

09039

COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES
(CIEH)
BP 369 OUAGADOUGOU BURKINA FASO



**ETUDE DU VIEILLISSEMENT DES FORAGES
D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE ET SEMI-URBAINE
EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN**

Financement
Fonds d'aide et de Coopération
de la République Française
Convention FAC 193/C/88/TTE

Janvier 1991

BURGEAP
70, rue Mademoiselle
75015-PARIS

CIEH
01 BP 369
OUAGADOUGOU 01

AVERTISSEMENT

"Le CIEH se réserve le droit d'usage de ce document. Toute reproduction, même partielle, de ce document, fera l'objet d'une autorisation préalable par le CIEH".

SOMMAIRE

Avant Propos

1. METHODOLOGIE DE L'ETUDE	2
2. ANALYSE DES DONNEES DES FORAGES DU BURKINA FASO, DE COTE D'IVOIRE ET DU MALI	3
2.1. Nombre et localisation des forages sélectionnés	3
2.2. Validité des données recueillies	3
2.3. Caractéristiques techniques et équipement des forages	4
2.4. Caractéristiques hydrogéologiques des formations et niveaux captés par les forages .	5
2.5. Détermination du débit d'exploitation	6
2.6. Analyse de l'exploitation et des problèmes rencontrés	7
2.6.1. Burkina Faso	7
2.6.1.1. Evolution des prélèvements	
2.6.1.2. Exploitation des forages	
2.6.1.3. Problèmes rencontrés	
2.6.2. Côte d'Ivoire	12
2.6.2.1. Exploitation des forages et évolution des prélèvements	
2.6.2.2. Problèmes rencontrés	
2.6.3. Mali	12
2.6.3.1. Exploitation des forages et prélèvements	
2.6.3.2. Problèmes rencontrés	

3. ETUDE DE CAS AU BURKINA FASO : POMPAGES D'ESSAI, DIAGNOSTIC TELEVISE ET REHABILITATION DE FORAGES DANS LES CENTRES URBAINS DE FADA N'GOURMA, KOUPELA ET KAYA	14
3.1. Présentation des sites de Koupela et Fada N'Gourma .	14
3.1.1. Koupela	14
3.1.1.1. Nombre et répartition des forages	
3.1.1.2. Caractéristiques des forages	
3.1.2. Fada N'Gourma	16
3.1.2.1. Nombre et répartition des forages	
3.1.2.2. Caractéristiques des forages	
3.1.3. Remarques sur l'équipement des forages	19
3.1.4. Remarques sur les essais de débit à l'origine	19
3.1.5. Evaluation de l'interinfluence des forages sur les zones de captage	21
3.2. Appréciation du degré de vieillissement des forages.	23
3.2.1. Méthodes	23
3.2.1.1. Comparaison des caractéristiques actuelles des forages par rapport à l'origine	
3.2.1.2. Observation des crépines par inspection télévisée	
3.2.1.3. Essais de pompage de longue durée	
3.2.2. Facteurs pouvant être à l'origine d'un colmatage	30
3.2.2.1. Nature de l'eau	
3.2.2.2. Vitesses d'entrée de l'eau dans les crépines	
3.2.2.3. Dénoyage des niveaux aquifères	
3.3. Expériences de réhabilitation par traitements physico-chimiques	34
3.3.1. Les procédures	34
3.3.2. Les résultats	35
3.3.2.1. Forage F6 de Koupela	
3.3.2.2. Forage F10 de Fada N'Gourma	
3.4. Conclusions sur les forages de Koupela et Fada N'Gourma	41
4. CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS	43
4.1. Conclusions	43
4.2. Recommandations	44
4.2.1. Réalisation et équipement des forages	44
4.2.2. Détermination des conditions d'exploitation .	46
4.2.3. Surveillance de l'exploitation	47

LISTE DES PLANCHES

Planche 1 :

Situation des forages de Koupela et de Fada N'Gourma

Planche 2 :

Courbes caractéristiques du forage F6 de Koupela avant et après les traitements

Planche 3 :

Courbes caractéristiques du forage F10 de Fada N'Gourma avant et après le traitement de decolmatage

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :

Évolution des prélèvements sur les forages des centres secondaires du Burkina Faso

Tableau 2 :

Burkina Faso :

Volumes moyens journaliers prélevés par forage dans les zones de captage et nombre de forages exploités

Tableau 3 :

Principales caractéristiques à l'origine des forages de Koupela

Tableau 4 :

Principales caractéristiques à l'origine des forages de Fada N'Gourma

Tableau 5 :

Débit d'exploitation des forages

Tableau 6 :

Comparaison des résultats des essais par paliers à l'origine et en avril 1990

Tableau 7 :

Résultats des essais par paliers normalisés type CIEH-Burgeap

Tableau 8 :

Résultats des analyses de l'eau

Tableau 9 :

Évolution du débit spécifique après les traitements sur le forage F6 Koupela

Tableau 10 :

Évolution du débit spécifique après le traitement au Wessoclean sur le forage F10 de Fada N'Gourma

LISTE DES ANNEXES
(Les annexes 3 à 9 sont spécifiques aux forages
du Burkina Faso)

Annexe 1 :

Modèles de fiches de renseignements sur forages et zones de captage

Annexe 2 :

Tableaux récapitulatifs des données recueillies et tableaux des principales caractéristiques techniques des forages du Burkina Faso, de Côte d'Ivoire et du Mali

Annexe 3 :

Situation pluviométrique de la période depuis le début de l'exploitation des forages au Burkina Faso

Annexe 4 :

Courbes caractéristiques à l'origine et en avril 1990 des forages testés

Annexe 5 :

Coupe des forages testés

Annexe 6 :

Spécifications du matériel mis en œuvre pour les essais de pompage, les diagnostics télévisés et les expériences de réhabilitation

Annexe 7 :

Compte rendu des diagnostics télévisés

Annexe 8 :

Compte rendu des expériences de réhabilitation réalisées sur F6 (Koupela) et F10 (Fada N'Gourma)

Annexe 9 :

Courbes d'évolution des niveaux pendant les pompages de 24 heures de juin 1990 sur les forages F3 et F6 de Koupela

AVANT PROPOS

Depuis 10 ans les Etats membres du CIEH se sont engagés dans une politique d'équipement hydraulique, par forages, des villages et des centres secondaires extrêmement importante.

Or les caractéristiques hydrauliques des forages se dégradent avec le temps; et l'on parle de vieillissement des forages, et leur remplacement est inéluctable à terme.

Il importe donc d'évaluer la durée de vie de ces équipements pour prévoir la périodicité et leur renouvellement ou l'intérêt de la réhabilitation de certains d'entre eux.

L'objectif de l'étude du vieillissement des forages, qui se décompose en deux phases, l'une pour les forages dans le socle cristallin et l'autre pour ceux dans les formations sédimentaires, est de mettre à la disposition des responsables dans les Etats, des éléments leur permettant de déterminer une durée de vie économiquement acceptable pour les forages et d'introduire dans les prévisions la notion de leur amortissement.

Pour chaque phase elle consiste à connaître la vitesse du vieillissement des forages, à en rechercher les causes et à identifier les mesures d'entretien et de réhabilitation possibles.

Pour cela, elle comporte :

- le recueil et l'analyse des données sur des forages ayant présenté une chute de débit d'exploitation conduisant généralement à un abandon de l'ouvrage au Burkina, Mali et Côte d'Ivoire. Cette phase a été réalisée grâce à la participation active des administrations nationales.
- des essais de débit sur des forages sélectionnés au Burkina pour connaître les caractéristiques actuelles des forages et les comparer à l'origine,
- une expérience de réhabilitation sur des forages sélectionnés au Burkina.

La présente étude concerne le vieillissement des forages dans le socle cristallin et a été financée par le Fonds d'Aide et de Coopération de la République Française.

L'étude a été rédigée par M. J.C.MOREL du BURGEAP et supervisée par M. J.C.PRAT du BURGEAP et M. C.DILUCA du CIEH.

avec la participation de la Direction Régionale n°4 de l'ONEA du BURKINA : MM. ILBOUDO Joseph et SAN SONNE Jean Désiré et de l'entreprise FORAFRIQUE.

1. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

Le CIEH a adressé aux Etats membres une lettre les informant de l'étude du vieillissement des forages dans le socle cristallin, et une note de présentation décrivant les objectifs, le déroulement et les intervenants de l'étude. Il a également adressé les fiches de renseignements présentées en annexe 1.

Ces fiches, remplies par les services concernés de chaque Etat, ont permis de rassembler les données et d'identifier les forages considérés comme "vieillis" dans les différents pays.

Elles ont été ensuite recueillies sur place et complétées avec la participation des responsables nationaux par des agents du CIEH lors de missions au Burkina Faso en Côte d'Ivoire et au Mali.

Après le dépouillement et l'analyse des données recueillies sur les forages présentés comme "vieillis", les forages de Fada N'Gourma et de Koupela au Burkina Faso ont été retenus pour étudier l'importance et les causes du vieillissement par des essais de débit et des diagnostics télévisés et pour réaliser des tests de réhabilitation par des traitements mécaniques et physico-chimiques.

Le choix de 3 forages à Koupela et de 2 forages à Fada N'Gourma a été fait en fonction du planning d'intervention et des contraintes d'exploitation de l'ONEA.

2. ANALYSE DES DONNEES DES FORAGES DU BURKINA FASO, DE COTE D'IVOIRE ET DU MALI

2.1. Nombre et localisation des forages sélectionnés

Les forages sélectionnés par les 3 pays concernent :

- Au Burkina Faso, 34 forages d'alimentation en eau potable des centres de Fada N'Gourma, Koupela, Kombissiri, Po et Tenkodogo. Les forages sont le plus souvent regroupés sur des zones de captage de 2 à 9 forages qui peuvent s'influencer. Tous les centres se trouvent dans la partie centre-sud du pays,
- En Côte d'Ivoire, 13 forages d'alimentation en eau potable de 10 centres secondaires qui sont : Tafiré dans le nord du pays, Blankouma dans la région de Man à l'est, Sassandra sur la côte à l'ouest et Ayamé, Azaguié, Bettié, Krinjabo, Lopou, Maferé et Sikensi, tous les 7 dans la partie sud-est du pays,
- Au Mali, 11 forages d'hydraulique villageoise équipés de pompes à motricité humaine et se trouvant dans le sud du pays.

Pour ces deux pays il s'agit de forages isolés.

2.2. Validité des données recueillies

La "fiche de renseignement sur forage d'exploitation" indique presque toujours la coupe géologique, la profondeur des venues d'eau, des résultats d'essais de pompage à l'origine, l'équipement de l'ouvrage et son exploitation.

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau sont rarement précisées.

Les deux "fiches de renseignements sur site d'exploitation" fournissent des explications surtout dans la partie "Descriptif des problèmes rencontrés".

Des coupes géologiques, des courbes d'essais de débit et le plan d'implantation ont également été joints aux fiches de renseignements.

L'échantillon de forages au Burkina Faso est le plus grand. Les renseignements sur ces ouvrages ont aussi les plus détaillés ; ainsi dans l'analyse qui suit ils sont plus développés que les forages de Côte d'Ivoire et du Mali.

2.3. Caractéristiques techniques et équipement des forages

Les caractéristiques techniques fournies sur l'équipement des forages sont présentés en annexe 2.

Au Burkina Faso, les forages ont été exécutés par différents organismes et entreprises, mais leur équipement est assez semblable. Il est constitué le plus souvent par un tubage PVC de diamètre 4"1/2, parfois 6", mis en place sur toute la hauteur. Seulement sur 2 forages sur 34 le trou a été laissé nu en face du socle, seules les altérites étant tubées. L'ouverture des fentes des crépines n'est pas précisée, celle-ci doit être de 1 ou 2 mm.

L'espace annulaire est comblé avec du gravier constitué par du granite concassé de 3 à 8 mm.

Il faut signaler que les techniques d'exécution et d'équipement de ces forages exploités à forts débits avec des pompes motorisées, sont tout à fait semblables à celles des forages d'hydraulique villageoise équipés de pompe à motricité humaine.

En Côte d'Ivoire, sur 10 forages pour un total de 13, le trou a été laissé nu en face du socle. L'équipement comprend un tubage PVC de 7" généralement, mis en place en face de l'altération et ancré au sommet ou dans le socle au moyen d'un ou plusieurs packers qui doivent assurer l'étanchéité vis à vis des terrains bouillants de l'altération.

Comme au Burkina Faso, ces forages sont exploités avec des pompes motorisées pour l'alimentation de centres secondaires, aussi ce type d'équipement qui ne présente pas toutes les garanties de sécurité, semble mal adapté.

Au Mali, sur 8 forages sur 11, le trou est laissé nu en face du socle comme en Côte d'Ivoire mais le tubage PVC en face de l'altération repose au sommet du socle sur une réduction du diamètre du forage dans le socle par rapport à celui dans les altérites. Là aussi, pour éviter un ensablement du forage par les produits de l'altération, il faut que l'étanchéité à la base du tubage soit parfaite et celle-ci est difficile à réaliser sans une cimentation du pied du tubage.

2.4. Caractéristiques hydrogéologiques des formations et niveaux captés par les forages

L'étude concernant les forages du socle cristallin, les formations géologiques dans lesquelles les forages captent la nappe sont constituées de roches granito-gneissiques et schisteuses du socle précambrien.

Selon la nature de ces roches, les forages sélectionnés se répartissent de la manière suivante :

	Granite	Schistes	Grès
BURKINA	34	-	-
COTE D'IVOIRE	10	3	-
MALI	7	3	1
TOTAL	51	6	1

Une très forte proportion des forages se trouve donc dans les granites.

Lorsque ces roches sont saines, la nappe est confinée dans des fissures dont l'extension est généralement inconnue et qui peut être limitée. Elle se trouve aussi dans l'altération qui recouvre ces roches, mais celle-ci est souvent trop argileuse pour fournir de bons débits et être captée en forage sans problèmes. Cependant, lorsqu'elle est gorgée d'eau, elle constitue une réserve qui réalimente la nappe des fissures sous-jacentes d'où son intérêt.

Sur les forages considérés, l'épaisseur des altérites généralement supérieure à 10 mètres varie de plusieurs dizaines de mètres.

Sur les granites, elle est de :

- 14 m à plus de 30 mètres sur les forages du Burkina Faso,
- 12 m à 40 mètres sur ceux de Côte d'Ivoire, exceptée une épaisseur de 5 mètres à Biankouma,
- 17 m à 33 mètres sur ceux du Mali.

Sur les schistes elle est de 15 à 48 mètres en Côte d'Ivoire et de 24 à 45 mètres au Mali.

Compte tenu de son épaisseur importante, l'altération était aquifère lors de la création des ouvrages sur presque les 3/4 des forages au Burkina Faso (71 %) sur les 2/3 en Côte d'Ivoire (64 %) et sur tous au Mali excepté sur celui captant les grès (Bangolosso).

Les niveaux captés par les forages se répartissent de la manière suivante :

	Socle	Socle + altérites	Altérites
BURKINA	57 % (17)	30 % (9)	13 % (4)
COTE D'IVOIRE	91 % (10)	9 % (1)	-
MALI	27 % (3)	55 % (6)	18 % (2)
TOTAL	60 % (31)	23 % (12)	17 % (9)

Les altérites ne sont pratiquement jamais captées sur les forages de Côte d'Ivoire, mais l'altération est captée seule ou avec le socle sur un peu moins d'un forage sur 2 au Burkina Faso et sur les 3/4 des forages au Mali.

2.5. Détermination du débit d'exploitation

Les essais de pompage à la réception des ouvrages, dont le but est de déterminer le débit d'exploitation des forages, ont été très simples et notamment lorsqu'il s'agissait de forages destinés à l'alimentation en eau de centres secondaires.

Au Burkina Faso, les essais ont comporté un pompage avec des paliers de débits croissants non enchainés de durée d'une demie heure à une heure puis un pompage à débit constant pendant 8 à 10 heures et parfois 1 jour.

A Po et Tenkodogo sur quelques forages, la durée des paliers a été de 12 heures.

Au cours de ces essais, les crépines, sur les forages captant l'altération, et les venues d'eau dans le socle ont été très souvent dénoyées (cf paragraphe 3.1.4.).

En Côte d'Ivoire, les essais ont consisté en une succession de 2 à 4 paliers enchaînés de débits croissants et de 1 heure à 12 heures de durée chacun.

Au Mali, les quelques données sur les essais indiquent un unique palier de débit de 16 heures.

Le débit d'exploitation déterminé à partir de ces essais, n'est, excepté au Burkina Faso, pas indiqué. Il est probable qu'il a été le plus souvent assimilé au débit maximum du pompage d'essai, sans prendre en compte les variations saisonnières du niveau de la nappe, ainsi que le fait la méthode CIEH-BURGEAP d'interprétation des essais de débit simplifiés sur forages d'hydraulique villageoise (1)

Lorsqu'il y a eu des essais de débit constant pendant une dizaine d'heures, cette durée est insuffisante pour mettre en évidence des phénomènes dus à la présence de limites dans l'aquifère fissuré.

Les quelques essais de 24 heures ont été mal conduits et n'ont pas été exploités pour préciser le débit d'exploitation déterminé à partir de la courbe caractéristique des forages.

2.6. Analyse de l'exploitation et des problèmes rencontrés

2.6.1. Burkina Faso

2.6.1.1. Evolution des prélèvements

Les volumes totaux annuels prélevés depuis le début de l'exploitation sont récapitulés dans le tableau 1.

Entre 1982 et 1988 ceux-ci ont été multipliés par :

- 3,7 à Fada N'Gourma,
- 2 à 2,5 à Tenkodogo et Po,
- de l'ordre de 1,6 à Koupela.

avec un nombre de forages en 1988 peu différent de celui de 1982. Le volume moyen journalier exploité par forage a été approximativement multiplié par 2.

(1) Voir plaquette essais de débit simplifiés sur forages d'hydraulique villageoise. Normalisation des modalités d'exécution et des méthodes d'interprétation. CIEH-BURGEAP 1987.

Dans le même temps on peut penser que l'alimentation des nappes diminuait. En effet, pendant cette période de 7 ans la pluviométrie de 4 années a été déficitaire, par rapport à la moyenne de 1980 à 1989, de 1983 à 1985 à Koupela et en 1983, 1984 et 1986 et 1987 à Fada N'Gourma (cf. Annexe 3).

Une analyse des volumes prélevés sur les zones de captage, comprenant plusieurs forages relativement proches, montre que le volume journalier moyen prélevé sur les forages de ces zones est indépendant du nombre des forages exploités (tableau 2).

A Fada N'Gourma et Tenkodogo il augmente depuis 1982. A Koupela et à Po il est sensiblement identique à ce qu'il était à l'origine.

Le nombre des forages exploités est identique ou inférieur à ce qu'il était au début des exploitations.

La diminution du débit de certains forages dans ces zones pourrait résulter de l'influence des pompages voisins.

A Kombissiri, les données ne concernent qu'une partie de l'année 1988 et l'année 1989 et l'on note entre ces deux périodes que le volume journalier prélevé sur les trois forages a plus que doublé (multiplié par 2,3) (annexe 2).

2.6.1-2. Exploitation des forages

A Koupela les forages de la zone de captage n°1 ont été exploités pendant 5 à 6 ans (annexe 2). Les volumes journaliers prélevés à la fin de l'exploitation ne peuvent être comparés à ceux à l'origine qui ne sont pas connus, mais le débit horaire semble avoir chuté après 3 à 5 ans de pompage, selon les forages. Les forages de la zone de captage n°2 sont exploités depuis plus de 6 ans, le débit exploité ayant diminué après 2 ans sur le forage F5. Sur le forage F4 le volume journalier prélevé est un peu plus de la moitié du volume prélevé au début de l'exploitation. Le forage F6 a été exploité seulement pendant 1 an et demi et son débit horaire a chuté de moitié au cours de la première année de l'exploitation.

A Fada N'Gourma les premiers forages de la zone de captage n°1 ont été abandonnés après 2 à 3 ans d'exploitation, 5 ans pour F3. Les 3 forages encore exploités le sont depuis plus de 5 ans, avec des débits journaliers de 70 % à 100 % de ce qu'ils étaient à l'origine.

Les deux ouvrages éloignés de la zone de captage sont exploités depuis 4 et 2 ans. Sur le forage F11, le débit a diminué après 3 années d'exploitation, le débit journalier est actuellement de 30 % de celui à l'origine.

A Po, sur la zone de captage n° 1, les deux forages abandonnés ont été exploités pendant 4 ans. Les 3 forages qui sont encore exploités le sont depuis 4 et 6 ans. Sur le forage F2, le débit est moitié de celui à l'origine. Sur les forages F3 et F5, le débit est le même qu'au début de l'exploitation.

Sur la zone de captage n° 2, sur laquelle un seul forage est actuellement exploité, les données ne permettent pas de faire de remarques.

A Tenkodogo, sur la zone de captage N° 1, les deux premiers forages ont été abandonnés après 4,5 et 5 ans d'exploitation, les 3 autres ouvrages sont en exploitation depuis 7 ans. Au forage F3, le débit est la moitié de celui à l'origine. Sur les forages F4 et F5, le débit horaire est inférieur à celui du début de l'exploitation, mais le volume journalier prélevé est supérieur ou du même ordre de grandeur.

A Kombissiri, 2 forages sont exploités depuis 16 mois à des débits supérieurs à ceux des essais de pompage, l'exploitation d'un troisième ouvrage qui captait en partie l'altération a été arrêtée après 15 mois.

2.6.1.3. Problèmes rencontrés

Les éléments fournis ne permettent pas de préciser la cause de la chute du débit de certains forages.

Celle-ci peut résulter :

- d'un colmatage des crépines et du massif de gravier par des éléments de l'altération ou par un développement de concrétions d'origine chimique ou bactériologique,
- d'une surexploitation de la nappe dans le secteur à la suite de la multiplication des ouvrages dans la zone de captage et en liaison avec la diminution de la pluviométrie.

La comparaison de la caractéristique actuelle de ces forages avec celle à l'origine, doit permettre d'appréhender l'un ou l'autre de ces phénomènes.

TABEAU N°1 : EVOLUTION DES PRELEVEMENTS GLOBAUX ET RAPPORTES AU NOMBRE DE FORAGES EXPLOITES

		1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Fada N° Gourna	Volumes prélevés en m ³		30300	27800	82500	103800	109700	101700	111650	93800 (9m) 125070 ex- trapolé
	Nombre de forages exploités		4	4	8	8	7	6	5	5
	Débit moyen journalier par forage m ³ /j		21	19	28	36	43	46	61	68
	Pluviométrie (moyenne 790 mm)	785 + 7,5 %	790 + 8 %	668 - 8,5 %	647 - 11 %	766 + 5 %	612 - 18 %	646 - 11,5 %	765 + 5 %	889 + 22 %
Koupela	Volumes prélevés en m ³	43779	64000	39900	54200	91700	84638	71100	65800	74319 (10m) 89185 ex- trapolé
	Nombre de forages exploités	2	2	3	5	5	5	5	3	4,5
	Débit moyen journalier par forage m ³ /j	60	68	36	30	50	46	39	60	54
	Pluviométrie (moyenne 679 mm)	675 - 0,5 %	574 - 15,5 %	634 - 7 %	523 - 23 %	525 - 23 %	777 + 14 %	761 + 12 %	788 + 16 %	854 + 26 %
Po	Volumes prélevés en m ³	22927	36100	43800	55500	65800	72982	75369	91131	115116 extrapolé
	Nombre de forages exploités	2	2	2	4	4	4	4	3	3,5
	Débit moyen journalier par forage m ³ /j	31	49	60	38	45	50	52	83	90
	Pluviométrie					796	1093	900	850	1065
Tenkodogo	Volumes prélevés en m ³		62600	95000	115600	120677	121950	128774	135347	148222 extrapolé
	Nombre de forages exploités		3	5	5	5	4	3	3,5	4
	Débit moyen journalier par forage m ³ /j		57	52	63	66	83	118	106	102
	Pluviométrie	797	890	790	472	654	664	>504	911	

TABEAU 2 : VOLUMES MOYENS JOURNALIERS PRELEVES PAR FORAGES DANS LES ZONES DE CAPTAGE ET NOMBRE DE FORAGES EXPLOITES

Années	Fada N'Gourma		Koupela		Po		Tenkodogo	
	Volume moyen par forage m ³ /j	Nombre de forages exploités	Volume moyen par forage m ³ /j	Nombre de forages exploités	Volume moyen par forage m ³ /j	Nombre de forages exploités	Volume moyen par forage m ³ /j	Nombre de forage exploités
1981					32	2		
1982	21	4	46	2	50	2	57	3
1983	19	4	36	3	60	2	52	5
1984	28	8			38	4	63	5
1985	41	7			45	4	66	5
1986	39	6	30	3	50	4	83	4
1987	47	4	21	3	27	4	89	3
1988	39	3			59	2	89	3
1989	54	3	32	1	52	3	97	3

2.6.2. Côte d'Ivoire

2.6.2.1. Exploitation des forages et évolution des prélèvements

Dans les différents centres sélectionnés, les forages sont en exploitation depuis 4 à 6 ans. A Ayamé, le forage F1 a été abandonné après avoir été exploité 5 ans.

Les volumes journaliers exploités sont en diminution pour l'année 1989 par rapport aux années précédentes à Ayamé et Biankouma. Ailleurs, ils sont identiques ou supérieurs. Mais l'on note une augmentation du temps de pompage en liaison avec une chute du débit horaire.

2.6.2.2. Problèmes rencontrés

Sur 5 forages, des venues de boue sont mentionnées en saison sèche.

L'équipement de 4 de ces forages est constitué par un tubage PVC uniquement en face de l'altération et ancré dans le socle au moyen de packers.

L'étanchéité des packers est vraisemblablement défectueuse et des venues de boue apparaissent lorsque la nappe est rabattue à ce niveau et en-dessous en saison sèche.

Sur le 4ème ouvrage, 5 mètres de crépines sont placés en face de l'altération argileuse qui n'est certainement pas isolée du forage par un massif de gravier filtrant approprié d'où les venues de boue.

