

Des réserves en eau souterraines inégalement réparties

LE DOMAINE GRANITIQUE

Dans les provinces du Yatenga et de la Comoé au Burkina Faso et dans la région de Kadiolo au sud du Mali, les sites expérimentaux sont localisés sur des socles granitiques du bouclier éburnéen ouest-africain (Figure 2). Le profil des altérations du socle granitique comprend de la surface au substratum :

- des formations superficielles sablo-argileuses,
- des indurations ferrugineuses, carapaces ou cuirasses,
- des argiles latéritiques,
- des argiles sableuses,
- la roche altérée,
- la roche saine.

L'épaisseur des altérites est en moyenne de 10 à 20 mètres et la zone saturée de ce réservoir varie en fonction des saisons, des zones climatiques et de la topographie.

Les formations géologiques, quelles qu'elles soient, sont découpées par des réseaux de fractures majeures dont la longueur peut atteindre plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de kilomètres. Ces fractures très profondes, sub-verticales, sont jalonnées par des zones broyées susceptibles d'intéresser des bandes de terrain larges de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres. Elles sont donc le siège d'une circulation d'eaux souterraines.

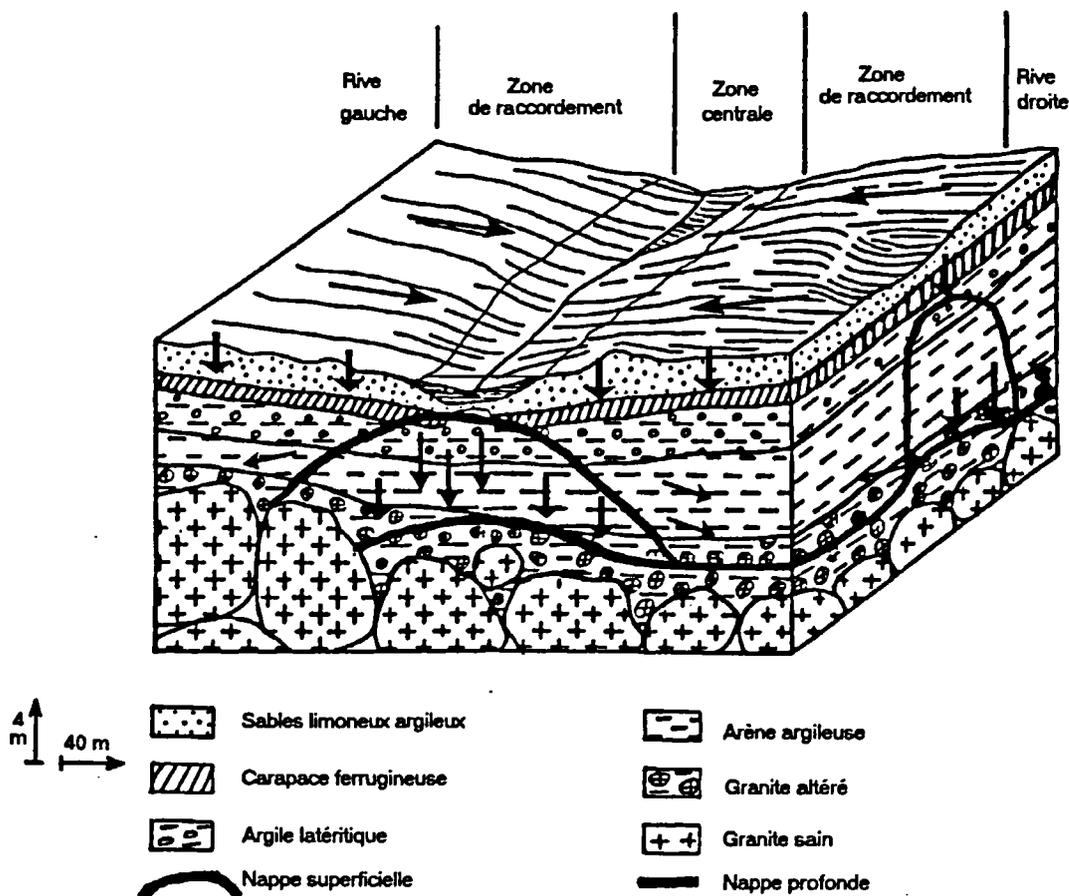
Les caractéristiques hydrauliques des réservoirs sont les suivantes:

	Cuirasse ferrugineuse	Altérites	Fissures
Perméabilité en m/s	8 à 80 10^{-5}	0.1 à 10 10^{-5}	0.1 à 10 10^{-5}
Transmissivité en m^2/s	20 à 200 10^{-5}	1 à 100 10^{-5}	3 à 30 10^{-5}
Coefficient d'emmagasinement en %	0.5 à 30	2 à 10	1 à 8 10^{-4}

