sur les nappes souterraines 15

1.2 Répartition des besoins en eau et objectifs d'approvisionnement 18

1.3 Contraintes liées à l'exhaure 19

1.4 Conclusions : points d'eau unités 21

1.5 Sélection du type d'ouvrage 22

1.6 Données sur l'équipement en points d'eau dans les États membres du C.I.E.H. 26

CHAPITRE 2

CARACTÉRISTIQUES A DONNER AUX OUVRAGES

2.1 Forage villageois réalisé au marteau fond de trou dans le socle 29

2.2 Forage villageois en terrain sédimentaire 35

2.3 Puits réalisé à la main 36

2.4 Puits foré 37

2.5 Forage avec motopompe dans le socle 39

2.6 Forages « profonds » dans les terrains sédimentaires ... 42

CHAPITRE 3

MATÉRIEL ET MÉTHODES POUR LA RÉALISATION DE FORAGES EN PETIT DIAMÈTRE

3.1 Sondeuses au marteau fond de trou 47
3.2 Forage au rotary à la boue 74
3.3 Forage carotté 78
3.4 Forage au battage 79

CHAPITRE 4

MATÉRIEL ET MÉTHODES POUR LA RÉALISATION DE PUITS FORÉS

4.1 Forage à la tarière - bucket 84
4.2 Forage à la benne - trépan 90
4.3 Forage au battage en grand diamètre 94
4.4 Forage au rotary en circulation inverse 97

CHAPITRE 5

ÉLÉMENTS SUR LES COÛTS ET LES STRUCTURES DE RÉALISATION

5.1 Dépenses relatives au matériel 101
5.2 Coût des forages 103
5.3 Structures de réalisation 111

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Évaluation des besoins en points d'eau. Structures de réalisation et matériels existant dans les États.	117
Annexe 2	Rappels fondamentaux sur les moyens d'exhaure.	127
Annexe 3	Sondeuses au rotary à l'air et au marteau fond de trou : données complémentaires sur le matériel, le fonctionnement et l'entretien.	133
Annexe 4	Caractéristiques techniques de différents modèles de sondeuses.	145
Annexe 5	Caractéristiques des tubages PVC	191
Annexe 6	Coût du matériel	197
Annexe 7	Exemple de Cahier des Prescriptions Techniques pour l'exécution des forages villageois en zone de socle cristallin.	205
Annexe 8	Exemples de méthodes alternatives pour l'exécution de forages villageois dans le socle (forages carottés en petit diamètre et forages au battage)	229
Annexe 9	Données sur les aquifères des formations cristallines et sédimentaires en Afrique Centrale et de l'Ouest.	241
Annexe 10	Bibliographie	267
Annexe 11	Liste des constructeurs.	271

Nota : Les numéros entre crochets dans le texte renvoient à la bibliographie (Annexe 10).

LISTE DES FIGURES

1 Esquisse géologique

2 Forages « villageois » dans le socle cristallin : coupes-types d'ouvrages réalisés au rotary/marteau fond de trou.

3 Forages « villageois » en terrains sédimentaires

4 Forages avec motopompe dans le socle cristallin.

5 Exemples de forages « profonds » en terrains sédimentaires

6 Principe de la pompe hydraulique à piston.

7 Principe d'une pompe à débit variable

8 Pompe à engrenages.

9 Pompe à palettes.

10 Dispositifs d'effacement de la tête de rotation.

11 Systèmes de translation.

12 Principe du régulateur de poussée Stenuick.

13 Exemple de marteau fond de trou à piston autodistributeur.

14 Taillants à boutons de carbure de tungstène.

15 Consommation d'air comprimé des marteaux fond de trou en fonction de la pression.

16 Exemple d'accroissement de la vitesse de pénétration en fonction de la pression d'air comprimé.

17 Tubage à l'avancement : système Saturne (Stenuick).

18 Tubage à l'avancement : système Odex (Atlas Copco).

19 Forage en circulation inverse à l'air avec doubles tubes.

20 Pompe duplex

21 Pompe centrifuge

22 Phases de construction d'un puits foré à la tarière en 2 diamètres.

23 Forage d'un puits à la benne - trépan en terrains tendres.

24 Débits et hauteurs de refoulement des pompes solaires Guinard Alta XF.

25 Répartition de la force motrice. Classification des sondeuses en fonction des schémas de construction.

26 Abaque de calcul du volume d'air nécessaire à la remontée des déblais dans l'espace annulaire.

27 Machine Calweld 250 B.

28 Bucket et accessoires pour l'équipement des puits.

29 Machine Secmi TP1.

30 Machine Galinet Teknifor MB 750.

31 Forages Villageois dans le socle cristallin ; coupes-types d'ouvrages réalisés au carottage au diamant.

32 Carte des grands ensembles géologiques.

33 Coupes hydrogéologiques schématiques.

34 Bassin sénégalo-mauritanien. Nappes phréatiques. Carte de profondeur de l'eau sous le sol.

35 Bassin sénégalo mauritanien. Nappe profonde maestrichtienne. Carte de profondeur de l'eau sous le sol.

36 Bassin sénégalo mauritanien. Nappe profonde maestrichtienne. Carte de profondeur du toit de l'aquifère.

37 Plaine du Gondo. Nappe du Continental Terminal. Carte de profondeur de l'eau sous le sol.

38 Bassin nigérien. Nappe du Continental Terminal. Carte de profondeur de l'eau sous le sol.

39 Bassin nigérien. Nappe du Continental Intercalaire. Profondeur de l'eau sous le sol et profondeur du toit de l'aquifère.

40 Séries du Crétacé supérieur et du Continental Terminal de l'Est Nigérien. Formations plioquaternaires du Lac Tchad. Carte de profondeur de l'eau sous le sol.

41 Zone Est du Bassin du Lac Tchad. Séries du plioquaternaire et du Continental Terminal. Carte de profondeur de l'eau sous le sol.

42 Bassin du Lac Tchad. Données sur la nappe moyenne sous pression des formations du Tchad.

PRÉFACE

Les diverses évaluations effectuées dans le cadre de la Décennie de l'Eau Potable et de l'Assainissement (1981-1990) montrent que les besoins en eau dans les pays de l'Afrique de l'Ouest et Centrale sont considérables. Dans le seul domaine de l'hydraulique villageoise, représentant environ 80 % des besoins, l'extrapolation des évaluations faites en 1976 conduit au chiffre de 100 000 points d'eau à réaliser d'ici 1990. En déduisant les 30 000 ouvrages réalisés à ce jour, les besoins actuels seraient de l'ordre de 70 000 points d'eau. Il faut y ajouter plusieurs milliers d'ouvrages pour les besoins de l'hydraulique pastorale et environ un millier en hydraulique semi-urbaine (centres secondaires de plus de 5000 habitants).

Pour atteindre ces objectifs, le forage seul est susceptible de répondre, par sa rapidité de mise en œuvre (quelques jours, contre 2 à 3 mois pour un puits), à l'urgence et à l'ampleur des besoins. D'ailleurs, si l'on se réfère à la plupart des programmes en cours de réalisation ou en projet, l'avantage va nettement au forage. De 50 à 60 000 forages devraient être réalisés d'ici la fin de la décennie, ce qui représente environ 80 % des besoins les plus immédiats en hydraulique villageoise.

Dès à présent, les États ont mobilisé un parc de machines important : plus de 50 machines dans le secteur public et environ 40 machines appartenant à des entreprises privées étrangères, ce qui laisse espérer que l'objectif fixé sera effectivement atteint au terme de la décennie.

En fait les programmes actuels ne visent à couvrir que les besoins les plus urgents et ne tiennent compte ni de l'expansion démographique considérable, ni de la desserte des hameaux de moins d'une centaine d'habitants. D'autres facteurs vont également contribuer à augmenter le nombre d'ouvrages et le nombre d'ateliers de forages nécessaires : taux d'échec enregistrés dans certaines formations géologiques, inégalité de la répartition du parc des machines selon le pays, renouvellement des matériels, dont certains ont près de 10 ans d'âge. L'amélioration des techniques, mais également la simplification des matériels et l'abaissement des coûts restent donc des sujets d'actualité.

Aussi, devant la diversité des matériels proposés sur le marché, l'élaboration d'un document qui puisse servir d'élément de base à un dialogue entre maîtres d'ouvrages, entrepreneurs et fabricants de matériel, nous est apparu indispensable. Nous l'avons voulu accessible aussi bien à ceux qui conçoivent et gèrent des programmes qu'à ceux qui font fonctionner les matériels de forage (foreurs, techniciens).

Dans le même esprit, nous avons voulu éviter les généralités et nous avons écarté les éléments que l'on trouve déjà dans des ouvrages spécialisés (notamment dans le domaine du forage à la boue).

Le présent document constitue une édition actualisée, dans la collection « Techniques Rurales en Afrique » d'une étude entreprise en 1981 par le Comité Interafricain d'Études Hydrauliques (C.I.E.H.)* et intitulé « le matériel de forage adapté au captage des eaux souterraines et l'équipement des ouvrages dans les États membres du CIEH ».

Ce travail a été réalisé par une équipe associée CIEH/BURGEAP sur la base de l'expérience des organismes nationaux, constructeurs et sociétés de forage auxquels nous tenons à exprimer nos vifs remerciements.

Nous tenons à remercier également le Fonds d'Aide et de Coopération de la République Française (FAC) dont la contribution financière a permis la réalisation et l'édition de l'étude précitée et de la présente publication.

Nous souhaitons que ce document puisse rendre aux organismes nationaux tous les services qu'ils sont en droit d'en attendre.

Ouagadougou Juin 1983

A. HASSANE./

Secrétaire Général du CIEH

* Le CIEH est un organisme fixé à Ouagadougou, Haute-Volta, et agissant dans le domaine de l'Eau. Il a pour but d'assurer la liaison entre ses douze États membres (Bénin, Cameroun, Congo, Côte d'Ivoire, Gabon, Haute-Volta, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad, Togo) en vue de faciliter les échanges d'informations, l'harmonisation des programmes d'étude d'intérêt régional, la réalisation des études communes et apporte aux États membres qui le souhaitent une assistance technique pour leurs propres programmes d'études.

Avertissement

La très grande majorité des points d'eau à créer dans les États membres du C.I.E.H. concerne les zones de socle.

Aussi le présent ouvrage est-il consacré pour l'essentiel aux matériels mettant en œuvre la technique du forage à l'air au marteau fond de trou, la mieux adaptée à la perforation des roches dures.

Parallèlement sont décrits des matériels et des méthodes utilisables pour la réalisation de puits forés en grand diamètre, susceptibles d'être d'un grand intérêt en zone sahélienne, notamment pour l'hydraulique pastorale.

Ont été abordées également certaines expériences en cours visant à banaliser la réalisation de points d'eau par le développement d'entreprises artisanales de forage, mettant en œuvre des techniques et des matériels simples et peu onéreux, à l'échelle des ressources techniques et financières du monde rural.

Ce document a été élaboré après enquête auprès d'un certain nombre de services et d'entreprises utilisant ces matériels dans les États membres du C.I.E.H. et des fabriquants correspondants. Que le lecteur veuille bien excuser l'imperfection et les imprécisions de ce texte, rédigé en un temps très court. Certaines données sur les coûts et les rendements ont été avancées à titre indicatif, dans le but d'accroître la portée pratique de l'ouvrage, mais pourront ne pas toujours correspondre aux expériences très variées auxquelles elles pourront être confrontées.

Cette étude s'appuie également sur certains ouvrages fondamentaux, qui sont marqués d'un astérisque dans la bibliographie jointe en annexe.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS

1.1. – APERÇU GÉNÉRAL SUR LES NAPPES SOUTERRAINES

Les formations géologiques de l'Afrique peuvent, en ce qui concerne les conditions de gisement des eaux souterraines, être regroupées en trois grands ensembles (figure 1) :

• *Le socle précambrien :* il représente les terrains les plus anciens du « bouclier africain ». Cet ensemble, plus ou moins granitisé, appelé complexe de base, comprend d'une part des granites et des gneiss, d'autre part des formations plus ou moins métamorphiques à dominante schisteuse ou quartzitique.

Il s'agit de roches dures, dans lesquelles les gîtes aquifères sont discontinus, et liés à la fracturation et à l'altération de la roche. En dessous des niveaux altérés de surface, la roche dure fracturée ne peut être traversée économiquement qu'au moyen du forage par percussion à l'air comprimé (marteau « fond de trou »).

Les débits ponctuellement exploitables y sont généralement faibles (de l'ordre du m^3/h) (*) mais conviennent pour les besoins dispersés de l'hydraulique villageoise ; ces débits sont obtenus généralement dans les cinquante premiers mètres sous le sol.

• *Les formations infracambriennes et primaires :*

Ces formations, souvent tabulaires, couvrent de très larges surfaces en Mauritanie et au Mali, ainsi qu'une partie des territoires du Togo, du Bénin et de la Haute Volta.

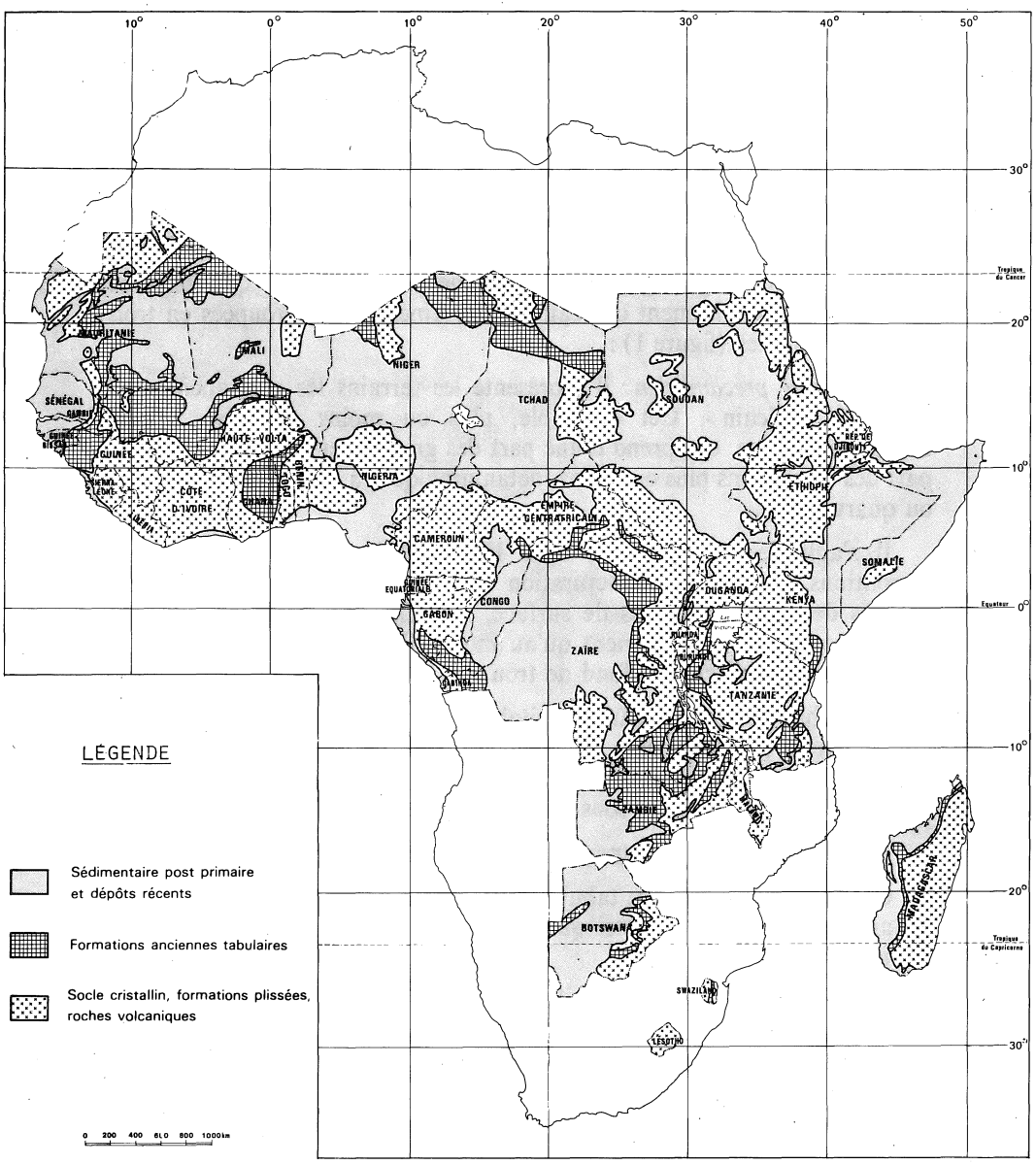
Ce sont également des roches dures (grès, quartzites et schistes essentiellement, roches carbonatées accessoirement), contenant une nappe de fissures plus ou moins continue, en général peu profonde. La productivité des ouvrages y est également liée à la fracturation et à l'altération de la roche et, en dehors de quelques cas particuliers, l'équipement en points d'eau s'y pose en des termes analogues à ceux du socle précambrien.

Pour cette raison, dans la suite du texte, les deux termes précédents ont été regroupés sous la dénomination de « socle » au sens large ou « terrains anciens », afin de les opposer aux terrains sédimentaires récents

(*) des débits de 5 à 10 m^3/h et plus peuvent être obtenus localement, mais, sauf cas exceptionnels, l'implantation de ces forages nécessite une prospection approfondie.

ESQUISSE GÉOLOGIQUE

Fig. 1.



(post-primaires) constitués de formations tendres, dont les caractéristiques d'ensemble sont très différentes.

Ce socle (au sens large), qui occupe la majeure partie de la Côte d'Ivoire (97 % de la superficie du pays), de la Haute-Volta (95 %), du Togo (94 %), du Bénin (83 %), du Cameroun (89 %) et du Gabon (80 %), correspond à des zones de fort peuplement. Dans ces pays, les conditions pluviométriques sont généralement suffisantes pour que le problème des points d'eau villageois ne s'y pose pas en termes de ressources. Plus au Nord, le socle précambrien affleure en massifs isolés (Nord de la Mauritanie, Adrar, Aïr) ; dans ces zones désertiques, les roches cristallines sont faiblement altérées et les conditions d'alimentation des aquifères sont beaucoup plus précaires.

• *Les formations sédimentaires post-primaires et les recouvrements récents :*

Elles se différencient en tous points des précédentes : constituées en majeure partie de roches tendres (sables, grès tendres, argiles) elles renferment des nappes continues, souvent de grande extension, pouvant être empilées en niveaux superposés séparés par des horizons moins perméables.

La nappe phréatique (*) s'y trouve, sous le sol, à une profondeur variable, parfois importante (annexe 9). Les nappes captives sous-jacentes peuvent nécessiter de forer à plusieurs centaines de mètres pour être captées : on sort ici du domaine du marteau « fond de trou » pour entrer dans celui du forage au rotary ou au battage (ou du puits creusé à la main pour les nappes les moins profondes).

Le débit des forages peut aller d'une dizaine de mètres cube/heure à 200 m^3/h ou plus. Paradoxalement ces aquifères, plus productifs que les précédents, conviennent parfois moins bien aux besoins de l'hydraulique villageoise, en raison de la profondeur de la nappe qui dépasse souvent les limites habituelles du pompage manuel (40 m).

Ces formations se rencontrent dans de grands « bassins sédimentaires » situés, pour la plupart, aux latitudes sahéliennes : bassin sénégalo-mauritanien à l'Ouest, delta central du fleuve Niger, bassin de Taoudeni, bassin nigérien, bassin du Tchad. Elles représentent 85 % de la superficie du Sénégal, 65 % de la Mauritanie, 75 % du Niger, 64 % du Mali, 65 % du Congo, 52 % du Tchad ; elles forment en outre une bande côtière étroite, qui occupe une faible partie de la Côte d'Ivoire, du Togo, du Bénin, du Gabon, du Congo et du Cameroun, sur laquelle se trouvent cependant concentrés la plupart des grands centres urbains.

On trouvera, en annexe 9, quelques données fondamentales regroupées par pays, sur les caractéristiques des aquifères mentionnés ci-dessus.

(*) Première nappe libre rencontrée sous la surface du sol.

1.2. – RÉPARTITION DES BESOINS EN EAU ET OBJECTIFS D'APPROVISIONNEMENT

• Structure de l'habitat :

La population des pays concernés est essentiellement rurale et l'habitat y est dispersé : à l'intérieur des douze pays membres du C.I.E.H., en effet, 75 % de la population totale vit hors des centres urbains, cette proportion variant, selon les pays, de 50 % (Congo) à 90 % (Tchad) et se situant généralement entre 80 et 90 % dans les pays sahéliens.

La dimension habituelle des villages est très petite :

Au Niger, par exemple, où l'on compte 9 500 villages administratifs et 15 600 hameaux, près de 80 % des premiers comptent moins de 500 habitants (recensement 1977).

Au Mali, près de 60 % des 10 800 villages ont moins de 300 habitants (recensement 1976).

Encore la dénomination « village » masque-t-elle souvent un éclatement encore plus important : en Haute-Volta, en pays Mossi, il n'est pas rare qu'un « village » de 1 000 habitants comporte une vingtaine de hameaux répartis sur une dizaine de kilomètres carrés [7].

Par ailleurs, le nombre des centres urbains et des centres secondaires (*) est faible et ne dépasse pas une quarantaine par pays en moyenne.

• Consommation et objectifs d'approvisionnement :

- Dans les villages, la consommation moyenne d'eau par habitant varie beaucoup selon la distance à parcourir jusqu'au point d'eau, la profondeur de puisage, la taille de la famille et la présence ou non de petit bétail [27]. Des quelques enquêtes effectuées, il ressort que la consommation varie entre 5 l/jour par habitant – ce qui paraît le minimum absolument indispensable à la survie – et 25 l/jour par habitant dans les zones où l'eau est d'un accès facile.

L'objectif d'approvisionnement à moyen terme que se sont fixé la plupart des États, à savoir la fourniture de 20 à 25 litres d'eau par habitant et par jour, correspond à peu près aux consommations humaines dans des conditions de confort minimales. A plus court terme, cependant, en raison de l'importance des programmes que cela nécessite, certains États se sont fixé un objectif minimum intermédiaire de 10 litres par jour et par habitant.

- Dans les centres urbains, la consommation varie selon l'importance relative des branchements particuliers et de la distribution par bornes-fontaines. Les objectifs d'approvisionnement sont fonction de la taille de

(*) Centre secondaire : nous désignons ainsi toute agglomération d'importance moyenne (grands centres urbains exclus) groupant plus de 5000 habitants.

l'agglomération. Citons, à titre d'exemple, les objectifs du dernier plan quinquennal au Niger :

- 30 l/j/h dans les centres secondaires pourvus d'un réseau d'adduction,
- 75 à 100 l/j/h dans les grands centres urbains.

– En hydraulique pastorale, on ne cherche des débits ponctuels élevés que dans les cas, peu nombreux, d'élevage intensif ou semi-intensif ou pour des aménagements particuliers (ranchs). Dans le cas général, l'exigence du débit est commandée par la capacité d'exhaure (dont nous reparlerons) et surtout par l'espace pâturable autour du point d'eau. La norme de consommation habituellement adoptée est de 40 litres d'eau par UBT (*) et par jour.

1.3. – CONTRAINTES LIÉES À L'EXHAURE

1.3.1. – Choix du type d'exhaure

Le mode d'exhaure représente une donnée importante dans le choix du type de point d'eau, dans la mesure où le problème posé par l'entretien des pompes s'avère encore souvent difficile à résoudre ; cette contrainte peut conduire, dans certains cas, à recourir aux ouvrages qui permettent l'exhaure par des moyens traditionnels (puits).

En hydraulique villageoise, les avantages déterminants du forage à l'air comprimé en zone de socle ont imposé cette méthode, seule capable de permettre la réalisation de vastes programmes de manière suffisamment rapide et économique. Ces ouvrages sont exploités par des pompes à motricité humaine, dont la maintenance, malgré l'attention qu'elle retient dorénavant, ne trouvera probablement une solution durable qu'au terme d'une évolution assez lente.

Pour cette raison, le puits, qui présente l'avantage d'être affranchi de ces problèmes d'exhaure, garde encore la faveur de nombreux États, là où il peut se substituer au forage. C'est le cas, notamment, pour le captage des niveaux d'altération en zone de socle et beaucoup plus couramment dans les terrains sédimentaires lorsque la profondeur de la nappe le permet (niveau de l'eau à moins de 60 mètres sous le sol).

En hydraulique pastorale, où l'on recherche avant tout une simplicité d'entretien en raison de l'isolement et des conditions sévères d'utilisation, le puits et l'exhaure traditionnelle gardent un avantage déterminant. Il se trouve en outre que les régions à activité pastorale dominante, situées

(*) Unité de bétail tropical, représentant 1 bovin ou 3 petits ruminants.

dans les zones où la culture sous pluie devient impossible (moins de 400 mm par an), correspondent, pour la plupart, aux latitudes des grands bassins sédimentaires. Dans ceux-ci la construction de puits est possible économiquement tant que le niveau de l'eau n'est pas trop profond.

Dans le secteur pastoral, l'alternative au puits est le forage équipé d'une motopompe, d'une éolienne ou d'une pompe solaire. L'avenir appartient probablement à l'exhaure par énergie solaire qui cumule les avantages d'un entretien réduit (mais très spécifique) et d'une énergie gratuite, et permettra de libérer le pasteur du travail considérable du puisage ; pour l'heure, si la fiabilité des capteurs progresse, semble-t-il, de jour en jour, les coûts d'investissements élevés constituent encore un frein au développement de ce type d'exhaure.

L'exhaure par motopompe, en raison des problèmes d'entretien et des charges d'exploitation, devrait être réservée à la desserte des agglomérations ou de certains aménagements nécessitant un débit élevé (ranchs, périmètres irrigués, etc.). Hors de ces cas, la seule condition qui peut imposer l'usage d'une motopompe est la profondeur trop importante du niveau de l'eau.

1.3.2. – Débits et profondeurs admissibles

Nous rappelons en annexe 2 quelques-unes des caractéristiques essentielles des principaux types d'exhaure. Il est possible de les résumer ainsi :

• Pompes à main ou à pied :

Le débit théorique d'une pompe à main (ou à pied), calculé sur la base d'une puissance de 0,08 CV fournie par un homme moyen et d'un rendement de 100 %, est de 2 200 l/h si la nappe est à 10 mètres de profondeur, 760 l/h à 30 mètres, 430 l/h à 50 mètres et 280 l/h à 80 mètres [8].

En pratique, compte tenu du rendement décroissant de la pompe avec la profondeur et des discontinuités qui interviennent dans le puisage, il est d'observation courante que le débit d'utilisation effectif d'une pompe à motricité humaine se situe habituellement aux environs de 600 l/h. Ce débit est nettement inférieur au débit instantané disponible sur un puits exploité par exhaure à la main [27]. On pallie parfois cet inconvénient en doublant le forage ou en installant deux pompes dans le même ouvrage (pompes à transmission hydraulique, expérience de la Côte d'Ivoire).

Par ailleurs, rares sont les pompes qui permettent une utilisation correcte du point d'eau lorsque le niveau dynamique est à plus de 50 mètres de profondeur. Les pompes à main ou à pied conviennent donc en zone de socle, mais peuvent être inadaptées dans certaines zones sédimentaires où la nappe est trop profonde (annexe 9).

• Puisage traditionnel à la main :

Sur la base d'observations qui ont été faites [8], le débit de puisage moyen dans un puits de 1,80 m de diamètre, avec 8 personnes prélevant l'eau en même temps, peut atteindre 3 m^3/h si la profondeur de l'eau est de 10 mètres, 2 m^3/h à 20 m, 1,5 m^3/h à 30 m et 600 l/h à 60 m.

Dans la pratique, on considère que ce mode d'exhaure reste utilisable tant que le niveau de l'eau ne dépasse pas une soixantaine de mètres de profondeur.

• Exhaure par traction animale :

Le débit d'exhaure dans un puits de 1,80 m de diamètre, avec des dalous (*) de 50 litres, peut atteindre 3,4 m^3/h avec 6 fourches (**) si le niveau de l'eau est à 40 mètres et 2,2 m^3/h à 80 mètres.

La profondeur limite d'exploitation dans des conditions acceptables est de 80 mètres, bien que l'on connaisse (notamment sur les confins mauritano-maliens) des puits pastoraux traditionnels de 100 mètres de profondeur exploités par traction animale. Pour cette raison, on évite généralement, dans la mesure du possible, de creuser des puits dans les zones où la nappe phréatique est plus profonde. Dans ces cas, heureusement assez rares, la solution de remplacement peut être un puits doublé par un forage permettant de capter une nappe plus profonde, en charge.

1.4. – CONCLUSIONS : « POINTS D'EAU UNITÉS »

En hydraulique villageoise, dans les zones de socle, l'ouvrage standard ou « unité » est donc le forage équipé de pompe à main ou à pied : un tel ouvrage, qui permet d'extraire 5 à 6 m^3/jour en 10 heures de pompage, peut alimenter 250 à 300 personnes à raison de 20 l/jour/habitant. Quand le village dépasse 250 à 300 habitants, on multiplie le nombre de points d'eau, ce qui permet une répartition meilleure, par quartiers, qu'avec un point d'eau unique de débit plus important.

Le puits standard est un ouvrage de 1,80 m de diamètre, plus rarement 1,40 m, dont l'objectif de débit devrait être également d'au moins 5 à 6 m^3/jour.

En hydraulique pastorale, dans les zones sahéliennes, l'ouvrage « unité » est le puits en 1,80 m de diamètre, débitant 2 à 5 m^3/h,

(*) Le dalou, ou délou, ou dellou, est un seau souple, de contenance variable (de 2 à 3 litres pour les seaux en chambre à air très utilisés pour le puisage à main, jusqu'à 50 litres pour les outres en peau utilisées dans le cas de la traction animale)

(**) La fourche, placée au-dessus du puits, évite à la corde de toucher les parois. 6 fourches = 6 postes de puisage simultanés.

exploitable à la main par 5 à 10 personnes puisant simultanément, ou par traction animale avec 5 ou 6 fourches.

Ces normes concernent les ouvrages construits en grandes séries. En ce qui concerne les forages exploités par motopompes, dont les besoins en nombre sont beaucoup plus limités, nous verrons qu'ils présentent des caractéristiques diverses selon leur utilisation et l'aquifère capté.

1.5. – SÉLECTION DU TYPE D'OUVRAGE

1.5.1. – Alimentation en eau des villages

L'objectif est l'ouvrage de petit débit, exploitable sans moteur, donnant une eau de bonne qualité bactériologique et suffisamment normalisé pour pouvoir être réalisé économiquement en grande série.

• En zone de socle

Dans ce type d'aquifère, on obtient les meilleurs débits dans la partie fissurée de la roche saine et plus rarement à la base des altérites (*).

Le forage à l'air comprimé, permettant de forer rapidement et économiquement dans la roche dure, s'est donc imposé largement malgré les contraintes entraînées par l'entretien des pompes. L'amélioration constante du matériel et l'utilisation de pressions d'air comprimé de plus en plus élevées permettent des vitesses d'avancement de plus en plus grandes (jusqu'à 20 m/h dans un granite moyen) ce qui permet bien souvent de réaliser un forage dans la journée.

Les niveaux statiques sont, le plus souvent, assez proches du sol (entre 10 et 20 mètres habituellement), et l'on capte en général les 30 premiers mètres de roche fissurée, ce qui conduit à réaliser des forages de 40 à 60 mètres de profondeur moyenne. Les cas d'altérites épaisses (dans les schistes en particulier), où le forage doit être poursuivi jusqu'à une centaine de mètres, demeurent heureusement assez localisés.

Selon les statistiques établies à l'issue d'un important projet en Côte d'Ivoire [24] et confirmées depuis sur d'autres projets (**), la probabilité d'obtenir un débit de 1 m^3/h pour une profondeur de forage donnée est en relation directe avec l'épaisseur d'altération, pour peu que le niveau statique ne soit pas trop profond et que la partie la plus perméable des altérites ne soit pas hors d'eau.

Le pourcentage de réussite dépend, en outre, de la nature de la roche, de la profondeur moyenne des ouvrages (qui doit être déterminée de façon à obtenir le coût minimum d'investissement) et de la stratégie qui prévaut dans la direction de la campagne :

(*) altérites : ensemble des terrains altérés qui recouvrent la roche saine.

(**) voir également récentes études CIEH.

La recherche du meilleur « service », qui amène à sélectionner, pour les premières tentatives de forage, des sites qui semblent à priori moins favorables, mais sont plus proches du village, peut se traduire par une augmentation du taux d'échec ; inversement, la recherche systématique d'un taux de succès élevé, visant à réduire le coût d'investissement, amène trop souvent à éloigner inconsidérément le point d'eau du village à alimenter, au détriment de son utilisation future.

Le puits en grand diamètre exécuté à la main, qui se prête beaucoup moins à la pénétration dans la partie fissurée et productive de la roche saine et qui est d'un coût plus élevé, surtout en roche dure, est de plus en plus délaissé au profit du forage. Le terrain le plus favorable à ce type d'ouvrage est celui des arènes granitiques épaisses de 15 à 25 m ; en roche dure, le puits n'est pratiquement plus utilisé. Par ailleurs, le puits présente l'inconvénient de ne pas garantir la qualité de l'eau, sujette à toutes les pollutions depuis la surface, ce qui, en principe, ne se produit pas sur les forages.

Le puits foré à la tarière est avantageux dans les zones de socle granito-gneissique, lorsque le niveau statique se situe entre 5 et 10 mètres de profondeur et la base des altérites entre 20 et 30 mètres. La tarière ne permet, en effet, de forer qu'en terrain tendre et jusqu'à 30 mètres de profondeur seulement, d'où l'importance du choix du site : les niveaux que l'on souhaite capter étant ceux de la base des altérites, le socle sain ne doit être ni trop profond (auquel cas le puits serait arrêté dans les altérites argileuses peu perméables), ni trop proche de la surface (auquel cas les couches perméables et mouillées risquent de faire défaut). Heureusement, la vitesse de perforation de la tarière permet d'exécuter rapidement des puits de reconnaissance (jusqu'à 3 puits d'une vingtaine de mètres dans la journée) et donc de pallier, dans une certaine mesure, ces limites étroites d'adaptation.

Ces puits, qui peuvent être faits à cadence rapide (8 à 10 puits par mois et par machine), sont busés dans un diamètre allant de 600 à 1000 mm et équipés d'une pompe à main ; une trappe dans la dalle de couverture autorise en outre le puisage à la main en cas de panne de la pompe.

• En zone sédimentaire

Les conditions de gisement des eaux souterraines sont paradoxalement moins propices à la réalisation en séries de points d'eau villageois. La profondeur de l'eau sous le sol devient ici un critère de sélection important : l'usage des pompes à main ou à pied (comme le puisage à la main) n'est guère envisageable au-delà de 50 à 60 mètres. En outre, aucune méthode de forage rapide, spécifiquement adaptée à ce type de besoins, ne s'est imposée jusqu'ici.

Le puits en grand diamètre creusé à la main est aujourd'hui encore l'ouvrage le plus répandu ; pourtant, sauf dans les secteurs où la nappe est

très proche du sol, il correspond mal aux besoins de l'hydraulique villageoise en raison de son coût, de sa lenteur de réalisation et de sa vulnérabilité à la pollution.

Les forages pratiqués dans le passé, réalisés au rotary ou au battage, ont trop souvent été adaptés plus aux possibilités de la nappe qu'aux besoins réels, ce qui avait pour résultat un surdimensionnement des ouvrages, peu compatible avec les besoins dispersés de l'hydraulique villageoise.

Pour être adapté aux besoins villageois, un forage dans les formations sédimentaires devrait être terminé en diamètre de 200 à 300 mm (8 à 12") pour permettre la mise en place d'un tubage PVC 110/125 ou 124/140 mm avec un massif de gravier suffisant.

Au battage, un forage de 70 mètres de profondeur en diamètre 250/300 mm dans le Continental Terminal peut être réalisé en une dizaine de jours. La simplicité de cette méthode, la robustesse et le coût relativement peu élevé du matériel, laissent à ce procédé tout son intérêt dans les cas de construction de forages en petite série dans les zones relativement isolées.

Le forage au rotary à la boue d'un ouvrage équivalent au précédent peut réclamer de quelques jours à une semaine tout compris si l'on utilise une boue à la bentonite, le temps de forage étant plus court mais la durée de développement plus longue. Étant donné les faibles volumes de boue mis en jeu, il apparaît préférable, à tous points de vue, d'utiliser une boue réversible, qui permet de réduire le temps de développement tout en facilitant les problèmes de transport (la quantité de produit nécessaire est beaucoup plus faible). C'est la solution qui a été généralement adoptée dans les programmes récents au Niger avec, semble-t-il, des temps et des coûts qui se rapprochent de ceux du forage villageois dans le socle. Il reste qu'en zone sahélienne, le forage rotary à la boue peut poser des problèmes pour le ravitaillement en eau.

Le forage à l'air, tout en étant affranchi de cette dernière contrainte, apparaît comme la méthode la plus rapide ; pourtant, elle n'a guère connu de développement jusqu'ici, en raison sans doute du problème posé par la tenue des parois dans les terrains peu cohérents. Elle mériterait, selon nous, d'être étudiée plus à fond en se fixant pour objectifs les caractéristiques de forage suivantes :

- profondeur de pénétration dans la nappe relativement faible (5 à 10 mètres peuvent suffire si les niveaux productifs sont situés immédiatement sous le niveau statique), compte tenu de la bonne perméabilité moyenne des terrains, des faibles fluctuations de la nappe et des faibles rabattements prévisibles,
- hauteur crépinée peu importante (2 à 5 m devraient suffire),

– massif filtrant plus réduit que dans les forages classiques, en raison des faibles débits nécessaires (de l'ordre du m^3/heure).

Le forage peut être réalisé soit en utilisant un tubage à l'avancement, soit en forant dans le trou nu jusqu'à la nappe, en posant si nécessaire un tubage provisoire et en poursuivant ensuite le forage selon une méthode qui reste à déterminer.

Le puits foré (puits en grand diamètre réalisé mécaniquement) :

Dans la mesure ou l'exhaure à main présente au plan sanitaire les inconvénients que l'on sait, cette méthode qui apparaît par ailleurs dans tous les cas plus chère et plus lourde à mettre en œuvre, ne paraît pas pouvoir concurrencer les ouvrages précédents dans le domaine de l'hydraulique villageoise.

1.5.2. – Alimentation en eau des zones pastorales

L'objectif est l'ouvrage de 2 à 5 m^3/h (rarement plus) qui s'accompagne d'une maintenance et d'un coût de fonctionnement minimale. La simplicité et la sécurité de l'exhaure manuelle ou animale sont ici un critère fondamental qui prévaut sur le coût d'investissement et les cadences de réalisation.

• En zone sédimentaire

Le puits exécuté à la main de 1,80 m de diamètre répond à ces exigences et constitue encore, dans ce domaine, l'ouvrage le plus économique au mètre cube d'eau produit. On construit actuellement des puits jusqu'à 80 mètres de profondeur, ce qui permet d'atteindre la majorité des nappes phréatiques ; cependant, au-delà de 60 mètres, la durée de construction et le prix de revient au mètre cube deviennent prohibitifs.

Le puits effectué à la benne trépan devrait permettre de réduire les délais d'exécution. Toutefois son faible diamètre en limite le débit d'exploitation par l'exhaure traditionnelle.

En ce qui concerne *les forages* ils sont effectués soit au battage (pour des profondeurs inférieures à 150 m environ) soit au rotary à la boue. Les expériences passées ont bien souvent montré l'inefficacité des moyens d'exhaure mécanisés : éoliennes, pompes à manège, pompes à moteur. Les pompes solaires constituent un progrès très important ; elles permettront certainement, dans un avenir assez proche, de réaliser des ouvrages suffisamment économiques pour relayer les puits, notamment dans les secteurs où la nappe est relativement profonde. Actuellement, le forage ne s'impose à la place du puits que là où le niveau piézométrique dépasse 70 à 80 mètres de profondeur.

Lorsque la nappe phréatique est trop profonde, *le forage doublé d'un contre-puits (ou puits-forage)* peut constituer une solution de rechange pour capter une nappe sous-jacente en charge, tout en conservant les avantages de l'exhaure traditionnelle. Ce type d'ouvrage est cependant encore assez peu répandu, en raison de son coût élevé (qui cumule celui du forage et celui du puits), et réclame des conditions hydrogéologiques particulières.

• En zone de socle

La possibilité d'admettre, pour les points d'eau pastoraux des coûts d'investissement élevés devrait permettre dans bien des cas :

- soit d'abaisser à 10 ou même 5 m^3/jour les débits unitaires recherchés, que peuvent alors fournir des puits à main (si possible limités aux zones d'arènes),
- soit de retenir la solution du « puits-forage » qui permet d'exploiter par exhaure traditionnelle, des forages réalisés au marteau fond de trou et captant des niveaux profonds plus productifs (fractures du socle en zone de faible épaisseur d'altération).

Bien qu'onéreux, ces ouvrages sont souvent préférables, en hydraulique pastorale, à des aménagements conçus à partir des eaux de surface, surtout si l'on veut garantir la pérennité des points d'eau en fin de saison sèche.

1.5.3. – Alimentation en eau des agglomérations et des périmètres irrigués.

Le point d'eau standard est le *forage équipé d'une motopompe.* On trouvera, dans les pages suivantes, la description de quelques types d'ouvrages construits couramment en zone cristalline et en zone sédimentaire.

L'obtention de débits minima de 5 à 10 m^3/h, parfois difficile en zone de socle, nécessite le plus souvent une prospection préalable par géophysique.

1.6. – DONNÉES SUR L'ÉQUIPEMENT EN POINTS D'EAU DANS LES ÉTATS MEMBRES DU CIEH

1.6.1. – Estimation des besoins

Selon les statistiques de l'OMS établies en 1976, 80 % de la population rurale d'Afrique ne disposait pas, à cette date, d'eau en quantité suffisante.

En hydraulique villageoise, une première estimation des besoins minimaux en points d'eau modernes, puits ou forages, peut être obtenue en divisant le chiffre de la population rurale de l'ensemble des pays par le nombre d'habitants que peut desservir un point d'eau « unité » : 250 à 300 personnes à raison de 20 l/jour/habitant. Pour environ 37 millions d'habitants (annexe 1.1) on obtient ainsi 125 à 150 000 points d'eau, ce qui est une valeur par excès puisqu'elle revient à considérer que toute la population rurale habite dans des villages.

En dépit de l'imperfection des chiffres que nous possédons, il est possible de tenter une deuxième approche en fonction du nombre des villages recensés dans les 12 pays membres (*) (annexe 1.1). En extrapolant ces données, il y aurait environ 70 000 villages, dont les deux tiers probablement, ont moins de 500 habitants. En supposant, en première approximation, qu'il faille un point d'eau par village de moins de 500 habitants, et deux au-delà, on arrive à un total de 93 000 points d'eau.

La comparaison des deux chiffres précédents permet d'estimer finalement à environ 100 000 le nombre de points d'eau modernes nécessaires, pour assurer une alimentation minimale de 20 l/jour/habitant. De ce chiffre, il convient de retrancher le nombre de points d'eau déjà créés, soit environ 30 000 à la fin de 1980. Il resterait donc, au début de 1981, environ 70 000 points d'eau villageois à réaliser, et cela sans tenir compte du renouvellement des ouvrages les plus anciens ni de l'accroissement de la population dans les prochaines années. (annexe 1.4).

En hydraulique pastorale, il est impossible de se fonder sur une estimation globale en raison de l'utilisation importante (mais difficile à chiffrer) qui est faite des eaux de surface et de la nécessité de prendre en compte les équipements existants. Seule l'addition du nombre des ouvrages programmés dans chaque État permettrait d'avoir une estimation valable. Bornons-nous à indiquer que le cheptel des 12 pays s'élève à 39 millions d'UBT et que si l'on voulait en alimenter le tiers ou la moitié à partir des eaux souterraines il faudrait de 10 à 20 000 points d'eau standards (de 40 m^3/jour).

Enfin, le nombre des points d'eau à créer pour alimenter les quelque 500 *centres secondaires* (annexe 1.1) dépend du taux d'équipement actuel, et des consommations unitaires, variables d'un cas à l'autre ; on peut estimer à plus d'un millier de points d'eau les besoins non encore satisfaits dans ce domaine.

(*) Douze pays membres du CIEH : Bénin, Cameroun, Congo, Côte d'Ivoire, Gabon, Haute-Volta, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad, Togo.

1.6.2. – Objectifs de création de points d'eau d'ici 1990

En ce qui concerne les points d'eau villageois, les chiffres établis par les États au début de la Décennie Internationale de l'Approvisionnement en Eau Potable et de l'Assainissement sont présentés en annexe 1.4. En extrapolant les chiffres connus, aux 12 pays, il y aurait eu environ 100 000 points d'eau villageois programmés, ce qui correspond, notons-le, à l'estimation des besoins faite précédemment. Au début de 1981, il en resterait 70 000 à créer, sans tenir compte du taux de renouvellement des ouvrages.

La proportion respective de puits et de forages dans ce total peut être estimée d'après la part qui est faite à chaque type d'ouvrage dans les programmes actuels (annexe 1.2) : celle-ci s'élève à 80 % pour les forages et 20 % pour les puits.

Nous ne connaissons pas les prévisions établies pour les besoins pastoraux ni pour les centres secondaires ; ces prévisions sont sans doute très variables selon les pays.

1.6.3. – Capacité actuelle de réalisation observée dans les douze États

Le tableau de l'annexe 1.6 donne une idée du parc de machines en service dans les États en 1981. On comptait à cette date :

Nombre de machines	Organismes publics ou parapublics	Sociétés privées
Sondeuses MFT (*) ou mixtes	38	40
Machines pour puits forés	11	0
Sondeuses rotary	27	16
Sondeuses au battage	5	8
Total des ateliers	81	64

Sur la base d'une cadence d'exécution de 100 forages/an/machine pour les sondeuses marteau fond de trou ou mixtes et de 80 pour les machines de constructions de puits forés, ce parc équivaudrait à une capacité de réalisation d'environ 5000 points d'eau villageois par les organismes publics et de 4000 par les sociétés privées. En réalité, comme on ne connaît pas l'état des machines, il paraît plus vraisemblable d'estimer la capacité globale de ce parc à environ 7000 points d'eau villageois par an. Ce chiffre est à comparer au rythme de construction prévu jusqu'en 1990 : environ 70 000 points d'eau villageois à réaliser en 9 ans, dont 50 à 60 000 forages et puits forés.

(*) MFT = marteau fond de trou.

CHAPITRE 2

CARACTÉRISTIQUES A DONNER AUX OUVRAGES

2.1. – FORAGE VILLAGEOIS RÉALISÉ AU MARTEAU FOND DE TROU DANS LE SOCLE

Nous décrivons ici l'ouvrage standard destiné à être équipé d'une pompe à main ou à pied et pouvant être exploité à raison de 5 à 6m^3/jour en moyenne. Il représente en nombre *la très grande majorité des besoins.* Les caractéristiques essentielles concernant cet ouvrage peuvent être résumées de la façon suivante :

- Nature de la roche : roche dure sous un recouvrement d'altérites généralement inférieur à 40 mètres, exceptionnellement supérieur à 60 m.
- Niveau statique à moins de 20 mètres de profondeur, sauf exception.
- Profondeur du forage : de 40 à 60 mètres en moyenne (maximum 100 mètres).
- Mode d'exécution : au rotary à l'air ou au marteau fond de trou, parfois au rotary à la boue, dans les altérites ; au marteau fond de trou dans la roche dure (compresseur de 20 m^3/mn, de préférence à 17,5 bars).
- *Diamètre de foration : 216 à 222 mm (8 1/2" à 8 3/4") dans les altérites, 152 à 165 mm (6" à 6 1/2") dans la roche dure.*
- Tubage : PVC 110/125 mm (et plus rarement 124/140 mm).
- Exploitation : pompe à main ou à pied.

2.1.1. – Remarques sur la longévité des ouvrages

Les cadences d'exécution toujours plus élevées que permet le matériel actuel ne doivent pas faire perdre de vue les exigences de qualité d'ouvrages qui devraient être conçus pour durer 20 ans au minimum (période minimale d'amortissement généralement retenue). Les solutions économiques (souvent proposées en variantes dans les réponses aux appels d'offres, par exemple) peuvent se révéler, à long terme, n'être qu'un mauvais choix. Le prix de revient de nouveaux ouvrages, réalisés au coup par coup en remplacement d'anciens forages défaillants, peut être deux fois plus élevé que celui obtenu dans des programmes importants et concentrés. Il appartient donc au maître d'œuvre de fixer les normes de

qualité recherchées, sur le plan de l'équipement notamment. Il revient, par contre, à l'entreprise de proposer des modalités d'exécution adaptées à ces normes.

2.1.2. – Choix du tubage (annexe 5)

Le tubage en PVC s'impose pour des raisons de coût (importance des économies sur le transport et la mise en place) et de résistance à la corrosion (les eaux du socle étant généralement très acides).

L'usage de colonnes vissées est préférable pour plusieurs raisons :

- conçus spécialement pour le forage, ces tubes en PVC rigide (sans plastifiant) résistent mieux aux pressions externes que les tubes classiques de canalisations, conçus pour des pressions internes, et donnent des colonnes plus rectilignes,
- les colonnes qui nont pu, pour une raison ou une autre, être descendues à la cote voulue, peuvent être récupérées. De la sorte, le foreur n'est pas tenté de mettre en place « en force » une colonne qui serait difficile à descendre.

Le filetage de 5 à 6 filets par pouce est préférable à celui à 11 filets par pouce, qui est plus fragile. Il est également conseillé d'utiliser le filetage à mi-épaisseur (sans manchon) qui facilite la mise en place du gravillon dans l'espace annulaire.

En ce qui concerne les diamètres, on choisit, en général, un diamètre intérieur minimum de 110 mm (éventuellement 105 quand il existe). L'expérience montre en effet que, par suite des déformations toujours à craindre (écrasement, courbure), un diamètre intérieur de 100 mm peut être insuffisant pour introduire une pompe électrique immergée de 4" nominal dont le diamètre habituel est de 96 mm. L'usage de la pompe immergée est nécessaire pour réaliser les essais de débit ; il peut également être décidé a posteriori, par exemple pour l'exploitation d'un forage très productif. Notons enfin que l'adoption d'un tubage de 124/140 mm peut permettre la pose de 2 pompes à transmission hydraulique dans le même forage, si son débit l'autorise.

Les crépines sont généralement à fentes de 1 mm d'ouverture. On doit préférer des crépines fabriquées en usine au façonnage sur place à la scie : par ce moyen, en effet, on obtient rarement la même finesse d'ouverture et les irrégularités du sciage peuvent être une cause de fragilité.

2.1.3. – Isolation de l'espace annulaire à la base des altérites

C'est certainement le point le plus vulnérable des forages dans le socle : si l'étanchéité à ce niveau n'est pas parfaitement réalisée, les

matériaux fins issus des horizons d'altération envahissent peu à peu le forage sous l'effet d'une pression différentielle qui peut atteindre une dizaine de mètres d'eau, ou plus. Ces matériaux colmatent et comblent peu à peu le forage, et accélèrent l'usure de la pompe.

L'étanchéité peut être obtenue soit par gravillonnage de l'espace annulaire sur une grande partie de sa hauteur avec du gravier filtre, soit par obturation de cet espace au toit de la roche dure, au moyen d'un packer éventuellement.

En règle générale (sauf dans les cas assez exceptionnels où les altérites sont dénoyées), il est nécessaire de tuber le forage au droit des altérites avant de poursuivre la perforation dans le socle. Il en résulte trois modes d'équipement possibles :

2.1.4. – Modes d'équipement usuels

• *Schéma N° 1 : Forage tubé intégralement et gravillonné (Fig. 2a)*

Dans ce cas, la procédure est la suivante :

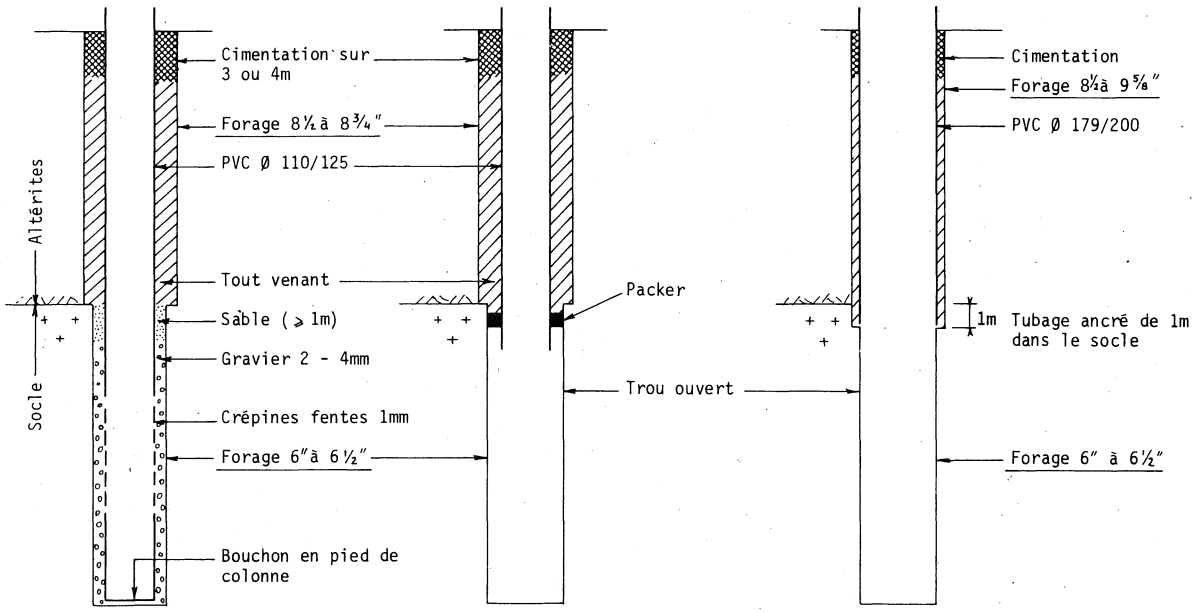
- forage des altérites au rotary à l'air en 210 ou 220 mm (8 1/2" ou 8 3/4"), éventuellement avec usage de mousse, parfois à la boue, ou au marteau fond de trou avec tubage à l'avancement,
- pose d'un tubage provisoire, en général de 7" nominal, jusqu'au toit de la roche dure (obligatoire si les altérites ne sont pas dénoyées) ou bien maintien, à ce niveau, du tubage à l'avancement (le plus souvent de 6" seulement),
- poursuite du forage dans le socle au marteau fond de trou en diamètre de 150 à 165 mm (6" à 6 1/2"),
- pose, sur toute la hauteur du forage, d'un tubage PVC 110/125 mm fermé à sa base, comportant 6 à 12 mètres de crépines au droit des horizons productifs,
- mise en place, dans l'espace annulaire, de gravier de quartz roulé de 2 à 4 mm (ou même 1-2 mm, avec des crépines à fentes de 0,5 mm) jusqu'à 3 mètres au-dessus de la partie supérieure des crépines, puis d'un bouchon de sable de 1 à 2 mètres et comblement du reste avec du tout-venant. L'espace annulaire est enfin cimenté en tête sur 3 à 6 mètres.

Remarques :

a) La qualité du gravillonnage, qui conditionne celle de l'étanchéité à la base des altérites, impose un espace annulaire suffisant. On vérifiera toujours avec soin la compatibilité entre le diamètre intérieur du tubage de travail, le diamètre du forage dans le socle (en vérifiant l'usure des

FORAGES « VILLAGEOIS » DANS LE SOCLE CRISTALLIN
COUPES TYPES D'OUVRAGES
RÉALISÉS AU ROTARY/MARTEAU FOND DE TROU

Fig. 2



a) Tubage intégral
Méthode recommandée

b) Tubage des altérites seules avec packer. La sécurité de l'isolation n'est pas absolue

c) Tubage des altérites sans packer.

taillants), le diamètre extérieur des tubes PVC et la granulométrie du gravier (par exemple, diamètres respectivement de 165, 160 et 125 mm et gravier 2-4 mm).

b) Si la dimension de l'espace annulaire le permet, à défaut de gravier de quartz roulé, on peut utiliser du gravier concassé de 2-5 mm ; les pertes de charges introduites par ce procédé sont négligeables pour les débits en jeu, comme l'ont montré les essais réalisés par le CIEH. La mise en place est par contre plus délicate et doit être faite avec beaucoup de soins. Notons que le gravier à fort pourcentage d'éléments latéritiques est à prohiber dans tous les cas (l'oxyde de fer est peu à peu dissous en milieu réducteur).

• *Schéma N° 2 : Utilisation d'un packer (Fig. 2b)*

- forage et pose de tubage provisoire, comme précédemment,
- pose d'un tubage PVC pénétrant de quelques mètres dans le socle, l'espace annulaire étant obturé à la base par un packer,
- mise en place d'un mètre de gravier ou de sable dans l'espace annulaire au-dessus du packer, puis comblement au-dessus avec du tout-venant.

Remarques :

a) Plusieurs sortes de packer peuvent être utilisées : packer souple (type ombrelle), qui convient pour les espaces annulaires réduits ; packer épais en caoutchouc moulé, utilisé de préférence au droit d'une réduction de diamètre (problème de mise en place) ; ou bien simple épaississement du tubage obtenu soit avec un manchon de raccordement, soit avec un morceau de PVC collé.

b) Le packer doit impérativement être mis en place au droit d'un niveau très consolidé et non fracturé.

c) La cimentation en pied de colonne au-dessus du packer est à proscrire, car sa bonne exécution est illusoire compte tenu des diamètres et des cadences d'exécution.

d) Le forage est généralement laissé nu sous le packer. Cependant, lorsque le niveau de l'eau en pompage risque de s'abaisser en-dessous de celui-ci (ou de l'élément de tubage qui le supporte) ou si la tenue de la roche est incertaine, le forage peut être tubé sous le packer.

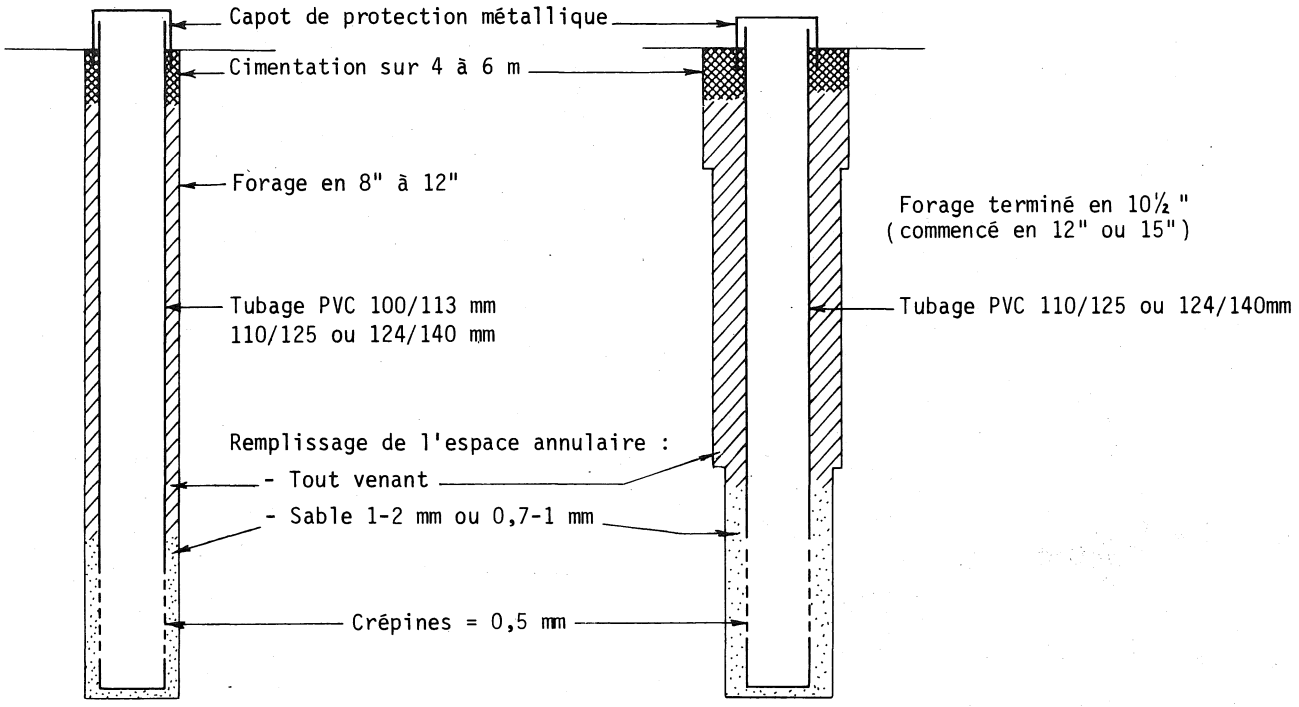
e) Si l'on désire capter également la base des altérites, on met en place quelques mètres de crépines au-dessus du packer et on remplit l'espace annulaire avec du gravier comme dans le schéma n° 1

• *Schéma N° 3 : Pose d'un tubage PVC à la place du tubage provisoire (Fig. 2c).*

- forage des altérites poursuivi dans la roche saine sur 1 ou 2 mètres, en diamètre 250 à 300 mm (9 5/8" à 12 1/4"),

FORAGES « VILLAGEOIS » EN TERRAINS SÉDIMENTAIRES

Fig. 3



a) Coupe-type de forage réalisé au rotary (à l'air ou à la boue)

b) Coupe-type de forage réalisé au battage

- pose d'un tubage PVC 179/200 mm, ancré solidement dans la roche dure,
- poursuite du forage au marteau fond de trou dans le socle à l'abri du tubage PVC qui joue le rôle de tubage provisoire,
- si la tenue de la roche est bonne et si le niveau de l'eau en pompage ne risque pas de s'abaisser en-dessous de la base du tubage PVC, le forage est laissé tel quel après comblement de l'espace annulaire et cimentation en tête. Sinon, le forage est tubé intégralement avec du tube PVC 110/125 mm ; le tubage 179/200 est en général laissé en place et perdu.

Remarques :

a) Avec ce procédé, le captage de la base des altérites n'est pas possible.

b) Le tubage 179/200 qui, dans la plupart des cas, doit constituer le seul tubage en place dans le forage, doit être de bonne qualité (épaisseur et rigidité). La perte de ce tubage dans les forages négatifs ou quand on est obligé de le doubler peut cependant être compensée par des économies de temps (suppression du tubage provisoire).

• *Comparaison des modes d'équipement ci-dessus :*

Le schéma N° 1, universel, est celui qui présente le plus de garanties (sous réserve que la granulomètrie du gravier soit appropriée à la dimension de l'espace annulaire).

Le schéma N° 2 permet de réaliser une économie de tubage mais présente des risques non négligeables : inefficacité du packer si la section du trou est irrégulière ou si les parois sont instables : risque de destruction lors du développement, en particulier avec les packers souples.

Le schéma N° 3 assure un gain de temps important lors de la réalisation mais présente des inconvénients majeurs : impossibilité de capter les altérites ; étanchéité à la base des altérites difficile à garantir si la régularité du trou n'est pas parfaite, le tubage étant simplement posé au-dessus du changement de diamètre.

2.2. – FORAGE VILLAGEOIS EN TERRAINS SÉDIMENTAIRES (Fig. 3)

Ce type d'ouvrage est encore peu répandu, l'alimentation en eau des villages dans la zone sédimentaire ayant été, jusqu'à ces dernières années, basée surtout sur les puits. Néanmoins, il semble qu'un changement d'attitude se soit produit dans ce domaine si l'on en juge par le cas du Niger où la construction de forages villageois dans la zone sédimentaire figure parmi les programmes récents. L'expérience semble montrer que les cadences de réalisation, sans atteindre celles obtenues dans le socle, peuvent être élevées.

On peut résumer comme suit les éléments concernant ce type d'ouvrage :

- Nature de la roche : terrain tendre, consolidé ou non.
- Nappe à moins de 50 mètres de profondeur.
- Profondeur du forage : 40 à 60 mètres en moyenne.
- Diamètre de perforation : 8" à 12" (200 à 300 mm).
- Tubage : PVC 100/113, 110/125 ou 124/140 mm.
- Massif filtrant obligatoire et crépines à fentes fines de l'ordre de 0,5 mm.
- Exploitation par pompe à main ou à pied.
- Méthode de forage : rotary à l'air avec tubage à l'avancement, rotary à la boue ; possibilité d'utiliser éventuellement le battage.