A Biankouma, la chute du débit des forages peut s'expliquer par l'aquifère limité dans les fissures du granite avec une altération peu épaisse (5 mètres) et dénoyée.

2.6.3. Mali

2.6.3.1. Exploitation des forages et prélèvements

Il s'agit d'ouvrages d'hydraulique villageoise réalisés entre 1982 et 1987 et exploités à 10 ou 20 m³/j avec des pompes à motricité humaine.

2.6.3.2. Problèmes rencontrés

Un comblement, de plusieurs mètres du fond des forages, par de l'argile et du sable, est mentionné pour 10 forages sur 11.

Ces produits viennent de l'altération et signifient que l'équipement de ces forages est mal adapté ou défectueux.

Sur 8 forages, les crépines sont placées en face de l'altération et sur 7 forages le tubage PVC dans l'altération s'arrête au sommet du socle à la faveur d'une réduction du diamètre du forage.

~~L'étanchéité à la base de ce tubage n'est certainement pas bonne.~~

Pour ces forages, le "vieillissement" provient d'une mauvaise exécution.

3. ETUDE DE CAS AU BURKINA FASO : POMPAGES D'ESSAIS, DIAGNOSTIC TELEVISE ET REHABILITATION DE FORAGES DANS LES CENTRES URBAINS DE FADA N'GOURMA, KOUPELA ET KAYA

La présente étude de cas a été rendue possible grâce à une participation active de l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) par le biais de sa Direction Régionale n°4 (Koupela). L'ONEA a mis à disposition toute la documentation disponible sur les caractéristiques des ouvrages et les données d'exploitation et a participé aux travaux sur les terrain.

3.1. Présentation des sites de Koupela et Fada N'Gourma

3.1.1. Koupela

3.1.1.1. Nombre et répartition des forages

Les forages pour l'alimentation en eau de la ville de Koupela sont répartis sur 3 zones de captage situées au sud de la ville de part et d'autre de la route vers Tenkodogo (cf Planche 1). Les caractéristiques de ces zones de captage sont les suivantes :

- Zone de captage n°1

Elle comprend 3 forages F1, F2, F3 équidistants de 300 à 500 mètres. Seul le forage F1 dont l'exploitation avait été arrêtée en février 1988 puis reprise un an après est actuellement exploité sur cette zone de captage.

- Zone de captage n°2

Elle se trouve à 3 km au sud de la précédente. Elle comprend 2 forages, F4 et F5, distants de 200 mètres. Les deux ouvrages sont en exploitation mais seulement 1 jour par semaine pour le forage F5.

- Zone de captage n°3

Elle se trouve à l'est de la route à 1 km au sud-est de la zone de captage n°1 et à 2,5 km au nord de la zone de captage n°2. Elle comprend 2 forages F6 et F7 distants de 600 mètres. Seul le forage F7 est en exploitation.

3.1.1.2. Caractéristiques des forages

Les données à l'origine connues pour les forages sont reportées dans le tableau 3 ci-après et en annexe 2.

- Profondeur de la nappe

Dans la zone de captage n°1 le niveau de la nappe semble avoir baissé de 7 mètres entre 1977 et 1981, vraisemblablement en liaison avec la baisse de la pluviométrie (cf. annexe 3) ; puis à nouveau de 10 mètres de 1981 à 1983 probablement sous l'influence des pompages F1 et F2 à partir de 1982. En août 1983 il se trouvait vers 21 mètres de profondeur au forage F3.

TABLEAU N°3 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES A L'ORIGINE DES FORAGES DE KOUPELA

Forage	Prof.	Epaisseur altérat.	Niveau statique (datv)	Hauteur altérites noyées	Profondeur NS sous contact alt/socle	Hauteur crépinée et (%)	Sommet crépi. sous NS	AE Princ. sous NS	Débit m ³ /h				
									Fin forage m ³ /h	Essais (durée) m ³ /h	Q/S m ³ /h/m	Q exploit. m ³ /h (1)	
F1	54	15	4,3 (11.77)	10,7									
F2	56	18	11 (81)	7		12 (21 %)	38		7,5				
F3	56	18	20,7 (06.83)		2,7	29 (52 %)	6,3	22,3	5,1	4,5 (1/2h)	0,47	4,5	
F4	50	18	11,2 (11.83)	6,8		24 (48 %)	14,8	15,3	12	10,3 (8h)	1,35	8	
F5	44	10	13,7 (11.83)		3,7	12 (27 %)	18,3	24,8	18	12 (8h)	1,3	8	
F6	63,5	20,5	8,6 (09.87)	11,9		40,8 (64.5 %)	5,1	6,4	14	9 (8h) 7,2(48h)	0,54 0,44	8	
F7	58	30	10,2 (03.88)	18,8		38 (68 %)	5,8	7,8	27	29 (8h) 29 (38h)	3,2 2,64	12	

(1) Débit exploitable indiqué par bureau d'étude ayant surveillé les travaux ; 12 heures par jour vraisemblablement

Cette baisse de la nappe a entraîné le dénoyage de l'altération entre 1981 et 1983.

Sur la zone de captage n°2 la nappe se trouve entre 11 et 14 mètres de profondeur en 1983.

Sur la zone de captage n°3 elle se situe aux environs de 10 mètres de profondeur en 1987 et 1988.

- Niveaux captés

Les forages de la zone de captage n°3 où l'altération est la plus épaisse captent les altérites et le socle.

Dans les deux autres zones de captage, les forages captent uniquement des fissures du socle.

Le forage F5 capte une seule fissure profonde dans laquelle la nappe est captive.

- Débits

Les débits obtenus en fin de forage sont supérieurs à 10 m³/h sauf sur F2 (7,5 m³/h) et sur F3 (5,1 m³/h).

Aux essais de débit, le débit spécifique calculé après 8 heures de pompage est égal à :

- 0,5 m³/h/m au forage F6 pour un débit de 9 m³/h,
- 1,3 m³/h/m aux forages F4 et F5 pour des débits de 10 et 12 m³/h,
- 3,2 m³/h/m au forage F7 pour un débit de 29 m³/h.

Au forage F3 le débit spécifique est inférieur à 0,5 m³/h/m après 1/2 heure de pompage à un débit de 4,5 m³/h.

3.1.2. Fada N'Gourma

3.1.2.1. Nombre et répartition des forages

L'alimentation en eau de la ville de Fada N'Gourma se fait à partir de 1 zone de captage située dans la partie sud de la ville, et de deux forages isolés au nord et à l'est de cette zone de captage (planche 1).

La répartition des forages est la suivante :

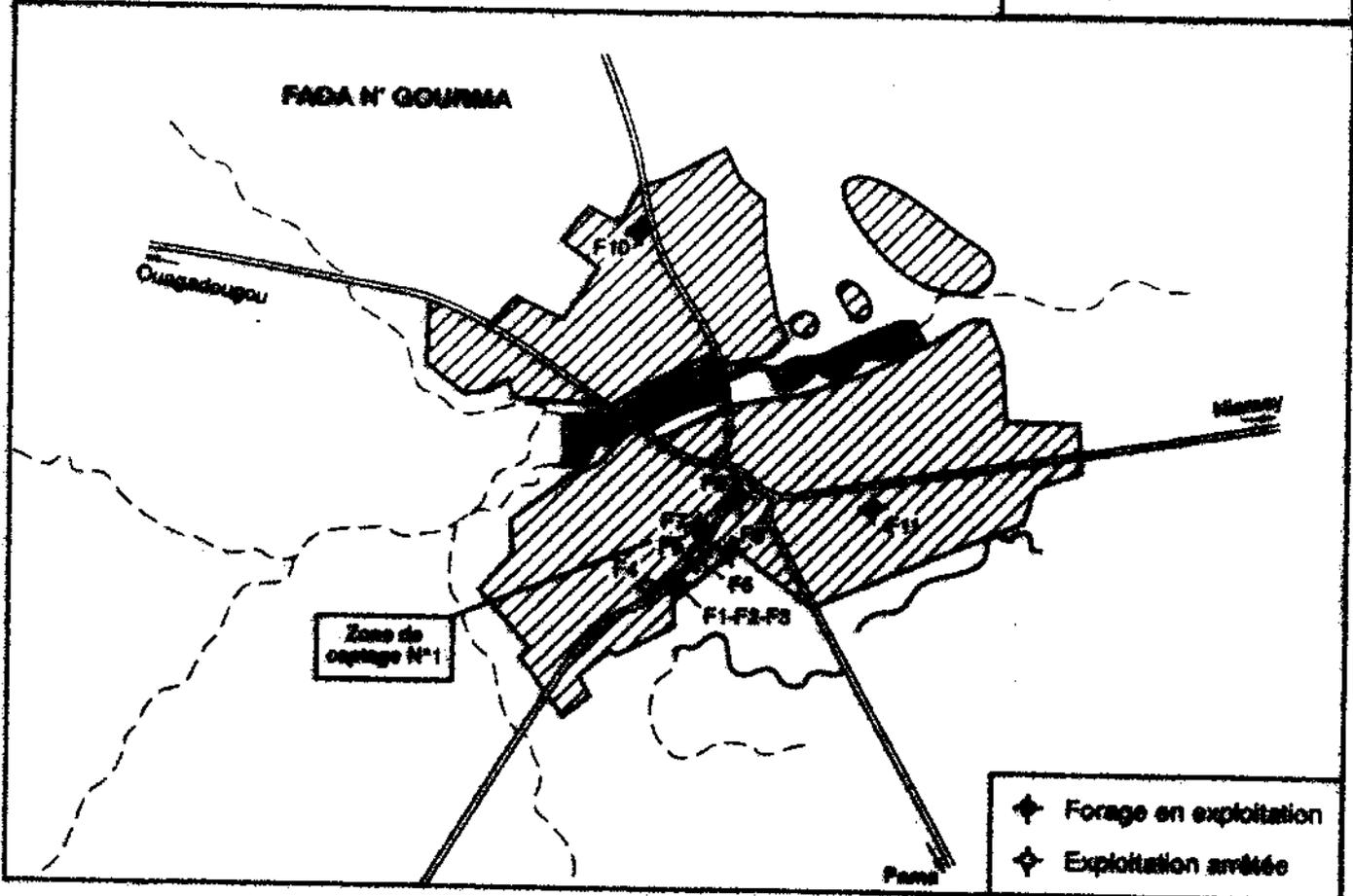
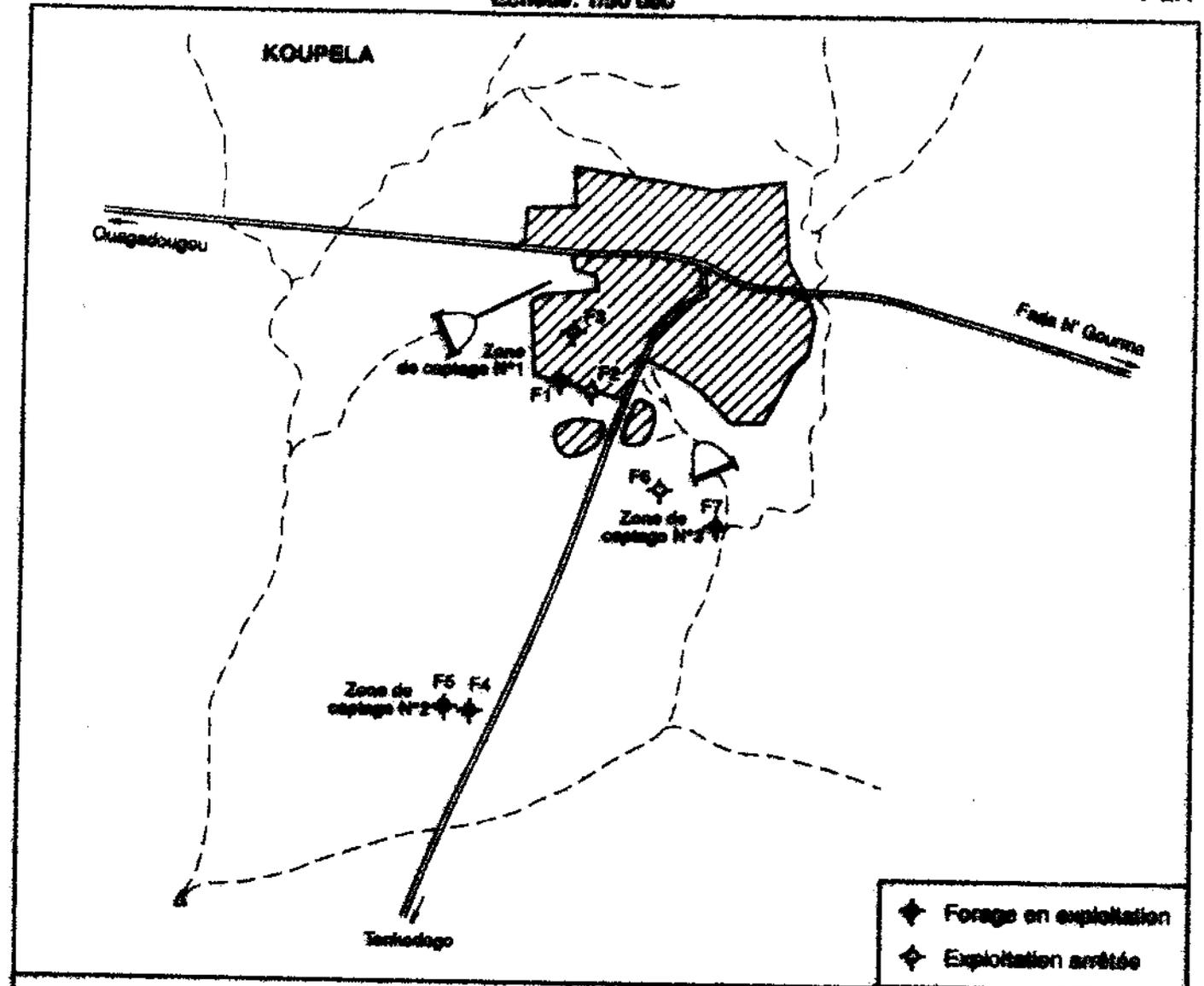
- Zone de captage

Cette zone comprenait 9 forages numérotés de F1 à F9. Seuls les forages F7 et F9 sont exploités actuellement. Le forage F8 est arrêté depuis 4 mois à la suite d'une panne de la pompe.

Ces forages implantés sur une zone de 700 m de côté sont distants entre eux de quelques dizaines de mètres à 300 mètres maximum.

SITUATION DES FORAGES DE KOUPELA ET FADA N' GOURMA
Echelle: 1/50 000

PL.1



- Forages isolés

- Forage F10

Le forage F10 qui est en exploitation, se trouve au nord de la ville, sur le versant nord du marigot à 2200 m de la zone de captage.

- Forage F11

Le forage F11 est situé à 1300 m à l'est de la zone de captage n°1 sur le même versant du marigot. Il est à 2500 m au sud-est du forage F10. Il est en exploitation.

3.1.2.2. Caractéristiques des forages

Les données à l'origine connues pour les forages sont reportées dans les tableaux en annexe 2. Les principales caractéristiques sont récapitulées dans le tableau 4 ci-après.

- Épaisseur de l'altération

Dans la zone de captage n°1 l'épaisseur de l'altération est très variable; elle est comprise entre 14 et 32 mètres. Elle est la plus épaisse dans le centre de la zone de captage (F7 - F8) et la plus faible dans son extrémité sud (F1 - F2) qui est plus haute.

En 1977 cette altération était noyée lorsque son épaisseur était inférieure à 15 mètres. En 1983, elle n'est plus noyée que si son épaisseur dépasse 20 mètres (F7 et F8) et même 25 mètres (F2).

Sur les forages F10 et F11 où elle a respectivement 25 et 20 mètres d'épaisseur elle est noyée sur 20 mètres en 1983 au forage F10 et sur 8 mètres en 1971 au forage F11.

- Profondeur de la nappe

Dans la zone de captage n°1 la nappe qui se trouvait avant 1982 entre 10 et 20 mètres de profondeur, selon la position topographique des forages, se situe en 1983, après la mise en exploitation des forages F1 à F4, entre 20 et 25 mètres de profondeur sur les nouveaux forages, non encore exploités, F5 à F9.

Le niveau de la nappe aurait baissé, dans la zone, de l'ordre de 5 mètres sous l'influence des pompages en un peu moins de 2 ans (21 mois).

TABLEAU N°4 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES A L'ORIGINE DES FORAGES DE FADA N'GOURMA

Forage	Prof.	Epaisseur altérites	Niveau statique (date)	Hauteur altérites noyées	Profondeur NS sous contact alt/socle	Hauteur crépinée et (%)	Sommet crépi. sous NS	AE Princ. sous NS	Débit			
									Fin forage m ³ /h	Essais (durée) m ³ /h	Q/S m ³ /h/m	Q exploit. m ³ /h (1)
F1	45	14	19,9 (05.81)		5,3	24 (53 %)	1,6		5,2			
F2	59,8	15,2	18,6 (05.77)		1,4	20 (33 %)	18,9	19,4	6			
F3	39	25,5	14,9 (12.77)	10,6		10 (26 %)	10,6		6			
F4	21,1	10	10 (06.82)	8		10 (47 %)	1,1		6,5			
F5	45,4	20	20,3 (12.83)	0	0	22,4 (49 %)	2,7	6,7	5	6 (8h)	0,39	5
F6	52	20	25 (12.83)		5	18 (35 %)	9	13	8	8 (10h)	0,51	6,5
F7	62	32	19,9 (12.83)	12,7		30 (46 %)	12,7	15,2	7	7,2 (10h)	0,46	6,5
F8	61,9	32	20,2 (12.83)	11,8		30 (46 %)	10,6	17,3		5 (10h)	0,25	4,5
F9	60	25	25 (12.83)	0	0	24 (40 %)	11	14,6	7	7,2	0,61	6,5
F10	56	25	5,8 (12.83)	19,4		27,4 (49 %)	23	19,4	6	6,5 (10h)	0,21	7
F11	36,7	20	11,4 (04.77)	8,8		16 (43 %)	8	6,1	12			

(1) Débit exploitable indiqué par bureau d'étude ayant surveillé les travaux, 12 heures par jour vraisemblablement

Sur les deux forages isolés, F10 et F11, la nappe se situe à 5,60 m (1983) et 11,40 (1977) de profondeur.

- Niveau capté

Ces forages captent tous des fissures du socle, mais la base de l'altération est également captée sur F4, F7, F8, F10 et F11.

- Débits

Les débits à la fin de la foration sont compris entre 5 et 8 m³/h. Seul le forage F11 avait un débit supérieur à 10 m³/h.

Aux essais de débit les débits spécifiques obtenus après 8 à 10 heures de pompage sont inférieurs ou égaux à 0,5 m³/h par mètre de rabattement pour les débits identiques à ceux en forage.

3.1.3. Remarque sur l'équipement des forages

Sur presque la moitié des forages la hauteur des crépines représente la moitié ou plus de la profondeur totale du forage. Le sommet des crépines, qu'il conviendrait de ne pas dénoyer en exploitation pour ne pas aérer les terrains, ce qui peut favoriser le colmatage, se trouve alors quelques mètres seulement sous le niveau statique.

Le crépinage est apparu, lors de l'inspection télévisée des forages, irrégulier et de mauvaise qualité sur le forage F6 de Koupela.

3.1.4. Remarques sur les essais de débit à l'origine

Les essais de débit réalisés après l'équipement du forage pour déterminer le débit d'exploitation ont consisté en un essai avec trois paliers, parfois quatre, non enchainés de débits croissants et de durée 1/2 heure chacun ou 1 heure pour le forage F6 de Koupela, et un essai à débit constant pendant 8 à 10 heures et 24 heures pour Koupela F6.

Sur le forage F7 de Koupela les essais ont comporté 3 paliers non enchainés de débits croissants de 12 heures chacun et un quatrième palier de 36 heures.

Ces essais ont généralement eu lieu au début de la saison sèche (août à décembre pour la plupart) lorsque le niveau de la nappe est haut.

Leur durée, assez courte, n'était pas suffisante pour permettre d'atteindre des limites d'alimentation de la nappe représentant l'extension de la zone fissurée.

Au cours des essais à débit constant les crépines et la première venue d'eau importante ont presque toujours été dénoyées ; ce qui a entraîné sur certains forages une chute brusque et rapide du niveau (Fada N'Gourma F5, F7, F10).

TABLEAU 5 : DEBITS D'EXPLOITATION DES FORAGES

Forage	Essai origine			Interprétation origine			Méthode CIEM-Burgoap			Débit exploitation m ³ /h
	Q m ³ /h	Durée h	ND m	Q exploi- table m ³ /h (1)	ND m	Observations	Q exploi- table 12h/j-m ³ /h	ND m	Observations	
Koupela F4	10,3	8	18,85	8			10,5	25	Sommet crépine 28 m, venue d'eau:26,50 m	5 (12h/j)
Koupela F5	12	8	23	12	23		11 15	31 37	Sommet crépine 32 m, venue d'eau:38,50 m	5 (3h/j)
Koupela F6	9 à 7,2 9	48 10	25,8 + 25,8	7	14,8	Dénoyage crépine à 13,80 m	1 2,3	13 17	ND limité par crépines ND limité par venue d'eau	7 à 2,8
Fada F5	8	8	35,54+	5	35,65	Dénoyage crépine à 23 m et venue d'eau à 27 m	3,5	26	Dénoyage cré- pine, ND limi- té par venues d'eau	
Fada F6	8	10	40,8 +	6,5	36,85	Dénoyage crépine à 34 m. Venues d'eau à 38 m	5	37	ND limité par venues d'eau	2
Fada F7	7,2	10	34,95+	6,5	36,70	Dénoyage crépine à 32 m et venue d'eau à 34,50	3,3	32		2,4
Fada F8	5	10	40 +	4,5	40,2	Dénoyage crépine à 31 m et venues d'eau à 37,50	2 3,4	31 37	ND limité par crépines, ND limité par venue d'eau	env. 2
Fada F10	6,5	11	36,4 +	7 (8h/j)	34,65	Dénoyage crépine à 28,60 m et venue d'eau à 25 et 35 m	3,6	28	ND limité par crépines	2,5 (11h/j)

+ Dénoyage des crépines ou de la première venue d'eau importante.

(1) 12 heures par jour vraisemblablement

Le débit d'exploitation déterminé à la suite de ces essais est indiqué dans le tableau 5, avec le niveau dynamique correspondant. On remarque que, excepté sur Koupela F4 et F5, les crépines et/ou la première venue d'eau sont dénoyées en exploitation.

Sur le même tableau figure le débit d'exploitation 12/h/j calculé à partir des mêmes essais, mais selon la méthode d'interprétation CIEH-Burgeap qui tient compte de la baisse saisonnière de la nappe durant la saison sèche. Ce débit est en outre déterminé pour ne pas dénoyer les crépines ou la première arrivée d'eau.

Sauf pour Koupela F4 et F5, ces débits sont sensiblement inférieurs de moitié aux débits annoncés ; et sur Koupela F6 il est inférieur de 70 %.

3.1.5. Evaluation de l'interinfluence des forages sur les zones de captage

Exemple de la zone de captage n°1 de Koupela qui comprend 3 forages éloignés respectivement de :

F1 - F2 = 300 mètres
 F1 - F3 = 400 mètres
 F2 - F3 = 500 mètres

Les débits d'exploitation sont à l'origine de :

F1 = 6,5 m³/h
 F2 = inconnu mais considéré égal à 5 m³/h
 F3 = 4,5 m³/h

La transmissivité est égale à $T = 1 \times 10^{-4}$ m²/s.

Le calcul est fait avec deux valeurs du coefficient d'emménagement de 1×10^{-3} et 1×10^{-4} .

Le temps de pompage est de 12 heures par jour pendant 6 mois soit 10×10^6 secondes.

Puits de pompage	S = 1 x 10 ⁻³			S = 1 x 10 ⁻⁴		
	influence sur niveau (en mètres)			influence sur niveau (en mètres)		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
F1		4,63	3,79		7,94	7,10
F2	3,57		2,42	6,12		4,97
F3	2,63	2,18		4,92	4,47	
Total des inter- influences	6,20	6,81	6,21	11,04	12,41	12,07

Après 8 mois d'exploitation, c'est-à-dire à la fin de la saison sèche, l'interinfluence entre les pompages peut atteindre plusieurs mètres et n'est pas négligeable.

Ces valeurs correspondent à un faible coefficient d'emmagasinement dans la roche fissurée.

Dans l'altération le coefficient d'emmagasinement pourrait être de quelques pourcents et avec 1 % les interinfluences sont inférieures à 0,5 mètre et elles ne se font plus sentir au-delà d'un rayon de 475 mètres autour des forages.

3.2. Appréciation du degré de vieillissement des forages

3.2.1. Méthodes

3.2.1.1. Comparaison des caractéristiques actuelles des forages par rapport à l'origine

Le colmatage apparaît par une diminution des caractéristiques du forage en l'occurrence du débit spécifiques. La comparaison des caractéristiques actuelles d'un forage avec celles à l'origine permet d'appréhender la présence et l'importance du colmatage.

Une série d'essais de pompages par paliers, que l'on puisse comparer à ceux réalisés lors de la réception des ouvrages a donc été réalisée en avril 1990.

La durée des paliers a été la même qu'à l'origine mais ceux-ci ont été enchaînés sans récupération du niveau statique entre chacun d'eux. Les rabattements à la fin des paliers ont été corrigés selon la méthode de superposition des écoulements pour tenir compte de cet enchaînement.

Ensuite un essai normalisé type CIEH-Burgeap (1) a été réalisé sur tous les forages pour servir de référence pour les autres essais à faire après les traitements.

Cet essai comprend 3 paliers enchaînés, le premier d'une durée de 2 heures et les deux suivants de 1 heure. Là aussi les rabattements des 2ème et 3ème paliers sont corrigés pour tenir compte de l'enchaînement et de la durée plus courte de ces paliers.

Les résultats des essais par paliers à l'origine et ceux d'avril 1990 sur six forages sont présentés dans le tableau 6.

Les courbes caractéristiques comparatives sont fournies en annexe 4.

