

20

pour Patrick
26.06.97

90129

République du Sénégal
Ministère de l'Agriculture

Société Nationale d'Aménagement et
 d'Exploitation des terres du Delta du fleuve
 Sénégal et des vallées du fleuve Sénégal et de la
 Falémé

S.A.E.D.

Opération Recherche - Développement 1996-1997

Financement : 5^{ème} Fonds Européen de Développement

Objet : Opération de recherche - développement pour l'amélioration de la
 production rizicole et la préservation de la ressource en sols

Rapport Final

Juin 1997

ORSTOM

L'Institut Français de Recherche
Scientifique pour le Développement en
Coopération

ISRA

Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
Centre de Saint-Louis

Fonds Documentaire ORSTOM



010016459

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : Ax16459 Ex :

Rapport de synthèse

Les travaux présentés dans ce rapport ont été réalisés entre Avril 1996 et Avril 1997. Ils portent sur trois volets : irrigation et dégradation de l'environnement, mécanisation, économie. Les deux premiers volets font suite à des recherches antérieures.

Une courte synthèse des résultats est présentée ci-après, puis chaque volet est présenté séparément, en rappelant les résultats antérieurs si nécessaire. Enfin, des rapports détaillés des travaux conduits sont présentés en annexes.

Au plan environnemental, on montre par le suivi de sites et la modélisation que les nappes superficielles peuvent jouer un rôle de drain de bonne qualité dans la moyenne vallée. A condition que leur écoulement reste libre et que la densité des aménagements respecte une limite d'encombrement spatial. Ces points doivent être mieux précisés dans le futur. L'introduction d'arbres (brise-vents) améliore sensiblement le rabattement des nappes. Cela étant, la modélisation prévoit une évolution géochimique en voie saline neutre dans la plupart des cas de figure, mais est partiellement contredite par l'expérimentation. Il faudra lever cette indétermination, en mesurant plus précisément les infiltrations réelles au champ qui semblent être inférieures pendant la culture que les mesures obtenues par ailleurs (infiltromètre à membrane, perméamètre à charge variable), en améliorant les modèles, et en procédant à une analyse géochimique plus fine de l'évolution de la solution du sol en cours de culture.

La salinité marine fossile qui affecte les périmètres irrigués (particulièrement le maraîchage) est répartie en bandes allongées, soit au centre des cuvettes, soit longeant d'anciens bourrelets de berge visibles sur photos aérienne. Il n'y a toutefois pas d'autre critère pour la localiser avec précision que de procéder à une cartographie par conductivimétrie électromagnétique. Les aquifères peuvent être caractérisés de façon satisfaisante à l'aide de sondages électriques. Ces deux méthodes combinées sont donc vivement recommandées en préalable à un aménagement.

Les argiles et les sols sont très sensibles aux solutions salines, au contact desquels ils se déstabilisent facilement. Les tests appliqués devront être généralisés (dispersion des argiles) ou complétés et améliorés (évolution structurale du sol).

Dans le cadre du **volet mécanisation**, deux aspects ont été abordés : l'étude des effets de travail du sol sur l'implantation de la culture du riz dans la vallée, et des essais et évaluation de matériels agricoles alternatifs à la grosse motorisation : cas du combiné stripper/batteuse et de la charrue polyvalente à traction animale. Le travail du sol n'ameublisse le sol que sur une faible profondeur, il détériore le planage et assure une mauvaise préparation du lit de semences. Le test d'une charrue de soulèvement de l'arachide s'est révélé positif, des améliorations sont proposées. Les performances du Stripper sont bonnes comparées à celles d'une moissonneuse batteuse, avec un rapport coût performance de l'ordre de 4. Toutefois des améliorations techniques sont nécessaires. La batteuse a donné entière satisfaction.

L'**approche économique** de l'agriculture irriguée dans le département de Podor exige une double entrée : les « unités économiques » et les organisations paysannes. Comprendre le fonctionnement de cette agriculture irriguée ne permet pas de se cantonner au cadre confortable de l'aménagement hydro-agricole, mais implique de la resituer dans les « économies familiales », où elle coexiste avec les autres activités et les cultures pluviales et de décrue. Sur le terrain, les investigations interdisent toute précipitation, un subtil brouillage verbal ralentissant une collecte sérieuse des informations : contours flous des « unités économiques », falsification des surfaces irriguées, construction virtuelle d'une exploitation des périmètres irrigués.

Les résultats dans quatre villages caractéristiques, mettent en évidence la faible taille des « unités économiques » et une diminution de la culture irriguée. Le fort endettement des groupements d'intérêt économique (GIE) mène à une impasse : en bloquant l'accès au crédit, il grippe progressivement le processus productif, les agriculteurs ne pouvant plus cultiver pour rembourser leurs dettes. Les gestions, financière et technique, des GIE expliquent en partie cette situation alarmante.

Le renouveau des cultures de décrue se montre de courte durée. Toutefois, il prouve l'adaptation rapide des populations de la Vallée et leur intérêt pour cette pratique culturale. Il leur permet aussi de confirmer leurs droits fonciers. Les cultures de décrue peuvent influencer sur l'agriculture irriguée. Mais d'autres facteurs se conjugent pour provoquer son recul dans l'ensemble du département. Le fléchissement de l'intensité culturale révèle une diminution des performances de l'agriculture irriguée. Dans ce contexte, parler d'intensification, de rentabilité ou d'auto suffisance alimentaire représente une gageure. Une relance de l'agriculture irriguée s'avère indispensable. Un assouplissement des conditions d'octroi des prêts, sans effacement de la dette, constitue une des mesures à prendre.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES CULTURES IRRIGUEES.

Le programme de travail 1996 - 1997 comportait des essais de modélisation et des expérimentations.

Les modélisations ont été appliquées à la dynamique des nappes sous irrigation d'une part, et aux transferts de sels dans les profils de sol sous culture d'autre part.

Les expérimentations ont porté sur trois points :

- caractérisation physique des sols
- réaction des argiles du sol et de sa structure au contact de solutions salines
- poursuite de bilans hydro-salins sous culture
- étude de la structure des aquifères à l'aide de méthodes de prospection électrique
- étude de la répartition de la salinité dans les sols non aménagés (secteur Ngalenka).

Modélisation de la dynamique des nappes sous irrigation.

Un modèle permettant de simuler l'infiltration et la recharge des nappes sous culture en deux dimensions a été écrit, en collaboration avec un laboratoire CNRS de Strasbourg (Diaw, 1996). L'application de ce modèle a été validée dans le cas des périmètres de Donaye IT1 (riziculture simple et double) et de Ouro Madiou (oignons - tomates), par confrontations aux données expérimentales obtenues les années précédentes.

Puis le modèle a été employé à des simulations exploratoires. Il s'agissait de simuler l'impact de la taille du périmètre sur la recharge des nappes, l'impact du système de culture (double ou simple riziculture), l'effet de l'introduction d'arbres. Ces différentes études figurent en annexe. On retiendra :

- La mise en évidence d'un effet cumulatif sur la recharge des nappes, lorsqu'un périmètre s'agrandit ou lorsque des périmètres sont trop proches les uns des autres, pouvant entraîner un engorgement. Les résultats obtenus ne permettent pas encore de donner des dimensions critiques, mais attirent l'attention sur ce point. En effet, dans la majorité des cas, il semble que l'aquifère superficiel puisse jouer le rôle de drain. Cela suppose néanmoins qu'aucune barrière ne soit rencontrée, et que les surfaces mises en eau soient limitées.
- Un effet cumulatif de la double riziculture par rapport à la simple qui semble faible, vu les temps de rabattement des nappes relativement courts, à condition qu'il n'y ait pas de restriction à l'écoulement de l'aquifère. Cette condition est généralement satisfaite en bordure du fleuve.
- Un effet significatif de brises vents de type eucalyptus sur le rabattement des nappes et donc la durée d'évaporation de l'eau de la nappe lorsqu'elle affleure.

La nappe semble donc pouvoir jouer efficacement un rôle de drain. Nous proposons de terminer ce volet dans une prochaine campagne, en affinant le modèle et en montrant quels sont les cas de figure où un engorgement peut malgré tout se produire.

Modélisation de l'évolution du profil salin de différents types de sols soumis à simple ou double riziculture sur de longues durées.

Avant de rendre compte de cette étude, dont le détail figure en annexe, il faut avertir clairement le lecteur. Aucun modèle de transfert salin dans un profil de sol n'est en mesure de donner des résultats considérés comme exacts, sur ce type de sols. Les résultats présentés ci-après sont obtenus à l'aide du logiciel LEACHM (Cornell University), réputé l'un des meilleurs. Néanmoins, ils n'ont qu'une valeur indicative, comme nous le discuterons ci-après.

Les simulations ont pris en compte deux cas de figure :

- Un sol salé du delta (station ADRAO de Ndiaye)
- Un hollaldé moyennement argileux de la moyenne vallée (Fanaye)

Dans les deux cas, on note une tendance à la salinisation sur le long terme si la nappe n'est pas contrôlée. Cette tendance est plus forte dans le delta. Dans ce cas, il faudrait rabattre la nappe à au moins deux mètres de profondeur pour éviter une salinisation. Dans le cas du sol de Fanaye, bien que les perméabilités soient plus faibles, les risques semblent moindres en raison de la profondeur actuelle de la nappe.

Nous rejoignons les conclusions de Ceupens, Wopereis et Miézan (1997) pour dire que la double riziculture permet d'éviter la salinisation, relativement à la simple riziculture, et tant que l'écoulement de la nappe est libre. Ce dernier point est toutefois rarement assuré dans le delta.

Selon les qualités de l'eau d'irrigation, qui fluctuent, un risque d'alcalinisation apparaît à Fanaye, mais ne se confirme pas à long terme. En effet l'absence de nappe favorisant le drainage vers la profondeur, la concentration des sels en surface est limitée, pour les conditions hydrodynamiques actuelles. Il a été montré que la présence d'une nappe ou une diminution de la conductivité hydraulique favorisent le phénomène de concentration de l'eau d'irrigation en surface. Dans ce cas le modèle prédit que les sels rejoignent la voie saline neutre, et non la voie alcaline.

