

PN AB 0-7J7
94414

IMPACT HYDROLOGIQUE ET ECOLOGIQUE DE L'EXPLOITATION DES EAUX
SOUTERRAINES A DES FINS AGRICOLES DANS LA REGION DES OUADIS
AU NORD-EST DU LAC TCHAD : QUELQUES ASPECTS

Christian EBERSCHWEILER

Hydrogéologue,
Expert en Travaux Ruraux
pour le projet ORT au Tchad

juillet 1990

USAID TCHAD

SOMMAIRE

	pages
INTRODUCTION	3
I CONDITIONS DE GISEMENT DES EAUX SOUTERRAINES	5
A. SCHEMA HYDROGEOLOGIQUE GENERAL	5
A.1 Schéma régional	5
A.2 Schéma local	5
B. LA NAPPE PHREATIQUE REGIONALE DES SABLES: NAPPE DU KANEM	8
C. LES NAPPES LOCALES DES OUADIS	8
D. RELATIONS ENTRE LES NAPPES	8
E. INTERFERENCE DES EAUX SUPERFICIELLES: LE LAC TCHAD	9
- Etat actuel du lac Tchad	9
- Relations piézométriques entre la nappe régionale du Kanem et le lac Tchad	9
II TERMES DU BILAN HYDRIQUE	12
A. INTRANTS: LA RECHARGE	12
- Les pluies efficaces	12
- Les écoulements souterrains latéraux	12
- Ecoulements souterrains verticaux	12
B. SORTIES: LES PERTES	12
- L'évapotranspiration réelle (ETR)	12
- Les écoulements souterrains en aval	16
- Les écoulements souterrains verticaux	16
C. BILAN HYDRIQUE	16
D. NIVEAUX DE STOCKAGE	16
E. EVOLUTION DANS LE TEMPS	16
E.1 Evolution à l'échelle annuelle	16
E.2 Evolution à l'échelle pluri-annuelle (depuis les années 1960)	21
III SCHEMA DE CYCLE SALIN	23
A. SALINITE DES EAUX SOUTERRAINES	23
A.1 Caractéristiques physicochimiques	23
A.2 Caractéristiques chimiques	23
A.3 Qualité des eaux pour l'agriculture	26
B. SALINITE DU SOL DES OUADIS	26
B.1 Nature des principaux sels	26
B.2 Qualité des sols pour l'agriculture	26

C. RELATIONS ENTRE L'EAU ET LE SOL DES OUADIS	26
C.1 Mécanismes physiques	26
C.2 Origine des sels dans les ouadis	28
C.3 Rapports entre nappe des sables et nappe des argiles	28
D. BILAN SALIN	29
IV PHENOMENES SPECIFIQUES A L'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES	31
A. DIFFERENTS TYPES D'OUVRAGES DE CAPTAGES SERIES PAR LE PROJET ORT	31
A.1 Les puits traditionnels	31
A.2 Les petites unités forage-motopompe	31
B. EFFETS DE L'EXPLOITATION DES EAUX	31
B.1 Impact hydrogéologique	31
B.2 Impact géochimique	31
V CONCLUSION	34
A. LIMITES DE L'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES POUR L'IRRIGATION	34
- Limites géographiques:	34
- Limites quantitatives:	34
B. DEUX ASPECTS OPPOSES DU RAPPORT ENTRE LA PIEZOMETRIE DES NAPPES DES SABLES ET DES ARGILES	34
C. SYSTEMES D'EXPLOITATION APPROPRIES AUX CONDITIONS DU MILIEU	34
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	35
BIBLIOGRAPHIE	37

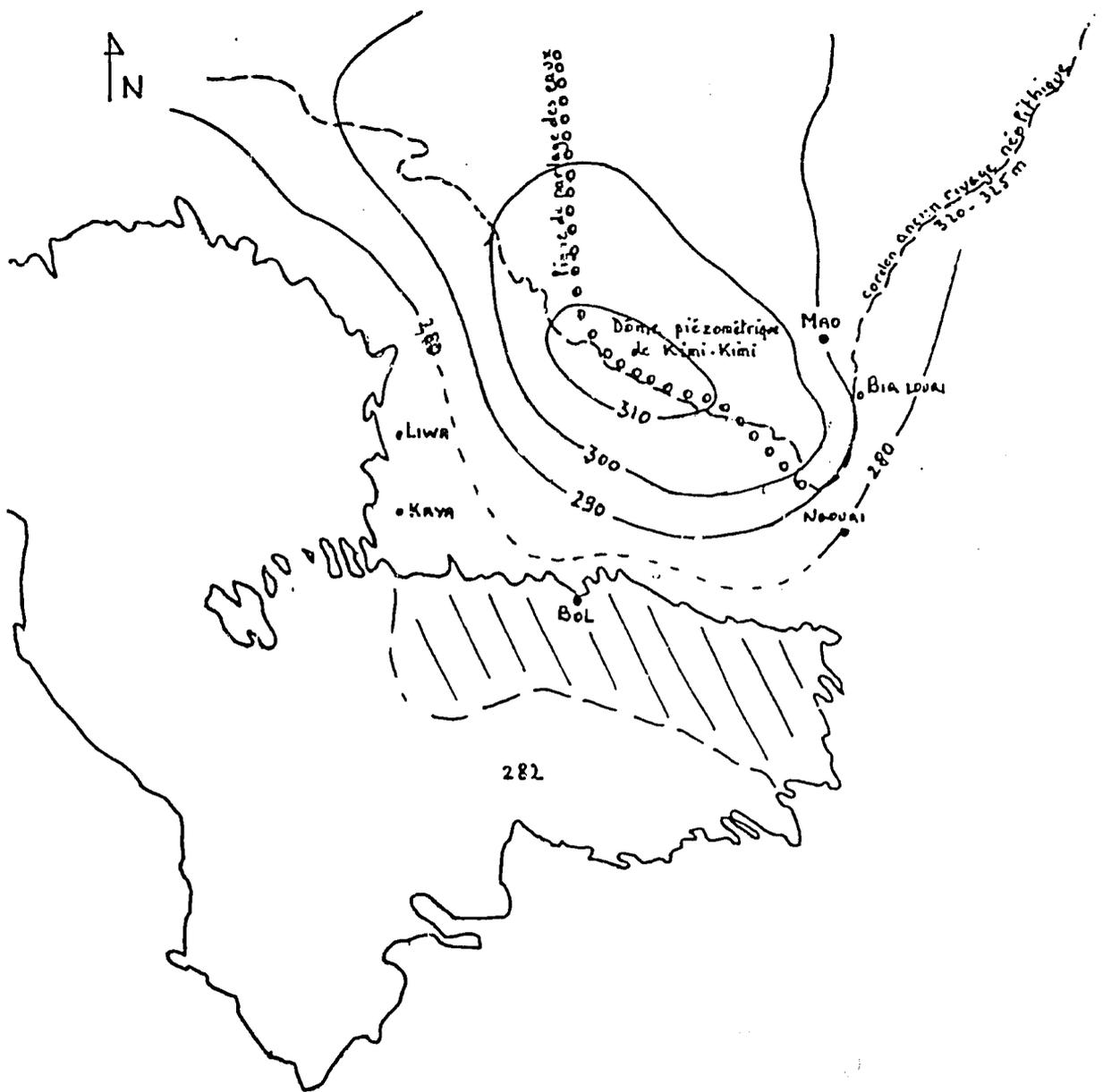
INTRODUCTION

L'objectif de cette étude est de tenter d'évaluer les conséquences sur l'environnement qui pourraient résulter d'un accroissement important de l'exploitation des eaux souterraines pour l'agriculture dans les dépressions inter-dunaires ou "ouadis" de la région de Ngouri au nord-est du lac Tchad. Il s'agit en particulier de chercher si les solutions préconisées par le projet ORT de Ngouri sont compatibles avec cet environnement fragile, dans un contexte climatique en régression tel qu'on l'observe depuis la dernière décennie.

Les chapitres I à III sont une analyse schématique des conditions naturelles du milieu des ouadis.

Les chapitre IV et V sont relatifs à l'exploitation des eaux dans les ouadis et à ses conséquences.

Le document se propose d'interpréter l'ensemble des données recueillies au cours du projet ORT. Toutes ces données sont disponibles à ORT dans le rapport final d'activités de l'Expert en Travaux Ruraux (Eberschweiler C. 1990). Un bon nombre d'hypothèses sont étayées à partir de travaux antérieurs dont les sources diverses sont référencées au cours du texte et dans la bibliographie à la fin du document.



Echelle 1/1.500.000e

fig.1 Carte piézométrique générale de la nappe du Kanem en 1969
 (d'après la carte hydrogéologique, Schneider J.L. 1969)

I CONDITIONS DE GISEMENT DES EAUX SOUTERRAINES

A. SCHEMA HYDROGEOLOGIQUE GENERAL

A.1 Schéma régional

Les eaux souterraines dans la région de Ngouri appartiennent à la nappe régionale du Kanem. Cette nappe a une alimentation encore actuelle par les pluies infiltrées au travers des dunes (Fontes et al. 1969, Roche M.A. 1980) et il existe à l'ouest de Mao un "dôme piézométrique" responsable d'un écoulement généralisé vers le lac Tchad (fig.1). L'influence du Lac ne se fait pas sentir elle, en fait, au delà de quelques kilomètres de ses rives.

A.2 Schéma local

On est en présence de deux types d'aquifères dont les comportements aussi bien hydrodynamiques que hydrochimiques sont très différents: la nappe régionale qui détermine la piézométrie générale de la zone et est très étendue (fig.1); des nappes locales se trouvant dans le fond des dépressions (ouadis). La fig.2 donne une idée de la morphologie générale de la région où s'opposent zones dunaires arides (steppe) et inter-dunaires mieux protégées des vents dominants, où règne un micro-climat beaucoup plus favorable à la végétation.

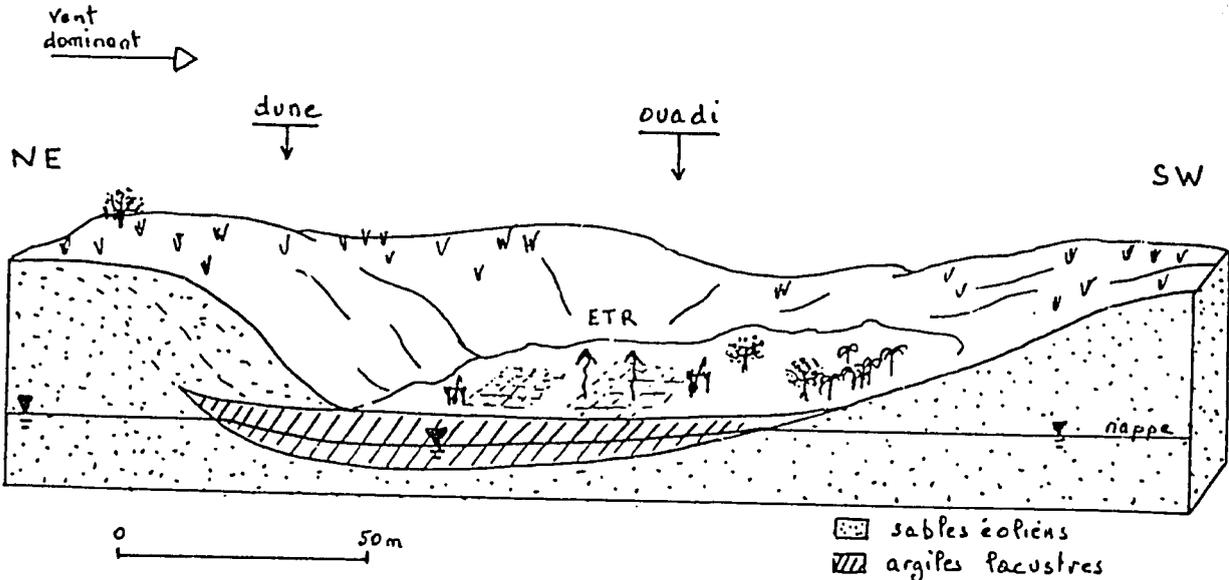
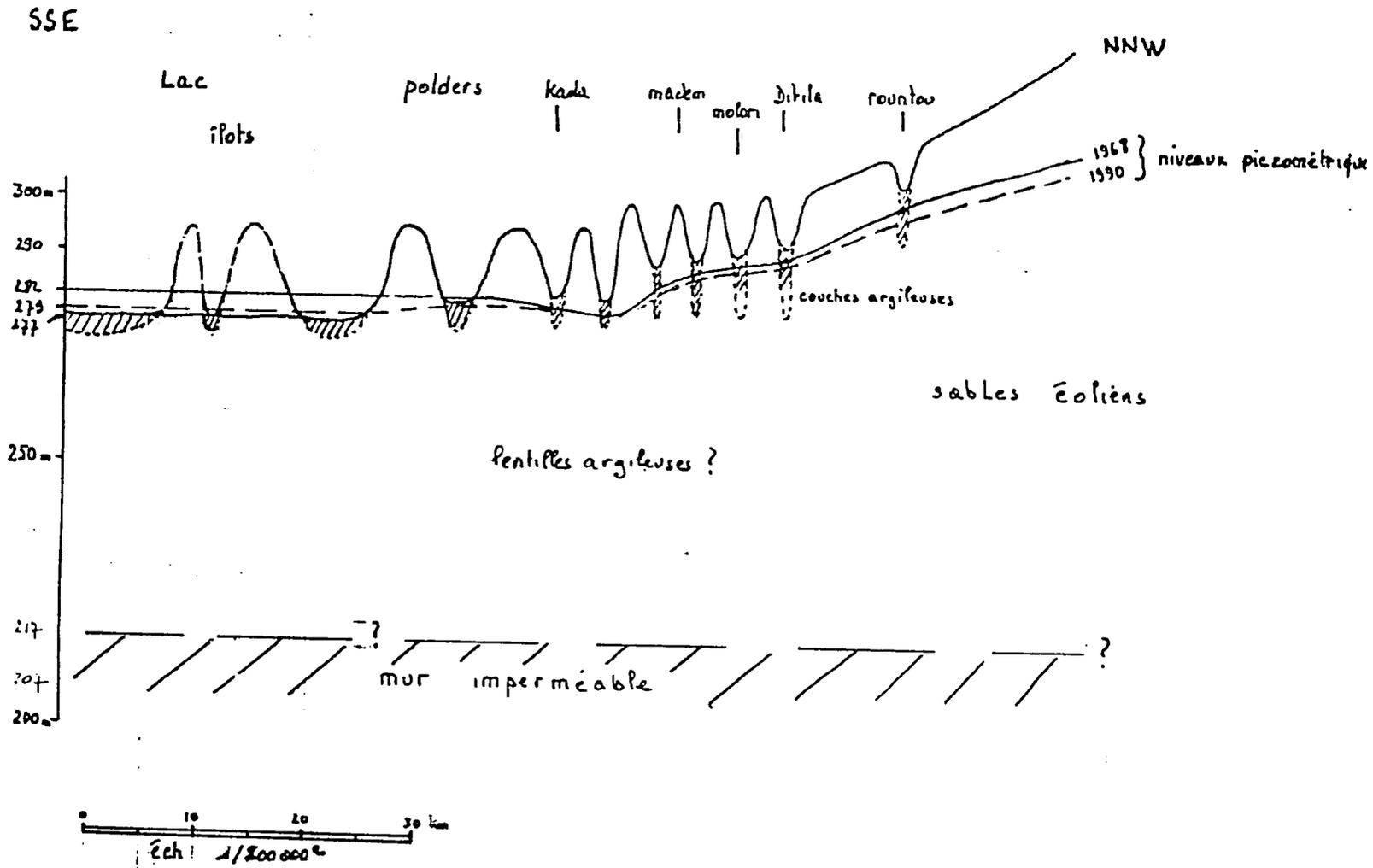


fig.2 Coupe schématique d'un ouadi: relations entre la nappe régionale des sables et la nappe du ouadi