On observe que :

- 3 forages présentent des signes nets de colmatages avec des diminutions du débit spécifique de 20 % à 75 %. Il s'agit de Koupela F6, Fada N'Gourma F10 et Kaya F15. Ces 3 forages sont crépinés en face de l'altération ainsi que le montrent les coupes en annexe 5. Les forages F6 de Koupela et F10 de Fada N'Gourma sont isolés et ils ne peuvent être influencés par des pompages sur des forages proches,
- 1 forage (Koupela F5) présente une faible perte du débit spécifique de 3,5 %. Le forage qui capte une fissure profonde dans le socle est, semble-t-il, peu colmaté,

(1) Plaquette Essais de débit simplifiés sur forages d'Hydraulique villageoise - CIEH-BURGEAP 1987.

- 2 forages au contraire, se sont développés en exploitation et leur débit spécifique s'est amélioré de 32 % à 100 %. Il s'agit respectivement du forage F3 de Koupela et du forage F6 de Fada N'Gourma. Ces forages captent uniquement des fissures dans le socle, l'altération étant totalement dénoyée.

L'amélioration des caractéristiques de ces deux forages, implantés à proximité d'autres ouvrages, peut s'expliquer outre par un développement des fissures, par l'arrêt ou la diminution des pompages sur les forages environnants. Ce qui se traduit à la fin de la saison sèche 1990 par un niveau de la nappe plus haut qu'à la création des ouvrages pendant ou à la fin de la saison des pluies en 1983.

Sur 3 forages la chute du débit d'exploitation est due probablement à un colmatage. Sur les trois autres il s'agit par contre vraisemblablement d'un aquifère dans des fissures d'extension limitée et mal réalimentées.

L'arrêt des pompages depuis un long moment a permis la réalimentation des fissures d'où les caractéristiques des forages identiques ou meilleures qu'à l'origine.

Les résultats des essais par paliers normalisés devant servir de référence pour les essais de pompages ultérieurs sont présentés sur le tableau 7.

TABEAU N°6 : COMPARAISON DES RESULTATS DES ESSAIS PAR PALIERS A L'ORIGINE ET EN AVRIL 1990

Forage	Essais à l'origine					Essais 1990					
	Palier (1)	Niveau statique	Débit m ³ /h	Rabat.	Débit spécif. m ³ /h/m	Palier (1)	Niveau statique	Débit m ³ /h	Rabat.	Débit spécif. m ³ /h	
Koupela F3	1	20,7	3	5,6	0,53	1	18,75	3,3	4,75	0,70	Pas de chute du débit spécifique, augmentation de 32 %
	2	(6.08.83)	4	8,3	0,48	2	(23.04.90)	4,5	7,25	0,82	
	3		4,5	9,7	0,48	3		5,4	10,5	0,51	
Koupela F5	1	13,7	6	3,5	1,71	1	19,70	2,9	1,30	2,23	Légère chute du débit spécifique (3,5 %)
	2	(11.83)	8	4,9	1,63	2	(23.04.90)	5,4	2,98	1,82	
	3		12	7,1	1,69	3		5,5	3,33	1,65	
Koupela F6	1	8,8	3	2,5	1,2	1	9,3	3,18	4,58	0,69	Chute de 42 % à 60 %, du débit spécifique
	2	(09.87)	6	4,8	1,25	2	(22.04.90)	5,45	6,6	0,83	
	3		9	9,3	0,98	3		5,6	11,3	0,49	
	4		12,4	14,1	0,88						
Fada N'Gourma F8	1	25,1	6	9,3	0,64	1	25,6	3	2,13	1,41	Pas de chute du débit spécifique, augmentation 100 %
	2	(21.12.83)	7,2	12,4	0,58	2	(24.04.90)	6	4,6	1,3	
	3		9	14,8	0,61						
Fada N'Gourma F10	1	5,5	4	8,2	0,49	1	14,2	3	9,53	0,31	Chute du débit spécifique de 74 %
	2	(11.83)	6	17,4	0,34	2	(24.04.90)	4	29,9	0,13	
	3		8	25,8	0,31						
Kaya F15	1		2	3	0,67	1	21,9	1	1,66	0,59	Chute du débit spécifique de 20 %
	2		4	7,2	0,55	2		2	3,79	0,53	
	3		6	11,4	0,53	3		3	5,95	0,50	
	4		8	16	0,50	4		4	8,64	0,46	

(1) Durée des paliers à l'origine et en 1990 : 1/2 heure sauf pour Koupela F6 durée : 1 heure et pour Kaya F15 : durée 1h40 en 1990 et inconnue à l'origine.

(2) 44 % pour un débit de 3m³/h-Forte chute au niveau et dénoyage des crépines et des venues d'eau à 4m³/h.

TABLEAU N°7 : RESULTATS DES ESSAIS PAR PALIERS NORMALISES
(TYPE CIEH-BURGEAP).

VILLE	Forage	Palier	Niveau statique m	Débit m ³ /h	Rabat. m	Rabat. corrigé m	Débit spécif. m ³ /h/m
KOUPELA	F3	1	18,95	3	5,3	-	0,57
		2		4,1	8,15	8,05	0,51
		3		5,2	12,6	12,4	0,42
	F5	1	19,95	2,2	1,15	-	1,91
		2		4,4	2,45	2,50	1,76
		3		8,5	4,3	4,3	1,51
	F6	1	8,7	3	4,9		0,61
		2		4,15	6,9	6,8	0,61
		3		5,8	13,5	13,3	0,44
FADA N'GOURMA	F6	1	26,05	2,4	2,05		1,17
		2		3,7	3,6		1,03
		3		5,5	5,7		0,96
	F10	1	14,35	2	6,4		0,31
		2		3	10,25	10	0,30
		3		3,3	13,35	12,75	0,26

3.2.1.2. Observation des crépines par inspection télévisée

Pour observer le colmatage sur et dans les crépines : concrétions, sable, précipités d'oxydes, les forages ont été inspectés avec une caméra de télévision. Les inspections ont eu lieu avant les traitements sur les forages F3, F5 de Koupela, F6, F10 de Fada N'Gourma et F15 de Kaya, et après les traitements sur F6 de Koupela et F10 de Fada N'Gourma. Sur le forage F6 de Koupela la première inspection télévisée a eu lieu après les premiers traitements au Wessoclean et aux polyphosphates qui d'ailleurs n'ont pas donné de résultats.

Le compte rendu des ces inspections est présenté en annexe 7.

Les principales observations faites sur les forages sont les suivantes :

- Koupela F3

De 29 à 50 mètres, soit pratiquement au niveau des venues d'eau localisées à 30 et 40 mètres, présence de dépôts blanchâtres à allure concrétionnée sur le bord inférieur des fentes qu'ils obturent entre 1/4 ou 3/4 de la hauteur.

Ces dépôts ne semblent pas avoir un effet colmatant puisque en 1990 le débit spécifique du forage est supérieur de 32 % à ce qu'il était à l'origine.

- Koupela F5

Sur une hauteur crépinée totale de 15 mètres, on note juste à partir de 39,50 m et jusqu'à 41,70 (profondeur de l'inspection) des dépôts blanchâtres identiques à ceux observés sur F3, mais de faible importance et qui obstruent seulement 10 % de la hauteur des ouvertures.

Ces dépôts réduits ne sont pas à l'origine d'un colmatage, la caractéristique du forage est d'ailleurs identique à ce qu'elle était à l'origine.

- Koupela F6

Ce forage est crépiné sur une hauteur d'environ 7 mètres en face de l'altération dont l'épaisseur, qui n'est pas connue avec précision, pourrait être égale ou supérieure à 20 mètres. Entre 14,40 et 26,20 m, on note la présence dans les fentes des crépines d'éléments sableux provenant de l'altération.

Les fentes des crépines ont une longueur très irrégulière, très courte par endroits.

Des dépôts blancs sur le bord inférieur des fentes apparaissent vers 23 m et 40 m, puis entre 42,50 et 46,50 m où ils ferment 1/4 à 3/4 des ouvertures. A 54 mètres au niveau de la venue d'eau dans le socle ces dépôts bouchent entièrement les fentes.

Entre 47,25 m et 53,50 m des lamelles sont accrochées à une extrémité des fentes et dirigées vers le haut. Il pourrait s'agir de copeaux de PVC provenant de l'exécution des fentes. A la base à partir de 55 mètres les crépines sont propres et totalement ouvertes.

Le colmatage qui apparaît par une diminution de 25 % du débit spécifique et très certainement dû au sable provenant de l'altération, qui fournit la moitié du débit en forage, plutôt qu'aux dépôts blanchâtres peu importants et dont le pouvoir colmatant est apparu faible sur le forage F3.

- Fada N'Gourma F8

Des dépôts blanchâtres semblables à ceux mentionnés sur les forages de Koupela ont été observés à 34 m, 42,20 m et 49 m, dans la zone des venues d'eau localisées à 38 mètres et entre 48 et 49 mètres.

Des flocculats argileux, qui se détachent au passage de la caméra, sont déposés sur le tubage et les crépines mais sans obturer les fentes.

Aucun produit de colmatage important n'apparaît sur ce forage dont le débit spécifique est actuellement le double de ce qu'il était à l'origine.

- Fada N'Gourma F10

Ce forage qui a perdu au moins 40 % de son débit spécifique est le seul sur lequel on a observé, entre 30 et 37 mètres, des traces noires pouvant provenir d'oxydes de manganèse ou de fer. Cette zone correspond aux venues d'eau situées à 25 et 35 mètres dans l'altération.

Ces traces coulent par les fentes des crépines sans les boucher, mais on peut penser que derrière le massif de gravier et le terrain sont colmatés par ces produits.

En-dessous de 37 mètres et jusqu'à 45,20 m où pose la caméra, la crépine est propre.

- Kaya F15

Contrairement aux forages précédents qui captaient la nappe dans les roches de nature granitique, le forage de Kaya se trouve dans des schistes tendres, altérés jusqu'à 20 mètres, puis entre 50 et 73 mètres d'après la coupe.

Au-dessus de la nappe entre 16 et 22,50 m, les fentes des crépines sont propres bien que l'intérieur du tube soit sale. Entre 24,40 et 28,50 il y a dans les fentes des dépôts noirs ou blancs qui n'obstruent pas totalement les ouvertures.

Entre 29 et 33 mètres les fentes sont bouchées entre 20 et 50 % et parfois entièrement par du sable, des fines argileuses, et des dépôts blanchâtres.

Sur la deuxième partie crépinée entre 39 et 51 mètres, on remarque la présence de dépôts blanchâtres sur 10 à 20 % de la hauteur des ouvertures entre 39 et 48 mètres, puis entre 48 et 51 mètres, les fentes sont entièrement bouchées par une matière argileuse blanche liquide qui est vraisemblablement de l'altération des schistes.

3.2.1.3. Essais de pompage de longue durée

Afin de savoir si la diminution du débit des forages pouvait provenir de limites de l'aquifère, deux essais de pompage à débit constant pendant 24 heures ont eu lieu sur les forages F3 et F6 de Koupela.

Les courbes d'évolution des niveaux pendant ces pompages sont présentées en annexe 9.

Aucune limite étanche n'est apparue sur le forage F3 après 24 heures de pompage à 4,2 m³/h, le débit du forage à l'origine, et l'on note même un début de stabilisation à l'arrêt du pompage qui, compte tenu de ce phénomène, aurait dû être poursuivi.

A la fin de l'essai, le niveau dynamique se trouvait à 30,60 m de profondeur, en face de la première venue d'eau peu importante, l'arrivée d'eau principale se trouvant vers 40 mètres.

Les valeurs de la transmissivité calculées à partir de ces essais sont assez différentes, elles sont de :

$$T = 0,68 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \text{ pour la descente.}$$

$$T = 2,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \text{ pour la remontée.}$$

Pendant le pompage, le forage F2 situé à 500 mètres n'a pas été influencé. Par contre sur le forage F1 distant de 400 mètres le niveau a baissé de 0,60m.

Sur le forage F6 de Koupela l'essai de débit a été fait au débit de 3,6 m³/h.

Après 2h30 de pompage lorsque le niveau dynamique atteint 17 mètres de profondeur on dénote les arrivées d'eau dans l'altération et le rabattement augmente avec une pente qui s'accroît jusqu'à la fin du pompage.

A la fin de l'essai, le niveau dynamique se trouve à 22,90 mètres de profondeur et il n'est pas stabilisé.

A la remontée, les points du rabattement résiduel s'alignent selon deux droites de pentes doubles, ce qui traduit l'existence d'une limite étanche. La distance de cette limite au forage ne peut être évaluée en l'absence de piézomètre.

La valeur de la transmissivité calculée à la descente et à la remontée est de :

$$T = 8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s.}$$

Pendant le pompage le forage F2 à 630 mètres n'a pas été influencé.

Malheureusement, cet essai ne peut être comparé avec celui de 24 heures réalisé à la réception du forage. Les données que l'on possède sur cet essai pendant lequel le débit est passé successivement de 12,4 m³/h à 9 m³/h, puis 8 m³/h et finalement 7,2 m³/h et où les arrivées d'eau de l'altération sont dénoyées dès la première minute de pompage, ne sont pas interprétables.

3.2.2. Facteurs pouvant être à l'origine d'un colmatage

3.2.2.1. Nature de l'eau

La nature chimique des dépôts blanchâtres "concrétionnés" observés dans les crépines, surtout sur les forages F3 et F6 de Koupela, est inconnue.

Les résultats d'analyses chimiques de l'eau des forages sont indiqués dans le tableau 8.

Les prélèvements ont eu lieu au début du mois de mars, soit 1 mois et demi avant les essais de pompage. Sur les forages dont l'exploitation est arrêtée, les échantillons ont été prélevés avec un préleveur mais sans vidanger auparavant le forage de l'eau qu'il contenait.

Une deuxième série de prélèvements a été faite à la fin des pompages par paliers des 23 et 24 avril 1990, pour analyser uniquement la teneur en fer total de la nappe, et l'eau a été acidifiée au moment du prélèvement.

Pour le forage F6 de Koupela, on dispose également des résultats d'une analyse à la réalisation du forage.

L'eau est bicarbonatée sodique. Elle est faiblement à moyennement minéralisée, comme l'est l'eau des formations granitiques. Elle est la plus minéralisée au forage F6 de Koupela.

Les teneurs en fer et en manganèse peuvent être l'indice d'un colmatage.

En ce qui concerne la teneur en fer de l'eau des forages, il faut noter ceci :

- la teneur de l'eau prélevée en mars 1990 est peu significative puisqu'elle provient de forages exploités et d'autres non exploités ; la teneur plus élevée sur les forages non exploités s'explique aisément par l'immobilisation de l'eau dans ces forages,
- la teneur en fer totale mesurée sur les échantillons prélevés à la fin des essais de pompage par paliers et pour lesquels des précautions spéciales ont été prises en vue de l'analyse lors des prélèvements est plus représentative.

Ainsi, la teneur en fer totale de la nappe est comprise entre 0,29 mg/l et 0,65 mg/l. Elle est supérieure à la concentration maximale admissible de 0,2 mg/l pour l'eau potable.

Elle est bien la plus élevée sur les deux forages dont l'exploitation a été arrêtée F6 de Koupela et F6 de Fada N'Gourma ; mais la concentration la plus faible (0,29 mg/l) correspond au forage F3 de Koupela qui est lui aussi inexploité. Sur le forage en exploitation F10 de Fada N'Gourma, elle est de 0,39 mg/l.

La teneur en manganèse est nulle sur les forages inexploités F6 de Koupela et F6 de Fada N'Gourma. Sur les autres forages, elle est égale à 0,1 mg/l, soit le double de la concentration maximale admissible (0,05 mg/l).

Les teneurs en fer et en manganèse à l'origine, ne sont pas connues et il est impossible de dire s'il y a un colmatage dû à des précipitations ferrugineuses ou manganésifères.

Après les traitements au Wessoclean et aux polyphosphates sur le forage F6 de Koupela :

- la teneur en manganèse est passée à 0,4 mg/l,
- celle en sodium a été multipliée par 3 (polyphosphates),
- celles du potassium et de la silice ont été divisées par 3,
- aucune observation ne peut être faite sur la teneur en fer, les méthodes d'analyse et de prélèvements n'étant pas identiques.

Le prélèvement et l'analyse des dépôts observés sur les crépines pourraient donner des renseignements sur leur nature et celle du colmatage.

TABLEAU N°8 : RESULTATS DES ANALYSES D'EAU

	Koupela					Fada N° Gourma	
	F3	F5	F6			F8	F10
	9/03/90	9/03/90	2/10/87	9/03/90	30/4/90(3)	9/03/90	9/03/90
PH	6,51	7,22	7	7,99	7,9	7,58	7,35
Conductivité µS/cm	280	542	790	752	935	241	389
TA	0	0	0	0	0	0	0
TAC	10,34	29,4	22,6 (2)	23,5	20,5	10,10	17
Bicarbonates mg/l	126	359	275,7	287	250	123	207
Chlorures mg/l	10	8	71	26	32	5	5
Sulfates mg/l	5,8	6,9		5,7	10	2,1	2
Silice tot. mg/l	10,9	16,07		15,6	4,58	20,8	15,68
Sodium mg/l	17,14	21,59		35,2	110	12,25	36
Potassium mg/l	4,7	3,09		11,38	4	3,09	5
Fer total (1) mg/l	0,25 (0,29)	0,04		0,17(0,65)	0,26	0,2 (0,60)	0,05 (0,39)
Manganèse mg/l	0,1	0,1		0	0,4	0	0,1
Résidu sec mg/l	219	374		588		240	278
Dureté TH			38°				
Dureté cal. TH cat			24°3				
Calcium mg/l			97,2				
Magnésium mg/l			28,9				

(1) Entre parenthèse analyse sur prélèvement d'eau acidifiée après pompage des 23 et 24/04/90

(2) 4,52 meq/l

(3) Après traitement au Wessoclean et aux polyphosphates.

3.2.2.2. Vitesses d'entrée d'eau dans les crépines

La vitesse d'entrée de l'eau dans les crépines est apparue comme un élément important du colmatage lorsqu'elle était supérieure à 10 mm/s lors de l'étude de forages colmatés dans un milieu granulaire en région parisienne.

Dans les crépines de diamètres 6" et 4"1/2 qui équipent les forages étudiés, la vitesse d'entrée de l'eau dans la crépine est supérieure à 10 mm/s avec un débit de 5 m³/h (débit d'exploitation courant pour un forage) lorsque la totalité du débit passe sur une hauteur de crépines inférieure ou égale à 3 mètres.

Les venues d'eau localisées dans les fissures du socle peuvent transiter sur de faibles hauteurs de crépines et atteindre des vitesses supérieures à 10 mm/s.

Mais les trois forages testés qui ne présentent pas de chute du débit spécifique, donc pas de colmatage, captent uniquement les venues d'eau de fissures du socle.

Les deux forages sur lesquels une chute du débit spécifique est apparue (F6 de Koupela et F10 de Fada N'Gourma) captent des venues d'eau dans l'altération en face de 7 à 10 mètres de crépines dans lesquelles la vitesse d'entrée de l'eau est de 6 à 5 mm/s pour des débits au début de l'exploitation de 7 et 6 m³/h.

La vitesse d'entrée de l'eau dans la crépine n'apparaît donc pas nettement liée au développement du colmatage sauf au colmatage mécanique des ouvrages par entraînement d'éléments d'altérites qui viennent se coincer dans et derrière les ouvertures et finissent par les boucher totalement, notamment lorsque l'on dénoie l'aquifère, ce qui a pour effet de créer de fortes vitesses d'entrée de l'eau dans le forage.

3.2.2.3. Dénoyage des niveaux aquifères

Dès le début de l'exploitation, l'altération et même les venues d'eau ont été dénoyées (cf. tableau 5) et ce phénomène a été en s'accroissant au fur et à mesure de la diminution du débit des forages.

Ceci a pour première effet, sur les ouvrages qui captent l'altération, comme F6 de Koupela et F10 de Fada N'Gourma, un colmatage mécanique des crépines par des petits éléments sableux, tels que ceux qui ont été remontés lors des opérations de brossage des crépines sur ces deux forages.

Mais les forts rabattements favorisent le dégagement de gaz carbonique et un apport d'oxygène, ce qui peut avoir pour effet, avec les variations de la température, de modifier l'équilibre calco-carbonique de l'eau et être à l'origine de la précipitation des dépôts dans les crépines, le massif de gravier et le terrain.

Là aussi une analyse des dépôts observés pourrait permettre de préciser l'existence d'un tel phénomène.

3.3. Expériences de réhabilitation par traitements physico-chimiques

3.3.1. Les procédures

Les traitements ont été effectués sur le forage F6 de Koupela et le forage F10 de Fada N'Gourma, seuls forages, parmi les ouvrages testés, à présenter un indice de colmatage, net, mis en évidence par les essais de pompage par paliers et confirmé sur le forage de Fada N'Gourma par l'observation, lors de l'inspection télévisée, de dépôts dans les crépines (1).

Les spécifications techniques du matériel mis en oeuvre par FORAFRIQUE sont fournies en annexe 6.

Les traitements ont consisté en :

- des traitements chimiques :
 - . acides avec injection de Wessoclean et d'acide chlorhydrique. Le Wessoclean, commercialisé par Preussag, spécifique pour la destruction des incrustations, contient, entre autres, des acides ascorbique et citrique et a un effet antibactériel.
 - . aux polyphosphates qui permettent d'éliminer essentiellement les dépôts d'argiles.
- des traitements mécaniques avec brossage et pistonnage dans les crépines et nettoyage par injection d'air comprimé avec un système d'air-lift.

Les traitements réalisés sont les suivants :

Forage F6 de Koupela

- a) Premier traitement : injection de Wessoclean et attente de 24 heures, puis brossage et nettoyage des crépines mètre par mètre avec circulation d'une solution acide de Wessoclean.
- b) Deuxième traitement : nettoyage avec soufflage à l'air-lift.
- c) Troisième traitement : injection de polyphosphates et pistonnage dans les crépines.

(1) Le forage F15 Kaya présente également des indices de colmatage.

- d) Quatrième traitement : brossage des crépines, nettoyage à l'air-lift, injection de Wessoclean, puis nettoyage à l'air-lift après une attente de 24 heures.
- e) Cinquième traitement : injection de 250 kg d'acide chlorhydrique puis nettoyage à l'air-lift.

Forage F10 de Fada N'Gourma

Un seul traitement comprenant :

- un brossage des crépines,
- une injection de Wessoclean et attente de 24 heures,
- un nettoyage mètre par mètre des ~~crépines avec circulation~~ d'une solution acide de Wessoclean.

Du sable est remonté sur les brosses après le brossage.

Le compte rendu des opérations de décolmatage réalisées est présenté en annexe 8.

3.3.2. Résultats obtenus

L'efficacité des traitements effectués a été contrôlée par :

- la comparaison des débits spécifiques obtenus lors d'essais de pompage par paliers normalisés (type CIEH-Burgeap) réalisés après chaque traitement,
- une nouvelle inspection télévisée.

3.3.2.1. Forage F6 de Koupela

L'évolution des débits spécifiques lors des essais de pompage successifs est reportée dans le tableau 9 ; celle du couple débits-rabattements (courbe caractéristique du forage) figure sur la planche 2.

Avant les traitements le débit spécifique du forage est inférieur de 40 à 60 % au débit spécifique initial pour des débits de 3 et 6 m³/h.

- a) Le premier traitement au Wessoclean, après lequel l'amélioration du débit spécifique n'est que de quelques pourcents, n'a eu aucun effet sur le colmatage du forage. Sur la courbe caractéristique (planche 2), les points de chaque palier se trouvent sur la courbe tracée avec les paliers du premier essai avant traitement.

Après une nuit dans le forage, le pH de l'eau au début du pompage est encore de 3,4, ce qui indique que l'acide a peu réagit.

L'augmentation de 15 % du débit spécifique au premier palier à 3 m³/h n'est pas significative, car le débit spécifique de 0,61 m³/h/m obtenu lors du premier essai par paliers normalisés semble faible comparé à celui obtenu lors de l'essai type origine (paliers de 1 heure), et qui est égal à 0,69 m³/h/m.

- b) Le traitement aux polyphosphates n'a également eu aucun effet décolmatant. On observe au contraire un très léger colmatage de l'ouvrage mais qui n'est pas significatif. Sur la planche 2 les points à chaque palier se placent sur la même courbe que les deux essais précédents.

- c) Après le deuxième traitement au Wessoclean le débit spécifique s'est amélioré de 10 à 17 % selon les paliers. Ce traitement ayant été précédé d'un brossage des crépines pendant 1h30 et d'un air-lift pendant 2 heures et suivi d'un second air-lift de 3 heures il est assez probable que cette amélioration soit plutôt le résultat du nettoyage du sable obturant les crépines que d'une action du Wessoclean sur les dépôts.

Sur la courbe débit-rabatement de la planche 2 les points obtenus se situent alors sur une courbe supérieure à la première.

Le débit spécifique est encore inférieur de l'ordre de 30 % à ce qu'il était à l'origine.

L'inspection par caméra de télévision réalisée après ce traitement montre que les crépines sont propres jusqu'à 49 mètres, mais qu'il y a beaucoup de sable dans l'espace annulaire entre 16 et 31 mètres. Les dépôts blanchâtres observés entre 40 et 46,50 m ont été éliminés.

Les dépôts en face de la dernière arrivée d'eau à 54 mètres ont été diminués de 50 à 90 %.

Entre 49 et 52,30 m il y a toujours des éléments blancs dirigés vers le haut qui peuvent boucher les crépines.

Le crépinage est en général de mauvaise qualité ; les fentes sont de longueurs inégales et il reste des ébarbures sur le PVC.

d) Le traitement à l'acide chlorhydrique n'a, en définitive, donné aucun résultat.

Après un temps de contact de 3 heures les points obtenus lors de l'essai de contrôle par paliers se situent sur la même courbe que celle après le deuxième traitement au Wessoclean (planche 2).

Le pH de l'eau égal à 1,2 et 2,2, lors de l'air-lift de nettoyage puis de l'essai de pompage, indique que l'acide n'a pas réagi.

