

Compresseur : DPV-8055,
Débit 2,5 m³/min.
Pompe centrifuge : MEP-65,
Débit 790 l/min.
Pompe à sable : 15 KW, Débit 200 l/min.
Soudeuse à arc électrique: DENYO DCD-2708, 50-270 A
Matériel pour le compement :

2-3 Résumé du déroulement et des procédés du forage

(1) Modalité de forage de chaque forage

Le Tableau III.2.1 représente la particularité de chaque forage achevé.

(2) Développement des travaux de forage

Voir de Tableau III.2.2 et la Tableau III.2.3.

Tableau III.2.1 Modalités d'achèvement des forages

N° Puits foré	Année d'exécution	Profondeur (m)	Épaisseur de la couche aquifère (m)	Niveau statique de l'eau (m)	Profondeur maximum de la couche aquifère (m)	Essais de pompage			Finition		
						Abaissement du niveau d'eau (m)	Débit critique (m ³ /h)	Position de la pompe (m)	Nombre de crépines	Nombre de centralisateurs	Remplissage de graviers ³⁾
1 Ha-1	1981	120,0	(27,0)	29,0	(111,5)	24,8	>12,2	90,7	WR 4 G 4	4 6	a- 5,0 (m ³) b- 80 (m)
2 G-1	1979	105,0	(26,5)	11,0	43,5	37,0	0,0	50,4	G 6	5	—
3 G-2	1979	60,0	45,0	4,5	49,5	10,5	3,9	41,6	G 5	3	—
4 G-3	1979	150,6	(46,4)	8,2	150,6	9,0	4,2	60,5	G 9	5	—
5 G-4	1980	(29,0) 60,0	4,7	13,3	180	2,8	3,5	22,6	WR 4	2	a- 3,5 b- 20
6 G-5	1980	(29,5) 60,2	17,3	6,2	24,0	5,5	7,0	24,5	WR 4	2	a- 3,5 b- 25
7 G-6	1981	(29,13) 40,6	6,5	13,5	(20,0)	(7,2)	(0,7)	22,8	WR 4	2	a- 0,9 b- 17,0
8 G-7	1981	(42,15) 45,3	21,1	4,9	(26,0)	>2,0	12,6	28,3	WR 6	3	a- 2,0 b- 37,0
9 G-8	1981	44,5	31,8	4,2	36,0	2,2	7,4	34,3	WR 3 G 3	2	a- 1,2 b- 23,0
10 G-9	1981	40,0	22,7	4,3	27,0	3,3	14,8	24,5	WR 5	2	a- 2,0 b- 36,5
11 G-10	1981	(36,92) 40,3	15,7	4,3	(200)	>6,3	>17,3	24,6	WR 4	2	a- 1,0 b- 19,0
12 B-1	1981	40,0	18,8	7,2	26,0	2,1	7,9	25,5	WR 5	2	a- 2,0 b- 35,0
13 A-1	1980	124,0	(61,0)	12,1	12,30	14,3	7,2	86,0	WR 6 G 8	5	a- 6,2 b- 119,0
14 A-2	1980	142,0	(57,0)	19,6	132,0	16,5	1,8	—	WR 5 G 3	2	a- 6,8 b- 132,0
15 A-3	1980	(54,80) 90,7	(195)	23,2	46,0	23,1	0,6	—	G 5	2	a- 7,0 b- 39,8
16 D-1	1981	121,5	(12,0)	57,5	97,0	—	—	—	G 4	4	a- 3,0 b- 58,0
Total		1.284,7							WR 50 G 46	47	

Notes:

- 1) La profondeur entre parenthèses signifie celle après le colmatage du fond.
- 2) L'épaisseur entre parenthèses est la somme de plusieurs couches aquifères.
- 3) La dimension des graviers varie entre 5 et 10 m/m. Ils sont tamisés sur place.
- 4) WR: Wire-round (entouré de câbles)
G: A graviers
- 5) Ha-1: En prévoyant la liaison avec le puits pour le P-C, on a rempli l'espace entre 120 et 40 m de profondeur avec des graviers et l'espace entre 40 et 37 m avec de l'argile. Le remplissage n'est pas effectué entre la surface et 37 m de profondeur. La bouche à la surface est couverte par du béton.
- 6) D-1: On a rempli l'espace entre 120 et 70m de profondeur avec des graviers, l'espace entre 70 et 68m avec de l'argile et l'espace entre 68 et 60m de nouveau avec des graviers. Pour pouvoir transformer ce puits en P-C plus tard, le remplissage n'a pas été effectué entre la surface et 60m de profondeur. L'ouverture est couverte par du béton.

Tableau III.2.2 Rendement des travaux de forage (suivant l'ordre du déroulement des travaux de forage)

Rubrique	Puits foré	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	A-1	A-2	A-3	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10	B-1	D-1	Ha-1	Total	Observations	
Conditions des travaux	Année d'exécution	54	54	54	55	55	55	55	55	56	56	56	56	56	56	56	56			
	Endroit	Dans le parc de l'Hydraulique à Gao	8 ^{ème} ar. de Gao	2 ^{ème} ar. de Gao	A côté du cha-teau d'eau à Gao	A côté de la cen-trale à Gao	Ansongo	2 ^{ème} ar. d'An-songo	1 ^{er} ar. d'An-songo	7 ^{ème} ar. de Gao	Gao, Boul-gounje	Gao	Gao	Gao	Bagoun-dje	Djebock	Hanakou-ladji			
	Position	A 450m du Niger	A 150m du Niger	A 100m du Niger	750m à l'est du Niger	A 70m du Niger	12 km au nord-est d'Anson-go	10 km au sud-est d'Anson-go	Dans la ville	Dans la ville	Près de l'abattoir	Près de l'abattoir	Au sud du cfm-tière	Près de l'abattoir	Vers Gao	A côté du puits	A la place centrale			
	Profondeur (m)	105,0	60,0	150,6	60,0	60,2	124,0	142,0	90,7	40,6	45,3	44,5	40,0	40,3	40,0	121,5	120,0	1254,7		
	Durée des travaux	3/1-26/2	22/1-11/2	7/2-8/3	10/11-4/12	24/11-16/12	24/12-15/1	9/1-4/2	4/2-19/2	11/11-25/11	26/11-1/12	12/12-22/12	22/12-4/1	5/1-21/1	26/1-5/2	6/2-20/2	22/2-13/3			
	Nature géologique	Principa-lement le qua-ternaire	Principa-lement le qua-ternaire	Principa-lement le qua-ternaire	Le qua-ternaire	Le qua-ternaire	Principa-lement le terti-aire	Le terti-aire	L'infra-cambrien	Le qua-ternaire	Le qua-ternaire	Le qua-ternaire	Le qua-ternaire	Id.	Id.	Le terti-aire	Le terti-aire			
	Nature de roches	Sables, galets, siltites	Sables, galets, argiles	Id.	Sables, galets	Sables, galets, graviers de laté-rite	Sables, galets, argiles sablon-neuses	Argiles sablon-neuses, sables, galets	Roche métamor-phique d'érosion éolienne	Argiles sablon-neuses	Sables, galets	Id.	Id.	Id.	Id.	Sables argileux, argiles sablon-neuses	Argiles sablon-neuses, galets de latérite			
Travaux de forage	Nombre d'heures	Préparation de forage	34H20	25H00	37H30	42H30	34H30	19H00	21H00	10H30	24H30	17H30	4H30	4H00	23H30	14H00	19H00	21H30		
		Forage	69H50	31H00	49H00	22H40	21H15	105H00	103H50	77H55	23H30	26H30	28H50	20H30	21H25	25H25	58H50	96H00		
		Carottage électrique, installation des cré-pines, remplissage de graviers	48H00	23H30	59H00	39H10	18H00	30H00	38H00	30H00	21H40	34H30	13H10	22H00	7H20	15H00	24H00	22H40		
		Levée, remise en état	7H30	20H30	4H00	7H30	14H00	12H30	4H30	18H00	6H30	7H30	3H30	7H00	7H00	7H00	7H00	7H00		
	Heures totales	159H40	100H00	149H30	111H50	87H45	166H30	167H20	136H25	76H10	86H00	50H00	53H30	59H15	61H25	108H50	147H10	172H20		
	Nombre de journées	Préparation de forage	6	5	6	8	7	3	3	2	4	3	1	1	3	2	3	3		
		Forage	9	4	6	4	3	10	9	7	3	4	4	3	3	4	5	8		
		Carottage électrique, installation des cré-pines, remplissage de graviers	7	3	7	6	3	3	5	4	3	4	2	3	1	2	3	3		
		Levée, remise en état	1	3	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
	Total des journées de travaux	23	15	20	20	15	18 (24)	18 (22)	14 (19)	11	12	8	8	8	9	12 (19)	16 (22)	227	Nombre de procédés est indiqué entre parenthèses. 14,2 journées/puits en moyenne	
Somme réelle de jours de travail	24	21	27	25	23	23	27	16	15	16	11	14	17	11	15	20	305	19 jours/puits en moyenne		
Mise au point	Nombre d'heures	Ingénieurs japonais	41	16	29	27	30	32	36	27	16	20	11	8	10	15	23	23		
		Collègues maliens	0	0	8	27	28	36	31	27	21	36	22	15	9	17	88	28		
	Ouvriers	162	87	147	87	84	109	106	87	85	100	74	52	73	68	86	96		(Y compris un conducteur)	
	Total de nombre de personnes	203	103	184	141	142	177	173	141	122	156	107	75	92	100	197	147	2260		
Profondeur de puits/journées des travaux(m)	4.56	4.0	7.5	3.0	4.0	6.9	7.9	6.5	3.7	3.8	5.6	5.0	5.0	4.4	10.1	7.5				
Essais de pompage	Nombre d'heures	Surging (airlift)	67H10	30H30	43H30						6H30	14H00	7H00	7H00	14H30	7H00	8H00	19H00		
		Jetting (eau propre)				8H00	2H00	8H00	16H00	13H30									7H00	
		Bailing (pompage)	7H30	22H30	30H00	12H00	4H30	6H00	7H00	7H00	6H30	7H00	19H00	7H00	7H00	7H00				
	Nombre total des heures	74H40	53H00	73H30	20H00	7H30	14H00	23H00	20H30	13H00	21H00	16H00	14H00	21H30	15H00	8H00	26H00			
Nombre de journées	Surging	9	5	6						1	2	1	1	3	1	1	2			
	Jetting				1	1	1	2	2											
	Bailing	1	3	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1			
Nombre total des journées	10	8	10	3	2	2	3	3	2	3	2	2	4	2	1	3	60	3,75 journées/puits en moyenne		
Nombre de personnes	Ingénieurs japonais	27	16	19	2	1	2	4	4	2	4	1	1	5	1	2	4			
	Collègues maliens	0	0	13	4	1	3	4	5	3	7	3	4	7	2	2	5			
	Ouvriers	50	43	85	10	4	9	14	14	10	22	11	9	29	6	6	16			
Nombre total des personnes	77	59	117	16	6	14	23	23	15	33	15	14	41	9	10	25	497			
Essais de pompage	Nombre de journées	Essais de pompage à paliers et à débit constant	4	4	5	3	2	4	4	1	3	4	3	3	4	3	3	50	3,125 journées/puits en moyenne	

Tableau IV.2.3 Equipements et matériaux employés pour les travaux de forage

Puits foré		G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	A-1	A-2	A-3	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10	B-1	D-1	Ha-1	Total	Observations	
Année d'exécution		1979	1979	1979	1980	1980	1980	1980	1980	1981	1981	1981	1981	"	"	"	"			
Profondeur du forage	(m)	105,0	60,0	150,6	60,0	60,2	124,0	142,0	0,7	40,6	45,3	44,5	40,0	40,3	40,0	121,5	120,0	1.284		
Genre des trépan employés	①	A wing 14-3/4	A wing 14-3/4	A wing 14-3/4	A wing 14-3/4	A wing 14-3/4	A wing 14-3/4	A wing 14-3/4	A wing 14-3/4	A wing 14-3/4	A wing 14-3/4	A wing 14-3/4								
	②	Tricônes 11-5/8	-	-	Tricônes 11-5/8	Tricônes 11-5/8	Tricônes 11-5/8(S)	Tricônes 11-5/8(S)	Tricônes 11-5/8(M)	-	-	-	-	-	-	Tricônes 11-5/8	Tricônes 11-5/8(M)			
	③	A drague 11-5/8	A drague 11-5/8	A drague 11-5/8	A drague 11-5/8	A drague 11-5/8	A drague 11-5/8	A drague 11-5/8	A drague 11-5/8	A drague 11-5/8	A drague 11-5/8	A drague 11-5/8								
	④	A bouton	-	-	-	-	-	-	A bouton 1/2	-	-	-	-	-	-	-	-	A bouton 5-5/8		
Quantité d'eau utilisée	(m³)	-	-	-	-	-	-	-	-	22	40	19	17	18	20	80	96			
Fonctionnement du moteur à la tour de forage (heures)	(h)	-	-	-	-	69	121	123	92	31	54	37	31	29	26	77	111			
Kérosène	(l)	-	-	-	1500	1725	3025	3075	2300	775	1350	925	775	725	650	1925	2775	21,525		
Huile de turbine	(l)	40	20	20	150	-	30	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-			
Huile de moteur	(l)	-	10	5	-	-	2	23	20	40	-	-	-	-	-	10	-			
Graisse	(kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Sables	(m³)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		Principalement pour le remplissage	
Graviers	(m³)	-	-	-	3,5	3,5	6,2	6,8	7,0	0,9	2,0	1,2	2,0	1,0	2,0	3,0	5,0	44		
Ciment (sachets)		-	5	4	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	1	1			
Oxygène (bouteilles)		-	-	(54-6)	-	-	-	-	(00-6)	-	-	-	-	-	-	-	(56-6)	18	Le total pour l'année est indiqué entre parenthèses	
Acétylène (bouteilles)		-	-	(54-3)	-	-	-	-	(00-3)	-	-	-	-	-	-	-	(56-3)	9		
Fils de fer	(kg)	-	-	(54-50)	-	-	-	-	(00-25)	-	-	-	-	-	-	-	(56-50)	125		
Soudure en fil B 104m/m	(kg)	-	-	(54-5)	-	-	-	-	(00-50)	-	-	-	-	-	-	-	(56-15)	76		
Soudure en fil 3,2m/m	(kg)	-	-	(54-1)	-	-	-	-	(00-25)	-	-	-	-	-	-	-	(56-15)	76		
Triamont	(kg)	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2		
Métal, 12x15x30mm		-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	8	8	56		
Bentenite	(kg)	-	-	-	75	250	350	275	-	250	385	370	345	230	345	400	650	4.225		
Rester	(kg)	-	-	-	200	-	80	120	00	70	70	40	35	25	35	70	75	920		
CMC	(kg)	-	5	65	-	8	7	7	3	-	-	-	-	-	-	-	-			
Détersif pour les puits (boîtes)	(kg)	-	-	-	-	2	2	1	-	1	2	1	1	-	1	1	-	12		
Tubes pour le tubage		16	8,5	22,5	3,5	3,5	15	22	8	3	5	5	4,5	5	4,5	20	18	164		
Crépines WR		-	-	-	4	4	6	5	00	4	6	3	5	4	5	-	4	50	A wire-round	
Crépines G		6	5	9	-	-	8	3	5	-	-	3	-	-	-	4	3	46		
Centralisateurs		5	3	5	2	2	5	2	2	2	3	2	2	2	2	4	4	47	A enfouir	
Tubes de guidage à 12"		-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1		
Couvertures de puits		-	-	-	1	-	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1	11		

2-4 Etat actuel du transfert de la technique et problèmes concernant l'exécution des travaux

Année 1979:

On n'a eu qu'un seul participant parmi le personnel malien vers la fin des travaux au puits G.3. Il est resté comme observateur.

Année 1980:

Mr Nouman Dialite qui avait participé l'année précédente et Mr. Mamadou Porgo qui avait été envoyé un peu plus tard, étaient les deux participants de ce projet.

Pour les initier au travail, nous leur avons donné des directives, enseigné la technique de base au moyen de leçons suivies de débats, que nous avons complétées par des observations pratiques et des manipulations. Ils ont participé aux travaux eux-mêmes, par roulement de deux groupes. Cependant, ils en sont restés à l'acquisition de la technique la plus élémentaire. Nous avons programmé, dans le projet pour l'année suivante, l'acquisition de connaissances sur les mesures à effectuer en fonction de la variété pétrographique, sur la technique générale de contrôle sur l'entretien du matériel et sur l'approvisionnement des pièces de rechange.

On peut énumérer les points exécutés cette année comme suit:

- Présentation de machines et matériaux divers
- Manipulation des machines et des outils
- Installation de la tour de forage, levée et rabatement du mât
- Manoeuvre de la tour de forage (démarrage, pression, forage, équilibrage de la tour de forage, lecture des jauges, etc...)
- Fonctionnement de l'eau boueuse
- Echange des pièces (pièces de rechange de la pompe, du robinet de contrôle, etc...)
- Operations accessoires (soudure au gaz, découpage et insertion du métal, soudure électrique, etc...)
- Installation des tuves pour le tubage et des crépines
- Essais de pompage

Prise de décision, direction de l'opération

- Choix des forets qui conviennent à la nature pétrographique du sol où l'avancement du forage
- Travail par roulement en deux groupes
- Méthode d'enlèvement des débris
- Méthode pour déterminer la position des crépines
- Méthode de nettoyage des puits qui ont une couche de sable fragile.

Remplissage des graviers de filtrage

Il faudra envisager, par endroits, d'employer un réservoir d'eau et une pompe pour la circulation au lieu de réservoir pour les précipitations ou l'eau boueuse, qui sont difficiles à écouler en couche dure très peu profonde comme c'est le cas dans le 1er arrondissement d'Ansongo.

On a renforcé de métal le foret à drague au puits A.2. Si l'on compare les résultats avec ceux du puits A.1, dont les couches sont semblables à celles du A.2, son utilisation a accru la capacité du forage.

Au puits A.3, on a diminué le diamètre du puits à 8½ inches en utilisant le foret à bouton à partir de 74,70 m de profondeur. La vitesse du forage est en moyenne à 45 min/m jusqu'à 90,7 m de profondeur, mais elle atteint presque 2 heures/m à certains endroits. L'utilisation du marteau à air a été nécessaire à Ansongo pour forer l'endroit où la roche de soubassement est découverte.

Travail par roulement:

On a adopté le travail par roulement de 4 jours au puits A.1, de 6 jours au puits A.2 et de 5 jours au puits A.3 uniquement pendant les travaux de forage. Entre 7h30 et 20h30, le temps du travail était réparti entre deux équipes. On voulait aussi diminuer le nombre de jours de travail mais c'était principalement pour faciliter le transfert de la technique aux deux co-équipiers maliens pour leur permettre de diriger chacun à son tour un groupe de deux ou trois ouvriers.

Il arrive que la sonde pour la prospection des couches doit être arrêtée dans sa descente à cause de la boue restée dans le puits comme lors du forage du quaternaire à Gao, l'année précédente. Une des solutions qu'on a trouvées a été d'employer un stabilisateur de foret pendant le forage et de passer ensuite, après ce forage, un foret tricône jusqu'au fond.

Année 1981:

Ils'agit de la dernière année des travaux de recherches. Comme c'est en même temps la deuxième année du transfert de la technique, on s'est donné comme but l'achèvement de l'essentiel de l'exploration et de rendre possible l'exécution des travaux en toute indépendance par les co-équipiers maliens. Cependant, on a remis à une date ultérieure le transfert de la technique concernant l'augmentation de l'efficacité, l'entretien du matériel, les prises de mesure dans les situations particulières etc... Sur ces questions, les spécialistes japonais se sont bornés à donner les conseils nécessaires abandonnant la direction des opérations aux Maliens. Ainsi les travaux étaient désormais conduits sur leurs propres directives.

Nous avons installé pour les travaux de forage les premiers campements dans les cercles de Djebok (puits D.1) et de Hamakouladji (puits H.1) éloignés tous les deux à environ 40 km de Gao, où la base est installée et où l'on peut s'approvisionner de tout le nécessaire. L'installation du campement et les travaux de forage ont été réalisés sans problème, ce qui indique bien que les co-équipiers maliens avaient déjà acquis assez de technique et de connaissances. Leurs activités couvraient la manoeuvre des machines, la direction du personnel, l'enregistrement, la préparation

dès dossiers et les travaux manuels comme la soudure, le coupage du gaz et de l'électricité.

Nous considérons que notre objectif de transfert de la technique était à peu près atteint. En effet, durant toute la période de la mission, on a eu affaire avec les couches du quaternaire et du tertiaire on a acquis des connaissances sur 3 régions différentes de point de vue géologique et pétrographique à savoir : les bords du Niger, l'hinterland et le cercle d'Ansongo; enfin, on a achevé 16 puits.

2-5. Perspectives d'Avenir

Ayant acquis la technique générale du forage, les co-équipiers maliens sont maintenant capables de réaliser par eux-mêmes un forage sans l'aide des spécialistes japonais. Dorénavant, ils devront maîtriser l'opération du forage avec le marteau à air qu'on n'a pas eu l'occasion d'utiliser durant cette mission et acquérir l'expérience sur la remise en marche des travaux par en récupérant les tubes coupés restés dans le puits. Il est aussi important de continuer la formation des techniciens.

Quant à la gestion de l'organisation et au partage des attributions pour la réalisation d'une exploitation autonome par le Mali, les points suivants méritent d'être signalés pour la période transitoire de l'organisation de l'hydraulique dans la 7ème région économique.

(1) Pour y parvenir il est essentiel d'abord d'arrêter un projet réalisable tenant compte du système et de la capacité en technique de la région de Gao afin que l'exploitation puisse continuer et que l'organisation livrée à elle-même soit solidement assise.

(2) Il faudrait que, non seulement, les collègues techniciens maliens mais encore tous les participants aux travaux fassent des efforts pour élever le niveau technique et acquérir les techniques englobant tous les domaines touchant aux travaux de forage. Enfin, prévoir l'inattendu pour que les travaux continuent normalement, même si un ou deux travailleurs venaient à manquer.

(3) Quant au partage de fonctions entre les collègues maliens, il est préférable que la même équipe s'occupe successivement du forage, du campement, des essais de pompage, etc., maintenant ainsi à profit les liens successifs entre chaque processus. En effet, si une équipe ne s'occupait que de forage et si une autre ne s'occupait que des essais de pompage, on ne pourrait pas espérer un résultat satisfaisant faute de bonnes liaisons entre la connaissance et l'information sur la situation.

3. Travaux d'amélioration des puits existants

3-1. Problèmes techniques sur les puits existants

Comme il a été déjà mentionné précédemment, la raison principale de l'impossibilité de faire les réparations et d'améliorer le travail vient du manque de fonds. En effet, il manque non seulement l'outillage et les matériaux nécessaires pour les travaux, mais aussi le budget pour la main-d'oeuvre est pratiquement inexistant. Même si l'on acquerrait les machines et les outils grâce à des aides étrangères, on ne pourrait pas s'en servir longtemps faute de moyens pour les réparer ou les entretenir, ce qui conduit à les abandonner.

La première mesure à prendre, c'est de trouver un système qui permette d'obtenir des aides financières pour assurer la réparation et l'entretien des machines.

Par contre, la technique malienne pour creuser les puits a sa propre efficacité, appréciable, bien qu'elle ne recoure qu'au travail à la main et au travail simple. Elle est capable de construire un puits ordinaire de 80 m avec revêtement en béton.

La mécanisation, afin de diminuer la durée des travaux et augmenter leur efficacité, demande un temps considérable; de sorte qu'il est préférable de changer progressivement de méthode à partir de la méthode traditionnelle malienne.

Selon la méthode pratiquée actuellement au Mali pour creuser un puits, on descend le puisatier et les matériaux à l'aide d'un seau suspendu par trois poteaux et tiré par un treuil manuel ou à moteur; un revêtement en béton armé garnit l'intérieur du puits. Il arrive que soit utilisé la poudre à canon ou un marteau piqueur.

Il est tout à fait inconséquent ou inopérant d'introduire la mécanisation dès maintenant pour améliorer la méthode actuelle de creusage. En effet, comme cela a été déjà dit plus haut, il manque, d'une part, la technique pour la manipulation, la réparation et l'entretien des machines, et, d'autre part, le système d'organisation et de direction n'est pas encore socialement développé.