Fig.3 Coupe hydrogéologique schématique perpendiculaire aux isopièzes, passant entre Dibinintchi et Njigidada (localisation voir carte fig.4)



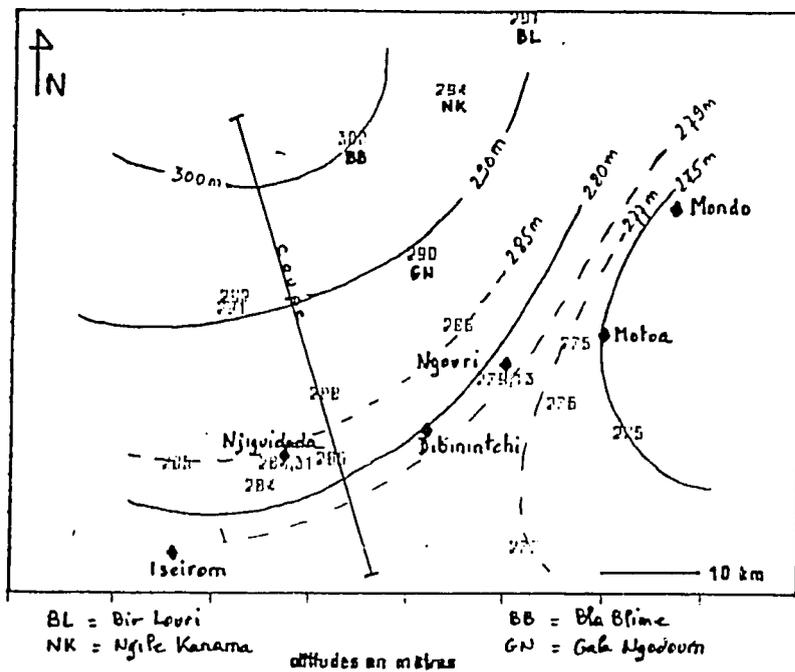


fig.4 Carte piézométrique de la nappe des sables (nappe phréatique du Kanem) dans la zone de Ngouri en janvier 1990

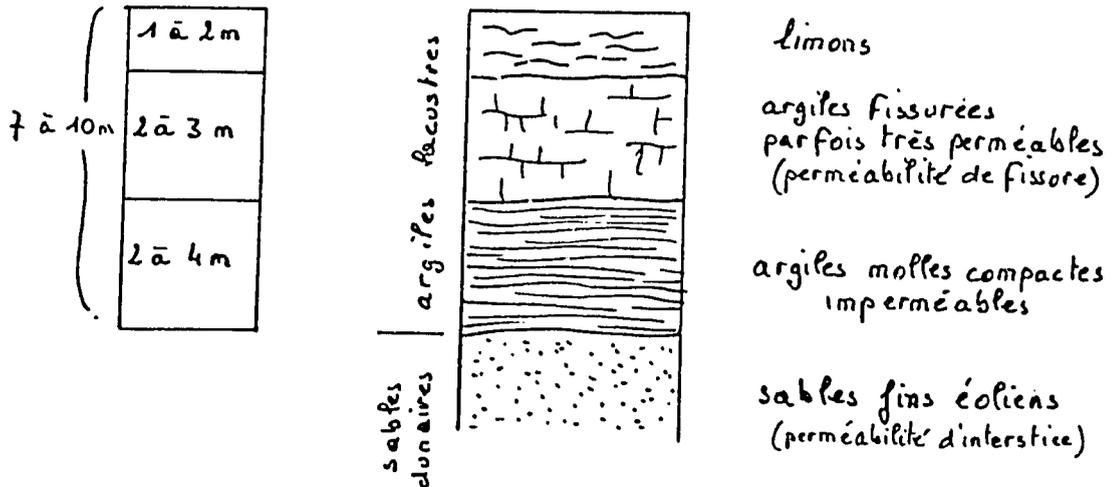


fig.5 Profil stratigraphique au centre d'un ouadi de la région de Ngouri

B. LA NAPPE PHREATIQUE REGIONALE DES SABLES: NAPPE DU KANEM

- Elle est contenue dans les formations dunaires du pleistocène supérieur. Il s'agit de sables éoliens fins, très homogènes. Il y a possibilité de trouver des lentilles argileuses inter-stratifiées qui correspondraient à des ouadis ou polders fossiles. Ces niveaux évaporitiques intercalés peuvent permettre d'expliquer certaines hétérogénéités de salinité de la nappe.

- Piézométrie: profonde (au delà de 20 mètres), protégée par une épaisse couverture sableuse sous les dunes, ou au niveau des ouadis par un toit argileux imperméable, la nappe est peu sensible aux fluctuations saisonnières du point de vue de la piézométrie mais aussi du point de vue chimique.

- Gradient piézométrique et écoulement général: le gradient piézométrique général est très faible. Il se situe autour de 0,0006 vers Njiguidada et 0,0008 au niveau de Ngouri (fig.3 et 4). Des mesures d'âge radiométrique apparent des eaux de la nappe (in Maglione 1976) montrent un vieillissement à mesure qu'on s'éloigne du dôme piézométrique du Kanem (Nokou 2660 ± 55; Ngouri 3110 ± 60; Dibinintchi 3810 ± 60 ans B.P.) et signifient pour ce secteur un écoulement très lent des eaux souterraines en direction du Lac. Schneider (1966) délimite au nord-est une ligne de partage des eaux au delà de laquelle les écoulements souterrains sont dirigés vers le nord-est (fig.1).

- Puissance de la nappe. Elle est estimée dans la région du Lac entre 70 et 80 mètres d'après les sondages (Roche M.A. 1980).

C. LES NAPPES LOCALES DES OUADIS

- Ces nappes locales sont contenues dans les formations lacustres de l'holocène. La fig.5 montre un profil caractéristique des couches qui tapissent le fond des ouadis. C'est au niveau des argiles fissurées que se situent les nappes proprement dites des ouadis. Il arrive néanmoins que le niveau hydrostatique dans ces couches se trouve plus bas au niveau des argiles imperméables ou même dans les sables. La nappe du ouadi est alors inexistante.

- Piézométrie: peu profondes (2 à 8 mètres dans la zone étudiée), elles présentent souvent des fluctuations saisonnières, piézométriques et chimiques, qui peuvent être très marquée. Elles sont plus sensibles aux effets de l'exploitation.

D. RELATIONS ENTRE LES NAPPES

- Les relations hydrostatiques entre les 2 types de nappes se présentent dans les ouadis de la zone selon 3 cas de figure (fig.6):

. Cas A: les argiles fissurées sont noyées et constituent l'aquifère local des argiles. Les sables dunaires sont noyés et en charge sous les argiles imperméables. Les puits creusés dans les argiles fissurées ont en général de bons débits.

. Cas B: mêmes conditions que pour le cas A mais les argiles fissurées sont sèches. Le niveau hydrostatique dans les argiles se situe plus bas au niveau des argiles compactes. Il n'y a pas de véritable aquifère des argiles. Les puits qui captent l'eau des argiles tarissent vite.

. Cas C: il n'y a pas d'eau dans les argiles, pas de nappe locale. Le niveau hydrostatique se trouve dans la couche sableuse ou à la base des argiles.

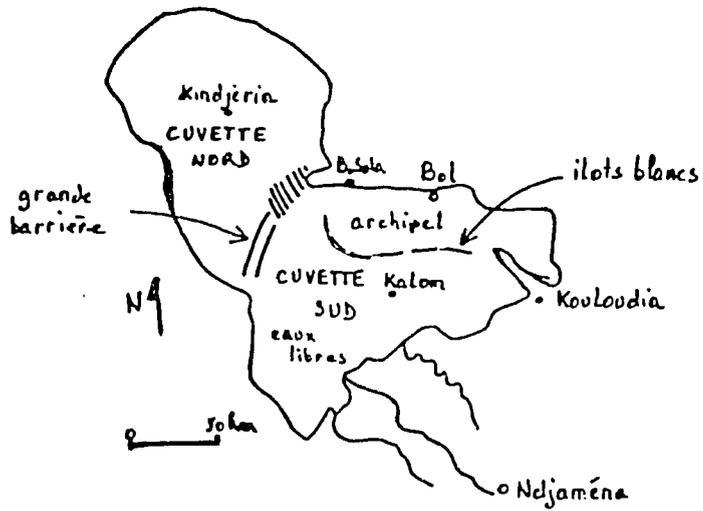


fig.7 Régions naturelles du lac Tchad en 1989
(Le Moalle J. 1989)

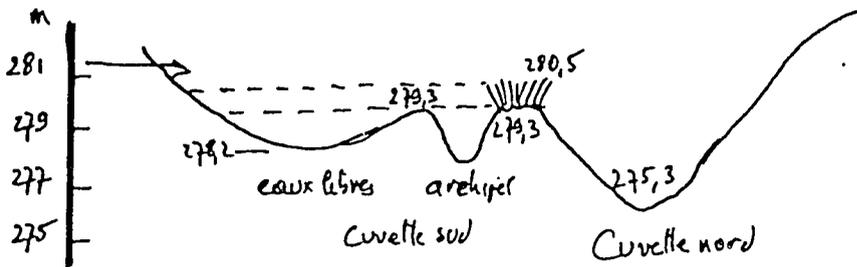
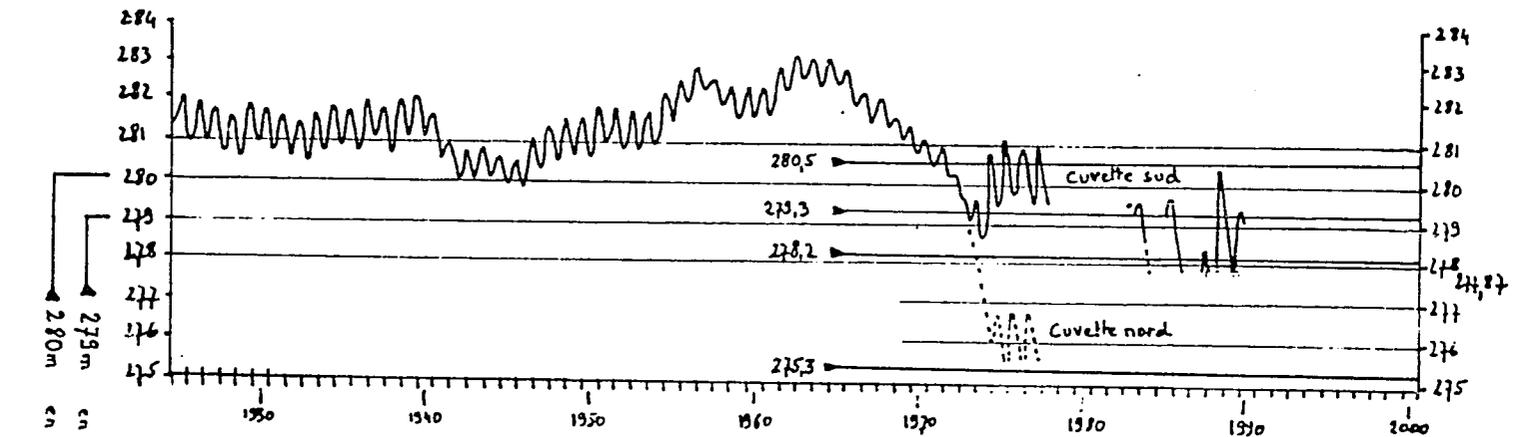


fig.8 Topographie schématique des fonds du lac Tchad
(Le Moalle J. 1989)

- Relations piézométriques entre la nappe régionale du Kanem et le lac Tchad: la coupe hydrogéologique de la fig.3 montre que le raccordement entre le Lac et la nappe se fait par une "gouttière" ou creux piézométrique vers lequel convergent les écoulements souterrains. Cette gouttière qui avait été mise en évidence il y a quelques dizaines d'années (Schneider J.L. 1966, Roche M.A. 1980) est devenue presque imperceptible actuellement (voir fig.3 et 9). Le rayon d'influence du Lac vis-à-vis des eaux souterraines, évalué autrefois à quelques kilomètres au maximum est devenu encore plus réduit actuellement.



Niveaux comparés de
la gouttière de la nappe
phréatique du Kanem

fig. 9 Niveaux du lac Tchad depuis 1925 jusqu'en 1990 (retracé d'après Roche M.A. 1980, Le Moalle J. 1989 et Annuaire hydrologique du Tchad)

II TERMES DU BILAN HYDRIQUE

L'unité hydrologique considérée est la nappe phréatique régionale dans le secteur Ngouri-Dibinintchi-Njiguidada: terme englobant la nappe générale des sables et les petites nappes localisées dans les ouadis avec lesquelles elle communique.

A. INTRANTS: LA RECHARGE

- Les pluies efficaces (cf tab.1 et fig.10).

L'infiltration des pluies à travers les sables dunaires est encore actuelle (Fontes et al. 1969, Roche M.A. 1980) et serait responsable de l'existence du dôme piézométrique du Kanem (Kimi-kimi; fig.1). Elle est cependant limitée dans certaines zones à cause de la consommation par la végétation herbacée qui se développe pendant la saison des pluies. Seules les pluies suffisamment intenses peuvent atteindre la nappe.

