

149

2 pl

ANNEXE 1

**Modélisation de la recharge des nappes
dans des périmètres irrigués de la vallée du
Fleuve Sénégal**


DIAW El hadji Bamba

ORSTOM-Pédologie Centre de Dakar

IRD
Date.....
N°.....
COTE CUL.....

Rap Rech N°4

091564

Fonds Documentaire IRD

010021672
Avril - Mai, 1997

Fonds Documentaire IRD
Cote : B * 21672 Ex: unique

Résumé

La salinisation des sols dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal est due à des phénomènes de remobilisation des dépôts de sels entraînés par la remontée des nappes superficielles. L'étude de la dynamique des nappes devient donc un impératif pour opérer une bonne politique de gestion conservatoire des eaux et des sols sous cultures irriguées. En général, la riziculture inondée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal et dans le Delta est pratiquée sans drainage. La principale conséquence est d'augmenter les percolations d'eau profondes qui sont à l'origine de la recharge parfois importante des nappes superficielles.

Deux aspects méritent d'être étudiés de manière assez fine, le processus de la dynamique de la recharge des nappes et les moyens pouvant être mis en place pour limiter les remontées salines. Ces dernières sont des phénomènes physiques fortement corrélés à la présence d'une nappe.

Une telle étude passe par l'analyse des différents facteurs pouvant influencer les mouvements des nappes d'eau souterraines au niveau des périmètres irrigués. Les principaux facteurs étudiés dans ce travail sont : l'influence des caractéristiques du sol en relation directe avec la pratique culturale (simple ou double culture de riz sur du sol léger (*fondé*) ou du sol lourd (*hollaldé*)), la taille des périmètres et la distance inter-périmètres, la conductivité hydraulique de l'aquifère et l'analyse enfin de l'influence de l'implantation d'arbres dans les périmètres irrigués.

Les résultats des différentes simulations démontrent la complexité du système sol-plante-atmosphère. L'introduction d'arbres dans le périmètre dans le souci d'un maintien de la nappe à une profondeur optimale a été étudié. Il est clair que vu la perméabilité des sols légers, la pratique de la riziculture inondée sur ces types de sols rend l'affleurement de la nappe durant l'irrigation imparable. On note cependant qu'à l'arrêt de l'irrigation, le rabattement de la nappe est fortement accéléré par la présence d'arbres dans le périmètre surtout si l'aquifère n'est pas d'une bonne perméabilité.

SOMMAIRE

1. Introduction	5
2. Modélisation du transfert d'eau en milieu poreux : le modèle MHNS_2D	6
3. Propriétés physiques des sols	8
4. Expériences numériques	8
4.1. Domaine de simulation et condition aux limites	9
4.2. Résultats numériques	10
4.2.1. Influence du type de sols et de la pratique culturale	10
4.2.2. Influence de la taille des périmètres	17
4.3. Détermination de la distance inter-périmètres :	18
4.4. Influence de la taille des aménagements sur le rabattement de la nappe.	20
5. Influence de la perméabilité de l'aquifère sur le rabattement de la nappe	21
6. Influence de la présence d'arbre au niveau des périmètres irrigués	27
7. Conclusion	30

Liste des principaux symboles

$C(h)$: capacité capillaire	$[L^{-1}]$,
ETR	: évapotranspiration réelle	$[L]$
f	: terme puits/source	$[T^{-1}]$
h	: hauteur de pression de l'eau du sol	$[L]$
$K(h)$: conductivité hydraulique non saturée	$[LT^{-1}]$
K_s	: conductivité hydraulique à saturation	$[LT^{-1}]$
m	: paramètre de forme de la courbe de rétention	
n	: paramètre de forme de la courbe de rétention	
\bar{q}	: vitesse de Darcy	$[LT^{-1}]$
α	: paramètre de forme de la courbe de rétention	$[L^1]$
$\theta(h)$: teneur en eau volumique	$[LL^{-3}]$
θ_r	: teneur en eau résiduelle	$[LL^{-3}]$
θ_s	: teneur en eau à saturation	$[LL^{-3}]$

Modélisation de la recharge des nappes dans des périmètres irrigués de la vallée du Fleuve Sénégal

1. Introduction

Les principales causes de la recharge importante des nappes au niveau de la région du fleuve Sénégal sont l'intensification de l'irrigation et la pratique de la riziculture inondée sans drainage dans des sols légers (Loyer, 1989). En effet, au cours des campagnes agricoles, on observe une infiltration profonde des eaux d'irrigation, provoquant la remontée de certaines nappes superficielles. Les quantités d'eaux percolées vers la nappe sont d'autant plus importantes que le sol est perméable. Ces eaux percolées constituent une menace pour le bon comportement des sols irrigués, car elles occasionnent un rehaussement du niveau de la nappe avec comme corollaire un risque de salinisation des sols.

En effet, la conséquence de la remontée du niveau de la nappe se manifeste par une concentration des solutions salines à la surface des sols. Ce phénomène se produit dès que la proximité de la nappe peut permettre une remontée des solutions en surface des sols par capillarité sous l'effet de la forte demande évaporatoire (Boivin *et al*, 1995). Nous assistons ainsi à une salinisation continue des sols.

Cette salinisation a comme conséquence directe sur les cultures, une sécheresse physiologique qui entrave l'absorption de l'eau par les racines et dérègle l'alimentation

minérale. Sur le sol, la salinisation se manifeste par la déstabilisation de sa structure (Dupriez et De Leener, 1990). La conséquence agro-économique étant une baisse de rendement notoire et un désintéressement progressif des surfaces aménagées qui deviennent impropres à toutes cultures. Ceci constitue un manque à gagner assez important et représente une menace pour le développement durable de l'agriculture irriguée.

Ainsi, pour garantir une agriculture irriguée durable dans la zone, Il est nécessaire de maîtriser le processus de recharge au niveau des périmètres, ainsi que l'ensemble des facteurs qui sont susceptibles de l'influencer. Parmi ceux-ci nous pouvons noter, les types de sols (par leurs caractéristiques physiques), les types de cultures (double ou simple riziculture ou encore la polyculture) et enfin la taille des périmètres ainsi que la conductivité hydraulique de l'aquifère. Nous essayerons donc dans cette étude, d'analyser l'influence de l'ensemble de ces facteurs sur la recharge de la nappe.

2. Modélisation du transfert d'eau en milieu poreux : le modèle MHNS_2D

L'étude de la recharge des nappes passe nécessairement par une connaissance des processus de migration de l'eau à travers la zone de transfert ou zone non saturée.

L'écoulement de l'eau en milieu poreux non saturé est généralement décrit par une équation mathématique aux dérivées partielles du second ordre, l'équation de Richards (1931). Cette équation résulte de la combinaison d'une loi dynamique ou loi de Darcy étendue aux milieux poreux non saturés et d'une loi de conservation de la masse ou équation de continuité. Moyennant certaines hypothèses simplificatrices telles que : le milieu poreux est inerte et indéformable, les phénomènes d'hystérésis existant entre les processus d'humectation et de drainage ne sont pas pris en compte, les effets thermiques sont considérés comme négligeables et l'air présent dans le milieu poreux est à la pression atmosphérique, l'écoulement peut être décrit par la loi de Darcy généralisée aux milieux poreux non saturés :

$$\bar{q} = -K(h)\bar{\nabla}H \quad (1)$$

La loi de conservation de la masse ou équation de continuité peut s'écrire de la manière suivante :

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = -\nabla \bar{q} + f \quad (2)$$

$C(h) = d\theta/dh$ est la capacité capillaire [L^{-1}], $K(h)$ est la conductivité hydraulique non saturé [LT^{-1}], h est la pression [L] et est liée à la charge H [L] par la relation $H = h + z$, z étant la cote repérée sur une verticale orientée vers le haut [L], \bar{q} est la vitesse de Darcy [LT^{-1}] et f représente le terme puits/source [T^{-1}] décrivant par exemple le prélèvement d'eau dans le sol par les plantes.

Les conditions imposées aux limites du domaine étudié peuvent être : soit un flux $q_{imp}(t)$ (pluies, évaporation, écoulement de nappe, etc..) une charge $h_{imp}(t)$ (présence d'une lame d'eau en surface, ou d'une nappe en profondeur) ou une condition de drainage libre ou gradient hydraulique unitaire. Cette dernière ne concerne que la limite inférieure du domaine simulé. Les conditions initiales peuvent être au choix, un profil de teneurs en eau ou un profil de pressions.

Plusieurs formulations analytiques permettent de décrire les fonctionnelles $\theta(h)$ et $K(h)$. Les fonctions de Mualem (1976) et Van Genuchten (1980) mises en oeuvre dans le modèle sont les plus couramment utilisées. Ces formulations sont les suivantes :

$$\theta(h) = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} + \theta_r \quad (3)$$

$$K(h) = K_s \frac{\left\{ 1 - \alpha(|h|)^{n-1} [1 + (\alpha|h|)^n]^{-m} \right\}^2}{[1 + (\alpha|h|)^n]^{m/2}} \quad (4)$$

θ_r [LL^{-3}] représente la teneur en eau résiduelle, θ_s [LL^{-3}] est la teneur en eau à saturation, K_s [LT^{-1}] est la conductivité hydraulique à saturation, α [L^{-1}] et n [-] représentent des coefficients de forme (forme de la courbe de rétention) et sont caractéristiques du type de sol considéré.

La modélisation est faite par l'utilisation du modèle **MHNS_2D**. Il représente une application de la théorie des éléments finis mixtes hybrides à l'étude des écoulements saturés et non

saturés. Du point de vue numérique, le programme résout l'équation de Richards en deux dimensions verticales (Diaw, 1996), et permet donc de décrire les transferts d'eau dans un plan suivant un transect. Il peut être utilisé pour étudier les transferts d'eau en milieux poreux non saturés, partiellement saturé ou tout simplement saturé en eau. Le domaine de simulation peut être homogène ou hétérogène et dans ce second cas, il suffit de bien différencier les matériaux et de caractériser physiquement chaque type de sol.

3. Propriétés physiques des sols

Les sols les plus rencontrés dans la vallée du fleuve sont des sols de levées (hautes et petites levées) ou sols légers encore appelé *fondé* et les sols vertiques (cuvettes de décantation) ou sols lourds encore appelé *hollaldé* (Mané et al, 1995). Les sols de types *fondé* étant assez perméables (3 à 6 cm/jour pour le périmètre de Ouro Madiou), la pratique de la riziculture inondée sur ces types de sol entraîne inévitablement des remontées de nappe importantes. Dans de tels types de sols, il convient d'étudier le retour de la nappe vers sa position initiale à l'arrêt de l'irrigation. En effet, le retour plus ou moins rapide de la nappe vers sa position initiale peut limiter dans une certaine mesure, les remontées salines. Le mouvement de rabattement de la nappe entre deux campagnes rizicoles dépend fortement des écoulements latéraux de la nappe, qui eux sont déterminés par la perméabilité de l'aquifère. La caractérisation des aquifères de la région (Laval, 1996), révèle des valeurs de perméabilité assez disparates allant de 50 cm/jour à Ndiaye (dans le delta) à environ 250 cm/jour à Donaye (moyenne vallée).

