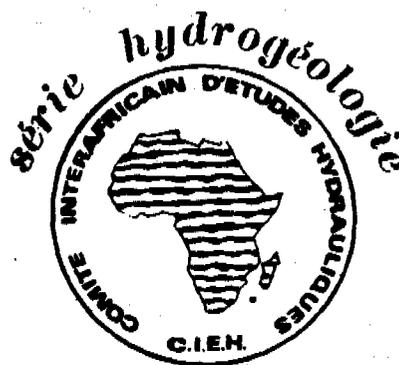


**COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES  
(C.I.E.H)**

LIBRARY  
INTERNATIONAL REFERENCE CENTRE  
FOR COMMUNITY WATER SUPPLY AND  
SANITATION (IRC)

**DOCUMENT-GUIDE POUR L'IMPLANTATION  
ET LA MISE EN EXPLOITATION DES FORAGES  
À GROS DEBIT EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN**



**OUAGADOUGOU  
Octobre 1992**

**COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES  
(C.I.E.H)  
01 BP369 OUAGADOUGOU 01 BURKINA FASO**

BRADY INTERNATIONAL REFERENCE  
TYPE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY  
AND SANITATION (IND)  
P.O. Box 131, 33009 AD The Hague  
Tel. (070) 014911 ext. 141/142  
RNT: ISN: 10525  
LO: 212.0 9200

## **DOCUMENT-GUIDE POUR L'IMPLANTATION ET LA MISE EN EXPLOITATION DES FORAGES A GROS DEBIT EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN**

**Financement  
Fonds d'aide et de Coopération  
de la République Française**

**M. RICOLVI**

**R.3591  
4S / EAU  
octobre 1992**

**BRGM  
BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES  
BP 6009-45060 ORLEANS CEDEX 02-FRANCE**

# SOMMAIRE

1 - INTRODUCTION .....	1
1.1- PROBLEMATIQUE DE L'APPROVISIONNEMENT EN EAU POTABLE DES CENTRES URBAINS .....	1
1.2 - OBJECTIF DU DOCUMENT-GUIDE - METHODOLOGIE DE L'ETUDE .....	2
2 - RAPPEL - LE DEBIT ET LA RESSOURCE .....	5
2.1. PRODUCTIVITE DES AQUIFERES DE SOCLE .....	5
2.1.1. Résultats des campagnes d'hydraulique villageoise .....	5
2.1.2. Recherche des débits élevés .....	6
2.2. RESSOURCES DES AQUIFERES DE SOCLE .....	7
2.2.1. Schématisation des aquifères .....	7
2.2.2. Evaluation de la capacité de stockage .....	7
2.2.3. Evaluation des ressources renouvelables .....	7
3 - ETUDE DE CAS .....	13
3.1. DONNEES DISPONIBLES .....	13
3.2. LES CHAMPS DE CAPTAGE "A PROBLEMES" .....	16
3.2.1. KOUPELA .....	16
3.2.2. FADA N'GOURMA .....	18
3.2.3. DAPAONG .....	20
3.2.4. Conclusions .....	21
4 - METHODOLOGIE PROPOSEE POUR L'IMPLANTATION DES FORAGES A DEBIT ELEVE .....	23
4.1. DEMARCHE .....	23
4.2. LES DIFFERENTES PHASES DES ETUDES D'IMPLANTATION .....	24

4.2.1. Phase préparatoire .....	24
4.2.2. Phase de reconnaissance hydrogéologique .....	26
4.2.3. Phase de prospection détaillée.....	29
5 - AMELIORATION DU DEBIT DES FORAGES INSUFFISAMMENT PRODUCTIFS PAR FRACTURATION HYDRAULIQUE.....	35
5.1. RAPPEL .....	35
5.2. PRINCIPE DE LA FRACTURATION HYDRAULIQUE .....	35
5.3. RESULTATS .....	36
5.4. CONCLUSIONS .....	37
6 - DIMENSIONNEMENT DES CHAMPS DE CAPTAGE ET SUIVI DE L'EXPLOITATION .....	39
6.1. DEMARCHE .....	39
6.2. METHODOLOGIES PROPOSEES POUR L'ACQUISITION DES PARAMETRES .....	40
6.2.1. Les prélèvements .....	40
6.2.2. La géométrie des réservoirs .....	44
6.2.3. Les paramètres hydrauliques des ouvrages de production .....	44
6.2.4. Les paramètres hydrauliques du système aquifère.....	45
6.2.5. La recharge par les pluies.....	48
6.3. MODELISATION .....	48
6.3.1. Synthèse des données .....	48
6.3.2. Choix du modèle.....	49
6.3.3. Premiers calages, simulations exploratoires( cf. fig. 7).....	49
6.4. SUIVI DE L'EXPLOITATION.....	50
6.4.1. Objectifs du suivi .....	50
6.4.2. Données à recueillir .....	50
6.4.3. Calage du modèle.....	53
7 - APPLICATIONS : MODELISATION DES CHAMPS DE CAPTAGE DE BOROMO ET KOUPELA .....	55
7.1. OBJECTIFS .....	55

<b>7.2. MODELISATION DU CHAMP DE CAPTAGE DE BOROMO .....</b>	<b>55</b>
7.2.1. Présentation .....	58
7.2.2. Données disponibles .....	58
7.2.3. Caractéristiques du modèle .....	58
7.2.4. Calage du modèle, résultats des simulations .....	58
<b>7.3. MODELISATION DU CHAMP N°4 DE KOUPELA .....</b>	<b>61</b>
7.3.1. Données disponibles .....	61
7.3.2. Calage et résultat des simulations .....	61
<b>7.4. CONCLUSIONS .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>67</b>

#### **ANNEXES**

- 1 - Evaluation des débits pérennes exploitables en zone Soudano -Sahélienne**
- 2 - Présentation du logiciel GRIVEL**
- 3 - Présentation du logiciel ISAPE**
- 4 - Présentation du modèle MARTHE**
- 5 - Prospection RADON**
- 6 - Fracturation hydraulique**

## AVANT-PROPOS

Par le Marché d'Etude HG2/89/28 notifié le 13 novembre 1990, le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H.) a confié au BRGM l'élaboration d'un "Document-guide pour l'implantation et la mise en exploitation des forages à gros débit en zone de socle cristallin".

L'objet de l'étude tel que défini dans les termes de référence est de proposer aux organismes chargés de l'alimentation en eau potable des centres urbains, une démarche méthodologique pour :

- l'implantation en zone de socle cristallin sous climat soudano-sahélien, d'ouvrages capables de fournir des débits de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>/h.
- le dimensionnement et le suivi des champs de captage en vue d'assurer la permanence de la production.

Cette étude a été réalisée par le groupement CIEH/BRGM sur un financement du Fonds d'Aide et de Coopération, de la République Française.

# 1 - INTRODUCTION

## 1.1. PROBLEMATIQUE DE L'APPROVISIONNEMENT EN EAU POTABLE DES CENTRES URBAINS

Les projections démographiques montrent que dans les vingt prochaines années, les 14 pays membres\* du CIEH verront le chiffre de leur population multiplié par 1,8. Cette croissance s'accompagnera très probablement d'une migration des populations rurales, aujourd'hui dispersées dans les villages, vers les petites villes et les quartiers périphériques des capitales. Le taux d'urbanisation qui était en 1990 de 41 % devrait atteindre 63 % en l'an 2010. Augmentation de la population et amélioration du niveau de vie auront pour effet de multiplier par 4 les volumes d'eau à usage domestique. Comme aujourd'hui, la majeure partie de l'eau potable sera prélevée sur les ressources en eau souterraine.

En zone de socle sous climat soudano-sahélien, les problèmes posés par l'approvisionnement en eau potable viendront moins de l'augmentation des besoins que de leur concentration liée au regroupement des populations rurales dans les centres urbains. Aux pompes à motricité humaine qui équipent actuellement les zones rurales à habitat dispersé devront s'ajouter progressivement, des moyens d'exhaure motorisés installés sur des forages capables de fournir des débits minima de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/j, dix fois supérieurs au débit produit par une pompe à main.

Dans les 15 dernières années, les centres secondaires les plus importants ont été équipés de réseaux de distributions centralisés alimentés par des champs de captage au socle fournissant, dans la majorité des cas, de 200 à 500 m<sup>3</sup>/j. Exceptionnellement, le débit prélevé peut atteindre 1000 m<sup>3</sup>/j (Dapaong au Togo). Aujourd'hui, l'installation d'équipements de production d'eau potable motorisés intéresse les villes de moindre importance ; la tendance est au système d'approvisionnement dispersé : postes d'eau autonomes sans réseau de distribution ou mini AEP avec un réseau réduit à quelques bornes fontaines ; ces systèmes sont alimentés par un forage unique dont la production moyenne journalière est rarement supérieure à 100 m<sup>3</sup>.

Les informations recueillies, principalement au Burkina Faso, montrent que les exploitants doivent faire face à 2 types de difficultés :

- dans le cas des réseaux centralisés installés dans les villes importantes, les problèmes concernent essentiellement la production. Les champs de captage sont généralement implantés sans tenir suffisamment compte de la fragilité des ressources des aquifères de socle ; les capacités de production ne permettent pas de suivre l'accroissement de la demande.

---

\* Bénin, Burkina-Faso, Cameroun, Congo, Côte d'Ivoire, Gabon, Guinée Bissau, Mali, Mauritanie, Niger, R.C.A Sénégal, Tchad, Togo

- dans le cas des postes d'eau autonomes ou des mini AEP, les problèmes sont inverses ; la demande en eau payante est insuffisante pour assurer la rentabilité des équipements.

La connaissance des aquifères de socle a sensiblement progressé au cours de ces dernières années. La réalisation de nombreux programmes d'hydraulique villageoise a permis d'améliorer les techniques de prospection des eaux souterraines et les études scientifiques portant principalement sur la recharge et la modélisation des aquifères discontinus fournissent aujourd'hui les données et les outils nécessaires à une approche quantitative de la ressource exploitable.

## **1.2. OBJECTIF DU DOCUMENT-GUIDE - METHODOLOGIE DE L'ETUDE**

Le présent document-guide a pour objectif de mettre à la disposition des exploitants, sous forme de recommandations pratiques, les acquis récents sur l'hydrogéologie des aquifères de socle dans le domaine de la recherche des débits élevés et de leur exploitation à long terme. Les propositions portent sur :

- le choix des techniques à mettre en oeuvre pour délimiter les zones les plus favorables du point de vue de la ressource disponible et mettre à jour des débits ponctuels de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>/h avec une bonne probabilité de succès,
- la démarche méthodologique pour dimensionner les champs de captage (distance entre les ouvrages, débit d'exploitation) de façon à assurer la pérennité de la production.

L'étude, fondée sur l'analyse du fonctionnement de champs de captage exploitant les aquifères du socle du Burkina, de la Côte d'Ivoire, du Mali, du Niger et du Togo, comporte 3 phases :

### ***1) Collecte des données***

Un questionnaire récapitulant les informations souhaitées a été élaboré par le BRGM et le CIEH et envoyé aux Administrations en charge de l'Hydraulique des 5 pays concernés. Ce questionnaire porte sur le contexte climatique et géologique du site, les études d'implantation préalables, la description géologique et technique du champ de captage, l'historique des débits prélevés et des niveaux, la demande, les tarifs, le réseau et les problèmes rencontrés par l'exploitant.

Des missions d'experts du BRGM et du CIEH ont été envoyées dans les 5 pays pour collecter les questionnaires.

Malgré ces interventions, les données suffisamment complètes et fiables pour être interprétées sont limitées aux 20 centres secondaires en zone de socle du Burkina Faso et aux champs de captage de Dapaong au Togo. Au total, l'étude concerne 21 villes alimentées par 35 champs de captage totalisant 99 forages dont 73 exploités en 1991.

## **2 ) Synthèse des données, élaboration d'une méthodologie**

Dans un premier temps, les données recueillies ont été dépouillées et analysées. La synthèse permet de reconstituer la "vie" des champs de captage : consommation, débits maxima des ouvrages à long terme, problèmes liés à la ressource et à sa mobilisation, solutions retenues par les exploitants pour faire face à la demande.

Ensuite, une démarche méthodologique, tenant compte des problèmes rencontrés, a été élaborée. Cette démarche propose la mise en oeuvre de techniques spécifiques à l'hydrogéologie des aquifères de socle, pour l'implantation des ouvrages à débit élevé dans les zones les plus favorables du point de vue de la ressource, le dimensionnement des champs (espacement des ouvrages, débit d'exploitation) et la gestion prévisionnelle de la ressource au moyen de modèles mathématiques simples.

## **3 ) Applications**

A titre d'exemple, 2 champs de captage du Burkina, pour lesquels on dispose d'un minimum de données, ont été modélisés.

- Boromo - placé dans un contexte favorable (pluviométrie 812 mm, altérations saturées épaisses), ce champ de captage ne pose pas de problèmes d'exploitation.
- Koupela - site représentatif d'un contexte difficile où la production est obtenue par épuisement de la ressource.

A ces exemples, s'ajoute la synthèse hydrogéologique de la région de Dapaong pour laquelle un modèle de champ de captage a été élaboré (17)\*.

---

\* (17) référence bibliographique



## 2 - RAPPEL - LE DEBIT ET LA RESSOURCE

### 2.1. PRODUCTIVITE DES AQUIFERES DE SOCLE

#### 2.1.1. Résultats des campagnes d'hydraulique villageoise

La gamme des débits fournis par les forages qui captent les aquifères de socle peut être approchée par une analyse statistique des résultats des programmes d'hydraulique villageoise réalisés durant les dix dernières années en Afrique de l'ouest. Le tableau ci-dessous détaille la distribution des débits constatée sur près de 11 000 forages situés en zone soudano-sahélienne :

PAYS	NOMBRE DE FORAGES	CLASSES DE DEBITS (m <sup>3</sup> /h)			
		< 0,5 (%)	0,5 à 5 (%)	5 à 10 (%)	> 10 (%)
BURKINA	7 946	30	56	9	5
NIGER	582	30	54	10	5
TOGO	277	29	50	9	6
MALI	2 188	31	46	13	10
TOTAL/ MOYENNE	10 933	30	54	10	6

Tableau 1

Sur 100 forages réalisés, 30 sont inexploitable, 54 peuvent être équipés d'une pompe à main et 16 sont capables de recevoir une exhaure motorisée ; parmi ces derniers, 6 seulement fournissent un débit supérieur à 10 m<sup>3</sup>/h, débit qui est considéré par les exploitants comme la limite inférieure pour l'équipement d'un ouvrage destiné à l'alimentation d'un réseau centralisé.

Il faut souligner que ces résultats statistiques sont biaisés par les contraintes spécifiques à l'hydraulique villageoise africaine, à savoir :

- un débit minimum d'équipement de 0,5 m<sup>3</sup>/h ; les forages sont arrêtés lorsque le débit cible est obtenu.
- un rayon d'investigation réduit à la proximité immédiate du village, de l'ordre de 500 m environ.
- des techniques de prospection rapides et peu coûteuses : relevé des principaux accidents à proximité du village et repérage au sol. La prospection électrique ou électromagnétique réservée aux sites jugés difficiles (25 à 30 %) est réduite au minimum nécessaire à la mise en évidence d'une anomalie supposée favorable.

## **2.1.2. Recherche des débits élevés**

En prospection de type "hydraulique villageoise", il est possible de prévoir la probabilité d'obtenir un débit cible de 0,5 m<sup>3</sup>/h à partir du contexte hydrogéologique ; les facteurs favorables sont bien identifiés et leur poids sur le résultat du forage est évalué avec une précision satisfaisante en termes de taux de succès.

Lorsque le débit cible est fixé à 5 ou à 10 m<sup>3</sup>/h, il n'est plus possible d'identifier les facteurs favorables. Si, dans un ensemble de forages d'hydraulique villageoise, on isole la population des forages à gros débit, on ne peut pas expliquer par une analyse du contexte géologique et structural pourquoi ces forages présentent un débit plus élevé que les autres. Autrement dit, en prospection de type "hydraulique villageoise", la mise à jour d'un débit supérieur à 5 m<sup>3</sup>/h est totalement aléatoire.

Ce constat n'est pas surprenant lorsqu'on sait que le débit fourni par une fracture est proportionnel au cube de son épaisseur. Suivant que le forage recoupe une fracture de 0,35 mm ou 0,75 mm, le débit pour 10 m de rabattement est de 1 m<sup>3</sup>/h ou 10 m<sup>3</sup>/h. Les techniques de prospection ne sont évidemment pas capables de faire la différence entre des discontinuités aussi peu contrastées.

Il est donc nécessaire, dans le cas des études d'implantation de forages à débit élevé, de s'affranchir des contraintes de l'hydraulique villageoise pour accroître de façon significative les chances d'obtenir les débits demandés. Cela suppose :

- l'augmentation du rayon d'investigation ;
- une prospection régionale et non plus ponctuelle pour délimiter les zones favorables ;
- l'étude détaillée de chaque zone favorable par des méthodes de prospection fines capables de mettre en évidence les secteurs dans lesquels la probabilité de succès est maximum.

Cette démarche a été appliquée au Burkina Faso, dans le cadre du Projet Milieu Fissuré II (23). Les résultats montrent que le taux de succès pour un débit cible de 10 m<sup>3</sup>/h atteint 30 % alors qu'il n'est que de 6 % en prospection "hydraulique villageoise".

## **2.2. RESSOURCES DES AQUIFERES DE SOCLE**

### **2.2.1. Schématisation des aquifères**

Le socle est constitué de roches cristallines ou métamorphiques imperméables. Cependant, les contraintes tectoniques ont développé, au sein des formations compactes, des réseaux de fractures suffisamment denses et ouvertes pour conduire et stocker les eaux infiltrées depuis la surface du sol.

Ce réservoir discontinu, car limité aux zones fracturées-fissurées, peu épais et faiblement perméable, présente des capacités d'emmagasinement réduites.

Les roches du socle sont généralement recouvertes par les produits de leur altération physico-chimique. La nature et l'épaisseur du recouvrement altéré sont déterminées par la lithologie de la roche mère, les conditions climatiques et l'intensité de la fracturation. Les altérations à prédominance argileuse constituent un deuxième réservoir peu perméable mais poreux, en liaison hydraulique plus ou moins directe avec les fractures aquifères sous-jacentes.

Le sol et son recouvrement forment donc un système bicouche comprenant un réservoir inférieur discontinu transmissif et un réservoir supérieur qui assure, par sa bonne porosité, la fonction de stockage ; c'est par le captage du réseau de fractures qu'il est possible de mobiliser les eaux contenues dans les altérations.

### **2.2.2. Evaluation de la capacité de stockage**

La figure 1 représente la coupe type des terrains rencontrés en zone soudano-sahélienne sur substratum granitique. A partir des valeurs de porosité efficace les plus généralement admises, on a calculé le volume d'eau disponible par m<sup>2</sup> de surface au sol, pour chaque formation. On constate que le volume total contenu dans la partie utile du système aquifère (les 60 premiers mètres) varie suivant les fourchettes de porosité entre 600 et 1 300 l/m<sup>2</sup>. Les altérations contiennent à elles seules, 92 à 93 % de l'eau disponible.

Il est important de souligner qu'en zone de socle, la fonction stockage c'est-à-dire la capacité régulatrice des réservoirs, est assurée par les altérations. Lorsque celles-ci sont absentes ou sèches, les ressources disponibles à long terme sont limitées aux seules ressources renouvelables, c'est à dire, à la fraction de la pluie qui chaque année atteint le réservoir de fractures.

### **2.2.3. Evaluation des ressources renouvelables**

La recharge annuelle par les pluies des aquifères de socle fait actuellement l'objet de nombreuses études. Les principaux résultats obtenus sur les sites comparables du point de vue hydrogéologique et climatique au contexte de la zone soudano-sahélienne africaine sont résumés dans le tableau 2. Les valeurs de recharge exprimées en pourcentage des

Méthode	Pays	Sites	Pluie annuelle - (mm )	recharge annuelle (mm)	R/P %	
Traçage tritium (piston - flow)	INDE	LOVER MANER	1250	100	8	
		GODAVARI-PURNA	652	56	3	
		KUKADI	612	46	8	
		MARUANKA	550	42	8	
		VEDAUATI	565	6,6 à 39	1 à 7	
		VATTAMALAIKARAI	460	61	13	
		NOYIL	715	69	10	
		PONUANI	1320	61	5	
		CHITRAUATI	615	25	4	
		KUNDERU	615	29	5	
		MANILA	390	24	6	
		AUREPALLE - 1984 15 sites	563			
		minimum		- 15	- 3	
		maximum		103	18	
moyenne		32	6			
AUREPALLE - 1985 12 sites	583					
minimum						
maximum						
moyenne						
Bilan du chlore	ZIMBABWE	Province de Victoria	500	10	2	
			728	22	3	
Bilan hydrologique	ZIMBABWE	CHIREDDI (12 ans)	818	38	5	
		MZERO (18 ans)	1055	90	9	
		MUSOKEWSI (10 ans)	1126	48	4	
		LUNDI (9 ans)	797	15	2	
		LUNDI RIVER				
		1975	1511	82	5	
		1976	720	11	2	
		1977	763	39	5	
		1978	919	27	3	
		1979	521	8	2	
		1980	634	9	1	
		1981	905	12	1	
		1982	441	7	2	
		1983	211	3	1	
Moyenne	736	22	3			
Modèle global	BURKINA	OUAGADOUGOU	690	23 à 45	3 à 7	
	TOGO	BAROGO (1985-1990)	595	53	9	
		DAPAONG	602	33	5	
Modèles hydrodynamiques	BURKINA	SANON (moyenne)	650	63	10	
		BAROGO (moyenne)	762	20	3	
		KATCHARI (moyenne)	366	18	5	

Tableau 2

précipitations moyennes annuelles et classées par méthodes d'expérimentation permettent de dégager les points importants suivants :

- La fraction de la pluie qui alimente les aquifères est faible. Compte non tenu des valeurs extrêmes (- 3, 18), les valeurs calculées sont comprises dans l'intervalle 1 à 13 % avec une médiane à 4,5 %.
- A l'intérieur d'un bassin, la distribution maximale de la recharge n'est pas uniforme.

Dans le bassin d'Aurepalle (Inde), les valeurs de recharge en 1984 varient de - 15 à 103 mm suivant la position du point de mesure (tableau 2).

Les modèles hydrodynamiques réalisés au Burkina Faso conduisent à adopter, pour restituer les historiques de niveaux observés, des valeurs d'infiltration très différentes selon la géomorphologie des bassins. Les éléments du calage pour les bassins de Sanon et Barogo sont résumés ci-dessous :

SITES	BAROGO					SANON				
	1	2	3	4	Site	1	2	3	4	Site
Unités morphologiques*										
Superficie (km <sup>2</sup> )	23,4	1,0	2,6	2,9	30	14,4	1,2	4,4	1	21
Pluviométrie (mm)					762					650
Recharge annuelle (mm)	5	25	170	5	20,2	28	205	90	295	63,0
Volume recharge 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	117	25	449	15	606	404	244	399	277	1324
R/P	0,7	3,3	22,3	0,7	2,6	4,3	31,5	13,8	45,4	9,7
Ruissellement (mm)					30,0					12 à 24

Tableau 3

\* Barogo 1 et 4 : versants

2 : bas-fond argileux

3 : bas-fond avec socle fracturé affleurant

\* Sanon 1 : versants

2 : périphérie du bas-fond aval

3 : amont du bas-fond aval

4 : centre du bas-fond aval

On constate que les bas-fonds sont des zones privilégiées de recharge ; la concentration du ruissellement multiplie l'infiltration par un facteur de 11 à 34 par rapport aux valeurs mesurées sur les pentes.

A Sanon, le bas fond qui représente 31 % de la surface du bassin, totalise 70 % du volume infiltré. A Barogo, 12 % de la superficie reçoivent 78 % de la recharge.

La valeur de la recharge est fortement influencée par la distribution temporelle des averses pendant la saison des pluies :

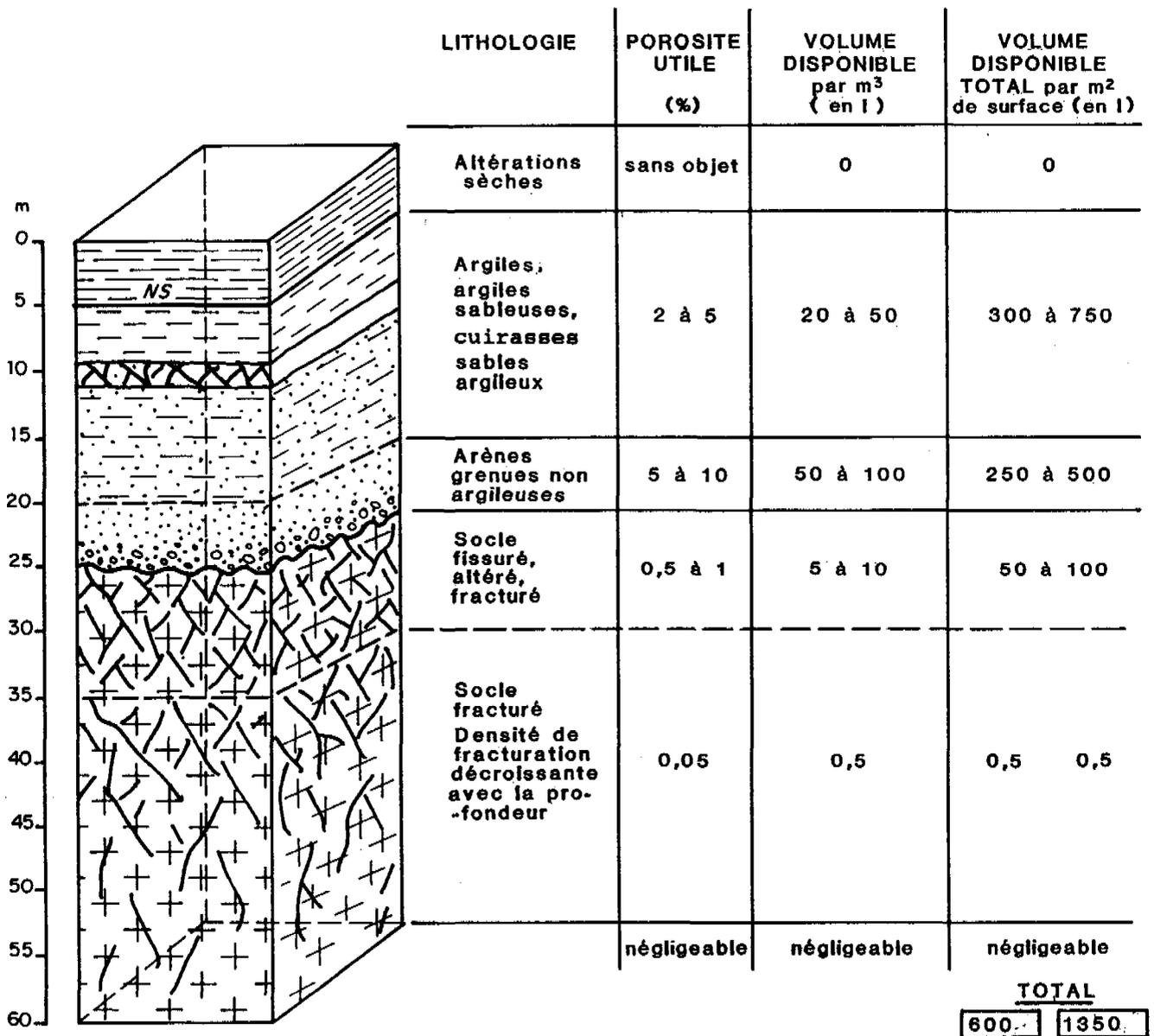


Fig.1 - COUPE SCHEMATIQUE TYPE ET VOLUMES STOCKES

Dans le bassin d'Aurepalle, les hauteurs pluviométriques enregistrées en 1984 et 1985 sont pratiquement identiques ; cependant, la modification de la chronologie et de l'intensité des pluies entraîne une variation de la recharge moyenne du simple au double.

A Barogo, le calcul sur la période 1953 - 1988 par modèle global montre que les valeurs de recharge sont comprises entre 15 et 260 mm alors que la pluie annuelle varie de 500 à 1000 mm.

En résumé, de l'état actuel de nos connaissances sur les ressources des aquifères de socle, on retiendra les deux points suivants :

**1) Les ressources renouvelables sont toujours faibles**

A l'échelle du bassin, l'ordre de grandeur de la recharge moyenne peut être grossièrement estimé à 5 % de la pluie annuelle. Les ressources renouvelables, calculées à partir de cette valeur, dans les différentes zones climatiques, seraient les suivantes :

	Zone sahélienne	Zone soudano-sahélienne	Zone soudanienne
Pluie annuelle (mm)	400 à 600	600 à 800	800 à 1200
Recharge (mm)	20 à 30	30 à 40	40 à 60
Ressources/km <sup>2</sup> en m <sup>3</sup> /a	20 000 à 30 000	30 000 à 40 000	40 000 à 60 000
Ressources/km <sup>2</sup> en m <sup>3</sup> /j	55 à 82	82 à 110	110 à 164

***2 ) Les ressources renouvelables sont irrégulièrement réparties dans l'espace et dans le temps***

Les zones de concentration du ruissellement, les marigots, les mares et plus généralement les bas-fonds, reçoivent la majeure partie de l'infiltration. En un point donné, la forte variabilité interannuelle de la pluie induit une variabilité encore plus grande de la recharge.

**Ces constats permettent de définir les lignes directrices de l'exploitation des aquifères du socle :**

**Compte tenu de la faible diffusivité et du compartimentage de ces aquifères, le débit demandé à un champ de captage devra être du même ordre de grandeur que la ressource renouvelable disponible dans la zone d'influence. La pérennité de la production sera d'autant mieux assurée que l'aquifère de socle sollicité sera surmonté d'altérations saturées capables par leur capacité régulatrice de gommer les fortes variations interannuelles de la recharge.**

### 3 - ETUDE DE CAS

#### 3.1. DONNEES DISPONIBLES

Les informations recueillies concernent la production d'eau potable de vingt centres secondaires situés en zone de socle au BURKINA FASO et de la ville de DAPAONG au TOGO (fig. 2). Au total, les données disponibles portent sur 99 forages d'exploitation que l'on peut regrouper en 35 champs de captage. La distribution des AEP étudiées dans les différentes zones climatiques est la suivante :

Zones climatiques	Nombre AEP	Nombre champs de captage	Nombre total de forages	Nombre forages exploités en 1990
Sahélienne (300-600 mm)	7	11	30	26
Soudano-sahélienne (600-800 mm)	8	16	41	25
Soudanienne (800-1200 m)	6	8	28	22
Total	21	35	99	73

Tableau 4

Le tableau 5 détaille, par centre, le nombre de forages d'exploitation et la période sur laquelle un minimum d'informations a pu être obtenu.

Pour tous les champs de captage on dispose des données suivantes :

- . plan de position des forages,
- . coupes géologiques et techniques des ouvrages de production,
- . paramètres hydrauliques initiaux : débits, rabattements, niveaux statiques,
- . production mensuelle de chaque ouvrage,
- . mesures de niveau dans les forages pompés ; ces mesures sont très peu nombreuses au Burkina dans la période 1981-1988. A partir de 1989, on dispose, sur la plupart des champs de mesures mensuelles.

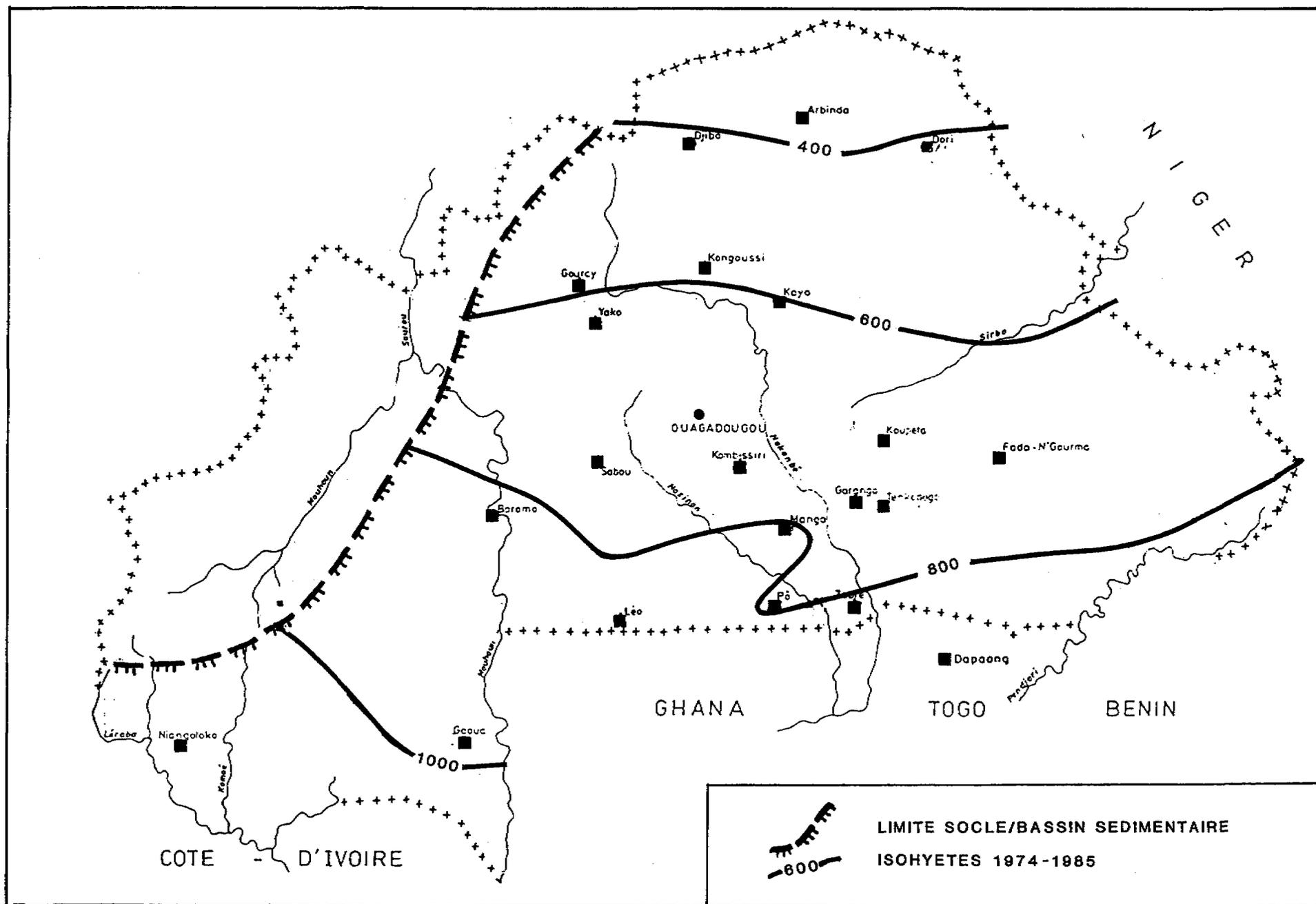


Fig.2 - LOCALISATION DES CHAMPS DE CAPTAGE ETUDIÉS

Zones climatiques	Champs de captage	Nombre total forages exploités	Nombre forages exploités en 1990	Durée exploitation (années)
Sahélienne P = 300 à 600 mm	Aribinda 1	1	1	3
	Aribinda 2	2	2	3
	Dtibo	3	2	3
	Dori 1	5	5	5
	Duri 2	3	3	4
	Govecy 1	2	2	3
	Govecy 2	1	1	3
	Kongoussi	2	2	3
	Kaya 1	3	2	9
	Kaya 2	6	4	6
	Yako	2	2	3
Sous-total 2 Sahel	11	30	26	
Soudano-Sahélienne P = 600 à 800 mm	Fada Ngourma 1	9	2	9
	Fada Ngourma 2	1	1	5
	Fada Ngourma 3	1	1	4
	Fada Ngourma 4	1	1	1
	Koupela 1	3	2	9
	Koupela 2	2	2	7
	Koupela 3	1	0	3
	Koupela 4	1	1	2
	Kombissiri	3	2	3
	Sabou	3	1	7
	Tenkodogo 1	5	3	9
	Tenkodogo 2	1	1	4
	Garango	2	2	3
	Manla	2	2	3
	Po 1	5	3	10
Po 2	1	1	4	
Sous-total Soudano-Sahel	16	41	25	
Soudanienne P = 800 à 1200 mm	Buromo	3	2	10
	Leo	3	3	4
	Groua 1	3	2	10
	Groua 2	2	2	6
	Niangoloko	4	4	6
	Zabre	3	3	3
	Dapaong 1	9	5	9
	Dapaong 2	1	1	6
Sous-total Soudan	8	28	22	
<b>TOTAL</b>	<b>35</b>	<b>99</b>	<b>73</b>	

Tableau 5

Les historiques production/niveau ainsi que la coupe géologique schématique sont reproduits sous forme graphique dans l'annexe 1.

Les informations relatives aux études d'implantation des forages et aux essais de débits sont limitées à quelques sites.

Ces données chiffrées sont complétées par les commentaires des chefs de centre sur les difficultés qu'ils rencontrent dans l'exploitation des champs et plus généralement dans la satisfaction de la demande.

L'ensemble des informations recueillies permet de reconstituer l'évolution des champs de captage sur une période dont la durée varie de 3 à 10 ans. Pour identifier les problèmes techniques posés par l'exploitation intensive et concentrée des aquifères de socle on étudiera en détail 3 cas jugés représentatifs des contraintes spécifiques aux régions de socle sous climat soudano-sahélien.

## **3.2. LES CHAMPS DE CAPTAGE "A PROBLEMES"**

### **3.2.1. KOUPELA**

#### *• Contexte physique*

KOUELA, chef-lieu de la province de KOURITENGA est une ville de 12 000 habitants située dans la partie orientale du BURKINA FASO à 140 km de OUAGADOUGOU.

Au point de vue géologique la ville est située sur un sillon birrimien étroit, constitué de formations volcano-sédimentaires injectées de granites post tectoniques. La puissance du recouvrement altéré est faible : 0 à 15 m.

#### *• Consommations et réseau de distribution*

L'évolution des consommations d'eau potable et du réseau de distribution est résumée pour la décennie 80 dans le tableau 6 ci-après.

Années	81	82	83	84	85	86	87	88	89
Consommation 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /an	36	47	35	51,5	77,7	73,8	58,9	54,3	79,1
Nombre Abonnés	41	83	103	122	142	144	204	215	254
Nombre bornes fontaines	13	13	13	14	16	14	14	16	16
Longueur des canalisations (m)									13877
Capacités de stockage (m <sup>3</sup> )									150

Tableau 6

Les consommations facturées ont été multipliées par 2,2 en 10 ans. Ce chiffre ne correspond pas à l'accroissement de la demande, fortement freinée par les capacités limitées de production.

On note que 75 % des consommations sont prélevés aux bornes fontaines.

• *Champs de captage*

De 1981 à 1990, 7 forages d'exploitation ont été réalisés pour l'AEP de Koupela. Ces ouvrages sont regroupés en 4 champs de captage.

**Le champ n°1** comprend 3 forages contenus dans un cercle de 100 m de rayon. Ces forages captent des granites fissurés sous une épaisseur d'altérations de 15 m. Le niveau statique initial étant situé à 10 m le réservoir supérieur est peu épais (5 m) et rapidement dénoyé en pompage. Les débits en fin de foration sont compris entre 5 et 8 m<sup>3</sup>/h.

Les 3 forages ont produit en 1982 un débit journalier moyen annuel de 160 m<sup>3</sup> qui a décré régulièrement jusqu'en 1988, date à laquelle l'exploitation a été arrêtée pour insuffisance de ressource. En 1989 l'exploitation a été reprise et le débit, aujourd'hui stabilisé est de 36 m<sup>3</sup>/j (2 forages).

**Le champ n°2** comprend 2 forages espacés de 200 m à 2,5 km du champ n°1. Les granites et gabbros captés sont recouverts d'altérations sèches. Les débits initiaux en fin de foration sont de 12 et 18 m<sup>3</sup>/h.

Mis en service en 1984, ces 2 ouvrages ont fourni un débit maximum de 190 m<sup>3</sup>/j en 1986 qui a décliné régulièrement pour atteindre 79 m<sup>3</sup>/j en 1990.

**Le champ n°3** est représenté par un seul forage qui capte un réservoir de migmatites fissurées, surmontées de 5 m d'altérations saturées. Le débit en fin de foration était de 14 m<sup>3</sup>/h. Mis en production en 1988 à 74 m<sup>3</sup>/j ce forage a été "épuisé" après un an et demi d'exploitation.

**Le champ n°4** comporte un forage unique (F 7) situé à 750 m du champ n°3. L'ouvrage exploité récemment (1989) a fourni 131 m<sup>3</sup>/j en 1990. La baisse de niveau enregistrée sur un an est de 10 m ce qui laisse supposer un tarissement rapide.

Koupela est un exemple de surestimation des ressources d'un aquifère limité au seul réservoir de socle. Les débits d'exploitation ont été déterminés au seul vu des débits instantanés des ouvrages à la réception, sans tenir compte de la capacité des aquifères.

Des prélèvements concentrés de 150 à 200 m<sup>3</sup>/j entraînent une baisse des niveaux dans les forages pompés, de l'ordre de 25 m, qui a pour effet de dénoyer les principales venues d'eau.

En 1990 les 5 forages exploités fournissent un débit total de 246 m<sup>3</sup>/j non stabilisé car le forage F7 est surexploité. La conservation de la production actuelle et a fortiori son augmentation passe par la dispersion des prélèvements, ce qui pose le problème des investissements à consentir pour la multiplication des ouvrages et à terme le problème de la rentabilité du système d'approvisionnement.

### **3.2.2. FADA N'GOURMA**

#### *• Contexte physique*

Le chef-lieu de la province du Gourma est situé dans la partie est du pays à 200 km de la capitale. La population de la ville en 1991 est estimée à 25 000 habitants.

Du point de vue géologique, Fada est située sur des formations volcano-sédimentaires et granitiques d'âge birrimien. La puissance du recouvrement altéré qui varie très rapidement est comprise entre 0 et 30 m.