Dans les dépressions, les pluies et les eaux ruisselées sur les flancs des dunes atteignent facilement les nappes peu profondes dont les variations saisonnières sont plus marquées surtout à l'ouest de la zone où la nappe est la moins profonde.

Globalement le ruissellement peut être considéré comme interne à l'unité hydrologique vu la topographie et la forte perméabilité des sables dunaires. Il ne concerne que les flancs des dépressions qui elles-mêmes sont endoréiques (pas d'exutoire).

La pluviométrie moyenne à Ngouri sur les trente dernières années est de 304,0 mm. Comparativement, elle est de 261,2 à Bol, 252,0 à Mao et 513,8 à Ndjaména (fig.11). Les pluies peuvent être très irrégulières d'une année sur l'autre, ainsi est-on passé à Ngouri de 141,5 mm en 1987 à 410,9 mm en 1988.

- Les écoulements souterrains latéraux: la participation des eaux lacustres à l'alimentation de la nappe du Kanem est limitée à une frange littorale réduite (Fontes et al. 1969); le Lac ne joue qu'un rôle mineur dans l'alimentation de celle-ci. En amont, le gradient piézométrique général indique un faible écoulement depuis le dôme du Kanem.

- Ecoulements souterrains verticaux: les relations avec les nappes sous-jacentes sont inconnues mais elles sont probablement assez limitées dans la zone vu l'épaisseur du substratum imperméable (Roche M.A. 1980, Schneider J.L. 1966).

B. SORTIES: LES PERTES

- L'évapotranspiration réelle (ETR)

Sous la dune, la nappe est bien protégée de l'évaporation par une épaisse couche sableuse $ETR \ll ETP$. Sous les ouadis par contre, les argiles favorisent la remontée capillaire des eaux souterraines et donc l'évaporation de la nappe surtout lorsque celle-ci n'est pas profonde (<3 mètres). De plus la végétation arborée puise directement ses besoins dans la nappe et accentue la phénomène. ETR se rapproche de ETP ($ETR \leq ETP$). Cette forte reprise par évaporation de la nappe des argiles explique que son niveau statique soit toujours plus bas que celui de la nappe des sables (cf. fig.2 et 6). Selon le rapport hydrostatique entre les nappes (drainance ou pas) la nappe des sables est vulnérable ou pas à l'évaporation. L'occurrence de cette reprise par évaporation dans la région des ouadis de la nappe des sables sous-jacente par l'intermédiaire de la nappe des argiles est une explication logique à la présence de la gouttière piézométrique

PLUIES A NGOURI

ANNÉES 1987 - 1990

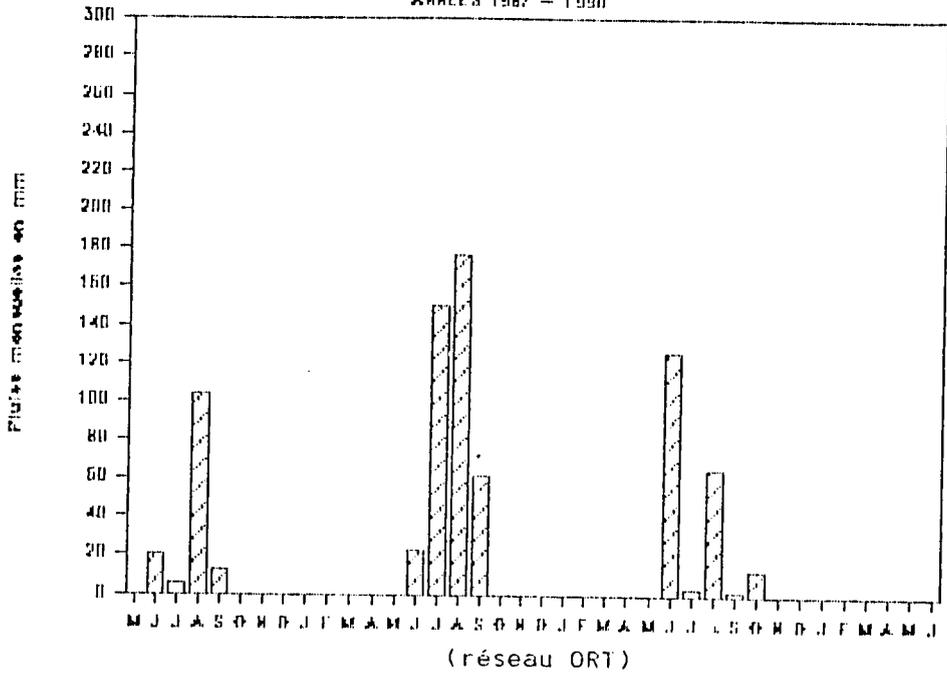
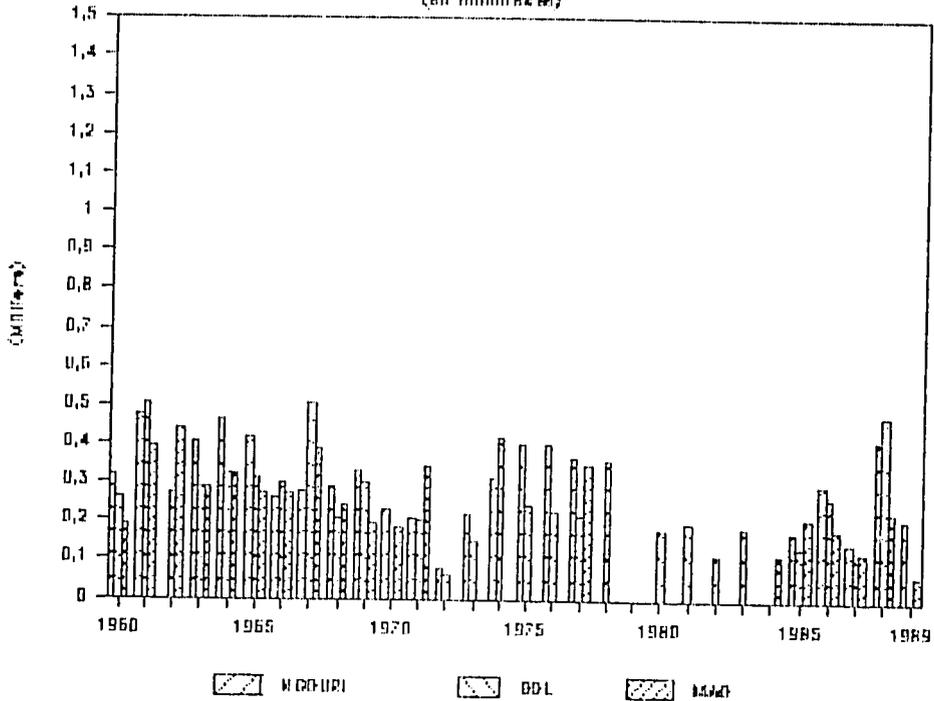


fig.10

PLUIES A NGOURI BOL ET MAO (1960-1989)

(en millimètres)



(données du Service Météorologique du Tchad)

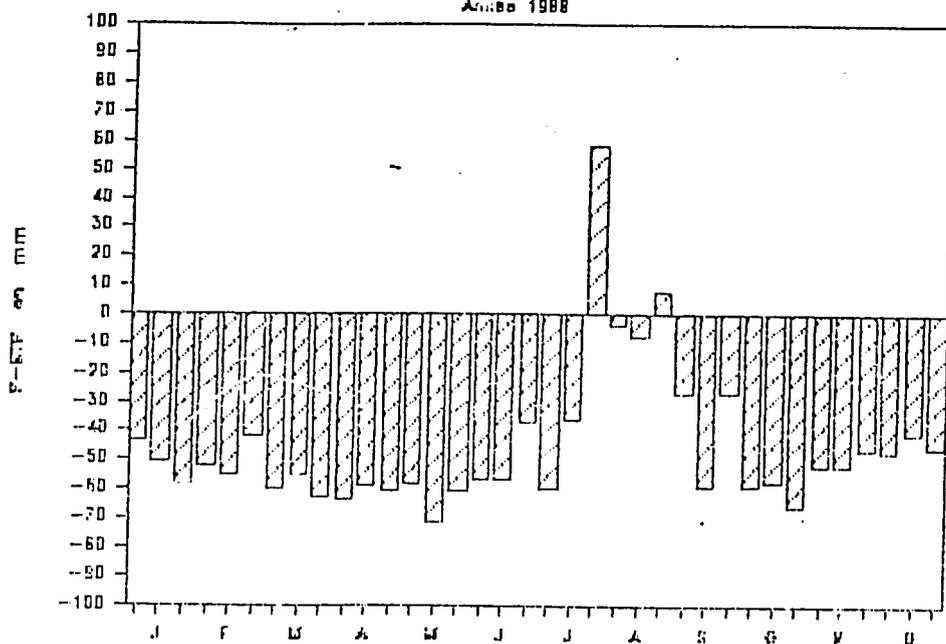
fig.11

tab.1 PLUIES ET EVAPORATION DECADAIRES A NGOURI ENTRE 1987 ET 1989
 Altitude: 290 mètres Latitude: 13,5° N

MOIS	Décade	Nb. jrs	1987		1988		1989		
			P mm	P mm	ETP mm/j	Penman décade	P mm	ETP mm/j	Penman décade
Janvier	1	10		0,0	4,3	43,2	0,0	4,5	45,0
	2	10		0,0	5,1	50,9	0,0	5,1	50,9
	3	11		0,0	5,3	58,4	0,0	5,1	56,0
	mois		0,0	0,0	4,9	152,5	0,0	4,9	151,9
Février	1	10		0,0	5,2	52,1	0,0	5,2	51,6
	2	10		0,0	5,5	55,2	0,0	5,6	55,8
	3	8		0,0	5,3	42,2	0,0	5,3	42,6
	mois		0,0	0,0	5,3	149,6	0,0	5,4	150,1
Mars	1	10		0,0	6,0	59,6	0,0	6,2	62,2
	2	10		0,0	5,5	54,8	0,0	6,0	59,6
	3	11		0,0	5,7	62,8	0,0	6,1	66,9
	mois		0,0	0,0	5,7	177,2	0,0	6,1	188,6
Avril	1	10		0,0	6,3	63,4	0,0	6,9	68,8
	2	10		0,0	5,9	59,2	0,0	6,6	65,8
	3	10		0,6	6,1	61,0	0,0	6,7	66,5
	mois		0,0	0,6	6,1	183,6	0,0	6,7	201,1
Mai	1	10		0,0	5,9	58,7	1,7	5,3	53,0
	2	10		0,0	7,1	71,2	0,0	6,9	68,5
	3	11		0,2	5,5	60,9	0,0	6,8	74,8
	mois		0,0	0,2	6,2	190,8	1,7	6,3	196,4
Juin	1	10		4,3	6,1	61,0	106,3	6,9	69,0
	2	10		0,0	5,7	56,6	0,7	6,8	68,1
	3	10		15,2	5,3	52,6	25,2	6,4	64,3
	mois		20,0	19,5	5,7	170,2	132,2	6,7	201,4
Juillet	1	10		0,9	6,1	60,7	0,0	6,1	61,3
	2	10		17,0	5,3	53,4	0,0	6,2	61,9
	3	11		122,9	5,8	64,2	1,8	4,7	52,1
	mois		5,4	140,8	5,8	178,4	1,8	5,7	175,3
Août	1	10		42,9	4,5	44,9	41,8	5,6	55,6
	2	10		45,7	5,1	51,4	7,8	5,0	50,1
	3	11		76,4	5,9	65,1	19,3	6,1	66,8
	mois		103,5	164,7	5,2	161,4	68,9	5,6	172,5
Septembre	1	10		35,2	5,6	55,7	0,0	5,7	56,6
	2	10		0,0	5,9	59,1	4,6	5,5	55,4
	3	10		24,6	5,1	51,0	0,0	5,7	57,4
	mois		12,6	59,8	5,5	165,7	4,6	5,6	169,5
Octobre	1	10		1,2	5,9	59,1	10,1	5,7	57,0
	2	10		0,0	5,8	57,8	0,0	6,1	60,8
	3	11		0,0	6,0	66,2	0,0	6,6	72,1
	mois		0,0	1,2	5,9	183,1	10,1	6,1	190,0
Novembre	1	10		0,0	5,2	52,3	0,0	5,9	58,9
	2	10		0,0	5,2	52,1	0,0	5,5	54,8
	3	10		0,0	4,7	46,9	0,0	4,7	46,9
	mois		0,0	0,0	5,0	151,2	0,0	5,4	160,5
Décembre	1	10		0,0	4,7	47,4	0,0	4,9	49,1
	2	10		0,0	4,2	41,5	0,0	4,6	45,8
	3	11		0,0	4,2	46,0	0,0	3,9	42,5
	mois		0,0	0,0	4,4	135,0	0,0	4,4	137,4
Total		365	141,5	386,2		1998,6	219,3		2094,8
Moyenne					5,5		5,7		

BILAN HYDRIQUE DANS LE OUADI A NGOURI

Année 1988

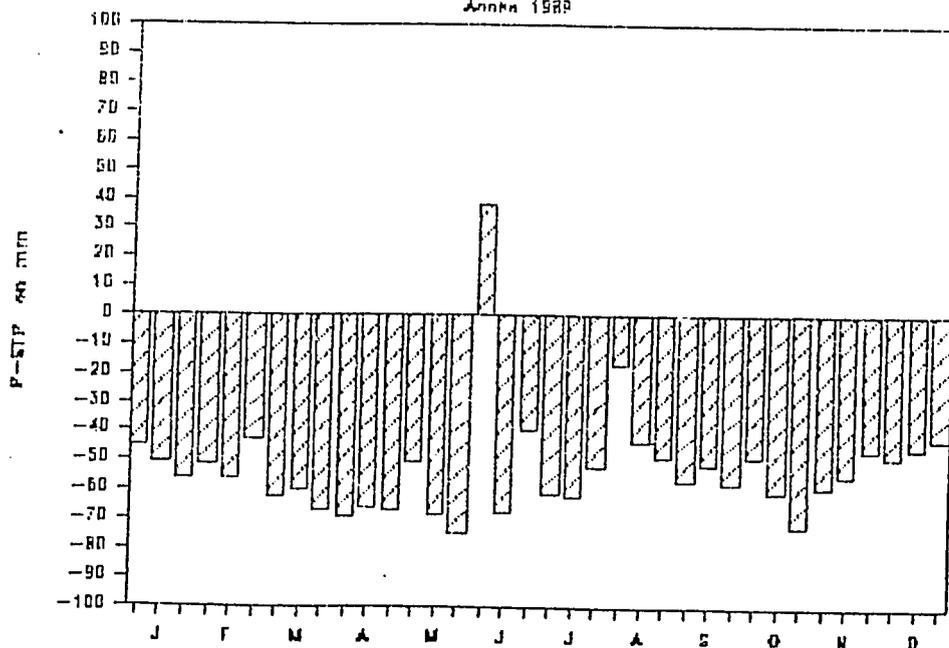


(échelle décadaire)

fig.12

BILAN HYDRIQUE DANS LE OUADI A NGOURI

Année 1989



(échelle décadaire)

fig.13

qui borde le Lac Tchad.