LES AQUIFERES DE LA ZONE SAHELIEENNE

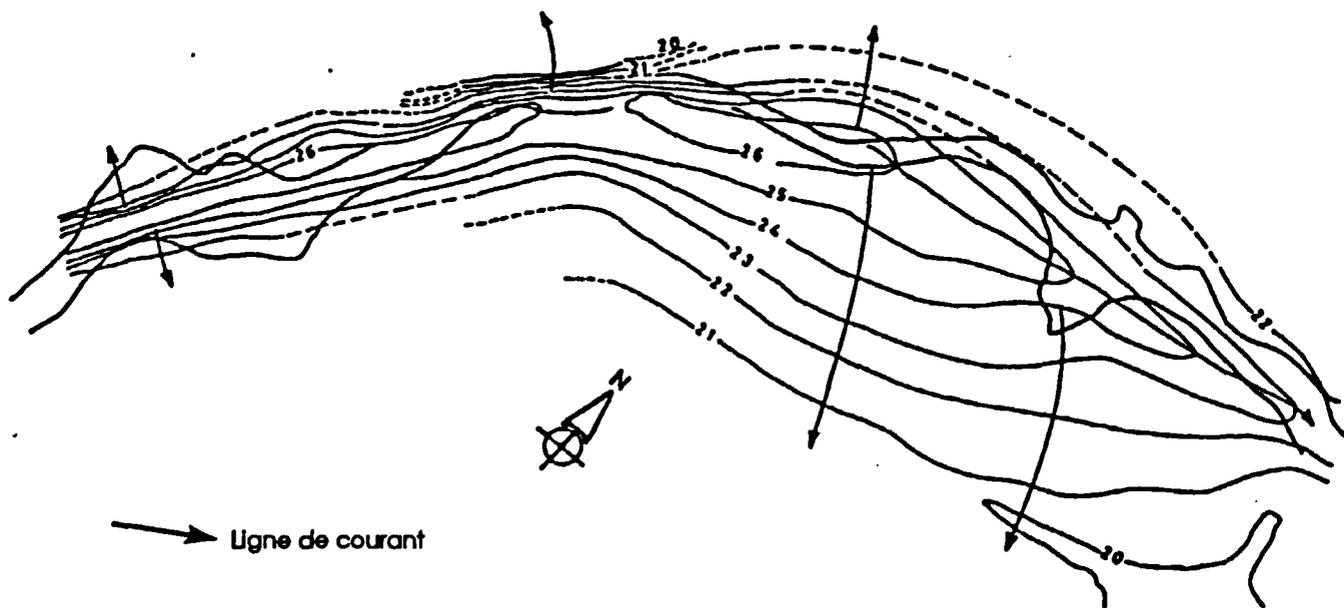
Le bloc diagramme de la figure 14 schématise le fonctionnement hydrologique du système aquifère du bief Gourga Tilli dans la région de Bidi au Yatenga (LAMACHERE & SERPANTIE, 1991). De petites nappes aquifères supérieures sont localisées dans les indurations ferrugineuses et les argiles latéritiques, sous les axes de drainage et les dépressions superficielles. En saison des pluies, ces petites nappes sont en continuité avec un aquifère profond localisé dans la roche altérée, dans les fissures et les fractures de la roche saine. Le niveau statique de l'aquifère profond se situe une vingtaine de mètres au-dessous de la surface du sol. La topographie du socle granitique ne suit pas toujours le modelé superficiel. Des compartiments surbaissés et le croisement de grandes fractures favorisent l'existence d'une nappe inférieure épaisse, d'autant mieux alimentée qu'elle se situe à proximité d'un bas-fond. Dans les compartiments surélevés, où la roche saine est à moins de 10 mètres de profondeur, le réservoir est constitué par les fissures et les diaclases de la roche. Il est alors de faible capacité et difficile à capter.

Figure 14 : Fonctionnement hydrologique du système aquifère du bief Gourga Tilli (Yatenga).



L'étude piézométrique de la nappe aquifère superficielle du bas-fond de Bidi dans le bief Gourga Tilli a montré que le sommet de cette nappe présente, en saison des pluies comme en saison sèche, une forme en dôme allongé dans l'axe du bas-fond avec un fort gradient hydraulique latéral : 10^{-2} à $4 \cdot 10^{-2}$ en rive droite, 10^{-1} à $4 \cdot 10^{-2}$ en rive gauche (figure 15). Dans la partie centrale du bas-fond, la position du niveau piézométrique par rapport au sol varie de 6 à 7 mètres de profondeur en fin de saison sèche, à 50 centimètres en fin d'hivernage. En relation avec le gradient hydraulique, cette profondeur s'accroît rapidement de part et d'autre de la zone inondable (CARLIER & al., 1992).