La pluie moyenne annuelle sur la période 1981-90 est de 730 mm avec un maximum à 889 mm (1989) et un minimum à 612 mm (1986).

• *Consommations et réseau de distribution*

Le tableau ci-dessous récapitule les consommations facturées et l'évolution du réseau de distribution pendant la période 1982-1989.

Années	1982	83	84	85	86	87	88	89
Consommation (m <sup>3</sup> /an)	28	27	71	90	96,5	90,5	96	102,5
Nombre abonnés	39	58	77	97	126	147	161	174
Nombre bornes fontaines	18	18	19	21	21	22	22	22
Longueur de canalisations (m)								19319
Capacité stockage (m <sup>3</sup> )								150

Tableau 7

Les consommations ont été multipliées par 3,2 dans les 4 premières années. A partir de 1986, la croissance est freinée par les capacités de production. D'après l'ONEA le taux de couverture des besoins est de 57 % et les consommations sont prélevées à 60 % aux bornes fontaines.

• *Les champs de captage*

L'alimentation de la ville a nécessité la réalisation de 11 forages d'exploitation répartis en 3 champs de captage.

**Le champ n°1** comprend 9 forages situés dans un cercle de 300 m de rayon. Les mises en production et abandon "par épuisement" se sont succédés au cours du temps. La production maximum a atteint 285 m<sup>3</sup>/j avec 7 forages en exploitation. En 1990 deux forages seulement sont exploités et fournissent un débit total de 67 m<sup>3</sup>/j en régime quasi-permanent.

Ce champ capte un aquifère granito-gneissique fracturé recouvert d'altérations dont la puissance varie de 18 à 30 m, la hauteur saturée avant exploitation étant comprise entre 0 et 18 m. Les débits d'exploitation recommandés, estimés après les essais de pompage de réception sont compris entre 5 et 8 m<sup>3</sup>/h.

**Le champ n°2** comprend un forage unique (F10) situé à 2,5 km du champ n°1. Il capte des gneiss fissurés sous 20 m d'altérations saturées. Le débit

initial en fin de foration était de 6,5 m<sup>3</sup>/h. Le débit moyen est passé de 88 m<sup>3</sup>/j en 1986 à 51 m<sup>3</sup>/j en 1990. A ce débit, les niveaux sont stables.

**Le champ n°3** comprend un seul forage (F11) situé à 1,2 km du champ n°1 et 2,5 km du champ n°2. L'ouvrage capte des gneiss fracturés sous 3 m d'altérations saturées avant pompage. Le débit initial en fin de foration est de 12 m<sup>3</sup>/h.

Mis en service en 1987, au débit moyen de 62 m<sup>3</sup>/j le forage a produit un débit maximum de 130 m<sup>3</sup>/j en 1989. La baisse de niveau dans le forage, de l'ordre de 20 m par rapport au niveau statique initial, laisse prévoir une chute rapide de la production.

**Le champ n°4** est constitué par un forage unique (F12) mis en production en 1990 au débit moyen de 87 m<sup>3</sup>/j.

FADA est un exemple particulièrement représentatif d'une exploitation menée en totale ignorance des contraintes hydrogéologiques.

Méconnaissance des phénomènes d'interférences : Le champ n°1 totalise 9 ouvrages dans un rayon de 300 m ; le débit d'exploitation de chaque forage est déduit de la courbe rabattement / débit obtenu par un court essai de réception, sans tenir compte des influences des forages voisins. Après 9 ans de tâtonnements deux forages (F7 et F9) sont exploités à 3 m<sup>3</sup>/h alors que le débit d'exploitation recommandé est de 6,5 m<sup>3</sup>/h. La production journalière actuelle, 67 m<sup>3</sup>, aurait pu être obtenue par un seul ouvrage correctement implanté.

Méconnaissance des ressources exploitables dans un contexte hydrogéologique et climatique donné ; le forage F 11 est exploité à 130 m<sup>3</sup>/j. Ce débit est trop élevé compte tenu de la faible épaisseur d'altérations saturées et de la position haute de la principale venue d'eau (-20 m).

### **3.2.3. DAPAONG**

Dapaong est située dans le nord du Togo à la limite du socle cristallin et du bassin gréseux ancien. Le socle est représenté par des granito-gneiss recouverts d'une formation altérée de 8 à 10 mètres d'épaisseur.

Le climat est de type soudanien avec des pluies moyennes annuelles de 1040 mm. Sur les 10 dernières années, la moyenne est tombée à 900 mm.

La ville est alimentée en eau potable à partir de 2 aquifères : le socle cristallin et les grès anciens. Les grès sont peu productifs et ne contribuent en 1990 que pour 16 % du total.

**Le champ de captage n°1** comprend au total 9 forages concentrés sur 15 km<sup>2</sup>. Mis en exploitation à 400 m<sup>3</sup>/j (7 forages) en 1982, la production a

chuté à 200 m<sup>3</sup>/j en 1986. Aujourd'hui le champ est exploité par 6 forages au débit moyen de 304 m<sup>3</sup>/j. Ce débit n'est pas stabilisé, la baisse de niveau dans les forages par rapport au niveau initial atteint en moyenne 15 m.

**Le champ n°2** est un forage unique (F7) situé à 1,2 km du champ n°1. Ce forage est exploité depuis 1985 au débit moyen de 200 à 229 m<sup>3</sup>/j. Le niveau baisse régulièrement de 4 m par an.

Pour faire face à la demande, 4 nouveaux forages ont été mis en exploitation en novembre 1990.

On retrouve à Dapaong, les mêmes problèmes qu'à Fada : concentration excessive des prélèvements et surestimation des ressources mobilisables. De façon plus générale Dapaong pose le problème de la faisabilité économique d'une AEP de ville importante à partir des seules eaux souterraines en zone de socle.

**Les exploitants doivent faire face à 3 problèmes :**

- *un accroissement constant de la demande* qui nécessiterait en 1991 le doublement du réseau de distribution.
- *la surexploitation des ouvrages* qui entraîne à la fois l'abandon des forages "épuisés" (investissements pour la réalisation des forages de remplacement et raccordements) et la baisse du débit des forages (surconsommation énergétique).
- *l'impossibilité de faire face à la pointe de consommation en saison sèche* : les besoins en pointe sont estimés à 2000 m<sup>3</sup>/j alors que le potentiel de production des 12 forages exploités (socle et grès) est limité en 1991 à 1400 m<sup>3</sup>/j.

Compte tenu des coûts d'exhaure, du traitement de l'eau par chloration, des travaux de maintenance et d'extension du réseau, le centre de Dapaong présente un bilan financier négatif, les recettes ne couvrant que les coûts énergétiques.

En conséquence, la RNET envisage de recourir aux eaux de surface par la réalisation d'un barrage.

### **3.2.4. Conclusions**

Les problèmes rencontrés à Koupela, Fada et Dapaong sont ceux de tous les centres secondaires des zones sahélienne et soudano-sahélienne. Les difficultés sont liées à deux types de contraintes :

- *La faible potentiel hydraulique des aquifères de socle* : La discontinuité des réservoirs et leur faible capacité d'emménagement ont pour effet de limiter les ressources exploitables à long terme à la recharge annuelle par les pluies (cf. 223). La perméabilité toujours médiocre des milieux fissurés fracturés

rend difficile et coûteuse la mobilisation de la ressource disponible à partir de forages dont le débit instantané est rarement supérieur à 10 m<sup>3</sup>/h.

- *Les contraintes économiques* : Des capacités d'investissement inférieures aux besoins, un prix de vente de l'eau fixé suivant des critères sociologiques et non en fonction du prix de revient obligent les organismes responsables de l'AEP des centres secondaires à retenir les solutions les moins coûteuses à court terme : recherche de sites à proximité immédiate de la ville, concentration excessive des prélèvements et surexploitation des ouvrages par allongement des durées de pompage. A terme, cette stratégie se traduit par l'accumulation d'investissements improductifs (forages et raccordements abandonnés) et de surcoûts énergétiques, qui rendent les solutions "économiques" très coûteuses.

Enfin il apparaît que les responsables des organismes nationaux en charge de l'alimentation en eau potable des centres secondaires ne maîtrisent qu'imparfaitement l'hydrogéologie des aquifères de socle. La méthodologie proposée dans les chapitres suivants devrait les aider à mieux concevoir la recherche des sites de production, le dimensionnement des champs de captage et la gestion prévisionnelle de l'exploitation. Cependant pour être mise en application, cette démarche suppose que les pouvoirs publics fixent le prix de vente de l'eau à un niveau suffisant pour assurer l'équilibre financier d'un service que le contexte physique rend inévitablement coûteux.

## **4 - METHODOLOGIE PROPOSEE POUR L'IMPLANTATION DES FORAGES A DEBIT ELEVE**

### **4.1. DEMARCHE**

La démarche à adopter pour la recherche des débits élevés en zone de socle procède par étapes successives, chaque étape regroupant les études nécessaires à la résolution des problèmes suivants :

**- Evaluer la faisabilité technique "a priori" du projet**

Il s'agit de comparer la demande prévisionnelle à différents horizons, aux débits pérennes que l'on peut attendre dans le contexte hydrogéologique et climatique de la ville à desservir, afin de chiffrer grossièrement le nombre de forages nécessaires et leur dispersion géographique. Si la solution "eau souterraine" est jugée viable on fixe le rayon d'investigation maximum admissible.

**- Rechercher et délimiter les zones favorables du point de vue de la garantie de ressource**

A l'intérieur de la zone d'étude précédemment délimitée, on identifie les secteurs de la nappe qui présentent à la fois un potentiel de recharge élevé et des épaisseurs d'altérations saturées maximum.

**- Rechercher dans les zones "à ressource garantie" les points où la probabilité de trouver un débit ponctuel important est forte**

Les études d'implantations sur le terrain consistent à localiser les zones perméables dans une position telle qu'elles soient en mesure de drainer la plus grande partie de la ressource.

Contrairement à la démarche du type "hydraulique villageoise", trop souvent transposée directement à l'AEP des centres secondaires, l'approche proposée ici donne la priorité à l'étude du réservoir c'est à dire de la ressource. Le positionnement des captages n'intervient que lorsqu'une ressource mobilisable suffisante pour couvrir la demande prévisionnelle a été mise en évidence.

L'enchaînement des différentes opérations à mettre en oeuvre au cours de la phase d'implantation ainsi que les articulations avec les phases suivantes (dimensionnement des champs de captage, suivi de l'exploitation) sont représentés graphiquement sur l'organigramme général placé en fin de texte.

## **4.2. LES DIFFERENTES PHASES DES ETUDES D'IMPLANTATION**

Les différentes actions à mener lors des études d'implantation peuvent être regroupées en phases opérationnelles suivant l'échelle d'investigation et les moyens à mettre en oeuvre. On distinguera 3 phases :

### **- La phase préparatoire**

C'est une étude régionale rapide fondée sur l'analyse des documents existants. Elle a pour objectifs de juger de la faisabilité du projet, de fixer le rayon maximum d'investigation et d'orienter le contenu des phases suivantes.

### **- La phase de reconnaissance hydrogéologique**

Ce sont les études sur le terrain à l'échelle du bassin versant hydrogéologique qui permettent de vérifier les hypothèses formulées en phase préparatoire, acquérir des données complémentaires, délimiter les zones favorables et positionner les travaux à réaliser dans la phase suivante.

### **- La phase de prospection détaillée**

Au cours de cette dernière phase sont mises en oeuvre les techniques de prospection géophysique à l'échelle kilométrique puis décamétrique ; il s'agit ici de positionner de façon précise, à l'intérieur des zones reconnues comme favorables, les secteurs à perméabilité maximum.

### **4.2.1. Phase préparatoire**

#### **- Collecte et analyse des données existantes**

Les nombreux programmes d'hydraulique villageoise réalisés dans les dix dernières années ont apporté une masse considérable de données sur les aquifères de socle. Dans la plupart des pays d'Afrique francophone, les informations sont stockées sous forme de dossiers villageois ou dans des bases de données informatisées capables de restituer une information déjà synthétisée (BURKINA, MALI, NIGER).

La collecte concerne tous les forages réalisés dans l'aire qui présente des conditions géologiques et climatiques comparables aux conditions de la ville à approvisionner. L'analyse doit permettre d'établir les documents suivants :

- histogramme des épaisseurs d'altération
- profondeurs du niveau statique en fonction de la géomorphologie (bas fonds, plateaux, interfluves)
- courbe des débits classés obtenus en fin de foration
- histogramme des débits spécifiques d'après les essais de réception

- qualité chimique des eaux

#### **- Interprétation de l'imagerie satellitaire**

L'étude des images fournies par les satellites permet d'extrapoler, à l'échelle régionale, les données ponctuelles de forage et de délimiter rapidement, sur de vastes régions, les secteurs a priori favorables.

L'analyse porte sur le réseau hydrographique, les états de surface et les "discontinuités-images".

- Le réseau hydrographique

L'étude du réseau hydrographique a pour objectif de différencier les zones de ruissellement des zones de recharge et d'orienter la recherche des secteurs les plus perméables.

L'analyse, effectuée sur des compositions colorées à 1/200 000 ou 1/50 000 traitées pour rehausser les marqueurs du réseau, comprend deux étapes :

- Squelettisation du réseau hydrographique et digitalisation pour faciliter les études statistiques.
- Hiérarchisation du chevelu selon la méthode de STRAHLER pour évaluer la densité du réseau.

Les guides d'interprétation des cartes synthétiques obtenues après traitements statistiques sont les suivants :

- La densité du réseau hydrographique est anti-corrélée à l'aptitude à l'infiltration des eaux : plus le réseau est dense plus les eaux ruissellent. Les zones potentiellement favorables à la recharge sont caractérisées par une faible densité des drains d'ordre 1.
- Les incisions du réseau hydrographique, vallées rectilignes bien marquées superposées aux fractures profondes, soulignent la fragilité du milieu.

Direction et densité du réseau sont donc des indicateurs de la perméabilité régionale.

- Les discontinuités images et photo-linéaments

L'interprétation des discontinuités-images est effectuée sur des compositions colorées à l'échelle 1/50 000, simultanément avec la recherche de photo-linéaments sur des couples stéréoscopiques de photographies aériennes à la même échelle qui offrent un pouvoir de résolution supérieure.

Une première interprétation "visuelle" permet de repérer les grands accidents plurikilométriques auxquels sont associées les zones de fracturation intense et qui

présentent, par leur développement, les plus fortes capacités de drainage de la ressource.

Dans un deuxième temps, l'étude statistique des discontinuités (longueurs, directions) fait apparaître la distribution des orientations et permet un classement en "familles de directions". Cette analyse devrait également permettre, par rapprochement avec l'histoire tectonique régionale, de déterminer les directions pour lesquelles l'ouverture des fractures, donc la perméabilité, est maximum.

La figure 3 reproduit des exemples d'interprétation de l'imagerie satellitaire.

#### **- Suite à donner au Projet**

Au terme de la synthèse des données et de l'interprétation des images satellitaires, le contexte hydrogéologique régional est connu. Tenant compte des conditions climatiques directement accessibles, il est possible d'évaluer la probabilité de rencontrer, dans un rayon d'investigation donné, le réservoir et les conditions d'exploitation requises par le projet.

Cette évaluation "a priori" de la faisabilité du projet est fondée sur la comparaison entre les débits demandés et les débits pérennes obtenus dans un contexte hydrogéologique et climatique comparable. En l'absence d'exemples d'exploitation intensive pour lesquelles on disposerait d'historiques de débits et de niveaux on se référera aux ordres de grandeurs des débits pérennes évalués à partir des résultats constatés sur les champs de captage du Burkina et du Togo (cf. annexe 1).

#### **4.2.2. Phase de reconnaissance hydrogéologique**

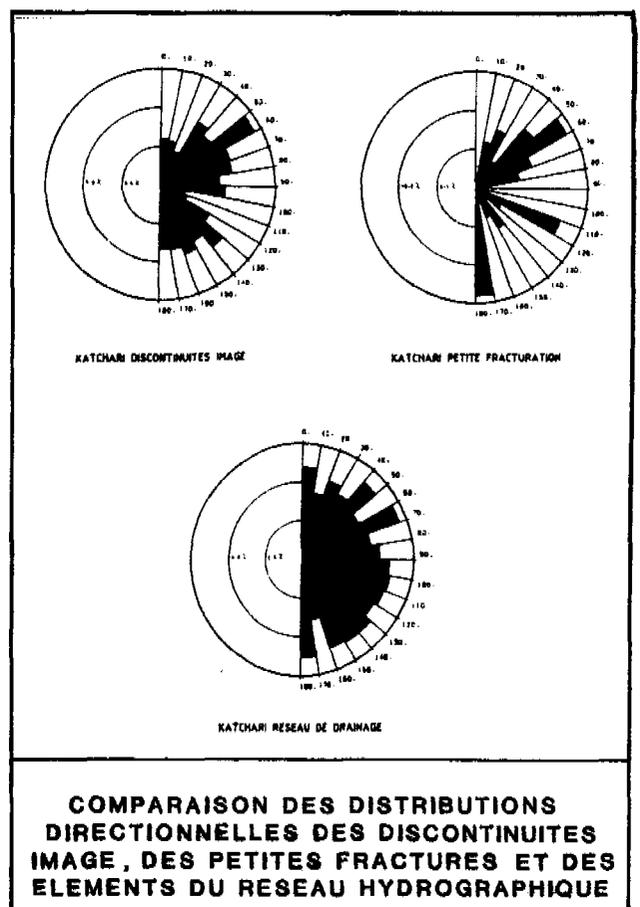
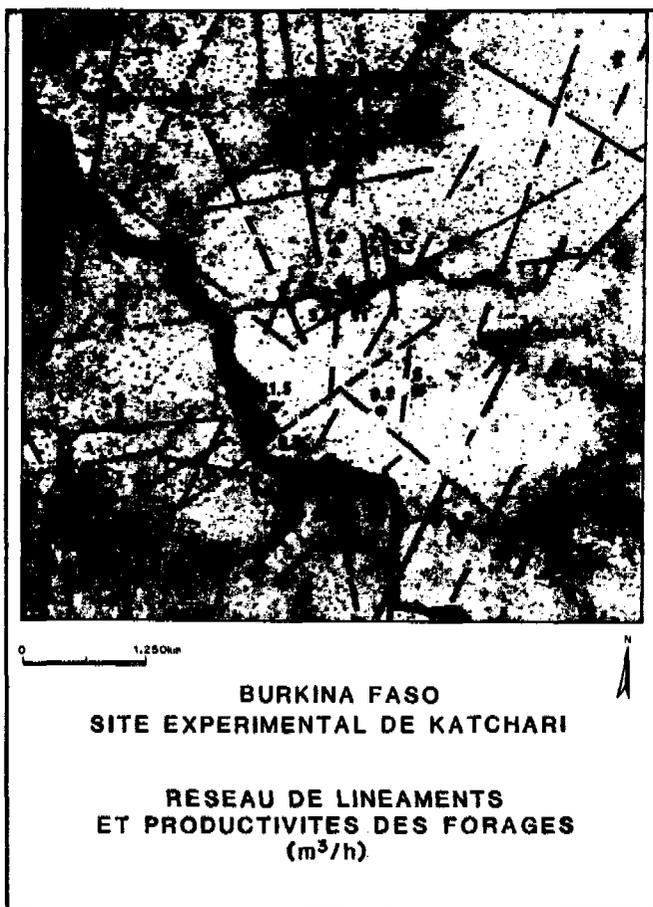
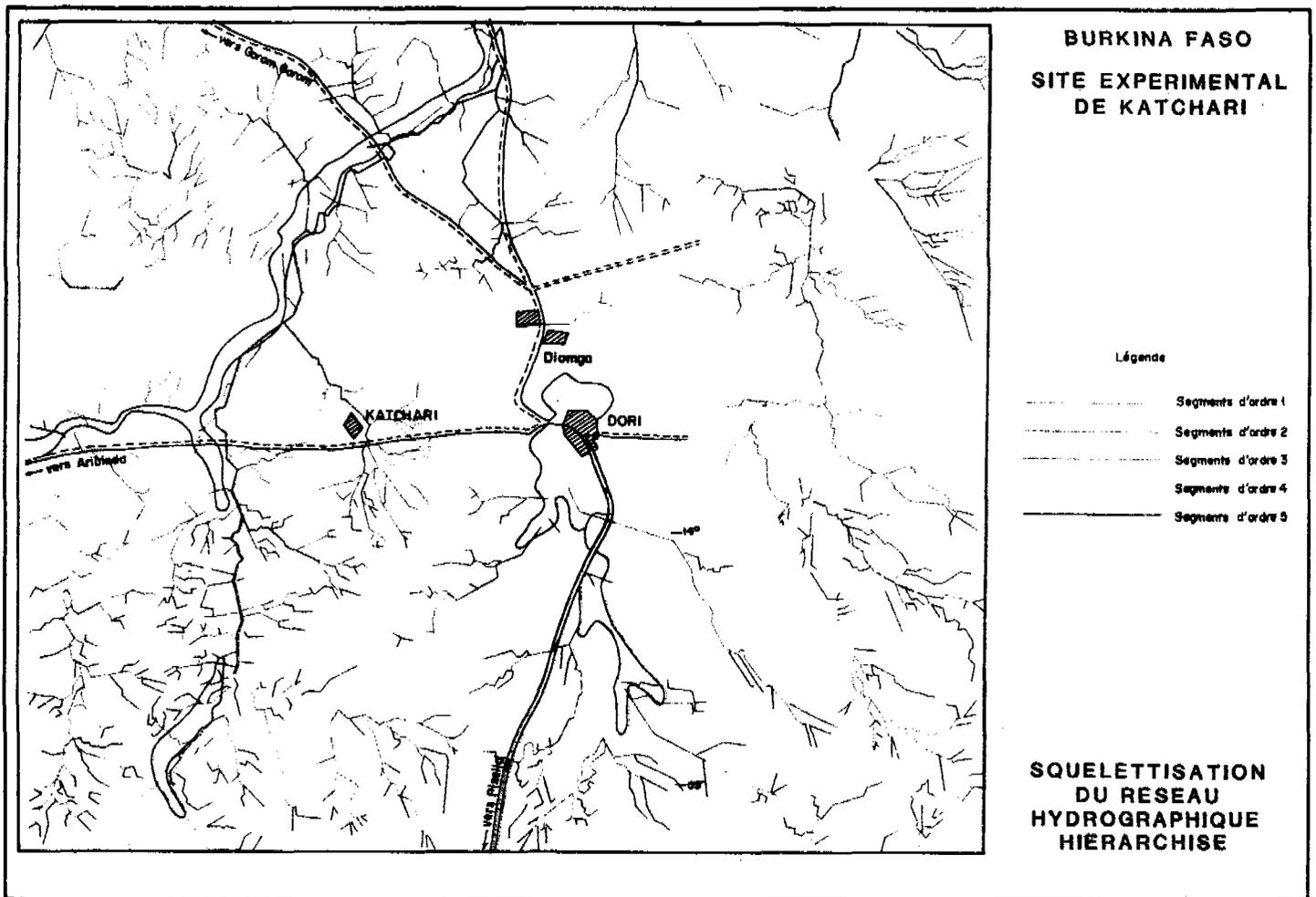
La reconnaissance hydrogéologique est une étude de terrain à grande échelle (1/20 000). Elle a pour objectif de vérifier les données acquises ou les hypothèses émises en phase préparatoire, de recueillir des informations complémentaires et de positionner les travaux de prospection détaillée.

##### **- Le contrôle des informations et hypothèses porte sur :**

- . la position précise des forages (y compris les forages négatifs) listés dans les bases de données ;
- . le repérage au sol des accidents majeurs reconnus sur les images et photographies aériennes ;
- . les zones d'infiltration préférentielle : nature du recouvrement, états de surface, végétation ;

##### **- Les données complémentaires concernent :**

- . les épaisseurs d'altération et les profondeurs des niveaux statiques. Elles sont obtenues par l'inventaire des puits dont on mesure la profondeur totale (épaisseurs minimum d'altération) et le niveau statique sous le sol.



**Fig.3 - EXEMPLES D'INTERPRETATION DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE SPOT**  
 ( Projet MILIEUX FISSURES Phase 2, BRGM-AQUATER )



A ce stade de l'étude on dispose de tous les éléments nécessaires à la "certification" des zones favorables. La synthèse des informations est réalisée sous forme de carte au 1/20 000 où sont parfaitement délimitées les cibles de la prospection détaillée. La phase de reconnaissance hydrogéologique s'achève par le positionnement sur le terrain des travaux de prospection géophysique.

#### **4.2.3. Phase de prospection détaillée**

##### **- La prospection géophysique**

La prospection géophysique a pour objectif de mesurer l'épaisseur du recouvrement altéré et de positionner en profondeur les accidents détectés en surface.

**Les méthodes électriques** sont les plus employées et donnent les résultats les plus fiables. Deux techniques complémentaires sont utilisées : le sondage électrique et le profil de résistivité.

Le sondage électrique fournit la courbe des variations de la résistivité apparente des terrains situés à la verticale du point de mesure. L'interprétation permet de passer de la coupe électrique à la coupe lithologique avec estimation des épaisseurs des différents terrains identifiés (altérations sèches et saturées, socle fissuré, socle sain).

L'analyse des sondages électriques est facilitée par l'utilisation de logiciels qui, par restitution du diagramme mesuré, calcule les couples de valeurs résistivité vraie/épaisseur. Le logiciel GRIVEL présenté dans l'annexe 2 est parfaitement adapté à l'analyse des sondages électriques dans le socle.

Le profil de résistivité donne, pour des stations de mesure alignées et régulièrement espacées (10 m), la valeur de la résistivité apparente à profondeur à peu près constante. Il met donc en évidence les variations latérales de faciès ou d'épaisseur. Les anomalies conductrices ont souvent pour origine une surépaisseur d'altération provoquée par une zone de fracturation intensive du socle sous-jacent.

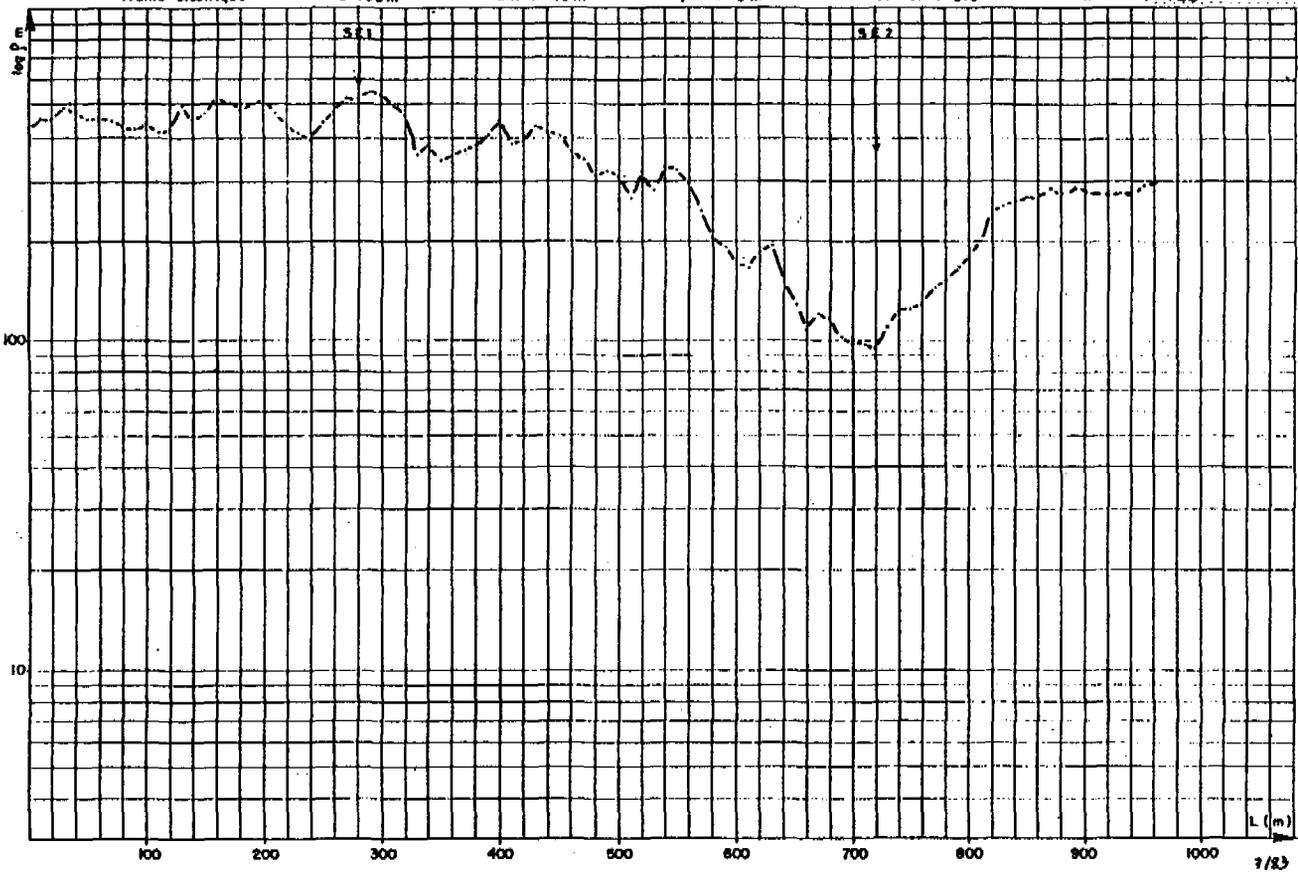
La combinaison des résultats fournis par ces deux techniques aboutit à des cartes synthétiques où apparaissent à la fois les épaisseurs d'altérations saturées (ressources) et la trace des accidents majeurs (perméabilité).

Les figures 4 et 5 reproduisent des exemples d'interprétation en zone de socle.

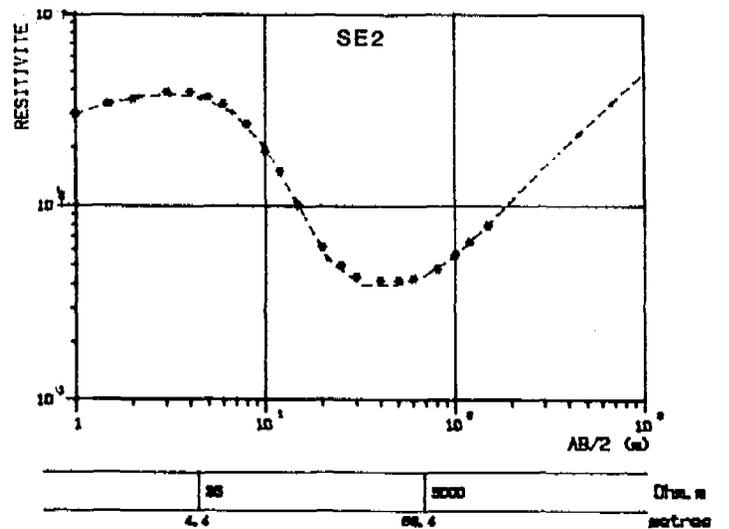
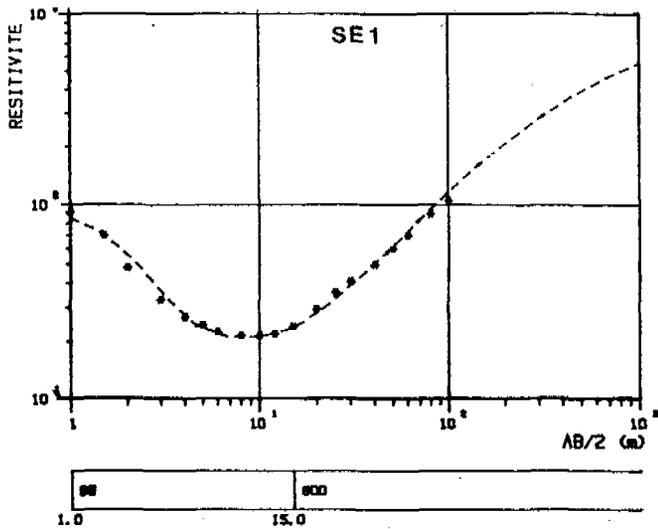
D'autres dispositifs sont utilisés en prospection électrique (dispositifs carré, rectangle) ; plus lourds à mettre en oeuvre, ils n'ont pas fait la preuve d'une efficacité supérieure.

- **Les méthodes électromagnétiques** sont rapides et peu coûteuses et de ce fait de plus en plus utilisées en hydraulique villageoise. Les données obtenues sont moins précises et moins fiables sauf contexte particulier (faible épaisseur d'altération).
- **Les méthodes magnétiques** sont réservées à la recherche et au positionnement précis des filons de roches basiques (dolérite).

Trainé électrique AB = 160 m MN = 40 m pas = 10 m azimut : 270° n° IRH : 722



PROFIL DE RESISTIVITE



SONDAGES ELECTRIQUES

Fig.4 - EXEMPLES DE RESULTATS FOURNIS PAR LA PROSPECTION ELECTRIQUE  
PROFIL DE RESISTIVITE ET SONDAGES ELECTRIQUES



Legende

- 280 VALEUR DE  $\rho_a$  (ohm.m)
  - 240 COURBES D'ISORESISTIVITE ET LEURS VALEURS
  - FORAGES EXECUTES PENDANT LE PROJET
- 60 90 140 200 280 420  $\rho_a$  (ohm.m)
- 

BURKINA FASO

ETUDE DE LA RECHARGE DES AQUIFERES  
DANS LE SOCLE CRISTALLIN  
( Phase 2 , 1987 - 1990 )

SITE EXPERIMENTAL DE SANON

CARTE D'ISORESISTIVITE APPARENTE  
AB = 200m

( Projet MILIEUX FISSURES Phase 2 BRGM AQUATER )

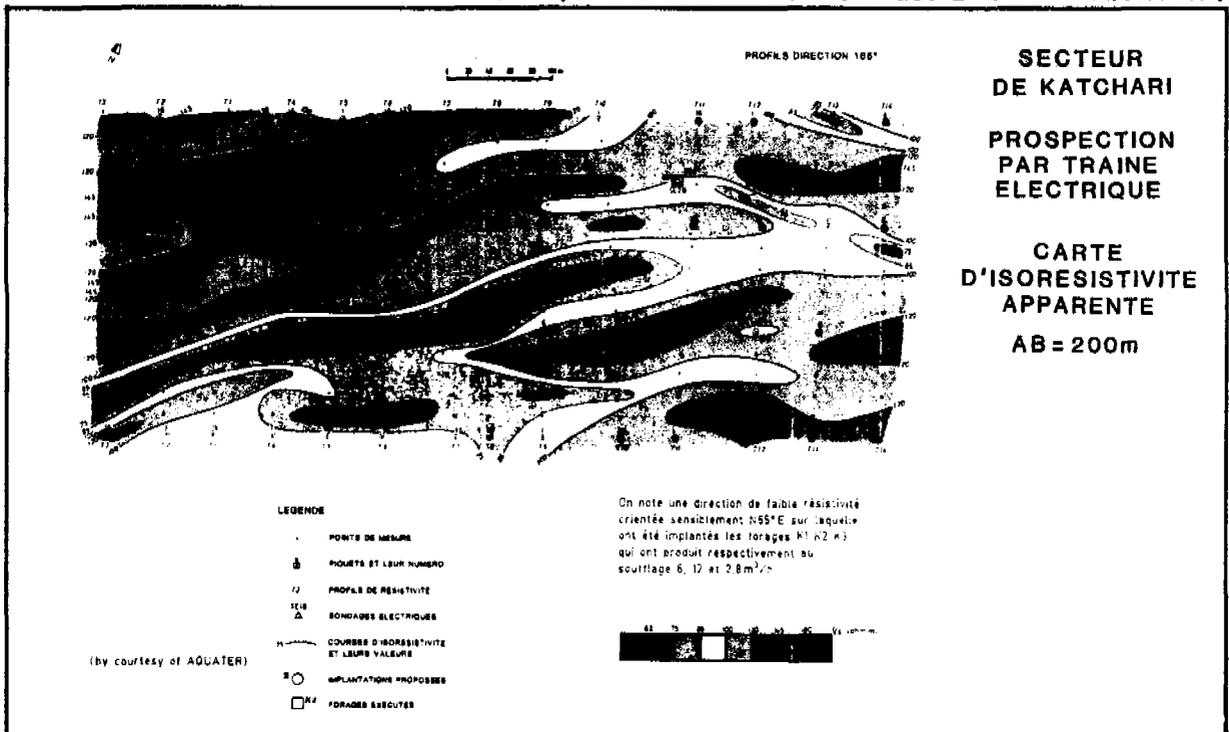


Fig.5 - EXEMPLES DE CARTES D'ISORESISTIVITE APPARENTE OBTENUES PAR SYNTHÈSE DES DONNÉES DES SONDAGES ELECTRIQUES ET DES PROFILS DE RESISTIVITE



- **la prospection radon** - L'étude de la distribution du gaz radon dans le sol, appliquée à la recherche de fractures aquifères est une méthode récente mise au point en France et appliquée au Burkina Faso dans le cadre du projet "milieux fissurés" phase 2. Le principe et les résultats obtenus sont décrits dans l'annexe 5.

La prospection radon permet de détecter, au droit d'un accident majeur déjà positionné par photo interprétation et confirmé par géophysique électrique, les secteurs de l'accident dans lesquels la fracturation est la plus ouverte, c'est à dire les points de perméabilité maximum.

Au terme de la prospection détaillée, on dispose de tous les documents pour positionner avec précision les forages de reconnaissance au droit des points de fracturation maximum situés à l'intérieur de zones à ressource suffisante.

Si les performances des forages de reconnaissance étaient inférieures aux prévisions, il reste la possibilité d'augmenter la perméabilité de l'aquifère capté au moyen de la fracturation hydraulique. Cette méthode, d'application récente en recherche d'eau souterraine est exposée au chapitre 5.



## **5 - AMELIORATION DU DEBIT DES FORAGES INSUFFISAMMENT PRODUCTIFS PAR FRACTURATION HYDRAULIQUE**

### **5.1. RAPPEL**

L'amélioration de la productivité des forages en roche dure par fracturation hydraulique a été développée par l'industrie pétrolière à partir de 1940. Son application dans le domaine des forages d'eau est plus récente et doit beaucoup à la mise au point d'unités mobiles légères et peu coûteuses mieux adaptées aux interventions à faible profondeur (150 m).

Le procédé a été expérimenté pour la première fois en Afrique en 1989 au Burkina Faso. Le programme expérimental visait deux objectifs :

- diminuer le taux d'échec des campagnes d'hydraulique villageoise par amélioration du débit des forages insuffisamment productifs (0 à 0,5 m<sup>3</sup>/h).
- augmenter la productivité des forages réalisés pour l'AEP des centres secondaires où l'irrigation de petits périmètres jusqu'à atteindre un débit compatible avec une exploitation par exhaure motorisée (5 à 10 m<sup>3</sup>/h).

Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité de la méthode (24). La fracturation hydraulique est maintenant utilisée dans les programmes d'hydraulique rurale (Entente 2bis-Burkina, 6ème et 7ème FED/Togo).

### **5.2. PRINCIPE DE LA FRACTURATION HYDRAULIQUE**

De l'eau sous pression est injectée sous un packer ancré dans le forage au dessus de la zone à fracturer. Lorsque la pression d'injection dépasse la résistance à la traction du terrain, il se produit un "claquage" qui crée de nouvelles connexions entre le forage et les fractures productives préexistantes. Pour maintenir les fractures ouvertes après relâchement de la pression, du sable est introduit en fin d'opération dans le circuit d'injection d'eau.

Les variations de la pression et du débit en fonction du temps d'injection sont enregistrées ; les courbes permettent de suivre l'évolution de la fracturation (rupture de la formation, extension ou propagation de la fracture, fermeture, réouverture dans le cas d'une fracture préexistante). Une notice de présentation de la fracturation hydraulique est reproduite dans l'annexe 6.

### 5.3. RESULTATS

De 1989 à 1991, 3 opérations ont été réalisées en Afrique de l'ouest ; les résultats sont résumés dans le tableau 8.

Programmes	Forages traités		Coefficient d'amélioration (rapport des débits spécifiques)
	Débit initial m <sup>3</sup> /h	Nombre de forages	
Expérimentation Burkina (21 forages traités)	0 à 0,5	10	3,6 à 4,6
	0,5 à 1	3	2,4 à 3,2
	1 à 3	7	2 à 2,5
	sup. à 5	1	1,4
Entente 2bis Burkina (16 forages traités)	0 à 0,5	12	2,2 à 13,6
	0,5 à 1	2	2,1 à 6,6
	1,2	1	1,1
	13,5	1	1,2
6ème FED Togo (51 forages traités)	0 à 0,5	45	2 à 18 (1)
	0,5 à 1	6	2 à 8

(1) sur 20 forages à débit initial nul, 9 forages n'ont pas fourni après fracturation un débit supérieur à 0,5 m<sup>3</sup>/h. Ces échecs sont constatés sur les formations insuffisamment compactées.

Tableau 8

#### **5.4. CONCLUSIONS**

La fracturation permet de récupérer la quasi totalité des forages d'hydraulique villageoise insuffisamment productifs (débit initial inférieur à 0,5 m<sup>3</sup>/h). On note que le coefficient d'amélioration est d'autant plus élevé que le débit avant intervention est plus faible. Cela est dû aux caractéristiques de l'unité de fracturation utilisée, conçue pour le traitement des forages à très faible débit.

Lorsqu'il s'agit d'obtenir un débit de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>/h à partir de forage à débit initial de 2 à 5 m<sup>3</sup>/h, il est nécessaire de mettre en oeuvre une pompe à débit suffisant pour assurer la montée en pression dans une formation qui présente au départ une perméabilité non négligeable.

Dans le cas de l'AEP des centres secondaires, la fracturation hydraulique présente un double intérêt :

- Rendre exploitables des forages à débit initial insuffisant.
- Diminuer les coûts énergétiques d'exploitation par l'amélioration du débit spécifique ou réduire très sensiblement les investissements dans le cas d'un pompage solaire.