A Ngouri, l'ETP a été calculée avec la formule de Penman pour les années 1988 et 1989 dans le ouadi et sur la dune. Les moyennes sur ces deux années sont de 2106,9 mm sur la dune et de 2046,7 mm dans le ouadi, soit respectivement 5,8 et 5,6 mm/jour.

- Les écoulements souterrains en aval (négligeables).
- Les écoulements souterrains verticaux (négligeables).

C. BILAN HYDRIQUE

Le bilan P - ETP considéré à l'échelle décadaire montre que les excédents sont très limités (fig.12 et 13). En 1988 malgré la bonne pluviométrie seules les troisièmes décades de juillet et d'août sont excédentaires. En 1989 c'est la première décade de juin qui est excédentaire et ce uniquement grâce à la pluie exceptionnelle du 8 juin. Parmi les excédents une proportion non négligeable sert à satisfaire la réserve utile du sol et ne gagne pas la nappe.

D. NIVEAUX DE STOCKAGE

Les réservoirs sont localisés en surface ou dans le sous-sol:

- Dans les marigots saisonniers au fond des dépressions tapissées d'argiles imperméables. Il s'agit alors de lacs perchés qui s'installent en saison des pluies et disparaissent rapidement en début de saison sèche sous l'effet de l'évaporation et de l'infiltration.

- Dans les petits lacs permanents qu'on peut trouver au fond de certains ouadis. Ces lacs sont plus fréquents dans le secteur à mi chemin entre Ngouri et Liwa au nord de Bol, là où la nappe phréatique affleure (cf. fig.1).

- Dans les nappes des argiles, principalement au niveau des argiles fissurées.

- Dans la nappe des sables.

E. EVOLUTION DANS LE TEMPS

E.1 Evolution à l'échelle annuelle

- La saison des pluies s'étend de juin à septembre. Le mois le plus pluvieux est en général le mois d'août (cf. fig.10).

- L'évapotranspiration varie peu au cours de l'année. Les mois où elle est la plus forte (>6 mm/j) sont avril-mai et octobre-novembre. Ce sont les mois les plus chauds de l'année.

- Les fluctuations saisonnières des niveaux du Lac sont variables selon l'importance des crues du Chari. Les plus hauts niveaux sont observés après la saison des pluies vers les mois de novembre ou décembre (fig.14).

- Les fluctuations saisonnières de la nappe des sables sont peu importantes et ne dépassent pas la dizaine de centimètres (fig.14; Ngouri F3, Boui village et Gala Ngodoum).

- Les fluctuations saisonnières des nappes des argiles sont beaucoup plus fortes et peuvent varier de quelques dizaines de centimètres (fig.15 et 16) à plus d'un mètre (fig.11; Boui 4). Les plus hauts niveaux s'observent entre septembre et décembre au début de la saison sèche. Les cartes des fig.17 à 20 montrent les différences des profondeurs de l'eau dans les ouadis de la zone du projet ORT entre les niveaux les plus bas (mai 1988 et juin 1989) et les niveaux les plus hauts (janvier 1989 et janvier 1990). Les variations les plus marquées (>1 m) s'observent dans le secteur sud-ouest de la zone vers Njiguidada où la nappe est peu

NAPPE DES ARGILES A NGOURI

VARIATION DES NIVEAUX ENTRE 1947 ET 50

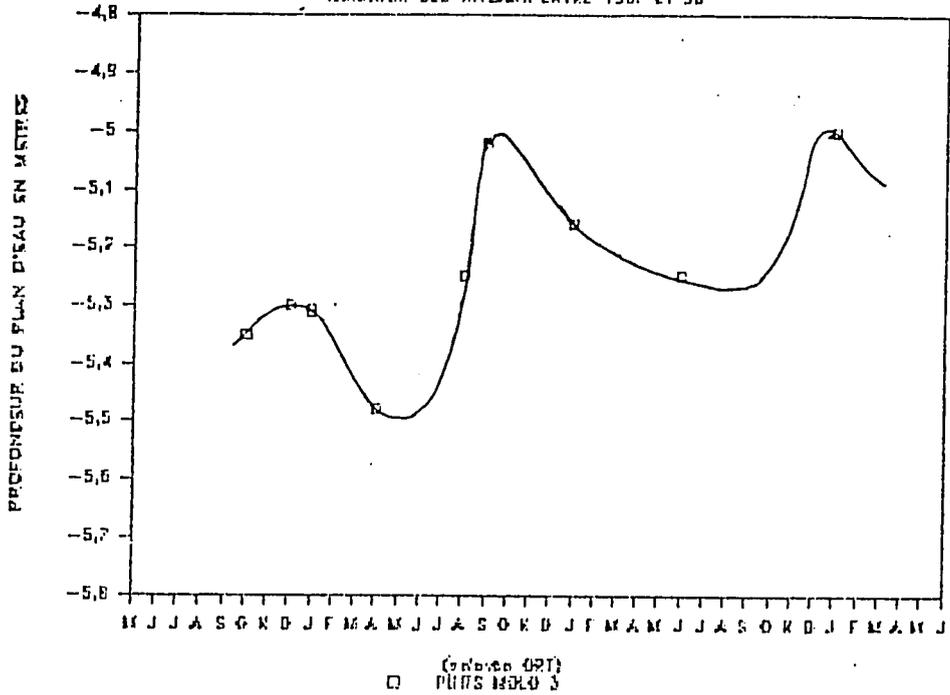


fig.15

NAPPE DES ARGILES A NGOURI

VARIATION DES NIVEAUX ENTRE 1953 ET 55

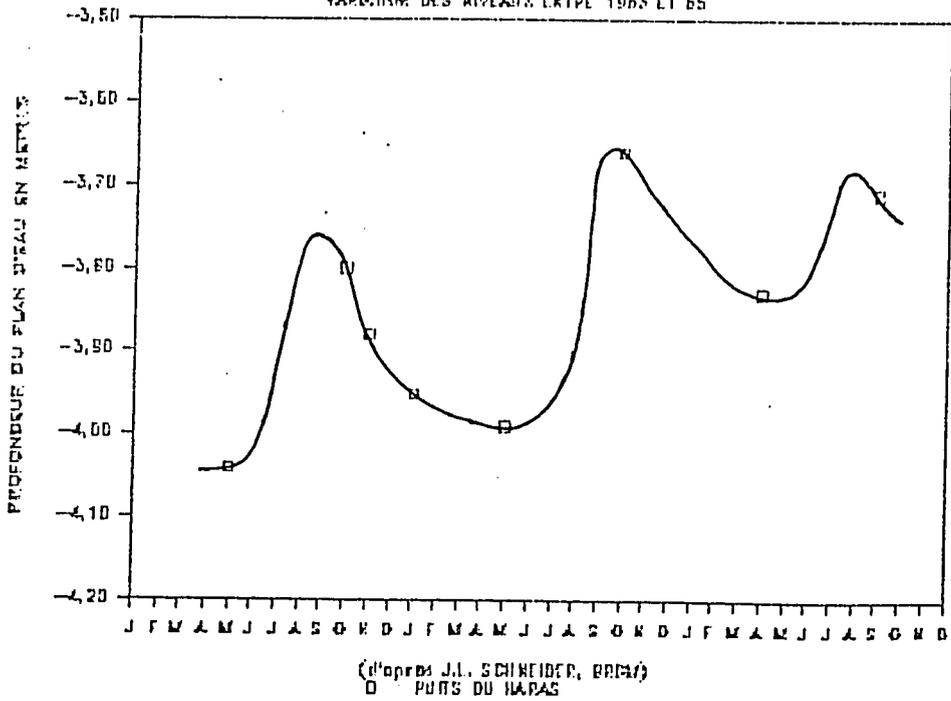
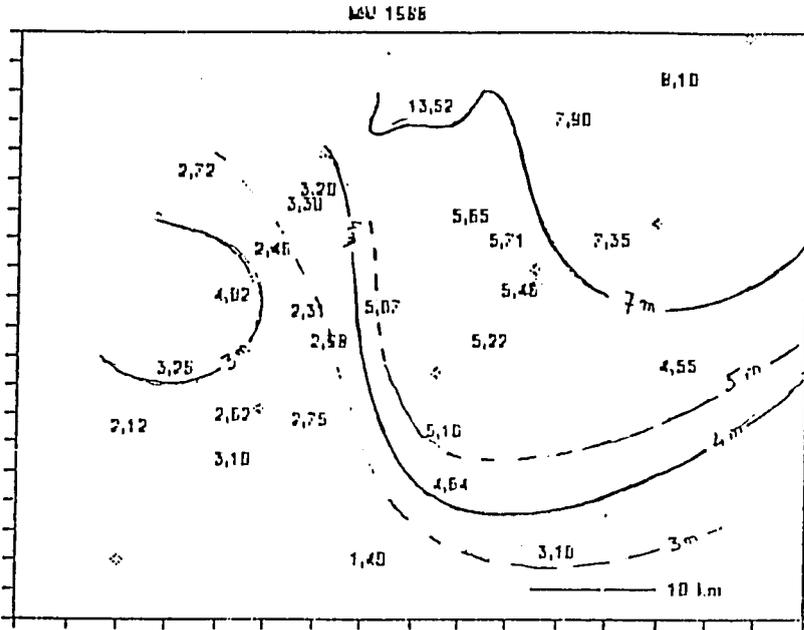


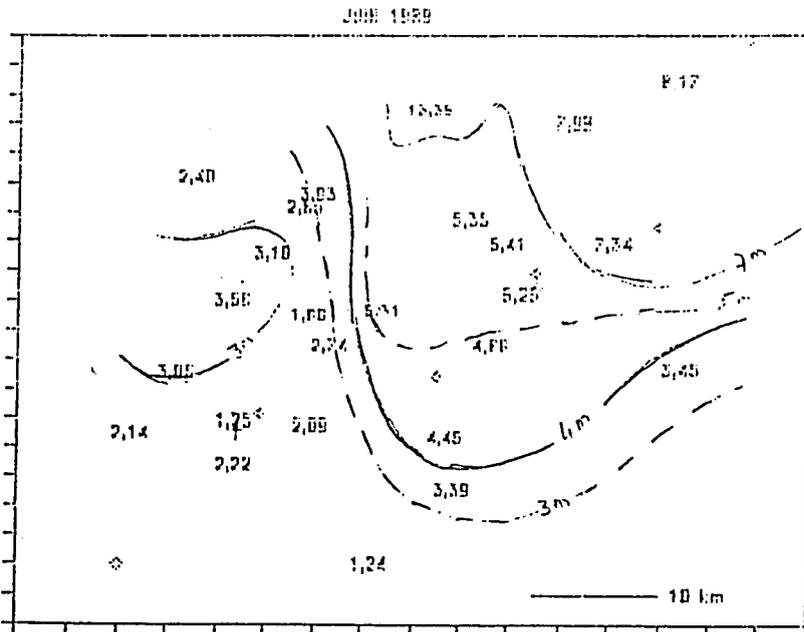
fig.16

PROFONDEUR DE LA NAPPE DANS LES OUADIS



(Profondeurs en mètres)

fig.17 Cartographie des niveaux des nappes des ouadis dans la zone du projet ORT-SODELAC: mois de mai 1988

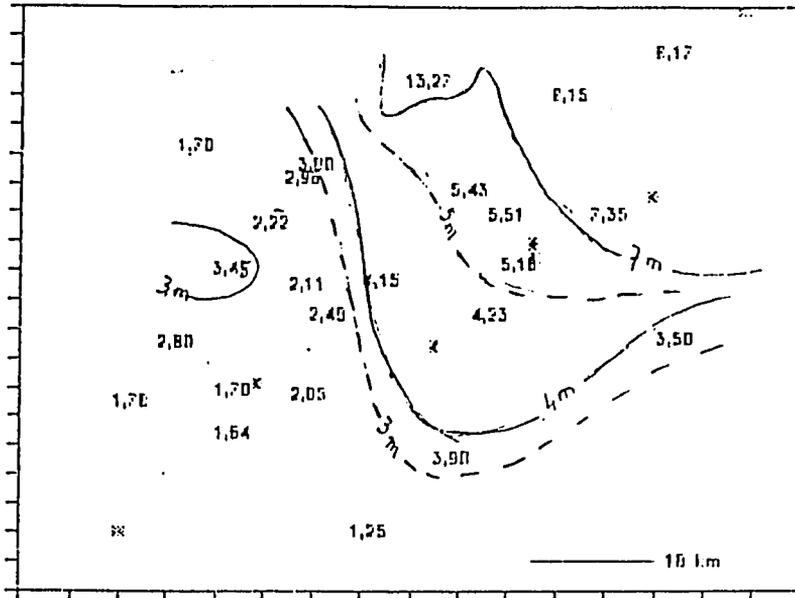


(Profondeurs en mètres)

fig.18 Cartographie des niveaux des nappes des ouadis dans la zone du projet ORT-SODELAC: mois de juin 1989

PROFONDEUR DE LA NAPPE DANS LES OUADIS

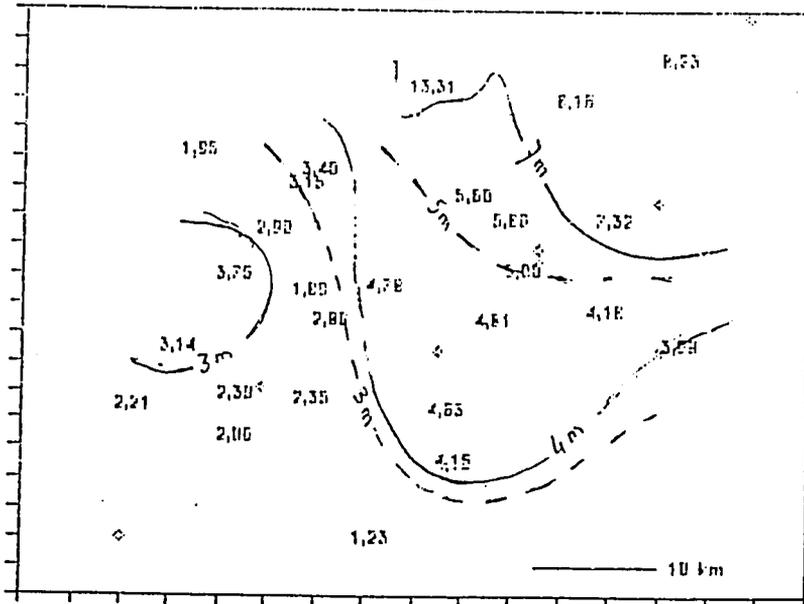
JANVIER 1989



(Profondeurs en mètres)

fig.19 Cartographie des niveaux des nappes des ouadis dans la zone du projet ORT-SODELAC: mois de janvier 1989

JANVIER 1990



(Profondeurs en mètres)

fig.20 Cartographie des niveaux des nappes des ouadis dans la zone du projet ORT-SODELAC: mois de janvier 1990

profonde. Dans le secteur nord-est, la courbe des 4 mètres délimite la zone où la reprise par évaporation de la nappe sous l'effet de la remontée capillaire devient faible (zone de Ngouri-Dibinintchi). La courbe des 7 mètres qui est relativement stable est aussi la limite à partir de laquelle on ne trouve plus de ouadi exploité.