Ce dernier point est délicat. Ces simulations montrent en effet qu'en cas d'intervention du magnésium (présent en abondance dans ces sols et en quantité raisonnable dans l'eau d'irrigation) dans les équilibres géochimiques, le danger d'alcalinisation serait écarté et seule la voie saline neutre serait à craindre.

Or les résultats obtenus à ce jour au laboratoire et sur le terrain (bougies poreuses) suggèrent que ce contrôle par le magnésium n'intervient pas, et des évolutions salines vers la voie alcaline sont enregistrées, comme nous l'avons signalé dans nos rapports précédents.

Nous proposons sur les deux prochaines campagnes une expérimentation qui doit permettre de trancher cette question.

Caractérisation physique des sols

La connaissance des paramètres physiques des sols est primordiale pour pouvoir quantifier explicitement les transferts d'eau et de sels. En particulier, la connaissance de la conductivité hydraulique à saturation (K_s) des sols est déterminante car elle permet de quantifier la facilité avec laquelle un sol laisse s'écouler l'eau à travers son réseau poreux. C'est un paramètre très difficile à mesurer précisément car il est très étroitement dépendant de la texture et de la structure du sol (donc de son réseau poreux), qui elles présentent souvent une forte variabilité. La mesure de conductivité hydraulique peut être réalisée soit au laboratoire sur de petites éprouvettes de sol, censées être représentatives du site étudié, ou alors directement sur le terrain.

Nous avons choisi de mesurer la conductivité hydraulique sur le terrain à l'aide d'un infiltromètre à membrane. Cette technique présente l'avantage de pouvoir réaliser des infiltrations avec de l'eau sous succion permettant d'éviter les écoulements préférentiels dans les fentes ou dans les macropores biologiques.

Ces mesures ont été réalisées dans différents sites de la région de Podor ainsi que sur 2 sites expérimentaux de l'ADRAO, à N'Diaye et Fanaye et sur un site de la bordure occidentale du lac de Guiers (Nder). Les résultats présentés dans le tableau 1 montrent une grande variabilité entre les différents types de sols mais également au sein d'un même type de sol. Pour les sols argileux on trouve des écarts de plus de 2 ordres de grandeur (0.01 à 2.5 cm/h). Néanmoins il apparaît un classement de la conductivité hydraulique en fonction du type de sol, en particulier la teneur en argile semble être un paramètre déterminant (Tableau I).

Tableau 1. Granulométrie et valeurs de conductivité hydraulique à saturation pour les horizons superficiels.
L.F. : limons fins ; L.G. : limons grossiers ; S.F. : sables fins ; S.G. : sables grossiers.

	TYPE DE SOL	argiles	L.F.	L.G.	S.F.	S.G.	K_s (cm/h)
Ouro Madiou	sol sablo-limoneux	9.49	4.44	21.62	63.94	0.51	2.2
Donaye	sol argileux	59.7	15.1	14.1	12.8	0.5	0.2
Fanaye	sol argileux	48.9	17	20.4	9.5	4.4	1.02 - 2.5
N'Diaye	sol argileux	39.7	21.8	13	21.5	3.9	0.84 - 2.24
M'Boyo	sol argileux	65.1	17.4	10.7	6.5	0.2	0.01 - 0.16
Fondeas	sol limoneux						1.44
Nder	sol sableux						8.7 - 14

Réaction des argiles et de la structure du sol au contact de solutions salines.

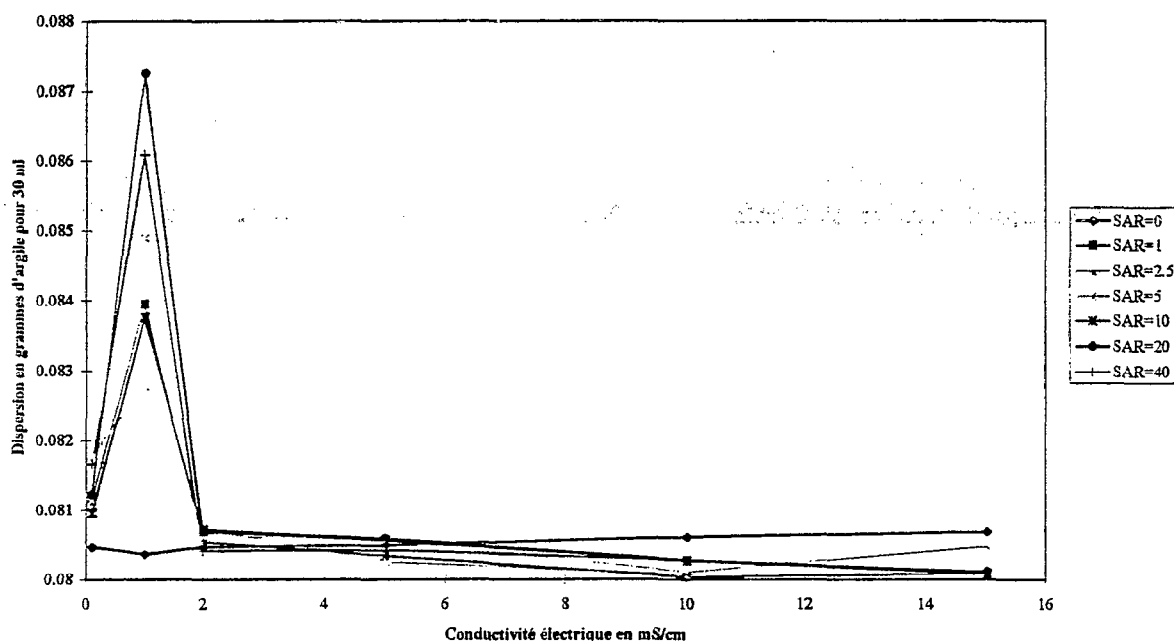
La conséquence d'une irrigation sans drainage est la salinisation. Cette salinisation aura notamment un effet sur la structure du sol, effet d'autant plus important que la solution saline obtenue sera riche en sodium relativement au calcium et au magnésium. Cette caractéristique est exprimée par le SAR (Sodium Adsorption Ratio). Un SAR faible correspond à une eau non sodique. Un SAR élevé correspond à une eau où le sodium est le cation dominant. Un SAR élevé provoque une dispersion des argiles, d'autant plus que la conductivité électrique de la solution est faible, et que les argiles seront fragiles : c'est ce qui est analysé en premier point. Cette dispersion des argiles provoque l'effondrement de la structure du sol : ce que nous avons testé en second point.

• Argiles

Des argiles prélevées dans différents types de sol de la vallée du Fleuve ont été soumises à des tests de dispersion selon un protocole déjà employé en de nombreuses situations de sols salés.

Il s'agit d'identifier la susceptibilité des argiles à la dispersion au contact de solutions salines plus ou moins concentrées et riches en sodium. Pour cela, un test standard a été appliqué. La figure ci-dessous illustre les résultats généralement obtenus. Il s'agit d'une argile de la station ADRAO de Ndiaye. On constate qu'à partir d'une conductivité électrique de 2 mS/cm, presque toutes les solutions sont dispersantes. Ceci illustre la grande sensibilité à la dégradation chimique des argiles des sols de la vallée. A SAR=0, il n'y a pas de dispersion. En revanche, même si un léger effet du SAR est discernable, tous les autres SAR sont dispersants. Les eaux d'irrigation et de submersion observées sur le terrain ont des SAR compris entre 0 et 5 : les risques de dispersion des argiles sont réels.

Disp z=50



Nous proposons de caractériser plus finement cette dispersion, à partir d'un nouveau test (test de floculation), appliqué systématiquement en criblage aux sols de la vallée, dans la gamme de sensibilité des argiles (conductivités électriques de 2mS/cm et moins).

• Structure du sol

Le détail de cette expérimentation figure en annexe 3 (rapport L. Meyer).

On a essayé de mesurer la chute de perméabilité des sols au contact de solutions salines.

Ceci est habituellement réalisé au laboratoire, sur échantillons remaniés et mélangés à du sable. En conséquence, on obtient des tests non représentatifs du fonctionnement in situ. Nous avons donc expérimenté in situ, avec une méthode nouvelle.

On montre une relative chute de conductivité hydraulique des sols dès que le SAR s'élève (1 et plus) pour les sols de Fondé. Cependant, ce test nouveau demande à être perfectionné, et comparé aux méthodes classiques de laboratoire, ce que nous proposons de faire en 1998.

Poursuite de bilans hydro-salins sous culture

En raison des échecs des campagnes, seul le site de Donaye a fait l'objet d'un suivi complet. Il confirme les résultats déjà acquis : très faible infiltration et évolution de la solution du sol vers le type carbonaté sodique laissant craindre une évolution alcalinisante. Les eaux ont acquis des propriétés dispersantes si on les replace dans le cadre des expérimentations de laboratoire ci-dessus. Il y a donc contradiction entre les simulations et les constatations expérimentales. La simulation aurait tendance à écarter les risques d'alcalinisation, mais l'évolution du sol in situ montre au contraire une évolution sur la voie alcaline.

Nous avons placé du sol au contact d'eau du fleuve soumis à forte évaporation, au laboratoire, depuis deux ans et demi, donc concentrée environ 100 fois. Dans ce cas encore, les modèles géochimiques sous-estiment l'évolution réelle, nettement alcaline. Après l'équivalent de 600 jours d'irrigation, l'eau au contact du sol a atteint un pH de 9.

Il est donc clair que les suivis in situ doivent être reconduits, tandis qu'on cherchera à améliorer les modèles existants (proposition de recherche - développement 1998).

Etude de la structure des aquifères à l'aide de méthodes de prospection électrique

L'un des problèmes posés lors de l'implantation de nouveaux périmètres est de connaître la configuration des aquifères superficiels : sont-ils profonds ou peu profonds, salés ou non, ont-ils des possibilités d'écoulement latéral. Or réaliser des campagnes de sondages est très coûteux. Ce travail visait donc à tester différentes méthodes permettant de connaître la structure du substrat à partir de mesures de surface.

Réalisé sur le secteur en voie d'aménagement du Ngalenka, il a permis de montrer l'apport des sondages électriques de surface, méthode empruntée à la géophysique. Cette méthode semble généralisable à la région pour apprécier la structure du substrat en liaison avec les aquifères superficiels. Le détail des résultats est joint en annexe 4 (rapport A. Zanolin).