Remarques :

Le diamètre du forage est conditionné étroitement par celui du tubage car il est impératif de garder un espace annulaire suffisant pour le massif filtrant. Les venues de sable constituent, en effet, l'écueil majeur à craindre dans des formations comme celle du Continental Terminal, par exemple. A titre purement indicatif, car seule l'expérience dictera les normes à adopter, un massif filtrant d'au moins 40 mm d'épaisseur pourra souvent être nécessaire, et en outre la colonne du tubage devra être parfaitement rectiligne et munie de centreurs au niveau des crépines.

Les diamètres minima de perforation, dans ces conditions, pourraient être :

- 200 mm (8") avec un tubage PVC 100/113 mm,
- 210 mm (8 1/4") avec un tubage PVC 110/125 mm,
- 230 mm (9") avec un tubage PVC 124/140 mm.

Etant donné la granulométrie très fine des terrains qui peuvent être rencontrés, on pourrait être amené à utiliser des crépines à fentes fines (jusqu'à 0,5 mm environ), et pour le massif filtrant un sable très propre de 1-2 mm ou même de 0,5-1 mm. On n'a pas à craindre de pertes de charge étant donné le faible débit d'exploitation.

Le développement ne pourra pas toujours être réalisé à l'airlift (profondeur de la nappe trop importante et faible hauteur aquifère captée) et pourra nécessiter l'emploi d'une soupape.

2.3. – PUITS RÉALISÉ A LA MAIN

Nous ne ferons que rappeler brièvement les caractéristiques de ce type d'ouvrage, déjà abondamment décrit dans d'autres traités [23] :

• Nature de la roche : terrain tendre (formations sédimentaires et niveaux d'altération du socle). Le fonçage en roche dure est possible (avec explosifs) mais très onéreux.

• Niveau statique : jusqu'à 50 mètres environ pour les puits à usage villageois et 70 à 80 mètres pour les puits pastoraux.

• Profondeur : en moyenne 20 mètres dans les régions du socle et 40 mètres dans les formations sédimentaires ; dans ces dernières, la profondeur du puits peut aller jusqu'à 80 mètres.

• Diamètre : le puits de 1,80 m est l'ouvrage le plus courant (cuvelage ⌀ 1,80/2 m ; captage ⌀ 1,40/1,60 m ou éventuellement 1,20/1,40 m). Le puits de 1,40 m se rencontre dans certains secteurs où l'aquifère est peu productif et où la fréquentation des puits est faible (cuvelage ⌀ 1,40/1,60 m ; captage ⌀ 1/1,20 m).

• Conditions de réception :

– en zone de socle 1 m^3/h ou 10 mètres de hauteur d'eau sous le niveau statique en fin de saison sèche.

– dans les grandes formations sédimentaires : 5 m^3/h.

2.4. – PUITS FORÉ

2.4.1. – A la tarière bucket

Cet appareil est adapté à la perforation de roches tendres, sans passages indurés (tels que blocs de dolérites, grès durs, etc.), mais possédant une tenue suffisante (les niveaux très fluents sont difficiles à passer).

Le niveau statique doit être à moins de 20 mètres de profondeur afin d'avoir, en fin d'ouvrage, une hauteur d'eau suffisante dans le puits.

Le domaine d'élection de cette méthode est celui d'altérites dont l'épaisseur totale au-dessus du socle est comprise entre 20 et 30 mètres, ou de grès tendres (là où la nappe est très proche du sol).

Les caractéristiques des ouvrages sont les suivantes :

• Profondeur : maximum 29 mètres.

• Diamètre maximum : puits 1,50 m
buses 1/1,20 m.

• Equipement : buses emboîtées, en béton armé, avec massif de gravier dans l'espace annulaire (Fig. 22)

• Exhaure : puisage à la main possible (2 à 3 cordes soit, en principe, 500 à 750 l/h) mais peu efficace en raison de l'étroitesse du puits.

En général, on équipe ces ouvrages de pompes à main (il est possible d'y installer 2 pompes tout en laissant un regard de 0,30 × 0,60 m pour un puisage de secours).

Les principales remarques à faire concernant cette méthode sont :

- Méthode très rapide.
- Reconnaissance peu coûteuse.
- Domaine géologique d'application très restreint.
- Handicap par rapport au forage : grosse sujétion du transport des buses.

2.4.2. – A la benne-trépan

Cette méthode convient pour forer dans des roches tendres pouvant comporter des passages durs (qui seront forés au trépan).

Le niveau statique ne doit pas être trop profond : moins d'une quarantaine de mètres, du moins tant qu'une méthode efficace de tubage permettant des forages plus profonds n'aura pas été mise au point.

Les grandes inconnues de cette méthode sont le soutènement des parois pendant le forage, la mise en place du cuvelage et surtout celle de la colonne de captage.

Les ouvrages peuvent avoir les caractéristiques suivantes :

- Profondeur : maximum 50 mètres, compte tenu de l'expérience actuelle.
- Diamètre de forage 1,50 à 1,70 m.
- Cuvelage : buses en béton armé, de 1 ou 1,20 m de diamètre intérieur, ancrées au terrain par cimentations de l'espace annulaire (*).
- Captage : buses en béton armé (⌀ 0,80/1 m) havées, ou trou nu si les roches sont consolidées.
- Exhaure : en usage pastoral, le diamètre intérieur du puits ne permet pas une exhaure efficace par traction animale : il ne paraît possible de descendre qu'un dalou à la fois (ce qui permet d'extraire environ 500 l/h) ou au grand maximum deux (débit 1 m^3/h). En usage villageois, le puisage peut être fait avec 2 ou 3 cordes (soit avec un débit de 500 à 700 l/h).

(*) Il y aurait lieu d'étudier le remplacement de cette colonne par des buses en PRV (Polyvinyle renforcé avec fibres de verre) ou en bois comprimé (type OBO), ou par l'emploi de la technique du gunitage (béton projeté sur grillage métallique)

Remarques :

Ce type d'atelier est lourd et moins rapide que le précédent.

Le problème du tubage pendant le forage n'est pas encore résolu.

Le transport des buses constitue une contrainte importante si l'on utilise des buses en béton.

2.5. – FORAGE AVEC MOTOPOMPE DANS LE SOCLE

C'est le type d'ouvrage couramment utilisé pour l'alimentation en eau de centres secondaires au moyen d'un réseau d'adduction.

L'aquifère capté est en général la partie fissurée du socle, plus rarement l'altération sablo-argileuse. Le débit recherché est d'au moins 5 m^3/h par forage ; dans des cas assez rares on peut obtenir jusqu'à 20 m^3/h, et, exceptionnellement, des débits plus importants.

Caractéristiques :

- Profondeur : inférieure à 100 m, sauf exception,
  40 à 80 m en moyenne.
- Diamètre : tubage PVC 150/165 mm pour les forages destinés à recevoir une pompe de 4" (pouvant débiter jusqu'à 12 m^3/h sous une HMT (*) de 120 m) ; tubage PVC 179/200 mm pour les forages destinés à recevoir une pompe de 6" (pouvant débiter jusqu'à 50 m^3/h sous une HMT de 80 m).
- Exploitation par pompe immergée ou pompe à axe vertical.
- Matériel : le forage est réalisé au moyen d'un atelier rotary-marteau fond de trou du type de celui qui est décrit au chapitre suivant. La puissance de traction doit être suffisante pour permettre d'extraire une colonne de tubage provisoire de 7" à 9 5/8" d'environ 50 m de longueur. Il apparaît indispensable de disposer d'une pompe à boue.

Mode de réalisation

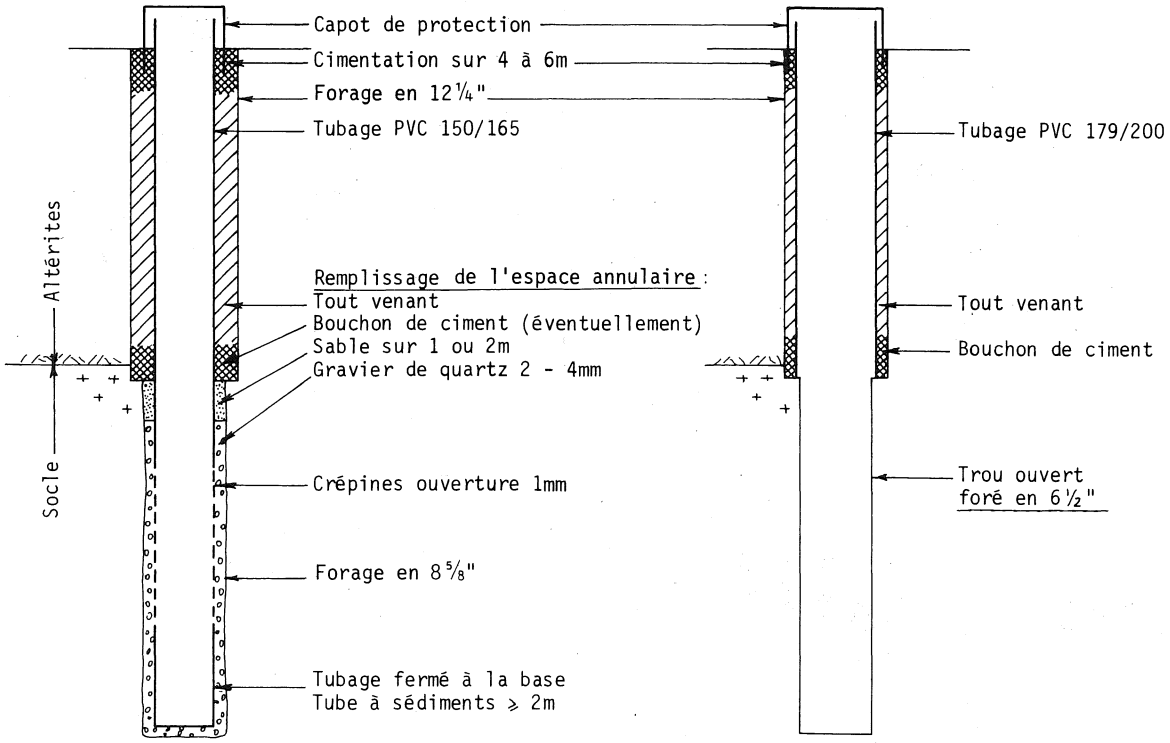
La chambre de pompage doit avoir les diamètres indiqués ci-dessus. En-dessous, le forage peut être tubé en un diamètre égal ou inférieur, ou être laissé tel quel si la tenue de la roche est bonne. Il en résulte plusieurs solutions possibles. La solution la plus sûre, aussi bien pour la longévité du forage que pour se prémunir contre les conséquences d'une baisse du niveau dynamique, est cependant de tuber le forage sur toute sa hauteur. Nous décrivons ici deux cas-types :

- *Forage captant la partie fissurée du socle, tubé en 150/165 mm sur toute sa hauteur (Fig. 4a)*

(*) H.M.T. : hauteur manométrique totale.

FORAGES AVEC MOTOPOMPE DANS LE SOCLE CRISTALLIN

Fig. 4



a) Forage captant les niveaux fissurés du socle tubé sur toute sa hauteur.

b) Forage captant les niveaux fissurés du socle tubé seulement au droit des altérites.

- Perforation en 310 mm (12 1/4") dans les altérites (au rotary à l'air ou à la boue).
- Pose d'un tubage provisoire de 245 mm (9 5/8").
- Perforation au marteau fond de trou en 220 mm (8 5/8") (*) dans le socle (ou perforation en 6" et réalésage en 8 5/8").
- Pose d'un tubage PVC 150/165 mm fermé à sa partie inférieure, crépiné au droit des horizons productifs (fentes de 1 mm).
- Remplissage de l'espace annulaire : gravier 2-4 mm (ou plus si possible) jusqu'à environ 3 m au-dessus des crépines, puis 1 à 2 m de sable, éventuellement, un bouchon de ciment sur 2 à 5 m, puis du tout-venant.
- Cimentation en tête sur 4 à 6 m.
- Pose d'un capot métallique de protection en surface.
- Développement à l'airlift jusquà obtention d'eau claire.
- Essai à la pompe immergée : plusieurs paliers de débit croissants de courte durée, suivis d'un pompage à débit constant de 24 heures au moins.

• *Forage captant la partie fissurée du socle, tubé seulement au droit des altérites (Fig. 4b)*

Si la tenue de la roche est bonne, la partie inférieure du forage peut être laissée en trou ouvert. Dans ce cas, la base du tubage doit être à au moins 5 m au-dessous de la cote de la pompe. On procède de la manière suivante :

- Perforation en 310 mm (12 1/4") dans les altérites, prolongée sur les premiers mètres de la roche consolidée (afin de s'assurer qu'il ne sagit pas d'un bloc isolé ou « faux socle »).
- Pose d'une colonne de tubage PVC 179/200 mm : cette colonne est perdue si le forage n'est pas exploitable et constitue le tubage définitif dans le cas contraire.
- Cimentation de l'espace annulaire en pied de colonne sur environ 5 m de hauteur et attente de prise (12 h si l'on utilise un accélérateur).
- Comblement du reste de l'espace annulaire avec du tout-venant.
- Poursuite du forage au marteau fond de trou en 165 mm (6 1/2") dans le socle.
- Cimentation en tête sur 4 à 6 m.
- Développement et essai comme précédemment.

(*) Diamètre minimum 200 mm, sous réserve d'un bon choix de gravier.

Remarques :

La pose du premier bouchon de ciment (à la base des altérites peut, dans les deux cas précédents, être effectuée avec un tube plongeur, si l'on s'arrange pour qu'il soit dans la partie du forage forée en 12 1/4" : l'espace annulaire 310-165 mm (12 1/4"-6 1/2") ou 310-200 mm (12 1/4"-8") est alors suffisant.

On peut utiliser un packer pour isoler l'espace annulaire à la base des altérites. Au dessus de celui-ci on met en place 1 ou 2 m de sable puis un bouchon de ciment, afin de consolider l'ensemble.

2.6. – FORAGES « PROFONDS » DANS LES TERRAINS SÉDIMENTAIRES

Nous rassemblons sous ce terme tous les forages, réalisés dans des terrains sédimentaires, dont le débit (et éventuellement la profondeur du niveau dynamique) justifient l'exploitation par pompe à moteur. Etant donné la profondeur des aquifères couramment captés en Afrique de l'Ouest, les forages y ont en général entre 100 et 400 m de profondeur mais, dans certains cas, ils peuvent être beaucoup plus profonds. Ils sont réalisés au rotary à la boue (ou au battage si leur profondeur ne dépasse pas 150 m environ). Leur réalisation exige une technique plus élaborée que dans les cas précédents, notamment pour la localisation et la mise en exploitation des couches productrices. Compte tenu des profondeurs et des débits, on utilise des tubages et des crépines métalliques (parfois en métal anti-corrosion).

Les caractéristiques de ces ouvrages sont très variables en fonction de la profondeur et des débits captés. Ces derniers sont en général compris entre 20 et 200 m^3/h mais peuvent aller jusquà 500 m^3/h. Le diamètre de la chambre de pompage est en principe égal à celui de la pompe plus quelques centimètres de chaque côté (voir correspondance diamètre/débit des pompes en annexes 2.4 et 2.5). Le diamètre de la colonne de captage est calculé de façon à limiter les pertes de charge, compte tenu de la longueur de la colonne [14]. Le diamètre de perforation doit être suffisant, quant à lui, pour permettre la mise en place d'un massif filtrant d'environ 70 mm autour des crépines, si l'on capte un aquifère sableux. Nous décrivons ci-dessous les caractéristiques de quelques ouvrages représentatifs réalisés au Sénégal.

• **Forage dans le Continental Terminal du Sénégal (Fig. 5a)**

– Profondeur : environ 100 à 150 m.

– Débit exploitable : variable de 20 à 200 m^3/h.

– Diamètres : en fonction des débits, on doit prévoir, en ordre de grandeur, les diamètres minima suivants :

Débit (m^3/h)	Diamètre int. de la chambre de pompage (mm)	Diamètre int. de la colonne de captage (mm)	Diamètre minimum du forage au niveau des crépines (mm)
30-50	170	120	250
50-100	220	170	310
100-150	280	220	380

– Tubages : tubages métalliques (selon normes API).

– Crépines : habituellement crépines à nervures repoussées, ouverture 1 mm.

– Massif filtrant : sable roulé basaltique 1-2 mm (parfois 0,7-1 mm).

– Réalisation : rotary à la boue (durée 10 à 15 jours) ou battage (durée 20 à 30 jours).

Au rotary, on peut forer en général tout le forage en un seul diamètre, ce qui permet de mettre en place une colonne d'un seul tenant.

– Développement : si le forage a été fait à la boue, on doit commencer par le nettoyer à l'hexamétaphosphate ; le développement proprement dit se fait d'abord à l'airlift, puis au moyen d'une pompe à axe vertical (surpompage et pompage alternatif). L'ensemble de l'opération peut durer une dizaine de jours.

– Essai de sable : les conditions de réception imposent une tache de sable (au fond d'un seau rempli à la sortie du tube d'exhaure) n'excédant pas 4 mm, 15 minutes après le démarrage de la pompe, et l'absence totale de sable après 3/4 d'heure de pompage.

• **Forage dans le Maestrichtien (Fig. 5b)**

– Profondeur : 200 à 300 m en moyenne.

– Débit exploitable : 150 à 200 m^3/h.

– Diamètres usuels :

chambre de pompage : (diamètre intérieur)	320 mm
colonne de captage : (diamètre intérieur)	200 mm
forage au niveau des crépines :	380 mm

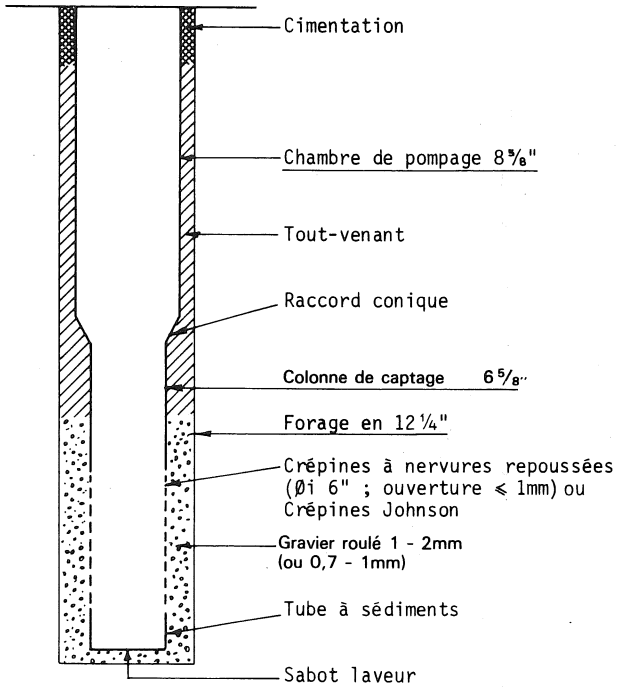
– Tubage métallique API.

– Crépines et massif filtrant : comme dans le cas précédent.

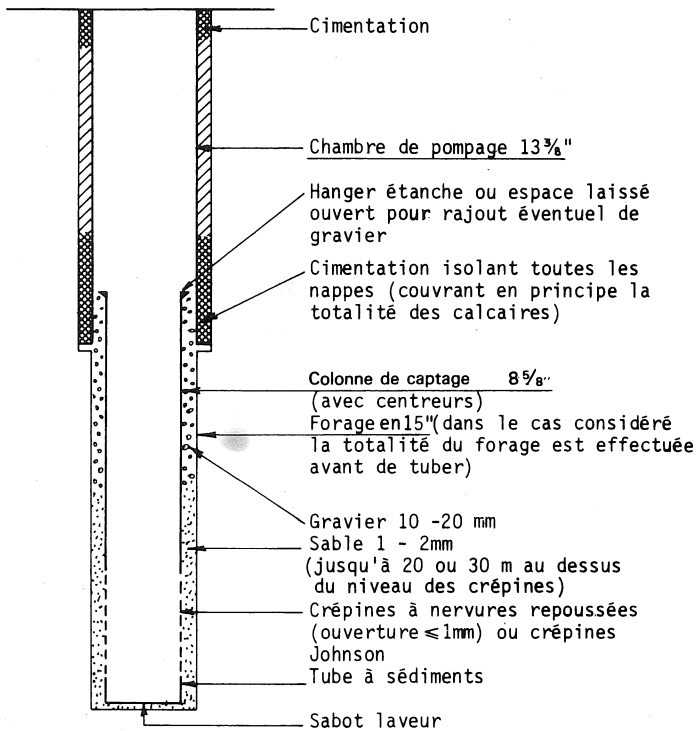
– Réalisation : au rotary à la boue (durée 1 mois environ). Le forage est réalisé généralement en 450 mm (17 1/2") jusqu'au bas de la chambre de pompage (100 m de profondeur environ), puis en 380 mm (15")

EXEMPLES DE FORAGES « PROFONDS » EN TERRAINS SÉDIMENTAIRES

Fig. 5



a) Forage de 50 à 100 m³/h dans le Continental Terminal (nappe phréatique)



b) Forage d'environ 150 m³/h dans le Maestrichtien

jusqu'au fond. On peut parfois forer jusqu'au fond sans tuber, ce qui permet théoriquement de mettre en place une colonne d'un seul tenant. Ceci est à proscrire, car il n'est pas possible de poser ensuite des bouchons de ciment dans l'espace annulaire et l'on met ainsi en relation la nappe du Maestrichtien avec les nappes supérieures, dans lesquelles elle se déverse du fait de la différence de pression. Un forage réalisé selon les règles de l'art doit isoler les nappes les unes par rapport aux autres.

- Développement : comme dans le cas précédent.

• Forage à fort débit dans les calcaires paléocènes

- Profondeur : 150 m environ.
- Débit : de 100 à 500 m^3/h.
- Diamètres : forage en 760 mm puis 610 mm
  chambre de pompage 600 mm
  colonne de captage 400 à 450 mm
- Crépines : en acier inoxydable.
- Gravier : basalte roulé 5-15 ou 10-25 mm.
- Forage : réalisé au battage ou au rotary à la boue (mais dans ce cas, il y a des risques de perte de boue dans le calcaire fissuré).

• Forage avec contre-puits (exploité à la main ou par traction animale)

Compte tenu du faible débit d'exploitation on peut se contenter pour le forage, d'un diamètre réduit : un forage dans le Maestrichtien peut être terminé en 250 mm de diamètre seulement. On met en place une colonne de captage de 100 mm de diamètre intérieur (avec éventuellement une chambre de pompage de 150 mm si l'on veut se réserver la possibilité d'exploiter, plus tard, le forage avec une pompe à moteur de moins de 20 m^3/h).

CHAPITRE 3

MATÉRIEL ET MÉTHODES POUR LA RÉALISATION DE FORAGES EN PETIT DIAMÈTRE

Dans ce chapitre, nous passerons en revue le matériel et les méthodes qui permettent de réaliser des « forages en petit diamètre ». Sous ce vocable sont regroupés tous les forages réalisés en un diamètre tel qu'ils ne peuvent être exploités autrement qu'avec une pompe, même si cela recouvre, en réalité, des types d'ouvrages fort différents.

Il existe trois méthodes de perforation permettant de réaliser ce type de forages :

• *La percussion rapide à l'air comprimé* au marteau fond de trou adaptée aux roches dures et que l'on ne peut séparer du *rotary à l'air.*

• *Le forage au rotary à la boue* adapté aux formations sédimentaires et accessoirement le *forage carotté.*

• *Le battage,* méthode beaucoup plus polyvalente mais qui n'est plus guère employée que dans les roches sédimentaires depuis l'introduction du marteau fond de trou pour la réalisation des forages d'eau dans le socle.

Conformément à l'orientation donnée à cet ouvrage, il sera avant tout question, dans ce chapitre, des méthodes de forage à l'air : rotary et marteau fond de trou. En effet, le rotary à la boue et le battage ont été appliqués de longue date à la recherche d'eau et ces méthodes ont déjà fait l'objet d'assez nombreuses publications. Il n'en allait pas de même des méthodes de forages à l'air, introduites beaucoup plus récemment en Afrique et qui y ont pris une place majeure du fait de la prééminence des programmes de forages « villageois » dans le socle.

3.1. – SONDEUSES AU MARTEAU FOND DE TROU

Le caractère commun à toutes ces machines est l'utilisation de l'air comprimé qui sert, en premier lieu, à entraîner l'outil (marteau fond de trou) et constitue le fluide qui remonte les cuttings (déblais de foration) à la surface. Accessoirement, la plupart de ces machines permettent de forer au rotary à l'air (l'air comprimé est alors toujours utilisé comme fluide de circulation mais il n'entraîne plus l'outil) ou même au rotary à la boue (par adjonction d'une pompe à boue).

Ceci conduit à distinguer trois types de machines :

• *Les perforatrices,* conçues pour forer uniquement au marteau fond de trou (leur vocation principale est le travail en carrière) : l'absence du rotary à l'air y est parfois compensée par l'adjonction d'un système de tubage à l'avancement qui permet de traverser les formations tendres non cohérentes (altération ou recouvrement), souvent présentes en début de forage.

• *Les sondeuses au rotary* à l'air et au marteau fond de trou : le rotary à l'air est alors utilisé pour traverser les formations tendres de surface.

• *Les sondeuses mixtes*, identiques aux précédentes mais équipées également pour forer à la boue.

Sur ces trois types de sondeuses, se retrouvent des composantes semblables, à quelques différences près : couple, gamme de vitesses et force de traction-poussée plus faible sur les perforatrices, présence d'une tête d'injection spéciale et d'une pompe à boue sur les sondeuses mixtes.

3.1.1. – Les principaux constituants de la machine

La force motrice, produite par un ou plusieurs moteurs thermiques, est transmise aux différents organes par l'intermédiaire d'une transmission mécanique, hydraulique ou pneumatique.

La force motrice est utilisée pour toutes les fonctions ci-après :

- la percussion (fonctionnement du marteau),
- la rotation du train de tiges,
- les mouvements de montée et de descente (translation),
- la production d'air comprimé (ou la circulation de boue),
- des fonctions annexes telles que : relevage du mât, mise en station de la machine, manutention, calage et serrage des tiges, etc.

3.1.1.1. – Force motrice

La puissance requise pour le fonctionnement de la machine est d'environ :

- 200 à 230 CV pour un compresseur de 21 m^3/mn à 10-12 bars,
- 300 CV pour un compresseur de 21 m^3/mn à 17,5 bars,
- 350 CV pour un compresseur de 21 m^3/mn à 20 bars,
- 80 à 100 CV pour la sondeuse proprement dite, sans la pompe à boue,
- 30 à 90 CV pour la pompe à boue.

La force motrice peut être fournie soit par un moteur unique (qui est alors celui du camion porteur), soit par plusieurs. Les solutions proposées par les constructeurs varient largement, comme le montre le tableau de l'annexe 3.1.

La solution du moteur unique réduit le coût d'investissement mais peut présenter certains inconvénients :

- Dépense d'énergie inutile, puisque l'on est souvent amené à faire tourner un moteur de forte puissance (celui du camion) pour entraîner des organes qui ne nécessiteraient individuellement qu'une puissance beaucoup plus faible. La décomposition des temps moyens d'exécution d'un forage villageois effectué en deux postes de 9 heures se répartit, en effet, à peu près de la manière suivante :

– utilisation simultanée du compresseur et de la sondeuse, ...	6 h
– utilisation du compresseur seul, ...	2 h
– utilisation de la sondeuse seule, ...	3 h
– utilisation du camion seul, ...	2 h
– sans force motrice, ...	5 h
Total	18 h

- Régulation de la vitesse du moteur : chacun des organes entraînés ne nécessite pas forcément, au même moment, le plein régime : l'emploi du moteur unique peut conduire à faire tourner constamment celui-ci à un régime élevé, ce qui se traduit, là encore, par un surcroît de dépense d'énergie.

- Risques d'échauffement plus importants pour un moteur de véhicule employé à poste fixe.

- Poids plus élevé de la machine : environ 25 tonnes pour l'ensemble camion porteur, sondeuse et compresseur haute pression, contre moins de 18 tonnes pour le camion porteur et la sondeuse seule. Ceci constitue un handicap lorsque les distances et les difficultés de parcours sont grandes.

- Poussière et bruit : pour la longévité du compresseur, il est préférable que celui-ci soit tenu à l'écart de la poussière dégagée par le forage ; cela améliore en outre le confort du foreur en diminuant le niveau sonore.

Pour toutes ces raisons, il est souvent jugé préférable d'utiliser un compresseur mû par un moteur autonome et monté, en général, sur un camion porteur distinct de celui de la machine.

3.1.1.2. – Transmission

L'emploi de la transmission hydraulique s'est généralisé sur ce type de machine, suivant en cela une tendance qui prévaut désormais dans les

travaux publics. A quelques rares exceptions près, la transmission mécanique ne subsiste que sur les machines plus puissantes. Enfin, certaines perforatrices légères sont équipées d'une transmission pneumatique ; celle-ci n'est pas adaptée aux fortes puissances en raison de son rendement très bas.

Transmission hydraulique

La souplesse est certainement l'atout majeur de la transmission hydraulique : souplesse dans la conception de la machine puisque la disposition des organes est affranchie des contraintes d'alignement propres à la transmission mécanique ; souplesse d'utilisation également puisqu'elle permet de faire varier, de manière continue, les forces et les vitesses, ce qui autorise une meilleure précision dans l'emploi de la machine.

Tous les paramètres utiles au forage (vitesse de rotation, couple, poussée sur l'outil, etc.) peuvent être visualisés aisément. En outre, ce mode de transmission se prête bien à la mise en œuvre des fonctions annexes et à une automatisation des manœuvres.

Le rendement du moteur thermique est meilleur car il tourne à vitesse fixe et à son régime optimum, ce qui n'est pas le cas avec une transmission mécanique où l'on est souvent conduit à faire varier son régime pour élargir la gamme des vitesses donnée par la boîte.

Le rendement de la transmission hydraulique est variable selon la complexité du circuit : il atteint normalement 90 % dans un circuit simple, mais peut descendre à 50 ou 60 % avec des circuits de laminage et systèmes de régulation divers.

Sous réserve d'assurer une maintenance régulière, la fiabilité est meilleure que sur les machines à transmission mécanique et les réparations se révèlent plus rapides.

Transmission mécanique

La transmission du mouvement est faite par l'intermédiaire d'arbres, pignons, chaînes, etc. Le rendement est très bon mais le système est contraignant par sa rigidité. Il ne permet pas d'obtenir une variation continue des vitesses et des forces, comme dans le cas précédent. Son utilisation est de moins en moins fréquente sur les machines légères.

Transmission pneumatique

Aussi souple que la transmission hydraulique, ce mode de transmission est plus rustique et souffre moins d'un entretien précaire. Par contre, son rendement très faible (de l'ordre de 10 %) limite rapidement la puissance de la machine, à moins d'augmenter démesurément la taille du compresseur. Il donne satisfaction sur certaines perforatrices, mais son usage semble devoir être exclu sur les machines au rotary à l'air, cette méthode exigeant des puissances plus élevées.

3.1.1.3. – Circuits hydrauliques

Dans la transmission hydraulique, l'agent de transmission est de l'huile sous pression. La centrale hydraulique est l'organe qui produit cette huile sous pression à partir de l'énergie fournie par le moteur ; elle est composée d'une boîte d'entraînement et d'une ou plusieurs pompes hydrauliques ou générateurs de pression.

Les organes récepteurs sont des vérins ou des moteurs hydrauliques ; les premiers restituent l'énergie mécanique sous forme de translation, les seconds sous forme de rotation.

Les types de pompes hydrauliques rencontrées sur le matériel de forage sont au nombre de trois [18] :

• Les pompes à pistons (Fig. 6) sont utilisées pour les pressions élevées. Les pompes à pistons à débit variable permettent, à vitesse constante de l'arbre d'entraînement, de faire varier le débit en agissant sur l'inclinaison du plateau sur lequel appuient les tiges de pistons (Fig. 7). On peut ainsi faire varier de manière continue la vitesse d'entraînement du récepteur sans perte d'énergie importante. Ce sont des pompes d'un coût élevé que l'on emploie principalement pour la rotation.

• Les pompes à engrenages (Fig. 8) sont les pompes les plus répandues et les moins coûteuses ; il s'agit de pompes à débit fixe (le débit demeure constant pour une vitesse de rotation donnée) ; le réglage de la vitesse du récepteur peut être obtenu en le couplant avec un circuit de fuite ou de laminage, mais cela s'accompagne d'une perte d'énergie sous forme de chaleur et le rendement est moins bon. Elles ne peuvent fournir des pressions élevées mais conviennent, en général, pour les asservissements ou fonctions annexes.

• Les pompes à palettes (Fig. 9) : elles sont moins employées que les types précédents.

3.1.1.4. – Rotation

La rotation du train de tiges est assurée par une table de rotation ou par une tête de rotation.

• *La table de rotation* est un organe d'entraînement fixe dans lequel coulisse une tige carrée (kelly). C'est le treuil, par l'intermédiaire d'un moufflage, qui supporte le poids de la garniture de forage (ensemble constitué par l'outil et le train de tiges) et permet ses mouvements de montée et de descente. Cet ensemble (treuil + table de rotation) est utilisé sur les machines de forte puissance : la table de rotation permet d'exercer des couples élevés et le treuil et le moufflage permettent la mise en œuvre de garnitures lourdes. En revanche, ce système ne s'impose pas sur les machines plus légères.

Fig. 6

PRINCIPE DE LA POMPE HYDRAULIQUE A PISTON

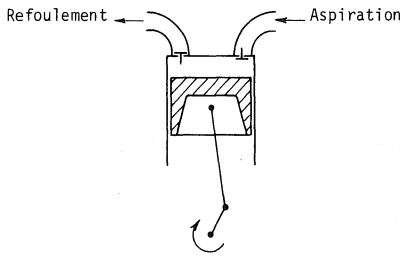


Fig. 7

PRINCIPE D'UNE POMPE A DÉBIT VARIABLE

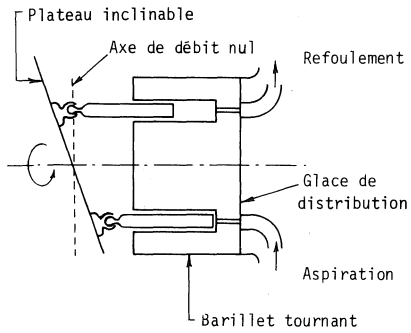


Fig. 8

POMPE A ENGRENAGES

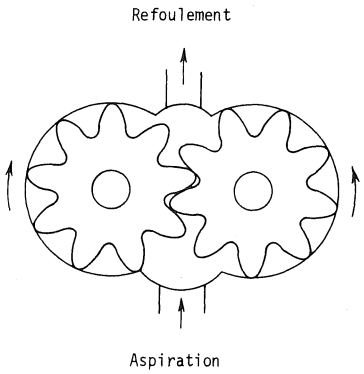
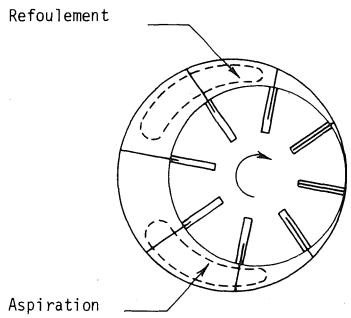


Fig. 9

POMPE A PALETTES



La table de rotation présente certains inconvénients : elle ne permet pas, notamment, un contrôle aisé du poids sur l'outil en début de forage, lorsque le poids de la garniture est encore faible. Certains constructeurs y remédient, sur les petites machines, par l'adjonction d'un système de poussée-retenue qui s'applique au dessus de la tige d'entraînement.

• *La tête de rotation* est un organe d'entraînement mobile qui supporte tout le poids des tiges. Elle permet d'appliquer, à volonté, une force de poussée sur les tiges et d'obtenir ainsi une maîtrise permanente du poids sur l'outil, quelle que soit la profondeur du forage. L'absence de tige carrée rend les manœuvres plus rapides et donne plus de souplesse d'intervention : ainsi, on peut simultanément exercer les fonctions de traction, de rotation et d'injection, quelle que soit la position du train de tiges dans le forage, ce qui n'est pas le cas avec une table de rotation lorsque la fourrure du kelly est sortie de la table : ceci constitue un avantage en cas de coincement des tiges.

Pour toutes ces raisons, la tête de rotation est le système employé sur la quasi-totalité des sondeuses légères avec marteau fond de trou. Elle est généralement entraînée par un ou plusieurs moteurs hydrauliques. En forage au marteau fond de trou, les couples demandés sont faibles : très rarement plus de 200 m. kg lorsqu'on fore en 150 mm (6") et de 400 m. kg lorsqu'on fore en 300 mm (12"). C'est l'ordre de grandeur du couple disponible sur les perforatrices légères citées en annexe 4. Par contre, le rotary exige des couples plus importants : sur la plupart des autres machines citées, la puissance fournie par le moteur permet d'obtenir un couple de l'ordre de 600 à 1000 m. kg.

Pour dégager l'axe du forage pendant la mise en place des tubages, qui se fait avec un treuil auxiliaire, il existe divers systèmes (Fig. 10) : tête rétractable, tête pivotante, positionnement de la tête en haut de mât, châssis mobile (pour une sondeuse à tête de rotation ou à table de rotation).

3.1.1.5. – Le mât

La charge que peut supporter le mât constitue l'un des facteurs qui limitent la capacité d'une sondeuse, c'est-à-dire la profondeur qu'elle peut atteindre avec un diamètre donné. Les sondeuses citées en annexe 4 ont un mât de 10 à 20 tonnes de capacité.

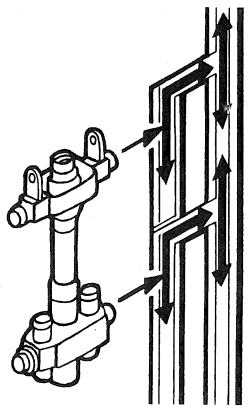
Le mât peut être construit en treillage métallique ou bien avec un ou plusieurs profilés épais. Le premier est plus léger à résistance égale mais il est également plus cher.

Selon les machines, la longueur du mât est calculée pour pouvoir utiliser des tiges de 3, 4,5 ou 6 mètres. Etant donné les vitesses de perforation des machines actuelles, il est préférable de pouvoir utiliser des tiges de 6 mètres, ce qui réduit le nombre de manœuvres et entraîne un gain de temps appréciable.

DISPOSITIFS D'EFFACEMENT DE LA TÊTE DE ROTATION Fig. 10

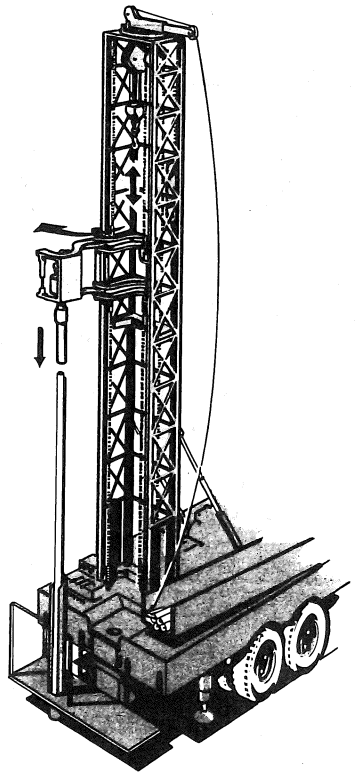
TÊTE RÉTRACTABLE

La tête de rotation peut être positionnée en retrait de l'axe du forage grace à des rails situés dans la partie supérieure du derrick.



(document Ingersoll Rand)

TÊTE PIVOTANTE



(document Portadrill)

3.1.1.6. – Translation

Sur les machines à table de rotation, les mouvements de montée et de descente du train de tiges sont obtenus avec le treuil. Certaines d'entre elles disposent, en outre, d'un système de poussée actionné hydrauliquement et permettant d'exercer une pression sur le train de tiges, ce qui est notamment utile en début de forage.

Sur les sondeuses à tête de rotation, le déplacement vertical de la tête est obtenu par l'action de vérins ou de moteurs hydrauliques (ou de moteurs pneumatiques si la machine est à entraînement pneumatique) (Fig. 11).

Avec les circuits hydrauliques, il existe plusieurs moyens de faire varier la vitesse de déplacement ; on peut, par exemple :

- combiner les effets de plusieurs pompes hydrauliques à débit fixe, afin d'obtenir une gamme de vitesses,
- ou bien utiliser une pompe ou un moteur à débit variable, ce qui permet de faire varier la vitesse de manière continue,
- ou encore utiliser une pompe à débit fixe couplée avec un circuit de fuite ou de laminage, ce qui est un autre moyen d'obtenir une variation continue de la vitesse.

3.1.1.7. – Régulation de la poussée sur l'outil

Le bon fonctionnement du marteau fond de trou exige un contrôle précis du poids appliqué sur l'outil : selon les types de marteau, les diamètres et les terrains, la force à appliquer se situe entre 0,5 et 2 tonnes. En général, on lit sur un manomètre la poussée qui s'exerce en tête du train de tiges : la pression d'huile ou d'air dans le circuit de translation est en effet fonction de la résistance opposée à l'enfoncement donc de la poussée exercée sur l'outil. Dans la plupart des cas, le foreur agit manuellement pour maintenir le poids sur l'outil constant, et tient compte du poids propre des tiges, qui s'ajoute à la pression exercée en tête de celles-ci.

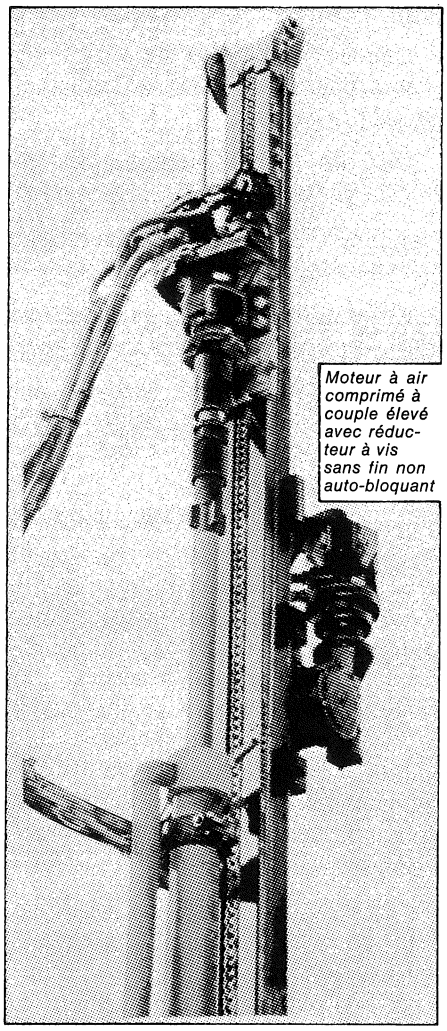
Il existe des systèmes destinés à faciliter le contrôle du poids sur l'outil ou même à le rendre automatique (notamment sur les perforatrices, pneumatiques ou hydrauliques) ; c'est le cas, par exemple, du régulateur de poussée schématisé sur la figure 12 (*), composé d'un cylindre à air comprimé avec deux entrées d'air : l'arrivée d'air par le haut, déclenchée au delà d'un certain seuil de pression, a pour effet de retenir la tête de rotation ; par le bas, elle a pour effet de la faire descendre.

(*) Régulateur Stenuick

SYSTÈMES DE TRANSLATION

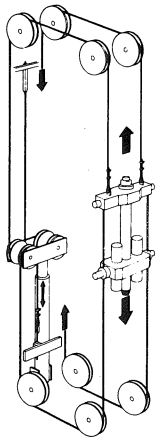
Fig. 11

TRANSLATION PAR MOTEUR PNEUMATIQUE ET CHAÎNE



(document Atlas Copco)

TRANSLATION PAR VÉRINS ET CABLES



(document Ingersoll Rand)

3.1.1.8. – Tiges de forage

En forage à l'air, on utilise des tiges lisses extérieurement, afin de faciliter la remontée des déblais dans l'espace annulaire (entre les tiges et les parois du trou). Le diamètre des tiges est choisi en fonction du diamètre de forage afin d'assurer une bonne remontée des déblais tout en limitant les pertes de charge. Il faut noter cependant que, dans le forage avec la haute pression (*), les marteaux consomment plus d'air que n'en nécessite habituellement l'entraînement des déblais : dans ce cas, les considérations de prix et de poids interviennent également dans le choix des tiges. On peut ranger les tiges de forage en trois catégories :

• *Tiges spéciales* pour marteau fond de trou. Elles ont un diamètre relativement important pour faciliter la remontée des cuttings mais sont relativement peu épaisses puisquelles ne sont pas destinées à subir des efforts de torsion élevés. Elles peuvent être à paroi simple (pour le forage à sec) ou doublées intérieurement par un tube d'injection d'eau.

• *Tiges conventionnelles :* ce sont des tiges prévues pour le forage au rotary mais que l'on peut tout aussi bien utiliser dans le forage au marteau fond de trou. Elles sont plus épaisses et plus résistantes que les précédentes. En raison de leur polyvalence, c'est la catégorie de tiges utilisée le plus fréquemment. Elles existent en plusieurs épaisseurs mais, pour les forages peu profonds dans le socle, la catégorie la plus légère suffit habituellement.

• *Tiges à double paroi* pour le forage en circulation inverse à l'air : ce sont des tiges spécifiquement adaptées à ce type de forage ; elles sont employées avec un outil dont le diamètre extérieur est très voisin de celui des tiges ; l'espace annulaire est ainsi très réduit et l'on réalise, par ce procédé, une sorte de tubage à l'avancement permettant de maintenir les parois du forage même en terrains pulvérulents. Les déblais remontent, dans ce cas, par l'intérieur du train de tiges.

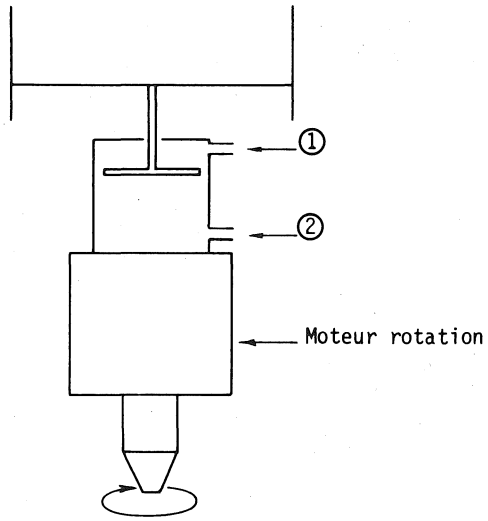
Avec les tiges conventionnelles, on utilise habituellement les dimensions suivantes :

Diamètre du forage	Dimension des tiges
<150 mm (6")	89 mm (3 1/2")
150 à 220 mm (6" à 8 1/2")	114 mm (4 1/2")
>220 mm (8 1/2")	127 à 140 mm (5" à 5 1/2")

(*) 17,5 bars ou plus

PRINCIPE DU RÉGULATEUR DE POUSSÉE STENUICK

Fig. 12



① - Arrivée d'air comprimé ayant pour effet de retenir la tête de rotation

② - Arrivée d'air comprimé ayant pour effet de pousser la tête de rotation

3.1.1.9. – Marteau et taillant

Le forage au marteau fond de trou n'est rien d'autre qu'un forage à la percussion : l'outil de percussion est le *taillant,* qui se fixe directement sur le marteau fond de trou, par lequel il est entraîné dans un mouvement rapide de va-et-vient vertical.

• *Le marteau*

Il en existe deux types :

– le marteau à tiroir de distribution,

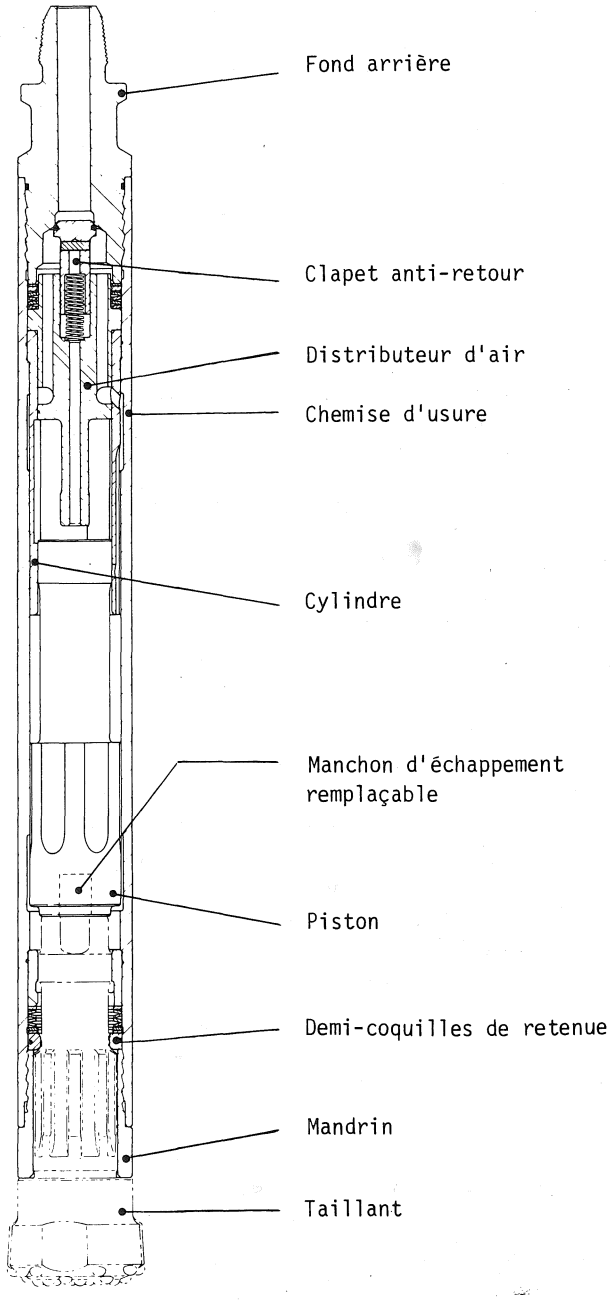
– le marteau à piston autodistributeur (Fig. 13).

Ce dernier, qui correspond à la génération actuelle des marteaux, représente une amélioration sensible par rapport au précédent : il n'y a qu'une seule pièce en mouvement (le piston) et le nombre total de pièces y est réduit (14 pièces, y compris les joints dans le marteau Mission « Megadrill »), ce qui contribue à une meilleure fiabilité.

EXEMPLE DE MARTEAU A PISTON AUTODISTRIBUTEUR

(document Ingersoll Rand)

Fig. 13



Les marteaux sont souvent munis d'un système de buses interchangeables permettant de répartir le débit d'air disponible entre celui destiné à la frappe et le débit en excès utilisé seulement pour le soufflage et l'entraînement des déblais.

Un même marteau peut fonctionner dans une gamme de pressions assez large : par exemple le marteau Ingersoll DHD 360 peut être utilisé entre 10 et 25 bars et le marteau Mission Megadrill entre 7 et 20 bars. Notons, au passage, que l'on met à profit cette particularité lorsqu'après un arrêt on reprend la percussion sous une certaine hauteur d'eau.

La durée de vie des marteaux est très variable selon les conditions d'utilisation. Elle est donnée pour 6 à 10.000 mètres de forage par les constructeurs ; mais l'enquête en Afrique a démontré qu'elle pouvait être bien inférieure et ne pas dépasser 2000 mètres dans certains cas.

• *Le taillant*

Le taillant est l'outil proprement dit qui sert à briser la roche. On utilise, le plus souvent, des taillants à boutons de carbure de tungstène (Fig. 14). Le soufflage en tête de taillant permet l'évacuation des déblais le long d'encoches latérales.

La dimension du taillant doit être adaptée à celle du marteau (annexe 3.3.2). On considère, généralement, qu'il faut au moins un pouce de différence entre le diamètre du marteau et celui du taillant si l'on veut éviter des pertes de charges trop importantes au-dessus de l'outil et une usure trop rapide du marteau par abrasion.

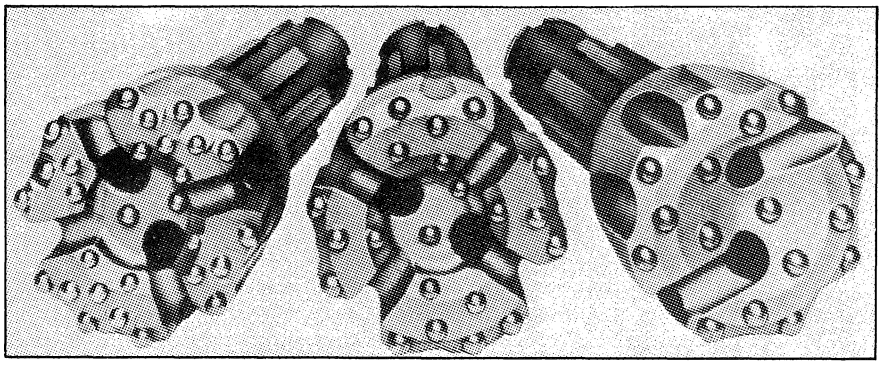
Pour allonger la durée de vie des taillants, les constructeurs conseillent de remeuler périodiquement les boutons de carbure, ce qui, dans la réalité, semble assez peu mis en pratique. On peut penser que les performances moyennes observées (de l'ordre de 250 à 500 mètres de forage par taillant) pourraient être améliorées si cette précaution était observée. En tout état de cause, un taillant utilisé trop longtemps voit diminuer naturellement son diamètre et il n'est pas conseillé de reprendre avec un taillant neuf un forage commencé avec un taillant trop usé (risques de coincement). Le diamètre des taillants (hors tout, au niveau des boutons, et celui de la matrice, inférieur de l'ordre de 1 mm) doivent être régulièrement contrôlé (au pied à coulisse).

Pour forer en grand diamètre, on peut être amené à forer dans un premier temps un trou en petit diamètre et à le réaléser ensuite au diamètre final. Le réalésage se fait avec des taillants spéciaux munis d'une tête-guide.

3.1.2. – Le forage à l'air comprimé

L'air comprimé a pour fonction d'entraîner le marteau fond de trou et de remonter les déblais ; sur les machines à transmission pneumatique, il sert, en outre, à entraîner certains organes de la machine.

TAILLANTS A BOUTONS DE CARBURE DE TUNGSTÈNE Fig. 14



3.1.2.1. – Débit d'air nécessaire

• *Fonctionnement du marteau*

La consommation d'air comprimé du marteau varie avec la surface de frappe, c'est-à-dire avec le diamètre du taillant (annexe 3.3.2) et avec la pression, comme le montre l'exemple suivant extrait de la figure 15 :

Pression	Diamètre du taillant	Consommation d'air
10,5 bars . . .	100 à 125 mm (4" à 5")	6,5 m^3/mn
	150 à 220 mm (6" à 8 3/4")	12,5 m^3/mn
17,5 bars . . .	100 à 125 mm (4" à 5")	11 m^3/mn
	150 à 220 mm (6" à 8 3/4")	21 m^3/mn

Nous conviendrons, dans la suite, d'appeler basse pression une pression de 10-12 bars et haute pression une pression égale ou supérieure à 17,5 bars.

• *Remontée des déblais*

Pour assurer une remontée correcte des déblais dans l'espace annulaire, on considère généralement que l'air comprimé doit y avoir une vitesse ascensionnelle au moins égale à 15 m/s. Le tableau de l'annexe 3.3.1 donne le débit correspondant pour différents diamètres de tiges et de forages.

En basse pression (10,5 bars) on remarquera que, pour un forage de 6 1/2" par exemple, avec tiges de 3 1/2", les débits d'air nécessaires à la remontée des déblais et au fonctionnement du marteau sont du même ordre de grandeur. En haute pression (17,5 bars), par contre, le débit

CONSOMMATION D'AIR COMPRIMÉ DES MARTEAUX FOND DE TROU EN FONCTION DE LA PRESSION

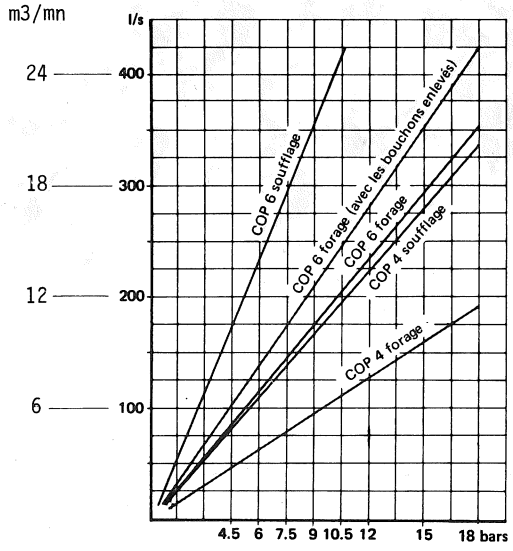


Fig. 15

(document Atlas Copco)

L'exemple ci-dessus montre la consommation d'air des marteaux Atlas Copco :
Cop 4 (marteau de 4" pour forage en 105 à 127 mm)
Cop 6 (marteau de 6" pour forage en 152 à 216 mm)
en fonction de la pression d'utilisation.

Avec le Cop 6 par exemple, la consommation en forage est d'environ 20 m3/mn, si la pression de fonctionnement est de 17,5 bars.

nécessaire à la remontée des déblais est nettement inférieur au débit demandé par le marteau. Dans ce dernier cas, ce sont donc les paramètres du marteau et non les caractéristiques du forage qui guident le choix du compresseur.

• *Entraînement d'une sondeuse pneumatique*

Sur une perforatrice Stenuick Perfo 66 D, la consommation d'air des moteurs est de :

- 3 m^3/mn pour la rotation du train de tiges,
- 3 m^3/mn pour la rotation du tubage Saturne (système de tubage à l'avancement),
- 6 m^3/mn pour la traction-poussée (2 moteurs).

Pendant la perforation, seules les deux premières fonctions exigent le débit d'air maximum, la fonction translation consommant alors peu d'air comprimé. C'est l'inverse pendant les manœuvres, d'où il résulte que, dans tous les cas, la consommation d'air comprimé ne dépasse pas environ 6 m^3/mn. Ce débit s'ajoute à celui qui est nécessaire au fonctionnement du marteau (ou à celui nécessaire à la remontée des déblais, s'il est plus grand). Il faudra donc environ :

- 15 à 20 m^3/mn pour l'ensemble à 10-12 bars,
- 22 à 30 m^3/mn pour l'ensemble à 17,5 bars.

3.1.2.2. – Pression d'air comprimé

Les pressions utilisées dans le forage au marteau fond de trou ont subi une augmentation régulière depuis l'introduction de cette méthode pour le forage d'eau en Afrique : les pressions de 10-12 bars utilisées dans les débuts le sont beaucoup plus rarement aujourdhui, où l'on emploie couramment une pression de 17,5 ou 20 bars, voire plus.

La raison de cette évolution tient à la vitesse d'avancement qui croît à peu près proportionnellement à la pression d'air comprimé (Fig. 16) : l'augmentation de vitesse est d'environ 50 % quand la pression passe de 7 à 10,5 bars et de 50 à 100 % quand elle passe de 10,5 à 17,5 bars. Ainsi, dans un granite de dureté moyenne, la vitesse d'avancement à 17,5 bars se situe-t-elle couramment entre 10 et 20 m/h.

L'accroissement de la vitesse d'avancement avec la pression s'explique (sous réserve d'avoir un bon dégagement des déblais) par le fait qu'elle est proportionnelle à l'énergie (E) de frappe, qui est une énergie cinétique et s'exprime sous la forme :

$$E = 1/2m\,V^2$$

où m est la masse du piston du marteau et V sa vitesse.

Ceci explique :

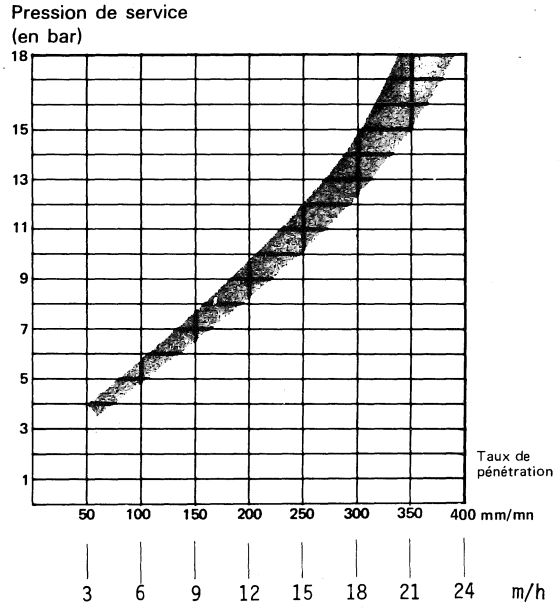
- que l'on fore plus vite avec un gros marteau qu'avec un petit,
- que la vitesse d'avancement dans le forage croît sensiblement comme le carré de la vitesse du piston, laquelle dépend de la pression.

Exemple du marteau Ingersoll Rand DHD 360 :

Pression (bars)	**Vitesse V du piston (coups/mn)**	**Coefficient d'augmentation de V^2 par rapport à 10,5 bars**
10,5	1175	
17,6	1575	1,79
24,6	1825	2,41

EXEMPLE D'ACCROISSEMENT DE LA VITESSE DE PÉNÉTRATION EN FONCTION DE LA PRESSION D'AIR COMPRIMÉ

Fig. 16



Taux net de pénétration avec le COP 4 et le COP 6 à différentes pressions de service, dans le cas de forage dans du granite avec une résistance à la compression d'environ 24,5 kN = 2500 kg/cm²
Diamètre du taillant de forage : COP 4 = 105 mm ; COP 6 = 152 mm.

(document Atlas Copco)

• *Avantages et inconvénients de la haute pression*

Le principal avantage est, évidemment, le gain sur la vitesse d'avancement ; toutefois ceci ne se traduit par une économie que si l'atelier est bien géré. Le calcul donné en annexe 3.3.4 montre que l'économie mensuelle peut dépasser 500.000 FCFA dans le cas d'un atelier effectuant 10 forages de 50 mètres par mois.

La fiabilité du matériel (marteaux et compresseurs) apparaît aussi bonne qu'en basse pression, tout au moins jusqu'à 17,5 bars, dans la mesure où l'entretien est fait selon les normes.

La durée de vie des taillants et des marteaux, exprimée en mètres de forage, ne semble pas diminuée par la haute pression et serait même plutôt meilleure que dans le cas de la basse pression. Il faut noter, en effet, que dans les roches très siliceuses l'usure du marteau intervient autant, sinon plus, par abrasion que par fatigue du métal. Or, à longueur

forée égale, l'abrasion est proportionnelle au temps de séjour de l'outil dans le trou. Il n'est malheureusement pas encore possible d'appuyer ces propos par des données statistiques : on citera seulement, à titre d'exemple, les résultats d'une campagne de forage récente en Côte d'Ivoire (annexe 3.7) : au cours de celle-ci, 24.250 mètres de forage ont été réalisés avec trois machines utilisant la haute pression (17,5 bars) ; la durée de vie moyenne des outils a été de 546 m pour les taillants et de 1910 m pour les marteaux. En ce qui concerne ces derniers, certains utilisateurs font état de durées de vie nettement plus importantes.

Parmi les inconvénients de la haute pression, il faut noter le coût plus élevé des compresseurs, bien que cet investissement initial puisse être compensé ensuite par une productivité meilleure. Leur poids est également plus important (3 à 4 tonnes pour un compresseur à 10,5 bars, 5 à 6 tonnes pour 17,5 bars, 7 à 10 tonnes pour 24,5 bars).

Le fonctionnement des marteaux avec la haute pression s'accompagne d'un débit d'air plus élevé qui peut être une gêne pour la tenue des parois du forage dans les terrains mal consolidés, la vitesse dans l'espace annulaire étant plus grande ; l'emploi de mousse peut permettre de remédier partiellement à ce problème.

Il faut noter enfin qu'un suivi géologique soigné des opérations de forage devient très difficile dès lors qu'un atelier haute pression peut terminer en 3 heures un forage de 60 mètres : des données géologiques importantes peuvent alors échapper au contrôle.