## **6 - DIMENSIONNEMENT DES CHAMPS DE CAPTAGE ET SUIVI DE L'EXPLOITATION**

### **6.1. DEMARCHE**

Il s'agit maintenant de déterminer le nombre de forages de production à réaliser, les espacements entre forages et les débits d'exploitation, de façon à obtenir, pour un prélèvement donné, une stabilisation des niveaux de pompage autour d'une cote prédéterminée.

Pour cela il est nécessaire de représenter l'aquifère à exploiter par un modèle mathématique capable de calculer l'évolution du rabattement dans les ouvrages en fonction du temps, suivant différents scénarios d'exploitation.

Les paramètres à acquérir pour l'élaboration du modèle hydrodynamique sont les suivants :

- les prévisions de prélèvements à 20 ans, leurs variations saisonnières et interannuelles ;
- la géométrie des réservoirs : extension latérale et puissance des altérations et du socle fissuré/fracturé ;
- la piézométrie ;
- les paramètres hydrauliques des ouvrages de production : relation débit/rabattement ;
- les paramètres hydrauliques du système aquifère : transmissivité et coefficient d'emménagement des différents réservoirs ;
- la recharge annuelle par les pluies.

#### **Remarque**

L'élaboration du programme de reconnaissance par forage et le suivi des travaux ne sont pas abordés ici. On rappellera cependant les principales règles à respecter pour tirer de la campagne de forage le maximum d'informations utiles :

- le programme de forage ne doit pas se limiter à la seule recherche ponctuelle des forts débits ; il doit couvrir et déborder la zone supposée favorable afin de fournir des données sur l'extension et les paramètres hydrauliques de l'aquifère hors de la zone d'influence des futurs champs de captage.

- la profondeur des reconnaissances par forage doit être prédéterminée en fonction de la lithologie du socle (par exemple 60 m sous la base des altérations en région granitique). Cette profondeur devra être atteinte même si le débit recherché est obtenu avant la côte d'arrêt prévue. Cette procédure permet d'estimer, au moyen des vitesses d'avancement, la puissance de la zone fissurée/fracturée.
- les sondages dont le débit en fin de foration est jugé insuffisant pour être exploités seront transformés en piézomètres. Ces points d'observation constitueront la base du système de suivi et de gestion de la ressource.

## **6.2. METHODOLOGIES PROPOSEES POUR L'ACQUISITION DES PARAMETRES**

### **6.2.1. Les prélèvements**

Les prélèvements sont calculés à partir d'une estimation de la demande affectée d'un coefficient multiplicateur qui rend compte des pertes à la distribution.

Une approche théorique de la demande peut être tentée par la population et les consommations unitaires. La fiabilité du résultat est compromise par l'incertitude sur les paramètres à prendre en compte. Les projections de populations effectuées au moyen d'un taux de croissance démographique calculé à partir de recensements successifs aboutissent généralement, pour le long terme, à des chiffres aberrants. L'écart est dû au poids de l'exode rural difficile à chiffrer car lié à des événements socio-économiques le plus souvent imprévisibles. L'estimation des consommations unitaires à partir des besoins tels qu'ils sont fixés par les normes de programmation nationale donne généralement des valeurs très surestimées ; la demande en eau payante (consommations) est fonction du nombre de points d'eau gratuits concurrents et de la facilité d'accès à l'eau potable (nombre de branchements privés et bornes fontaines).

Une approche pragmatique paraît mieux adaptée à la résolution du problème. Elle consiste à prendre comme référence les évolutions de consommation constatées sur des centres secondaires comparables du point de vue de la population et du réseau.

On distinguera deux cas :

**- Les mini AEP et les postes d'eau autonomes (1)**

Des études récentes menées au Niger (25) sur les consommations de 9 gros villages équipés de mini AEP ont abouti aux résultats suivants :

	Type d'AEP	Population	Autres points d'eau	Moy (l/j/hab)	Min (l/j/hab)	Max (l/j/hab)	Max/Min	Max/Moy	Prix des 2 seaux
BAGUEY	Poste	3600	Non	15	10	23	2,3	1,5	Variable
DAN GONA	Réseau	2300	Oui	12,5	9	15	1,7	1,2	5F CFA
ROUKOUZOOM	Poste	2500	Oui	11	4	25*	6,2	2,3	5F CFA
BAKIN BIRDJIN	Réseau	3900	Non	19	13	27	2,0	1,4	5F CFA
SASSOUMBROUM	Réseau	2800	Oui	8	6	12	2,0	1,5	5F CFA
BABOULWA	Poste	500	Non	15	10	24	2,4	1,6	10F CFA
KANEMBACHI	Réseau	3100	Non	17	13	23	1,8	1,4	5F CFA
DJRATAOUA	Réseau	3100	Oui	8,5	6	12	2,0	1,4	10F CFA
GABI	Réseau	1800	Oui	10	6	16	2,7	1,6	10F CFA

\* pas de points d'eau concurrents en saison sèche

La présence de points d'eau concurrents gratuits et faciles à utiliser (forages avec pompe à main, puits à niveau de puisage inférieur à 10 m) est le facteur déterminant de la demande en eau payante. La taille du village et le prix de vente de l'eau ne paraissent pas influencer de façon significative les consommations.

Dans un contexte socio-économique et climatique comparable à celui du Niger on retiendra les valeurs suivantes (2) :

Contexte	Type AEP	Consommation (l/j/hab)		
		Moyenne	Minimum	Maximum
Pas de points d'eau concurrents	Poste d'eau	15	10	23
	Mini AEP	18	13	25
Points d'eau concurrents	Poste d'eau	11	4	?
	Mini AEP	10	6	15

Tableau 9

Les variations saisonnières sont très importantes. La pointe de consommation intervient en avril-mai ; elle est supérieure de 40 à 60 % à la moyenne annuelle. En saison des pluies les consommations minimales représentent 40 à 70 % de la moyenne.

Les variations interannuelles ne sont pas connues avec précision car l'installation des mini AEP et postes d'eau est récente. On peut retenir en première analyse que la croissance des

(1) Poste d'eau autonome : desserte assurée uniquement au réservoir de stockage/ mini AEP : desserte assurée au réservoir de stockage et par un nombre réduit de bornes fontaines.

(2) Des enquêtes effectuées sur les postes d'eau autonomes du Burkina donnent des valeurs comparables.

consommations est forte pendant les trois premières années, 10 % par an, puis se stabilise autour de 2 % par an.

#### **- les réseaux centralisés**

On prend pour références les centres secondaires gérés par l'ONEA au Burkina Faso. Les données relatives aux centres pour lesquels on dispose d'au moins 9 ans de suivi de l'exploitation sont resumées dans les tableaux 10 à 12.

La consommation moyenne calculée en 1989 sur 8 centres totalisant 136 000 habitants est de 18 l/j/hab. Les valeurs extrêmes sont de 10 l/j/hab (Boromo) et 34 l/j/hab (Dori). Les variations de consommations sont liées à la densité des points de distribution (bornes fontaines et branchements privés) et à la capacité de production qui souvent limite la consommation en saison sèche.

Pour une première approximation on retiendra les valeurs repères suivantes :

**30 l/j/hab** : 1 borne fontaine pour 500 habitants. 2,5 % de la population desservie par branchements privés

**18 l/j/hab** : 1 borne fontaine pour 1000 habitants. 1,5 % de la population branchée.

**13 l/j/hab** : 1 borne fontaine pour 1500 habitants. 0,5 % de la population branchée

Les variations saisonnières de consommation sont moins importantes que dans le cas des mini AEP et postes d'eau autonomes. Les pointes et creux de consommation représentent 25 % de la moyenne annuelle.

**Evolution des consommations ( $10^3 \text{ m}^3/\text{an}$ )**

Centres	1981	82	83	84	85	86	87	88	89	Pop. 1989	l/j/h 1989
KAYA	63	97	108	110	132	151	174	189	178	27 900	17,5
DORI	64	70	82	77	89	108	107	138	145	11 800	33,7
PO	20	31	32	42	58	69	65	82	27	15 000	17,7
GAOUA	49	64	87	89	81	105	105	104	105	12 500	23,0
BOROMO	11	16	23	23	24	27	26	29	33	9 100	9,9
KOUELA	36	47	35	52	78	74	59	54	79	10 900	19,9
TENKODOGO	2	57	65	99	107	111	123	128	135	25 800	14,3
FADA	(10)	28	27	71	90	99	91	96	110	22 900	13,2
<b>TOTAL</b>	<b>255</b>	<b>410</b>	<b>459</b>	<b>563</b>	<b>659</b>	<b>744</b>	<b>750</b>	<b>820</b>	<b>882</b>	<b>135400</b>	<b>17,8</b>
<b>taux d'accrois. interannuel (%)</b>		61	12	23	17	13	1	9	8		
<b>par rapport 1981 (%)</b>		61	80	121	158	192	194	221	246		

Tableau 10

**Variations saisonnières (Productions mensuelles 1990 de 10 centres secondaires)**

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy.
<b>Production <math>10^3 \text{ m}^3/\text{mois}</math></b>	53,6	54,2	55,9	63,6	59,8	51,0	38,8	37,7	37,9	46,5	53,4	54,8	50,6
<b>Rapport à la moyenne</b>	1,06	1,07	1,10	1,26	1,18	1,0	0,77	0,75	0,75	0,92	1,06	1,08	1

Tableau 11

**Pertes à la distribution (1989)**

	KAYA	DORI	PO	GAOUA	BOROMO	KOUE LA	TENRI- MOGO	FADA	TOTAL
<b>Produc. <math>10^3 \text{ m}^3/\text{an}</math></b>	192	159	116	136	43	87	149	115	997
<b>Conso. <math>10^3 \text{ m}^3/\text{an}</math></b>	178	145	97	105	33	79	135	110	882
<b>Pertes (%)</b>	7	9	16	23	23	9	9	4	12

Tableau 12

Les pertes de distribution (fuites du réseau, production non vendue) représentent en moyenne 12 % de la production avec des valeurs extrêmes à 4 et 23%. Il ne semble pas y avoir de relation simple entre les pertes et l'âge du réseau et les pourcentages d'eau vendue aux bornes fontaines et aux abonnés.

### **6.2.2. La géométrie des réservoirs**

La construction du modèle hydrodynamique suppose que soient préalablement définis :

- l'extension des réservoirs (limites du modèle) ;
- les limites internes (principalement les zones de perméabilité) ;
- le toit et le mur des réservoirs.

La géométrie du recouvrement altéré est connue avec une précision suffisante à partir des informations fournies par la prospection électrique et les coupes de forages.

Sauf dispositions particulières (filons de dolérite, socle affleurant en relief, contacts lithologiques très contrastés) l'extension du socle fissuré fracturé ne peut pas être précisée. En règle générale, le modèle sera limité soit par le bassin versant hydrologique, soit par des limites arbitraires éloignées du rayon d'influence des futurs champs de captage.

Les limites internes ne peuvent être tracées que dans le cas de couloirs de faille bien repérés sur photos aériennes et confirmés par géophysique électrique.

Le mur du réservoir inférieur est positionné en fonction des vitesses d'avancement enregistrées en cours de forage. En moyenne, la puissance de la frange fissurée/fracturée est de 50 m dans les roches vertes, 60 m en zone granitique et de l'ordre de 100 m dans les formations schisteuses.

### **6.2.3. Les paramètres hydrauliques des ouvrages de production**

Il s'agit ici de calculer le débit instantané de chaque ouvrage à partir de la relation débit/ rabattement. Cette relation est définie au moyen d'un essai de débits à paliers enchaînés de courte durée.

Le test qui tient lieu de réception provisoire de l'ouvrage comprend 3 paliers de débits de 2 heures chacun. Le dernier palier est effectué au débit maximum obtenu en fin de forage par soufflage.

Les valeurs de rabattement mesurées en fin de paliers permettent de tracer la courbe rabattement/débit de l'ouvrage. Le débit optimum est déduit de la courbe en fixant un rabattement maximum admissible tel que le niveau en pompage soit situé au dessus de la première venue d'eau. Suivant la période de l'année pendant laquelle le test est réalisé, le rabattement maximum devra être diminué de l'amplitude des variations saisonnières de niveau (cf. fig. 6). En moyenne cette amplitude est de l'ordre de 3 à 6 m.

## 6.2.4. Les paramètres hydrauliques du système aquifère

### - Les altérations

Le recouvrement altéré n'est généralement pas capté par les forages de production. Le coût de l'étude des paramètres hydrauliques des altérations au moyen de pompages d'essai sur des ouvrages réalisés spécialement à cet effet n'est pas justifié. Une estimation de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement au vu de la composition lithologique est suffisante pour représenter ce réservoir. L'erreur maximum prévisible, de l'ordre d'un facteur 5, n'a que peu de poids sur la représentativité du système socle /altérites.

On retiendra pour K et S des altérites les valeurs repères suivantes :

	Argiles sableuses	Sables argileux	Arènes grenues
K (m/s)	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$
S	$10^{-2}$	$3.10^{-2}$	$5.10^{-2}$

Tableau 13

### - Le socle

#### . Conduite des essais

Le pompage d'essai pour le calcul des paramètres hydrauliques de l'aquifère de socle est effectué sur chaque forage de production muni de son piézomètre. L'essai comprend un palier unique au débit optimum, suivi de l'observation de la remontée jusqu'au niveau statique initial.

La durée de l'essai est un compromis à trouver entre la représentativité des données et le coût de leur acquisition. Le forage de production est situé sur une zone de perméabilité anormalement forte dont la largeur varie de quelques décimètres (fracture unique) à quelques dizaines de mètres (couloir de faille).

Le rayon d'investigation du pompage est fonction de T et S et de la durée du pompage. Le tableau 14 ci-après donne, pour les couples de paramètres les plus fréquents, le temps minimum à partir duquel une limite de perméabilité est mise en évidence.

CONTEXTE	S	T m <sup>2</sup> /s	Distances *(m)				
			10	25	50	100	200
<b>NAPPE LIBRE</b>			10	25	50	100	200
frange fissurée superficielle en contact direct avec les altérations saturées	10 <sup>-2</sup>	5.10 <sup>-5</sup>	10 h	3 j	10 j	41 j	165 j
		10 <sup>-4</sup>	5h	1,5 j	5 j	20,6 j	82,5 j
frange fissurée superficielle niveau statique dans le socle	10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-5</sup>	1 h	6 h	1 j	4 j	17 j
		10 <sup>-4</sup>	0,5 h	3 h	12 h	2 j	8,5 j
<b>NAPPE CAPTIVE</b>	10 <sup>-4</sup>	5.10 <sup>-5</sup>	0,1 h	0,6 h	2 h	10 h	1,6 j
fracturation profonde isolée des altérations		10 <sup>-4</sup>			1 h	5h	20 h

\* Distances calculées dans le cas d'un aquifère homogène

Tableau 14

Ce tableau montre qu'un pompage d'essai de 3 jours, valeur généralement adoptée pour les tests dits "de longue durée", permet dans le cas le plus défavorable d'explorer l'aquifère de socle dans un cercle de 25 m de rayon. Ce rayon d'investigation est en général suffisant pour couvrir la zone de perméabilité anormalement élevée sur laquelle est positionné le forage de production et tester les formations moins perméables adjacentes. Dans les cas plus favorables un essai de 72 h. pourra en outre mettre en évidence le phénomène de drainance des altérations par les fissures captées.

Cette approche théorique est confirmée par les résultats obtenus au cours des essais de débits effectués sur les forages d'hydraulique villageoise. L'analyse des essais, d'une durée de 6 heures, sur 388 forages réalisés dans le socle du Burkina Faso montre que :

- dans 36 % des cas, les essais décèlent la présence d'une zone à faible perméabilité,
- dans 15 % des cas, les essais mettent en évidence une zone à forte perméabilité ou une drainance des altérations,
- dans 21 % des cas, l'aquifère se comporte comme un milieu homogène,
- dans 28 % des cas, (très faibles transmissivités) les effets de capacité masquent le phénomène transitoire.

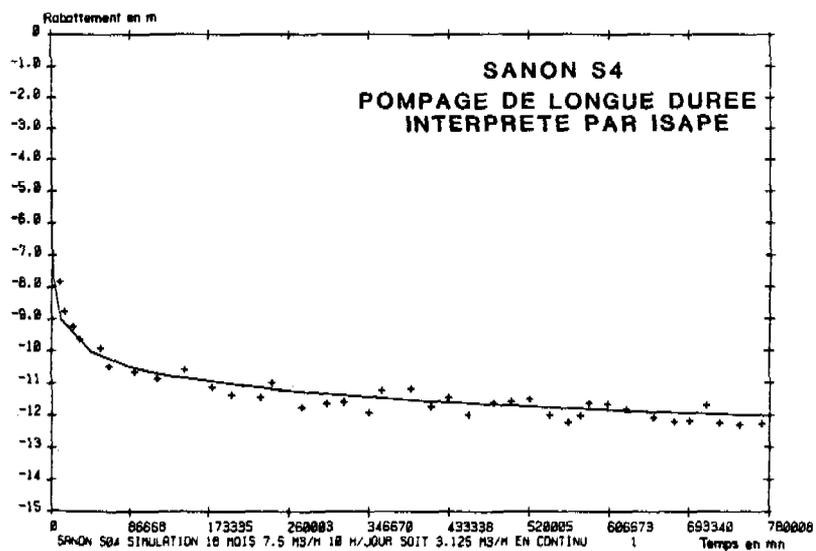
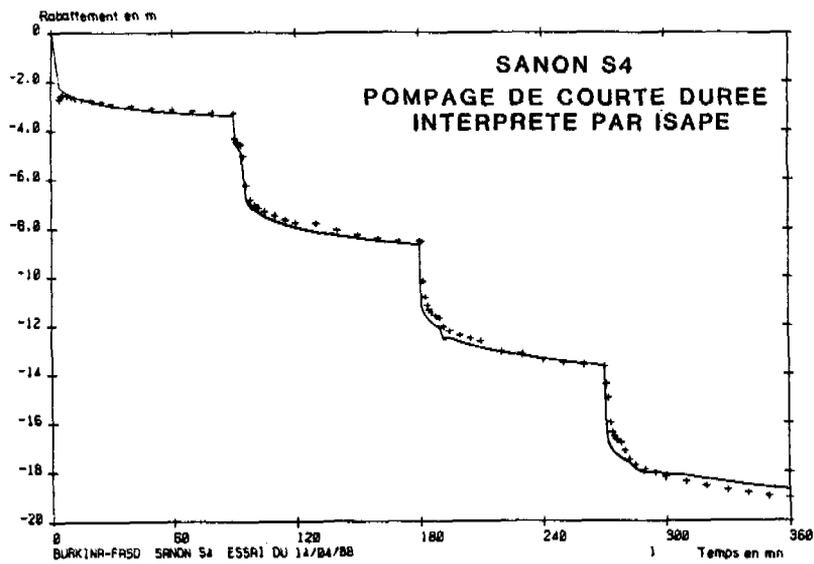
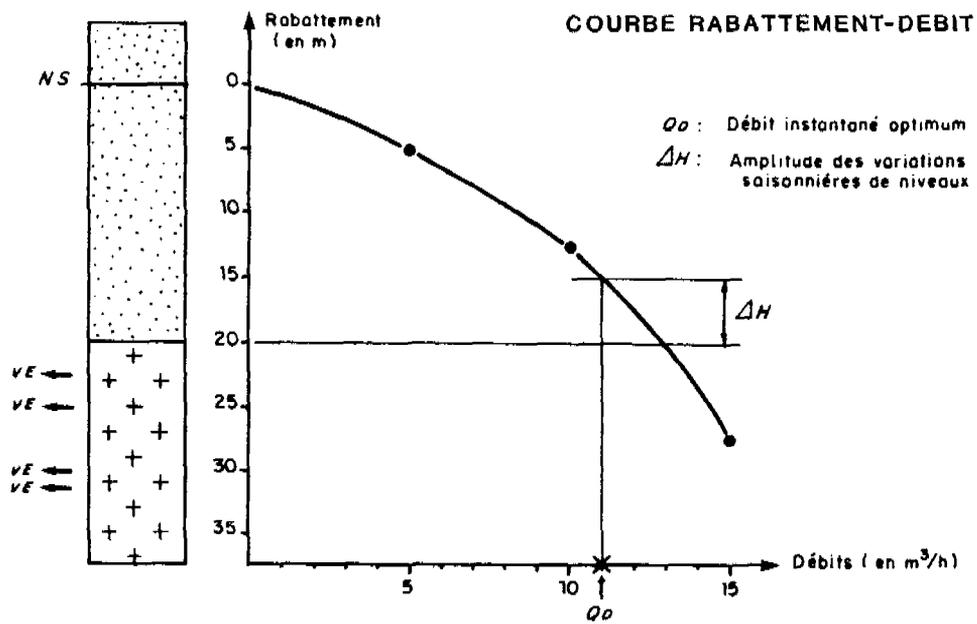


Fig.6 - EXEMPLES D'INTERPRETATIONS DE POMPAGES D'ESSAIS PAR ISAPE

## **. Interprétation**

Le calcul des paramètres hydrauliques dans le cas d'un système aquifère complexe (bicouche, discontinu) est grandement facilité par l'utilisation de programmes informatiques spécialement conçus à cet effet.

Le logiciel ISAPE (Interprétation Semi Automatique des Pompages d'Essais) est particulièrement bien adapté à l'étude des schémas hydrauliques fréquemment rencontrés en zone de socle :

- . THEIS (aquifère homogène, iostrope, infini)
- . GRINCARTEN (fracture unique)
- . HANTUSH, BOULTON (drainance, égouttement)
- . WARREN-ROOT (double porosité)

Une note explicative sur ISAPE est donnée dans l'annexe 3.

### **6.2.5. La recharge par les pluies**

L'évaluation de la recharge annuelle par les pluies sur un site donné suppose la mise en oeuvre d'une expérimentation longue (plusieurs cycles hydrologiques) et coûteuse. Dans le cas d'un projet d'AEP on ne dispose en général pas du temps nécessaire à l'acquisition de données historiques suffisamment longues pour être exploitables.

Pour les premiers calages du modèle, on utilisera les valeurs moyennes observées sur des sites placés dans un contexte climatique comparable. On notera qu'il est préférable d'intégrer dans le modèle des valeurs de "recharge nette", infiltration diminuée des reprises dans la nappe par évapotranspiration. La meilleure approche de ce paramètre est l'étude du bilan hydrologique. Le tableau 2 montre que la recharge calculée par cette méthode est comprise entre 1 et 5 % de la pluie annuelle.

Les valeurs de départ à intégrer au modèle devront se situer dans cette fourchette. L'estimation de la recharge sera affinée ultérieurement lorsqu'on disposera des historiques de niveaux piézométriques mesurés sur les piézomètres du site.

## **6.3. MODELISATION**

### **6.3.1. Synthèse des données**

Les données recueillies au cours des phases précédant l'élaboration du modèle sont synthétisées sous forme cartographique. Les documents à produire pour chaque réservoir du système aquifère à représenter sont les suivants :

- limites du modèle ;
- isohypses du toit et du mur des réservoirs ;

- carte piézométrique de l'aquifère de socle (on admet que les niveaux dans les altérites et dans le socle sont confondus) ;
- cartes des transmissivités et des coefficients d'emmagasinement ;
- maillage du modèle : mailles de dimensions variables suivant la densité des données et la précision des résultats attendus.

### **6.3.2. Choix du modèle**

Le logiciel utilisé pour la modélisation du système aquifère doit obligatoirement posséder les caractéristiques suivantes :

- maillage irrégulier ;
- multicouche (au minimum bicouche) ;
- régimes permanent et transitoire ;
- dénoyage de la première couche ;
- anisotropie horizontale des perméabilités.

Le logiciel MARTHE (Modèle A maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) est parfaitement adapté à la représentation des aquifères de socle.

La notice de présentation de MARTHE est reproduite dans l'annexe 4.

### **6.3.3. Premiers calages, simulations exploratoires (cf. fig. 7)**

Dans un premier temps le modèle est calé en régime permanent. Il s'agit d'ajuster le débit d'écoulement et les transmissivités pour restituer la piézométrie observée. Ce premier calage permet de vérifier la cohérence des données et de fixer l'état initial du système aquifère.

Les simulations exploratoires sont réalisées en régime transitoire après introduction des coefficients d'emmagasinement et des séquences de recharge étalées dans le temps. En l'absence de chroniques pluies-niveaux le calage en transitoire n'est pas possible. A ce stade, on se bornera à vérifier que la recharge imposée pendant la saison des pluies provoque des remontées de niveau compatibles avec les observations effectuées dans un contexte comparable.

Les prélèvements prévisionnels sont simulés dans les mailles contenant les forages de production au pas de temps mensuel pour tenir compte des variations saisonnières de la demande. Il s'agit de trouver la meilleure répartition des prélèvements pour laquelle les niveaux en pompage sont stabilisés au dessus de la cote des premières venues d'eau. Cette contrainte assure la pérennité de la production. On peut également décider, pour des raisons économiques ou tactiques, d'exploiter la nappe par épuisement. Dans ce cas, le modèle

permet d'évaluer la durée de vie du champ de captage c'est à dire le délai disponible pour la mise en oeuvre des solutions de rechange.

Le choix du meilleur scénario possible est toujours un compromis entre le nombre de forages à exploiter, que l'on souhaite minimiser et la nécessaire dispersion des prélèvements.

Au terme des simulations exploratoires les forages d'exploitation sont sélectionnés. Les productions journalières par ouvrage sont ajustées par les durées de pompage, le débit instantané d'exploitation étant fixé par les caractéristiques hydrauliques des forages.

## **6.4. SUIVI DE L'EXPLOITATION**

### **6.4.1. Objectifs du suivi**

Le modèle hydrodynamique élaboré en fin d'étude n'a pas encore fait la preuve de sa fiabilité. Construit à partir de données ponctuelles de terrain, dont la représentativité régionale est difficile à évaluer, le modèle doit être périodiquement calé sur les données recueillies durant les premières années d'exploitation.

La validation du modèle, c'est à dire son aptitude à effectuer des prévisions à long terme avec une précision suffisante pour l'utilisateur suppose un suivi de l'exploitation.

### **6.4.2. Données à recueillir**

Les données à recueillir concernent les productions, les niveaux piézométriques et la pluviométrie.

#### **- Les productions**

Les volumes prélevés sont mesurés, pour chaque forage de production, au moyen d'un compteur d'eau. La production mensuelle est suffisante pour les besoins du modèle. Il est impératif que les volumes produits soient mesurés séparément sur chaque ouvrage. La production globale à la sortie du réservoir, ou pire, le chiffre des consommations ne sont pas utilisables.

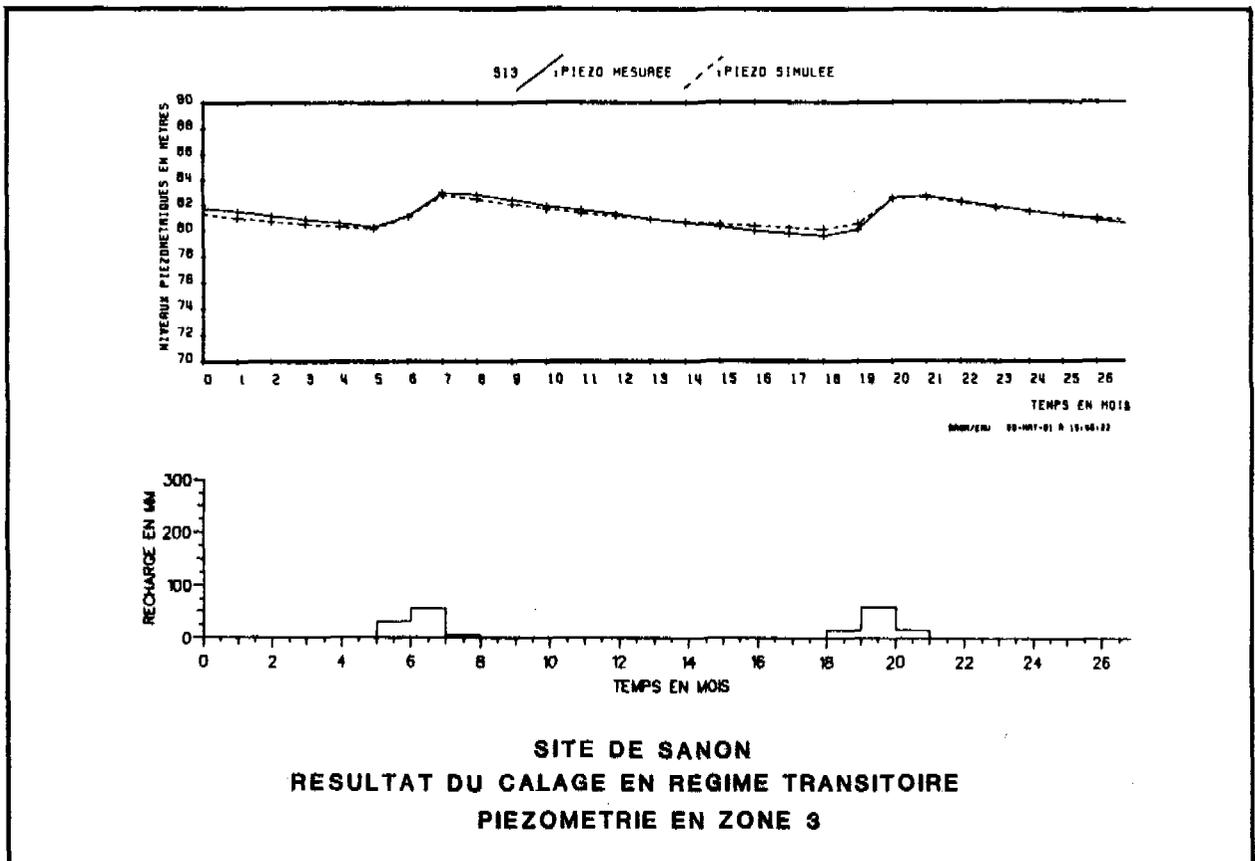
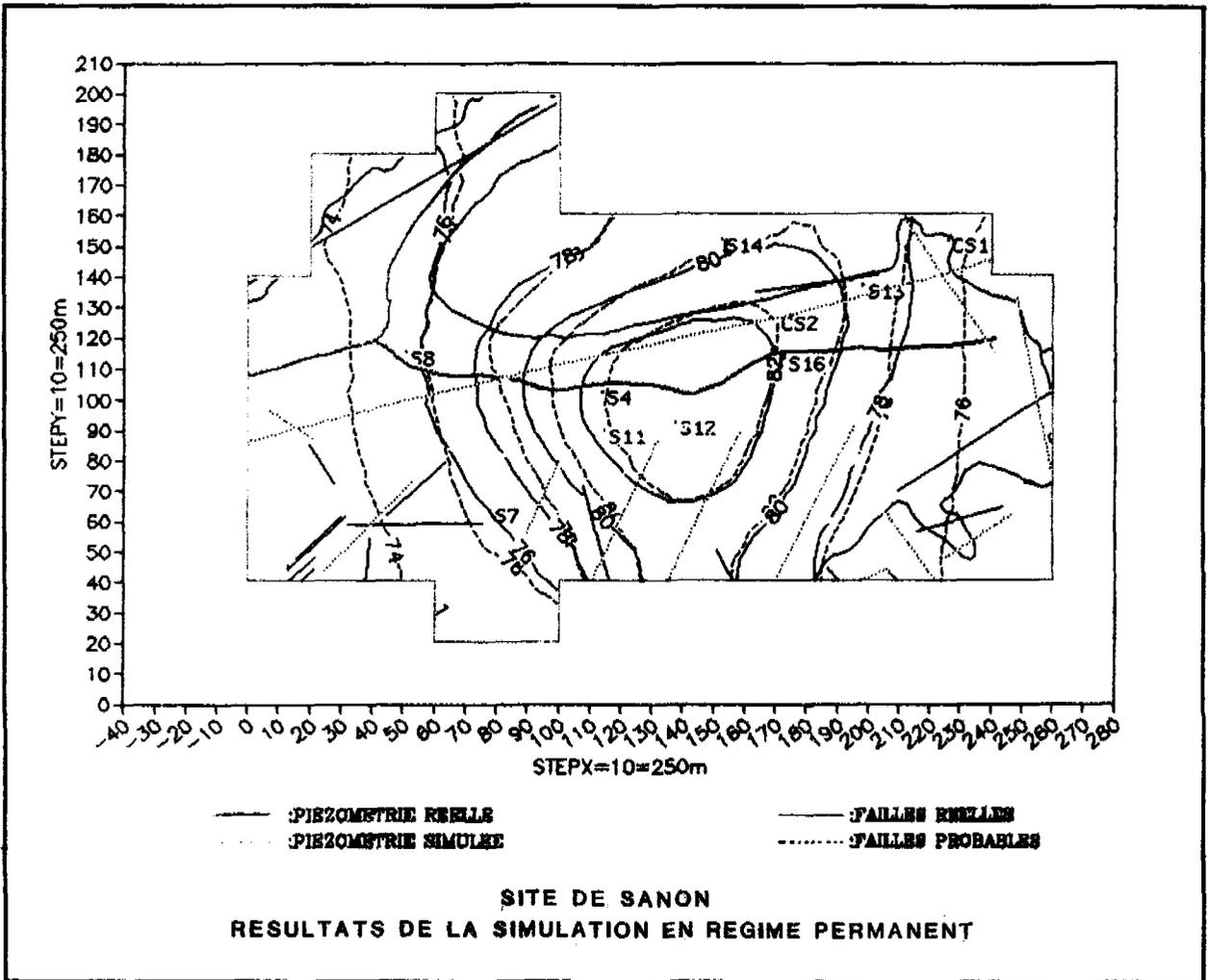
#### **- Les niveaux**

Le réseau d'observation piézométrique doit comprendre pour chaque champ de captage :

Un piézomètre double : l'un ouvert dans le socle, l'autre dans les altérations saturées. Ce piézomètre doit être situé à proximité du centre de gravité du champ.

Un piézomètre à proximité immédiate de chaque ouvrage de production. On utilisera ici les piézomètres réalisés pour les essais de pompage.

Deux piézomètres situés en dehors de la zone d'influence des forages.



**Fig.7 - EXEMPLES DE CALAGES SUR MODELE MARTHE**  
 ( Projet MILIEUX FISSURES Phase 2 , BRGM-AQUATER ).



La fréquence des mesures est hebdomadaire pour les piézomètres dans le champ et mensuelle pour les deux piézomètres hors du champ.

Les mesures de niveaux statiques sont complétées par des mesures dans les forages exploités spécialement équipés à cet effet d'un tube guide de mesure. Les niveaux sont relevés avant le démarrage (niveau au repos) et avant l'arrêt de la pompe (niveau maximum en pompage) ; une fréquence hebdomadaire est suffisante.

**- La pluie**

Elle est mesurée par un pluviomètre placé à proximité des champs de captage, relevé après chaque averse.

Les mesures de productions, de niveaux et de hauteurs pluviométriques sont consignées sur une fiche de suivi annuel.

### **6.4.3. Calage du modèle**

Le calage du modèle sur les données d'exploitation intervient après un cycle hydrologique d'observations. Durant cette période, le système aquifère a été sollicité à différents débits (variations saisonnières de la demande) et a réagi à la recharge annuelle par les pluies.

L'ajustement des niveaux calculés aux niveaux mesurés est effectué par retouches successives des valeurs initiales introduites dans le modèle.

Deux paramètres importants doivent être confirmés.

- **La recharge** : Elle sera calculée par restitution des variations de niveaux piézométriques observées sur les piézomètres placés en dehors de l'influence des captages.
- **La drainance des altérations par l'aquifère de socle exploité** : L'évolution des rabattements mesurés simultanément dans les altérations et le socle permet de juger de la liaison hydraulique entre les deux réservoirs. Si un décrochage important entre les deux niveaux était constaté, le modèle devrait être amélioré par l'introduction d'une couche semi perméable entre les deux aquifères.

Lorsque le modèle est capable de simuler avec une précision satisfaisante les variations de niveaux piézométriques mesurées sur le réseau d'observation, il est jugé opérationnel. Les calages ultérieurs sur des historiques de plus en plus longs ne devraient entraîner que des retouches de détail.

Les responsables de l'exploitation disposent alors d'un outil de gestion de la ressource et de programmation des investissements.



## **7 - APPLICATIONS : MODELISATION DES CHAMPS DE CAPTAGE DE BOROMO ET KOUPELA**

### **7.1. OBJECTIFS**

Il s'agit ici de vérifier qu'un modèle mathématique simple est capable de reconstituer l'évolution des niveaux dans les forages de production et de montrer l'intérêt de la modélisation comme outil de gestion de l'exploitation.

Deux sites, placés dans des contextes hydrogéologiques et des conditions d'exploitation différents, ont été retenus :

- BOROMO - contexte hydrogéologique favorable et production "raisonnable" permettant une relative stabilité interannuelle des niveaux de pompage,
- KOUPELA - aquifère à faible ressource, surexploité.

### **7.2. MODELISATION DU CHAMP DE CAPTAGE DE BOROMO**

#### **7.2.1. Présentation**

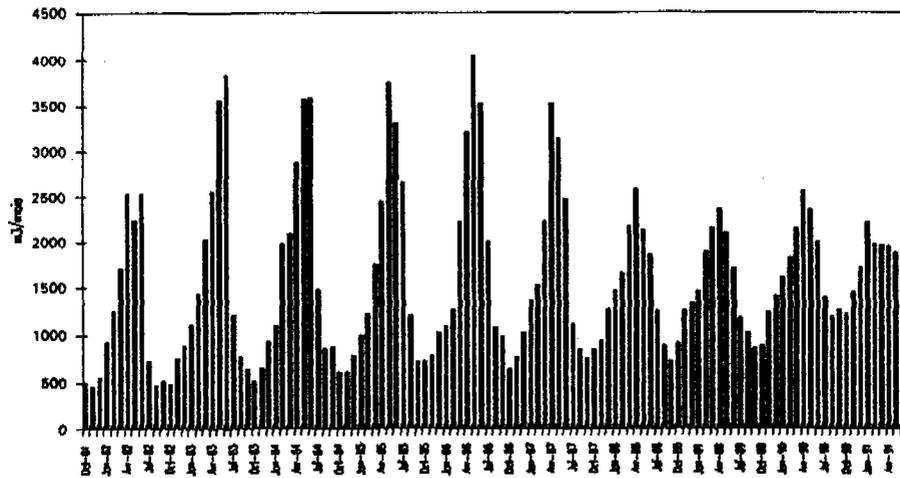
L'ONEA exploite actuellement deux forages F1 et F3 distants de 150 m. Le forage F2 a été abandonné pour débit insuffisant et F4 n'est pas encore mis en service. Dans un rayon de 5 km autour de F1 et F3, trois forages sont exploités par pompes manuelles.

L'aquifère granito-gneissique capté est recouvert d'altérations argilo-sableuses de 20 m d'épaisseur, saturées sur les 2/3 de la hauteur. Les dernières venues d'eau recoupées par les forages sont situées vers 55 m de profondeur.

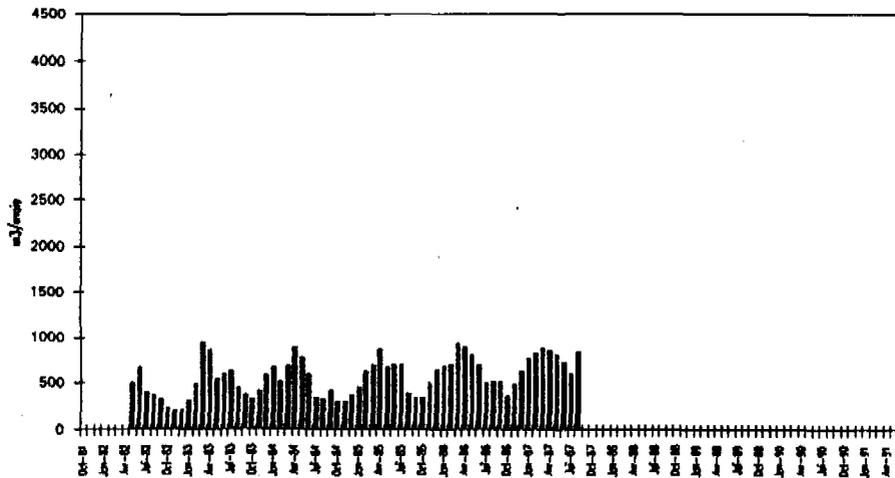
#### **7.2.2. Données disponibles**

- **Productions** : les productions mensuelles des forages sont connues sur la période octobre 1981/juin 1991 (cf. fig. 8).