Etude de la répartition de la salinité dans les sols non aménagés (secteur Ngalenka).

La salinité fossile, d'origine marine, ne se trouve pas seulement au niveau des aquifères. On la rencontre dans le sol, généralement à partir de 1m, sous forme de sels précipités. Sa localisation est délicate, car elle semble répartie en bandes peu larges et très concentrées. Il est très important pour l'implantation de futurs périmètres de la localiser. Nous avons montré que la méthode la plus appropriée pour la cartographier est la conductivimétrie électromagnétique, qui permet de faire un grand nombre de mesures en peu de temps et à faible coût.

Cette étude, également réalisée sur le site des futurs aménagements du Ngalenka, a pour but de cartographier sur une grande surface la salinité des sols non aménagés, et de rechercher des critères d'organisation de la salinité dans les paysages. On cherche ainsi à faciliter le choix de sites aménageables dans le futur.

On conclue qu'une cartographie de la salinité par conductivimétrie électromagnétique à partir d'un maillage carré de 70m de côté semble indispensable pour cartographier la salinité. Toutefois, l'ensemble des travaux réalisés au laboratoire suggèrent une répartition de la salinité liée à la présence d'anciens bourrelets de berge et de reliefs au niveau du sable nouakchottien. Il est donc intéressant de poursuivre cette recherche afin de préciser la répartition de sels et leur éventuelle mobilité dans le paysage, tant en milieu naturel qu'aménagé.

Le détail de ce travail est fourni en annexe 5 (rapport S. Cunnac).

GESTION DE LA MECANISATION

Deux activités ont pu être menées au cours de cette année :

- 1) Etude des effets de travail du sol sur l'implantation de la culture du riz dans la vallée
- 2) Essais et évaluation de matériels agricoles alternatifs à la grosse motorisation : cas du combiné stripper/batteuse et de la charrue polyvalente à traction animale.

Ces activités ont la particularité d'être toutes menées en équipes pluridisciplinaires : en collaboration avec l'agronome système de l'ORSTOM pour la première, la deuxième a vu la participation de l'ADRAO (agronomie et économie), la SAED (machinisme) et d'autres chercheurs de l'ISRA (socio-économie) et le test de la charrue a été conjointement mené avec l'agronome diversification du CIRAD détaché à l'ISRA avec la collaboration de la SAED et du PNVA dans le cadre de l'introduction de la fleur 11 dans les systèmes irrigués du Fleuve.

Mis à part les tests de matériels agricoles qui touchent à la fois le delta et la moyenne vallée, toutes les autres activités sont menées dans la délégation SAED/Podor en particulier dans le secteur de Nianga. Cependant, le transfert de leurs résultats pour le reste de la vallée et du delta ne devrait poser aucun problème.

I. ETUDE DES EFFETS DU TRAVAIL DU SOL SUR L'IMPLANTATION DU RIZ

L'étude se propose d'examiner deux aspects principaux : l'un concerne l'effet du travail du sol sur l'état de surface (le nivellement des parcelles) qui influence directement la gestion de l'eau et des sols, l'autre a trait à la vitesse et l'homogénéité de levée, qui sont les deux principaux facteurs de réussite de l'implantation de la culture, laquelle est capitale dans l'élaboration du rendement. Conformément aux conclusions du rapport annuel de 1995, nous avons poursuivi l'étude en parcelles paysannes, en station et au laboratoire (voir pour ce dernier cas le volet 2). Avec le retard accusé dans le démarrage de la campagne hivernale 1996 par les producteurs (le 20 Août certains producteurs n'avaient pas encore accès aux tracteurs pour effectuer le travail du sol), seule l'étude en station a pu être conduite jusqu'au bout. Le manque d'intrants et la panne de GMP des producteurs de Diatar n'ont pas permis de mener jusqu'au bout le travail démarré sur ces parcelles identifiées en rapport avec l'UJAK et la SAED (levés topographiques avant et après travail du sol).

Pour une meilleure maîtrise des paramètres étudiés et pour éviter les aléas des études en parcelles paysannes, nous avons mené des essais à la station de Fanaye.

1.2. Rappel des objectifs et résultats attendus :

Deux objectifs majeurs sont visés :

- . connaître l'effet du travail du sol sur le nivellement à l'échelle de la parcelle.
- . connaître l'effet de la variabilité du micro relief induit par le passage des machines sur la dynamique de levée du riz : vitesse et homogénéité de levée.

1.3. Dispositif et Méthodes :

L'évaluation des conséquences du travail du sol sur l'installation de la culture s'appuie sur des levés topographiques avant et après travail du sol, une caractérisation du travail du sol réalisé et des comptages de levée.

1.4. Résultats et discussions

I.4.1. Effets sur le nivellement

Avec les lames niveleuses actuellement utilisées dans la vallée on peut obtenir un planage relativement correct et précis : une pente de 3,5/1000. Avec la lame niveleuse guidée par rayon laser on doit pouvoir obtenir un nivellement parfait.

Il est observé une augmentation des cotes (augmentation assez homogène, moyenne de 4,5 cm des altitudes de la parcelle) suite à la mise en eau après planage. Cette augmentation des cotes étaient prévisibles compte tenu de la nature gonflante des argiles.

L'examen des cartes établies sur logiciel WINDSURF à partir des données recueillies par levés topographiques sur un maillage de 3 m x 3 m avant et après travail du sol donne les résultats suivants :

- une carte après travail du sol différente de la carte dressée avant, des courbes de niveau beaucoup plus rapprochées traduisant une répartition plus hétérogène des cotes après travail du sol.
- l'analyse fine des courbes d'isovaleur montre une modification aléatoire de la topographie : il y a des remblais et des déblais. Il faudra nécessairement répéter l'étude pour voir l'effet à long terme. Il s'agit de voir s'il y a une structure du processus de dégradation qui se forme.
- les différences de cote avant et après travail du sol peuvent atteindre 24 cm de dénivelé (18 à Nianga et 24 à Fanaye). Il y a plus de creux après travail du sol qu'avant travail du sol. Si cette tendance se maintient (travail avec les mêmes outils), il sera difficile de maintenir une lame d'eau favorable à la levée ou d'assurer un drainage correct. A titre d'exemple dans la parcelle de Nianga si un point A est à l'étiage (9 cm) un autre point B (- 9 cm) peut être sous l'eau c'est à dire capable de recevoir des semis. C'est ce qui explique entre autre la stratification des stades des cultures et sa répercussion sur le cycle, la récolte et même la qualité du paddy. La détérioration du nivellement est de ce fait un facteur de baisse de rendement et participe à la détérioration de la qualité du paddy. Le paysan est obligé de corriger au râteau pendant la mise en eau. Le morcellement des parcelles observé en est une résultante. Cette détérioration est d'autant plus grande quand le précédent cultural est un labour. Le tableau 1 qui suit donne un exemple d'évolution de l'état de surface d'une parcelle pré - irriguée qui a reçu un passage de Grader pour le nivellement.

Tableau 1 : Evolution moyenne de l'état de surface après trois traitements

	altitude moyenne	altitude maximale	altitude minimale	écart type
Après grader	126.9	133.5	116	3.182
après mise en eau	131.4	137	120	3.023
après travail du sol	131.8	142.5	118.5	4.268

Ce tableau montre qu'après planage, il subsiste un écart maximal d'altitude de 17,5 cm et après travail du sol cette différence maximale d'altitude est de 24 cm, ce qui montre une accentuation du dénivellement suite à l'intervention de l'outil de travail du sol.

1.4.2. La qualité du travail du sol

L'analyse porte sur des parcelles offsettées avec un seul passage comme décrit plus haut. Le travail a été effectué à sec dans les parcelles de Diatar, Guia, Ouromadiou et de la station Fanaye.

La qualité du travail du sol a été apprécié à travers ses objectifs (ameublissement du sol, amélioration de la structure du sol, enfouissement des résidus, etc) et les critères retenus suivants : l'homogénéité, la profondeur, la proportion et la répartition de la taille des mottes, la hauteur de la lame d'eau après irrigation.

Résultats par rapport aux objectifs d'un travail du sol

Les résultats montrent que le travail du sol tel qu'il est effectué ameublisse une faible couche du sol (3-7 cm). Il n'y a pas d'enfouissement des résidus. Par conséquent, il ne permet pas une amélioration véritable de la structure du sol.

Les conséquences négatives d'un mauvais travail du sol sont par contre observées :

- il détériore le planage qui coûte cher, provoquant ainsi une variabilité de la hauteur de la lame d'eau pouvant atteindre 24 cm,
- difficultés de conduite de l'eau : drainage, engorgement, gaspillage d'eau, hétérogénéité de levée.

Les résultats des enquêtes menées à Nianga montrent que les producteurs n'ont pas de référentiel en matière de travail du sol. Ils déplorent la qualité des prestations reçues mais l'expérience de terrain montre qu'on ne rencontre jamais un producteur qui assiste au travail de sa parcelle pour donner des observations quant à la qualité. La qualité du travail du sol ne constitue non plus un souci chez les prestataires.

Homogénéité

Le critère d'homogénéité est pertinent à cause de son influence sur les levées donc sur la croissance de la culture. L'examen du calibre et du dénombrement des mottes au niveau des placettes donnent les résultats suivants :

- la représentation des différentes classes de calibre de motte est délocalisée c'est à dire que les classes 5-10 et 10-20 cm ne sont pas en pourcentages constants dans les placettes encore moins les classes extrêmes < 5 cm et > 20 cm qui, elles, sont même indépendantes de la place qu'occupe la placette dans la parcelle. Cela indique donc une hétérogénéité confirmée dans l'ensemble des observations. Cette hétérogénéité est liée à la vitesse d'avancement de l'outil, de la profondeur de travail, et à l'humidité du sol.
- au niveau des fourrières l'émiettement exagéré est prouvé par la forte présence de la classe < 5 cm : 84 % et 94 % dans les fourrières 1 et 2 de la parcelle 2 du casier, mais aussi par la faible représentation des classes médianes.