E.2 Evolution à l'échelle pluri-annuelle (depuis les années 1960)

- Pluviométrie: les années 1960-89 sont témoin de la grande sécheresse de 1973 qui succéda au cycle pluvieux des années 60 (fig.11). Depuis cette époque on n'a pas observé de nette reprise de la pluviométrie. La question est de savoir si on se trouve au creux d'un cycle climatique d'échelle séculaire ou moindre ou bien sur la pente descendante d'un cycle beaucoup plus long qui signifierait que le climat continuera à régresser.

- Niveaux du Lac: à partir de l'année 1973 la cuvette nord se trouve isolée de la cuvette sud et son niveau suit une évolution séparée (fig.9). Depuis le début du siècle, les niveaux du Lac ont suivi une évolution cyclique environ tous les trente ans. Vers 1904 une grande sécheresse avait mis le Lac dans une situation similaire à celle actuelle ce qui fait penser qu'il peut aussi exister un cycle plus grand à l'échelle séculaire comme pour les pluies.

- Profondeur des nappes des ouadis: Les observations à Ngouri sur deux puits du ouadi de Molo (fig.16, puits du Haras et fig.15, puits Molo 3) pendant les années 1963-65 et 1987-90 montrent que la nappe du ouadi a baissé d'un peu plus d'un mètre au cours de ces 25 ans mais que par contre l'amplitude des variations saisonnières reste identique. Les enquêtes indiquent que certains ouadis situés au delà de la limite des 7 mètres pour la profondeur de l'eau (secteur nord est de Ngouri, fig.17 à 20) étaient cultivés il y a trente ans alors qu'ils sont maintenant abandonnés.

- Piézométrie de la nappe des sables: les courbes de la fig.21 montrent la baisse survenue dans les puits de Bir Louré et de Ngile Kanama au Kanem depuis les années 1960 (voir localisation sur la fig.4). Le dôme piézométrique du Kanem s'est régulièrement aplati au cours de ces 30 dernières années: baisse de 2 à 3 mètres de son sommet et de 1 mètre sur ses flancs (Bir Louré). Cette baisse comparée à la puissance (épaisseur totale) de la nappe n'est pas vraiment significative (cf. fig.3) mais elle le deviendra si l'évolution continue dans le même sens au cours des prochaines décennies.

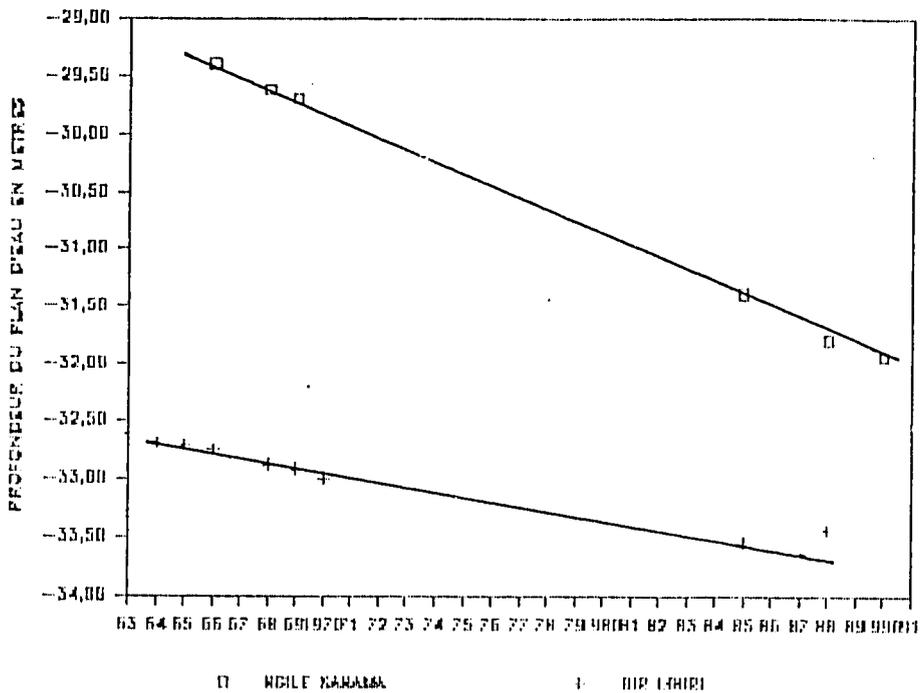


fig.21 Evolution des niveaux de la nappe phréatique du Kanem depuis 1963 jusqu'en 1990 (Schneider J.L.(2) puis ORT 1990)

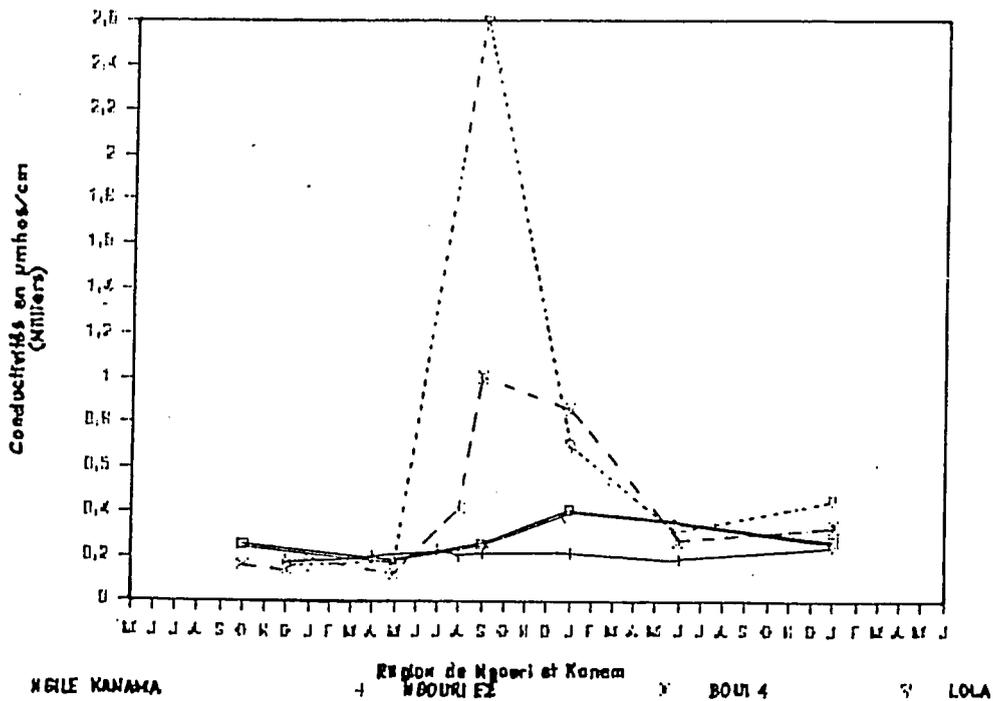


fig.22 Variation des conductivités des eaux des nappes de la région de Ngouri entre 1987 et 1990

III SCHEMA DE CYCLE SALIN

Les paramètres chimiques les plus caractéristiques ont été mesurés à Ngouri avec une mallette laboratoire portative de terrain et la précision des mesures reste limitée. On ne peut leur attribuer une valeur scientifique mais elles permettent de considérer l'évolution de certains facteurs dans le temps. Les raisonnements sont fondés eux sur des données plus précises antérieures (ORSTOM).

A. SALINITE DES EAUX SOUTERRAINES

A.1 Caractéristiques physicochimiques (tab.2)

Il s'agit des températures, conductivités et acidités (pH), qui sont mesurées in situ à l'aide d'appareils de terrain.

- Températures: on ne note aucune température anormale. L'ensemble des mesures se situe autour de la moyenne annuelle des températures de l'air soit 27°C.

- Conductivités: deux cas sont à considérer (fig.22): celui de la nappe des sables (forages villageois sur la dune, forages et puits avec drains dans les ouadis; fig.23) pour laquelle les valeurs restent stables dans le temps et ne dépassent que rarement 400 $\mu\text{S/cm}$ (ou $\mu\text{mhos/cm}$). Les nappes des ouadis (puits captant les eaux des argiles) sont au contraire très sensibles aux fluctuations saisonnières et les conductivités peuvent passer de valeurs voisines de celles de la nappe des sables en fin de saison sèche à des taux beaucoup plus forts en fin de saison des pluies, rendant parfois les eaux inexploitable pour l'agriculture (3000 à 4000 $\mu\text{S/cm}$).

- Acidités: comme pour les conductivités, peu de variations sont observées pour la nappe des sables dont le pH est voisin de la neutralité (=7). Pour les nappes des argiles, le pH peut baisser de façon importante en fin de saison des pluies et devenir franchement acide (pH=3). On rencontre plus rarement et localement des pH alcalins (=7,5 à 8)

A.2 Caractéristiques chimiques (tab.2)

- Faciès chimiques: les eaux rencontrées peuvent appartenir à différent faciès dont les principaux sont bicarbonaté sodique ou calcique et sulfaté-sodique ou calcique (Cheverry C. 1969, Maglione G. 1976).

- Alcalinité: en relation avec le faciès, les eaux carbonatées ou bicarbonatées ont une alcalinité moyenne à forte; certaines eaux dans les argiles qui au contraire ont une alcalinité nulle le doivent vraisemblablement à la présence massive de sulfates.

- Dureté: elle est moyenne à faible dans la région.

- Taux d'Absorption en Sodium TAS (ou SAR: Sodium Absorption Ratio): il est toujours faible et en dessous de 2 pour les eaux des sables, caractérisant des eaux dont le taux en sodium n'est pas dangereux pour le sol. On peut néanmoins rencontrer dans les argiles des eaux où il est important (>25) rendant l'eau impropre à l'irrigation; effectivement les ouadis concernés ne sont pas cultivés.

- Relation conductivité-salinité: le recueil d'un grand nombre d'analyses effectuées par l'ORSTOM (Cheverry C. 1969, Maglione G. 1976) a permis de définir pour la région du lac Tchad la relation entre la conductivité (C) mesurée au conductivimètre de terrain et la teneur totale en sels dissous (Rs). Cette relation (fig.24) est linéaire et a pour équation: $R_s = 0,83 C$ où Rs et C sont exprimés en mg/l et $\mu\text{S/cm}$ (ou $\mu\text{mhos/cm}$).

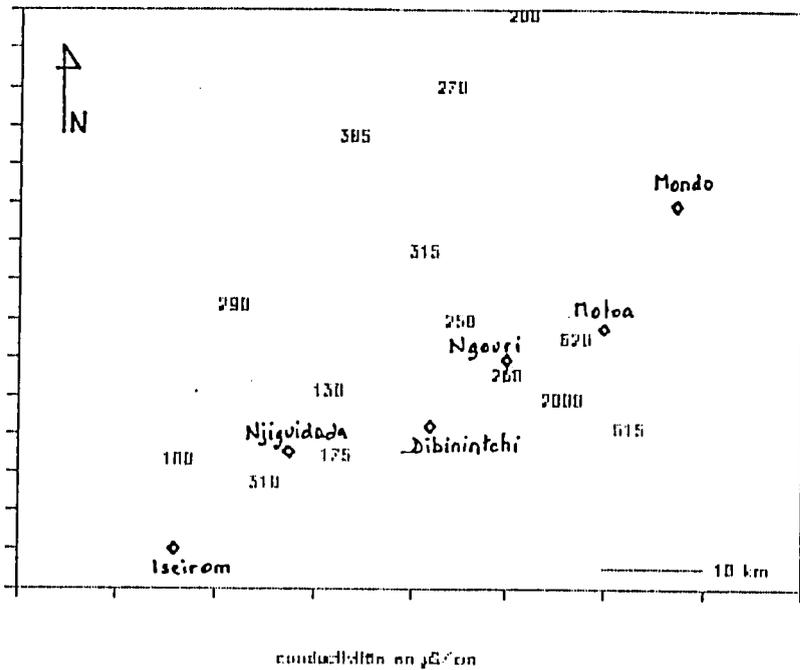


fig.23 Carte des conductivités de la nappe des sables (nappe phréatique du Kanem) en janvier 1990

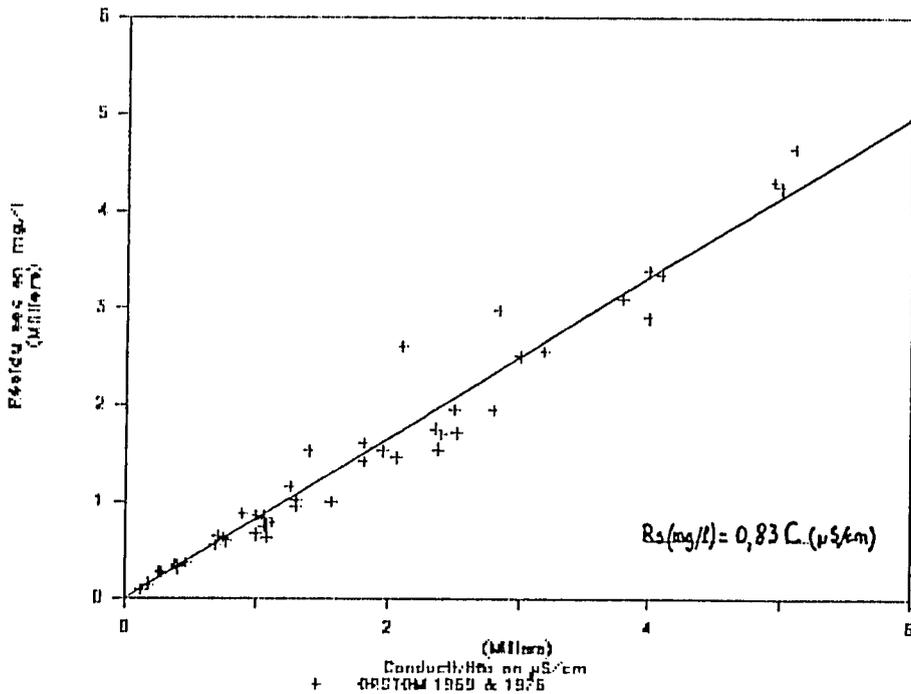


fig.24 Relation conductivité-salinité pour les eaux du nord-est du lac Tchad (tracé d'après les données de Roche M.A. 1980, Maglione G. 1976, Chevery C. 1969)

tab.2 ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES DANS LA ZONE DU PROJET ORT-SODELAC : quelques éléments caractéristiques