3.1.2.3. – Lubrification du marteau

Le marteau est lubrifié par de l'huile qui est injectée dans le circuit d'air comprimé au moyen d'un lubrificateur à vanne pointeau ou d'une petite pompe. La consommation d'huile est comprise entre 0,5 et 2 l/h ; elle peut aller jusqu'à 2,5 l/h si l'on fore à la mousse, en raison de la nécessité de lutter contre l'effet détergent de celle-ci.

3.1.2.4. – Injection d'eau

Il est presque toujours recommandé d'injecter de l'eau quand on fore au marteau fond de trou : cette eau facilite la remontée des cuttings, réduit ou élimine les poussières et contribue, en outre, au refroidissement du marteau.

L'eau est injectée dans le circuit d'air comprimé au moyen d'une petite pompe volumétrique capable de débiter jusqu'à 30, voire 60 litres par minute, sous une pression de 20 à 30 bars. En régime normal, cependant, le débit d'injection est faible et la consommation d'eau pour un forage d'une cinquantaine de mètres reste habituellement comprise entre 2 et 3 m^3.

3.1.2.5. – Forage à la mousse

L'emploi de mousse peut parfois faciliter le forage notamment lorsque l'on doit traverser des altérites épaisses, mal consolidées : elle améliore la remontée des cuttings en les dispersant et en les maintenant en suspension grâce à son émulsion très serrée ; elle limite l'érosion des parois par le courant d'air comprimé et contribue ainsi à leur tenue ; elle s'oppose à l'injection des cuttings dans le terrain pendant leur trajet ascendant. L'emploi de mousse élargit donc le domaine d'utilisation du forage à l'air et permet bien souvent d'éviter le recours à la boue pour traverser des couches d'altération épaisses.

On ajoute souvent à l'agent moussant des produits stabilisants (polymères organiques) qui renforcent la stabilité de la mousse tout en améliorant la tenue des parois. Ces produits sont mélangés à l'eau dans la proportion de :

- 1 à 5 % de produit moussant,
- 0,25 à 1 % de polymère.

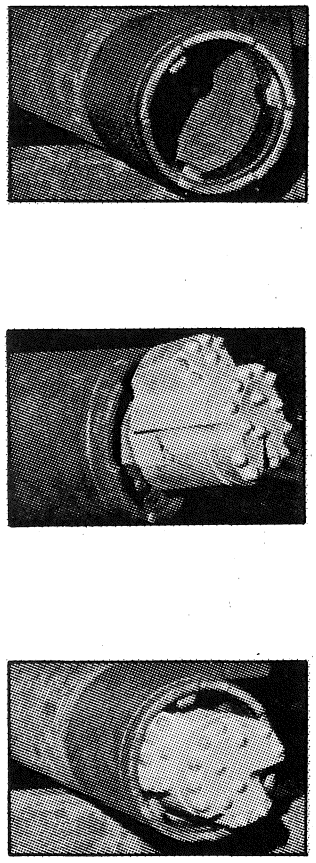
3.1.2.6. – Tubage à l'avancement

Comme son nom l'indique, ce système consiste à descendre un tubage dans le forage au fur et à mesure de l'avancement de la perforation, ce qui supprime tout problème de tenue des parois ; il permet de pallier les insuffisances du marteau fond de trou dans les terrains d'altération non cohérents ; les deux procédés les plus couramment employés sont les suivants :

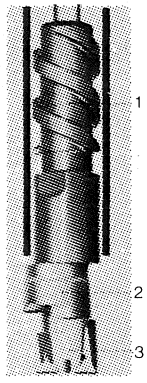
• *Système Saturne (Stenuick) (Fig. 17) :*

Le tubage est mû par un moteur de rotation indépendant et tourne en sens inverse de celui des tiges. Le marteau est muni d'un taillant excentrique qui fore un trou d'un diamètre légèrement supérieur à celui du tubage ; ce dernier, qui est muni d'un sabot, est entraîné par la tête de rotation et progresse vers le bas à la même vitesse que l'outil qu'il suit de quelques centimètres. Il est composé d'éléments vissés que l'on rajoute au fur et à mesure de la descente, en même temps que les tiges.

Le système Saturne permet de traverser les terrains d'altération jusqu'à une quarantaine de mètres de profondeur (60 m avec le Saturne 209/229). Au toit de la roche dure, le tubage Saturne est laissé en place et l'outil peut être retiré grâce à sa forme excentrique escamotable ; après meulage des ergots de centrage du marteau, on poursuit alors le forage avec un taillant conventionnel de diamètre plus petit. La nature des altérites permet souvent d'utiliser dès le départ un taillant conventionnel, en le faisant suivre dans les altérites par le tubage Saturne (couple disponible 800 m.kg).



TUBAGE A L'AVANCEMENT
(SYSTÈME SATURNE STENUICK)
Fig. 17



Taillant de forage excentré ODEX
1. Dispositif de guidage
2. Aléseur (sorti)
3. Taillant-pilote

TUBAGE A L'AVANCEMENT
(SYSTÈME ODEX ATLAS COPCO)
Fig. 18

Le Saturne existe en trois diamètres : 117/133, 152/168 et 209/229 mm. Le tubage 152/168, habituellement utilisé, permet de poursuivre le forage dans la roche saine en 150 mm (6"). Le 209/229 mm, qui nécessite un couple plus élevé, n'est pas disponible sur la perforatrice pneumatique, mais sur une machine plus puissante à transmission hydraulique.

• *Système Odex (Atlas Copco) (Fig. 18) :*

Il n'y a pas, ici, de moteur autonome pour entraîner le tubage ; celui-ci est enfoncé sans rotation et progresse à la manière d'un clou qu'on enfonce, sous l'impulsion du marteau qui agit sur un épaulement à la base du tubage. Comme dans le cas précédent, un taillant excentrique fore un

trou de diamètre légèrement supérieur à celui du tubage. Parvenu au toit de la roche saine, ce dernier est laissé en place et le forage est poursuivi dans un diamètre plus petit.

Le tubage Odex existe en deux dimensions : 128/138 et 180/192 mm. Il est composé d'éléments en acier que l'on soude sur place les uns aux autres et qui sont normalement laissés en place de manière définitive dans le forage (*). Il faut cependant remarquer que ce type d'équipement est peu compatible avec l'agressivité des eaux dans le socle.

3.1.2.7. – Circulation inverse à l'air (Fig. 19) :

Ce procédé original est particulier à la sondeuse VPRH de Foraco. Il est basé sur l'utilisation de doubles tiges (appelées doubles tubes) dans lesquelles l'air comprimé est injecté par le tube extérieur et remonte avec les déblais par le tube intérieur.

Dans les terrains non consolidés, on fore avec un outil dont le diamètre est très voisin de celui des tiges, qui jouent alors le rôle d'un tubage à l'avancement et maintiennent les parois du trou. L'outil est soit un tricône, soit une couronne ; dans ce dernier cas, l'espace intérieur des doubles tiges permet éventuellement, avant leur retrait, de mettre en place un tubage définitif.

Les doubles tiges existent en deux diamètres :

- tiges de 5" : diamètre extérieur 127 mm (5"), diamètre intérieur 70 mm (2 3/4")
- tiges de 8" : diamètre extérieur 203 mm (8"), diamètre intérieur 152 mm (6")

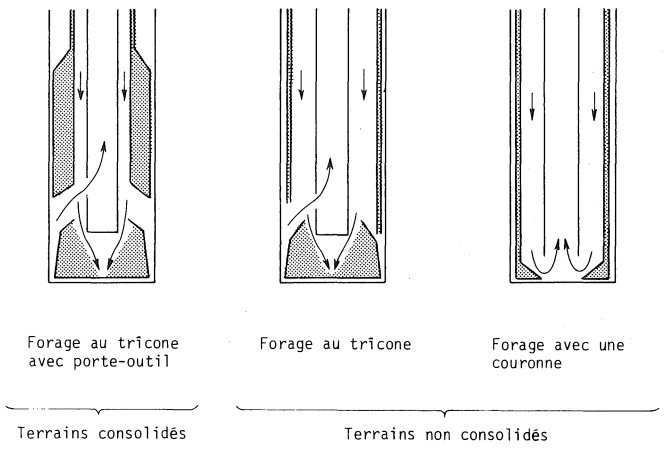
En terrain cohérent, on peut forer avec des tiges d'un diamètre nettement inférieur à celui du trou : on utilise alors un porte-outil spécial à flux croisé, qui canalise l'air vers le tube central, évitant ainsi qu'il remonte par l'espace annulaire.

Le procédé d'enfoncement original de la VPRH ajoute à la rotation classique des mouvements de vibration et/ou de percussion imprimés depuis la tête de rotation. Ces mouvements diminuent considérablement les forces de frottement entre les parois du trou et le tube extérieur.

Ce système très performant en terrains tendres, particulièrement s'ils sont non cohérents, peut convenir pour les forages villageois en terrains sédimentaires. Il est par contre moins bien adapté pour les forages dans le socle, du moins en zone granito-gneissique ; en roche dure, en effet, la vibro-percussion n'est pas performante et il est préférable de revenir à l'emploi du marteau fond de trou avec une circulation directe.

(*) Sur option, le 128/138 mm peut être fourni en éléments vissés.

FORAGE EN CIRCULATION INVERSE A L'AIR AVEC DOUBLES TUBES Fig. 19
(SYSTÈME FORACO VPRH)



3.1.2.8. – Paramètres de forage

a) **Forage au marteau fond de trou**

• *Poids sur l'outil :*

Il est important de maintenir sur l'outil un poids assez faible mais constant, de façon à éviter, d'une part la frappe à vide qui détériorerait le taillant, d'autre part une pression trop forte qui diminuerait l'efficacité du marteau. Les poids recommandés varient selon les marques ; pour les marteaux Mission, par exemple, ils sont donnés par le tableau ci-dessous :

Poids sur l'outil	Diamètre de forage
600 à 800 kg	127 à 146 mm (5" à 5 3/4")
1,5 t	152 à 222 mm (6" à 8 3/4")
2 t	194 à 254 mm (7 5/8" à 10")

Certains constructeurs (comme Stenuick) recommandent des poids inférieurs à ceux-ci.

• *Vitesse de rotation :*

La vitesse de rotation doit être assez faible ; elle est ajustée en fonction de la vitesse de pénétration selon la formule empirique suivante :

Vitesse de rotation t/mn = 1,5 × Vitesse de pénétration m/heure, ce qui donne environ :

- 15 t/mn à 10 m/h
- 25 t/mn à 15 m/h
- 30 t/mn à 20 m/h

• *Débit d'air comprimé :*

Nous avons vu précédemment que le débit d'air comprimé doit assurer une vitesse dans l'espace annulaire de l'ordre de 15 m/s. Les débits d'air élevés améliorent le rendement de l'outil grâce au bon dégagement des déblais en fond de trou ; inversement, ils augmentent l'usure du taillant par abrasion et sont moins favorables à la tenue du trou.

b) **Forage au rotary à l'air**

• *Poids :*

Il est difficile de fixer une norme pour des forages qui, dans le cas qui nous intéresse, sont toujours réalisés à faible profondeur, dans des formations tendres. A titre indicatif, signalons cependant qu'en forage profond au rotary à l'air, le poids appliqué sur l'outil est habituellement deux fois plus faible qu'au rotary à la boue, ce qui donne un ordre de grandeur de 300 à 400 kg par pouce de diamètre de l'outil. Les outils utilisés sont des tricônes, comme dans le forage rotary à la boue.

• *Vitesse de rotation :*

La vitesse de rotation en rotary à lair est sensiblement la même qu'au rotary à la boue, c'est-à-dire de 85 à 150 t/mn en terrains tendres et de 40 à 50 t/mn en terrains durs.

3.1.2.9. – Profondeur limite de perforation

La profondeur limite qui peut être atteinte avec une sondeuse au marteau fond de trou dépend, sur le plan du matériel, de deux facteurs :

• *La capacité de la sondeuse* (mât, tête de rotation, force de traction) : cent mètres de tiges 4 1/2" pèsent environ 2,5 tonnes ; une sondeuse dont la capacité est de 10 tonnes permet donc de forer jusqu'à 200 mètres en gardant un coefficient de sécurité voisin de 2.

• *La pression d'air comprimé :* elle n'a d'influence notable sur la profondeur limite que lorsqu'on fore sous la nappe. En effet, en terrains secs, les pertes de charge restent négligeables tant que la profondeur ne dépasse pas 150 à 200 m.

Dans la nappe, au contraire, le poids de l'émulsion air + eau pendant le forage, ou le poids de la colonne d'eau à chaque reprise de la perforation, réduisent d'autant la pression efficace disponible au niveau du marteau ; toutefois cela ne peut devenir gênant que lorsque le forage est très productif et il est rare, dans ce cas, que l'on doive forer très profondément sous la nappe.

A titre d'exemple, nous citerons les profondeurs maximales observées il y a quelques années avec une perforatrice légère (force de traction 3,5 t), forant en basse pression (10,5 bars) dans des formations volcaniques (basalte et scories) :

90 m en 8 1/2" avec des tiges ∅ 140 mm (niveau statique 50 m, débit en forage 10 m^3/h, débit exploitable 30 m^3/h),

190 m en 6" avec des tiges ∅ 120 mm (injection de mousse, niveau statique 160 m, débit en forage < 1 m^3/h, débit exploitable 10 m^3/h).

3.1.3. – Utilisation de la boue sur les machines mixtes

3.1.3.1. – Nécessité du recours à la boue en forage villageois

La pompe à boue apparaît souvent comme un accessoire indispensable des sondeuses à l'air comprimé pour exécuter des forages peu profonds dans le socle aussi bien que dans les formations sédimentaires.

En région de socle, en effet, la traversée des niveaux altérés qui surmontent la roche dure peut être difficile par forage à l'air comprimé (même avec l'emploi de mousse) lorsque ces niveaux sont épais et mal consolidés. Il en est de même dans les formations sédimentaires, pour la traversée de terrains non cohérents tels que sables et argiles.

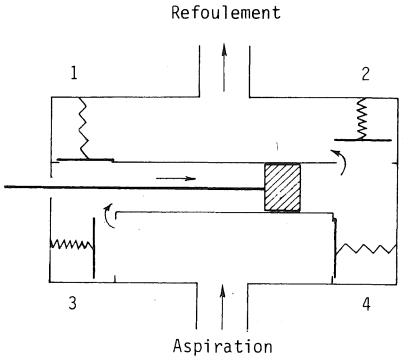
La décision d'équiper un atelier de forage à l'air avec une pompe à boue dépend des conditions géologiques et de la spécificité des programmes sur lesquels il est destiné à travailler. On rappellera ainsi, à titre d'exemple, qu'en Côte d'Ivoire, où les formations volcano-sédimentaires produisent fréquemment une altération argilo-sableuse très épaisse, la principale société de forage a entrepris d'équiper d'une pompe à boue toutes les machines de son parc qui ne l'étaient pas encore.

Les pompes à boue utilisées en forage « villageois » ont un débit relativement modeste puisqu'elles sont destinées seulement à permettre de traverser des horizons de moins de 100 m d'épaisseur avec un diamètre de foration qui dépasse rarement 250 mm.

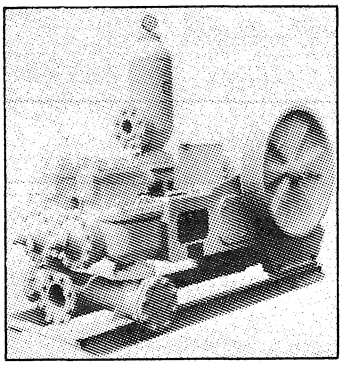
3.1.3.2. – Débit et pression nécessaires

En forage rotary profond, le débit de la pompe à boue est calculé pour assurer une vitesse de remontée minimum dans l'espace annulaire de

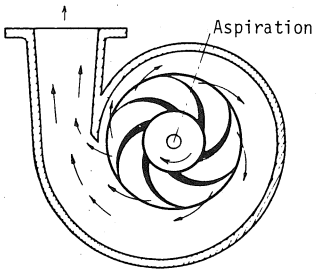
POMPE A BOUE DUPLEX Fig. 20

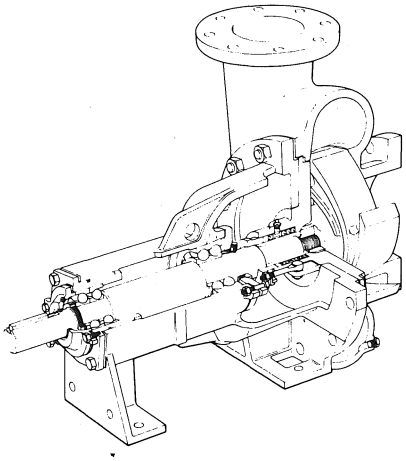


(le schéma ne représente qu'une moitié de la pompe)



POMPE A BOUE CENTRIFUGE Fig. 21





50 m/mn, ce qui, transposé dans le cas d'un forage en 8 1/2" avec des tiges de 4 1/2", correspond à un débit de 1350 l/mn. Dans les forages en petit diamètre, étant donné les faibles profondeurs concernées, l'expérience montre que l'on peut se contenter de vitesses de remontée beaucoup plus faibles, de l'ordre de 20 à 30 m/mn. Le débit de la pompe à boue devra donc se situer dans la gamme de 500 à 1500 l/mn.

La pression requise à la sortie de la pompe à boue est fonction des pertes de charge dans le circuit de boue. En première approximation, celles-ci ne doivent pas dépasser 2 kg/cm^2 dans les éléments de surface et 1,5 kg/cm^2 pour 100 m de tiges ; en admettant une perte de charge de 5 à 6 kg/cm^2 au niveau du trépan, la pression minimum de refoulement de la pompe devrait être de l'ordre de 10 kg/cm^2.

3.1.3.3. – Choix du type de pompe

Pour les forages peu profonds, on peut utiliser deux types de pompes :

- les pompes volumétriques (pompes à cylindres horizontaux, à simple effet ou à double effet),
- les pompes centrifuges.

• *Les pompes volumétriques* permettent d'obtenir des pressions élevées mais ne délivrent un débit important qu'au prix d'un encombrement, d'un poids et d'un coût élevés. Parmi celles-ci, les pompes à pistons plongeurs se situent dans la gamme des débits les plus bas : d'une part parce que ce sont des pompes à simple effet, d'autre part parce que le diamètre du piston ne peut dépasser certaines limites (110 mm au maximum pour la pompe citée en annexe 3.4.2, ce qui donne un débit maximum de 700 l/mn à 15 bars).

Les pompes à double effet (duplex ou triplex) (Fig. 20) sont des pompes utilisées classiquement en forage rotary ; elles permettent d'obtenir des pressions élevées ainsi que de forts débits ; leur inconvénient, outre leur poids et leur prix élevés, est d'être d'un entretien un peu moins facile que les pompes centrifuges.

• *Les pompes centrifuges* (Fig. 21) sont caractérisées par la possibilité de donner un débit élevé mais leur pression de refoulement est limitée à un maximum de 12 bars, ce qui conduit à les éliminer pour tous les forages à la boue quelque peu profonds. Leur avantage tient à leur faible encombrement, à leur coût modéré et à leur entretien facile. Par contre, elles peuvent parfois présenter des difficultés d'amorçage si elles sont placées trop haut par rapport au bac d'aspiration.

L'exemple ci-après illustre la différence de poids et d'encombrement entre une pompe centrifuge et une pompe volumétrique.

Pompes	Débit max. l/mn	Pression max. bars	Dimensions cm×cm×cm	Poids kg
Pompe à piston à double effet Failling 5" × 6 1/2"	788	22	70×80×200	1180
Pompe centrifuge Mission 3 × 2 × 13	1137	12	50×45×80	200

L'enquête que nous avons réalisée auprès des constructeurs et des foreurs montre que si les pompes volumétriques sont plus polyvalentes, la pompe centrifuge peut parfaitement convenir dans la plupart des cas pour les forages en petit diamètre à faible profondeur.

Nous indiquons, en annexe 3.4.2, les débits et pressions de refoulement de plusieurs pompes appartenant aux catégories précédentes.

3.1.3.4. – Puissance nécessaire à l'entraînement d'une pompe duplex

Si l'on suppose, pour la pompe, un rendement mécanique de 0,85 et pour la transmission un rendement de 0,9, la puissance P à fournir par le moteur est donnée par la formule :

$$P = \frac{p \times Q}{340}$$

dans laquelle :

P = puissance en CV,
p = pression de refoulement en kg/cm²
Q = débit en l/mn

Ainsi, pour une pompe débitant 1000 l/mn à 20 bars, la puissance requise est-elle d'environ 60 CV.

3.2. – FORAGE AU ROTARY A LA BOUE

Nous avons parlé jusqu'ici des sondeuses légères, adaptées à la réalisation de forages en petit diamètre (150 à 200 mm) dans le socle et fonctionnant soit au rotary à l'air comprimé, soit avec un marteau fond de trou ; la plupart de ces appareils peuvent être accessoirement équipés pour forer à la boue, mais cela ne constitue pas leur fonction principale.

Nous abordons ici l'étude des machines rotary conçues pour forer avec la boue comme seul fluide de circulation. En Afrique, l'utilisation classique de cette méthode concerne l'exécution de forages à moyenne ou grande profondeur dans les formations sédimentaires.

Il n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage de décrire les appareils et les méthodes de forage au rotary à la boue. Cette technique a fait l'objet de nombreux traités, notamment dans son application à la recherche pétrolière. Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur aux cours de l'ENSPM (*) et plus généralement aux publications réalisées sous l'égide de l'Institut Français du Pétrole (**).

En ce qui concerne plus particulièrement le forage d'eau, nous donnons en annexe 10 une liste de quelques ouvrages de référence dont le plus connu est probablement le livre de A. Mabillot « Guide pratique du forage d'eau » [14].

Dans ce chapitre, nous ne ferons que rappeler les caractéristiques essentielles et les contraintes du forage au rotary à la boue après avoir passé en revue ses applications possibles au forage d'eau en Afrique.

3.2.1. – Principe

La perforation de la roche est obtenue par l'action conjuguée de la pression sur l'outil et de la rotation. Cette pression est appliquée par le poids des tiges et sur les petites machines où celui-ci ne suffirait pas, par la tête de rotation ou par un dispositif de poussée à vérins ou à chaînes (pull down). Pour les forages profonds, le poids des tiges devient trop important pour pouvoir être supporté par une tête de rotation et les machines comportent donc une table de rotation.

Les trois types d'outils communément utilisés sont le tricône (qui convient pour des roches de dureté variée, à l'exception des roches très dures), l'outil à lames (pour les roches tendres) et la couronne ou la tête diamantée (pour les roches dures ou très dures).

Le fluide de forage est la boue, parfois remplacée par de l'eau ou une boue légère dans les forages peu profonds en petit diamètre. La fabrication, le contrôle puis l'élimination de la boue au moment de la mise en production constituent l'une des contraintes importantes du rotary dans les forages profonds.

(*) ENSPM : Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs
4, avenue du Bois-Préau - 92500 Rueil-Malmaison

(**) Institut Français du Pétrole
1, avenue du Bois-Préau - BP 311 - 92500 Rueil-Malmaison

3.2.2. – Domaines d'application

Le forage au rotary à la boue, conçu pour forer sans tubage dans les terrains meubles ou peu consolidés, est la seule méthode permettant de réaliser des forages à moyenne ou grande profondeur dans les bassins sédimentaires récents, constitués de roches variées, généralement tendres et peu cohérentes.

Son domaine d'élection est celui des roches de dureté faible à moyenne. Au-delà d'une certaine dureté de la roche, son rendement diminue fortement, de sorte que le forage au tricône convient mal aux roches dures ou très dures.

Il n'y a pas de limite technique à la profondeur qui peut être atteinte mais une limite de prix de revient. En Afrique de l'Ouest, il existe des forages d'eau dont la profondeur atteint près de 2000 m (*) mais, le plus souvent, la profondeur des ouvrages se situe entre 100 et 500 mètres.

Compte tenu de la gamme des débits habituellement captés (20 à 200 m^3/h) et des épaisseurs des massifs filtrants à mettre en place dans les aquifères sableux, les diamètres de perforation se situent entre 500 et 600 mm (20" et 24") au départ et 250 et 380 mm (10" et 15") en fin de forage.

A côté de ces forages à moyenne ou grande profondeur, qui constituent le domaine d'application courant de la méthode rotary à la boue, celle-ci peut également servir pour réaliser des forages peu profonds destinés à l'usage villageois. Nous verrons un peu plus loin à quelles conditions cet emploi pourrait être généralisé.

3.2.3. – Forages à moyenne ou grande profondeur dans les formations sédimentaires

• *Matériel*

La gamme des matériels est très variée selon la profondeur des forages à réaliser. Certains des appareils mixtes décrits en annexe 4, munis des accessoires convenables pour la boue, peuvent permettre de forer jusqu'à environ 400 m. L'annexe 4 fournit en outre les caractéristiques d'un appareil capable de forer jusqu'à 800 mètres de profondeur avec des tiges de 89 mm (3 1/2") ou 1500 m avec des tiges de 73 mm (2 7/8"). La composition d'ateliers complets est donnée en annexes 6.2 et 6.3.

• *Mise en œuvre*

La pratique du forage au rotary à la boue, surtout quand il s'agit de profondeurs importantes, ne peut s'improviser et réclame beaucoup de

(*) 1786 m au forage de Tahabanat au Mali.

savoir-faire. Le contrôle de la qualité de la boue, l'adaptation des paramètres de forage à la dureté du terrain, les cimentations, le positionnement des crépines au droit des couches aquifères, la mise en place du massif filtrant, le nettoyage du forage et son développement, sans compter les instrumentations parfois nécessaires, sont autant d'opérations qui réclament une grande technicité.

Le procédé est relativement lent, compte tenu de toutes les opérations annexes au forage proprement dit et les risques sont plus grands que sur les forages peu profonds. Le maintien en circulation de la boue exige un travail continu à 2 ou 3 postes. Enfin, la diversité et la complexité du matériel et des opérations demande un appui constant de la base.

La consommation d'eau est importante et il faut prévoir des moyens d'approvisionnement lourds pour acheminer sur les chantiers les fournitures nécessaires (eau, bentonite, ciment, fuel, etc.).

Il en résulte que cette méthode est onéreuse.

En terrain tendre, et pour des profondeurs pas trop importantes, le prix de revient du mètre linéaire de forage rotary est nettement plus élevé que celui du mètre linéaire de forage au battage ou que celui du forage à l'air dans les terrains consolidés. Les prix sont cependant très variables en fonction des conditions locales et de l'importance des programmes.

3.2.4. – Possibilités d'application du rotary à la réalisation de forages villageois dans les terrains sédimentaires

Les données qui précèdent concernent des ouvrages d'un débit relativement important, destinés à être exploités par pompe à moteur.

On ne devrait pas pour autant, nous semble-t-il, écarter le rotary à la boue pour la réalisation d'ouvrages de faible débit dans les nappes peu profondes. Cette application nécessiterait cependant d'en abaisser le coût, ce qui devrait être possible :

- en adaptant la dimension du matériel aux ouvrages à réaliser,
- en réduisant le diamètre des ouvrages au diamètre strictement nécessaire à la mise en place d'une pompe à main,
- en utilisant une boue réversible, ce qui, d'une part, limite la quantité de produits à transporter, d'autre part, devrait réduire considérablement, sinon annuler, le temps de nettoyage du forage,
- en simplifiant le développement lui-même, compte tenu des faibles débits à fournir.

3.3. – FORAGE CAROTTE

Dans l'énumération des méthodes de forage susceptibles d'être utilisées pour la recherche d'eau, il convient de mentionner le forage carotté, bien que son application à cette fin ait été peu fréquente jusqu'ici. Une expérience récente, réalisée au Togo (*), montre cependant que, dans certaines conditions, cette méthode peut être utilisée pour effectuer des points d'eau villageois équipés de pompes à main. Son intérêt réside dans la grande simplicité du matériel, qui le rend accessible à du personnel peu spécialisé et permet d'obtenir des coûts de forage réduits, contrairement à ce que pourrait suggérer l'emploi de couronnes au diamant.

• *Matériel*

La machine est une sondeuse légère de carottage minier, dont la description figure en annexe 4.16. Elle est entraînée par un moteur de 18 CV, la pompe à boue étant, quant à elle, mue par un moteur de 6 CV. Son poids (environ 500 kg) la rend aisément transportable sur une remorque derrière un véhicule léger 4 × 4. Il est nécessaire de disposer en outre d'une citerne de 2 ou 3 m^3 qui peut également être montée sur remorque. Pour les manœuvres des tiges et du tubage, on utilise une chèvre démontable.

• *Mise en œuvre*

Le forage est réalisé à l'eau claire. Dans les altérites, on fore directement avec le tubage provisoire muni à sa base d'une couronne au carbure de tungstène ou au diamant. Dans la roche dure, le forage est poursuivi avec le carottier dont l'outil est une couronne diamantée.

Les diamètres de perforation sont très faibles : de l'ordre de 90 mm dans les altérites et de 60 mm dans la roche saine. Le forage définitif est tubé seulement au droit des altérites, avec du tube galvanisé de 50 × 60 mm, ancré dans la roche dure (**). Le diamètre du cylindre de pompe que l'on peut introduire dans ce type de forage (43 mm, 1 11/16") autorise un débit instantané d'environ 500 l/h en pompage à main (***).

Les essais de débit peuvent être faits en adaptant sur le corps d'une pompe à main classique un dispositif spécial d'entraînement mû par un moteur (pump jack).

Trois personnes (1 foreur et 2 aides) suffisent pour mettre en œuvre ce type d'atelier. Dans les conditions normales, il faut moins d'une semaine, tout compris, pour réaliser un forage d'une quarantaine de mètres, dont 25 mètres en roche dure.

(*) Les données ci-dessous sont tirées de cette expérience.

(**) Le tube galvanisé devrait être prochainement remplacé par du tube PVC, afin de se prémunir contre l'agressivité des eaux du Socle.

(***) Peu de fabricants proposent des cylindres de cette taille ; au Togo on utilise la pompe Monitor, fabriquée par Baker Manufacturing Compagny, U.S.A.

• *Avantages*

Le premier avantage de cette méthode est son prix de revient réduit : faible coût d'investissement (de l'ordre de 27 millions de FCFA pour un atelier complet, véhicule compris) ; faible coût de fonctionnement.

Elle peut être employée par du personnel peu spécialisé, sur des chantiers autonomes nécessitant peu d'appui de la base et est donc aisément vulgarisable.

Le carottage continu du terrain permet d'avoir une bonne connaissance du milieu traversé (intensité de la fracturation).

• *Inconvénients*

Les pompes susceptibles d'être installées sur ce type d'ouvrage ont un débit instantané notablement plus faible que celles adaptées aux forages réalisés au marteau fond de trou (500 l/h contre 700 à 1200 l/h).

Le procédé est relativement lent : dans les conditions normales, 3 à 4 fois plus lent que le marteau fond de trou à profondeur égale.

Il consomme de l'eau (environ 6 à 10 m^3 par forage, contre 2 à 3 m^3 pour un forage au marteau) : cela ne pose pas de problème au Togo, dans la zone où opère cet atelier, mais pourrait en poser en zone sahelienne.

La machine que nous avons décrite ici ne permet pas de traverser des altérites très épaisses : sa puissance risque en effet d'être insuffisante pour extraire un tubage provisoire de plus de 30 ou 40 m.

Ce procédé ne permet pas la mise en évidence immédiate des aquifères comme dans le forage à l'air comprimé. On y remédie en effectuant à intervalles réguliers de courts essais d'infiltration.

Le diamètre des forages est très faible, ce qui ne permet pas de les tuber dans le socle. Cependant, il est possible de tuber convenablement les altérites en réalisant à leur base une étanchéité suffisante.

3.4. – FORAGE AU BATTAGE

Il s'agit, rappelons-le, du procédé de forage le plus ancien et partant, le plus rustique, qui fut utilisé en Chine dès le début de notre ère.

3.4.1. – Principe

Le forage est réalisé par fractionnement de la roche sous l'effet de la chute répétée d'un trépan suspendu à un câble. Le mouvement alternatif du trépan est produit par un balancier actionné par une bielle et une manivelle. Un système d'avance permet de lâcher le câble au fur et à

mesure de l'approfondissement du forage. Les sédiments sont récupérés au moyen d'une « soupape » descendue dans le forage au moyen d'un treuil secondaire. La perforation est réalisée sans circulation d'eau ou de boue.

3.4.2. – Domaine d'utilisation

• *Nature du terrain :* le battage au câble est une méthode de forage universelle qui permet de traverser pratiquement tous les types de terrains. Cependant, au-delà d'une certaine dureté de la roche, la vitesse d'avancement devient très faible et le rendement diminue en conséquence. Dans les terrains tendres et non consolidés, le battage est plus lent que le forage au rotary. Le domaine d'élection de cette méthode est donc celui de terrains cohérents, pas trop durs, tels que grès tendres, marnes indurées, schistes ou calcaires fracturés. Dans les formations qui occasionnent des pertes de boue, cette méthode, du fait de l'absence de fluide de circulation, présente un avantage déterminant sur le rotary.

Dans les formations non consolidées, il est nécessaire de descendre une colonne de tubage provisoire au fur et à mesure de l'avancement du forage. Les frottements contre les parois du forage limitent toutefois la progression de la colonne et il peut être nécessaire de télescoper un ou plusieurs tubages à l'intérieur de la première colonne pour poursuivre le forage ; ceci limite, en définitive, la profondeur maximum qu'il est possible d'atteindre.

• *Profondeur maximum et diamètre :* dans les terrains cohérents, le battage permet techniquement d'atteindre des profondeurs importantes (plusieurs centaines de mètres), mais on atteint vite sa limite économique car le rendement diminue avec la profondeur (alors qu'au rotary le rendement augmente jusque vers 50 m pour rester stable ensuite). Cette méthode convient donc bien pour les forages peu profonds (moins d'une centaine de mètres) ; elle est peu utilisée au-delà de 150 mètres, sauf dans des cas très spéciaux.

Les diamètres de forage habituels sont compris entre 250 et 500 mm (10" et 20"), lorsqu'on fore dans des terrains sédimentaires, ce qui est sans doute exclusivement le cas à l'heure actuelle. Nous verrons cependant au chapitre 4 quil existe des machines de battage capables de forer jusqu'en 1,50 m de diamètre.

3.4.3. – Avantages et inconvénients

Parmi les avantages de la méthode, il faut noter :

• La simplicité et la robustesse du matériel : la longévité d'une machine de battage est supérieure à celle d'une machine rotary et, a

fortiori, à celle d'une machine hydraulique à tête de rotation. Une grande partie des dépannages peuvent être effectués sur place, sans l'aide de la base. L'autonomie des chantiers est ainsi plus grande.

• Le coût d'investissement modéré : un atelier de battage coûte environ deux fois moins cher qu'un atelier rotary, à capacité égale. Il en résulte que les immobilisations ont relativement moins d'effets sur les prix de revient.

• La facilité de la mise en œuvre due, en particulier, à l'absence de boue de forage : le battage peut être entrepris avec du personnel relativement peu spécialisé et il constitue, en outre, un excellent moyen de formation pour les foreurs. Du fait de l'absence de boue, le travail peut s'effectuer à un seul poste.

• L'absence de fluide de circulation permet le repérage facile de l'aquifère, évite le colmatage des parois, simplifie le développement et accroît ainsi la fiabilité du forage.

• La faible consommation d'eau : quelques dizaines de litres par heure suffisent normalement pour entretenir un volume d'eau au fond du forage et faciliter le travail de l'outil.

En revanche, l'inconvénient du battage est évidemment sa lenteur : il en résulte que cette méthode n'est bon marché qu'en terrains cohérents et pas trop durs et pour des ouvrages pas trop profonds. Elle se prête mal aux programmes importants, sauf à multiplier le nombre d'ateliers, ce qui entraîne des problèmes de logistique.

CHAPITRE 4

MATÉRIEL ET MÉTHODES POUR LA RÉALISATION DE PUITS FORÉS

Le puits répond à la nécessité de préserver l'exhaure traditionnelle là où l'exhaure par pompe pose des problèmes d'entretien ou de coût trop élevé. C'est pourquoi il restera longtemps un ouvrage adapté et nécessaire en Afrique ; aujourd'hui encore il occupe une place importante dans les programmes d'équipement de plusieurs Etats. Toutefois, la lenteur du procédé de fonçage à la main, par ailleurs très bien adapté aux conditions locales d'exécution, conduit à examiner de près les possibilités qui pourraient être offertes par le fonçage mécanique des puits.

Quatre méthodes de forage en grand diamètre sont exposées ici : elles répondent inégalement à la question posée et sont adaptées chacune à des conditions spécifiques ; ce sont :

- Le forage à la tarière-bucket,
- Le forage à la benne-trépan,
- Le battage en grand diamètre,
- Le rotary en circulation inverse.

Le forage de puits à la tarière a été pratiqué, notamment en Côte d'Ivoire, sur des programmes suffisamment importants pour qu'il soit possible d'émettre un avis valable sur cette méthode et de préciser son domaine d'utilisation.

Le forage à la benne-trépan est pratiqué depuis plusieurs années en Guinée-Bissau, semble-t-il avec succès, pour réaliser des puits assez peu profonds en alluvions et dans des grès, mais nous n'avons pas de données sur les résultats de cette expérience. Il est également utilisé depuis peu de temps au Sénégal et au Niger, mais il est encore trop tôt pour tirer une conclusion sur ces travaux.

Le battage en grand diamètre n'a, à notre connaissance, encore jamais été utilisé en Afrique de l'Ouest ; cette méthode peut cependant permettre de réaliser mécaniquement des puits dans des formations de dureté moyenne (schistes, pélites, grès tendres, etc.) en zone sahélienne.

Le rotary en circulation inverse sera mentionné pour mémoire, car ses conditions d'emploi très spécifiques en limitent beaucoup la portée.

Nota : Ce chapitre emprunte de nombreux extraits à l'ouvrage [23] : « La construction des puits en Afrique tropicale » BURGEAP 2e éd. 1980, édité par le Ministère français de la Coopération et du Développemnt (Série Techniques Rurales en Afrique).

4.1. – FORAGE A LA TARIÈRE (BUCKET)

4.1.1. – Caractéristiques générales

Nous nous rapportons ici au matériel genre Calweld qui a été largement utilisé en Côte-d'Ivoire (*). Il est à noter que son emploi dans ce pays ne répondait pas au souci d'intégrer un diamètre permettant le puisage, puisque les ouvrages y sont équipés de pompes, mais aux autres intérêts de cette technique dans les terrains anciens.

L'excavation est réalisée par un cylindre à lames hélicoïdales (bucket) fixé à l'extrémité d'un train de tige télescopique (kelly) entraîné par une table de rotation.

Le diamètre de forage maximum est de 1,50 m. Des tubages provisoires peuvent être utilisés pour maintenir le terrain. Le puits est garni de buses en béton d'un diamètre maximum de 1 m intérieur.

Un puits simple, sans réduction de diamètre, peut être réalisé et équipé en une journée.

Cette technique présente trois contraintes principales :

- la profondeur, très limitée, du fonçage (29 m pour le matériel présenté ci-après), qui restreint pratiquement l'usage de cette technique aux nappes dont le niveau est à moins de 20 m sous le sol ;
- l'adaptation du procédé aux seuls terrains à la fois tendres et cohérents ;
- les risques d'éboulement constants et les difficultés de mise en place de la colonne de buses.

De plus le matériel, lourd et lent, réclame une bonne infrastructure routière.

Le même matériel permettant d'effectuer à la fois les sondages de reconnaissance et les puits d'exploitation, ce procédé est particulièrement bien adapté aux formations d'altération des terrains anciens, où la productivité des nappes est aléatoire.

Dans le cadre d'une réalisation systématique en Côte-d'Ivoire en 1979 [24], comportant 208 puits équipés de 20 m de profondeur moyenne et environ 600 puits de reconnaissance, le coût du mètre linéaire tout compris, actualisé à 1983, s'établit à moins de 200.000 FCFA.

4.1.2. – Description d'un atelier CALWELD 250 B

Ce type de matériel, employé en Côte-d'Ivoire, peut être considéré comme un bon exemple.

(*) Le présent chapitre est tiré de l'expérience ivoirienne [24].

La machine (fig. 27) est montée sur un véhicule porteur tous terrains d'une charge utile de 25 t. Trois autres véhicules lourds sont nécessaires pour les déplacements et les transports.

La machine comprend :

- moteur de 240 CV,
- derrick de 12,80 m,
- kelly télescopique de 3 éléments de 10 m,
- treuil à double tambour (puissance 4 t) pour kelly et câble de service,
- table de rotation :
  - diamètre intérieur : 1,32 m,
  - couple maximum 5 000 m. kg,
  - vitesse de rotation moyenne : 20 tr/mn,
- 2 vérins latéraux de stabilisation à l'arrière,
- mandrin hydraulique avec vérins verticaux pour passage de terrains indurés,
- bras latéral de décharge pour l'évacuation des déblais.

Des « buckets » de deux diamètres sont couramment utilisés (fig. 28 en annexe 4.21) : 1 m et 1,20 m. Le bucket de 1,20 m peut être équipé d'un aléseur permettant de forer en 1,50 m.

Les tubages

Le terrain peut être maintenu par 3 tubages de protection pouvant être télescopés au fur et à mesure de l'avancement ; ils sont en tôle roulée et soudée de 4 mm, garnis de guides extérieurs de centrage.

Ils ont des diamètres de 1,30, 1,20 et 0,95 m et une longueur de 6 à 7 m, ce qui donne une longueur de 16 m pour les 3 tubes télescopés sur 1 m, compte tenu du recouvrement.

Les accessoires comprennent :

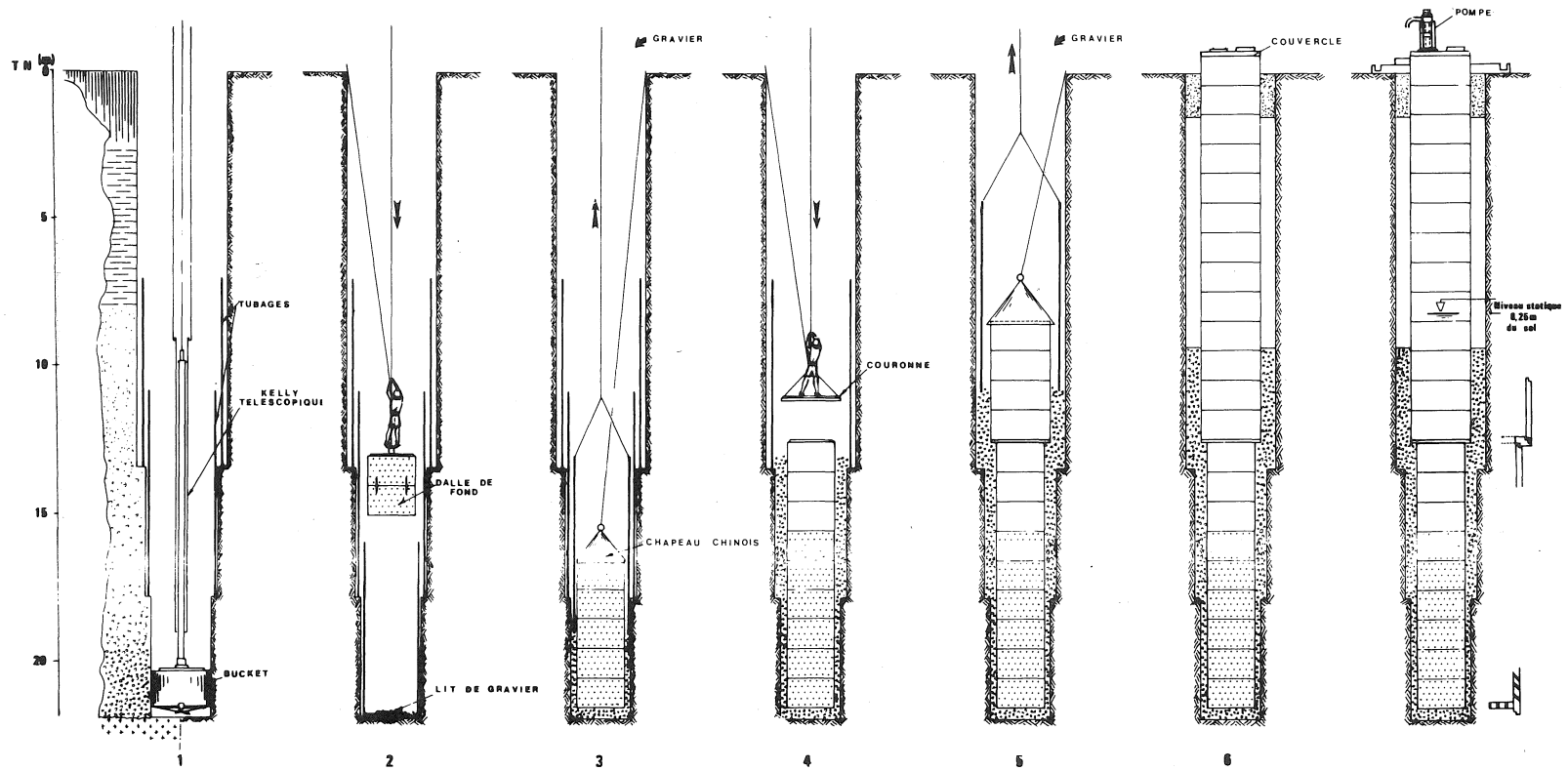
- des guides de centrage pour les buses descendues à l'intérieur du tubage,
- des ciseaux à buse pour la descente des buses dans le puits,
- deux chapeaux chinois pour le gravillonnage de l'espace annulaire.

4.1.3. – Equipement du puits

Les buses sont en béton armé vibré avec des encoches. Elles sont pleines pour le cuvelage, percées de trous pour la crépine, et ont 1 m de hauteur avec les caractéristiques suivantes :

PHASES DE LA CONSTRUCTION D'UN PUITS FORÉ A LA TARIÈRE EN 2 DIAMÈTRES

Fig. 22



Buses	Epaisseur (m)	Nbre de trous (crépines)
Buse de 1 m.	0,10	180
Buse de 0,80 m	0,08	140
Buse de 0,60 m	0,075	95

Elles sont posées sur une dalle de fond solidaire de la première buse, et reposant sur un matelas de gravier. Les buses suivantes sont successivement empilées. Des couronnes intermédiaires permettent de raccorder les buses de diamètre différent.

4.1.4. – Mode d'exécution

4.1.4.1. – Sondages de reconnaissance

Ils sont réalisés dans les mêmes diamètres que ceux utilisés pour les puits. Les tubages de travail ne sont pas forcément nécessaires.

La vitesse de réalisation des sondages, malgré les gros diamètres de foration, permet de faire environ 60 m de reconnaissance par jour, soit 3 sondages en moyenne, déplacements compris.

4.1.4.2. – Puits d'exploitation

Le puits est exécuté à environ 5 m du sondage jugé positif. Les terres retirées du puits permettent de combler le trou du sondage précédent.

Le puits doit nécessairement être réalisé dans la journée (au moins busé et gravillonné jusqu'au niveau statique).

L'exemple ci-après est tiré du compte rendu d'exécution d'un puits busé en deux diamètres (800 et 600 mm) et exécuté en Côte-d'Ivoire (fig. 22).

Phase 1

- Foration ⌀1 500 mm (bucket ⌀ 1 200 mm + aléseur), de 0 m à 13,40 m.
  Pose tubage ⌀ 1 300 mm, de 13,40 m à 7,00 m (8 h 05 à 9 h 00).
- Foration ⌀1 200 mm (bucket ⌀ 1 200 mm), de 13,40 m à 17,80 m.
  Pose tubage ⌀ 1 100 mm, de 17,80 à 10,80 m (9 h 00 à 9 h 35).
- Foration ⌀1 000 mm (après changement de bucket), de 17,80 m à 21,90 m (foration arrêtée à 21,90 m sur le socle granitique).
  Pose tubage ⌀ 950 mm, de 21,90 m à 15,90 m (9 h 35 à 10 h 15).

Phase 2

- Descente de la buse crépinée « dalle de fond » ⌀ 600 mm avec la première buse ⌀ 600 mm crépinée sur un lit de gravier (0,30 m).

Phase 3

- Descente de 3 buses ⌀ 600 mm crépinées.
- Gravillonnage de l'espace annulaire à l'aide du petit chapeau chinois (pour insertion du gravier à la périphérie du trou) et retrait du tubage ⌀ 950 mm au fur et à mesure de l'opération (11 h 25).

Phase 4

- Descente de la dernière buse ⌀600 mm crépinée et de 3 buses ⌀ 600 mm pleines.
- Deuxième phase de gravillonnage de la colonne ⌀ 600 mm avec retrait du tubage ⌀ 1 100 mm.
- Pose de la couronne intermédiaire à 12 h 45.

Phase 5

- Descente de 4 buses ⌀ 800 mm pleines.
- Gravillonnage de l'espace annulaire, et retrait du tubage ⌀ 1 300 mm, à 14 h 30.

Phase 6

- Descente des dernières buses ⌀ 800 mm pleines.
- Pose du couvercle.
- Damage de l'espace annulaire avec du tout-venant (déblais du puits).
- Cimentation de l'espace annulaire sur 1,50 m.
- Fin des travaux à 16 h 20.

Travaux de finition

- Développement de l'ouvrage le lendemain (4 h à la pompe à air comprimé).
- Essai de pompage (2 h) et observation de la remontée pendant 12 h.
- Construction de la superstructure } ultérieurement.
- Pose de la pompe } ultérieurement.

Nota

Le temps total d'exécution d'un puits Calweld tel qu'il vient d'être décrit est de 6 jours :

1er jour : Exécution de 1, 2 ou 3 puits de reconnaissance.

2e jour : Approvisionnement en buses et gravier, et réalisation du puits d'exploitation.

3e jour : Développement, essai de débit.

4e jour : Construction de la superstructure.

5e jour : Consolidation (séchage) de la superstructure.

6e jour : Installation de la pompe à main.

On remarquera que la machine est libérée du chantier dès la fin de la 2e journée. Les opérations ultérieures sont réalisées par des équipes différentes.

4.1.4.3. – Observations diverses

a) La réussite de cette technique est basée avant tout sur la rapidité d'exécution. La décompression des terrains après sondage doit s'accompagner d'une désaturation, d'où une diminution importante de la perméabilité aux abords des parois et une consolidation des terrains. En outre, les parois sont glacées par le passage de l'outil. Le sondage se fait ainsi généralement à sec : les venues d'eau en cours de sondage ne se manifestent immédiatement que dans les fissures qui affectent les horizons de roche altérée à structure conservée, ou dans les niveaux les plus perméables d'arènes grenues.

La stabilité des parois dans ces formations argilo-sableuses n'est que temporaire. En particulier, la remontée du niveau d'eau entraîne la destruction progressive des parois. Pour pallier ces éboulements, notamment pendant le temps que dure la mise en place des buses, il est en général nécessaire de poser le tubage métallique de protection.

Le gravillonnage de l'espace annulaire est une nécessité absolue, non pas pour constituer un massif filtrant mais pour soutenir les terrains. Sans ce soutènement, la structure du terrain (qui a toujours une certaine cohésion) est détruite, des éboulements se produisent, les altérites sablo-argileuses se liquéfient et les ouvrages s'ensablent. L'utilisation de gravier de 15 mm concassé, granitique, est parfaitement adaptée à cet objectif.

b) La grande rapidité d'exécution des ouvrages explique que ce procédé ait trouvé son application dans les terrains cristallins de Côte-d'Ivoire, pays qui a mis en route d'importants programmes de puits, et dont l'infrastructure est développée.

Un tel atelier, qui représente une immobilisation importante, doit fonctionner à plein temps, ce qui correspond bien aux conditions des gros marchés d'entreprise.

Sa rentabilité devient rapidement problématique avec une utilisation discontinue, par exemple en régie administrative dans le cadre de campagnes de durée limitée.

4.2. – FORAGE A LA BENNE-TRÉPAN

4.2.1. – Données générales

Par rapport à la technique précédente, le battage à la benne présente deux avantages importants :

- la profondeur utile dépasse 100 m,
- on peut forer des terrains beaucoup plus durs qu'avec la tarière ; toutefois le rendement n'est satisfaisant qu'avec des formations de dureté faible ou moyenne.

Il est à noter que, si le matériel qui va être décrit ci-après est couramment employé en France, dans la Craie du Bassin Parisien (roche tendre de bonne tenue), il commence seulement à être utilisé en Afrique (en Guinée-Bissau dans les terrains anciens, au Niger dans les grès tendres du Continental Terminal et au Sénégal). Les données d'utilisation dont on dispose sont donc aujourd'hui encore fragmentaires.

Dans les terrains peu consolidés, et notamment dans la nappe, on utilise des bennes à coquilles hémisphériques classiques ; en terrain dur, par contre, et c'est là l'originalité des matériels Secmi et Galinet-Teknifor (fig. 29 et 30 en annexes 4.22 et 4.23) présentés ici, on emploie des bennes preneuses renforcées par une couronne externe de dents, dont le poids total peut atteindre 5 t, ce qui permet de briser les terrains durs. Les terrains très durs sont forés au trépan de 5 t et plus.

Le diamètre des bennes peut aller jusqu'à 2 m.

Pour la construction des puits, on peut envisager deux procédés :

- en terrain consolidé, nécessitant ou non l'emploi de tubages de travail, le forage est mené jusqu'au fond ; puis on met en place une colonne de buses emboîtées, suivant la méthode décrite ci-dessus pour les puits à la tarière ;
- en terrain peu consolidé par contre, on arrête dans une première phase le puits au niveau statique, puis on met en place un cuvelage ancré par cimentation dans le terrain.

On reprend ensuite le fonçage avec une benne de plus petit diamètre, en havant une colonne de captage. Cette technique rejoint donc celle du puits dit « à main » ;

- en terrain dur ou très dur, un complément de matériel de battage permet de poursuivre le puits à la benne par un forage de petit diamètre (6").

4.2.2. – Description d'un atelier

Montée sur un véhicule porteur tous terrains de 20 t, la machine de forage au battage à câble comporte :

- une flèche de 9 m,
- un treuil de battage de 10 t, avec 80 m de câble,
- un treuil de manœuvre de 3 t, avec 80 m de câble,
- un moteur diesel de 100 CV,
- 2 vérins de stabilisation.

Les outils de forage

La benne-trépan est conçue de manière à protéger les coquilles de ramassage lors du fonçage. Ces coquilles s'appuient contre le trépan qui encaisse le choc lors du fonçage. Le modèle actuel est monocâble mais, prochainement, une benne à 2 câbles permettra d'effectuer plusieurs manœuvres successives de fonçage, afin de remonter le maximum de déblais.

Les outils sont les suivants :

- benne-trépan ∅ 1 500 mm (5 t),
- élargisseur ∅ 1 700 à 2 000 mm, pour benne à trépan,
- benne à coquilles ∅ 1 500 mm et 1 000 mm,
- benne-trépan ∅ 1 150 mm (3 t),
- trépan en croix ∅ 1 150 mm,
- soupape ∅ 700 mm.
- accessoires divers.

Les tubages de travail sont en éléments de 6 m.

Un atelier de construction de buses doit être aménagé, ainsi qu'un atelier de développement et d'essai.

2 camions gros porteurs sont nécessaires au transport du matériel, des buses et du gravier.

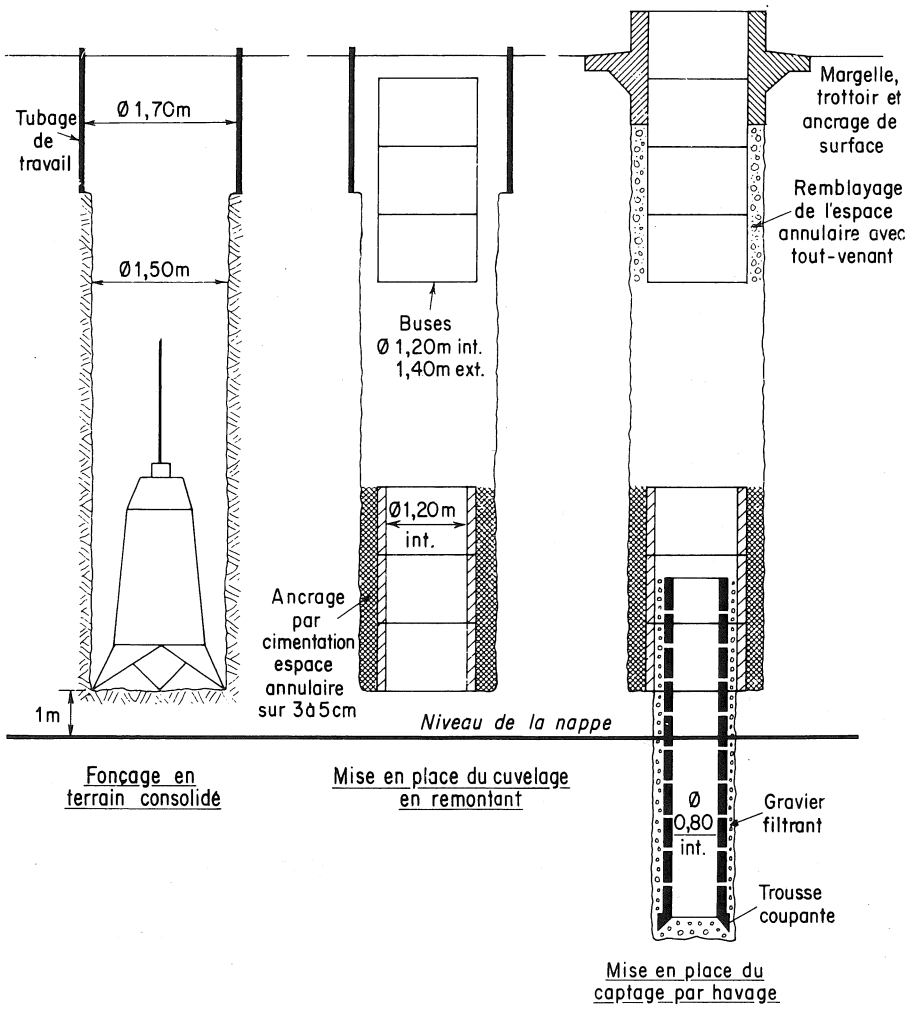
La composition et le coût d'un atelier complet sont indiqués en annexe 6.6.

4.2.3. – Equipement

Le puits, foré en 1 500 mm jusqu'à 1 m du niveau de l'eau, peut être revêtu de buses en béton armé à encoches boulonnées, de diamètre

Fig. 23

FORAGE D'UN PUITS A LA BENNE-TRÉPAN EN TERRAINS TENDRES



intérieur 1 200 mm, avec un ancrage de base, ou de coquilles de PRV (⌀ 1 200 ou 1 400 mm) de 6 m de long.

L'espace annulaire est remblayé avec du tout-venant.

Le captage est constitué d'une colonne de buses en béton havée avec trousse coupante ; l'annulaire est garni de gravier-filtre.

On aménage une margelle et une aire assainie.

4.2.4. – Mode d'exécution (fig. 23)

4.2.4.1. – Terrain tendre consolidé

- Havage d'un tubage de travail ⌀ 1 700 mm sur quelques mètres.
- Fonçage à la benne-trépan ⌀ 1 500 mm jusqu'au niveau de l'eau.
- Mise en place des buses de béton armé ⌀ 1 200-1 400 mm par groupe de 5 sur la totalité du cuvelage ; cimentation du pied de la colonne.
- Fonçage dans l'aquifère avec la benne-trépan ⌀ 1 150 mm jusqu'à la profondeur désirée. Mise en place de la colonne de captage (⌀ 800-1 000 mm) sur trousse coupante, par havage avec soupape ⌀ 700 mm.

En terrain de bonne tenue, mise en place de buses encastrées, garnies de gravier-filtre, en partant de la base.

4.2.4.2. – Terrain comportant des passées instables

- Puits de moins de 20 m : havage d'un cuvelage (monolithique), avec trousse coupante, de ⌀ 1 200-1 400 mm, avec la benne-trépan ⌀ 1 000 mm. Colonne de captage ⌀ 800-1 000 mm mise en place par havage à la soupape ⌀ 700 mm ;
- Puits de plus de 20 m : mise en place, havage, d'un tubage provisoire dans les zones instables. Equipement du puits comme dans le cas des terrains consolidés, avec retrait progressif du tubage provisoire. La colonne captante est havée à la soupape ⌀ 700 mm.

4.2.4.3. – Temps d'exécution

Il semble que l'on puisse admettre, pour un puits de 50 m dans des terrains tendres consolidés (type Continental Terminal) :

- 5 jours pour le fonçage jusqu'à l'eau,
- 5 jours pour la mise en place du cuvelage avec des buses de béton armé (1 jour avec des coquilles de PRV) et l'ancrage de surface,

– 5 jours pour la mise en eau et le développement, soit 15 jours, c'est-à-dire environ 10 fois moins de temps que pour un puits à main équivalent.

4.2.4.4. – Observations

Le procédé de fonçage à la benne-trépan a l'avantage de permettre de traverser des terrains variés, tendres ou durs, sans limite de profondeur. Même si cela réclame de financer des opérations à caractère expérimental, il nous paraît important de tester et de mettre au point cette technique pour en évaluer l'intérêt réel.

Un des gros problèmes posés par cette méthode, comme d'ailleurs pour la précédente, réside dans les sujétions relatives à la fabrication, à l'approvisionnement et à la mise en place des buses en béton. Ces procédés ne peuvent atteindre une efficacité réelle qu'à la condition de mettre en place un atelier industriel de buses et de maîtriser entièrement approvisionnements, fabrication et transports.

Ceci montre l'intérêt de mettre au point des revêtements en matière plastique comme le PRV. On devrait pouvoir ainsi alléger la réalisation et augmenter le diamètre utile.

4.3. – FORAGE AU BATTAGE EN GRAND DIAMÈTRE

4.3.1. – Données générales

Avec des appareils de battage puissants, il est possible de réaliser des forages de 1,20 à 1,50 m de diamètre, jusqu'à une centaine de mètres de profondeur. En terrain tendre, cette méthode ne semble toutefois pas pouvoir concurrencer le forage à la benne-trépan, à la fois plus efficace et plus rapide. Ce n'est donc que dans des formations de dureté moyenne, telles que schistes, pélites, grès tendres ou calcaires, que ce procédé semble pouvoir être envisagé. Dans un tel cas, il apparaît, par contre, comme la seule méthode de construction de puits pouvant se substituer au fonçage à la main où à l'explosif. Le battage en grand diamètre pourrait donc être la méthode permettant de réaliser mécaniquement des puits pastoraux dans les terrains sédimentaires anciens tels que les formations du Gourma, les pélites de Nara, etc. Le diamètre final des ouvrages, comme dans toutes les méthodes de puits forés, est cependant bien inférieur à celui des puits classiques en 1,80 m, ce qui limite le nombre de puisages simultanés et diminue par conséquent le débit exploitable.

4.3.2. – Description du matériel

Une machine de ce type est décrite en annexe 4.20. Elle est normalement montée sur semi-remorque, l'ensemble pesant 27 tonnes. Elle comprend :

- un moteur de 140 CV,
- un treuil de battage de 27 t,
- un treuil de manœuvre de 18,8 t,
- un treuil de curage de 7,6 t,
- un mât télescopique de 19,50 m, de 45 t de capacité.

L'atelier complet dont la composition et le coût sont décrits en annexe 6.5, comprend en outre un groupe de soudure de forte puissance, une citerne de 4 m^3 montée sur remorque et 4 véhicules :

- 1 tracteur (pour la sondeuse),
- 2 camions gros porteurs,
- 1 véhicule léger.

Les trépans sont des trépans en croix de 3 tonnes ; pour un puits commencé en 1,60 m de diamètre, il faut :

- 2 trépans ⌀ 1,60 m,
- 2 trépans ⌀ 1,30 m,
- 2 trépans ⌀ 1 m,
- soupapes et accessoires.

Les tubages de travail sont en éléments soudés de 6 m de longueur et de 1,40 m à 1,10 m de diamètre.

4.3.3. – Mode d'exécution

4.3.3.1. – Fonçage

Dans l'hypothèse où nous nous plaçons, cette méthode sera réservée à la réalisation de puits dans des terrains relativement durs et cohérents. Dans ce cas, les formations tendres correspondront à des terrains superficiels d'épaisseur en général limitée (sans doute rarement plus de 20 mètres).