Profondeur du travail

La profondeur de travail détermine l'épaisseur de l'horizon ameubli donc une possibilité de croissance racinaire rapide dans cette tranche mais aussi joue sur la macroporosité en donnant un volume d'air plus important. Aussi un travail du sol peu profond peut permettre l'installation d'une semelle très proche constituant un obstacle au développement racinaire. C'est pourquoi, il a été retenu comme critère de qualité pour le travail effectué en rapport avec l'horizon optimal pour le développement racinaire du riz : horizon 0-20 cm où se développe 90 % des racines (cf. : le riz CNAPTI). Malheureusement, comme nous l'avons souligné plus haut, l'offsetage généralement effectué par les entreprises de prestations de services mécanisés constitue un simple grattage. Il n'ameublisse pas plus de 3 cm de couche, par conséquent cette façon de travail du sol n'améliore pas le profil cultural ou d'une préparation d'un lit de semis. Par contre on observe les principaux effets négatifs d'un mauvais emploi des machines : dégradation des diguettes, détérioration du planage, obstacles mécaniques à la levée constitués par les grosses motte, difficultés d'ancrage des plantules, etc. Il s'en suit des conséquences secondaires :

- on note une hétérogénéité de levée (densité de levée peut varier entre 0 et 44 pieds par m²)
- des zones d'engorgement succèdent avec des zones exondées dont les conséquences peuvent aller jusqu'à favoriser une salinisation
- la maîtrise des adventices devient plus difficile
- les oiseaux attaquent facilement les semences laissées nues par l'ASSEC.

1.4.3. Effet sur la vitesse et l'homogénéité de levée

L'étude de la vitesse et de la densité de levée en rapport avec le microrelief montre une grande hétérogénéité de levée à l'échelle du m² comme annoncé ci-dessus (cf. carte en annexe). Cette hétérogénéité est liée en partie à la technique de semis à la volée.

La corrélation entre micro relief et levée est difficile à établir en raison des problèmes méthodologiques et des difficultés de mesures en conditions irriguées. Les études ultérieures nous permettront d'avoir des résultats plus exploitables avec la révision du protocole d'étude et l'utilisation d'outils plus précis mieux adaptés aux conditions d'étude.

1.5. Conclusion sur l'effet du travail du sol

En attendant les résultats des études en cours, nous pouvons dire que les résultats de cette deuxième campagne bien que préliminaires confirment ceux de l'année précédente. Le travail du sol tel qu'il est exécuté actuellement pour l'essentiel à l'offset produirait les effets suivants :

1. Il n'ameublisse le sol que sur une faible profondeur.

2. Il détériore le planage à des proportions difficiles à connaître dans le court terme. Les pratiques actuelles seraient incompatibles avec une agriculture durable. La détérioration du nivellement pourrait induire un morcellement du parcellaire suivant les courbes de niveau à l'image de ce qui s'est produit à Ndombo/Thiago où les parcelles ont été multipliées par 3 au bout de 10 années.

3. Le lit de semis est mal préparé avec des fourrières émietées et sensibles au tassement, une grande proportion de grosses mottes à l'intérieur de la parcelle occasionnant une lame d'eau peu uniforme. Ceci pourrait se traduire par un encrassement et un enracinement lent du riz prégermé par endroit ce qui donne une reprise lente, hétérogène et parfois des mortalités.

4. Le drainage est peu favorisé dans les zones de dépressions où il y a une stagnation d'eau favorable à une salinisation.

5. Elle occasionne beaucoup de travail de correction au râteau ou à la pelle exigeant en main d'oeuvre et en temps.

1.6. CONTRAINTES SUR LA GESTION DE LA MECANISATION

A défaut de démarrer le suivi sur la gestion de la mécanisation (motorisation et surtout culture attelée pendant la période de travail et durant la période creuse) par les organisations de producteurs, nous avons mené des enquêtes basées sur des questions ouvertes pour appréhender les difficultés que connaissent les producteurs de la moyenne vallée aval pour accéder aux machines de travail du sol et de récolte/battage. Le travail a abouti aux résultats suivants :

a - Le recours à la motorisation est perçu à raison par les producteurs comme l'un des moyens leur permettant d'accroître la productivité de leur travail, par conséquent d'intensifier la riziculture. L'emploi de machines agit entre autres sur deux facteurs clef pour l'intensification de la riziculture :

- La double culture annuelle par la rapidité d'intervention permettant le dégagement rapide d'une parcelle et l'installation de la culture suivante. L'intérêt de cette intervention rapide est plus marqué durant la récolte de la CSC et l'installation de la culture hivernale.
- L'augmentation des rendements par une bonne préparation du sol permettant ainsi à la culture d'exprimer son potentiel.

b - Pour intensifier la riziculture, les agriculteurs sont confrontés à plusieurs contraintes liées à la mécanisation. Parmi celles-ci on peut citer :

- **l'acquisition du matériel** : le coût des équipements a toujours pesé lourd dans le budget des producteurs même regroupés. La dévaluation récente du franc CFA a aggravé cette situation par le renchérissement des prix des machines importées et des pièces détachées. L'étude que nous avons menée sur l'augmentation des coûts d'acquisition des matériels suite à la dévaluation montre que le prix des tracteurs ont connu une augmentation de 79% et celui des moissonneuses-batteuses de 82%. Ainsi, la majeure partie des périmètres encadrés par le projet FED/AHA qui ont eu à abandonner la culture attelée espérant acquérir des tracteurs ou recourir à des prestataires de services mécanisés se sont vus confrontés à de nombreuses contraintes durant la campagne hivernale 1996. On a noté des retards considérables sur les façons culturales (après le 20 Août) faute de machines. Les tarifs des façons culturales sont généralisés à 20 000 fcfa/ha. Les prestataires en moissonnage - battage ont plafonné leur prix à 20% de la production, exigeant même dans certaines localités des paiements en espèce. On note un sous - équipement dans la zone qui se traduit par l'intervention de prestataires venant d'autres localités.
- **l'indisponibilité du matériel** : le parc sur place est insuffisant et les prestataires extérieurs ne viennent que quand il n'y a plus de travail dans leur zone contribuant ainsi au non respect du calendrier cultural avec toutes ses conséquences. Selon les producteurs, le problème est plus ressenti dans la zone pour le matériel de travail du sol. Cependant les récoltes tardives occasionnent d'énormes pertes que les populations considèrent comme un facteur important de baisse de rendement. La présence de moissonneuses-batteuses venant de Saint-Louis et les meules sous la pluie que nous avons constaté lors de la visite de terrain (Aéré Lao, Djimandou, Ndioum, etc) attestent bien cela.
- **la mauvaise qualité du travail du sol** : La qualité médiocre du travail du sol est déplorée par tous les producteurs interrogés. Il s'agit d'un simple grattage du sol. Les tractoristes n'ont reçu aucune formation sur l'analyse de la qualité du travail réalisé ou à réaliser n'ont pas de référentiels de qualité sur le travail qu'ils effectuent. La faiblesse des moyens financiers des producteurs est l'une des raisons aussi évoquées pour justifier la non diversification des techniques de travail du sol.

Plusieurs raisons nous ont poussé à analyser la mécanisation sous l'angle des producteurs et sous celui des entreprises de travaux mécanisés :

- les prix pratiqués par les prestataires après dévaluation sont jugés élevés par les producteurs malgré leur mauvaise qualité ;
- les difficultés aiguës d'accès aux machines dans la moyenne vallée liée à un vieillissement et à une réduction du parc sont observées cette campagne aussi bien pour le travail du sol que pour la récolte/battage ;
- les résultats jusqu'ici médiocres de l'introduction de la culture attelée dans les périmètres du projet FED/AHA posent en filigrane la question du type et du niveau de mécanisation les mieux adaptés pour cette partie de la vallée. Ceci amène le débat sur la place de la culture attelée dans les systèmes irrigués de la moyenne vallée.

Pour aborder le problème, nous nous sommes posé la question de savoir si les producteurs sont pour ou contre la culture attelée, qui peut constituer en réalité une solution alternative à la grosse motorisation et qui peut contribuer à la réduction des charges de production améliorant ainsi la compétitivité du riz de la vallée. Dans le cas où les producteurs nous ont dit oui pour la poursuite de la culture attelée nous avons demandé dans quelles conditions ils peuvent poursuivre la pratique. Dans le cas contraire, la question est posée de savoir quelles sont les solutions de rechange.

Les résultats préliminaires montrent que ceux qui veulent poursuivre la traction bovine sont confrontés à des contraintes de gestion des attelages surtout pendant les périodes creuses et des problèmes de sous-utilisation. Les détracteurs ne comptent en réalité que sur les prestataires qui pour la plupart et suivant la localité devraient venir du delta car tous les

GIE sont endettés (les retards de la mise en place de la campagne sont liés à des impayés à la banque) et aucun d'eux n'a dans son compte de l'argent pouvant assurer un apport personnel pour acquérir du matériel à crédit. C'est pourquoi il était intéressant de faire un travail préliminaire sur les difficultés l'évolution des prix des prestations après la dévaluation.

L'augmentation des prix des prestations constatée cette campagne et les difficultés aiguës d'accès aux machines dans la moyenne vallée pousse la réflexion sur les possibilités de renouvellement du parc. Pour ce faire il est nécessaire de voir les conditions de rentabilité de l'activité. C'est ce que nous allons démarré pour la campagne hivernale 1997.

2. ESSAI ET EVALUATION DE MATERIELS AGRICOLES ALTERNATIFS A LA GROSSE MOTORISATION

2.1. Charrue polyvalente à traction animale : Soulevage de l'arachide

2.1.1. Justificatifs et objectifs

L'arachide Fleur 11 a donné de bons résultats en culture irriguée de saison sèche chaude (excellents résultats en gousses et en fane) au cours des dernières années tant au niveau de la recherche que du développement. C'est un produit très demandé, qui se vend bien pour une consommation comme arachide de bouche (grillée ou non) et pour sa production de fanes d'excellente qualité à un moment où le fourrage de qualité est rare et très recherché. Les essais antérieurs montrent que malgré de bonnes conditions de fertilité des sols, les pertes de densité par mortalité en cours de culture sont importantes. Mais des compensations exceptionnelles sont observées. Compte tenu de la faible disponibilité des semences, des densités de semis modérées peuvent être proposées en milieu réel.