Pour les sols lourds ou *hollaldé*, qui sont des sols très peu perméables (de l'ordre de 1mm/jour pour le périmètre de Donaye) et les risques de remontée de la nappe par les eaux d'irrigation sont quasi inexistantes. Les caractéristiques physiques des sols utilisées pour les simulations ont été déterminés dans des études antérieurs (Diaw, 1996 ; Laval, 1996) et sont présentées en annexe.

4. Expériences numériques

Dans la région différents types d'aménagements sont représentés, allant des grands périmètres (supérieur à 500 ha) aux périmètres irrigués villageois ou PIV (de 15 à 50 ha) (Hecq et Dugauquier, 1990). Trois facteurs sont déterminants pour l'étude de la recharge des nappes au

niveau des périmètres irrigués, les caractéristiques physiques des sols, la taille des périmètres et un troisième facteur qui est la pratique culturale. La pratique de la polyculture (oignon, tomate) n'entraînant pas une recharge de nappe significative (Diaw, 1996), les volumes d'eaux transférés étant peu importants, nous limiterons notre étude dans le cas de la pratique de la riziculture inondée simple ou double. Il s'agira d'essayer de montrer l'influence de la taille de l'aménagement sur le mouvement de la nappe notamment son rôle sur le rabattement de celle-ci une fois l'irrigation arrêtée.

4.1. *Domaine de simulation et conditions aux limites*

L'étude numérique est menée en considérant un PIV de 20 hectares supposé rectangulaire de 500 m sur 400 m au sein duquel est pratiquée une riziculture inondée. Les simulations sont menées en considérant un transect suivant la longueur du périmètre et nous supposons que toutes les parcelles sont irriguées en même temps et de la même manière. Ce périmètre se situe à l'intérieur d'une superficie aménagée rectangulaire de 1000 m de longueur (figure 1). Le suivi expérimental de la campagne rizicole de Donaye (Hivernage 1995) avait permis d'estimer les apports d'eau pour une culture, correspondant à une lame d'eau moyenne de 120 mm présente sur les parcelles ($1200 \text{ m}^3/\text{ha}$). Nous nous sommes alors inspirés de cette valeur pour imposer, dans nos simulations, une lame d'eau de 120 mm sur les parcelles. La campagne agricole considérée s'étend sur 120 jours dont 80 d'irrigation effective et 40 jours après arrêt de l'irrigation (période de la récolte). L'évapotranspiration réelle (ETR) est supposée faible en première approximation comparée aux volumes d'eaux qui sont transférés pendant la période d'irrigation. En revanche, à l'arrêt de l'irrigation, un flux évaporatif égal à 2,5 mm par jour est imposé à la surface du sol. La nappe est supposée être à 4 m de profondeur à l'état initial. L'épaisseur de l'horizon supérieur considérée est de 3 m et celle de l'aquifère est de 5 m (voir figure 1). La limite inférieure est considérée comme imperméable (substratum de l'aquifère) de même que la partie supérieure du domaine hormis celle représentant la zone cultivée où nous avons imposé une pression égale en lame d'eau à 120 mm. Les limites latérales sont considérées comme imperméables au dessus de l'aquifère (de 4 à 0 m de profondeur), et dans l'aquifère une pression constante a été imposée, correspondant une charge constante égale à 4 m de colonne d'eau (400 mbar). Pour les conditions initiales, nous avons utilisé un profil continu de pression avec une valeur de -4 m CE (-400 mbar) à la surface du sol et 0 m CE à 4 m de profondeur qui correspond à la surface de la nappe.

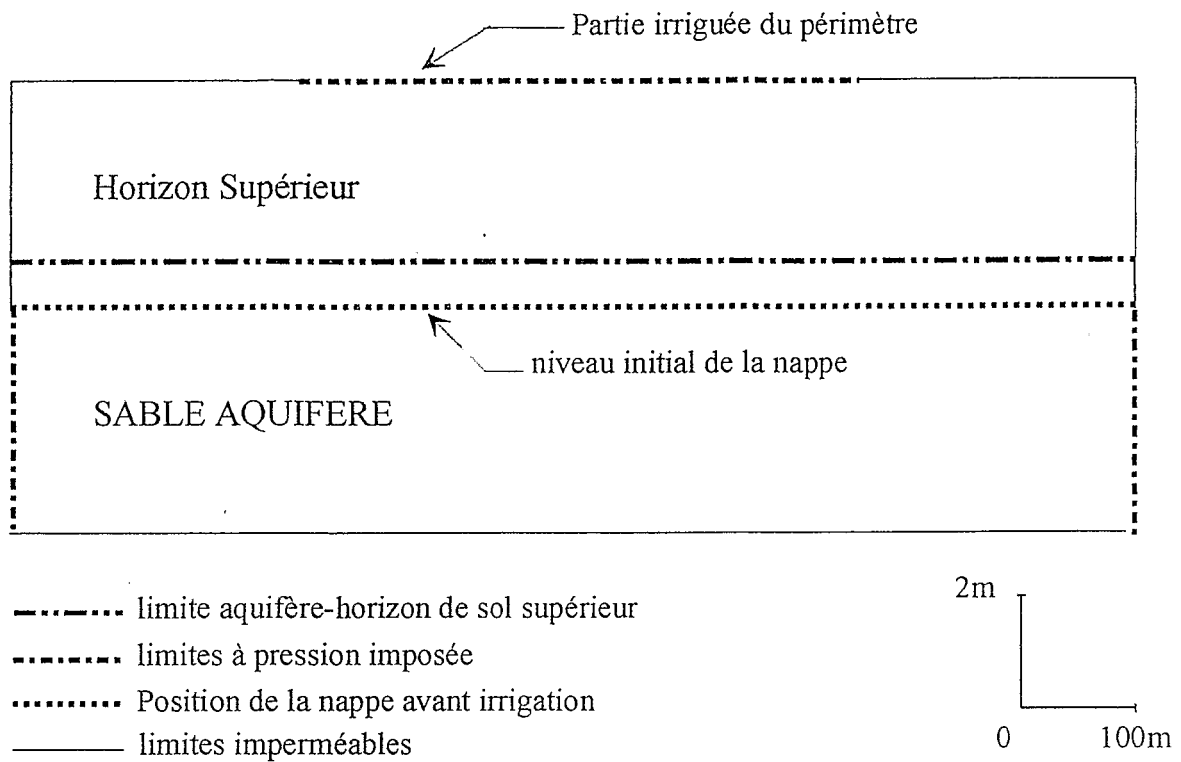


Figure 1 : Domaine de simulation et conditions aux limites : transect simulé pour un PIV de 20 hectares et de forme rectangulaire ayant 500 m de longueur et 400 m de largeur.

4.2. Résultats numériques

Plusieurs simulations numériques ont été effectuées suivant les types de sols et la pratique culturale mais également pour déterminer les limites latérales de l'influence des eaux d'irrigation sur le niveau de la nappe. Nous avons également réalisé des simulations pour étudier le comportement de deux périmètres voisins en vue de la détermination d'une distance inter-périmètres dans le cas où nous en aurions plusieurs à aménager.

4.2.1. Influence du type de sols et de la pratique culturale

Partant des deux principaux types de sols rencontrés dans la région (*fondé, hollaldé*), nous avons étudié la recharge des nappes suivant la pratique culturale (simple ou double).

4.2.1.1. Sol de type fondé :

• Simple culture :

Les résultats des simulations menées pour une simple culture montrent un affleurement de la nappe à l'arrêt de l'irrigation mais avec une tendance générale de retour vers la position initiale. Ils montrent aussi que huit mois après l'arrêt de la première irrigation, (c'est-à-dire à la veille de la campagne suivante) la nappe est à une profondeur moyenne 3,9 m, profondeur sensiblement égale à la position initiale de la nappe.

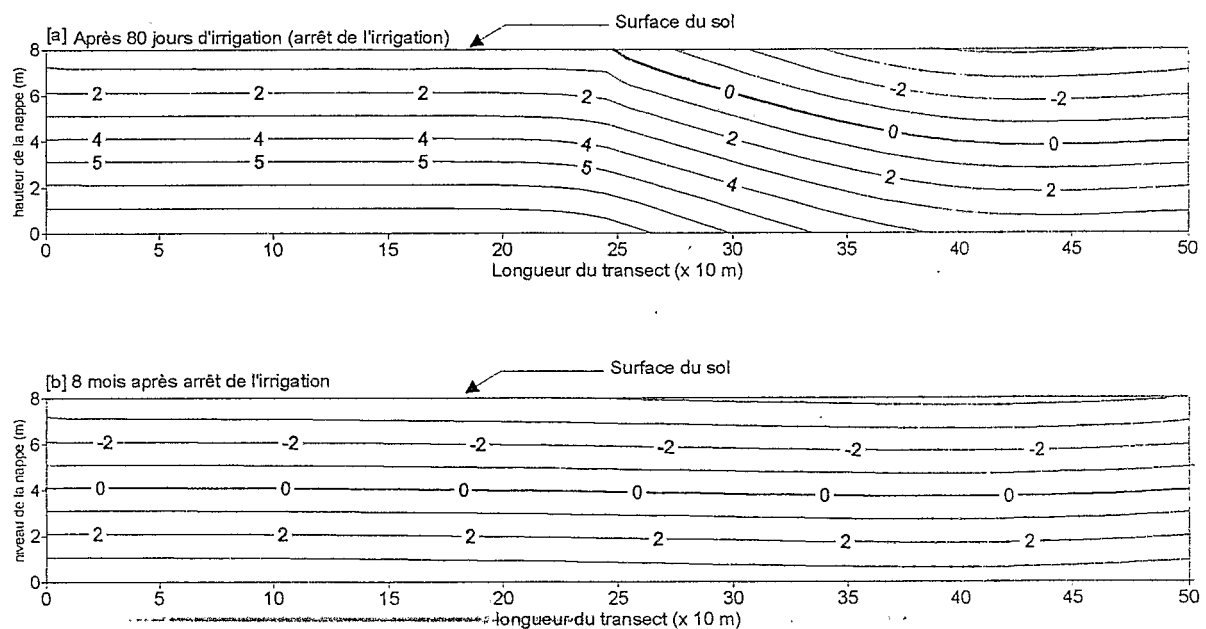


Figure 2 : Position de la nappe à l'arrêt de l'irrigation [a]; et 8 mois après l'arrêt de l'irrigation [b], l'isovaleur de pression égale à 0 correspond à la surface de la nappe.