### FORAGE F1



### FORAGE F2



### FORAGE F3

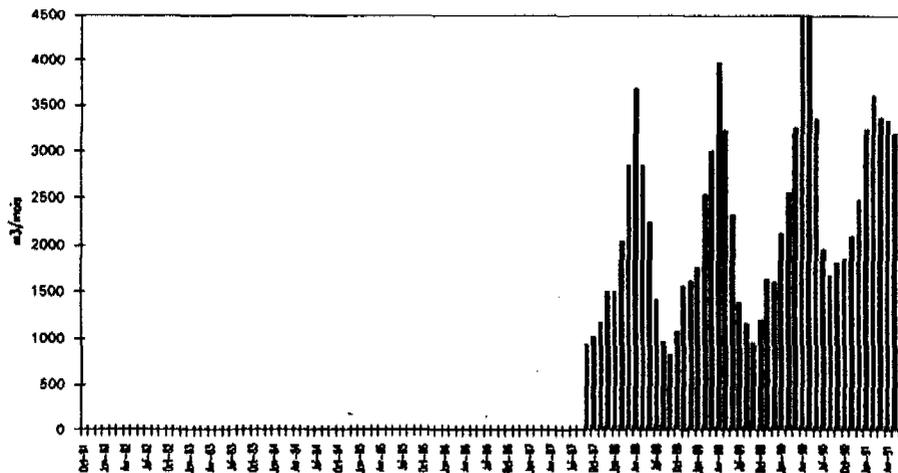


Fig.8 - BOROMO - DEBITS MENSUELS

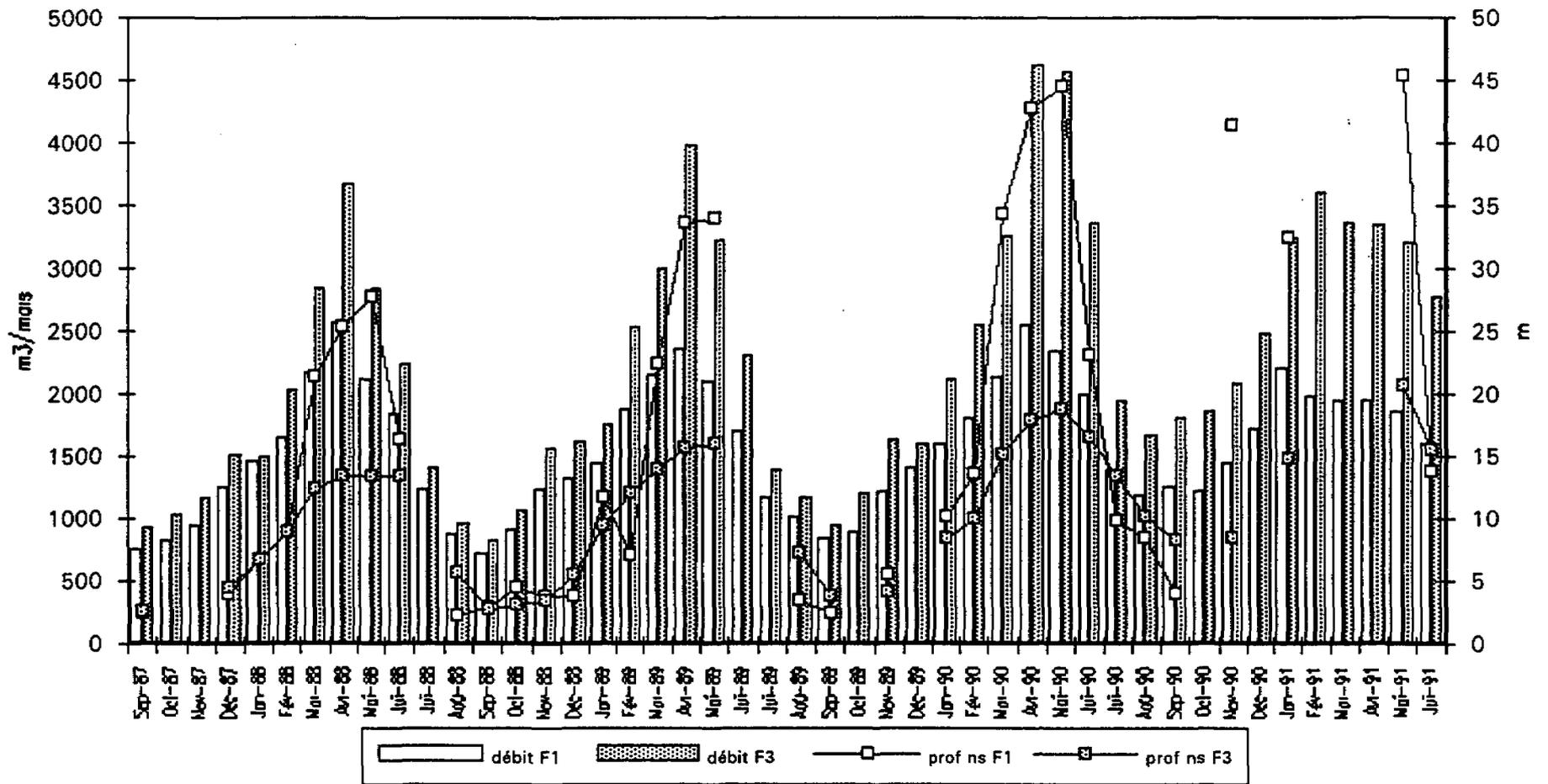


Fig.9 - BOROMO 1987-1991

- **Niveaux** : Les mesures régulières de niveaux ne couvrent que la période juin 1987/juin 1991. Les niveaux sont mesurés dans les forages exploités avant la mise en route de la pompe soit après 16 h d'arrêt. On dispose d'une mesure mensuelle d'un niveau pseudo-statique. Les chroniques sont représentatives de l'évolution générale "très lissée" de la nappe (fig. 9).
- **Paramètres hydrauliques** : Les études préliminaires limitées à la recherche de débits ponctuels élevés ne fournissent pas de valeurs régionales des paramètres hydrauliques de l'aquifère.

### 7.2.3. Caractéristiques du modèle

La modélisation a été effectuée au moyen du logiciel MARTHE. L'aquifère est représenté par un système bicouche : 20 m d'altérites sur 40 m de socle fissuré. La surface modélisée (2,4 x 2,8 km) est limitée par des mailles à potentiel imposé. L'extension du modèle est suffisante pour que l'influence des pompages simulés n'atteigne pas les limites. La taille des mailles varie de 60 m (mailles de pompage) à 200 m en bordure du modèle.

### 7.2.4. Calage du modèle, résultats des simulations

#### Calage

En l'absence de données de terrain, on a introduit dans le modèle des valeurs de paramètres hydrauliques représentatives du contexte hydrogéologique et climatique du site, à savoir :

$$\begin{array}{lll} \text{Altérites} & T = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} & \text{Socle} = 10^{-5} < T < 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \\ & 10^{-2} < S < 5 \cdot 10^{-2} & 10^{-3} < S < 10^{-4} \end{array}$$

Recharge = 5 à 10% de la pluie étalés sur 4 mois (juillet à octobre)

Les paramètres retenus après plusieurs essais de restitution des niveaux observés sont les suivants :

	Altérites	Socle
T m <sup>2</sup> /s	1.5 · 10 <sup>-5</sup>	4 · 10 <sup>-5</sup>
S	5 · 10 <sup>-3</sup>	5 · 10 <sup>-4</sup>
R mm	1987 = 50 ; 1988 = 56 ; 1989 = 47 ; 1990 = 35 mm soit 6% de la pluie annuelle	

#### Résultats

La restitution des niveaux observés sur F3 est bonne (cf. fig. 10 et 11). Le modèle retrace avec une précision très satisfaisante l'évolution cyclique du niveau provoquée par les variations saisonnières de production et la recharge par les pluies. La légère baisse générale du niveau pendant la période simulée est également bien rendue.

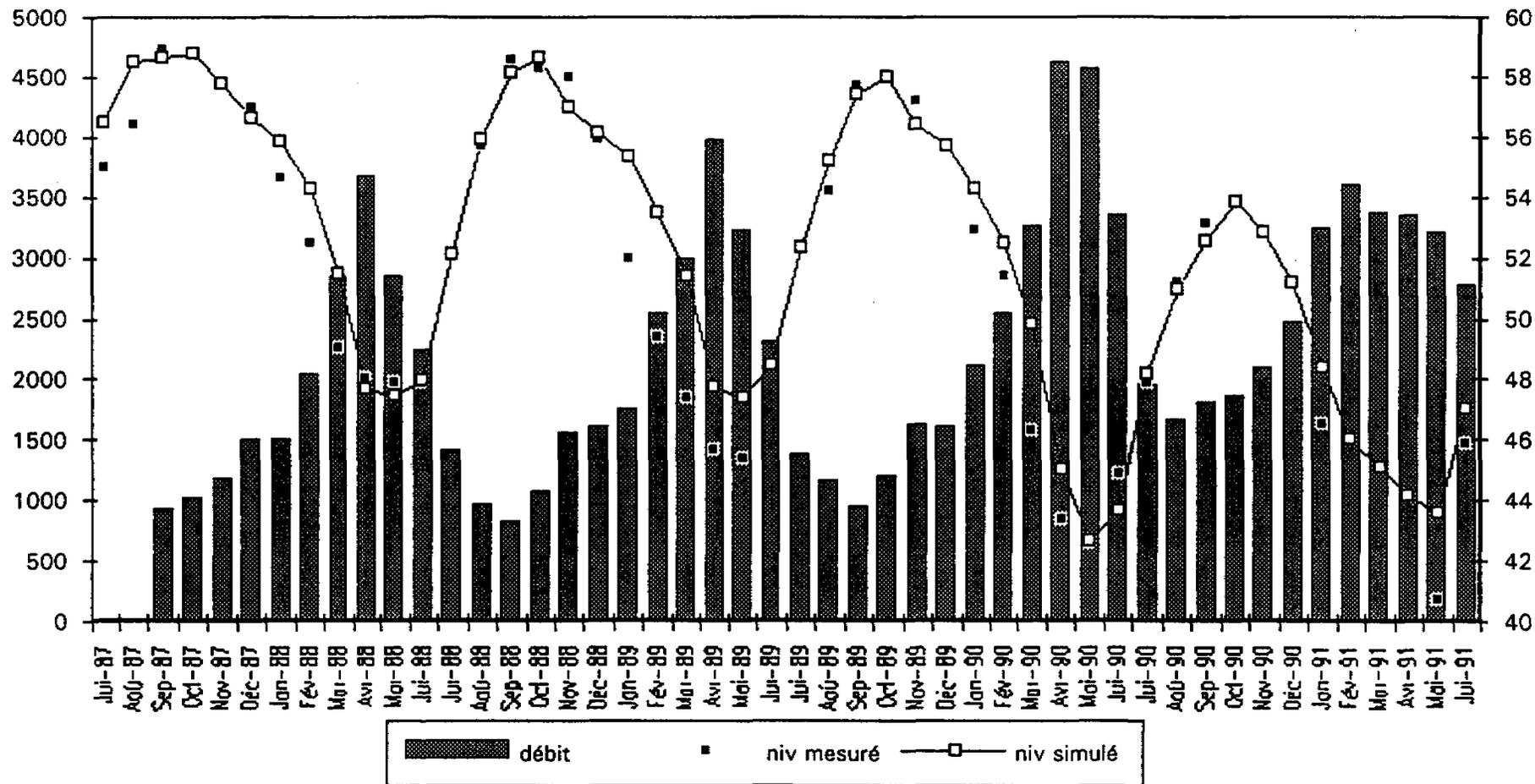


Fig.10 - BOROMO F3

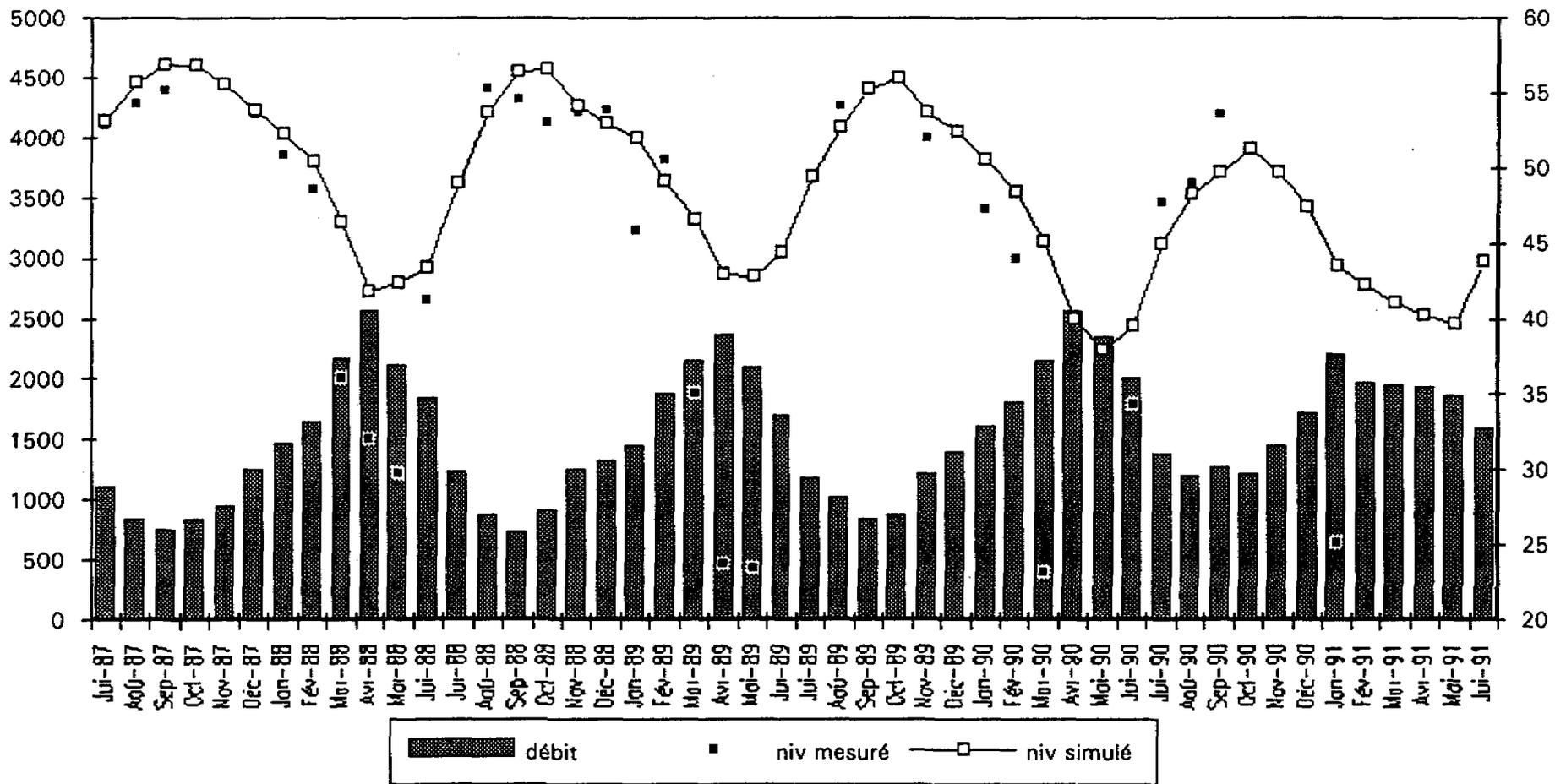


Fig.11 - BOROMO F1

Sur F1, l'évolution générale est également bien restituée. Par contre, le modèle ne retrouve pas les forts rabattements constatés en saison sèche. La baisse de niveau anormalement forte aux périodes de pointe de la production est due au dénoyage partiel des fissures productrices. Ce phénomène n'est pas pris en compte par le modèle (différence entre le niveau calculé au centre de la maille et le niveau mesuré dans le forage).

### **7.3. MODELISATION DU CHAMP N°4 DE KOUPELA**

#### **7.3.1. Données disponibles**

L'AEP de KOUPELA comprend 4 champs de captage regroupant 7 ouvrages de production qui captent un socle granitique à recouvrement altéré saturé d'épaisseur faible ou nulle.

Les productions mensuelles de tous les forages sont connues depuis 1981. Les mesures régulières de niveau ne sont disponibles que sur le forage F7, depuis sa mise en service en 1989.

Il n'existe pas de données sur les caractéristiques hydrauliques de la nappe au droit du forage F7. Des valeurs de transmissivités comprises entre 2 et 5. 10<sup>-4</sup> ont été calculées sur les forages F4 et F5.

#### **7.3.2. Calage et résultat des simulations**

##### **Calage**

Les altérations étant sèches dans la zone d'influence du forage F7, le modèle est réduit à une seule couche de 50 m d'épaisseur.

La surface modélisée est un carré de 1 km de côté limité par des cotes de débordement. La maille dans laquelle est située le forage F7 est un carré de 50 m de côté.

Le meilleur calage est obtenu avec les valeurs suivantes :

$$T \approx 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = 10^{-3} \text{ (nappe libre dans le socle fissuré/fracturé)}$$

Recharge : 32 mm (1989) 19 mm(1990)

##### **Résultats**

La restitution des niveaux piézométriques observés sur F7 en fonction des prélèvements est tout à fait satisfaisante. Le modèle retrouve le rabattement excessif (12 m en 21 mois) constaté sur le forage ( cf. fig. 12).

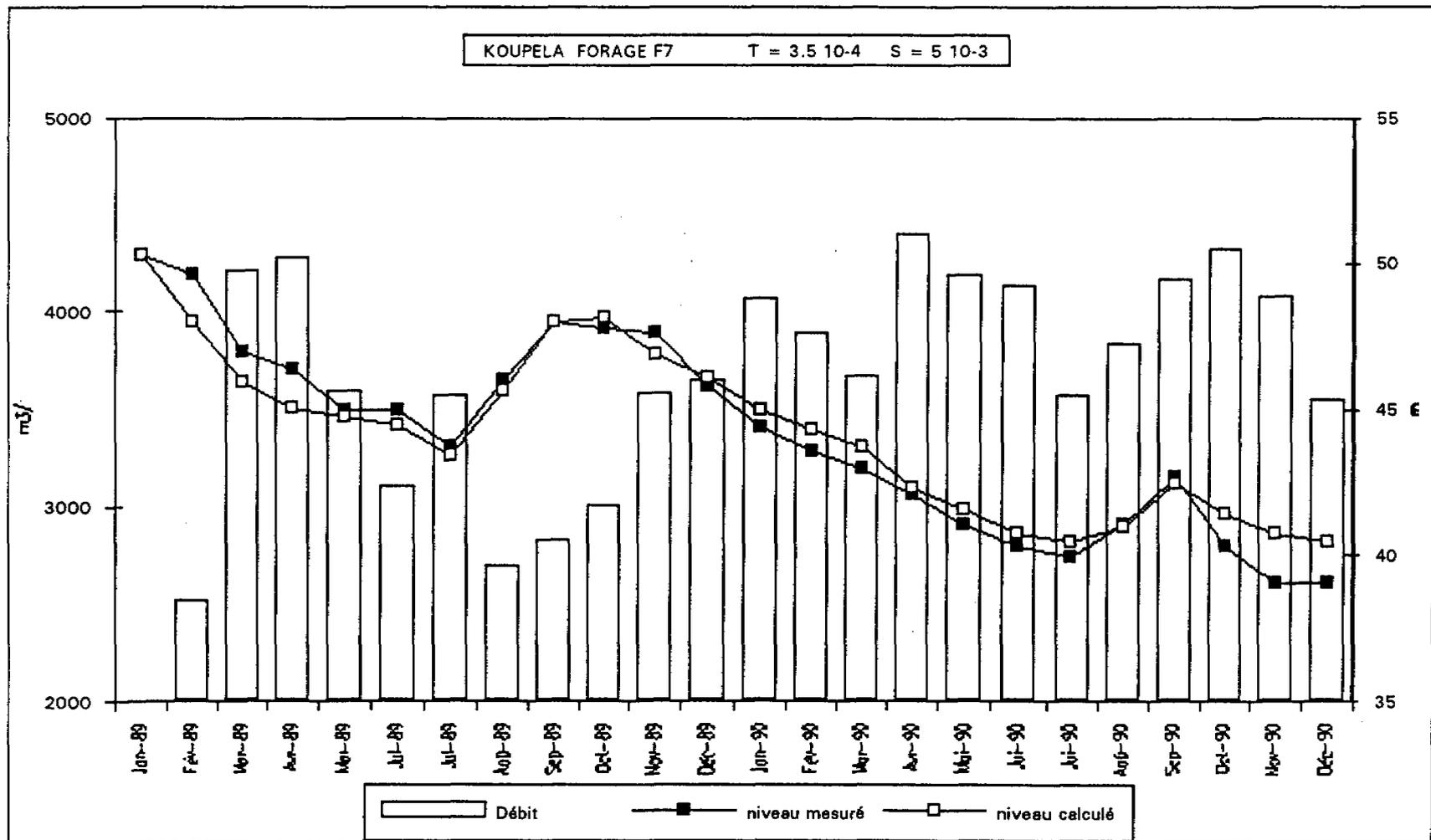


Fig.12 - KOUPELA - FORAGE F7

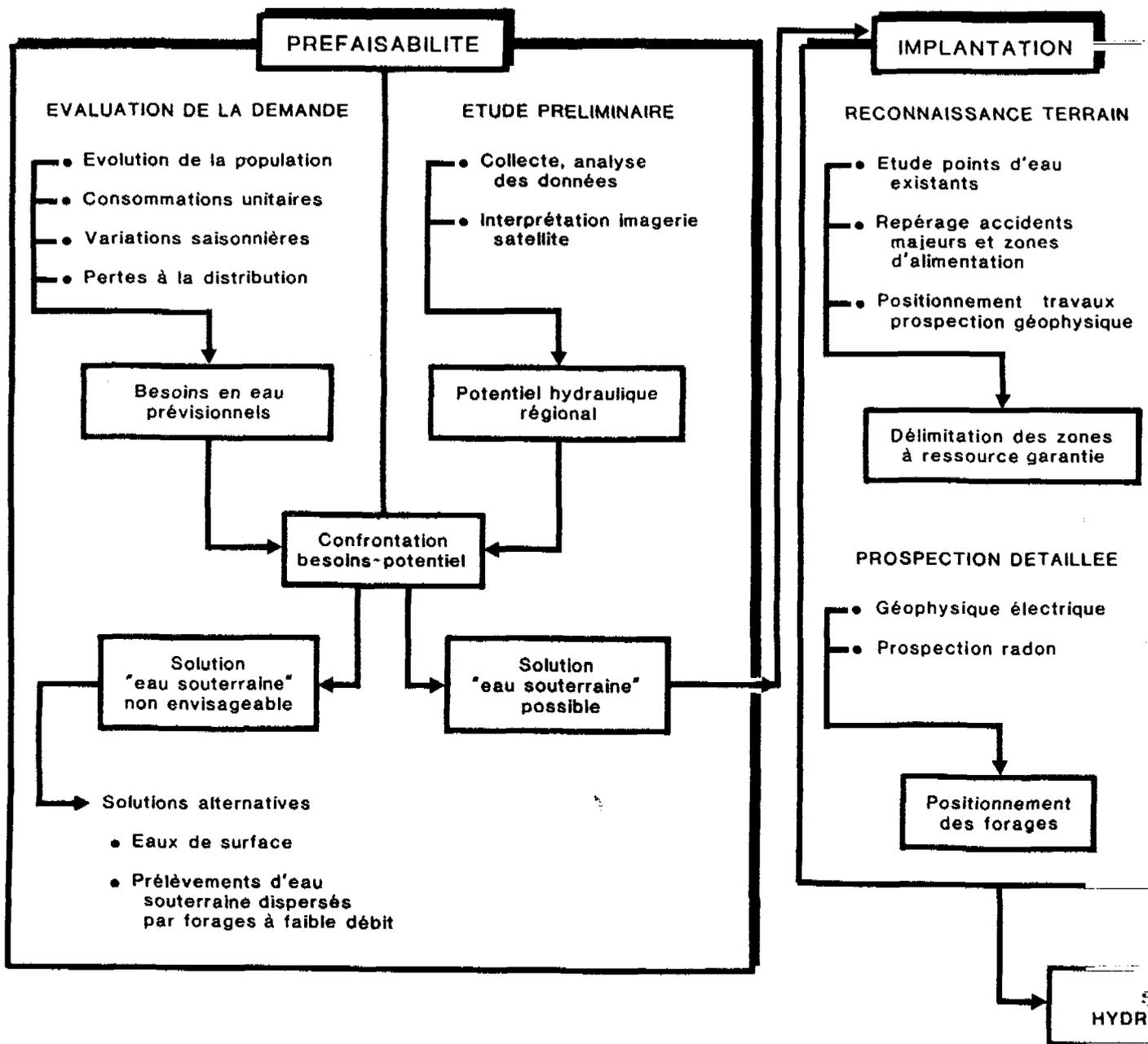
## **7.4. CONCLUSIONS**

Ces deux exemples montrent qu'il est possible au moyen d'un modèle mathématique simple, de simuler l'évolution des niveaux piézométriques mesurés dans un aquifère de socle soumis à une exploitation intensive.

Ces modèles, réalisés avant la mise en production des champs, auraient montré aux exploitants que les prévisions de prélèvements étaient réalistes à Boromo et trop élevées à Koupéla.

La même démarche devrait être appliquée à tous les centres secondaires pour lesquels on dispose de chroniques débits/niveaux sur une période suffisamment longue. Les modèles calés sur ces historiques permettraient aux exploitants d'identifier les champs de captage surexploités, de calculer, pour chacun de ces champs, le débit optimum stabilisé et de positionner les ouvrages complémentaires.





- Cartes struct
  - Limites d
  - Isohypse
  - Isopaque
- Paramètres i
  - Cartes d
  - Cartes d
- Piézométrie
  - Carte pié
- Recharge
  - Première

**TRAVAUX**

**FORAGES DE RECONNAISSANCE**

- Coupes géologiques
- Débits fin de foration
- Essais de débits par paliers
- Fracturation hydraulique

Géométrie des réservoirs  
Paramètres hydrauliques des forages

**POMPAGES D'ESSAI**

- Pompage palier unique 72h
- Etude remontée
- Interprétation des essais

Paramètres hydrauliques de l'aquifère

**SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE**

- Géométrie des réservoirs
- Extension altérites et socle
- Toit et mur socle fracturé
- Altérations et socle fracturé
- Paramètres hydrauliques
- Coefficients de transmissivités
- Coefficients d'emmagasinement

Géométrie socle fracturé

estimation

**MODELISATION**

- Construction du modèle
- Calage régime permanent
- Régime transitoire
- Simulations exploratoires

Choix des forages de production et des débits d'exploitation (schéma provisoire)

**SUIVI**

- Contrôle des productions mensuelles
- Contrôle des niveaux
- Mesure de la pluie

Historiques prélèvements - niveaux - pluies

Comparaison niveaux calculés / niveaux observés

- Calage en régime transitoire sur historiques
- Simulation des scénarios d'exploitation

Choix des forages de production et des débits d'exploitation (schéma définitif)

**ORGANIGRAMME DES DIFFERENTES PHASES D'ETUDE**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 - **BRGM-AQUATER**. Exploitation des eaux souterraines en zone de socle cristallin et valorisation agricole (1991).
- 2 - **BRGM**. Constat sur le fonctionnement de onze mini adductions d'eau potable au Niger et conditions de rentabilité économique (1992).
- 3 - **BRGM**. Etablissement du programme des pompages d'essais (1970).
- 4 - **BRGM**. Expérimentation de la fracturation hydraulique sur forage d'eau au Burkina Faso (1989).
- 5 - **BRGM**. Interprétation des données de pompage d'essai pour l'évaluation des paramètres aquifères (1972).
- 6 - **BRGM**. Principales méthodes de reconnaissance des milieux fissurés (1980).
- 7 - **BRGM**. Prospection hydrogéologique en roches dures. Techniques croisées pour la recherche des forts débits en forage (1982).
- 8 - **BRGM**. Utilisation de l'imagerie satellitaire SPOT pour la prospection hydrogéologique en milieux fissurés. Exemple au Burkina Faso.
- 9 - **BRGM**. Utilisation de l'imagerie satellitaire SPOT pour la prospection hydrogéologique en milieux fissurés. Rapport final (1988).
- 10 - **BURGEAP**. Contribution à l'implantation des forages d'eau dans le socle cristallin par la méthode VLF. CIEH bulletin n°4 (1984).
- 11 - **BURGEAP**. Essais de débit simplifiés sur puits. CIEH (1982).
- 12 - **CIEH**. Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines (1978).
- 13 - **CIEH**. Essais de débit simplifiés sur forages d'hydraulique villageoise. BURGEAP (1988).
- 14 - **CIEH-BGR**. Contribution à la méthodologie de prospection des eaux souterraines sur le bouclier cristallin d'Afrique de l'ouest. Etudes hydrogéologiques et géophysiques au Burkina Faso (1987).
- 15 - **CIEH-BURGEAP**. Etudes du vieillissement des forages d'hydraulique villageoise et semi urbaine en zone de socle cristallin (1991).
- 16 - **CEFIGRE**. Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie du socle cristallin et cristalloyllien et du sédimentaire ancien de l'Afrique de l'ouest (1983).

- 17 - **D. ASSOUMA.** Etude par modèle mathématique de la structure et du fonctionnement d'un aquifère de socle exploité en région tropicale (1988). Thèse de l'université d'Orléans.
- 18 - **F. GUERIN.** Production et mécanisme de migrations du radon 222 dans les milieux fissurés. Thèse de l'Université de Paris 6. BRGM (1991).
- 19 - **IAH.** Ground water recharge (1990). Volume 8.
- 20 - **IWACO.** Exploitation concentrée de l'eau souterraine par champ de captage pour la ville de Ouagadougou. Bulletin du CIEH n°71 (1988).
- 21 - **PNUD.** Schéma de mise en valeur des ressources en eau du Mali (1989).
- 22 **PROJET BILAN D'EAU.** Rapport intermédiaire de la deuxième phase 1987-90. TOME 2. Inventaire des ressources en eau. Ministère de l'Eau DEP Ouagadougou (1989).
- 23 - **PROJET BILAN D'EAU.** Etude. Inventaire des ressources en eau des centres secondaires ONEA alimentés à partir des eaux souterraines (1989). Ministère de l'Eau DEP Ouagadougou (1989).
- 24 **PROJET BILAN D'EAU.** Stratégie d'implantation des points d'eau au Burkina Faso. Ministère de l'Eau DEP Ouagadougou (1989).
- 25 - **PROJET BILAN D'EAU.** Analyse des données d'exploitation des 26 centres secondaires ONEA, alimentés par les eaux souterraines (1990). Ministère de l'Eau DEP Ouagadougou (1989).
- 26 - **Ph. SOUBIRAN.** Etude de la productivité attendue à moyen et long terme des captages en milieux fissurés (Bretagne et Burkina Faso). Rapport de fin de stage ENSHMG. BRGM (1991).

## **ANNEXES**

- 1 - EVALUATION DES DEBITS PERENNES EXPLOITABLES EN ZONE SOUDANO-SAHELIENNE**
- 2 - PRESENTATION DU LOGICIEL GRIVEL**
- 3 - PRESENTATION DU LOGICIEL ISAPE**
- 4 - PRESENTATION DU MODELE MARTHE**
- 5 - PROSPECTION RADON**
- 6 - FRACTURATION HYDRAULIQUE**



**ANNEXE 1**

**EVALUATION DES DEBITS PERENNES EXPLOITABLES EN ZONE  
SOUDANO-SAHELIENNE**



# **EVALUATION DES DEBITS PERENNES EXPLOITABLES EN ZONE SOUDANO-SAHELIENNE**

## **1. OBJECTIFS**

De nombreuses études abordent l'évaluation de la ressource en eau des aquifères de socle par des méthodes analytiques visant principalement à quantifier le paramètre recharge. L'hétérogénéité des valeurs d'infiltration mesurées sur le terrain et la complexité des écoulements dans les réservoirs discontinus rendent très difficile le passage d'une valeur ponctuelle de recharge aux ressources mobilisables par forages qui conditionnent la faisabilité des projets d'alimentation en eau potable.

Une approche pragmatique paraît plus adaptée aux problèmes posés par les exploitants. Elle consiste à analyser l'évolution des champs de captages qui exploitent de façon intensive des aquifères de socle dans divers contextes hydrogéologiques et climatiques. Cette étude de cas vise à établir une typologie de conditions d'exploitation, permettant de prédéterminer, par comparaison, l'ordre de grandeur des débits pérennes exploitables sur un site donné ainsi que le nombre et l'espacement des ouvrages de production à prévoir.

## **2. METHODOLOGIE**

A quelques exceptions près, les champs de captage de la zone soudano-sahélienne sont surexploités. Les historiques de débits et de niveaux montrent un abaissement rapide et continu de la nappe dans la zone d'influence des pompages. La production moyenne annuelle du champ décroît (baisse du débit d'exploitation par dénoyage des fissures productives) jusqu'à une valeur d'équilibre qui correspond aux ressources pérennes mobilisables par le champ.

Dans un premier temps, on sélectionne les champs de captage exploités depuis au moins 5 ans et pour lesquels on dispose des productions mensuelles et de quelques mesures de rabattement permettant d'apprécier, même de façon très schématique, "l'épuisement" du réservoir en fonction du temps au droit des captages. La comparaison des débits prélevés aux abaissements de niveaux permet, dans la majorité des cas, d'évaluer l'ordre de grandeur du débit pour lequel on aurait obtenu une stabilisation des niveaux de pompage dans le forage.

Dans un deuxième temps, on essaie de valider les résultats obtenus par modélisation de schémas hydrauliques théoriques représentatifs des conditions hydrogéologiques et climatiques les plus fréquemment rencontrées.

### **3. DONNEES DISPONIBLES**

Quinze champs de captage au Burkina Faso répondent aux conditions énumérées au paragraphe 2. Il faut noter que les ouvrages de DORI et KAYA sont placés en bordure de mares ou de retenues pérennes ; ils ne sont donc pas représentatifs de la zone climatique sahélienne pour laquelle on ne dispose d'aucune donnée.

Les 13 champs utilisables sont également repartis entre la zone soudano-sahélienne (pluviométrie 600 à 800 mm) et la zone soudanienne (800 à 1200 mm). Au total les 13 champs pris en compte comprennent 39 forages d'exploitation.

Les historiques de débits et de niveaux sont résumés sous forme graphique dans les figures 10 à 18.

### **4. RESULTATS**

Les données de base et les résultats de l'interprétation sont récapitulés dans le tableau 1.

Le débit maximum prélevé sur le champ correspond au volume total prélevé l'année de la plus forte production divisé par 365 jours.

Le débit pérenne est estimé en fonction de l'évolution du niveau piézométrique mesuré sur les forages exploités.

**En zone soudano-sahélienne** le débit pérenne par ouvrage est compris entre 33 et 83 m<sup>3</sup>/j. Les débits les plus élevés correspondent aux captages d'aquifères de socle surmontés de 20 à 30 m d'altérations saturées.

**En zone soudanienne** le débit pérenne par ouvrage est compris entre 50 et 150 m<sup>3</sup>/j. Cette dernière valeur, relevée sur un seul ouvrage situé en bordure d'un marigot important n'est représentative que de ce contexte. La borne supérieure de 100 m<sup>3</sup>/j paraît plus représentative. L'influence de la présence d'altération saturée sur le débit pérenne ne peut pas être précisée ; tous les champs de captage étudiés exploitent des aquifères de socle avec recouvrement altéré saturé épais (10 à 50 m).

On constate que, malgré la complexité à petite échelle des systèmes aquifères, l'estimation de la ressource mobilisable, qui intègre des paramètres régionaux, aboutit à des valeurs relativement homogènes et cohérentes avec le contexte climatique et hydrogéologique.

## **5. MODELISATION DE SCHEMAS HYDRAULIQUES TYPES**

### **5.1 DEFINITION DES SCHEMAS**

#### **5.1.1 Les réservoirs**

Un forage au socle capable de fournir un débit supérieur ou égal à 10 m<sup>3</sup>/h, est obligatoirement implanté sur une zone à perméabilité anormalement élevée. Cette zone dont la largeur varie de quelques mètres à quelques dizaines de mètres est le plus souvent liée à un accident majeur rectiligne plurikilométrique. Par ailleurs, l'observation montre que la densité de fracturation décroît en profondeur ; la majeure partie des venues d'eau est localisée dans les 25 premiers mètres.

Le schéma type de l'aquifère de socle introduit dans le modèle comprend donc :

- un réservoir perméable de longueur toujours supérieure au rayon d'influence du forage, de 25 m de profondeur et d'une largeur fixée à 40 m. Cette dernière valeur représente la largeur moyenne des lits majeurs de marigots surimposés à un couloir de faille ;
- un réservoir "encaissant" moins perméable, de 50 m d'épaisseur.

Le socle est recouvert par des altérations qui peuvent être sèches ou saturées. Dans ce dernier cas la puissance du réservoir saturé est fixée à 15 m.

Les schémas hydrauliques modélisés sont représentés sur la figure 1.

#### **5.1.2 Les paramètres hydrauliques**

Les valeurs des paramètres hydrauliques introduites dans les différents réservoirs sont les suivantes :

ZONE CLIMATIQUE	CHAMP DE CAPTAGE	EXTENSION DU CHAMP (1) (m)	EPAISSEUR ALTERATIONS SATUREES (m)	DEBIT MAXIMUM OBTENU SUR LE CHAMP				ESTIMATION DU DEBIT PERENNE DISPONIBLE			
				Q max m <sup>3</sup> /J	Nbre forages	Q moy forage m <sup>3</sup> /j	Observations	Q P m <sup>3</sup> /j	Nbre forages	Q moy forage m <sup>3</sup> /j	Observations
Sahélienne P = 300 à 600 mm	DORI n°1	400	(15)	176	2	88	non stabilisé	(80)	2	(40)	dans mare pérenne
	KAYA n°3	500		420	4	105	non stabilisé	300	4	75	bord de retenue
Sahel-Soudan P = 600 à 800 mm	FADA n°1	750	0-10	284	7	41	non stabilisé	100	3	33	
	FADA n°2	forage unique	20	88	1	88	non stabilisé	60	1	60	
	KOUELA n°1	300	5	159	1	159	non stabilisé	35	1	35	
	KOUELA n°2	250	0	169	2	85	non stabilisé	80	2	40	
	SABOU	forage unique	?	44	1	44	(stabilisé)	(44)	1	(44)	
	TENKODOGO n°1	140	20-30	331	4	83	non stabilisé	250	3	83	
PO n°1	500	0-30	198	4	50	non stabilisé	150	3	50		
Soudanaïenne P=800 à 1200 mm	BOROMO	180	20-30	145	2	73	non stabilisé	100	2	50	
	GAOUA n°1	750	10-35	300	3	100	non stabilisé	200	2	100	
	GAOUA n°2	10	35-40	195	2	98	stabilisé	200	2	100	
	NIANKOLOGO	600	35-50	134	4	34	stabilisé	> 134	4	> 34	
	DAPAONG n°1	1500		404	7	58	non stabilisé	250	5	50	
	DAPAONG n°2	forage unique		229	1	229	non stabilisé	100-150	1	100-150	

(1) Distance entre les forages extrêmes

Tableau 1

RESERVOIRS	PERMEABILITE m <sup>3</sup>	TRANSMISSIVITE m <sup>2</sup> /s	COEFFICIENT EMMAGASINEMENT
Altérites	7,5 10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-5</sup>	5 10 <sup>-2</sup>
Socle fracturé	4 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup> (nappe libre)
Socle peu fracturé	2 10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-2</sup> (nappe libre) 10 <sup>-4</sup> (nappe captive)

La transmissivité retenue pour la zone fracturée captée (10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s) autorise un débit de 10 m<sup>3</sup>/h pour 20 m de rabattement environ. Le socle peu fracturé encaissant est représenté par une transmissivité de 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s qui correspond à la médiane d'un échantillon de valeurs obtenues par essai de pompage sur 389 forages d'hydraulique villageoise situés dans la partie centrale du Burkina Faso.

Pour les autres paramètres (coefficients d'emménagement, transmissivité des altérites) on a retenu les valeurs communément admises.

### 5.1.3 Contextes climatiques, recharges annuelles

Les aquifères sont placés dans les 3 zones climatiques les plus représentatives de l'Afrique de l'ouest : sahélienne, soudano-sahélienne et soudanienne.

La pluviométrie moyenne prise en compte dans la période simulée est la moyenne interannuelle de la zone. Pour tester la capacité des aquifères à supporter les années déficitaires on représente la succession suivante :

4 années normales : pluviométrie moyenne interannuelle = P<sub>m</sub>

3 années sèches = P<sub>s</sub> = P<sub>m</sub> x 0,60

3 années pluvieuses = P<sub>p</sub> = P<sub>m</sub> x 1,40

Les études sur la recharge annuelle par les pluies des aquifères de socle, montrent que la fraction de la pluie qui alimente les nappes est généralement inférieure à 5 %. Deux hypothèses sont testées : 2,5 et 5 %. Les valeurs de recharge prises en compte dans les différents contextes climatiques sont les suivantes :

ZONES CLIMATIQUES	R. années normales		R. années sèches		R. années pluvieuses	
	2,5 % (mm)	5 % (mm)	2,5 % (mm)	5 % (mm)	2,5 % (mm)	5 % (mm)
sahélienne = Pm = 500 mm	12,5	25	7,5	15	17,5	35
soudano-sahélienne = Pm = 700 mm	17,5	35	10,5	21	24,5	49
soudanienne = Pm = 1000 mm	25	50	15	30	35	70

## 5.2 CONSTRUCTION DU MODELE

Le programme de calcul utilisé est le logiciel MARTHE\*. Ce programme permet la modélisation en régime transitoire d'aquifères tridimensionnels et multicouches. MARTHE résout les équations de l'hydrodynamique par la méthode des différences finies.

### 5.2.1 Maillage

La surface du système aquifère modélisé est un carré de 3 km de côté : la zone fracturée productive est représentée par 4 rangées de mailles de 10 m de largeur, figurant un couloir de faille perméable nord-sud de 40 m de largeur, passant par le centre du modèle. Le socle peu perméable est discrétisé en mailles carrées de 100 m de côté, la jonction avec la zone fracturée étant assurée par 5 rangées de mailles de largeur décroissante.

Le maillage est représenté sur la figure 1 (compte tenu de la symétrie du dispositif la figure ne reproduit que le quart nord-est du modèle).

### 5.2.2 Limites, état initial

Les mailles limites du modèle sont à potentiel imposé (+ 65 m, + 50 m ). Sur toutes les autres mailles, on impose des côtés de débordement à + 67 ou 52 m. Ce dispositif permet de limiter à 2 m l'amplitude des remontées de niveaux piézométriques consécutives à la recharge. En d'autres termes, on considère que l'amplitude des fluctuations naturelles de la nappe est de 2 m (valeur fréquemment observée, en dehors des zones où le niveau statique est près du sol) et que la fraction de la recharge qui ne peut être stockée s'écoule à travers les limites à potentiel imposé ou est reprise par évapotranspiration.

Avant le démarrage des simulations d'exploitation le potentiel est fixé à + 65 m dans toutes les mailles. L'absence d'écoulement naturel est une hypothèse a priori pessimiste. Des simulations réalisées avec un gradient important montrent que la piézométrie initiale de la nappe n'a que peu d'influence sur l'évolution des niveaux calculés (cf. NOTA § 5.4).

\* MARTHE : Modèle A maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements.