Dans les terrains non consolidés, on procèdera exactement comme avec la benne-trépan, en mettant en place un tubage provisoire au fur et à mesure de l'avancement.

- Si la longueur à tuber est faible, il est possible d'utiliser un tubage provisoire d'un seul diamètre, en éléments vissés de 3 à 4 m chacun (épaisseur entre 10 et 20 mm). L'emploi d'une tubeuse-louvoyeuse est dans ce cas vivement recommandée pour extraire le tubage.
- Pour une longueur plus importante, il est sans doute préférable d'utiliser des éléments en tôle roulée emboîtés les uns dans les autres. Dans ce cas, on utilise généralement des éléments de 6 mètres, avec une tôle de 4 à 5 mm d'épaisseur.
- Les diamètres de tubages et de trépans sont calculés ordinairement de façon à laisser :
  - 15 à 20 cm entre le diamètre du terrain et le diamètre extérieur du tubage,
  - 3 cm environ entre le diamètre intérieur du tubage et le diamètre du trépan utilisé pour continuer le forage.

  Dans les terrains consolidés, le fonçage se fait sans soutènement.

La vitesse d'exécution dépend beaucoup du foreur ; plus que dans toute autre méthode il est nécessaire que celui-ci « sente » le terrain et qu'il ait pour cela une grande pratique de ce genre de travail. En terrains pas trop durs et cohérents, l'avancement peut atteindre 5 à 10 m par jour. En terrains durs, il peut être inférieur à 1 m par jour.

4.3.3.2. – Equipement du puits

Si la solidité des terrains situés en dessous le permet, le puits peut n'être équipé que dans la partie supérieure, au droit des terrains non consolidés. Des buses en béton, qui peuvent être fabriquées sur place ou pas trop loin du chantier, apparaissent encore comme la méthode la plus pratique et la plus économique ; en effet, le tubage métallique en gros diamètre coûte cher (*) et pose des problèmes difficiles de transport.

Comme dans les cas précédents, les buses en béton sont composées d'éléments à encoches de 1 mètre. Elles sont posées par groupe de 3 ou de 5 à l'abri du tubage provisoire qui est retiré progressivement. Les buses sont rendues solidaires entre elles par boulonnage. L'emploi de tubage en PRV peut là également être une solution d'avenir (**).

(*) 150.000 FCFA/mètre prix départ usine en 1981 pour un tubage ∅ 1320 mm de 10 mm d'épaisseur en longueurs de 1 mètre chanfreinées aux extrémités.

(**) environ 85.000 FCFA/mètre prix départ usine en 1981 pour un tube ∅ 1200 mm fabriqué en France.

4.3.4. – Observations

L'avantage de cette méthode est évidemment sa vitesse, comparativement à celle d'un puits fait à la main et à l'explosif : dans les formations anciennes du Gourma malien, par exemple, il faut au minimum de 11 à 13 mois pour faire un puits de 80 mètres à la main. Le fonçage au battage permettrait probablement de réduire à 2 ou 3 mois le temps de réalisation.

Par ailleurs étant donné le coût des puits profonds réalisés à l'explosif, cette méthode, si elle est bien employée, a toutes les chances d'être meilleur marché.

Toutefois le manque de données concernant l'emploi de ce matériel en Afrique impose une certaine prudence et nécessiterait, avant de l'introduire sur un projet, de s'assurer précisément de son aptitude à forer dans les terrains où l'on se propose de creuser des puits. Dans des terrains trop durs, le rendement pourrait diminuer au point que ce procédé ne soit plus rentable.

La réussite de cette méthode repose en grande partie sur le foreur, qui doit être très expérimenté et rompu à la conduite de chantiers dans des conditions isolées et difficiles.

Il s'agit d'un chantier lourd, réclamant une logistique sans faille, notamment pour la fabrication et le transport des buses, et une liaison permanente avec la base.

Le diamètre final des ouvrages pourrait être de 1 mètre si l'on n'a effectué qu'un seul changement de diamètre, ou de 0,80 mètre si l'on a dû changer deux fois de diamètre. Il n'autorise pas le puisage simultané avec 5 ou 6 dalous comme les puits en 1,80 mètre. On peut songer à diminuer ce handicap en améliorant le rendement des dalous (*).

4.4. – FORAGE AU ROTARY EN CIRCULATION INVERSE

Cette méthode est utilisée dans des conditions très particulières, pour réaliser des forages en grand diamètre, particulièrement dans les formations tendres et hétérogènes dont la succession lithologique est bien connue à l'avance.

4.4.1. – Caractéristiques

A l'inverse du forage rotary classique, dans lequel le fluide de circulation est refoulé par l'intérieur des tiges et remonte par l'espace

(*) Un dalou plus grand tiré par plus d'une bête ?

annulaire (circulation directe), le forage rotary en circulation inverse consiste à aspirer l'eau ou la boue par l'intérieur des tiges. La section intérieure des tiges restant relativement faible, on peut ainsi obtenir de grandes vitesses de remontée des déblais quel que soit le diamètre de forage. Cela permet de forer dans des formations hétérogènes comme par exemple des alluvions grossières comportant des galets. A l'inverse, la vitesse de descente du fluide dans l'espace annulaire est faible et l'érosion des parois est minime.

Le forage est réalisé le plus souvent avec une boue légère ou même à l'eau. Il est obligatoire de maintenir le niveau du fluide dans le forage proche de la surface, sans quoi le dispositif d'aspiration ne fonctionnerait plus. Compte tenu du diamètre des forages et des pertes de circulation possibles, ce système consomme donc beaucoup d'eau. Un trou de 40 mètres de profondeur représente en effet un volume de :

- 32 m^3 si son diamètre est de 1 m,
- 45 m^3 si son diamètre est de 1,20 m,
- 71 m^3 si son diamètre est de 1,50 m.

De ce fait la consommation d'eau pour réaliser un forage de 40 à 50 mètres de profondeur en 1 mètre de diamètre peut facilement dépasser une centaine de mètres cube si les terrains sont relativement perméables et si le niveau d'équilibre de la nappe n'est pas très proche du sol. Dans certains cas, on peut remédier à cette difficulté en creusant au préalable un forage en petit diamètre, qui servira à prélever l'eau nécessaire à l'ouvrage principal.

La circulation inverse permet de réaliser des forages jusqu'en 1,60 m ou 1,80 m de diamètre avec des vitesses d'avancement spectaculaires. Mais en raison des contraintes exposées ci-dessus, son domaine d'emploi semble devoir rester très limité.

4.4.2. – Description du matériel

La sondeuse ne se distingue d'une sondeuse rotary classique que par la présence d'un dispositif d'aspiration d'eau ou de boue et par un type de garniture différent.

Aspiration

L'aspiration du fluide de circulation est obtenue par l'un des procédés suivants :

- « jet eductor » : la dépression dans la colonne est obtenue par un dispositif Venturi fonctionnant à partir d'une pompe centrifuge à fort débit. C'est, semble-t-il, le système le plus efficace et celui qui permet d'obtenir la dépression maximale.

- pompe centrifuge de grande dimension, assistée d'une pompe d'amorçage et aspirant directement dans la colonne ; au-delà d'une certaine profondeur, la pompe peut être relayée par :
- un dispositif d'airlift créant une émulsion air-eau dans la colonne, il nécessite un compresseur débitant environ 10 m^3/mn d'air sous une pression de 8 à 10 bars.

Tiges de forage

Les tiges sont d'un type spécial et leur diamètre est plus grand qu'en rotary classique. Ce sont des tiges lisses intérieurement, à raccords par brides, de longueur ne dépassant pas 3 mètres (pour permettre le réamorçage de la pompe après chaque changement de tige). Les diamètres habituellement utilisés sont les suivants :

Diamètre intérieur de la tige	**Diamètre du forage**
150 mm (6")	1 à 1,20 m
200 mm (8")	1,20 à 1,60 m
250 mm (10")	> à 1,60 m

Outils de forage

Les outils utilisés sont soit des outils à lames multiples (dans les formations tendres), soit des outils à molettes.

4.4.3. – Domaine d'utilisation

La grande consommation d'eau, la nécessité d'avoir au préalable une connaissance précise des terrains à forer, limitent la portée de cette méthode dont le domaine d'élection paraît être celui de la réalisation d'ouvrages à fort débit destinés à capter des nappes peu profondes (alluvions).

CHAPITRE 5

ÉLÉMENTS SUR LES COÛTS ET LES STRUCTURES DE RÉALISATION

5.1. – DÉPENSES RELATIVES AU MATÉRIEL

5.1.1. – Coûts d'investissement

Le tableau ci-dessous récapitule les chiffres donnés en annexe 6 sur le coût de quelques ateliers-types. Ces chiffres représentent, en ordre de grandeur, le coût d'ateliers complets prêts à fonctionner, incluant notamment les véhicules et les outils et pièces de rechange pour 1 (ou 2) an(s) de travail.

Ateliers types	Véhicules	COÛTS EN MILLIONS DE FCFA (*)					TOTAL
		Atelier de forage complet	Outils de forage (pour 1 an de travail environ)	Unité d'essais	Pièces détachées (environ 10 % (**)		
					Atelier de forage	Unité d'essais	
1) Battage (150 m/15")	1VL ; 2PL	98	1 (***)	16,5	10	1,5	127
2) Rotary-MFT (hte pression)	1VL ; 4PL	184	24	25	18,5	2,5	254
3) Rotary (500 m/10")	1VL ; 3PL	303	15	41	30	4	393
4) Rotary (750 m/10")	1VL ; 2PL	341	15	41	34	4	435
5) Battage (100 m/1,2 à 1,5 m)	1VL ; 3PL	193	1,5 (***)	16,5	18,5	1,5	231
6) Benne-trépan	1VL ; 5PL	180	1 (***)	16,5	18	1,5	217

(*) Prix H.T. départ usine début 1983 ; ajouter à ce chiffre environ 10 à 15 % pour l'acheminement sur place.
(**) 10 % de pièces détachées sur les sondeuses équivalent à environ 1 an d'utilisation pour les sondeuses rotary et 2 ans pour les sondeuses au battage.
(***) Prix de la soudure ; le prix des trépans est inclus dans le coût de l'atelier.

Remarque : Ce chapitre fait largement appel à l'ouvrage [8] : « L'équipement des villages en puits et forages en fonction des conditions hydrogéologiques dans les États ACP d'Afrique », BURGEAP 1978, édité par la Commission des Communautés Européennes.

5.1.2. – Coûts d'amortissement

• *Durée de vie des machines de forage*

La durée de vie d'une sondeuse normalement entretenue peut être estimée à environ :

7 à 10 ans pour une sondeuse hydraulique à tête de rotation,

15 à 20 ans pour une sondeuse rotary mécanique,
20 ans ou plus pour une sondeuse au battage.

Il faut rappeler toutefois que ces chiffres peuvent varier considérablement en fonction des conditions d'utilisation.

• *Amortissements*

Ces durées de vie permettent de calculer le coût d'amortissement technique des sondeuses. Cependant, l'amortissement comptable est souvent calculé sur une période plus courte (par exemple sur la durée d'un projet de 4 ou 5 ans). Il faut noter que les différences sur les taux d'amortissement expliquent parfois les écarts importants de prix constatés dans les réponses aux appels d'offres.

On applique en général la méthode de l'amortissement linéaire, dans laquelle les annuités sont calculées en divisant le prix d'achat du matériel par la durée d'amortissement, lequel doit être exprimé en francs constants.

5.1.3. – Coût de l'entretien

Les frais d'entretien des sondeuses varient à peu près dans les mêmes proportions que les durées de vie indiquées plus haut (*) :

• *Sondeuses hydrauliques à tête de rotation :* de 5 à 10 % du prix de la machine la première année, puis coût croissant les années suivantes (probablement au moins 15 % dès la cinquième année).

• *Sondeuse rotary mécanique :* environ 10 % du prix de la machine par année d'utilisation.

• *Sondeuse au battage :* 5 % par an du prix de la machine.

L'entretien des sondeuses hydrauliques revêt une importance particulière, du fait que ce sont des machines coûteuses et à haut rendement. Il nécessite :

- un appui mécanique important (il faut un mécanicien hautement qualifié à la base pour 3 ou 4 machines) ;
- un approvisionnement sans faille en fournitures et pièces détachées ;
- un entretien très régulier au niveau du chantier.

(*) Ces chiffres, qui résultent de l'enquête menée dans le cadre de cet ouvrage, ne représentent cependant que des ordres de grandeur des dépenses d'entretien.

Nous donnons en annexe 3.6 un exemple de charte d'entretien d'une machine de ce type (points de contrôle quotidiens, renouvellement des huiles et des filtres). Sur le chantier, l'entretien nécessite tous les jours de 3/4 d'heure à 1 heure de travail.

5.1.4. – Consommables

Les consommables sont les carburants et lubrifiants, les outils de forage et les produits servant aux fluides de circulation. La durée de vie des outils est très variable et dépend beaucoup des conditions d'utilisation. On peut toutefois avancer les données suivantes, à titre indicatif :

• *Durée de vie des outils :*

Marteau fond de trou : de 2 000 à 7 000 m
Taillant : de 200 à 600 m (parfois pas plus de 100 m dans certains grès quartzitiques)
Tricône à dents : de 500 à 1 000 m (dans les altérites et les roches tendres)
Tricône à pastilles : 1 500 m et plus (dans les altérites et les roches tendres à dures)

• *Produits divers*

Huile pour le marteau : 0,5 à 2 l/h (2,5 si on fore à la mousse)
Mousse : environ 30 l de produit pour un forage de 50 m
Eau : 2 à 3 m^3 pour un forage de 50 m (forage à l'air uniquement)

On trouvera par ailleurs en annexe 3.7 quelques statistiques de consommations établies sur un programme récent en Côte d'Ivoire.

5.2. – COÛT DES FORAGES

Nous indiquons ci-dessous, à titre d'exemple, un mode de calcul du prix de revient de forages villageois dans le socle effectués en régie administrative (prix janvier 1983) :

5.2.1. – Organisation

La mise en œuvre d'ateliers de forage implique les fonctions suivantes :

• travaux : forages
essais de pompage
construction des superstructures
pose des pompes

• services généraux : direction des travaux
gestion des chantiers
atelier mécanique, magasin

Le coût de la maîtrise d'œuvre n'est pas inclus dans cette évaluation.

On suppose ici un service mettant en œuvre quatre ateliers de forage (nombre qui permet une utilisation optimale des moyens au niveau de l'encadrement) ainsi que 2 unités d'essais de débit et 2 unités chargées des superstructures (et éventuellement de la pose des pompes).

Les ateliers sont du type de ceux décrits en annexe 6.1 (ateliers de forage rotary marteau fond de trou haute pression avec 4 véhicules chacun ; unités d'essai indépendantes avec 1 véhicule chacune).

Le service, qui peut être autonome ou intégré à une direction de l'hydraulique par exemple, dispose d'une *base* avec bureaux, atelier mécanique, magasin. L'encadrement est constitué par du personnel local et le personnel expatrié suivant :

- un ingénieur de forage
- un conducteur de travaux
- un mécanicien (chef d'atelier)

La base dispose des véhicules suivants :

- direction : 2 véhicules de liaison
- conducteur de travaux : 1 véhicule tous terrains
- magasin : 1 véhicule de liaison
- atelier : 1 véhicule de liaison
  1 camion de 5 t.

5.2.2. – Hypothèses de calcul

- Rythme de travail (chantier) : 1 poste de 8 h/jour, 25 postes par mois, 10 mois de forage par an (et 2 mois de mise en révision de la sondeuse).
- Forages dans le socle de 50 m de profondeur en moyenne (20 m dans les altérites, 30 m en roche dure) ; débit recherché : 1 m^3/h ; taux d'échec de 30 % environ.
- Réalisation : 110 forages/an/atelier, dont 75 positifs, soit 300 forages positifs pour 4 ateliers.
- Les essais de débit sont réalisés au rythme d'une journée par essai, déplacements compris. La construction d'une superstructure demande une journée de travail.

• Temps de réalisation d'un forage :

Vitesse de perforation : 20 m/h dans les altérites (rotary à l'air)
7,5 m/h dans le socle (marteau fond de trou)

Temps de travail (h)	Forage positif		Forage négatif	
	sans FM (*)	avec FM	sans FM	avec FM
Déplacement entre chantier	2		1	
Installation et repli de l'atelier	2		2	
Forage altérites		1		1
Forage socle		4		4
Pose et retrait du tubage provisoire		1		1
Pose du tubage PVC définitif	1	1		
Développement		2		
Total brut :	5	9	3	6
Incidents forage		3		3
Incidents mécaniques	1	2	1	1
Total risques compris :	6	14	4	10
Nombre de postes :	0,75	1,75	0,5	1,25
Nombre de postes par forage :	2,5		1,75	

• Durées d'amortissement :

- 40 ans pour les constructions
- 10 ans pour le matériel d'atelier et le mobilier
- 5 ans pour le matériel de bureau
- 5 ans pour les sondeuses et les camions
- 3 ans pour les véhicules légers

(*) FM = Force motrice (moteurs de la sondeuse et du compresseur).

5.2.3. – Coût des services généraux

	FCFA/mois	Coût annuel en M FCFA
1 - Personnel :		
a) Direction		
1 ingénieur	150 000	
2 techniciens	140 000	
1 comptable	80 000	
1 secrétaire	50 000	
1 chauffeur	40 000	
1 planton	30 000	
Charges 30 %	150 000	
Indemnités	100 000	8,8
	740 000	
b) Atelier-garage		
1 chef d'atelier	80 000	
2 mécaniciens	100 000	
2 aides-mécaniciens	80 000	
2 manœuvres	60 000	
1 chauffeur	40 000	
Charges 30 %	110 000	
Indemnités	80 000	6,6
	550 000	
c) Magasin		
1 magasinier	60 000	
1 aide-magasinier	40 000	
2 manœuvres	60 000	
1 chauffeur	40 000	
Charges 30 %	60 000	
Indemnités	40 000	3,6
	300 000	
d) Assistance technique (expatriés)		
1 ingénieur de forage	2 500 000	
1 mécanicien	2 000 000	54
	4 500 000	
Total (a à d)	6 090 000	73
2 - Amortissements :		
a) Locaux : 50 millions sur 40 ans		1,25
b) Véhicules : 3 véhicules de liaison : 6 millions sur 3 ans		2
1 véhicule tous terrains : 4,5 millions sur 3 ans		1,5
1 camion 5 t : 10 millions sur 5 ans		2
c) Matériel : Matériel atelier : 10 millions sur 10 ans		1
Mobilier et matériel divers : 7 millions sur 10 ans		0,7
Matériel de bureau et matériel scientifique : 3 millions sur 5 ans		0,6
3 - Carburants :		
VL : 200 km/j × 0,14 l × 200 = 5 600 FCFA		
PL : 100 km/j × 0,25 l × 140 = 3 500 FCFA		
9 100 FCFA × 25 j × 11 mois =		2,5
4 - Lubrifiants : 15 % de *3*		0,4
5 - Entretien des véhicules : 15 %/an de la valeur des véhicules.		3
6 - Autres frais de fonctionnement (fournitures, télécommunications, électricité, transports, etc.)		6
7 - Frais divers		4
TOTAL 1 à 7		**98**
Prix de revient par poste et par atelier de forage : $\frac{98\ 000\ 000}{4 \times 250}$ = **98 000 FCFA**		

5.2.4. – Coût d'un poste de l'atelier de forage

		Coût annuel en MFCFA	Coût/poste en FCFA	
			sans FM	avec FM
1 - Personnel	*FCFA/mois*			
1 chef sondeur	80 000			
1 aide sondeur	50 000			
1 mécanicien	50 000			
1 technicien pointeur	60 000			
2 chauffeurs (1 PL ; 1 VL)	90 000			
2 manœuvres	60 000			
Charges 30 %	120 000			
Indemnités	220 000			
	730 000			
Assistance technique : 1 conducteur de travaux expatrié pour 4 chantiers :				
1/4 × 2 000 000	500 000			
	1 230 000	14,8	59 000	59 000
2 - Amortissement				
– Sondeuse et camions : 180 millions sur 5 ans		36	144 000	144 000
– Véhicule léger : 4,5 millions sur 3 ans		1,5	6 000	6 000
3 - Carburants				
– Sondeuse 350 CV × 0,2 l/CV/h × 8 h × 75 % = 420 l/poste × 140 =			–	59 000
– Véhicules : 100 l/poste × 140			14 000	14 000
4 - Lubrifiants : environ 15 % de *3*			2 000	11 000
5 - Entretien				
Matériel : 12,5 % par an de 123 millions		15,4	–	61 500
Véhicules : 15 % par an de 61 millions		9,2	36 500	36 500
6 - Services généraux			98 000	98 000
7 - Divers et imprévus : 10 %			36 000	49 000
COÛT D'UN POSTE (total 1 à 7 arrondi)			**400 000**	**540 000**

5.2.5. – Coût des essais de débit

Prix de revient de l'unité d'essais :		Coût annuel en MFCFA
1 - Personnel	*FCFA/mois*	
1 chef d'équipe	80 000	
1 chauffeur électromécanicien	50 000	
2 manœuvres	60 000	
Charges 30 %	60 000	
Indemnités	110 000	
	360.000	4,32
2 - Amortissements		
Camion et matériel : 25 millions sur 5 ans		5
3 - Carburants		
• Groupe électrogène	200 l/mois	
• Camion	800 l/mois	
	1 000 l/mois × 10 × 140 =	1,4
4 - Lubrifiants : 15 % de *3*		0,21
5 - Entretien du véhicule : 15 %/an de 15 millions		2,25
6 - Divers et imprévus		*1,82*
TOTAL *(1 à 6)*		**15**
soit à raison de 150 essais/an/équipe : $\frac{15\ 000\ 000}{150}$ = **100 000 FCFA/essai**		

5.2.6. – Coût des superstructures

		Coût annuel en MFCFA
1 - Personnel	*FCFA/mois*	
1 maçon	60 000	
1 chauffeur	40 000	
2 manœuvres	60 000	
Charges 30 %	50 000	
Indemnités	90 000	
	300 000	3,6
2 - Amortissements 1 camion : 10 millions sur 5 ans		2
3 - Carburants : 800 l/mois × 10 × 140 =		1,12
4 - Lubrifiants : 15 % de *3*		0,17
5 - Entretien du véhicule : 15 %/an de 10 millions		1,5
6 - Fournitures (ciment, sable, gravier, fer à béton) 30 000 × 150 forages		4,5
7 - Divers et imprévus : 10 %		1,3
TOTAL *1 à 7, environ*		**14,2**
soit à raison de 150 superstructures/an/équipe : $\frac{14\ 200\ 000}{150} \neq$ **95 000 FCFA/superstructure**		

5.2.7. – Prix de revient d'un forage

	Forage positif	Forage négatif
1 - Postes		
– sans force motrice 0,75 × 400 000 =	300 000	
0,5 × 400 000 =		200 000
– avec force motrice 1,75 × 540 000 =	945 000	
1,25 × 540 000 =		675 000
2 - Outils et autres consommables		
– tricônes (rotary) : 20 m à 400 m/outil à 280 000 F pièce	14 000	14 000
– taillants (marteau) : 30 m à 240 m/outil à 320 000 F pièce	40 000	40 000
– marteau et divers	50 000	50 000
3 - Tubages PVC (110/125 mm, fileté)		
– tubes pleins : 38 m à 5 000 F/m =	190 000	
– crépines : 12 m à 6 250 F/m =	75 000	
4 - Gavier siliceux	25 000	
5 - Essai de pompage	100 000	
6 - Superstructure	95 000	
TOTAL *1 à 6* FCFA	**1 834 000**	**979 000**
Prix du mètre FCFA	(37 000)	(20 000)
Coût d'un forage incluant les échecs (hypothèse 75 forages positifs et 35 forages négatifs par an (*) :	**2 300 000 FCFA**	
Prix du mètre de forage incluant les échecs :	**46 000 FCFA**	

(*) 1 834 000 + 35/75 × 979 000 ≠ 2 300 000

5.2.8. – Décomposition du prix de revient (échecs inclus)

	total	dont dépenses extérieures
Ventilation (par rubrique et en devises)		
– Personnel	23 %	8 %
– Amortissements	27 %	27 %
– Carburants, lubrifiants	11 %	10 %
– Entretien	17 %	16 %
– Outils de forage	7 %	7 %
– Fournitures (tubages)	12 %	12 %
– Divers	3 %	
	100 %	**80 %**

Partie fixe et partie variable (proportionnelle au métrage)

– Partie fixe : 0,75 poste sans force motrice	300 000	
0,60 poste avec force motrice	325 000	
Superstructure et essai	195 000	
	820 000	soit 45 %
– Partie variable 1 834 000 – 820 000 =	1 014 000	soit 55 %

5.2.9. – Commentaires sur les prix de revient (cf. 5.2.8).

Les *dépenses extérieures* représentent près de 80 % du prix du forage. Ceci résulte de l'importance des amortissements, de l'entretien et des fournitures importées (tubages, outils, carburants et lubrifiants). Le coût du personnel expatrié s'élève dans l'hypothèse choisie, à 8 % du total.

La *partie fixe des dépenses* représente 45 % du coût total, (pour un forage de 50 m.) ce qui est considérable. Les 55 % restants (proportionnels au métrage foré) représentent le coût marginal, soit 20 300 F par mètre de forage (dont 6 000 F de tubage). Ceci montre qu'en l'absence de statistiques précises sur la corrélation débit/profondeur des forages dans tel ou tel type de roche, on peut avoir intérêt à dimensionner assez largement la profondeur des ouvrages (d'autant plus qu'il n'est toujours pas nécessaire de tuber jusqu'au fond).

La *rapidité d'exécution* est le facteur qui influence le plus les coûts puisque les dépenses proportionnelles à la durée du chantier (coût des postes) représentent plus de 72 % du prix global. Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, si chaque atelier ne réalise que 60 forages par an, le coût de ceux-ci s'élèvent à 2 700 000 F ; à l'inverse si les mêmes ateliers réalisent chacun 100 forages par an, le prix du forage tombe à 1 900 000 F.

Mais le temps de forage proprement dit ne représente en marche normale que le tiers de la durée du chantier de sorte que s'il est théoriquement justifié de chercher à réduire par l'emploi de matériel plus onéreux, la limite est rapidement atteinte, car ce raisonnement suppose une organisation à l'abri des aléas, ce qui n'est jamais le cas ; la sophistication du matériel doit porter moins sur l'augmentation de la vitesse de perforation que sur la réduction des risques : ceux-ci représentent en effet couramment 25 % du temps global.

Par contre la recherche du rendement ou du coût minimum ne doit pas se faire aux dépens de la qualité des ouvrages, ce qui s'observe parfois dans le cas des programmes trop importants. L'abaissement du coût du mètre cube d'eau produit, qui est le seul véritable objectif, dépend avant tout de la pérennité des ouvrages, lesquels doivent être conçus pour durer plus de 20 ans. Aucune économie injustifiée ne peut être tolérée (comme par exemple, l'emploi de tubages PVC inadéquats ou de gravier latéritique, ou bien l'absence d'étanchéité à la base des altérites).

5.3. – STRUCTURES DE RÉALISATION

5.3.1. – Comparaison avec les travaux à l'entreprise

A titre de comparaison, l'application des prix unitaires obtenus sur deux appels d'offres, conduit aux coûts suivants pour des forages d'exploitation (*) de 50 m de profondeur (socle à 20 m, taux d'échec de 35/100), pompe non comprise (prix dernier trimestre 1981 réactualisé de 12 %) :

- Haute Volta (F.E.D.), 260 forages, un seul atelier, 80 forages par an :
  2 700 000 FCFA
- Haute Volta, Bénin, Niger (Conseil de l'Entente), 330 forages par pays, 2 ou 3 ateliers en 11 mois de travail effectif :
  2 450 000 FCFA

Les différences dans le nombre d'ateliers et le rythme d'exécution expliquent l'écart entre ces prix, faible au demeurant.

Ces exemples sont représentatifs des prix actuellement pratiqués par les entreprises en matière de forages villageois dans le socle. Ils montrent que ceux-ci sont tout à fait comparables au prix du forage en régie, tel que nous l'avons calculé, en dépit des majorations qui, dans une entreprise, grèvent le prix de revient (impôts, taxes diverses, frais financiers, auxquels il faut ajouter les bénéfices et provisions pour risque d'immobilisation du matériel et du personnel) (**).

(*) Coût incluant les échecs

(**) Une différence de 20 à 30 % serait normalement justifiée. Les prix indiqués ci-dessus doivent être considérés comme des minima. Des prix trop bas provoqués par la concurrence au cours de ces dernières années ont mis en difficulté nombre d'entreprises.

En réalité l'expérience montre que les forages en régie reviennent généralement plus cher qu'à l'entreprise pour peu que soient prises en compte toutes les composantes du coût (notamment les services généraux, l'amortissement du matériel et l'assistance technique). En effet la mise en œuvre d'ateliers à haut rendement, avec lesquels le facteur temps joue un rôle essentiel, exige une gestion et une efficacité rigoureuses, de type industriel, peu compatibles avec les contraintes auxquelles se trouve soumise toute administration. En outre, les administrations sont souvent pénalisées par les discontinuités qui interviennent dans la mise en place des financements.

5.3.2. – Développement des initiatives nationales

S'il est indéniable que la réalisation directe des travaux ne constitue qu'une fonction secondaire de l'Administration, face à ses tâches d'études et de programmation notamment, il n'en reste pas moins qu'il lui appartient de promouvoir les capacités nationales de réalisation sous toutes leurs formes. Le développement des compétences dans ce domaine reste fondamental :

- pour réduire la dépendance vis-à-vis de l'extérieur et préparer la relève des programmes d'équipement actuels.
- pour répondre aux besoins dispersés mais nombreux, qui ne pourront être satisfaits par ces programmes.
- pour former le personnel aux tâches de maître d'œuvre (tant il est vrai qu'on ne conçoit et ne contrôle bien que ce que l'on sait soi-même réaliser).
- pour permettre des interventions isolées, au coup par coup, par des structures implantées sur place.

Si l'urgence et l'ampleur des programmes actuels rend pratiquement inévitable le recours aux entreprises internationales ou régionales, on peut craindre que l'effort entrepris ne porte pas tous les fruits escomptés, si la relève n'est pas préparée à l'échelon local et si le forage d'eau de type villageois ne devient pas un ouvrage banal réalisable par les moyens locaux.

Les besoins en points d'eau vont en effet bien au-delà des équipements programmés au cours de la décennie actuelle, lesquels ne visent qu'à assurer le minimum indispensable à raison d'un point d'eau moderne par village ou par quartier de 300 habitants. En réalité un travail considérable reste à entreprendre avant que l'eau potable ne soit à la portée de tous en quantité suffisante.

La réponse a cet enjeu peut être préparée de deux manières : d'une part par la création d'entreprises modernes (publiques ou privées) de type

industriel, mettant en œuvre des machines à haut rendement, d'autre part par le développement d'entreprises artisanales pratiquant des méthodes de forage plus simples.

Les premières devraient être autonomes et soumises à la concurrence. La dimension des programmes proposés dans les appels d'offre devrait cependant être adaptée, afin que les plus petites d'entre elles ne soient pas systématiquement pénalisées par leur taille.

Les entreprises artisanales doivent assurer leur propre rentabilité, sans peser sur le budget public, dès lors qu'elles ont été aidées pour leur équipement initial. Le prix de vente des forages doit cependant leur permettre d'amortir rapidement leur matériel et de le renouveler ensuite avec leurs fonds propres. La réussite de telles initiatives suppose une bonne adaptation des matériels et des techniques aux conditions d'emploi et aux conditions géologiques locales. Deux exemples sont exposés en annexe 8. Ils concernent l'un la réalisation de forages d'eau au carottage dans le socle sous faible recouvrement d'altérites, l'autre l'emploi d'un atelier de battage léger pour la création de forages ou l'approfondissement de puits. Le prix de revient des ouvrages semble se situer très en dessous de celui des forages classiques effectués à l'air comprimé (de 30 à 50 % environ). Les entreprises artisanales présentent l'intérêt d'être intégrées dans le secteur où elles opèrent et de pouvoir répondre rapidement aux besoins (forages, mais aussi entretien des pompes). Elles font travailler une main-d'œuvre locale, disponible notamment en saison sèche, et permettent de créer des revenus qui resteront sur place. L'expérience semble montrer, au moins dans certaines régions, que, dès lors, que de telles entreprises existent, il se manifeste à la fois une forte demande en points d'eau et des capacités de financement non négligeables au niveau des collectivités locales.

ANNEXES

ANNEXE 1

ÉVALUATION DES BESOINS EN POINTS D'EAU AU COURS DE LA PRÉSENTE DÉCENNIE. STRUCTURES DE RÉALISATION ET MATÉRIELS EXISTANT DANS LES ÉTATS.

1.1. Répartition de la population à l'intérieur des pays membres du C.I.E.H.

1.2. Proportion de puits et de forages dans les programmes villageois en projet à la fin de 1981 (10 pays).

1.3. Mode d'exécution retenu dans les programmes villageois en cours ou prévus dans 7 pays membres du C.I.E.H.

1.4. Objectifs de création de points d'eau villageois d'ici 1990.

1.5. Types de structures intervenant dans la réalisation des ouvrages.

1.6. Aperçu du parc de machines utilisées pour le forage d'eau en 1981 (12 pays).

1.1. – RÉPARTITION DE LA POPULATION A L'INTÉRIEUR DES PAYS MEMBRES DU C.I.E.H.

PAYS	POPULATION				NOMBRE DE VILLAGES	RÉPARTITION DES VILLAGES				CENTRES SECONDAIRES*
	TOTALE		RURALE							
	Millions d'habitants	Année recensement	Millions d'habitants	%		0-500 h	500-1000	1000-2000	2000-5000	
BÉNIN	3,2	1975	2,8	87	2 800					10
CAMEROUN	6,5	1975	3,9	60	?					100
CONGO	1,2	1975	0,6	50	5 000	4 000 (80%)	?	?	?	35
COTE D'IVOIRE	7,3	1977	4,9	67	8 100					126
GABON	1	1970	?	?	5 200					
HAUTE-VOLTA	5,5	1975	4,6	84	7 440	4 400 (59%)	2 600		440	50
MALI	6,3	1976	5,7	90	10 800	5 960 (55%)	4 830	890	240	16
MAURITANIE	1,4	1975	0,7	50	2 770					9
NIGER	5,1	1977	4,5	88	9 500	7 400 (78%)	1 500	480	120	50
SÉNÉGAL	5,5	1979	3,9	71	5 520	5 000 (91%)		450	70	10
TCHAD	4	1975	3,6	90	?					50
TOGO	2,6	1980	1,6	62	2 500	1 630 (65%)	490	330	50	50
Total	49,6		36,8 (11 pays)		59 630 (10 pays)					506 (11 pays)

** Centres comptant en 1978 une population agglomérée supérieure à 5 000 habitants, grands centres urbains exclus.*

1.2. - PROPORTION DE PUITS ET DE FORAGES DANS LES PROGRAMMES VILLAGEOIS EN PROJET A LA FIN DE 1981 (10 PAYS)

PAYS	NOMBRE D'OUVRAGES PROJETÉS	FORAGES		PUITS	
		NOMBRE	%	NOMBRE	%
BÉNIN	785	745	95 %	40	5 %
CAMEROUN	500	400	80 %	100	20 %
COTE D'IVOIRE	1 730	1 430	83 %	300	17 %
GABON	500	500	100 %	0	0
HAUTE-VOLTA	4 330	3 290	76 %	1 040	24 %
MALI	2 410	2 250	93 %	160	7 %
MAURITANIE	435	150	34 %	285	66 %
NIGER	2 800	2 000	71 %	800	29 %
SÉNÉGAL	320	150	47 %	170	53 %
TOGO	360	360	100 %	0	0
Total	14 170	11 275	80 %	2 895	20 %

1.3. - MODE D'EXÉCUTION ADOPTÉ DANS LES PROGRAMMES VILLAGEOIS EN COURS OU PRÉVUS DANS 7 PAYS MEMBRES DU C.I.E.H.

PAYS	PÉRIODE CONCERNÉE	FORAGES				PUITS			
		RÉGIE (*)		ENTREPRISE		RÉGIE (*)		ENTREPRISE	
		NOMBRE	%	NOMBRE	%	NOMBRE	%	NOMBRE	%
COTE D'IVOIRE	75 - 82			7 172	100			3 328	100
BÉNIN	81 - 90	1 095	66	568	34	75	100		
HAUTE-VOLTA	81 - 90	1 990	64	1 140	36	2 785	100		
MALI	81 - 90	2 396	91	227	9	400	100		
NIGER	81 - 85	400	22	1 430	78	3 900	100		
SÉNÉGAL	81 - 85			80	100	450	81	105	19
TOGO	80 - 85	224	15	1 295	85				
Total		6 105	34	11 912	66	7 610	69	3 433	31

(*) Terme pris au sens large, incluant la régie administrative directe, les projets intégrés et les organismes parapublics.

1.4. - POINTS D'EAU VILLAGEOIS A CRÉER D'ICI 1990

PAYS	OBJECTIFS FIXÉS EN DÉBUT DE PROGRAMME	POINTS D'EAU DÉJA RÉALISÉS A LA FIN DE 1980	POINTS D'EAU RESTANT A RÉALISER
BÉNIN	6 000	600	5 400
CAMEROUN	4 000	3 000	1 000
COTE D'IVOIRE	11 000 programmés de 1975 à 1982 + environ 10 000 de 1983 à 1990 (estimation)	6 700	environ 14 300
HAUTE-VOLTA	10 000	3 000	7 000
MALI	11 400	3 200	8 200
MAURITANIE	5 100	2 600	2 500
NIGER	20 000	5 700	14 300
SÉNÉGAL	4 200	1 200	3 000
TOGO	5 400	1 000	4 400
Total 9 Pays	environ 87 000	27 000	environ 60 000

NOTA : En tenant compte des pays sur lesquels nous ne disposons pas de données (Congo, Gabon, Tchad), on peut estimer à 100 000 le nombre de points d'eau à réaliser d'ici 1990, parmi lesquels environ 30 000 étaient déjà réalisés à la fin de 1980.

1.5. - TYPES DE STRUCTURES INTERVENANT DANS LA RÉALISATION DES OUVRAGES
(entreprises privées exclues)

PAYS	RÉGIE ADMINISTRATIVE	STRUCTURE PARAPUBLIQUE	SOCIÉTÉ NATIONALE	AGENCE D'EXÉCUTION
BÉNIN	Direction de l'Hydraulique	SBEE		UNICEF/BIRD
CAMEROUN	Direction des Mines et de la Géologie			
CONGO	Direction des Mines			
COTE D'IVOIRE		SODECI AVB ARSO CNA	FOREXI	
HAUTE-VOLTA	Direction de l'Hydraulique	AVV BUVOGMI		
MALI	Direction de l'Hydraulique	«Opération Puits»	SONAREM	PNUD HELVETAS
MAURITANIE	Direction de l'Hydraulique			
NIGER		OFEDES		
SÉNÉGAL			SONAFOR	
TCHAD	SERARHY			
TOGO	Bureau National de Recherche Minière (B.N.R.M.)			

1.6. - APERÇU DU PARC DE MACHINES UTILISÉES POUR LE FORAGE D'EAU EN 1981

PAYS	PROPRIÉTAIRES 1) Organismes publics ou parapublics ou société nationale ; 2) Entreprises privées et divers.		NOMBRE ET TYPE DE MACHINES			
			BATTAGE	ROTATION	MFT(*) ou MIXTE	PUITS FORÉS
BÉNIN	1	S B E E Hydraulique Hydraulique FENU/USAID	1 Tarnax	1 Agbo G 450 B 1 Craelius	1 Aquadrill 1 Mobildrill B 80 1 Ingersoll TH 55	
CAMEROUN	1	Mines	1 Bonne Espérance	1 Failing 1250	1 Ingersoll TH 60 1 Stenuick HS 66D	
CONGO	1	Mines		1 Joy 1 Winky 1 Zif 300 1 Zif 150		
COTE D'IVOIRE	1	FOREXI Direction des T.P. AVB ARSO CNA SODECI PRÉSIDENCE		2 Acker 2 Failing W W 1 1 Bonne Espérance	5 Portadrill 10 TK 4 Failing 1250 HD 1 Ingersoll TH 60 3 Aquadrill	7 Calweld 250 B 3 Calweld 250 B
	2	FORAFRIQUE FORACO ADRIAN WALKER INTRAFOR SASIF FORAKY		5 Foraco VPRH	3 Airdrill 5 Foraco SM70 1 Rotamec 2 B. Espérance FBE 2 1 Mobildrill 1 Domine SR 200 4 Failing 314 3 Ingersoll TH 60	

(*) Marteau fond de trou

PAYS		PROPRIÉTAIRES	NOMBRE ET TYPE DE MACHINE			
			BATTAGE	ROTATION	MFT * ou MIXTE	PUITS FORÉS
HAUTE VOLTA	1	Hydraulique A V V BUVOGMI	2 Dando 800	1 Ingersoll RO 300	2 Foraco SM 70 1 Ingersoll TH 60 2 Stenuick HS 66 D 2 Failing 1250 HD	1 Calweld 250 B
	2	AFORCOM SADE ONG(**) et divers	2 Walker Neer 1 Bonne Espérance		2 Stenuick HS 66 D 1 Nord Meyer 1 Failing FA 100 1 Schafer	
MALI	1	Hydraulique SONAREM		1 Tone 300 1 Failing CF 15 1 BA 15 V 2 Sboud 150	2 Foraco Sis 66 1 Foraco SM 70 2 Aquadrill 461 1 Aquadrill 661 1 Failing 1500+1 F. 1250 1 Aquadrill 461	
	2	CARITAS FORACO AQUA VIVA			1 Stenuick lyonne 2 Foraco SM 70 2 Foraco Sis 66	
MAURITANIE	1	Hydraulique		1 Ingersoll TH 100 1 Failing 1250	3 Ingersoll TH 60	
NIGER	1	OFEDES	1 Bucyrus 20	1 Davey M7W 2 Bomag 400 1 Tone 171 A 1 Mobildrill B 30 1 Seismic	1 Failing 1250 1 Aquadrill 461	
	2	SATOM SADE INTRAFOR	1 Bucyrus 22 RB	1 Atlas B 50 1 Failing FWN 40+1 Jed. A 2 Gardner Denver 1500 1 Joy 215	 2 Foraco SM 70 1 Bonne Espérance FBE 2 1 Bonne Espérance TP 125	

(*) Marteau fond de trou
(**) Organisation non gouvernementale

PAYS		PROPRIÉTAIRES	NOMBRE ET TYPE DE MACHINES			
			BATTAGE	ROTATION	MFT(*) ou MIXTE	PUITS FORÉS
SÉNÉGAL	1	SONAFOR	1 Bucyrus	1 Failing 2500 2 Failing JEDA 2 Zil	1 CM E 55	
	2	INTRAFOR SASIF CARITAS	1 Bucyrus L 60 1 Keystone 1 Treuil Wilson 2 Star 72	2 Joy 225 1 Failing 2000 1 Failing 2500 1 F. 314+1 F. 1500 XHD 1 Chicago Pneumatic	1 Mobildrill 2 Domine SM 200	
TCHAD	1	SERARHY			3 Foraco SM 70	
TOGO	1	B N R M	1 Bucyrus 1 Speedstar	1 Failing FWN 40 1 Failing CF 15	1 Schett Dubon	
	2	SASIF FELGAS MASSON SOBEA PANAF CONSULT		2 (non précisé) 1 (non précisé)	1 Stenuick HS 66 D 1 Rotamec 1 Stenuick P. 80 1 (non précisé)	
Total	1		8	33	44	11
	2		9	21	41	–
GHANA (pour information)	1	G W S C	12 Bucyrus	3 Failing 1500	2 Ingersoll TH 55	–

(*) Marteau fond de trou

ANNEXE 2

RAPPELS FONDAMENTAUX SUR LES MOYENS D'EXHAURE

2.1. Exhaure traditionnelle

2.2. Pompes à motricité humaine

2.3. Pompes solaires

2.4. Pompes électriques immergées

2.5. Pompes à axe vertical

2.1. - EXHAURE TRADITIONNELLE

a) Puisage à la main

Profondeur maximale admissible : environ 60 m

Débit pour un puits ϕ 1,80 m (observation BURGEAP-SATEC 1965) [7] :

- 1 m^3/h avec 6 personnes puisant en même temps et un niveau de l'eau à 20 m
- 1,5 m^3/h avec 6 personnes puisant en même temps et un niveau de l'eau à 10 m
- 2 m^3/h au maximum.

b) Puisage par traction animale

Profondeur maximale admissible dans les puits actuels : 80 m

Débit (avec dalous de 50 litres) [22] :

– puits ϕ 1,80 m, profondeur de l'eau 80 m : 375 l/h par fourche, soit
  avec 5 fourches : 1,87 m^3/h
  avec 6 fourches : 2,25 m^3/h
  total avec 5 fourches et 20 h/jour : 40 m^3/jour

– puits ϕ 1,80 m, profondeur de l'eau 40 m : 500 l/h/fourche, soit
  avec 5 fourches : 2,5 m^3/h
  avec 6 fourches : 3,4 m^3/h
  total avec 5 fourches et 20 h/jour : 50 m^3/jour

2.2. - POMPES A MOTRICITÉ HUMAINE

Usage : pour les points d'eau villageois uniquement.

– Profondeur maximum d'exploitation :
  - 40 m pour les pompes à main usuelles
  - 60 m pour les pompes à transmission hydraulique et certaines catégories de pompes à main.

– Débit théorique : la puissance fournie par l'homme moyen est évaluée à 0,08 CV, ce qui correspond, avec un rendement mécanique de 1/1 de la pompe, à l'exhaure d'un débit de 2,2 m^3/h si la nappe est à 10 m de profondeur, de 760 l/h à 30 m, de 430 l/h à 50 m et de 280 l/h à 80 m.

– Débit pratique : compte tenu du rendement décroissant de la pompe avec la profondeur, des discontinuités de puisage, de l'inégalité des forces des usagers successifs, il est d'observation courante que le débit d'exhaure pratique dépasse exceptionnellement 700 l/h sur une période de plusieurs heures [8].

– Caractéristiques de quelques pompes [27] :

a) Pompe Abi :

Diamètre du cylindre (mm)		Profondeur
intérieur	extérieur	m
80		0 à 12
70		13 à 20
60		> 30

b) Pompe Atlas Copco «Uganda» :

Diamètre du cylindre (mm)		Profondeur	Débit (*)
intérieur	extérieur	m	l/h
100	127	15	1 700
70	98	25	900
57	85	50	600
46	67	60	400

(*) à 22 coups/mn avec une course de piston de 7".

c) Pompe Bodin (type Solo SL2)

Diamètre du cylindre (mm)		Profondeur
intérieur	extérieur	m
90	110	13
80	100	18
70	90	26
60	78	30
50		40

d) Pompe Briau «Nepta»

Diamètre du cylindre (mm)		Profondeur	Débit*
intérieur	extérieur	m	l/h
120	135	10	4 500
100	115	15	3 000
80	95	25	2 000
60	78	45	1 200
50	78	65	800
40	78	100	450

(*) à 40 coups/mn

e) Pompes Deplechin (à volant)

Diamètre du cylindre (mm)		Profondeur	Débit*
intérieur	extérieur	m	l/h
100		15	3 200
90		15	2 600
80		20	2 050
70		25	1 560
60		35	1 150
50		50	800

(*) à 50 coups/mn avec un rendement de 90 %.

f) Pompe Vergnet

Type de corps	Diamètre ext. mm	Profondeur m	Débit moyen l/h
4 C 2	90	25	1 400
4 C 2	90	35	1 250
4 C 2	90	45	1 000
4 C 1	90	60	500

2.3. - POMPES SOLAIRES

Exemple : Pompes Guinard Alta FX : débit en m^3/jour pour un ensoleillement moyen de 6 kwh/m^2/j :

Diamètre des pompes :

4" en dessous de 25 m^3/j environ
6" de 25 à 150 m^3/j environ
8" au-dessus.

DÉBITS ET HAUTEURS MANOMÉTRIQUES POSSIBLES AVEC LES POMPES SOLAIRES GUINARD ALTA XF

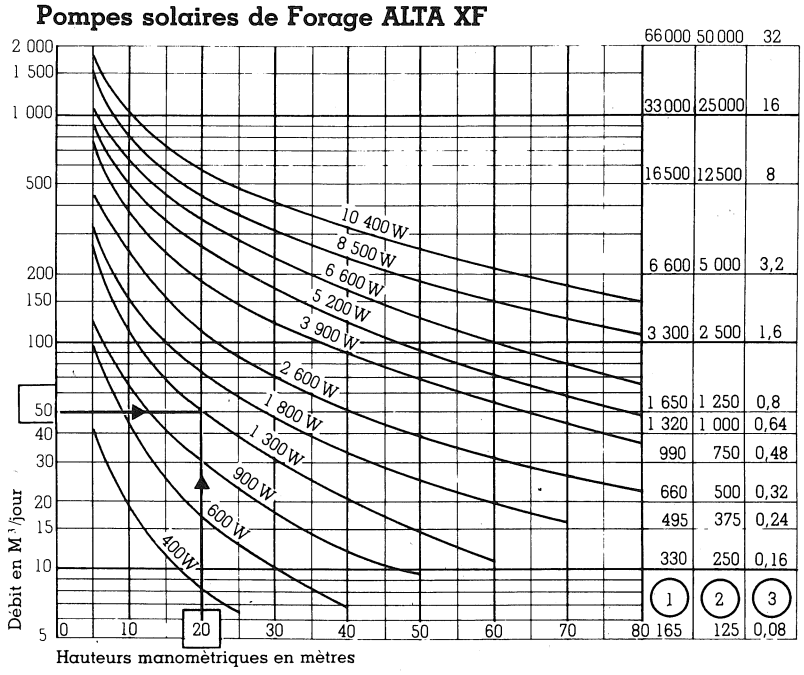


Figure 24

2.4. - POMPES ÉLECTRIQUES IMMERGÉES

Exemple : Pompes Grundfos - Série SP

Diamètre	Débit m³/h	HMT m
4"	0 - 12	250 à 120
6"	12 - 50	250 à 90
8"	50 - 90	180 à 100
10"	90 - 150	110 à 70

2.5. - POMPES A AXE VERTICAL

Exemple : Pompe Layne : Débit et HMT par turbine (m³/h à 1 750 t/mn)

HMT m	6"	7"	8"	10"	12"	14"
5	12	35				
10			45	120		
15				90	230	
20					140	500
30						300

ANNEXE 3

SONDEUSES AU ROTARY A L'AIR ET AU MARTEAU FOND DE TROU : DONNÉES COMPLÉMENTAIRES SUR LE MATÉRIEL, LE FONCTIONNEMENT ET L'ENTRETIEN

3.1. Origine de la force motrice : différents montages possibles

3.2. Transmission : différents modes de transmission utilisés

3.3. Air comprimé :

- Débit d'air nécessaire pour assurer la remontée des déblais
- Consommation d'air des marteaux et dimension des taillants
- Caractéristiques des compresseurs
- Comparaison des coûts d'utilisation de la haute pression et de la basse pression

3.4. Boue :

- Vitesse de remontée dans l'espace annulaire
- Débits et pression de refoulement de quelques pompes à boue

3.5. Tiges de forage

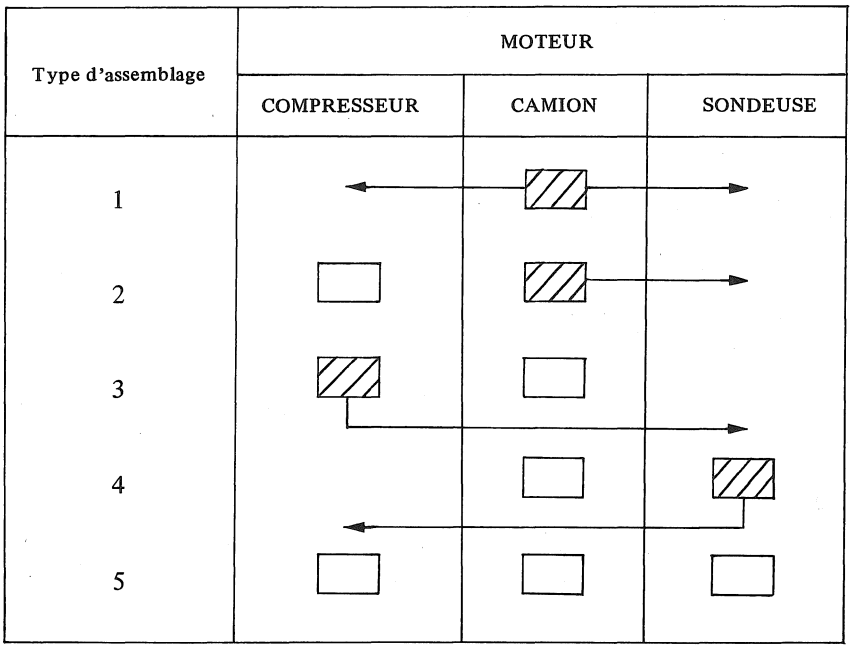
3.6. Exemple de charte d'entretien d'une sondeuse à transmission hydraulique

3.7. Consommations : statistiques établies sur un programme récent en Côte d'Ivoire

3.1. - RÉPARTITION DE LA FORCE MOTRICE

Figure 25

CLASSIFICATION DES SONDEUSES EN FONCTION
DES SCHÉMAS DE CONSTRUCTION



Légende : moteur indépendant

moteur assurant plusieurs fonctions

Assemblages adoptés habituellement par les constructeurs :

1	Ingersoll	TH 60	4	Atlas Copco	Rotamec 1302
	Ingersoll	RO 300		Portadrill	TLS
2	Bonne Espérance	FBE 2	5	Acker	WA II
	Failing	1 250		Simco	5000 WS
	Foraco	SM 70		Stenuick	Perfo 80
	Foraco	VPRH		Umdi	DO 100
				Umdi	SR 200
3	Atlas Copco	Aquadrills			
	Stenuick	Perfo 66D			

3.2. - MODE DE TRANSMISSION UTILISÉ SUR QUELQUES SONDEUSES

MARQUE	TYPE	Transmission		
		mécanique	hydraulique	pneumatique
Acker	WA II		x	
Airdrill	500 standard	Pompe à boue seule	x	
Atlas Copco	Aquadrill Rotamec 1302		 x	x Pompe à boue seule
Bomag	B 400		x	
Bonne Espérance	FBE 2		x	
Domine	DO 100 SR 200		x x	
Failing	1 250	x	translation et fonctions annexes	
Foraco	VPRH SM70	 Rotation seule	x x	
Ingersoll Rand	TH60 RO300		x x	
Portadrill	TLS		x	
Simco	5000 WS		x	
Stenuick	Perfo 66D Perfo 80		 x	x Saturne seul

3.3. - AIR COMPRIMÉ

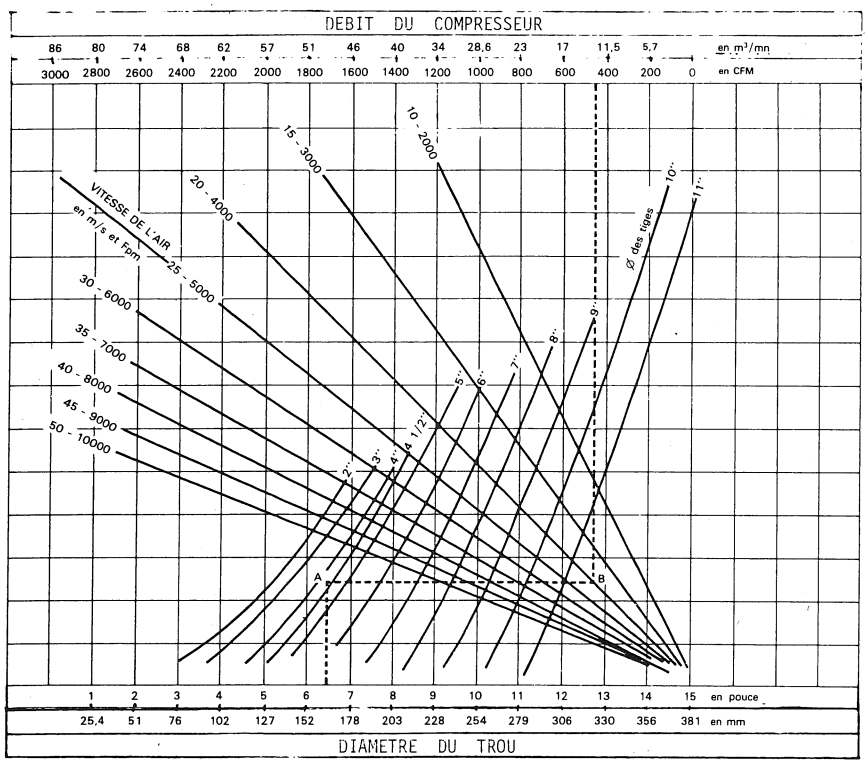
3.3.1. - Débit d'air nécessaire à la remontée des déblais

- Abaque donnant le débit d'air en fonction du diamètre du trou et des tiges et de la vitesse désirée, établi d'après la formule :

$$V\,(m/s) = \frac{Q\,(m^3/s)}{S\,(m^2)} = \frac{\text{débit du compresseur } (m^3/s)}{\text{différence des sections (trou-tiges)}}$$

Figure 26

CALCUL DU VOLUME D'AIR NÉCESSAIRE A LA REMONTÉE
DES DÉBLAIS DANS L'ESPACE ANNULAIRE



(document Hausherr France)

- Débit d'air assurant une vitesse de remontée de 15 m/s (3 000 ft/mn) dans l'espace annulaire (m^3/mn) :

Diamètre du forage	Tiges 3 1/2"	Tiges 4 1/2"
6"	10,8	7,1
6 1/4"	12,2	8,6
6 1/2"	13,7	10
7"	16,7	13
7 7/8"	22,7	19
8 1/2"	27,4	23,7

3.3.2. - Consommation d'air des marteaux fond de trou
(renseignements fournis par les constructeurs)

Pression	Marteau	ϕ ext. (pouces)	ϕ taillant (pouces)	Consommation d'air (m^3/mn)
10,5 bars	Ingersoll DHD 340	3 1/2	4 1/2	4,25
	Ingersoll DHD 350	4 1/2	5 1/8 - 5 1/2	7,4
	Ingersoll DHD 360	5 3/8	6, 6 1/2, 8 1/2 (*)	9,3 si forage en 6 ou 6 1/2"
	Ingersoll DHD 17	6 1/2	7 1/2 - 8	
	Mission A 53-15	5 3/8	6 - 8 5/8	13 à 18,7
	A 53-25	5 3/8	6 - 8 5/8	8,5 à 14,1
	A 63-15	6 3/8	7 5/8 - 10	16,3 à 27,4
	Atlas Cop 4	3 21/32	4 1/8 - 4 1/2	6,6
	Cop 6	5 3/8	6 - 6 1/2	12,7
	Stenuick 100 FL D 17	3 3/4	4 - 5 1/4	10,5
	S 551	4 3/8	5 1/8 - 6 1/8	11,5
	S 651	6	6 1/2 - 8 11/16	16,5
14 bars	Ingersoll DHD 15	3 1/2	5 - 5 1/2	20,5
	Mission A 53-15	5 3/8	6 - 8 5/8	17,6 à 21,6
	A 53-25	5 3/8	6 - 8 5/8	12,2 à 19,9
	A 63-15	6 3/8	7 5/8 - 10	22,4 à 35,8
17,5 bars	Ingersoll DHD 380	7	8 - 8 1/2	32
	Ingersoll DHD 360	5 3/8	6, 6 1/2, 8 1/2	16,1
	Ingersoll DHD 17	6 1/2	7 1/2 - 8	31,1
	Ingersoll DHD 350	4 1/2	5 1/8 - 5 1/2	13,5
	Mission A 53-15	5 3/8	6 - 8 5/8	21,6 à 30,8
	A 53-25	5 3/8	6 - 8 5/8	16 à 25,2
	A 63-15	6 3/8	7 5/8 - 10	30,9 à 47,5
	Stenuick S 551	4 3/8	5 1/8 - 6 1/8	19,5 (à 20 bars)
	S 651	6	6 1/2 - 8 11/16	24 (à 20 bars)
24,5 bars	Ingersoll DHD 360	5 3/8	6, 6 1/2, 8 1/2	26,6
	Ingersoll DHD 350	4 1/2	5 1/8 - 5 1/2	22,7

(*) *En réalésage*

3.3.3. - Caractéristiques des compresseurs

Marque	Type	Moteur		Débit m^3/mn	Pression bars	Poids kg	Observations
		CV	t/mn				
Ingersoll Rand	XP 600 S	196	2 500	17	8,8	3 535	Sur skid
	HP 525 S	196	2 500	15	10,5	3 535	Sur skid
	HP 600 W	228	2 100	17	10,5	4 220	Sur skid
	DXL 600 H	228	2 100	16,8	10,5	4 176	Sur skid
	XHP 750 S	290	2 100	21,2	17,5	5 035	Sur roues
	XHP 950 D	460	2 100	26,8	24,5	10 000	Sur skid
Sullair	750/2	360	2 100	21,2	17,6	4 530	Sur skid
	750/350	400	2 100	21,2	24,6	6 480	Sur skid
	900/350	500	2 100	25,5	24,6	8 000	Sur skid
Atlas Copco	PRH 700	261	2 100	19,8	7	3 600	
	XA 350	180	2 300	21	7	3 365	Sur roues
	XR 350	225	2 300	21	12	4 120	Sur roues
	XRH 350	340	2 300	21	20	4 380	Sur roues
Gardner Denver	STQYQA	340	2 100	21,2	24,1	7 938	Poids du groupe moto-compresseur sur skid
	STQYSA	340	2 100	25,5	17,2	7 938	
Holman	R 075-170			21	12	6 155	Sur roues
	R 070-VHP	379	1 900	19,8	17,6	5 706	Sur roues
	R084-250S	400	2 075	24	17		
Bauer	DSF10H18	260	2 000	18	18	4 700	

3.3.4. - Comparaison des coûts d'utilisation de la haute pression et de la basse pression (*)

Haute pression = 17,5 bars Basse pression = 10-12 bars

Hypothèses basse pression :

Forage de 50 m dont	20 m d'altérites
	30 m de roches saines
2 postes de 9 h/forage	12 h avec force motrice
	6 h sans force motrice
10 forages/mois, soit	200 ml dans les altérites
	300 ml dans la roche saine

	F CFA
Majoration mensuelle pour haute pression :	
Amortissement compresseur 8,25 millions 2 % mois	165 000
Entretien	82 500
Carburant 65 CV supplémentaires	167 500
	415 000

Gain de temps mensuel :

Basse pression :	altérites 200 m à 15 m/h	= 13,3 h
	roche saine 300 m à 8 m/h	= 37,5 h
		50,8 h
Haute pression :	altérites 200 m à 25 m/h	= 8 h
	roche saine 300 m à 15 m/h	= 20 h
		28 h

Gain de temps = 50,8 – 28 # 23 heures

Coût moyen de l'heure d'atelier haute pression :

Amortissement : $\frac{125\,000\,000 \times 2\,\%/\text{mois}}{200\text{ h}}$ =	12 500
Personnel chantier	2 250
Carburants, lubrifiants	4 500
Entretien	6 750
Foreur assistant technique	13 000
Divers	3 500
	42 500

Economie mensuelle introduite par la haute pression :

Majoration des dépenses	415 000
Economie sur le temps gagné : 23 x 42 500 =	977 500
Economie mensuelle	**562 500**

(*) *Chiffres 1981*

3.4. – BOUE DE FORAGE

3.4.1. – Vitesse de remontée de la boue dans l'espace annulaire (en m/mn) :

Diamètre tiges (pouces)	Diamètre trou (pouces)	Débit de la boue (l/mn)			
		380	760	1 140	1 500
3 1/2	6 1/4	28	56	84	
	6 3/4	22	45	67	89
	7 5/8	17	33	50	67
	7 7/8	15	30	45	61
	8 3/8	13	26	39	52
	8 1/2	13	26	38	51
	9	11	22	33	44
	9 3/8	10	19	29	38
4 1/2	7 3/4	19	38	57	77
	8 3/8	16	31	46	62
	8 1/2	15	30	44	59
	9	12	25	38	50
	9 5/8	11	21	32	43
	10 5/8	8	16	24	33

3.4.2. – Débits et pressions de service de quelques pompes à boue :

(Pour les pompes à pistons, il s'agit de la gamme des débits obtenue avec différents diamètres de pistons).