Ce retour de la nappe vers sa position initiale pendant la période d'arrêt de l'irrigation est la résultante de deux processus de prélèvement d'eau dans le domaine, un premier lié à l'évaporation de surface et un second qui est relatif aux écoulements latéraux et ne dépend que des propriétés de l'aquifère. De même, la simulation continue pendant cinq années de la pratique d'une simple riziculture montre que la profondeur maximale de la nappe avant chaque irrigation est stabilisée à environ 4 m, sa position initiale. L'intervalle de temps entre les campagnes rizicoles représente une période privilégiée pour des remontées salines (285

jours pour une simple culture et environ 102 jours pour une double culture), l'irrigation étant arrêtée, l'évaporation de surface reste le processus de transfert d'eau dominant. Il s'établit alors un régime permanent de transfert d'eau par capillarité de la nappe, si elle est assez proche, à la surface du sol. Cette remontée capillaire dépend de la taille des pores du sol et pour des sols sableux ou de texture légère comme le *fondé*, elle est limitée à quelques centimètres voire quelques décimètres (Dupriez et de Leener, 1990).

A environ un mois après l'arrêt de l'irrigation, la nappe est à plus de 1,80 m de profondeur. Ceci témoigne d'un rabattement plus ou moins rapide de la nappe durant la période d'inter-cultures. Ce rabattement de la nappe dans le temps est illustré à travers la figure 3.

Le bilan des volumes d'eau échangés à travers le périmètre montre à l'arrêt de l'irrigation, un volume d'eau de 37 000 m³ par hectare.

Sachant que la teneur en eau à saturation du sol est égale à 34,6% et celle de l'aquifère à 30,6%, il est possible d'estimer le volume d'eau stocké dans le sol (saturation du profil supérieur) à 13 440 m³ par hectare. Fort de ce résultat, on peut alors calculer la quantité d'eau apportée directement à la nappe (23 560 m³ par hectare) ce qui correspond à une fraction de lessivage qui correspond à 63%. Ceci témoigne de l'importance des volumes d'eau transférés pour une riziculture inondée sur un sol de type *fondé* et explique l'affleurement de la nappe durant la période d'irrigation. La figure 4 montre l'évolution des différentes lames d'eau échangées à travers le périmètre pendant une année de simple culture. Elle permet d'apprécier entre autres, l'importance de la lame d'eau évaporée à l'arrêt de l'irrigation par rapport à la lame d'eau écoulee par transferts latéraux à partir d'environ 1 mois après arrêt de l'irrigation.

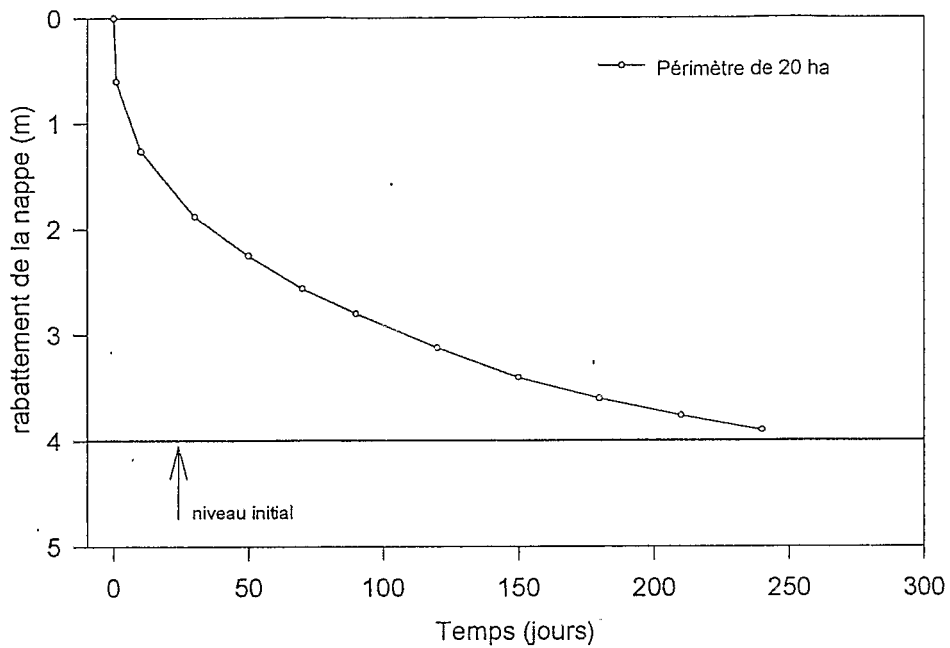


Figure 3 : rabattement de la nappe dans le temps à l'arrêt de l'irrigation

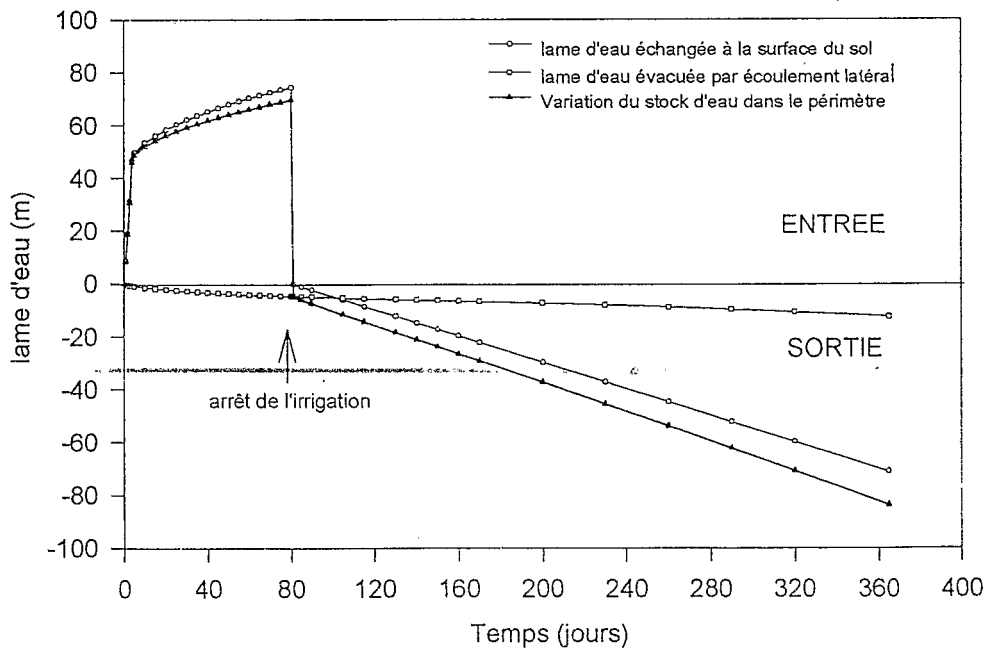


Figure 4 : Evolution des différentes lames d'eau échangées à travers le périmètre pour une riziculture simple sur un fondé.

- Evolution de la lame d'eau échangée à travers le périmètre avec la perméabilité des sols.

Utilisant l'exemple simulé plus haut (périmètre rectangulaire de 20 hectares), nous avons procédé à des simulations pour étudier l'évolution de la lame d'eau échangée à travers le

périmètre pour une campagne de culture et pour différentes valeurs de perméabilité de l'horizon de sol supérieur. Nous avons utilisé trois valeurs de perméabilité, 6 cm/j valeur du *fondé* à Ouro Madiou, 1 cm/j choisie arbitrairement dans la gamme de valeurs disponibles et 0,3 cm/j perméabilité d'un *faux hollaldé* tirée du bulletin technique n°12 de la SAED (Janvier 1997). Nous avons considéré une simple riziculture et les résultats sont présentés à travers la figure 5.

On constate que pour des valeurs de perméabilité, supérieures au centimètre par jour, la saturation du domaine est complète durant la campagne agricole et la nappe devient affleurante. On atteint rapidement le régime permanent et il faudra attendre l'arrêt de l'irrigation pour observer un retour de la nappe à sa position initiale. En revanche, l'allure de la lame d'eau pour du *faux hollaldé*, montre que le régime permanent n'est jamais atteint (jusqu'à l'arrêt de l'irrigation). Ceci traduit le fait que la saturation du domaine n'est pas complète, le flux d'eau infiltrant n'atteignant pas le niveau de la nappe. Par contre, à l'arrêt de l'irrigation, l'évolution des lames d'eau est la même et ceci résulte tout simplement du fait que le seul transfert d'eau qui a lieu est du à l'évaporation qui est en fait la même pour toutes les simulations (2,5 mm/j).

A travers ces mêmes simulations, nous avons essayé de suivre l'évolution de la pression à environ 1,70 m sous la surface du sol. Pour ce faire, nous avons suivi la pression de la maille de coordonnées 67,5 m suivant l'axe des abscisses et 6,33 m suivant l'axe des ordonnées, l'origine étant le substratum de l'aquifère. Les résultats sont illustrés à travers la figure 6. Ils montrent, une série de variation entre deux phases, une de saturation au moment de l'irrigation et l'autre de dessiccation à l'arrêt de l'irrigation. Une fois l'irrigation arrêtée, on observe une diminution de la pression qui tend ainsi vers la valeur initiale. En revanche, si la nappe n'affleure pas, nous observons une variation continue de la pression de la maille qui augmente jusqu'à l'arrêt de l'irrigation pour ensuite décroître vers sa position initiale. Ceci est observé pour la simulation avec un sol de type *faux hollaldé*. Dans ce cas d'espèce, la nappe n'affleure pas et on atteint jamais le régime permanent. Le flux transféré de la surface vers les profondeur est assez faible, faiblesse souvent due au contraste qui existe entre les propriétés physiques du sol et celles de l'aquifère. Les effets sont les mêmes pour des simulations effectuées avec un *hollaldé* véritable.

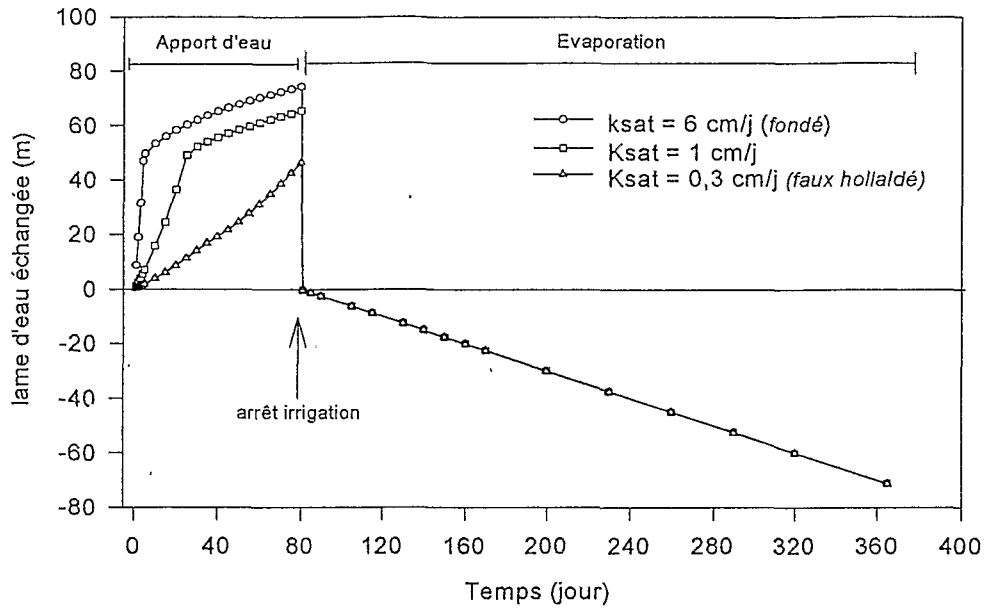


Figure 5 : Evolution de la lame d'eau échangée à travers le périmètre en fonction de la perméabilité de l'horizon de sol supérieur.