Cependant l'engouement des producteurs pour cette spéculation a rencontré une contrainte de taille qui est le soulevage. En effet, l'arrachage manuel après pré - irrigation est jusqu'ici la seule technique de récolte utilisée. Or cette technique a occasionné environ 50 % de pertes sous terre l'année dernière ce qui a poussé l'encadrement de la SAED à interpeller la recherche pour apporter une solution à travers la mécanisation de cette opération.

L'objectif général visé est donc d'améliorer le revenu des producteurs par l'introduction de cette spéculation en CSC. D'une manière spécifique il s'agit de :

- proposer des densités de semis plus modérées
- tester différentes techniques de semis : sur billons et à plat
- concevoir une souleveuse légère, simple, à faible coût, adaptée aux efforts de traction disponibles.
- réduire les pertes en terre à la récolte

L'objectif général est d'augmenter le revenu des producteurs par une amélioration de la productivité du travail tout en diminuant sa pénibilité. De manière spécifique, il s'agit de :

- . Concevoir une charrue légère, simple et à faible coût
- . Tester la technique de culture à plat de l'arachide irriguée
- . Mécaniser la récolte de l'arachide irriguée
- . Réduire les pertes par terre

2.1.2. Dispositifs et Méthodes

Sites : 4 sites initialement prévus : GF de Barangol, 1 privé de Thioubalel, GF de Kodit et Loboudou Doué.

Traitements : 2 traitements : Culture sur billons et culture à plat

Matériels : 3 charrues munies chacune de 1 corps de charrue de 25 cm, de 30 cm, 1 lame souleveuse de 25 cm, de 30 cm et de 35 cm et 1 lame « Diala » de 30 cm.

2.1.3. Résultats

Les résultats suivants ont été obtenus :

- Rendement en gousses : 4 - 6 t/ha à 15 % de taux d'humidité
- Rendement en Fane : 8 - 11 t/ha
- Conduite de la culture à plat réussit surtout en sol léger
- Construction de trois prototypes de charrue conformes au cahier de charge
- Réduction à néant des pertes par terre qui étaient estimées à 50 % grâce au soulèvement mécanique
- Soulèvement mécanique 3 fois plus rapide que 7 personnes en manuel (intéressant avec la non dormance de la variété, le problème de main d'oeuvre et les exigences d'une triple culture annuelle)
- Efforts de traction adaptés à deux ânes et à un cheval mais reste à réduire
- Problème de résistance de certaines parties et de certains matériaux utilisés

2.1.4. Conclusions et recommandations

Pour cette première année de test en milieu réel, nous pouvons dire que les objectifs de départ sont largement atteints : conception d'une machine polyvalente (soulèvement et labour), simple de fabrication (fabrication locale), réduction des pertes par terre à néant et du temps de récolte (3 fois plus rapide que 7 personnes), effort de traction acceptable par rapport aux animaux cibles (des efforts dans le sens d'une réduction des efforts de traction demandés restent à consentir à ce niveau), possibilité de conduite de la culture de l'arachide irriguée à plat (avec une réduction des charges liées au billonnage de 25 à 30 000 fcf/ha sans oublier l'effet précédent cultural de l'arachide sur une céréale qui suit avec gain de travail du sol car le soulèvement constitue en lui seul une préparation du sol pour la culture qui suit).

Pour confirmer le référentiel, le test est à reconduire pour l'année 1997 sur les mêmes sites en ajoutant des villages comme Loboudou Doué qui dispose des paires de boeufs très opérationnelles pour valider les résultats des essais sur le soulèvement mécanique. Dans tous les cas la zone de Cascas doit être privilégiée pour non seulement les bons résultats obtenus dans cette localité, mais aussi pour les bonnes dispositions de l'encadrement et l'esprit d'ouverture des producteurs vis à vis des innovations technologiques. Une deuxième raison non moins importante qui milite en faveur de la reconduction du test demeure la rotation arachide - maïs. Ce dernier bénéficie du précédent cultural de l'arachide (fertilisation résiduelle et effet légumineuse) et du soulèvement qui sert en même temps de préparation du sol. Ceci peut entraîner, en plus de l'augmentation de rendement qui peut résulter des bonnes conditions d'installation de la culture, un gain de temps et d'argent, le soulèvement servant de travail du sol, on n'a pas besoin de payer un prestataire pour faire du travail du sol pour la culture suivante. Ceci est une demande forte des producteurs lors de la dernière journée de soulèvement à Barangol.

A travers ce thème qu'on peut qualifier d'APT (Action Partagée Thématique) nous voyons une APA (Action Partagée Agrosystémique) dans l'avenir. Effet, il était beaucoup question lors de la dernière restitution de valoriser les fanes par une intégration de l'animal à travers une pratique de l'embouche ; les avantages qu'offre le précédent cultural de l'arachide récoltée mécaniquement est favorable à rotation arachide - maïs.

Pour la diffusion de la machine nous avons opté pour le modèle n°2 qui n'occasionne presque pas de bourrage. En ce qui concerne le type de lame souleveuse, le type Diala et la lame souleveuse de 30 cm sont les outils qui ont donné les meilleurs résultats : efforts de traction acceptables, efficacité. Les lames Diala sont particulièrement recommandées pour leur forme compacte qui facilite le guidage lors du soulèvement et présente une ligne de coupe beaucoup plus large ce qui évite les ratés survenus avec les lames souleveuses utilisées au début des essais. La lame souleveuse de 25 cm n'est pas suffisamment large occasionnant ainsi des pertes tandis que celle de 35 cm demande plus d'effort de traction.

2.2. Combiné Stripper/Batteuse « ISA/ASI »

2.2.1. Justificatifs et objectifs :

Le recours à la motorisation des travaux agricoles est l'un des moyens permettant d'atteindre l'objectif d'intensification de la culture irriguée.

Dans le delta et la vallée, les prestations de services mécanisés pour la récolte et le battage sont réalisées avec du matériel standard de grand gabarit. La récolte et le battage ne sont mécanisés qu'à environ 50 % malgré les efforts louables consentis par les producteurs et les privés depuis le désengagement de la SAED du secteur.

Pour accroître la rentabilité de la riziculture irriguée, face à la réduction drastique des subventions et de la dévaluation, il est nécessaire de réduire les charges de mécanisation tant au niveau des coûts d'acquisition qu'au niveau des frais de fonctionnement.

L'objectif global visé par l'étude est d'évaluer les performances techniques et économiques du combiné SG 800/TC 800 en milieu réel en vue de l'adapter aux conditions techniques et économiques des exploitations de la vallée.

2.2.2. Résultats

A) Les performances techniques

1. *Le Stripper*

Les tests ont donné les résultats suivants :

- la vitesse moyenne d'avancement : 1,02 m/s soit 3,7 km/h ;
- largeur de travail moyenne : 65 cm
- les pertes de temps au virage : 22 % du temps global ;
- la superficie travaillée moyenne par heure 0,16 ha/h, soit 1 ha pour une journée de 6 h de travail réel ou 1,6 ha pour une journée de 10 h ;
- consommation carburant : 0,5 l/h, soit 3 l/j de 6 h de travail ou 5 l/j de 10 h de travail.
- pertes de temps pour la vidange d'une trémie : 1 mn en moyenne (40 s à 3 mn)

Les performances sont influencées par plusieurs facteurs :

- une mauvaise organisation du chantier de récolte (mauvais choix de l'emplacement de la batteuse, désordre dans les rôles du personnel, etc) ;
- habileté des personnes qui dégagent la trémie et maîtrise de la conduite de la machine ;
- une insuffisance du personnel (conducteurs relais, personnel pour vider la trémie, etc) ;
- terrain mal plané ou trop humide.
- les arrêts de travail pour des convenances personnelles.

Ces performances, comparées à celles d'une moissonneuse-batteuse et en tenant compte des coûts des deux machines, peuvent être jugées bonnes. Le rapport des performances journalières d'une moissonneuse sur celles du stripper est de 3 (3/1) pour un rapport de prix de 12,5 (50 M/4 M). Cela veut dire qu'une moissonneuse-batteuse coûte 12,5 fois plus cher qu'un stripper alors qu'elle est seulement 3 fois plus rapide.

2. *La Batteuse*

L'analyse des résultats donne les performances suivantes :

1) Les performances moyennes avec battage du produit d'une récolte manuelle :

- rendement horaire : 350 - 600 kg/h (mini maxi) ;

- consommation horaire en carburant : 0,35 l ;
- qualité produit : propre

2) Les performances moyennes avec battage du produit du stripper :

- rendement horaire : 1 000 - 1600 kg/h (mini maxi)
- consommation horaire en carburant : 0,32 l ;
- qualité produit : propre

La longueur de coupe, le rendement des parcelles (rapport grain/paille) et le taux d'humidité sont les facteurs qui influent le plus sur les performances de la machine. L'habileté des opérateurs et l'organisation des chantiers ont aussi une importance particulière sur les rendements. Grâce à un système de vannage efficace, le produit est propre et ne nécessite quasiment pas de vannage. Ceci constitue un avantage comparatif par rapport à la Votex.