**Figure 15 : Piézométrie dans le bas-fond de Bidi (août 1990)
(BIDJOCKA, 1990)**

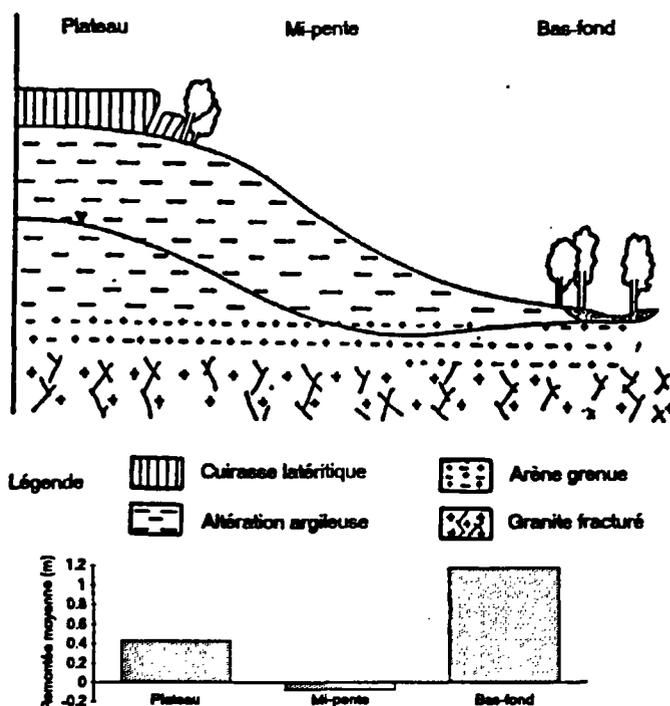


La vidange de la nappe superficielle est plus ou moins rapide en fonction de la nature des matériaux sous-jacents et de l'épaisseur de l'aquifère. La vitesse de descente des niveaux est de 4 à 9 cm par jour en septembre et de 3 à 5 cm par jour en octobre et novembre. A proximité du bas-fond, la nappe inférieure se recharge dès les premières crues avec des vitesses de 3 cm par jour en juillet et 6 à 8 cm par jour en août et septembre, vitesses qui correspondent à la vitesse de décharge de la nappe supérieure. La recharge se prolonge ensuite lentement jusqu'au début du mois de décembre. Avec le tarissement de la nappe supérieure, la descente des niveaux est ensuite très rapide et dès le mois de février la nappe inférieure a retrouvé son niveau d'étiage, à environ 20 mètres sous la surface du sol.

L'étude réalisée par le bureau d'études néerlandais IWACO et le CIEH sous la direction de la DEP du Ministère de l'Eau du Burkina Faso (1990) fournit des renseignements complémentaires intéressants la position des aquifères en fonction de la géomorphologie et les variations inter-annuelles des niveaux piézométriques au Yatenga. La figure 16 schématise la position respective des aquifères dans le paysage. Elle fait apparaître un creux piézométrique au niveau des versants qui correspond à un déficit d'alimentation de la nappe aquifère. Ce déficit local dans l'alimentation hydrique de l'aquifère doit être mis en relation avec la dégradation des versants et l'existence de sols nus encroûtés sur les charfreins qui bordent les bas-fonds.

Les mesures piézométriques anciennes dans le Yatenga mettent en évidence un abaissement progressif de la nappe aquifère entre 1965 et 1985 à la vitesse de 0.2 à 0.7 mètre par an. Entre l'année 1988 et l'année 1989, suite à une pluviométrie favorable, on a observé une remontée moyenne de 0.5 mètre dans les bas-fonds. La recharge des aquifères dans le Yatenga correspondrait actuellement à une lame d'eau annuelle d'environ 50 mm (CARLIER, 1992).

Figure 16 : Position respective des aquifères dans le paysage du Yatenga (IWACO & CIEH, 1990)



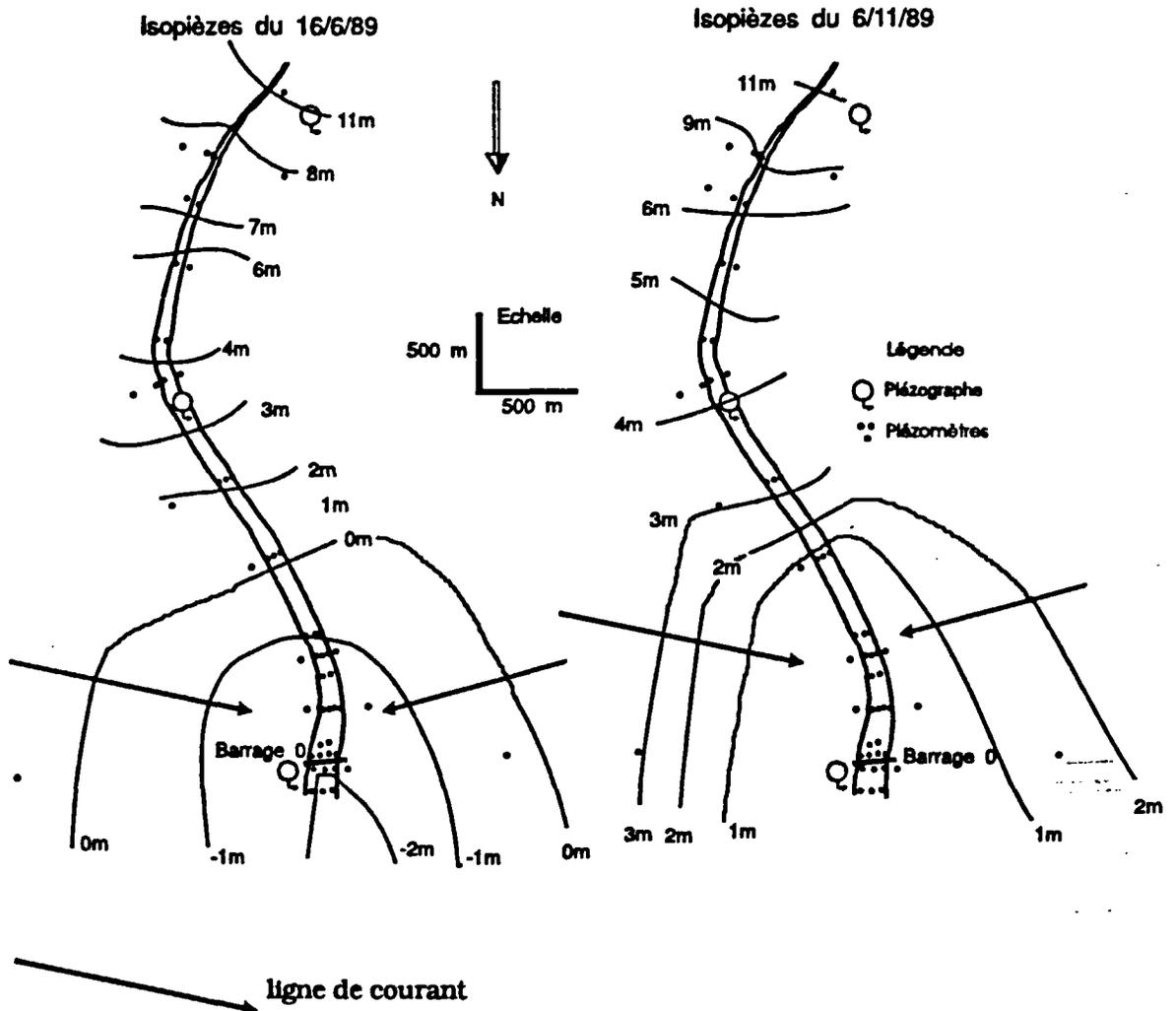
Dans le Yatenga, les puits traditionnels, dont la profondeur varie entre 5 et 20 mètres, captent généralement les couches ferrugineuses indurées, parfois la roche altérée. Ils sont localisés à proximité des bas-fonds. L'accessibilité à l'eau potable et domestique en saison sèche conditionne en effet, dans cette région du Burkina Faso, l'installation et le développement des villages. L'importance accordée à l'existence de nappes aquifères peu profondes et pérennes s'exprime jusque dans le nom des villages. Le mot Bidi, nom du village près duquel est installé le site expérimental du Yatenga, vient du mot fulfuldé "Widizou" qui signifie puits ou puisard peu profond.