### 5.3 SIMULATIONS D'EXPLOITATION

Les prélèvements sont effectués au moyen d'un forage placé au centre du modèle et ouvert sur toute la hauteur de la formation perméable.

Les débits testés sont de 50, 100 et 150 m<sup>3</sup>/j en moyenne annuelle. Pour se rapprocher des conditions d'exploitation réelles observées sur les AEP des centres secondaires, on module ces débits moyens selon les variations saisonnières de la demande à savoir :

- Saison des pluies (4mois) = Q moy x 0,8
- Saison froide (4 mois) = Q moy x 1,05
- Saison chaude (4 mois) = Q moy x 1,15

Les simulations sont effectuées sur les 2 schémas hydrauliques retenus (socle, socle + altérite) placés dans les contextes climatiques précédemment décrits. On notera que le résultat négatif d'une simulation rend sans objet de nouvelles simulations à débits supérieurs.

Par ailleurs l'hypothèse "socle sans altération sous climat soudanien" n'est pas prise en compte car elle ne correspond pas à une réalité de terrain.

Toutes les simulations utiles effectuées sur le modèle sont récapitulées dans le tableau ci-après. Elles permettent par extrapolation de prévoir l'évolution du niveau piézométrique dans tous les cas de figure possibles.

SCHEMA HYDRAULIQUE	ZONE CLIMATIQUE	RECHARGE		DEBIT MOYEN	N° FIGURES	
		% P	mm			
SOCLE	Sahélienne (500 mm)	2,5	12,50	50	2	
		5,0	25,00	50	3	
	Soudan Sahel (700 mm)	2,50	17,50	50	4	
		5,00	35,00	50	5	
	SOCLE + ALTERITES	Sahélienne	2,50	12,50	100	6
		Soudano-Sahélienne (700 mm)	2,50	17,50	100	7
5,00			35,00	100	8	
Soudanienne (1000 mm)		5,00	50,00	150	9	

## 5.4 RESULTATS

L'évolution du niveau piézométrique pour chaque simulation est représentée graphiquement sur les figures 2 à 9 ci-après. Le schéma supérieur représente le niveau calculé au centre de la maille de pompage tous les 4 mois pendant 10 ans.

Pour passer du niveau maille au niveau dans le forage il est nécessaire d'introduire une correction. Le rabattement supplémentaire est donné par l'expression :

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \left[ \text{Ln} \left( \frac{a}{r_p} \right) - \frac{\pi}{2} \right]$$

- S** = rabattement supplémentaire  
**Q** = débit d'exploitation  
**a** = côté de la maille  
**r<sub>p</sub>** = rayon du puits  
**T** = transmissivité de la maille  
**Ln** = logarithme népérien

Les 2 schémas inférieurs représentent la surface piézométrique à la fin des septièmes et dixièmes saisons sèches. Ils permettent de visualiser l'extension de la dépression produite par le pompage.

Les principaux résultats fournis par les simulations sont résumés dans le tableau ci-après.

SCHEMA HYDRAULIQUE	ZONE CLIMATIQUE	RECHARGE		DEBIT TESTE M <sup>3</sup> /J	EVOLUTION DU NIVEAU DANS LE FORAGE
		%P	mm		
SOCLE	Sahélienne (P = 500 mm)	2,5 5	12,5 25	50 50	dénoyage en 2 ans dénoyage en 5 ans
	Soudano Sahélienne (P = 700 m)	2,5 5	17,5 35	50 50	dénoyage en 4 ans En limite de dénoyage après 7 ans (fin de la période de déficit pluviométrique).
SOCLE + ALTERITES	Sahélienne (P = 500 mm)	2,5	12,5	100	Pas de dénoyage mais le niveau continue à baisser après 3 dernières années.
	Soudano Sahélienne (P = 700 mm)	2,5 5	17,5 35	100 100	Niveau stabilisé Niveau stabilisé
	Soudanienne (P = 1000 mm)	5	50	150	Dénoyé en 2 ans

**NOTA :** Pour évaluer l'influence de l'hypothèse "écoulement naturel nul avant pompage" on a repris les mêmes simulations avec une piézométrie initiale convergente vers la zone perméable. Pour cela, des cotes de débordement sont introduites dans des mailles de la zone perméable. Le modèle calcule en régime transitoire la piézométrie correspondant à un équilibre interannuel avec la recharge.

Les résultats obtenus sont évidemment un peu plus favorables que dans l'hypothèse "écoulement naturel nul" mais ne modifient pas sensiblement les ordres de grandeur.

- dans le schéma socle, la zone perméable est dénoyée pour un débit de 50 m<sup>3</sup>/j sauf dans l'hypothèse P = 35 mm pour laquelle le rabattement encore disponible dans le forage est de 10 m.
- Dans le schéma socle + altérites, les résultats sont comparables pour les simulations à 100 m<sup>3</sup>/j. Au débit de 150 m<sup>3</sup>/j, le dénoyage intervient après 7 ans au lieu de 2 ans.

## **5.5 CONCLUSIONS**

Des résultats des simulations, on retiendra les conclusions pratiques suivantes :

Lorsque les aquifères de socle des zones sahéliennes et soudano-sahéliennes ne sont pas recouverts d'altérations saturées, le débit pérenne mobilisable par forage est inférieur ou égal à 50 m<sup>3</sup>/j.

La présence d'altérations saturées permet d'obtenir un débit pérenne de 100 m<sup>3</sup>/j dans tous les contextes climatiques.

Dans aucune des hypothèses étudiées un forage ne peut fournir un débit pérenne de 150 m<sup>3</sup>/j.

Le rayon d'influence du forage après 10 ans d'exploitation à 100 m<sup>3</sup>/j est compris entre 700 et 900 m, suivant la valeur de recharge adoptée.

Bien que fondés sur des schémas hydrogéologiques volontairement simplifiés, les résultats des simulations confirment les ordres de grandeur des débits pérennes déduits de l'analyse des performances des champs de captage en exploitation au Burkina Faso et au Togo.

Ces valeurs de débits pérennes et de rayons d'influence des forages au socle doivent permettre de dimensionner rapidement, au stade de la préfaisabilité, leurs champs de captage à installer pour satisfaire les besoins en eau d'une agglomération ou d'un périmètre irrigué et de juger a priori la viabilité économique d'une solution "eau souterraine".

Par ailleurs, l'expérience montre que dans leur grande majorité les forages utilisés pour l'AEP des centres secondaires sont mis en service à un débit très supérieur aux ressources pérennes. En conséquence, le débit initial d'exploitation décroît régulièrement, obligeant l'exploitant à créer de nouveaux forages, toujours au moindre coût, c'est à dire à proximité immédiate des ouvrages dits "épuisés". Les investissements improductifs (forages abandonnés) et les coûts de fonctionnement d'un trop grand nombre de forages rendent les

coûts de production prohibitifs. La connaissance des ordres de grandeur de la ressource mobilisable par un forage dans un contexte hydrogéologique et climatique donné devrait, en l'absence d'études détaillées, permettre aux exploitants de mieux dimensionner leurs champs de captage.

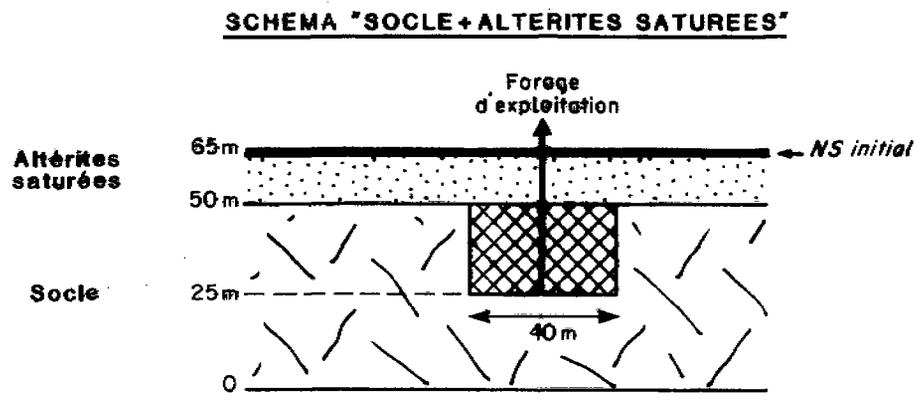
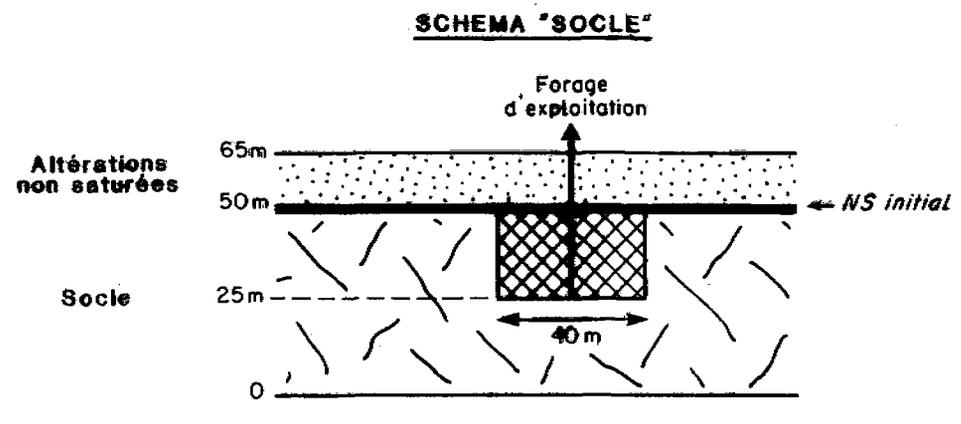
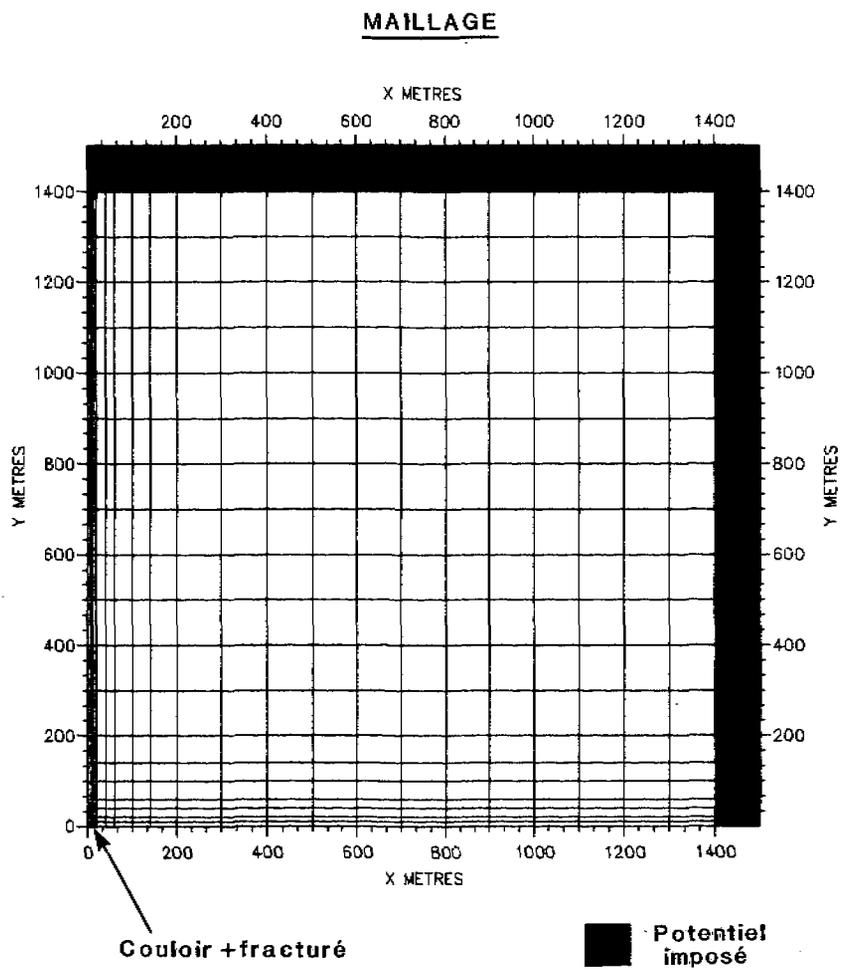
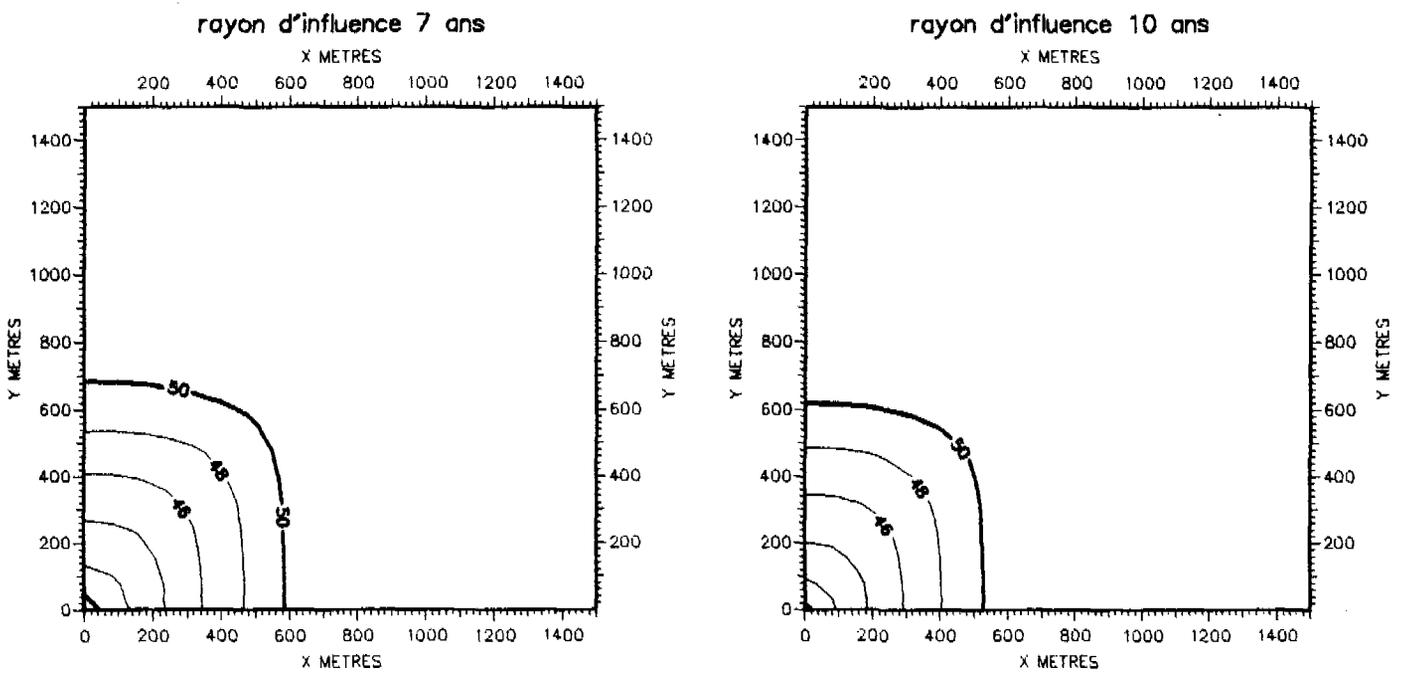
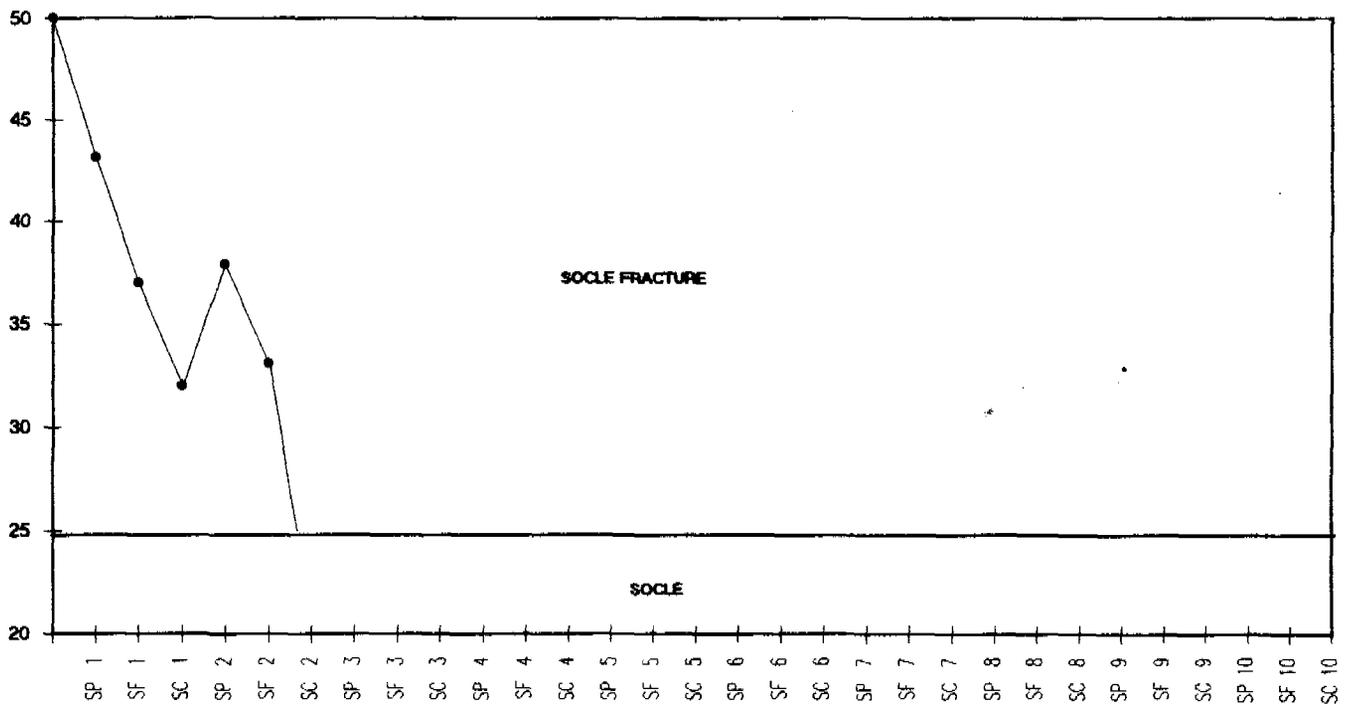


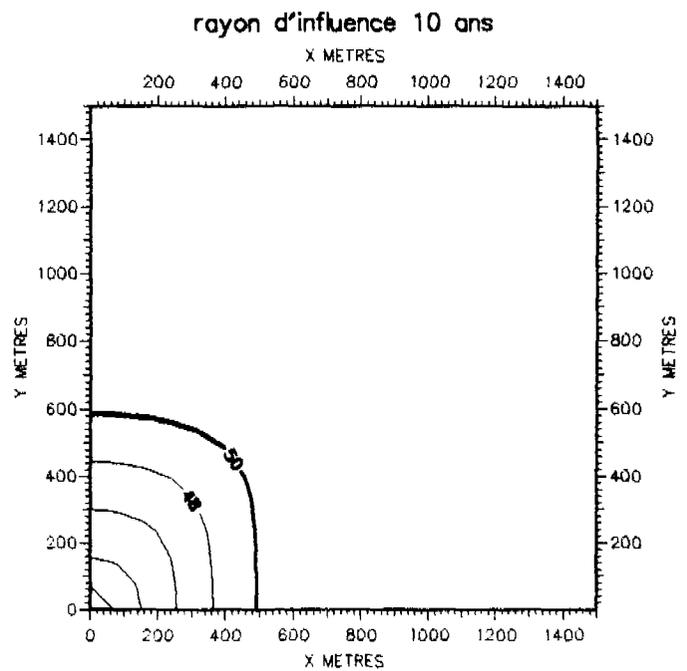
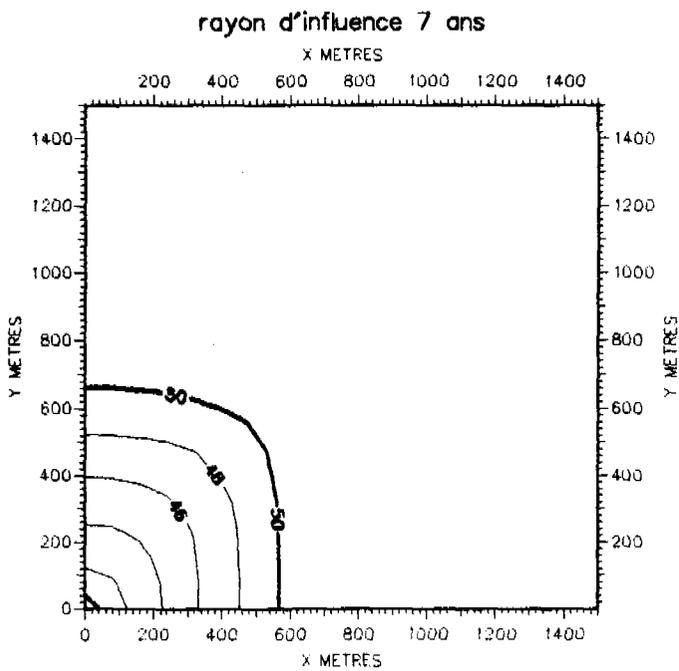
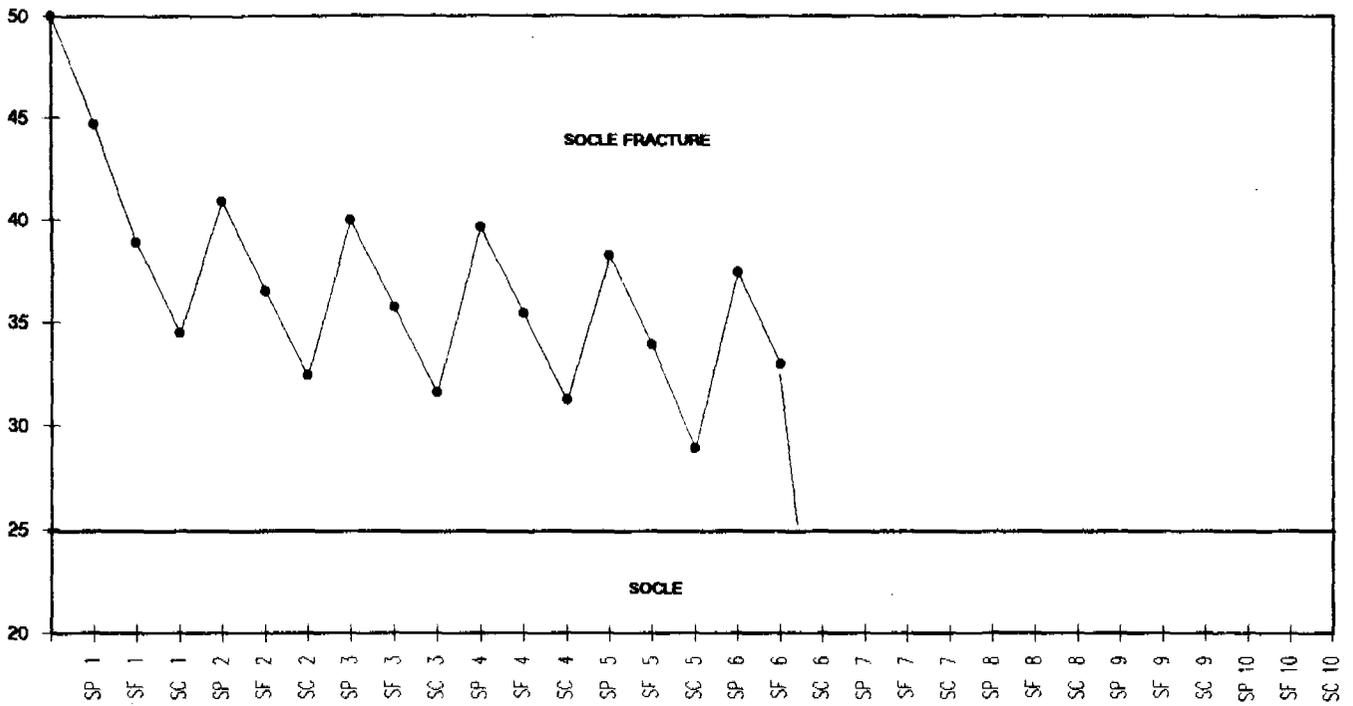
Fig.1 - MAILLAGE ET COUPES SCHEMATIQUES DES RESERVOIRS MODELISES



**Commentaires :** Le dénoyage a lieu dès la deuxième année en fin de saison sèche .  
 Les rayons d'influence à 7 et 10 ans sont donnés à titre indicatif  
 ( le modèle ne peut extraire à partir de la deuxième année  
 que 30m<sup>3</sup>/j environ de la maille de pompage )

**Fig.2 - SOCLE SEUL**

**Evolution du niveau dans le forage d'exploitation et piézométries à 7 et 10 ans**  
 Pluviométrie = 500 mm      Infiltration = 2,5%P      Débit moyen = 50 m<sup>3</sup>/j

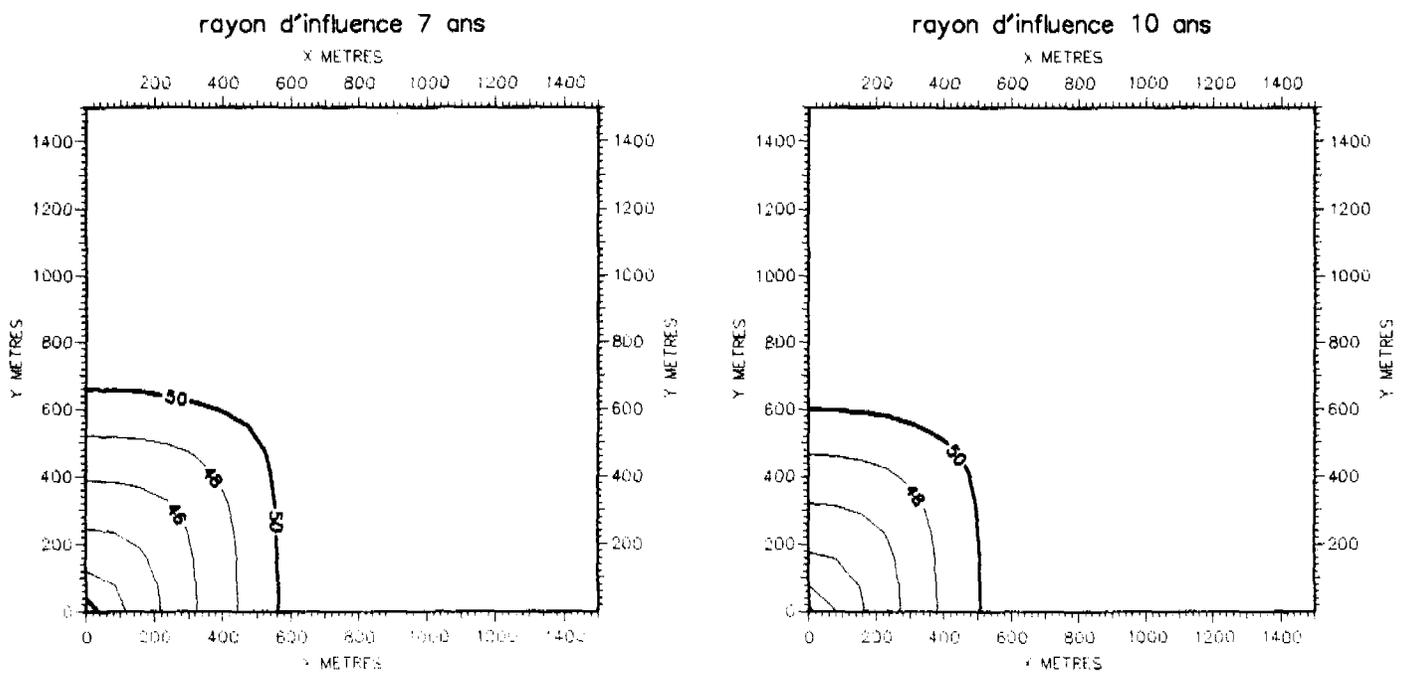
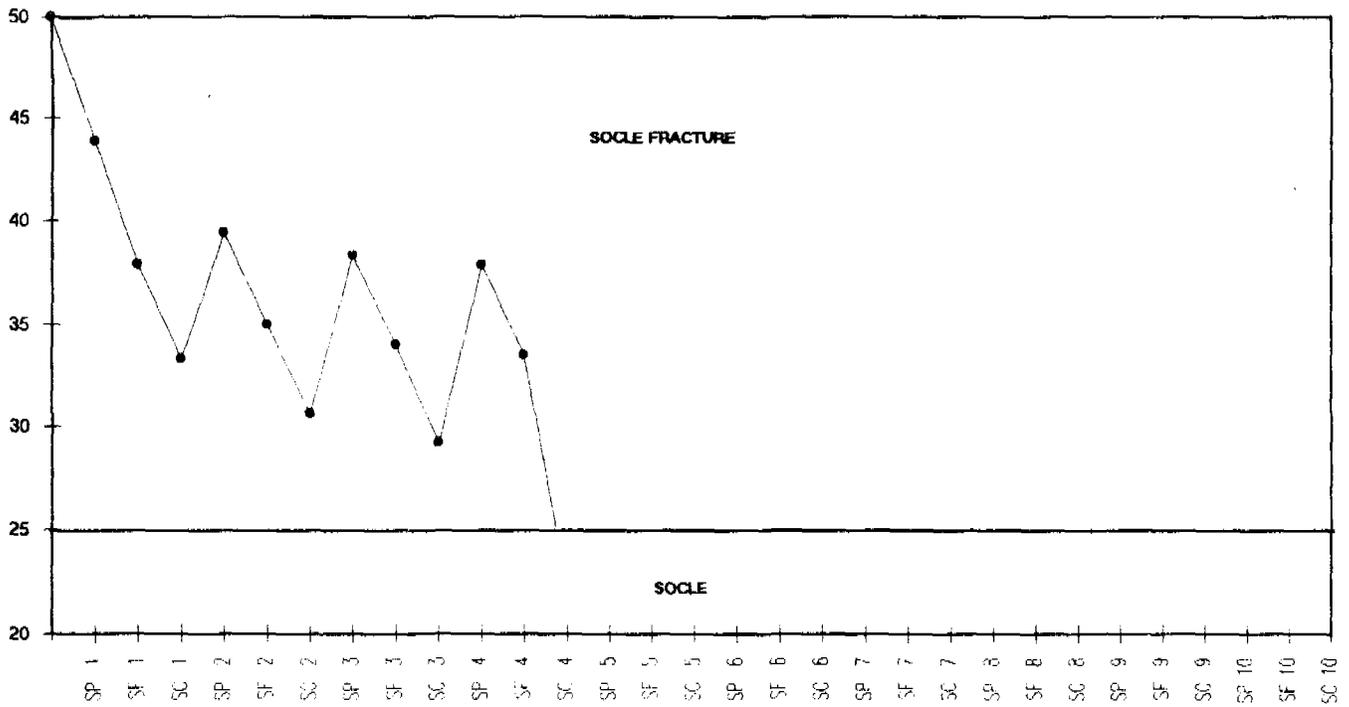


**Commentaires :** Le dénoyage a lieu la 6ème année, c'est-à-dire après la 2ème saison sèche. La correction de maille étant de 3,7m environ, on constate que dès la 5ème année en fin de saison sèche, il ne resterait que quelques décimètres de socle plus fracturé noyé.

Les rayons d'influence à 7 et 10 ans sont donnés à titre indicatif car après le dénoyage, le modèle ne peut plus extraire les  $50\text{m}^3/\text{j}$  ( $-30\text{m}^3/\text{j}$  environ). On note cependant que le rayon d'influence est inférieur à 700m.

**Fig.3 - SOCLE SEUL**

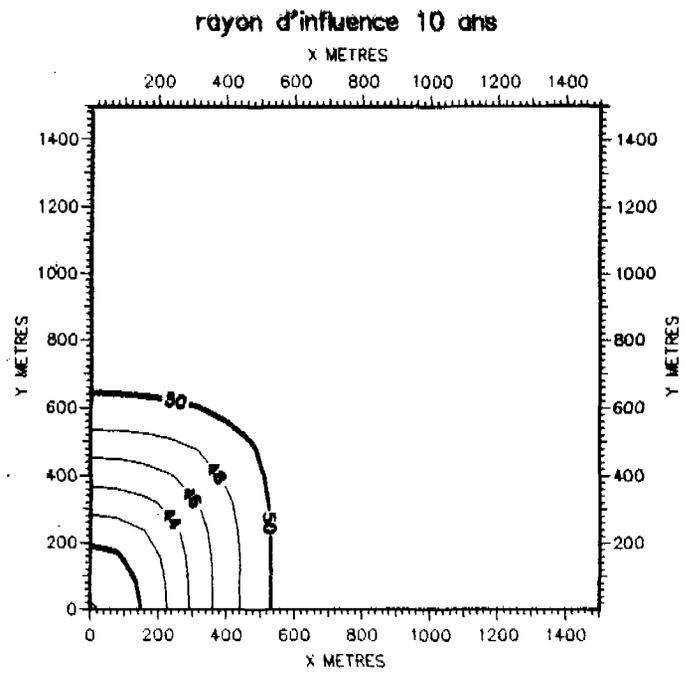
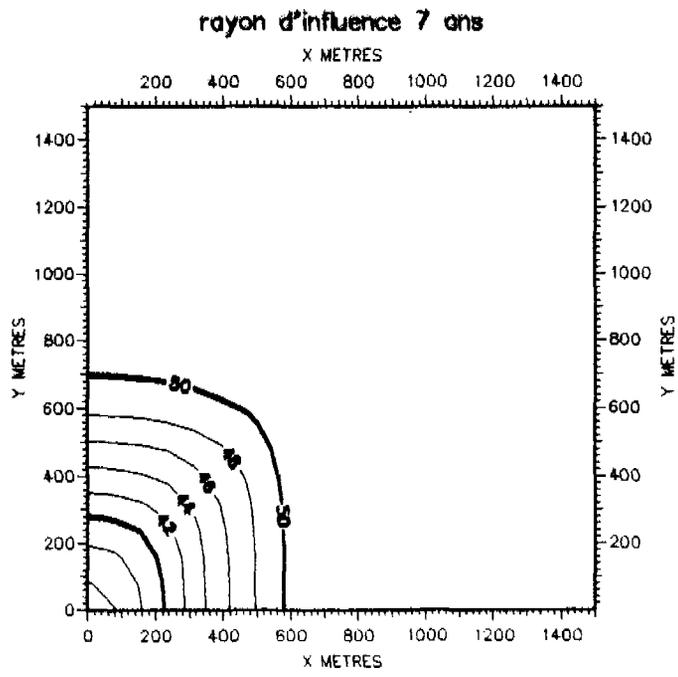
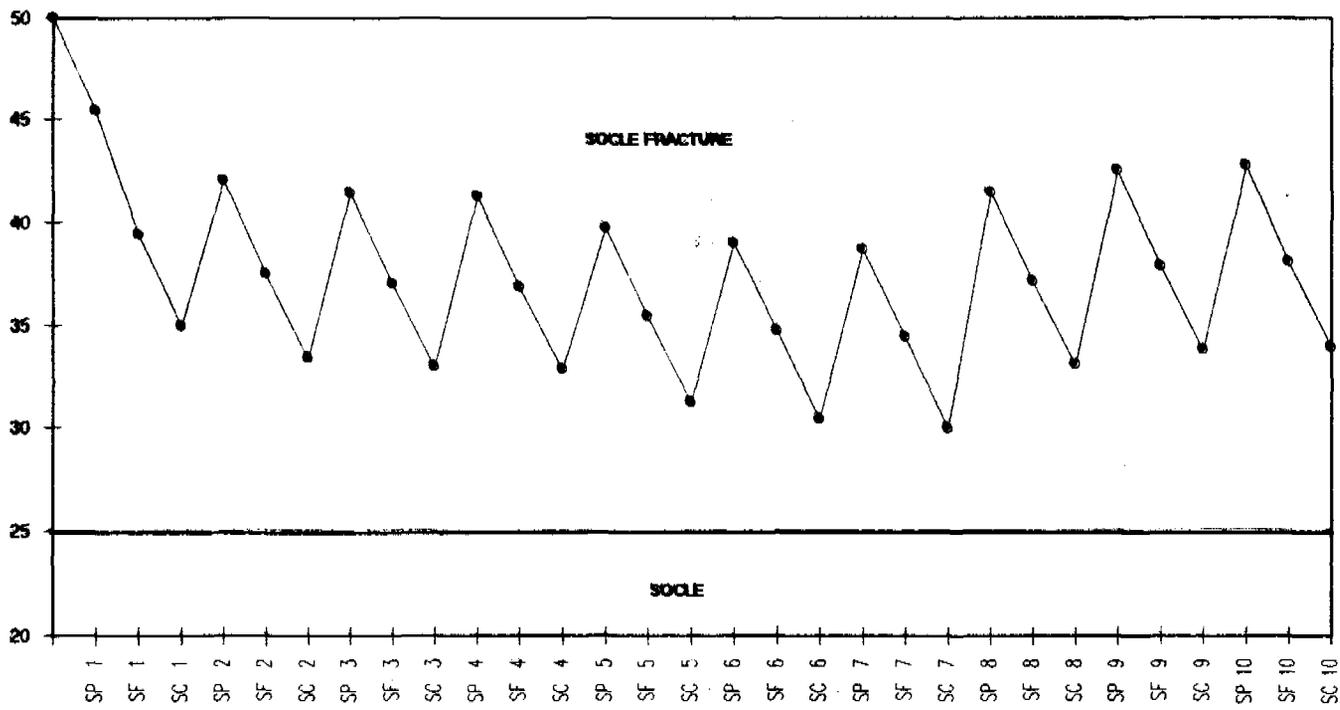
Evolution du niveau dans le forage d'exploitation et piézométries à 7 et 10 ans  
 Pluviométrie = 500 mm      Infiltration = 5%P      Débit moyen =  $50\text{m}^3/\text{j}$



**Commentaires :** Dénoyage au cours de la 4<sup>ème</sup> année ( saison chaude ).  
 La correction de maille étant de 3,7m environ, on constate que dès la fin de la 3<sup>ème</sup> année, il ne resterait que quelques décimètres de socle plus fracturé noyé.  
 Même remarque que précédemment quant au rayon d'influence ( cf Fig.3 ).

**Fig.4 - SOCLE SEUL**

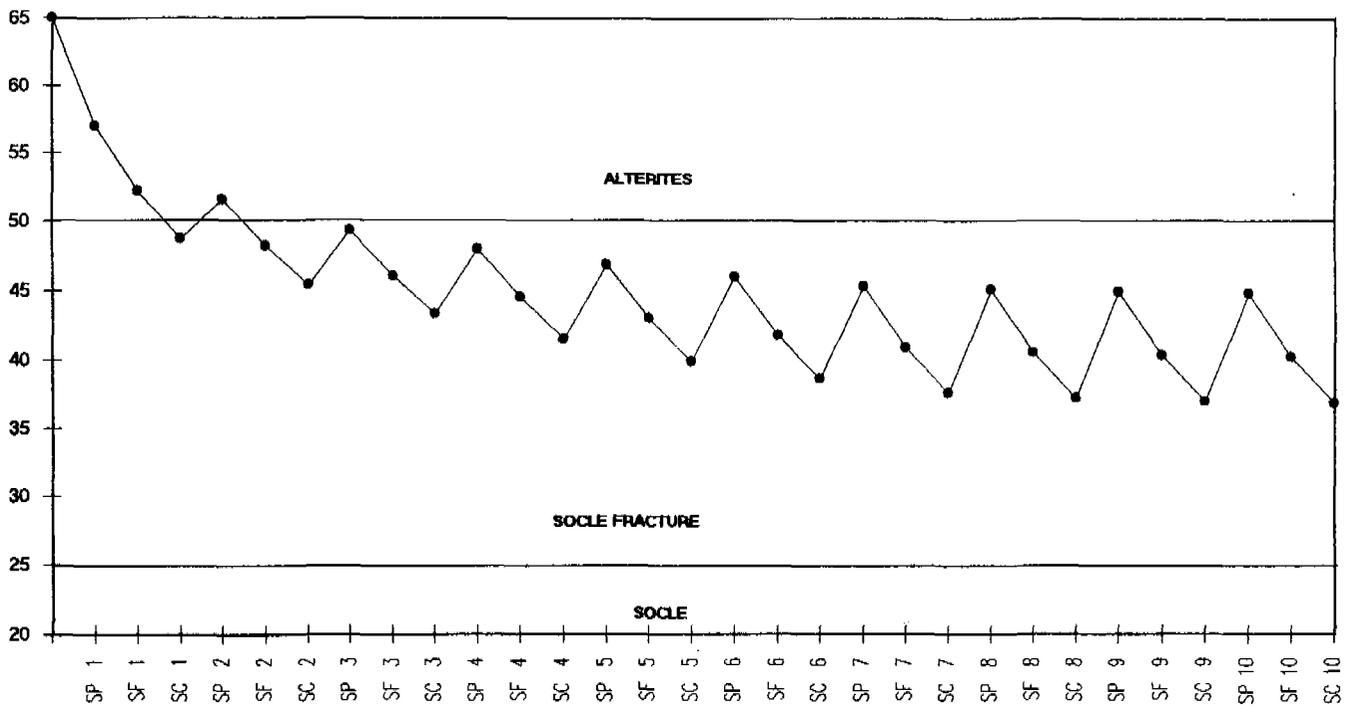
Evolution du niveau dans le forage d'exploitation et piézométries à 7 et 10 ans  
 Pluviométrie = 700 mm      Infiltration = 2,5%P      Débit moyen = 50 m<sup>3</sup>/j



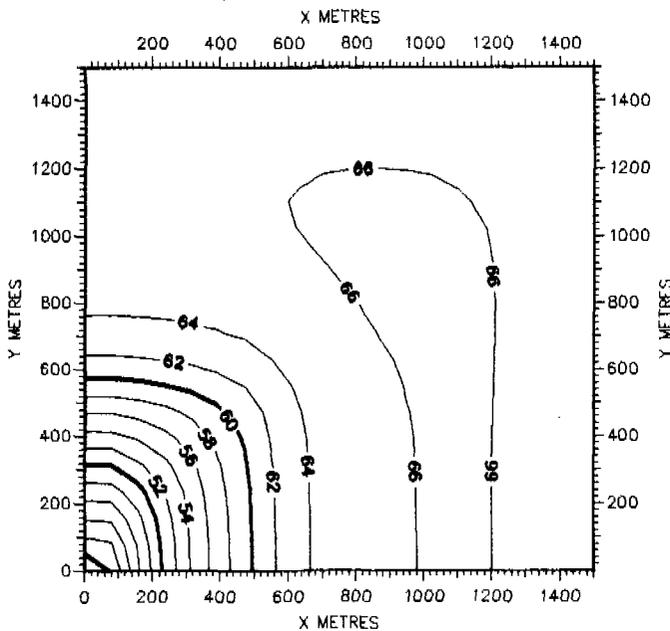
**Commentaires :** Pas de dénoyage et remontée des niveaux au cours des 3 dernières années plus pluvieuses.  
 En tenant compte de la correction de maille  $\approx 3,7m$ , on remarque qu'il ne resterait que 2 ou 3m de socle plus fracturé saturé au bout de 7 ans, après 3 années sèches.  
 Le rayon d'influence du pompage reste inférieur à 700m à son maximum (à 7 ans).