Le lendemain, après un temps de séjour de 10 heures (une nuit), lors d'un pompage de 3 heures au débit de 9 m³/h pour normaliser le pH qui est revenu à 6 dès le début du pompage, le débit spécifique a beaucoup augmenté et est même légèrement supérieur à celui à l'origine.

Le forage semblait alors décolmâté.

Un deuxième essai de contrôle par paliers type CIEM, réalisé 1 mois après pour confirmer ou non le décolmâtage, montre qu'il n'en est rien et que l'ouvrage a même repris la caractéristique qu'il avait avant les traitements.

Cette courte amélioration du débit spécifique provient vraisemblablement d'un débouillage brusque provoqué par le surpompage, des crépines ensablées par l'altération mais qui se sont colmatées à nouveau dès l'arrêt du pompage (1)

3.3.2.2. Forage F10 de Fada N'Gouraa

Les débits spécifiques lors des essais de pompage par paliers normalisés avant et après traitement sont reportés sur le tableau 10. La courbe débit-rabattements, courbe caractéristique du forage, figure sur la planche 3.

Avant le traitement le débit spécifique du forage est inférieur de 75 % à celui obtenu à la création de l'ouvrage.

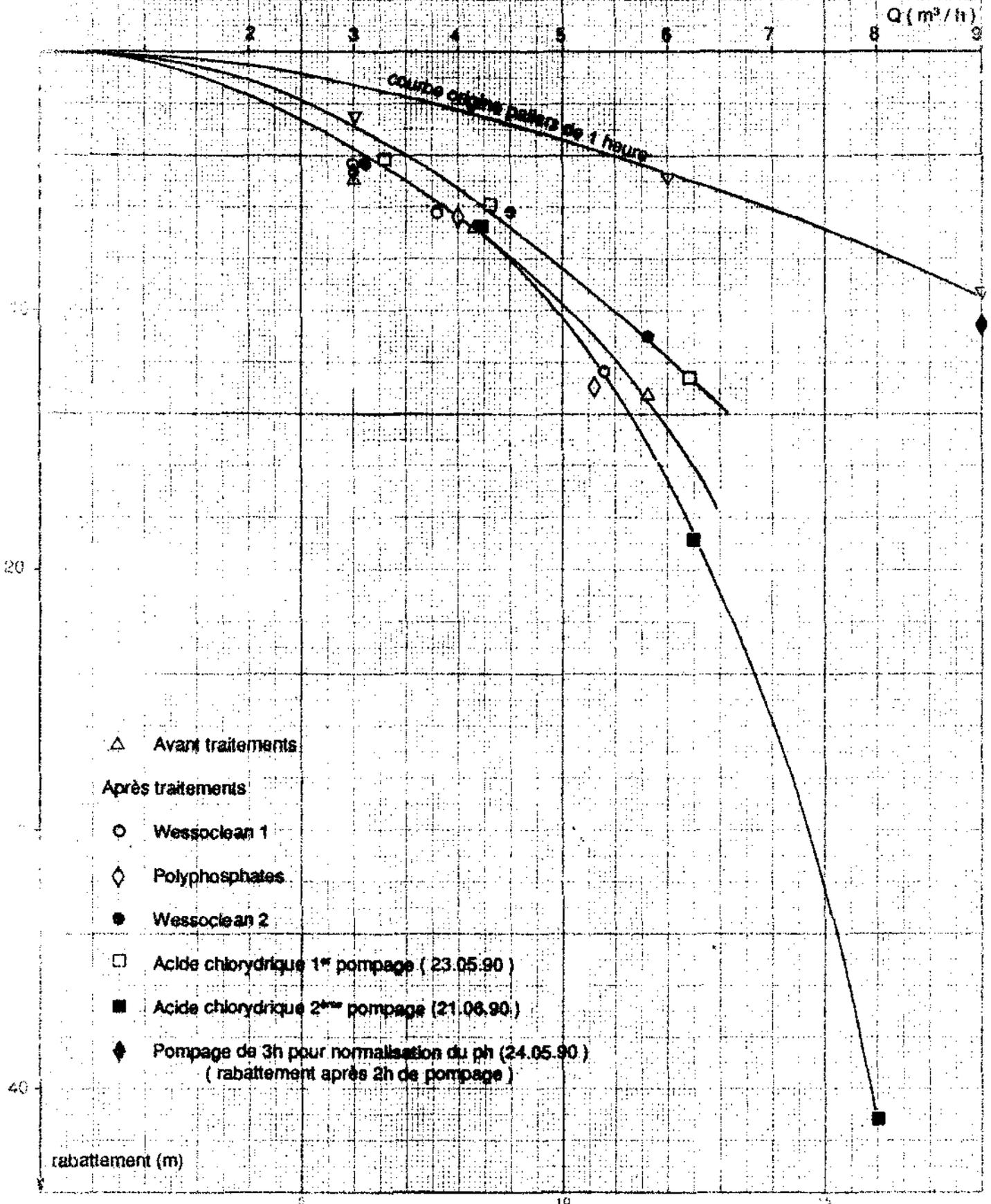
Après le traitement, qui a comporté un brossage des crépines et une acidification au Wessoclean, l'amélioration du débit spécifique est de 10 à 23 % selon les paliers, et le débit spécifique est encore inférieur de 35 % à ce qu'il était à la création du forage pour un débit de 4 m³/h.

L'inspection par caméra de télévision réalisée après le traitement montre que les traces noires entre 30 et 37 mètres ont disparues peut-être uniquement sous l'effet du brossage des crépines.

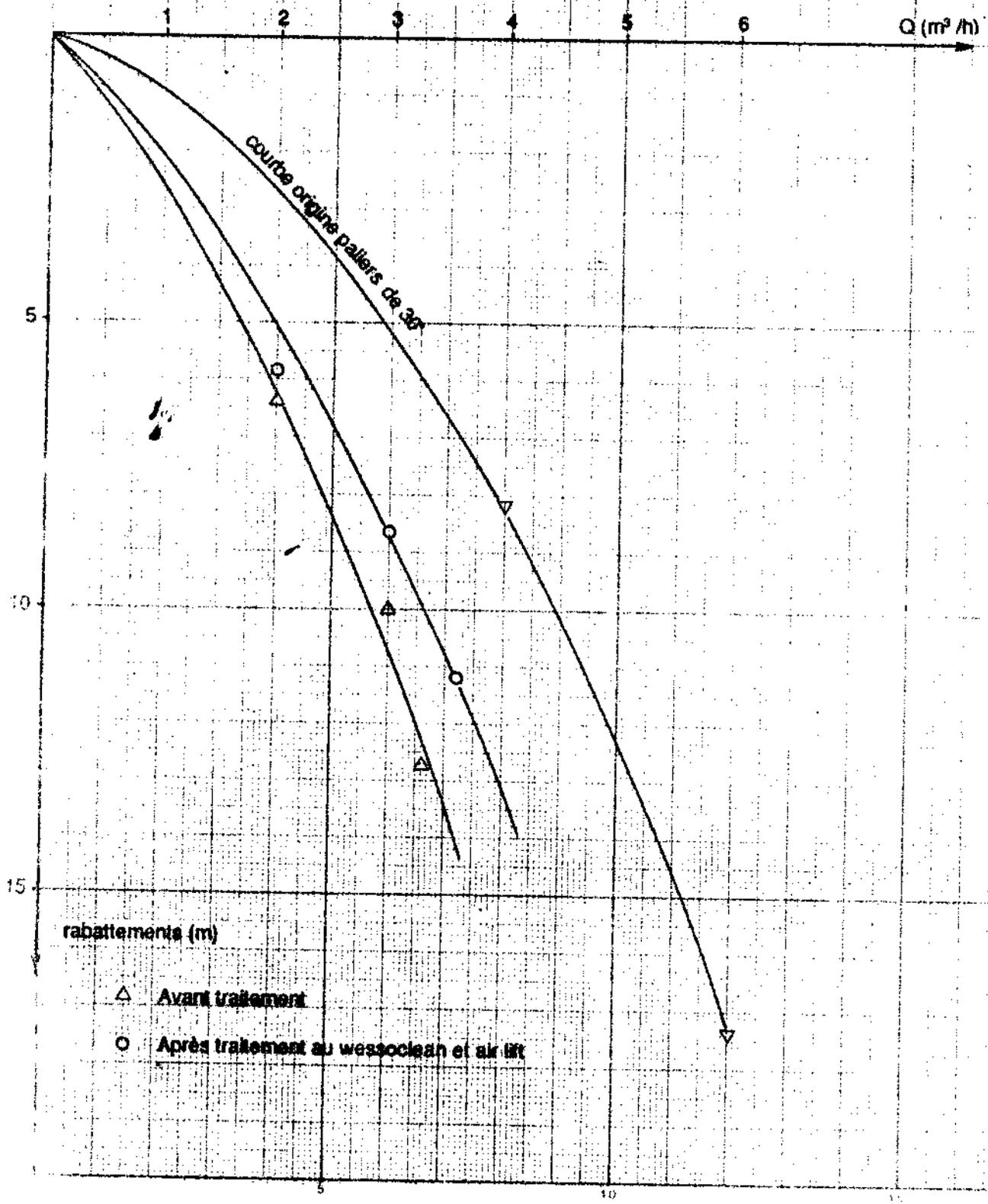
Par contre, les dépôts blanchâtres sur les faces inférieures des fentes entre 38 et 40 mètres n'ont pas été détruits par l'acide.

(1) Ce pourrait être aussi le fait d'une erreur sur la mesure des niveaux.

**COURBES CARACTERISTIQUES DU FORAGE F6 DE KOUPELA
AVANT ET APRES LES TRAITEMENTS**



**COURBES CARACTERISTIQUES DU FORAGE F10 DE FADA N° GOURMA
AVANT ET APRES LE TRAITEMENT DE DECOLMATAGE**



De 47 mètres au fond du forage, partie qui n'avait pas été inspectée la première fois, il y a de fines particules qui bouchent 50 à 100 % de la hauteur des fentes. Ces particules, facilement mobilisables puisqu'elles bougent au passage de la caméra, n'ont cependant pas été éliminées par le nettoyage à l'air-lift qui a eu lieu juste avant l'inspection télévisée. Il pourrait s'agir d'éléments sableux et argileux provenant de l'altération et qui sédimenteraient au fond du forage.

Entre 51,50 et 52 m il y a des éléments accrochés aux fentes des crépines qui pourraient être du PVC comme sur le forage F6 de Koupela.

**TABEAU N°9 : EVOLUTION DU DEBIT SPECIFIQUE APRES LES TRAITEMENTS
SUR LE FORAGE F8 DE KOUPELA**

	Paliers	Niveau statique	Débit Q m ³ /h	Rabattement s m	Rabattement corrigé m	Débit spécif. Q/s m ³ /h/m	Amélioration successive du Q/s %	% du Q/S à l'origine (1)
Essai par paliers à l'origine : 4 paliers de 1h non enchainés.	1	8	3	2,5		1,2		
	2		6	4,8		1,25		
	3		9	9,3		0,98		
	4		12,4	14,1		0,88		
Essai par paliers type origine 3 paliers de 1h enchainés.	1	9,3	3,18	4,55		0,69		57 %
	2		5,45	9,3	8,6	0,63		
	3		5,6	12,8	11,3	0,49		39 %
ESSAIS PAR PALIERS NORMALISES (TYPE CIEH-BURGEAP)								
Avant traitement	1	8,70	3	4,9		0,61		57 %
	2		4,15	8,9	8,6	0,61		
	3		5,6	13,5	13,3	0,49		
Après 1er traitement au Wessoclean	1	9,35	3	4,3		0,70	+ 15 %	70 %
	2		3,8	8,25	8,05	0,63	+ 3 %	
	3		5,4	12,35	12,05	0,45	+ 2 %	
Après traitement aux polyphosphates	1	9,8	3	4,4		0,68		68 %
	2		4	8,4	8,25	0,64		
	3		5,3	12,9	12,55	0,42		
Après 2ème traitement au Wessoclean	1	9,55	3,1	4,15		0,75	+ 10 %	71 %
	2		4,5	8,2	8,10	0,74	+ 16 %	
	3		5,8	11	10,6	0,55	+ 17 %	
Après traitement à l'acide Chlorhydrique	1	9,85	3,3	4,10		0,80	+ 7 %	76 %
	2		4,3	5,9	5,75	0,75	+ 1 %	
	3		8,2	12,55	12,3	0,50		
	1	10	9	10,65		0,85(2)	(+ 145 %)	+ 12 %
	1	9,49	4,2	8,94		0,80		55 %
	2		6,25	18,86	18,76	0,33		
	3		8	41,25	40,64	0,19		

(1) Après une heure de pompage au premier palier.

(2) Débit spécifique après une heure de pompage : 1,08 m³/h/m -
débit spécifique à l'origine après une heure de pompage à 9
m³/h = 0,96 m²/h/m.

TABEAU N° 10 : EVOLUTION DU DEBIT SPECIFIQUE APRES LE TRAITEMENT AU WESSOCLEAN SUR LE FORAGE F10 DE FADA N'GOURMA

Essai normalisé par paliers	Paliers	Niveau statique	Débit Q m ³ /h	Rabattement s m	Rabattement corrigé m	Débit spécif. m ³ /h/m	Amélioration du Q/s	% du Q/s à l'origine (30' de pompage)
Avant traitement	1	14,20	2	8,4		0,31		< 50 %
	2		3	10,05	10	0,30		
	3		3,3	13,35	12,75	0,28		
Après traitement au Wessoclean	1	12,85	2	5,85		0,34	+ 10 %	65 %
	2		3	8,7	8,65	0,35	+ 17 %	
	3		3,6	11,7	11,2	0,32	+ 23 %	

3.4. Conclusions sur les forages de Fada N'Gourma et Koupela

Parmi 5 forages testés, présentant des chutes de débit en exploitation, seuls deux, crépinés en face de l'altération, ont présenté une diminution nette de leurs caractéristiques à l'origine, indice d'un colmatage.

L'observation de la coupe géologique, de l'équipement de l'ouvrage, l'inspection des crépines par caméra et le sable granitique remonté au brossage des crépines, indiquent que le colmatage provient en grande partie d'éléments de l'altération entraînés dans les fentes des crépines lors des dénoyages successifs de celles-ci en pompage.

L'ensablement des crépines, à l'origine du colmatage est la cause principale de la chute du débit de ces ouvrages.

Toutefois, la présence de quelques dépôts dans les fentes des crépines indique aussi l'existence possible d'un colmatage d'origine chimique.

Mais l'incidence de celui-ci sur le débit des ouvrages serait actuellement très faible puisque les dépôts existent aussi sur les forages ne présentant pas de diminution de leur caractéristique (F3 Koupela).

On ne connaît pas la nature de ces dépôts, aucun n'ayant pu être récupéré pour être analysé, et on ne sait pas non plus comment ils vont évoluer et s'ils peuvent à l'avenir obturer totalement les fentes des crépines.

Pour les trois autres forages, la chute du débit en exploitation provient vraisemblablement de la nature de l'aquifère confiné dans les fissures profondes du socle sans réalimentation à partir de l'altération sous-jacente dénoyée, à laquelle s'ajoute l'influence des pompages sur des forages proches et la baisse générale de la nappe liée à la diminution de son alimentation à la suite de pluviométries déficitaires pendant plusieurs années de suite.

Les deux essais de pompage d'une journée réalisés dans le cadre de l'étude, sur les forages F3 et F6 de Koupela ont montré sur le forage F6, en pompage, une chute du niveau dynamique due à un dénoyage de la venue d'eau dans l'altération et la présence d'une limite étanche à la remontée. Sur le forage F3, aucune anomalie n'est apparue pendant la durée de l'essai.

Le vieillissement des forages correspond donc, semble-t-il, dans le cas des forages captant l'altération, à un équipement et à un régime d'exploitation mal adaptés et dans celui des forages captant les fissures du socle à une surexploitation ou à un assèchement de la ressource.

Toutes les tentatives de réhabilitation par des traitements chimiques des deux forages colmatés n'ont donné aucun résultat.

Les traitements mécaniques par brossage des crépines ont donné des résultats, mais ceux-ci ne peuvent être considérés comme totalement satisfaisants.

Sur le forage F6 de Koupela on a noté une bonne amélioration des caractéristiques du forage mais celle-ci a été de courte durée, le forage s'étant à nouveau colmaté rapidement par des éléments de l'altération.

Sur le forage F10 de Fada N'Gourma, l'amélioration du débit spécifique n'est que d'une vingtaine de pourcents et, comme sur le forage de Koupela, celle-ci pourrait n'être que temporaire.

4. CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

4.1. Conclusions

Le vieillissement des forages en zone de socle cristallin a été étudié sur un échantillon de 58 forages répartis au Burkina Faso (34), en Côte d'Ivoire (13) et au Mali (11).

Outre les formations cristallines captées, ces forages ont également en commun leur mode de réalisation qui est identique à celui des ouvrages destinés à l'hydraulique villageoise. Pourtant les forages du Burkina Faso et de Côte d'Ivoire sont exploités avec des pompes motorisées pour l'alimentation des centres secondaires. Les forages du Mali sont équipés de pompes à motricité humaine et alimentent des villages.

La durée d'exploitation des forages d'hydraulique urbaine est extrêmement variable et il est difficile d'indiquer une durée de vie, à partir d'ouvrages qui n'ont pas été réalisés selon les règles de l'art.

Au Burkina Faso, si 1 forage sur 5 ne présente pas de problèmes après 5 années d'exploitation, les 2/3 des ouvrages ont été abandonnés ou ont vu leur débit diminuer fortement après 2 à 4 années d'exploitation.

En Côte d'Ivoire, les forages sont exploités depuis 2 à 6 ans et l'on note sur quelques ouvrages une diminution du débit après 2 à 3 années d'exploitation (plus de 1 sur 4 en 2 ans), les forages d'hydraulique villageoise du Mali ont été exécutés depuis 9 à 2 ans et les dépôts de plusieurs mètres au fond des forages ont eu lieu entre 1 an et 7 ans.

Il n'est pas raisonnable d'envisager le renouvellement d'un ouvrage après 2 à 4 années d'exploitation et l'on doit s'attacher à faire réaliser des ouvrages de meilleure qualité et à mieux suivre et contrôler l'exploitation. Dans ce but, nous donnons ci-après des recommandations pour la réalisation, l'équipement des forages et la surveillance de l'exploitation.

Le comblement des forages par des produits argileux et sableux et les venues de boue mentionnées dans les données des ouvrages de la Côte d'Ivoire et du Mali font apparaître que les problèmes rencontrés dans l'exploitation de ces points d'eau ne sont pas à proprement parler dus à un vieillissement des forages mais proviennent d'équipements mal adaptés ou défectueux qui sont :

- des crépines en face de niveaux altérés argileux ou fins sans une ouverture et un massif de gravier correctement calibrés,
- un équipement mixte comportant un tubage PVC en face de l'altération et le trou nu dans le socle ; l'isolement des altérites à la base du tubage étant assuré par des packers ou une réduction du diamètre du forage dans le socle qui, dans les deux cas, se révèle mauvais à la longue.

Ces phénomènes de comblement et de venues de boue ne sont pas signalés sur les forages du Burkina Faso, ce qui ne signifie pas qu'il n'y en a pas.

L'analyse des données de ces ouvrages ne permet pas de définir la cause de la diminution du débit. Les essais de pompage réalisés sur 5 forages pour appréhender l'importance du colmatage ont montré la chute de la caractéristique sur 2 forages seulement et sur ceux-ci qui captent en partie l'altération, on a pu observer que des éléments sableux provenant des altérites obstruaient les fentes des crépines.

Ceci semble confirmer, après les remarques sur les forages de Côte d'Ivoire et du Mali, que la principale cause du vieillissement des forages dans le socle cristallin est un colmatage mécanique des crépines par des produits de l'altération, qui résulte d'un équipement mal adapté aux niveaux captés.

Cependant, le diagnostic télévisé des 5 forages a montré dans pratiquement tous les forages, la présence de dépôts sur les fentes des crépines, mais ces derniers ne semblent pas avoir pour le moment d'incidence sur le débit des ouvrages.

L'expérience de réhabilitation des 2 forages présentant une chute du débit spécifique par des traitements physico-chimiques est restée sans résultat.

Le broyage des crépines qui a permis de remonter du sable coincé dans les crépines a donné un résultat mais celui-ci ne peut être considéré comme entièrement satisfaisant, d'autres éléments sableux venant à nouveau très rapidement boucher les fentes.

Après cette étude, il n'est donc pas possible d'établir des consignes pour la réhabilitation des forages.

4.2. Recommandations

4.2.1. Réalisation et équipement des forages

L'équipement des forages doit être adapté aux niveaux aquifères à capter :

- mettre en place un tubage PVC de diamètre 6" dans un trou foré en 8" dans le socle,
- capter l'altération, si elle a plus de 20 mètres d'épaisseur et si elle est noyée sur au moins 10 mètres, seulement sur quelques mètres à la base où elle est la plus grossière,
- ne pas placer le sommet des crépines ni capter des venues d'eau trop près du niveau statique probable à la fin de la saison sèche, afin de ne pas les dénoyer en exploitation,

- adapter l'ouverture des fentes des crépines et le massif de gravier à la granulométrie de l'altération lorsque celle-ci est captée. Le massif de gravier devrait avoir 7 cm d'épaisseur et être constitué d'éléments roulés siliceux,
- choisir des ouvertures de fentes des crépines le plus grand possible lorsque des fissures propres du socle sont seules captées. Le gravier qui sert juste au calage du tubage doit être aussi constitué d'éléments grossiers.

Il doit aussi être adapté à l'exploitation des points d'eau. Les ouvrages devant être exploités avec des pompes motorisées doivent être équipés sur toute leur hauteur et pas seulement en face de l'altération avec à la base du tubage un système pour isoler la nappe des altérites peu efficace semble-t-il et qui se détériore avec les vibrations provoquées à chaque mise en route de la pompe.

Sur les forages d'hydraulique villageoise, le trou peut être à la rigueur laissé nu dans le socle mais à condition que :

- les formations soient de nature granitique et pas fissurées au sommet du socle,
- le niveau dynamique en exploitation se situe au-dessus de la base du tubage et du système mis en place pour assurer l'étanchéité.

Le tubage PVC représente 12 % du prix de revient d'un forage (échecs inclus), et un mètre de crépine 17 % du prix d'un mètre de forage positif, mais, la recherche du coût minimum des ouvrages ne doit pas se faire aux dépens de leur qualité. Le seul véritable objectif est le coût du mètre cube d'eau produit qui dépend 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). (1)

(1) Collections Techniques Rurales en Afrique.
Forage d'eau. Matériel et techniques mis en oeuvre en Afrique Centrale et de l'Ouest. CIEH - BURGEAP - 1983 - Pages 109 à 111.

4.2.2. Détermination des conditions d'exploitation

A la réception des ouvrages, les essais de débit pour déterminer les conditions d'exploitation doivent comporter un pompage par paliers et un pompage de longue durée, séparés par un temps suffisant pour permettre la remontée de la nappe jusqu'au niveau statique. Pendant ces essais, l'évolution du niveau à distance du pompage doit être suivi sur 1 ou 2 piézomètres.

Le pompage par paliers comprend 3 ou 4 paliers de débits croissants, de durée 2 heures chacun.

Ces paliers peuvent être enchaînés ou non. Leur débit est déterminé en fonction du débit instantané en fin de forage ou au développement de l'air-lift de la manière suivante :

- 1/3, 2/3 et 3/3 de ce débit instantané pour un essai avec 3 paliers,
- 1/4, 1/2, 3/4 et 4/4 du même débit instantané pour un essai avec 4 paliers.

A partir de cet essai, on établit la courbe caractéristique du forage et son débit critique.

Cette courbe pourra être comparée à celles établies par la suite lors de problèmes d'exploitation pour apprécier la chute du débit spécifique de l'ouvrage.

Le pompage de longue durée dure 72 heures, temps au bout duquel on peut observer une stabilisation du niveau dynamique.

Le débit du pompage est constant et il ne doit pas être modifié en cours d'essai. Pour cela, il est déduit des résultats de l'essai par paliers précédents afin de ne pas dénoyer en fin d'essai les crépines si l'altération est captée, ou la première venue d'eau importante.

Cet essai sert à calculer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère et à appréhender sa configuration.

Les pompages doivent être faits avec beaucoup de rigueur et de précision pour la mesure des niveaux et du débit. Il faut notamment prévoir dans le forage de pompage un tube de mesure du niveau pour la sonde.

Le report des points de l'évolution du rabattement sur les graphiques appropriés doit se faire en cours d'essai de manière à détecter les anomalies.

Le débit d'exploitation est calculé à partir des résultats de ces deux essais en prenant en compte :

- le niveau statique de la nappe à la fin de la saison sèche,
- le niveau dynamique maximum admissible pour ne pas dénoyer en exploitation les crépines si l'altération est captée ou la première venue d'eau importante dans le socle,
- l'influence des pompages sur les forages voisins.

Lorsque à la fin du pompage de 72 heures le niveau dynamique n'est pas stabilisé dans le forage, on déterminera le débit d'exploitation avec la méthode CIEH-BURGEAP, établie pour les forages d'hydraulique villageoise, en extrapolant la pente de l'évolution du rabattement spécifique jusqu'à 8 mois d'exploitation à 24, 12 ou 8 heures par jour.

Pour les forages où l'altération sur le socle est dénoyée ou noyée sur une hauteur inférieure à 5 mètres, on retiendra comme débit d'exploitation la moitié de celui déterminé par extrapolation de la pente.

Si le niveau dynamique est stabilisé à la fin du pompage de 72 heures, on calculera le débit d'exploitation à partir des paramètres hydrodynamiques de la nappe déduits de l'essai et des pertes de charges probables à partir de la courbe caractéristique.

Là aussi, si l'altération est dénoyée ou insuffisamment noyée, il faut être prudent et retenir dans un premier temps la moitié du débit trouvé.

Il est préférable de choisir un débit plus faible avec un rabattement moindre, mais avec une durée de pompage plus longue pour obtenir le volume d'eau désiré.