B) Ergonomie

1. Le Stripper

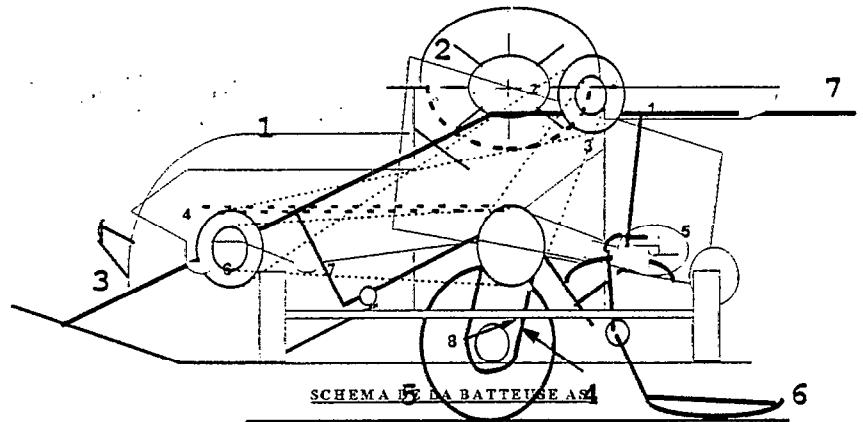
- sécurité : très peu de risques d'accidents,
- déplacement à l'intérieur des parcelles aisé
- manoeuvre en terrain plat aisé mais difficile en terrain boueux ou de mauvais planage ;
- facilité d'entretien et de réglage
- coûts d'utilisation et de maintenance faibles
- système d'accrochage du moteur non adapté : difficultés de transport
- possibilité de fabrication et de maintenance locale grande
- nécessite deux conducteurs pour se relayer : tous les 5 trémies
- difficultés de chargement et de déchargement : minimum 6 personnes

Conception

Quatre parties principales composent la machine (voir schéma) :

- le bâti : il est constitué de deux longerons en tube carré sur les quels viennent se fixer les paliers des différents arbres de la transmission. A l'avant, un assemblage de tôles forme une cage pour abriter le rotor et servir de guide au produit récolté qui doit se retrouver au niveau de la caisse de stockage démontable. A l'avant de la cage se trouve le nez. A l'arrière se trouve la poignée de commande sur laquelle est articulée une tige qui agit sur le levier tendeur-inverseur de marche et pour la position intermédiaire d'arrêt. Tout cet ensemble repose sur deux roues cages (travail en conditions humides) ou sur des pneumatiques jumelés ou non (travail en terrain sec).
- le rotor : de forme octogonale, il est la seule pièce qui intervient pour la récolte avec son mouvement rotatif de sens contraire au mouvement d'avancée effectuant ainsi l'arrachage des panicules à l'aide de ses doigts en caoutchouc.
- la caisse (trémie) : démontable, elle est ouverte à l'avant et est constituée d'un cadre parallélopipédique formé de tube carré. Les parois sont en tôle perforée de 10/10°. La caisse est munie de roues à l'arrière pour rendre aisées les opérations de vidange et de galets pour faciliter le glissement sur les rails (cornières) fixés sur le bâti.
- le système de transmission : c'est un ensemble de poulies (7 au total) de diamètres différents, de courroies trapézoïdales (4), un levier tendeur-inverseur de mouvement et une boîte réductrice. Les roues sont montées sur l'arbre secondaire de cette boîte.

1. cage du rotor
2. caisse de stockage
3. nez escamotable
4. boîtier
5. roue cage
6. patin
7. bâti



SCHEMA DU STRIPPER

Deux grilles de protection (côté moteur et côté transmission) assure la sécurité du personnel et empêche l'égrenage des graines au contact avec les courroies.

2. La Batteuse

- sécurité : peu de risques d'accident de travail
- système d'accrochage du moteur non adapté : difficultés de transport
- pénibilité du travail moindre par rapport au battage manuel
- légère sans le moteur
- la machine est lourde, il faut des pneumatiques et adopter le système d'accrochage du moteur chez la Votex
- très simple d'entretien et de réglage
- coûts d'utilisation faibles

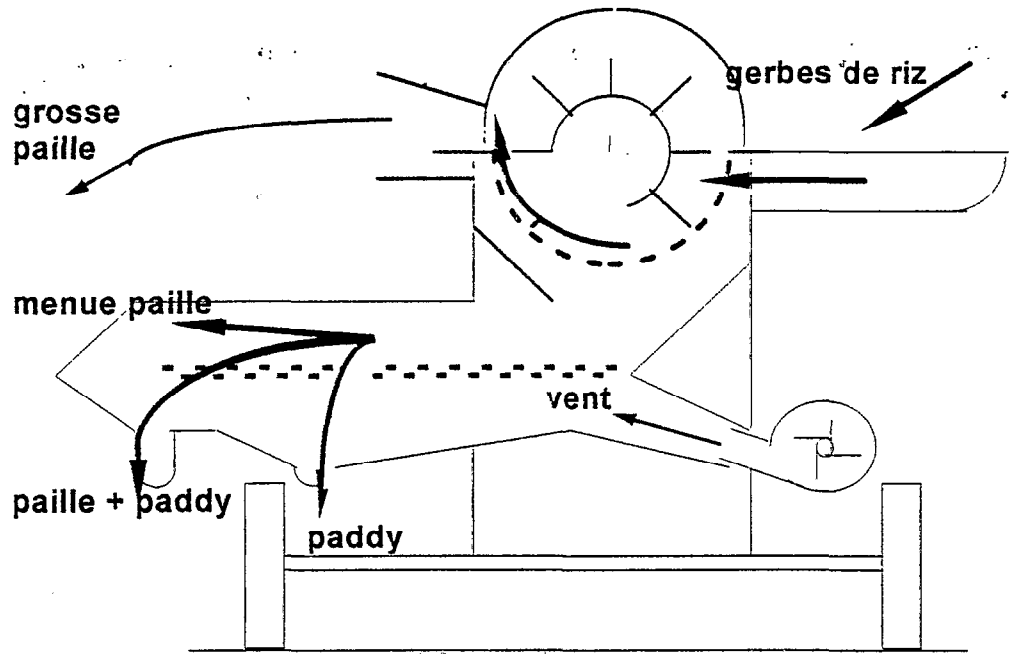
Peu de pannes ont été rencontrées et les rares cas observés sont dus aux points de soudure. On note souvent des bourrages liés à la goulotte de ventilation et au système de réglage de la manivelle de la grille de séparation.

Schéma de la batteuse :

1. table d'alimentation
2. chambre de battage
3. grille
4. table de séparation
5. ventilateur
6. goulotte de sortie paddy (bac 1)
7. goulotte de sortie paille (bac 2)
8. essieu

Principe de fonctionnement

Le produit à battre s'introduit dans la chambre de battage à partir de la table d'alimentation. Sous l'effet du flux axial il est battu en même temps qu'il est repoussé vers l'extracteur qui l'éjecte loin de la machine (un avantage de la batteuse qui par ce fait épargne les opérateurs du débarras de la paille). Ceci étant possible grâce à la disposition des déflecteurs en spirale (vis sans fin). Par la grille passe le mélange paille/paddy/grains immatures qui tombe sur la table de séparation, plus précisément sur sa partie densimétrique faite de tôle ondulée. Par le mouvement des vibrations, le paddy supposé plus lourd que la paille effectue un mouvement longitudinal vers les trous de la deuxième parties de la table d'où il tombe vers la vis sans fin de la goulotte de sortie paddy (bac 1). Cependant, la paille plus légère sursaute le long de la table et est soufflée par le vent vers la goulotte de sortie paille (bac 2) et à l'arrière de la batteuse (voir schéma de circulation du produit).



SCHEMA DE CIRCULATION DU PRODUIT

PROBLEMES GENERAUX RENCONTRES SUR LE STRIPPER

PROBLEMES RENCONTRES		SOLUTIONS	OBSERVATIONS
LOCALISATION	EXPLICATION		
le boîtier	la chaîne du second niveau est sous-dimensionnée pour le travail en terrain humide.	- changement complet des pignons et chaînes du boîtier - adoption d'un train d'engrenages	c'est un problème majeur, de sa qualité dépendra la fiabilité de la machine - l'adoption d'un train d'engrenages représente une solution coûteuse.
le nez	possibilité de jouer sur la hauteur de coupe, mais les grains sont projetés vers l'avant pour les positions élevées	réglage optimum et étude de la trajectoire du paddy arraché suivant la vitesse du rotor	le problème n'est pas prioritaire
les roues	patinage en terrain humide - beaucoup d'effort à fournir lors des manoeuvres - instabilité	les roues doivent être bordées sur les côtés - augmentation du diamètre des roues - roues séparées et écartées au maximum	- c'est à partir de ce moment qu'il y a eu la possibilité d'incliner davantage la caisse
la caisse	-mauvais positionnement entraîne des pertes de grains par l'espace entre la caisse et le contre-dent - petite capacité, - inclinaison faible, déversement lors du ramassage de riz versé	- soudure de cornière à l'avant de la caisse pour obturer l'espace - augmentation de volume (dans les limites possibles) - augmentation de l'inclinaison	- solution apportée en cours de test - a donné satisfaction
la poignée de commande	du fait que les courroies n'avaient pas les dimensions requises la marche arrière s'enclenchait trop facilement ⇒ risque d'accident	blocage de la poignée à la position arrêt par butée	solution apportée en cours de test qu'on peut retrouver sur le deuxième prototype SISMAR
les diviseurs	inefficaces en terrain mal nivelé	diviseurs montés sur patins réglables rappelés par ressorts	- variétés de riz à longues talles. - joue aussi sur la hauteur de coupe
contre-dent	accumulation de la paille sur le rotor entraîne des pertes de grains	réalisation d'un contre-dent qui joue le rôle de peigne pour le rotor	- avantages et inconvénients à déterminer
levier réglage patin			

2.3. Perspectives :

Les résultats obtenus sont très satisfaisants : fabrication (malgré les difficultés et problèmes de départ rencontrés sur les prototypes SISMAR et à une moindre mesure ceux de l'artisan), performances et fiabilité de la technologie.

Vu les performances de la batteuse, nous allons rédiger les spécifications techniques et le manuel d'utilisation et proposer la fabrication d'une petite série pour l'année 1997. Les unités seront suivies pour voir leurs comportement réel en gestion exclusivement paysanne.

Par contre, le stripper mérite d'autres tests en 1997 avant d'être lâché en milieu réel.

Économies familiales, organisations paysannes et crédit

Xavier LE ROY¹

Les recherches en économie, entreprises dans le département de Podor, se répartissent selon les trois thèmes complémentaires suivants :

- économie de la production agricole et économies familiales ;
- organisations paysannes, crédit et endettement ;
- agriculture irriguée et cultures de décrue.

Si le troisième volet est presque achevé, les deux premiers se voient retardés par les difficultés rencontrées sur le terrain. En effet, nous sommes confrontés à un brouillard verbal de la part de nos interlocuteurs, s'inscrivant dans une subtile tactique de dissimulation et d'altération des informations. Deux phénomènes se manifestent : d'une part une minimisation des surfaces cultivées, d'autre part un affichage systématique de faire-valoir direct dans les périmètres irrigués. La stratégie développée vise à démontrer le besoin urgent de nouveaux aménagements.