LES AQUIFERES DANS LA ZONE SOUDANIENNE

Dans la province de la Comoé et dans le sud du Mali, les altérites sur socles granitiques sont d'épaisseur plus réduite que dans le Yatenga, mais la nappe aquifère, bien alimentée à partir des versants et des reliefs cuirassés, est continue, plus épaisse et suit fidèlement la topographie générale.

Sur le petit bassin de Kambo, le niveau piézométrique de la nappe se situe en saison sèche à une profondeur de 5.5 mètres par rapport au sol du plateau. Il remonte au cours de la saison des pluies pour se stabiliser à la profondeur de 2.80 mètres. Dans le bas-fond, le niveau piézométrique se situe à 2.5 mètres de la surface du sol en fin de saison sèche, remonte lentement en juin et juillet puis rapidement en août. Il affleure dans la partie centrale du bas-fond au début du mois d'août jusqu'au début du mois de novembre dès que la superficie du bassin versant dépasse 8 km² (Figure 17).

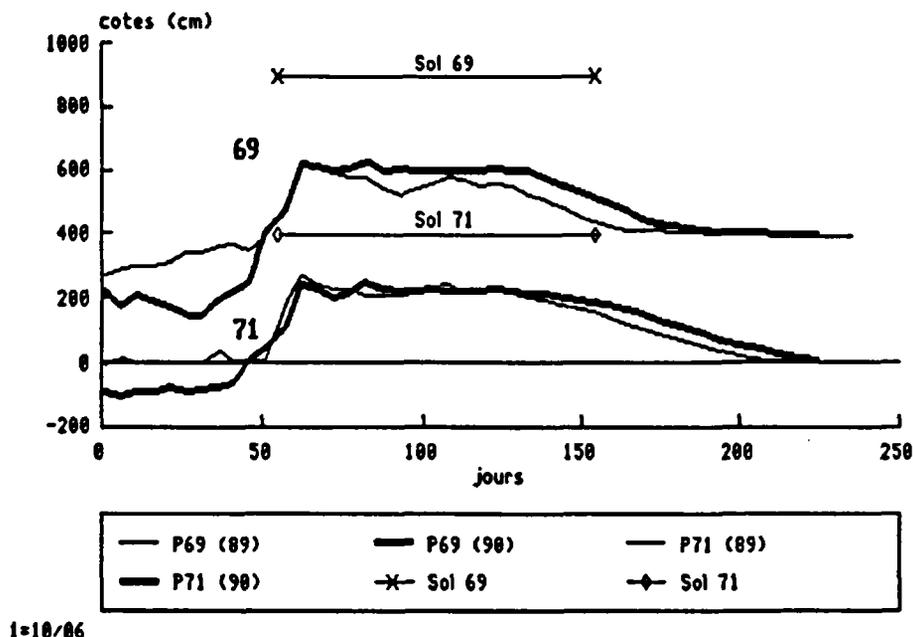
Figure 17 : Isopièzes de la nappe des altérites à Kambo (PEPIN, 1989)



Dans les bas-fonds de Damana, Kawara et Moadougou, pour des bassins versants dont la superficie est voisine de 100 km², le niveau piézométrique se situe à 0.5 mètre de profondeur en dessous du sol en fin de saison sèche. Il remonte rapidement avec les premières grosses pluies et la nappe aquifère alimente l'écoulement des marigots du mois de juillet au début du mois de novembre. En remontant le cours des marigots sur une distance de 10 kilomètres, l'évolution des niveaux piézométriques reste à peu près identique bien que le niveau de base en fin de saison sèche soit plus profond, à 1.5 mètre de la surface du sol. En saison des pluies comme en saison sèche, les bas-fonds de la Comoé se situent en position de drainage, dans un creux piézométrique de la nappe aquifère.