Comme le point le plus faible dans la méthode traditionnelle sur le plan de l'équipement, consiste dans l'utilisation de la pompe pour le sable restant au fond du puits, il est nécessaire d'améliorer le choix de la pompe pour ce sable.

Pour les travaux de creusage des puits, en raison de la présence du puisatier au fond du puits avec la pompe, on emploie une pompe à air comprimé, puisqu'elle ne présente pas, d'une part, de risque d'électrocution et que, d'autre part, elle permet de fournir de l'air frais grâce au rejet de l'air comprimé. Cependant, les pompes utilisées jusqu'à présent présentent des défauts comme: le bruit, la fragilité, l'insuffisance de la capacité de pompage, etc...

3-2. Mesures concrètes pour l'amélioration

Ce sont les aides financières qui seraient nécessaires pour le projet d'amélioration, mais pour le moment, la mesure réalisable la plus importante consiste dans la transformation en P-C.

En ce qui concerne les puits profonds de 50 à 80 m, ceux-ci demandent beaucoup de temps et de dépense pour les creuser et aussi les réparer; à tel point qu'on laisse échapper le moment de la réparation et qu'ainsi on finit par les laisser se détériorer.

La solution la plus facile et la plus réalisable, dans l'état actuel des choses, consiste à transformer ces puits en P-C. En effet, la façon de puiser l'eau est la même que la traditionnelle et pour cette transformation, il suffit d'avoir une foreuse et de connaître la technique du forage. C'est pourquoi il est fortement recommandé de commencer par cette transformation en P-C, à partir des puits les plus aptes.

3-3. Travaux de réfection des puits

Les travaux de réfection des puits ont été exécutés à Tin-Aoukart et In-Fardan, dans le cercle de Gao, en 1980, par l'opération puits sous nos directives à la suite de la demande urgente du Mali.

On a désensablé ces deux puits à 50 – 60 m et on a réparé leurs parois, margelle et dallage. Etant donné que l'eau est maintenant limpide et que le puisage est plus facile, les habitants et les nomades en sont satisfaits. Les points principaux concernant les travaux sont les suivants.

Période des travaux:

Comme dans cette région, les mares formées durant la saison des pluies sont asséchées pendant la saison sèche, il est préférable d'effectuer les travaux au moment où le bétail peut profiter des mares, c'est-à-dire, entre juin et octobre. Malgré cela, on a été obligé de les exécuter, au cours de la mission, entre janvier et février, c'est-à-dire pendant la période où les puits sont le plus fréquentés. C'est ainsi que les travaux ont été à plusieurs reprises interrompus pour permettre l'abreuvement.

Choix de la pompe pour l'évacuation de l'eau:

Le modèle à air comprimé est souhaitable, mais comme en général on a besoin du modèle à 60 – 80 m d'élévation et 100 – 150 l/m de débit, il est assez difficile de s'en procurer qui soit convenable.

Schéma des travaux

Nom du puits	Tin – Aoukert	In – Fardan
Coordonnées	65 km au N-N-E de Gao	50 km au nord de Gao
Durée des travaux	Du 2 au 30 janv. 1981	Du 2 au 28 fév. 1981
Schéma des travaux	Désensablement de 6 m au fond du puits Aménagement du terrain à 5 m autour du puits Dallage de 5 m autour du puits Réparation de la margelle (50 cm de hauteur)	Id. Id. Id. Réparation des parois fissurées
Coût des travaux	997.415 FM	921.915 FM
Détails du coût	Ciment — 3 tonnes Kérosène — 620 l Essence — 240 l Effectif — 210 (unités de travail)	Ciment — 3 tonnes Kérosène — 400 l Essence — 200 l Effectif 230 (unités de travail)

3-4. Etude pour la construction de P-C

Le P-C occupe la place la plus importante dans le futur projet d'exploitation des eaux souterraines et présente la solution unique qui permet vraiment de mettre en valeur les poits forés. Nous avons fait une enquête afin d'examiner les problèmes fondamentaux et urgents concernant les meilleures performances du P-C, son efficacité et l'économie du coût du travail.

Les travaux étaient commandés par la section de Gao de l'Opération Puits et exécutés de la manière traditionnelle malienne avec l'équipement du pays. Toutefois, le Japon a prêté un compresseur, un groupe électrogène, un équipement pour l'air-lift, une tente de camping, etc. . .

Position d'installation du P-C. et modalités du forage:

Il s'agit d'effectuer un forage à côté d'un puits existant (dont l'eau était naguère puisée par le moulin à vent) à Argabeche, à 45 km de Gao par la route, dans l'arrondissement de Djebock à l'intérieur du cercle de Gao, afin de construire un P-C

Le puits en question existe dans un oued de Tilemsi. Le niveau statique de son eau est à 40 m. La couche aquifère se trouve entre 82 et 97,7 m. Le débit est à 11 m³/h.

o Modalité du puits

diamètre: 1,8 m
 profondeur: 60 m
 communication avec le puits foré: à 55 m de profondeur

ancrage: 1 ancrage à la surface et 4 au milieu du puits

revêtement de béton: 10 cm d'épaisseur en règle générale

ouverture du puits: dallage de 5 m de diamètre en béton.

○ Communication avec le puits foré

On fait seulement un trou de communication sans installer ni tuyau ni "robinet". On utilise une garniture pour arrêter l'écoulement de l'eau du puits foré.

○ Processus et coût des travaux

total du coût d'entreprise	12.500.000 FM
coût par mètre	208.333 FM/m
nombre total d'unités de travail	1953
coût: main d'oeuvre	20%
matériaux	40%
carburant	6%
transport des matériaux commandés à l'extérieur	2%
amortissement	8%
divers	24%

○ Méthode des travaux

Les principaux points sont déjà décrits, mais sont complétés ci-après.

On a transporté de Gao la nourriture, le ciment et d'autres matériaux, mais on pompe l'eau du puits foré destiné au P-C par l'air-lift. Le Japon a prêté le groupe électrogène, le compresseur, le réservoir en tarpaulin, les tuyaux et d'autres accessoires. On a campé près du chantier.

L'équipe est composée de huit personnes: 2 équipiers qui s'occupent du seau à la surface, 2 pour le treuil, 2 puisatiers, 1 pour le campement, etc. et 1 autre équipier.

Le fil de fer est de 10 m/m de diamètre, la dimension du seau est de 40 cm de diamètre et de 50 cm de profondeur. La poulie a 25 cm de diamètre. Le tambour du treuil manuel a 1,2 m de large, 40 cm de diamètre et 60 cm de hauteur. Le maillon de liaison est de 16 m/m de diamètre.

Les coffres à béton sont constitués de 4 cadres serrés par des boulons et son larges de 60 cm. L'épaisseur du revêtement en béton est de 10 à 15 cm pour une paroi solide et 20 cm pour une paroi fragile de sable.

Pour faire ce trou de communication, suspendu par des cordes, l'ouvrier perce, après avoir effectué un revêtement en béton, des trous en cercle avec une perceuse à air et termine en cassant ce cercle à l'aide d'un marteau.

Quant à la méthode et au coût des travaux, on pourrait à la rigueur accepter ceux qui sont en cours actuellement. Néanmoins, il est nécessaire de se procurer les outils, les instruments et autres petits accessoires, tous neufs, et de réexaminer les modalités des travaux pour surtout prendre des mesures de sécurité.

4. Construction de la base et entretien de l'outillage

4-1. Construction de la base

L'entretien des machines et des véhicules est difficile, les pannes sont fréquentes à cause de multiples mauvaises conditions comme l'écart de température important dans l'année et dans la journée, la chaleur, la sécheresse, le tempête de sable, les mauvaises routes, la conduite peu soignée, etc.. De plus, faute de la technique nécessaire à la réparation et à l'entretien, et d'équipement et de pièces de rechange pour ces travaux, les machines et les véhicules sont, pour la plupart, hors d'usage au bout de deux ou trois ans.

Les machines et les véhicules employés pour les travaux de recherches prévus par le projet en question ont tous été cédés au Mali qui continuera les travaux de l'exploitation en toute indépendance après la fin de la mission.

C'est pourquoi, il est déterminant, croyons-nous, pour construire une base équipée du matériel nécessaire, de donner à la fois les capacités sur les plans personnel et matériel pour entretenir les machines et les véhicules, afin de faire du projet un succès.

Le nombre d'heures de fonctionnement des machines augmente au fur et à mesure. Depuis que le rayon d'action des véhicules s'élargit de la région sablonneuse à la région rocheuse, les pneus sont fréquemment endommagés et les véhicules se détériorent plus rapidement.

Pendant la mission, il suffisait de se servir du sol en béton et des vieux containers comme atelier de réparation et entrepôt. Cependant, pour continuer les travaux d'exploitation, il faudra désormais construire au moins un atelier de réparation et un entrepôt véritables.

4-2. Entretien de matériel

Composition de l'équipe d'entretien:

- 1 collègue ingénieur malien
- 1 collègue technicien malien
- 7 personnes pour la main d'oeuvre
- 7 chauffeurs

Équipement:	Sol en béton avec une fosse	(9,0 m x 8,2 m)	1
	Tente moyenne	(5,5 m x 5,0 m x 3 m)	1
	Vieux containers		3
	Maison préfabriquée		1

Principaux exemples de panne et d'entretien:

Les 6 voitures de Nissan ont parcouru 39.000 km au maximum, 22.000 km au minimum et en moyenne 28.000 km, d'après la statistique, pendant la mission. La panne au niveau du châssis était plus fréquente que celle du moteur. On constate davantage de réglages d'embrayages pour les voitures de HINO et de réparation des fissures causées par les secousses dans les pièces pour

voitures de Nissan et de Hino. En ce qui concerne les autres machines, on remarque surtout les pannes d'alternateur dans le groupe électrogène et l'usure prématurée des pompes immergées.

Conservation des pièces, des outils et d'autres accessoires:

Actuellement, il existe environ 1000 pièces de rechanges. Comme la capacité de l'entrepôt (les vieux containers) est insuffisante, il sera question de l'agrandissement de l'entrepôt et de la méthode d'emmagasinage des pièces, des outils et autres accessoires lorsque le nombre de machines et de véhicules augmentera.

Dans l'état actuel des choses, il faut signaler la perte d'outils prêtés (pour les travaux du génie civil, etc.) entre les équipes (les équipes du forage, de la prospection électrique, de l'entretien, de la base, etc.) et on constate souvent une dépense inutile causée par le double emploi d'un même type d'outil fourni aux équipes.

Il serait plus pratique, pour certains outils, qu'ils soient prêtés sous responsabilité personnelle; mais pour les instruments moins fréquemment utilisés ou les outils communs avec ceux utilisés pour les travaux du génie civil (pelle, pioche, seau, brouette, corde, etc...), il serait préférable d'adopter un système centralisé de garde. Donc il sera nécessaire de nommer un gardien pour cet entrepôt.

En ce qui concerne la méthode de contrôle du stockage des pièces, on peut faire les remarques suivantes:

Actuellement, on utilise comme entrepôt les trois containers anciens et la moitié du bureau dans la maison préfabriquée. Mais il est nécessaire de mettre un système d'aération pour les containers dont la température intérieure monte considérablement.

Pour contrôler numériquement les pièces, on pourra employer des cartes dans lesquelles toutes ces pièces sont inscrites et qui seront gardées dans des casiers.

Consommation de carburant pour les machines et les véhicules:

○ NISSAN PATROL hard top	1 l – 4 km
○ NISSAN PATROL pic-up	1 l – 4.3 km
○ HINO WA211	1 l – 2.3 km
○ HINO HH440	1 l – 1.7 km
○ AS-35MD & MDS (Osaka Seimitsu)	1 h – 17 l
○ AS-20MD & MDS (Osaka Seimitsu)	1 h – 15 l
○ RIG F6L413FR (Tone)	1 h – 30 l
○ DCA-15S (Denyo)	1 h – 4 l
○ DCA-20SS (Denyo)	1 h – 7 l
○ DCD-270S (Denyo)	1 h – 4 l
○ DPV-80S (Denyo)	1 h – 5 l
○ DPV-175SS (Denyo)	1 h – 15 l
○ PDSH-500 (Hokuetsu)	1 h – 45 l

- o Consommation de carburant à la base de Gao

Essence: 168 l/Jour

Gas oil: 260 l/Jour (JAN.~MAR. 1982, GAO)

4-3. Etat Actuel du Transfert de la Technique et Développement Ultérieur

Le principal but est d'aider les collègues maliens à maîtriser la technique afin qu'ils puissent la pratiquer d'une façon indépendante. On a mis tout le poids sur la "sécurité", "l'opération réalisée" et remis à plus tard des objectifs comme l'efficacité ou l'élévation du niveau. Au lieu de se borner à l'enseignement par le biais des réparations, on devra également procéder à partir de ce choix à l'éducation sur place dans le domaine concerné.

Jusqu'à il y a deux ans, les travaux auxquels ont donné lieu les machines et les véhicules avaient principalement trait aux réparations nécessitées par la perte de pièces, aux coupures de circuit et aux dommages causés par les secousses pendant le transport routier depuis Abidjan, à la fourniture d'huile et d'essence, et, enfin, à l'entretien. Les points de forage s'éloignant de plus en plus de la base, le parcours du véhicule augmentant, par conséquent, on rencontre de nouvelles pannes depuis l'année dernière.

Le vaste domaine de l'équipe d'entretien couvre la réparation et l'entretien des machines et des véhicules, le stockage du carburant, la fourniture d'essence, la distribution de véhicules à chaque équipe, la direction des conducteurs, les transports divers pour le campement du forage, la mise en place du circuit, l'adduction d'eau, l'installation des égouts, l'entretien du logement à Gao et l'administration de la base. A ces vastes attributions, il lui manque l'équipement et les personnes. Si l'on tient compte de la multiplication des machines et des véhicules par suite de la dotation de l'année prochaine d'une part, et, d'autre part, de l'augmentation du travail d'entretien causée par l'éloignement des points de forage dans l'hinterland, il faudra envisager quelques mesures nouvelles.

Premièrement, il s'agit de la construction d'un atelier de réparation, de l'adjonction de 2 collègues maliens et du partage des fonctions à l'intérieur de l'équipe d'entretien.

Il faudra qu'une équipe ait suffisamment de personnel pour pouvoir partager le travail de réparation, d'entretien, le contrôle de l'équipement, la distribution des véhicules, le transport pour le campement, etc. . . Ainsi, il est nécessaire d'augmenter de 2 le nombre de collègues aides-techniciens et aussi le nombre d'ouvrier et conducteurs d'une façon correspondante. A propos de la méthode d'enseignement, il est pratiqué actuellement par le biais de l'exécution des travaux dans la plupart des cas. Mais cela demande beaucoup de temps et il est difficile de faire comprendre l'ensemble d'un système puisque l'expérience acquise est souvent partielle. Par conséquent, on a tendance à faire une opération au jugé, ce qui est le défaut commun aux collègues maliens actuels.

Pour résoudre ce problème, il serait utile que les collègues maliens fassent un stage au Japon-même.

Pour former les membres de l'équipe d'entretien, on a donné à chacun d'eux, recruté sur place, un travail qui convenait à son caractère. Ils apprennent sérieusement la technique, de sorte qu'ils deviendront des membres sur lesquels on pourra compter, s'ils continuent à accumuler les connaissances.

Don du matériel de base employé pendant la mission au Mali:

On a offert au Mali les machines, les véhicules et l'équipement principaux expédiés du Japon et employés durant la mission. Le don a été effectué le 13 mars à la base de Gao en présence de Mr. Karim Dembelé, directeur-adjoint de l'Hydraulique du Mali, et Mr. Amado Guindo, chef technicien des collègues maliens. Les dossiers officiels ont été échangés le 17 mars entre Mr. Sitapha Traoré, directeur de l'Hydraulique, et la mission japonaise.

IV. RÉSULTATS DES RECHERCHES ET CONSIDERATION

IV RÉSULTATS DES RECHERCHES ET CONSIDERATION

1. Topographie et géologie

1-1 Topographie (Fig. IV.1.1)

Les éléments géologiques importants dans la 7^{ème} région économique sont l'Adrar des Iforhas, la vallée du Tilemsi, le bassin de Mali-Niger, le détroit Soudanais*¹ et le massif de Gourma.

L'Adrar des Iforhas, terrain composé de roches métamorphiques et de granites, précambriens a une surface de 100,000 km². Ce terrain, branché du massif d'Ahaggar (ou d'Hoggar), s'étend du nord au sud de la zone presque centrale de la 7^{ème} région économique. L'extrémité sud est couverte de roches sédimentaires plus nouvelles du détroit Soudanais, l'ouest de roches sédimentaires de la vallée du Tilemsi, et l'est de roches sédimentaires du bassin Mali-Niger.

La vallée de Tilemsi est un vaste oued s'écoulant linéairement vers le sud. L'amont de l'oued coïncide, en majeure partie, avec une zone de structure synclinale appelée synclinal d'Asselar.

Le bassin de Mali-Niger est presque égal à une zone appelée synclise d'Iullemeden. Une zone au nord-ouest de la vallée d'Ahzar (tributaire de la vallée d'Azaouac), correspondant à la moitié ouest de ce bassin, appartient à la République du Mali. Dans les roches sédimentaires du bassin, il existe des gisements de cuivre ou d'uranium au ou aujourd'hui la République du Mali et la République du Niger exécutent respectivement l'exploration l'exploitation de gisement uranifère.

Deux failles traversent du nord au sud le détroit Soudanais. La zone entre les deux failles dite fossé d'effondrement de Gao, s'étend du nord-ouest au sud-est d'une longueur de 400 km environ sur une largeur de 35 à 100 km.

Le massif de Gourma formé de roches métamorphiques infracambriennes se situe à la rive droite du Niger. Au sud de l'Ansongo, ces roches se répandent continuellement à la rive gauche du Niger et font partie du bassin de Mali-Niger.

1-2 Géologie (Fig. IV.1.2 à 3, Tableau IV.1.1)

A la 7^{ème} région économique, les soubassements de l'Adrar des Iforhas et du massif de Gourma sont couverts de continental intercalaire (désigné ci-après C.I), créacé supérieur, "tertiaire",*² continental terminal*³ (désigné ci-après C.T) et quaternaire. Ces terrains sont accumulés dans cet ordre et inclinés légèrement vers le sud. Quant au tertiaire et plus antérieure situées au nord-ouest de la vallée du Tilemsi, elles présentent une structure compliquée sous l'effet du pli et sont couvertes de C.T.

*1 Le détroit Soudanais correspond à un bras de la mer qui fait communiquer la mer de l'Afrique du Nord, passant par le sud de l'Adrar des Iforhas, avec la mer étendant sur le Niger, le Tchad et le Nigeria.

*2 Ce terme représente le terrain tertiaire sauf C.T. défini par J.M. CARRERE (1975). La définition de ce terme utilisé dans l'ouvrage est utilisée.

*3 Cette désignation concerne le dépôt continental après la période éocène moyenne parmi les terrains tertiaires.

(1) Roches de soubassement

Le soubassement de l'Adrar des Iforhas est composé de granites, de roches métamorphiques et de roches effusives précambriens. Le soubassement du massif de Gourma est constitué par des roches métamorphiques infracambriennes.*1

(2) Continental intercalaire (C.I)*2

Cette couche recouvrant directement le soubassement de l'Adrar des Iforhas à généralement une puissance de 50 à 100 m. La puissance s'élève à 1.500 à 2.100 m sur certaines zones dans le bassin de Mali-Niger (côté Niger). Cette couche est divisée en gros dans l'ordre de profondeur en:

- a. groupe de grès d'Agades
- b. groupe de roches de boue d'Irhazer
- c. groupe de Tegama

a. Groupe de grès d'Agades

La partie inférieure est composée d'arkoses colorées, sur lesquelles reposent des grès par l'intermédiaire de conglomérat. Ce groupe est réputé pour la présence de mines d'uranium et de cuivre.

b. Groupe de roche de boue d'Irhazer

La roche de boue est gréseuse ou marneuse et, rougeâtre. Ce groupe couvre le groupe de grès d'Agades d'une façon discordante. Il est réputé par la présence d'une mine de cuivre. La prospection d'uranium réalisée par PNC (Société pour le développement de l'énergie nucléaire) et des réacteurs du Japon a constaté que des eaux souterraines sont présentes près de la limite inférieure de ce groupe.

c. Groupe de Tegama

La partie inférieure est constituée par des grès et de roches de boue moyens et gros, la partie supérieure des vases et roches de boue, avec des intercalations minces de grès quartzeux et de calcaire. La puissance de ce groupe s'élève à 250 m. La Société précitée a constaté la présence d'eaux souterraines.

(3) la couche crétacé supérieur

Ce terrain est divisé dans l'ordre de profondeur en:

- a. dépôt marin*3 dont le faciès de roche est similaire à C.I.
- b. couche*4 de calcaire blanc dont le faciès de roche est similaire à C.I. (serie crébacé supérieur.)
- c. crétacé terminal*5 (désigné ci-après Cr.T).

*1 Cette désignation est utilisée pour le système dont les caractéristiques ressemblent à celles des terrains cambriens.

*2 D'après la définition par C. Killan, C.I signifie tous les dépôts continentaux formés dans les régions sahariennes depuis la période moscovienne jusqu'à la période cénomaniennne.

*3 cénomaniennne supérieure à turonien inférieure

*4 turonien supérieure à sénonien inférieure

*5 maëstrichien à danien et montien

a. Dépôt marin dont le faciès de roche est similaire à C.I.

La partie inférieure est composée de calcaire et grès cumulés avec C.I d'une façon concordante, la partie supérieure de roches de boue, grès et marnes. La puissance totale est de 30 m dans une zone appartenant au Mali du bassin Mali-Niger.

b. Couche de calcaire blanc dont le faciès de roche est similaire à C.I.

La partie inférieure de cette couche est composée de calcaire argileux et gypseux, de marne et de conglomérat calcaire et, se transforme graduellement en dépôt continental (roche de boue sableuse et grès quartzeux) à l'ouest de Tamakas et d'Agueboun. Généralement, la puissance est de 35 à 80 m (10 m environ à Tenekert et à Gueljet, 118 m à Tahabonate). La partie supérieure est constituée par des roches de boue sableuses, localement gypseuses et marneuses. Le calcaire et la marne sont contenus dans le socle. La puissance est de 100 m à l'est de Tarara, 57 m à Tahabonate et 29 m à Isaxagen.

c. Crétacé terminal (Cr.T)

Le soubassement est composé de sable continental et de roche argileuse, la partie supérieure de calcaire marne et de roche argileuse. Le danien et le maéstrichien définis par K.F. Saad sont estimés correspondants à la partie supérieure de cette couche et, réputés par la présence d'une nappe aquifère.

Dans le bassin du Mali-Niger, ce terrain est divisé dans l'ordre de profondeur en:

- a) grès inférieurs et roche de boue
- b) marnes et calcaires (schistes de Msasaurus)
- c) grès supérieurs et roches de boue
- d) marnes et calcaires

La partie d) contient des couches de paléocène et a une puissance de 2 à 20 m. Elle existe seulement du côté Mali. La puissance totale de Cr.T s'élève à 160 m.

La couche crétacée supérieure du détroit Soudanais présente un faciès de roche de soubassement au nord (côté extérieur) du fossé d'effondrement de Gao. Elle passe du bassin de Mali-Niger à la Vallée de Tilemsi par l'intermédiaire du détroit Soudanais. A mesure qu'elle se rapproche du fossé d'effondrement, la granulométrie des sédiments devient plus grosse et le fond contient du fer. Cr.T dans le fossé d'effondrement présente un faciès de roche marin et continental. D'après le sondage fait par Tin Berguiou, cette partie d'une puissance totale de 60 m est divisée dans l'ordre de profondeur en:

- e) Grès fins, roches argileuses et grès calcaire (contenant du lignite et de la pyrite avec des conglomérats)
- f) Grès fins (contenant une couche argileuse graduelle et colorée.
- g) Roches argileuses noires et sables fins (riches en lignite et gourdon)

(4) "Tertiaire"

Ce terrain est divisé en:

- a. paléocène inférieur
- b. paléocène supérieur et yprésienne

a. Paléocène inférieur

La relation entre cette partie et la partie d) de Cr.T n'est pas claire.

Dans le bassin de Mali-Niger, cette couche est constituée par:

- a) marnes sableuses marines et marnes continentales (socle)
- b) schistes gris et calcaires jaunes (partie supérieure)

Certaines zones manquent de a).