Pompe à pistons plongeurs BE 110 x 140 :

150 l/mn	à	70 bars
428 l/mn	à	25 bars
592 l/mn	à	18 bars
718 l/mn	à	15 bars

Pompe duplex BE 7 x 8 :

247 l/mn	à	142 bars
1128 l/mn	à	30 bars
1335 l/mn	à	26 bars
1550 l/mn	à	22 bars

Pompe duplex Failing 5 x 6 1/4 :

273 l/mn	à	63 bars
380 l/mn	à	45 bars
500 l/mn	à	34 bars
636 l/mn	à	27 bars
788 l/mn	à	22 bars

Pompe centrifuge Mission Magnum 3 x 2 x 13 :

1137 l/mn	à	12 bars
1326 l/mn	à	11,7 bars
1516 l/mn	à	11,4 bars
1895 l/mn	à	11,1 bars

3.5. – TIGES DE FORAGE

3.5.1. – Qualité de l'acier

NORMES API	Grade C	Grade D	Grade E
Limite élastique kg/mm²	31,6	38,7	52,7
Charge de rupture kg/mm²	52,7	66,8	70,3
Allongement en %	20	18	18

Les embouts sont fabriqués dans un acier beaucoup plus dur que celui des tiges.

3.5.2. – Caractéristiques des tiges

a) Tiges API

ϕ nominal pouces	ϕ extérieur mm	Épaisseur mm	Poids kg/m Tiges de 9 m avec tool joints F.H.
3 1/2	88,9	5,56	12,7
3 1/2	«	7,62	16,7
3 1/2	«	9,35	19,8
4 1/2	114,3	6,88	20,5
4 1/2	«	8,56	24,7

b) Tiges utilisées en forage à l'air comprimé

- Tiges conventionnelles

Marque (exemples)	Longueur m	Tiges 3 1/2 "		Tiges 4 1/2 "	
		épais. mm	poids kg/m	épais. mm	poids kg/m
Failing	1,50	7,62	24,4	8,56	36,7
	3	«	19,2	«	29,5
	4,50	«	17,6	«	27,1
	6	«	16,7	«	25,9
Foraco	3	6,5	14,7	6,35	22
	4,50	«	14,4	«	20,4
	6	–	–	«	19,7
Domine	1,50	4	17,3		
	3	«	12,7		
	6	«	10,5		
	1,50	5,5	19,3	6,3	31,3
	3	«	15,3	«	24
	6	«	13,3	«	20,5

- Tiges spéciales pour MFT :

Marque	Longueur m	Poids en kg/m		
		Tiges 90 (3 1/2 ")	Tiges 120 (4 3/4 ")	Tiges 140 (5 1/2")
Stenuick	1	18	26,5	31
(Tiges simples	2	13,5	19	22,5
épaisseur 5 mm)	3	12	16,7	21,7

- Doubles tiges pour circulation inverse à l'air :

Marque	ϕ ext.	ϕ int.
Foraco	5 "	2 1/2 "
	8 "	6 "
Ingersoll Rand	6 1/2 "	

3.6. – EXEMPLE DE CHARTE D'ENTRETIEN D'UNE SONDEUSE A TRANSMISSION HYDRAULIQUE (*)

1) Contrôle et graissage

Tous les jours : 10 points de contrôle, 10 points de graissage.
Toutes les semaines 8 points de contrôle, 6 points de graissage supplémentaires
Tous les mois : 11 points de contrôle, 5 points de graissage supplémentaires.

2) Lubrifiants

Organes à lubrifier	Volume huile (litres)	Fréquence des vidanges	Type de lubrifiant	Prix approxim. F CFA/l (**)
Moteur camion (8V92t)	37	100 h	Huile moteur diesel MIL 2104B SAE 40	520
Boîte Fuller	13	600 h	Huile MIL 2104C SAE 50	535
Pont AV et AR camion	25	26 000 km camion	Huile MIL 2105B SAE 140	570
Boîte de transfert			Graisse	
Boîte Cotta	10 à 15	6 mois	Huile MIL 2105B SAE 140	570
Boîte Fuller d'entraînement des pompes	5 à 10	6 mois	Huile MIL 2105B SAE 90	570
Système hydraulique	400	6 mois	Huile hydraulique antiusure 68CSP à 40°C	485
Tête de rotation	10	2 mois	Huile MIL 2105B SAE 90	570
Compresseur 21 m^3/mn, 17,5 bars	128	1000 h ou 6 mois	Huile de synthèse spéciale compresseur (SHC 626)	2 260
Graisseur de ligne pour marteaux	2 l/h 2,5 l/h si forage à la mousse)		Huile spéciale pour marteaux ISO 100	460
Réducteur pompe à boue	15	2500 h ou 6 mois	Huile MIL 2105B SAE 90	570
Pompe à boue	40	5000 h	Huile MIL 2105B SAE 140	570

3) Filtres

Type de filtre	Nombre	Fréquence de changement	Coût approx. F CFA (***)
Filtre à huile moteur	1	2 mois	14 000
Filtre à gas oil	2	«	16 600 les 2
Filtre à air moteur	2	«	46 350 les 2
Filtres à air compresseur	2	«	46 350 les 2
Filtres à huile hydraulique	2	6 mois	35 000 les 2
Filtres à huile compresseur		«	8 700

(*) Sondeuse Ingersoll-Rand TH60
(**) Prix T.T.C. Abidjan, août 1981
(***) Prix T.T.C. France, août 1981

3.7. - CONSOMMATIONS : STATISTIQUES SUR UN PROGRAMME RÉCENT EN COTE D'IVOIRE (*)

- Programme de forages villageois dans des granites de dureté moyenne réalisé en 14 mois avec 3 machines.
- Métrage total effectué : 24 248 m (dont 12 786 m dans les altérites et 11 462 m dans la roche saine).
- Nombre de forages réalisés : 420, dont 330 positifs et équipés.
- Profondeur moyenne des forages positifs : 57 m (dont 32 m dans les altérites et 25 m en roche saine).

Consommations moyennes par forage

– Gas-oil	623 l
– Mousse	33 l
– Huile	42,7 l
– Gravier	0,48 m^3
– Ciment	500 kg

Métrage moyen par outil de forage

– Marteaux	1910 m
– Taillants	546 m
– Tricônes à dents	182 m
– Tricônes à pastilles	1626 m

Heures de travail des sondeuses

- 5 198 h pour les 3 sondeuses, soit 4,7 m/heure.

(*) Programme terminé en 1981

ANNEXE 4

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE DIFFÉRENTS MODÈLES DE SONDEUSES

1) SONDEUSES ROTARY -MARTEAU FOND DE TROU

Acker WA II
Atlas Copco Aquadrills
Atlas Copco Rotamec 1302
Bonne Espérance FBE2 GC
Failing 1250
Foraco SM 70
Foraco VPRH
Ingersoll Rand TH 60
Ingersoll Rand RO 300
Portadrill TLS
Simco 5000 WS
Stenuick Perfo 66 D
Stenuick Perfo 80
Umdi DO 100
Umdi SR 200

2) SONDEUSES ROTARY

Longyear 24
Failing 2500

3) SONDEUSES AU BATTAGE

Bonne Espérance APEC
Dando 800
Walker Near S46 A

4) SONDEUSES POUR PUITS FORÉS

Calweld 250 B
Secmi TP 1
Galinet Teknifor MB 750

LÉGENDE DES SCHÉMAS

..... Circuit d'air comprimé
——— Circuit hydraulique
— — — Chaîne
—.—.— Câble
——— Arbre
} Transmission mécanique

BV = Boîte de vitesse
BT = Boîte de transfert
PTO = Power Take Off (prise de force)
MFT = Marteau fond de trou

Marque : **ACKER**	*Type :* **WA II**

Sondeuse polyvalente

- **Caractéristiques essentielles** : sondeuse polyvalente rotary + MFT, circulation inverse, tarière ; tête de rotation, transmission hydraulique.
- **Moteur** : sondeuse : moteur 100 CV à 1800 t/mn GM 4031-C
  Compresseur : unité indépendante
- **Rotation** : tête de rotation entraînée par 2 moteurs hydrauliques + réduction à 2 vitesses

Type	Basse vitesse		Haute vitesse	
	t/mn	m.kg	t/mn	m.kg
1 moteur	70	710	226	1 350
2 moteurs	34	1 438	125	379

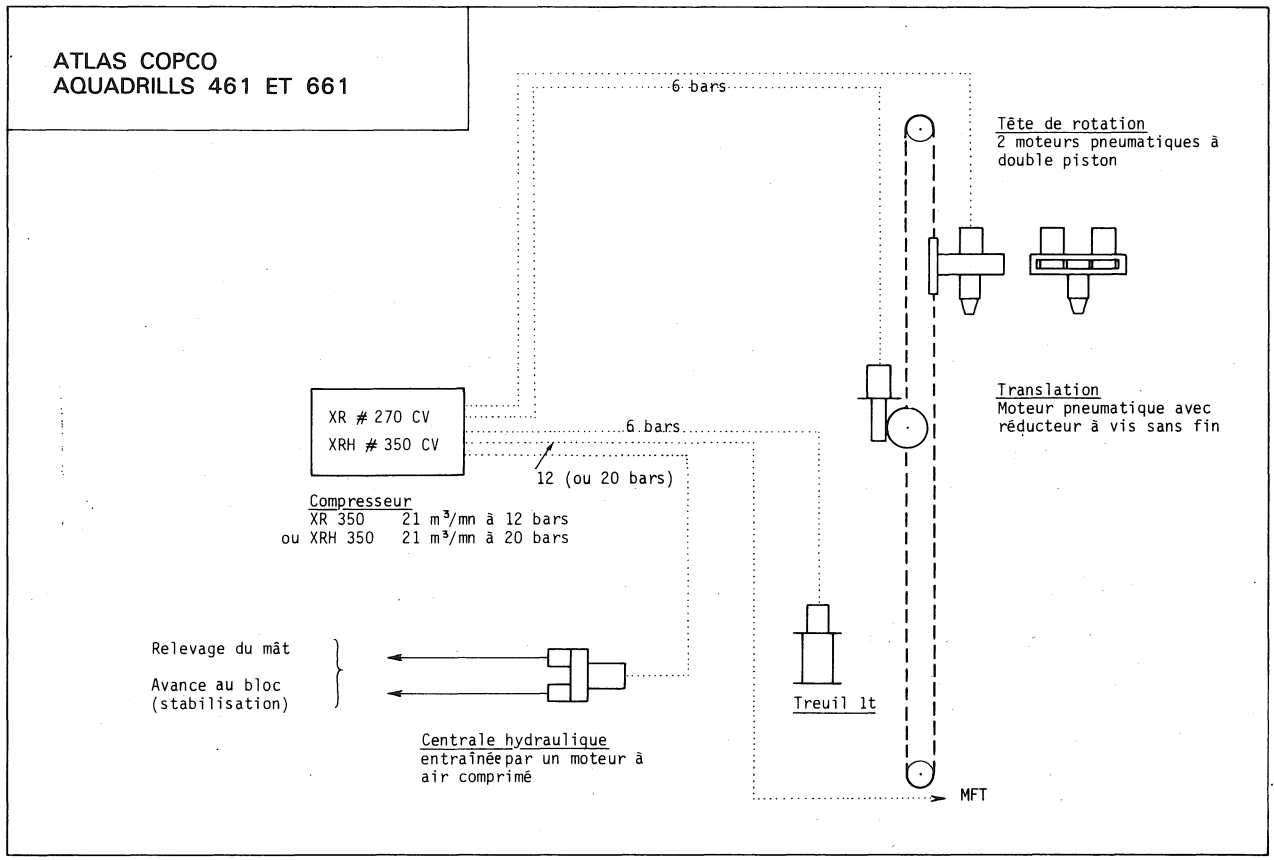
- **Translation** : vérin à double effet + câble moufflé.

Fonction	Force maxi	Vitesse
poussée	10,9 t	2,4 à 12 m/mn
traction	9 t	3 à 15 m/mn

Course : 7,32 m

- **Centrale hydraulique** :

  1 pompe principale à débit variable 250 l/mn à 175 bars
  1 pompe auxiliaire à débit fixe 70 l/mn à 140 bars
- **Mât** : en profilés ; course utile 7,32 m
- **Treuil** : entraînement hydraulique (engrenage planétaire)
  force : 4,5 t sur brin simple
  capacité : 27,5 m de câble 1/2"
  vitesse : 15,8 m/mn (sur 1ère rangée)
  frein automatique dans les 2 sens.
- **Compresseur** (option) : compresseur autonome 10 m^3/mn à 7 bars pour circulation inverse.
- **Pompe à boue** (option) : 580 l/mn à 22 bars.
- **Poids de la sondeuse seule** : (sans compresseur ni pompe à boue) 8,9 t.
- **Chargement des tiges** : tête de rotation basculante.


ATLAS COPCO
AQUADRILLS 461 ET 661
6 bars
Tête de rotation
2 moteurs pneumatiques à
double piston
XR # 270 CV
XRH # 350 CV
6 bars
12 (ou 20 bars)
Translation
Moteur pneumatique avec
réducteur à vis sans fin
Compresseur
XR 350 21 m³/mn à 12 bars
ou XRH 350 21 m³/mn à 20 bars
Relevage du mât
Avance au bloc
(stabilisation)
Treuil 1t
Centrale hydraulique
entraînée par un moteur à
air comprimé
MFT

Marque : ATLAS COPCO	*Type :* **AQUADRILL 461 ET 661**

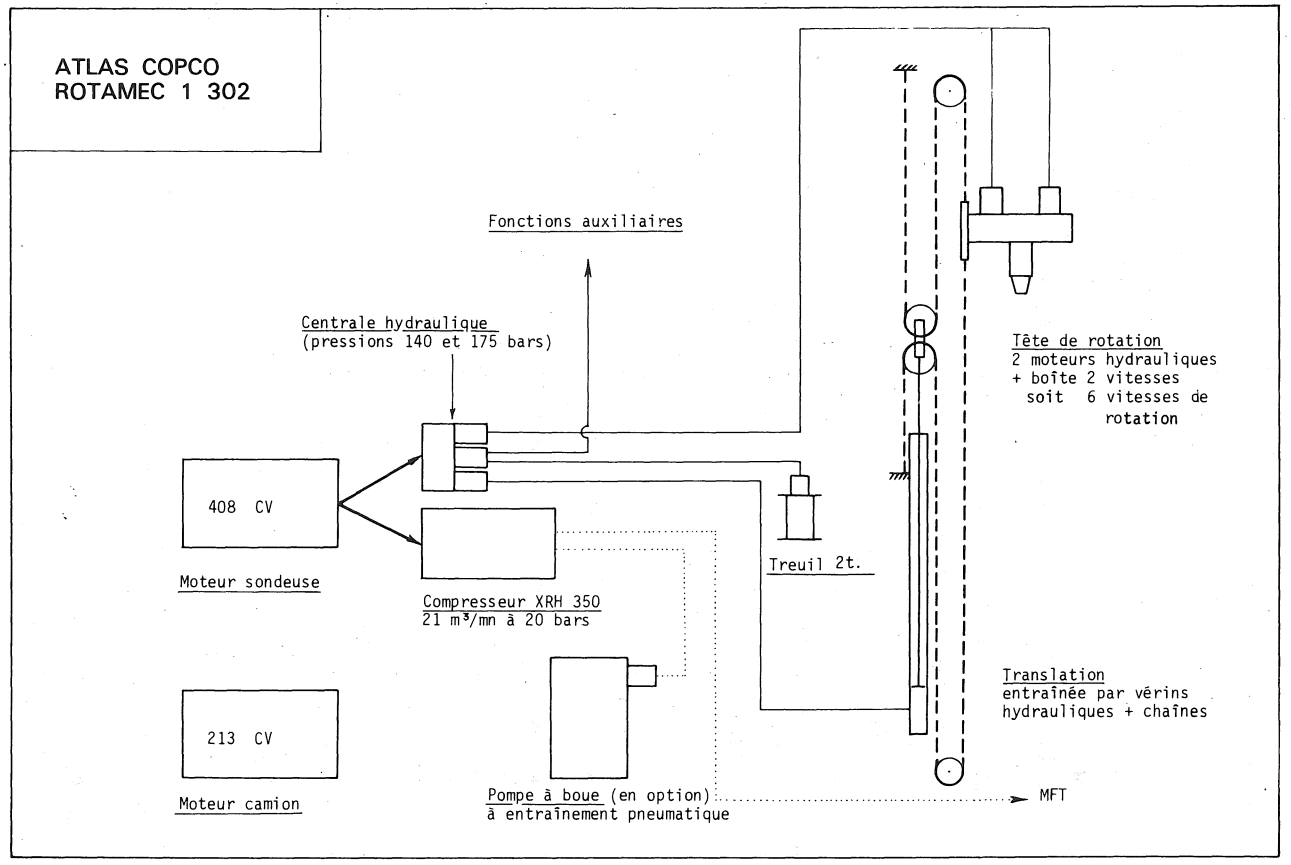
Perforatrice

- **Caractéristiques essentielles** : MFT seul ; transmission pneumatique ; tubage à l'avancement ; deux versions : Aquadrill 461 avec marteau Cop 4, Aquadrill 661 avec marteau Cop 6 ; tête de rotation.
- **Moteurs** : Moteur du compresseur :
  XR 350 (21 m^3/mn à 12 bars) : 225 CV à 2300 t/mn (Deutz F8L 413)
  ou
  XRH 350 (21 m^3/mn à 20 bars) : 340 CV à 2500 t/mn (Deutz F12L 413)
- **Rotation** : tête de rotation entraînée par 2 moteurs pneumatiques.
  Vitesse variable de manière continue de 0 à 60 t/mn.
  Couple maxi : 200 m.kg.
- **Tubage à l'avancement** : Système Odex.
  Taillant excentré permettant de mettre en place des tubes métalliques soudés (dont la descente est facilitée par la frappe du MFT sur un sabot de pied).

Type	Marteau	ϕ Taillants mm	ϕ int. sabot mm
Aquadrill 461	Cop 4	105 à 115	115
Aquadrill 661	Cop 6	152 à 165	165

- **Translation** : Moteur pneumatique et chaîne
  Poussée maxi : 3,4 t.
  Traction maxi : 3,4 t.
  Vitesse : 2,8 m/mn.
  Course maxi : Tiges de 3,5 m.
- **Mât** : En profilé.
- **Treuil** : Entraînement pneumatique
  Puissance sur brin simple : 1 t.
  Moufflage à 2 brins ; puissance totale 2 t.
- **Pompe d'injection eau-mousse** : Pompe pneumatique indépendante Alémite.
- **Chargement des tiges** : treuil de manutention sur Aquadrill 661.
  Chargement à la main sur Aquadrill 461.
- **Poids sondeuse seule** : (sans le compresseur) :

  Aquadrill 461 : 2,25 t.
  Aquadrill 661 : 2,7 t.


ATLAS COPCO
ROTAMEC 1 302
Fonctions auxiliaires
Centrale hydraulique
(pressions 140 et 175 bars)
408 CV
Moteur sondeuse
Compresseur XRH 350
21 m³/mn à 20 bars
213 CV
Moteur camion
Pompe à boue (en option)
à entraînement pneumatique
Treuil 2t.
Tête de rotation
2 moteurs hydrauliques
+ boîte 2 vitesses
soit 6 vitesses de
rotation
Translation
entraînée par vérins
hydrauliques + chaînes
MFT

Marque : **ATLAS COPCO**	*Type :* **ROTAMEC 1302**

Sondeuse mixte Rotary/MFT

- **Caractéristiques essentielles** : Rotary + MFT ; tête de rotation ; transmission hydraulique (+ pneumatique) ; tubage à l'avancement.
- **Moteur** : Moteur sondeuse : 408 CV à 2100 t/mn (GM 12V7IN G5)
  Il entraîne la centrale hydraulique et le compresseur.
- **Compresseur** : Atlas XRH 350 Gd : 21 m^3/mn à 20 bars.
- **Rotation** : Tête de rotation entraînée hydrauliquement. 2 moteurs + 1 réducteur ; 2 pompes à palettes à débit fixe pouvant fonctionner ensemble ou séparément, d'où 6 vitesses de rotation :

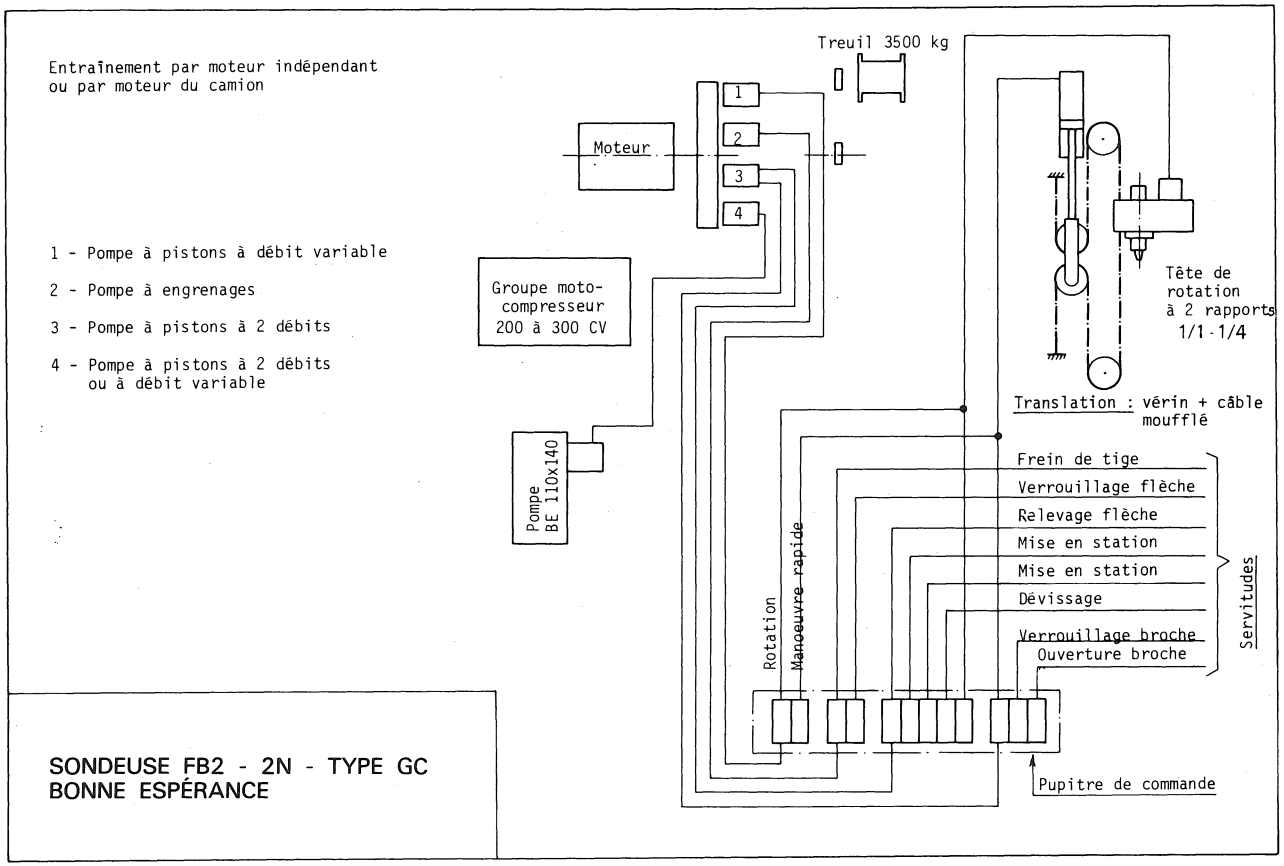
Vitesse maxi	Couple	Vitesse maxi	Couple
10 t/mn	1172 m.kg	34	1284
18 t/mn	672 m.kg	62	729
23 t/mn	553 m.kg	80	573

- **Translation** : Vérin + chaîne moufflée.
  Poussée maxi : 13,2 t.
  Traction maxi : 13,2 t.

Vitesses	montée	descente
rapide	30,6 m/mn	23 m/mn
lente	3,5 m/mn	2,6 m/mn

Course utile : Pour tiges de 6,25 m.

- **Mât** : Treillage métallique.
- **Treuil** : Entraînement hydraulique.
  2 t. sur brin simple.
  Pas de moufflage : capacité totale : 2 t.
- **Pompe à boue** : Entraînée par un moteur pneumatique à 2 cylindres (ou sur option par un moteur thermique indépendant).
- **Pompe d'injection eau/mousse** : Pompe à piston entraînée par un moteur hydraulique. Débit : 38 l/mn.
- **Chargement des tiges** : Barillet de 4 tiges
  Treuil et tête de levage pour les tiges suivantes.
- **Dégagement axe du forage** :
  - La tête de rotation peut être positionnée en haut du mât (course utile : 7,60 m).
  - Table de calage des tiges : ouverture maxi : 508 ou 600 mm (options).
- **Poids** : 20,1 t. pour l'ensemble décrit ci-dessus.


Entraînement par moteur indépendant
ou par moteur du camion
1 - Pompe à pistons à débit variable
2 - Pompe à engrenages
3 - Pompe à pistons à 2 débits
4 - Pompe à pistons à 2 débits
ou à débit variable
Treuil 3500 kg
Moteur
1
2
3
4
Groupe moto-
compresseur
200 à 300 CV
Pompe
BE 110x140
Tête de
rotation
à 2 rapports
1/1 - 1/4
Translation : vérin + câble
moufflé
Frein de tige
Verrouillage flèche
Relevage flèche
Mise en station
Mise en station
Dévissage
Verrouillage broche
Ouverture broche
Servitudes
Rotation
Manoeuvre rapide
Pupitre de commande
SONDEUSE FB2 - 2N - TYPE GC
BONNE ESPÉRANCE

Marque : **BONNE ESPÉRANCE**	*Type :* **F B E 2 N Type GC**
Sondeuse mixte Rotary/MFT	

- **Caractéristiques essentielles** : Rotary + MFT ; transmission hydraulique ; tête de rotation.
- **Moteurs** :
  - Sondeuse : prise de force sur moteur camion 136 CV à 2300 t/mn (DIN A) DEUTZ F 6L 413
  - Compresseur : unité indépendante.
- **Compresseur** : au choix de l'utilisateur
- **Rotation** : Tête de rotation entraînée par 1 moteur hydraulique (pompe hydrostatique)
  Réduction épicycloïdale 2 vitesses

Rapport	Vitesse de rotation	Couple maxi	
1/4	Var. cont. de 0 à 90 t/mn	800 m.kg	version B
1/1	" " 0 à 360 t/mn	200 m.kg	

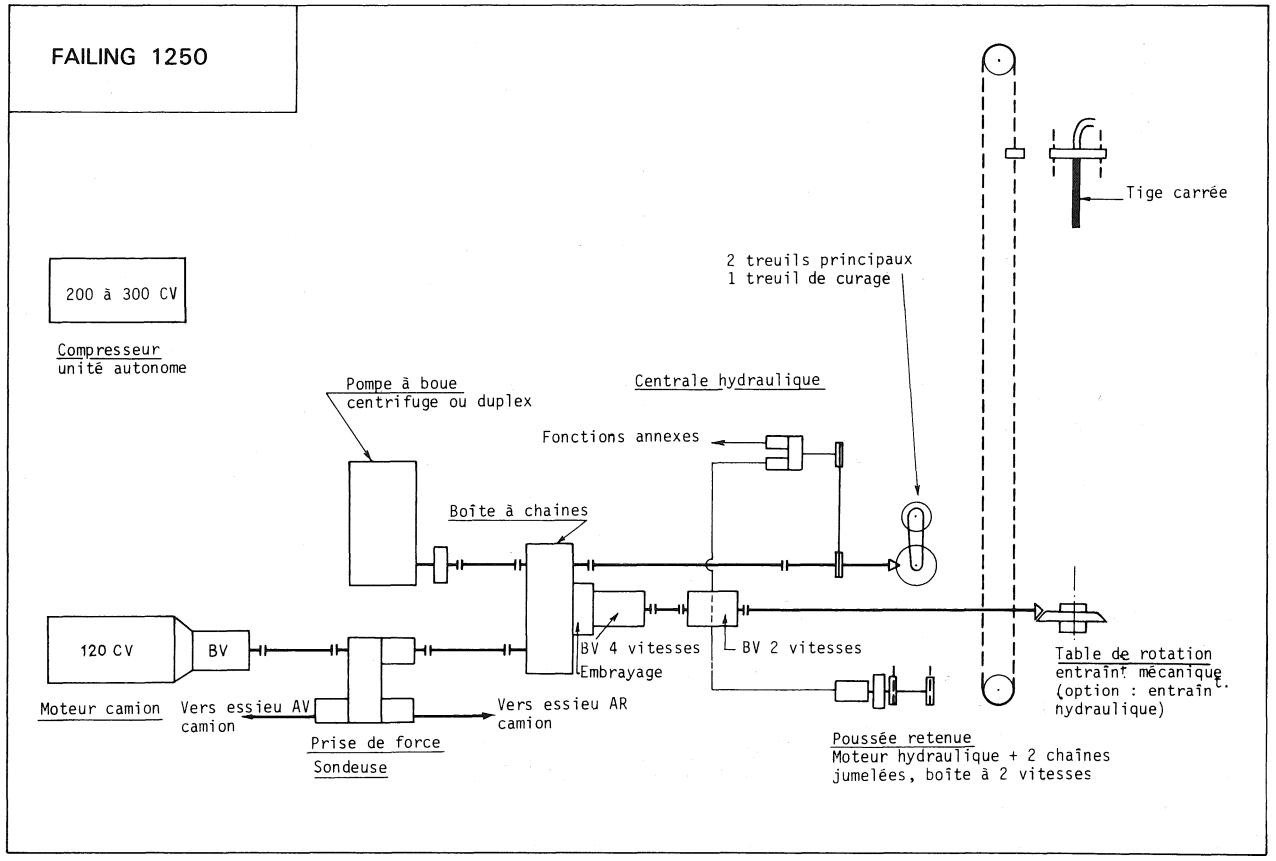
- **Translation** : Vérin + câble moufflé
  poussée maxi : 5,8 t.
  traction maxi : 9 t.
  course utile : 6,40 m
  vitesses :

m/mn	Montée	Descente
Forage	0 à 5	0 à 9
Manœuvre	0 à 4	0 à 81

- **Mât** : Treillage métallique ; capacité 20 t.
- **Treuil** : Entraîné directement par le moteur du camion
  3,5 t. sur brin simple
  Moufflage à 2 brins
  Force de traction totale : 7 t.
  Chute libre permettant le battage
- **Pompe à boue** : Entraînée hydrauliquement : 3 types possibles

Type	l/mn	bars	Puissance moteur
p. à pistons plongeurs BE 100/110			20 CV
« « BE 110/140	432	25	30 CV
	718	15	
pompe duplex 7" x 8"	767	44	90 CV
	1550	22	

- **Pompe d'injection eau mousse** : Entrainement pneumatique ; 0 à 60 l/mn
- **Dégagement axe du forage** : tête de rotation pivotante (diam. disponible 60 cm).
- **Chargement tiges** : collier élévateur fixé sur la tête de rotation.
- **Poids** : sondeuse seule avec pompe à boue, sans compresseur : 10,7 t.


FAILING 1250
200 à 300 CV
Compresseur
unité autonome
Pompe à boue
centrifuge ou duplex
Centrale hydraulique
Fonctions annexes
2 treuils principaux
1 treuil de curage
Tige carrée
Boîte à chaines
120 CV
BV
Moteur camion
Vers essieu AV
camion
Prise de force
Sondeuse
Vers essieu AR
camion
BV 4 vitesses
Embrayage
BV 2 vitesses
Table de rotation
entraînt mécanique
(option : entraînt.
hydraulique)
Poussée retenue
Moteur hydraulique + 2 chaînes
jumelées, boîte à 2 vitesses

Marque : **FAILING**	*Type :* **1250**
Sondeuse mixte Rotary/MFT	

- **Caractéristiques essentielles** : Rotary à la boue et à l'air (+ MFT), table de rotation, transmission mécanique.
- **Moteurs** :
  - Pour la sondeuse, prise de force sur moteur camion 120 CV à 1 800 t/mn (DIN A) ou toute autre option.
  - Pour le compresseur éventuel, moteur autonome.
- **Rotation** : Table de rotation entraînée mécaniquement (ou hydrauliquement sur option).
  1 boîte 4 vitesses + 1 boîte 2 vitesses (1/1 et 1/2).

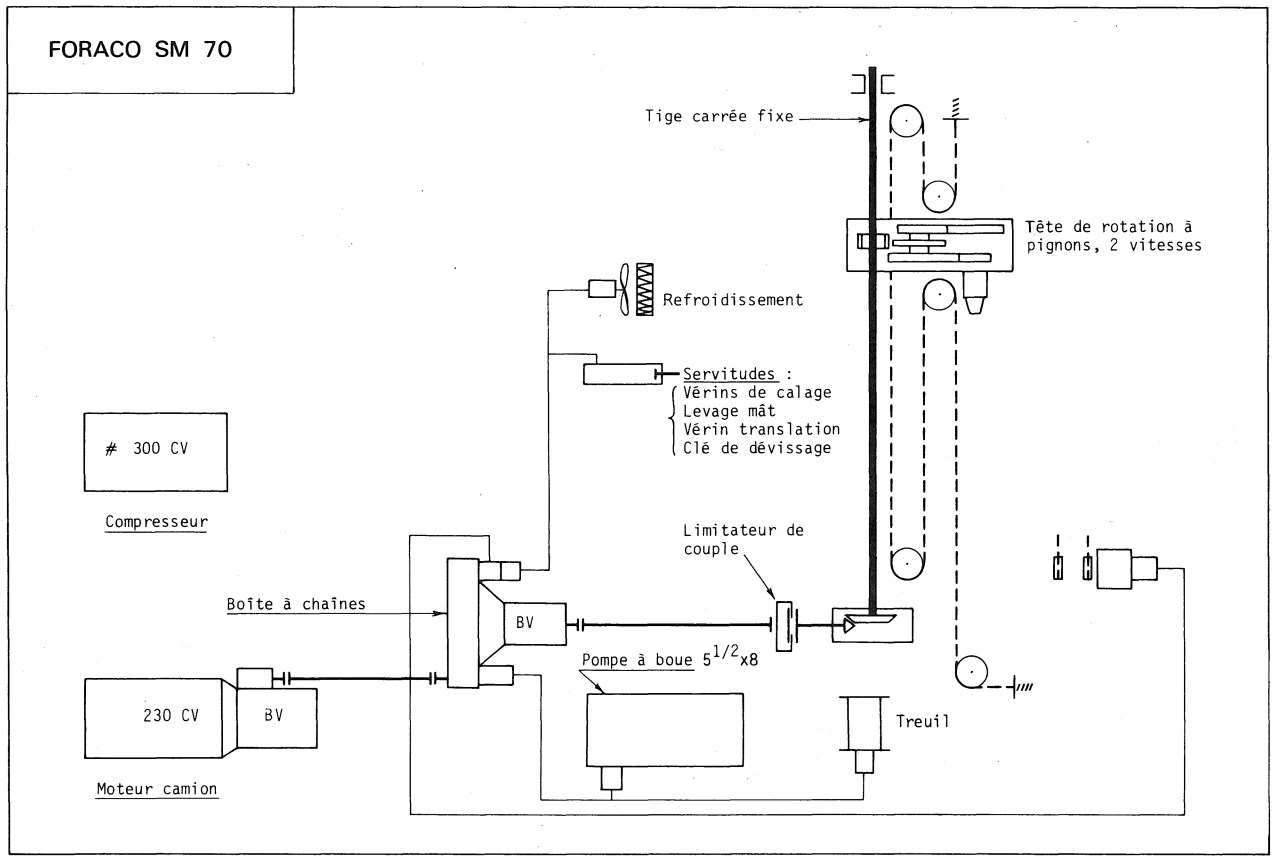
Rapports		Vitesse	Couple
Rapport 1/1 sur la 2e boîte de vitesse	1e	36 t/mn	1 360 m.kg
	2e	55 t/mn	827 m.kg
	3e	112 t/mn	447 m.kg
	4e	210 t/mn	257 m.kg
Rapport 1/2		Vitesses moitiés, couples doubles	

- **Translation** : Support et relevage du train de tiges assuré par le treuil principal.
  Course utile : 9,60 m.
- **Retenue et poussée** : 2 chaînes jumelées entraînées par 1 moteur hydraulique + boîte 2 vitesses.

Vitesses	Vitesse d'enfoncement	Poussée
Basse vitesse	0 à 12,3 m/mn	0 à 9,5 t.
Haute vitesse	0 à 19,8 m/mn	0 à 5,9 t.

Retenue limitée à 6 t. par régulation hydraulique.

- **Mât** : En treillis métallique soudé.
  Capacité : 18 t.
  Dégagement sur table : 7,9 ; 9,6 ; 10,7 ; 11,5 m (selon option)
- **Treuils** : – 2 treuils principaux
  Capacité sur brin simple : 6,1 t. (option 6,8 t.)
  Moufflage : 2 brins ; force totale 12,2 t. (option 13,6 t.)
  – 1 treuil de curage
  Capacité sur 1 brin : 1,8 t. (moufflage 1 brin)
- **Pompe à boue** :
  - Pompe centrifuge Mission 4" x 3" : 370 l/mn à 12,5 bars et 1 850 l/mn à 8,4 bars.
  - ou Pompe duplex (nombreux types au choix) : par ex. duplex 5" x 6" : 650 l/mn à 22 bars.
- **Pompe d'injection eau-mousse** : Option, à déterminer.
- **Compresseur** : Peut être monté sur le camion porteur de la sondeuse jusqu'à 14 m^3/mn à 17 bars ; les compresseurs plus puissants sont montés sur camion séparé avec moteur indépendant.
- **Chargement des tiges** : Treuil et tête de levage ou collier.
- **Dégagement axe forage** : table rétractable ; ouverture 355 mm
- **Poids de la sondeuse** : 5,5 t. (sans le compresseur).


FORACO SM 70
Tige carrée fixe
Tête de rotation à pignons, 2 vitesses
Refroidissement
Servitudes :
Vérins de calage
Levage mât
Vérin translation
Clé de dévissage
300 CV
Compresseur
Limitateur de couple
Boîte à chaînes
BV
Pompe à boue 5 1/2 x8
230 CV
BV
Moteur camion
Treuil

Marque : **FORACO**	*Type :* **SM 70**
Sondeuse mixte Rotary/MFT	

- **Caractéristiques essentielles** : Rotary + MFT ; tête de rotation à entraînement mécanique ; autres fonctions entraînées hydrauliquement.
- **Moteurs** :
  - Sondeuse : prise de force sur camion 110 ou 230 CV à 2200 t/mn (DEUTZ F 6L ou F 8L 413)
  - Compresseur : unité autonome
- **Compresseur** : au choix de l'utilisateur
- **Centrale hydraulique** : ensemble hydraulique basse pression (120 bars) ; pompes à engrenages + régulateurs de débit (circuits de fuite).
- **Rotation** : Tête de rotation entraînée par tige carrée fixe ;
  2 vitesses sur la tête } 10 vitesses
  5 vitesses sur BV rotation }

  t/mn pour 1 000 t/mn moteur :

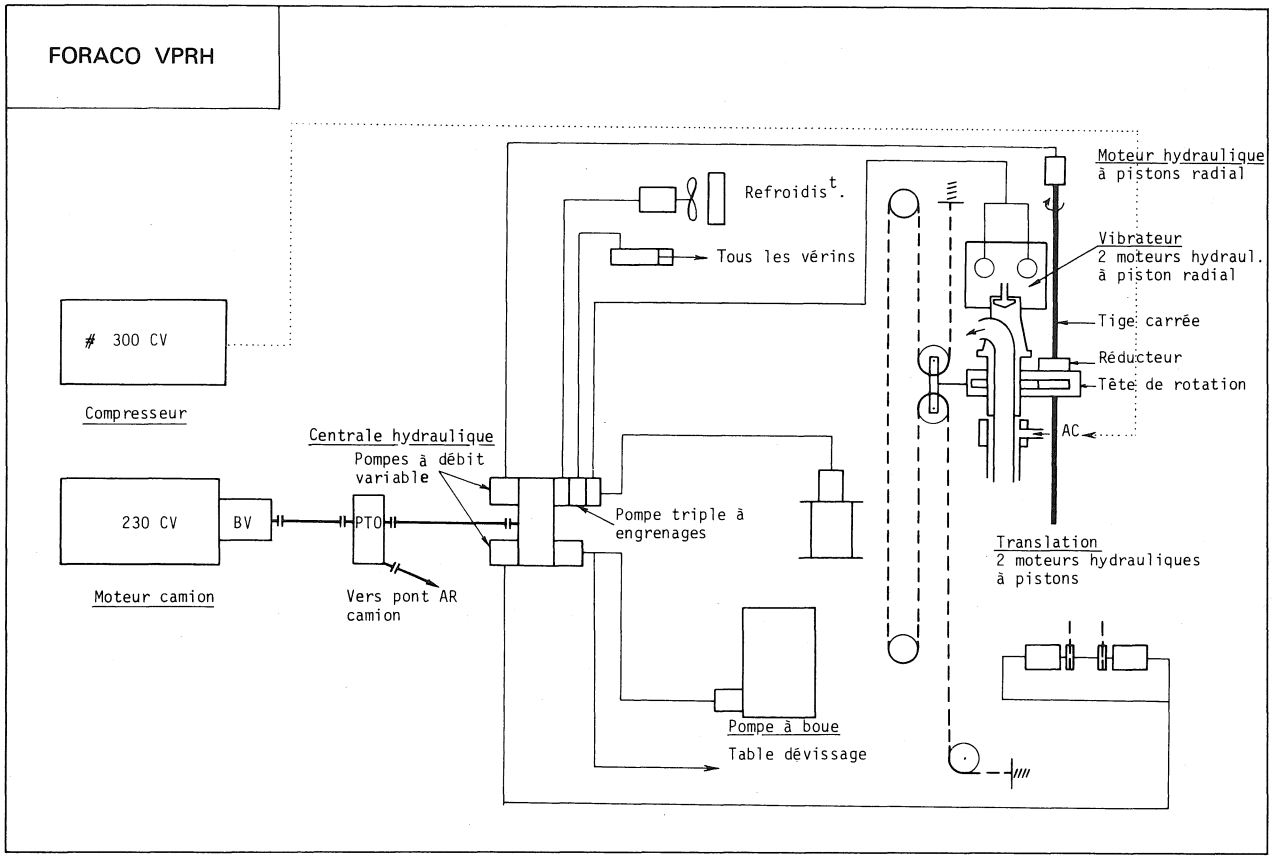
Vitesses	1e	2e	3e	4e	5e
petite vitesse	27	47	80	136	221
grande vitesse	53	89	153	259	420

  couple maxi : 1 000 m.kg

- **Translation** : Moteur hydraulique + chaîne moufflée ;
  Boîte à 2 vitesses

Vitesse	Traction ou poussée maxi
6,5 m/mn	8,4 t.
18 m/mn	4 t.

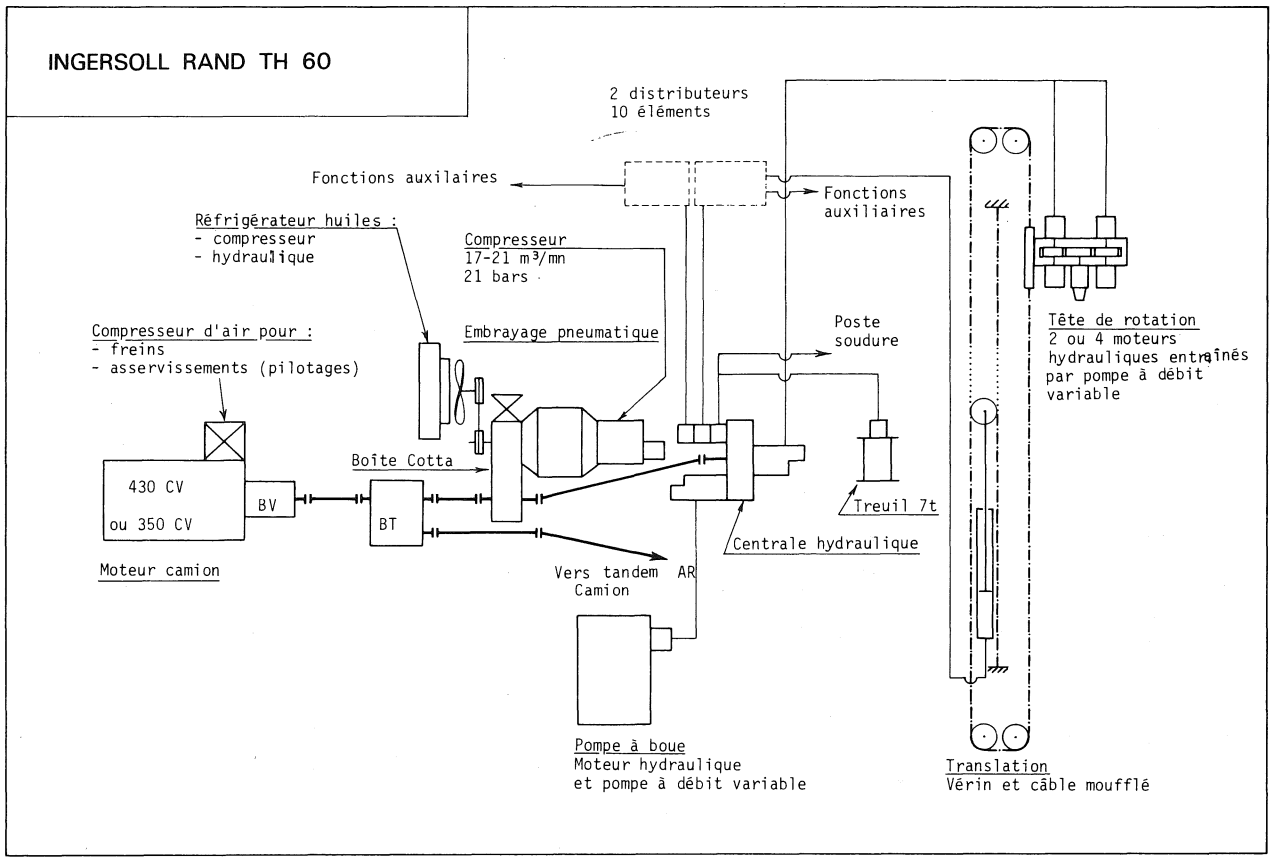
  course utile : pour tiges 6 m
- **Contrôle de poussée** : Régulation du débit d'alimentation du moteur hydraulique par circuit de fuite.
- **Mât** : Capacité 20 t.
- **Treuil** :
  - Treuil principal : 2,5 t. sur brin simple (option 4,5 t.)
    moufflage : 2 brins ; force totale 5 t. (option 9 t.)
    vitesse : 37 m/mn
  - Treuil de curage en option (capacité 1,5 t.).
- **Pompe à boue** : duplex 5" x 6" ou 5 1/2" x 8" (ou toute autre option).
- **Pompe d'injection eau-mousse** : pompe triplex 90 l/mn à 17,5 bars ou 15 l/mn à 100 bars.
- **Dégagement axe du forage** : enlèvement de la table à la main ; déplacement du mât et du treuil sur châssis mobile.
- **Chargement des tiges** : élévateur fixé à la tête de rotation assurant manutention, vissage et dévissage des tiges.


FORACO VPRH
300 CV
Compresseur
230 CV
BV
Moteur camion
PTO
Vers pont AR camion
Centrale hydraulique
Pompes à débit variable
Refroidis^{t}.
Tous les vérins
Pompe triple à engrenages
Pompe à boue
Table dévissage
Moteur hydraulique à pistons radial
Vibrateur
2 moteurs hydraul. à piston radial
Tige carrée
Réducteur
Tête de rotation
AC
Translation
2 moteurs hydrauliques à pistons

Marque : **FORACO**	*Type :* **VPRH**

Sondeuse avec circulation inverse à l'air

- **Caractéristiques essentielles** : Rotary + MFT ; rotation + vibro percussion ; transmission hydraulique ; circulation inverse à l'air.
- **Moteur** : Sondeuse : prise de force sur moteur camion 230 CV à 2 200 t/mn (Deutz F 8L 413 F)
  Compresseur : unité indépendante.
- **Compresseur** : au choix de l'utilisateur.
- **Rotation** :Tête de rotation entraînée par kelly fixe ; celui-ci est entraîné par un moteur hydraulique et une pompe à débit variable.
  Vitesse : variation continue de 0 à 80 t/mn
  Couple maxi : 1 100 m.kg
- **Syst. vibropercussion** : 2 moteurs hydrauliques pour l'entraînement des balourds (réglage mécanique des écartements marteau/enclume).
- **Translation** : 2 moteurs hydraul. + chaîne moufflée (pompe hydrostatique)
  Poussée maxi : 19 t.
  Traction maxi : 17 t.
  Vitesse : 13-15 m/mn (sur option 2 vitesses : 13-15 et 35 m/mn)
  Course utile : 6,50 m
- **Mât** : En profilé ; capacité 25 t.
- **Treuil** : Capacité 1,5 t. sur brin simple
  1 seul brin ; force totale 1,5 t.
- **Pompe à boue** : Triplex 135 l/mn à 40 bars (Bean 535) ou tout autre modèle.
- **Dégagement axe forage** : 35 cm
- **Chargement des tiges** : lève-tiges hydraulique.
- **Doubles tiges** : ϕ 5" diam. int. 2 3/4"
  ϕ 8 5/8" diam. int. 6 "
  permettent la tenue de trou en terrain non consolidé.
- **Poids sondeuse** : 27 tonnes sur camion 6 x 6 avec compresseur.


INGERSOLL RAND TH 60
2 distributeurs
10 éléments
Fonctions auxilaires
Fonctions
auxiliaires
Réfrigérateur huiles :
- compresseur
- hydraulique
Compresseur
17-21 m³/mn
21 bars
Compresseur d'air pour :
- freins
- asservissements (pilotages)
Embrayage pneumatique
Poste
soudure
Tête de rotation
2 ou 4 moteurs
hydrauliques entraînés
par pompe à débit
variable
Boîte Cotta
430 CV
ou 350 CV
BV
BT
Treuil 7t
Centrale hydraulique
Moteur camion
Vers tandem AR
Camion
Pompe à boue
Moteur hydraulique
et pompe à débit variable
Translation
Vérin et câble moufflé

Marque : **INGERSOLL RAND**	*Type :* **TH 60**

Sondeuse mixte Rotary/MFT

- **Caractéristiques essentielles** : Rotary + MFT ; tête de rotation ; transmission hydraulique ; ensemble très complet et automatisé avec moteur unique (pilotage pneumatique).
- **Moteur** : Prise de force sur moteur camion, qui entraîne à la fois le compresseur et la sondeuse : 430 CV à 2100 t/mn (avec compresseur 21 m^3/mn) (DIN B) (ou 350 CV avec compresseurs moins puissants).
- **Compresseur** : 21 m^3/mn à 17,5 bars monté avec la machine (Ingersoll XHP 750).
- **Rotation** : Tête de rotation entraînée par 2 ou 4 moteurs hydrauliques (pompe à pistons à débit variable).
  Entraînement par pignons.

	Vitesse	Couple maxi
4 moteurs	0 à 100 t/mn ou 0 à 160 t/mn (variat. continue)	692 m.kg 460 m.kg

- **Translation** : Vérin + câble moufflé (entraîné par pompe hydraulique à engrenages à débit fixe)
  Poussée maxi : 13,6 t.
  Traction maxi : 10,5 t.
  Vitesse :

m/mn	Montée	Descente
forage		0 à 6,4
manœuvre	76	25

  Course utile : tiges 6 m
- **Mât** : Treillage métallique ; capacité 20 t.
- **Treuils** : 1 treuil de tubage (entraînement hydraulique) 7,25 t. sur brin simple. Peut être moufflé à 1 ou 2 brins. Vitesse maxi : 21 m/mn
  1 treuil de manœuvre (option) ; 0,9 t. sur brin simple ; 34 m/mn
- **Pompe à boue** : entraînée par pompe hydraulique à pistons à débit variable.
  Pompe duplex GD 5 x 6 : 863 l/mn à 21 bars (option 1200 l/mn 28 bars)
- **Pompe d'injection eau** : pompe cat triplex (0 à 94 l/mn)
  + pompe à membrane pour addition de mousse.
- **Chargement des tiges** : automatique par barillet (capacité 7 tiges de 6 m) ensuite avec treuil et tête de levage.
- **Dégagement axe du forage** : effacement de la tête de rotation par guidage sur rails en retrait.
- **Poids** : ensemble monté sur camion 6 x 4 International : 23 t.
- Poste de soudure Hobart monté en option.

Marque : **INGERSOLL RAND**	*Type :* **RO 300**

Sondeuse mixte conçue essentiellement comme une rotary

- **Caractéristiques essentielles** : Rotary à la boue et à l'air (+ MFT) ; sondeuse polyvalente pour forages à moyenne profondeur ; table de rotation ; transmission hydraulique ; pilotage pneumatique.

- **Moteurs** : Le moteur du camion entraîne l'ensemble des fonctions ; sa puissance est de :
  - pour forage boue uniquement : 210 ou 220 CV (CAT 3202 ou DD 6 - 7 IN)
  - pour forage air - boue avec compresseur 21 m^3/mn à 17,5 bars : 430 CV à 2100 t/mn (DD 8 V 92T).

- **Rotation** : table de rotation entraînée hydrauliquement (pompe à pistons à débit variable).

  4 gammes de vitesses :

	Vitesse de rotation	Couple maxi
1	Variat. cont. de 0 à 75 t/mn	1 106 m.kg
2	Variat. cont. de 0 à 150 t/mn	553 m.kg
3	Variat. cont. de 0 à 200 t/mn	277 m.kg
4	Variat. cont. de 0 à 350 t/mn	138 m.kg

- **Translation** : support et relevage du train de tiges assuré par le treuil principal.

- **Poussée-retenue** : système par vérin et câble moufflé agissant sur la tige carrée ; permet un contrôle du poids beaucoup plus précis (pour le MFT) qu'avec le treuil.

  poussée maxi : 13,6 t.
  retenue maxi : 12 t.
  vitesse d'enfoncement : 0 à 5,5 m/mn
  vitesse de montée : jusqu'à 23 m/mn

- **Mât** : treillage métallique ; hauteur 11,9 m ; capacité 22,5 t.
  tige carrée de 8,1 m.

- **Treuils** :
  - Treuil principal entraîné hydrauliquement (pompe à engrenages à débit fixe)
    7,26 t. sur brin simple
    Vitesse maxi : 21 m/mn
  - Treuil auxiliaire (option) : 1 t. sur brin simple
    Vitesse maxi 48,7 m/s

- **Pompe à boue** : entraînée hydrauliquement (pompe à pistons à débit variable).

  Choix de pompes :

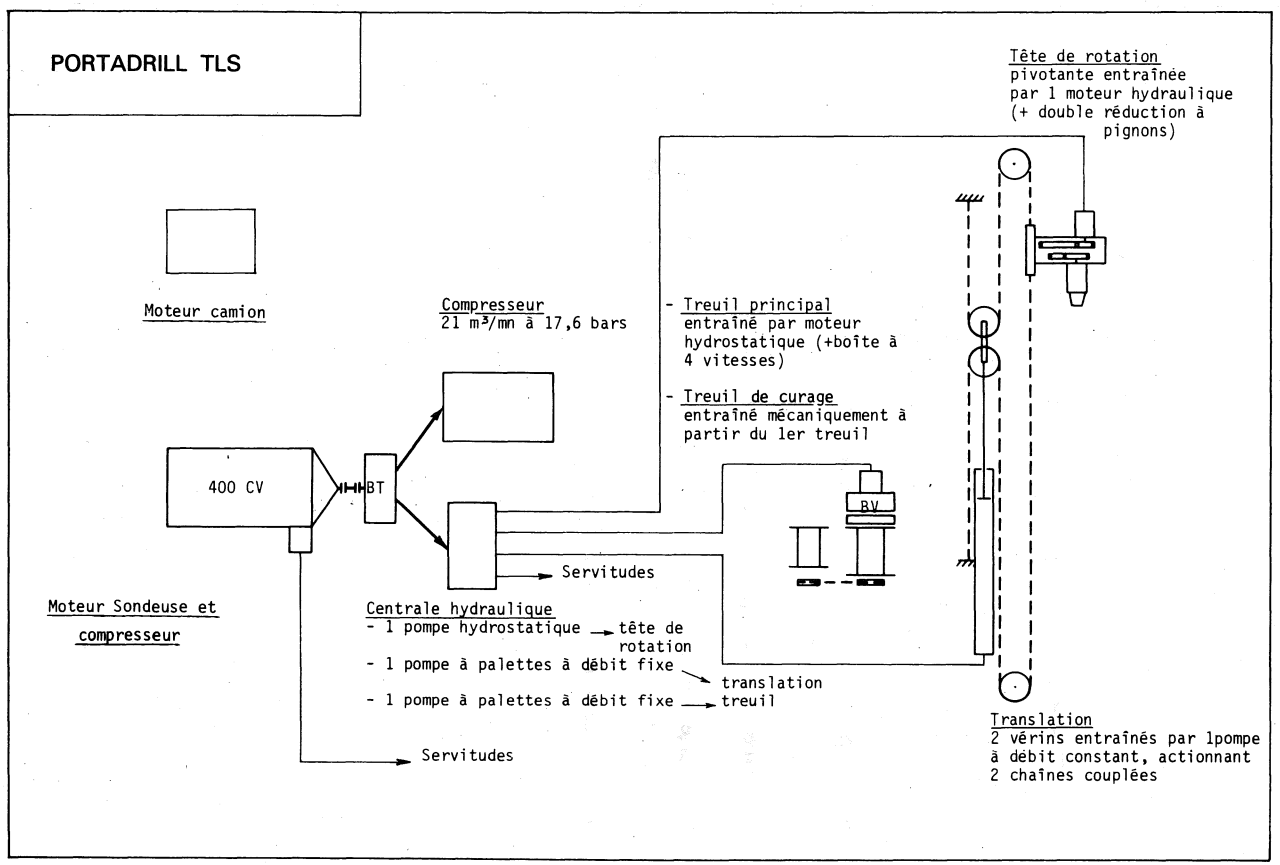
  - centrifuges : 1 136 l/mn à 8,8 ou 14 bars
  - duplex de 860 à 2 400 l/mn ; 18 à 39 bars

- **Pompe d'injection d'eau/mousse** : entraînée hydrauliquement 30,45 ou 94 l/mn.

- **Chargement des tiges** : treuil et tête de levage.

- **Dégagement axe forage** : table de rotation rétractable ; effacement du kelly sur rails en retrait (permet de mettre en place tubage 508 mm).

- Poste de soudure Hobart (option).

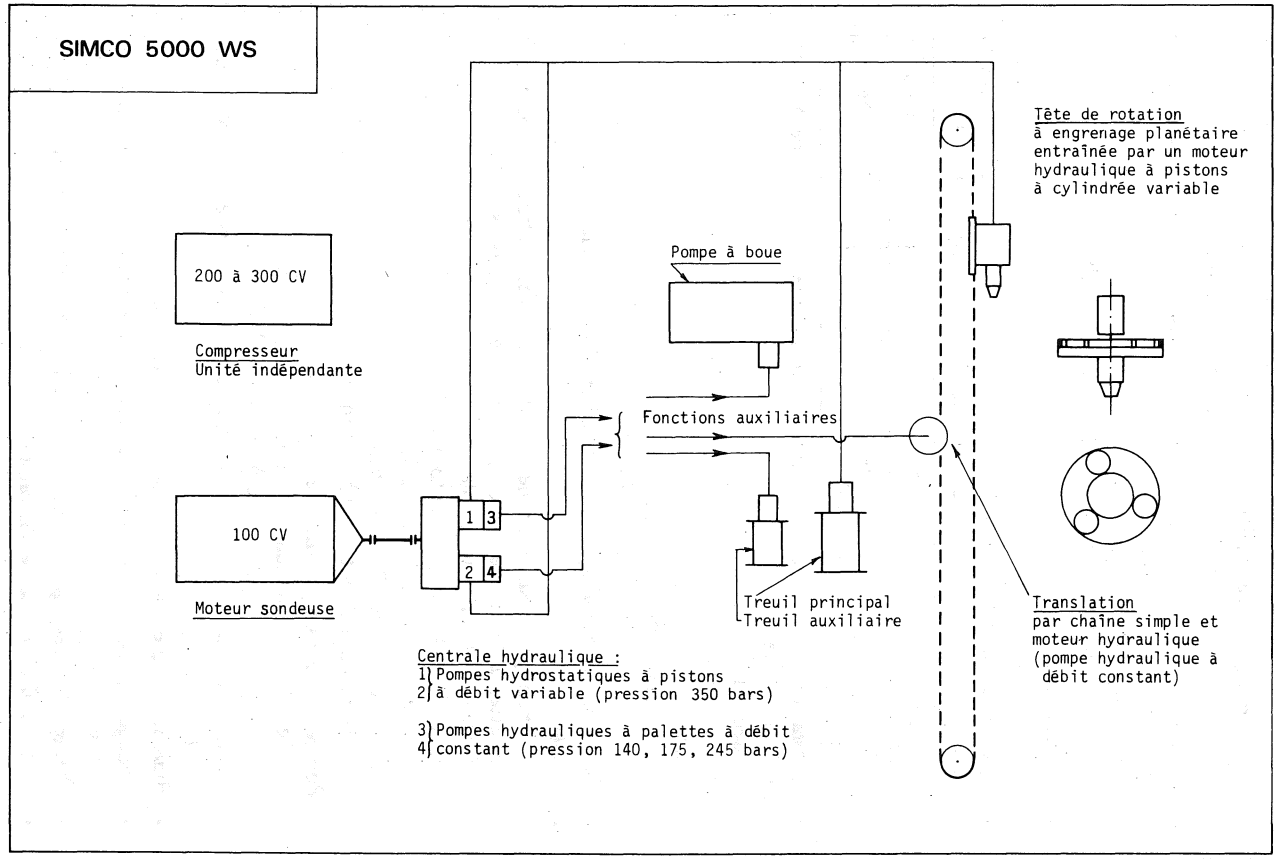

PORTADRILL TLS
Tête de rotation
pivotante entraînée
par 1 moteur hydraulique
(+ double réduction à
pignons)
Moteur camion
Compresseur
21 m³/mn à 17,6 bars
- Treuil principal
entraîné par moteur
hydrostatique (+boîte à
4 vitesses)
- Treuil de curage
entraîné mécaniquement à
partir du 1er treuil
400 CV
BT
BV
Servitudes
Moteur Sondeuse et
compresseur
Centrale hydraulique
- 1 pompe hydrostatique → tête de rotation
- 1 pompe à palettes à débit fixe → translation
- 1 pompe à palettes à débit fixe → treuil
Servitudes
Translation
2 vérins entraînés par 1pompe
à débit constant, actionnant
2 chaînes couplées

Marque : **PORTADRILL**	*Type :* **T L S**
Sondeuse mixte Rotary/MFT	

- **Caractéristiques essentielles** : Rotary à l'air (+ boue en option) + MFT ; tête de rotation ; transmission hydraulique.
- **Moteurs** : – moteur unique pour la sondeuse et le compresseur (différent de celui du camion)
  400 CV à 2100 t/mn (DIN A)
  – moteur camion (6 x 4) environ 200 CV
- **Compresseur** : Sullair 21 m^3/mn à 17,6 bars
  (option : 25,5 m^3/mn à 21 bars)
- **Tête de rotation** : tête pivotante entraînée par un moteur hydraulique à pistons + pompe hydrostatique ; double réduction à pignons.