L'étude comparative des chroniques piézométriques du bassin versant de Kambo en 1989 et 1990 (figure 18) montre que la recharge de l'année 1990 est supérieure à celle de l'année 1989 en rive droite du bas-fond, à mi-versant, avec un décalage de 40 cm à 1 mètre (GUIGUEN, 1991). Cette recharge supplémentaire localisée, qui prolonge la durée d'affleurement de la nappe aquifère d'une quinzaine de jours, est à mettre en relation avec une pluviométrie plus importante en 1990 qu'en 1989 sur le versant (150 à 200 mm de pluies supplémentaires). La comparaison des étages de la nappe aquifère fait apparaître un étage beaucoup plus prononcé en 1990. L'explication en est simple : l'étage de l'année 1989 fait suite à une pluviométrie excédentaire en 1988 (1244 mm), alors que l'étage de l'année 1990 correspond à une pluviométrie déficitaire en 1989 (920 mm).

Figure 18 : Niveaux statiques de la nappe pour deux isopièzes du bas-fond de Kambo. (GUIGUEN, 1991)



1=10/86

Dans la province de la Comoé et le sud du Mali, la nappe aquifère réagit donc rapidement aux excédents pluviométriques mais conserve également assez longtemps les effets de déficits pluviométriques qui sont cumulatifs. Elle alimente le débit de base des marigots du mois d'août au début du mois de novembre, mais la durée et l'importance des débits dépendent à la fois des pluies de la saison en cours et des pluies des saisons antérieures. Ce débit de base conditionne la saison rizicole dans les bas-fonds.

Dans la Comoé, les puits traditionnels captent des aquifères situés dans les altérites où les débits d'exhaure sont médiocres. Sur les socles granitiques, les forages captent le substratum fissuré selon les directions principales de l'orogénie éburnéenne.

LE DOMAINE SEDIMENTAIRE

Les trois-quarts du Sénégal sont recouverts par d'épaisses séries sédimentaires d'âges secondaire et tertiaire, qui appartiennent aux formations du bassin atlantique côtier africain sénégal-mauritanien. L'épaisseur des dépôts est d'autant plus importante que l'on se rapproche de la Casamance où elle peut dépasser 4000 mètres. La série secondaire est constituée par des alternances de marnes, de sables et de calcaires marneux, gréseux ou dolomitiques. Les formations secondaires se terminent par une épaisse série détritique, sableuse, d'âge crétacé supérieur, qui constitue le principal aquifère du Sénégal. Surmontant les sables du maestrichien, ces dépôts, d'épaisseur très variable, atteignent 500 mètres en basse Casamance. Une épaisse série marno-calcaire recouvre des dépôts alternés de sable et d'argile d'âge éocène supérieur à quaternaire.

La partie supérieure altérée de ces dépôts marins est appelée à tort "continental terminal". La partie inférieure des sédiments sablo-argileux enferme plusieurs niveaux sableux aquifères d'un grand intérêt économique. Nous conviendrons d'appeler "continental terminal", l'ensemble de cette série sablo-argileuse. Son épaisseur est d'environ 80 mètres dans la région de Thyse Kaymor, 160 mètres dans la région de Ziguinchor.

HYDROLOGIE DES AQUIFERES

Siné-Saloum :

Dans la région de Thyse Kaymor (Siné-Saloum), le niveau statique de la nappe aquifère, localisée dans le continental terminal, se situe à 11 mètres de profondeur près du marigot Bao Bolon, à près de 50 mètres de profondeur sur le plateau. Sa position en altitude est voisine du niveau marin, légèrement supérieure au S.W. (+3m) et inférieure vers le N.E. (-3m à -6m à Amath Maran) (figure 19). Les variations piézométriques observées de juillet 1989 à février 1990 ont été de l'ordre de 20 centimètres dans les bas-fonds et de quelques centimètres sur les interfluves.

Les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère sont les suivantes:

- transmissivité $T = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- coefficient d'emmagasinement $S = 5 \text{ à } 15\%$.

La position de l'aquifère le place en situation de drainage des écoulements superficiels. Sa réalimentation est faible sur l'ensemble de la région et plus importante à proximité des bas-fonds. Une simulation des lames d'eau journalières infiltrées au-dessous du profil racinaire (1.50m) a été réalisée sur la période 1934-1987 (ALBERGEL & al, 1991). Le modèle utilisé, (ALBERGEL & PEPIN, 1991) a été calé sur les données de débit du bassin versant de Ndiba et celles de l'évapotranspiration des parcelles de bilan hydrique sous culture. La lame d'eau disponible pour l'infiltration sur la période 1934-1987 est en moyenne de de 150 mm/an, il faut cependant préciser que pour de nombreuses années, aucune réalimentation de la nappe n'est possible. Lorsque ces années sont isolées comme 1941, 44, 56, 57, 68, 72 et 73, le préjudice sur la ressource en eau souterraine n'est pas sensible, tandis que, lorsque ces années sont groupées comme de 1982 à 1985, alors le niveau de l'eau dans les puits descend et certains d'entre eux s'assèchent.