**Fig.5 - SOCLE SEUL**

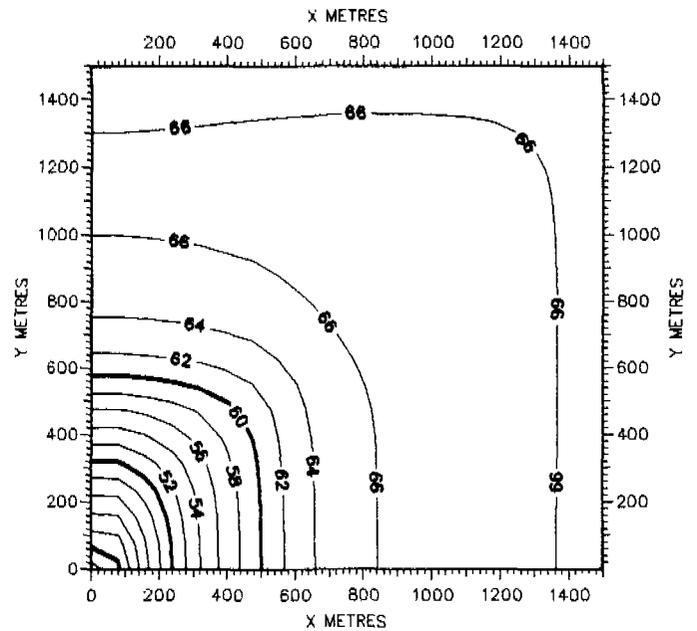
Evolution du niveau dans le forage d'exploitation et piézométries à 7 et 10 ans  
 Pluviométrie = 700 mm      Infiltration = 5 %P      Débit moyen = 50 m<sup>3</sup>/j



rayon d'influence 7 ans



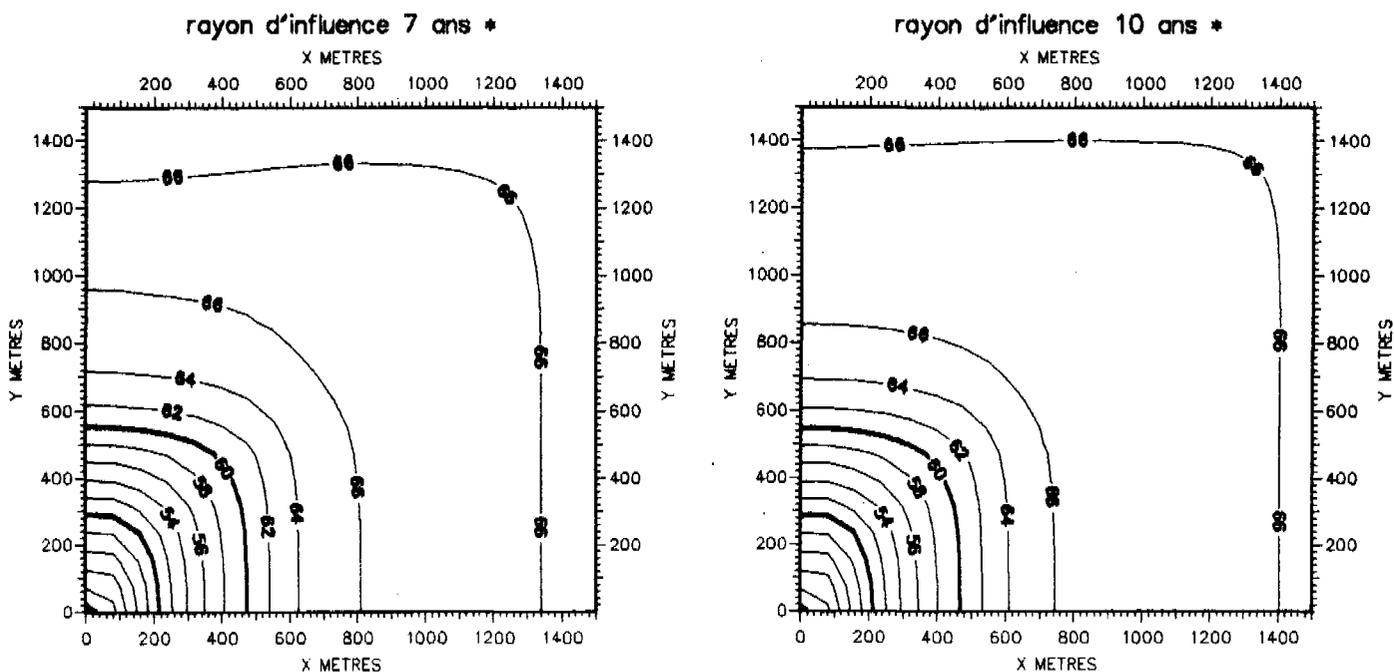
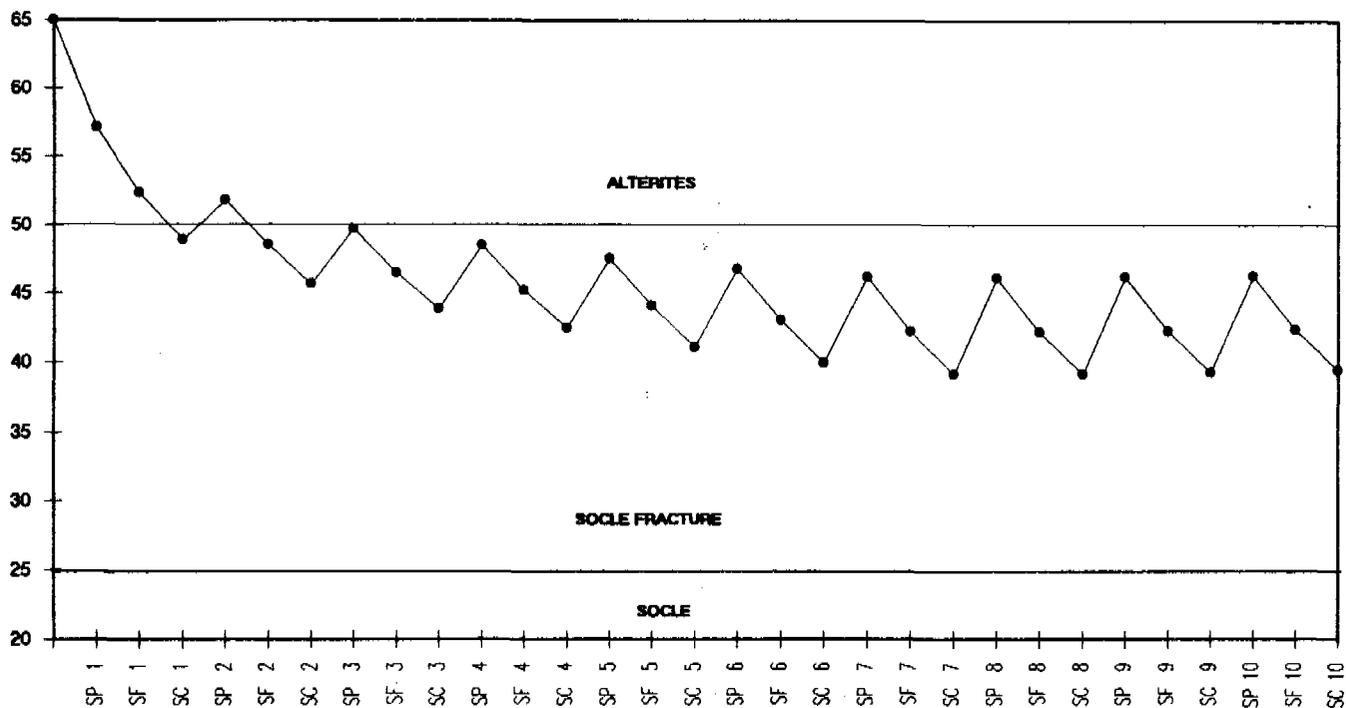
rayon d'influence 10 ans



**Commentaires :** Pas de dénoyage du socle + fracturé, cependant le niveau ne remonte pas vraiment au cours des 3 dernières années plus pluvieuses ( pas de stabilité ).  
 La correction de maille est de 7,4m environ, il ne resterait donc que 5m de socle fracturé au bout de 10 ans.  
 Le rayon d'influence est de l'ordre de 900m au bout de 10 ans dans l'axe de la fracture.  
 Les altérites sont dénoyées sur 300m dans l'axe du couloir de fracture.

Fig.6 - SOCLE+ALTERITES

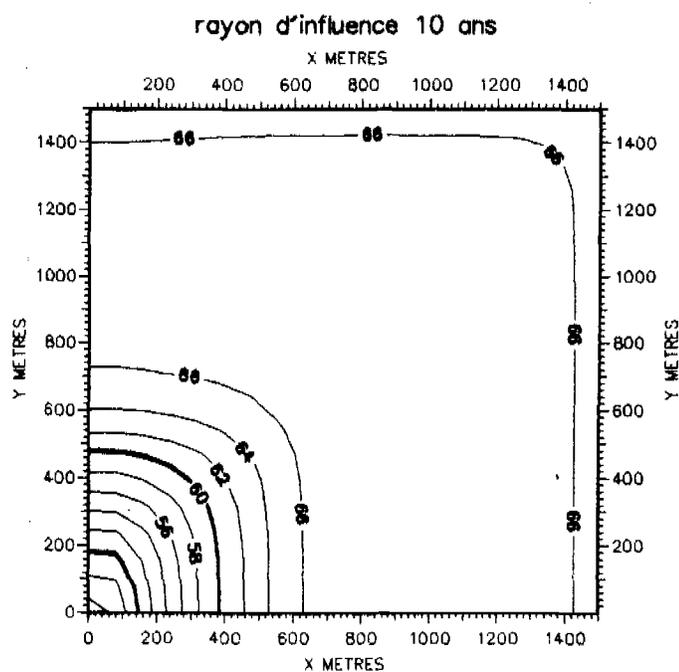
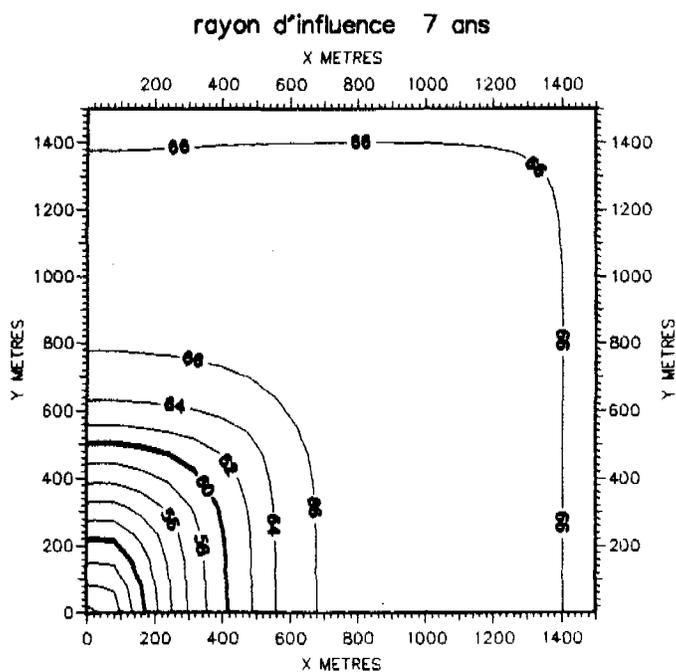
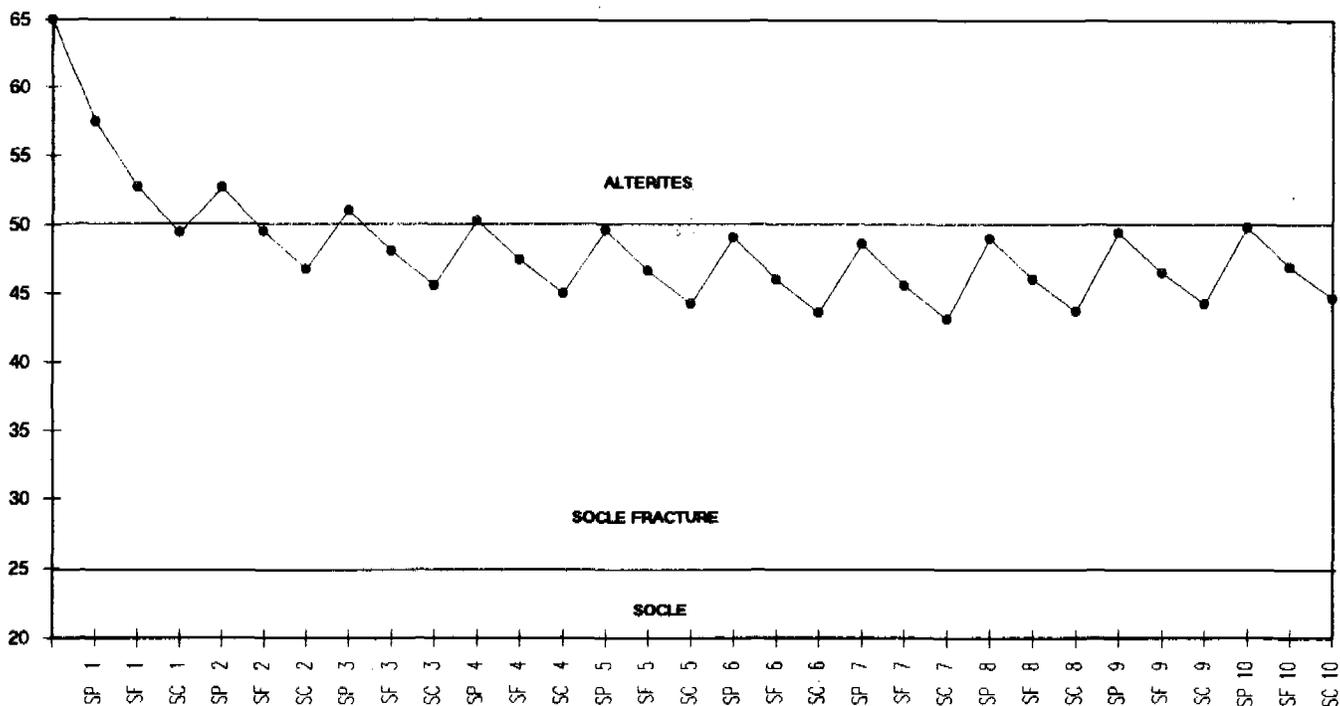
Evolution du niveau dans le forage d'exploitation et piézométries à 7 et 10 ans  
 Pluviométrie = 500 mm      Infiltration = 2,5%P      Débit moyen = 100 m<sup>3</sup>/J



**Commentaires :** Pas de dénoyage du socle + fracturé, légère remontée des niveaux durant les 3 dernières années plus pluvieuses ( 24,5mm/an ).  
 Avec la correction de 7,4m, on constate qu'il reste plus de 6m de socle + fracturé saturé l'année la plus défavorable au bout de 7 ans.  
 Rayon d'influence maximum à 7 ans de l'ordre de 750m sur l'axe du couloir de fracture.  
 Altérites dénoyées sur 290m environ sur ce même axe .

**Fig.7 - SOCLE+ALTERITES**

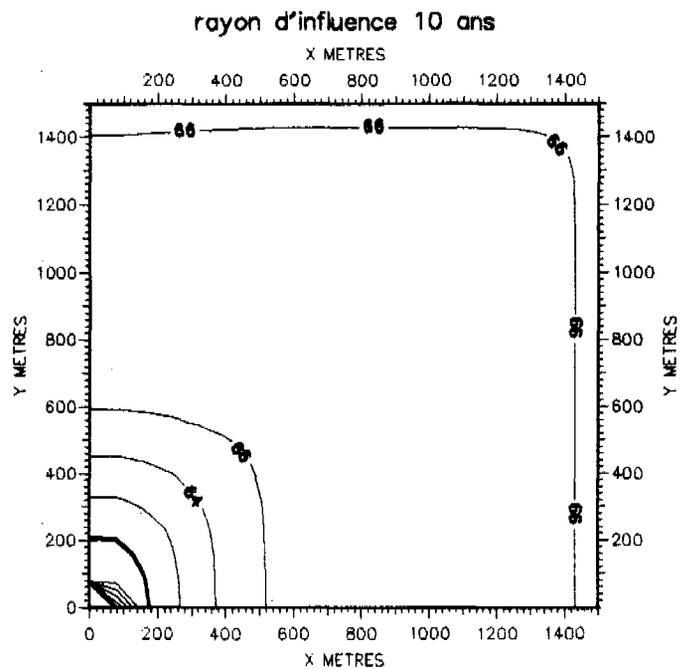
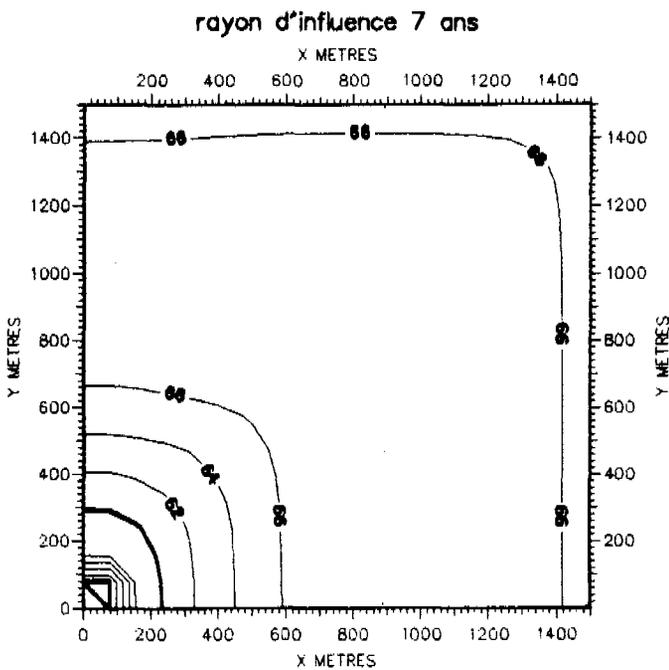
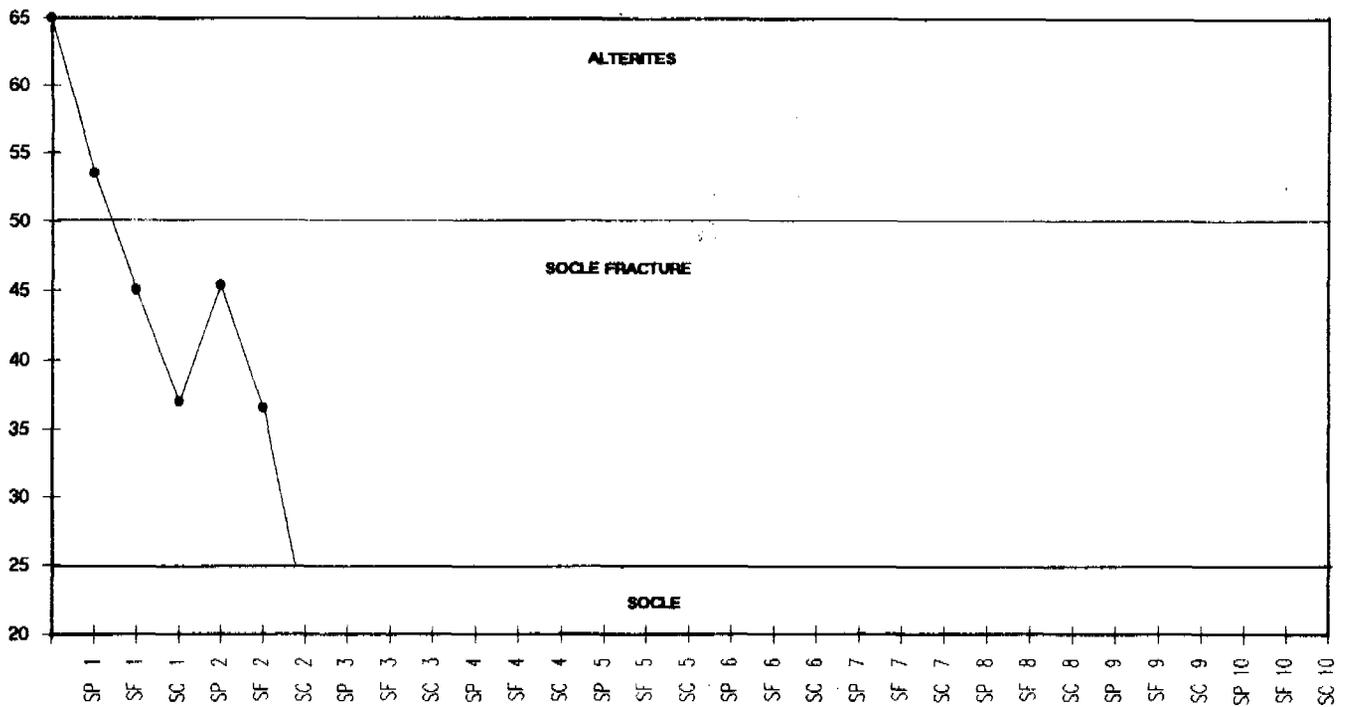
Evolution du niveau dans le forage d'exploitation et piézométries à 7 et 10 ans  
 Pluviométrie = 700 mm      Infiltration = 2,5%P      Débit moyen = 100 m<sup>3</sup>/j



**Commentaires :** Pas de dénoyage du socle + fracturé et très nette remontée des niveaux au cours des 3 dernières années plus pluvieuses ( 49 mm/an ).  
 En tenant compte de la correction de maille (  $\approx 7,4m$  ), il reste plus de 10m de socle + fracturé saturé au bout de 7 ans.  
 Altérites dénoyées sur 200m seulement au bout de 7 ans.  
 Rayon d'influence à 7 ans de 700m environ sur l'axe du couloir fracturé .

**Fig.8 - SOCLE + ALTERITES**

Evolution du niveau dans le forage d'exploitation et piézomètres à 7 et 10 ans  
 Pluviométrie = 700 mm      Infiltration = 5 %      Débit moyen = 100 m<sup>3</sup>/j



**Commentaires :** Dénoyage dès la 2ème année.  
 Rayon d'influence donné à titre indicatif car le modèle ne peut extraire les 150 m<sup>3</sup>/j au bout de 2 ans.  
 La correction de maille étant de 11m environ, on constate que dès la première saison chaude, il ne reste plus que 1m de socle+fracturé saturé.

**Fig.9 - SOCLE+ALTERITES**

Evolution du niveau dans le forage d'exploitation et piézomètres à 7 et 10 ans  
 Pluviométrie = 1000mm      Infiltration = 5 %P      Débit moyen = 150 m<sup>3</sup>/j

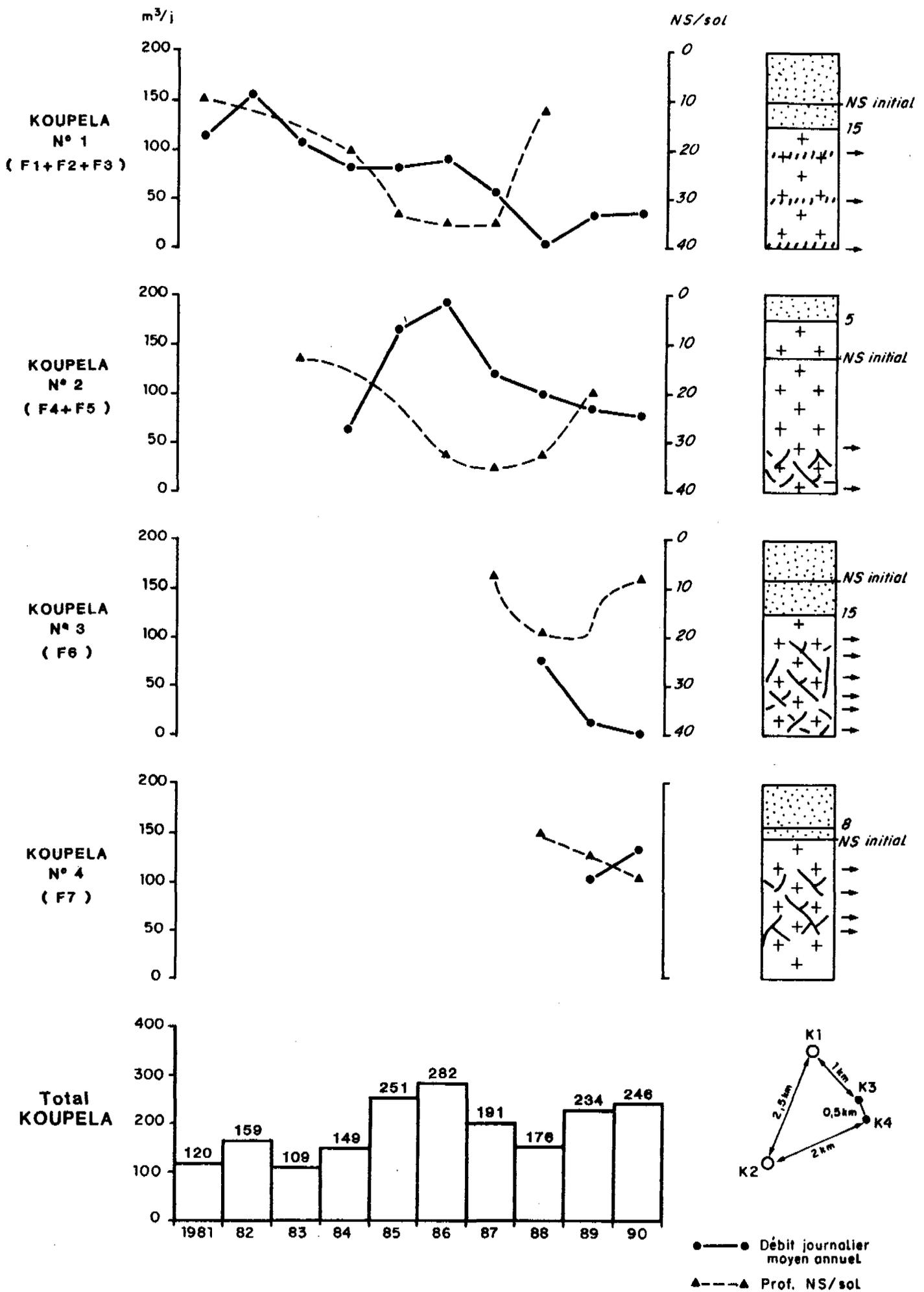


Fig.10- KOUPELA

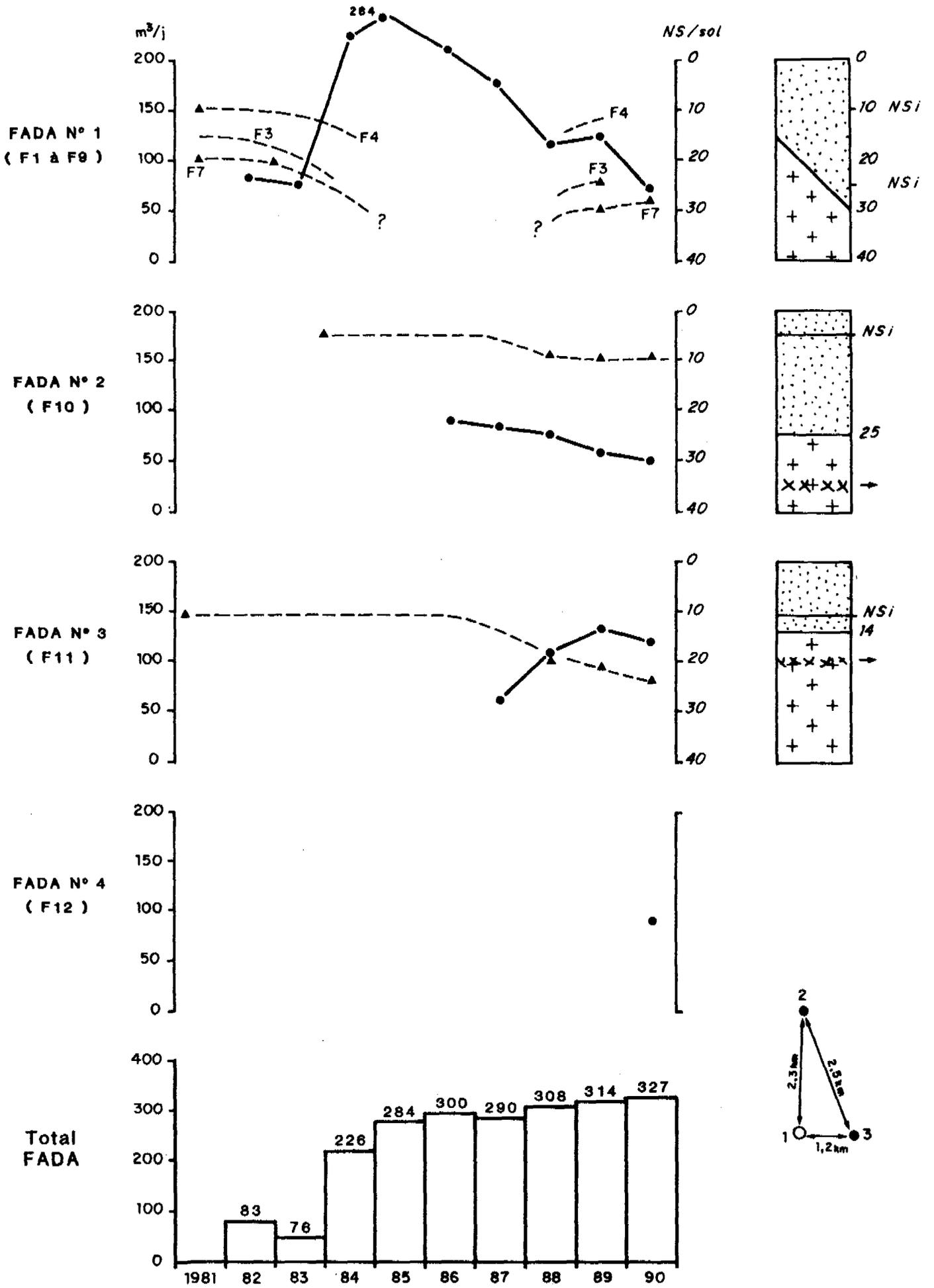


Fig.11- FADA

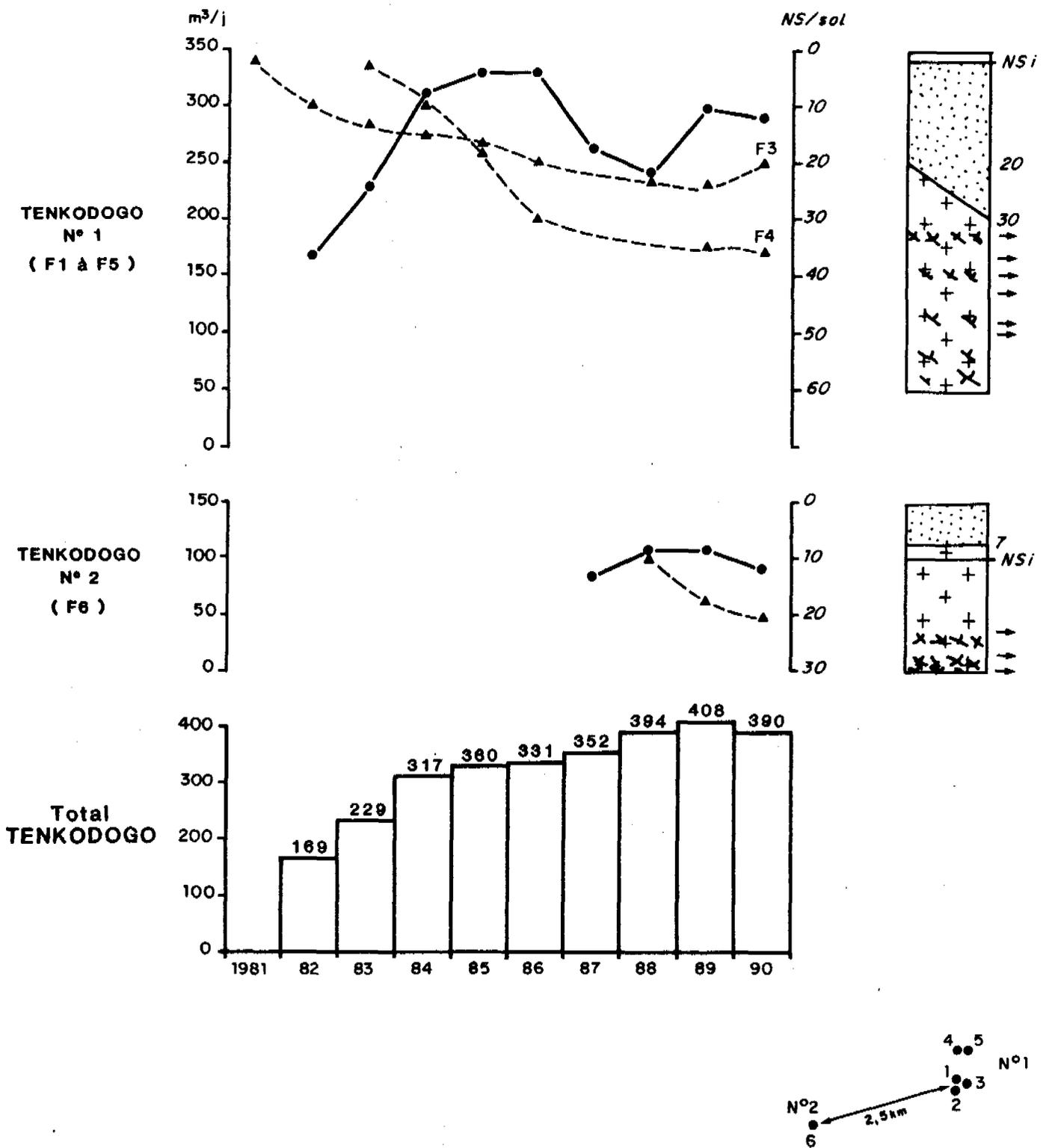


Fig.12 - TENKODOGO

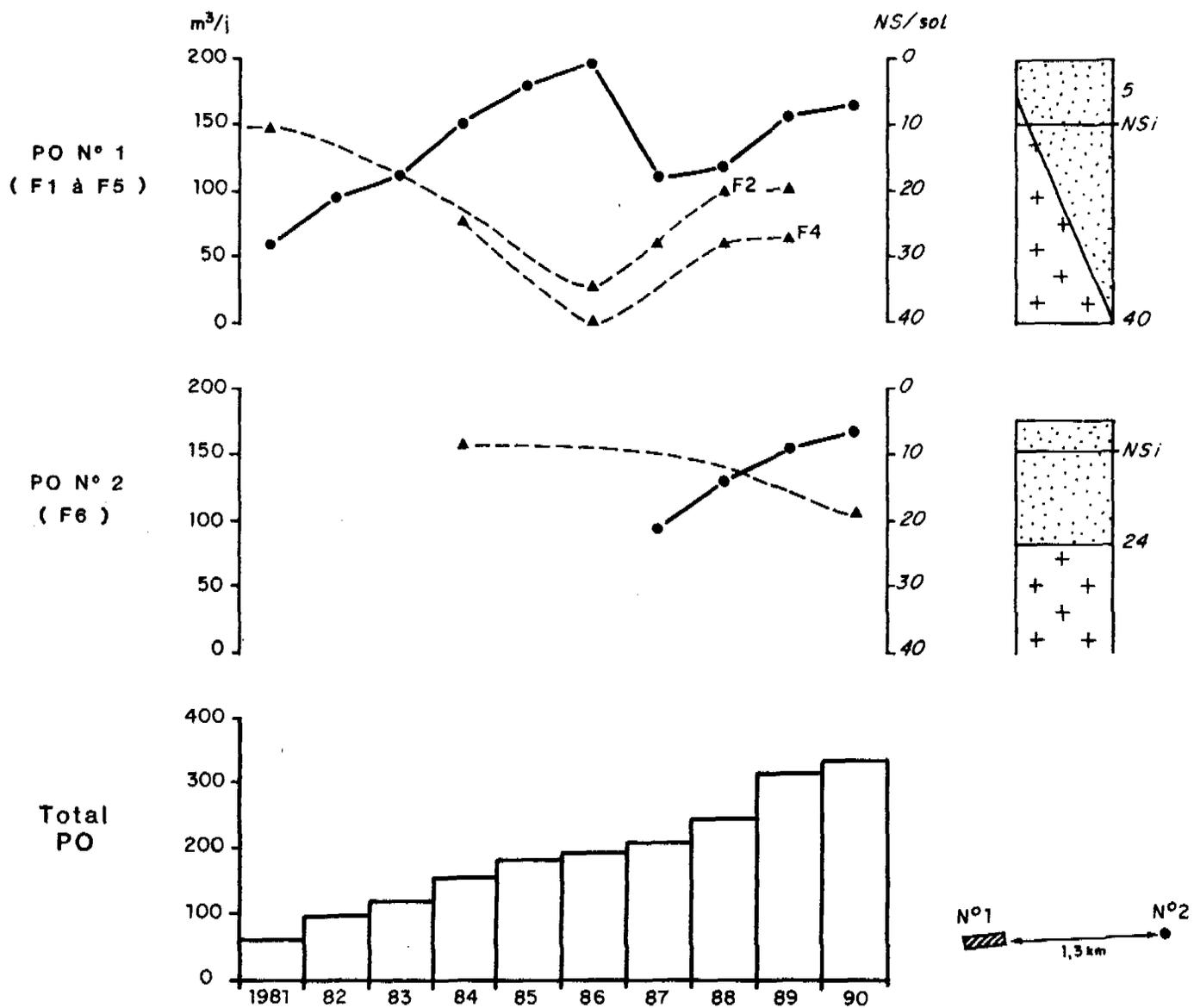
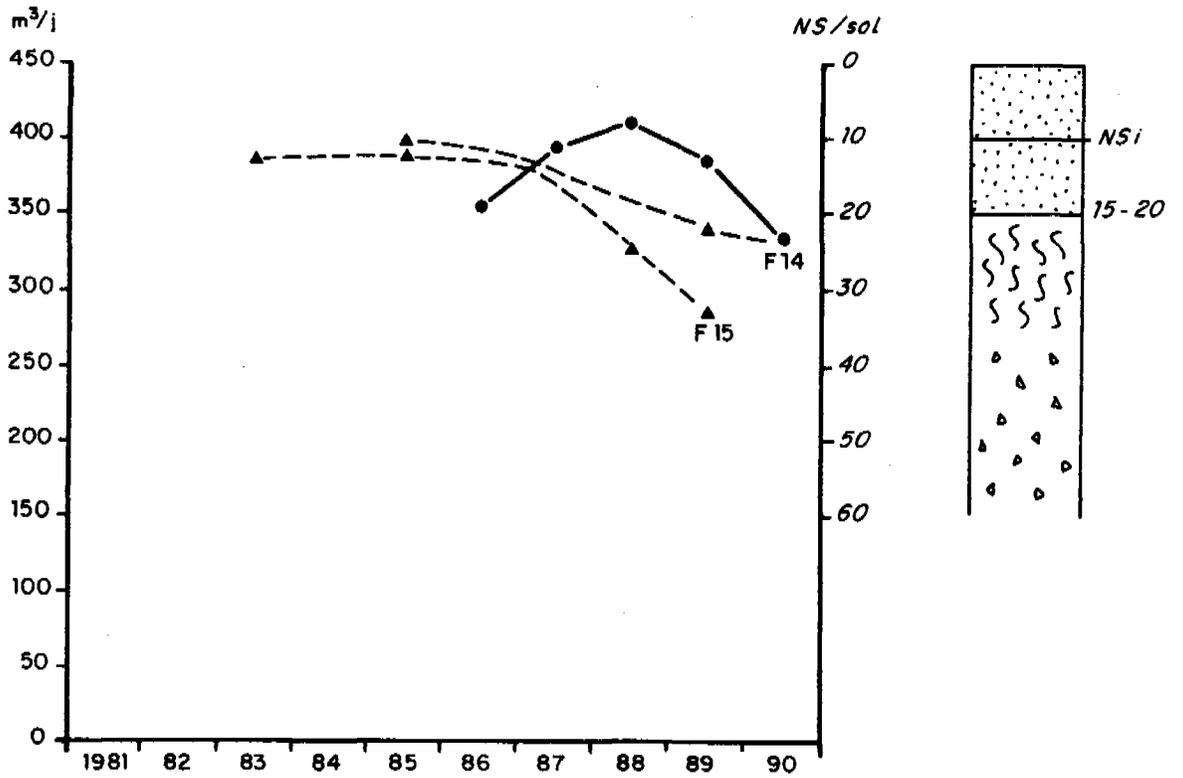


Fig.13- PO

KAYA N° 3  
( F11 à F17 )



*Nota: Les prélèvements sur le champ N°2 ne sont pas représentés car les ouvrages (puits) exploitent les alluvions sous la retenue de DIMASSA*