Type	Vitesse	Couple maxi
Standard	variat. cont. 0 à 145 t/mn	665 m.kg
Option	variat. cont. 0 à 90 t/mn	900 m.kg

- **Translation** : Par vérins et chaînes ; entraînement par pompe à palettes à débit fixe.
  Poussée maxi : 13,5 t.
  Traction maxi : 24 t.
  Course utile : 6,25 m
  Vitesse maxi : montée : 18,3 m/mn
  descente : 13,7 m/mn
- **Mât** : treillage métallique ; hauteur utile : 11 m ; capacité 27 t.
- **Treuils** :
  – 1 treuil principal entraîné par moteur hydrostatique et pompe à palettes à débit fixe + boîte mécanique à 4 vitesses
  force 6,75 t. sur brin simple
  moufflé à 4 brins ; force totale 27 t.
  vitesse : variat. cont. de 0 à 43 m/mn
  – treuil de curage : 2 t. sur 1 brin
  vitesse : variat. cont. de 0 à 113 m/mn
- **Pompe d'injection eau-mousse** :
  Pompe duplex : standard : 0 à 30 l/mn à 21 bars
  option : 0 à 76 l/mn à 35 bars
  entraînée par un moteur hydraulique à pistons libres et pompe hydrostatique.
- **Huileur de ligne** : pompe à piston pneumatique.
- **Réglage du poids sur l'outil** : circuit de fuite sur les vérins, réglable manuellement.
- **Chargement des tiges** : câble et tête de levage (potence en haut du mât)
- **Poids total de sondeuse sur camion** : 27,9 t.
- **Dégagement axe forage** : tête de rotation pivotante.


SIMCO 5000 WS
200 à 300 CV
Compresseur
Unité indépendante
100 CV
Moteur sondeuse
1
3
2
4
Pompe à boue
Fonctions auxiliaires
Treuil principal
Treuil auxiliaire
Centrale hydraulique :
1 Pompes hydrostatiques à pistons
2 à débit variable (pression 350 bars)
3 Pompes hydrauliques à palettes à débit
4 constant (pression 140, 175, 245 bars)
Tête de rotation
à engrenage planétaire
entraînée par un moteur
hydraulique à pistons
à cylindrée variable
Translation
par chaîne simple et
moteur hydraulique
(pompe hydraulique à
débit constant)

Marque : **SIMCO**	*Type :* **5000 WS**

Sondeuse mixte Rotary/MFT

- **Caractéristiques essentielles** : Rotary + MFT ; tête de rotation ; transmission hydraulique.
- **Moteur thermique** : Moteur sondeuse 100 CV à 2400 t/mn (dans l'option forage à l'air avec compresseur intégré à la machine, moteur 210 CV à 2800 t/mn.
- **Compresseur** :
  – entraîné par moteur sondeuse : 13,6 m³/mn à 17,5 bars
  – ou autonome, au choix de l'utilisateur.
- **Centrale hydraulique** :
  – Pression circuit principal : 350 bars
  – Pression circuits auxiliaires : 140, 175 et 245 bars
- **Rotation** : Tête de rotation à engrenage planétaire entraînée par un moteur hydraul. à pistons à cylindrée variable (pompe hydrostatique). 2 gammes de vitesse :

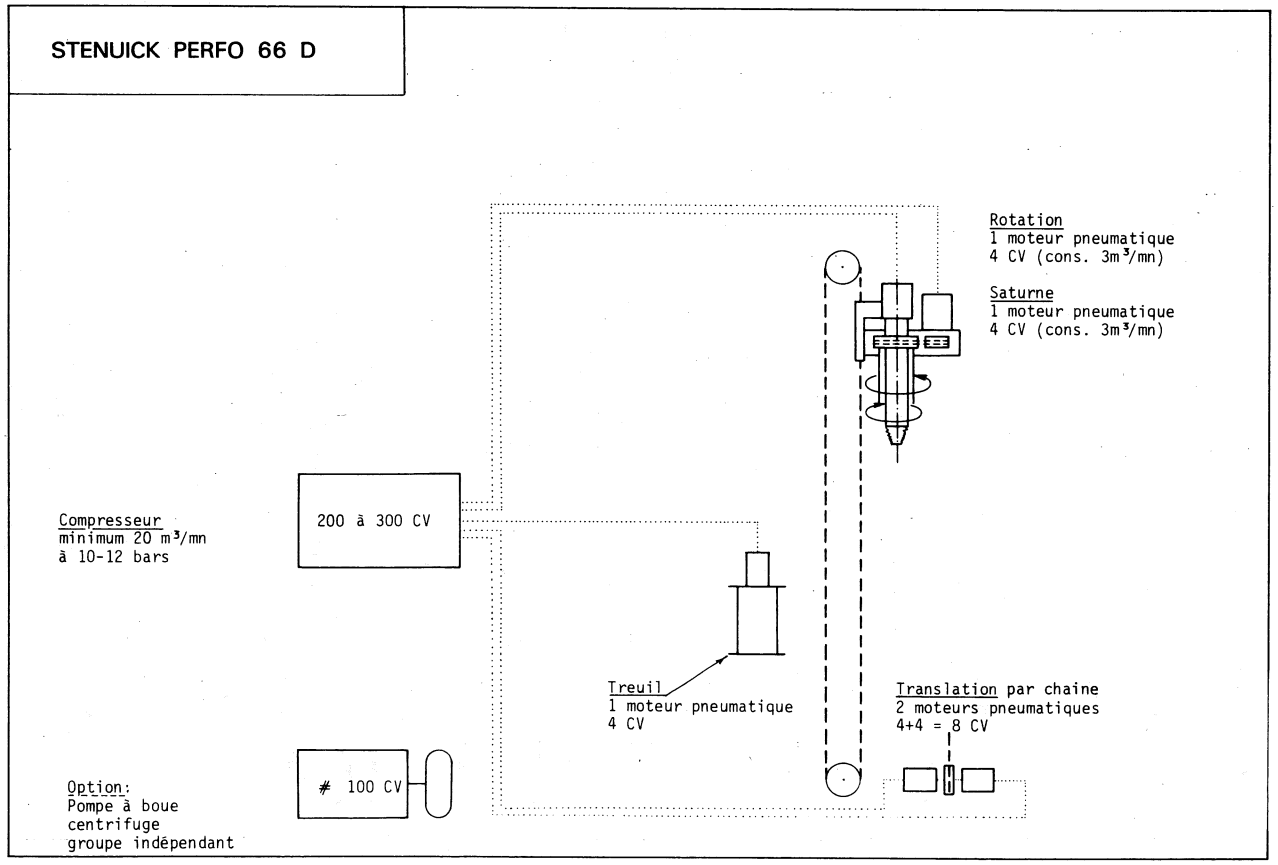
  Régime high-torque

Régime	Vitesse	Couple
1	variable de 0 à 40 t/mn	1 355 m.kg
2	« 0 à 100 t/mn	542 m.kg

  Régime high speed

Régime	Vitesse	Couple
1	variable de 0 à 200 t/mn	339 m.kg
2	« 0 à 600 t/mn	40 m.kg

- **Translation** : 2 chaînes jumelées entraînées par un moteur hydraulique à palettes (pompe à palettes à débit constant).
  Vitesse : 0 à 23,5 m/mn
  Poussée maxi : 5,9 t. (option : 6,8 t.)
  Traction maxi : 5,9 t. (option : 6,8 t.)
  Course utile : 6,90 m.
- **Mât** : Poutre ; capacité : 13,6 t. (option : 20 t.).
- **Treuil principal** : Entraîné hydrauliquement (pompe hydrostatique)
  Capacité : 4,5 t. sur brin simple (option : 5,9 t.)
  Moufflage : 2 brins : force totale 9 t. (option : 11,8 t.)
  Vitesse : variation cont. de 0 à 37,5 m/mn.
- **Treuil auxiliaire (option)** : Entraîné hydrauliquement (pompe à débit constant).
  Capacité : 1,1 t. sur brin simple.
  Moufflage : 1 brin.
  Vitesse : 0 à 49,5 m/mn.
- **Pompe à boue** :
  – centrifuge 370 l/mn à 12,5 bars ; 1850 l/mn à 8,4 bars. (Magnum 3" x 4")
  – ou duplex ou triplex : choix de pompes débitant de 200 l/mn à 20 bars à 650 l/mn à 22 bars.
  Entraînement hydraulique (pompe hydrostatique).
- **Poids sondeuse** : 6 t. (avec pompe centrifuge, sans compresseur).

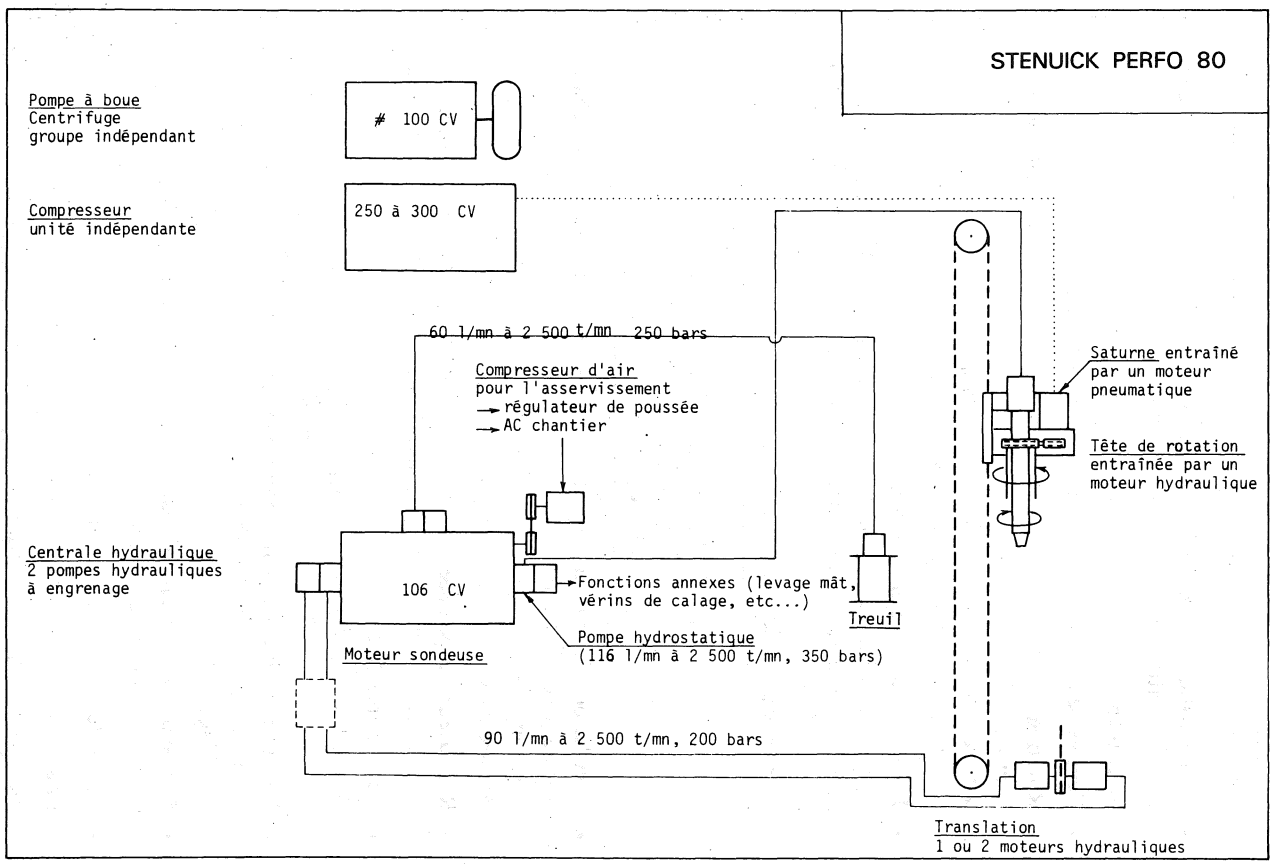

STENUICK PERFO 66 D
Rotation
1 moteur pneumatique
4 CV (cons. 3m³/mn)
Saturne
1 moteur pneumatique
4 CV (cons. 3m³/mn)
Compresseur
minimum 20 m³/mn
à 10-12 bars
200 à 300 CV
Treuil
1 moteur pneumatique
4 CV
Translation par chaine
2 moteurs pneumatiques
4+4 = 8 CV
≠ 100 CV
Option:
Pompe à boue
centrifuge
groupe indépendant

Marque : **STENUICK**	*Type :* **PERFO 66 D**
Perforatrice	

- **Caractéristiques essentielles** : MFT seul ; entièrement pneumatique ; tête de rotation ; tubage à l'avancement.
- **Moteur thermique** : Celui du compresseur.
- **Compresseur** : Minimum 20 m^3/mn à 10-12 bars.
- **Rotation** : Tête de rotation entraînée par un moteur pneumatique 4 CV (consom. d'air : 3 m^3/mn).
  Vitesse : Variat. continue de 0 à 45 t/mn.
  Couple maxi : 280 m.kg (au calage à 6 bars).
- **Tubage à l'avancement** : Système Saturne
  Tubage entraîné par un moteur pneumatique 4 CV tournant en sens inverse du marteau (Consommation d'air : 3m^3/mn) ; boîte de réduction rapport 0,5.
  Vitesse réglable de manière continue.

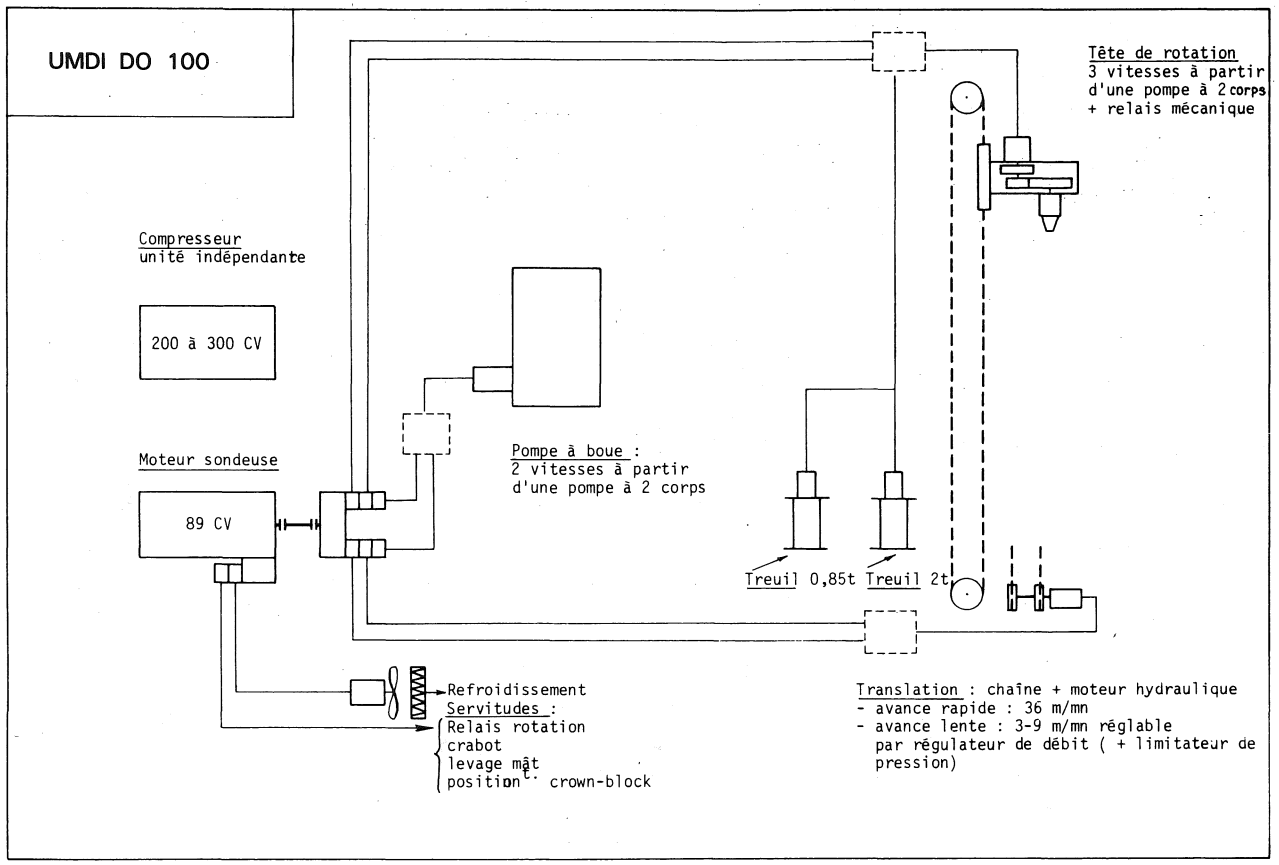
Couple maxi	Vitesse maxi
410 m.kg	30 t/mn
820 m.kg	15 t/mn

- **Translation** : 2 moteurs pneumatiques (4 + 4 = 8 CV) + Chaîne
  Vitesse maxi : 30 m/mn
  Traction maxi : 3,6 t.
  Poussée maxi : 3,6 t.
- **Régulateur de poussée** : Vérin double effet ϕ 200 mm assurant au niveau de l'outil un appui constant quelle que soit la profondeur.
- **Mât** : Force 20 t.
  Course utile : Standard tiges 3 m
  : Option tiges 4,50 m.
- **Treuil** : Entraînement par moteur pneumatique 4 CV
  Capacité : 1,5 t. sur brin simple
  Moufflage : 2 brins ; force : 3 t.
- **Pompe d'injection eau-mousse** : Pompe à piston à entraînement pneumatique ; 50 l/mn à 25 bars.
- Calage des tiges : étau pneumatique
- Desserrage des tiges : Clé Vénus.
- Chargement des tiges : Treuil + tête de levage (ou à la main)
- Poids sondeuse (sans compresseur) : 3,5 t.


STENUICK PERFO 80
Pompe à boue
Centrifuge
groupe indépendant
≠ 100 CV
Compresseur
unité indépendante
250 à 300 CV
60 l/mn à 2 500 t/mn 250 bars
Compresseur d'air
pour l'asservissement
→ régulateur de poussée
→ AC chantier
Saturne entraîné
par un moteur
pneumatique
Tête de rotation
entraînée par un
moteur hydraulique
Centrale hydraulique
2 pompes hydrauliques
à engrenage
106 CV
Fonctions annexes (levage mât,
vérins de calage, etc...)
Treuil
Pompe hydrostatique
(116 l/mn à 2 500 t/mn, 350 bars)
Moteur sondeuse
90 l/mn à 2 500 t/mn, 200 bars
Translation
1 ou 2 moteurs hydrauliques

Marque : **STENUICK**	*Type :* **PERFO 80**
Sondeuse mixte Rotary/MFT	

- **Caractéristiques essentielles** : Rotary + MFT ; transmission hyd. + pneumatique ou tout hydraulique ; tubage à l'avancement ; tête de rotation.
- **Moteurs thermiques** :
  – Moteur sondeuse 106 CV à 2 500 t/mn (Deutz F 6L 912)
  ou 50 CV à « (Deutz F 3L 912)
  – Moteur compresseur
  – Moteur pompe à boue : 100 CV.
- **Rotation** : Tête de rotation entraînée par 1 moteur hydraulique (pompe hydrostatique)
  Vitesse : variat. cont. de 0 à 130 t/mn.
  Couple maxi. : 800 m.kg.
- **Tubage à l'avancement** : Système Saturne (voir Perfo 66 D) entraîné par un moteur pneumatique à pistons.
- **Translation** : 1 ou 2 moteurs hydrauliques (à pistons axiaux) + Chaîne ; ou moteurs pneumatiques à pistons)
  2 vitesses : 15 et 30 m/mn
  Poussée maxi : 9 t.
  Traction maxi : 9 t.
- **Régulateur de poussée** : (idem Perfo 66 D)
- **Mât** : Capacité 20 t.
  Course utile : Standard : Tiges 4,50 m
  Option : Tiges 6 m
- **Treuil** : Entraînement par moteur hydraulique.
  Capacité : 1,5 t. sur brin simple.
  Moufflage : 2 brins ; force totale 3 t.
  Vitesse : 26 m/mn.
- **Pompe à boue** : Pompe centrifuge 1 666 l/mn à 12 bars (ou tout autre modèle).
- **Pompe d'injection eau-mousse** : idem Perfo 66 D.
- Chargement, calage, desserrage des tiges : idem Perfo 66 D.
- Table de calage rétractable (sur option) : dégagement ϕ 60 cm.


UMDI DO 100
Tête de rotation
3 vitesses à partir
d'une pompe à 2 corps
+ relais mécanique
Compresseur
unité indépendante
200 à 300 CV
Moteur sondeuse
89 CV
Pompe à boue :
2 vitesses à partir
d'une pompe à 2 corps
Treuil 0,85t
Treuil 2t
Refroidissement
Servitudes :
Relais rotation
crabot
levage mât
position crown-block
Translation : chaîne + moteur hydraulique
- avance rapide : 36 m/mn
- avance lente : 3-9 m/mn réglable
par régulateur de débit (+ limitateur de
pression)

Marque : **UMDI (DOMINE)**	*Type :* **DO 100**
Sondeuse mixte Rotary/MFT	

- **Caractéristiques essentielles** : sondeuse légère Rotary + MFT ; tête de rotation ; transmission hydraulique ; carottage au câble.

- **Moteurs** :
  – sondeuse et pompe à boue :
  moteur 89 CV (Deutz F6L 413)
  ou 57 CV (Deutz F4L 413)
  – compresseur : unité indépendante.

- **Rotation** :
  – Tête de rotation à pignons
  – Moteur hydraulique 3 vitesses à partir d'une pompe à 2 corps ; relais mécanique 2 vitesses ; au total 6 vitesses de rotation ; couple maxi : 400 m.kg (option : pompe hydrostatique à débit variable).

- **Translation** : par moteur hydraulique, réducteur et chaînes. Réglage de la vitesse par régulateur de débit et limiteur de pression.
  Vitesse rapide : 36 m/mn
  Vitesse lente : 0 à 9 m/mn
  Traction maxi : 6 t.
  Poussée maxi : 4,5 t.
  Course utile : 5,1 m (avec crown block effacé)

- **Treuil principal** :
  2 t. sur brin simple
  vitesse : 40 m/mn

- **Treuil secondaire** : 850 kg sur brin simple
  Vitesse : 120 m/mn (couche moyenne)

- **Mât** : profilé.

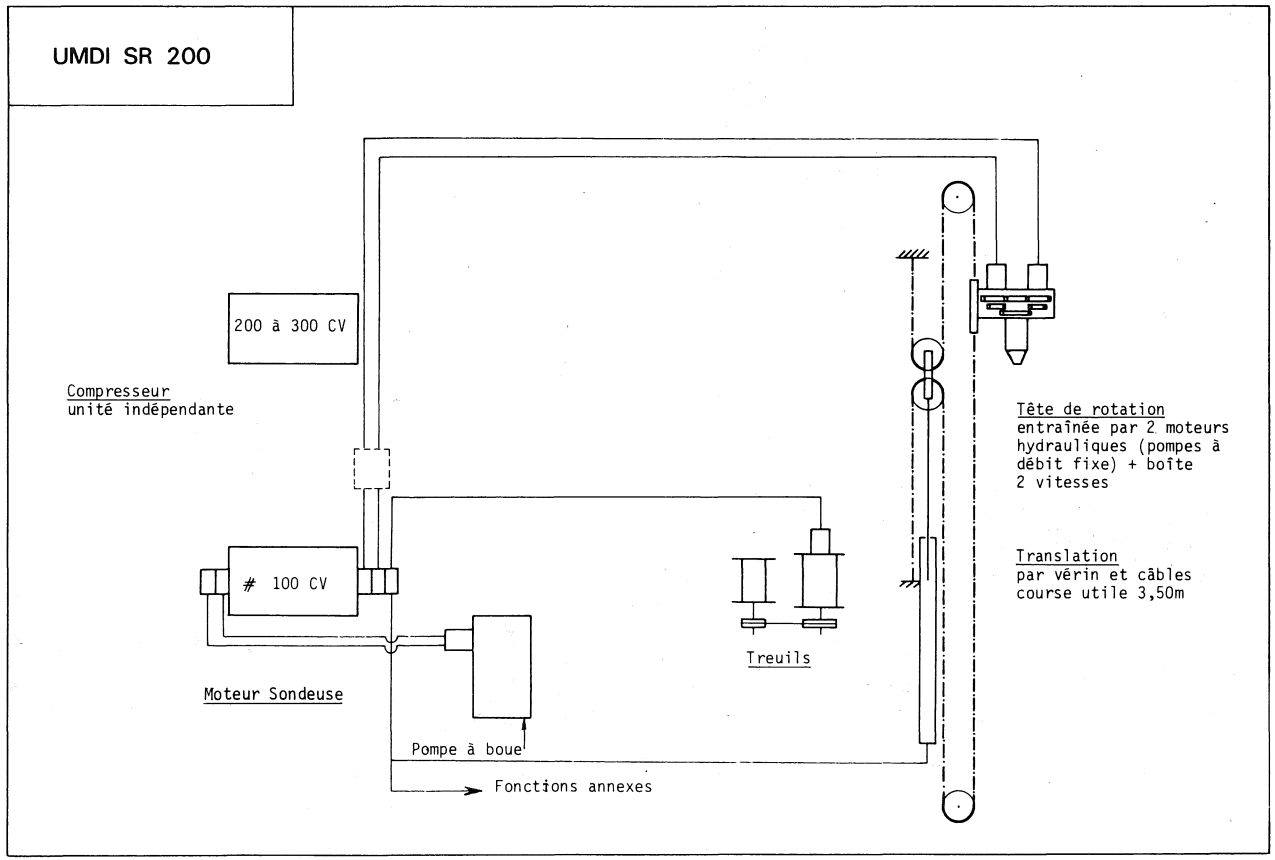
- **Crown block** : escamotable, 2 ou 4 poulies.

- **Pompe à boue** : pompe triplex ; 2 vitesses d'entraînement à partir d'une pompe hydraulique à 2 corps :
  125 l/mn ; 35 bars
  245 l/mn ; 35 bars

- **Etau de serrage hydraulique**

- **Déblocage des tiges** : clé actionnée par vérin.

- **Poids** : 3,5 t. (sondeuse seule avec pompe à boue, sans compresseur).


UMDI SR 200
200 à 300 CV
Compresseur
unité indépendante
100 CV
Moteur Sondeuse
Pompe à boue
Fonctions annexes
Treuils
Tête de rotation
entraînée par 2 moteurs
hydrauliques (pompes à
débit fixe) + boîte
2 vitesses
Translation
par vérin et câbles
course utile 3,50m

Marque : **U M D I (DOMINE)**	*Type :* **SR 200**
Sondeuse mixte rotary/MFT	

- **Caractéristiques essentielles** : Rotary + MFT ; tête de rotation ; transmission hydraulique

- **Moteurs** : Sondeuse et pompe à boue : moteur indépendant (environ 100 CV)
  Compresseur : unité indépendante.

- **Rotation** : Tête de rotation entraînée par 2 moteurs hydrauliques et pompe à 2 corps à débit fixe ; relais mécanique 2 vitesses ; total 4 vitesses de rotation : 35, 55, 170, 250 t/mn - couple maxi : 400 mkg.

- **Translation** : par vérin hydraulique et câbles.
  Traction maxi : 5,5 t.
  Poussée maxi : 3,5 t.
  Course utile : 3,50 m sous tête de rotation
  (prolongateur de glissière pour manœuvre au treuil de tiges de 6 m).

- **Mât** : En profilé : force 7 t.

- **Treuil principal** : 2,5 t. sur brin simple
  Moufflage à 1 brin ; force totale 2,5 t. - vitesse 60 m/mn

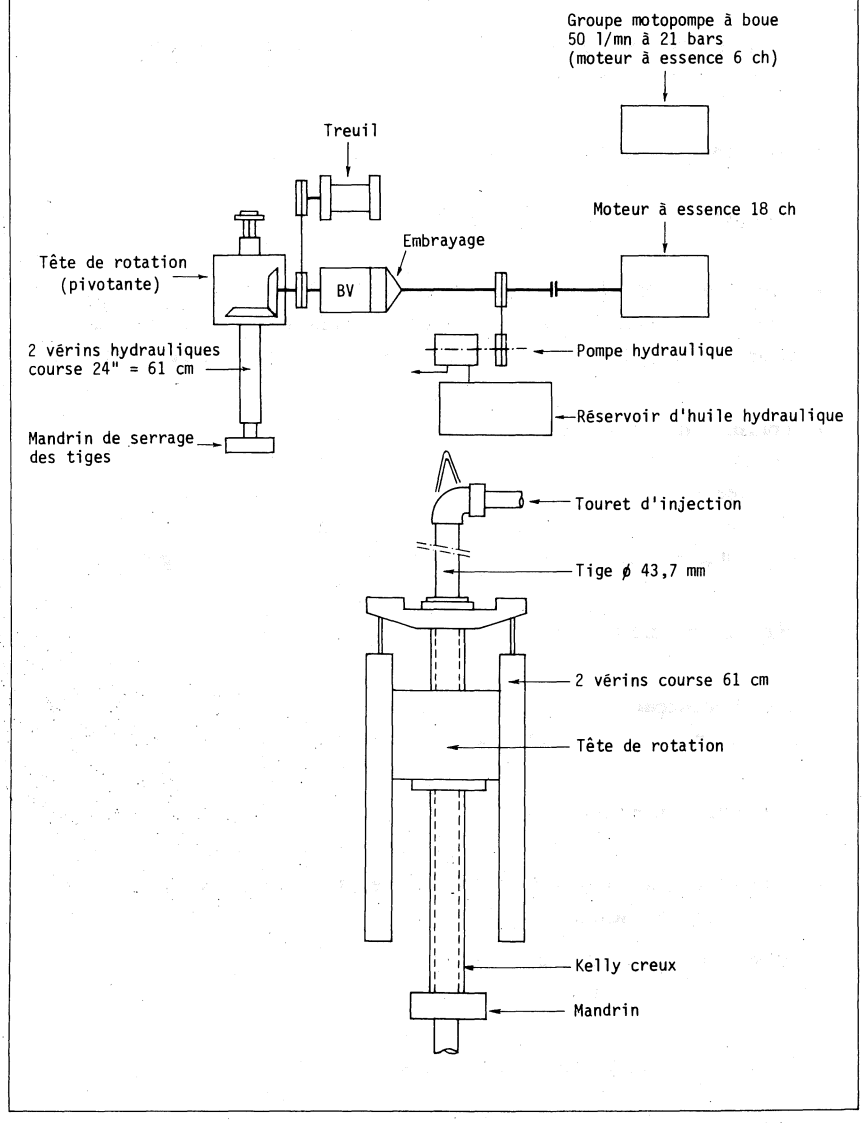
- **Treuil auxiliaire** (option)

- **Pompes à boue** : pompe à pistons plongeurs entraînée hydrauliquement; débit réglable jusqu'à 165 l/mn.
  pression maxi : 35 bars à 165 l/mn
  55 bars à 100 l/mn

- Effacement du frein de tiges pour passage de gros outils.

LONGYEAR 24

SONDEUSE POUR CAROTTAGE AU DIAMANT



Marque : **LONGYEAR**	*Type :* **24 Standard diamond core drill**
Sondeuse pour carottage au diamant	

- **Caractéristiques essentielles** : sondeuse légère de carottage au diamant, sur skid ou sur remorque.

- **Moteurs** :
  sondeuse : moteur à essence 18 CV
  pompe à boue : moteur à essence 6 CV

- **Rotation** : Tête de rotation fixe, 6 vitesses : t/mn avec un moteur tournant à 2.200 RPM :

Vitesses	1	2	3
Lente	225	500	925
Rapide	373	834	1 540

- **Translation** : 2 vérins hydrauliques, course 64 cm, entraînant le kelly creux solidaire du mandrin.
  La 1ère tige de forage (toujours la même) passe dans le kelly creux ; le serrage se fait par le mandrin.

- **Treuil** : Capacité :

- **Pompe à boue** : groupe motopompe autonome sur skid Longyear 315 :
  50 l/mn à { 21 bars en continu
  35 bars en travail intermittent

- **Dégagement axe du forage** : Tête de rotation pivotante.
  Dégagement environ 12 cm.

- **Extraction du tubage provisoire** : par contre-battage. Actionnement d'une masse mobile au moyen du treuil utilisé comme un cabestan.

Marque : **FAILING**	*Type :* **2 500**
Sondeuse rotary	

- **Caractéristiques essentielles** : Sondeuse rotary à la boue pour forages profonds dans le sédimentaire (jusqu'à 800 m terminé en 10").
- **Moteurs** : 2 moteurs identiques fournissant au total 150 à 180 CV. Ensemble moteurs et sondeuse monté sur châssis autonome.
- **Distribution du mouvement** : Transmission mécanique (embrayages et clabots à commande par air ; boîte de vitesses et freins de treuils à commande mécanique). Boîte «compound» permettant d'utiliser les 2 moteurs séparément ou couplés.
- **Table de rotation** :
  ouverture 18"
  capacité : 50 tonnes (à 100 t/mn).
- **Treuil de manœuvres** :
  Force de traction au 1er brin : 7 t.
  Capacité de levage : 25 t. avec moufflage à 4 brins
  30 t. avec moufflage à 6 brins
  Capacité d'enroulement : 100 m de câble 19 mm.
- **Treuil de curage** :
  Force de traction au 1er brin : 2,7 t.
  Capacité d'enroulement : 1 000 m de câble 11 mm
- **2 cabestans**
- **Mât tubulaire** :
  Hauteur sous crown bloc : 17,40 m
  Capacité totale standard : 40 t.
  Capacité standard au crochet : 27 t.
  permet de gerber 760 m de tiges 3 1/2"
- **Pompe à boue** :
  Standard : pompe gardner Denver FD-Fxx 5 1/2" x 8"
  (750 l/mn à 65 cpm sous 22 bars)
  Option : pompe gardner Denver 7 1/2" x 8"
- **Poids** de l'ensemble sur châssis : 15 t.
- **Capacité** :

Profondeur	Tiges	Diamètre
800 m	3 1/2 IF	60" à 10"
1 100 m	2 7/8 IF	12" à 6"
1 500 m	2 3/8 IF	7" à 5"

Marque : **BONNE ESPÉRANCE**	*Type :* **A P E C**
Sondeuse au battage	

- **Caractéristiques essentielles :**
  Sondeuse au battage de capacité moyenne permettant de forer jusqu'à 150 m en 390 mm (ou 60 m en 470 mm)

- **Moteur** : 40 CV à 1500 t/mn
  (ensemble moteur et sondeuse monté sur remorque).

- **Batteur** : 55 coups/mn.

- **Masse de battage** : 2,5 t. course 30 cm
  1,5 t. course 50 cm
  1,1 t. course 70 cm

- **Trépans** : de 276 mm (315 kg) à 1000 mm (1,7 t.)

- **Mât** :
  Hauteur : 9,50 m (télescopé 12,50 m)
  Capacité : 18 t.

- **Treuil de battage et de manœuvre** :
  Force sur brin simple : 4 t. (vitesse 22 m/mn)
  Force avec moufflage à 2 brins : 8 t. (vitesse 11 m/mn)
  Capacité : 300 m de câble ϕ 3/4 "

- **Treuil de curage** :
  Force sur brin simple : 2 t.
  Vitesse de remontée moyenne : 45 m/mn
  Capacité : 300 m de câble ϕ 1/2 "
  Le treuil est muni d'un embrayage et d'un frein à commande individuelle permettant le travail à la benne.

- 4 vérins de calage à vis.

- **Poids** : ensemble monté sur remorque : 10,3 t.

Marque : **DANDO**	*Type :* **800**
Sondeuse au battage	

- **Moteur** : 50 CV à 1600 t/mn
- **Batteur** : 55 c/mn
  course 56,74 et 92 com
- **Masse de battage** : 1,18 t. à 120 m
  0,9 t. à 305 m
- **Mât télescopique** : Hauteur : 12 m (en position sortie)
  Capacité : 10 t.
- **Treuil principal** :
  Force sur brin simple : 3,6 t. (1ère couche)
  1,6 t. (dernière couche)
  Vitesse : 36 à 166 m/mn (maxi 120 m/mn avec longueur ci-dessous)
  Longueur normale de câble : 305 m de câble 19 mm
- **Treuil de curage** :
  Force sur brin simple : 1,5 t. (1ère couche)
  0,7 t. (dernière couche)
  Vitesse : 82 à 217 m/mn (maxi 200 m/mn avec longueur ci-dessous)
  Longueur normale de câble : 305 m de câble 11-13 mm
- **Treuil de manœuvre** :
  Force sur brin simple : 3,2 t. (1ère couche)
  2,5 t. (dernière couche)
  Vitesse : 21 à 61 m/mn
  Longueur normale de câble : 60 m de câble 16 mm
- **Capacité de forage** :

Diamètre (mm)	Profondeur (m)
760-690	30
610-460	120
380	180
300	240
250	305
150	455

- Possibilité de conversion en sondeuse rotary.
- **Poids** : ensemble monté sur remorque : 6,1 t.

Marque : **WALKER NEER**	*Type :* **S 46 A**
Sondeuse au battage pour grands diamètres	

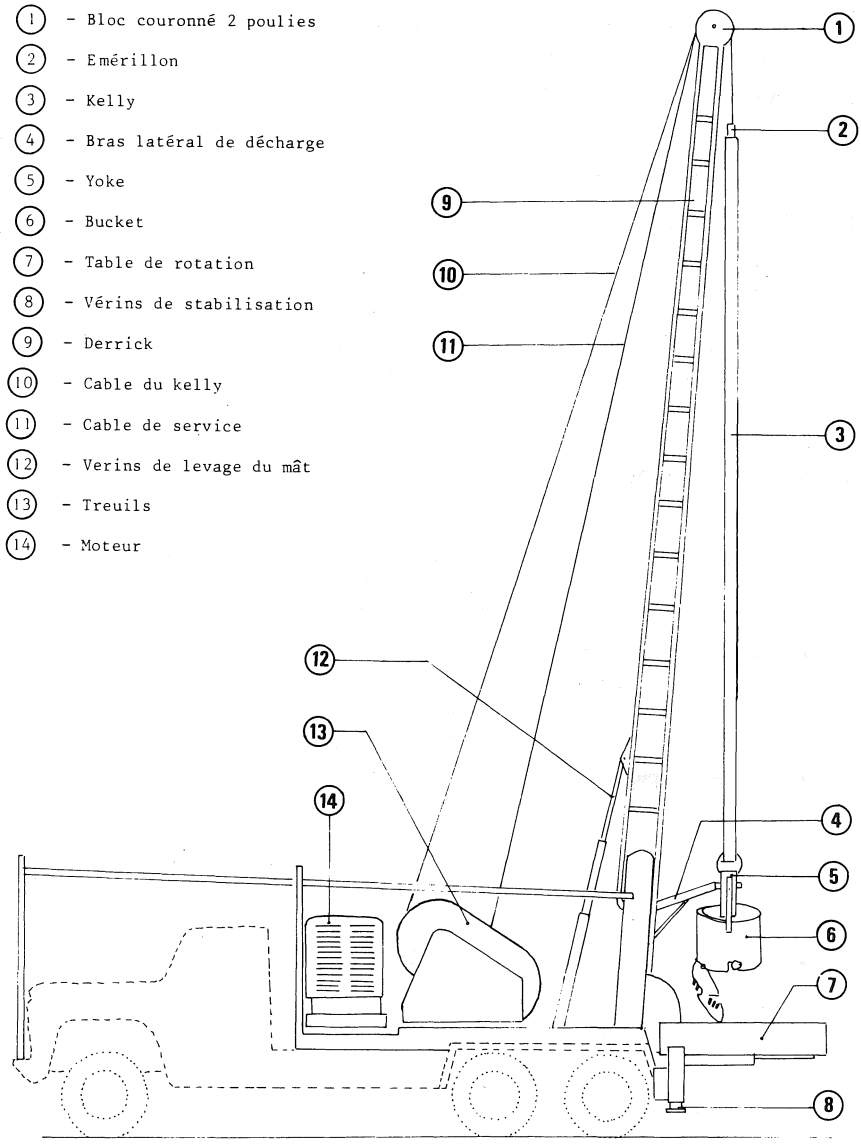
- **Caractéristiques essentielles :**
  Sondeuse au battage de grande puissance, permettant de réaliser des forages jusqu'en 1,50 m de diamètre.
- **Moteur** : 132 CV à 1400 t/mn
  ou 142 CV à 1800 t/mn
  + Boîte 4 vitesses
  (ensemble sondeuse et moteur monté sur semi-remorque)
- **Battage** : course 66,94 et 122 cm.
- **Treuil de battage :**
  Force à brin simple : 27 t. sur 1ère couche
  5 t. à tambour plein
  4 vitesses d'enroulement : 60, 110, 215, 350 m/mn (à tambour plein)
  Vitesse maxi : 100 m/mn sur 1ère couche
  350 m/mn sur dernière couche.
  Capacité : 2200 m de câble 1" (25 mm).
- **Treuil de curage :**
  Force à brin simple : 7,6 t. sur 1ère couche
  2,5 t. sur dernière couche
  Vitesse d'enroulement maxi : 160 m/mn (1ère couche)
  et 480 m/mn (dernière couche)
  Capacité : 3000 m de câble 9/16e (14 mm)
- **Treuil de manœuvre :**
  Force à brin simple : 18,8 t. sur 1ère couche
  16,4 t. sur 2ème couche
  Vitesses d'enroulement : 20, 35, 70, 120 m/mn (2ème couche)
- **Mât télescopique :**
  Hauteur sous poulies : 19,5 m (entièrement sorti)
  12 m (en position rentrée)
  Capacité : 45 t.
  Poids maximum au crochet : 30 t. avec moufflage à 4 brins
  33 t. avec moufflage à 6 brins
- **Capacité de forage :**

Profondeur	Poids outil	ϕ outil
jusqu'à 100 m	3 t.	1,20 à 1,50 m
100 à 150 m	2,6 t.	1 à 1,20 m
150 à 200 m	2,5 t.	0,8 à 0,6 m
200 à 500 m	2,2 t.	0,4 à 0,5 m
1000 à 1500 m	1,3 t.	0,15 à 0,20 m

- Possibilité d'adaptation au forage rotary.
- **Poids** : ensemble monté sur semi-remorque : 27 t.

Figure 27

MACHINE CALWELD 250 B



FOREUSE TARIERE-BUCKET

A. CARACTÉRISTIQUES D'UN ATELIER CALWELD 250 B (*)

1) Foreuse :

- Camion porteur 6 x 4 MACK (250 CV)
- Moteur sondeuse : moteur «General Motors» 240 CV
- Derrick de 12,80 m
- Kelly télescopique 3 éléments de 10 m
  Profondeur maximum : 29 m
- Treuil à double tambour (puissance 4 tonnes)
  - kelly
  - câble de service
- Table de rotation : diamètre intérieur 1,32 m
  - couple maxi : 5 000 m.kg
  - vitesse rotation moyenne 20 tours/minute
- Dispositif de poussée par mandrin hydraulique actionné par vérins verticaux pour le passage des terrains indurés en début de forage (cuirasse)
- 2 vérins latéraux de stabilisation pour le véhicule

2) Accessoires

- 3 tubages de protection pouvant être télescopés au fur et à mesure de la foration, en tôle roulée soudée de 4 mm, garnis de guides extérieurs de centrage

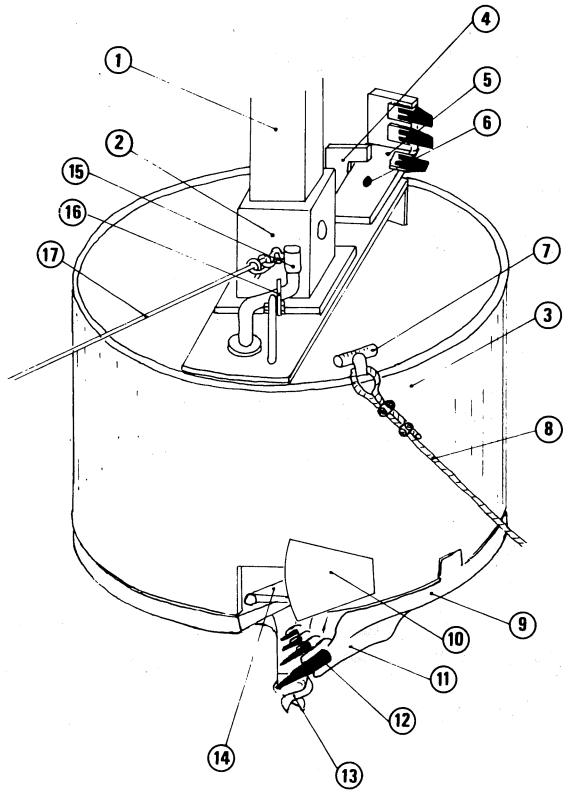
  tube ϕ 1300 mm d'une longueur de 6,40 m
  tube ϕ 1100 mm d'une longueur de 7,00 m
  tube ϕ 950 mm d'une longueur de 6,00 m

  soit une hauteur utile de 16 m en prenant un mètre de sécurité au-dessus du niveau statique (cote de l'éboulement) et un recouvrement de 1 m entre chaque tubage.
  - Guides centreurs de buses descendus à l'intérieur du tubage ϕ 1100mm
  - Ciseaux à buse pour la descente des buses dans le sondage
  - 2 chapeaux chinois pour le gravillonnage de l'espace annulaire.

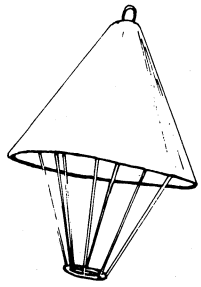
(*) Nous décrivons ici un atelier FOREXI, Côte d'Ivoire [24].

Figure 28

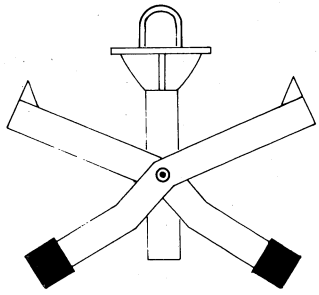
BUCKET ϕ 1200 mm



1 - Kelly
2 - Raccord Kelly-Bucket
3 - Bucket
4 - Butée de l'aléseur
5 - Aléseur
6 - Axe rotation aléseur
7 - Crochet de décharge
8 - Cable de décharge
9 - Panneau de décharge
10 - Lame
11 - Porte-dent
12 - Dent
13 - Tarière "pilote"
14 - Volet
15 - Levier de déverrouillage
16 - Sécurité du levier
17 - Corde de déverrouillage



CHAPEAU CHINOIS



CISEAUX A BUSES

3) Véhicules

- *Déplacement du chantier :*

  – Camion porteur de la foreuse MACK

  – Camion d'accompagnement MACK avec grue de manutention pour les tubages, buckets et accessoires (2 voyages nécessaires pour chaque puits, un seul pour les sondages).

  – Véhicule léger pour transport du personnel (10 personnes).

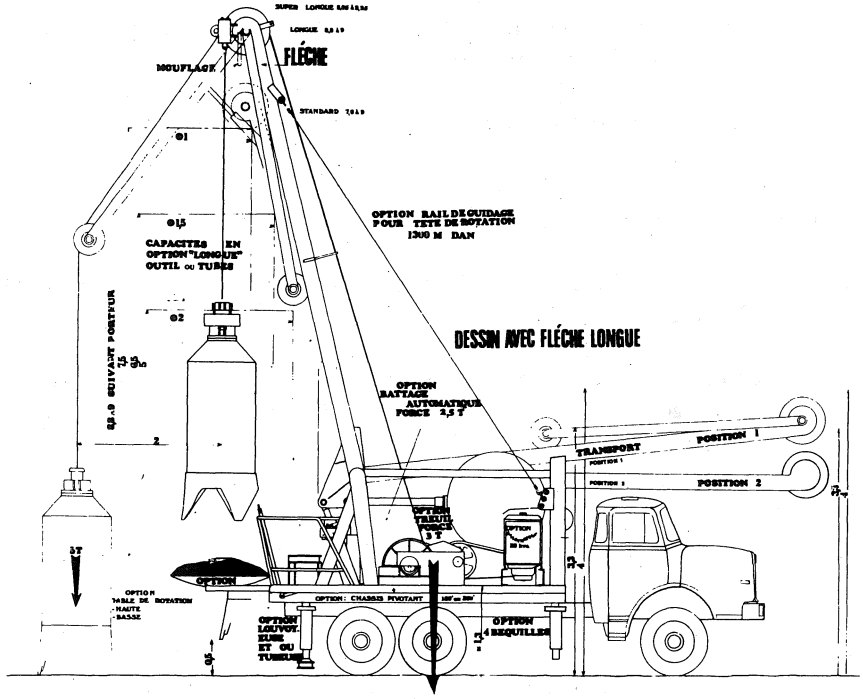
- *Approvisionnement :*

  – Camion MACK avec grue de manutention pour le transport des buses (2 voyages)

  – Camion MACK benne pour le transport du gravier, environ 10 m^3 (1 voyage).

Figure 29

SONDEUSE SECMI TP 1



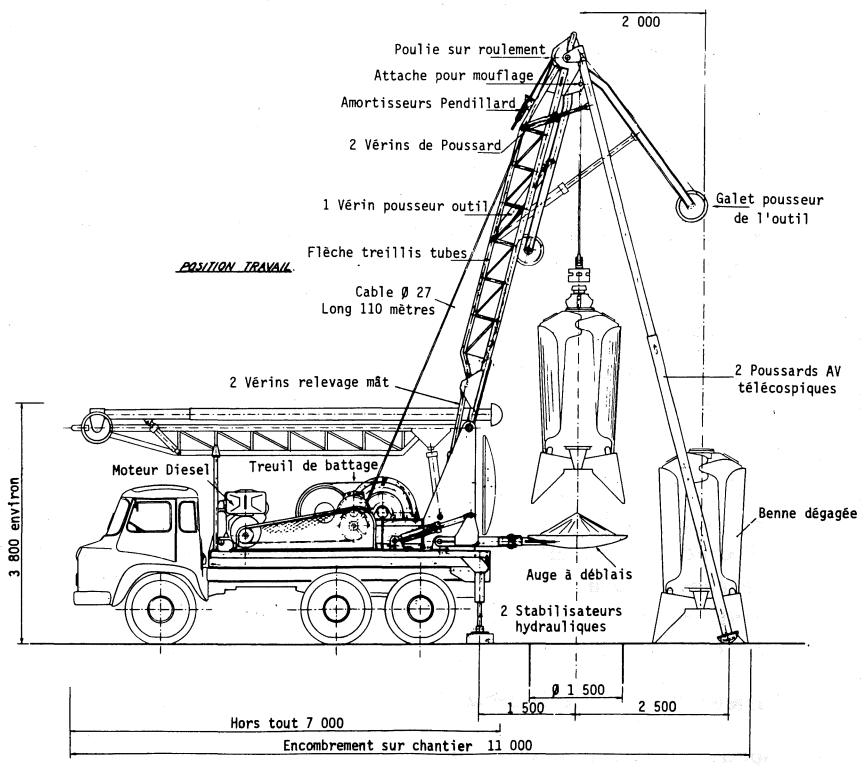
MACHINE EN TRANSPORT P7T (suivant option)

Marque : **S E C M I**	*Type :* **T P 1**
Sondeuse au battage - havage	

- **Caractéristiques essentielles** : Benne preneuse et battage en grand diamètre ; outils à trépans permettant de forer des couches dures.
- **Moteur** : Moteur sondeuse 110 CV.
- **Treuils** :
  - Treuil principal :
    Force : 10 t. sur la 1ère couche.
    Capacité : 450 m de câble ϕ 22 mm.
    Vitesse d'enroulement : de 48 à 75 m/mn en 1ère couche selon le rapport des poulies.
    Frein à bande à action automatique.
    Commandes mécaniques.
  - Treuil auxiliaire (option) :
    Force : 3 t.
- **Flèche** :
  Hauteur libre sous poutre : 8,9 à 9,25 m.
  Pousseur d'outils (5 t. à 2 m) (option)
  Fléchette permettant de manier des tubes de 1 m x 1 m jusqu'à une distance de 10 m.
  Pieds réglables pour former une chèvre pour poids au crochet supérieur à 10 t. (option).
- **Chargeur automatique de déblais**
- **Dispositif de battage automatique** (option)
  Force maxi : 2,5 t.
  Hauteur de battage : variable de 0,4 à 0,8 m
  Fréquence : 35 coups/mn.
- **Tubeuse-louvoyeuse** (option)
- **Outils** :
  Bennes hémisphériques articulées (terrains tendres)
  Bennes à trépans (terrains durs)
  Trépans en croix
  Soupapes.

Figure 30

SONDEUSE GALINET-TEKNIFOR MB 750



Marque : **GALINET-TEKNIFOR**	*Types :* **MB 750** **MB 1000**
Sondeuses au battage - havage	

- **Caractéristiques essentielles** : Benne preneuse et battage en grand diamètre ; outils lourds à trépans permettant de forer des couches dures.
- **Moteur** : Moteur sondeuse environ 90 CV.
- **Treuils** :
  - Treuil de battage :
    Force 7,5 t. sur brin direct (sur MB 750) ; 10 t. (sur MB 1000)
    Capacité : 110 m de câble ϕ 27 mm.
    Vitesse : 45 m/mn.
    Frein à bande réversible, action automatique par contrepoids, relevage hydraulique.
    Renverseur de sens de marche, pour la descente des charges lourdes (buses, etc.).
  - Treuil de curage :
    Force : 2,5 t. sur brin direct.
    Capacité : 100 m de câble ϕ 16 mm.
    Vitesse : 30 m/mn.
    (même fonctionnement que le treuil de battage).
- **Flèche** :
  Hauteur libre sous poulie : 9,50 m
  2 contre-flèches télescopiques, formant chèvre, manœuvrées par vérins.
  Flèche articulée, pour écarter l'outil, manœuvrée par vérin ; portée 2 m ; force 4 t.
- **Chargeur automatique de déblais**
- **Dispositif de battage automatique** (option)
- **Outils** :
  Bennes hémisphériques articulées (terrains tendres)
  Bennes à trépans (terrains durs)
  (Diamètre des bennes : jusqu'à 1,50 m).
  Trépans en croix.
  Soupapes.

ANNEXE 5

TUBAGES PVC

5.1. - CARACTÉRISTIQUES DU PVC :

a) Propriétés comparées du PVC rigide (employé en forage) et du PVC souple (canalisations et autres usages).(*)

	PROPRIÉTÉS	Unités	Méthodes d'essais (ASTM)	Polychlorure de vinyle Résines vinyliques (Chlorure et acétochlorure)	
				Rigide	Souple
PHYSIQUES	Masse volumique	g/cm³	D792	1,35-1,45	1,16-1,35
	Indice de réfraction n_D	–	D542	1,52-1,55	–
	Transmission lumineuse	%	–	Transparent à opaque	Transparent à opaque
	Possibilités de coloration	–	–	Illimitées	Illimitées
	Absorption d'eau - 24 h, ép. 3,2 mm	%	D570	0,07-0,4	0,15-0,75
MÉCANIQUES	Contrainte de rupture à la traction	daMPa (hecto-bars, kgf/mm²)	D638-D651	3,5-6,3	1,05-2,45
	Allongement à la rupture par traction	%	D638	2-40	200-450
	Module d'élasticité à la traction	daMPa (hecto-bars, kgf/mm²)	D638	245-420	–
	Contrainte de rupture à la compression	«	D695	5,6-9,1	0,63-1,19
	Contrainte de rupture à la flexion	«	D790	7-11,2	–
	Trav. spéc. de rupture au choc sur éprouvette entaillée	kJ/m²(kgf.cm/cm²)	D256	2,1-108	Variable suivant nature et quantité plastifiant
	Trav. spéc. de rupture au choc sur éprouvette lisse	«	–	–	–
	Dureté Rockwell	–	D785	70-90 Shore	–
CHIMIQUES	Action de la lumière solaire	–	–	Brunissement	Variable suivant plastifiant
	Action des acides faibles	–	D543	Nulle	Nulle
	– – – forts	–	D543	Nulle	Nulle à légère
	Action des alcalis faibles	–	D543	Nulle	Nulle
	– – – forts	–	D543	Nulle	Nulle
	Action des solvants organiques	–	D543	Résistent aux alcools, hydrocarbures aliphatiques, huiles. Solubles dans cétones, esters. Gonflent dans hydrocarbures aromatiques	Résistent aux alcools, hydrocarbures aliphatiques, huiles. Solubles dans cétones, esters. Gonflent dans hydrocarbures aromatiques
TECHNOLOGIQUES	Possibilités de moulage	–	–	Médiocres à bonnes	Bonnes
	Température de moulage injection	°C	–	150-205	180-195
	– – compression	°C	–	140-205	140-180
	Pression de moulage injection	h k Pa (kgf/cm²)	–	1050-2800	560-1750
	– – compression	h k Pa (kgf/cm²)	–	105-140	35-140
	Facteur de contraction	–	–	2-2,4	2-2,6
	Retrait au moulage	%		0,1-0,4	1-5
	Qualités d'usinage	–	–	Très bonnes	–

(*) (Extrait du livre : «Les plastiques-Guide pratique de l'utilisateur» par M. REYNE, Ingénieur en chef à la CEGOS. CFE).

	PROPRIÉTÉS	Unités	Méthodes d'essais (ASTM)	Polychlorure de vinyle Résines vinyliques (Chlorure et acétochlorure)	
				Rigide	Souple
PHYSIQUES	Masse volumique	g/cm³	D792	1,35-1,45	1,16-1,35
	Indice de réfraction n_D	–	D542	1,52-1,55	–
	Transmission lumineuse	%	–	Transparent à opaque	Transparent à opaque
	Possibilités de coloration	–	–	Illimitées	Illimitées
	Absorption d'eau - 24 h, ép. 3,2 mm	%	D570	0,07-0,4	0,15-0,75
MÉCANIQUES	Contrainte de rupture à la traction	da MPa (hecto-bars, kgf/mm²)	D638-D651	3,5-6,3	1,05-2,45
	Allongement à la rupture par traction	%	D638	2-40	200-450
	Module d'élasticité à la traction	da MPa (hecto-bars, kgf/mm²)	D638	245-420	–
	Contrainte de rupture à la compression	«	D695	5,6-9,1	0,63-1,19
	Contrainte de rupture à la flexion	«	D790	7-11,2	–
	Trav. spéc. de rupture au choc sur éprouvette entaillée	kJ/m²(kgf.cm/cm²)	D256	2,1-108	Variable suivant nature et quantité plastifiant
	Trav. spéc. de rupture au choc sur éprouvette lisse	«	–	–	–
	Dureté Rockwell	–	D785	70-90 Shore	–
CHIMIQUES	Action de la lumière solaire	–	–	Brunissement	Variable suivant plastifiant
	Action des acides faibles	–	D543	Nulle	Nulle
	– – – forts	–	D543	Nulle	Nulle à légère
	Action des alcalis faibles	–	D543	Nulle	Nulle
	– – – forts	–	D543	Nulle	Nulle
	Action des solvants organiques	–	D543	Résistent aux alcools, hydrocarbures aliphatiques, huiles. Solubles dans cétones, esters. Gonflent dans hydrocarbures aromatiques	Résistent aux alcools, hydrocarbures aliphatiques, huiles. Solubles dans cétones, esters. Gonflent dans hydrocarbures aromatiques
TECHNOLOGIQUES	Possibilités de moulage	–	–	Médiocres à bonnes	Bonnes
	Température de moulage injection	°C	–	150-205	180-195
	– – compression	°C	–	140-205	140-180
	Pression de moulage injection	h k Pa (kgf/cm²)	–	1050-2800	560-1750
	– – compression	h k Pa (kgf/cm²)	–	105-140	35-140
	Facteur de contraction	–	–	2-2,4	2-2,6
	Retrait au moulage	%		0,1-0,4	1-5
	Qualités d'usinage	–	–	Très bonnes	–

b) Qualité du PVC rigide employé en forage (normes allemandes DIN)

Propriétés physiques du matériau (PVC)

Propriétés	Unités	Norme	Méthode d'essai
Densité env.	g/cm^3	1,4	DIN 53 479
Module d'élasticité env.	kp/cm^2	30 000	DIN 53 457
Résistance à la traction	kp/cm^2	550	DIN 53 455
Résistance aux chocs		pas de rupture	DIN 53 453
Résistance à 20°C	$cmkp/cm^2$	3,0	DIN 53 453
Température de ramolissement Vickat	°C	80	DIN 53 460 B

Résistance des tubes

Résistance à la compression extérieure des tubes SBF et PB			
diamètre nominal		épaisseur de paroi normale	épaisseur de paroi renforcée
mm	inch	bar (kp/cm^2)	bar (kp/cm^2)
100	4	6,5	
115	4 1/2	5,0	15,5
125	5	5,5	
150	6	4,5	14,0
175	7	6,0	
200	8	6,5	14,0
250	10	6,0	14,0

5.2. - CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES TUBAGES ET CRÉPINES PVC

a) PB - RABANAP

Tubes rigides, vissés, tulipés - Assemblage A (11 filets/pouce)
- Assemblage B (6 ou 3 filets/pouce)
ou lisses - Assemblage C

ϕ Nominal mm	ϕ Nominal pouces	ϕ int. mm	ϕ ext. mm	Épaisseur paroi mm	ϕ maxi au niveau du raccord en mm A	B	C
100	4	103	113	5	120	–	–
110	4 1/2	110	125	7,5	–	135	125
115	4 1/2	115	125	5	–	130	–
125	5	126	140	7	–	149	140
150	6	150	160	5	–	172	–
150	6	149	165	8	–	176	165
175	7	163	180	8,5	–	192	180
200	8	196	210	7	–	220	–
200	8	203	225	11	–	241	225

b) SBF – PREUSSAG

Tubes et crépines K (paroi normale) :

ϕ Nominal mm	ϕ int. mm	ϕ ext. mm	Épaisseur paroi	ϕ maxi (mm) A	B
100	103	113	5	119	
115	115	125	5	132	
125	128	140	6	149	
150	152	165	6,5	174	
175	178	195	8,5	206	
200	205	225	10	240	

Tubes et crépines KV (paroi renforcée) :

ϕ Nominal mm	ϕ int. mm	ϕ ext. mm	Épaisseur paroi	ϕ maxi (mm) A	B
115	110	125	7,5	137	125
125	124	140	8		140
150	146	165	9,5	180	165
200	199	225	13	246	225

c) Tubes PVC fabriqués en Afrique

Marque	ϕ int.	ϕ ext.	Epaisseur paroi	ϕ ext. manchon	Observations
FLEXIFOAM	112,5	125	6,25	125	vissé lisse
SOTICI	112,5	125	6,25	135	vissé avec manchon

ANNEXE 6

COUT DU MATÉRIEL (*)

6.1. - Atelier-type ROTARY/MARTEAU FOND DE TROU

6.2. - Atelier ROTARY (750 m en 10")

6.3. - Atelier ROTARY (500 m en 10")

6.4. - Atelier de BATTAGE (150 m en 15")

6.5. - Atelier de BATTAGE (100 m en ϕ 1,2 à 1,5 m)

6.6. - Atelier de BATTAGE - HAVAGE

(*) prix H.T. départ usine début 1983 en millions de F.CFA

6.1. - ATELIER-TYPE ROTARY - MARTEAU FOND DE TROU

		MONTANT en M FCFA
a) Sondeuse et camion porteur		
Sondeuse hydraulique Rotary-MFT, entraînée par prise de force du camion		
• rotation : vitesse variat. continue 0 à 300 t/mn couple maxi 800 m.kg		
• force de traction 9 t. ; course pour tiges de 6 m		
• treuil 3,5 t.		
• pompe à boue à pistons plongeurs 4" x 5" 650 l/mn à 15 bars		
• pompe doseuse eau-mousse à air comprimé		
• caisse outils		
Camion porteur 6 x 6, 150 CV, avec treuil AV 10 t., réservoir supplémentaire 350 l., 4 vérins de stabilisation		81
b) Compresseur et camion d'accompagnement		
Compresseur 21 m^3/mn à 17 bars.	31	
Camion porteur 6 x 6 identique au précédent (sans le treuil)	25	
	56	56
c) Train de sonde		
120 m de tiges 4 1/2 (dont 102 m en longueur de 6 m) 6 m de masse-tiges 6" 80 m de tubage de travail 7"		
Raccords, accessoires, instruments de repêchage		11
d) Outils de forage		
3 marteaux pour taillants 6 1/2 à 8 1/2" 25 taillants 6 1/2" 2 taillants 8 1/2 " Clés et pièces de rechange 20 tricônes 8 1/2 ".		24
e) Véhicules		
Camion d'accompagnement 6 x 6, 12 à 15 t. de C.U. avec grue hydraulique, 3 t. à 1 m et 2 citernes (4 + 2 m^3)		31,5
Véhicule de liaison tout terrain		4,5
f) Unité d'essais de pompage		
Camion 4 x 4, 4 t. de C.U. Treuil électrique 1,5 t., flèche 7 m Groupe électrogène 15 KVA 1 pompe immergée 6", 12 m^3/h à 50 m 2 pompes immergées 4", 5 m^3/h à 50 m Colonnes de refoulement, accessoires, matériel de mesure		25
g) Pièces de rechange pour 1 an de fonctionnement		
Environ 10 % de la valeur du matériel		21
TOTAL (a à g)		**254**

6.2. - ATELIER ROTARY (capacité 450 m en 20" ou 750 m en 10")

	MONTANT en M. FCFA	
a) Sondeuse		
• Sondeuse sur châssis autonome, avec pompe 7 1/2 " x 10" et équipement de surface, l'ensemble monté sur semi-remorque	159	
• Groupe motopompe auxiliaire GD 7 1/2" x 10" sur skid	45	
• 500 m de tiges 3 1/2 IF (tiges de 6,20 m)	17,5	
• 4 masse tiges 4 3/4 " de 6 m = 24 m	4	
• 8 masse tiges 6 1/4 " de 6 m = 48 m	12,5	
• 4 masse tiges 8" de 6 m = 24 m	9,5	
• Accessoires, (raccords, outils de repêchage...)	10	
• Lot de pièces de rechange pour 5000 m de forage (environ 10 % de la valeur du matériel)	25,5	
	283	283
b) Véhicules		
– Semi-remorque de 9 m de long	10	
– Tracteur (pour les 2 semi-remorques)	19	
– Camion d'accompagnement 4 x 4,5 t. de C.U.	16	
– Camion citerne 6 x 4,10 m^3	25	
– 1 véhicule tous terrains	4,5	
– Lot de pièces de rechange pour 1 an de fonctionnement (environ 10 %)	7,5	
	82	82
c) Matériel annexe		
– Groupe électrogène 15 KVA	3	
– Poste de soudure électrique	1,5	
– Poste de soudure oxyacétylénique	0,5	
– Groupe motopompe centrifuge (confection de boue)	1	
– Pièces de rechange (10 % du matériel ci-dessus)	0,5	
– Outillage atelier et divers	3,5	
	10	10
TOTAL (a à c)		**375**

	MONTANT en M. FCFA	
d) Matériel de développement et d'essai		
– Groupe motocompresseur sur roues 7 m^3/mn à 7 bars et équipement airlift pour nettoyage du forage	31	
– Pompe à axe vertical 100 m^3/h à 80 m avec 120 m de colonne pour essais de débit	9,5	
– Pièces de rechange pour 1 an de fonctionnement . .	4,5	
Total (d)	45	

6.3. - ATELIER ROTARY (capacité 250 m en 12" ou 500 m en 10")

a) Sondeuse		
– Sondeuse montée sur camion 6 x 6 (prise de force), pompe 5 1/2 "x 8" et équipement de surface	137	
– Groupe de pompage auxiliaire 7 1/2" x 10"	45	
– Garniture de forage identique au cas précédent sauf masse-tiges 8".	44	
– Pièces détachées (10 %)	23	
	249	249
b) Véhicules		
Identique au cas précédent, sauf camion citerne 10 m^3 remplacé par citerne 10 m^3 sur semi-remorque	67	
Pièces détachées	7	
	74	74
c) Matériel annexe : identique au cas précédent.		10
TOTAL (a à c)		**333**

6.4. - ATELIER DE BATTAGE (capacité 150 m en 15") :

	MONTANT en M FCFA	
a) Appareil de forage et outillage		
– Appareil de forage (sans le camion porteur)	18,5	
– Outillage complet pour forage entre 550 et 312 mm (comprenant 2 trépans de 22", 2 de 18", 2 de 15", 1 de 12", 6 soupapes correspondantes, masse-tiges, coulisses, raccords, 2 rouleaux de câble de 19 mm, 2 rouleaux de câble 13 mm, outillage divers).	15	
– 22 m de tubage de travail 22" (560 mm) fileté avec sabot, collier et accessoires	4	
– 65 m de tubage de travail 16 1/2 " (420 mm) fileté avec sabot, collier et accessoire.	6	
– 48 m de tubage de travail 13 1/2" (340 mm) fileté avec sabot, collier et accessoires	3,5	
– Pièces de rechange : 10 % du prix de la sondeuse (soit environ 2 ans de travail).	5	
	52	52
b) Matériel annexe		
1 poste de soudure autonome 250 A	6	
1 ensemble de soudure oxyacétylénique.	0,3	
2 citernes de 4 m^3 sur skid	3	
1 motopompe et outillage divers.	1,7	
Matériel divers	0,4	
Pièces détachées 10 %.	0,6	
Soudure.	1	
	13	13
c) Véhicules		
1 camion de 12 t. de charge utile (porteur sondeuse) .	17,5	
1 camion de 12 t. de charge utile (accompagnement) .	17,5	
1 véhicule tous terrains.	4,5	
Pièces détachées (10 %)	4,5	
	44	44
TOTAL (a à c)		**109**

6.5. - ATELIER DE BATTAGE (capacité 100 m en 1,20 à 1,50 m de diamètre) :

	MONTANT en M FCFA	
a) Appareil de forage et outillage		
– Sondeuse montée sur remorque	75	
– Ensemble d'outils et d'accessoires (dont 2 trépans ϕ 1,60 m, 2 trépans ϕ 1,30 m, 2 trépans ϕ 1 m, soupapes, raccords, etc.).	12,5	
– Outils de repéchage	5,5	
– 70 m de tubage de travail ϕ 1,40 et 1,10 m	18	
– Pièces détachées (10 % du prix de la sondeuse) . . .	11	
	122	122
b) Matériel annexe		
1 groupe de soudure autonome grande puissance (300 A, 80 à 100 CV) monté sur roues	15	
1 groupe chalumeau oxyacétylénique	0,3	
1 citerne de 4 m³ montée sur remorque.	2,5	
1 motopompe et outillage divers.	3,2	
Soudure.	1,5	
Pièces détachées	1,5	
	24	24
c) Véhicules		
1 tracteur (pour la sondeuse).	19	
2 camions d'accompagnement 12 t. de C.U.	37,5	
1 véhicule tous terrains.	4,5	
Pièces détachées (10 %)	6	
	67	67
TOTAL (a à c)		**213**
d) Matériel d'essai de pompage.	p.m.	