Casamance :

En Casamance, dans la région de Djigoum, la nappe superficielle se trouve dans les différentes formations quaternaires :

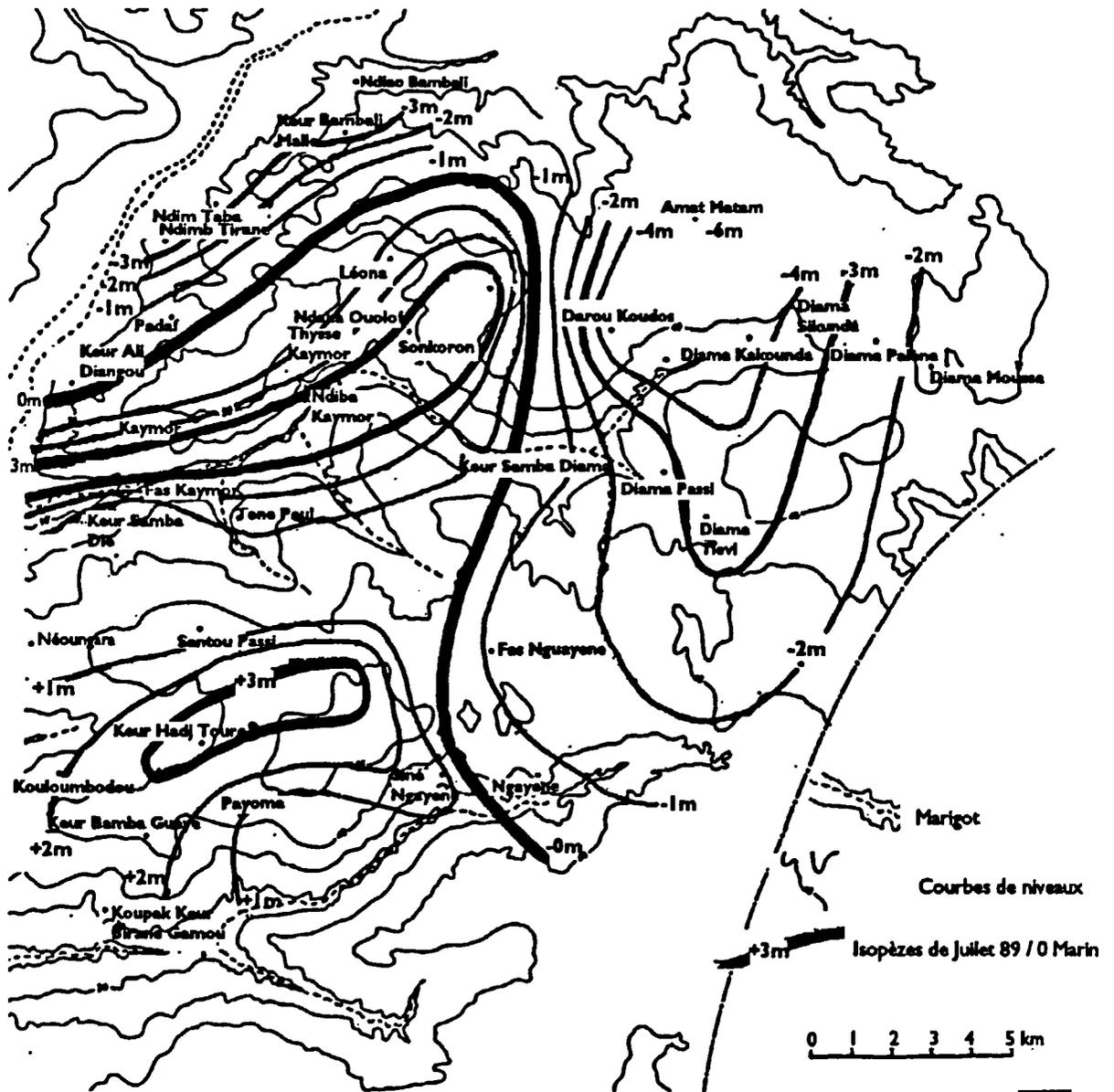
- sables rouges des plateaux,
- couches latéritiques de la base des sables rouges,
- sables des terrasses.

Le niveau imperméable inférieur est constitué par les argiles jaunes du continental terminal.