Sites de mesures (voir localisation fig.26)		mai 1988				janvier 1989				juin 1989			
		Conduc- tivité µS/cm	TAC mg/l	SAR	pH	Conduc- tivité µS/cm	TAC mg/l	SAR	pH	Conduc- tivité µS/cm	TAC mg/l	SAR	pH
Ngouri F2	s	205	1,40	0,93	7,0	194	-	0,87	7,8	198	1,40	0,44	7,6
Ngouri F4	sso	295	2,80	1,85	7,3	-	-	-	-	215	-	1,63	-
Ngouri F5	s	220	2,00	0,81	6,8	203	-	0,61	7,1	260	1,92	1,37	7,6
Molo 1	a>4m	595	4,20	0,89	6,9	553	3,68	0,00	7,3	-	-	-	-
Molo 3	a>4m	400	3,00	0,82	7,2	-	-	-	-	498	3,04	0,73	6,5
Igra 2 & 2bis	a>4m	1050	6,50	1,14	6,8	941	3,44	0,25	6,6	1302	3,84	0,00	6,8
Mado 1	a>4m	210	1,40	0,00	6,6	234	-	0,34	5,9	-	-	-	-
Mado 4	a>4m	705	3,80	0,54	6,5	529	1,48	0,37	6,0	405	2,48	0,35	6,7
Molori 2 & 2bis	a<4m	125	0,80	0,35	7,1	1181	0,00	7,19	3,0	1673	0,00	1,10	33,3
Molori 6	a<4m	230	1,40	0,10	7,6	174	-	0,28	7,3	239	2,04	0,39	6,8
Boui 5 & 5bis	a<4m	350	1,30	1,24	6,6	2265	0,00	5,09	3,0	-	-	-	-
Boui 6	a<4m	170	1,20	0,23	7,5	628	2,00	3,62	6,8	525	3,56	2,35	7,9
Mangalma 1	a<4m	70	0,50	0,67	6,6	114	-	0,64	6,0	65	0,56	0,30	6,4
Mangalma 2	a<4m	-	-	-	-	683	0,00	2,17	3,4	401	0,44	0,35	5,7
Ditila 2 bord ouadi	a, sso	2150	16,80	3,88	7,6	86	-	0,19	6,2	86	0,60	0,18	5,9
Adeu ouadi	a<4m	190	1,30	0,11	6,8	3193	0,00	25,18	3,0	513	1,68	1,33	6,8
Yari Ouadi	sso	50	1,10	0,00	6,8	104	-	0,47	6,7	137	1,28	0,15	7,3
Kada	a<4m	1400	13,20	1,79	7,9	2048	-	11,08	7,7	2214	39,60	11,30	7,8
Bladjil	a>4m	200	2,00	0,00	7,2	-	-	-	-	202	1,76	0,60	6,8
Kirdiourom ouadi	a>4m	2750	17,20	6,33	7,6	2102	12,68	13,21	7,5	2556	31,20	26,01	7,7
Bla-Blime	s	130	1,10	0,00	7,8	254	-	1,63	6,8	348	0,88	1,48	6,5

s = nappe des sables.

sso = nappe des sables sous le ouadi.

a>4m = nappe des argiles à plus de 4 mètres de profondeur.

a<4m = nappe des argiles à moins de 4 mètres de profondeur.

Remq: Le puits de Ditila a été amélioré en janvier 1989 par un drain captant la nappe des sables.

A.3 Qualité des eaux pour l'agriculture

- Pour les eaux de la nappe des sables, les caractéristiques sont assez stables et bonnes dans la zone, dans le temps comme dans l'espace. Certaines hétérogénéités peuvent trouver leur explication dans la présence des lentilles argileuses de caractère évaporitique ou comme on le verra, par une contamination par les eaux des argiles (cf. §V.C.3).

Dans un diagramme conductivité-SAR (diagramme de Riverside, fig.25-a), les eaux se répartissent dans les classes C1-S1 et C2-S1, typiques d'eaux de très bonne qualité (Malcom M. 1987, Eberschweiler C. 1990).

- Les eaux des argiles par contre sont de qualité très variable dans le temps et l'espace. Certains ouadis qui ne sont pas exploités le doivent à la mauvaise qualité de l'eau des puits traditionnels. Pour les ouadis cultivés, une détérioration de la qualité peut survenir en saison des pluies surtout pour les puits dont le niveau statique est peu profond et inférieur à 4 mètres (fig.25-b). Lorsque la nappe est plus profonde, elle est mieux protégée et les fluctuations saisonnières sont moins importantes (fig.25-c), (Malcom M. 1987, Eberschweiler C. 1990).

- Espèces chimiques nocives: les teneurs en éléments traces comme le Bore n'ont pas été analysées. Parmi les éléments majeurs, la présence de sulfates dans les eaux des argiles peut poser un problème lorsqu'il y a excès. C'est le cas dans certains puits de quelques ouadis comme Ngarfari, Molori ou Mangalma où l'irrigation des arbres fruitiers avec ces eaux (papayers, bananiers, goyaviers) provoque un jaunissement des feuilles.

B. SALINITE DU SOL DES OUADIS

B.1 Nature des principaux sels (Maglione G. 1976)

Deux familles de sels (ou paragenèses) coexistent.

- Paragenèse Carbonatée: elle est essentiellement alcaline avec pour terme ultime le trona ($\text{NaHCO}_3, \text{Na}_2\text{CO}_3, 2\text{H}_2\text{O}$), qu'on confond parfois avec le natron ($\text{Na}_2\text{CO}_3, 10\text{H}_2\text{O}$) plus connu.

- Paragenèse Sulfato-chlorurée ("saline"): avec parmi les minéraux les plus connus, le gypse (sulfate de calcium) et la halite (chlorure de sodium).

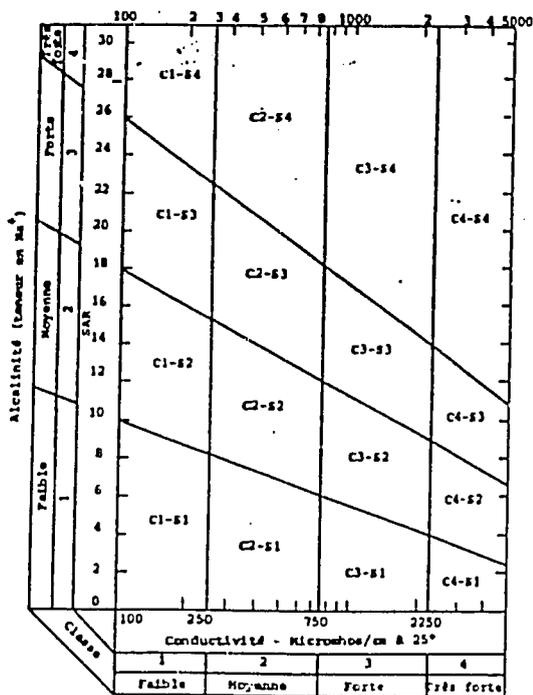
B.2 Qualité des sols pour l'agriculture

- Dans son étude, Malcom (1987) remarque des insuffisances généralisées en magnésium et nitrates. Les taux en sulfates peuvent être selon les cas excessifs ou au contraire trop faibles. La structure des sols cultivés est en général acceptable (Cheverry C. 1971). Certains ouadis ont une extrémité salée ("natronée") où la structure du sol est très détériorée.

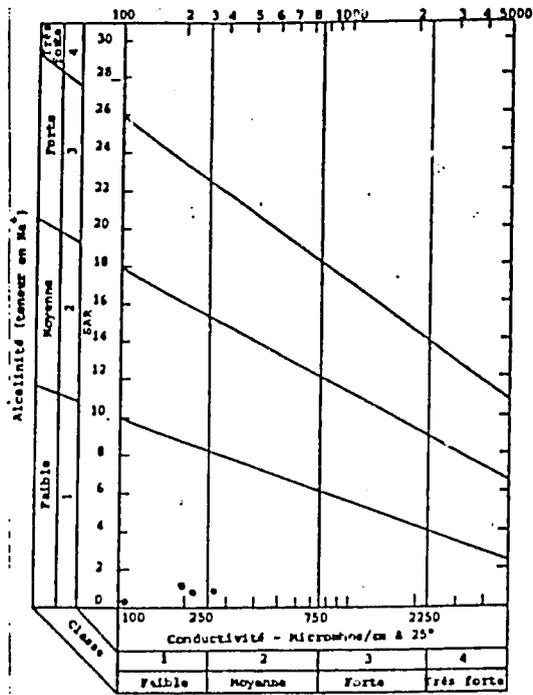
C. RELATIONS ENTRE L'EAU ET LE SOL DES OUADIS

C.1 Mécanismes physiques

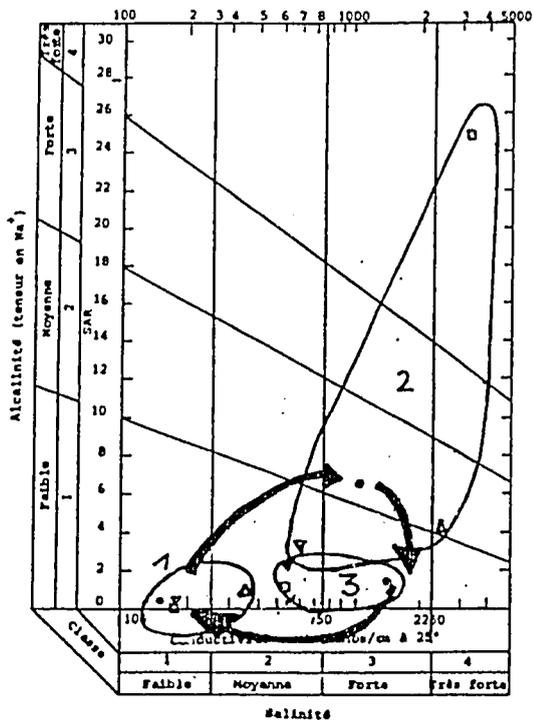
- Remontée capillaire: la présence de sédiments fins argileux et la mise en charge locale de la nappe entretiennent, là où la surface piézométrique est peu profonde, un important phénomène de remontée capillaire. La profondeur critique au delà de laquelle cesserait l'évaporation capillaire de la nappe pour les sols argileux des ouadis a été évaluée par Maglione (1976) à 380 cm pour la région du Kanem.



Salinité
Diagramme de Riverside.



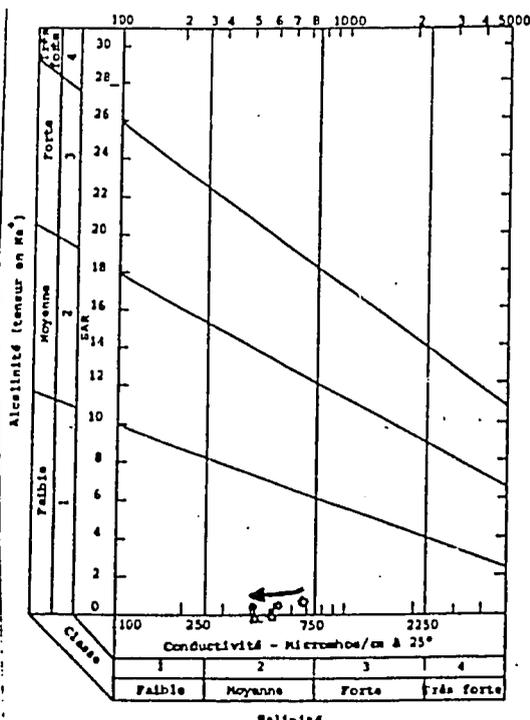
Salinité
a. Nappe des sables
(peu d'évolution saisonnière)



b. Nappe des argiles (prof. <4m)

1= mai 88, 2=janv. 89, 3=juin 89

- Molvi-2
- ▼ Bovi-6
- △ Bovi-5
- Adou



c. Nappe des argiles (prof. >4m)

(peu d'évolution saisonnière)

- Made 4
- △ Mofo 3

fig.25 Evolution saisonnière des relations conductivité-SAR (Sodium Absorption Ratio) des eaux souterraines (diagramme de Riverside) dans la zone du projet ORT entre 1987 et 1990

- Lessivage naturel: on observe après chaque saison des pluies une détérioration parfois très importante des qualités chimiques des eaux des nappes des argiles (cf. tab.2, fig.22 et 25-b) sous l'effet du lessivage du sol par les pluies. Une partie des sels précipités dans le sol est redissoute dans la nappe chaque année. La conductivité de celle-ci croît fortement (passant par exemple de 200 à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), son pH peut devenir très acide (pH 3) et son TAS plus élevé (> 15).

C.2 Origine des sels dans les ouadis

Deux phases de salure d'origine évaporitique se succèdent dans le temps (Cheverry 1971). La première alcaline, héritée de l'époque où le Lac était présent, la seconde, actuelle, "saline".

- Salure héritée: elle est liée à l'action des eaux superficielles lacustres (lorsque le ouadi était en relation avec le lac) au moment de leur retrait. Elle a un caractère très alcalin et typique des milieux confinés et réducteurs. C'est la phase de "natronisation" (paragénèse carbonatée sodique).

L'invasion saisonnière des polders par les eaux du Lac a eu pour effet de repousser chaque fois davantage les sels redissous à la périphérie (Roche 1980). Beaucoup de ouadis actuels ont une extrémité "natronée" qui correspond vraisemblablement à la partie amont par rapport au Lac lorsque ce ouadi était un polder (ex. Boui, Molori, Mangalma..). On observe d'ailleurs dans la plupart de ces ouadis un accroissement progressif de la salinité du sol quand on se déplace de l'extrémité qui devait être aval vers l'extrémité opposée.