Dans le détroit Soudanais, cette partie est constituée par:

- c) marnes sableuses continentales sables fins et très fins, et marnes sableuse (socle)
- d) idem, contenant localement du calcaire argileux (partie supérieure)

La puissance est de quelques mètres à dix et quelques mètres.

b. Paléocène supérieure et yprésienne

Cette couche est un dépôt marin.

Dans le bassin de Mali-Niger, elle est divisée dans l'ordre de profondeur en:

- a) calcaires et calcaires argileux
- b) calcaires argileux jaunes (contenant du gypse et du sel)
- c) roches de boue (contenant du gypse et du sel)
- d) schistes gris (contenant du phosphate)
- e) schistes jaunes (contenant du phosphate et de l'oolithe ferreux)
- f) schistes rouges (contenant du sable fin, de l'oolithe, de la pisolithe ferreuse et du phosphate)

Cette couche a une épaisseur de 40 à 50 m dont 18 à 48 m correspond à la puissance du socle en calcaire. L'épaisseur accumulée des cinq dernière couches est de 10 m environ au maximum.

Dans le détroit Soudanais, cette couche s'étend sur le nord (côté extérieur) du fossé d'effondrement de Gao, non sur l'intérieur du fossé, Elle se compose du calcaire inférieur et de la roche argileuse supérieure. Le calcaire inférieur est supposé être équivalent à a) du bassin de Mali-Niger. En ce qui concerne la roche argileuse supérieure, on peut dire seulement qu'il correspond à une quelconque couches d), e) et f) précitées, du fait que le phosphate est contenu dans cette couche. Le calcaire inférieur a une puissance de quelques mètres à vingt et quelques mètres, la roche argileuse supérieure de 10 à 50 m. La présence de la roche argileuse n'est jamais constatée à Samit et à In Ouallen.

(5) Continental terminal (C.T)*¹

Ce terrain est largement répandu sur le bassin du Mali-Niger, le détroit Soudanais et la vallée du Tilemsi.

*1 D'après la définition par C. Killan, C.T signifie tous les dépôts continentaux formés à partir de la dernière transgression sur les régions sahariennes, sauf les terrains quaternaires.

Dans le bassin du Mali-Niger, il se divise en trois parties suivantes:

- a. roches de boue, sables fins et grès (contenant des oolithes ferreux).
- b. sables grossier et fins, roches de boue argileuses kaoliniques ou sableuses et vases grises et noires
- c. grès, vases et roches de boue rougeâtre

La partie "a", passant à la partie "b" avec une transition graduelle, a une puissance de 50 à 80 m. Parmi C.T, seul "b" est répandu dans la zone ouest du bassin Mali-Niger (zones appartenant au Mali). Le sondage réalisé à Digdiga au Niger a constaté que la puissance est de 180 m sur point. Sur l'affleurement au Mali, la puissance est égale ou inférieure à 20 m.

La partie "c" biseaute le soubassement et présente une cuesta élevée au bord sud du bassin du Mali-Niger. Sa puissance est de 100 à 200 m.

Dans le détroit Soudanais, ce terrain est divisé dans l'ordre de profondeur en:

- d. roches argileuses bariolées (contenant localement du gypse)
- e. grès (avec roche de boue et roche argileuse kaolinique; des couches d'oolithe ferreux éventuellement superposées sur une épaisseur importante)

La puissance est de 30 à 130 m à l'intérieur du fossé d'effondrement et de 5 à 10 m au nord (à l'extérieur) du fossé. Sur la zone située au nord-nord de la précédente, elle est de 35 à 50 m. Enfin, elle est de 15 m à la vallée du Tilemsi et, de 100 m au minimum à l'ouest (Azaouad).

(6) Quaternaire

Le quaternaire est divisé dans l'ordre de profondeur en:

- a. couche de sables d'un ton clair
- b. boues kaoliniques légèrement sableuses (contenant des matières ferreuses)

La couche "a", constituée par du sable dont la granulométrie est égale ou inférieure à 2 mm, a une puissance de 2 à 45 m. Dans les parties inférieure et moyenne, il existe des intercalations de galets de quartz contenant de l'argile brune. Cette couche se répandant sur la côte du fleuve Niger est une nappe aquifère importante.

La couche "b" a une puissance de 0,4 à 2,0m. La boue kaolinique est utilisée pour produire la brique de boue appelée "banko".

D'après un rapport, entre ces deux couches est présente une couche de sable et gravier considérée comme ancienne terrasse de la vallée du Tilemsi. Dans cette couche d'une puissance estimée de 0,2 à 1 m, les graviers sont cimentés par l'oxyde de fer. Mais, les détails sont inconnus. En plus des couches précitées, il existe des couches de sable et de gravier superposées dans les oueds s'étendant sur l'Adrar des Iforhas d'une façon arborisée, des dunes couvrant la presque moitié du détroit Soudanais, etc.

2. Prospection électrique

2-1 Prospection électrique à la surface du terrain (Fig. IV.2.2 à IV.2.21; Tableau IV.2.1 à IV.2.6)

Les eaux souterraines dans la 7^{ème} région économique peuvent être classifiées grosso modo dans les nappes phréatiques s'étendant le long du Niger et dans la zone rocheuse de Kidal, ainsi que dans les nappes artésiennes situées dans la région intérieure comme Djebok. Ci-dessous, sont récapitulés les résultats pour chacune des nappes souterraines.

(1) Résultats de mesure (Fig. IV.2.2 à IV.2.5; Tableau IV.2.1)

1) Nappes phréatiques (Gao, Bagoundje, Kidal)

Les figures de IV.2.2 à IV.2.5 représentent les résultats des prospections électriques menés dans les régions Gao et Bagoundje longeant le Niger.

La résistivité apparente diminue considérablement en fonction de la profondeur; des couches superficielles de haute résistivité sont apparemment distinguées de couches de faible résistivité largement réparties dans la profondeur. Par ailleurs, la région Alzana-Bandia dont le niveau statique est bas, correspond aux zones de très faible résistivité apparente figurant à la courbe de niveau de la nappe phréatique de Gao (figure IV.4.1) et ce, se rattachant peut-être à la présence d'une couche épaisse d'argiles qui s'étend jusqu'à proximité du terrain superficiel. Le tableau IV.2.1 représente les résistivités apparentes maximale et minimale enregistrées dans les régions Gao et Bagoundje.

D'autre part, les résultats obtenus dans la zone rocheuse de Kidal démontrent que la résistivité apparente tend à augmenter considérablement avec la profondeur. La raison en est que le rocher de soubassement présente une résistivité extrêmement supérieure par rapport à la couche humide de sables l'enveloppant. A Kidal, la résistivité apparente maximum a été de $1,129 \Omega \cdot m$ avec $AB/2 = 375$ m au maximum, tandis que la résistivité apparente minimum, $25,2 \Omega \cdot m$ avec $AB/2 = 9$ m.

2) Nappes artésiennes (Hamakouladji, Ansongo, Djebok) (Tableau IV.2.2)

Une courbe extrêmement décroissante de résistivité apparente, telle qu'enregistrée à Gao, ne se retrouve pas dans ces régions. Toutefois, celles-ci présentent une faible résistivité apparente dans l'ensemble du fait qu'elles sont principalement composées de couches d'argiles. Les résistivités apparentes maximum et minimum sont telles que représentées au tableau IV.2.2.

(2) Conclusions analytiques (Fig. IV.2.6 à IV.2.19)

1) Nappes phréatiques (Gao, Bagoundje, Kidal) (Fig. IV.2.8 à IV.2.14 et IV.2.19, Tableau IV.2.3)

La structure souterraine des régions Gao et Bagoundje est électriquement composée de 4 couches de résistivité. Le tableau IV.2.3 représente la résistivité de chacune de ces 4 couches qui est expliquée plus tard.

Les première et deuxième couches de résistivité sont composées de sables et graviers corrélatifs à ceux de la couche quaternaire. Particulièrement, la première couche a pour caractéristique une vaste gamme de fluctuations de résistivité (de 10 à 5.000 $\Omega \cdot m$). Une telle caractéristique provient du fait que la première couche est comparable à la couche de sables dans laquelle est répartie l'eau en quantités différentes, c'est-à-dire que les parties de haute résistivité composent une couche sèche de sables et les parties de faible résistivité, une couche de sables contenant de l'eau et une grande quantité de sel résiduel. La deuxième couche de résistivité est une couche relativement perméable de sables grossiers et fins ayant une épaisseur de 5 à 50 m, qui possède parfois la nappe aquifère à son fond. D'après les carottages électriques des puits de G-1 à G-10 et du puits B-1 creusés au cours de l'étude menée jusqu'ici, la résistivité de la nappe aquifère de la deuxième couche est estimée à une valeur comprise entre 80 et 250 Ωm . Dans presque tous les puits dans ces régions, l'eau est prise à partir de la nappe phréatique de cette couche.

La troisième couche d'une épaisseur comprise entre 70 et 150 m, étant donné sa faible résistivité (de 3 à 40 Ωm), est comparable à la couche d'argiles et, donc, supposée être difficilement perméable. Par conséquent, on peut compter sur le dépôt d'eaux souterraines à proximité de la bordure entre cette couche et la deuxième couche.

La quatrième couche de résistivité s'étend à une profondeur de 75 m ou plus à partir de la surface du terrain et peut être comparée à la couche de grès du fait de sa résistivité relativement élevée. Cependant, des forages n'ont pas mis sa formation géologique en évidence.

D'après les résultats qui précèdent, la nappe aquifère longeant le Niger existe vraisemblablement dans la deuxième couche de résistivité et la surface supérieure de la troisième couche de résistivité correspond, paraît-il, au fond de la nappe aquifère. De ce fait, il est concevable que la courbe isoprofondeur du fond de la troisième couche de résistivité dans la région Gao (Fig. IV.2.5) reflète l'épaisseur de la couche quaternaire. Cette courbe démontre que la surface inférieure de la deuxième couche de résistivité s'approche, en général, de la surface du terrain à mesure de la distance au Niger. Elle révèle également la présence des deux bandes de résistivité anormalement réduite, la première s'étend à une profondeur d'au moins 30 m au sud de la région Boulgoundje, à proximité du puits G-4 dans le nord et dans la région Gadeye et la deuxième traverse à Alzana-Bandia et Sosso-Koira à une profondeur de 10 m ou moins.

Les études menées au cours de la première année ont abouti à la conclusion que le local In-Tedenit de la région Kidal possède une structure souterraine composée de trois couches (Fig. IV.2.19); la première couche de résistivité relativement élevée pouvant être comparée à la couche sèche de sables, la deuxième couche de basse résistivité pouvant être comparée à la couche humide de sables; la troisième couche de très haute résistivité pouvant être comparée au rocher de soubassement (granit) de la région.

Par ailleurs, l'implantation des points de mesure dans une direction transversale à la rivière épuisée a permis de mettre en évidence la configuration des vallées souterraines et le mécanisme

Tableau IV.2.1 Résistivités apparentes maximale et minimale

(dans les nappes phréatiques)

Région		Résistivité Apparenté (Ωm)	Points de mesure	AB/2 (m)	Distance au Fleuve Niger (m)
Gao	Max.	4022	K-3	6	800
	Min.	3.9	N-12	80	1500
Bagoundje	Max.	4898	F-10	10	350
	Min.	14	A-6	250	180

Tableau IV.2.2 Résistivités apparentes maximale et minimale

(dans les nappes artésiennes)

Région		Résistivité Apparente (Ωm)	Points de mesure	AB/2 (m)
Hamakouladji	Max.	160	HA-3	3
	Min.	4,4	HD-2	20
Ausongo	Max.	468	F-11	3
	Min.	8,6	E-9	6
Djebok	Max.	171	DB-5	3
	Min.	5,8	DB-6	8

Tableau IV.2.3 Résultats analytiques de la région de Gao

Couche de resistivite	Profondeur (m)	Epaisseur (m)	Résistivité (Ωm)	Lithologie	
1ère couche		0 ~ 10	10 ~ 5000	Sables	Quaternaire
2ème couche	0 ~ 10	5 ~ 50	100 ~ 2000	Graviers ou gravillons	
3ème couche	5 ~ 50	70 ~ 150	3 ~ 40	Argiles ou argiles sableux	Tertiaire
4ème couche	>75		>50	Gres	

de réception d'eau dans la région.

2) Nappes artésiennes (Hamakouladji, Ansongo, Djebok) (Fig.IV.2.6, IV.2.7 et IV.2.15 à 18; Tableau IV.2.4 à IV.2.6)

La structure souterraine de ces régions est considérée comme étant électriquement composée de cinq couches. Les résultats analytiques pour les régions Hamakouladji, Ansongo et Djebok sont représentés, pour chacune des couches de résistivité, aux tableaux suivants (IV.2.4 à IV.2.6)

a) Région Hamakouladji (Fig. IV.2.6 et IV.2.7; Tableau IV.2.4)

Les résultats des études menées dans cette région sont tels qu'indiqués au tableau IV.2.4. On n'y trouve pas d'équivalent à la deuxième couche de résistivité à Gao. La raison en est que la couche argileuse, en raison de ses racines très profondes, empêche la pénétration d'eau depuis le fleuve Niger.

La première couche marque une gamme relativement étendue de résistivité, à savoir de 20 à 130 $\Omega \cdot m$; ceci se rattache, peut-être, à la quantité de sables contenus dans la couche d'argiles.

La deuxième couche présente une faible résistivité de 4 à 8 $\Omega \cdot m$ du fait de la présence de la couche d'argiles particulière à la région.

La troisième couche est une couche d'argiles identique à la deuxième couche, mais elle présente une résistivité relativement élevée, de 12 à 18 $\Omega \cdot m$, qui se retrouve également dans les résultats du carottage électrique (Ha-1) exécuté dans la région. A en juger par là, la présence de la nappe aquifère est probable, notamment à la bordure entre cette couche et la deuxième (à une profondeur de 65 à 88 m).

La quatrième couche présente une faible résistivité de 3 à 5 $\Omega \cdot m$ et peut être considérée comme étant équivalente à la couche d'argiles. Le carottage électrique précité a révélé également une très haute résistivité apparente à une profondeur de 102 à 112 m correspondant à la partie supérieure de la quatrième couche de résistivité; ceci fait penser à la possibilité de présence de la nappe aquifère à la bordure entre la troisième et la quatrième couches.

La cinquième couche présente une haute résistivité supérieure à 50 $\Omega \cdot m$ et sa limite supérieure est estimée à une profondeur d'au moins 170 m. D'un point de vue géologique, elle est supposée être composée de grès et calcaires du crétacé supérieur. Toutefois, les forages précédents n'arrivent pas à constater la structure géologique de cette cinquième couche.

b) Région Ansongo (figures IV.2.15 à IV.2.17; Tableau IV.2.5)

Il est déterminé par la résistivité que la structure souterraine de la région est composée de 4 couches sur une profondeur de 150 m. Le tableau IV.2.5 récapitule les résultats analytiques qui en découlent.

La première couche est comparée à la couche de sables répartie sur la surface du terrain et présente partiellement une faible résistivité. Il paraît que cette différence de résistivité dépendrait de la teneur en eau.

La deuxième couche possède la plus haute résistivité dans la région, à savoir de 40 à

Tableau IV.2.4 Résultats analytiques à Hamakouladji

Couche de résistivité	Profondeur(m)	Epaisseur(m)	Résistivité(Ω m)	Lithologie	
1 ^{ère} couche	0	0 ~ 15	20 ~ 130	Sables argileux	Tertiaire
2 ^{ème} couche	0 ~ 15	25 ~ 35	4 ~ 8	Argiles	
3 ^{ème} couche	25 ~ 50	50 ~ 75	12 ~ 18	Argiles et partiellement couches aquifères	
4 ^{ème} couche	80 ~ 100	80 ±	3 ~ 5	Argiles	
5 ^{ème} couche	> 170		> 50	Grès	

Tableau IV.2.5 Résultats analytiques à Ansonges

Couche de résistivité	Profondeur(m)	Epaisseur(m)	Résistivité(Ω m)	Lithologie	
1 ^{ère} couche	0	0 ~ 25	10 ~ 100	Sables	Quaternaire
2 ^{ème} couche	0 ~ 25	20 ~ 100	40 ~ 300	Grès silteux et couche aquifère partielle	Tertiaire
3 ^{ème} couche	10 ~ 100	50 ~ 80	30 ~ 100	Grès silteux, couche difficilement perméable	
4 ^{ème} couche	100		15 ~ 50		

Tableau IV.2.6 Résultats analytiques à Djebok

Couche de résistivité	Profondeur(m)	Epaisseur(m)	Résistivité(Ω m)	Lithologie	
1 ^{ère} couche	0	3 ~ 25	4 ~ 15	Sable et graviers argileux	Tertiaire
2 ^{ème} couche	3 ~ 25	10 ~ 40	25 ~ 50	Argiles et sables	
3 ^{ème} couche	25 ~ 60	50 ~ 80	10 ~ 16	Grès silteux et couche aquifère partielle	
4 ^{ème} couche	100 ±	50 ~ 100	3 ~ 9	Argiles	
5 ^{ème} couche	>150		20 ~ 90	Grès et calcaires	

300 $\Omega \cdot m$. Cette couche, bien qu'étant comparée à la couche d'argiles sableuses, est supposée être constituée par des couches alternatives de sables accompagnant parfois la nappe aquifère. La couche aquifère révélée au cours des carottages électriques des puits A-1 et A-2 fait partie de cette deuxième couche et sa résistivité apparente est de l'ordre de 100 $\Omega \cdot m$.

La troisième couche ayant une résistivité de 30 à 100 $\Omega \cdot m$ est comparée à la couche d'argiles sableuses. Toutefois, sa résistivité plus ou moins inférieure permet de penser que la bande de sables n'est pas aussi large que celle de la deuxième couche.

La quatrième couche répartie à une profondeur de 100 m environ, présente la plus faible résistivité dans la région, à savoir de 15 à 50 Ωm . La prospection menée cette fois-ci n'arrive pas à situer géologiquement cette couche. Cependant, les résultats des carottages électriques des puits A-1 et A-2 démontrent que la nappe aquifère ayant une résistivité apparente de 50 $\Omega \cdot m$ environ s'étend à proximité de la bordure entre cette couche et la troisième; la limite supérieure de cette couche est, en conséquence, significative dans la prospection d'eaux souterraines.

c) Région Djebok (Fig. IV.2.18; Tableau IV.2.6)

Comme l'indique le tableau IV.2.6, la région Djebok, bien que chacune de ses couches possède une résistivité inférieure à celles de la région de Gao (à nappe phréatique), présente une formation horizontale stable. Parmi les cinq couches de résistivité, la première et la deuxième, comparables à la partie supérieure de la couche tertiaire, sont constituées par des sables et graviers argileux de mauvaise perméabilité et par des argiles proprement dites. Si la première couche possède une résistivité inférieure à la deuxième couche, c'est parce qu'elle contient une plus grande quantité de sels résiduels.

La troisième couche qui peut être comparée à la couche d'argiles constituant la partie inférieure de la formation géologique du tertiaire, présente une épaisseur de 50 à 80 m et une résistivité de 10 à 16 $\Omega \cdot m$. Les carottages électriques dans le puits D-1 ont permis de constater une très haute résistivité apparente (20 à 40 $\Omega \cdot m$) en deux points à la partie inférieure de la troisième couche; ceci fait penser à une grande possibilité de présence de la nappe artésienne.

La quatrième couche de résistivité est comparable à la couche d'argiles de mauvaise perméabilité. Cette couche présente la plus faible résistivité dans la région, à savoir de 3 à 9 $\Omega \cdot m$. La bordure entre la quatrième couche et la troisième couche occupe une place très importante dans la prospection des eaux souterraines, particulièrement au niveau de la nappe artésienne.

La cinquième couche possède la plus haute résistivité dans la région, à savoir de 20 à 90 $\Omega \cdot m$. Elle est supposée être comparable aux grès et calcaires du crétacé supérieur. Toutefois, son existence n'est pas encore constatée par des forages.

(3) Remarques sur les modalités de prospection (Fig. IV.2.20 et IV.2.21)

1) Profondeur de mesure aux alentours de Gao

La surface supérieure de la couche dite difficilement perméable (soit la troisième couche de résistivité) de la région Gao s'est avérée présente à une profondeur d'au plus 50 m. De ce fait,

pour la nappe phréatique particulièrement le long du fleuve Niger, il suffirait de fixer la profondeur de mesure ($AB/2$) à 150 m.

2) Prospection électrique horizontale le long du fleuve Niger

Les résultats des essais et mesures de cette fois-ci ont montré que la prospection électrique horizontale à configuration de Wenner dans la zone longeant le fleuve Niger, ne nécessitant pas une analyse complexe, est une méthode très efficace pour la localisation des eaux souterraines. (Fig. IV.2.20)

La prospection électrique verticale menée en 1981 à l'aide de l'appareil de mesure (YEW 3244) a apporté des données dont la précision est affectée à une profondeur (a) égale ou supérieure à 50 m, car la structure géologique de la région se compose, dans l'ensemble, de couches de faible résistivité apparente. Il serait, cependant, possible d'obtenir des données de haute précision, si l'on utilisait des appareils de mesure plus performants, comme G-5003A, B et 7505 VSP de marque Yokohama Electronic par exemple, sur la base de la disposition à configuration de Wenner.

3) Profondeur de mesure et intervalle des points de mesure dans la nappe artésienne

D'après les résultats de mesure précédemment obtenus, la structure souterraine de la région est considérée comme étant uniforme. Il est donc plus efficace, pour la prospection de la nappe artésienne, d'implanter les points de mesure à un intervalle de 500 m à 1 km au lieu de l'intervalle de 50 à 100 m dans le but de recueillir des données sur une plus ample étendue de la région, et de mener, au besoin, une étude minutieuse à des intervalles conventionnels limités. De plus, il est conseillé d'écartier les électrodes de courant maximum à une distance de 800 à 1.000 m au lieu de 400 m.

4) Exemple de prospection dans le rocher de soubassement à Kidal

Les mesures d'essai exécutées au cours de la première année ont démontré que les eaux souterraines de la région déposent sur des cavités du rocher de soubassement. Il est en conséquence essentiel de saisir la configuration du rocher de soubassement à travers la prospection électrique.

A partir des résultats des mesures exécutées à In-Tedenit au cours de la première année a été obtenue une courbe VES caractérisant la présence du soubassement de haute résistivité apparente. La prospection électrique horizontale à configuration de Schlumberger basée sur la courbe VES doit permettre de situer la partie la plus profonde du rocher de soubassement. La courbe X représentée à la figure IV.2.21 est une courbe VES qui résulte des mesures réelles au point de mesure de prospection. La prospection horizontale s'effectuera sur la polygonale à deux intervalles des électrodes, à savoir $AB/2 = 40$ m et $AB/2 = 100$ m, en prenant ce point de mesure pour le centre. Dans ce cas, si la valeur de mesure obtenue peut être placée parmi les valeurs sur le côté A à la courbe VES, la surface supérieure du soubassement à ce point de mesure est considérée comme étant plus profonde que celle du point de référence; si la valeur obtenue

est placée parmi les valeurs sur le côté B, la surface supérieure du soubassement est considérée comme étant moins profonde que celle du point de référence. La prospection électrique horizontale à configuration de Wenner ne permet pas de déterminer la profondeur des couches géologiques; il faut ce fait, repérer un point de référence tous les 1 ou 2 km en déterminant la profondeur de la couche au préalable. La prospection horizontale doit alors avancer à un pas de 20 à 50 m particulièrement sur le tronçon entre les points de repère, pour localiser ainsi les cavités du rocher de soubassement.

2-2 Carottage électrique dans les forages (Fig. IV.3.1; tableau IV.2.7 et IV.2.8)

Les résultats des précédents carottages électriques dans les forages sont récapitulés comme suit: résultats concernant la nappe phréatique et résultats concernant la nappe artésienne. Toutefois, les résultats obtenus pour les forages A-1 et A-2 à Ansongo, bien que le dépôt d'eau souterraine ait été constaté sur ces deux nappes, ont été classés parmi les résultats concernant la nappe artésienne. D'autre part, les résultats sur le forage A-3 sont décrits sous le rubrique "Nappe artésienne" en dépit d'une grande possibilité de présence de la nappe phréatique.