4.2.3. Surveillance de l'exploitation

En exploitation, il faut continuer à suivre l'évolution du niveau à distance du pompage sur les piézomètres réalisés pour les essais de pompage. Mais il convient également de suivre le niveau de la nappe sur des piézomètres non influencés par les pompages, mais implantés cependant sur des zones fissurées de perméabilité identique à celle des ouvrages exploités.

Les débits d'exploitation pourront alors être réajustés en fonction du niveau de la nappe et de son alimentation par les pluies.

Ces mesures de niveau devraient avoir lieu 3 fois par an en fonction des saisons sèches et pluvieuses, par exemple, en février, juin et octobre.

Pour que ces relevés soient utiles, ils doivent être faits, archivés et interprétés par les services qui exploitent les forages.

ANNEXES

ANNEXE 1

**MODELES DE FICHES DE RENSEIGNEMENTS SUR FORAGES
ET ZONES DE CAPTAGE**

CIEH Vieillessement des forages en zone de socle	FICHE DE RENSEIGNEMENTS SUR SITE D'EXPLOITATION	N° FICHE S :	PAYS
--	---	-----------------	------

Fiche remplie par : M. _____ Fonction : _____
 Organisme : _____

IDENTIFICATION DU SITE

Ville : _____ Coordonnées : X = ° ' " "
 Nombre d'habitants : _____ Y = ° ' " "
 Province : _____ Z = m
 Département : _____

SCHEMA DU SITE (Joindre un schéma, en précisant l'échelle, et l'implantation de chaque captage dans le cas d'un groupe de forages)

Forage isolé : (*)
 Champ captant : (*) Nombre de forages : _____
 * Cocher la case Nombre de piézomètres : _____

DESCRIPTION DU SITE

Géologie

Aquifères captés		Nature du socle	
Alluvions :	<input type="checkbox"/> (*)	Granito-gneiss :	<input type="checkbox"/> (*)
Cuirasse latéritique :	<input type="checkbox"/> (*)	Schistes :	<input type="checkbox"/> (*)
Base altérations :	<input type="checkbox"/> (*)	Grès primaires :	<input type="checkbox"/> (*)
Socle :	<input type="checkbox"/> (*)	Autres :	<input type="checkbox"/> (*)

Profondeur moyenne du socle : _____ m
 Superficie approx. bassin versant : _____
 Observations : _____

Géomorphologie

Plaine alluviale :		Mi-pente :	
Bas-fond :		Plateau :	
Bas de pente :		Autres :	

Observations : _____

EXPLOITATION GLOBALE DU CHAMP CAPTANT

Année	Nombre de forages		Vol. pompé (m ³ / an)	Pluviométrie annuelle (**)
	Existants	Exploités		
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				

(**) Relevée à :

CIEH Vieillessement des forages en zone de socle	FICHE DE RENSEIGNEMENTS SUR SITE D'EXPLOITATION (suite)	N° FICHE S :	PAYS
--	---	-----------------	------

DESCRIPTIF DES PROBLEMES RENCONTRES

Chutes de débit : Description, Commentaires

Variation de la qualité des eaux : Description, Commentaires

Renseignements complémentaires :

* Description des éventuelles incrustations, corrosions, ou dépôts observés :

- Tuyauterie :

Pompe :

- Réservoirs :

* Evolution des niveaux statiques sur piézomètres : (ou à défaut avant pompage sur forage d'exploitation)

N° mesure	Date	Forage de mesure	Niveau statique	Niveau avant pompage
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

ANNEXE 2

TABLEAUX RECAPITULATIFS DES DONNEES RECUEILLIES
ET TABLEAUX DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES
DES FORAGES DU BURKINA FASO, DE COTE D'IVOIRE ET DU MALI

BURKINA FASO

**PRINCIPALES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES
DES FORAGES DU BURKINA FASO**

DESIGNATION	N° FORAGE	ANNEE EXECUTION	ENTREPR. OU PROJET	EQUIPEMENT			TYPE DE GRAVIER
				NATURE	DIAMETRE	TYPE	
FADA N'GOURMA	F1	1981	SADE		400 mm	Total	6.12 mm
	F2	1977	HER	PVC	4"1/2	"	Concassé 3/8
	F3	1977	HER	"	6"	"	"
	F4	1982	HER	acier	4"	"	8.5
	F5	1985	BUVOGMI	PVC	4"1/2	"	Concassé 3/8
	F6	1989	"	"	"	"	"
	F7	1985	"	"	"	"	"
	F8	1983	"	"	"	"	"
	F9	1983	"	"	"	"	"
	F10	1988	"	"	"	"	"
	F11	1977	HER	"	"	"	"
KOUFELA	F1	1977	HER	PVC	4"1/2	Total	
	F2	1981	SADE	PVC	4"1/2	"	Concassé 3/8
	F3	1983	BUVOGMI	PVC	4"1/2	"	"
	F4	1983	"	"	"	"	"
	F5	1983	"	"	"	"	"
	F6	1987	ONPE	"	6"	"	"
	F7	1988	FORAFRIQUE	"	8"	"	2.4 mm
TENKODOGO	F1	1981	SADE		400 mm	Total	6.12 mm
	F2	1981	"		"	"	"
	F3	1977	HER	PVC	6"	Suspendu	Concassé 3/8
	F4	1982	BUVOGMI	PVC	4"1/2	Total	"
	F5	1982	"	PVC	"	"	"
	F6	1986	BUMIGES	PVC	"	"	"
PO	F1	1980	SADE		400 mm	Total	6.12 mm
	F2	1978	AVV	PVC	4"1/2	Suspendu	Néant
	F3	1984	BUVOGMI	PVC	4"1/2	Total	Concassé 3/8
	F4	1984	"	"	"	"	"
	F5	1984	"	"	"	"	"
	F6	1984	-	PVC	8"	"	"
KOMBISSIRI	FK1	1981	AFORCON	PVC	4"1/2	Total	
	FK5	1981	"	"	"	"	

DONNEES DES FORAGES DE FADA N° GOURMA

Zone de captage	Forage	Date de mise en service	Date arrêt	Durée exploitation	Caractéristiques à l'origine						Evolution de l'exploitation							OBSERVATIONS													
					Prof m	Epais alté. m	Prof VE m	Niveau capté	Niveau statique (date)	Débit m3/h	Q/s m3/h/m	Année	Débit m3/h	h/j	Débit m3/j	"NS" avant pompage	ND		Q/s m3/h/m	Vitesse entrée eau crépine mm/s											
N° 1	F1	11/03/82	11/04/84	2 ans	45	14		Socle: 20,9 à 44,9	19,3 (05-81)	5,2 ?			89									Colonne PVC Ø 400 mm pompe retirée									
	F2	11/03/82	08/85	3,5 ans	59,8	15,2	36	Socle: 35,5 à 55,5	18,6 (05-77)	8 ?												Forage détérioré									
	F3	11/03/82	09/04/87	5 ans	39	25,5		Socle: 25,5 à 35,5	14,9 (12-77)	6 ?												Pompe retirée									
	F4	19/06/82	10/09/85	3,5 ans	21,1	18		Alté. + Socle: 11,1 à 21,1	10 (06-82)	6,5 ?												Puits approfondi à partir de 15m. Tubage acier Ø 100 mm Pompe retirée									
	F5	11/02/84	03/08/86	2,5 ans	45,4	20	27	Socle: 23 à 45,4	20,3 (12-83)	5 (forat.) 4 (1/2 h) 5 (1/2 h) 6 (1/2 h) 8 (8 h) Qexp: 5,5	1,1 (st) 1,1 (st) 0,97 (nst) 0,39 (nst)									35,85		Pompe retirée Forage comblé T=1,2x10 ⁻⁵ m2/s									
	F6	07/04/84	11/08/87	3 ans	52	20	38 49,7	Socle: 34 à 52	25 (12-83)	8 (forat.) 6 (1/2 h) 7,2 (1/2 h) 8,2 (1/2 h) 7,2 (10 h) Qexp: 6,5	0,65 (st) 0,59 (nst) 0,55 (nst) 0,51 (nst)			84 85 86 87 88 89	6,5 6,5 3,1 1,2 arrêt	12 10 15 19	78 65 45 22,8					37	48,9 ?	0,25	2,8	Pompe retirée T=4x10 ⁻⁵ m2/s Débit d'exploitation 2 m3/h					
	F7	23/03/84	En exploitation	> 5 ans	62	32	34,5 55,8	Socle: 22 à 62 m	19,3 (12-83)	7 (forat.) 6,4 (1/2 h) 7,2 (1/2 h) 8,2 (1/2 h) 7,2 (10 h) Qexp: 6,5	0,47 (st) 0,5 (st) 0,4 (nst) 0,46 (nst)			84-85 86 87(01 à 04) 87(05 à 12) 88 89(01 à 09)	?	98 21 21,5 21,5 15 3,7	28,8 à 87,2 71 45,1 40,5 46,5							50 (06)	0,13	0,8	T=5x10 ⁻⁵ m2/s Débit d'exploitation 2 m3/h				
	F8	05/04/84	12/89 (panne pompe)	5,5 ans	61,9	32	37,5	Alté. + Socle: 31 à 61,9	20,2 (12-83)	3 (1/2 h) 4 (1/2 h) 5 (1/2 h) 5 (10 h) Qexp: 4,5	0,38 (st) 0,38 (st) 0,29 (nst)			84-86 87 88 89	?	21,8 14,4 20	52,5 33,1 28,9 (06) 28,9 (06)							52,9 51,9	0,09 0,08	0,3	T=2,9x10 ⁻⁵ m2/s				
	F9	06/03/84	En exploitation	> 6 ans	60	25	39,6	Socle: 36 à 60	25 (12-83)	7 (forat.) 7,2 Qexp: 7	0,81			84-85 86 87 88 89	?	15,8 20,4 14,6 20	50,5 57,1 44,2 48									1	Débit d'exploitation 5 m3/h				
Isolé à 2 km du champ de captage N° 1	F10	09/11/85	En exploitation	> 4 ans	58	25	25 et 35	Socle: 28,6 à 56	5,6 (12-83)	6 (forat.) 4 (1/2 h) 6 (1/2 h) 8 (1/2 h) 5,5 (10h) 8 h/jour Qexp: 7	0,5 (st) 0,35 (nst) 0,3 (nst) 0,21 (nst)			86 87 88 89 90	5,7 4,3 4,3 3,2 2,5	15,4 19 17 18,8 11	87,8 81,7 76,5 60,1 27,5											33,8 48,3 48,1 48,9	0,24 0,14 0,10	1,6	T=2,3x10 ⁻⁵ m2/s Débit d'exploitation 5 m3/h
Isolé à 1,25 km du champ de captage N° 1	F11	05/10/87	En exploitation	> 2 ans	36,7	20	19,5	Alté. + Socle: 19,4 à 35,4	11,4 ? (04-77)	12 (forat)			87 (3 mois) 88 89	7 7 6,7	8,8 18,2 19,2	81,6 113,3 127,3	10,1 21 21,8											23,8 26,8 27,9	1,5 1,2 1,1	3,4	Ancien forage hydraulique villageoise Débit d'exploitation 12 m3/h

DONNEES DES FORAGES DE KOUPELA

Zone de captage	Date de mise en service	Date d'arrêt	Durée exploitation	Caractéristiques à l'origine			Evolution de l'exploitation						OBSERVATIONS									
				Prof. Epais a/cà, m	Prof. VE m	Niveau capté	Niveau statique (date)	Débit m3/h	Q/s m3/h/m	Année	Débit m3/h	h/j		Débit m3/j	"NS" avant pompage	ND	Q/s m3/h/m	Vitesse entrées eau captage cm/s				
N° 1 F1-32 m F1-300 m F1-F3 : F2-400 m F2-F3 : 500 m	1982 02/89	03/02/88 En exploit.	6 ans	54	15	Niveau capté : 4,33 (11-77)						82-83	?	?	?			0 exploitation 4,5 m3/h				
												84	6,5	9	58,5	14,8 (06) 18,5 (12) 17,0 (01) 21,95 (06) 24,45 (01)						
												85	9,5	10,4	65-84,5							
												86	2,16 2,3 arrêt	13 18	44	30,5 (08) 31,1 (01)						
												87	5,25	9	47,2							
F2	1982	03/02/88	6 ans	56	18	Socle: 11,05 (81) 44-56	7,5					82-83	?	?	?							
												84	2,5	9	22,5	16,8 (06) 21,4 (12) 33,25 (06) 35,25 (01) 31,70 (01) 34,85 (01)					1,6	
												85	2,8	13	36,4							
												86	1,5	15	22,5							
												87	2,5	6	15							
F3	1983	03/02/88	5 ans	56	18	Socle: 20,7 (08-83) 27-56	5,1 (for.) 3 (1/2 h) 4 (1/2 h) 4,5 (1/2 h) Cexp: 4,5	0,53 0,45 0,47				83-85	7	7	21,9							
												86	1,48	15	11,2					0,4		
												87	1,25	9								
												88	1,5	15	22,5							
												89	2,5	6	15							
N° 2 F4-F5 : 200 m	1984	En exploitation	> 6 ans	50	18	Socle: 11,25 (11-83) 28-50	12 (forat) 4 (1/2 h) 6 (1/2 h) 10,3 (nst) 10,3 (8h) Cexp: 8	2,2 (st) 1,75 (st) 1,72 (nst) 1,35 (nst)				84-85	7	7	120,3			7 = 2x10 ⁻⁴ m2/s 5 m3/h				
												86	8,3	14,5	103,5					2,7		
												87	5,45	19	88,6							
												88	4,5	14								
												89	4,9	14								
F5	1984	En exploitation	> 6 ans	44	10	Socle: 19,7 (11-83) 32-44	15 (for.) 8 (1/2 h) 12 (1/2 h) 12 (5 h) Cexp: 8	1,71 (st) 1,83 (st) 1,69 (st) 1,3				84	7	7	60			1 = 1,5x10 ⁻⁴ m2/s 5 m3/h 3 h/jour				
												85	3,1	10	34							
												86	5,3	11	23,6							
												87	4,3	4,5	18,5							
												89	4,4	4,3	17,6							
N° 3 F6-F7 : 600 m	1987	31/12/87	1,5 an	63,3	20,57 (15 a et 25)	Alt.: 9,6 (09-87) 12,5-31,2 Socle: 37,1 60,4	14 (fora.) 3 (1 h) 6 (1 h) 9 (1 h) 12,4 (1 h) 5 (24 h) Cexp: 12	1,25 0,97 0,88 0,5				88	7	7	126 à 50,4			Analyse 10-87 T = 25°C μ = 780 μs/cm PH = ? TH = 38,2 TAC = 4,52 meq/l HC03 : 275,72 mg/l Cl = 71 mg/l Ca++ = 97,2 mg/l Mg++ = 28,5 mg/l TA = 0				
												89	7	10	35,1							
												89	1,25	15	146,4							
												89	0,97	12	108,3							
												89	0,88	12	146,4							
F7	1989	25/01/89	En exploitation	56	30	Alt.: 10,25 (03-88) Socle: 16-54	27 (fora.) 7 (12 h) 14 (27 h) 22 (12 h) 29 (35 h) Cexp: 12	3,7 (nst) 3,4 (nst) 2,64 (nst)				89	5,86	12	108,3			0 exploitation : 10 m3/h				
												90	12,2	12	146,4							
												90	3,7	12	108,3							
												90	3,4	12	146,4							
												90	2,64	12	108,3							

* 10 x vides

DONNEES DES FORAGES DE TERKODOGO

Zone de captage	Forage	Date de mise en service	Date arrêt	Durée exploitation	Caractéristiques à l'origine						Evolution de l'exploitation							OBSERVATIONS				
					Prof m	Epais alté. m	Prof VE m	Niveau capté	Niveau statique (date)	Débit m3/h	Q/s m3/h/m	Année	Débit m3/h	h/j	Débit m3/j	"NS" avant pompage	ND		Q/s m3/h/m	Vitesse entre au crapine m/s *		
N° 1	F1	11/81	07/05/86	4,5 ans	29,5	26,5		Alt. 33-25,3	3,5 (08-81)				82-83 84 (10-12) 85 86 89	? 7,5 6 arrêt	3 0,5 0,5	15 3,7 3						Puits approf. Colonne PVC diam. 400 mm Pompe retirée Un nettoyage air-lift sans résultats
	F2	11/81	10/10/86	5 ans	29	22,5		Alt. 4,8 - 24,8	2,2 (08-81)				82-83 84 (8-12) 85 (1-4) (5-11) 86 89	? 4,7 5,2 7,4 2,35 arrêt	5,75 2,4 0,5 0,5	27 12,5 3,7 14						Puits approf. Colonne PVC diam. 400 mm Pompe retirée Un nettoyage air-lift sans résultats
	F3	11/81	En exploitation un arrêt momentané en 87-88	> 7 ans	54,5	13,5	41	Soacle: 37-54,5	1,5 (11-77)				82 83 84 (5 mois) 85 86 87 (6 mois) 88 (6 mois) 89	5,2 7,5 6,6 5,3 3,7 2,7 4,5 2,7	12 15 8,6 14 16,5 16 15 16,5	62,5 76,5 57 74 61 43 67,5 44,5	10 13 15 16 20 22 23 (07)	25 25 30 32 25 ? 34	0,35 0,35 0,44 0,33 0,74 0,28 0,25			Tubage 6" de 0 à 37 m ensuite trou nu dans granite sain. Capté une seule fissure à 41 m. Un nettoyage air-lift sans résultats
	F4	30/12/82	En exploitation	> 7 ans	62	21 ?	31 50	Alté.+ soacle: 18-62	14,7 (12-88)	18 (for.) 3 (12 h) 5,1 (12h) 7,3 (12h) 10,8 (12h) (36h)	5 4 2,9 2,35 1,94		84 85 86 87 88 89 (8 mois)	9,6 9,35 7,85 6,7 6,65 7,7	9 14 18 19,5 19,5	86,4 131 141 131 130 146	10 17 31 14,5 23	16 35 38 30	1,92 0,52 1,12 0,32 1,1			
	F5	30/12/82	En exploitation	> 7 ans				Identique à F4					83 84 (3 mois) 85 86 87 88 89	? 9,8 3,4 5,9 5,2	8 13,7 10 10,8 10,6	88 129 141 117 110 99	10 ? 17 31 14,5 23	15 35 38 30	1,95 0,52 1,05 0,27 0,74			Juste à côté de F4 avec lequel il est double
Isolé à 2250 m de la zone de captage N° 1	F6	27/03/87	En exploitation	> 2,5 ans	40	20 ?	25,4	Base site.+ soacle: 19 à 40	= 5 (5-86) 9,7 (12-88)	18 (for.) 3 (12 h) 5 (12 h) 7,3 (12h) 9 (12 h) (36 h)	2,36 1,87 1,58 1,36 1,15		87 (8 mois) 88 89 (8 mois)	9,25 9,6 7,5	12 13 13,5	111 103 116	8 14,5 16 17,65 (12)	13,5 26 30	1,68 0,75 1,87			

* 10 % vides

DONNEES DES FORAGES DE KOMBISSIRI

Zone de captage	Forage	Date de mise en service	Date arrêt	Caractéristiques à l'origine							Evolution de l'exploitation							OBSERVATIONS		
				Prof m	Epais alté. m	Profondeur Venues d'eau m	Niveau capté	Niveau statique (date)	Débit m ³ /h	Q/s m ³ /h/m	Année	Débit m ³ /h	h/j	Débit m ³ /j	"NS" avant pompage	ND	Q/s m ³ /h/m		Vitesse entre eau crépine mm/s *	
	FK1		En exploitation	88	20 ?	23 à 45 49, 54, 60 72 et 73	Socle	6,7(05-81)	7,8(for.) 8 6	0,33 0,54		1988 1989	11,5 10,95	3,2 7,3	37 80	27 (08)	32 (06)			Débit moyen d'exploitation sur 16 mois : 11 m ³ /h
	FK5		En exploitation	82	30 ?	24-36 43-47 57-58	Base altér. +socle	10,15 (06-81)	4,7(for.) 3,8 4,9	0,20 0,17		1988 1989	4,4 6,4	0,6 5	5,3 32,6	27 (08)	30 (06)			Débit moyen des 11 premiers mois d'exploitation : 8,88 m ³ /h, ensuite 4,77 m ³ /h (5 mois)
	FU		10/89	49,4	27,6	21,6	Altér.	17,35 (03-01)	?			1988 1989	6,5 4,9	2,8 5,7	18 28	28 (08)	37 (06)			Gravier concassé 3/8 et latéritique

COTE D'IVOIRE

COTE D'IVOIRE

Ville	Forage	Géologie	Niveau capté	Débit m ³ /h (1)	NS (2)	ND (2)	Production			Fer mg/l	Observations
							Période	Annuelle m ³ /j	Débit moy/j m ³ /j		
Ayané	F1	granite	socle	12	17,2	33,3	88 (3 mois)	7181	78	0	Trou nu dans le socle Abandonné Abandonné Trou nu dans socle - remontée de boue en saison sèche Débit d'exploitation 7 et 4 m ³ /h en 1988.
	F2	granite	socle		38	-	89 (9 mois)	25335	104		
	F3	granite	socle	12	37,1	41	86 (3 mois)	19834	215	0,02	
							87	63814	175		
							88	58190	154		
						89 (9 mois)	21901	80			
Azaguie	F1 bis	Schistes	socle	(19,8)	10,4	41,6	85	32766	90	0,05	Paliers de 3h à 3 à 8 et 12 m ³ /h. Mn = 0,25 mg/l Trou nu dans le socle. Débit d'exploitation 12 à 18 m ³ /h 4 heures/jour en 85-86-87. 12 à 18 heures/jour en 88-89 Remontée de boue
				12			86	39890	109		
							87	70365	193		
							88	62267	170		
							89 (9 mois)	58448	214		
Betté	F1	Schistes	socle	23,7	10,5	15,5	86 (3 mois)	3913	42	<0,06	Remontée de boue. Ancien forage hydraulique villa- geoise qui était curé chaque année. Eau trouble Trou nu dans le socle.
							87	14500	40		
							88	16911(3)	46		
							89	14856(4)	54		
Bian- kouma	F1	Granite	socle	6	5,5	7,1	87 (3 mois)	12541	136	0	Altération 5m. Le débit est passé de 6 à 3 m ³ /h. Débit d'expl. 3m ³ /h 24h/j Altération 5m. Le débit initial de 18 m ³ /h est actuellement de 6 m ³ /h. Débit d'exploitation 6 m ³ /h. 24h/j.
							88	43406	119		
							89 (9 mois)	18028	59		
	F3	Granite	socle	(18)	4,8	-	86 (3 mois)	12315	134		
							87	42352	116		
							88	42670	117		
						89 (9 mois)	12708	46			

- (1) Débit à l'essai de pompage - Entre parathèses débit en fin de forage
(2) Niveaux à l'essai de pompage à l'origine
(3) Deuxième forage à partir d'octobre
(4) 2 forages

COTE D'IVOIRE

Ville	Fo- rage	Géologie	Niveau capté	Débit m ³ /h (1)	NS (2)	ND (2)	Production			Fer mg/l	Observations
							Période	Annuelle m ³ /j	Débit moy/j m ³ /j		
Krinjabo	F1 bis	Granite	alt. + socle.	-	24,7	-	86 (3 mois)	8901	75		Boue en saison sèche au même temps que la chute du débit. Débit d'exploitation de Fibis 8 puis 4 m ³ /h 12h/j jusqu'en 1986.4h/j en 1989.
							87	24214	66		
	88						20646	56			
	89 (9 mois)						4646	17			
	88 (3 mois)						4472	49			
F1	89 (9 mois)	16351	60								
Lopou							86 (3 mois)	16531	180		Aucune anomalie signalée. Débit d'exploitation 10 m ³ /j. 15h/j. Type d'équipement inconnu
							87	75459	207		
							88	72062	197		
							89 (9 mois)	43754	160		
Naféré	F1 bis	Gran- diorite	socle	(10) 6,8	18,1	41,9	87	24125	68		Venue de boue en saison sèche : eau trouble. Trou nu dans le socle. Débit d'exploitation 5 puis 4 m ³ /h 15h/jour et 22h/jour en 89.
							88	24806	68		
							89 (9 mois)	24009	68		
Tafiré	F2	Granito- gneiss	Alt. + socle	(9) 6,8	1,4	53,8	86 (3 mois)	6173	67	0,06	Trou nu dans le socle.
							87	35942	98		
							88	37493	103		
							89 (9 mois)	28064	103		
Sassan- dra	F5	Granite	terti- aire + socle	8	11,8	37,4					Trou nu dans le socle. Tertiaire 10 m ³ /h. Venue d'eau socle 1,4 m ³ /h.
Sikensi	F2	Schistes	socle	27,3		41,7	86 (3 mois)	2334	25	1,9	Trou nu dans le socle. Débit critique 12 m ³ /h
							87	36572	100		
							88	35287	97		
							89 (9 mois)	22124	61		

(1) Débit à l'essai de pompage - Entre parenthèses débit en fin de forage

(2) Niveaux à l'essai de pompage à l'origine

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES
DES FORAGES DE COTE D'IVOIRE

DESIGNATION	N° FORAGE	ANNEE EXECUTION	ENTREPR. OU PROJET	EQUIPEMENT			TYPE DE GRAVIER
				NATURE	DIAMETRE	TYPE	
AYAME	F1	1986		PVC	5"	Suspendu	
	F2	1986				*	
	F3	1986				*	
AZAGUIE	F1 b			*	*	*	
BETTIE	F1			PVC	*	*	
BIANKOUNA	F1	1976	FORACO CI	PVC	7"	*	
	F3	1976	FORACO CI	*	*	*	
KRINJABO	F1 b			PVC	5"	Total	
LOPOU	-	-	-	-	-	-	
HAFERE	F1 b	1984	Projet 51 centres	PVC	7"	Suspendu	
TAFIRE	F2	1982	SASIF	*	7"	*	
SASSANDRA	F5	1983	Projet 51 centres	*	7"	*	
SIKENSİ	F2	1983	*	*	7"	*	

MALI

MALI

FORAGES D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE EXPLOITES AVEC POMPE VERGNET

Village	Géologie	Niveau capté	Débit m ³ /h (1)	Observations	Origine colmatage
Sougoula N°2	Schistes	Base altérites	4,5	Dépôt d'argile 11,40 en 8 ans.	Ensablement
Digan N°2	Granito-gneiss	Base altérites	3,9	Dépôt d'argile et de sable 13m en 8 ans.	Ensablement
Sokourani N°2	Granito-gneiss	Base altérites socle	2,4	Dépôt sableux 8,50m en 2 ans.	Ensablement
Yanfoula N°10	Granodiorite	Altération	0,9	Dépôt d'argile 7m en 1 an.	Ensablement
Yanfoula N°12	Granodiorite	socle	7,2	Dépôt d'argile 0,35m en 1 an. Trou nu dans le socle.	Faible ensablement
Domba N°3	Granite	Socle fissuré	7,2	Dépôt d'argile et de sable 25m en 4 ans.	Ensablement Forage abandonné pour raisons techniques
Dalabani N°1	Granite	Base altérite	1,9	Dépôt d'argile et de sable 9m en 1 an. Trou nu dans le socle.	Ensablement
Kokélé N°2	Schistes	socle	4,2	Dépôt d'argile 8,8m en 7 ans. Trou nu dans le socle.	Ensablement et altération des schistes
Fakola N°3	Granite	Base altérite	2	Dépôt de sable et d'argile 4m en 7 ans. Trou nu dans le socle.	Ensablement
N'Tinbouyou Village SOS Enfance (2)	Schistes	Base altérite (filon de quartz)	2,8	Dépôt d'argile micacée. Trou nu dans le socle.	Ensablement
Bangolosso	Grès	socle	1,5	Comblement de 25,75m à partir sable d'altération des grès. Trou nu dans socle	Ensablement

(1) Débit air-lift. (2) Equipé d'une pompe immergée.