- Mécanismes actuels: l'évaporation intense associée à la remontée capillaire peut déterminer la saturation et la précipitation de sels. Leur nature dépend non plus du chimisme du Lac actuel mais de celui de la nappe phréatique. De plus, on se trouve en milieu moins confiné et oxydant. Il s'agit de sels neutres comme le sulfate de sodium (paragénèse chloro-sulfatée). Cette seconde étape qui prend le relais de la première lorsque le polder devient ouadi, va dans le sens d'une désalcalinisation partielle et donc d'une amélioration de la structure du sol (remplacement des sels carbonatés par des sels sulfatés). Elle sera suivie ou non suivant le cas d'une phase ultime de concentration dépendant de l'intensité des effets de la remontée capillaire et donc de la profondeur de la nappe.

On a pu remarquer au cours du temps que des ouadis jugés impropres aux cultures il y a quelques décennies sont aujourd'hui cultivés, c'est le cas par exemple de Molori, qui est actuellement l'un des ouadis les plus actifs de la zone, alors qu'il était qualifié de "natroné" dans le rapport de Girard (1959). Il faut noter cependant qu'une partie des sulfates néoformés peut se retrouver dans la nappe des argiles après le lessivage par les pluies et rendre l'eau de très mauvaise qualité pour l'irrigation (formation d'acide sulfurique lié à une forte baisse du pH) sans pour autant qu'elles soient forcément très concentrées (conductivité non excessive).

C.3 Rapports entre nappe des sables et nappe des argiles

Selon le rapport hydrostatique entre nappe des argiles et nappe des sables (cf. fig.6), deux différents cas de figure peuvent être retenus.

- Pour les cas A et B, l'existence d'une drainance à travers les argiles compactes de base protège la nappe des sables sous-jacente de toute contamination par la nappe des argiles en particulier en fin de saison des pluies lorsque ses qualités se

sont dégradées sous l'effet du lessivage. Ce mécanisme est très important pour l'aspect écologique de la région.

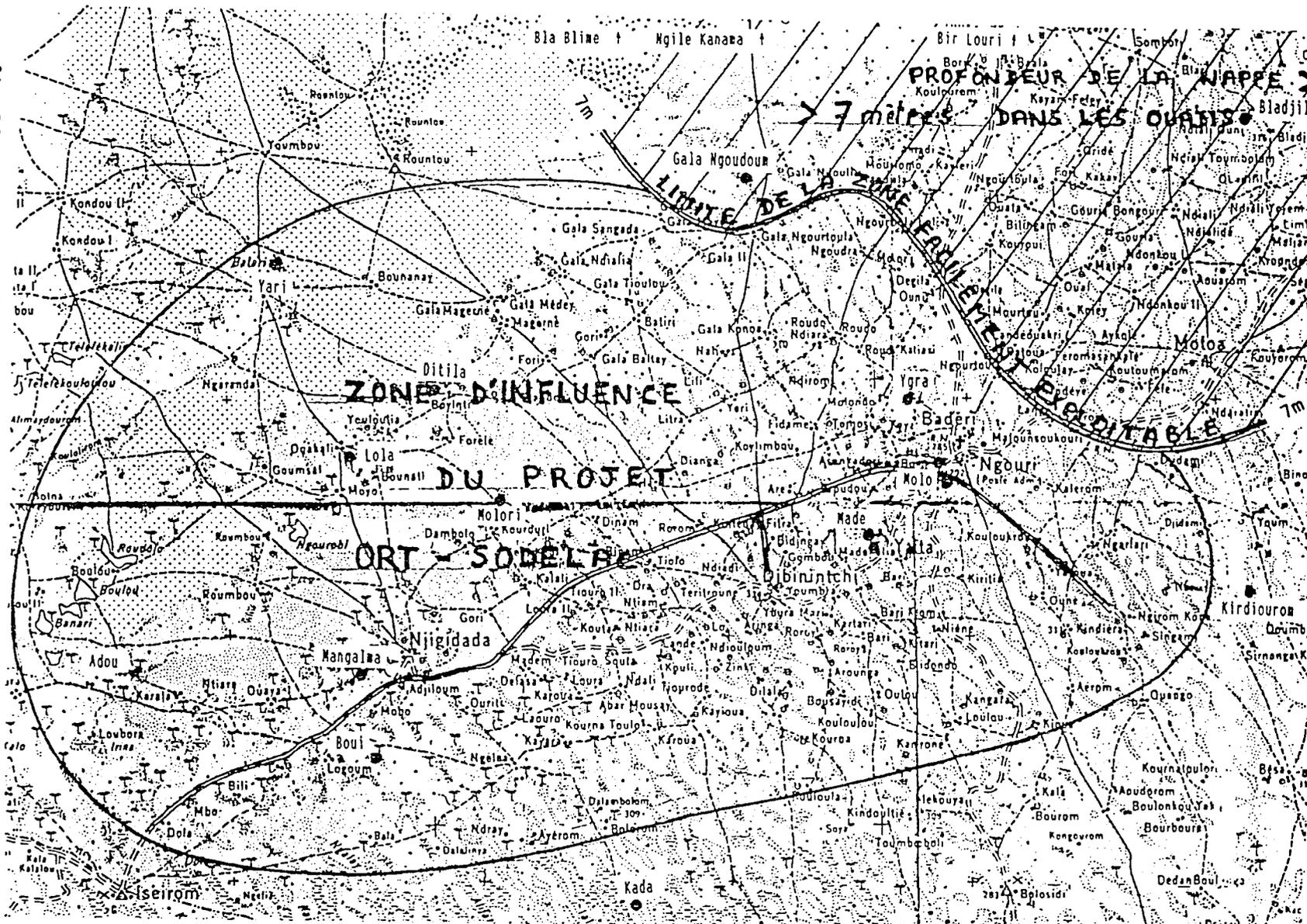
- Pour le cas C, la nappe des sables n'est pas protégée et peut recevoir les eaux de lessivage des argiles sus-jacentes. On trouve ici une deuxième explication pour les hétérogénéités de salinité dans la nappe des sables (le cas est rencontré dans la région est de Ngourï cf. fig.23; cas des eaux $> 600 \mu\text{S/cm}$ et notamment à Ngarfari).

D. BILAN SALIN

A l'échelle régionale tout se résout à un transfert des sels contenus dans les sables dunaires vers les ouadis qui constituent des zones d'évaporation et vers où convergent les écoulements (cas A et B fig.6). Seule la région limitrophe du Lac est concernée par un apport salin extérieur: sels apportés au Lac par le fleuve Chari. Dans la région concernée par le projet ORT le Lac n'exerce pas d'influence directe et on peut se considérer en système clos. Si à l'extrême la nappe générale baissait de façon à ce qu'on rencontre partout le cas C (fig.6), il n'y aurait plus de mécanisme important de salinisation du sol des ouadis. Le transfert des sels serait alors inversé et c'est la nappe des sables qui recueillerait les sels lessivés du sol des ouadis.

Si on considère qu'il n'y a pas d'évaporation sous la dune, pour l'ensemble de la zone concernée par le projet ORT (cf. fig.26), les apports d'eau douce sont les eaux météoriques infiltrées sur l'ensemble de la zone; les départs sont les eaux évapotranspirées au niveau des ouadis qui représentent une petite proportion de cette surface. Une cartographie très précise serait nécessaire pour connaître les véritables proportions de surfaces couvertes par les ouadis et par la dune. Si on estimait cependant ce rapport à 10% cela signifierait qu'une évaporation annuelle dans les ouadis de 2000 mm pourrait être compensée par une pluie moyenne sur l'ensemble de la zone de 200 mm ce qui est inférieur aux pluies annuelles actuelles. La zone ne serait donc globalement pas en voie de salinisation.

fig. 26 Limites de la zone d'influence du projet ORT-SODELAC et limite des zones facilement exploitables pour l'agriculture (fond carte IGN au 1/200.000e)



IV PHENOMENES SPECIFIQUES A L'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES

A. DIFFERENTS TYPES D'OUVRAGES DE CAPTAGES SERIES PAR LE PROJET ORT

A.1 Les puits traditionnels

- sans drain: ils captent la nappe des argiles.
- avec drain: ils captent les deux nappes. Dans ce cas l'alimentation naturelle des nappes des argiles par celle des sables est accentuée.

Les débits prélevés avec la technique traditionnelle du Chadouf sont compris entre 2 m³/h (lorsque la nappe est profonde de 5 ou 6 mètres) et 5 m³/h pour les puits peu profonds (<2 m).

A.2 Les petites unités forage-motopompe

- Les forages manuels captent la nappe des sables.

Les débits des petites motopompes de 3,5 CV utilisées dans ces forages sont compris entre 8 et 15 m³/h suivant la profondeur de la nappe.

B. EFFETS DE L'EXPLOITATION DES EAUX

B.1 Impact hydrogéologique

Dans les conditions actuelles d'exploitation (traditionnelle avec Chadouf), la recharge annuelle de la nappe régionale pour une année de bonne pluviométrie comme 1988 (410,9 mm) a provoqué une élévation de niveau de l'ordre de 10 cm à Ngouri (cf. fig.14, Ngouri F3 entre janvier 1988 et janvier 1989). L'analyse de courbes granulométriques d'échantillons de sable dunaire dans quelques sondages permet d'évaluer la porosité de drainage entre 15 et 22% (on prendra pour la suite des calculs 20%). Ceci signifie qu'une tranche de 10 cm d'aquifère contiendrait 20 mm d'eau qui correspondent à la recharge annuelle en 1988.

Dans les parcelles irriguées ETR devient proche ou égal à ETP, la culture des oignons par exemple qui figure parmi les cultures les plus consommatrices en eau, demande annuellement 2200 mm (Purkey D. 1990), soit environ 2000 mm si on retranche les pluies.

Dix centimètres d'aquifère (donc 20 mm d'eau) permettent de cultiver $20/2000 = 1\%$ des superficies, ce qui signifie qu'en 1988 par exemple où ils correspondent à l'excédent de recharge dans les conditions d'exploitation traditionnelles, la zone peut absorber une augmentation des surfaces cultivées correspondant à 1% de sa propre superficie.

L'ensemble de la zone concernée par le projet ORT couvre une superficie d'environ 1000 km² (fig.26). Les surfaces cultivables avec 10 cm d'aquifère seraient donc de l'ordre de 1000 hectares. On voit donc par ce calcul que l'ensemble des surfaces cultivées actuellement dans les ouadis qui ne dépassent pas 100 hectares n'influencent annuellement qu'un centimètre de nappe.

B.2 Impact géochimique

- Evolution saline d'un sol irrigué: les effets du lessivage dans une parcelle irriguée (fig.27 et tab.3) se traduisent par un affaissement des courbes salinité-profondeur couplé à une remontée de sel sur le sommet des diguettes (Jenkins M. 1990, Eberschweiler C. 1990). Les transferts salins se font vers le bas jusqu'à un niveau critique qui est fonction de la lame d'eau appliquée et vers le haut par ascension capillaire dans les diguettes. En fin de saison des pluies 1988 le lessivage naturel par les eaux météoriques était important et le niveau

critique d'accumulation saline se trouvait environ à 1,5 m de profondeur (courbe 2). Après une période de longue jachère (courbe 3), le niveau d'accumulation est remonté jusqu'à 0,5 m mais les diguettes se sont dessalées. Sous irrigation modérée par contre (courbe 1) on n'observe pas vraiment de déplacement de ce niveau d'accumulation mais le degré de salinisation général baisse au détriment des diguettes. Tout se passe en fait comme si une grande partie des sels se déplaçait du niveau d'accumulation (à 0,5 m) vers le sommet des diguettes.

Des mesures tensiométriques sur la même parcelle confirment que les écoulements convergent bien vers ces niveaux d'accumulations (Eberschweiler C. 1990).

Dans son programme de calcul de l'évaluation des besoins en eau des cultures, Purkey (Purkey D. 1990) évalue l'excédent nécessaire au lessivage entre 15 et 20% en général pour les eaux de conductivité modérées (<500 $\mu\text{mhos/cm}$).

On notera aussi que les sols non cultivés ou mis en jachère prolongée peuvent se trouver en partie protégés d'une salinisation rapide par l'écran que constituent leurs horizons superficiels fortement structurés, presque secs (Cheverry C. 1969).

tab.3 VARIATION DE LA SALINITE DU SOL EN FONCTION DE LA PROFONDEUR SUR UN CARREAU CULTIVE

(électro-conductivité (CEs) mesurée sur extrait 1:1 de solution de sol en mhos/cm)

	12/1987		01/1988		05/1988		09/1988		06/1989	
	pH	CEs	CEs	CEs	CEs	CEs	CEs	pH	CEs	
OUADI DE MOLO										
terrain de Ali Fiti										
près du puits n°2										
centre du ouadi										
		non irrigué	planté blé	jachère	planté sorgho		semé			
- surface diguette	6,6	15,30	20,70	6,4	9,60	6,0	3,10			
- 0 à 5 cm	6,9	4,30	0,80	1,90	0,60	6,0	2,10			
- 5 à 30 cm	6,9	3,40	3,20	3,00	1,10	5,7	4,80			
- 30 à 60 cm	7,7	5,60	4,70	5,00	2,50	6,4	7,80			
- 60 à 90 cm	8,0	3,50	3,70	4,30	3,90	5,4	6,50			
- 90 à 120 cm				3,10	5,80	5,5	5,10			
- sondage					4,70					
tarière					3,00					
(11/88)					1,20					
- 400 cm					0,60					
- 500 cm					2,20					
- 600 cm					2,40					
puits n°2 (à proximité):										
- profondeur de la nappe en cm		440	440	462	360		340 ?			
- conductivité CEe en mhos/cm		0,520	0,49	0,665	1,300		éboulé			