(1) Carottage électrique dans la nappe phréatique (Forages G-1 à G-10 et B-1) (Fig. IV.3.1; Tableau IV.2.7)

Les résultats des carottages électriques dans la région où se trouve vraisemblablement la nappe phréatique, sont tels que représentés aux figures IV.3.1, tandis que les conclusions analytiques, au tableau IV.2.7. Pour tous les forages (G-2 à G-5, G-7 à G-10 et B-1) à l'exception des forages G-1 et G-6, des couches de résistivité apparente anormalement élevée (50 à 250 $\Omega \cdot m$) ont été constatées sur une profondeur de 13 à 35 m et des couches de faible résistivité n'ont été détectées qu'au delà de 35 m. Les premières correspondent à la deuxième couche de résistivité apparente, désignée par la prospection électrique à la surface du terrain, qui composée de sables relativement perméables et de graviers, peut comporter partiellement la nappe aquifère. Par ailleurs, les couches de faible résistivité correspondent à la troisième couche résultant de la prospection électrique à la surface du terrain de la région, qui est comparable à la couche difficilement perméable d'argiles.

Parmi les puits présentant une résistivité apparente anormalement élevée, les forages de G-7 à G-10 possèdent tous la résistivité apparente de crête à deux points, soit à proximité de la surface du terrain (niveau supérieur) et à une profondeur de 15 à 25 m (niveau inférieur). Dans la saison où le niveau d'eau du fleuve Niger descend, le niveau statique pourrait également descendre au-delà du niveau supérieur auquel est marquée la résistivité apparente de crête; dans ce sens, il est nécessaire de considérer la résistivité apparente pour son niveau inférieur plutôt que pour son niveau supérieur.

D'autre part, le forage G-6 présente une faible résistivité apparente de l'ordre de 20 $\Omega \cdot m$ qui varie peu sur une profondeur de 8 à 40 m. Ceci démontre que la couche peu perméable d'argiles

est répartie jusqu'à proximité de la surface du terrain. Egalement, le bilan d'eau dans cette région est considéré comme étant presque figé, du fait que la résistivité de l'eau souterraine dans ce forages est basse, soit de $8 \Omega \cdot m$.

Par ailleurs, le forage G-1 présente une résistivité apparente généralement limitée, allant de 16 à $28 \Omega \cdot m$; ses résistivités de crête de 25 à $28 \Omega \cdot m$, enregistrées à une profondeur de 11 à 22 m, témoignent, paraît-il, de la présence de la couche aquifère. Il est encore supposé que des parties ayant une résistivité apparente aussi faible existent sur une profondeur inférieure à 11 m. De même que pour le forage G-6, le forage G-1 est dominé par des couches d'argiles peu perméables et de sables argileux. Toutefois, l'eau souterraine du forage G-1 présente une haute résistivité apparente de $40 \Omega \cdot m$ et une bonne qualité, alors que l'eau du forage G-6, une faible résistivité de $8 \Omega \cdot m$ et une mauvaise qualité.

(2) Nappe artésienne (Forages Ha-1, A-1 à A-3*¹ et D-1) (Fig. IV.3.1; tableau IV.2.8)

Le tableau IV.2.8 représente les résultats analytiques sur la nappe artésienne.

Les carottages électriques de ces régions rapportent une résistivité apparente généralement inférieure à celle marquée dans les régions où la nappe phréatique est probable. La raison en réside peut-être dans la teneur en sel de l'eau souterraine et dans les couches d'argiles et de sables argileux.

1) Hamakouladji (Forage Ha-1)

Une résistivité apparente anormalement élevée (20 à $50 \Omega m$), accompagnant une polarisation spontanée anormale dans l'alternance négative, a été observée sur les trois sections de profondeur; de 45 à 50 m, de 75 à 87 m et de 102 à 111 m.

La résistivité anormale enregistrée sur une profondeur de 45 à 50 m correspond à la couche d'argiles sableuses sur la base des résultats des forages. Un seul puits foncé dans cette région atteint cette profondeur, mais il est laissé complètement inutilisé et l'eau s'y trouvant en dépôt présente une très faible résistivité apparente de $2 \Omega \cdot m$. A en juger par là, on ne peut pas compter sur une couche aquifère prometteuse.

Sur la section de profondeur de 75 à 87 m, la présence d'une couche d'argiles contenant des graviers est justifiée également par les résultats des forages; en outre, l'eau souterraine peut être espérée plus ou moins.

Les résultats des forages montrent que la résistivité anormale marquée sur le tronçon de 102 à 111 m correspond à la couche de sables et graviers, en justifiant ainsi la possibilité de présence d'une bonne couche aquifère.

Les résultats obtenus par la prospection électrique à la surface du terrain dans la région n'arrivent pas à faire ressortir la résistivité apparente anormalement élevée aux trois points précités. Cependant, à la bordure entre les deuxième et troisième couches, ont été constatée des résistivités anormales.

2) Ansongo (Forages A-1 à A-3)

Il a été détecté que le forage A-1 présente deux bandes de haute résistivité apparente, soit de 70 à 190 $\Omega \cdot m$ et de 40 à 80 $\Omega \cdot m$ respectivement sur une profondeur de 11 à 45 m et de 89 à 112 m et, de plus, une bande de basse résistivité apparente de 35 à 40 $\Omega \cdot m$ sur une profondeur de 45 à 89 m. A une profondeur de 23 m environ de la bande de haute résistivité apparente où la crête positive de polarisation spontanée et la résistivité apparente tendent à diminuer, pourrait être située une couche d'argiles sableuses contenant des matières organiques. La bande de basse résistivité apparente s'étendant sur une profondeur de 45 à 89 m correspond à la couche peu perméable d'argiles sableuses et de sables argileux. Par ailleurs, la bande de haute résistivité apparente s'étendant sur une profondeur de 89 à 112 m correspond à la couche bien perméable de graviers et sables qui pourrait être considérée comme une couche aquifère dans laquelle repose la nappe artésienne.

Quant au forage A-2, deux bandes de haute résistivité, soit de 80 à 180 $\Omega \cdot m$ et de 50 à 120 $\Omega \cdot m$, ont été détectées respectivement sur une profondeur de 17 à 52 m et de 115 à 133 m. De plus, une bande de basse résistivité apparente de 40 $\Omega \cdot m$ a été détectée sur une profondeur de 52 à 115 m. De même que pour le forage A-1, les bandes de haute résistivité témoignent de la présence de la nappe artésienne. La bande de basse résistance de la nappe artésienne. La bande de basse résistivité s'étendant sur une profondeur de 52 à 115 m correspond à celle du forage A-1, tandis que la crête positive anormale du polarisation spontanée marquée à une profondeur de 39 m environ correspond à celle du forage A-1 enregistrée à une profondeur de 23 m.

Le forage A-3 a marqué, sur toute sa profondeur, une bande de résistivité apparente supérieure par rapport à celle des forages A-1 et A-2. La bande de basse résistivité apparente observée à une profondeur de 45 m au plus correspond à la couche altérée du rocher de soubassement où les sables accompagnant parfois des graviers sont dominants. La bande de haute résistivité apparente s'étendant au-delà de 45 m correspond au soubassement principal de cette région composé de schistes cristallins, tandis que la bande de très haute résistivité d'au moins 300 $\Omega \cdot m$ observée au-delà de 80 m correspond au socle de quartzites.

3) Djebok (Forage D-1)

Une résistivité apparente anormalement élevée (10 $\Omega \cdot m$ à 40 $\Omega \cdot m$) accompagnant SP* anormal dans l'alternance négative, a été observée sur les trois sections de profondeur; de 22 à 38 m, de 79 à 89 m et de 94 à 37 m.

La résistivité anormale marquée sur une profondeur de 22 à 38 m peut être reliée à la présence de la couche de sables argileux d'après les résultats des forages. La résistivité anormale enregistrée sur une profondeur de 79 à 89 m et sur une profondeur de 94 à 97 m implique la présence de la nappe artésienne qui est également justifiée par les résultats des forages et par les informations provenant d'un puits existant éloigné de 200 m environ du forage D-1.

D'autre part, d'après les résultats de la prospection électrique à la surface du terrain à

* SP — polarisation spontance

Djebok, la résistivité anormale sur une profondeur de 22 à 38 m est supposée correspondre à la deuxième couche de résistivité, tandis que celle observée sur les deux autres tronçons, à la partie inférieure de la troisième couche de résistivité. La comparaison entre la troisième et la quatrième couches résultant de la subdivision d'une même couche d'argiles démontre également que la troisième possède une résistivité relativement plus élevée (10 à 15 $\Omega \cdot m$) par rapport à la quatrième.

(3) Problèmes et solutions au niveau de la prospection ultérieure

Etant donné que la couche d'argiles contrarie la progression de la sonde, le nettoyage du puits de sondage s'impose au cours de la mesure en affectant ainsi la qualité des données sur la polarisation spontanée.

Afin de faire face à un tel problème, la sonde est équipée d'un poids dans la mesure de la résistance limite du câble électrique à la tension; ceci n'a cependant pas d'effet définitif.

Egalement en ce qui concerne le traitement de l'eau boueuse et le nettoyage de l'intérieur de puits de sondage, il y a lieu de prendre les mesures appropriées en collaboration avec le personnel du forage.

3. Forages

3-1 Point de forage (Fig. IV.2.1 et Tableau IV.3.1)

16 forages ont été effectués sur une étendue de 40 km en sens E-O et de 120 km N-S. Le tableau IV.3.1 représente les points de forage et la profondeur de forage.

Tableau IV.3.1 Points et profondeur de forage

Forage	Pointe de forage						Profondeur de forage
	Cercle	Secteur	X	Y	Z(m)	Emplacement	
Ha-1	GAO	(H)amakouladji	0°06'W	16°36'N	257,0*	(H)amakouladji	120,0
G-1	GAO	Gao	0°03'W	16°15'N	253,8	Hydraulique Gao	105,0
G-2	GAO	Gao	0°03'W	16°15'N	249,7	Tiely – Coiré	60,0
G-3	GAO	Gao	0°03'W	16°18'N	251,8	Teney – Cora	150,6
G-4	GAO	Gao	0°03'W	16°15'N	256,6	Gao-Chatéan d'eau	60,0
G-5	GAO	Gao	0°03'W	16°15'N	250,5	Gao-Centrale électrique	60,2
G-6	GAO	Gao	0°03'W	16°16'N	252,4	Sosso-Koira	40,6
G-7	GAO	Gao	0°03'W	16°15'N	252,0	Bougoundié-Abaltoire	45,3
G-8	GAO	Gao	0°03'W	16°15'N	252,0	Bougoundié-Abaltoire	44,5
G-9	GAO	Gao	0°03'W	16°15'N	250,5	Bougoundié	40,0
G-10	GAO	Gao	0°03'W	16°15'N	252,0	Bougoundié	40,3
B-1	GAO	Bagoundie	0°01'W	16°13'N	254,0	Bagoundie	40,0
A-1	ANSONGO	Ansongo	0°30'E	15°40'N	254,5	Badji-Haoussa	124,0
A-2	ANSONGO	Ansongo	0°30'E	15°40'N	249,5	2 ^{ème} quartier	142,0
A-3	ANSONGO	Ansongo	0°30'E	15°40'N	247,0	1 ^{er} quartier	90,7
D-1	GAO	Djebok	0°17'E	16°20'N	279,0	Djebok	120,0

N.B.: * Valeur estimative proportionnellement répartie sur la base des 2 points connus au sud et au nord d'(H)amakouladji

X : Longitude Y : Latitude Z : Altitude

3-2 Résultats de sondage

1) Résultats de sondage par puits (Fig. IV.3.1 à 2, Tableau IV.3.2)

Le forage ayant été réalisé à l'aide d'un trépan à lames et d'un trépan tricône. la circonscription géologique a été jugée à partir du limon. Pour la limite géologique, on a utilisé la circonscription géologique a été jugée à partir du limon. Pour la limite géologique, on a utilisé la prélevés tous les 3 m pour les puits G-1 à 5 et A-1 à 3, et tous les 2 m pour les autres.

L'observation des limons ne permettant de distinguer le "tertiaire" et C.T,*1, on les désigne sous le seul nom "couche tertiaire" dans ce rapport.*2 La distinction du dépôt éolien d'avec les alluvions du fleuve Niger étant également impossible, on les réunit sous le nom de "couche quaternaire" correspondant à "quaternaire" mentionné au paragraphe 1-2 de ce Chapitre.;

(1) Forage Ha-1

Un terrain entier entre 0 et 120,0 m est de la couche tertiaire. Ce terrain est constitué par, dans l'ordre de profondeur, des argiles compactes (8,5 m), des sables peu argileux (10 m), des grès quartzeux (1 m), des argiles (13 m), des argiles et graviers latéritiques (12,5 m), des argiles compactes (25 m) — principalement gris —, des sables argileux (4,5 m), des argiles sableuses (4,5 m), des argiles (34,5 m) et des argiles latéritiques (6,5 m) — bruns —. Des nappes aquifères sont intercalées dans la couche d'argiles sableuses et de sables argileux bruns (à une profondeur de 41 à 50 m), la couche d'argiles gris et graviers latéritiques gris (à une profondeur de 75 à 87,5 m) et la couche de sables bruns peu argileux (à une profondeur de 101,5 à 111,5 m). Parmi ces nappes aquifères, la meilleure est celle située à une profondeur de 101,5 à 111,5 m. Le niveau statique est de 29,0 m. L'eau souterraine est en charge.

(2) Forage G-1.

La couche entre 0 et 19,5 m appartient à la couche quaternaire et celle entre 19,5 et 105,0m à la couche tertiaire. La première est constituée par, dans l'ordre de profondeur, de galets (6,35 m), de sables gris grossiers (2,53 m), de galets de quart (1,07 m), de sables gris grossiers (1,52 m) et de sables grossiers (8,03 m). Le fond de la couche quaternaire est constitué, en majeure partie, par des galets blancs de quartz dont la granulométrie est de 2 à 3 cm et, contient un peu de grès noirs ou bruns. La couche tertiaire, elle, est constituée par des grès fins vert-clairs à bruns (7,5 m), des argiles brunes contenant des granules (6 m), des argiles brunes (3 m), des argiles brunes et des sables à granules (3m), des grès fins vert-clairs à bruns (21 m), des argiles brunes (12 m), des grès fins vert-clairs à bruns (3 m), des argiles brunes (6 m), des grès fins vert-clairs à bruns (9m), des argiles compactes brunes (6m) et des grès fins vert-clairs à bruns (9 m).

La nappe aquifère appartient à la couche quaternaire et le niveau statique est de 11,0 m, L'eau souterraine est phréatique et la zone de saturations a une épaisseur de 8,5 m.

(3) Forage G-2

La couche entre 0 et 49,5 m fait partie de la couche quaternaire et celle entre 49,5 et 60,0m appartient à la couche tertiaire. La première est constituée par, dans l'ordre de profondeur, de galets (3m), d'argiles brunes avec galets (3m), de galets (18m) et de sables grossiers (25,5 m). Ces galets, d'une granulométrie de 0,5 à 2 cm, sont pour la plupart blanc et quartzeux avec des

*1 C.T : Continental terminal.

Cr.T : Crétacé terminal Voir le paragraphe 1,2 du Chapitre IV.

*2 Les détails sont mentionnés dans la description pour le forage D-1.

grès noirs en petite quantité. La couche tertiaire est constituée par des grès fins vert-clairs à bruns avec des substances argileuses brunes.

La nappe aquifère appartient à la couche quaternaire et le niveau statique est de 4,5 m. L'eau souterraine est phréatique et la zone de saturation a une épaisseur de 45 m (Par le carottage électrique, il s'est avéré que cette épaisseur est plus faible). Une fuite d'eau de refroidissement a été constatée sur une profondeur de 17,00 m de la couche quaternaire au cours du forage.

(4) Forage G-3

D'après le rapport établi l'année où le sondage a été exécuté, la couche quaternaire se trouve entre 0 et 55,5 m avec des intercalations d'argiles entre 19,5 et 37,5 m. Cependant, l'analyse a été effectuée à nouveau sur la base de données obtenues plus tard, et on en a déduit que la couche entre 0 et 19,5 m appartient à la couche quaternaire et celle entre 19,5 et 150,6 m à la couche tertiaire. La couche quaternaire est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des galets (6 m), des sables grossiers avec galets (3 m) et des sables grossiers (10,5 m). Les galets inférieurs sont quartzeux et ont une granulométrie de 5 à 7 mm. Les sables supérieurs sont quartzeux et ont une granulométrie de 1 à 2 mm. La couche tertiaire est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des grès fins vert-clairs à bruns (17,1 m), des argiles brunes (30 m), des argiles brunes à bleu-vert grisâtres (21 m) et des argiles brunes (63 m). Le lit inférieur de grès contient des argiles brunes. On rapporte que le lit le plus supérieur d'argiles brunes (à une profondeur de 19,5 à 82,50 m) contient des sables grossiers (18 m) et des galets quartzeux (3 m). Toutefois, cela se modifie par la description ci-dessus, du fait que ces argiles et sables contenus peuvent être considérés comme effondrements de la couche quaternaire d'après les résultats de carottage électrique et d'essai de pompage.

La nappe aquifère appartient à la couche quaternaire et le niveau statique est de 8,2 m. L'eau souterraine est nappe phréatique et la zone de saturation a une épaisseur de 11,3 m.

(5) Forage G-4

La couche entre 0 et 18 m appartient à la couche quaternaire et celle entre 18 et 60 m à la couche tertiaire (peut-être C.T). La couche quaternaire est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des sables fins bruns (puissance: 3 m), des sables grossiers et graviers jaunes (9 m) et des sables fins gris et leur boue (6 m). Les graviers dans le lit intermédiaire sont, en majeure partie, quartzeux et leur granulométrie est jugée inférieure à 2 ou 3 cm sur la base des données sur les puits de Gao et compte tenu de la circonstance géologique des alentours. Sur une profondeur de 0 à 3 m du lit supérieur le terrain devient plus argileux. Dans la couche tertiaire constituée principalement par des argiles sableuses brunes et parfois grises, il existe des grès verdâtres entre 36 et 39 m et des grès très fins à argiles gris-verdâtres entre 51 et 60 m. Les argiles sableuses étant douces et fragiles, les travaux de forage sont souvent entravés par leur gonflement dans le tubage.

La nappe aquifère est un lit de sables de la couche quaternaire et le niveau statique est de 13,3 m. L'eau souterraine est nappe phréatique et la zone de saturation a une épaisseur de 4,7 m.

(6) Forage G-5

La couche entre 0 et 14 m appartient à la couche quaternaire et celle entre 24 et 60,2 m à la couche tertiaire (peut-être C.T). La couche quaternaire est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des gravillons latéritiques (puissance: 6 m), des gravillons latéritiques avec argiles rougeâtres (3 m), des sables fins jaunes à bruns clairs (6 m), des gravillons et sables bruns foncés (3 m) et des sables fins blancs (6 m). Le niveau de démarcation entre la partie inférieure en gravillons et la partie supérieure en sables est à 15 m au-dessous de la surface de la terre. La couche tertiaire est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des argiles rougeâtres et quelques gravillons latéritiques (12 m), des argiles grisâtres (6 m) et des argiles sableuses brunes et gravillons latéritiques (18 m).

La nappe aquifère est un lit de sables de la couche quaternaire. Etant donné que 2 forages et 1 puits foncé existent dans un rayon de 45 m autour du forage G-5 et qu'il sont actuellement en cours de pompage, le niveau statique correct ne peut être obtenu. On adopte dans ce rapport un niveau statique de 6,2 m constaté lors de l'essai de pompage. Toutefois, on peut considérer que le niveau statique réel est presque identique à celui du forage G-2 foré en 1979 (4,5 m). L'eau souterraine est nappe phréatique et la zone de saturation a une épaisseur de 17,8 m.

(7) Forage G-6

La couche entre 0 et 20 m fait partie de la couche quaternaire et celle entre 20 et 40,6 m appartient à la couche tertiaire. La première est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des sables grossiers argileux (4 m), des sables argileux avec gravillons (4 m), des sables argileux (2 m), des sables moyennes argileux (2 m), des sables de granulométries moyennes (4 m), des sables fins (2,5 m) et des sables et peu argileux (1,5 m). Cette couche est jaune à brune. Ces sables sont quartzeux. Des gravillons sont présents sur une profondeur de 12 à 20 m. La couche tertiaire est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des argiles (8,6 m), des argiles avec sables (2 m), des argiles (4 m) et des argiles sableuses (6 m). Cette couche est brune. Des argiles sableuses sont présentes sur une profondeur de 20 à 26 m. Et, entre 22 et 24 m, la quantité de sable augmente légèrement.

La structure géologique générale de Gao est caractérisée par la superposition de la couche quaternaire de sables et graviers (dont une partie est la zone de saturation) sur la couche tertiaire d'argiles douces. Mais, dans ce puits, la couche tertiaire et la couche quaternaire, toutes deux, sont argileuses.

La présence d'une nappe aquifère distincte n'est pas constatée dans ce puits. Le niveau statique d'eau souterraine existant en faible quantité est de 13,5 m. Sur ce point, les détails sont mentionnés au paragraphe IV.4.1

(8) Forage G-7.

La couche entre 0 et 35,5 m appartient à la couche quaternaire et celle entre 35,5 et 45,3 m à la couche tertiaire. La première est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des argiles avec des galets moyens de quartz et de latérites (9,5 m), des sables à granulométries avec des

grains quartzeux et latéritiques (7 m), des sables moyens et des graviers fins (3,5 m), des argiles sableuses (2 m), des sables fins (3,5 m), des sables moyens (4 m) et des sables grossiers et gréseux (6 m). Cette couche présente une couleur brune. Les argiles accompagnées de galets moyens de quartz et de latérites sont réparties presque régulièrement sur la partie inférieure (ou ses alentours) de la couche quaternaire de Gao. Une Strate d'argiles sableuses est présente à une profondeur de 13,5 à 15,5 m. Mais, aucune strate comparable à cette strate n'est présente dans les autres forages situés aux environs. La couche tertiaire est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des argiles brunes (7,3 m) et des argiles grises (2,5 m).

La nappe aquifère est un lit des sables de la couche quaternaire et le niveau statique est de 4,9 m. L'eau souterraine est nappe phréatique et la zone de saturation a une épaisseur de 21 m.

(9) Forage G-8

La couche entre 0 et 36 m appartient à la couche quaternaire et celle entre 36 et 44,5 m à la couche tertiaire. La première est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des sables fins à très fins (10 m), des sables moyens (2 m), des graviers (10 m), des sables fins à très fins (6 m), des sables moyens (6 m) et des sables argileux (2 m). Cette couche présente une couleur brune à rougeâtre et grisâtre sur le fond. Dans ce forage, on ne constate pas la présence d'argiles brunes accompagnées de galets quartzeux réparties sur la partie inférieure (ou ses alentours) de la couche quaternaire. La couche tertiaire est constituée par des argiles (8,5 m) qui sont rougeâtres à une profondeur de 36,0 à 42,5 m et gris-noirâtres à une profondeur de 42,5 à 44,5 m.

La nappe aquifère est un lit de sables et graviers et le niveau statique est de 4,2 m. L'eau souterraine est nappe phréatique et la zone de saturation a une épaisseur de 32 m.

(10) Forage G-9

La couche entre 0 et 27 m appartient à la couche quaternaire et celle entre 27 et 40 m à la couche tertiaire. La première est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des argiles avec gravillons latéritiques (3 m), des sables grossiers (7 m), des graviers siliceux avec gravillons latéritiques (8 m), des sables moyens (2 m), des sables grossiers (3 m), des sables argileux (2 m) et des argiles très peu sableuses (2 m). Cette couche est de couleurs brune et rose. La couche tertiaire est constituée par des argiles brun jaunâtres (13 m).

La nappe aquifère est composée de graviers de la couche quaternaires, et le niveau statique est de 4,3 m. L'eau souterraine est nappe phréatique et la zone de saturation a une épaisseur de 20 m.

(11) Forage G-10.

La couche entre 0 et 20 m appartient à la couche quaternaire et celle entre 20 et 40,3 m à la couche tertiaire. La première est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des graviers siliceux et latéritiques (4 m), des sables moyens (2 m), des graviers siliceux et latéritiques (8 m), des graviers siliceux (2 m), des sables moyens (2 m) et des sables fins (2 m). Cette couche présente une couleur brune à jaune. La couche tertiaire est constituée par des argiles (20,3 m) et présente

une couleur grise, rougeâtre et brune de bas en haut.