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES
DES FORAGES DU MALI

DESIGNATION	N° FORAGE	ANNEE EXECUTION	ENTREPRISE OU PROJET	EQUIPEMENT			TYPE DE GRAVIER
				NATURE	DIAMETRE	TYPE	
BOUGOULA	F2	1982	MALI-SUD HELVETAS	PVC	127 mm	Total	2/5 et 3/8
DIGAN	F2	1982	" "	"	"	Suspendu	" "
SOKOURANI	F2	1988	" "	"	"	Total	" "
YANFOLILA	F10	1988	" "	"	"	Total	" "
YANFOLILA	F12	1987	" "	"	145 mm	Suspendu	" "
DONBA	F3	1984	" "	"	127 mm	Total	2/5 et 3/8
DALABANI	F1	1987	" "	"	145 mm	Suspendu	" "
KOKELE	F2	1982	" "	"	"	Suspendu	" "
FAKOLA	F3	1982	" "	"	145 mm	Suspendu	2/5 et 3/8
N'TINBOUGOU		1988	COOPERATION MALI, ITALIE	"	127 mm	Suspendu	2/3 roulé
BANGOLOSSO			MAV	"	159 mm	Suspendu	

ANNEXE 3

**Situation pluviométrique de la période depuis
le début de l'exploitation des forages
AU BURKINA FASO**

II

Les moyennes des précipitations annuelles (en mm) sont les suivantes :

	Fada	Koupela	Tenkodogo
Période 1960-1989 (nombres d'années prises en compte)	639,5 (28 ans)	769,5 (30 ans)	855 (27 ans)
Période 1980-1989	728	675,5	743,5 (1)
Différence	- 13 %	- 12 %	- 13 %

(1) période 1980-1988.

La pluviométrie moyenne annuelle des dix dernières années (1980-1989) est déficitaire de 13 % par rapport à celle de la période 1960-1989.

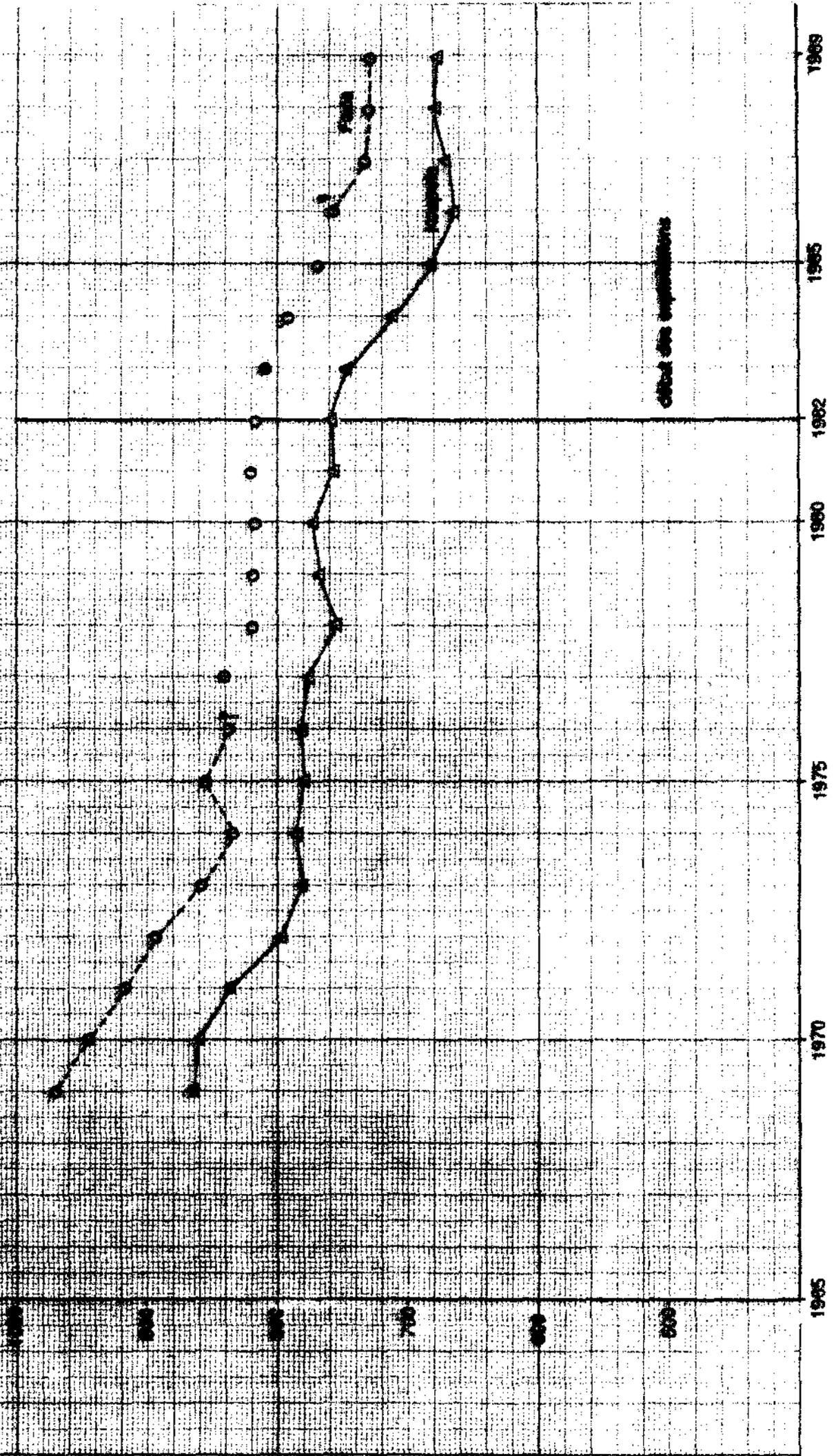
Les moyennes mobiles pour des périodes de 10 ans, représentées sur le graphique ci-après, diminuent constamment de 1960 à 1989, mais avec deux épisodes où la chute de la pluviométrie est accentuée, le premier de 1969-1970 à 1974 et le second de 1982 à 1986-1987.

La mise en exploitation des forages d'AEP a commencée au début de cette période.

Pendant les 10 dernières années :

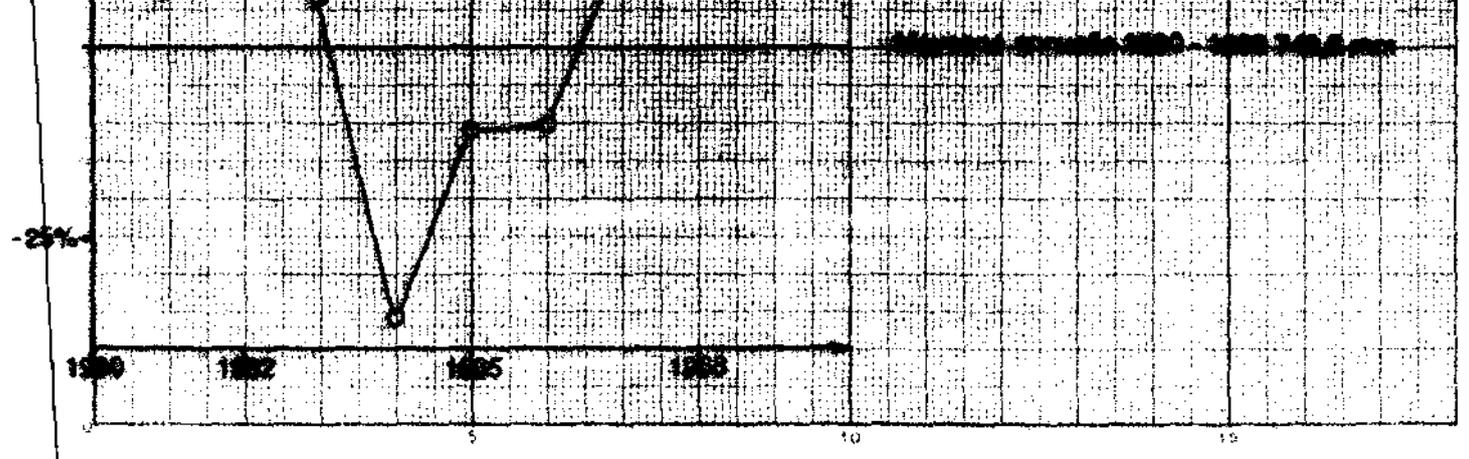
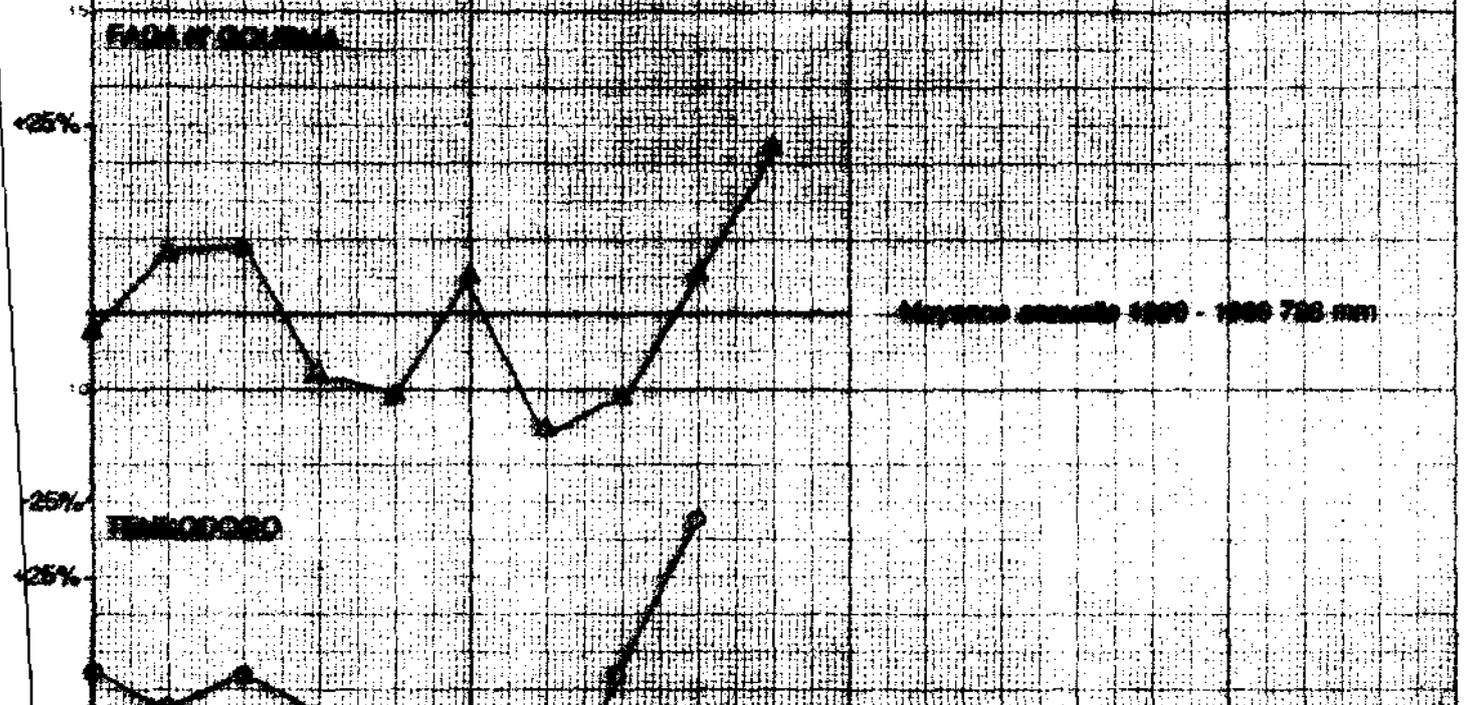
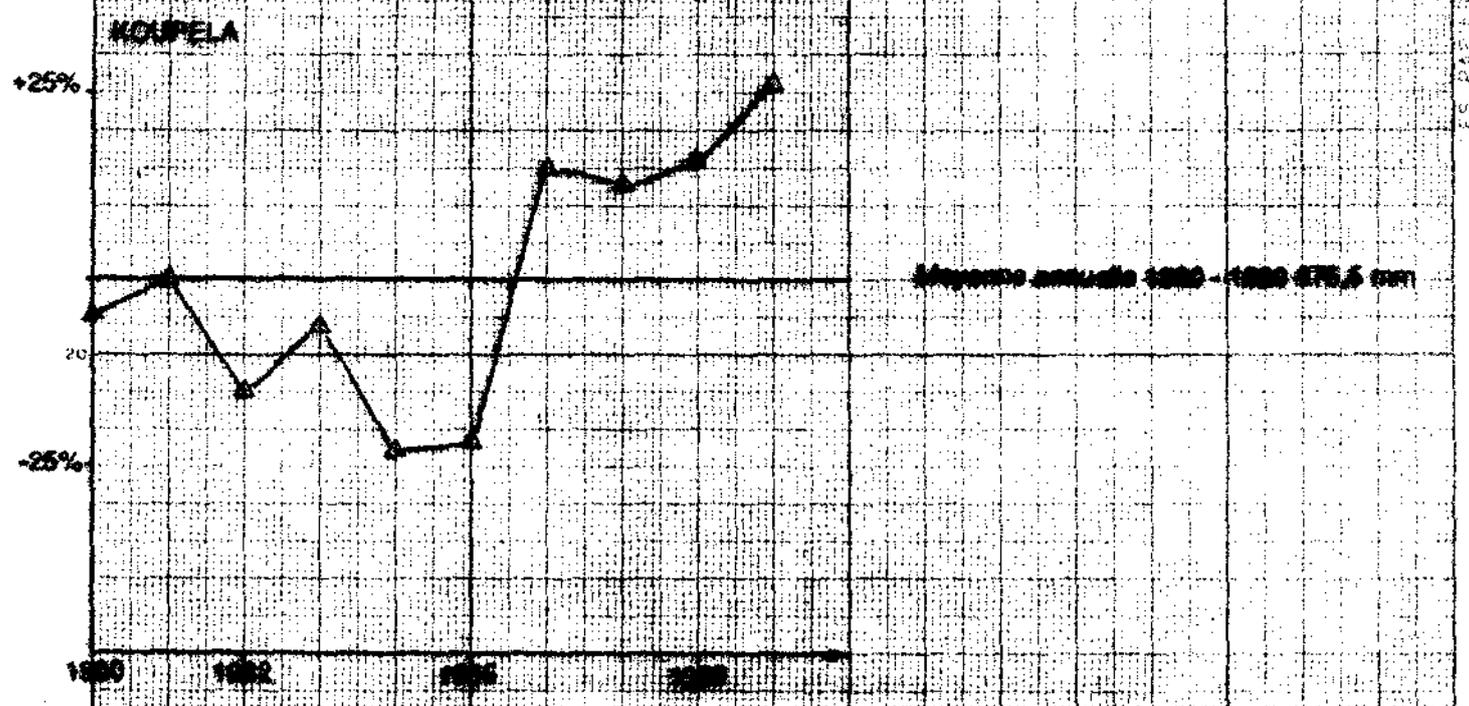
- à Koupela la pluviométrie est déficitaire par rapport à la moyenne annuelle de cette période de 1982 à 1985 ; elle est ensuite excédentaire à partir de 1986,
- à Fada N'Gourma la pluviométrie est déficitaire en 1989 et 1984 puis en 1985 et 1986 et elle est excédentaire en 1981 et 1982 et à partir de 1988,
- à Tenkodogo la pluviométrie est fortement déficitaire en 1984 et elle reste inférieure à la moyenne en 1985 et 1986. Elle est très excédentaire en 1988.

MOYENNES MENSUELLES AVEC PAS DE 10 ANS SUR LA PERIODE 1969-1989 (21 ANS)



COTE DES EXPORTATIONS

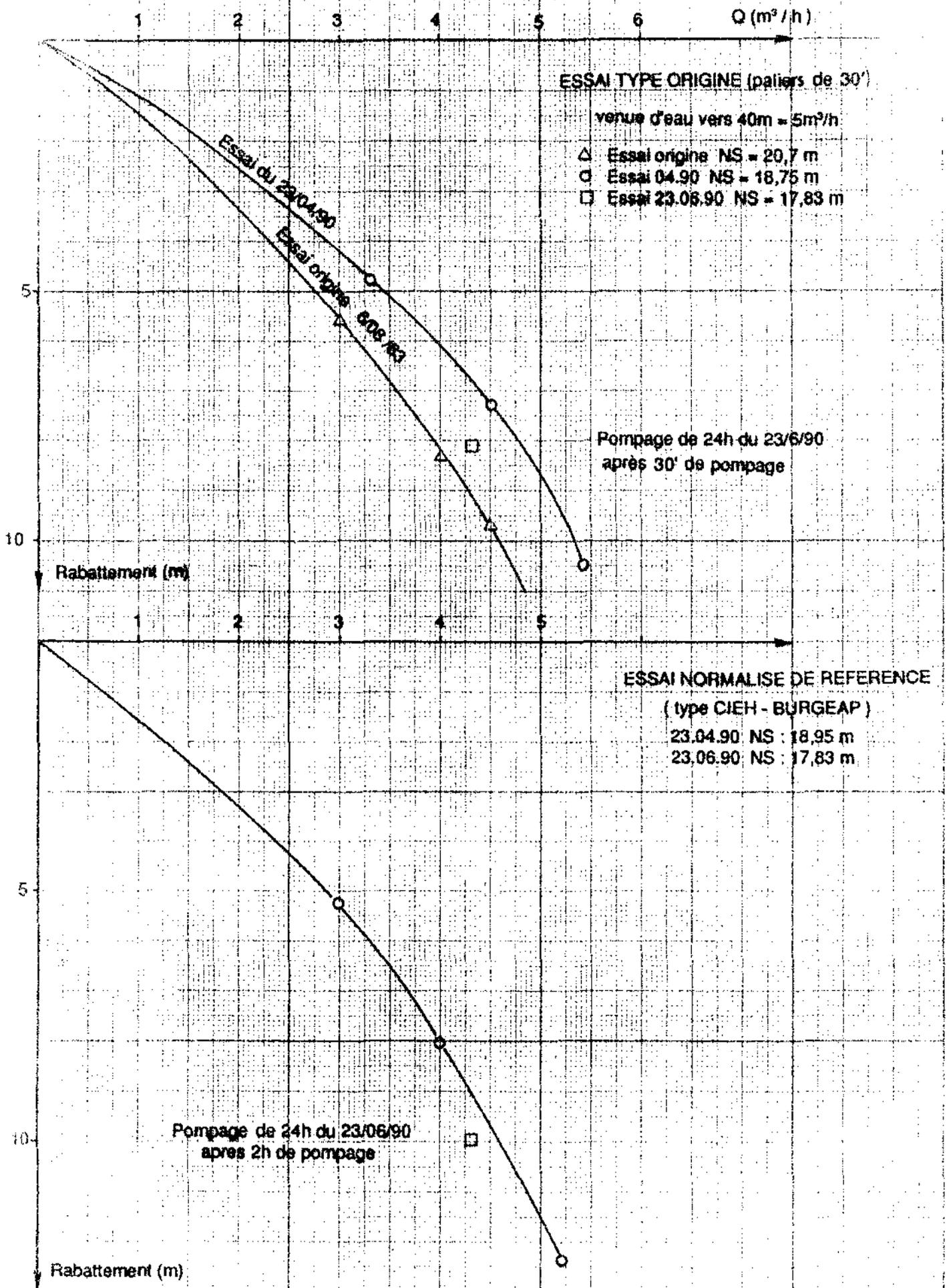
PLUVIOMETRE ANNUELLE DES ANNEES 1900 - 1960
SITUATION PAR PAYS ET A LA MOYENNE DE LA PERIODE



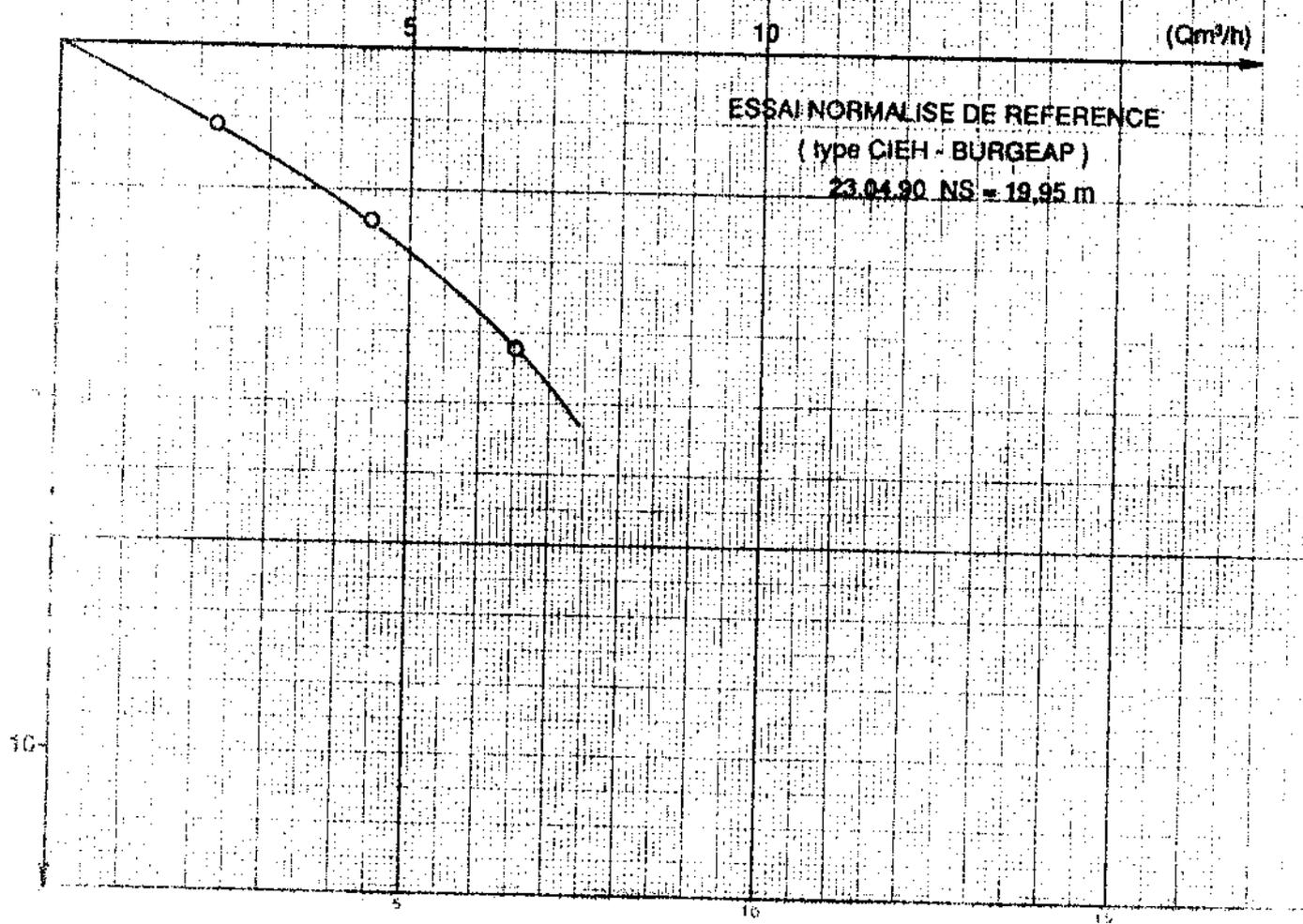
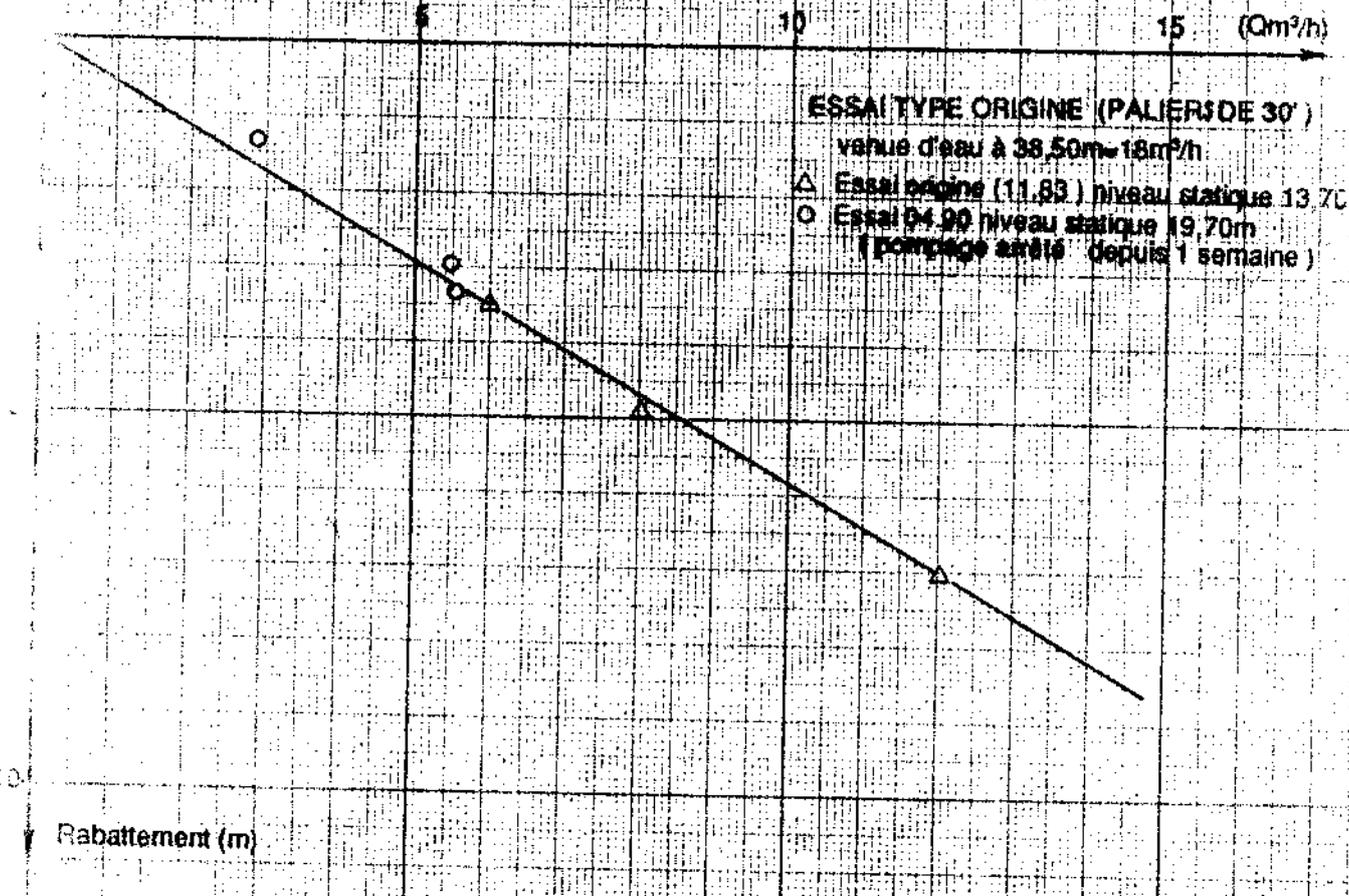
ANNEXE 4