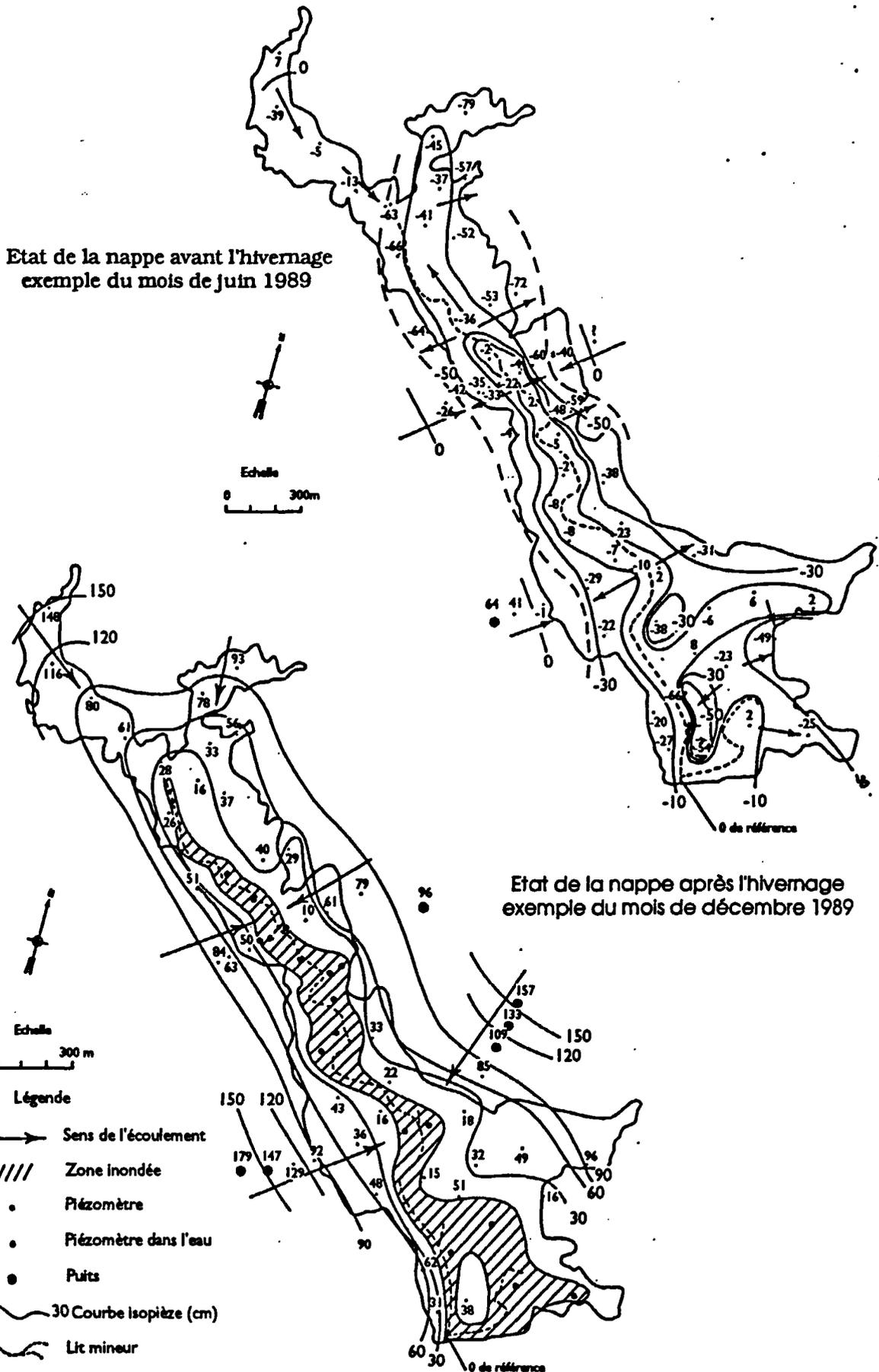
L'observation des cartes piézométriques (figures 20) permet de tirer les grandes lignes du fonctionnement de la nappe superficielle:

- La surface piézométrique reflète fidèlement la morphologie du terrain avec des gradients très faibles sur les plateaux et une accentuation de la pente hydraulique vers les versants.
- Le marigot draine la nappe dès les premières pluies importantes et l'affleurement de la nappe suit les ramifications des marigots. Les rizières inondées longent toutes les berges des marigots.
- Les eaux souterraines douces en provenance des plateaux s'écoulent vers les bas-fonds où elles entrent en contact avec les eaux salées.
- Dans leurs parties amont les bas-fonds sont alimentés en eaux douces durant toute l'année, tandis qu'en aval on remarque de décembre à mai un fort creux piézométrique sous les terrasses alluviales qui bordent le lit mineur où circule l'eau salée.

Figure 19 : Fonctionnement de l'aquifère du continental terminal dans le Siné Saloum (ALBERGEL & al 1991)



Figures 20: Cartes piézométriques de Djiguinoum (BRUNET, 1990)



QUALITE CHIMIQUE DES AQUIFERES

Dans le Siné-saloum, la qualité chimique des eaux de la partie supérieure de l'aquifère est excellente (pH de l'ordre de 6.5 et conductivité inférieure à 5 mS/cm), mais sa position par rapport au niveau de la mer et la proximité des marigots sous influence des marées posent un problème pour l'exploitation de cet aquifère.

En Casamance, la caractérisation chimique mensuelle des eaux de la nappe a été exprimée à partir du pH, de la conductivité électrique et de la teneur en aluminium. Les valeurs de chaque paramètre ont été réparties en trois classes définissant les domaines où la contrainte est soit la plus faible, soit la plus forte pour la culture du riz, ainsi qu'un domaine intermédiaire :