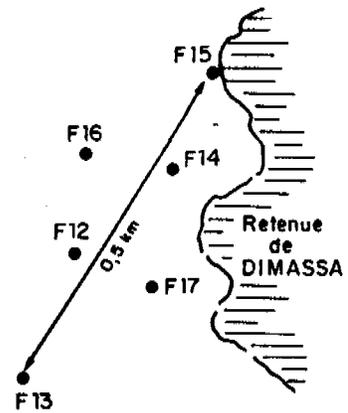


Fig.14 - KAYA

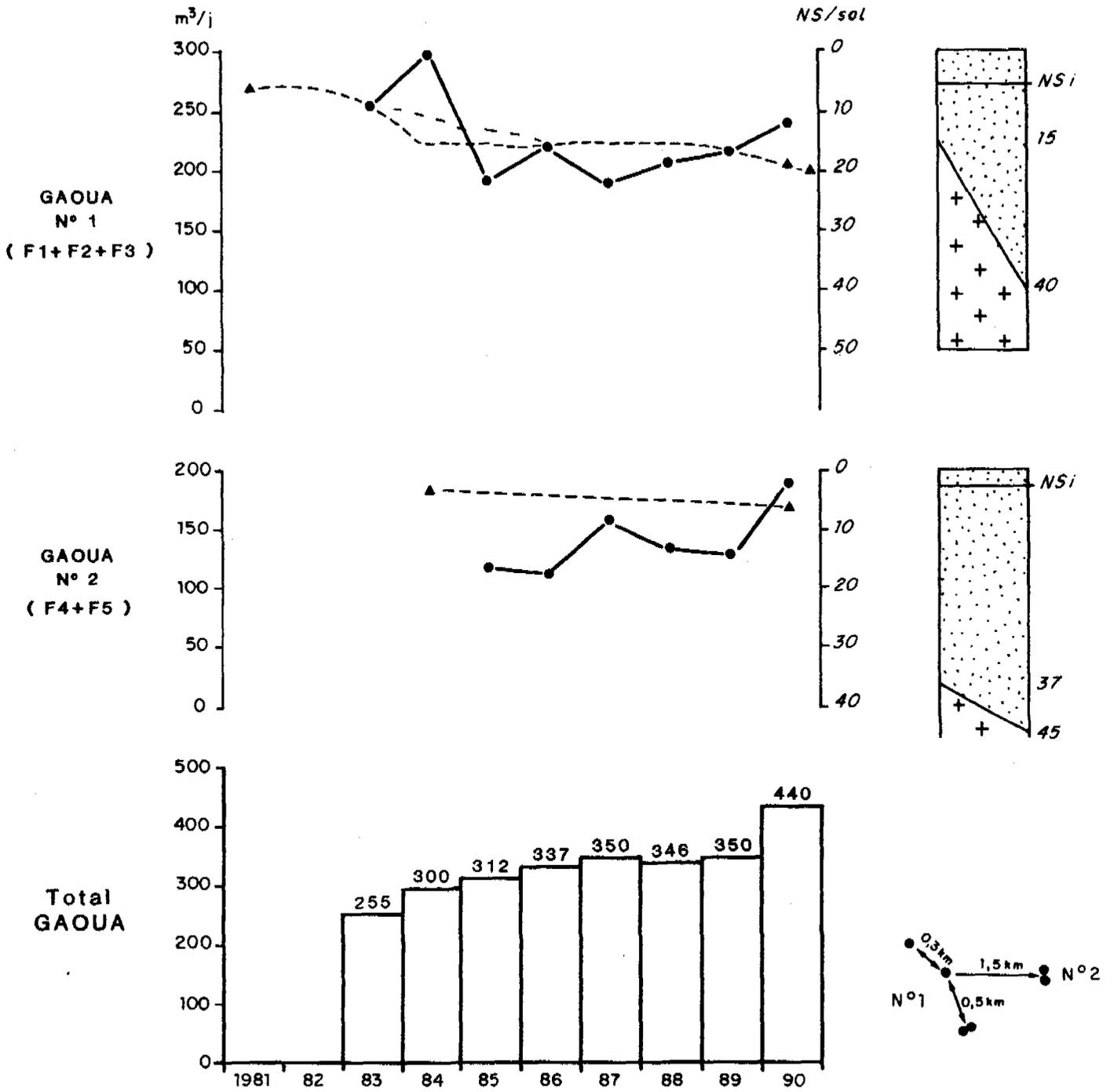
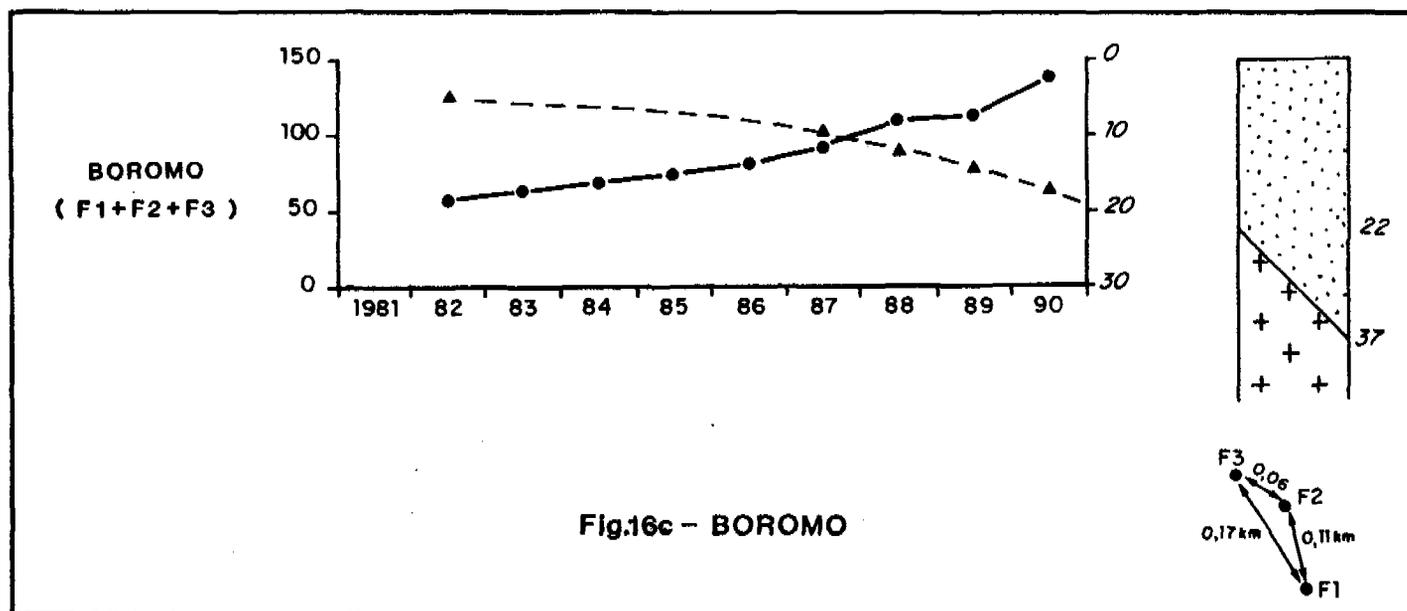
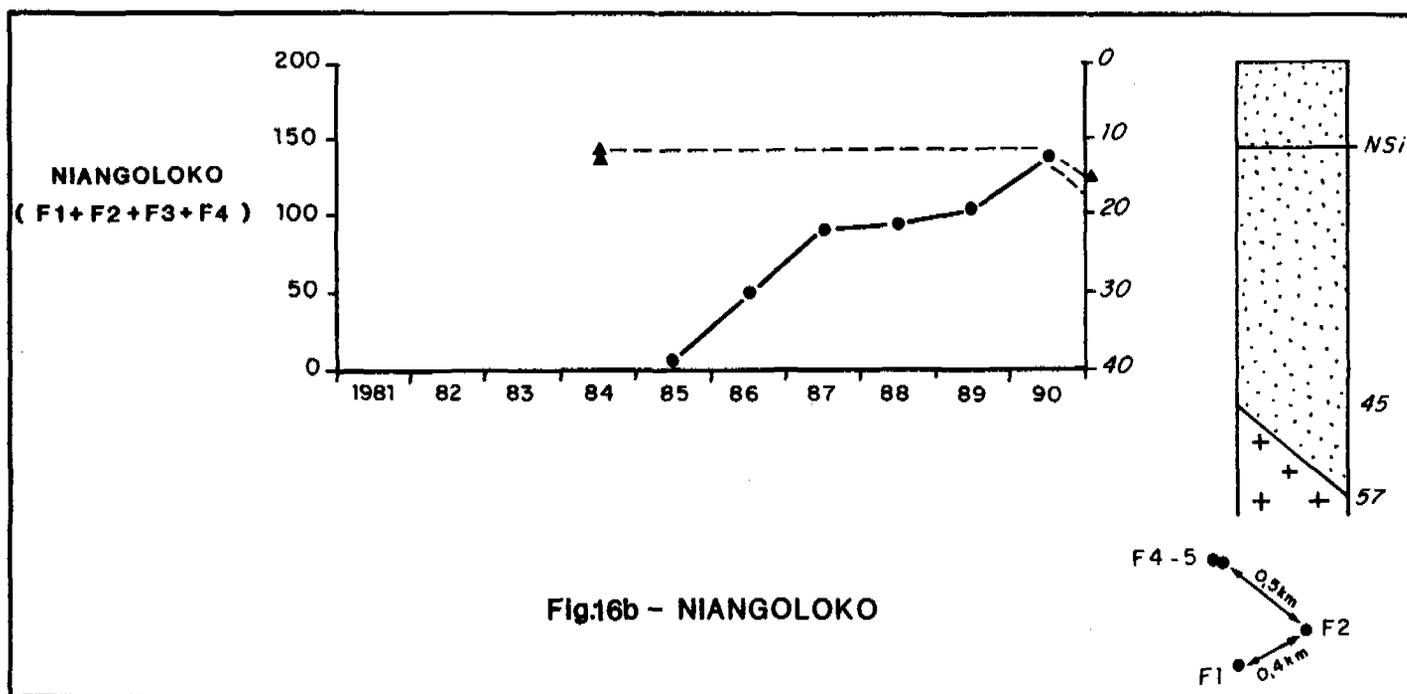
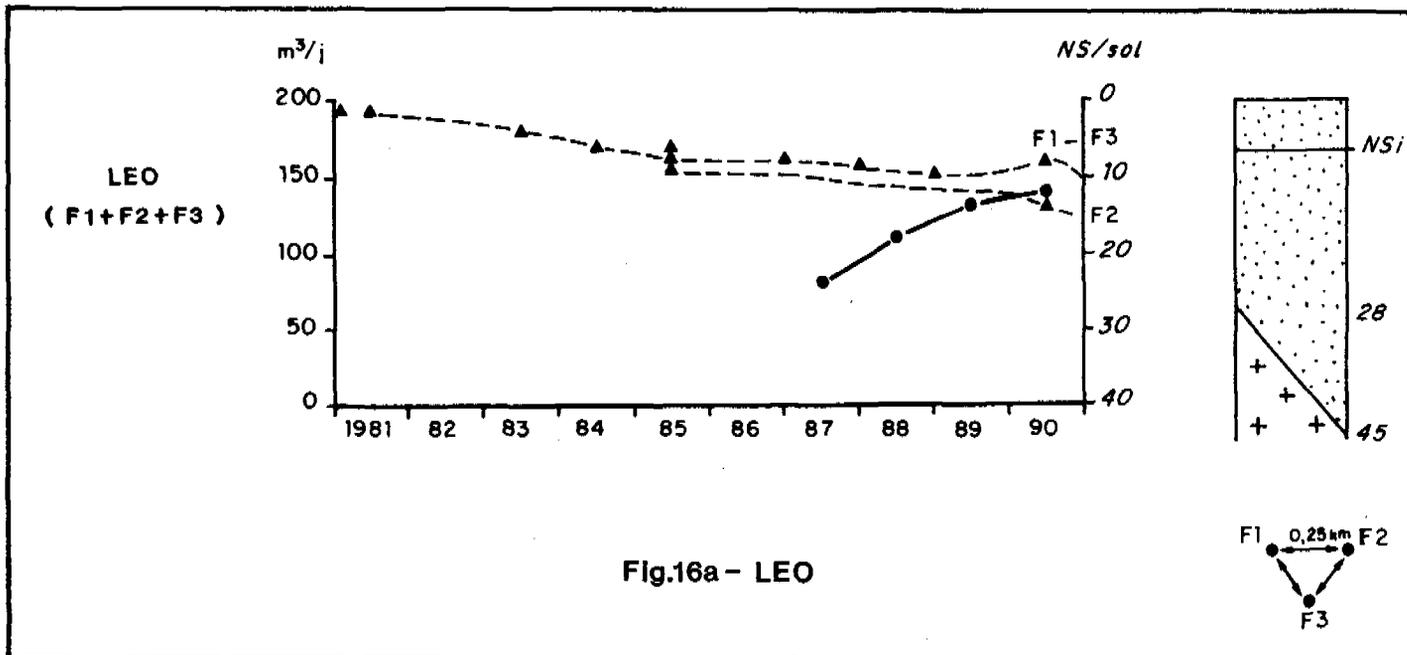
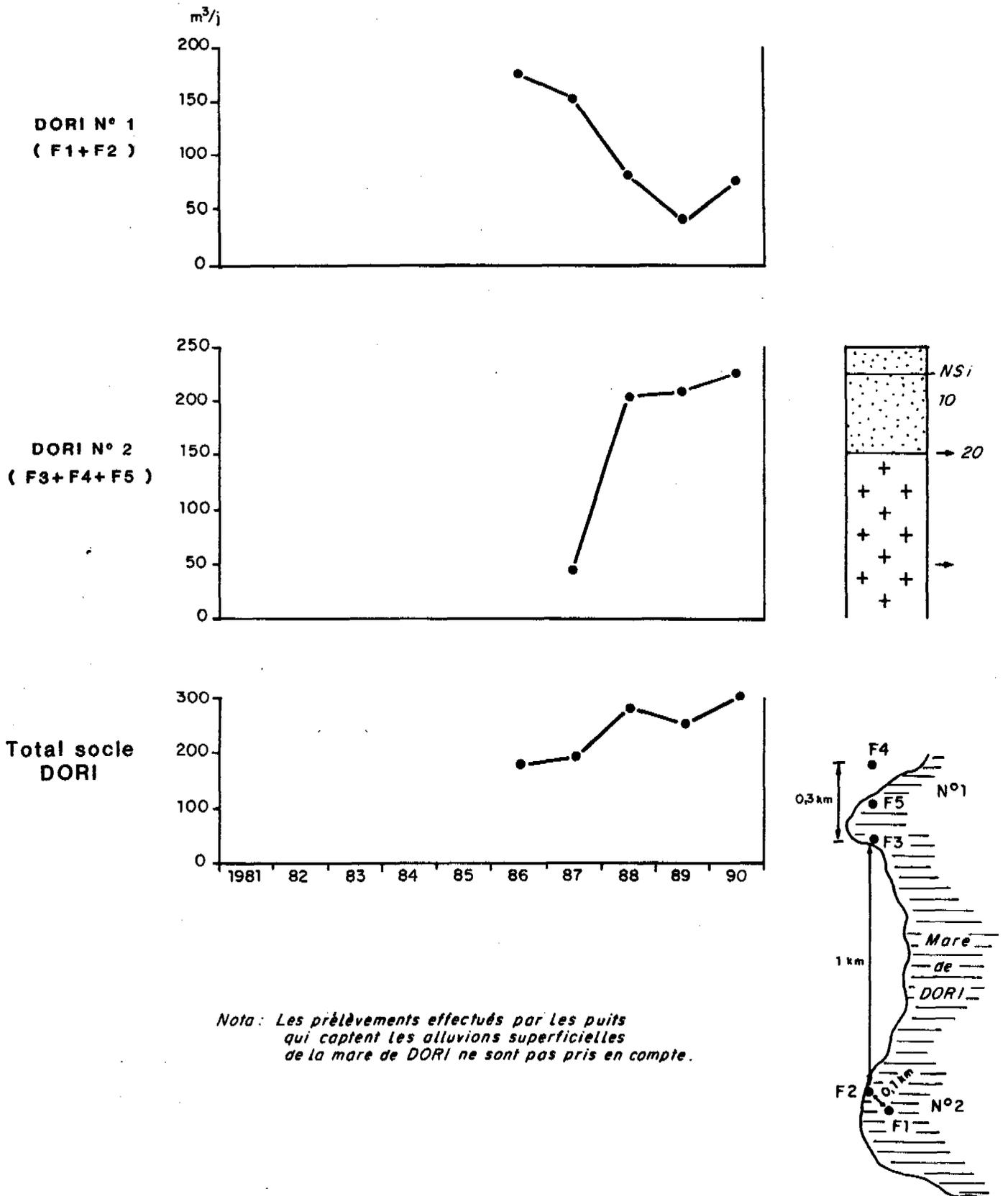


Fig.15 - GAOUA





*Nota: Les prélèvements effectués par les puits qui captent les alluvions superficielles de la mare de DORI ne sont pas pris en compte.*

**Fig.17 - DORI**

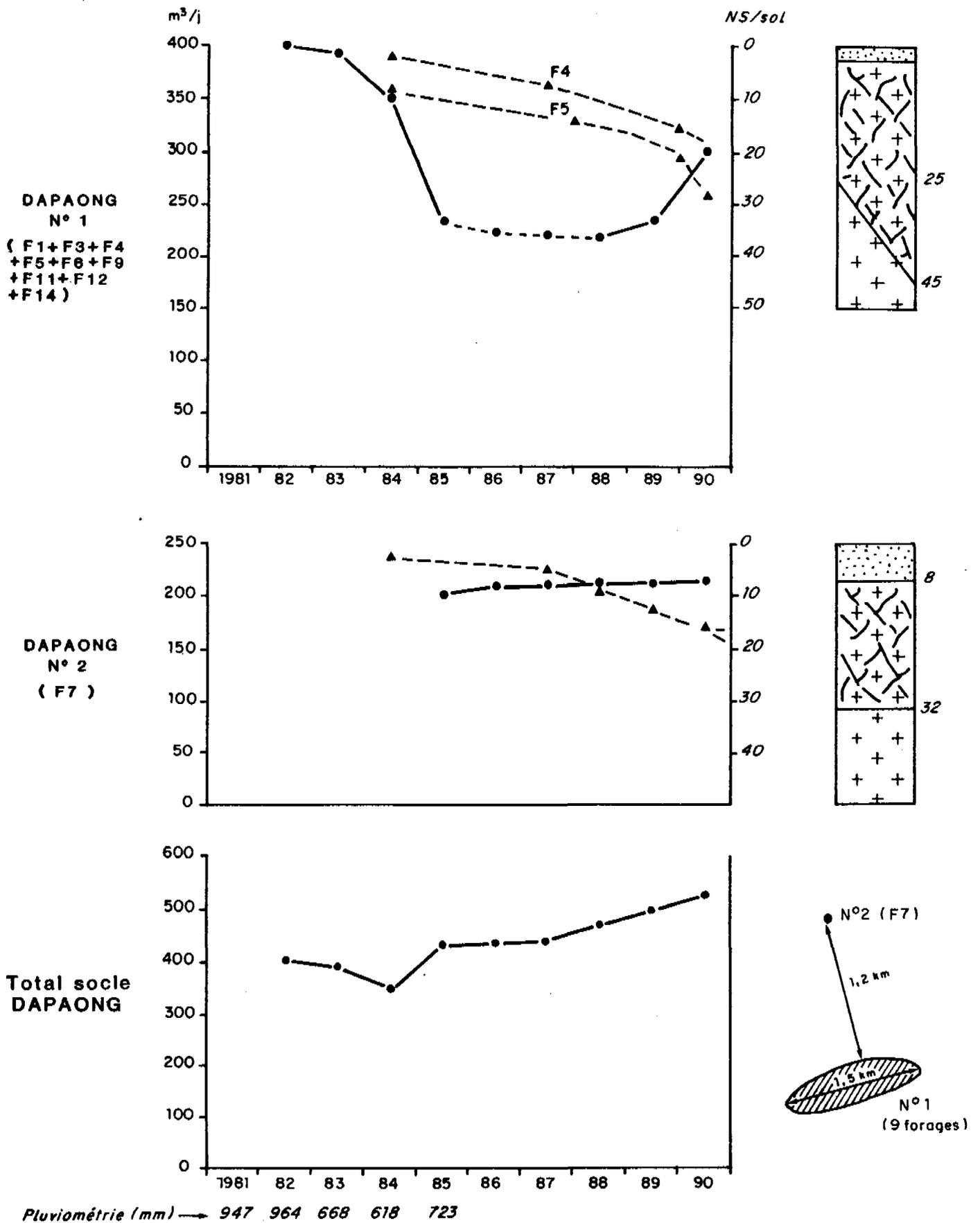


Fig.18- DAPAONG

**ANNEXE 2**

**PRESENTATION DU LOGICIEL GRIVEL**

# GRIVEL

Le logiciel "GRIVEL" développé par le Département Géophysique du BRGM est un programme d'interprétation interactive des sondages électriques en modèle horizontal stratifié (modèle géoélectrique 1D) avec ajustement automatique des paramètres.

Sa caractéristique principale est d'offrir un tel ajustement via les paramètres de Dar-Zarrouk, lesquels présentent l'avantage de tenir compte implicitement des lois d'équivalence. Les développements ultimes sur ces paramètres de Dar-Zarrouk (croix et pôles) ont été menés par P. GRIVEAU (1974) avec l'introduction de la loi de Dar-Zarrouk-2 régissant le comportement asymptotique de la résistivité apparente, alors que les travaux initiés par R. MAILLET (1947) sur la loi de Dar-Zarrouk-1 ne s'appliquent rigoureusement qu'au noyau intermédiaire connu sous le nom de fonction de stratification. L'utilisation des paramètres de Dar-Zarrouk-2 conduit à une quasi-orthogonalisation et une quasi-linéarisation (propriété de positivité) du problème inverse monodimensionnel sur les sondages électriques, d'où, d'un point de vue pratique, un algorithme convergeant très rapidement.

Version BASIC sur micro-ordinateur Hewlett-Packard HP 9816 avec BASIC 2.0/2.1 (série 200)

## Données expérimentales

Les données expérimentales peuvent être introduites au clavier, ou via un digitaliseur HP 9874A, ou encore transférées de la mémoire interne du résistivimètre SYSCAL R2 ; elles sont stockées sur support magnétique à un format standard adapté aux données géophysiques.

## Calcul direct

Le calcul direct de sondage théorique est effectué par la technique du filtrage à décalage ; pour le sondage électrique Schlumberger, quatre filtres sont disponibles, comme indiqué dans le tableau 1 ci-après ; les indications de temps de calcul correspondent à l'exemple du sondage électrique ci-joint couvrant deux décades et demie en longueurs de dispositifs (fig. 1).

N° et nom du filtre	0	1	2	3
	Ghosh	Koefoed	O'Neill	Johansen
Nbre de coefficients	9	18	20	141
Nbre de coeff./décade	3	4	6	10
Nbre de points calculés par décade et temps de calcul	3 : 0.95	4 : 1.55	6 : 2.10	10 : 12.50
correspondant(s) pour le modèle TEST	6 : 1.85 9 : 2.70 12 : 3.60	8* : 3.00 12 : 4.40 16 : 5.80	12 : 4.05 18 : 6.05	20 : 24.30 30 : 36.10

\* Option choisie pour la figure 1

Tableau 1 : Temps de calcul avec les différents filtres pour le modèle TEST de la figure 1 (5 couches sur 2,5 décades)

### **Ajustement manuel**

Les différents paramètres du modèle géoélectrique (nombre de couches, résistivités, profondeurs, épaisseurs, paramètres de Dar-Zarrouk) peuvent être modifiés par l'interpréteur.

### **Ajustement automatique**

Deux possibilités d'ajustement automatique sont offertes :

- en résistivités et épaisseurs par algorithme de Marquardt,
- en paramètres de Dar-Zarrouk par un algorithme spécifique.

Dans les deux cas, l'opérateur donne la liste des paramètres à ajuster, les autres restant inchangés ; le tableau 2 indique pour le modèle TEST de la figure 1 les temps d'ajustement pour une itération ; la méthode d'ajustement par paramètres de Dar-Zarrouk est plus rapide que l'algorithme de Marquardt même pour un nombre élevé de paramètres à ajuster car il requiert moins d'itérations ; le calcul des résistivités apparentes théoriques correspondant aux points expérimentaux est effectué par interpolation spline cubique à partir des valeurs calculées par la méthode de filtre à décalage.

Méthode d'ajustement	n	Dar-Zarrouk	Marquardt
Temps de calcul (s) pour une itération	1	14	26
sur n paramètres du modèle TEST	4	49	43
	7	83	65

Tableau 2 : Temps de calcul des deux techniques d'ajustement pour une itération avec les données de la figure 1 (filtre n° 1 avec 8 points calculés par décade)

### **Impression des résultats**

Les résultats sont présentés sous forme d'un diagramme bilogarithmique avec points expérimentaux et courbe théorique correspondant au modèle : ce dernier peut être représenté sous trois options : coupe schématique, barre interprétative, liste des paramètres ; l'impression des résultats est réalisée sur une table traçante HP 7470.

### **Espace mémoire**

185 Koctets pour un ensemble standard de données.

### **Version BASIC sur ordinateur Hewlett-Packard HP 9845**

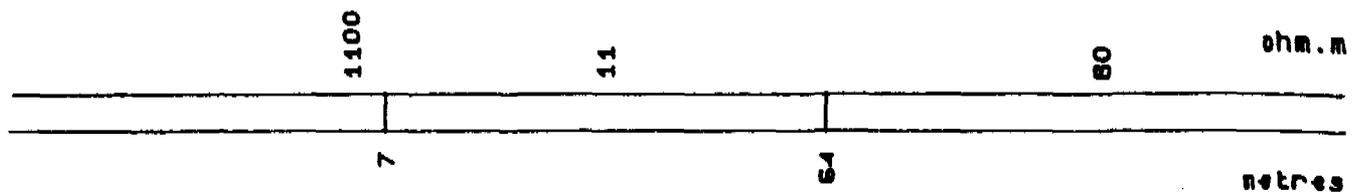
Un logiciel "GRIVEL" similaire à celui décrit pour le HP 9816 est également disponible sur HP 9845. L'impression des résultats est alors réalisée sur l'imprimante thermique interne.

### **Références :**

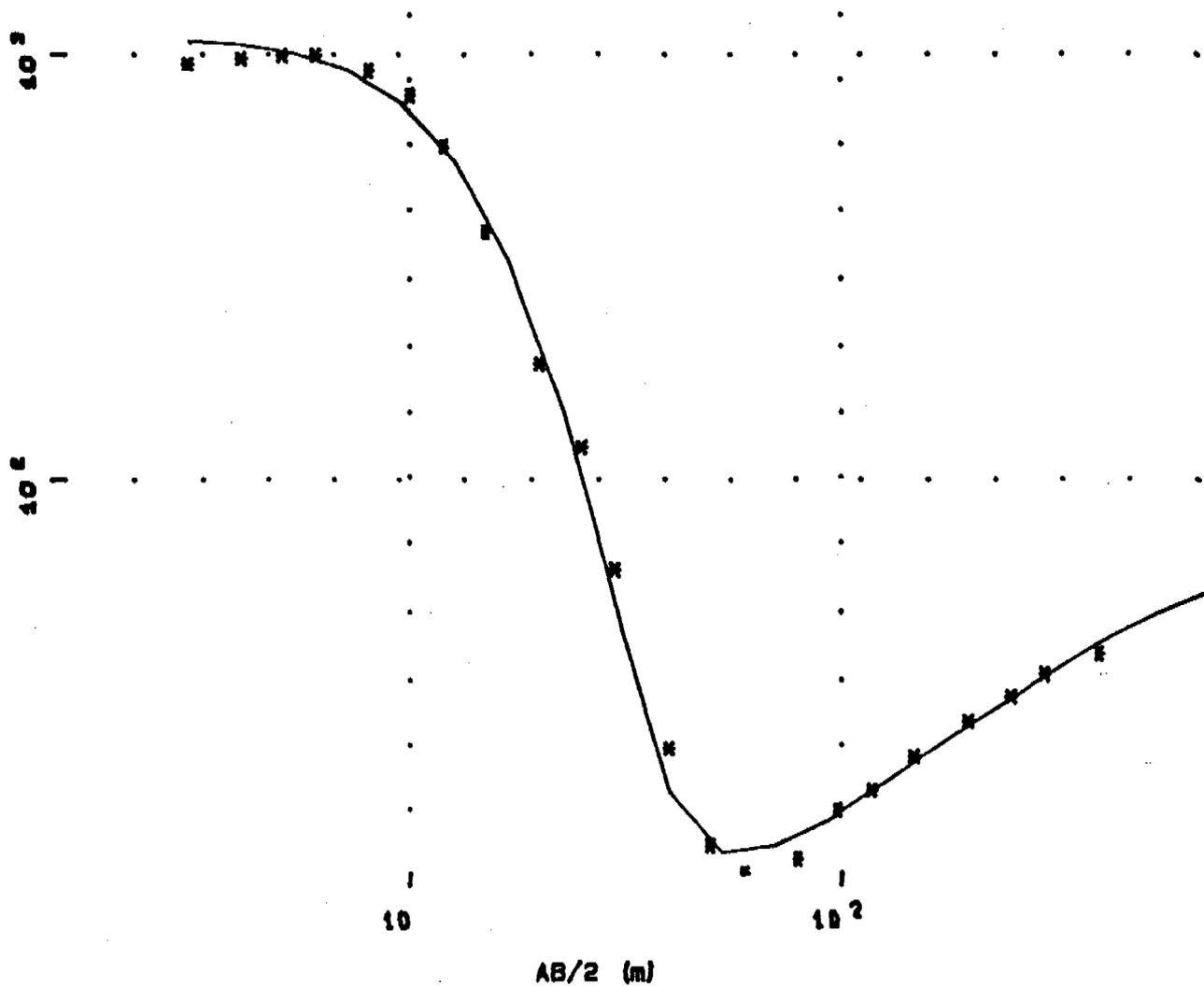
P. GRIVEAU (1974) : Equivalence law and semi-automatic inversion of geoelectrical soundings. E.A.E.G. abstracts in Geophysical Prospecting, vol. 22, p. 585.

R. MAILLET (1947) : The fundamental equations of electrical prospecting, Geophysics, vol. 12, p. 529-556.

ALIMENTATION EN EAU DE ROSSO



SE 13



BROM/SPH A BRIVEL \*

Schlumberger

**ANNEXE 3**

**PRESENTATION DU LOGICIEL ISAPE**

# ISAPE

<b>FONCTION</b>	Interprétation semi-automatique des pompages d'essai et simulation du comportement des puits pour des contextes hydrogéologiques variés.
<b>UTILISATEURS</b>	Logiciel indispensable pour la caractérisation du comportement hydrodynamique des aquifères et pour les études prospectives de gestion de la ressource. Très convivial, il est utilisable par tous ingénieurs après quelques heures de familiarisation.
<b>MATERIEL NECESSAIRE</b>	Micro-ordinateur IBM PC ou compatible possédant un disque dur, écran graphique (mono ou polychrome) + éventuellement imprimante graphique et/ou table traçante.
<b>PRESENTATION</b>	Une disquette et une documentation détaillée. Le logiciel et la documentation existent aussi en langue anglaise.
<b>AVANTAGES</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• la prise en compte des variations de débit, par convolution de ceux-ci, permet l'interprétation de pompages à débit instable ;</li><li>• la prise en compte des effets de puits (pertes de charge, effet de capacité, vidange de la colonne de refoulement) permet l'interprétation au puits de pompage ;</li><li>• interprétation graphique par identification (solutions analytiques de THEIS, HANTUSH, GRINGARTEN, ou modèle maillé axisymétrique) ;</li><li>• convivialité totale (pages-questionnaire, mode d'emploi intégré, vérification automatisée des données saisies).</li></ul>
<b>UTILISATION</b>	<p>L'utilisation s'effectue entièrement en mode conversationnel avec possibilité d'accès, à tout moment, à un système d'aide à l'utilisation très détaillé. Les données d'un pompage d'essai (temps rabattement, débit) sont préalablement stockées dans un fichier créé à l'aide d'un préprocesseur.</p> <p>ISAPE est organisé à l'écran en une succession de "pages" de saisie de données. Pour chacune d'elles, l'utilisateur peut soit valider directement les valeurs par défaut proposées par le logiciel, soit les modifier. Ces pages concernent :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• les paramètres de lecture du fichier de données (format, unités de lecture, unités graphiques) ;</li><li>• le choix d'un modèle d'interprétation et les paramètres correspondants ;</li><li>• les éventuels effets de capacité et de perte de charge au puits de pompage ;</li><li>• les caractéristiques de la fenêtre de tracé à l'écran.</li></ul>
<b>DESCRIPTION DU LOGICIEL</b>	<p>Au lieu de superposer manuellement la courbe expérimentale des rabattements mesurés lors des tests hydrauliques sur une courbe théorique figée, l'opérateur s'efforce de "modéliser" la courbe calculée, en modifiant progressivement les paramètres hydrodynamiques et géométriques caractéristiques de l'aquifère étudié, et en intégrant tous les phénomènes réels ayant pu survenir lors des tests : pertes de charge au puits, effet de capacité, variations du débit, influences de limites à flux nul ou à potentiel constant.</p> <p>ISAPE reconstitue, avec les paramètres hydrogéologiques estimés par l'opérateur et la prise en compte des phénomènes perturbateurs, l'évolution théorique des niveaux. Une correspondance satisfaisante avec les évolutions mesurées permet de justifier l'appréciation correcte.</p> <p><b>Schémas hydrauliques proposés :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• le schéma de THEIS pour un milieu isotrope d'extension infinie ou présentant une limite ou deux limites parallèles, que celles-ci soient à flux nul -limite(s) étanche(s)- ou à potentiel(s) imposé(s) ;</li><li>• le schéma en milieu anisotrope affecté d'une fracture verticale unique avec longueur de fracture variable (méthode de GRINGARTEN), d'extension infinie ou présentant une limite ou deux limites parallèles à flux nul ou à potentiel imposé ;</li><li>• le schéma de pénétration partielle dans un aquifère anisotrope semi-captif (méthode de HANTUSH) ;</li><li>• un modèle maillé axisymétrique, à discrétisation automatique, pouvant comporter cinq couches aquifères anisotropes superposées.</li></ul> <p>L'interprétation est possible aussi bien au puits de pompage que pour un piézomètre, avec prise en compte de la pénétration partielle pour chaque ouvrage.</p> <p>ISAPE est évolutif car de nombreux schémas hydrauliques de comportement de milieux aquifères y sont progressivement intégrés.</p>

**ANNEXE 4**

**PRESENTATION DU LOGICIEL MARTHE**



MARTHE, Version 4.3  
Décembre 1990

Nom étendu :

Modèle A maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements

Descriptif :

MARTHE est un logiciel permettant la modélisation en régime transitoire d'aquifères tridimensionnels et multicouches. Il est adapté aux problèmes classiques d'hydrodynamique souterraine :

- implantation de champs captants,
- interaction entre forages,
- bilans d'aquifères,
- assèchement de fouilles.

Son caractère tridimensionnel et multicouche et ses possibilités de maillage rectangulaire irrégulier le rendent en outre particulièrement adapté aux problèmes miniers et de stockage, ainsi qu'aux dénoyages avec surface libre. MARTHE résout les équations de l'hydrodynamique par la méthode des différences finies dans un domaine formé d'un nombre de couches pouvant atteindre 99. Certaines couches peuvent être séparées par des formations semi-perméables.

Manuel d'utilisation

Rapport présenté sous forme de classeur mis à jour périodiquement

Support informatique

Le programme est écrit en FORTRAN 77. Il est implanté sur micro-ordinateur PC-AT compatible (640 Ko avec co-processeur) et sur gros systèmes VAX.

**BRGM**

établissement public à caractère industriel et commercial

Siège : Tour Mirabeau, 39-43, quai André-Citroën - 75739 Paris cedex 15, France  
Tél.: (33) 1 40.58.89.00 - Téléc. : BRGM 780258 F - Télécopieur : (33) 1 40.58.89.33  
R.C. 58 B 5614 Paris - SIRET : 58205614900419

Centre scientifique et technique :

Avenue de Concy, Orléans-La Source (Loiret) - B.P. 6009 - 45060 Orléans cedex 2, France  
Tél.: (33) 38.64.34.34 - Téléc. : BRGM 780258 F - Télécopieur : (33) 38.64.35.18

## \* CHAMP D'APPLICATION

Dans sa version actuelle, le logiciel MARTHE présente les caractéristiques suivantes :

- écoulements tridimensionnels,
- aquifères multicouches avec épontes optionnelles,
- maillage rectangulaire irrégulier, l'extension de chaque couche pouvant être différente (sur une verticale les mailles existantes ont cependant les mêmes dimensions horizontales) ; possibilité de court-circuit quand une formation disparaît,
- prise en compte de surface libre dans n'importe quelle couche,
- possibilités de simuler finement un dénoyage local de l'aquifère,
- prise en compte de mailles à débordement (cours d'eau, sources, gravières),
- possibilité de simuler des zones équipotentiellles à potentiels inconnus ou variables (lacs, gravières) jusqu'à 99 zones équipotentiellles différentes,
- prise en compte de parois étanches (palplanches, bâtiments, failles, etc...),
- présence optionnelle de coefficients d'anisotropie des perméabilités selon les directions horizontales,
- présence de coefficients d'anisotropie verticale,
- possibilité d'anisotropies horizontale et verticale définies maille par maille,
- simulation en régime permanent ou transitoire,
- utilisation de données sous forme de "semis de points" à la norme du BRGM ; ces "semis" en entrée et en sortie permettent une compatibilité immédiate avec les logiciels BRGM de transformation (OPERASEM), d'interpolation et de visualisation (INGRID, UNIGRID), de calcul de trajectoires (VIKING), de dispersion (SESAME), etc...
- possibilité de faire des modifications ou des affectations de paramètres par zones et de réaliser des bilans de débits par zone.

## \* CARACTERISTIQUES DU MODELE MARTHE

### *. Possibilités de calcul*

- Calcul par différences finies,
- Résolution itérative des calculs avec prise en compte de non linéarités,
- Maillage rectangulaire en écossais,
- Schéma tridimensionnel et multicouche simultané,
- Un seul logiciel pour traiter en régime permanent et transitoire (qui peuvent être enchaînés dans le même passage),
- Un seul logiciel pour prendre en compte nappes captives, nappes libres ou mixtes,
- Très grand nombre de mailles possibles (8000 sur micro-ordinateur),
- Calcul exact des échanges entre deux couches avec épontes en prenant en compte les perméabilités des trois couches du sandwich (et pas seulement la perméabilité de l'éponte),

- Calcul des surfaces libres en 3D ou en coupes,
- Traitement optimal des dénoyages,
- Schéma de calcul exact (en régime transitoire) de l'emmagasinement lors du passage de nappe libre à nappe captive et réciproquement,
- Possibilité d'avoir 99 zones équipotentiellles, à potentiel non imposé (lacs, gravières, cavités),
- Possibilité de prendre en compte l'emmagasinement des épontes,
- Possibilité de dénoyer n'importe quelle couche,
- Possibilité de court-circuiter des couches,
- Prise en compte de liaisons étanches (palplanches...),
- Anisotropie horizontale (nord-sud / est-ouest),
- Anisotropie verticale / horizontale.

#### . *Confort d'utilisation*

- Définition graphique du maillage par préprocesseur sur habillage graphique de la zone à étudier,
- Préprocesseur pleine page pour définir les paramètres,
- Préprocesseur pleine page pour définir les pas de temps,
- Données sur des fichiers séparés : un fichier de données par type de données,
- 99 zones géométriques (pour définir "en ligne" des paramètres géométriques ou hydrodynamiques),
- 99 zones de pluies, 99 zones d'irrigation,
- Utilisation de dates absolues permettant d'enchaîner des simulations,
- Pas de temps de modèles non périodiques, mais définis par l'utilisateur "à la demande",
- Définition des données de mailles par fichiers ASCII de type "semis" auto-documentés et manipulables par une chaîne de traitement,
- Bilans très détaillés des débits d'échange,
- Calcul des rabattements et des débits résiduels,
- Possibilité d'éditer les fichiers de résultats dans les mailles en clair ou en binaire (très rapide et très précis),
- Possibilité de modifier toutes les données avant calcul et à chaque pas de temps.
- Toutes les données peuvent être modifiées :
  - . par lecture d'un nouveau fichier (pour toutes les couches),
  - . par affectation d'une valeur constante pour toutes les mailles,
  - . par affectation d'une valeur par couche,
  - . par affectation d'une valeur par zone géométrique,
  - . par affectation d'une valeur par maille,
- Aucune donnée redondante (le substratum d'une couche sert par exemple de toit à la couche sous-jacente).

## \* PRINCIPE DE RESOLUTION

Le logiciel MARTHE permet de résoudre les équations classiques de l'hydrodynamique des nappes, à savoir :

$$(1) \quad \text{div} [K \text{ Grad } h] = S_{\bullet} \frac{Oh}{Ot} + q_1 \quad \text{pour une nappe captive}$$

$$(2) \quad \text{div} [T (h) \text{ Grad } h] = S \frac{Oh}{Ot} + q_2 \quad \text{pour une nappe libre}$$

avec :

- h = charge hydraulique au point (x, y, z)
- q<sub>1</sub>, q<sub>2</sub> = densité de flux, entrant (infiltration, injection) ou sortant (pompage), de dimension L.T<sup>-1</sup> (nappe libre) ou T<sup>-1</sup> (nappe captive)
- S<sub>•</sub> = coefficient d'emménagement spécifique (de dimension L<sup>-1</sup>)
- S = coefficient d'emménagement "libre" (sans dimension)
- K = tenseur de perméabilité (diagonalisé) (de dimension L.T<sup>-1</sup>)
- T = transmissivité, produit de la perméabilité par l'épaisseur mouillée (de dimension L<sup>2</sup>.T<sup>-1</sup>)

La résolution se fait par *différences finies* avec une *méthode implicite pure*, en établissant l'équation d'équilibre entre la maille de calcul (C) et les six mailles voisines (Nord, Sud, Est, Ouest, Haut et Bas). La solution est obtenue par un calcul itératif.