**Courbes caractéristiques à l'origine
et en avril 1990, des forages testés**

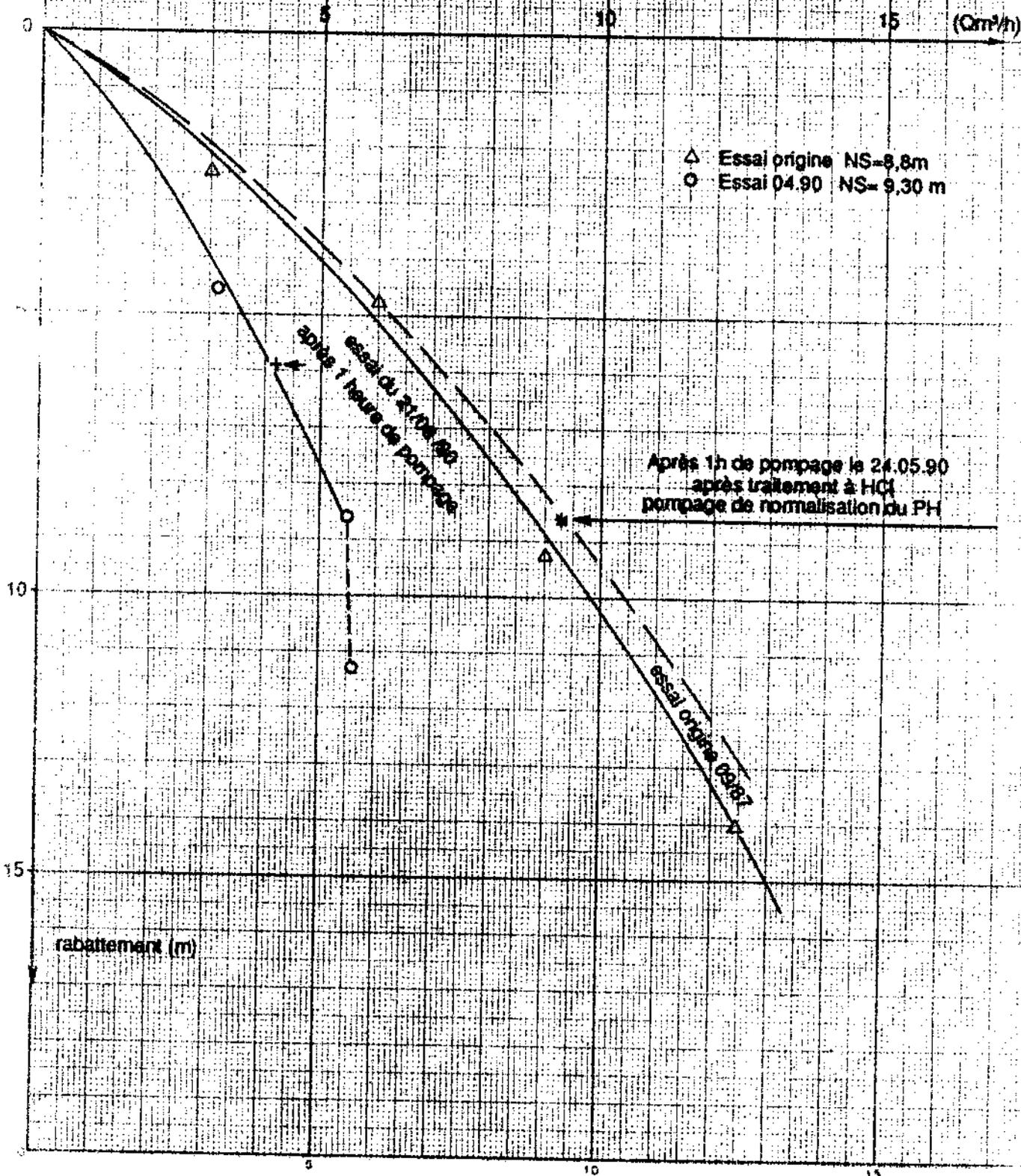
KOUELA F3 (non exploité)



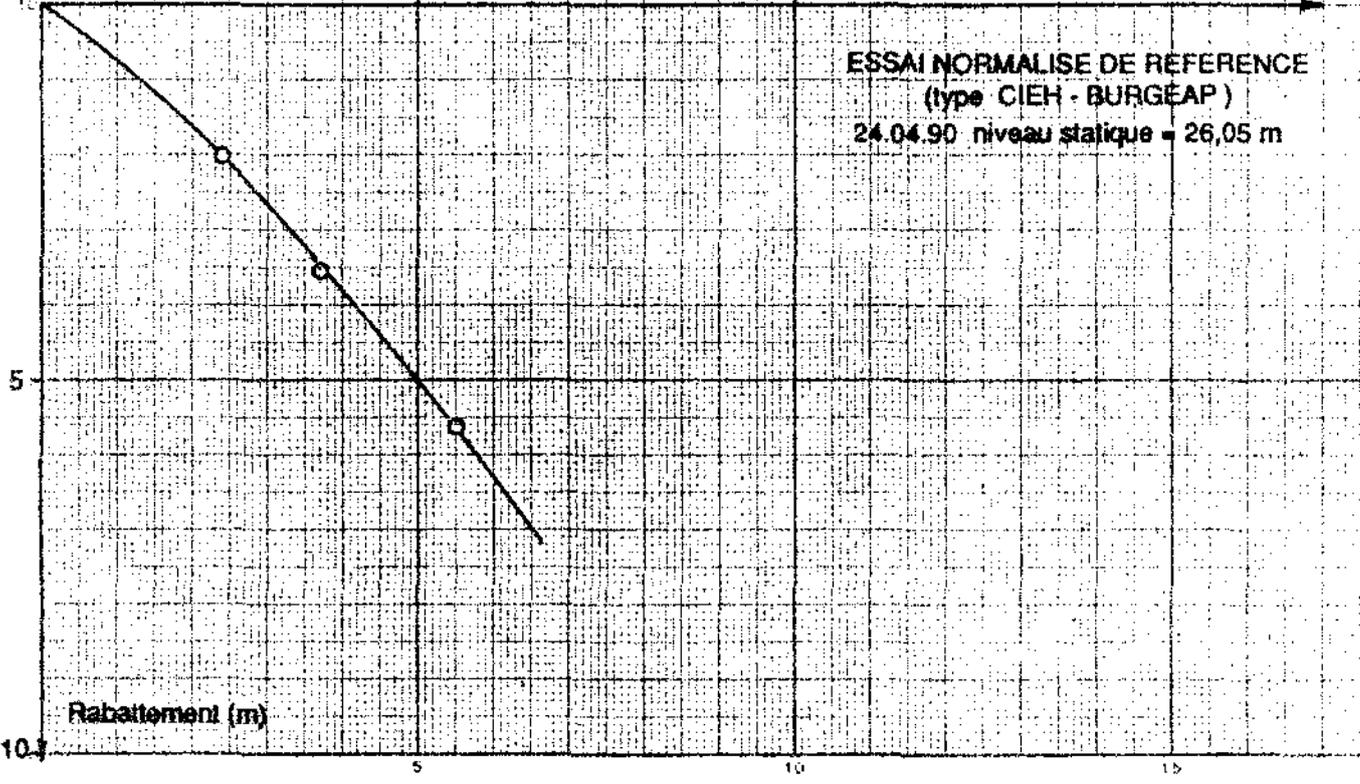
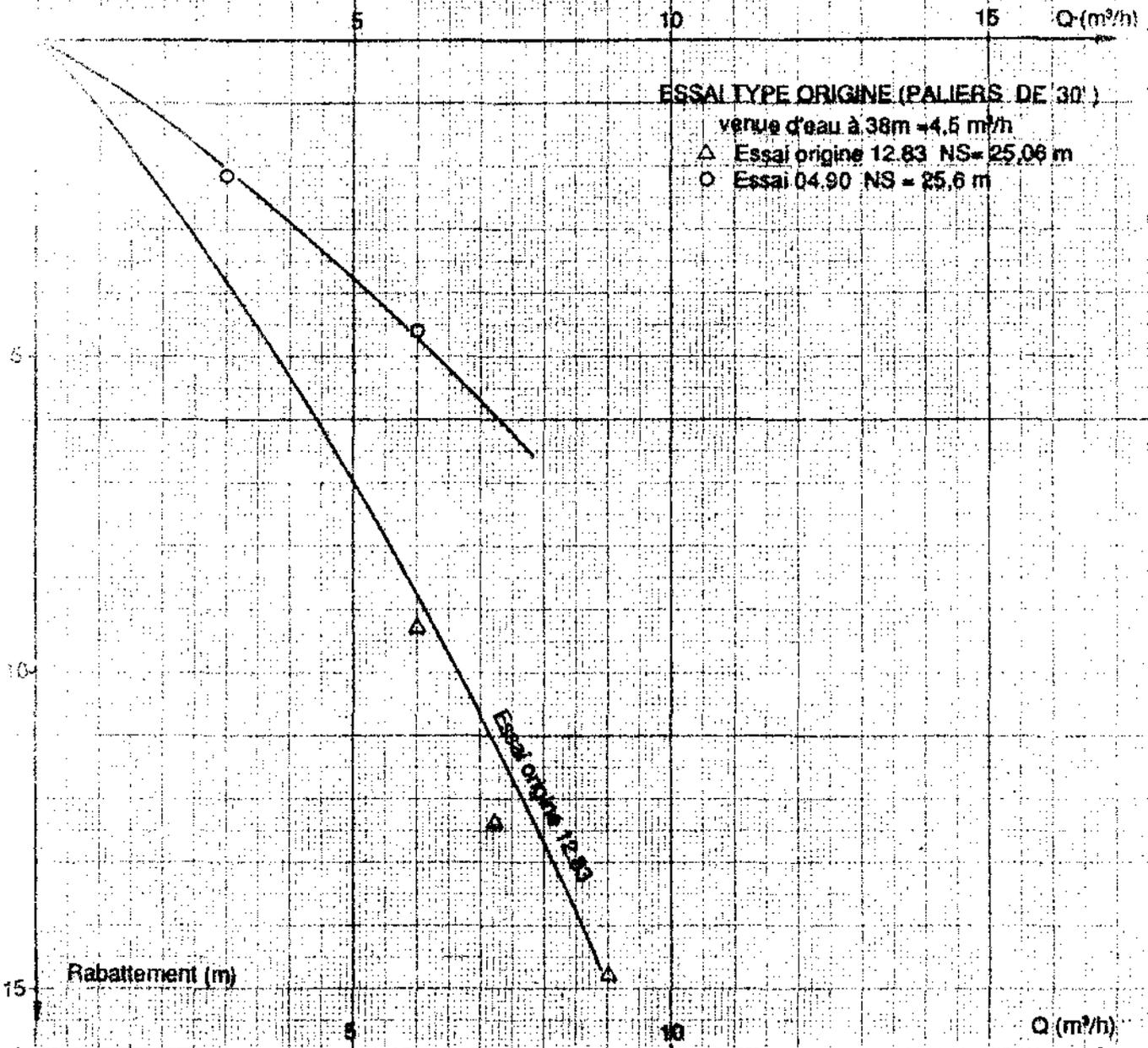
KOUELA F5 (exploité 1 jour par semaine)



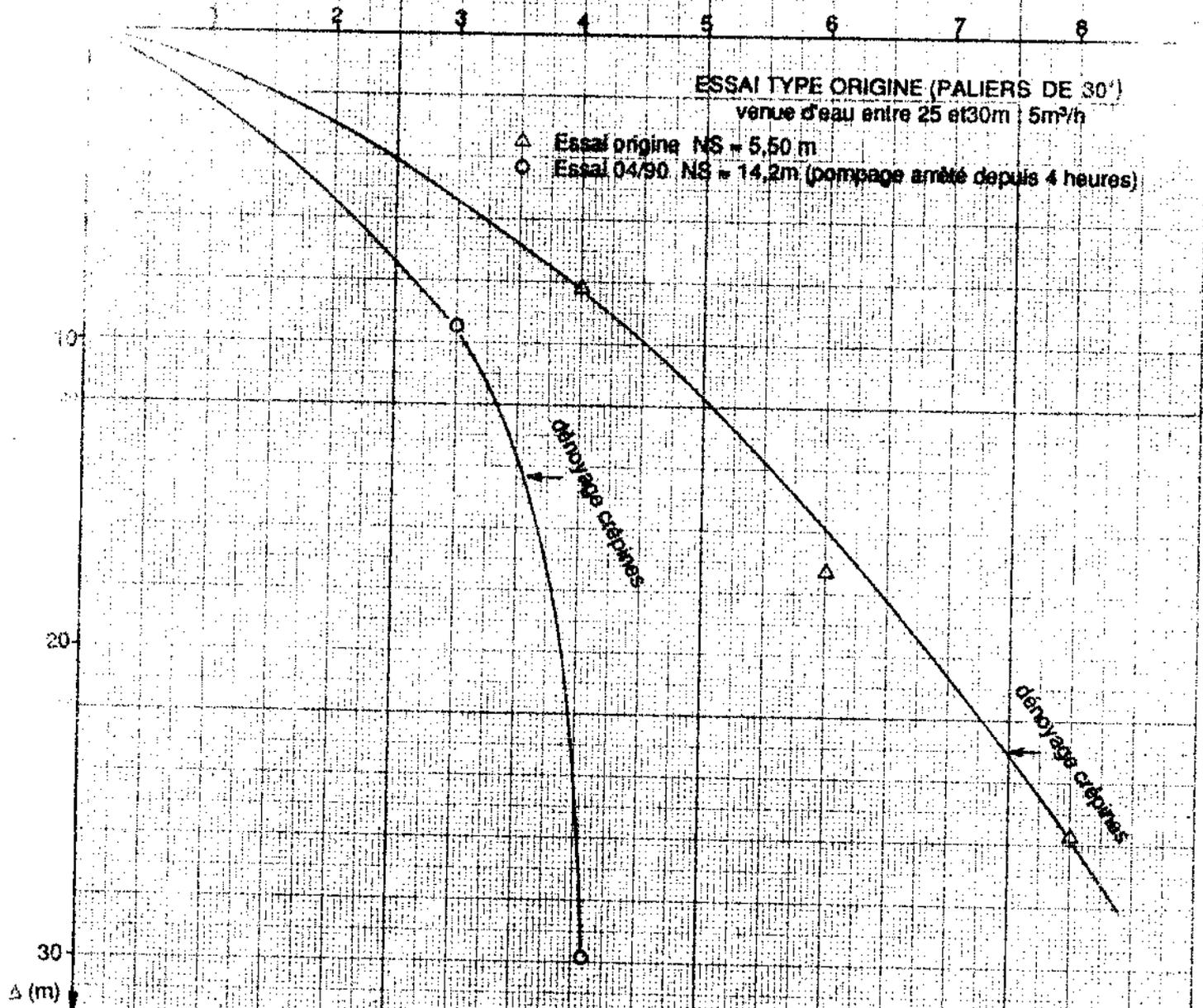
KOUPELA F6
ESSAI TYPE ORIGINE (BALIERS DE 1 HEURE)
 Venue d'eau entre 18 et 25 m = 7m²/h Forage Inexploité



FADA N' GOURMA F6
INEXPLOITE

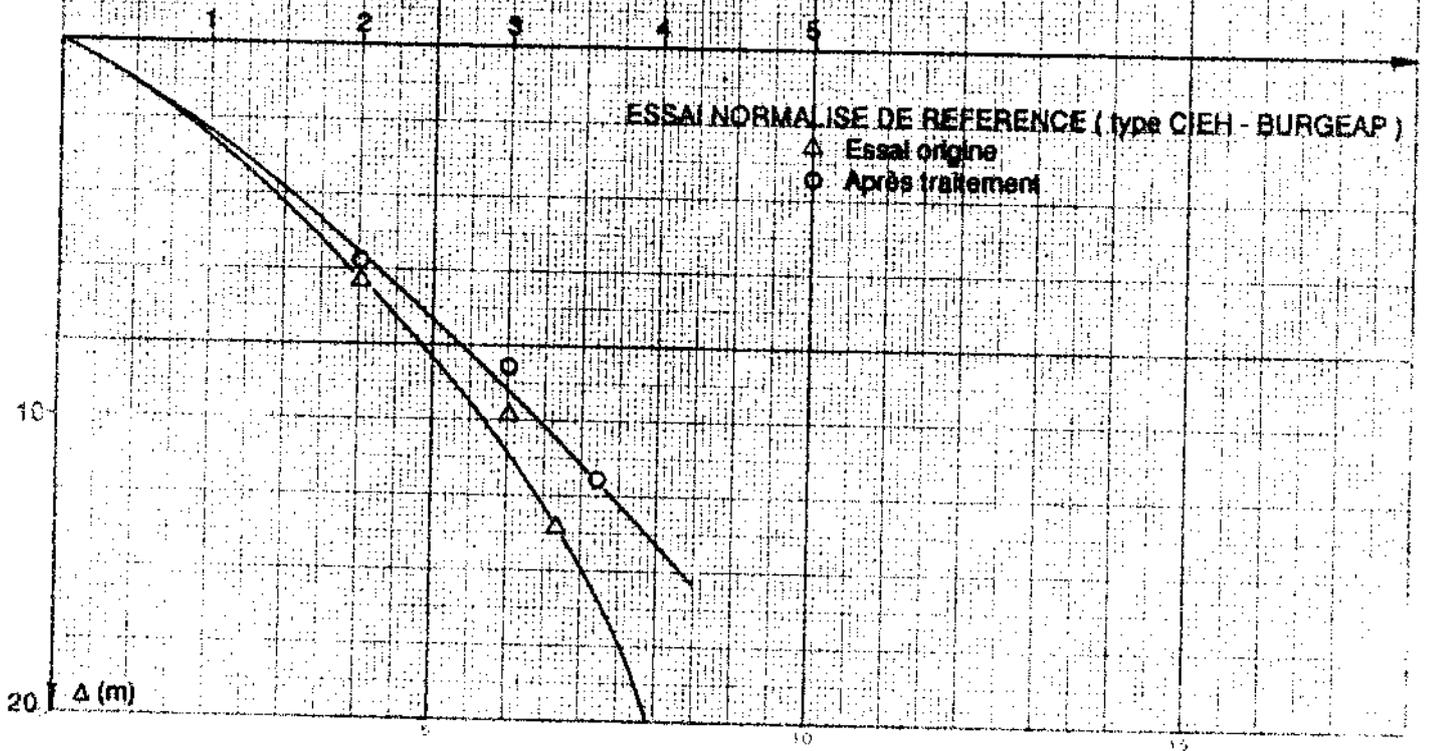


**FADA N'GOURMA F10
EN EXPLOITATION**



ESSAI NORMALISE DE REFERENCE (type CIEH - BURGEAP)

- △ Essai origine
○ Après traitement



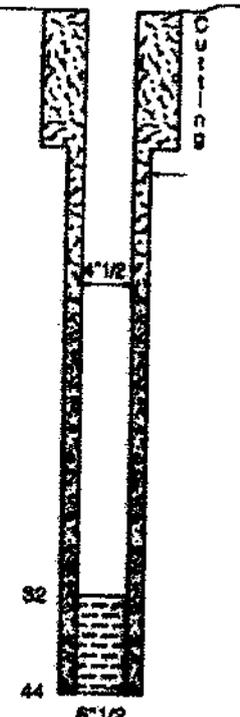
ANNEXE 5

Coupes des forages testés

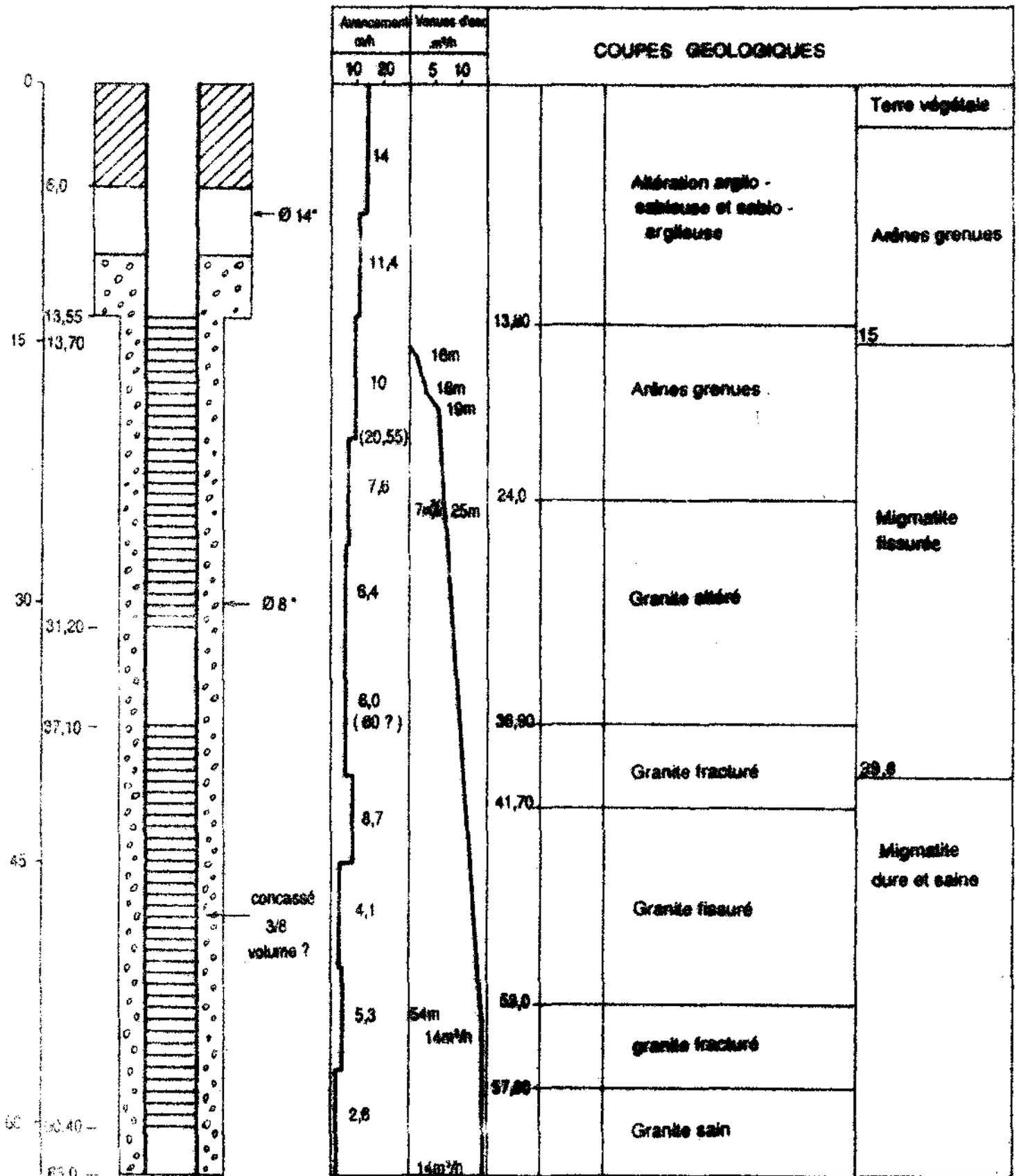
KOUPELA F3

COUPE TECHNIQUE	COUPE GÉOLOGIQUE	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	N.S.	OBSERVATIONS
		<p>0 m 0,30 m 1,80 m 5 m 16 m 16 m 56 m</p> <p>Terre végétale Argile à gravillon latéritique Arène argileuse Arène sableuse Arène grossière Granite fissuré avec passage de quartz à 24,50 m, 34 m et 41 m Granite non fissuré à partir de 50 m</p>	<p>30,70</p>	<p>Humide à 24,50 m</p> <p>Venue d'eau à 30 m</p> <p>Q1 - 37 m = 750 l/h</p> <p>Q2 - 43 m = 5,1 m³/h</p> <p>Q3 - 50 m = 5,1 m³/h</p> <p>Q4 - 56 m = 5,1 m³/h</p>

KOUELA F5

COUPE TECHNIQUE	COUPE GÉOLOGIQUE	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	N.S.	OBSERVATIONS
 <p>4 1/2 32 8 1/2 44</p>		<p>Terre graveleuse avec fragments de quartz Argile compacte</p> <p>Gabbro fissuré avec passage de quartz</p> <p>44 m</p>	<p>13,70</p>	<p>Venue d'eau à 38,50 m Q = 16 m³/h</p>

KOUPELA F6



ANNEXE 6

**SPECIFICATIONS DU MATERIEL MIS EN OEUVRE POUR LES ESSAIS
DE POMPAGE? LES DIAGNOSTICS TELEVISES ET LES EXPERIENCES
DE REHABILITATION**

II

Pour l'exécution dans les meilleures conditions de ce programme d'études, FORAFRIQUE avait mis en oeuvre les moyens suivants :

- une unité de servicing, montée sur porteur Mercedes 4x4, comprenant :
 - . un groupe électrogène DEUTZ 15 KVA,
 - . un compresseur air-lift Ingersol P 125,
 - . une grue hydraulique HIAB 3 T/mètre,
 - . une cellule de travail climatisée,
 - . deux enrouleurs d'exhaure polyéthylène,

- une unité de pompage indépendante, montée sur porteur Berliet 6x6, comprenant :
 - . un groupe électrogène DEUTZ 25 KVA,
 - . une grue de manutention 5 T/mètre,
 - . une exhaure de pompage polyéthylène 2" montée sur enrouleur,

- un camion citerne,

- une unité d'approvisionnement, camion plateau 6x6 Berliet, transportant tous les accessoires nécessaires au chantier :
 - . cuve de préparation des produits traitants,
 - . TURBO CLEANER PREUSSAG et ses accessoires,
 - . 3 pompes immergées 4" (1 à 13 m³/h) et 1 pompe 6",
 - . un ensemble VIDEO (caméra, régie, moniteur, câble gradué, etc.),
 - . tous produits de traitements = agents moussants, WESSOCLEAN, acide chlorydrique. etc,
 - . deux véhicules légers TOYOTA 4x4, équipés de radio.