6.6. - ATELIER DE BATTAGE-HAVAGE (benne-trépan)

	MONTANT en M. FCFA	
a) Sondeuse		
Appareil de forage équipé de deux treuils (10 t., 3 t.), d'un dispositif d'évacuation des déblais et d'un alternateur de 30 KVA		36
b) Camion porteur 6 x 4, avec treuil AV 6 t.		28
c) Outils de forage		
3 bennes à trépans (ϕ 1500, 1300, 1150 mm)	16	
2 bennes hémisphériques (ϕ 1300-1500, 1150 mm). .	15	
1 trépan en croix 3 t., ϕ 1150 mm	3	
1 soupape ϕ 700 mm	0,75	
Accessoires.	3,25	
	38	38
d) Tubages de travail et accessoires		
12 m de tubage ϕ1350mm, 12m de tubage ϕ1200mm et accessoires	4,5	
Poste de soudure électrique et poste oxyacétylénique.	6	
Équipement divers	1,5	
Soudure.	1	
	13	13
e) Atelier de construction de buses		
Bétonnière 380 l., moules à buses, groupe électrogène 6 KVA et divers		16
f) Véhicules		
1 camion benne 6x4 , 15 t. de C.U. avec grue 7,5 t. et treuil AV 6 t.	30	
1 camion benne 4x2 , 8 t. de C.U.	10	
1 remorqueur 6,5 m, 7 t. de C.U.	5,5	
1 véhicule tous terrains.	4,5	
	50	50
g) Atelier de développement et d'essai		
1 camion 4x2 , 2 t. de C.U. avec portique.	9	
1 groupe électrogène 15 KVA	3	
2 pompes submersibles 20 m^3/h à 20 m.	3	
Dévidoire 40 m de flexible et divers	1,5	
	16,5	16,5
h) Pièces de rechange		
10 % (postes a à g)		19,5
TOTAL (a à h)		**217**

ANNEXE 7

EXEMPLE DE

CAHIER DES PRESCRIPTIONS TECHNIQUES

POUR L'EXÉCUTION DE FORAGES VILLAGEOIS

EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN

CHAPITRE I

INDICATIONS GÉNÉRALES

ARTICLE 1 - PRÉSENTATION DU PROJET

Le présent appel d'offres concerne la réalisation de ... forages d'exploitation, devant être équipés de pompes manuelles.

Le présent Cahier des Prescriptions Techniques fixe les conditions d'exécution de ces forages et de réalisation des essais de débit.

Il est précisé que la construction des superstructures, la fourniture et la pose des pompes ne font pas partie du présent marché.

ARTICLE 2 - CONSISTANCE DES TRAVAUX ET LOCALISATION

Compte tenu des normes retenues pour les débits d'exploitation, il est prévu de réaliser environ ... forages dont environ ... %, soit ... devraient être équipés en ouvrage d'exploitation.

Les listes de villages ou quartiers retenus seront communiquées à l'Attributaire avec au moins un mois d'avance sur les travaux. Les implantations exactes lui seront indiquées au cours de tournées d'implantation.

La répartition prévisible des ouvrages d'exploitation par zone et par campagne, (entre 2 saisons des pluies), est, à titre indicatif, la suivante :

Il est précisé que l'ensemble de ces travaux doit être effectué à l'aide de ... atelier(s) de forage. Toutefois, en cas de retard dans le déroulement des travaux pour des causes qui ne lui seraient pas directement imputables, une dérogation pourrait être accordée à l'Attributaire pour la mise en œuvre d'un atelier supplémentaire, à des périodes compatibles avec les diverses contraintes auxquelles le Projet se trouve assujetti.

CHAPITRE II

DESCRIPTION DES OUVRAGES

ARTICLE 3 - PROFONDEUR DES OUVRAGES

Sauf exception, les niveaux aquifères captés correspondront à des zones de fissures dans un socle peu ou pas altéré, dur ou très dur.

Ce socle peut être constitué soit de granito-gneiss, soit de schistes birrimiens ou de roches associées (roches vertes, quartzites, grès), soit encore, dans la zone de ... de calcaires, schistes ou grès ou conglomérats primaires ou infra-cambriens.

Ce socle est surmonté par des formations d'altération. Ces formations généralement argileuse ou argilo-sableuses, peuvent être peu ou mal consolidées, voire fluentes, et contenir des blocs erratiques de roche dure.

A titre indicatif l'épaisseur d'altération devrait être, dans la majorité des cas, inférieure à ...m dans ... , mais supérieure à ... m dans la zone ... où elle pourra atteindre 60 m et plus.

La profondeur moyenne des forages devrait être d'une cinquantaine de mètres. La profondeur des ouvrages n'excèdera 70 m qu'exceptionnellement.

Il est rappelé que les informations précédentes ne sont données qu'à titre indicatif. Quelles que soient les conditions géologiques, l'Attributaire s'engage :

- à traverser au moins 60 m de formations d'altération
- à atteindre dans le socle une profondeur maximale de 90 m.

ARTICLE 4 - MODE D'EXÉCUTION DES FORAGES

Le forage des formations d'altération sera réalisé en rotary à l'air ou au marteau fond-de-trou. La traversée de niveaux non consolidés pourra cependant nécessiter une circulation d'eau, de mousse, voire de boue.

Chaque fois que nécessaire, un tubage provisoire devra être mis en place au droit des formations d'altération, et correctement ancré dans le socle.

Le forage sera poursuivi dans le socle au marteau fond-de-trou.

Le choix des méthodes et matériels à mettre en œuvre ainsi que celui des diamètres de forage restera à l'initiative de l'Attributaire et sous sa seule responsabilité ; toutefois le forage à l'air sera impératif dans le socle.

ARTICLE 5 - ÉQUIPEMENT DES FORAGES

Les forages productifs seront tubés aussitôt après leur réalisation. Les consignes d'arrêt des forages et de leur équipement seront communiquées à l'Attributaire, dans l'objectif d'obtenir un débit d'exploitation garanti minimum de 0,7 m^3/h, pour une profondeur de pompage compatible avec l'exhaure manuelle.

Il est prévu qu'environ ... % des forages, jugés négatifs, ne seront pas tubés.

Les forages productifs seront tubés sur toute leur hauteur en tubes PVC rigide, de 110 mm minimum de diamètre intérieur, vissés, sans manchons.

Le tubage sera crépiné au droit des fissures productives du socle. Exceptionnellement, des niveaux d'arènes grossières de la base du profil d'altération pourront être captés.

Les crépines seront fabriquées en usine et comporteront des fentes de 1 mm d'ouverture.

La base de la colonne comportera un élément de décantation et sera obturée par un bouchon de pied.

Pour permettre une bonne adaptation du plan de tubage à la coupe géologique rencontrée, l'Attributaire devra disposer sur le chantier d'éléments de tubes et crépines de 1 m et 3 m de longueur. Les quantités utilisées en moyenne par forage seront les suivantes :

- 3 éléments de 1 m de tubes pleins
- 1 élément de 1 m de crépines
- 2 éléments de 3 m de tubes pleins
- 1 élément de 3 m de crépines
- les autres éléments pleins ou crépinés pourront être de 3 à 6 m de longueur.

L'espace annulaire sera comblé avec du gravier de quartz roulé ou, à défaut, avec du gravier concassé, jusqu'à 3 m environ au-dessus des crépines. L'emploi de gravier latéritique est interdit. La granulométrie du gravier sera adaptée à la largeur de l'espace annulaire.

Cet espace sera ensuite comblé par du sable sur une hauteur de 2 m, puis par du tout-venant.

Les 6 premiers mètres de l'espace annulaire, en surface, seront cimentés, après développement du forage.

La tolérance sur la verticalité des tubages sera de 0,5 % jusqu'au niveau statique.

Le tubage PVC dépassera d'au moins 0,50 m la surface du sol. La tête de forage sera fermée par un capot métallique boulonné sur le tubage PVC.

Deux variantes au mode d'équipement précédent sont prévues et seront mises en œuvre à l'initiative du fonctionnaire chargé de diriger l'exécution du marché :

a) Sur certains forages, la partie inférieure du forage, si elle se révèle stérile, pourra être comblée à l'aide de gravier ou de tout-venant jusqu'à une certaine profondeur à partir de laquelle sera posé le tubage. La hauteur comblée ne pourra être inférieure à 10 mètres par ouvrage. La profondeur du forage sera mesurée avant élaboration du plan de tubage définitif.

b) Sur un certain nombre d'ouvrages, l'étanchéité de l'espace annulaire, nécessaire pour isoler le captage de la base des altérites, pourra être obtenue par la pose d'un packer.

Ces packers ne pourront être posés qu'au droit de niveaux durs et non fissurés et à une cote inférieure à la cote présumée du niveau dynamique. Le trou sera laissé nu sous le packer.

Les soumissionnaires devront préciser dans leur offre, de façon claire et détaillée, les diverses modalités qu'ils comptent adopter pour l'obtention de l'étanchéité de l'espace annulaire :

- dans le cas d'un gravillonnage, diamètre de forage et de tubage provisoire et définitif, et granulométrie du gravier,
- dans le cas d'un packer, nature, mode de fixation et de mise en place.

ARTICLE 6 - DÉVELOPPEMENT DES FORAGES

Le développement se fera à l'air-lift aussitôt après l'équipement du forage, à l'aide d'une colonne d'injection d'air de $1^{1/2}$".

Il sera poursuivi jusqu'à obtenir de l'eau claire sans particules sableuses ou argileuses.

L'Attributaire devra contrôler la teneur en sable (diamètre de la tache de sable dans un seau de 10 litres).

La durée du développement sera de 2 heures minimum lorsque seules les fissures du socle auront été captées, et de 4 heures minimum lorsque l'on aura capté des niveaux d'arènes.

Si des défauts d'exécution apparaissent lors de la réalisation d'un forage ou pendant le développement, la poursuite des opérations de développement au-delà de 4 heures de pompage sera à la charge de l'Attributaire et, si elles ne peuvent aboutir à l'obtention d'eau claire, l'ouvrage ne sera pas réceptionné.

Le débit sera mesuré toutes les 15 minutes pendant le développement. La remontée du niveau d'eau après le développement sera mesurée toutes les cinq minutes pendant trente minutes. La profondeur de l'ouvrage sera contrôlée avant et après développement.

L'Attributaire devra disposer sur le chantier du matériel nécessaire pour la mesure des débits et des niveaux. La précision exigée sera de :

- 10 % pour les débits
- 2 cm pour les mesures de niveaux
- 5 cm pour les mesures de profondeur

ARTICLE 7 - ESSAIS DE DÉBIT

Les essais de débit seront faits au moyen de pompes électriques immergées, capables de fournir des débits de 1 à 10 m^3/h à 50 m de profondeur.

L'essai type comportera 2 heures de pompage à 1 m^3/heure, suivies par 2 paliers de 1 heure à des débits à fixer en cours d'essai. La remontée sera suivie pendant 30 minutes.

Sur certains forages, à l'initiative du fonctionnaire chargé du contrôle des travaux, ces essais pourront être prolongés.

Les débits seront mesurés toutes les 15 minutes, avec une précision de 5 %.

Les niveaux seront mesurés toutes les 5 minutes, la première 1/2 heure après toute modification de débit de pompage, puis toutes les 10 minutes au-delà. La précision des mesures sera de 2 cm au maximum.

Les essais devront être repris, à la demande du fonctionnaire, s'ils ont été affectés par un arrêt intempestif du pompage ou des mesures. Ce sera en principe le cas si ces arrêts ont eu une durée supérieure à 10 % du temps écoulé depuis le début ou la fin du pompage d'essai. La reprise de l'essai interviendra, sauf contre-ordre ou dérogation de l'Administration, quand le rabattement résiduel ne sera plus que 1/10 de celui mesuré avant essai. L'essai interrompu sera à la charge de l'Entreprise.

La profondeur du forage sera contrôlée avant et après l'essai de pompage, avec une précision de 5 cm.

La qualité de l'eau (turbidité) et la teneur en sable (diamètre de la tache de sable) seront notées, notamment en début de pompage.

CHAPITRE III

DÉROULEMENT DES TRAVAUX

ARTICLE 8 - PLANNING DES TRAVAUX

Le délai global d'exécution est fixé à ... mois à compter de la notification.

Les délais intermédiaires suivants, comptés à partir de la date de notification, devront en outre être respectés :

Si le pourcentage de forages négatifs se révèle plus élevé que prévu, le nombre de forages d'exploitation équivalents à prendre en compte pour le contrôle des délais d'exécution sera donné par la formule :

$$Fe = 0{,}8\ Fp + 0{,}5\ Fn$$

Fe = forage d'exploitation équivalent
Fp = forage positif tubé et développé
Fn = forage négatif

Il est précisé que l'(les) atelier(s) ne devra(ont) être mis en œuvre que sur un seul poste de travail, 26 jours par mois au maximum.

La date d'interruption des travaux durant la saison des pluies sera décidée d'un commun accord entre l'Administration et l'Attributaire dans la mesure où les conditions d'accès ne perturbent ni la bonne exécution des travaux, ni leur direction et contrôle.

ARTICLE 9 - IMPLANTATION DES OUVRAGES

La liste des villages dans lesquels devront être réalisés des forages sera communiquée à l'Attributaire avec un mois d'avance.

Les implantations matérialisées sur le terrain par l'Administration ou son représentant, et les itinéraires d'accès seront reconnus avec le représentant de l'Attributaire lors de tournées d'implantations.

L'Administration se réserve toutefois le droit de modifier ces implantations, en temps utile, sans que l'Entreprise puisse prétendre à indemnisation.

Tous les villages seront accessibles en saison sèche. Le débroussaillage éventuel des zones d'implantation et de leurs accès, ainsi que la remise en état des lieux en fin de chantier resteront à la charge de l'Entrepreneur.

Chaque village et chaque ouvrage se verra attribuer un numéro d'identification fixé par l'Administration.

ARTICLE 10 - ÉCHANTILLONS ET MESURES

1. Echantillons

Pour chaque forage, l'Attributaire prélèvera des échantillons de terrain :

- à chaque longueur de tiges
- à chaque changement de terrain
- à chaque zone de fractures
- à chaque arrivée d'eau

Les échantillons (200 à 300 g) seront conservés dans des sacs plastiques avec les renseignements permettant de les identifier (nom de village, et numéro, numéro du forage, profondeur).

Ils devront pouvoir être présentés à toute demande de l'Administration ou de son représentant.

Les échantillons stockés par l'Attributaire seront tenus à la disposition de l'Administration pendant 3 mois ou lui seront remis sur sa demande.

2. Mesures en cours de travaux

Pendant la réalisation des forages, l'Attributaire devra mesurer :

- la profondeur du socle, des zones fracturées, et des différentes arrivées d'eau
- les débits d'eau en cours de forage, à chaque changement de tiges, à chaque nouvelle venue d'eau notable et en fin de forage, avant équipement
- les vitesses d'avancement pour chaque changement de terrain ou chaque changement de tiges.

Ces différentes mesures seront consignées sur le cahier de chantier.

3. Instruments de mesure

L'Attributaire maintiendra en permanence sur ses chantiers les instruments de mesure adéquats et les mettra à disposition des agents de l'Administration pour que ceux-ci puissent opérer à tout moment les contrôles nécessaires. Faute à lui de le faire, l'Administration les achètera aux frais de l'Attributaire et le montant correspondant sera déduit des sommes qui lui sont dûes.

ARTICLE 11 - CAHIER DE CHANTIER ET JOURNAL DES TRAVAUX

L'Attributaire tiendra un cahier de chantier sur lequel seront reportés tous les détails techniques des travaux et notamment :

- les caractéristiques du chantier :
  - date
  - appellation
  - personnel et matériel présents sur chantier

- les éléments relatifs aux opérations de forage :
  - méthode de forage et outils (type et diamètre)
  - vitesses d'avancement
  - tubages de travail (diamètre et longueur)
  - incidents en cours de forage

- les éléments relatifs aux opérations d'équipement :
  - plan détaillé de tubage (longueurs et cotes par rapport au sol)
  - cote du packer éventuel
  - volume de gravier et cimentation

- les données géologiques et hydrogéologiques et notamment les observations et mesures prescriptes à l'article 14.

- les éléments relatifs aux opérations de développement :
  - profondeur de soufflage
  - profondeur de l'ouvrage avant et après développement
  - observation et mesures prescriptes à l'article 10.

Tous ces éléments seront mentionnés sur le cahier de chantier au fur et à mesure de la manifestation des événements correspondants.

En cas de retard ou d'erreur dans la transcription de ces éléments, l'Attributaire restera responsable des défauts d'équipement qui pourraient en résulter et ne pourra contester les décisions prises par l'Administration concernant les attachements des travaux correspondants.

Le cahier de chantier sera maintenu en permanence sur le chantier et devra être présenté à toute demande du fonctionnaire chargé de diriger l'exécution des travaux ou de ses représentants.

Les détails techniques mentionnés sur le cahier de chantier seront reportés par l'Attributaire sur un journal de travaux.

L'original du journal de travaux sera remis à l'Administration 48 heures au moins avant chaque réunion mensuelle de chantier, de même que les compte-rendus d'essais de débit, établis conformément à l'article 7.

ARTICLE 12 - DIRECTION ET CONTROLE DES TRAVAUX

La direction des travaux, assurée par le fonctionnaire nommé par l'Administration ou ses représentants, portera sur :

– les implantations des ouvrages

– les décisions sur la poursuite ou l'arrêt des forages, leur équipement ou leur abandon, le plan de tubage. Ces décisions résulteront soit de l'application de consignes générales notifiées à l'Attributaire par notes de service, soit de consignes particulières notifiées sur le chantier ou transmises par radio.

A cette fin, l'Attributaire maintiendra en service un réseau de liaisons radiophoniques avec son chantier et y donnera en permanence accès aux représentants de l'Administration.

L'Administration s'engage à faciliter l'attribution des autorisations et l'affectation des fréquences nécessaires à la mise en service du réseau radiophonique. Les redevances éventuelles correspondantes resteront à la charge de l'Attributaire.

Il est toutefois précisé qu'un retard ou un refus enregistré dans l'obtention des autorisations précédentes ne pourront donner droit ni à une prolongation des délais d'exécution du marché, ni à indemnité.

Le contrôle exécuté par l'Administration portera sur :

– le personnel et le matériel affectés aux chantiers.

– la tenue du cahier de chantier et du journal des travaux, en particulier en ce qui concerne la nature des terrains traversés, les débits mesurés par l'Attributaire et la profondeur des ouvrages.

– la conduite des travaux de forage, d'équipement et de développement, ainsi que celle des essais.

ARTICLE 13 - RÉCEPTION TECHNIQUE DU MATÉRIEL

L'Attributaire sera responsable du choix du matériel à employer. Toutefois, à l'issue du premier forage, le matériel mis en œuvre donnera lieu à une réception technique dans le but de constater :

– la conformité entre les matériels proposés par l'Attributaire dans son offre, notamment en ce qui concerne ceux ayant fait l'objet d'une avance au titre de l'article ... du C.P.S.

– la compatibilité entre les capacités de ces matériels et les délais d'exécution

– leur aptitude à respecter les prescriptions techniques et en particulier celles des articles 3, 4, 5 et 6 du présent C.P.T.

La prononciation de cette réception technique ne libère en rien l'Attributaire de ses engagements aussi bien quant aux délais que quant aux prescriptions techniques.

ARTICLE 14 - RÉCEPTIONS PROVISOIRES

La réception provisoire des forages sera prononcée au vu des résultats des

opérations de développement et des essais de pompage, qui devront corroborer les observations et mesures de débit faites au cours de forage, sauf réserves faites par l'Attributaire dans le carnet de chantier lors de la décision d'équipement du forage.

La réception provisoire sera notifiée à l'Attributaire par le fonctionnaire chargé de diriger l'exécution des travaux, lors des réunions mensuelles de chantier, simultanément avec la prise en attachement des travaux.

Réceptions provisoires et attachements ne porteront que sur des ouvrages terminés (développement, tête de forage, remise en état des lieux et essais) et pour lesquels le journal de travaux et le compte-rendu d'essai auront été remis dans les délais prescrits à l'article 11 (48 heures avant les réunions mensuelles de chantier).

ARTICLE 15 - RÉCEPTIONS DÉFINITIVES

Les réceptions définitives seront prononcées à l'issue du délai de garantie d'un an.

Si, au cours de l'exploitation des forages pendant la période de garantie, une chute de caractéristiques des ouvrages (eau chargée, ensablement de l'ouvrage...) devait être constatée et avoir pour origine un défaut d'exécution, l'Attributaire pourrait être mis dans l'obligation, à ses frais, soit de renouveler les opérations de développement, soit de réaliser un nouvel ouvrage à proximité immédiate.

ARTICLE 16 - GARANTIE DES TRAVAUX

L'Attributaire s'engage à exécuter, avec le matériel qu'il propose, tous les travaux dans les règles de l'art quelles que soient les conditions géologiques, dans les limites des profondeurs définies à l'article 3 du C.P.T.

En cas d'incident en cours de forage ou d'équipement (chute de matériel dans le forage, coincement d'outils ou de tubages, ...) pouvant entraîner l'abandon du forage, l'Attributaire pourra être astreint à recommencer un autre forage dans le voisinage immédiat du premier, et produisant, dans le cas d'un forage positif, au moins le même débit que le forage abandonné. Il ne pourra prétendre à aucune rémunération pour le forage abandonné.

CHAPITRE IV

PROVENANCE ET QUALITÉ DES MATÉRIAUX

ARTICLE 17 - DISPOSITIONS GÉNÉRALES

L'Attributaire soumettra à l'approbation de l'Administration les matériaux qu'il compte employer avec indication de leur nature et de leur provenance.

Tous les matériaux reconnus défectueux devront être évacués par l'Entrepreneur et à ses frais.

L'Attributaire assurera sous sa propre responsabilité l'approvisionnement régulier des matériaux pour la bonne marche du chantier.

Nonobstant l'agrément de l'Administration sur la qualité des matériaux et leur lieu d'emprunt, l'Attributaire demeure responsable de la qualité des matériaux mis en œuvre. Il lui appartient de faire effectuer à ses frais toutes analyses ou essais de matériaux nécessaires à une bonne exécution des ouvrages.

Il appartient à l'Attributaire d'effectuer toutes les démarches, d'obtenir toutes autorisations ou accords et de régler les frais, redevances ou indemnités pouvant résulter de l'exploitation des carrières ou gisements et de l'emprise des installations de chantiers.

L'Attributaire ne saurait se prévaloir de l'autorisation de l'Administration en ce qui concerne les lieux d'emprunt pour se retourner contre elle dans le cas d'une action intentée par des tiers du fait de l'exploitation des carrières ou gisements.

ARTICLE 18 - CARACTÉRISTIQUES DES TUBAGES

Les tubages seront en PVC de diamètre intérieur 110 mm au moins, avec filetage dans la masse. Ils devront présenter toutes garanties de résistance aux efforts de cisaillement, d'écrasement et de tension au cours de leur mise en place et durant l'exploitation des ouvrages (pression extérieure 10 bars au moins).

Ils ne devront pas posséder des éléments susceptibles de se dissoudre dans l'eau ou de modifier sa potabilité.

Les crépines auront des fentes de 1 mm d'ouverture et seront fabriquées en usine.

Les tubages seront soumis à l'agrément préalable de l'Administration. A cette fin, des échantillons comportant filetage et crépine, seront remis à l'Administration qui devra prononcer ou refuser la réception technique préalable correspondante dans un délai de 15 jours.

ARTICLE 19 - CIMENT

Le ciment à utiliser sera du ciment Portland artificiel 210/314.

Il devra être livré en sacs de 50 kgs à l'exclusion de tout autre emballage. Tout sac présentant des grumeaux sera refusé.

Les récupérations de poussières de ciment seront interdites.

ARTICLE 20 - GRAVIER

Le gravier introduit dans l'espace annulaire des forages sera du gravier propre de quartz rond et calibré issu de carrières agréées par l'Administration.

L'utilisation de tout autre gravier tel que du concassé de carrière, sera soumise à l'agrément préalable de l'Administration.

L'emploi de gravier de latérite ne sera pas autorisé.

ARTICLE 21 - ORIGINE DES MATÉRIAUX ET FOURNITURES

L'importation des matériaux et fournitures sera soumise à l'autorisation préalable de l'Administration.

CHAPITRE V

CONDITIONS D'APPLICATION DES PRIX

ARTICLE 21 - DÉPLACEMENTS

Prix 1 - Préparation et amenée du matériel

Ce prix rémunère la préparation de l'ensemble du matériel et son amenée sur le lieu des travaux, y compris tous frais de transport, d'assurance, de droits statistiques ou péages éventuels.

Il n'est pas applicable à l'amenée éventuelle d'un nouvel atelier si les causes de retard justifiant la mise en œuvre de cet atelier sont imputables à l'Attributaire.

Prix 2 a - Déplacement entre 2 villages

Ce prix rémunère forfaitairement le déplacement d'un atelier de forage entre deux villages, ainsi que le montage et démontage de l'atelier sur le premier forage réalisé dans chaque village. Pour des déplacements supérieurs à 40 km, une plus-value lui est applicable suivant le Prix 2 c.

Il s'applique dès qu'un forage positif ou négatif est pris en attachement.

Il s'applique en sus des prix 1 et 3 pour les premiers villages de chaque campagne (pour chaque atelier).

Prix 2 b - Déplacement dans un village

Ce prix rémunère forfaitairement le déplacement de l'atelier de forage entre deux forages réalisés successivement dans un même village. Il comprend le montage et démontage de l'atelier sur le second de ces deux forages.

Il s'applique seulement si ce forage est pris en attachement.

Pour certains villages comprenant des quartiers isolés, ce prix 2 b n'est applicable que si le déplacement entre les deux sites de forages successifs est inférieur à 3 km ; dans le cas contraire, le déplacement sera rémunéré par application du prix 2 a.

Prix 2 c - Plus-value pour déplacement de plus de 40 km

Ce prix rémunère le kilomètre de transport d'un atelier entre 2 chantiers successifs pour le kilométrage supérieur à 40 km, suivant l'itinéraire retenu lors des tournées d'implantation.

ARTICLE 24 - ÉQUIPEMENT DES FORAGES

Prix 5 - Tubes pleins

Ce prix rémunère la fourniture et la pose du mètre linéaire de tubes pleins en PVC de 110 mm de diamètre intérieur au minimum, suivant les spécifications des articles 5 et 18 du CPT.

Il inclut le gravillonnage et le comblement de l'espace annulaire, ainsi que la pose d'un bouchon de pied de colonne.

Il ne s'applique pas pour la partie de tubage située au-dessus de la surface du sol.

Il s'applique pour des éléments de 1 m, 3 m ou plus, dans les limites des quantités prévues à l'article 5.

Prix 6 - Crépines

Ce prix rémunère la fourniture et la pose du mètre linéaire de crépines en PVC de 110 mm de diamètre intérieur au minimum, suivant les mêmes conditions d'application que le prix n° 5.

Prix 7 - Comblement de la partie inférieure d'un forage

Ce prix rémunère forfaitairement le comblement de la partie inférieure stérile de certains forages par du gravier ou du tout-venant.

Prix 8 - Packer

Ce prix rémunère forfaitairement la fourniture et la pose d'un packer pour réalisation de l'étanchéité annulaire à la base des altérites et toutes sujétions.

Prix 9 - Développement

Ce prix rémunère forfaitairement les opérations de développement à l'air lift. Il comprend :

- l'installation et le démontage de l'équipement d'air lift
- un pompage d'une durée minimum de 2 heures et au maximum de 4 heures
- l'observation de la remontée du niveau d'eau pendant 30 minutes

Prix 10 a - Mise à disposition avec force motrice

Ce prix rémunère l'heure de mise à disposition de l'atelier de forage avec force motrice :

- pour les opérations de développement, au-delà des 4 heures prises en compte dans le prix 9.
- pour des opérations spéciales ou des essais qui pourraient être éventuellement demandés par le fonctionnaire chargé de diriger l'exécution du marché.

Il s'applique en plus-value au prix 2 a.

Pour les premiers chantiers de chacune des campagnes sur chaque atelier les déplacements sont comptés à partir de ...

Il n'est pas applicable pour le repli des derniers chantiers de chacune des campagnes.

Prix 3 - Repli du matériel

Ce prix rémunère le repli de l'ensemble du matériel à la fin des travaux.

ARTICLE 23 - FORAGE

Prix 4 a - Forage dans les formations d'altération

Ce prix rémunère le mètre linéaire de forage dans les formations d'altération. Il inclut :

- l'exécution d'un avant trou éventuel
- le forage en rotary à l'air ou éventuellement au marteau fond-de-trou ainsi que la mise en œuvre éventuelle de méthodes de forage à la mousse ou à la boue et toutes autres sujétions
- une pénétration suffisante dans les formations consolidées pour assurer les meilleures conditions pour la poursuite du forage
- la mise en œuvre d'un tubage de travail si nécessaire et toutes sujétions, y compris l'abandon éventuel de ce tubage.

Prix 4 b - Plus value pour formations d'altération de plus de 40 m

Ce prix s'applique en plus-value au prix 4 a pour le forage des formations d'altération au-delà de 40 m de profondeur, jusqu'à des profondeurs maxima de 60 m.

Prix 4 c - Forages dans les formations du socle

Ce prix rémunère le mètre de forage, au marteau fond-de-trou, dans les horizons peu ou pas altérés des formations du socle. Les différentes roches peuvent être dures ou très dures. Il comprend toutes sujétions, y compris la traversée de passées peu ou pas consolidées et de zones fracturées.

Ce prix s'applique uniquement au-delà des profondeurs rémunérées par les prix 4 a et 4 b, et jusqu'à une profondeur maxima de 90 m.

Dans les cas où la colonne de tubes et crépines n'aura pu être descendue jusqu'à la profondeur atteinte en forage, sans que cela puisse nuire à la productivité et à la solidité de l'ouvrage, ce prix ne s'applique que sur la hauteur tubée. Cette dernière clause n'est pas applicable si l'équipement retenu comporte soit le comblement de la partie inférieure et stérile d'un forage, soit la pose d'un packer.

Il ne s'applique pas pour les soufflages de courte durée nécessaires à l'évaluation des débits en cours ou en fin de forage.

Prix 10 b - Mise à disposition sans force motrice

Ce prix rémunère l'heure de mise à disposition de l'atelier sans force motrice.

Prix 11 - Tête de forage

Ce prix rémunère :

- la cimentation des 6 premiers mètres de l'espace annulaire
- la fourniture du tubage PVC situé au-dessus de la surface du sol, sur une hauteur d'au moins 0,50 m
- la fourniture et la pose d'un capot métallique boulonné sur le tubage PVC.

Prix 12 a - Essai de pompage

Ce prix rémunère forfaitairement les essais de pompage d'une durée de 4 heures y compris :

- l'installation et le démontage d'un équipement de pompage conforme aux prescriptions de l'article 5 du C.P.T.,
- l'observation de la remontée pendant 30 minutes,
- toutes sujétions de mesure de débit et de niveaux.

Prix 12 b - Mise à disposition de l'équipement d'essai de pompage

Ce prix rémunère l'heure de mise à disposition de l'installation de pompage au-delà des 4 heures prises en compte dans le prix 12 a.

PROJET D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE ...

RÉALISATION DE ... FORAGES

CADRE DU BORDEREAU DES PRIX

N° DES PRIX	DÉSIGNATION	UNITÉ	PRIX UNITAIRE F CFA
	A. DÉPLACEMENTS		
1	Préparation et amenée du matériel. Le forfait : (en lettres)	F	
2a	Déplacement entre 2 villages. Le forfait :	F	
2b	Déplacement dans 1 village. Le forfait :	F	
2c	Plus value au prix 2a pour déplacement de plus de 40 km. Le km :	km	
3	Repli du matériel. Le forfait :	F	
	B. FORAGE		
4a	Forage dans les formations d'altération. Le mètre linéaire :	m	
4b	Plus value au prix 5a pour formations d'altération de plus de 40 mètres. Le mètre linéaire :	m	
4c	Forage dans les formations du socle. Le mètre linéaire :	m	

N° DES PRIX	DÉSIGNATION	UNITÉ	PRIX UNITAIRE F CFA
	C. ÉQUIPEMENT		
5	Fourniture et pose de tubes pleins. Le mètre linéaire :	m	
6	Fourniture et pose de crépines. Le mètre linéaire :	m	
7	Comblement de la partie inférieure d'un forage. Le forfait :	F	
8	Fourniture et pose d'un packer. L'unité :	U	
9	Développement d'un forage. Le forfait :	F	
10a	Mise à disposition de l'atelier avec force motrice. L'heure :	h	
10b	Mise à disposition de l'atelier sans force motrice. L'heure :	h	
11	Tête du forage. L'unité :	U	
12a	Essai de pompage de 4 heures. Le forfait :	F	
12b	Mise à disposition de l'équipement d'essai de pompage. L'heure :	h	

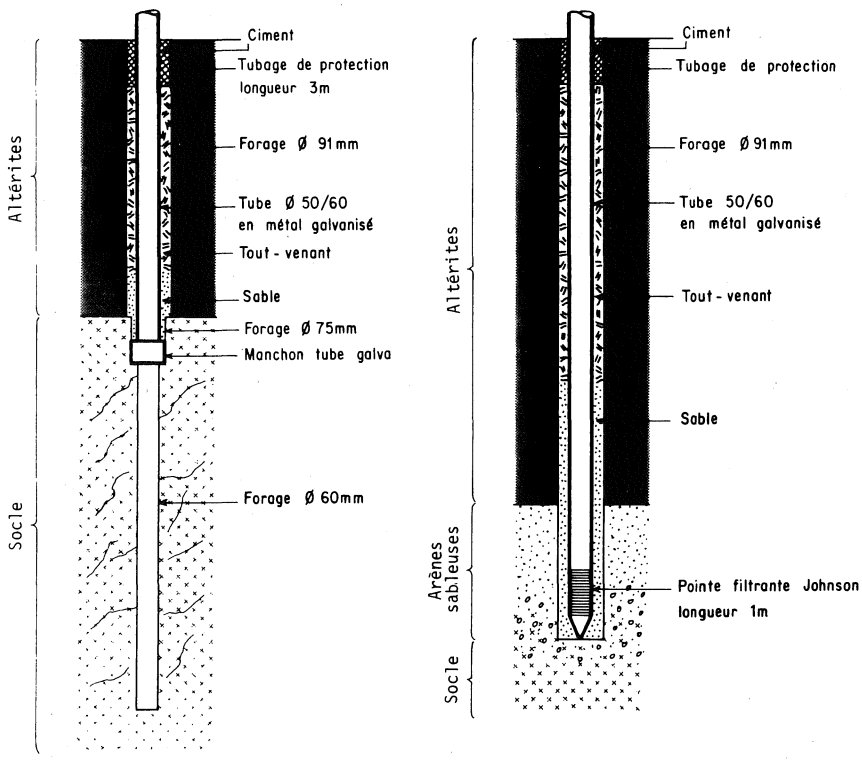
PROJET D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE ...
RÉALISATION DE ... FORAGES

CADRE DU DÉTAIL ESTIMATIF

N° des Prix	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire F. CFA	Montant F. CFA
	A. DÉPLACEMENTS				
1	Préparation et amenée du matériel	F			
2a	Déplacement entre 2 villages.	F			
2b	Déplacement dans 1 village.	F			
2c	Plus value pour déplacement de plus de 40 km.	km			
3	Déplacement entre 2 secteurs du projet	F			
4	Repli du matériel.	F			
	B. FORAGE				
5a	Forage dans les formations d'altération.	m			
5b	Plus value pour formations d'altération de plus de 40 m.	m			
5c	Forage dans les formations du socle.	m			
	C. ÉQUIPEMENT				
6	Tubes pleins.	m			
7	Crépines.	m			
8	Comblement de la partie inférieure d'un forage.	F			
9	Packer.	U			
10	Développement.	F			
11a	Mise à disposition avec force motrice.	h			
11b	Mise à disposition sans force motrice.	h			
12	Tête du forage.	U			

Figure 31

FORAGES «VILLAGEOIS» DANS LE SOCLE CRISTALLIN
COUPES TYPES D'OUVRAGES RÉALISÉS AU CAROTTAGE
AU DIAMANT



a) Captage dans le socle

b) Captage dans les altérites

8.1.2. - Coût d'un atelier

(capacité théorique 205 m avec tiges de 2 1/8 " ; utilisable en pratique pour des forages dans le socle ne dépassant pas 80 m de profondeur, avec une épaisseur d'altération inférieure à 40 m).

	MONTANT en M FCFA
a) Sondeuse et accessoires	
– Sondeuse sur skid et accessoires	8,6
– 60 m de tiges 2 1/8 " (tiges de 3 m)	0,95
– 42 m de casing 3 1/2 " (en longueurs de 3 m)	0,7
– Carottier double tube	0,25
– Motopompe à boue 132 l/mn à 35 bars	4,3
– Outillage	1,2
b) Véhicule léger 4 x 4	4,5
c) **Matériel annexe :**	
– Matériel d'essai de pompage	0,5
– Remorque et citerne 3 m^3	1
– Remorque pour la sondeuse	0,6
– Groupe motopompe 3 CV (pour approvisionn^t. en eau)	0,4
d) Têtes diamantées et couronnes pour 1400 m de forage	2
e) Pièces détachées (10 % de la valeur du matériel)	2,5
TOTAL	**27,5**

8.1.3.- Prix de revient des forages

8.1.3.1.- *Moyens*

- Personnel :
  - Base : entrepreneur + 1 gardien
  - Chantier : 1 foreur + 2 aides
  - Assistance technique : 1/2 volontaire expatrié (comptabilité, gestion)
    1/4 volontaire expatrié (mécanique)

- Matériel : sondeuse (annexe 4.16)
  matériel annexe (voir sous-chapitre 3.3)

- Véhicules :
  - Chantier : 1 véhicule 4 x 4 (type pick-up)
  - Base : 1 moto

8.1.3.2.- *Organisation*

- 1 poste de 8 à 10 heures par jour ; 22 jours par mois ; 10 mois de forage par an (et deux mois d'arrêt technique).

- Forages de 40 m de profondeur en moyenne, dont 15 m dans altérites et 25 m en roche dure (niveau statique en général inférieur à 10 m).

- 30 forages par an par atelier (*).

(*) C'est l'objectif que s'est fixé l'entreprise, objectif qui est tout à fait réalisable. En 1981-82, celui-ci n'a été atteint qu'à 77 % (23 forages réalisés au cours de la campagne).

8.1.3.3.- *Services généraux*

	F.CFA par mois	*Coût annuel en M. F CFA*
a) Personnel		
– Entrepreneur	60 000	
– Gardien	25 000	
– Charges sociales 30 %	25 500	
– Indemnités	14 500	
	125 000 x 12 =	1,5
b) Amortissements		
– Locaux : 4 millions	sur 40 ans	0,1
– Matériel atelier : 2 millions	sur 10 ans	0,2
– Véhicules (moto) : 0,5 million	sur 3 ans	0,17
c) Carburants		
– Moto : 1 500 km par mois x $\frac{5}{100}$ x 200 = 15 000		
15 000 x 11		0,17
d) Lubrifiants : 15 % (c)		0,02
e) Entretien : 15 % par an de 500 000		0,08
f) Frais divers de fonctionnement		0,66
g) Frais financiers		1,5
Assistance technique :		
– 1/2 volontaire expatrié (comptabilité, gestion)	200 000	
– 1/4 volontaire expatrié (mécanique)	100 000	
12 x	300 000	3,6
Total (a à g)		8

Prix de revient / poste d'atelier de forage :

$$\frac{8\,000\,000}{210} \neq 38.000 \text{ F CFA}$$

8.1.3.4.- *Coût d'un poste de l'atelier de forage*

		Coût annuel en MCFA	Coût/poste en FCFA	
			sans FM	*avec FM*
a) Personnel	*FCFA par mois*			
1 foreur	40.000			
2 aides	60.000			
Charges 30 %	30.000			
Indemnités	50.000			
	180.000 x 12	2,16	10 300	10 300
b) Amortissements				
– sondeuse : 19 millions sur 7 ans (*)		2,7	12 900	12 900
– véhicule : 4,5 millions sur 3 ans		1,5	7 100	7 100
c) Carburants				
– sondeuse : 24 CV x 0,2 x 8 h x 75 % $\neq$ 30 l x 200			–	6 000
– véhicule = 100 km/j x $\frac{20}{100}$ = 20 l x 200			4 000	4 000
d) Lubrifiants : 15 % (c)			600	1 500
e) Entretien				
– sondeuse : 15 % par an de 19 millions		2,85		13 000
– véhicule = 15 % par an de 4,5 millions		0,68	3 200	3 200
f) Services généraux			38 000	38 000
g) Divers et imprévus : 10 % de a) à f)			7 600	9 700
TOTAL (a à g) environ			**84 000**	**106 000**

(*) amortissement de la sondeuse sur 7 ans et non sur 5 pour tenir compte du métrage très faible effectué (1 200 m/an).

8.1.3.5. - *Coût des essais et des superstructures*

	Coût en F CFA
– Essai : 0,5 poste sans FM/essai :	42 000
– Superstructure : 0,5 poste + 30 000 F de fournitures :	72 000

8.1.3.6. - *Prix de revient d'un forage*

a) Postes :

– sans force motrice :	2 x 84 000 =	168 000	
– avec force motrice :	5 x 106 000 =	530 000	
		698 000	698 000

b) Outils

– couronne ϕ 91 mm : 100 m par couronne

$$\frac{54\,000 \times 15}{100} = 8\,000$$

– couronne ϕ 75 mm : 50 m par couronne

$$\frac{50\,000 \times 1}{50} = 1\,000$$

– couronne ϕ 60 mm : 50 m par couronne

$$\frac{91\,000 \times 25}{50} = 45\,000$$

	54 000	54 000
c) Tubages (ϕ 50/60 mm) : 15 m x 2 000 =		30 000
d) Essais de pompage		42 000
e) Superstructure		72 000

Total : **Prix d'un forage tubé** (prof. 40 m.).	**896 000**
Prix d'un mètre de forage tubé.	**22 400**
Prix d'un forage non équipé.	752 000
Prix d'un mètre de forage non équipé	18 800
Prix d'un forage d'exploitation (30 % d'échec)	**1 218 000**

8.2. - FORAGE AU BATTAGE AU MOTO-TREUIL

8.2.1. - Données techniques

Dès à présent deux ateliers de battage manuel sont mis en œuvre en Haute-Volta dans le Yatenga, par des équipes d'artisans, avec l'appui et l'encadrement d'O.N.G.(*). On ne dispose encore que d'expériences ponctuelles, mais qui ont paru suffisamment encourageantes pour qu'il soit décidé d'appuyer de telles initiatives.

La technique adoptée est celle du battage, simple et universelle. A priori les niveaux aquifères recherchés seront limités aux horizons d'altération du socle cristallin (arènes grenues) ou aux formations schisteuses les moins dures. Les outils utilisés sont des tarières, des soupapes et des trépans.

Chaque fois que cela est possible, ces forages seront entrepris à l'intérieur de puits modernes bétonnés, ce qui présente l'avantage :

- de réduire d'autant la profondeur à forer (les puits du Yatenga atteignent souvent 30 m et plus),
- de supprimer tout frottement latéral sur la hauteur correspondante,
- de pouvoir s'appuyer, à l'aide de vérins hydrauliques, sur le cuvelage du puits pour foncer ou retirer le tubage de travail,
- de réduire la nécessité de télescopage des tubages de travail,
- d'attaquer le forage sous le niveau statique.

Du point de vue hydrogéologique, la région du Yatenga ne présente pas cependant les conditions les plus favorables :

- les altérations sont souvent très épaisses, excédant parfois 60 m et plus,
- en zone granitique, il semble que les arènes grenues soient peu développées, et que l'on passe souvent directement d'une altération argileuse très peu productive à un socle très dur, non altéré.

Toutefois, le fonçage en fond de puits, au moins pour les ouvrages pénétrant de plusieurs mètres sous le niveau statique, permettra par l'effet de capacité de l'ouvrage, d'exploiter à raison de 5 m^3/jour des horizons ne fournissant que 200 l/h, inexploitables directement en forage par une pompe à main.

L'objectif est d'équiper ces forages avec un tubage PVC de 110/125 mm, pour y installer si nécessaire une pompe manuelle classique. Un approfondissement des puits par des forages de 20 m devrait être suffisant pour les débits recherchés (5 m^3/jour).

On envisage actuellement de substituer au battage à la main, le battage au moyen d'un moto-treuil, appareillage très simple mais qui permet de développer une énergie 20 à 30 fois plus élevée. Nous donnons ci-dessous, à titre indicatif, le devis d'un tel atelier et l'estimation qui a été faite du prix de revient des ouvrages.

(*) *Organisations non gouvernementales.*

8.2.2. - Investissements

		kg	*Quant.*	*Coût en F CFA*
1. Atelier forage				
1.1.	Groupe moto-treuil (moteur 11 CV)	340		1 400 000
1.2.	Chevalement	300		2 400 000
				3 800 000
2. Outils				
2.1.	Trépan en croix 211 mm	130		450 000
2.2.	Trépan droit 160 mm	70		270 000
2.3.	Trépan en croix 160 mm	75		330 000
2.4.	Raccord			110 000
2.5.	Masse tige ϕ 95,3 mm	170	2	360 000
2.6.	Pièce d'enlevage			50 000
2.7.	Raccord au câble			170 000
2.8.	Soupape à gravier 178 mm	30		220 000
2.9.	Soupape à gravier 127 mm	20		150 000
2.10.	Soupape à piston 127 mm	20		320 000
2.11.	Tarière 200 mm			300 000
				2 730 000
3. Tubages et accessoires				
3.1.	Tube foreur 175 mm élément 2 m	1000	25	1 250 000
3.2.	« « « « 1 m	50	2	80 000
3.3.	Protecteur		22	420 000
3.4.	Tête de mouton simple			60 000
3.5.	« « double			180 000
3.6.	Mouton coulissant			130 000
3.7.	Sabot tranchant		2	80 000
3.8.	Clés à chaîne pour tubes 7"		2	120 000
3.9.	Collier léger pour tubes 7"		2	160 000
				2 480 000
4. Outillage repéchage et divers				
4.1.	Harpon			60 000
4.2.	Repêcheur ϕ 127 mm			420 000
4.3.	Jeu de clés avec levier à chaîne pour carré 70			270 000
4.4.	Crochet à tourillon		2	120 000
4.5.	Collier tige 95,3 mm		2	130 000
4.6.	Clé boulons de collier		2	20 000
4.7.	Tirefort 5 t., 2 crick 10 t., 2 vérins			800 000
4.8.	Caisse à outils			180 000
				2 000 000

	Coût en F CFA
RÉCAPITULATIF	
1. Ensemble moto-treuil	3 800 000
2. Outils	2 730 000
3. Tubages	2 480 000
4. Outillages	2 000 000
	11 010 000
– divers et imprévus	1 290 000
	12 300 000
– emballage mise à FOB	400 000
– transport	1 300 000
	14 000 000
5. Land-Rover 109	4 500 000
6. Divers équipements	500 000
	19 000 000

8.2.3. - Prix de revient

			Coût en FCFA/an
Amortissements			
total sur 3 ans	19 000 000 : 3 =		6 300 000
Fonctionnement		**par mois**	
personnel 4 artisans - 1 comptable		300 000	
services extérieurs (soudeur - mécanicien)		50 000	
carburants lubrifiants		100 000	
consommables		20 000	
entretien pièces détachées		100 000	
divers		30 000	
		600 000	6 000 000
Fourniture			
15 forages de 20 m tubés en 110/125 par an 300 m x 6 000			1 800 000
Risques et bénéfices	15 %		2 300 000
		Total pour 15 forages	16 400 000

COUT D'UN FORAGE : 1 093 000 FCFA

ANNEXE 9

DONNÉES SUR LES AQUIFERES DES FORMATIONS CRISTALLINES ET SÉDIMENTAIRES EN AFRIQUE CENTRALE ET DE L'OUEST

9.1. Superficie couverte dans chaque État par les zones d'aquifères discontinus.

9.2. Données sur les épaisseurs d'altération en zones d'aquifères discontinus.

9.3. Description des principaux aquifères.

9.1. - SUPERFICIE COUVERTE DANS CHAQUE ÉTAT PAR LES ZONES D'AQUIFERES DISCONTINUS

PAYS	SUPERFICIE TOTALE EN MILLIONS DE KM^2	AQUIFERE DISCONTINU EN % DE LA SUPERFICIE TOTALE (*)
Bénin	0,11	83 %
Cameroun	0,48	87 %
Congo	0,34	35 %
Côte d'Ivoire	0,32	96 %
Gabon	0,27	80 %
Haute-Volta	0,27	95 %
Mali	1,2	36 %
Mauritanie	1,03	35 %
Niger	1,27	25 %
Sénégal	0,22	15 %
Tchad	1,28	48 %
Togo	0,056	93 %

(*) Valeur évaluée par planimétrage.

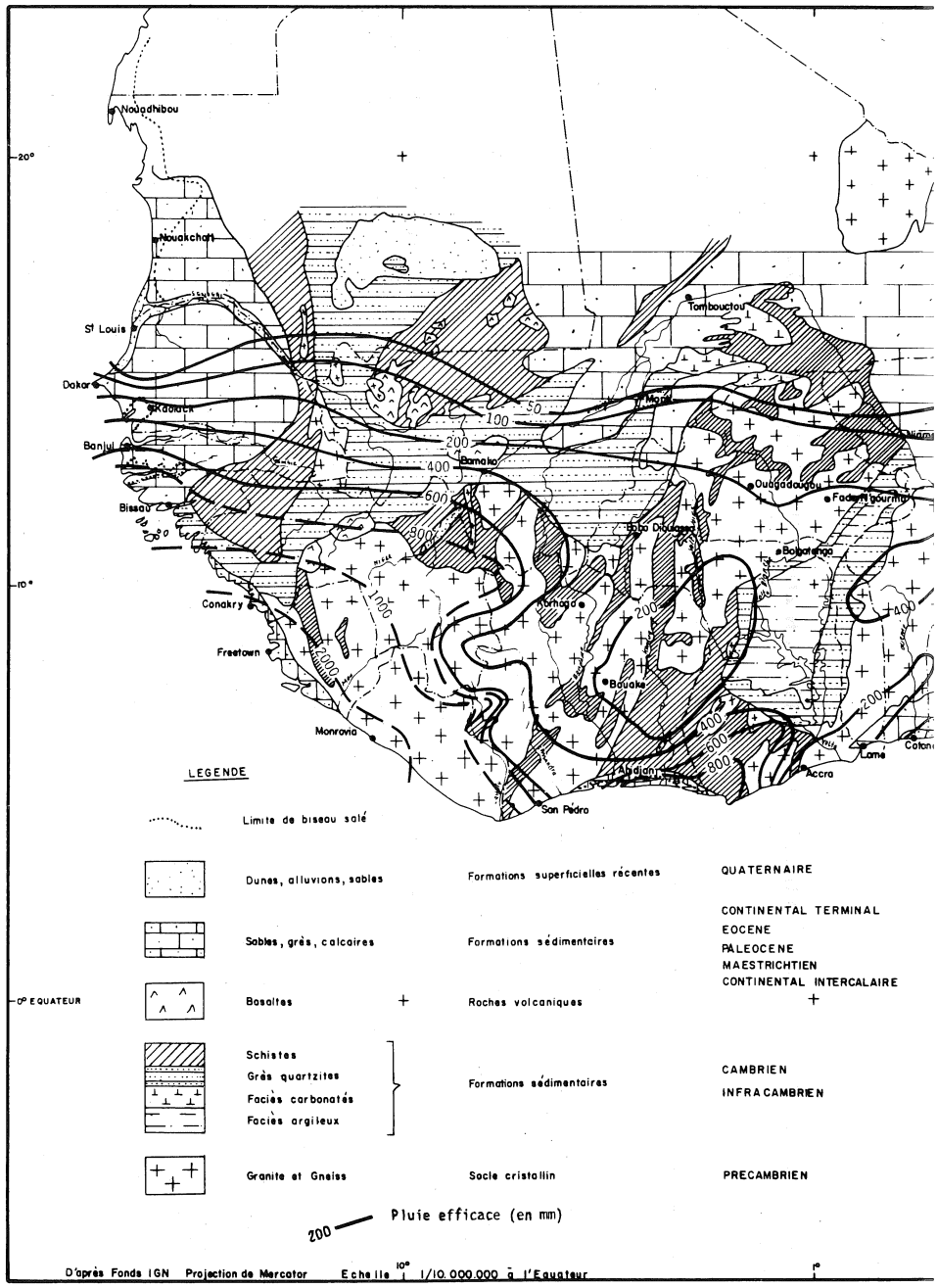
9.2. - DONNÉES SUR LES ÉPAISSEURS D'ALTÉRATION EN ZONES D'AQUIFERES DISCONTINUS

PAYS	ZONE	ÉPAISSEUR MOYENNE D'ALTÉRATION			RÉFÉRENCE PROGRAMME	NOMBRE D'OUVRAGES CONCERNÉS
		Granite	Schistes	Autres formations		
Bénin	Centre Nord Ouest Nord Est	10 m 15 m 30 m	30 m	Gneiss : 15 m	Wakuti	783 sondages
Cameroun	Nord	15 m	30 m		Hydrogéo 1975	25 forages
Côte d'Ivoire	Nord Centre Boucle du Cacao	25 m 25 m 12 m	25 m 35 m		Projet «Coton» « Boucle du Cacao	570 points d'eau « « « 1000 forages
Haute-Volta	Sahel (*) Plateau mossi (centre) Vallées des Voltas Zone méridionale	24-14-11 25 m 15 m 20 m	30 m 32 m 13 m	Grès : 20 m Roches Vertes : 9 Roches Vertes :30	ORD du Sahel Urgence Sahel Programme AVV Ranch de Léo	80 forages 29 forages 113 forages 29 forages
Mali	Bamako San-Tominian Kayes Mali-Sud	17 m 9 m 30 m	30 m 7 m	Grès : 15 m Grès : 7 m	PNUD Géomine Ombevi Helvetas	170 forages 34 forages 177 forages 110 forages
Mauritanie	Akjoujt	20 m	28 m		Synthèse hydro-géologique	23 puits
Niger	Liptako Sud Niger	15 m 20 m	20 m 35 m	Quartzites : 25 m	Liptako Kruger	130 forages 79 forages
Sénégal	Oriental	Ensemble indifférencié : grès, pellites, schistes, granites, volcanosédimentaire Moyenne : 25 m Maximum : 70 m			Projet allemand	35 forages
Togo	Ensemble du Pays Zone Nord (Ataloté)	12 m	19 m (Buem)		4ème FED PNUD 1977	290 forages

(*) 3 valeurs d'épaisseur d'altération : granite ancien - granite régénéré - granite tarditectonique.