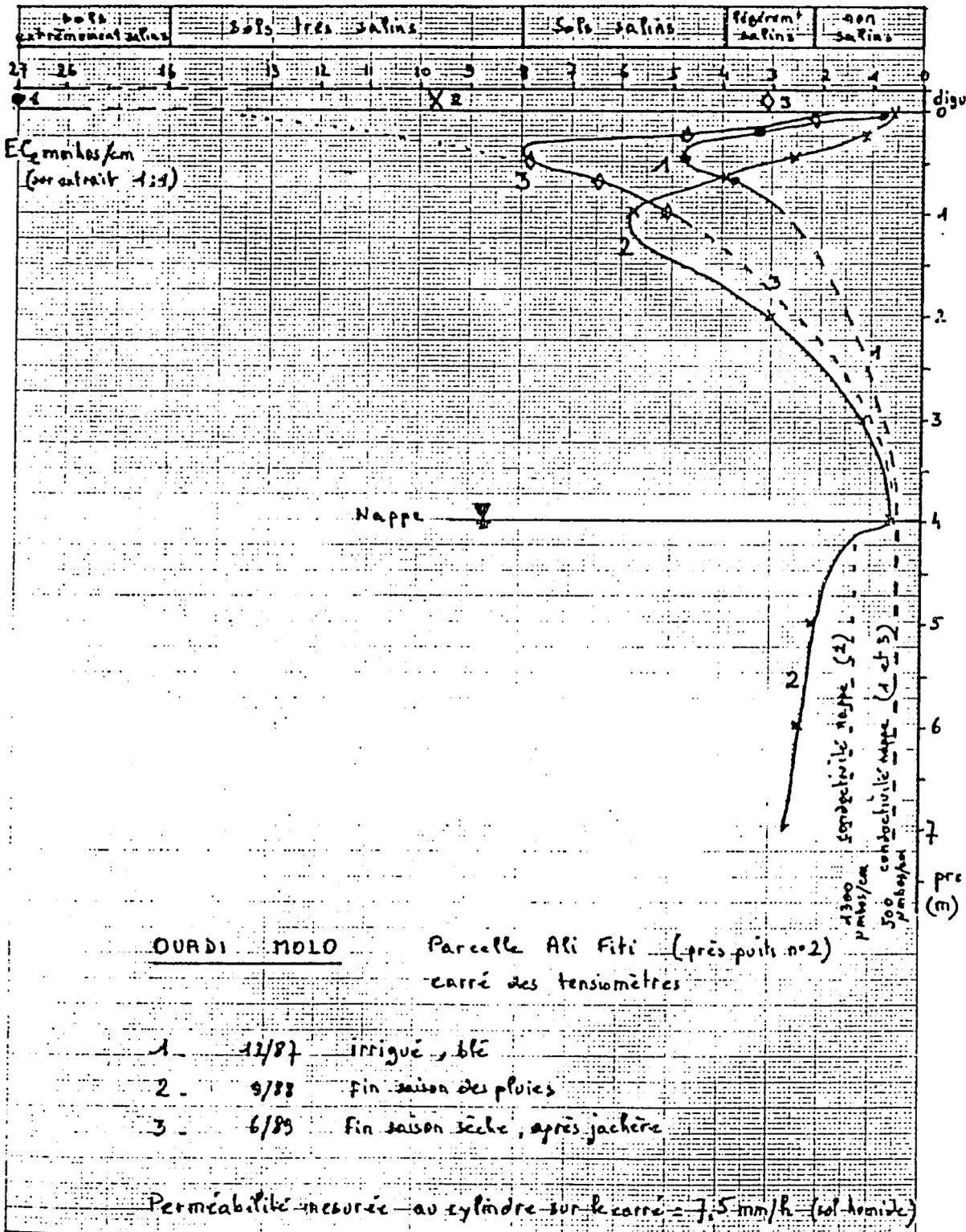


fig.27 Evolution dans le temps des courbes salinité-profondeur sur un carré cultivé dans le ouadi de Molo

V CONCLUSION

A. LIMITES DE L'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES POUR L'IRRIGATION

- Limites géographiques: elles sont principalement liées à la profondeur de la nappe. On a fixé à 7 mètres la limite des eaux facilement exploitables avec des moyens simples, aussi bien avec des systèmes d'exhaure traditionnels (chadouf) qu'avec des motopompes de surface (fig.26). On constate dans les faits que plus aucun ouadi n'est cultivé lorsque la nappe est à plus de 7 mètres. Les seuls puits existants dans ces ouadis sont des puits villageois et pastoraux qui n'exigent pas des débits importants comme pour l'agriculture.

- Limites quantitatives: les stocks d'eau contenus dans la nappe régionale des sables sont considérables. Pour les 1000 km² de la zone du projet et pour une porosité de 20%, 10 cm de nappe contiendraient un stock de 20 millions de mètres cubes d'eau et 1 mètre de nappe 200 millions de mètres cubes.

.A court terme (demi-siècle), la question de l'épuisement de la nappe ne se pose pas dans les conditions d'exploitation de petite échelle individuelle telle que l'envisagent les projets de développement intégré comme ORT.

.A long terme par contre, le problème est de savoir si le climat continuera à régresser ou non. Une bonne pluviométrie comme celle des années 1960 garantirait un milieu stable capable d'absorber une agriculture à l'échelle villageoise assez étendue. La poursuite de la régression climatique sur un long terme posera par contre de nombreux problèmes et l'agriculture irriguée n'en sera qu'un des aspects.

B. DEUX ASPECTS OPPOSES DU RAPPORT ENTRE LA PIEZOMETRIE DES NAPPES DES SABLES ET DES ARGILES

- Vulnérabilité de la nappe des sables à la contamination lorsqu'elle est protégée de l'évaporation (cas C).

- Protection contre la contamination lorsqu'elle est vulnérable à l'évaporation (cas A et B). A long terme si le climat continue à régresser, on se dirige vers le cas C.

C. SYSTEMES D'EXPLOITATION APPROPRIES AUX CONDITIONS DU MILIEU

Les conclusions ne concernent ici que l'aspect physique des mécanismes sans tenir compte de l'aspect agronomique qui fait entrer de son côté de nombreux autres facteurs importants non forcément concordants avec les exigences physiques.

Le système d'irrigation au chadouf sur carré est jugé bon, du point de vue de la salinisation, par les chercheurs de l'ORSTOM (Cheverry C. 1969). Les mêmes chercheurs remarquent cependant qu'il est souhaitable de limiter le développement de conditions marécageuses (milieu réducteur) favorables à la formation de carbonate de sodium.

Plus que la méthode de culture c'est la lame d'eau appliquée sur le sol qui est déterminante pour les transferts salins dans le sol. Il est indéniable que certaines variétés de cultures peuvent mieux s'accommoder de systèmes d'irrigation différents de celui du carré traditionnel comme la raie, le billon ou la planche; tout dépend des conditions dans lesquelles elles se développent le mieux: milieu oxygéné ou non. L'introduction de ces nouvelles techniques est l'une des activités du volet agronomique du projet ORT.

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

- tab.1 - Pluies et évaporation décennales à Ngouri entre 1987 et 1989.
- tab.2 - Analyses chimiques des eaux souterraines dans la zone du projet ORT; quelques éléments caractéristiques.
- tab.3 - Variation de salinité du sol en fonction de la profondeur sur un carreau cultivé (site de Molo).

FIGURES

- fig.1 - Carte piézométrique générale de la nappe du Kanem en 1969 (d'après la carte hydrogéologique; Schneider J.L. 1969).
- fig.2 - Coupe schématique d'un ouadi: relations entre la nappe régionale des sables et la nappe des ouadis.
- fig.3 - Coupe hydrogéologique schématique perpendiculaire aux isopiezés, passant entre Dibinintchi et Njiguidada.
- fig.4 - Carte piézométrique de la nappe des sables (nappe phréatique du Kanem) dans la zone de Ngouri en janvier 1990.
- fig.5 - Profil stratigraphique au centre d'un ouadi de la région de Ngouri.
- fig.6 - Relations hydrostatiques entre les eaux des nappes dans un ouadi (nappe des sables; nappe des argiles): 3 cas de figures.
- fig.7 - Régions naturelles du lac Tchad en 1989 (Le Moalle J. 1989).
- fig.8 - Topographie schématique des fonds du lac Tchad (Le Moalle J. 1989).
- fig.9 - Niveaux du lac Tchad depuis 1925 jusqu'en 1990 (retracé d'après Roche M.A. 1980, Le Moalle J. 1989 et Annuaire hydrologique du Tchad).
- fig.10 - Pluviométrie à Ngouri entre 1987 et 1990 (réseau ORT).
- fig.11 - Pluviométrie à Ngouri, Bol et Mao entre 1960 et 1990. (données du Service Météorologique du Tchad).
- fig.12 - Bilan hydrique P-EiP dans le ouadi à Ngouri en 1988.
- fig.13 - Bilan hydrique P-ETP dans le ouadi à Ngouri en 1989.
- fig.14 - Variations piézométriques des nappes de la région de Ngouri et fluctuations des niveaux du lac Tchad entre 1987 et 1990.
- fig.15 - Variations des niveaux de la nappe des argiles à Ngouri entre 1987 et 1990 (ORT 1990).
- fig.16 - Variations des niveaux de la nappe des argiles à Ngouri entre 1963 et 1965 (Schneider J.L.(2)).
- fig.17 - Cartographie des niveaux des nappes des ouadis dans la zone du projet ORT-SODELAC: mois de mai 1988.
- fig.18 - Cartographie des niveaux des nappes des ouadis dans la zone du projet ORT-SODELAC: mois de juin 1989.
- fig.19 - Cartographie des niveaux des nappes des ouadis dans la zone du projet ORT-SODELAC: mois de janvier 1989.
- fig.20 - Cartographie des niveaux des nappes des ouadis dans la zone du projet ORT-SODELAC: mois de janvier 1990.
- fig.21 - Evolution des niveaux de la nappe phréatique du Kanem depuis 1963 jusqu'en 1990 (Schneider J.L.(2) puis ORT 1990).
- fig.22 - Variation des conductivités des eaux des nappes de la région de Ngouri entre 1987 et 1990.

- fig.23 - Carte des conductivités de la nappe des sables (nappe phréatique du Kanem) en janvier 1990.
- fig.24 - Relation conductivité-salinité pour les eaux du nord-est du lac Tchad (tracé d'après les données de Roche M.A. 1980, Maglione G. 1976, Cheverry C. 1969).
- fig.25 - Evolution saisonnière des relations conductivité-SAR (Sodium Absorption Ratio) des eaux souterraines (diagramme de Riverside) dans la zone du projet ORT-SODELAC entre 1987 et 1990: a- nappe des sables; b- nappe des argiles à moins de 4 mètres de profondeur; c- nappe des argiles à plus de 4 mètres de profondeur.
- fig.26 - Limites de la zone d'influence du projet ORT-SODELAC et limite des zones facilement exploitables pour l'agriculture (fond carte IGN au 1/200.000e).
- fig.27 - Evolution dans le temps des courbes salinité-profondeur sur un carré cultivé dans le ouadi de Molo.

BIBLIOGRAPHIE

- CHEVERRY C. 1969 Salinisation et alcalinisation des sols des polders de Bol. Conséquences sur la fertilité et l'aptitude à l'irrigation de ces sols. Centre ORSTOM Fort-Lamy (Contribution à la connaissance du bassin tchadien) - 110 p.
- CHEVERRY C. 1971 Les premières étapes de la poldérisation sur les bordures nord-est du lac Tchad. Aspects hydrologiques, pédologiques, agronomiques. Conséquences sur la mise en valeur. Centre ORSTOM Fort-Lamy (Contribution à la connaissance du bassin tchadien. 11140 ex 1,2) - 38 p.
- DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU ET DE LA METEOROLOGIE :
Annuaire hydrologique de la République du Tchad. Années 1960 à 1989.
- DREGNE H. E. 1982 Dryland soil resources. (Agency for International development. Dept of States Washington D.C. 205023).
- EBERSCHWEILER C. 1990 Rapport final d'activités. ORT Ngouri
- FAI PNUD 1986-89 Forages d'urgence dans le Kanem-Lac; rapport final, Mario Mélandri Hydrogéologue - C. Lotti & Associati -Roma.
- FAO 1986 Les besoins en eau des cultures. J. Doorenbos & W.O. Pruitt. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage N° 24. Rome 1986 - 198 p.
- FONTES J.-Ch., MAGLIONE G., ROCHE M.A. 1969 Eléments d'hydrologie isotopique dans le bassin du lac Tchad. (Compte rendu d'un colloque organisé par l'OUA - Kinshasa. IAEA Vienna 1970) pp 209-219.
- GIRARD J. 1959 Prospection agricole des "ouadis" du district de Mao et étude de leur possibilité de mise en valeur. Communauté, République du Tchad, région du Kanem. Service de l'Agriculture.
- GOODSON W. 1987 Effects of water management interventions on salinisation, waterlogging, groundwater drawdown and water-related disease incidence rates in Chad. (United States Agency for International Development) - 11 p.
- GUICHARD E. 1961 Etude pédologique des ouadis de Ngouri à Njiguidada. (ORSTOM, Centre de recherches tchadiennes; publication n° 61-44) - 112 p.
- JENKINS M. 1990 Salinisation of arid lands: a case of the wadis in the lake agricultural development and farmer training project. (Term project in water quality. ECI 240, winter 1990. UC Davis USA) - 42 p.

- JENKINS M., MULLIGAN D. 1988-90 Analyses chimiques des échantillons prélevés sur le réseau de surveillance du projet ORT entre 1988 et 1990.
- LE MOALLE J. 1989 Le fonctionnement hydrologique du lac Tchad au cours d'une période de sécheresse (1973-89). Rapport ORSTOM Montpellier 89-03 27p.
- MAB (Programme on Man And the Biosphere) 1975 Impact of human activities on the dynamics of arid and semi-arid zone ecosystems, with particular attention to the effect of irrigation. (Expert panel on project 4. Final report. UNESCO - Paris march 1975) - pp 6-18.
- MAGLIONE G. 1976 Géochimie des évaporites et silicates néoformés en milieu continental confiné. Les dépressions inter-dunaires du Tchad - Afrique. (Travaux et documents de L'ORSTOM n° 50) - 335 p.
- MARKS M. 1987 An analysis of soils and water at the project ouadi. (American ORT federation; lake Tchad agriculture development and farmer training project) - 56 p.
- MASSOUD F. I. 1977 Soil conservation as a protective measure against salinisation. (FAO soils bulletin n°33) - pp 77-85.
- PURKEY D. 1990 Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations; application à la région des ouadis. Programme de calcul.
- ROCHE M.A. 1980 Traçage naturel et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. (Travaux et documents de l'ORSTOM n° 117) - 389 p.
- SCHNEIDER J.L. 1966 Carte hydrogéologique au 1/500.000e, feuille de Fort-Lamy TCHAD (BRGM; Ministère des Travaux Publics, service de l'hydraulique république du Tchad.
- SCHNEIDER J.L. (2) Communications personnelles.
- SERVANT M. 1967 Nouvelles données stratigraphiques sur le quaternaire supérieur et récent au nord-est du lac Tchad. (Cahiers de l'ORSTOM sér. géologie, vol. II n°1, pp 95-114, 11 fig.).