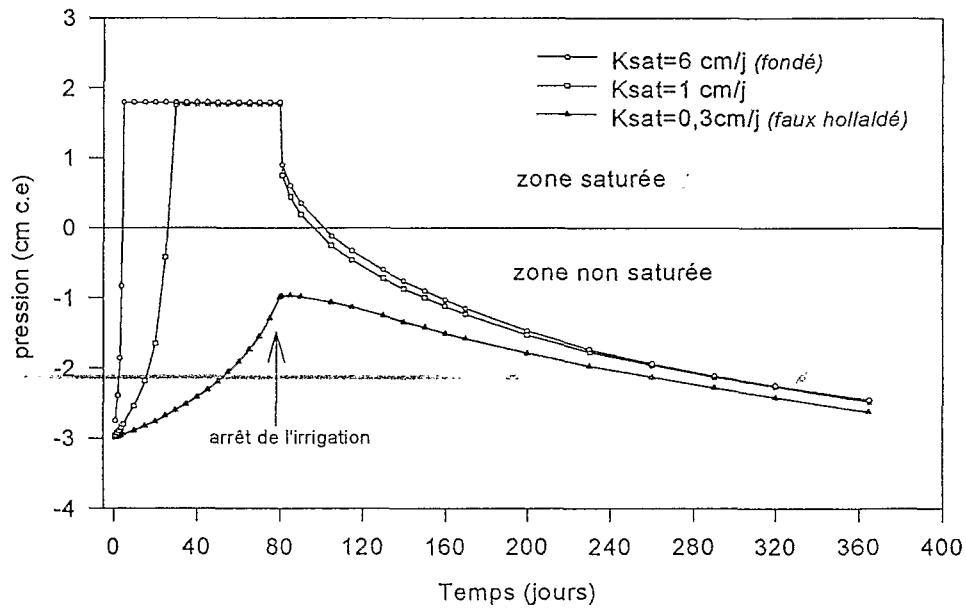


Figure 6 : Evolution de la pression à 1,70 m de profondeur en fonction de la perméabilité de l'horizon de sol supérieur.

Etant donné que le régime d'irrigation est le même, il est clair que le volume apporté par campagne agricole augmente avec la perméabilité de l'horizon de sol supérieur.

• *Double culture :*

De la même façon que pour une simple culture, nous avons un affleurement de la nappe durant les périodes d'irrigation. On notera que pour la première année de double culture à partir des conditions initiales choisies, la nappe est à une profondeur sensiblement égale à 3 m durant l'inter-cultures (la période entre les deux cultures).

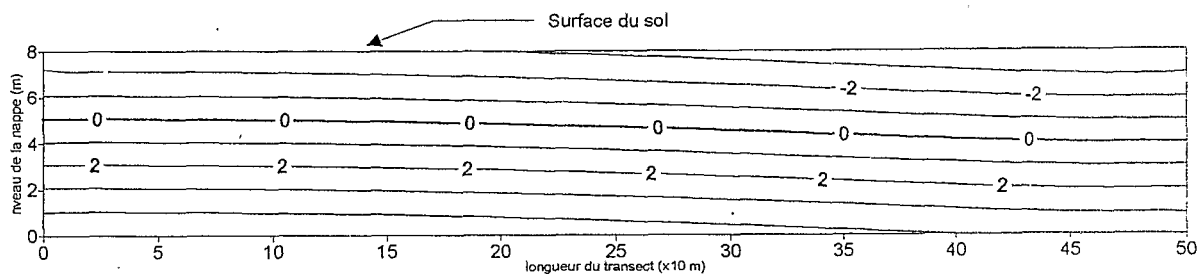


Figure 7 : Position du niveau de la nappe 3 mois et demi après l'arrêt de l'irrigation : c'est la situation à la veille de la seconde culture.

La pratique d'une double culture continue sur cinq années montre un retour de la nappe à environ 3 m de profondeur à la veille de chaque campagne agricole (durant la période correspondant à l'inter-cultures).

En outre, il est clair que le même processus de salinisation souligné dans le cadre d'une simple culture existe mais seulement, dans cette pratique, les cultures rapprochées entraînent un lessivage quasi continue des sols ce qui fait que le risque de salinisation est moindre comparée à la pratique de la simple culture. Ceci est en fait constaté au niveau de certains périmètres de la région du fleuve (Ndiaye, fanaye, ect.).

4.2.1.2. Sol de type hollaldé :

Pour ces types de sol, les essais de simulation menés (en utilisant les caractéristiques hydrodynamiques du sols de Donaye IT1), montrent que pendant 5 ans de riziculture continue (c'est-à-dire en double culture), l'eau d'infiltration provenant de l'irrigation ne fait pas remonter la nappe (voir figuré 8). Ce pendant nous observons une humidification des horizons supérieurs pendant la période d'irrigation.

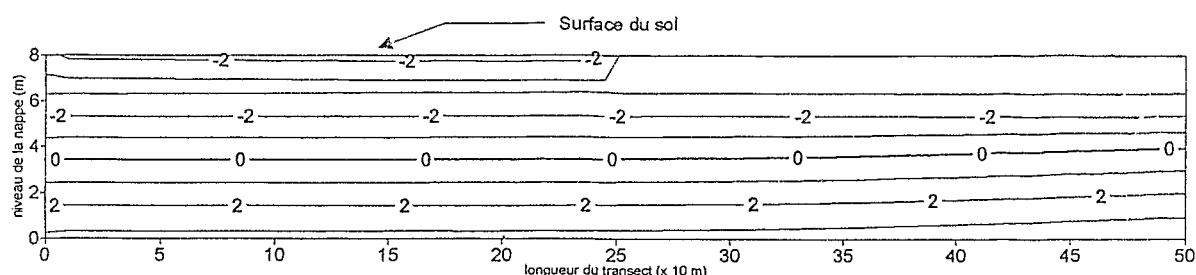


Figure 8 : Essai de simulation sur du sol de type hollaldé, le front d'humidité n'atteint pas la nappe.

L'évolution très lente du front d'infiltration peut s'expliquer en partie par le fort contraste qui existe entre les paramètres hydrodynamiques de l'horizon argileux supérieur et l'aquifère. Ce contraste est de l'ordre de 1 pour 1000 pour ce qui est de la conductivité hydraulique à saturation. Le sol n'est donc pas lessivé et l'utilisation de l'eau du fleuve à l'alcalinité résiduelle positive comme eau d'irrigation, peut aboutir à une augmentation du pH du sol. Cette augmentation du pH du sol est à l'origine d'un second problème non moins délicat qui est l'alcalinisation des sols sous cultures (Boivin, 1993).

Etant donné que pour ces types de sols (argileux), la remontée capillaire ne dépendant que de la taille des pores du sol peut se faire sur quelques mètres (Dupriez et De Leener, 1990), il est donc clair qu'ils sont sous la menace de ces deux processus, salinisation et alcalinisation.

4.2.2. Influence de la taille des périmètres

L'analyse de l'influence de la taille des périmètres sur la recharge de la nappe ne peut se faire de manière efficiente que par l'étude du processus d'engorgement de l'ensemble du périmètre en étude. En effet, nous avons vu plus haut dans le cas de la riziculture sur du *fondé*, la nappe devient affleurante durant la campagne. Dans de telles conditions, les caractéristiques physiques du sol étant fixes, ce qui est intéressant à voir devient alors, la détermination de la limite latérale de l'influence de la recharge provenant des parcelles étudiées mais également le temps de retour de la nappe vers sa position initiale à l'arrêt de l'irrigation.

L'analyse de la figure 9 suivante montre les limites de l'influence des eaux d'irrigation sur le niveau de la nappe. Il s'agit de la distance à partir de laquelle un rehaussement du niveau de la nappe ne se fait pas ressentir.

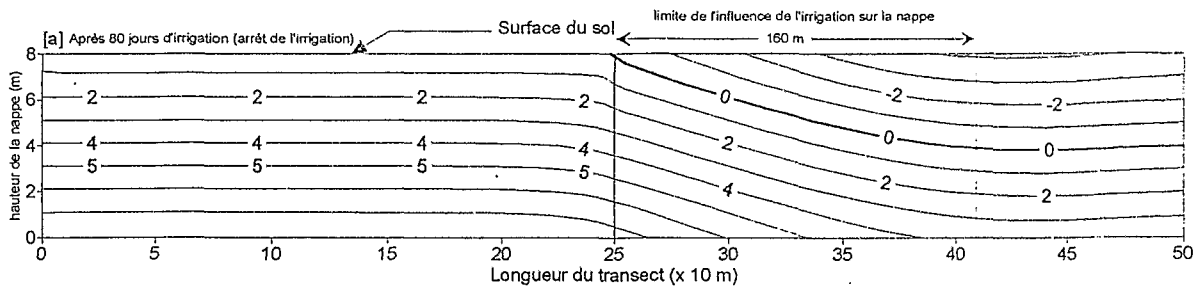


Figure 9 : Limite de l'extension latérale de l'influence des eaux d'irrigation sur le niveau de la nappe pour une riziculture sur du sol de type fondé.

Cette limite de l'effet des eaux d'infiltration sur le niveau de la nappe est estimée dans ce cas présent à 160 m et ne dépend que des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Ceci montre que pour éviter un engorgement continu des sols, il ne faudrait pas exploiter toute la surface aménagée.

Dans le cadre de notre étude où nous avons considéré un périmètre de 20 hectares, il faudra en fait aménager en moyenne 32,8 hectares ce qui correspond en moyenne à une superficie exploitée de 61%.

4.3. Détermination de la distance inter-périmètres :

Etant donné que pour une riziculture sur du fondé l'affleurement de la nappe est inévitable, il serait intéressant de pouvoir estimer la distance qu'il faudrait respecter entre deux périmètres voisins pour éviter un engorgement total et continu des sols. Ce dernier est souvent la conséquence d'une généralisation des remontées de nappe. Partant de la limite d'influence des eaux d'irrigation sur le niveau de la nappe estimée plus haut à 160 m (figure 9), nous essayerons de simuler la pratique de la riziculture sur du sol fondé dans deux périmètres voisins. Pour ce faire, nous avons considéré deux périmètres de 20 hectares identiques à celui que nous avons utilisé plus haut en supposant une distance inter-périmètres de 320 m. Cette distance a été choisie en rapport avec la limite d'influence des eaux d'irrigation sur le niveau de la nappe déterminée précédemment et est égale à deux fois cette limite.