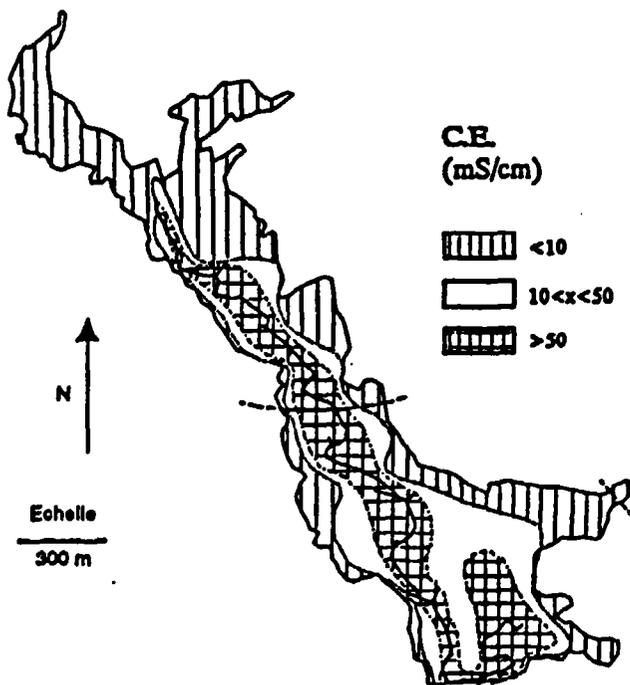
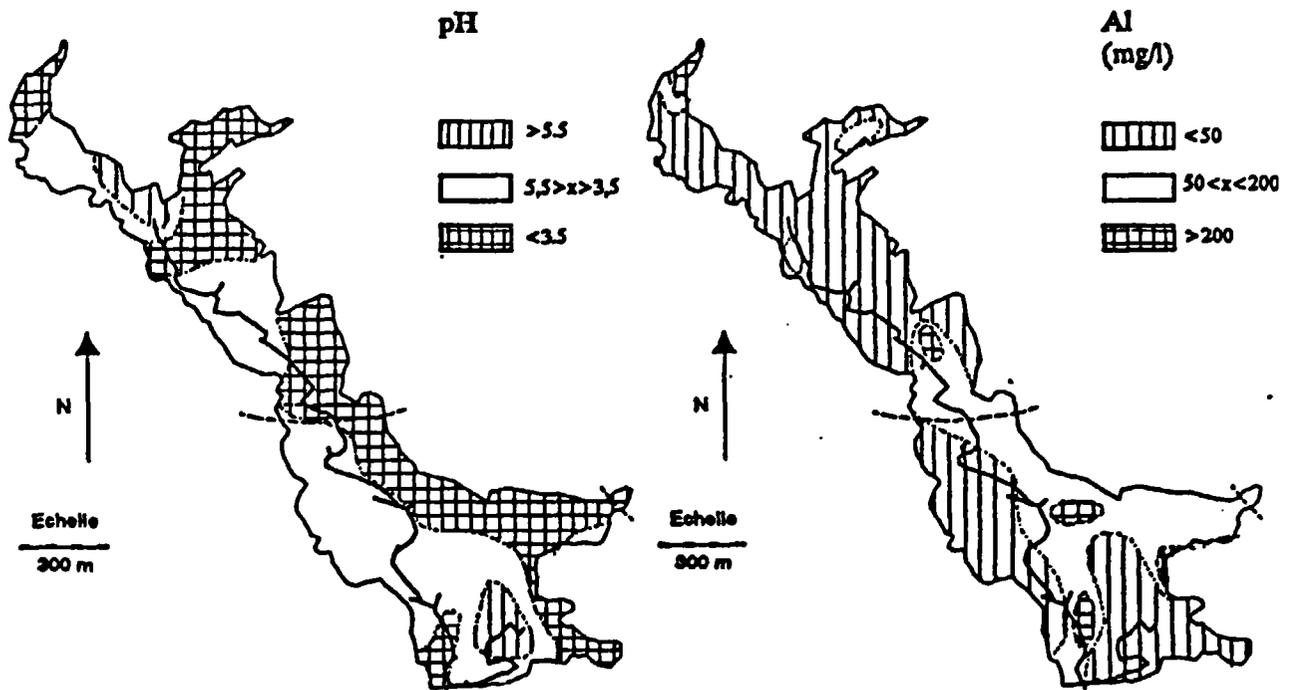
- Une conductivité de 10 mS/cm est le seuil maximal de tolérance du riz et celle de 50 mS/cm correspond à la conductivité de l'eau de mer,
- un pH < 3.5 rend la culture du riz impraticable, un pH entre 3.5 et 5.5 est correct
- une teneur en aluminium entre 50 et 200 mg /l est supportable par les rizières.

Les cartes mensuelles, établies pour chaque paramètre, mettent en évidence les faits suivants (figure 21) :

- une hyper-acidité (pH < 3.5) sur l'ensemble de la vallée lorsque le bas-fond est inondé d'août à décembre,
- de très fortes teneurs en aluminium dans les zones où le pH reste hyper-acide toute l'année,
- de faibles variations de la salinité de la nappe au cours de l'année avec un gradient très net de la salinité du marigot vers le plateau.

L'analyse de la conductivité en fonction de la profondeur montre un fort gradient salin. Au-dessous de 30 cm, la salinité varie très peu. Les échanges entre eaux douces des plateaux et eaux salées de la nappe de bas-fond sont très faibles.

**Figure 21 : Principaux caractères chimiques des eaux de nappe
Djigouinoum, Juin 1989. (BRUNET, 1990)**



VALLEE DE DJIGUINOUM
Principaux caractères chimiques
des eaux de nappe
Juin 1989

Légende	
	Bordure du bas-fond Lever topographique Brunet & Zante 1988
	Plat
	Marigot
N	Nord magnétique 1988