En fait, ces deux phénomènes donnent des résultats contradictoires. Lors du recensement des individus, la minimisation des surfaces cultivées se fait en omettant de déclarer les parcelles exploitées dans certains aménagements. Dans l'étude des périmètres irrigués, la dissimulation des prêts de parcelles, des locations, des métayages (*rem-petiem*) provoque une majoration des surfaces exploitées par les attributaires de parcelles. Cette incohérence, entre les deux niveaux de collecte de l'information, nous a contraint à reprendre à zéro tout le processus d'enquête.

Ceci engendre un grand retard dans la production des résultats, mais constitue la seule méthode à même de fournir des informations conformes à la réalité. Cette réitération des enquêtes s'achèvera en septembre 1997. Pour les deux premiers thèmes, nous ne présentons donc ici que des résultats provisoires. Ces résultats seront actualisés en octobre, suite à un nouveau dépouillement. L'arrivée d'un statisticien permettra d'accélérer sa réalisation et d'approfondir l'analyse. En revanche, nous disposons des données définitives du thème « agriculture irriguée et cultures de décrue ».

Abordons successivement chacun de ces trois thèmes.

Economie de la production agricole et économies familiales

Replacer la culture irriguée dans des ensembles plus vastes

Une meilleure compréhension de l'agriculture irriguée du département de Podor passe par une bonne connaissance de l'économie de la production, à l'échelle qui nous semble la plus pertinente, celle des « unités économiques ». Nous appelons « unités économiques » les groupes familiaux de base, présentant des liens

¹ Avec la collaboration de Mamadou KANE, Maouloud LY, Bocoum YERO, Moussa SY, Thierry VECLIN... et grâce à l'accueil et à la patience des habitants de Ngaolé, Ouro-Madiou, Guédé-Village et Nguendar.

économiques étroits, dans les trois flux fondamentaux que constituent le travail, l'argent et la nourriture. Ces cellules familiales peuvent différer des unités de résidence (*galle* en pulaar) et des unités de cuisine (*foyere*).

Si l'analyse privilégie la culture irriguée, elle ne saurait se borner à ce secteur de l'économie de la Vallée. Une bonne perception des motivations et des stratégies développées face à la culture irriguée implique de replacer cette dernière dans des ensembles plus vastes. Tout d'abord l'activité agricole globale, prenant en compte les cultures de décrue et les quelques productions pluviées dans le *jeeri* (zone dunaire). Et, surtout, en intégrant l'activité agricole dans les « économies familiales », comprenant aussi la pluri-activité et les relations à distance.

Quatre villages caractéristiques

Le suivi pendant un an de six cents personnes (une centaine « d'unités économiques ») constitue l'ossature de cette étude des économies familiales, intégrant donc l'agriculture irriguée. Le choix de cette centaine « d'unités économiques » se fait par un échantillonnage en cascade. L'étude de l'ensemble du département de Podor conduit à un resserrement des observations aux deux principales communautés rurales pratiquant la culture irriguée : celle de Ndiayène-Pendao et celle de Guédé. Ces deux communautés rurales coïncident avec celles choisies pour les deux autres volets du programme de recherche (pédologie, agro-machinisme).

Des entretiens avec les autorités administratives, les responsables de la Saed et du projet Fed de Nianga, des présidents de GIE et des agriculteurs, permettent une caractérisation des différentes zones et un repérage de plusieurs villages. Quatre d'entre eux couvrent tous les contextes rencontrés dans le département de Podor : degré d'enclavement, types de périmètres et d'encadrement, productions agricoles et autres activités, groupes statutaires. Du nord au sud, ce sont :

Ngaolé, encadré par le projet Fed et où subsiste la culture attelée. Perché sur la rive du fleuve Sénégal, en aval de Podor, il regroupe des pêcheurs (*cuballo*), dont une forte colonie de « réfugiés » et de « rapatriés » de Mauritanie, suite au conflit de 1989. La proximité de Podor atténue son enclavement.

Ouro-Madiou, composé à majorité de nobles *torodo*, bénéficie d'une situation idéale sur la route bitumée de Podor. Pionnier en matière de diversification des cultures irriguées, il se distingue par son dynamisme précoce dans la production d'oignons. Proche de la cuvette de Nianga, il possède aussi de nombreux PIV (périmètres irrigués villageois) et PIP (périmètres irrigués privés), de l'autre côté du Doué.

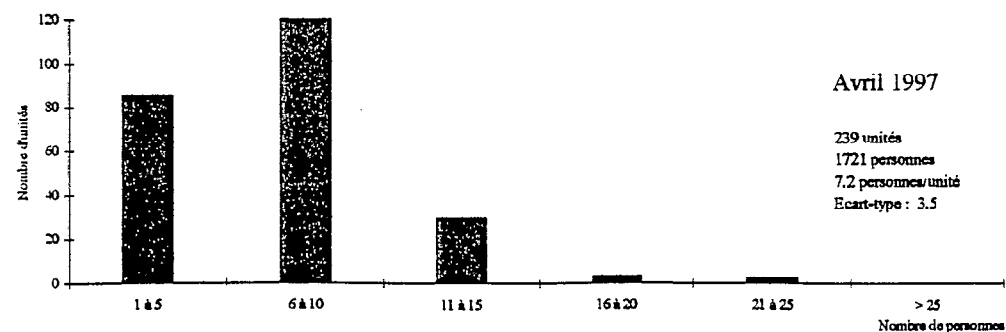
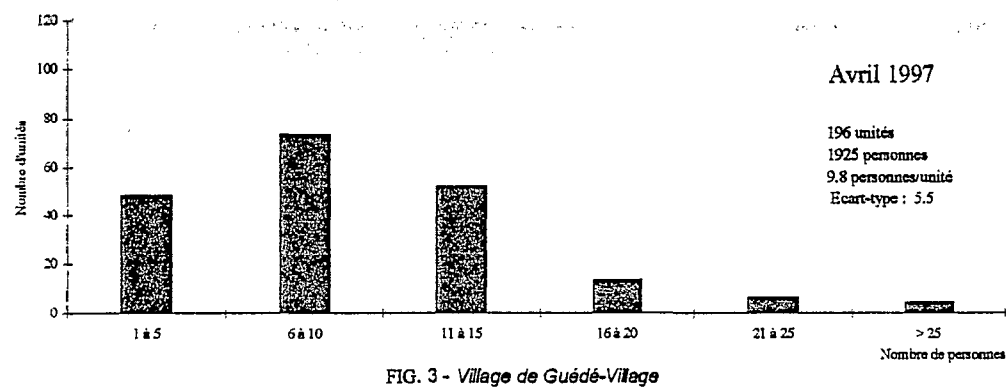
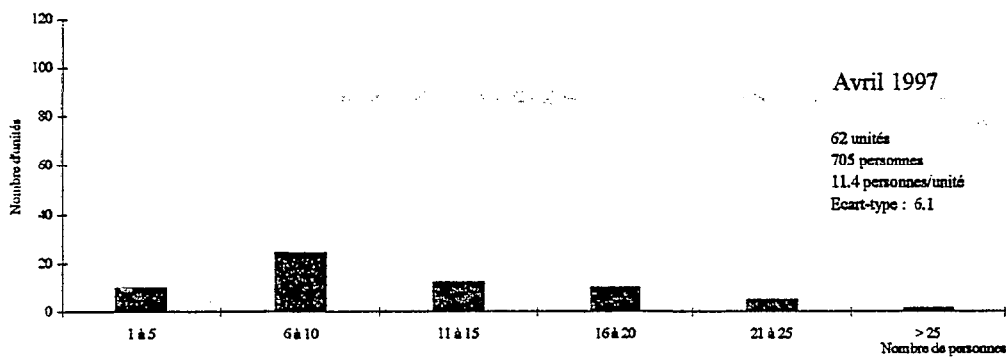
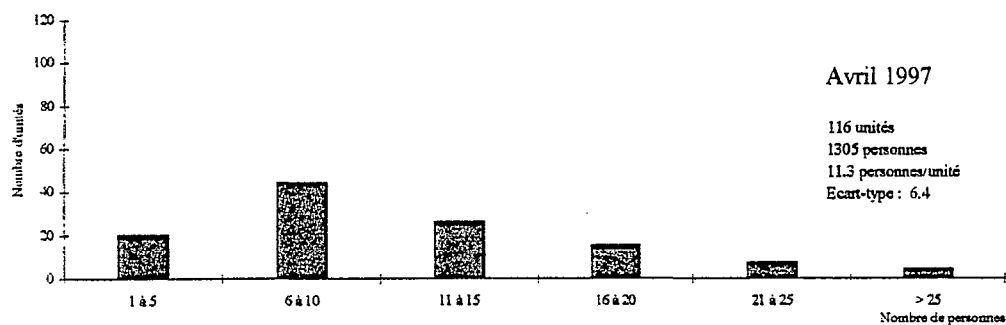
Guédé-Village, sur la rive nord du Doué, présente une grande diversité au niveau social (captifs *macudo*, affranchis *gallunke*, nobles *torodo*, pêcheurs *cuballo*) et dans les types de périmètres. Toutes les formes d'aménagements s'y exploitent : périmètres intermédiaires (IT) implantés par les Italiens en 1988, cuvettes de Guédé-chantier et de Mbantou sur l'autre rive du Doué, périmètres irrigués privés (PIP). Les tentatives originales de petite motorisation dans les IT n'ont pas fait long feu, mais ces périmètres subsistent dans un état satisfaisant. L'enclavement de ce village, à l'écart de toute route importante, se voit atténué par un bac au fonctionnement capricieux et par une pirogue, permettant de rejoindre l'axe Saint-Louis-Matam.

Nguendar regroupe des peuls (*pulo*), écartelés entre l'élevage et la riziculture. Son terroir s'étire sur plus de cinquante kilomètres, de la plaine alluviale (*waalo*) au nord, à la zone dunaire (*jeeri*) au sud. Selon la période de l'année et selon leur activité principale, les membres des « unités économiques » se partagent entre des campements dans le *jeeri* et le village au bord de route goudronnée Saint-Louis-Matam. Leurs rizières, dans la cuvette de Nianga, se caractérisent par leur éloignement : huit kilomètres du village. L'attribution de neuf futurs périmètres tout proches, par le « projet Ngalanka-amont », suscite un regain d'intérêt pour la culture irriguée.