Les résultats montrent un affleurement localisé de la nappe pour chaque périmètre (figure 10). Ceci traduit une interférence des deux périmètres négligeable et laisse supposer que la distance choisie est acceptable comme distance inter-périmètres.

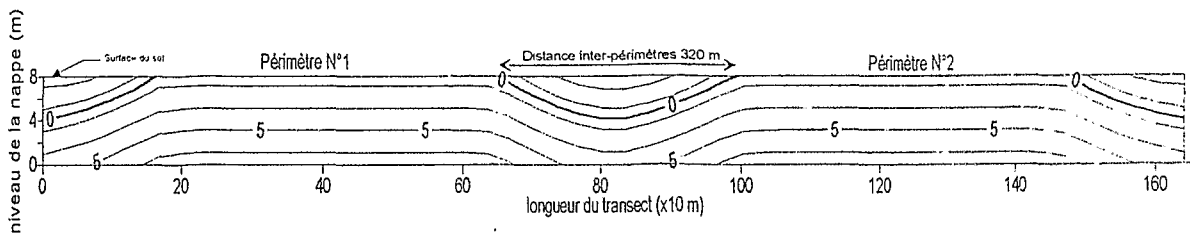


Figure 10 : position de la nappe à l'arrêt de l'irrigation pour deux périmètres voisins dans lesquels nous avons une riziculture inondée, les périmètres étant irrigués en même temps.

En fait, on pourrait s'attendre à une interférence plus importante des eaux provenant des deux périmètres dans la distance inter-périmètre. Elle se traduirait alors par une remontée de nappe plus ou moins nette dans la partie séparant les dits périmètres. Par contre, ceci n'est pas observé sur la figure 10, ce qui peut s'expliquer entre autres par un problème d'échelle d'observation assez grande.

A l'arrêt de l'irrigation, la nappe a une tendance générale à retrouver sa position initiale. ce rabattement de la nappe est conditionné par les écoulements latéraux (écoulement de base de la nappe) et l'évaporation de surface. La figure 11 montre la position du niveau de la nappe à 8 mois après l'arrêt de l'irrigation.

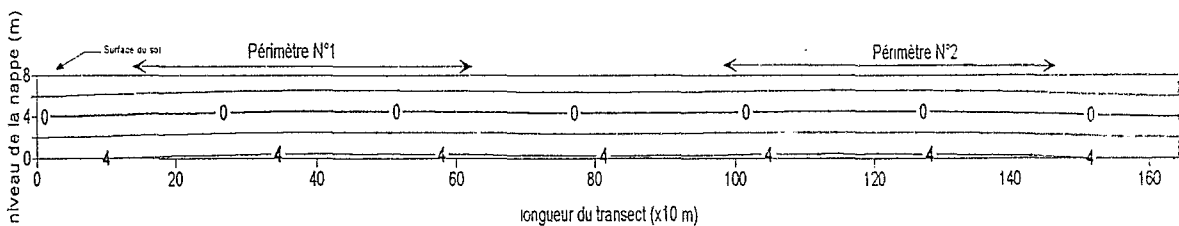


Figure 11 : position de la nappe 8 mois après arrêt de l'irrigation au niveau de deux périmètres voisins.

A travers cette figure 11, on voit un bon retour de la nappe vers sa position initiale durant la période d'inter-cultures.

Les résultats obtenus montrent globalement une satisfaction sur la distance entre périmètres choisie. Il faudra noter que cette distance dépend des caractéristiques des sols et est de 320 m pour cette exemple d'étude. Par contre si la zone de transfert c'est-à-dire l'horizon de sol supérieur est constitué d'un sol moins perméable que le fondé (faux hollaldé par exemple) la distance peut être moins importante.

Ainsi, on constate que plus on se rapproche des limites naturelles (qui sont fixes), leur influence sur le rabattement devient importante, ce dernier devenant identique pour les périmètres de grandes tailles. Dans l'exemple simulé, nous avons le même rabattement pour les périmètres de 28 ha, 32 ha et 36 ha (voir annexes).

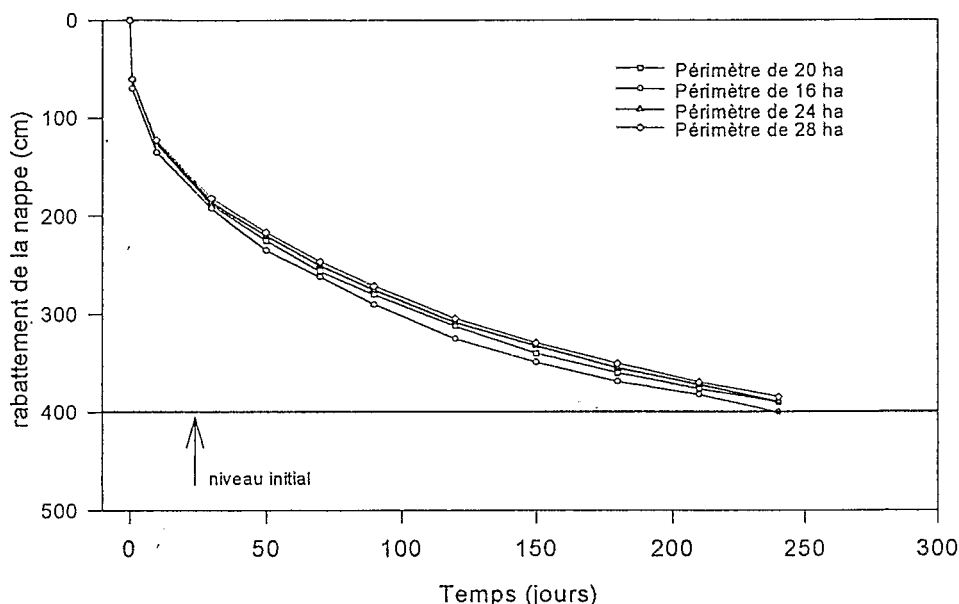


Figure 12 : Evolution du rabattement de la nappe suivant la taille des périmètres.

5. Influence de la perméabilité de l'aquifère sur le rabattement de la nappe

D'après la caractérisation hydrodynamique des aquifères alluviaux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal par la méthode du Slug Test (Laval, 1996), on constate une variabilité importante de la conductivité hydraulique à saturation pour des sites de mesure situés dans le delta (Ndiaye) jusqu'à des sites situés dans la moyenne vallée aval du fleuve (Donaye, Mboyo, Ouro Madiou, Pont Gari, Ngawlé).

L'analyse statistique de la série de valeurs mesurées dans la zone montre une variabilité plus ou moins importante de la conductivité hydraulique à saturation. La moyenne se situant à 119,5 cm/j pour un écart type de 119,2. Le coefficient de variation est estimé à 99,8%. La valeur maximale est de 530 cm/j et la valeur minimale de la série mesurée est de 3 cm/j, ce qui nous donne une étendue de la série égale à 527.

D'après les trois classes de variabilité pour les paramètres de transfert de l'eau distinguées par Vauclin, 1982 ($CV < 10\%$, faible variabilité, $10\% < CV < 50\%$, variabilité moyenne et $CV > 50\%$, forte variabilité), et vu la valeur du coefficient de variation, il est clair que nous nous trouvons

dans la troisième classe c'est-à-dire une variabilité très forte. Celle-ci est justifiée d'autant plus que les différents sites de mesure sont éloignés les uns des autres. Evidemment on gardera à l'esprit que cet essai statistique n'est vraiment pas déterminant vu les distances énormes qui séparent les différents sites et le nombre plus ou moins faibles de mesures effectuées. Seulement, elle permettra d'avoir une idée sur la gamme de variabilité de la conductivité hydraulique dans les différents sites étudiés. En outre, Il serait intéressant de mener une étude plus fine et plus rigoureuse en relation directe avec les différents phénomènes physiques, géochimiques et géomorphologiques de la région du fleuve Sénégal. Dans un cas pareil, il est même envisageable d'utiliser l'outil géostatistique pour essayer de déterminer la structure de la distribution de la conductivité hydraulique de même que sa variabilité spatiale dans la région.

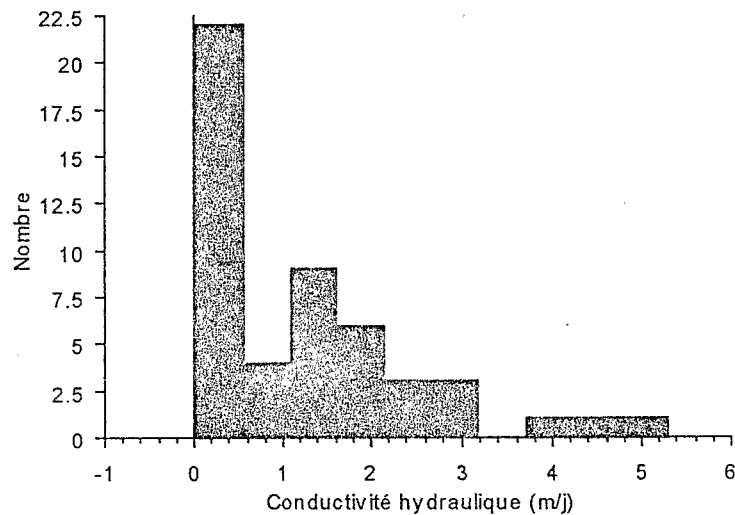


Figure 13 : Histogramme des valeurs de conductivité hydraulique

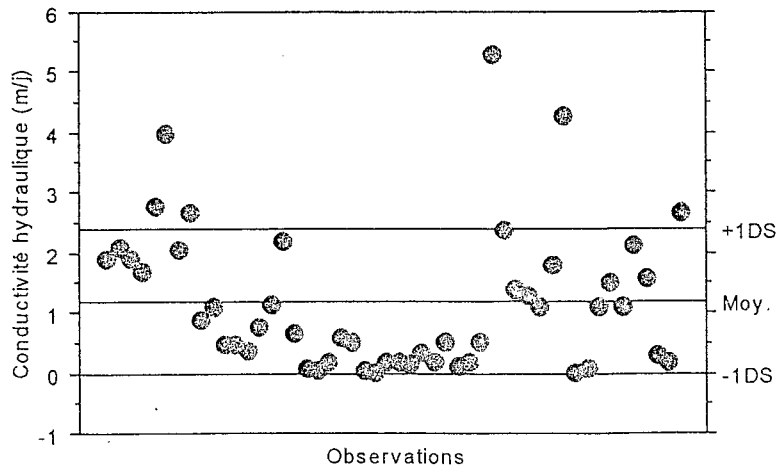


Figure 14 : Nuage de points univarié

Partant de ces valeurs de perméabilité des aquifères, nous avons mené une série de simulations afin de pouvoir illustrer de manière précise, l'influence de la perméabilité de l'aquifère sur le rabattement de la nappe.