La nappe aquifère est composée des sables et graviers de la couche quaternaire et le niveau statique est de 4,3 m. La zone de saturation a une épaisseur de 16 m.

(12) Forage B-1.

La couche entre 0 et 28 m appartient à la couche quaternaire et celle entre 28 et 40,0m à la couche tertiaire. La première est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des galets de quartz et argiles (2m), des sables grossiers et gravillons latéritiques (8m), des sables grossiers (6m), des sables fins (2 m), des sables grossiers (8 m) et des sables (2 m) La couche tertiaire est constituée par des argiles compactes (11,8 m).

La nappe aquifère est composée de graviers de la couche quaternaire et le niveau statique est de 4,3 m. La zone de saturation a une épaisseur de 22 m.

(13) Forage A-1

La couche entre 0 et 9 m appartient à la couche quaternaire et celle entre 9 et 124 m à la couche tertiaire (peut-être C.T). La première est constituée par des sables bruns fins à moyens et présente une couleur un peu noirâtre entre 3 et 6 m. Parmi les puits foncés à Ansongo, certains situés près du fleuve Niger ont un niveau statique de 9m environ. Il semble que l'eau souterraine est obtenue à partir du fond d'un lit de sables de la couche quaternaires, Donc, on considère les environs du fond de la couche quaternaire comme nappe aquifère. Mais le niveau statique dans le forage A-1 est rélement plus bas à la limite inférieure de la couche quaternaire. La couche tertiaire est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des sables fins à grossiers (puissance: 19 m), des galets (15 m), des sables argileux (9 m), des argiles sableuses (60 m), des argiles avec graviers de quartz (11 m) et des argiles sableuses (2 m). Cette couche est caractérisée par un changement distinct de couleur sur une profondeur de 81 (blanchâtre au-dessus de cette profondeur et rougeâtre au-dessous de cette profondeur). La zone entre 21 et 27 m (partie blanchâtre) correspond à une couche gris-foncé contenant des matières organiques, qui peut servir de ligne de démarcation entre les époques géologiques. En ce que concerne la couche blanche dit "argiles" à Ansongo, elle peut-être considérée comme alternance des states de grès silteux (ou vase) et sable (ou grès), du fait que la paroi de forage est bien portée et qu'une nappe aquifère est présente dans la couche d'argiles sableuses par suite du carottage électrique.

Les couches aquifères sont entre 27 et 42 m (alternance rythmique des couches de sables-vases), celle entre 90 et 123 (galets et sables) et celle entre 8 et 21 m (pour la raison sus-mentionnée). Bien que la zone entre 8 et 21 m soit constituée par des sables de la couche quaternaire et de la couche tertiaire, la division géologique n'est pas effectuée, car il y a peu de différence entre les qualités d'eau obtenues à deux puits foncés pénétrant respectivement dans ces deux couches, Cependant, le niveau statique dans ce forage est de 12,1 m (situé dans la couche tertiaire), du fait de la faible pression d'eau artésienne dans la couche tertiaire.

(14) Forage A-2

La couche entre 0 et 3 m appartient à la couche quaternaire et celle entre 3 et 142 m à la couche tertiaire. La première contient des galets et éléments altérés (à l'origine des grès argileux blancs de niveau inférieur) en quantité non négligeable. La couche tertiaire est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des sables argileux rouges (puissance: 10 m), des galets de quartz et cailloux grossiers à moyens (9 m), des galets de quartz (6 m), des sables argileux ou argiles sableuses (36 m), des sables fins (6 m) et des argiles sableuses (63 m). La couleur est blanchâtre au-dessus d'une profondeur de 132m et rougeâtre au-dessous de cette profondeur. Pour ce forage, les couches de galets sont présents sur la partie la plus basse de la zone blanchâtre. En cas de forage A-1, les couches appartiennent à la zone rougeâtre. En cas de ce forage, la partie entre 36 et 42 m dans la zone blanchâtre présente des couleurs telles que blanc bariolé gris et gris foncé. On a rapporté que pendant ce forage, il s'était produit une grande quantité de bulles de gaz au cours du pompage, une mauvaise odeur de boues évacuées après l'essai de pompage, et un son d'explosion lors du coupage du tubage. Compte tenu de ce qui précède, on peut estimer que la partie précitée gris foncé est riche en matières organiques et que le gaz produit est du méthane. Cette partie est comparable à la partie gris-foncé du forage A-1. Mais, la Production de bulles de gaz en grande quantité n'a pas été constatée au forage A-1. La plupart des argiles sableuses dans le forage A-2 semblent être corrélatives avec les grès silteux blancs affleurant aux alentours. La variation détaillée de couleurs de la Partie supérieure des couches tertiaires des forage A-1 et A-2 correspond au changement de couleurs estimé sur la base du croquis "falaises nord-est le long de l'autoroute principale Ansongo-Gao", indiqué dans le rapport d'étude préliminaire de ce projet. Des couches existant au moins au-dessus de la partie gris foncé sont comparables à C.T. Les couches de galets sont quartzeux en majeure partie et, certains galets sont à l'origine des schistes cristallins.

Les nappes aquifères sont entre 42 et 65 m (alternance rythmique des couches de vases-sables), entre 117 et 132 m (galets et sables) et celle entre 17 et 36 m (alternance des couches de vases-sables). Le niveau statique de ce forage est de 19,6m, tandis que celui d'un puits foncé à 70 m environ de ce forage est de 15,3 m. Cela démontre que la pression d'eau artésienne sur un bas niveau faible.

(15) Forage A-3

La couche entre 0 et 46m est constituée par des roches altérées de soubassement, et la couche entre 46 et 90,7 par des roches de soubassement dont les éléments principaux sont des biotites schistes et des quartzites. Les roches de soubassement sont estimées infracambriennes. Il est difficile de tracer correctement la ligne de démarcation entre les roches de soubassement altérées et non altérées. Sur la base des rapports de fouille et des résultats de carottage électrique, on a tracé cette ligne sur une profondeur de 46 m. La zone entre 0 et 4 m est considérée comme un nouveau talus.

La couche entre 31 et 46 m est constituée par des galets de biotite schistes, et la couche entre 18 et 31 m, du même faciès, présente une couleur brunne. Au-dessus d'une profondeur de 18 m, il existe des boues brunes ou jaunes et des sables et graviers de même couleur. Les roches de soubassement sont des quartzites très durs blancs entre 87 et 90,7 m, et des biotites schistes vert foncé uniformes. On a rapporté que la dissémination de pyrites a été constatée dans cette couche et qu'on a senti fréquemment la variation de dureté et de fragilité au cours du forage.

La zone aquifère est présente entre 26,5 et 46 m. Mais, le débit d'eau est faible et la qualité d'eau est inférieure.

(16) Forrage D-1

La couche entre 0 et 2m appartient à la couche quaternaire et celle entre 2 et 120m à la couche tertiaire. La première est constituée par des argiles et des graviers argileux et latéritiques de 2 à 3 cm. La couche tertiaire est constituée par, dans l'ordre de profondeur, des argiles sableuses (36 m), des sables argileux avec colithes (4 m), des argiles (14 m), des argiles gréseuses (6 m), des argiles (14 m) — noirs à gris verdâtre —, des argiles jaunâtres, oolithes noires (6 m), un alternance de grès blanc et d'oolithes noires (6 m), des sables argileux oolithiques (12 m), des argiles avec colithes (14 m) et des argiles feuilletées (6 m) — jaunes à blanches —. Les nappes aquifères sont la couche de sables argileux noirs à gris verdâtres avec oolithes (entre 80 et 84 m) et la couche d'argiles sableuses (93 et 97 m). Le carottage a décelé une anomalie entre 22 et 34 m, mais cette zone n'est pas aquifère. La niveau statique est de 57,5m et l'eau souterraine est en charge.

D'après les documents existants, à Djebok la ligne de démarcation entre la couche tertiaire et la couche de crétaé supérieur se trouve sur une profondeur de 80 m environ et, la couche de calcaires de crétaé supérieur située juste au-dessous de cette profondeur est une couche aquifère. "L'Opération puits (1975)" a foré un puits foncé d'une profondeur de 80 m. Cette investigation lui a permis de juger que la couche C.T (couche tertiaire) se trouve entre 10 et 80m, et que la zone entre 70 et 80 m est une nappe aquifère. Dans ce rapport, nous adoptons un jugement similaire à celui de l'Opération puits pour les raisons suivantes:

- 1 La Différence géologique nécessitant la distinction d'époque n'est pas constatée sur une profondeur de 80 m ou aux alentours de forage D-1.
- 2 Les roches argileuses et roches argileuses noires correspondent à Cr.T de la couche de crétaé supérieur. Mais, elles sont présentes dans d'autres couches. Cela est donc insuffisant pour déterminer l'époque.
- 3 Par contre, les oolithes similaires à ceux visés au Paragraphe 1-2 "(4) Tertiaire b. Partie supérieure paléocène et yprésienne, e) et f)" sont présents en grande quantité dans le forage D-1. On ne peut pas affirmer que les oolithes du bassin de Mali-Niger

sont corrélatifs à ceux de cette région. Cependant, il est possible que des couches de cette époque soient présentes à Djebok (côté intérieur du fossé d'effondrement de Gao), compte tenu du fait que des couches corrélatives sont réparties au nord du fossé (côté extérieur).

- 4 Nous avons mentionné la présence d'oolithes au paragraphe 1-2 "(5) Continental terminal (C.T), a et b" Dans le paragraphe précité, nous avons dit que les roches C.T sont relativement sableuses.

La couche entre 2 et 120 m du forage D--1 est probablement "tertiaire", car elle contient des colithes et est argileuse. La distinction détaillée des couches étant difficile par l'observation des limons prélevés, on désigne "le tertiaire" et "C.T" sous le seul nom "couche tertiaire", sauf dans le paragraphe 1-2 du chapitre IV.

L'aperçu des résultats est montré sur la Fig. IV.3.2 et dans le Tableau IV.3.2.

Tableau IV.3.2 Aperçu géologique des régions ayant fait l'objet des recherches

Couche	Lithologie	Caractéristiques	Puissance(m)
Couche quaternaire	Sables et graviers	Des graviers de quartz et des argiles brunes sont présents sur le fond et à ses environs.	0 ~ 49,5
Couche tertiaire	Argiles brunes	Argiles particulières à Gao, partiellement avec des intercalations de grès vert clair.	8,5 ~ 139
	Grès silteux et sables et graviers.	Blanc à gris à brun clair. Gravier de quartz	
Infracambrien	Roches métamorphiques	Biotites-schistes, quartzites, avec zone altérée.	71,7

Parmi les roches de soubassement, les roches métamorphiques infracambriennes provenant du massif de Gourma affleurent à Ansongo. Sur A-3, un sondage a été effectué à une profondeur de 44,7 m au-dessous de la zone altérée atteignant une profondeur de 31 m. Par suite du forage, on a constaté que l'eau du fleuve Niger ne s'introduit pas dans la zone altérée et que l'eau provenant de la fissure n'est pas présente dans les roches métamorphiques.

La présence de C.I n'a pas été constatée à l'occasion de cette reconnaissance, car C.I est répandu sur le côté est de l'Adrar des Iforhas.

Les Recherches réalisées jusqu'à présent n'ont pas montré l'existence de Cr. T comme constituant la partie supérieure du crétacé supérieur (couche aquifère) et des strates appartenant à "la couche crétacé supérieur".

L'épaisseur constatée de la couche tertiaire est de 120 m à Hamakouladji, 8,5 à 131,1 m

à Gao, 12, 2 m à Bagoundje, 115 à 139 m à Ansongo et 118 m à Djebok. La puissance réelle est supérieure à ces valeurs, du fait que le sondage n'a pas atteint le fond de la couche tertiaire. Cette couche est la couche aquifère principale pour Hamakouladji, Ansongo et Djebok.

L'épaisseur constatée de la couche quaternaire est de 18 à 49,5 m à Gao, 28 m à Bagoundje, 3 à 9 m à Ansongo et 2 m à Djebok. Cette couche est la couche aquifère principale pour Gao et Bagoundje.

2) Constante hydraulique des couches aquifères (Fig. IV.3.3 à 4, Tableau IV.3.3 à 4)

Les nappes aquifères découvertes par cette recherche sont divisées en celles appartenant à la couche tertiaire, celles appartenant à la couche quaternaire et celles appartenant à la zone altérée infracambrienne. Il n'est pas question ici de ces dernières, car leur débit d'eau est faible.

(i) Nappes aquifères de la couche tertiaire

Les nappes aquifères de la couche tertiaire sont constituées par des sables argileux, des graviers argileux et, partiellement des argiles sableuses (constatées par le carottage électrique). A Ansongo, il existe une couche de graviers et une couche de sables (sans argiles ou avec très peu d'argiles) et leur épaisseur cumulée s'élève à 33 m. L'eau souterraine dans ces nappes aquifères est en charge.

Tableau IV.3.3 Nappes aquifères^{*a} dans la couche tertiaire et leur altitude

Nappe aquifère	Région ayant fait l'objet de la reconnaissance			Autres régions similaires	
	Hamakouladji	Amsongo	Djebok	*4.1 Argabeche	*4.2 Tin ténéran
Altitude du point de sondage	257,0 m	251,8 m	279,0 m	261,6 m	290,0 m
Nappe aquifère 1 ^{*1}	** 209	*** 229	** 251		*2 242
Nappe aquifère 2	178	206	197	*3 194	208
Nappe aquifère 3	151	141	184	171	—

*1 Plus exactement, "couches pouvant devenir nappes aquifères"

*2 Fond de la couche aquifère

*3 On ne sait pas pour quelle partie de la nappe aquifère.
Altitude à mi-épaisseur de la nappe aquifère, sauf *2 et *3

*4 ,1 Argabeche or Ag Arbech
,2 Tin Ténéran

** Absence d'eau souterraine

*** Débit d'eau souterraine estimé faible

*a Nous faisons remarquer qu'une nappe aquifère dans une région n'est pas toujours collatérale à celle de même numéro dans une autre région.

Dans la couche tertiaire sont présentes au moins 3 couches pouvant être nappes aquifères au point de vue géologique. On estime que (la nappe aquifère 1) la plus supérieure parmi ces 3 couches ne contient aucune eau souterraine ou très peu d'eau souterraine.

Compte tenu de ce qui précède, on peut considérer que cette eau souterraine est locale, ne provenant pas de loin. Pour le projet de développement local des eaux souterraines, on peut considérer l'utilisation de la nappe aquifère 1. Par contre, pour le projet de développement des eaux souterraines sur une zone étendue, il y a lieu de mettre en valeur les couches aquifères 2 et 3.

La nappe aquifère 2 et la nappe aquifère 3 sont situées respectivement entre 40 et 90 m et entre 90 et 110 m. En cas de pompage combiné à partir de ces deux nappes, on peut s'attendre à un débit critique total de 2 à 12 m³/h. Dans ce cas, le débit spécifique est de 0,1 à 0,5 m³/h/m et, 2 m³/h/m à Argabeche.

(ii) Nappes aquifères de la couche quaternaire

Les nappes aquifères de la couche quaternaire sont constituées par des sables fins à grossiers et des graviers et, éventuellement accompagnées de lentilles d'argiles brunes sur leur fond ou juste au-dessus du fond. L'eau souterraine de ces nappes aquifères est phréatique et le fleuve Niger les alimente en eau.

D'après les résultats des forages effectués jusqu'à présent, le niveau du fond de la couche de graviers est bas sur le côté fleuve Niger et haut sur le côté de la région intérieure. Le niveau statique a une tendance inverse: la zone de saturation est épaisse près du fleuve Niger et mince du côté de la région intérieure.

Le fond de la couche de graviers est situé sur une profondeur de 19 à 50 m près du Niger et de 19 à 20 m dans la région intérieure à 450 à 800 de ce fleuve.

Le niveau statique est de 4 à 8 m près du Niger et 11 à 14 sur le côté région intérieure.

L'épaisseur de la zone de saturation est de 11 à 45 m (environ 20 m en moyenne) et seulement de 4 à 14 m sur le côté de la région intérieure.

Le débit critique des nappes aquifères de la couche quaternaire est généralement de 3,5 à 12 m³/h, et dans ce cas le débit spécifique est de 0,4 à 6,3 m³/h/m. Aux forages G-7 et G-10, le débit critique s'élève à 12 m³/h ou plus, et dans ce cas le débit spécifique est de 2,7 à 6,3 m³/h/m. Aux forages G-1 et G-6, le débit critique et le débit spécifique sont moins importants, du fait que ces forages sont situés sur une zone intérieure par rapport aux autres forages de série G et B et, les conditions géologiques telles que l'épaisseur de la zone de saturation sont donc moins favorables.

Les Fig. IV.3.3 et 4 montrent les résultats d'essai de pompage aux forage foré représentatif, le Tableau IV.3.4 les résultats des essais des nappes aquifère de chaque forage.

3) Qualité d'eau souterraine (Fig. 3.5~, Tableau IV.3.5)

Geological Survey of Japan a effectué l'examen de qualité sur les échantillons d'eau prélevés au cours de l'essai de pompage. Les échantillons sont au nombre de 7 dont 1 est infracambrien, 4 couches tertiaires et 2 couches quaternaires. Les résultats d'examen sont tels qu'indiqués dans le. Fig. IV.3.5~6 et Tableau IV.3.5.

(i) Caractéristiques des composants chimiques

Parmi les 7 échantillons d'eau, une teneur en matières dissoutes la plus élevée a été constatée sur G-6, suivi de Ha-1, A-3, In-Aoukert, A-1, G-2 et G-7.

L'échantillon G-6, prélevé dans la partie presque centrale de l'agglomération de Gao, contient des ions d'acide nitrique et du sodium en quantité considérable. Les caractéristiques de ces composants chimiques sont analogues à celles du salpêtre du chili.

Quant à EC (conductibilité électrique) des autres 6 échantillons d'eau, elle est de 1.100 à 1.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C) sauf A-1 (couche tertiaire) et couche quaternaire. Le résidu sec de 1 g/l marque la limite entre l'eau douce et l'eau saline. Cette valeur correspond à une conductibilité électrique de 1.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On peut donc dire que l'eau souterraine dans les couches tertiaires et infracambriennes est une eau dont la nature est voisine de celle de l'eau saline.

L'eau souterraine de la couche infracambrienne contient des éléments dissous, en particulier, des ions d'acide bicarbonique, des ions d'acide sulfurique, du calcium et du magnésium.

L'eau souterraine de la couche tertiaire est caractérisée par la haute teneur en ions d'acide sulfurique, calcium, magnésium (In-Aoukert), ions de chlorure et sodium (Ha-1).

L'eau souterraine de la couche quaternaire contient très peu de matières dissoutes.

La Fig. IV.3.5 indique la quantité de matières dissoutes. D'après cette figure, on peut comprendre que l'eau souterraine quaternaire est complètement différente des autres eaux et que les eaux

souterraines de couche tertiaire et infracambrienne contiennent plus d'ions d'acide sulfurique que l'eau souterraine de couche quaternaire.

L'eau souterraine d'Ansongo (A-1 et A-3 (infracambrien)) est riche en fer. Un dépôt de sulfate ferreux et un dépôt d'oxyde de fer ont été constatés respectivement sur l'échantillon d'eau infracambrienne et celui A-1 à l'aide du contrôle visuel. Mais, des bactéries de fer n'ont pas constatées dans ces deux échantillons.

(ii) Type de qualité d'eau

Pour savoir les types de qualité d'eau des 7 échantillons, on a établi la Fig. IV.3.6. D'après ce tableau, la qualité d'eau peut être divisée en gros en 3 types différents:

Type Ca-HCO₃ : G-2 et G-7

Type CA-SO₄ : A-1 et In-Aoukert

Type Na-Cl : HA-1 et G-6

A-3 est du type intermédiaire entre Ca-HCO_3 et Ca-SO_4 .

Le type Ca-HCO_3 étant similaire à celui constaté à la source d'eau souterraine (source d'alimentation), on peut considérer que la nappe aquifère de Gao (eau de couche quaternaire telle que G-2 et G-7) est suffisamment alimentée en eau par le Niger.

Pour ce qui concerne le type Na-Cl , la source des ions de chlorure n'est pas encore déterminée. On espère que cette source sera décelée à l'avenir par le développement des eaux souterraines dans le dépôt marin crétacé.

4. Eaux souterraines de Gao et d'ansongo

4-1 Emmagasinage des eaux souterraines de Gao (Fig. IV.4.1 à 4, Tableau IV.4.1)

Le terrain de Gao étant généralement plat, la courbe isopiesométrie de la nappe phréatique et la courbe d'isoprosopondeur de la nappe phréatique présentent une configuration presque identique. Ces courbes sont presque parallèles aux rives du Niger et présentent un niveau supérieur sur le côté fleuve et un niveau inférieur sur le côté région intérieure. Le gradient hydraulique est de 0,01 environ sur une zone à moins de 500 m du fleuve et, de 0,001 environ sur une zone à 500 m à 2.000 m du fleuve.

Le niveau d'eau souterraine varie suivant la saison, comme le montre la Fig. IV.4.3. iA, B et C dans cette figure représentent les puits forés observés qui sont disposés presque perpendiculairement au fleuve Niger. Les distances entre ces puits et le fleuve sont telles qu'indiquées dans le Tableau IV.4.1. Les valeurs données en bas de la figure représentent les profondeurs des puits, les marges "x" les niveaux statiques. La mesure a été effectuée tous les jours par les habitants sur place sous notre direction. Mais, on a donné sur la figure les valeurs de mesure de tous les 5 jours.

Tableau IV.4.1 Niveau du fleuve Niger et niveau statique des puits forés de Gao

Point de mesure	Profondeur de puits	Distance du fleuve Niger	Niveau statique*		Fluctuation en cours d'année	Emplacement
			Maxi. (m)	Mini. (m)		
Fleuve Niger	—	—	3,86	0	3,8	—
A	5,93	170	4,2	5,7	1,5	A 100 m environ au nord du forage G-2
B	7,63	240	6,2	7,3	1,1	A mi-chemin entre A et C
C	13,35	420	8,9	9,4	0,5	Direction hydraulique de Gao

* Profondeur de l'eau uniquement pour le fleuve Niger

D'après le niveau du fleuve Niger donné sur la Fig. IV.4.3 on peut voir que:

- le niveau statique est haut près du fleuve Niger et, bas sur le côté région intérieure.
- la variation de niveau d'eau souterraine est en corrélation positive avec celle de niveau du fleuve et celui-ci est influencé par le niveau du fleuve d'autant plus rapidement que la distance du fleuve est moins importante.
- la variation de niveau d'eau souterraine est d'autant plus petite que la distance du fleuve est plus importante.

- d. le niveau d'eau souterraine est influencé par la chute de pluie et l'influence est plus prolongée dans la région intérieure.
- a: Cela est indiscutable d'après cette figure.
- b: Entre le changement de niveau du fleuve et le changement d'eau souterraine, on constate un décalage de 0,5 à 3 mois (côté fleuve à côté région intérieure) en cas de niveau maximum et un décalage de 1 à 4 mois (côté fleuve à côté région intérieure) en cas de niveau minimum.
- c: La variation de niveau d'eau souterraine est de 1,5 à 0,5 m (côté fleuve à côté région intérieure)
- d: Une faible pointe de précipitation se présente lorsque le niveau dans les puits forcés B et C est inférieur. La précipitation augmente le niveau d'eau souterraine de 12 cm ou plus. Le niveau d'eau souterraine commence à s'élever 1,5 mois après le début de la saison pluvieuse. L'influence de la chute de pluie dure 3 à 4 mois. Cette influence n'est pas constatée sur le puits forcé A, du fait que ce dernier subit plus tôt une grande influence du niveau du fleuve Niger.