Figu

CARTE DES GRANDS ENSE



2

LES HYDROGÉOLOGIQUES

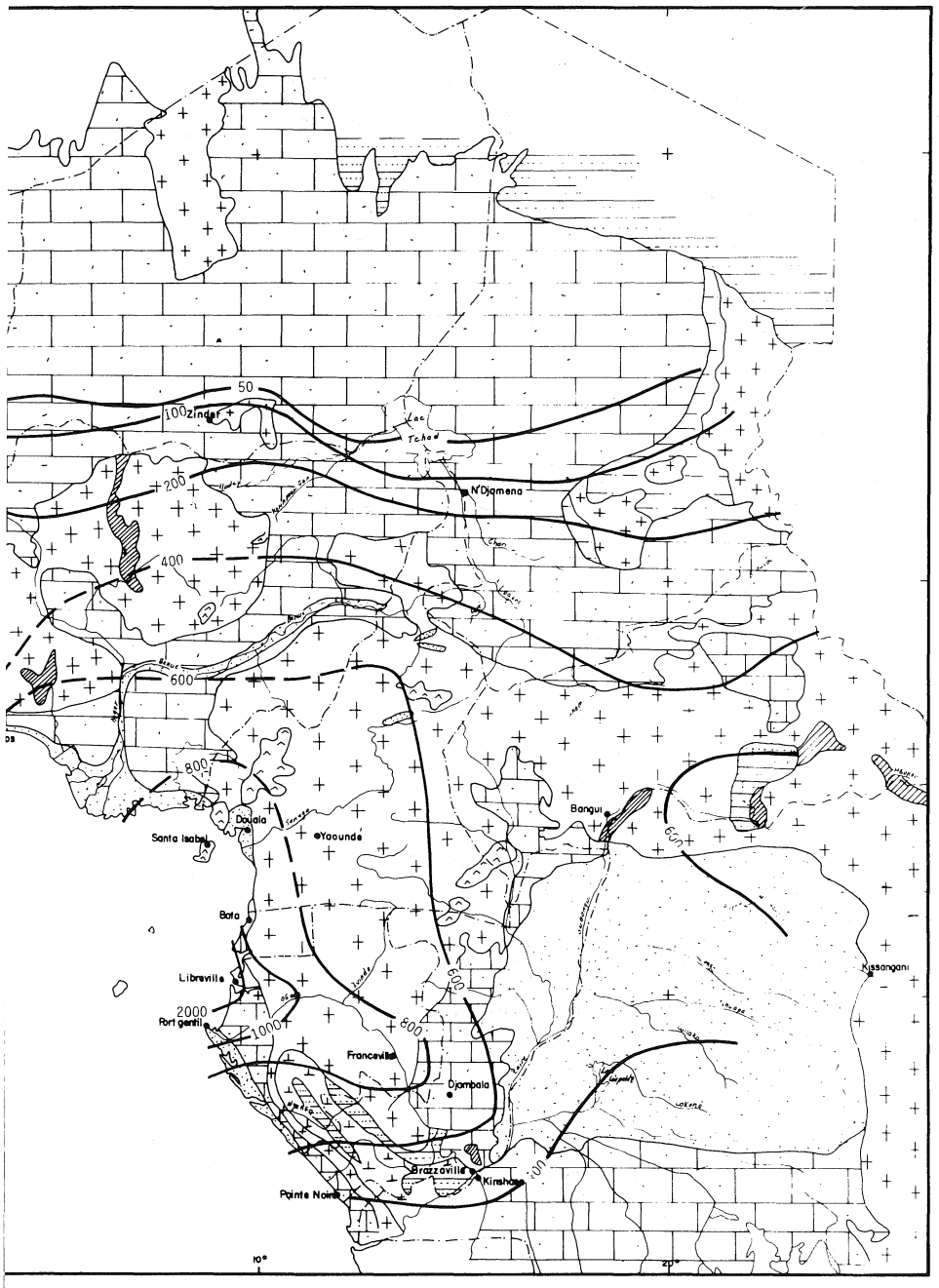
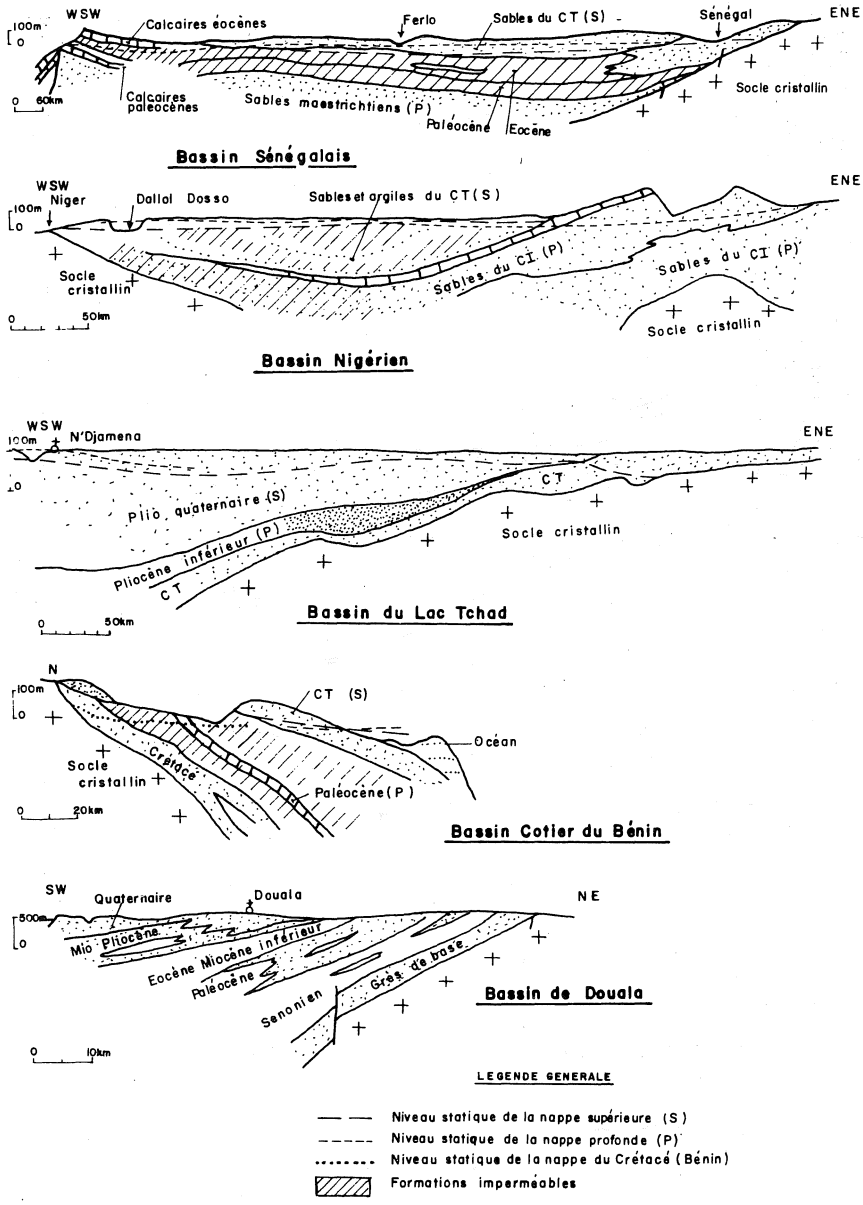


Figure 33

COUPES HYDROGÉOLOGIQUES SCHÉMATIQUES



9.3. - DESCRIPTION DES PRINCIPAUX AQUIFERES (*)

9.3.1. - Le socle précambrien

a) Le bouclier libérien, ivoirien, voltaique

Les formations du socle présentent une physionomie identique sur la majeure partie de la Côte d'Ivoire, du Mali et le Liptako nigérien.

On y retrouve l'alternance de deux familles de roches :

- les formations métamorphiques du Birrimien (Précambrien moyen) et, dans une mesure bien moindre, celles du Tarkwaïen (Précambrien supérieur) ;
- des roches cristallines : granites, gneiss, migmatites, constituées en fait pour la majeure partie de granites syntectoniques associés aux formations birrimiennes.

Le Birrimien est constitué de roches métamorphiques généralement d'origine sédimentaire : schistes essentiellement, grès et conglomérats, plus rarement volcanosédimentaire : tufs, brèches, roches vertes et schistes.

En Côte d'Ivoire, le Birrimien revêt une extension assez large et représente environ un tiers des affleurements du socle. En Haute-Volta, les granites dominent largement ; ailleurs, les deux types de formation se partagent à peu près également.

Dans les roches schisteuses du Birrimien, la couverture d'altération argileuse est habituellement peu perméable et les débits les plus intéressants sont obtenus dans la partie supérieure, fissurée, de la roche saine. L'épaisseur d'altération est en moyenne d'une trentaine de mètres (voir annexe 9.2), mais peut localement atteindre des valeurs beaucoup plus importantes.

Dans les roches grenues, l'eau est emmagasinée dans les fissures de la roche saine ou dans les arènes à la base de la couche d'altération. L'épaisseur de celle-ci est en moyenne de 15 à 30 m en Côte d'Ivoire, avec des valeurs extrêmes autour de 10 et 60 m. En Haute-Volta, les épaisseurs moyennes d'altération se situent entre 15 et 25 m (voir annexe ci-dessus).

Les débits qu'il est possible d'obtenir ponctuellement dans ces formations varient entre 1 et 5 m^3/h et ne dépassent qu'exceptionnellement 10 m^3/h.

b) Togo et Bénin

Au Togo et au Bénin, le socle, qui occupe la plus grande partie des deux pays, se divise en deux ensembles distincts :

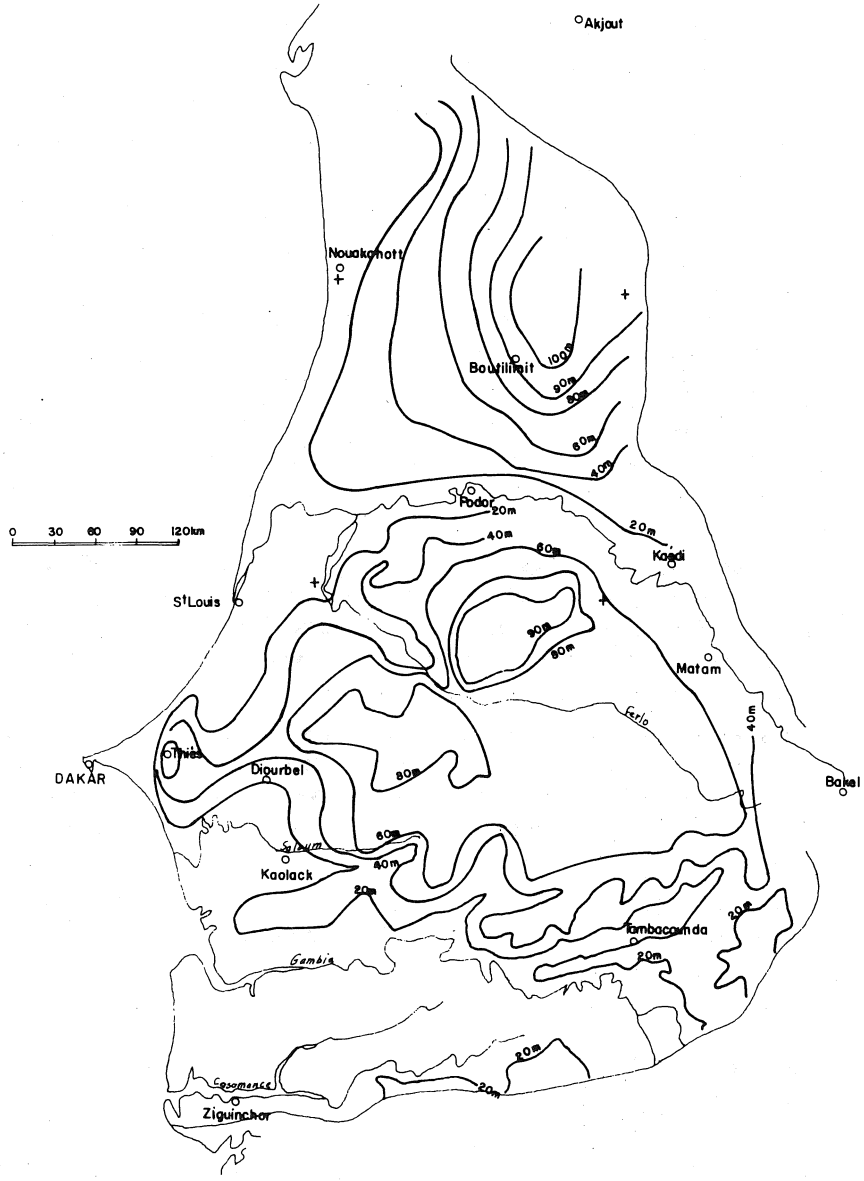
(*) une partie des données figurant ci-dessous a été extraite des études [2 à 6] «Planification des ressources en eau», réalisées par le B.R.G.M.

Figure 34

BASSIN SÉNÉGALO-MAURITANIEN

NAPPES PHRÉATIQUES

Carte de profondeur de l'eau sous le sol



– Les terrains cristallins anciens (anté-birrimiens) : ils comprennent une grande variété de roches grenues et métamorphiques (granites, gneiss, migmatites, etc.) et sont caractérisés par une faible épaisseur d'altération.

– Le bassin voltaïen qui occupe le Nord et l'Ouest de ces pays et prend une grande extension au Ghana. On y distingue deux ensembles :

  - l'un, formé de roches métamorphiques anciennes (précambrien moyen et supérieur) à dominante schisto-gréseuse : Atacorien, série de Kandé, Buem;
  - l'autre, formé de roches d'âge infracambrien à ordovicien : grès de Dapango, grès de Bombouaka et schistes de l'Oti.

Dans toutes ces roches, les conditions de gisement des aquifères sont semblables, c'est-à-dire discontinues et liées à l'altération ou à la fracturation des roches. Les schistes de l'Oti et les schistes marneux du Buem se sont révélés jusqu'à présent les moins favorables à la production d'eau souterraine.

c) Mauritanie

Le socle apparaît le long de la bordure orientale du bassin sénégalo-mauritanien. Il s'agit d'une série fortement tectonisée à prédominance schisteuse, injectée de granites, de dolérite et de roches basiques. On tire localement quelques ressources de la frange d'altération, principalement sous le réseau hydrographique à écoulement temporaire. Cette série s'étend sur 58 000 km^2.

Le Nord de la Mauritanie est occupé par de très larges affleurements de roches cristallines, dans lesquelles les granites prédominent.

9.3.2. - Les formations infracambriennes et primaires

Au Mali, ces formations comprennent :

- la séquence sédimentaire infracambrienne du Gourma
- les grès de l'Infracambrien
- les schistes cambriens de Nara
- le bassin de Taoudeni (Cambrien au Carbonifère).

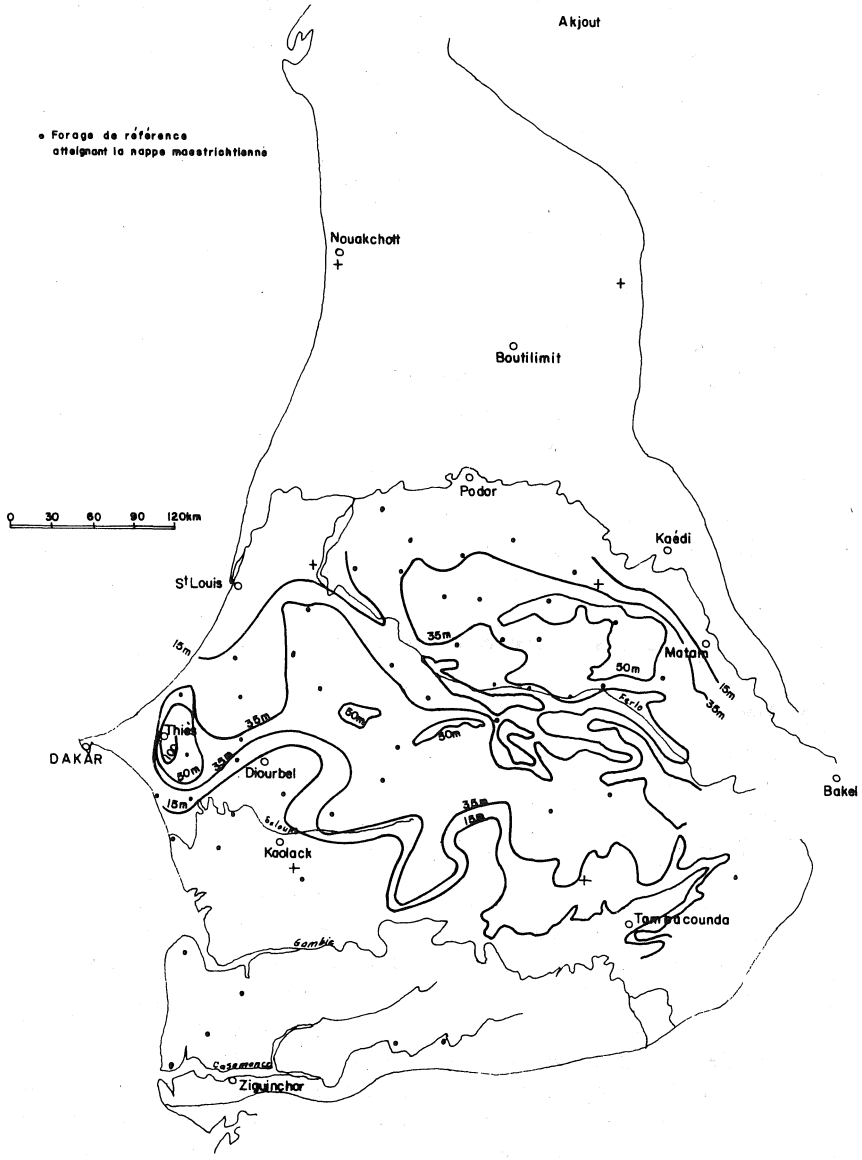
Les formations du Gourma (60 000 km^2) sont caractérisées par une alternance rapide de schistes argileux, grès, quartzites, calcaires et calcaires dolomiques ; ces formations non métamorphiques à l'Ouest et au centre du Gourma, sont atteintes par le métamorphisme dans la partie Est. Les forages qui y ont été exécutés jusqu'à présent ont connu un fort taux d'échecs, mais la plupart avaient été implantés sans géophysique ; les forages ou puits positifs profonds d'une centaine de mètres, ont donné aux essais des débits de 1 à 8 m^3/h ; les niveaux statiques se situent en moyenne entre 50 et 60 m mais peuvent atteindre 100 m de profondeur. Les calcaires et dolomies karstiques de la base du groupe d'Ydouban sont susceptibles de donner localement des débits élevés (100 m^3/h au

Figure 35

BASSIN SÉNÉGALO-MAURITANIEN

NAPPE PROFONDE MAESTRICHTIENNE

Carte de profondeur de l'eau sous le sol



forage Christine). Les aquifères du Gourma sont réalimentés en certains endroits par le Niger.

Grès infracambriens (198 000 km²) : les grès tabulaires, qui s'étendent depuis la région de Bandiagara jusqu'à la frontière de la Guinée et du Sénégal, et en Haute-Volta dans la région de Bobo Dioulasso, n'ont de chance d'être productifs qu'à la faveur de fissuration. Les grès de Koutiala, San, Tominian sont, semble-t-il, assez régulièrement productifs grâce à un réseau très développé de fractures et de fissures. Les niveaux statiques se situent entre 3 et 15 m de profondeur. Les grès de Bandiagara, plus mal connus, présentent sans doute des caractéristiques analogues. Dans les grès de Bafoulabé-Kenieba, il est possible d'obtenir des débits de 1 à 10 m³/h dans des forages de 50 à 60 m de profondeur avec un taux de réussite de 60 à 70 %.

Les schistes cambriens de Nara (57 000 km²) sont également imperméables dans leur masse et ne sont aquifères que là où ils sont fracturés. Sur 183 forages implantés avec géophysique (*), on a obtenu 43 % de réussite (forages débitant plus de 1 m³/h pendant 3 heures d'essais).

Les formations primaires du bassin de Taoudeni sont, quant à elles, très mal connues sur le plan hydrogéologique.

En Mauritanie, les formations infracambriennes et primaires comprennent :

- les grès infracambriens et primaires
- les pélites du Hodh

Les grès couvrent 78 000 km². Ils présentent des faciès très variés avec localement des intercalations de calcaires et de dolomies. Les réservoirs traditionnellement exploités sont les franges d'altération superficielle et les alluvions, mais il existe probablement des nappes relativement productives liées aux réseaux de fractures ou à des faciès particuliers.

Les pélites du Hodh (51 000 km²) sont perméables dans les 15 à 20 premiers mètres, du fait de leur fracturation.

9.3.3. - Les formations sédimentaires post-primaires et les recouvrements récents

a) Le bassin sénégalo-mauritanien

- **Sénégal**

Le bassin sédimentaire occupe la majeure partie (83 %) de la superficie du pays, le socle n'affleurant que dans l'angle sud-est du territoire. Il est constitué d'un empilement monotone de couches qui recèle de bas en haut les quatre aquifères suivants (figure 35) :

– les sables et grès du Maestrichtien (Crétacé supérieur)
– les calcaires paléocènes
– les calcaires et dolomies du Lutétien (Eocène)
– le Continental Terminal.

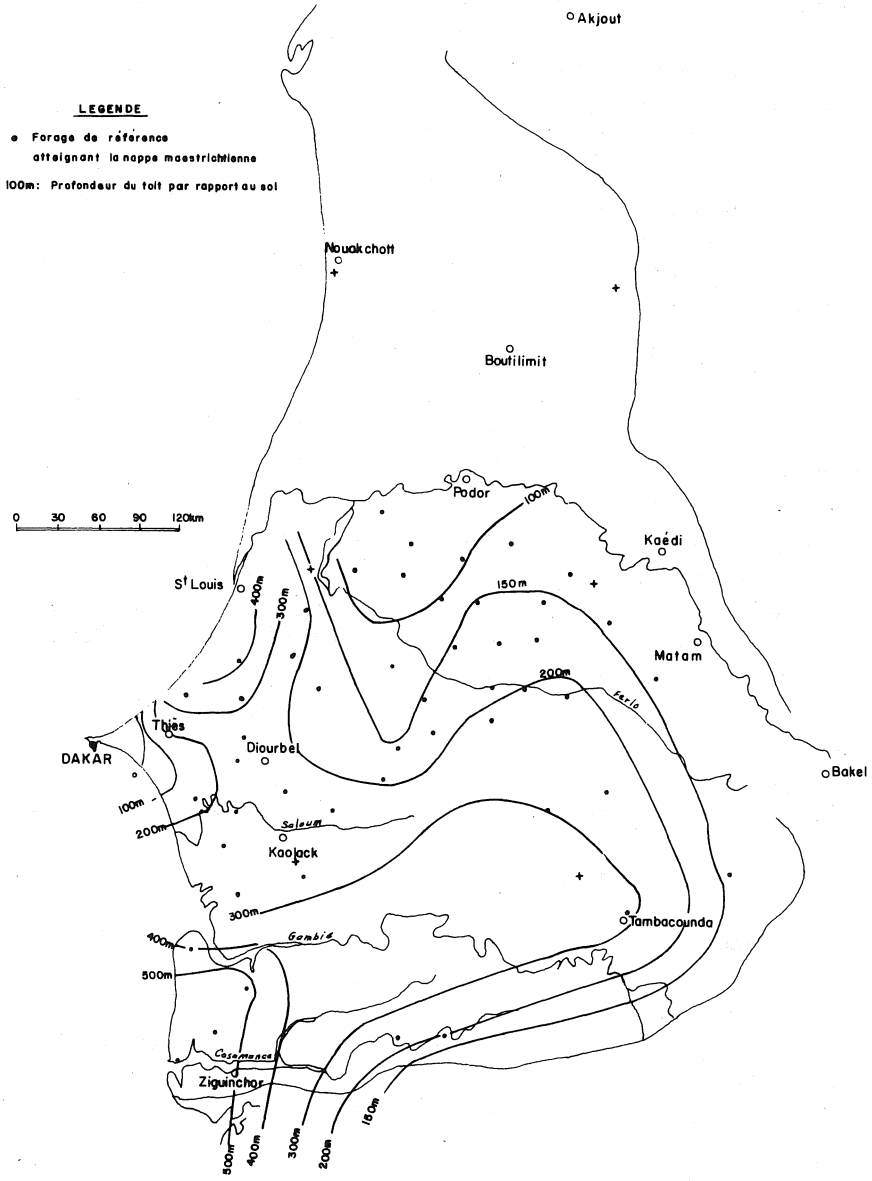
(*) Forages P.N.U.D.

Figure 36

BASSIN SÉNÉGALO-MAURITANIEN

NAPPE PROFONDE MAESTRICHTIENNE

Carte de profondeur du toit de l'aquifère



Deux autres aquifères généralisés, celui contenu dans les sables dunaires du littoral et celui des alluvions du fleuve Sénégal, sont susceptibles de fournir des ressources importantes.

Le Maestrichtien recèle la nappe la plus importante du Sénégal. Il est bien connu grâce aux nombreux forages qui exploitent cette nappe (*). Son extension correspond à peu près à celle du bassin sédimentaire, mais il est surtout exploité dans les deux tiers nord du pays. Il est formé de sables avec intercalations argilo-marneuses ou grésocalcaires, sur une épaisseur de 200 à 250 m. Le toit de l'aquifère est situé à une profondeur de 300 à 500 m dans la région de Tambacounda et de la Gambie, et de 100 à 300 m dans le reste du pays (figure 38). Le niveau statique y est plus élevé que celui de la nappe phréatique, ce qui conduit parfois à exploiter cette nappe par forage + contrepuits, là où la profondeur de la nappe phréatique ne se prête pas à l'exploitation par puits. La cote piézométrique est à 35 à 50 m sous le sol dans tout le centre du pays et à 15 à 35 m en bordure. Elle peut localement être abaissée par des prélèvements (Thiès). Les débits unitaires sont de l'ordre de 150 à 200 m^3/h par forage et la productivité est maximum au centre du bassin (N.E. de Diourbel).

Les calcaires Paléocènes très karstifiés, localisés dans la presqu'île du Cap Vert, renferment une nappe généralement libre fortement productive (200 à 500 m^3/h par forage). Les niveaux statiques s'échelonnent entre 20 et plus de 50 m de profondeur dans la zone où la nappe est exploitée.

Les calcaires et dolomies karstifiés du Lutétien (Eocène), localisés dans l'Ouest et le Nord du pays sont partiellement recouverts par le Continental terminal ou des dépôts récents ; ils renferment une nappe généralisée dans laquelle les débits peuvent aller jusqu'à 100 m^3/h par ouvrage. La surface utile est de 1900 km^2.

Le Continental Terminal recouvre les 4/5 de la surface du bassin sénégalais (105 000 km^2). Il renferme une nappe libre, qui la plupart du temps constitue la nappe phréatique de la région. Les sédiments (sables et grès argileux) ont une épaisseur de quelques dizaines de mètres à 100 ou 200 m. La cote de la nappe sous le sol varie entre une vingtaine de mètres sur la bordure du bassin et 80 à 90 m au centre (figure 36). Les ouvrages qui captent cette nappe ont une profondeur variant autour de 100 m et les débits spécifiques vont de 130 $m^3/j/m$ au Sénégal à 30 à 50 $m^3/j/m$ en Mauritanie.

Sables dunaires : ils sont développés le long d'une étroite bande entre Dakar et Saint Louis (5 000 km^2). Les débits d'exploitation peuvent être importants, mais doivent être modulés en fonction des risques d'invasion d'eau salée.

Alluvions du fleuve Sénégal (4 000 km^2) : elles sont localement très perméables et peuvent donner jusqu'à 30 m^3/h avec 2 m de rabattement. La nappe est salée et inutilisée en aval de Boghé.

(*) 328 forages répertoriés en 1978.

Figure 37

PLAINE DU GONDO
NAPPE DU CONTINENTAL TERMINAL
Carte de profondeur de l'eau sous le sol

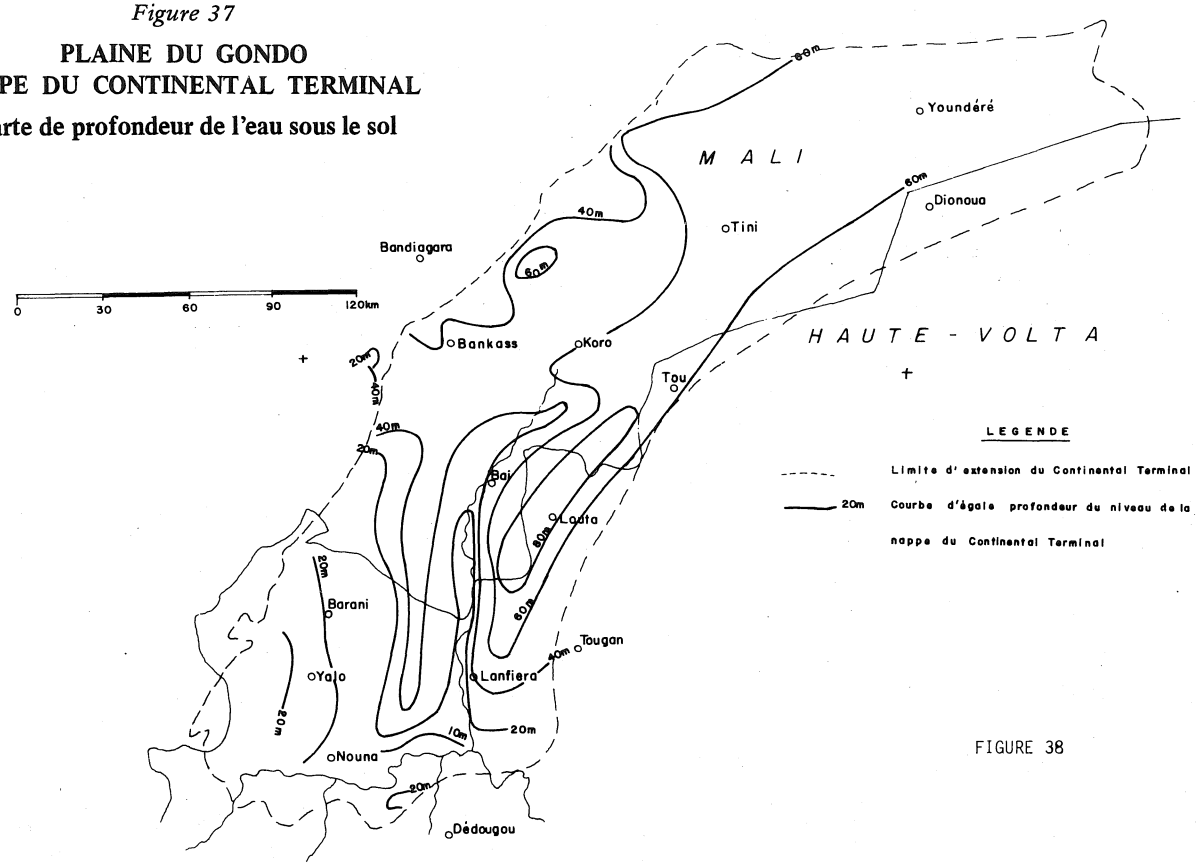


FIGURE 38

- *Mauritanie*

On retrouve en Mauritanie les aquifères précédents, à l'exception du Maestrichtien et du Paléocène.

Le Continental Terminal (sables et grès plus ou moins argileux) est exploitable dans la partie Ouest du bassin (54 000 km²). Son épaisseur passe d'Est en Ouest de quelques dizaines de mètres à 100 ou 200 m. La nappe est libre ou semi-captive ; plus à l'Est sa surface piézométrique est située dans l'Eocène. La profondeur de la nappe dans ces deux formations va d'une dizaine de mètres en bordure de la côte Est du fleuve Sénégal à plus de 100 m au centre du bassin (figure 36).

L'Eocène, sous-jacent au Continental Terminal, renferme une nappe libre dans les sables et grès du Lutétien de la bordure orientale du bassin. La surface d'alimentation de cet aquifère représente 40 000 km².

Les sables dunaires de la dépression d'Aouker et, plus au Nord, de la bordure du grès primaire (129 000 km²) renferment une nappe qui peut être atteinte par des puits à 20 ou 30 m sous le sol.

b) Le bassin de Taoudéni et le delta central du fleuve Niger

Au Mali, les aquifères continus sont localisés dans :

- le bassin de Ségou, la plaine du Gondo, le détroit soudanais et l'Ouest de l'Adrar des Iforas : ces régions sont occupées principalement par le Continental Terminal superposé par endroits au Crétacé et au Continental Intercalaire,
- l'immense bassin de Taoudéni qui s'étend à la fois en Mauritanie et au Niger.

Le Continental Intercalaire existe dans le Fossé de Nara et sur le pourtour de l'Adrar.

Fossé de Nara : les sédiments s'étendent sur 50 à 80 km de large et atteignent plus de 300 m d'épaisseur au centre du fossé. Les débits sont de 10 à 15 m³/h par forage pour un rabattement de 3 à 30 m.

Pourtour de l'Adrar : la nappe du Continental Intercalaire peut être atteinte vers 120 à 150 m de profondeur à la latitude de Menaka. Le niveau statique se situe entre 35 et 60 m sous le sol. On obtient des débits de l'ordre d'une dizaine de m³/h pour 3 à 10 m de rabattement avec des forages de 150 à 200 m de profondeur.

Le Crétacé et l'Éocène inférieur occupent le détroit soudanais et reposent sur le socle. Les sédiments sont constitués de sables, argiles et calcaires et l'on peut exploiter des débits de l'ordre d'une dizaine de m³/h pour des rabattements très variables (10 à 30 m).

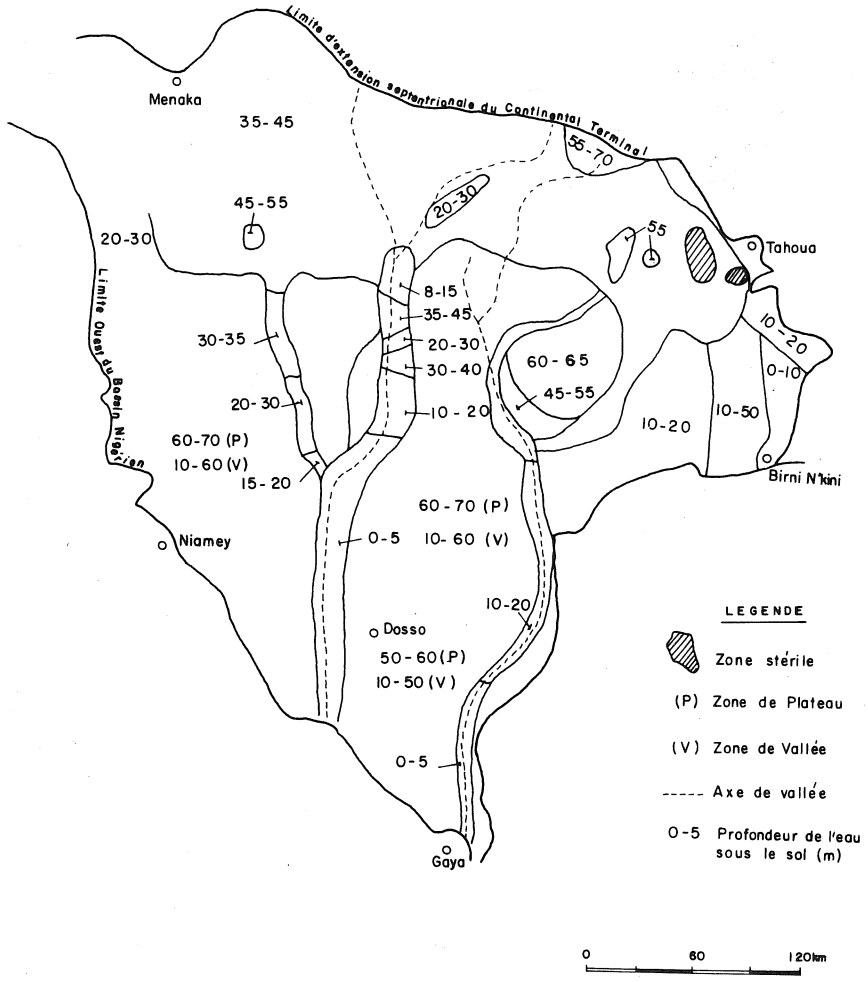
Le Continental Terminal présente une grande extension et se répartit en trois zones :

Figure 38

BASSIN NIGÉRIEN

NAPPE DU CONTINENTAL TERMINAL

Carte de profondeur de l'eau sous le sol



- **Delta central** : la nappe du Continental Terminal est alimentée directement par les alluvions du fleuve Niger et constitue la plus grande réserve d'eau souterraine du Mali. Sa cote, en équilibre avec celle du fleuve au voisinage de celui-ci, s'approfondit au fur et à mesure qu'on s'en éloigne. Elle est exploitée par des puits de 20 à 35 m dans la région de Ségou, de 50 à 60 m au nord de Macina, du lac Faguibine et dans les cercles de Tombouctou et Gao. Les forages assurant l'alimentation des principaux centres situés sur les rives du fleuve ont une profondeur de l'ordre de 75 m et donnent des débits de quelques dizaines de m^3/h pour 3 à 6 m de rabattement.

- **Azaouad et bassin de Taoudeni** : Le Continental Terminal, formé d'argiles gréseuses bariolées, recouvre tantôt les grès et schistes primaires, tantôt le Continental Intercalaire ou le Crétacé et l'Eocène du détroit soudanais. La nappe phréatique du Continental Terminal est la plupart du temps accessible sous une couverture dunaire de 10 à 50 m par des puits d'une profondeur de 40 à 60 m. La surface prise en compte pour le calcul des ressources est de 193 000 km^2.

- **Plaine du Gondo (22 000 km^2)** : le Continental Terminal, dont l'épaisseur est de l'ordre de 50 m (exceptionnellement 120 m) contient à sa base une nappe continue à faible débit, drainée par les fractures des calcaires sous-jacents. Le niveau de cette nappe en creux s'équilibre entre 20 à 40 m de profondeur sur la bordure du bassin et 80 m au centre de celui-ci (figure 39).

Alluvions quaternaires

Ces alluvions argileuses de la cuvette du Niger, reconnues sur une dizaine de mètres d'épaisseur s'étendraient sur 90 000 km^2. Elles recouvrent le Continental Terminal.

c) Le Bassin Nigérien

Les aquifères continus sont localisés dans les formations suivantes :

- Le Continental Terminal recouvre 56 000 km^2 dans la partie occidentale du bassin. Il est constitué de grès argileux et d'argiles dans lesquels s'individualisent des sables bien classés. Il contient une nappe supérieure libre (nappe phréatique) qui s'étend sur tout le bassin ; dans la partie Est, il recèle 2 nappes captives sous-jacentes.

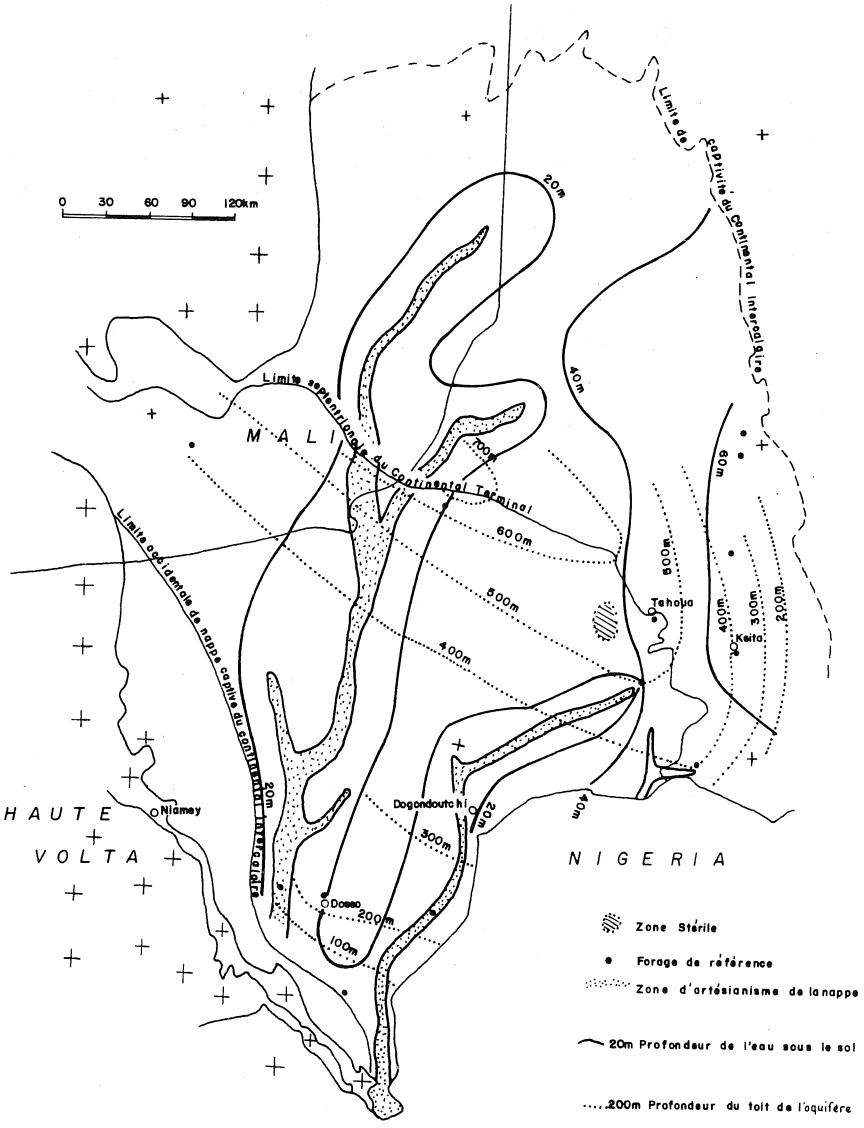
La nappe supérieure libre est celle qui est captée le plus généralement. Son niveau statique, assez proche de la surface du sol dans les vallées des Dallols, se trouve à une profondeur de 30 à 60 m et plus sous les plateaux (figure 40). Cette nappe est captée par des puits, dont la profondeur moyenne ne dépasse pas 45 m, grâce à leur implantation dans les points bas du relief. On obtient facilement 5 m^3/h par puits avec une hauteur captée de 4 à 5 mètres.

Figure 39

BASSIN NIGÉRIEN

NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE

Profondeur de l'eau sous le sol et profondeur du toit de l'aquifère



• Le Continental Intercalaire est une épaisse série formée de sables, grès et argiles, qui affleure au centre du bassin et est recouverte à l'Ouest par le Crétacé, le Paléocène et le Continental Terminal, l'épaisseur du recouvrement pouvant atteindre 600 m. Dans ce secteur, la nappe est en charge et est localement artésienne dans les vallées des Dallols. Les grès de Tégama, encore mal reconnus, recéleraient des réserves très importantes. La surface correspondant à la nappe libre est de 222 000 km² ; celle correspondant à la nappe captive de 165 000 km² (figure 41).

• Les formations du Crétacé supérieur au Continental Terminal de l'Est nigérien sont encore mal connues, mais contiennent probablement des nappes généralisées.

• Le Plioquaternaire affleure sur de très grandes surfaces tout autour du lac Tchad. Il renferme une nappe libre dans les dunes et les horizons de surface. Les niveaux inférieurs renferment une nappe captive appelée «nappe moyenne sous pression des formations du Tchad», qui offre d'excellentes ressources autour du lac Tchad où elle est artésienne. La profondeur du toit de l'aquifère est de 250 à 300 m. Il existerait une nappe plus profonde, rencontrée à une profondeur de plus de 500 m. La surface concernée par la partie exploitable de la nappe libre est de 104 000 km² ; celle de la nappe moyenne 26 000 km².

Il existe de nombreux autres aquifères de moins grande extension sur lesquels les données sont malheureusement moins nombreuses :

– *grès d'Agadès* : nappe captive, parfois artésienne (27 000 km²)
– *grès de Téloua* : nappe généralement captive ; niveau entre 30 et 90 m sous le sol ; surface concernée 26 000 km²
– *grès primaires* : ils contiennent 4 aquifères principaux séparés par de puissantes séries argileuses.

La nappe de l'Ordovicien, malgré des ressources importantes, n'est pas exploitée en raison de sa grande profondeur (> 800 m) ; celle du Viséen inférieur, très largement captive, donne des débits de 3 à 30 m³/h.

– *Ténéré du Tafassasset* : remplissage sédimentaire sableux.
– *bassin des Koromas* : silts et sables argileux.
– *Continental Terminal des Pays-Bas* : sables.
– *Cambrien-Viséen* : grès grossiers et grès kaoliniques.

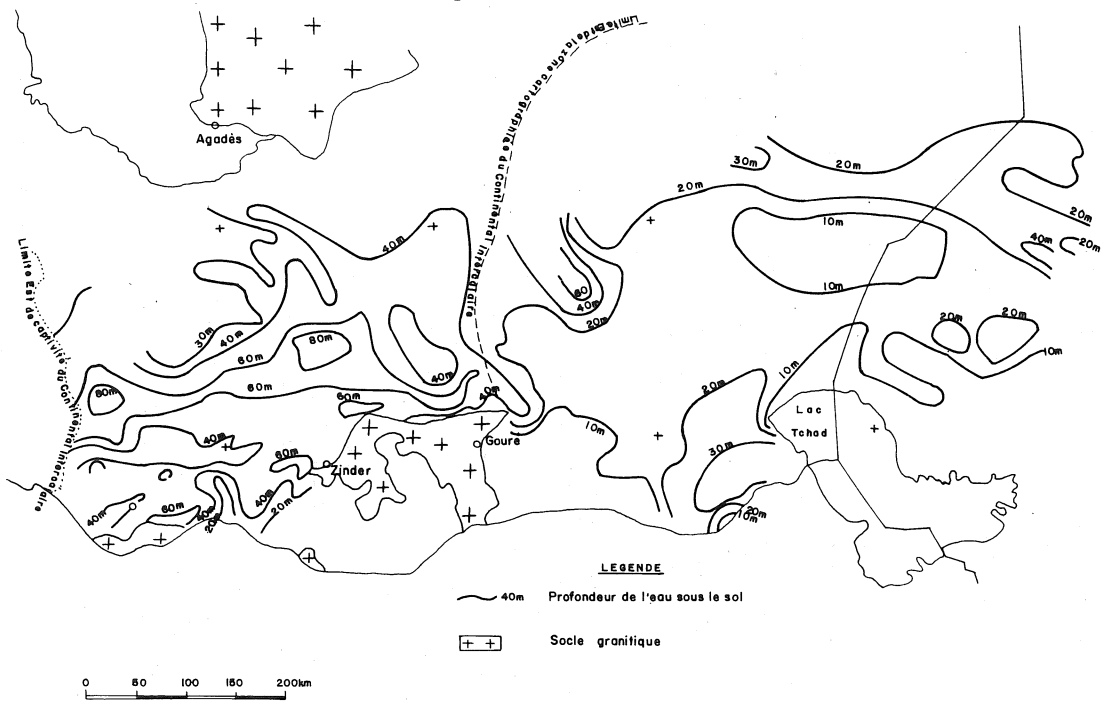
d) Le bassin du Tchad

• Le Plioquaternaire, qui s'étend sur le Niger et sur le Tchad, présente ici les mêmes caractéristiques (figure 42). La nappe libre concerne ici une surface de 235 000 km². La nappe moyenne sous pression intéresse 130 000 km².

• Le Crétacé renferme probablement une nappe captive sous un épais recouvrement marnoschisteux. La présence d'eaux superficielles et de nappes locales

Figure 40

EST NIGÉRIEN – BORDURE DU LAC TCHAD
SÉRIES DU CRÉTACÉ SUPÉRIEUR ET DU CONTINENTAL TERMINAL DE L'EST NIGÉRIEN
FORMATIONS PLIOQUATERNAIRES DU LAC TCHAD
Carte de profondeur de l'eau sous le sol



peu profondes a jusqu'ici fait négliger leur reconnaissance.

• Le Continental Terminal affleure sur de très vastes étendues : 130 000 km^2 au Nord, 160 000 km^2 au Sud du pays. Au Nord, depuis les Pays-Bas jusqu'à Batha, les puits traditionnels descendent parfois jusqu'à 80 m pour atteindre la nappe ; au sud, la nappe est en relation directe avec les cours d'eau, mais sa profondeur sous le sol peut cependant dépasser 90 m dans les interfluves.

• Le Cambrien-Viséen (115 000 km^2) donne par forage des débits de l'ordre de 1 000 m^3/jour, mais les exploitations traditionnelles se font par puits captant le plus souvent les ressources des nappes alluviales.

e) Les bassins sédimentaires côtiers

Les données concernant la profondeur du niveau piézométrique sous le sol et les caractéristiques moyennes des ouvrages pourront, dans chaque cas particulier être obtenues à partir des synthèses hydrogéologiques locales. Les éléments ci-dessous, extraits pour la plupart de la notice sur la planification des ressources en eau [2], bien que non exhaustifs, donneront une idée approchée des caractéristiques des différentes nappes.

• *Côte d'Ivoire*

Le bassin sédimentaire n'occupe que 9 500 km^2, soit 3 % de la superficie du pays. On y trouve deux aquifères :

– la nappe des formations quaternaires littorales : le débit des ouvrages captant cet aquifère est de quelques m^3/h à quelques dizaines de m^3/h (localement jusqu'à 200 m^3/h). L'exploitation de ces ouvrages doit être modulée en fonction du risque d'invasion d'eau salée.

– Le Continental Terminal recouvre la quasi totalité du bassin sédimentaire en arrière des formations récentes littorales. En général, il repose directement sur le socle précambrien, sauf au sud du bassin où il recouvre le Crétacé supérieur, l'Éocène ou le Miocène. Il est constitué de sables dans la partie supérieure et d'argiles sableuses dans la partie inférieure ; son épaisseur totale ne dépasserait pas 150 m.

Sur 60 forages recensés dans l'ouvrage sur la planification des ressources en eau [2], 90 % ont une profondeur inférieure à 100 m (et 40 % inférieure à 50 m), 72 % ont un niveau statique à moins de 40 m (et 90 % un niveau statique inférieur à 60 m). Les débits des ouvrages vont de 10 à 20 m^3/h à plus de 200 m^3/h.

• *Togo*

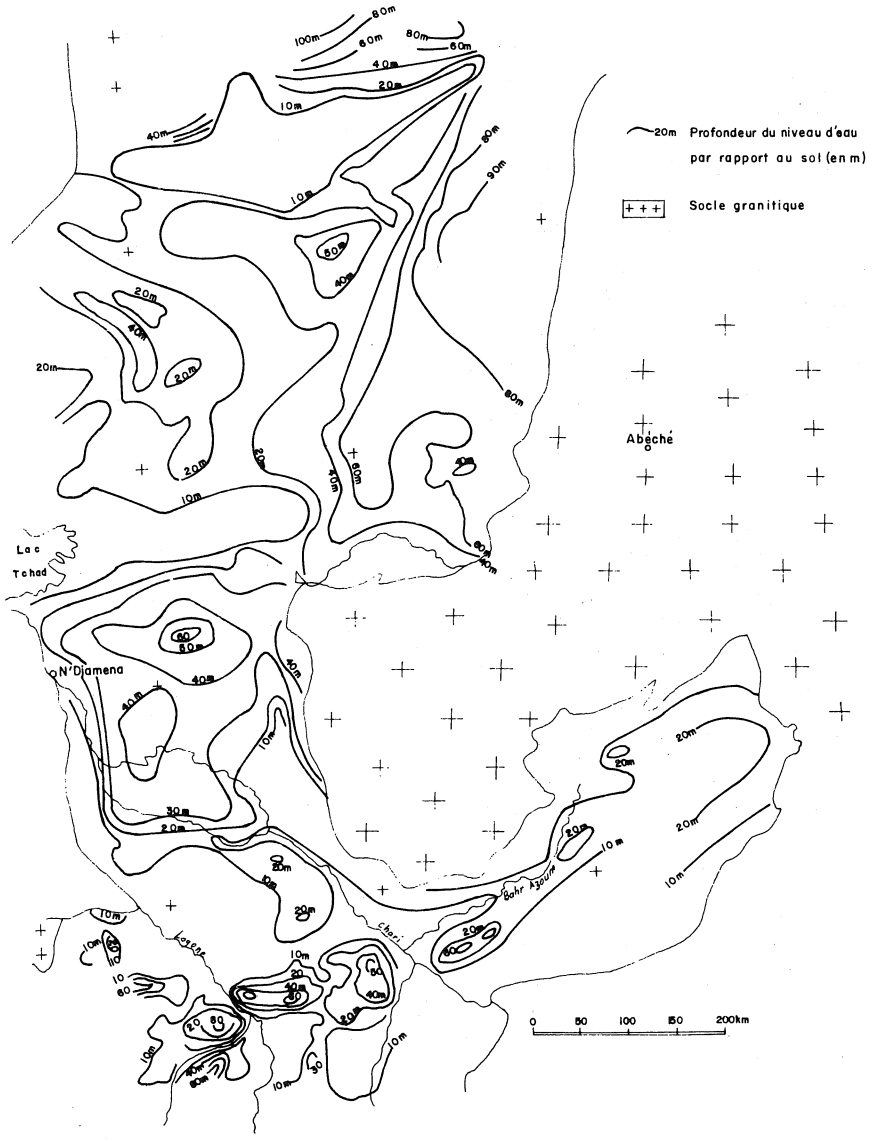
Le bassin sédimentaire occupe 3 450 km^2, soit 6 % de la surface du pays.

Figure 41

ZONE EST DU BASSIN DU LAC TCHAD

SÉRIES DU PLIOQUATERNAIRE ET DU CONTINENTAL TERMINAL

Carte de profondeur de l'eau sous le sol



Il contient plusieurs aquifères superposés, qui sont, du plus ancien au plus récent :
- le Crétacé supérieur (Maestrichtien) sableux
- le Paléocène (aquifère dans les calcaires et marnes sableuses)
- le Continental Terminal
- les sédiments récents, en bordure du littoral.

Le Crétacé supérieur n'affleure pas au Togo. D'après les éléments de la notice [2], il est recoupé par forage à des profondeurs variant entre 75 m et 405 m. La profondeur des forages est inférieure à 160 m sur 13 des 14 forages recensés. Les niveaux statiques sont inférieurs à 50 m dans 9 forages et supérieurs à 50 m dans les 5 autres. Les débits sont de quelques dizaines de m^3/h en général (et sont supérieurs à 100 m^3/h sur deux forages).

Le Paléocène a été bien reconnu à l'Ouest de Lomé. Sur les 8 forages cités [2], les profondeurs varient entre 50 et 300 m. Le niveau statique est généralement inférieur à 50 m. Les débits sont compris entre 15 et 60 m^3/h.

Le Continental Terminal, constitué de sables et argiles rouges, parfois assez mince, recouvre 80 % de la surface du bassin. Sauf exception (forage d'Attitogon 390 m), la nappe peut être captée par des ouvrages de moins de 100 m de profondeur. Le niveau statique est relativement proche du sol : moins de 40 m sur 13 des 14 forages recensés.

Les débits vont de quelques dizaines de m^3/h à 200 m^3/h.

Les dépôts sédimentaires récents s'étalent sur 220 km^2 en bordure de la côte. Ils sont constitués de sables littoraux et d'argiles sur environ 40 mètres d'épaisseur. Un certain nombre d'ouvrages à l'Ouest d'Anécho y prélèvent 2 millions de m^3/an à raison de 5 à 15 m^3/h par ouvrage.

- *Bénin*

Au Bénin, le bassin côtier représente 12 200 km^2, soit un peu moins de 11 % de la superficie du pays. On y retrouve quatre aquifères comme au Togo :

- Le Crétacé supérieur (Maestrichtien) sableux : la superficie connue et exploitable de cet aquifère couvre 6 200 km^2. La productivité y est très bonne et serait de l'ordre de 5 000 m^3/jour par forage sur 70 % de cette surface. Les 22 forages recensés ont une profondeur variant entre moins de 100 m et plus de 600 m et donnent quant à eux 20 à 40 m^3/h ; en ce qui concerne les niveaux statiques, on trouve :

  6 forages artésiens

  8 forages avec un NS inférieur à 30 m

  8 forages avec un NS supérieur à 30 m (1 niveau exceptionnel à 110 m de profondeur).

- Le Paléocène calcaire est moins bien connu, mais recèle probablement des possibilités intéressantes. Les 4 forages cités ont une profondeur de 300 à

Figure 42

BASSIN DU LAC TCHAD

DONNÉES SUR LA NAPPE MOYENNE SOUS PRESSION

DES FORMATIONS DU TCHAD

500 m et leur débit s'étage entre 7 et 75 m^3/h ; celui-ci n'est pas forcément représentatif de la productivité réelle de la formation et serait sans doute meilleur dans des forages acidifiés. Deux des forages sont artésiens ; les autres ont un niveau statique à 44 et 65 m.

– Le Continental Terminal recouvre une grande partie des terrains précédents et affleure sur 6 610 km^2. Ici encore, il est constitué de sables et argiles sableuses. Sur 14 forages recensés, 11 ont une profondeur inférieure à 150 m. Le niveau est artésien dans 4 forages et inférieur à 30 m dans 8 autres.

Les débits sont dans l'ensemble de 10 à 30 m^3/h ; 4 forages ont un débit compris entre 100 et 200 m^3/h.

ANNEXE 10

BIBLIOGRAPHIE

1. HYDROGÉOLOGIE, RESSOURCES EN EAU

[1] BARRERE J. ; SLANSKY M. - 1965
Notice explicative de la carte géologique au 1/2000.000è de l'Afrique Occidentale.
Mémoire BRGM n° 29

[2] BRGM - 1975
Notices explicatives et cartes de planification pour l'exploitation des eaux souterraines de l'Afrique Sahélienne.
Fonds d'Aide et de Coopération de la République Française.

[3] BRGM - 1976
Carte de planification des ressources en eau souterraine. L'Afrique Soudano - Sahélienne. CIEH

[4] BRGM - 1977
Les eaux souterraines du Sahel. Études des ressources. Propositions d'études. Typologie des captages. Club des amis du Sahel.

[5] BOURGEOIS M. (BRGM) - 1979
Carte de planification des ressources en eau de la Côte d'Ivoire, Ghana, Togo, Bénin. CIEH.

[6] BRGM - 1979
Carte de planification des ressources en eau du Cameroun. CIEH.

2. POLITIQUE DE L'ÉQUIPEMENT EN POINTS D'EAU

[7] BURGEAP - 1972
Etude comparative des avantages respectifs des puits et forages dans les régions à substratum cristallin d'Afrique de l'Ouest (CIEH).

[8] BURGEAP - 1978 *
L'équipement des villages en puits et forages en fonction des conditions hydrogéologiques dans les États A.C.P. d'Afrique.
Commission des Communautés Européennes
Direction générale du Développement.

[9] OMS - 1977
Compte-rendu de la conférence de Ouagadougou.
Réunion inter-étatique des responsables gouvernementaux de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement en milieu rural - Déc. 1976.
Groupe de travail Adhoc «Approvisionnement en eau potable et assainissement en milieu rural» des Organisations internationales.

[10] GEOHYDRAULIQUE - 1978
Programme d'hydraulique villageoise dans les États du Conseil de l'Entente - Etude préparatoire au programme. Conseil de l'Entente.

[11] GEOHYDRAULIQUE - 1979
Programme d'hydraulique villageoise et pastorale dans les Etats de la CEAO. Etude préparatoire au programme CEAO.

[12] TAMS - 1978
L'utilisation des ressources en eau et des terres des régions de Savane. CIEH.

3. FORAGES

[13] EDWARD E. JOHNSON, INC. - 1966
Ground water and wells.
A reference book for water well industry (Publié par Crépines Johnson).

[14] MABILLOT Albert - 1971 *
Le forage d'eau.Guide pratique - Édité par Crépines Johnson France S.A. 86 Naintré.

[15] IFP - 1974 *
Le formulaire du foreur - Edition Technip.

[16] KEITH E. ANDERSON - 1979 *
Water well handbook
4th Edition - Revised 1971 by Missouri
water well & pump contractors Assn, Inc PO Box 517,
Belle, MO 65013

[17] DUPUIS Jean - 1979
La technologie des forages d'eau. CTGREF Antony - Mémoire n° 11 - Septembre 1979.

[18] FAISANDIER J. - 1980
Mécanismes hydrauliques
Editions Dunod Technique.

[19] ADOU K. - 1978
Organisation d'une société d'état de forages en Côte d'Ivoire : La Forexi. Communication présentée aux Journées techniques de la neuvième réunion du Conseil du CIEH à Lomé (Togo) CIEH.

[20] CIEH - 1979
Formation des foreurs - Communication présentée par le CIEH à la Réunion de la Commission d'application des recommandations du séminaire de Niamey - Paris 1979 CIEH/CEAO/CEFIGRE.

[21] GÉOLOGIE ET FORAGES D'EAU
Revue de l'Union française des géologues n° 50-51 - Décembre 1979.

4. PUITS

[22] BCEOM - 1969
Techniques Rurales en Afrique, volume 7 - Hydraulique pastorale
Secrétariat d'Etat aux affaires étrangères chargé de la coopération.
Edition Eyrolles.

[23] BURGEAP - 1974 *
La construction des puits en Afrique Tropicale - 2e édition 1980.
Éditions du Ministère de la Coopération et du Développement - Paris.

[24] BURGEAP - RENARDET ENG. 1979 *
Projet de développement des régions cotonnières. Études d'implantation et de surveillance des travaux de 570 points d'eau. R14 Juillet 1979. Min. des travaux publics, des transports, de la construction et de l'urbanisme. Direction centrale de l'Hydraulique. Côte d'Ivoire.

5. MOYENS D'EXHAURE

[25] CIEH - 1977
Les moyens d'exhaure en milieu rural - République du Tchad, Direction de l'élevage et des Industries animales - Banque mondiale.

[26] OMS - 1979
Pompes à main destinées à l'approvisionnement en eau potable dans les pays en voie de développement.
OMS Centre International de référence pour alimentation en eau collective. Doc. technique n° 10 - Octobre 1978.

[27] CIEH - 1981
Hydraulique villageoise et moyens d'exhaure - A. BENAMOUR - Juillet 1981.

ANNEXE 11

LISTE DES CONSTRUCTEURS

ACKER - Voir LINDQUIST

ATLAS COPCO - 326 rue du Général Leclerc, 95130 FRANCONVILLE - Tél. : 413.54.54

BENOTO INTERNATIONAL - 26 rue de la Trémoille, 75008 PARIS

BOMAG - Bohrmaschinen und Geräte GmbH & CO KG. Richard Strauss Str. 14 D 7800 FREIBURG - R.F.A. - Tél. 761/52999 - Telex 925 212

BONNE ESPÉRANCE - (Société Nouvelle de Sondages) : BP. 117 91163 LONGJUMEAU Cedex - Tél. (6) 934.50.02 - Telex 690 415 F

BUCYRUS ERIE - P.O. Box 1000. RACINE. Wisconsin 53405 U.S.A.

CALWELD - (Division of Smith International Inc) P.O. Box 2875 - SANTA FE Springs - California 90670, U.S.A. - Tél. (213)723.08.81 - Telex 657 420

CHICAGO PNEUMATIC - P.O. Box 1225 ENID. Oklahoma 73701 - U.S.A.

COMPAIR FRANCE - 31 rue de la Justice - Z.I. Vaux le Pénil - B.P. 514, 77015 MELUN Cedex - Tél. 437.91.43 - Telex Compair 690 189.

CRAELIUS - B.P. 630, 95004 CERGY PONTOISE Cedex - Tél. 037.47.77 - Telex 697 589.

DUKE & OCKENDEN LTD - River Road - LITTELHAMPTON Sussex BN 17 5 DN ENGLAND - Tél. Littelhampton (09064) 7106 - Telex 87543.

FAILING - Voir LINDQUIST

FLEXIFOAM (Tubages et crépines) - B.P. OUAGADOUGOU - HAUTE VOLTA

FORACO - 14 rue Beffroy, 92200 NEUILLY - Tél. 747.83.01 - Telex 610 439.

GALINET SA - Zone industrielle de Romamet, 87000 LIMOGES.

GARDNER DENYER (FRANCE) S.A.R.L. - Route de Service Est Orly Frêt 743 94399 ORLY Aérogares Cedex - Tél. 687.24.93 - Telex 203 613 F.

HAGUSTA - Voir LE MATÉRIEL DE SONDAGE

HAUSHERR FRANCE - Z.I. rue Guy Mocquet, 95102 ARGENTEUIL - Tél. : 982.09.33 - Telex 696 725 F

HOLMAN - Voir COMPAIR

INGERSOLL RAND - 5-7 Av. A. Einstein - B.P. 113, 78190 TRAPPES - Tél.: 050.61.10 - Telex 696 291/696 292

INTERNATIONAL-FORAGE - 5 Bd Notre Dame 13006 MARSEILLE - Tél. : (42) 89.19.44 et (91) 33.23.67

JOHNSON (filtres crépines), 86530 NAINTRÉ - Tél. (49) 90.06.73 - Télex 791 124

LINDQUIST INTERNATIONAL S.A. - 60, rue Richelieu, 75009 PARIS - Tél. : 261.84.55 - Telex 210 569 Oloslin.

LONGYEAR FRANCE S.A. - 20 Av. Vladimir Komarov, 78191 Z.I. B.P. 1 - TRAPPES Cedex - Tél. 051.61.17 - Telex 698 288 Longfran.

LE MATÉRIEL DE SONDAGE - 24 rue Charles Fillion, 75017 PARIS - Tél. : 627.36.35

MISSION - Voir HAUSHERR

MOBILE DRILL INTERNATIONAL INC - 3807 Madison Av. Indianapolis - INDIANA 46227 - U.S.A. Telex 2 7352

NORDMEYER - Voir RABANAP

PB - Voir RABANAP

PORTADRILL - Voir LONGYEAR

RABANAP HUDIG FRANCE - 44 rue du Général Leclerc Ballainvilliers, 91160 LONGJUMEAU - Tél. 909.34.50 - Telex 690 658

SALZGITTER MASCHINEN UND ANLAGEN AG - Windmühlenbergstrasse 20 - 22 SALZGITTER BAD R.F.A. - Tél. (05341) 302-1 - Telex 954 445 Smag d

SBF PREUSSAG - Voir TUBAFOR

SECMI - (Société Escovienne de Construction Mécanique et Industrielle) 27440 ECOUIS

SMF (usine) Creusot Loire, Division Matériels de forage, B.P. 19, 65001 TARBES.

SN MAREP - 28 Bd de Grenelle, 75015 PARIS.

SPEC - Zone industrielle B.P. 101, rue Guy Mocquet, 95102 ARGENTEUIL.

STENUICK FRANCE - Bd Marie Stuart, B.P. 2803, 45028 ORLÉANS - Tél. : (38) 86.50.46 - Telex 760 895.

SULLAIR - 40 rue de la République, 78920 ECQUEVILLY - Tél. (1) 475.55.40 Telex 696 622

TEKNIFOR - 87 rue Taitbout, 75009 PARIS - Tél. 285.24.87

TUBAFOR - B.P. 96, 59393 WATTRELOS Cedex - Tél. (20) 26.24.32 - Telex 160 620 F

UMDI - Domine, 86530 NAINTRÉ - Tél. (49) 90.03.01 - Telex 790 183

WABCO - Voir LINDQUIST

WALKER NEER - Voir LINDQUIST.

Achevé d'imprimer
sur les presses de **sofiac**paris
8, rue de Furstenberg, 75006 Paris
Dépôt légal n° 5904 – Septembre 1983
Imprimé en France