Les résultats montrent (voir figure 15), une légère différence au niveau des rabattements observés, entre les différentes valeurs de conductivité hydraulique pour une même période. A un mois après arrêt de l'irrigation, nous avons un écart estimé à 100 cm pour deux aquifères de conductivités hydrauliques respectives 1530 cm/j et 10 cm/j. En revanche, entre deux périodes données (par exemple 1 mois et 2 mois après arrêt de l'irrigation), la différence de rabattement est significative pour chaque valeur de conductivité hydraulique de l'aquifère prise isolément.

D'un autre côté, si l'on regarde la classification des valeurs de conductivité hydraulique suivant les types de sols proposée par De Marsily 1981, on se rend compte en fait, que les valeurs de conductivité hydraulique utilisées entre 10 cm/j et 530 cm/j se situent dans la gamme des sables fins et argileux. En effet, ce type de sable correspond en générale aux sables constituant les aquifères rencontrés dans la région de la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Ceci représente alors une explication plausible des écarts non importants de rabattement observés pour cette gamme de conductivité hydraulique à saturation. En revanche, la valeur de 1530 cm/j utilisée comme valeur extrême est caractéristique d'un sol non argileux et permet de voir des différences appréciables par rapport aux résultats obtenus avec des simulations utilisant des valeurs de conductivité hydraulique plus faibles.

graviers sans éléments fins :	$K = 10^{-2} m / s$
sables non argileux et graviers :	$K = 10^{-2} m / s$ à $10^{-5} m / s$
sables fins et argileux :	$K = 10^{-5} m / s$ à $10^{-9} m / s$
argiles franches :	$K = 10^{-9} m / s$ à $10^{-13} m / s$

On notera que pour une semaine après arrêt de l'irrigation, le rabattement de la nappe est très instable suivant les valeurs de conductivité hydraulique et ceci pour les valeurs les plus faibles.

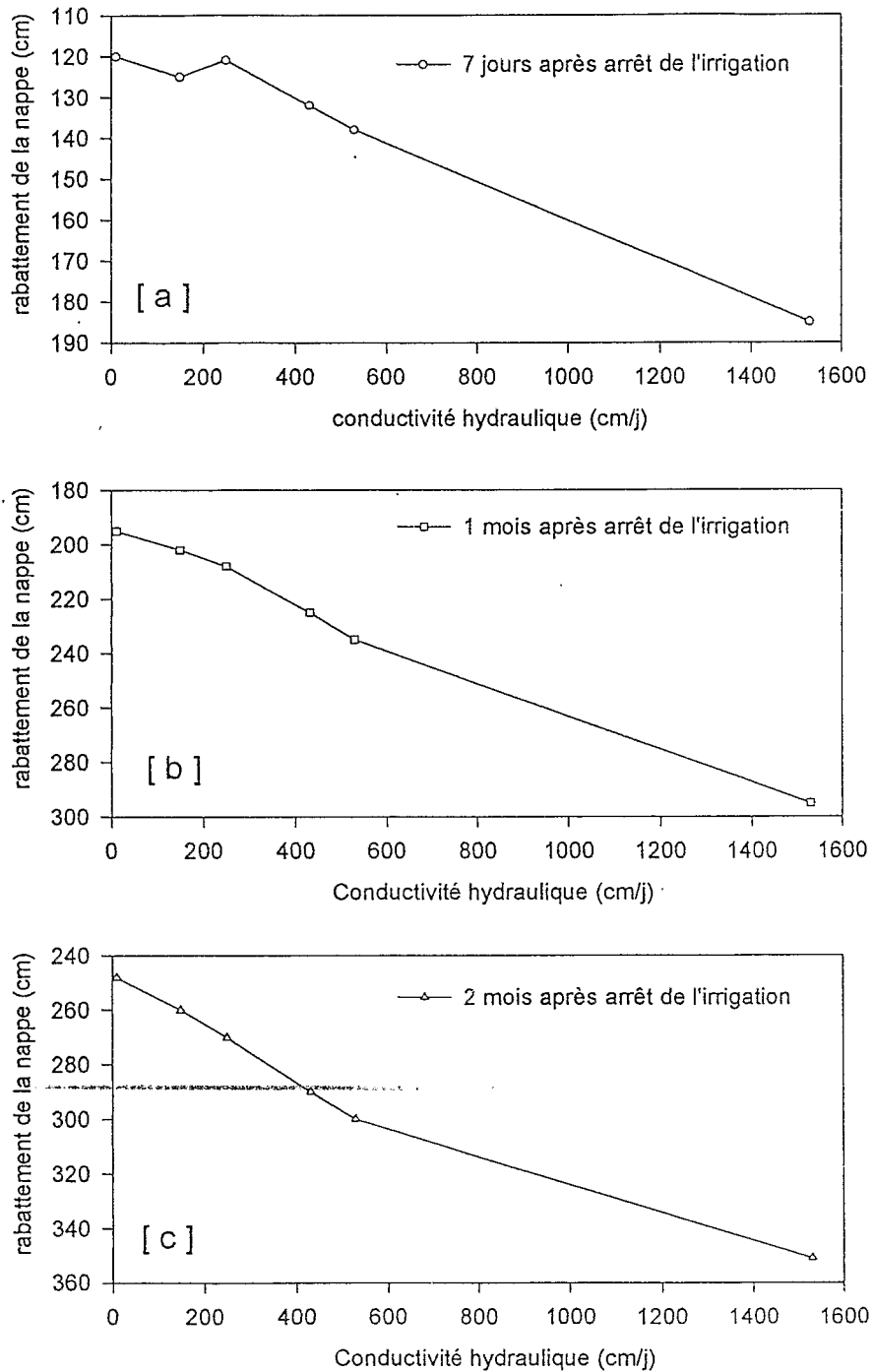


Figure 15 : Evolution du rabattement de la nappe avec la conductivité hydraulique de l'aquifère : [a] 7 jours ; [b] ; 1 mois et [c] ; 2 mois après arrêt de l'irrigation

Il y a lieu maintenant de montrer l'importance de l'évaporation sur le rabattement de la nappe et également d'illustrer plus concrètement l'influence de la perméabilité de l'aquifère. Pour ce faire, nous avons supposé, une fois l'irrigation arrêtée, un système fermé à l'extérieur

où les seuls transferts d'eau se font par écoulement latéral. C'est ce qu'on appelle souvent une redistribution non influencée des pressions de l'eau du sol (pas d'influence de l'évaporation de surface). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 16.

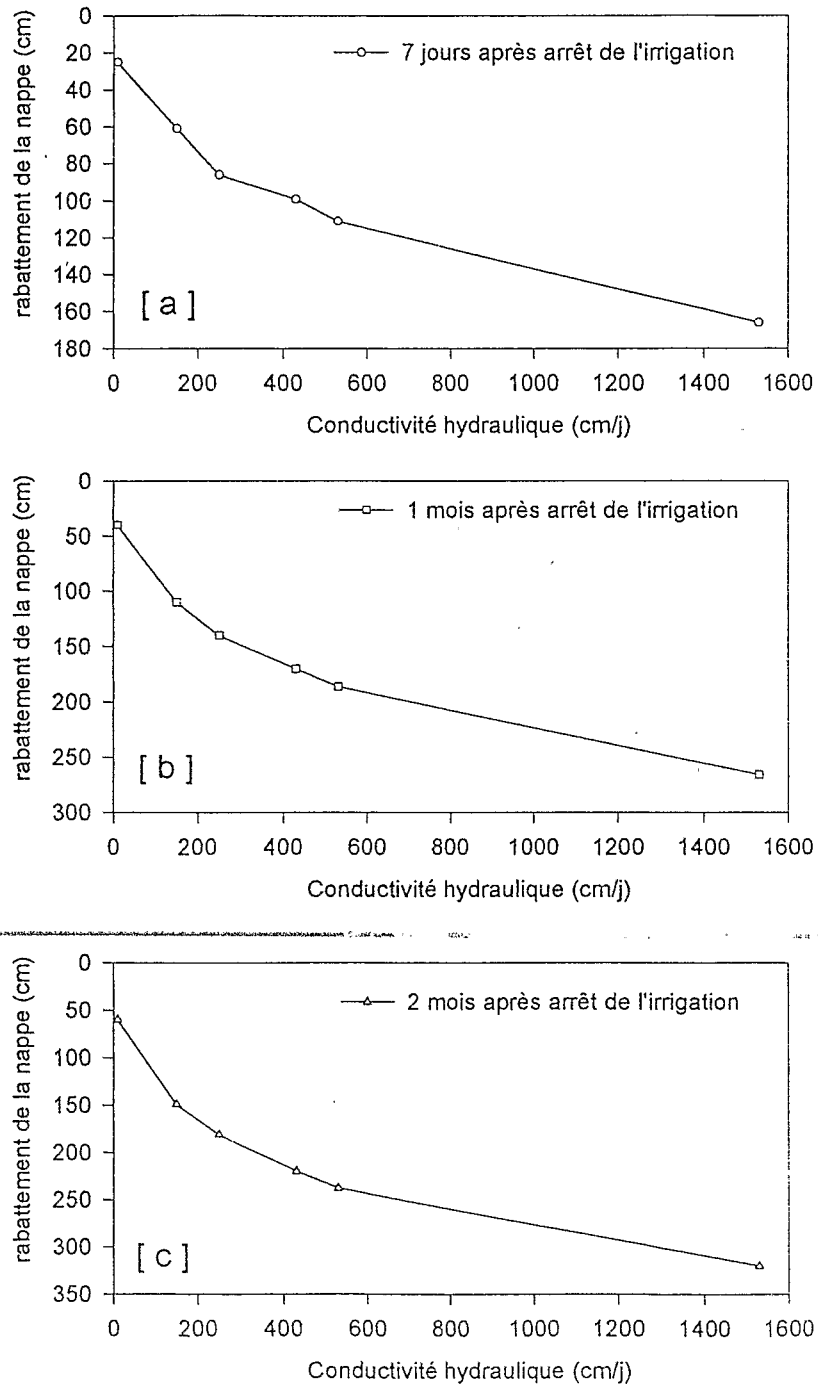


Figure 16 : Evolution du rabattement non influencé de la nappe avec la conductivité hydraulique de l'aquifère: [a] 7 jours ; [b] ; 1 mois et [c] ; 2 mois après arrêt de l'irrigation.

En regardant de plus près les résultats des simulations notamment le rabattement influencé par l'évaporation et celui non influencé, il est possible d'estimer la part du rabattement de la nappe due à l'évaporation et celle due aux écoulements latéraux. Ces derniers sont liés à la conductivité hydraulique de l'aquifère.

Ainsi, ces résultats de simulation ont montré qu'un mois après arrêt de l'irrigation et pour une conductivité hydraulique de 1530 cm/j, la part du rabattement de la nappe causée par l'évaporation est estimée en moyenne à 10%, pour une conductivité hydraulique de 250 cm/j elle est estimée en moyenne à 33% et pour une conductivité hydraulique de 10 cm/j, elle est estimée en moyenne à 80%. Nous pouvons alors en déduire que, plus la conductivité hydraulique de l'aquifère est faible plus la part de rabattement de la nappe due à l'évaporation est importante (voir figure 17).