(1) Alimentation en eau souterraine par la précipitation

Le taux d'alimentation en eau souterraine par la précipitation à Gao s'obtient à partir de la formule suivante:

$$P = (120 \times 0,3 \div 303,1) \times 100 = 11,9 \text{ (\%)}$$

Taux d'alimentation par la précipitation	P
Précipitation annuelle	303,1 mm (1980)
Augmentation de niveau d'eau souterraine, jugée imputable à la précipitation	120 mm
Porosité effective de la nappe aquifère	30 % :

Il s'agit du calcul effectué à titre de référence. Nous faisons remarquer que pour ce genre de calcul, il y a lieu de comparer la précipitation au volume d'alimentation sur une certaine gamme compte tenu du sens d'écoulement d'eau souterraine. On peut ainsi obtenir le volume annuel d'alimentation du à la précipitation sur une zone de 2 km E-O (entre le fleuve Niger et le puits forcé le plus intérieur) et de 10 km S-N (entre Gao et Bagoundje) comme suit:

$$A = (2 \times 10^3) \times (10 \times 10^3) \times (120 \times 10^{-3} \times 0,3) = 7,2 \times 10^5 \text{ (m}^3\text{)}$$

Cette valeur correspond au volume d'eau consommé par 197.000 habitants par an, si on suppose que le volume consommé par habitant par jour soit de 10 litres.

$$(10 \times 10^{-3}) \times 365 = 3,65 \text{ (m}^3\text{/habitant/an)}$$

$$(7,2 \times 10^5) \div 3,65 \approx 197.000 \text{ habitants}$$

Elle correspond également au volume d'eau annuel requis pour 49.000 UBT (ou UB),
 $(40 \times 10^{-3}) \times 365 = 14,6(m^3/UBT/an)$
 $(7,2 \times 10^5) \div 14,6 \approx 49.000$

(2) Volume d'emmagasinement au bassin du fleuve Niger

Les a, b et c précités démontrent que l'eau souterraine de Gao a un mécanisme d'emmagasinement dans la rive. Le volume d'emmagasinement dans la rive peut être obtenu par la formule suivante:

$$V_s = A \times h \times Pe$$

où, ; V_s : volume d'emmagasinement dans la rive

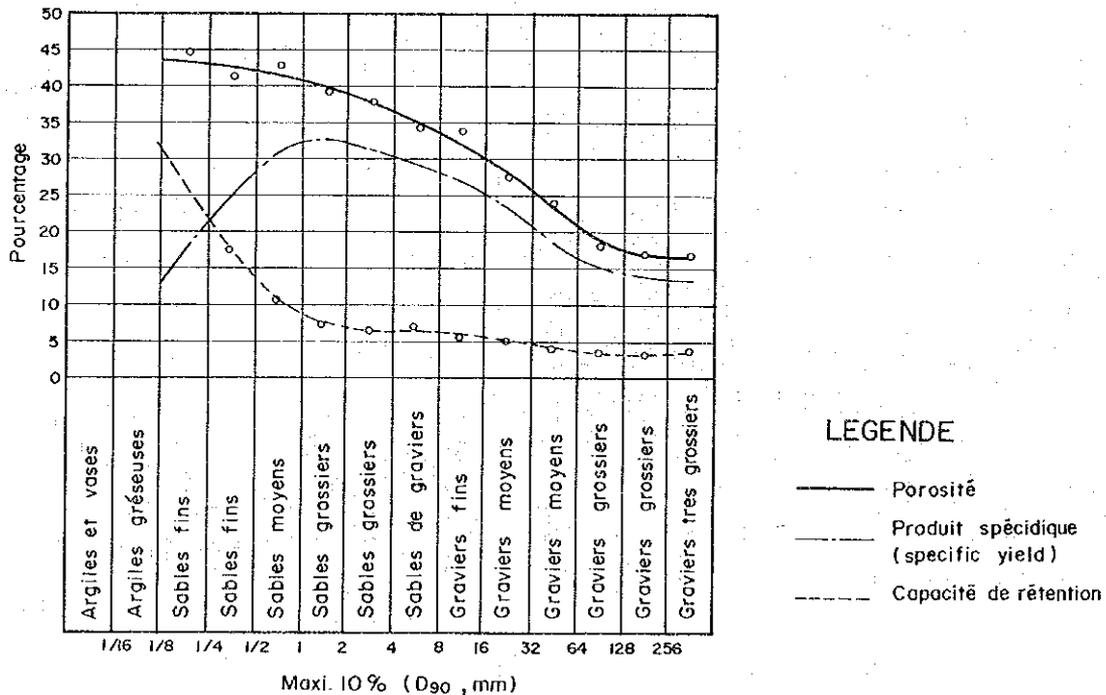
A : superficie de la zone où l'influence de l'emmagasinement dans la rive peut être observée

h : variation moyenne de niveau d'eau souterraine

Pe : porosité effective moyenne de la nappe aquifère

A est de 2 km E-O (du Niger au puits foncé le plus intérieur) et de 10 km S-N (Gao à Bagoundje). h est obtenu à partir de la Fig.IV.4.3. Pe est estimé sur la base de. (On a déterminé la granulométrie correspondant à D_{90} sur la course granulométrique cumulative à 1 à 2 mm à l'aide du contrôle visuel, compte tenu de la situation des forages foncés et de l'état des limons échantillonnés.)

Fig. IV.4.4 Débit spécifique d'eau de la roche sédimentaire (porosité effective)



$$A = (2 \times 10^3) \times (10 \times 10^3) \quad m^3$$

$$h = \frac{1,5 + 1,1 + 0,5}{3} \quad m$$

$$P_e = 30 \sim 35 \text{ (30 adopté)} \quad \%$$

Donc, V_s est:

$$V_s = 6,2 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Ce volume d'emmagasinement dans la rive, correspondant au niveau de la nappe phréatique variant naturellement pendant toute l'année, ne représente pas le volume d'emmagasinage total d'eau souterraine. Pendant la période où le débit du Niger est riche, l'épaisseur de la zone de saturation à Gao s'élève à 11 à 45 m dans le bassin du fleuve. En outre, le pompage accélère l'alimentation de la nappe aquifère en eau de fleuve. Compte tenu de ce qui précède, l'utilisation d'eau souterraine ne pose aucun problème pendant la période en eau. On peut donc considérer que le volume d'emmagasinement précité est suffisant pour consommer l'eau souterraine même au cours de la saison sèche sans influencer le niveau de la nappe aquifère de Gao, à condition qu'on assure ce volume pendant une période prolongée en ayant recours à un moyen approprié.

(3) Précautions à prendre pour la détermination de l'emplacement et profondeur d'un forage.

1) Au nord du forage G-6 à Gao, il existe une zone où le niveau de la nappe aquifère est extrêmement bas par rapport aux alentours. Les caractéristiques des puits foncés situés dans cette zone sont les suivantes: (Fig.IV.4.1)

- a. l'eau souterraine avait été présente lors du sondage des puits.
- b. les puits se sont graduellement taris.
- c. l'eau souterraine est salée.
- d. la conductibilité de l'eau souterraine est anormalement haute (1.250 à 9.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C).
- e. une teneur en NO_3^- est haute.
- f. la couche quaternaire sur le forage G-6 est constituée par des sables argileux.

La distance maximum dans le sens N-S de cette zone est de 0,8 à 1,0 km et celle dans le sens E-O de 2,0 km ou plus. La plupart des puits situés dans cette zone ne sont plus utilisés. Si les habitants ne les réparent pas malgré leur indispensabilité pour la vie quotidienne, c'est que la zone serait particulière au point de vue hydrogéologique. Sur ce point, on peut en déduire que:

- la couche quaternaire dans cette zone n'est guère alimentée en eau du Niger.
- Les caractéristiques de l'eau souterraine sont similaires à celles de l'eau fossile.
- Une fois un nouveau vide (puits foncé) formé, l'eau interstitielle jaillit par suite de déséquilibre de pression aux alentours, et le jaillissement dure jusqu'à ce que la force compressive due au poids mort de la couche s'équilibre avec la tension superficielle de l'eau interstitielle après l'abaissement du niveau d'eau.

2) Même dans des zones alimentées en eau du Niger, le niveau statique risque d'atteindre le fond du puits en cas d'absence d'influence de la chute de pluie et des puits pourraient s'assécher l'année où les précipitations sont faibles. Pour le sondage de puits, il est nécessaire de déterminer leur profondeur en tenant compte de ce qui précède.

4-2 Eau Souterraine d'Ansongo (Fig. IV.4.5)

Une faille d'orientation NO-SE est présente à Ansongo. On constate des roches sédimentaires et des roches de soubassement respectivement au nord-est et au sud-ouest de la faille. Les roches sédimentaires comprennent des sables et galets de la couche quaternaires ainsi que des sables, vases, galets et d'autres de la couche tertiaires (Continental Terminal). Les roches de soubassement comportent des biotite schistes noirs et des quartzites présentant partiellement une structure gneisseuse.

A Ansongo, 3 nappes aquifères ont été constatées dans la profondeur d'exploration.

La première nappe aquifère est présente entre 8 et 36 m et les habitants obtiennent de l'eau à partir de cette nappe. L'eau de cette dernière est principalement une eau phréatique contenue dans la couche quaternaire de sables et galets et, elle devient artésienne dans la région intérieure par suite de l'alimentation par la couche tertiaire. La pression l'eau artésienne n'est pas haute. On peut considérer que la source d'alimentation originale est le Niger. Dans la couche quaternaire, des sables dont la répartition dépend de la structure géologique locale semblent constituer des sédiments épais sur les parties d'orientation NNO-SSE prolongées d'une zone entre le bâtiment civil de Cercle Commandant et l'école à 1 km environ au nord. Le niveau statique de l'eau souterraine est de 4,3 m sur une rive du fleuve Niger et de 10 m environ sur un point de la région intérieure à 400 m environ du fleuve. Le gradient hydraulique entre les deux points est de 0,02 (d'après la recherche des puits foncés).

La deuxième nappe, alternance rythmique de sables et roches silteuses tertiaires, est présente entre 27 et 65 m et séparée de la première nappe aquifère par une couche de matières organiques. La position de cette nappe a été estimée par le carottage, non constatée par le sondage ni par la carte-croquis de limons. L'échantillonnage d'eau n'a pas été effectué individuellement pour cette nappe. Cependant, on peut estimer que l'eau a une haute teneur en fers dissous. La profondeur est analogue à celle du puits foncé de Magibo à 25 km environ à l'est de Ansongo.

La troisième nappe aquifère a été décelée seulement par la dernière reconnaissance. Elle est constituée par des galets et sables et se trouve entre 90 et 132 m. La fuite d'eau lors du sondage d'un puits a donné l'espoir d'un débit important. Mais, le débit du puits A-2 proche de la faille est inférieur à celui du puits A-1.

5. Eaux souterraines de la 7^{ème} région économique

5-1 Nappes aquifères (Fig.IV.5.1 et Tableau IV.5.1)

Les nappes aquifères décelées par cette reconnaissance appartiennent principalement à la couche tertiaire et à la couche quaternaire.*¹ De plus, il existe d'autres nappes aquifères appartenant à la C.I et à la couche crétacée supérieure. Nous allons décrire ces nappes aquifères dans l'ordre de profondeur.

Au Mali, les nappes aquifères du C.I sont présentes sur la limite inférieure du groupe de roche de boue d'Irhazer et dans le groupe de Tegama. Elles ont été constatées par plusieurs sondages effectués par PNC au voisinage de la frontière entre le Mali et l'Algérie en vue de la prospection d'uranium. Ces sondages ont révélé la présence des nappes aquifères entre 178 et 438 m grâce auxquelles on peut obtenir de l'eau à un débit de 3,6 à 9 m³/h. D'après K.F. Saad (1969), l'épaisseur de ces nappes correspond à 26 à 72 % de l'épaisseur totale des C.I CI, et le secteur dans lequel sont présentes les nappes aquifères du C.I est divisé en 5 circonscriptions hydrologiques.

Les nappes aquifères crétacées supérieures sont autrement appelées crétacée marin. Au point de vue de la géologie historique, il semble que le dépôt marin comprenant ces nappes appartienne au "Tertiaire" défini dans ce rapport. Cependant, suivant la description du faciès et de l'âge des nappes aquifères par Saad, la description du faciès et de l'âge du Cr.T par J.M. CARRERE et un passage de CARRERE "cette couche est connue pour la présence d'eau", on peut considérer que les nappes aquifères principales de la couche crétacée supérieure appartiennent au Cr.T danien à maëstrichien. D'après Saad, la puissance de la couche crétacée supérieure entière est de 20 à 350 m dont 10 à 81% correspond à la puissance des nappes aquifères. Saad divise le secteur dans lequel sont présentes les nappes aquifères crétacées supérieures en 6 zones hydrologiques.

Les nappes aquifères de la couche tertiaire appartiennent à C.T. D'après certains documents, les nappes aquifères de Djebok sont crétacées supérieures. Mais, nous affirmons dans ce rapport qu'elles sont de la "couche tertiaire" pour la raison décrite au p.² Le sondage pour le projet de JICA a constaté la présence de deux nappes aquifères appartenant à C.T et d'une nappe pouvant être aquifère par l'alimentation en eau. Par ailleurs, on estime la présence de certaines nappes aquifères sur la base des données sur les puits existants, comme décrit au p.³ aragraphe suivant. Saad divise le secteur dans lequel sont présentes les nappes aquifères de couche tertiaires (C.T) en 4 circonscriptions hydrologiques dont certaines côtoyant le Niger sont caractérisées par la présence de couches quaternaires (définies dans ce rapport) dans les nappes aquifères.

Des couches quaternaires de sables et de graviers sont superposées à une épaisseur importante

*1 En outre, à Ansongo on obtient de l'eau provenant de la couche souterraine de roches altérées. Toutefois, il n'en sera pas fait davantage mention dans ce document, du fait d'un débit insignifiant.

*2 p.96

*3 p.98

à Gao et forment des nappes aquifères excellentes. Des telles nappes ne se trouvent pas toujours dans tout le bassin du fleuve Niger. Il paraît qu'elles sont présentes sur des courbures (éperons) du courant principal du Niger et des zones où le fleuve conflue avec les oueds provenant de la région intérieure. Ces zones sont favorables à l'alimentation en eau souterraine et il est probable que la fluence souterraine est présente sur ces zones.

De plus, les alluvions et la couche altérée sur le soubassement forment des nappes aquifères quaternaires, par exemple celles à Kidal. Des sables et graviers s'accumulent ordinairement à une épaisseur de 10 à 17m (l'épaisseur estimée d'après les résultats de prospection électrique) dans les oueds formés aux sillons du soubassement. Et, l'épaisseur de la couche altérée pourrait s'élever à 50 m au maximum. Le niveau statique est de 8 à 16 m et la zone de saturation a une épaisseur de 1 m environ.

5-2 Profondeur et caractéristiques des nappes aquifères estimés à partir des données sur les puits existants (Fig. IV.5.2 a 3 et Tableau IV.5.2)

Nous avons établi un tableau de puits et d'autres cartes en nous référant aux cartes hydrogéologiques existantes,*¹ à 2 ou 3 documents*² et aux résultats de reconnaissance pour le projet de JICA. Nous avons également élaboré une courbe isoprofondeur des nappes aquifères de la 7^e région économique sur la base du tableau et des cartes établis. Si nous n'avons pas établi de courbe de niveau, c'est parce que l'altitude du point où se trouve chaque puits diffère selon le document (Eventuellement, il y a une différence de 10 m environ pour le même point entre deux documents). Ainsi, la Fig.IV.5.2 ne représente pas la configuration des surfaces de nappes aquifères. Cependant, on peut dire que même la courbe isoprofondeur représente une configuration approximative des nappes aquifères, du fait que la zone prospectée présente un terrain peu accidenté et une structure homocline à pente douce sauf aux alentours de Timétrine en amont du vallée du Tilemsi et sur la zone de roches de soubassement à Kidal. D'ailleurs, la courbe isoprofondeur est très utile à la détermination de la profondeur de forage. Pour établir la courbe isoprofondeur, nous avons adopté la profondeur de puits comme profondeur de nappe aquifère en cas d'absence d'indication de celle-ci, en supposant que le forage soit arrêté dès que le puits atteint la nappe aquifère.

La courbe isoprofondeur de la nappe aquifère est divisée en 2 types différents. En cas de courbe du type 1, la profondeur augmente dans la direction du nord au sud (NE à SO ou NO à SE) ou de l'est à l'ouest. Cette tendance couvre la 7^e région économique entière et est

*1 Ces cartes ont été établies par M. Paris, M. Radier et 3 autres personnes il y a environ 28 ans. On ignore encore les informations détaillées sur ces cartes telles qu'année exacte d'établissement, nom du projet concerné, nom du rapport auquel elles ont été jointes. Elles sont désignées sous le nom de "HYDROGEOLOGIE DU SOUDAN ORIENTAL, FOND CARTES DE L'I.G.N" SERVICE HYDRAULIQUE.

*2 Voir le tableau des puits (Appendice du chapitre IV (1)) Joint au chapitre IV.

remarquable au fossé d'effondrement, sur son prolongement et dans la zone au nord du fossé. Sur la base de la courbe isoprondeur, on peut estimer qu'au moins 3 nappes aquifères*¹ sont présentes sur le fossé d'effondrement de Gao. Toutefois, c'est seulement au nord-est de Tagarengabout ou à ses environs que 3 nappes aquifères sont présentes. En principe, il existerait sur la région entière 2 nappes aquifères: nappe aquifère inférieure et nappe aquifère moyenne.*² La distance entre les deux nappes aquifères est de 10 à 30 m. La nappe aquifère de niveau moyen est située à une profondeur de 40 à 60 m ou plus.

Cette tendance précitée est constatée pour les nappes aquifères de C.T au fossé d'effondrement de Gao. Dans la plupart des zones de la vallée du Tilemsi, le niveau de nappe aquifère est inconnu ou incertain. Au nord du fossé d'effondrement de Gao, des nappes du type *³ 1 sont décelées dans les nappes aquifères crétacées supérieures.

En cas de courbe du type 2, la profondeur augmente dans la direction du sud au nord (S à N ou SO à NE). Cette tendance est considérable au nord de Bourem, plus que le long du fleuve Niger entre Gao et Ansongo. Les nappes aquifères de ce type appartiennent, d'une part à C.T (nord de Bourem et une partie d'Ansongo), d'autre part à la couche quaternaire (le long du Niger entre Gao et Ansongo).

Compte tenu de la répartition des nappes aquifères visée ci-dessus, on considère qu'afin de dresser le projet de développement des eaux souterraines il convient de diviser la 7^e région économique en zones suivantes:

- a. Fossé d'effondrement de Gao et son prolongement
- b. Zone de roches sédimentaires au nord du fossé d'effondrement (Samit, Anefis, etc.)
- c. Nord de Bourem
- d. Zone de roches de soubassement d'Adrar des Iforhas (Kidal, etc.)

5-3 Eaux souterraines (Tableau IV.5-1)

Les eaux souterraines sont classées en eau phréatique et en eau artésienne suivant la nappe aquifère les contenant.

L'eau phréatique est présente dans la couche quaternaire et possède un mécanisme d'emmagasinement dans la rive. Sur ce bassin, l'alimentation en eau souterraine a lieu par suite de la chute de pluie et le niveau d'eau augmente sur une petite échelle pendant 3 ou 4 mois, comme décrit au paragraphe 4-1 du chapitre IV.

*1 Ces 3 nappes aquifères sont différentes de "3 nappes" décrites au (Le critère de classification n'est pas identique.) Voir *2 ci-dessous.

*2 La nappe aquifère de niveau inférieur correspond aux 2 et 3 couches du puits D-1. La couche correspondant à la nappe aquifère de niveau moyen n'est pas constatée au puits D-1.

*3 La nappe aquifère présentant une configuration tracée par la courbe isoprondeur du type 1 est désignée ci-après "nappe du type 1". La courbe isoprondeur ne coïncide pas toujours avec la structure de la nappe aquifère.

L'eau artésienne est présente dans les couches tertiaire, de C.I et de crétacé supérieur. Mais, il y a peu d'eau jaillissante sauf à Tahabanat (situé à 150 km environ au nord-est de Ménaka). La répartition des nappes artésiennes sur une zone étendue n'est pas encore correctement saisie. Il est donc difficile de mentionner globalement des eaux souterraines dans différentes couches superposées. On peut seulement estimer que les eaux souterraines ont les caractéristiques suivantes qui sont autres que celles décrites à la page 98

L'eau artésienne contenue dans C.I est généralement douce, sauf sur la zone où affleure cette couche. La teneur en résidus secs est haute au nord et faible au sud.

L'eau artésienne dans la couche crétacée supérieure a une teneur de résidus secs de 400 à 5.000 mg/l (conductibilité électrique: 600 à 7.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C) et, cette teneur dépend de la nature de terrain de la zone où a lieu l'alimentation en eau souterraine; à savoir:

- a. Alimentation en eau à l'est de l'Adrar des Iforhas: 1.500 à 3.000 mg/l (correspondant à une conductibilité électrique de 3.000 à 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C.
- b. Alimentation en eau au sud de l'Adrar des Iforhas: 1.000 mg/l ou moins (correspondant à une conductibilité électrique égale ou inférieure à 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C)
- c. Alimentation en eau à l'ouest de l'Adrar des Iforhas: 2.000 à 5.000 mg/l (correspondant à une conductibilité électrique de 3.500 à 7.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C.)

En cas d'eau artésienne contenue dans la couche tertiaire, la teneur en résidus secs dépend également de la nature de terrain de la zone d'alimentation en eau:

- d. Alimentation en eau au sud-est et au sud de l'Adrar des Iforhas: 700 mg/l ou moins (conductibilité électrique: 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C) (eau douce)
- e. Alimentation en eau à l'ouest de l'Adrar des Iforhas: 5.000 mg/l en quelques secteurs au nord et 700 mg/l ou un petit peu plus au sud sous l'effet de la dilution avec de l'eau "d" ci-dessus.

5-4 Alimentation et écoulement des eaux souterraines (Fig. IV-5-1 et Tableau IV.5.1)

La corrélation stratigraphique de la 7^e région n'est pas encore établie. Elle reste encore à examiner. K.F. Saad (1969) décrit en détail le mécanisme d'alimentation en eau dans cette région. La figure IV-5-1 et le tableau IV-5-1 ont été établis en modifiant les cartes de Saad. Les numéros de grosse écriture sur la figure et ceux indiqués dans la colonne "a" du tableau représentent les mêmes zones hydrogéologiques. Le mécanisme d'écoulement de l'eau souterraine n'est pas suffisamment élucidé. Sur ce point, on va décrire selon la nécessité.

(1) Eau phréatique

Saad ne mentionne pas particulièrement cette eau souterraine. On peut considérer que l'eau phréatique est présente à Kidal, à Gao et sur différentes zones du bassin du fleuve Niger. Elle est contenue dans 4 du C.T (Tertiaire) décrite par Saad.

A Kidal, les oueds sont alimentés en eau par suite de la chute de pluie en saison pluvieuse sur la région montagneuse (Adrar des Iforhas) constituée par des roches de soubassement et s'écoulent vers le terrain plat sableux. Au cours du déplacement, des eaux courantes sont partiellement emmagasinées sous le sol. Etant donné que la longueur de l'oued principal regroupant un grand nombre d'affluents arborisés s'élève à quelques centaines de kilomètres, il existe à Kidal des puits qui n'assèchent pas pendant toute l'année malgré les faibles précipitations.

Comme nous l'avons vu plus haut, la nappe phréatique de Gao a un mécanisme d'emmagasinage au bassin, qui consiste à stocker de l'eau provenant du fleuve Niger pendant la saison des hautes-eaux et à l'évacuer en saison sèche. Le volume d'emmagasinage s'élève à $6,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ sur une étendue de $2 \times 10 \text{ km}^2$.

La période d'évacuation d'eau correspond à la saison pluvieuse de Gao. Le niveau d'eau souterraine augmente durant 3 à 4 mois sous l'effet de la chute de pluie. Il augmente de 12 cm ou plus au maximum. Le volume annuel d'alimentation en eau due à la chute de pluie correspond à 11,9 % des précipitations, soit $7,2 \times 10^5 \text{ m}^3$ sur l'étendue précitée d'après le calcul.

(2) Eau artésienne

L'eau souterraine dans le C.I, le Cr.T et la couche tertiaire est artésienne.

o Continental Intercalaire (C.I)

Le C.I forme des nappes artésiennes importantes à l'est de l'Adrar des Iforhas. Dans cette zone, l'alimentation en eau est de $116,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ et l'écoulement d'eau de $115,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Et, le débit spécifique est de 4 à $6 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

o Crétacé supérieur (Cr.T)

Les zones hydrogéologiques contenant des nappes artésiennes de crétacé supérieur sont divisées en 2 groupes d'après la structure géologique. Les circonscriptions 1, 2, 3 et E (constituent le groupe 1), les circonscriptions 4, 5 et 6 (le groupe 2). Le premier est situé dans le bassin du Mali-Niger et le dernier au détroit Soudanais.