Les équations (1) et (2) ci-dessus peuvent se mettre sous la forme discrétisée unique suivante :

$$\sum_{i=1}^6 C_i \cdot [H_i - H(t)] + Q + \frac{H \text{ PLUIE.SURF}}{dt} = S.SURF \frac{H(t) - H(t-dt)}{dt}$$

débit d'échange avec les mailles voisines
débit d'échange avec l'environnement
débit de pluie ou d'irrigation
débit de variation de stockage

avec les notations :

- C<sub>i</sub> = coefficient d'échange global ("transmissivité") entre la maille de calcul et une maille voisine i (intégrant éventuellement un coefficient d'anisotropie)
- H(t) = charge de la maille de calcul à la date t
- H<sub>i</sub> = charge d'une maille voisine à la date t
- Q = débit prélevé ou injecté
- H PLUIE = hauteur de pluie efficace pendant la durée dt
- SURF = surface horizontale de la maille = DX.DY

S = coefficient d'emmagasinement libre si la maille n'est pas pleine ou bien :  
 S captif =  $S_{\bullet} \cdot dz$ , si la maille est pleine d'eau  
 avec :  $S_{\bullet}$  = coefficient d'emmagasinement captif spécifique  
 et :  $dz$  = épaisseur de la maille

La charge au centre de la maille de calcul est donc obtenue par itérations suivant la relation :

$$H(t) = \frac{\sum_{i=1}^6 C_i \cdot H_i + Q + \frac{H \text{ PLUIE.SURF}}{dt} + \frac{S.SURF H(t-dt)}{dt}}{\sum_{i=1}^6 C_i + \frac{S.SURF}{dt}}$$

La résolution se fait de manière itérative avec utilisation possible d'un coefficient de sur-relaxation ou de sous-relaxation.

#### \* VALIDATION DU PROGRAMME

La validation a été faite par comparaison à des solutions connues (solutions analytiques, solutions présentées dans des publications, ...). Par exemple :

- modèle monocouche *anisotrope* en régime *transitoire* : simulation du cas traité par PAPADOPOULOS, 1965 : "Nonsteady flow to a well in an infinite aquifer. Hydrologie des roches fissurées - Colloque de Dubrovnik - Octobre 1965" ;
- modèle *tridimensionnel* homogène avec *surface libre* en régime permanent : simulation d'un massif filtrant et comparaison avec une formule analytique basée sur l'hypothèse de DUPUIT ;
- modèle représentant une *coupe verticale* avec *fortes hétérogénéités* des couches ; prise en compte de tunnels dans l'une des couches ; comparaison avec les résultats fournis par un modèle aux éléments finis.

## \* QUELQUES EXEMPLES DE REFERENCE

Depuis 1980, le logiciel MARTHE a permis la modélisation de très nombreux contextes hydrogéologiques, tant en France qu'à l'étranger (Haïti, Egypte, Botswana, Malte, Koweït, Oman, Espagne, Maroc...) dans le cadre de différents champs d'application :

- exhaure minier (Mine de Dikuluschi, Zaire),
- aménagements urbains (Grand Louvre, voie Mazas - Paris),
- sites industriels (COGEMA Marcoule et La Hague),
- stockages de déchets radioactifs (ANDRA, 4 sites profonds et 2 sites de surface)
- recherche scientifique (Géologie profonde de la France, Cézallier),
- gestion et planification (Plaines du Roussillon),
- ...

**ANNEXE 5**

**PROSPECTION RADON**

# PROSPECTION DES FRACTURES AQUIFERES DU SOCLE CRISTALLIN PAR DOSAGE DU GAZ RADON CONTENU DANS LE SOL

## 1. PRINCIPE DE LA METHODE

### 1.1 RAPPELS

Les roches cristallines du socle contiennent en très faible quantité (en moyenne 3,5 ppm) mais uniformément réparties, des minéralisations uranifères. Le radon est l'un des descendants de l'uranium ; la filiation simplifiée s'écrit :



Parmi les propriétés du radon on retiendra que :

- le radon est un gaz inerte radioactif, émetteur très énergétique, de période courte (3,8 jours) : il est possible de le doser par des méthodes physiques extrêmement sensibles et précises,
- le radon est le seul gaz radioactif présent dans la nature en quantités mesurables : lorsqu'on mesure la radioactivité d'un mélange gazeux, on est certain de doser uniquement le radon,
- le radon est soluble dans l'eau ; sa solubilité augmente lorsque la température décroît,
- le radon est 7,5 fois plus lourd que l'air.

### 1.2 LE RADON MARQUEUR DES FRACTURES AQUIFERES

#### Pouvoir d'émanation

Les atomes de radon prennent la place, dans le réseau cristallin, des atomes de radium dont ils sont issus. Au moment de sa formation, l'atome de radon conserve une partie de l'énergie produite par la désintégration (énergie de recul). Cette énergie résiduelle provoque un déplacement de l'atome de radon qui varie de 20 à 70 nanomètres. Ce déplacement est suffisant pour permettre aux atomes situés à la surface du cristal de se libérer dans l'espace intergranulaire.

On appelle pouvoir d'émanation, le rapport entre la quantité de radon libérée de la roche hôte et la quantité de radon qui y reste piégée.

#### Facteurs influençant le pouvoir d'émanation

Le pouvoir d'émanation est d'autant plus grand que la surface de contact entre les cristaux de la roche et l'extérieur est grande. Autrement dit plus une roche est divisée plus le radon aura de possibilité de s'en échapper. A titre d'exemple, le pouvoir d'émanation à partir d'un cristal de NaCl est de 1,7 % alors qu'il peut atteindre 99 % pour une roche uranifère finement broyée.

Le pouvoir d'émanation augmente avec la teneur en eau de la roche mère : lorsque l'hydratation d'une zéolithe (silicate dont la teneur en eau varie sans variation de la structure cristalline) passe de 0 à 7 moles d'eau, le pouvoir d'émanation du radon varie de 1 à 63 %.

### **Migration du radon dans la roche**

Le radon libéré des cristaux par son pouvoir d'émanation va migrer dans la roche en empruntant les espaces intergranulaires et les discontinuités (fractures).

Cette migration sera d'autant plus facile que les discontinuités sont plus nombreuses. De plus si la roche est aquifère, le processus de migration sera renforcé par l'entraînement mécanique de l'eau en mouvement. Cet entraînement étant d'autant plus efficace que le milieu est plus perméable.

En conséquence, au niveau d'une fracture aquifère le dégagement de radon doit être plus important qu'au niveau de la roche saine car :

- la division de la roche fracturée et la présence d'eau augmentent considérablement le pouvoir d'émanation du radon,
- les discontinuités et le mouvement de l'eau favorisent la migration du radon à travers le massif rocheux.

On doit donc, par des prélèvements de gaz dans le sol pouvoir mettre en évidence des anomalies positives de concentration en radon qui devraient se situer à la verticale des accidents du socle ; l'extension et l'amplitude de ces anomalies devraient être liées à l'intensité de la fracturation.

## **2. PREMIERS RESULTATS DE LA PROSPECTION REALISEE AU BURKINA**

Le groupement BRGM-AQUATER a entrepris depuis 1987, sur financement européen, français et italien, l'étude des ressources en eau souterraine des aquifères du socle cristallin au Burkina Faso. Ce projet consiste à étudier et mettre en exploitation 3 champs de captage expérimentaux placés dans des contextes hydrogéologiques et climatiques représentatifs de l'Afrique sahélienne.

Pour implanter les forages de reconnaissance et de production, on a superposé aux techniques d'implantation utilisées classiquement en hydraulique villageoise (photo-interprétation, géophysique) une étude détaillée par prélèvements de gaz radon dans le sol (2000 échantillons analysés).

### **2.1 CONSTAT SUR L'EFFICACITE DE LA METHODE**

Les résultats des 43 forages réalisés sur les 3 sites sont détaillés dans les tableaux ci-après, en distinguant pour chaque forage la ou les méthodes d'implantation utilisées. Les premières conclusions sur l'efficacité de la prospection radon peuvent être résumées ainsi :

### **Site de Sanon**

Ce premier champ expérimental, situé à 15 km au nord-ouest de Ouagadougou, est constitué par un substratum granitique ancien recouvert d'une épaisse formation altérée saturée (30-40 m).

La prospection radon réalisée sur ce site (900 prélèvements de gaz dans le sol) a mis en évidence une dizaine d'anomalies d'amplitude 3 à 4 fois supérieure à la concentration moyenne régionale (fig. 1).

On constate que sur les 4 forages capables de fournir un débit supérieur à 5 m<sup>3</sup>/h dans des conditions d'exploitation économiquement acceptables (débit spécifique supérieur ou égal à 0,25 m<sup>3</sup>/h/m) 3 sont placés sur une anomalie radon bien contrastée et étendue (+ + +).

A l'exception du forage S3, tous les forages positionnés sur un pic radon (+ +) ont rencontré des zones fortement fissurées ; les débits spécifiques varient entre 0,11 et 0,23 m<sup>3</sup>/h/m selon la puissance et le degré de colmatage de la zone fissurée reconnue.

### **Site de Katchari**

Le site de Katchari est situé en zone sahélienne à 10 km à l'ouest de Dori ; le substratum est ici amphibolitique avec un recouvrement altéré-sec peu épais (15-20 m).

On observe que les concentrations radon moyennes sont beaucoup plus faibles qu'à Sanon (100-150 pci/l) ; cela est dû à la nature lithologique du substratum, les roches vertes étant moins riches en minéraux uranifères que les granites. On note également une excellente concordance entre les résultats des prospections électrique et radon ; les anomalies radon sont alignées sur les axes conducteurs qui en géophysique électrique matérialisent les zones fracturées présumées favorables.

L'exemple représenté sur la figure 2 montre clairement l'aptitude de la méthode radon à délimiter, à l'intérieur d'une zone favorable reconnue par géophysique, les secteurs les plus productifs. Le débit spécifique des 3 forages implantés sur le même axe conducteur est d'autant plus élevé que la concentration en radon au droit des forages est plus forte :

K2 = 200 pci/l, Qs = 1,64 m<sup>3</sup>/h/m

K1 = 160 pci/l, Qs = 0,36 m<sup>3</sup>/h/m

K3 = 90 pci/l, Qs = 0,16 m<sup>3</sup>/h/m

### **Site de Barogo**

Comme à Katchari le niveau moyen d'émanation radon est faible (100 à 300 pci/l). On remarque une bonne correspondance entre les profils électriques et les profils radon ; en particulier, les contacts schistes/roches vertes, bien marqués sur les profils électriques du fait des contrastes de résistivité, apparaissent clairement sur les profils radon, les formations schisteuses étant moins uranifères que les roches vertes.

Les 500 prélèvements effectués sur le site n'ont permis de mettre en évidence qu'une seule anomalie bien contrastée (850 pci/l). Le forage B6 positionné au centre de l'anomalie (fig. 3) a fourni 25 m<sup>3</sup>/h alors que les forages voisins placés sur anomalie géophysique (B7) ou indice morphologique (B13) n'ont donné respectivement que 4 et 2 m<sup>3</sup>/h.

## **Conclusion**

En zone de socle granitique à recouvrement altéré épais (Sanon), les 3 forages implantés sur des anomalies bien contrastées et étendues ont fourni des débits élevés : 7 à 15 m<sup>3</sup>/h pour 20 m de rabattement. Lorsque les forages sont positionnés sur des anomalies ponctuelles, les résultats sont plus modestes (2 à 5 m<sup>3</sup>/h). Il faut souligner que dans un tel contexte géologique, la géophysique électrique et la photo-interprétation sont pratiquement inopérantes.

Dans les régions à substratum volcano-sédimentaire (Katchari, Barogo) à recouvrement peu important, la prospection électrique permet de présélectionner les zones favorables. A l'intérieur de ces zones, la méthode radon délimite les secteurs les plus productifs. Les performances des forages implantés dans ces conditions sont alors exceptionnelles : 30 m<sup>3</sup>/h pour 20 m de rabattement.

## **2.2. DEVELOPPEMENT DE LA METHODE**

Si l'efficacité de la prospection radon pour la recherche des débits élevés dans les aquifères de socle semble démontrée, les mécanismes qui permettent la concentration du gaz dans le sol restent à élucider.

Compte tenu de la brève durée de vie du radon, de sa forte solubilité et de sa densité très supérieure à la densité de l'air, les sources émettrices doivent obligatoirement être situées à proximité du sol. Si le schéma de principe exposé au paragraphe 2 est admissible pour un socle subaffleurant, il ne peut être conservé lorsque les formations cristallines sont séparées de la surface du sol par plusieurs dizaines de mètres d'altérations à prédominance argileuses saturées ou sèches. Dans ce cas, l'hypothèse la plus probable consiste à admettre que les fractures du socle sont des lieux de concentration privilégiés des minéralisations uranifères (minéralisations secondaires) ; ces anomalies géochimiques, conservées dans les produits d'altération jusqu'au niveau du sol (filon fantôme) sont à l'origine des concentrations anormales en gaz radon (fig. 4).

Des phénomènes secondaires peuvent perturber la distribution initiale des sources émettrices et donner naissance à des anomalies radon non reliées à la fracturation. On sait que les sels d'uranium sont solubles en milieu oxydant et peuvent être transportés par les eaux de surface ou les eaux souterraines puis précipiter et se concentrer dans des milieux réducteurs confinés comme les amas de matière organique. Les anomalies radon peu contrastées et localisées au droit des lits de rivière ont probablement cette origine.

Pour accroître l'efficacité de la prospection radon, il est nécessaire de mieux comprendre la genèse des anomalies observées. C'est l'objectif assigné aux études que le BRGM va entreprendre sur fonds propres au Burkina Faso. Ces expérimentations consisteront à multiplier les prospections sur des sites bien connus du point de vue hydrogéologique et structural, à établir des corrélations entre les concentrations en gaz et la géochimie des altérations et à préciser l'influence des facteurs extérieurs (température, humidité du sol, pression atmosphérique) sur les niveaux d'émanation. Les données recueillies au terme de ce programme de recherche devraient permettre d'une part de définir les critères d'identification des anomalies reliées aux zones intensément fracturées et d'autre part de fixer les règles d'implantation des forages par rapport à l'anomalie observée.

SITE DE KATCHARI

N° forage	Méthode			Profondeur (m)	Débit fin foration (m3/h)	Débit pompage (m3/h)	Rabattement (m)	Débit spécifique (m3/h/m)
	R	G	PHM					
K 2	+++	+++	+++	72,0	11,0	12,0	7,3	1,64
K 6	-	++	+++	67,5	11,0	12,0	14,1	0,85
K 4	-	++	+++	63,0	3,5	4,5	11,3	0,40
K 12	-	++	+++	58,5	3,6	4,9	10,2	0,39
K 1	+	+++	++	63,0	5,4	6,0	16,6	0,36
K 3	0	++	+++	52,0	2,0	2,8	17,1	0,16
K 5	0	++	++	63,0	0,5	-	-	-
K 8	0	++	0	58,5	0,2	-	-	-
K 9	+	++	0	58,5	0,2	-	-	-
K 7	0	+	++	54,0	-	-	-	-
K 11	0	++	0	63,0	-	-	-	-

R = prospection radon

G = prospection géophysique

PHM = photointerprétation et géomorphologie

Méthode radon

- méthode non utilisée

0 pas d'anomalie

+ anomalie faiblement contrastée

++ anomalie ponctuelle (pic sur profil)

+++ anomalie contrastée et étendue

Méthode géophysique et géomorphologique

- méthode non utilisée

0 pas d'indices

+ indices peu significatifs

++ indices favorables

+++ indices très favorables

SITE DE SANON

N° forage	Méthode			Profondeur (m)	Débit fin foration (m <sup>3</sup> /h)	Débit pompage (m <sup>3</sup> /h)	Rabattement (m)	Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)
	R	G	PHM					
CE 2	+++	+	+	49,0	18,0	4,0	5,1	0,78
S 10	+++	+	+	63,0	18,0	12,1	20,2	0,60
S 4	0	+++	+	72,0	3,0	7,5	19,0	0,40
CS 2	+++	0	+	67,5	6,8	4,9	14,5	0,34
S 16	-	-	+++	67,5	5,0	7,0	30,0	0,23
CE 1	++	+	++	51,1	4,2	3,6	15,4	0,23
S 6	-	+++	0	76,5	3,0	4,5	20,8	0,22
S 8	++	++	++	58,5	4,0	4,4	27,5	0,16
CE 3	0	+	++	59,0	4,0	4,0	24,4	0,16
S 12	++	0	+	72,0	3,0	3,0	21,3	0,14
S 1	++	0	+	76,5	3,6	4,0	35,3	0,11
CS 1	0	++	+	63,0	2,0	1,4	15,2	0,09
S 5	0	+	++	72,0	2,0	-	-	-
S 13	0	++	+	63,0	1,2	1,2	27,0	0,04
S 3	++	0	+	49,5	0,0	-	-	-

R = prospection radon

G = prospection géophysique

PHM = photointerprétation et géomorphologie

Méthode radon

- méthode non utilisée

0 pas d'anomalie

+ anomalie faiblement contrastée

++ anomalie ponctuelle (pic sur profil)

+++ anomalie contrastée et étendue

Méthode géophysique et géomorphologique

- méthode non utilisée

0 pas d'indices

+ indices peu significatifs

++ indices favorables

+++ indices très favorables

SITE DE BAROGO

N° forage	Méthode			Profondeur (m)	Débit fin foration (m3/h)	Débit pompage (m3/h)	Rabatement (m)	Débit spécifique (m3/h/m)
	R	G	PHM					
B 6	+++	0	++	66	25,0	12,0	7,2	1,67
CEAO 104	0	0	+++	46	20,0	7,2	6,3	1,14
B 4	0	++	+++	81	13,5	12,0	15,0	0,80
B 7	0	+++	++	58	4,0	4,0	7,6	0,52
F 2	0	+++	++	52	14,0	4,8	9,5	0,50
B 2	0	++	+++	54	6,7	6,2	18,4	0,34
CE 1 - 772.1	+	++	+++	51	15,0	6,0	25,5	0,23
B 8	+	++	+	76,5	4,0	4,0	22,0	0,18
CE 1 - 772.2	0	0	++	45	3,2	4,0	25,6	0,15
B 12	-	-	+++	63	3,0	3,5	24,6	0,14
B 9	0	+++	+	58	2,8	-	-	-
B 13	0	0	++	53	2,0	-	-	-
B 3	0	++	++	67,5	1,5	-	-	-
B 5	-	++	0	63,0	1,2	1,5	29,3	0,05
F 1	0	+	++	52,0	1,2	-	-	-
B 10	0	++	++	72,0	1,0	-	-	-
B 1	0	+++	+++	81,0	0,7	-	-	-

R = prospection radon

G = prospection géophysique

PHM = photointerprétation et géomorphologie

Méthode radon

- méthode non utilisée

0 pas d'anomalie

+ anomalie faiblement contrastée

++ anomalie ponctuelle (pic sur profil)

+++ anomalie contrastée et étendue

Méthode géophysique et géomorphologique

- méthode non utilisée

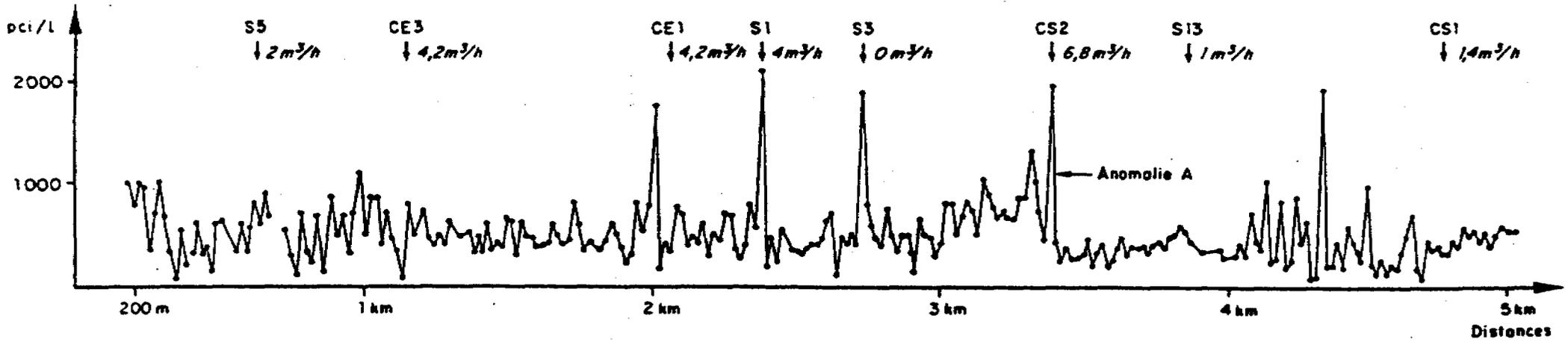
0 pas d'indices

+ indices peu significatifs

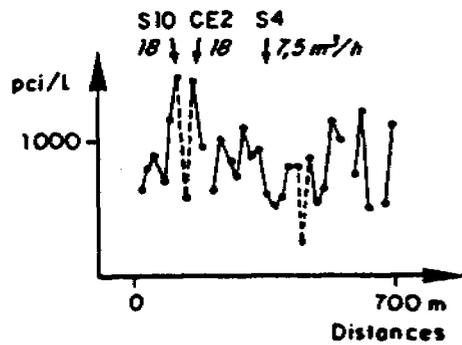
++ indices favorables

+++ indices très favorables

PROFIL 1 (ouest-est) Pas de mesure : 20m



PROFIL 2 (sud-nord) Pas de mesure : 20m



ANOMALIE A

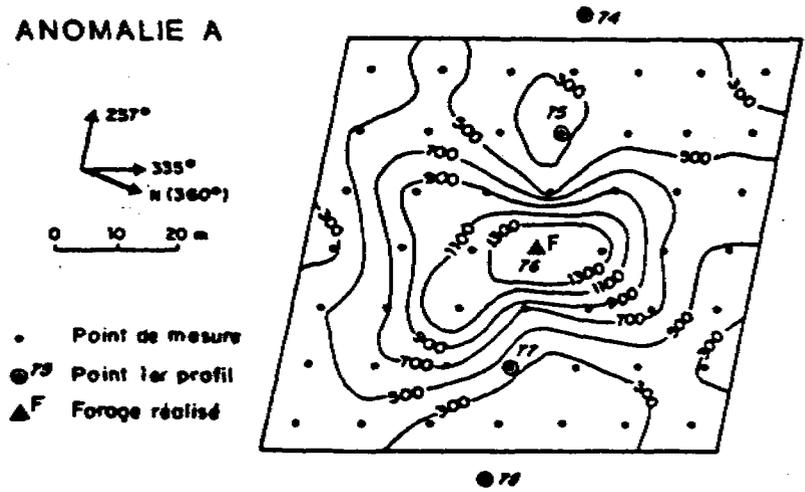
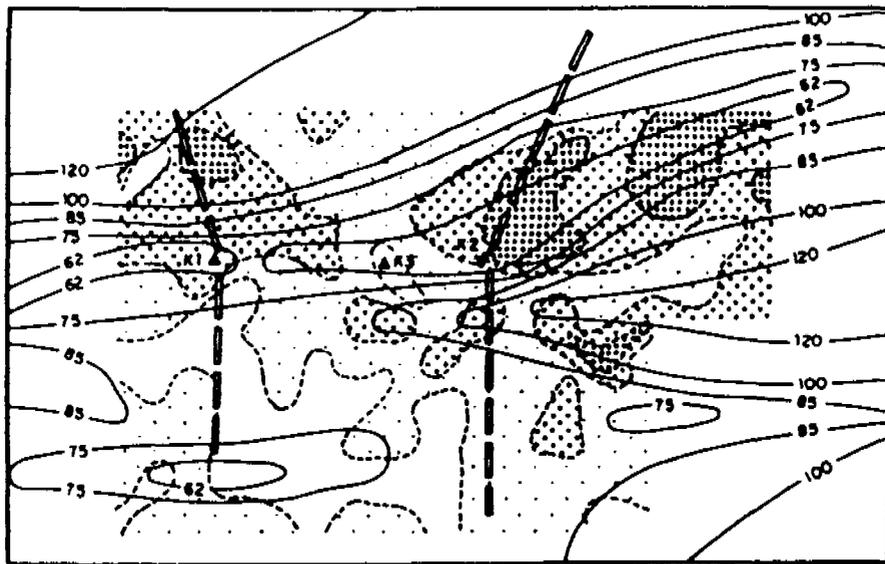


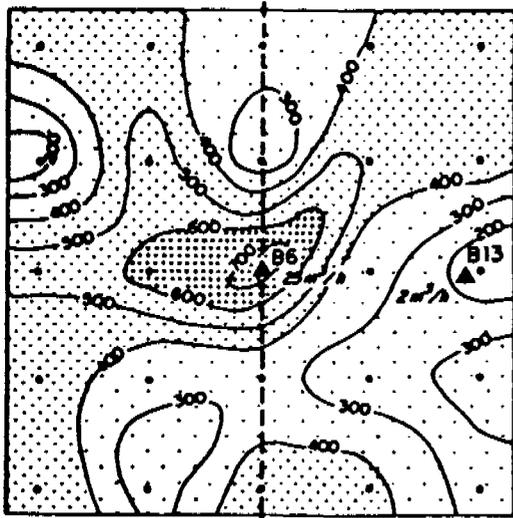
Fig.2



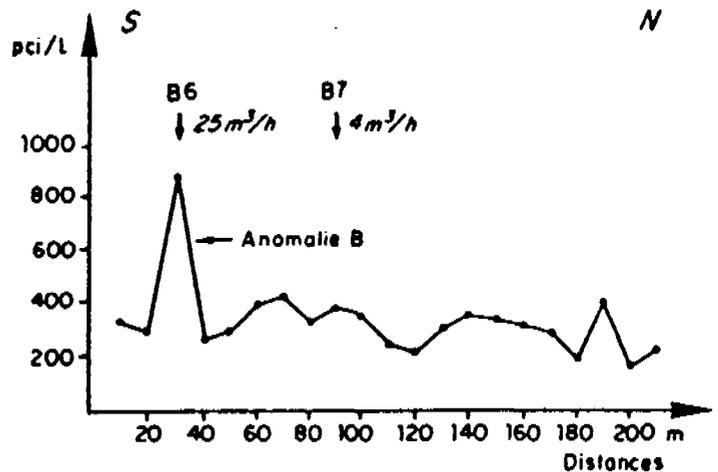
100 — Courbe d'égale résistivité apparente ( $\Omega m$ )  
 (dispositif ABMN orienté N.S.)  
 — — — — — Axe conducteur d'après carte de résistivité apparente  
 suivant dispositif ABMN orienté E.W.  
 Plages d'isovaleurs de concentration en gaz Radon (pci/L)  
 [White box] < 100 pci/L      [Dotted box] 150 à 200 pci/L  
 [Horizontal lines box] 100 à 150 pci/L      [Grid box] > 200 pci/L  
 ▲ A43 Forage réalisé dans le cadre de l'étude

SITE DE KATCHARI

ANOMALIE B Profils 0 5m



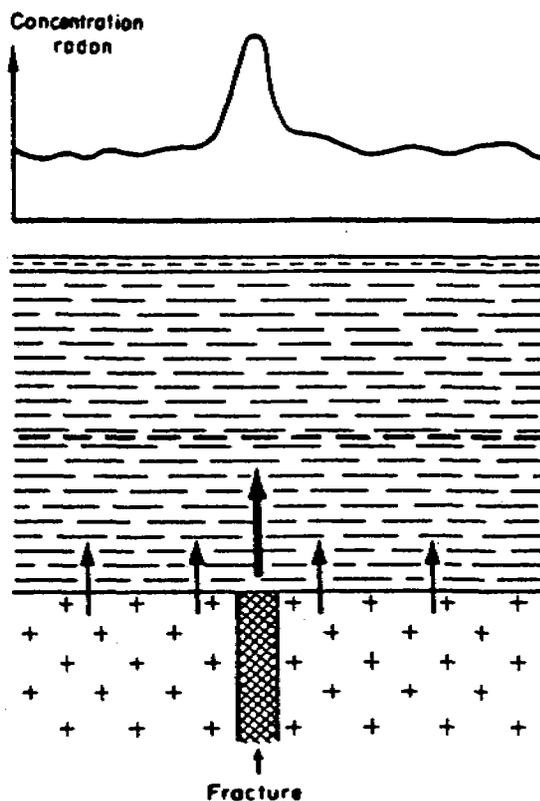
[White box] < 200 pci/L      [Dotted box] 400 à 600 pci/L  
 [Horizontal lines box] 200 à 400 pci/L      [Grid box] > 600 pci/L



PROFIL 3 passant par l'ANOMALIE B

SITE DE BAROGO

Fig.3



HYPOTHESE 1

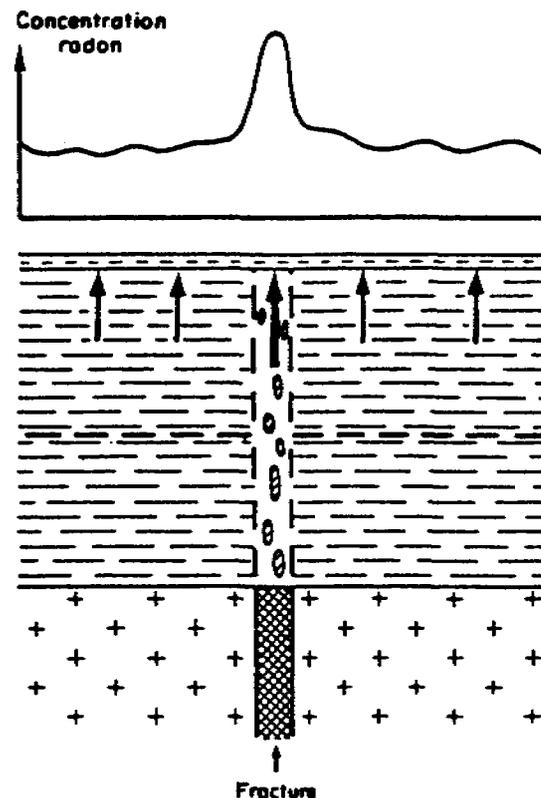
Les zones émettrices sont situées dans le socle

Le pouvoir d'émanation du radon est anormalement élevé au niveau de la zone fracturée ( roche mère très divisée, présence d'eau )

Par migration du gaz à travers le recouvrement altéré, l'anomalie de concentration radon se retrouve dans le sol .

Altérites sèches  
Niveau statique  
Altérites saturées

Socle



HYPOTHESE 2

Les zones émettrices sont situées dans les altérations

La zone fracturée contient des minéralisations uranifères anormalement fortes par rapport au socle sain environnant . Les sources émettrices, conservées dans les altérations ( filon fantôme ) , sont à l'origine de l' anomalie radon observée dans le sol .

HYPOTHESES SUR L'ORIGINE DU RADON CONTENU DANS LE SOL

**ANNEXE 6**

**FRACTURATION HYDRAULIQUE**



CIEH

# FRACTURATION HYDRAULIQUE

Le procédé **FLEXIFRAC**

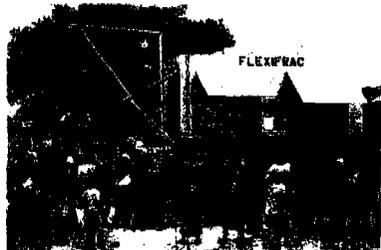
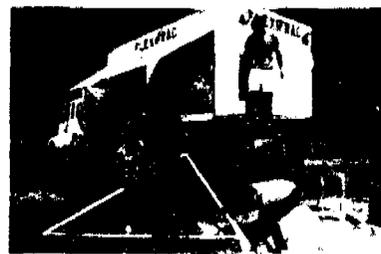
Une méthode efficace pour accroître la productivité  
des forages d'eau en milieux fissurés



hydroexpert



BRGM





Les roches dures, qu'il s'agisse de zones massives de socle ou de couches en bassins sédimentaires (calcaires, dolomies, grès,...) représentent un pourcentage important des terrains accessibles à la prospection hydrogéologique.

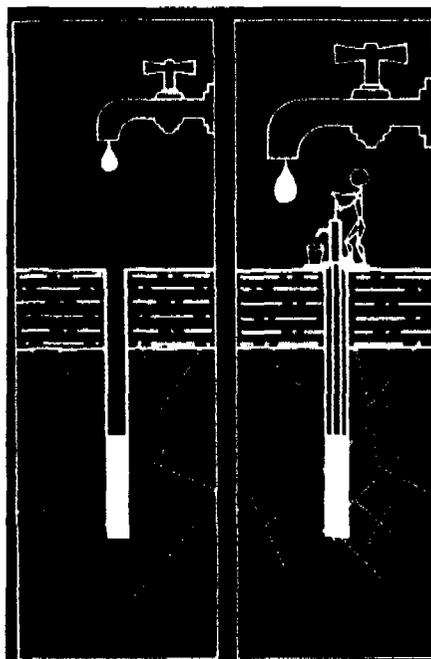
Cependant, le taux d'échec y est couramment de l'ordre de 20% (forages secs ou insuffisamment productifs). Ce taux peut atteindre jusqu'à 50% dans certaines "zones difficiles".

En effet, dans ces milieux, l'eau circule dans le réseau fissural qui présente une densité et un degré d'ouverture très variables et difficiles à apprécier au stade de la reconnaissance.

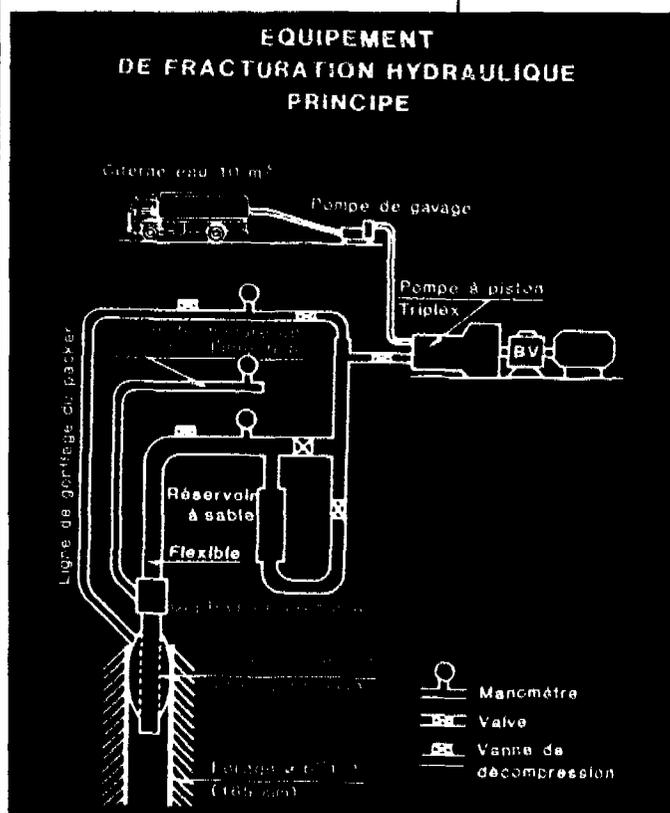
**Dans ce contexte, la productivité d'un forage peut être améliorée en créant de nouvelles fissures aquifères.**

**Plusieurs techniques sont possibles. D'après les études comparatives conduites par l'Université de Fort Collins, la fracturation hydraulique s'est révélée la plus efficace et la plus aisée à mettre en œuvre et à contrôler.**

Le principe de la fracturation hydraulique est simple. De l'eau sous pression est injectée sous un packer ancré dans le forage au-dessus de la zone à fracturer. Le claquage des terrains qui en résulte accroît la relation du forage avec les fissures naturelles productives.



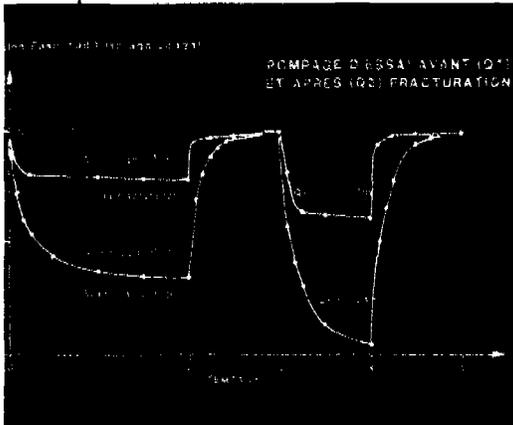
Des liaisons plus denses entre les fractures aquifères augmentent le débit du forage.



## RÉSULTATS TECHNIQUES

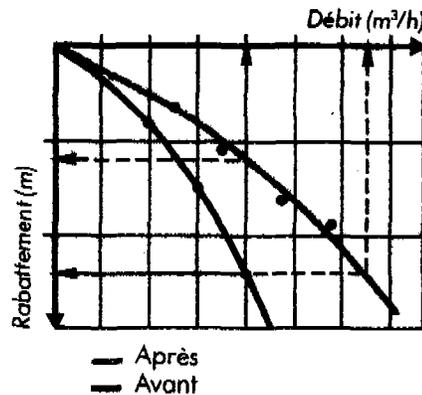
- Plus de villages desservis par augmentation du taux de succès (90%);
- des améliorations durables:
  - augmentation du débit de production,
  - diminution des rabattements donc du coût de fonctionnement;
- réduction de la profondeur des forages négatifs.

### Forage de Loaga (Burkina Faso, 1989)



Après fracturation (jaune) et pour un débit constant de 0,5 m<sup>3</sup>/h, le niveau de pompage passe de 6,63 m à 2,23 m.

### Forage d'Asserac (France, 1987)

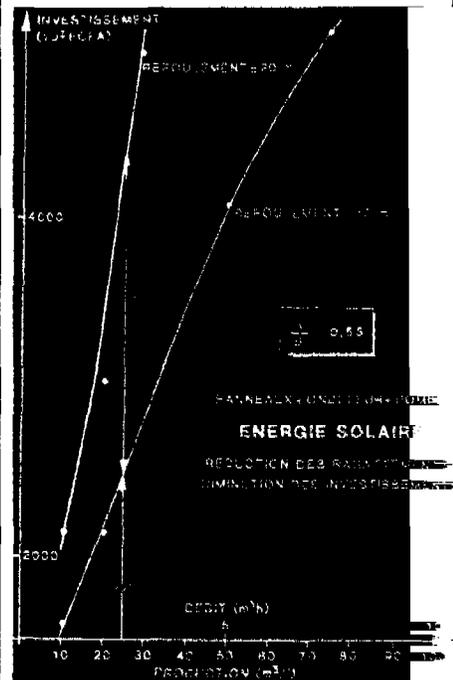


Après fracturation (vert) le débit initial (rouge) est multiplié par 2,9.

## RÉSULTATS ÉCONOMIQUES

- Diminution de 5 à 10% du coût des forages productifs ruraux.
- Réduction des investissements pour les mini-alimentations solaires en eau potable..., réduction des coûts de fonctionnement (énergie consommée).

En réduisant, par fracturation hydraulique, de 20 m à 10 m le niveau de pompage, on diminue de 45% l'investissement de l'équipement de pompage solaire.



Une expérience conduite au Burkina Faso en 1989 (convention F.A.C.) a montré que le débit des 21 forages "fracturés" a été amélioré par fracturation effective ou nettoyage des fractures existantes. L'accroissement du débit a été en général supérieur à 100% et a atteint 200 à 300% pour les forages initialement négatifs (débit inférieur à 0,5 m<sup>3</sup>/h) qui sont devenus positifs.

La majorité des fractures recoupées par les forages sont proches de l'horizontale mais les résultats les plus importants concernent des fractures proches de la verticale.

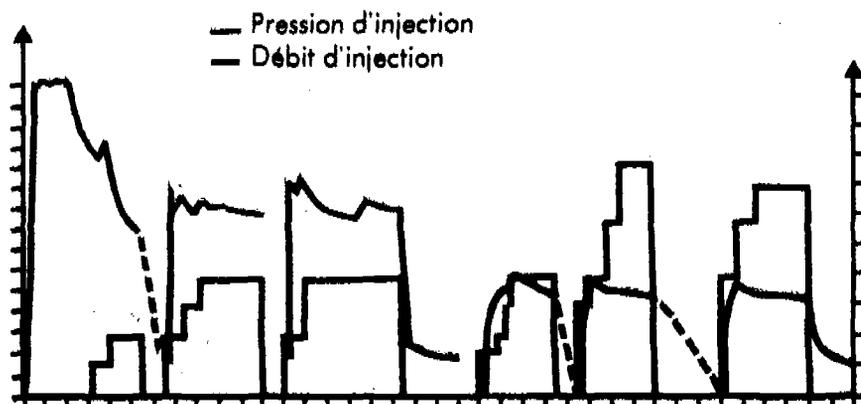


L'unité de fracturation hydraulique FLEXIFRAC résulte de plusieurs années d'expérience. Elle rassemble dans une cabine montable sur camion (poids: 7 tonnes):

- une pompe d'injection triplex haute pression pouvant assurer jusqu'à 200 bars et 40 m<sup>3</sup>/h,
- un treuil hydraulique équipé d'un flexible haute pression d'une longueur totale de 130 m,
- un moteur thermique de 300 ch embroyable sur le treuil ou la pompe,
- des circuits de commandes hydrauliques et un banc de mesure pression/débit.

Des packers de divers diamètres sont connectables en bout du circuit de flexibles.

L'utilisation de flexibles pour le gonflement et la mise en pression du forage permet une mise en place sur site aisée (il n'est pas nécessaire de positionner l'unité à l'aplomb de l'ouvrage) et une descente dans l'ouvrage puis une mise en œuvre rapides (quelques heures seulement pour la fracturation d'un ouvrage). Un seul opérateur spécialisé est nécessaire pour conduire l'opération.



Pour plus d'efficacité, pressions et débits d'injection sont contrôlés en continu.