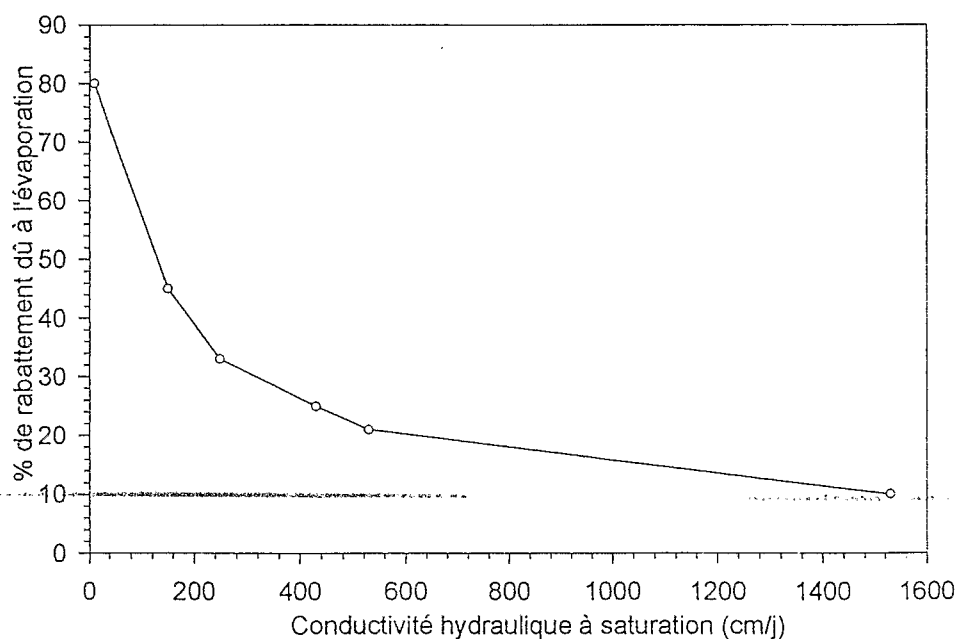


Figure 17 : Evolution du pourcentage de rabattement dû à l'évaporation

On notera que même si les pourcentages de rabattement causés par l'évaporation sont fluctuants dans le temps (7 jours, 1 mois ou 2 mois après arrêt de l'irrigation) pour la valeur de conductivité hydraulique de 250 cm/j, il n'en demeure pas moins qu'ils restent plus ou moins stables pour les deux valeurs de conductivité hydraulique extrêmes c'est-à-dire 10 cm/j où l'évaporation est dominante et 1530 cm/j où ce sont les écoulements latéraux qui dominent.

6. Influence de la présence d'arbres au niveau des périmètres irrigués

Nous avons utilisé une parcelle de 20 ha comme pour les exemples précédents avec cette fois-ci la présence d'arbres de type *Eucalyptus Globulus* dans le périmètre.

L'objectif principal de cette étude est de montrer l'influence de la plantation d'arbres sur le rabattement de la nappe à l'arrêt de l'irrigation et d'essayer de quantifier en terme de gains de temps, l'évolution du rabattement de la nappe avec ou sans arbres dans le périmètre.

Pour ce faire, nous avons considéré des *Eucalyptus Globulus* âgés de 3 ans et qui sont caractérisés par une extension latérale des racines de 5,12 m pour une profondeur racinaire de 2,12 m (Mathur et Rajagopal, 1986).

La densité de plantation des *Eucalyptus* en zone sèche est de 1100 pieds/hectare pour un écartement de 3 m x 3m (Tamba, 1993) ce qui correspond en moyenne à 33 arbres pour un transect de 100 m de longueur. Dans un souci de simplifier les calculs pour la modélisation, nous avons opté pour une densité des arbres de 625 pieds/hectare pour un écartement de 4 m x 4 m soit 25 arbres pour un transect de 100 m de longueur.

Ainsi, pour le transect considéré de 500 m et qui représente la longueur du périmètre, nous avons un total de 125 arbres.

Pour les conductivités hydrauliques à saturation des sols nous avons utilisés une valeur de 1cm/j pour l'horizon de sol supérieur et 200 cm/j pour le sable aquifère. Cette valeur considérée pour l'aquifère est sensiblement égale à la moyenne des conductivités hydrauliques à saturation mesurées dans la région (voir paragraphe 5). Nous avons considéré une simple riziculture inondée avec une campagne qui dure 120 jours dont 80 jours d'irrigation effective. Les conditions initiales et aux limites sont les mêmes que précédemment (paragraphe 4 fig. 1).

Les résultats des simulations montrent comme prévu, un rabattement de la nappe beaucoup plus important lorsque nous avons des arbres dans le périmètre que lorsqu'il n'y en a pas (figures 18, 19 et 20). Dans les deux cas, le rabattement évolue de manière totalement différente et l'écart pour une même durée après arrêt de l'irrigation très important (figure 21). Une semaine après arrêt de l'irrigation, nous constatons que l'écart est estimé à 94 cm et 167 cm pour deux mois après arrêt de l'irrigation.

En matière de gain de temps ou de rapidité du rabattement on constate que le niveau de rabattement de 185 cm, qui est atteint deux mois après arrêt de l'irrigation lorsqu'il n'y a pas d'arbres dans le périmètre, est atteint en une semaine seulement en présence d'arbres dans le périmètres. Mieux encore, le rabattement de 232 cm atteint deux semaines après arrêt de l'irrigation, n'est même pas atteint trois mois après arrêt de l'irrigation lorsqu'il n'y a pas d'arbres dans le périmètre ; le rabattement atteint à ce moment étant de 206 cm.

Ceci témoigne alors de l'importance des prélèvements d'eau effectués par les arbres au niveau du périmètre irrigué. D'après ces résultats, il apparaît alors que les arbres peuvent jouer un rôle important dans la perspective d'une recherche pour la stabilisation de la nappe à une profondeur optimale pour qu'il n'y aient pas de remontées salines importantes pouvant compromettre le bon comportement des sols.

L'essai entrepris ensuite pour intégrer l'effet de la perméabilité de l'aquifère montre que plus l'aquifère est perméable moins l'influence du prélèvement des arbres sur le rabattement de la nappe est important (voir figure 21).

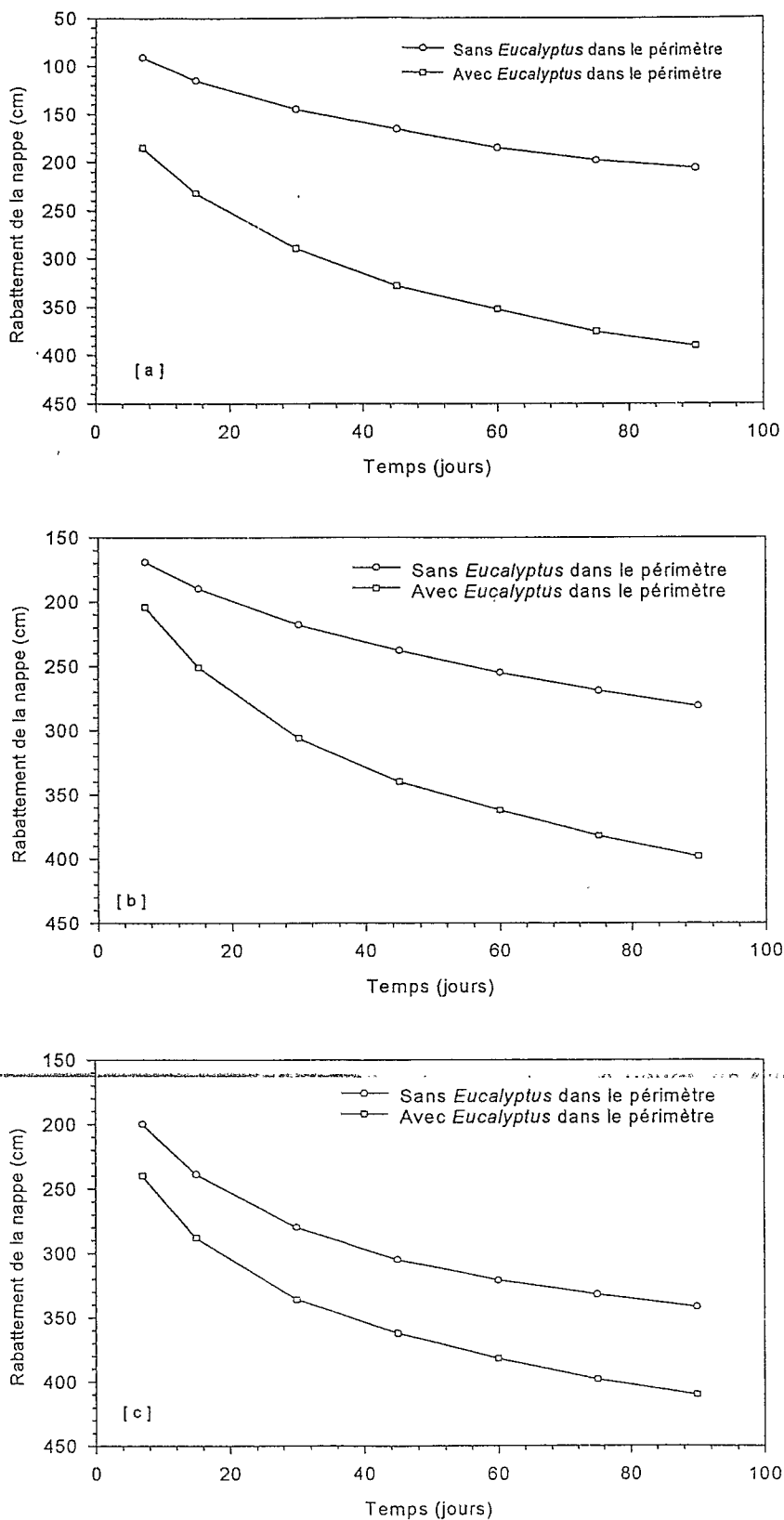


Figure 18 : Evolution comparée du rabattement de la nappe à l'arrêt de l'irrigation avec ou sans présence d'Eucalyptus dans le périmètre et pour différentes valeurs de perméabilité (K_s) pour l'aquifère : [a], $K_s=200$ cm/j, [b], $K_s=530$ cm/j et [c], $K_s=1530$ cm/j.