L'alimentation en eau du groupe 1 est de $27,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$, qui est identique à l'écoulement annuel. Le débit spécifique est égal ou inférieur à $1 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

Dans les 3 circonscriptions hydrogéologiques du groupe 2, leur eau souterraine se déplace individuellement du nord-est vers le sud-ouest. Mais, le mécanisme d'écoulement n'est pas inconnu. Parmi ces zones, la zone 4 est la plus importante et la qualité d'eau y est supérieure. L'alimentation en eau du groupe 2 est de $38,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ et, le débit spécifique est de 1 à $3 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

o La couche tertiaire (C.T)

Le terrain contenant des nappes artésiennes de couche tertiaires est divisé en 4 circonscriptions hydrogéologiques. Parmi elles, les zones 2, 3 et 4 sont principales pour la 7^e région économique. Il est possible que la circonscription 4 contienne de l'eau phréatique du bassin du fleuve Niger. Mais, nous nous sommes conformés aux cartes, du fait que le volume

d'alimentation en eau phréatique sur cette zone représentée est extrêmement faible par rapport au volume total d'alimentation dans la région. Le mécanisme d'écoulement dans la circonscription 4 est encore incertain.

Le volume d'alimentation en eau artésienne est important sur la circonscription 3. Dans cette dernière, la teneur en résidus secs s'élève éventuellement à 5.000 mg/l. Dans la circonscription 2, le volume d'alimentation en eau artésienne est relativement important et la teneur en résidus secs est égale ou inférieure à 700 mg/l, ce qui signifie la bonne qualité d'eau. La teneur en résidus secs est également faible sur une partie de la circonscription proche de la circonscription 2. La somme des débits d'alimentation en eau des circonscriptions est de $732 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$. Le débit spécifique est estimé à $1 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

Le volume annuel d'alimentation en eau artésienne est donc de $182,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ dans la 7^e région économique. Ce volume correspond à 0,6 % de la précipitations annuelle, à supposer que la hauteur pluviométrique annuelle moyenne est de 100 mm environ et, conformément au tableau récapitulatif de population et de surface par région (Article II.1, p).

6. Besoins en eaux dans la 7^{ème} région économique

6-1 Besoins en eaux

Suite à l'Article précédent selon lequel l'alimentation annuelle à partir des nappes phréatiques artésiennes est de $190 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$, dans le présent Article, sont mis à l'étude les besoins en eaux dans la 7^{ème} région économique. Selon le plan quinquennal établi en 1981, la population de la dite région, dont le taux d'accroissement régional est de 2,4 %, était d'environ 370×10^3 habitants. De ce fait, on estime que la population lors de la dernière année du plan (1985) s'élèvera à environ 460×10^3 habitants. De plus, selon le rapport entre la superficie de pâturage de la 7^{ème} région économique et celle nécessaire à une UBT, le nombre du bétail élevé est théoriquement d'environ $1,1 \times 10^6$ UBT dans cette région.*¹

Les besoins des eaux de la région, fondés sur les résultats de calcul, s'élèvent à $48,6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jour}$, ce qui correspond à environ $18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Cela nous montre aussi que l'équilibre entre le besoin et l'offre des eaux est établie du point de vue des statistiques. Combien d'eaux souterraines faut-il donc mettre à disposition? Ce point est soumis ci-après à l'étude.

6-2 Situation récente de l'alimentation en eaux.

Selon les données citées ci-dessus, le nombre d'habitants en 1981 et le nombre récent du bétail dans la 7^e région économique sont estimés respectivement à 417×10^3 habitants et à 885×10^3 UBT*²

Actuellement, la population et le bétail réussissent à vivre. C'est donc que la quantité d'alimentation en eau, chiffrée approximativement à $13 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ suffit aux besoins de la population et du bétail à ce stade d'accroissement.

Sur le tableau II-4 est indiqué le nombre de puits forcés construits dans la 7^{ème} région économique et des mares existant dans cette région. Sur le tableau II-5 est indiquée l'année correspondante à la construction de chaque puits dont le total est supérieur à 185, y compris les puits et analogues qui ne sont pas mentionnés sur le tableau II-4. Parmi ces puits et analogues, le total dans les cercles de Gao, Ansongo et Kidal est supérieur à 135, alors que le nombre des puits et analogues existants est de 68, dont 54 doivent subir des réparations (en 1979). D'après un autre rapport, 24 forages ont été réalisés au cours de 1963 à 68, et 19 forages tubulaires avaient déjà été réalisés antérieurement. Le total est donc de 43 forages dont 33 ont été mis en exploitation. Sur ces 33 forages, 22 ont été équipés d'une pompe, mais ils ne sont plus exploités aujourd'hui. De toute façon, les puits existants sont peu nombreux, et

*1 Aménagements d'hydraulique pastorale, la région de Gao, Mali, et aménagements d'hydraulique pastorale

les puits et analogues qui sont construits les uns après les autres ne peuvent être utilisés que pour une durée relativement courte. Nous pouvons en déduire que les nomades se procurent la plupart des eaux nécessaires à leurs besoins par des moyens autres que le forage, par exemple à l'aide de puisards, ou directement à partir des mares ou du Niger. Les lieux des prises d'eau sont tellement dispersés et sont à une si petite échelle qu'il est difficile d'exprimer en chiffres la quantité d'eau utilisée.

6-3 La quantité d'eau exigée à l'avenir

Dans la situation actuelle de l'alimentation en eau explicitée ci-dessus, le problème à résoudre est de savoir à quelle estimation doit être portée désormais la quantité d'eau à mettre à disposition. A cette fin, on calcule les besoins en eau du bétail selon la différence entre le nombre éleveable de bétail ($1,1 \times 10^6$ UBT) et son évaluation récente ($0,885 \times 10^6$ UBT)*¹ dans la 7^{ème} région économique. A la valeur des besoins en eau du bétail, on ajoute la valeur de la quantité d'eau nécessaire à la population selon l'estimation de son accroissement jusqu'à la dernière année du plan quinquennal à compter de 1981. Le total de ces deux valeurs est considéré comme la quantité nécessaire pour les années à venir. Le nombre récent supposé du bétail est de $0,885 \times 10^6$ UBT, les besoins en eau nécessaires à l'avenir sont les suivants :

$$(1,1 \times 10^6) - (0,885 \times 10^6) = 0,215 \times 10^6 \text{ (UBT)}$$

$$(0,215 \times 10^6) \times 0,04 \text{ m}^3/\text{jour} = 8,600 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$(417 \times 10^3) (1,024^4 - 1) \times 0,01 \text{ m}^3/\text{jour} = 415 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$8.600 + 415 = 9.015 \text{ m}^3/\text{jour} \text{ (} 3,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an)}$$

Si l'on tire l'eau de forages à la capacité de pompage de $3 \text{ m}^3/\text{h}^{*2}$ pendant 12 h/jour, il faut 250 forages comme suit :

$$9.015 - (3 \times 12) = 250$$

*1 Les statistiques de l'enquête administrative relative à l'UBT (Unité Bétail Tropical) ne correspondent pas à celles des autorités compétentes telles que Direction Elevage Bamako, Région Elevage Gao et Secteurs d'élevage. Par exemple, le total de l'UBT augmente respectivement selon l'ordre des autorités citées ci-dessus (ainsi le total des Secteurs d'élevage est 3 fois plus important que celui de l'enquête administrative.) De plus, vu l'importance de la variation entre les statistiques annuelles établies pourtant par une même autorité, en conséquence, il est difficile d'y repérer une tendance précise. Cependant la valeur de l'UBT est approximativement fixée entre 528×10^3 et 885×10^3 d'après deux documents cités ci-dessous. A supposer que la valeur la plus importante soit plus proche de la réalité, la valeur 885×10^3 UBT est adoptée dans le présent Article.

Documents : —Les bases de l'hydraulique pastorale dans le Soudan oriental (Cercle de Gao)

—Aménagements d'hydraulique pastorale

*2 La quantité de pompage moyenne par puits. Elle est fixée d'après le Tableau des puits (Appendice du chapitre IV (1)) selon l'aménagement souhaité de la 7^{ème} région économique.

7. Directives techniques pour de la sélection des zones de développement

7-1 Critère pour la sélection des zones de développement

La sélection des zones de développement des eaux souterraines est effectuée en tenant compte de la densité de répartition des animaux pendant les saisons pluviale et sèche, de la direction de migration des animaux, de l'état des routes et de l'état hydrogéologique en particulier selon le point de vue de l'Article 5-2 du Chapitre IV, concernant la 7^{ème} région économique, alors que l'ordre d'exécution portant sur les secteurs de développement est décidé synthétiquement en prenant de nouveau en considération les degrés de nécessité et d'urgence, les moyens d'assurer l'eau destinée au forage etc..., qui orientent le choix de secteur.

(1) Densité de répartition et direction de migration des animaux

Les pâturages de la 7^{ème} région économique occupent le côté sud de la ligne qui relie les environs de 18° et de 17° de latitude nord se trouvant respectivement aux extrémités ouest et est de cette région, ce qui correspond à l'aire des pâturages. Plus la latitude baisse, plus la densité de bétail augmente (La densité est la plus importante aux environs des frontières de la République du Niger), mais pendant la saison sèche, les nomades se déplacent vers le Niger, et le bétail demeurant à l'intérieur du Mali se concentre au bord des Oueds et des mares qui ne contiennent de l'eau que peu durablement, et au bord du Niger. Dans ce cas, les aires de répartition dense se concentrent aussi d'une manière déséquilibrée sur le côté sud de la septième région économique. Les flèches sur la figure IV.7.2 de l'Article suivant indiquent les débouchés commerciaux des nomades et il semble qu'elles fassent allusion aussi à la direction de déplacement des nomades.

Les nomades se déplacent, semble-t-il, dans la direction des flèches au fur et à mesure de la diminution et de l'épuisement des sources.

La distance de migration du bétail est de 10 à 15 km par jour; le bétail boit de l'eau une fois tous les deux jours. Il en résulte que l'intervalle entre les puits doit être de 20 à 30 km.

(2) Etat des routes

Les routes principales de la 7^{ème} région économique sont les suivantes: la route internationale qui dessert Niamey (Niger) et Gao via Ansongo et qui atteint Bamako en traversant le Niger par le ferry; la route qui traverse entièrement le Sahara jusqu'à Alger (Algérie) en direction du nord, passant Gao en suivant la vallée du Tilemsi; la route desservant Ansongo et Ménaka.

Hormis la route internationale entre Niamey et Bamako, les autres routes sont impraticables pendant la saison pluviale, ce qui entraîne leur instabilité. Cependant une nouvelle route, excellente, a été récemment construite entre Ansongo et Ménaka, Hormis ces routes principales, les autres routes de la septième région économique ont une faible densité de circulation.

Hormis l'espace des routes, le sol est recouvert soit par le sable, soit par des arbustes, ce qui rend difficile le transport du matériel. Cette difficulté ralentit le déplacement. Des équipements appropriés doivent être requis pour faire face à cette difficulté.

(3) Les conditions hydrogéologiques

Au sein de l'aménagement de la 7^{ème} région économique, le développement des eaux souterraines de la rive gauche du Niger doit être conçu en divisant préalablement cette dernière en quatre secteurs (Chapitre IV.5.2) comme suit:

- a. Fossé d'effondrement de Gao et son prolongement
- b. Zone de roche sédimentaire au nord du fossé d'effondrement.
- c. Nord de Bourem
- d. Zone de roche de soubassement d'Adrar des Iforhas

a. Fossé d'effondrement de Gao et son prolongement

Il est fortement possible qu'il existe plus de deux couches d'une nappe aquifère*¹ type 1 dans C.T au-dessus de fossé d'effondrement de Gao et son prolongement; la présence des deux couches n'est toutefois constatée qu'à Argabeche, parce que la plupart des puits et analogues n'atteignent pas le niveau inférieur de la nappe aquifère*².

Pourtant, des puits et analogues dont la capacité de pompage est supérieure à 3 m³/h, se trouvent sur la courbe qui relie Argabeche—Djebok—Andernamel—Tin Ténérans—Erenga. Cette courbe se situe approximativement au centre du fossé d'effondrement constitué des deux failles nord et sud; la courbe est parallèle à ces dernières.

De plus, la courbe se trouve éloignée de 30 à 35 km du Niger sur la section où elle est parallèle à ce dernier.

L'emplacement de ces puits et analogues dont la capacité de pompage est relativement supérieure est peut-être dû au hasard, mais il est à noter que leur emplacement coïncide avec celui de l'"exutoire" des eaux souterraines dans C.T. estimé selon les résultats de l'étude de débit du Niger faite par K.F. Saad (en 1970). K.F. Saad prétend aussi que la coïncidence de la courbe avec l'"exutoire" peut être attribuable à la ligne de structure géologique.

Il est possible de mettre à disposition sur une vaste étendue du fossé d'effondrement des puits qui ne s'épuiseront pas même pendant la saison sèche en choisissant la profondeur de l'exploration qui dépend de la profondeur de la nappe aquifère inférieure. Cela est confirmé par la présence des puits susceptibles de pompage (plus de 3 m³/h) se trouvant au côté nord de ladite courbe dans le fossé d'effondrement de Gao, et par le système d'alimentation en eaux souterraines étant pris en considération dans ce secteur etc. Au côté sud de ladite courbe, la présence des forages est presque nulle, et rarement s'y trouvent des puits foncés et analogues. En conséquence, les résultats de l'exploration prévue dans ce secteur sont importantes du point de vue des corrélations et recherches quant à la structure de la nappe aquifère.

La nappe aquifère inférieure est profonde sur le côté sud-ouest du fossé d'effondrement de Gao et peu profonde sur le côté nord-est du fossé d'effondrement de Gao. Les différentes pro-

*1: Se référer à la Note marginale de page 110

*2: Se référer à la Note marginale de page 110 concernant le niveau inférieur de la nappe aquifère.

fondeurs de la nappe sont estimées comme suit: 100 m au bord du Niger; 90 m de 10 à 35 km du Niger (de l'extrémité nord-ouest au centre du fossé d'effondrement); 70 m de 20 à 55 km du Niger (de l'extrémité nord-ouest au centre du fossé d'effondrement). La profondeur du forage doit être légèrement supérieure à ces profondeurs citées cidessus.

Le débit de pompage par puits ou analogue est estimé généralement de 2 à 6 m³/h dans ce secteur et à plus de 10 m³/h dans la vallée du Tilemsi, à Ansongo—Ménaka et à Hamakouladgi,

Au sein du fossé d'effondrement sont répandues des nappes aquifères type 2 différentes des nappes explicitées ci-dessus. Il existe la nappe aquifère type 2 dans la couche quaternaire. La nappe aquifère type 2 contient la nappe phréatique alimentée par le Niger. L'épaisseur de la zone de saturation de cette nappe type 2 est de 4 à 45 m et est plus importante près du fleuve, que plus avant dans les terres.

Le débit de pompage par puits foré est estimé en général de 4 à 10 m³/h mais il arrive que ce débit atteigne plus de 4--10 m³/h au sud de Gao. Ce genre de nappe aquifère n'est pas toujours répandu tout au long du Niger, c'est la raison pour laquelle le choix des lieux faisant l'objet du développement doit être fondé sur la prospection électrique et l'étude du terrain.

b. Zone de roche sédimentaire au nord du fossé d'effondrement

Dans cette zone, il existe une couche aquifère type 1. La profondeur de la nappe aquifère dans ce secteur est peu importante. Elle est seulement de 60 m aux environs de la limite du fossé d'effondrement et de 20 m à 30 km à partir de la faille (aux environs d'Imenas). Cependant, Si l'on s'éloigne d'Imenas en direction du nord-ouest ou du sud-est (dans la direction parallèle au fossé d'effondrement), la profondeur de la nappe aquifère augmente légèrement. La nappe aquifère dans ce secteur se trouve souvent sur la roche de soubassement. Aux environs de la vallée du Tilemsi, il est indispensable de procéder à une étude avant de pouvoir déterminer l'âge de la nappe aquifère.

Le débit de pompage par puits foncé dans ce secteur peut être estimé au maximum à 3 m³/h malgré une variation importante selon l'emplacement des puits.

c. Nord de Bourem

Dans cette zone, il existe une nappe aquifère type 2. La profondeur de cette nappe aquifère, au nord-est, est de 50 m et de 70 m, respectivement à 20 km et à 35 km du fleuve Niger, alors qu'au nord de Bourem elle est de 50 m et de 60 m, respectivement à 50 km et à 100 km du fleuve.

Cependant, les valeurs de pente indiquées sur la courbe de niveau de la nappe phréatique dans le secteur éloigné de 15 à 30 km du fleuve Niger, montrent une tendance contraire par rapport aux valeurs de profondeur mentionnées ci-dessus. Cela témoigne que la courbe-isopropendeur reflète les influences de la configuration du terrain. Pour cette raison, il faut faire attention à ce que la structure indiquée par la courbe-isopropendeur ne soit pas confondue avec la structure de la nappe aquifère.

Les eaux souterraines de cette zone sont considérées comme de bonne qualité; toutefois, le débit semble peu important. Dans cette même zone, un débit de 4–5 m³/h par puits est réalisé dans le cas de certains puits foncés dont la profondeur est d'environ 50 m.

d. Zone de roche de soubassement d'Adrar des Iforhas

Dans cette zone, il existe de nombreux puisards (leur profondeur approximative est de 5–10 m) tout au long des oueds qui sont disposés comme les branches d'un arbre (Figure IV-7-1). La profondeur de certains puisards entre ces oueds atteint de 20 à 25 m. Ces puisards se concentrent au nord de Kidal et à l'ouest d'Adrar des Iforhas (du côté de la vallée du Tilemsi). Dans cette zone, les nappes aquifères sont de petite dimension et sont indépendantes les unes des autres. Elle n'appartiennent ni au type 1 ni au type 2.

Il est impossible d'estimer le débit de pompage dans cette zone, en raison de l'absence de documents relatifs à ce débit.

7-2 Proposition pour la sélection des zones de développement (Fig. IV.7.2)

En tenant compte à la fois des résultats explicités ci-dessus et de la liste des secteurs à développer fournie par le Mali qui souhaite la réalisation de ces projets, les secteurs faisant l'objet du développement des eaux souterraines sont donnés à titre indicatif sur la Figure IV.7.2.

Parmi ces secteurs, il faut accorder tout d'abord la préférence à ceux du "fossé d'effondrement et son prolongement", en particulier les points de ralliement des nomades maliens (Ansongo–Ménaka) ayant une densité de répartition du bétail très élevée, la vallée du Tilemsi qui sert de passage lors d'un déplacement des nomades et le secteur Argabeche–Djebok–Andernamel qui peut apporter hydrogéologiquement de bons résultats.

La profondeur du forage doit être fixée approximativement à de 80 à 150 m, y comprise l'épaisseur de la nappe aquifère. Cette profondeur est prévue importante sur le côté sud-ouest, peu importante sur le côté nord-est et approximativement de 100 à 120 m aux environs d'Argabeche–Andernamel.

Il convient de réunir les renseignements nécessaires sur le secteur à développer prochainement en exécutant une exploration de la "Zone de roche sédimentaire au nord du fossé d'effondrement" dans la mesure du possible selon le planning du développement des eaux souterraines en cours dans le secteur concerné. Etant donné que les renseignements sur la zone de roche de soubassement à la zone sud d'Ansongo sont presque nuls, il est aussi important de les réunir en ce qui concerne cette zone.

Le développement des eaux souterraines de la "Zone de roche sédimentaire au nord du fossé d'effondrement" prendra corps avançant progressivement vers l'intérieur du pays, alors que l'eau souterraine trouvée grâce à l'exploration citée ci-dessus servira au forage. Dans ce secteur la profondeur de la roche de soubassement varie de 20 à 60 m; par conséquent, la profondeur prévue est fixée à de 20 à 70 m. Sur le côté nord de Samit, il est fortement possible que la

partie supérieure de la couche C.T contiennent du phosphate. Il est donc nécessaire de faire attention aux limites de C.T avec la couche crétacée supérieure, et si la situation géologique l'exige, d'introduire du ciment à l'extérieur du tubage métallique dans la C.T à la place du gravier.

La profondeur de forage "Au nord de Bourem" est fixée de 50 à 100 m en tenant compte de l'épaisseur de la nappe aquifère et est prévue peu importante au côté sud ou ouest et importante sur les côtés nord ou est.

La surface supérieure de la nappe aquifère de la "Zone de roche de soubassement d'Adrar des Ifrohas" se trouve en général à la profondeur de 5 à 10 m, rarement de 20 à 25 m à partir de la surface du sol. Il est reconnu aussi grâce à la prospection électrique que atteint quelque fois 30 m.

Le déplacement et le transport de matériels jusqu'à ce secteur demande plus de temps par rapport à d'autres secteurs à cause de son emplacement défavorablement éloigné, ce qui cause facilement le problème de transport de l'eau et du combustible. De plus, le déplacement des matériaux et matériels d'un oued à un autre nécessite beaucoup de temps, même à l'intérieur de la zone d'exploration. C'est la raison pour laquelle il est préférable d'entamer postérieurement le développement de ce secteur, sauf en cas de raisons particulières, pour que l'ensemble du développement des eaux souterraines soit dirigé efficacement.

Il est nécessaire d'éclairer la structure de la roche de soubassement et d'étudier les points de forage en effectuant la prospection électrique de ce secteur pendant que l'exploration est exécutée dans les autres secteurs explicités ci-dessus.

Fig. IV-5-2 Plan de puits existants la 7^{ème} région économique.

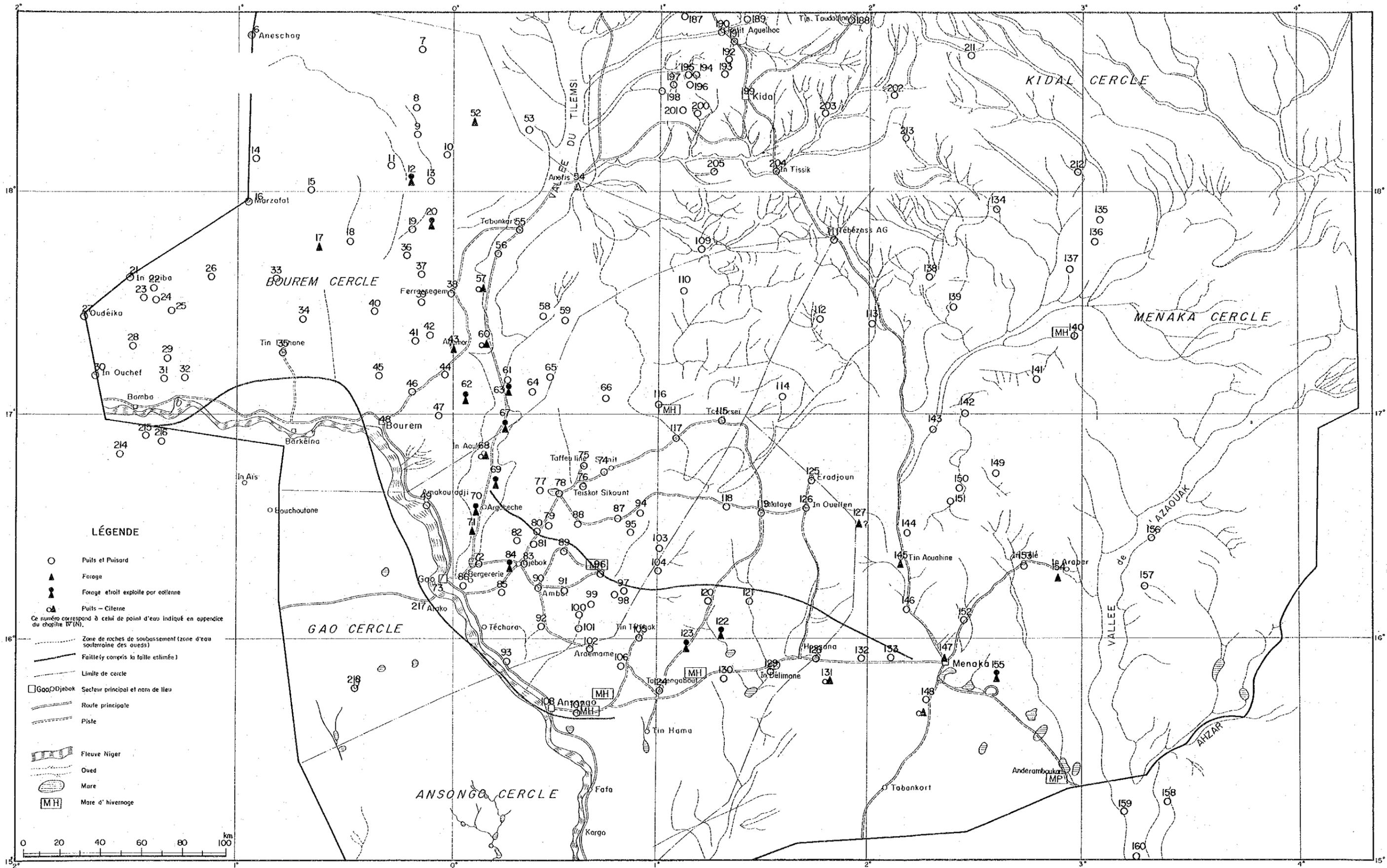


Fig. IV-5-3 Courbe isoprofondeur des nappes aquifères de la 7ème région économique.