ANNEXE 7

COMPTE RENDU DES DIAGNOSTICS TELEVISES

II

KOUPELA F3 (Inspection du 3/05/90)

Entre 27 mètres, sommet des crépines, et 29,10 m les fentes de la crépines sont propres et bien ouvertes.

De 29,10 à 37,20 m des dépôts blanchâtres posés à l'intérieur des fentes sur leur bord inférieur obturent le quart ou la moitié des ouvertures.

A 40 mètres les fentes des crépines sont presque entièrement bouchées par ces dépôts blancs (au 9/10).

De 40 à 49,4 m les dépôts bouchent entre 1/2 et 3/4 de l'ouverture des fentes.

A 49,70 m comme à 40 m les dépôts bouchent presque la totalité des ouvertures.

A partir de 50 mètres les dépôts sont moins importants. A 55 mètres l'eau est trouble et l'on ne voit rien jusqu'à 56 mètres, fond du forage.

Sur ce forage, les arrivées d'eau sont localisées à 30 mètres et vers 40 mètres.

Malgré la présence de dépôts dans les fentes des crépines, ce forage n'a pas montré de diminution de sa caractéristique aux essais de pompage de 1990.

KOUPELA F5 (Inspection du 3/05/90)

Le sommet des crépines se trouve à 29 mètres au lieu de 32 mètres comme indiqué sur la coupe du forage.

De 29 à 39 m les crépines sont propres. A partir de 39,50 m il y a des petits dépôts blancs sur le bord inférieur des fentes qui obturent 10 % de la hauteur.

A 41,70 m la caméra bloque sur un raccord. La profondeur totale du forage est de 44 mètres.

Ce forage ne présente pas d'indice d'un colmatage, d'ailleurs sa caractéristique en 1990 est identique à celle de l'origine.

KOUPELA F6 (Inspection du 3/05/90 après traitement au Wessoclean et aux polyphosphates)

De 13,50 m, sommet des crépines par rapport au sol, à 14,40 m les fentes des crépines sont propres et bien ouvertes.

De 14,40 à 20,70 présence dans les fentes de grains de sable et de gravier.

III

De 20,70 à 21,70 m la longueur des fentes est plus courte qu'au-dessus, celles-ci sont propres et bien ouvertes.

A 26,20 m grains de sable et gravier dans les fentes.

A 28,80 m des dépôts peu importants et peu nets apparaissent sur la face inférieure des fentes.

De 29 à 30,90 m la longueur des fentes est très irrégulière et celle-ci est généralement très courte.

De 30,90 à 37 m tube plein.

De 37 à 39,80 m fentes des crépines bien ouvertes.

A 39,80 m présence sur la face inférieure des fentes de dépôts blanchâtres sur 1/4 à 1/2 de l'ouverture.

De 39,80 à 42,50 m les fentes sont bien ouvertes avec un peu de sable les obturant à 40,20 m.

De 42,50 à 46,55 m dépôts blanchâtres à l'intérieur des fentes sur le bord inférieur sur 1/4 à 3/4 de la hauteur de l'ouverture.

De 46,55 à 47,25 m les fentes sont bien ouvertes sans dépôt.

De 47,25 à 53,50 m présence de "lamelles" de la largeur des ouvertures de la crépine, accrochées toujours sur la même extrémité des fentes et orientées vers le haut. Ces "lamelles" pourraient être des copeaux de PVC provenant de l'exécution des fentes (des "lamelles" semblables ont été observées également sur le forage F10 de Fada N'Gourma).

Derrière les "lamelles" les fentes des crépines sont généralement propres et bien ouvertes excepté à 48,85 m, 53,50 m où il y a des dépôts blanchâtres sur la moitié de la hauteur des ouvertures.

A 54 m, en face de la dernière venue d'eau, des dépôts blanchâtres obturent la totalité de la hauteur des fentes des crépines.

A partir de 55 mètres fentes propres et bien ouvertes jusqu'à 58,40 mètres.

Ensuite eau trouble jusqu'au fond du forage à 61,80 mètres par rapport au sol.

Sur ce forage où la chute du débit spécifique par rapport à l'origine est de 40 à 60 %, le colmatage serait plutôt dû à des produits sableux de l'altération et au massif de gravier plutôt qu'au dépôt blanchâtres dont l'effet colmatant semble peu important d'après le forage F3.

IV

KOUELA F6 (Inspection du 12/05/90 après deuxième traitement au Wessoclean)

L'inspection par caméra de télévision réalisée après ce traitement montre que les crépines sont propres jusqu'à 49 mètres, et qu'il y a beaucoup de sable derrière entre 16 et 31 mètres.

Les dépôts blanchâtres observés lors de la première inspection, notamment entre 40 et 46,50 m, ont été éliminés.

Entre 49 et 52 m et à 52,30 m on observe toujours des crépines en partie bouchées par une matière blanche dirigée vers le haut du forage, et des flocculats blanchâtres.

De 54 à 59,40 m (fin de l'inspection) les dépôts blanchâtres qui obturaient la totalité des ouvertures sont devenues des particules fines facilement mobilisables qui bouchent de 10 à 50 % de l'ouverture.

Enfin, entre 56 et 56,90 m il y a une matière blanche rigide qui sort des crépines et qui pourrait être des particules de PVC.

FADA N'GOURMA F6 (Inspection du 04/05/90)

Comme indiqué sur la coupe, le sommet des crépines se situe à 34,10 mètres sous le niveau du sol.

Des flocculats argileux plus ou moins importants selon les endroits sont déposés sur le tubage et sur la crépine mais sans boucher les ouvertures. Ceux-ci se détachent au passage de la caméra.

Des dépôts blanchâtres qui bouchent les crépines existent localement sur une hauteur de 20 centimètres à 34 m, 42,20 et 49 m.

L'eau est trouble entre 51 et 52 m fond du forage.

Les venues d'eau sur le forage se trouvent à 38 mètres et entre 46 et 49 m de profondeur.

Les dépôts observés dans les fentes des crépines sont peu importants et ils ne sont certainement pas à l'origine d'un colmatage. D'ailleurs, d'après l'essai de pompage de 1990 le débit spécifique est le double de celui à l'origine.

FADA N'GOURMA F10 (Inspection du 04/05/90)

Le sommet des crépines se trouve à 28,20 m de profondeur par rapport au sol ce qui est conforme à la cote de 28,56 m indiquée sur la coupe du forage.

A partir de 30 m et jusqu'à 37,20 mètres présence de traces noires, formées par une matière molle, qui bavent sur le PVC à partir des fentes des crépines sans obturer les ouvertures.

Approximativement entre 35,20 et 35,70 m soit au niveau de la deuxième arrivée d'eau à 35 mètres, présence de dépôts blanchâtres sur la moitié de la hauteur de l'ouverture des fentes.

De 37,20 à 45,20 m les crépines sont propres et bien ouvertes. La caméra pose à 45,20 probablement sur un raccord. La profondeur totale du forage est de 56 mètres.

Les traces noires sont certainement des oxydes de manganèse ou de fer qui n'obstruent pas les fentes des crépines mais qui ont pu colmater le massif de gravier et le terrain derrière.

Depuis l'origine ce forage a perdu de 40 à 75 % de son débit spécifique.

FADA N'GOURMA F10 (Inspection du 09/05/90 après traitement)

L'inspection par caméra de télévision réalisée après le traitement montre que :

- les traces noires sur le tubage entre 30 et 37 m ont disparues,
- par contre, entre 36 et 40 m il y a des dépôts blanchâtres à allures de concrétions qui obstruent la moitié de la largeur des fentes. Ces dépôts n'étaient pas appurés lors de la première inspection télévisée,
- de 47 m jusqu'à 53 m fond du forage de fines particules déposées sur la face inférieure des fentes bouchent la moitié ou la totalité des ouvertures. Ces particules qui bougent au passage de la caméra devraient être facilement éliminées du forage par un pompage (l'inspection a lieu après un nettoyage à l'air-lift mais avant l'essai de pompage par palier),
- entre 51,60 et 52 m une matière blanche molle orientée vers le haut est accrochée aux fentes des crépines sans les boucher. Il semble que se soit la même chose que sur le forage F6 de Koupela et que cela pourrait être des languettes de PVC provenant de la réalisation des crépines. Lors de la première inspection le forage n'avait pas été inspecté en dessous de 45 mètres, la caméra bloquant à ce niveau.

VI

KAYA F15 (Inspection du 8/05/90)

De 16 mètres, sommet des crépines (15 mètres d'après la coupe), jusqu'au niveau statique à 22,50 m les crépines sont propres mais l'intérieur du tubage est sale avec des traces noires organiques.

A 24,40 m on note un dépôt noir brillant dans les crépines et un dépôt blanc sur le bord inférieur des fentes.

A 26,50 m il y a des dépôts blancs sur 10 % de l'ouverture des fentes.

De 29 à 33 m les fentes des crépines sont bouchées par du sable, des fines et parfois par des dépôts. Quelques ouvertures sont totalement bouchées mais elles sont obturées en majorité entre 20 et 50 %.

De 33 à 39 m il y a un tubage plein d'après la coupe.

De 39 à 48 m les crépines sont propres avec des dépôts blanchâtres sur 10 à 20 % de la hauteur des fentes.

De 48 à 51 m (base des crépines) les fentes de la crépine sont totalement bouchées par une matière molle blanche qui semble argileuse et qui coule, qui pourrait correspondre à de l'altération des schistes.

Aux essais de pompage de 1990, réalisés par IWACO, ce forage a montré une perte de caractéristique de 20 %.

Le colmatage semble provenir essentiellement de produits argileux d'altération de schistes qui obturent les crépines.

ANNEXE 8

COMPTE RENDU DES EXPERIENCES DE REHABILITATION REALISES
SUR F6 (KOUPELA) ET F10 (FADA N'GOURMA)

Forage F6 de KOUPELA

LI

Premier traitement : injection de Wessoclean et brossage des crépines

- 26/04/90 :

Injection gravitaire successivement à 50 m, 40 m, 25 m et 15 m, d'une solution de 75 litres avec une concentration de 80 g/l de Wessoclean (8 kg).

Attente de 24 heures.

- 27/04/90 :

a) Brossage des crépines pendant 1 heure avec le Turbocleaner sans circulation. Sur les brosses remontée de sable composé d'éléments granitiques de taille inférieure à 0,5 mm.

b) Nettoyage des crépines et du massif de gravier mètre par mètre par injection à 5 et 6 bars de pression et circulation avec le Turbocleaner pendant 5 à 15 minutes d'une solution de Wessoclean de pH compris entre 2,6 et 2,9.

Attente une nuit.

Essai de pompage par paliers normalisés de contrôle des résultats du traitement.

Deuxième traitement : nettoyage à l'air comprimé

- 28/04/90 :

Soufflage des crépines à 30 m, 40 m, 50 m et 60 m avec un système d'air-lift pendant une durée totale de 3 heures et avec à coups de pression d'air.

Sortie de 1,05 m de sable décanté dans le tube plein au fond du forage.

Troisième traitement : injection de polyphosphates

- 29/04/90 :

a) Injection, en remontant successivement à 48 m, 45 m, 40 m, 30 m, 25 m, 20 m et 15 mètres, avec une pression de 2,5 bars d'une solution de 1 200 litres avec 3 % de polyphosphates.

III

- b) Injection en tête du forage de 360 litres de cette même solution.
- c) Attente 2 heures.
- d) Pistonnage dans les crépines avec les brosses du Turbocleaner pendant une heure et demie.
- e) Pompage à 5,6 m³/h pendant 1 heure pour sortir les polyphosphates. L'eau sortie du forage est trouble et grisâtre.

- 30/04/90 :

Contrôle du résultat du traitement par un ~~essai de pompage par paliers normalisés type CIEH-Burgeap.~~

Quatrième traitement : brossage des crépines, nettoyage air-lift et injection de Wessoclean

- 11/05/90 :

- a) Brossage des crépines avec le Turbocleaner pendant 1h30 avec 3 allers et retours entre 15 et 30 mètres et 5 allers et retours de 30 m au fond.
- b) Soufflage des crépines à l'air comprimé avec un système d'air-lift pendant 2 heures.
- c) Injection d'une solution de 200 litres dosée à 70 g/l de Wessoclean (14 kg) à 25 et à 45 mètres. Injection d'un volume d'eau claire de 800 litres en tête du forage.

Attente de 24 heures.

- 12/05/90 :

- a) Nettoyage à l'air comprimé avec émulseur à 30 mètres puis à 50 mètres pendant 3 heures jusqu'à obtenir de l'eau claire.
- b) Inspection du forage par caméra de télévision.

- 14/05/90 :

Essai de pompage par paliers normalisés de contrôle des résultats du traitement.

Cinquième traitement : acidification à l'acide chlorhydrique

- 23/05/90 :

- a) Injection à 15 mètres de 100 kg et à 45 mètres de 150 kg d'acide chlorhydrique à 20° Baumé et en tête du forage d'un volume d'eau claire de 800 litres.
- b) Attente de 3 heures.
- c) Nettoyage à l'air-lift pendant 2 heures. Le pH de l'eau égal à 1,2, semble indiquer qu'il n'y a pas eu de réaction avec l'acide.
- d) Essai de pompage par paliers normalisés (type CIEH-Burgeap) pour contrôle des résultats.

- 24/05/90 :

Pompage pendant 3h/2 au débit constant de 9,1 m³/h pour éliminer l'acide.

Forage F10 DE FADA N'GOURMA

1 seul traitement au Wessoclean a été réalisé sur ce forage.

- Avant l'injection de l'acide le 8/05/90 on a procédé au brossage des crépines, avec le Turbocleaner sans circulation, avec 3 allers et retours entre 25 m et le fond de l'ouvrage à 56 m. Du sable est remonté sur les brosses lors de cette opération.

Une solution de 100 litres dosée à 50 g/l de Wessoclean (5 kg) a été injectée à 35 mètres et chassée dans le forage avec 150 litres d'eau déversés sur la nappe.

- Après une attente de 24 heures on a procédé, le 9/05/90 au nettoyage mètre par mètre des crépines par injection sous pression (6,55 bars) et circulation, à chaque mètre, pendant 10 minutes à la descente et 5 minutes à la remontée, d'une solution de 1 300 litres avec 10 kg de Wessoclean.

A 38 mètres, sous les venues d'eau rencontrées en forage à 25 et 35 m, la circulation était en perte totale.

- Un nettoyage à l'air-lift avec l'émulseur placé successivement à 30, 40 et 50 mètres a ensuite été réalisé pendant 3 heures pour sortir l'acide du forage.
- Le résultat du traitement a été contrôlé le 10.05.90 par un essai de pompage par paliers normalisés (type CIEH-Burgeap).

ANNEXE 9

Courbes d'évolution des niveaux
pendant les pompages de 24 heures de juin 1990
sur les forages F3 et F6 de Koupela

KOUELA F3
REMONTEE APRES POMPAGE DE 24 HEURES
DU 23.24.06.90

Rabatement
(en m)

10

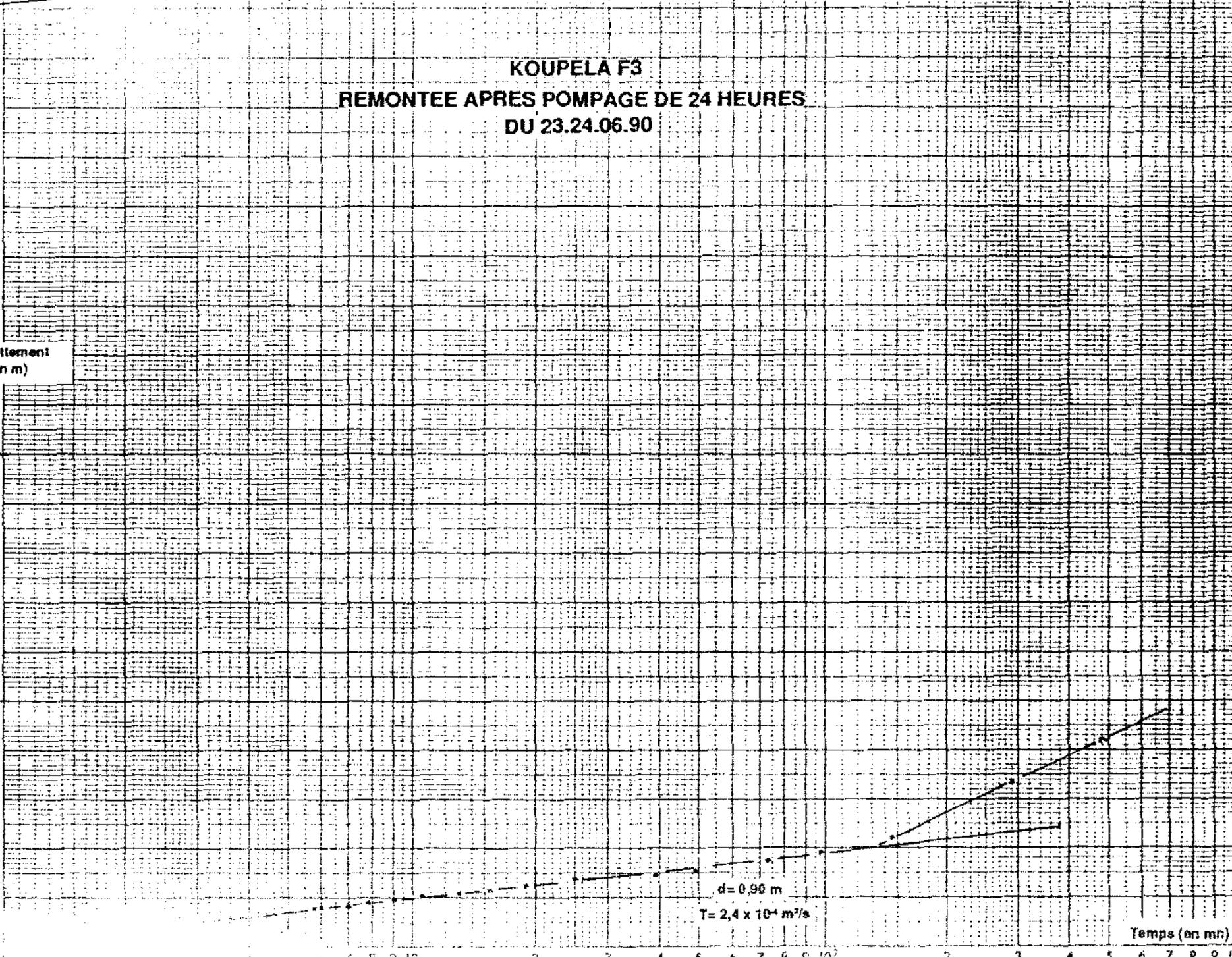
5

$d = 0,90 \text{ m}$

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

Temps (en mn)

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10² 2 3 4 5 6 7 8 9 10³



KOUPÉLA F6
 POMPAGE DE 24 HEURES DU 21.22.06.90
 DÉBIT 3,6 m³/h

Rabatement
 (en m)

15

10

5

1

2 3 4 5 6 7 8 9 10

2 3 4 5 6 7 8 9 10³

2 3 4 5 6

2

d = 8,3 m

d = 6,15 m

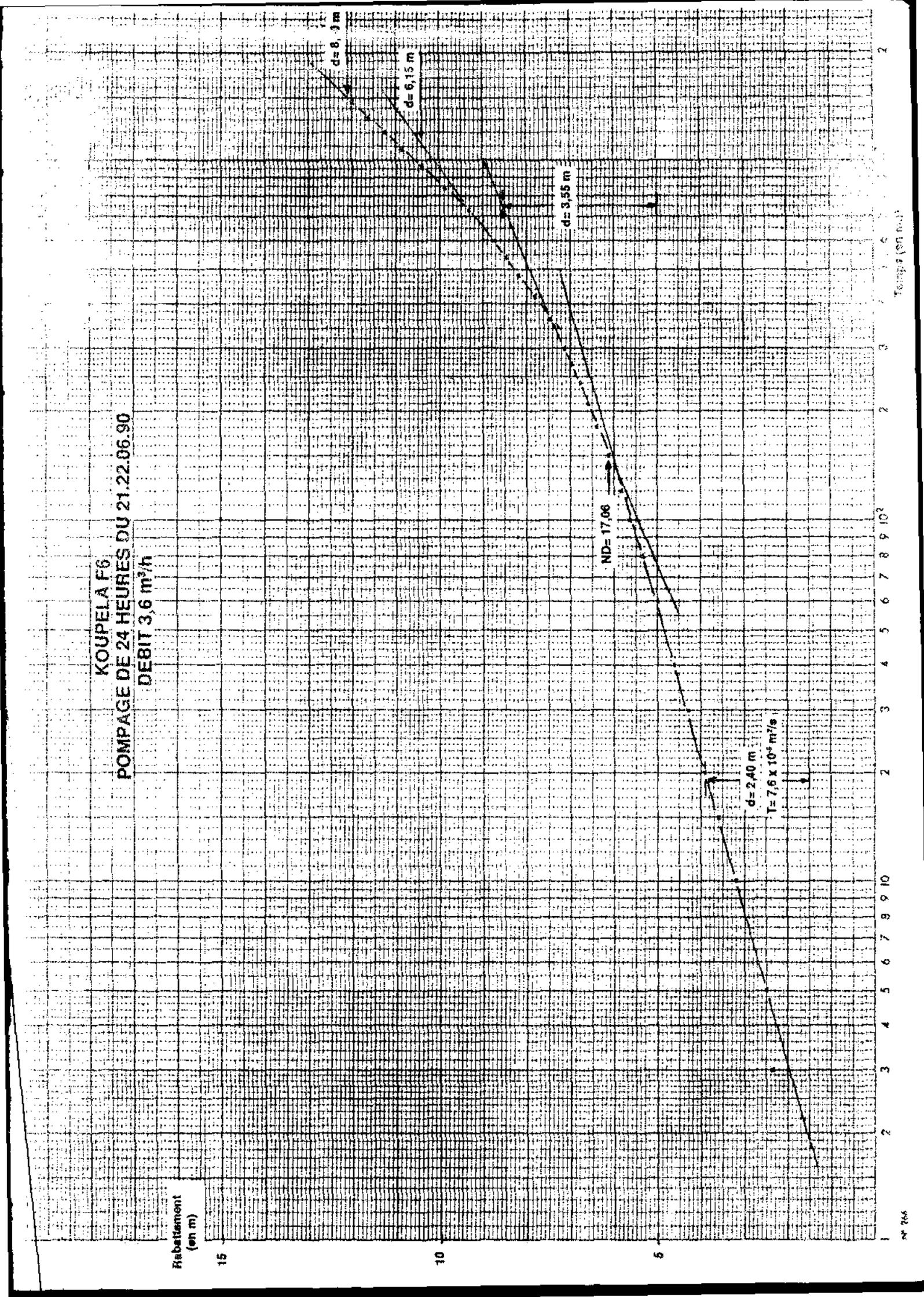
d = 3,55 m

ND = 17,06

d = 2,40 m

T = 7,6 x 10⁶ m²/s

Temps (en min)



KOUPÉLA F6
 REMONTÉE APRES POMPAGE DE 24 HEURES
 DU 21.22.06.90

Rabattement
 (en m)

10

5

1

2 3 4 5 6 7 8 9 10

2 3 4 5 6 7 8 9 10

2 3 4 5 6 7 8 9 10

1:1

d = 4,40 m

d = 2,25 m
 $T = 8,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