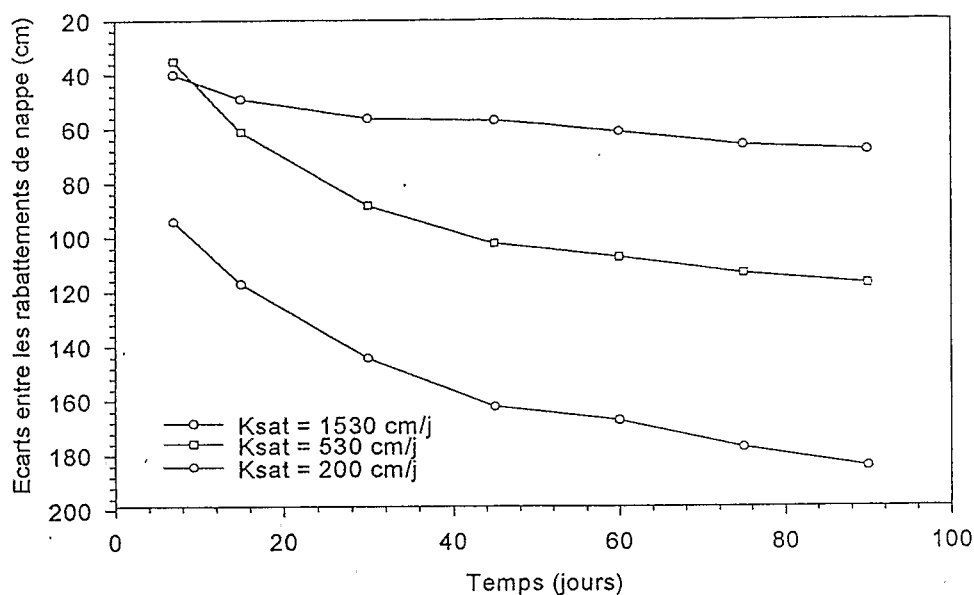


Figure 19 : Evolution dans le temps de l'écart des rabattements de la nappe avec ou sans présence d'Eucalyptus dans le périmètre.

7. Conclusion

Dans les aménagements hydro-agricoles sur des sols répondant aux caractéristiques d'un *fondé* (sol de Ouro Madiou), l'étude a révélé qu'à chaque campagne de culture la nappe affleure en surface. La remontée de la nappe dépend de la pratique culturale, des caractéristiques physiques des sols mais elle est indépendante de la taille du périmètre. La riziculture inondée sur du *fondé* entraîne donc inévitablement une remontée de la nappe. Pour garantir un retour plus facile de la nappe vers sa position initiale au terme de la période d'irrigation, et ainsi éviter un engorgement des sols durant toute la campagne agricole, il serait préférable de n'exploiter qu'une partie des surfaces aménagées (61% pour l'exemple de 20 ha étudié). Cette étude montre par ailleurs qu'il est pertinent de respecter une distance inter-périmètres irrigués dans la zone. Cette distance est estimée à 320 m au minimum afin d'éviter un engorgement constant des sols. Nous avons aussi mis en évidence et illustré à travers la figure 12, l'influence de la taille du périmètre sur le rabattement de la nappe à l'arrêt de l'irrigation.

En revanche, dans les sols de type *hollaldé* comme celui de *Donaye*, nous constatons qu'après cinq années de riziculture inondée (double culture), il est pratiquement impossible de faire remonter la nappe. Ceci démontre que pour ces types de sols, les risques *d'alcalinisation*, ne peuvent pas être écartés. En effet, de par la faible infiltration de l'eau dans le sol au moment de l'irrigation, la forte demande évaporatoire favorise la concentration de l'eau d'irrigation et contribue ainsi à l'accumulation de sels d'un faciès plus alcalin. L'analyse de l'influence de la conductivité hydraulique de l'aquifère sur le rabattement de la nappe a permis de montrer l'importance et le rôle des écoulements latéraux dans le rabattement de la nappe en relation directe avec la conductivité hydraulique de l'aquifère. On a ainsi pu montrer que la proximité d'un périmètre irrigué voisin ou d'un cours d'eau, ralentit fortement le rabattement de la nappe après la période d'irrigation. Nous avons également essayé de déterminer pour chaque type d'aquifère, la part du rabattement de la nappe dû à l'évaporation. Dans la dernière partie de l'étude, nous avons démontré le rôle que peuvent jouer certains arbres à fort pouvoir évapotranspiratoire, dans la lutte pour le maintien de la nappe à une profondeur raisonnable, pour éviter des remontées salines importantes.

Annexes

Tableau i : Exemple de paramètres hydrodynamiques d'un sol de type fondé(Ouro Madiou)

Matériaux	θ_r [%]	θ_s [%]	α [cm^{-1}]	n [-]	Ks [cm/j]
1	6,7	34,6	0,0025	1,93	6,0
2	2,2	30,6	0,007	1,58	126,0

Tableau ii : Exemple de paramètres hydrodynamiques d'un sol de type hollaldé (Donaye)

Matériaux	θ_r [%]	θ_s [%]	α [cm^{-1}]	n [-]	Ks [cm/j]
1	2	32,9	0,006	1,07	0,3
2	0,5	25,0	0,0115	1,54	237,6

Tableau iii : valeurs de rabattement de la nappe suivant la taille du périmètre étudié

Temps (jours)	Rabattement de la nappe (m) suivant la taille du périmètre				
	16 ha	20 ha	24 ha	28 ha	32 ha
1	0,70	0,60	0,60	0,60	0,60
10	1,35	1,26	1,25	1,22	1,22
30	1,92	1,88	1,85	1,81	1,81
50	2,35	2,25	2,20	2,16	2,16
70	2,62	2,56	2,50	2,46	2,46
90	2,90	2,80	2,75	2,71	2,71
120	3,25	3,12	3,08	3,04	3,04
150	3,49	3,40	3,32	3,29	3,29
180	3,69	3,60	3,55	3,50	3,50
210	3,82	3,76	3,72	3,69	3,69
240	4,00	3,90	3,89	3,84	3,83

Tableau iv : Valeurs de rabattement avec et sans arbres dans le périmètre

Temps (jours)	Rabattement (cm)		Ecart entre les rabattements (cm)
	Sans <i>Eucalyptus</i>	Avec <i>Eucalyptus</i>	
1	66	95	29
7	91	185	94
15	115	232	117
30	145	289	144
45	166	328	162
60	185	352	167
75	198	375	177
90	206	390	184

Bibliographie

Boivin P., 1995 : La dégradation des terres irriguées dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal : Mécanismes, état et modes de caractérisation, Atelier international ADRAO sur le riz irrigué au Sahel, Ndiaye (Sénégal), Avril 1995. 15p.

Boivin P., 1993 : La dégradation des terres irriguées dans la vallée du fleuve Sénégal, Atelier SCOPE, Dakar, Novembre 1993. 9p.

Diaw E. B. (1996) : Modélisation du transfert d'eau en milieux poreux non saturés : Application à l'étude de la recharge des nappes d'eaux souterraines en région soudano-sahélienne. Thèse de l'Université Louis Pasteur, Institut de Mécanique des fluides, Strasbourg, France, 239 pages + annexes.

Dupriez H. et De leener Ph., 1990 : Les chemins de l'eau : ruissellement, irrigation, drainage; Manuel tropical. Terres et vie, CTA, l'harmattan, enda ISBN 2-87105-009-X, 380p.

Hecq J. et Dugauquier F., 1990 : Périmètre irrigué villageois de Guia au Sénégal, in : Périmètres irrigués villageois en Afrique Sahélienne, Centre technique de coopération agricole et rurale, Wageningen, 26p.

Laval F., 1996 : Caractérisation hydrodynamique des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal. Région de Podor, NDiaye. Méthode du Slug test, ORSTOM-Dakar, 21p et annexes.

Loyer J.Y., 1989 : Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal : caractérisation, distribution et évolution sous culture. Edition de l'ORSTOM, collection Etudes et Thèse Paris, 137p.

Mané L., Boivin P., et Seguis L., 1995 : Etat de surface des sols non cultivés dans la cuvette de Niangua : description, radiométrie de terrain et imagerie Spot. in "Nianga laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du fleuve Sénégal". ORSTOM-édition, 561p.

Marsily G. de, 1981 : Hydrogéologie quantitative, Collection Sciences de la terre, Masson, Paris, 215p.

Mualem Y., 1976 : A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12 : pp. 5135-522.

Richards L. A., 1931 : Capillary conduction of liquids in porous media, Physics 1, pp. 318-333.

Van Genuchten, M., Th. 1980 : A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp. 892 -898.

Vauclin M., 1982 : Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. Les colloques de l'INRA ; 15 : 9-43.

Liste des figures

- Figure 1 : Domaine de simulation et conditions aux limites : transect simulé pour un PIV de 20 ha et de forme rectangulaire ayant 500 m de longueur et 400 m de largeur.
- Figure 2 : Position de la nappe à l'arrêt de l'irrigation [a]; et 8 mois après l'arrêt de l'irrigation [b], l'isovaleur de pression égale à 0 correspond au niveau supérieur de la nappe.
- Figure 3 : rabattement de la nappe dans le temps à l'arrêt de l'irrigation.
- Figure 4 : Evolution des différentes lames d'eau échangées à travers le périmètre pour une riziculture simple sur un fondé.
- Figure 5 : Evolution de la lame d'eau échangée à travers le périmètre en fonction de la perméabilité de l'horizon de sol supérieur.
- Figure 6 : Evolution de la pression à 1,70m de profondeur en fonction de la perméabilité de l'horizon de sol supérieur.
- Figure 7 : Position du niveau de la nappe 3 mois et demi après l'arrêt de l'irrigation : c'est la situation à la veille de la seconde culture.
- Figure 8 : Essai de simulation sur du sol de type hollaldé, le front d'humidité n'atteint pas la nappe.
- Figure 9 : Limite de l'extension latérale de l'influence des eaux d'irrigation sur le niveau de la nappe pour une riziculture sur du sol de type fondé.
- Figure 10 : Position de la nappe à l'arrêt de l'irrigation pour deux périmètres voisins dans lesquels nous avons une riziculture inondée, les périmètres étant irrigués en même temps.
- Figure 11 : position de la nappe 8 mois après arrêt de l'irrigation au niveau de deux périmètres voisins.
- Figure 12 : Evolution du rabattement de la nappe suivant la taille des périmètres.
- Figure 13 : Histogramme des valeurs de conductivité hydraulique.
- Figure 14 : Nuage de points univarié.
- Figure 15 : Evolution du rabattement de la nappe avec la conductivité hydraulique de l'aquifère : [a] 7 jours ; [b] ; 1 mois et [c] ; 2 mois après arrêt de l'irrigation.
- Figure 16 : Evolution du rabattement non influencé de la nappe avec la conductivité hydraulique de l'aquifère : [a] 7 jours ; [b] ; 1 mois et [c] ; 2 mois après arrêt de l'irrigation.
- Figure 17 : Evolution du pourcentage de rabattement dû à l'évaporation.
- Figure 18 : Evolution comparée du rabattement de la nappe à l'arrêt de l'irrigation avec ou sans présence d'Eucalyptus dans le périmètre et pour différentes valeurs de perméabilité (K_s) pour l'aquifère : [a], $K_s = 200$ cm/j, [b], $K_s = 530$ cm/j et [c], $K_s = 1530$ cm/j.
- Figure 19 : Evolution dans le temps de l'écart des rabattements de la nappe avec ou sans présence d'Eucalyptus dans le périmètre.