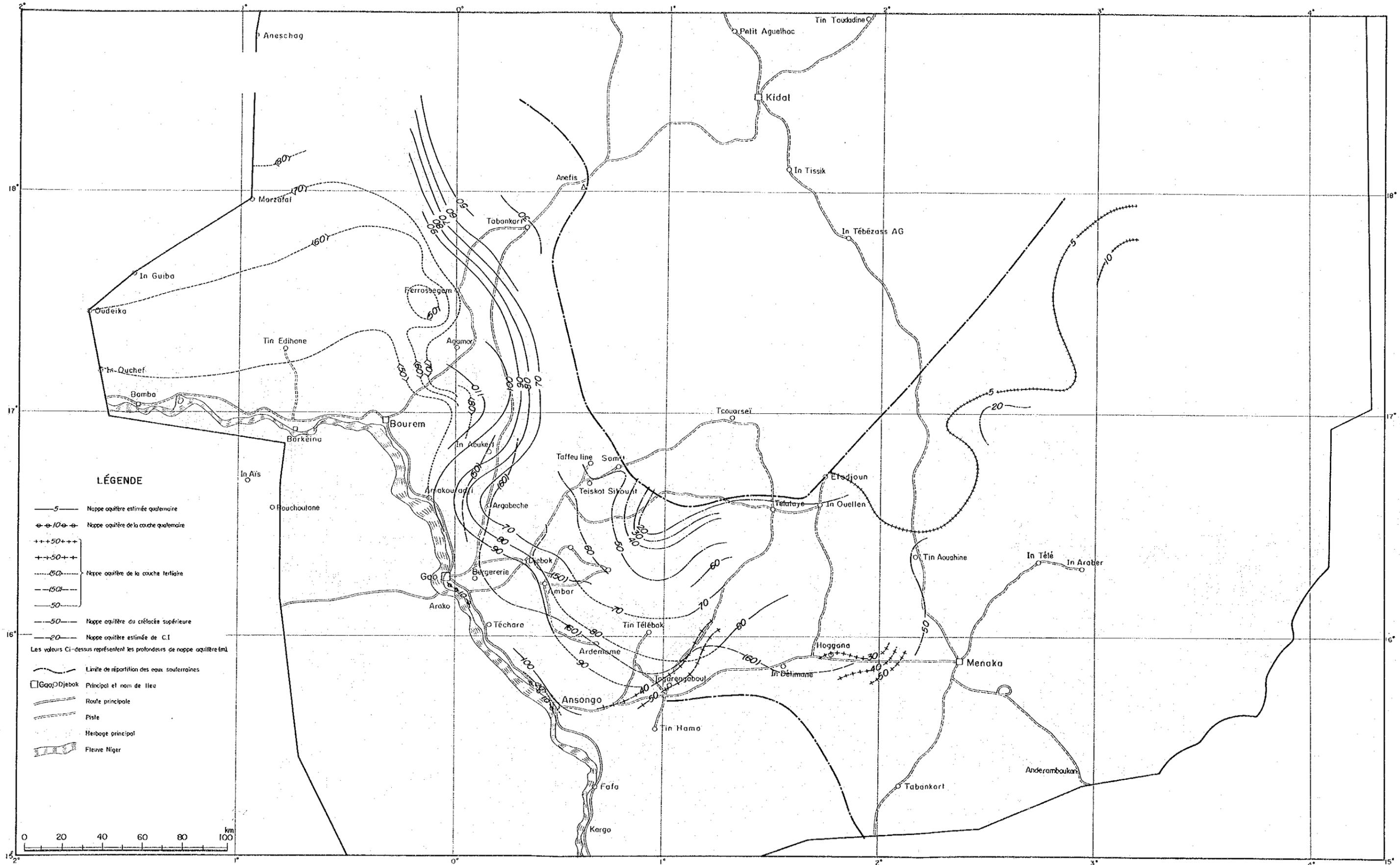


Fig.IV-7-1 Herbages et acheminement pour le nomadisme pastoral.

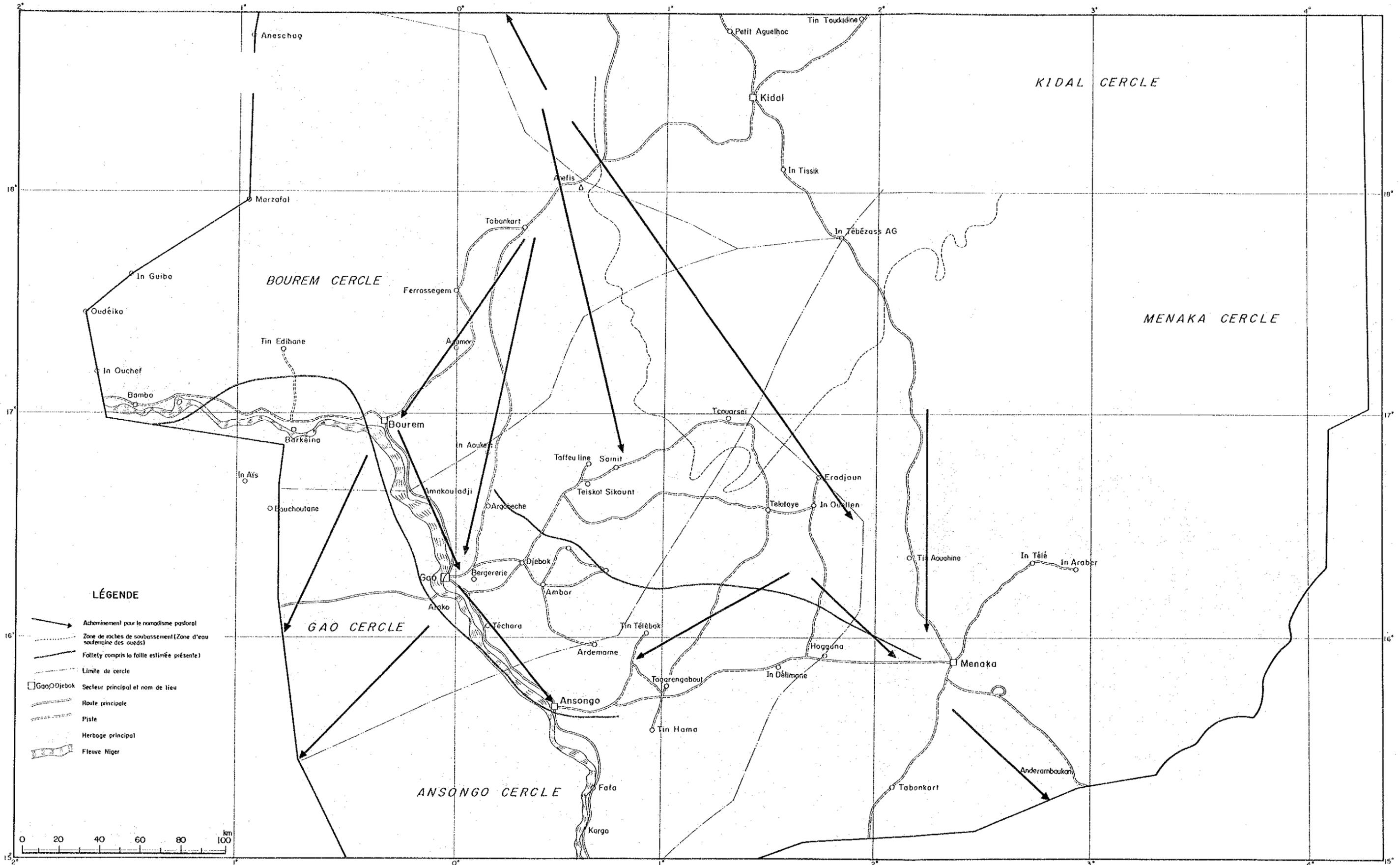


Fig. IV-7-2 Degré d'importance du développement des eaux souterraines par secteur.

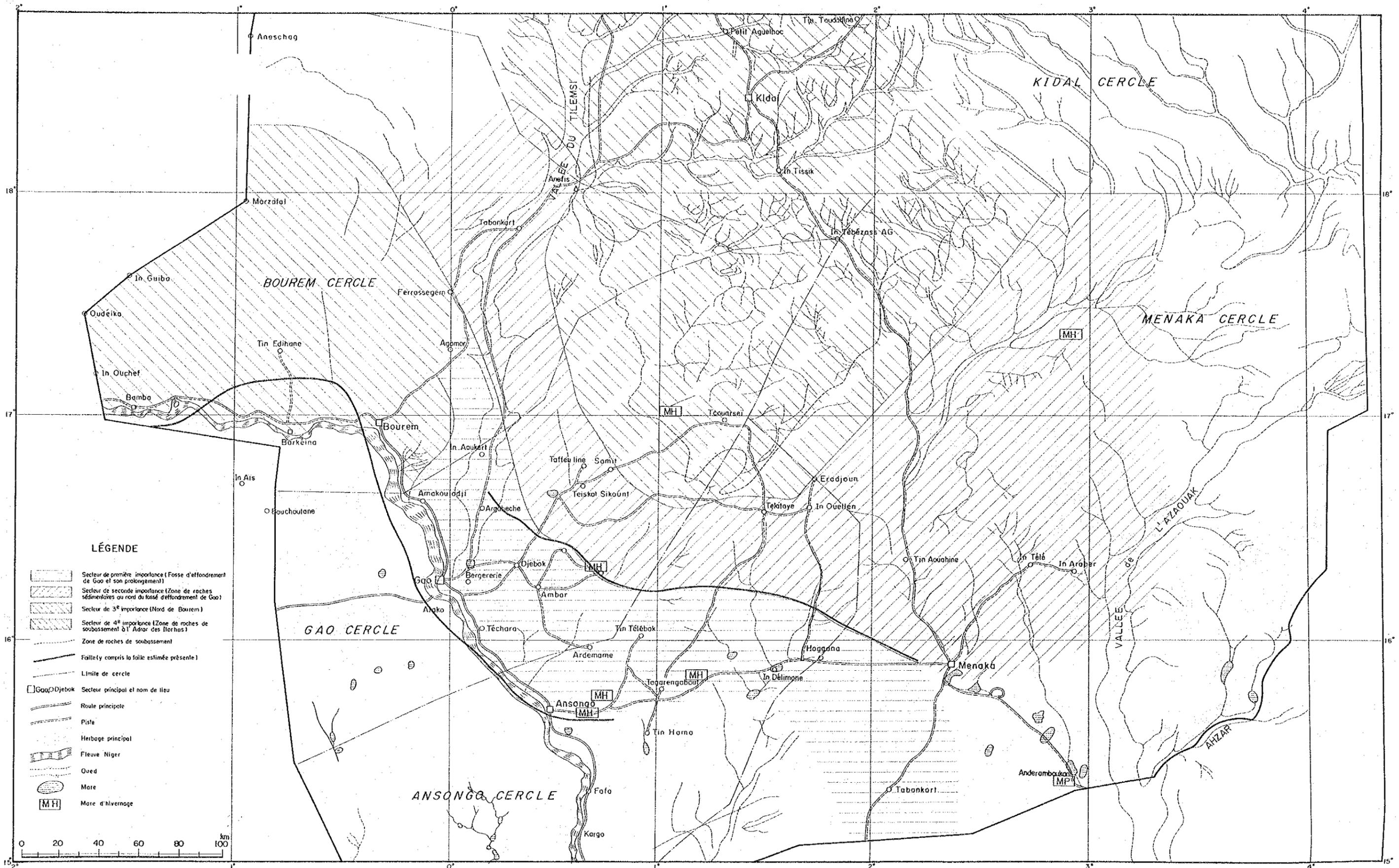
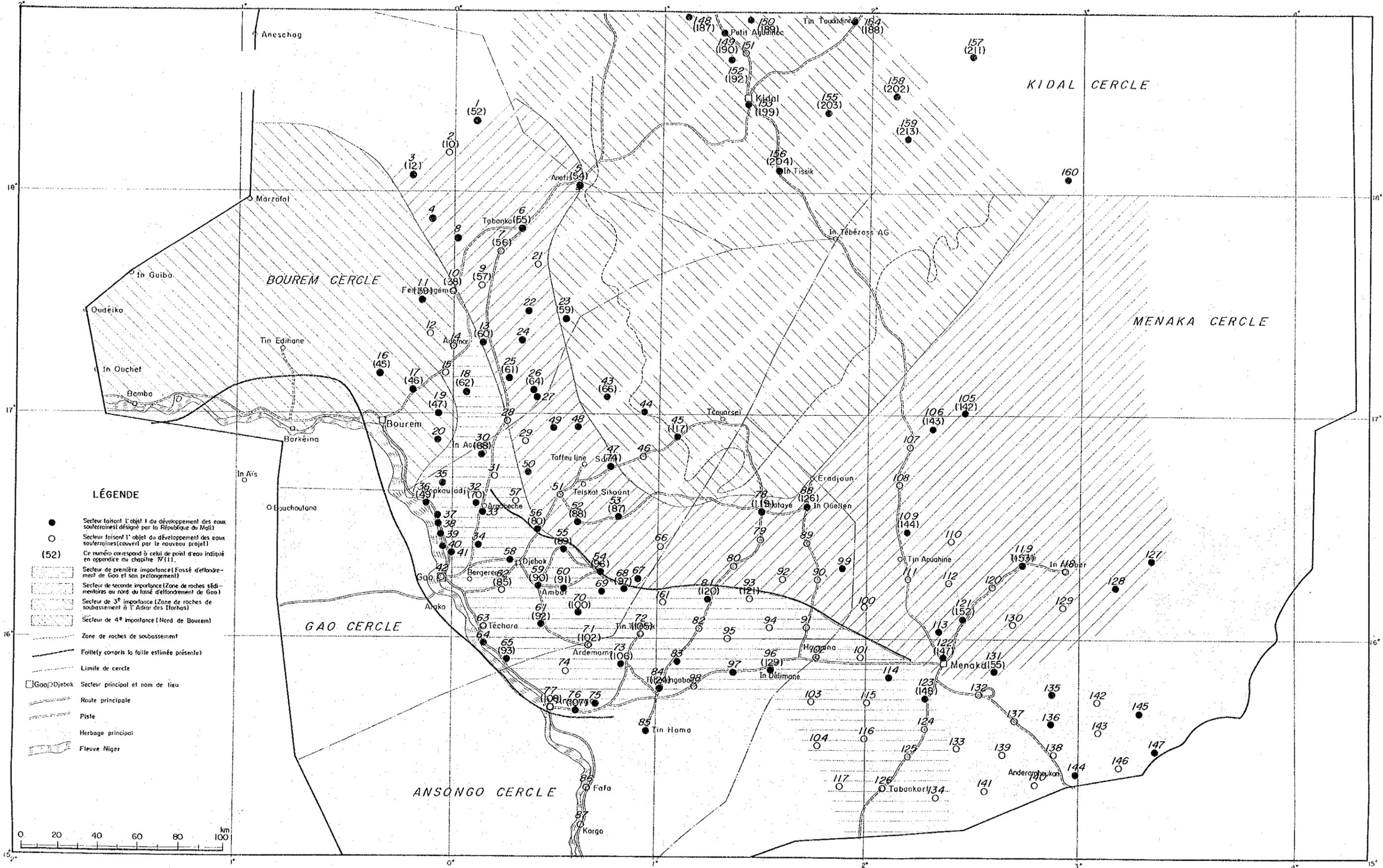


Fig. IV-7-3 Secteurs sur lesquels sera prévu le développement des eaux souterraines.



V. ETUDE DU PROJET EN VALEUR
DES EAUX SOUTERRAINES

V. ETUDE DU PROJET DE MISE EN VALEUR DES EAUX SOUTERRAINES

Comme décrit ci-dessus, les solutions techniques optimales de prospection et de forage pour la mise en valeur des eaux souterraines ont été définies par quatre ans d'études d'avant-projet et, à partir de l'analyse des études effectuées sur le terrain ainsi que de l'étude des documents, la structure hydrogéologique et la prévision de la demande et offre de l'eau de la 7^{ème} région économique ont été déterminées. Des directives du plan d'utilisation des eaux souterraines ont pu ainsi être définies.

Dans ce qui suit, les principales conditions du projet de mise en valeur des eaux souterraines dans cette 7^{ème} région économique sont étudiées sur la base des résultats des études d'avant-projet et des considérations sur ces résultats.

1. Faisabilité hydraulique de la mise en valeur

Pour pouvoir réaliser le projet de mise en valeur des eaux souterraines, on doit d'abord déterminer si, oui ou non, les eaux souterraines existent dans cette région en quantité suffisante pour satisfaire les besoins prévus. Si oui, on doit ensuite s'assurer qu'il soit possible d'utiliser ces eaux souterraines.

Autrement dit, la faisabilité du projet de mise en valeur des eaux souterraines doit d'abord être étudiée sur le plan hydraulique. Les eaux souterraines sont classées en deux catégories: nappe phréatique et nappe profonde. Les eaux souterraines de la première catégorie se trouvent normalement à une profondeur jusqu' à 40 m, tandis que celles de la dernière catégorie existent dans des nappes aquifères plus profondes.

Des nappes phréatiques existent dans un terrain quaternaire s'étendant le long du fleuve du Niger (et qui, par endroits, est alimenté en eau par le fleuve et présente en conséquence un mécanisme d'vémmagasinment dans la rive), ainsi que dans des flaques et des mares qui se trouvent dans un arrière-pays plat. De plus, ces nappes se trouvent également dans des aires altérées des zones des roches de soubassement à Kidar et à Gourma, ainsi que dans des couches du gravier des oueds. Pour ces nappes phréatiques, il est relativement facile de mettre en œuvre des puits. De ce fait, les nappes phréatiques sont largement utilisées depuis longtemps.

D'autre part, des nappes profondes sont contenues dans des nappes aquifères se trouvant dans l'intercalaire continental, le crétacé tertiaire et le tertiaire (comprenant l'intercalaire continental) qui sont composés de roches sédimentaires et dont les roches de soubassement n'affleurent pas. Le nombre de ces nappes aquifères monte à plusieurs nappes, dont la profondeur va jusqu'à 100m ou plus, ce qui n'a pas permis de les utiliser au moyen de puits ordinaires (dont la profondeur limite de construction va jusqu'à 60 m). Cependant, des forages permettent de prélever des eaux souterraines de ces nappes aquifères et peuvent assurer l'utilisation efficace des eaux souterraines précieuses qui existent dans cette région.

L'alimentation en eau souterraine est assurée par les chutes de pluie tant pour les nappes phréatiques que pour les nappes profondes. D'ailleurs, dans le terrain s'étendant le long du fleuve du Niger, cette alimentation en eau souterraine est assurée également par le fleuve par endroits.

Pour les nappes profondes, l'alimentation en eau souterraine se fait en bordure de la zone du massif d'Adrare des Iforas dans laquelle les strates constituant les nappes aquifères considérées affleurent à la surface du sol. Dans cette bordure, les précipitations se transforment en eaux souterraines, qui courent dans des nappes aquifères penchant vers le fleuve du Niger.

Ainsi, la structure hydrogéologique de la 7^e région économique est relativement simple d'une façon générale, et il semble à peu près certain que l'existence de nappes aquifères soit très largement étendue dans cette région. Cependant, la quantité d'eau n'est pas très orande.

Ce problème se pose notamment par le fait que la hauteur pluviométrique dans cette région est faible et que la perméabilité des nappes aquifères n'est pas bonne en moyenne. Dans ces conditions, on ne peut pas s'attendre à une quantité excessive d'eau sauf dans certaines zones s'étendant le long du fleuve du Niger.

D'après les résultats des études effectuées jusqu'ici, on ne peut s'attendre qu'à un pompage de l'ordre de 1 à 10 m³/h pour les nappes phréatiques (de profondeurs jusqu'à 40 m) et de 3 à 6 m³/h pour les nappes profondes (de profondeurs jusqu'à 150 m).

Cependant, en ce qui concerne l'équilibre entre la demande et l'offre de l'eau souterraine dans l'ensemble de cette région, l'apport annuel d'eau souterraine est de 182 x 10⁶ m³/an pour les nappes profondes en dehors des nappes phréatiques, alors que les besoins maximum actuels en eau (quantité totale d'eau calculée à partir des besoins en eau des bestiaux d'une unité maximum debetail pouvant être élevés sur la superficie actuelle du pâturage ainsi que du besoin en eau par habitant) sont de 18 x 10⁶ m³/an. Ainsi, la quantité des eaux souterraines existant dans cette région est considérée comme étant suffisante pour satisfaire les besoins en eau. En ce qui concerne la qualité d'eau, elle ne pose pas de problème dans les cas ordinaires. En ce qui concerne les caractéristiques des nappes aquifères par zones, leur hauteur, pendage, perméabilité, etc. sont fonction des conditions géographiques dans l'âge auquel les strates se trouvant dans la zone considérée ont été formées. Donc, si une zone de forage est choisie par suite d'une prospection efficace, un puits au débit de jaillissement relativement grand pourra être foré.

Enfin, l'apport des eaux souterraines et la potentialité de l'existence de nappes aquifères à une profondeur jusqu'à 150 m dans cette région rendent le présent projet de mise en valeur faisable. Si des puits appropriés sont construits à des points de forage efficaces, le but de la mise en valeur des eaux souterraines pourra être atteint d'une manière satisfaisante.

2. Sélection des zones de forage

Pour la sélection des zones de forage, une bonne étude doit d'abord être effectuée pour qu'un effet de la mise en valeur des eaux souterraines par forage puisse être obtenue et que les travaux de forage puissent être exécutés efficacement.

Pour une zone de forage destiné à l'élevage du bétail, on doit étudier les conditions d'exploitation, telles que la relation de ce point au pâturage et au lieu d'existence de l'eau de surface en saison pluviale, le nombre et l'itinéraire de migration des bestiaux, la distance entre le point de forage et les puits y attenants, etc., ainsi que les conditions de chantier de sondage, telles qu'état d'une route d'accès à la zone de forage, relation du point de forage à un point d'alimentation en eau de sondage, etc. D'ailleurs, on doit également procéder à une étude sur le plan hydraulique pour vérifier que des eaux souterraines existent en quantité voulue à une zone de forage proposé.

Les zones de forage proposées sont ainsi étudiées sur le plan de l'exploitation, sur le plan de l'exécution des travaux de forage et sur le plan, hydrogéologique. L'ordre de priorité d'exécution des forages pour les différentes zones de mise en valeur des eaux souterraines sera décidé en fonction de l'effet et de l'urgence de la mise en valeur des eaux souterraines de chaque zone.

Etant donné que le présent projet est un projet d'aménagement de l'infrastructure sociale, la priorité devra être donnée à des points de forage qui produiront un effet primaire tout en permettant l'utilisation de l'eau en plus grande quantité et dans un plus court délai.

Ainsi, l'exécution de la mise en valeur des eaux souterraines devra être commencée d'abord pour assurer l'alimentation en eau potable des habitants. Les forages destinés à l'élevage du bétail devront être exécutés à partir des zones de première importance indiquées à la figure IV.7.2 dans lesquelles on peut s'attendre à un relativement grand débit de pompage de l'eau.

De ce point de vue, la sélection des zones de forage devra être faite de la manière décrite ci-dessous.

Ordre de priorité de l'exécution du projet suivant Cercle Administratif :

Cercle \ Ordre	I	II	III
Gao			
Ansongo			
Ménaka			
Bourem			
Kidal			