Recensement socio-démo-agricole

Nous recensons toutes les « unités économiques » de ces quatre villages. La préparation du questionnaire fait l'objet d'un soin particulier, par rodages successifs sur le terrain, pour la meilleure adéquation aux objectifs de notre recherche. Ce questionnaire comprend cinq rubriques.

Répartition des unités économiques selon le nombre de personnes



La première rubrique recense tous les membres de « l'unité économique », en précisant, pour chacun d'eux, ses caractéristiques démographiques et sociales. Nous demandons également si l'intéressé pratique l'agriculture, s'il est titulaire de parcelles cultivées, s'il est propriétaire de bétail et s'il exerce des activités autres que l'agriculture. Lorsqu'elles sont positives, nous détaillons ces trois dernières réponses dans les trois rubriques suivantes du questionnaire : parcelles cultivées depuis l'hivernage 1995, bétail possédé, autres activités. Enfin, s'il y a lieu, nous mentionnons le matériel possédé par certains membres de l'unité.

S'il paraît simple, ce recensement bute sur de sérieux problèmes. Outre quelques rares cas compréhensibles de refus de répondre, nous sommes confrontés à deux sortes d'obstacles. Tout d'abord à la définition des contours exacts des groupes recensés. Nous utilisons volontairement l'expression « unité économique » pour insister sur le fait que notre critère est avant tout économique et non pas exclusivement productif ou familial. Aussi, pour nous démarquer des entités généralement employées pour désigner les groupes domestiques : exploitation, unité de production, famille, ménage, *galle*, *foyere*.

S'ajoutent à cela les stratégies parfois développées par nos interlocuteurs : dissimulation d'une scission récente de parents proches, segmentation ou regroupement factices, visant à coller aux critères passés ou supposés d'attribution de parcelles irriguées (dans certains cas, une parcelle est attribuée par unité, dans d'autres un effectif suffisant se voit imposé), réticence d'origine superstitieuse de décompter tous ses dépendants, déclaration de migrants ou dissimulation de présents, enregistrement involontaire d'habitants de villages proches (pour accéder à un aménagement présumé !).

Nous contournons les difficultés relatives aux contours exacts des « unités économiques » (qui recenser sur un même questionnaire ?) par le recours à chacun des trois flux économiques fondamentaux. Pour être plus explicite, développons la méthode employée. Les investigations partent de l'unité de résidence (*galle*), généralement facilement repérable par son regroupement d'habitations, souvent clôturé. Un entretien d'une dizaine de minutes avec le chef de cette unité de résidence (*jom galle*) permet de repérer la ou les « unités économiques » qui la composent. Lorsqu'un doute surgit pour l'un des membres de l'unité de résidence, l'analyse, critère par critère, du travail, de l'argent et de la nourriture, permet à l'enquêteur de décider si cette personne est recensée ou non dans la même « unité économique ».

Insistons sur le fait que cette analyse se pratique pour chaque flux économique fondamental pris isolément, indépendamment des deux autres critères. Ainsi, l'enquêteur demande tout d'abord à la personne dont la dépendance se montre équivoque, si elle travaille le plus souvent sur les parcelles du chef « d'unité économique » déjà identifié. Il applique ensuite la même approche pour l'argent, en demandant qui prend en charge généralement ses dépenses monétaires, sans se soucier de l'origine de cet argent. Enfin, le critère de la nourriture est employé, pour déterminer la dépendance alimentaire de l'individu ambigu.

Précisons bien que seul le fournisseur de l'aliment utilisé pour la préparation du repas importe. Ainsi notre « unité économique », constitue bien une unité de consommation, mais pas une unité de commensalité. Elle ne s'identifie pas toujours au *foyere* (unité de cuisine), les épouses résidant dans le *galle* (unité de résidence) de leur père ou de leur frère étant intégrées dans « l'unité économique » de leur mari, alors qu'elles n'appartiennent pas au *foyere* de ce dernier.

Lorsque les trois critères, du travail, de l'argent et de la nourriture, convergent, on en conclut automatiquement le recensement de la personne dans « l'unité économique » en question ou le recours à un autre questionnaire. L'approfondissement des quelques cas de divergence des trois flux économiques fondamentaux permet de dégager une tendance principale et de résoudre le problème de recensement rencontré. Ajoutons enfin que la décision de réunir plusieurs individus sur la même fiche relève de l'enquêteur, en fonction de sa conclusion à partir de trois critères fondamentaux, sans tenir compte d'avis éventuellement divergents de la part des individus.

Des surfaces irriguées falsifiées

Le second écueil, auquel se heurte le recensement des unités économiques, concerne les surfaces cultivées. Afin de corroborer la lancinante requête d'un nouvel aménagement, les agriculteurs ne déclarent pas toutes leurs parcelles irriguées. Dans certains cas, l'écart s'avère important, faussant complètement les résultats, surtout que cette dissimulation ne se montre pas systématique. Nous avons découvert le subterfuge en confrontant les surfaces, déclarées lors du recensement, avec celles obtenues ultérieurement pour chaque périmètre.

Les enquêteurs finissent actuellement de reprendre cette partie du recensement, en contrôlant systématiquement les surfaces cultivées depuis l'hivernage 1995, par culture et par périmètre. L'ensemble du recensement sera actualisé début septembre 1997, en rajoutant les superficies de la campagne en cours, l'hivernage 1997, et les derniers mouvements de population (décès, naissances, départs, arrivées). Un nouveau dépouillement permettra de mieux préciser les contours, les caractéristiques et la diversité de l'économie du département de Podor, basée sur l'agriculture irriguée. Nous avons vu que l'appui d'un statisticien permettra de refaire plus rapidement les traitements et d'affiner l'analyse des données.

Surtout, ce nouveau dépouillement permettra de sélectionner enfin la centaine « d'unités économiques », constituant notre échantillon final. Ce dernier sera significatif de la diversité de l'agriculture irriguée et de ses contextes (économique, social, institutionnel) dans le département de Podor, sans un strict souci de représentativité. Chacun des membres, âgés d'au moins 15 ans, de cet échantillon « d'unités économiques », fera l'objet d'un suivi budgétaire pendant une année complète. Afin de concilier le souci de fiabilité des informations recueillies et celui de validité statistique par un effectif important de l'échantillon, deux passages par mois seront réalisés. Des entretiens périodiques, consécutifs à des dépouillements partiels, permettront de discuter avec les intéressés des décisions qu'ils ont prises. Une reconstitution annuelle, beaucoup plus qualitative, de l'organisation du travail et de l'alimentation, complétera la perception du fonctionnement de ces « unités économiques ».

Le suivi budgétaire de 600 personnes prend en compte tous les flux économiques, qu'ils soient monétaires ou en nature. Une première enquête expérimentale fut réalisée, pendant trois semaines en juillet 1996, auprès de 600 personnes prises au hasard. La saisie des données permit une meilleure conception du questionnaire. Celui-ci comprend les rubriques suivantes : date de l'opération, opération (achat, vente, emprunt, prêt, remboursement, recouvrement, don effectué ou reçu, salaire versé ou perçu), poste (riz, engrais, huile, etc.), type (argent, nature, crédit), montant, bénéficiaire ou donateur, lieu (village de l'opération), GIE (rempli seulement lorsqu'une opération concerne une parcelle irriguée ou l'organisation dont celle-ci dépend). La nouvelle version du questionnaire est de nouveau testée en juillet 1997, pendant deux semaines, afin de mettre en évidence les éventuelles lacunes.

Des résultats provisoires

Au fur et à mesure, nous complétons et corrigeons la saisie des différentes parties du recensement de toutes les « unités économiques » de nos quatre villages. L'état actuel des fichiers reste donc provisoire et incite à la prudence dans l'exploitation des résultats. Toutefois, nous pouvons présenter la situation démographique par « unité économique » en avril 1997, la fiabilité de nos données se montrant satisfaisante pour cette rubrique.

La figure 5 révèle une taille généralement peu importante des « unités économiques ». L'effectif moyen se limite à 9 personnes. Plus des deux tiers (69 %) des unités regroupent moins de 11 personnes et un peu plus du quart d'entre elles (27 %) n'ont que 5 personnes ou moins.

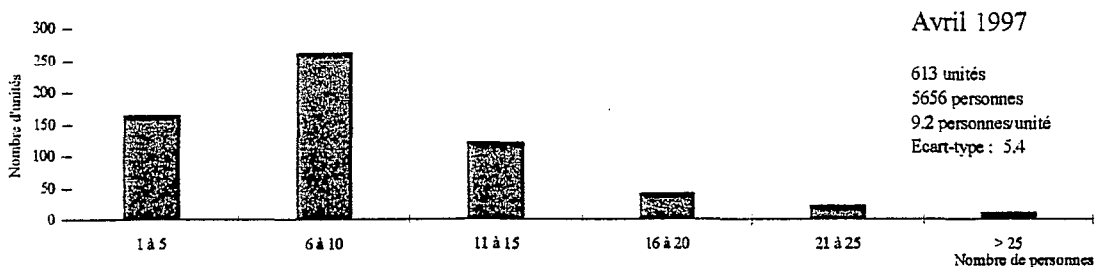


FIG. 5 - Répartition des « unités économiques » selon le nombre de personnes pour l'ensemble des quatre villages

La comparaison du même histogramme pour nos quatre villages montre une taille supérieure, 11 personnes, pour les deux premiers villages : Ngaoilé (fig. 1) et Ouro-Madiou (fig. 2). Guédé-Village (fig. 3) présente un effectif comparable à celui de l'ensemble des quatre villages. L'éclatement des familles chez les peul de Nguendar (fig. 4) s'explique par la très grande mobilité qu'impose leur activité principale d'élevage : 7 personnes en moyenne et 86 % des unités rassemblant moins de 11 personnes.

En revanche, les surfaces cultivées sont plus sujettes à caution. Si nous avons déjà corrigé les chiffres pour certaines « unités économiques », les contrôles se poursuivent pour d'autres. Ceci exclut une exploitation par « unité économique », mais autorise une présentation globale. La figure 6 présente, pour nos quatre villages, l'assolement moyen par personne pour cinq campagnes successives, de l'hivernage 1995 à la contre-saison froide 1996/97. Un phénomène saute aux yeux : la régression de la culture irriguée, pendant l'hivernage et surtout en contre-saison froide. Les productions de contre-saison chaude s'avèrent anecdotiques.

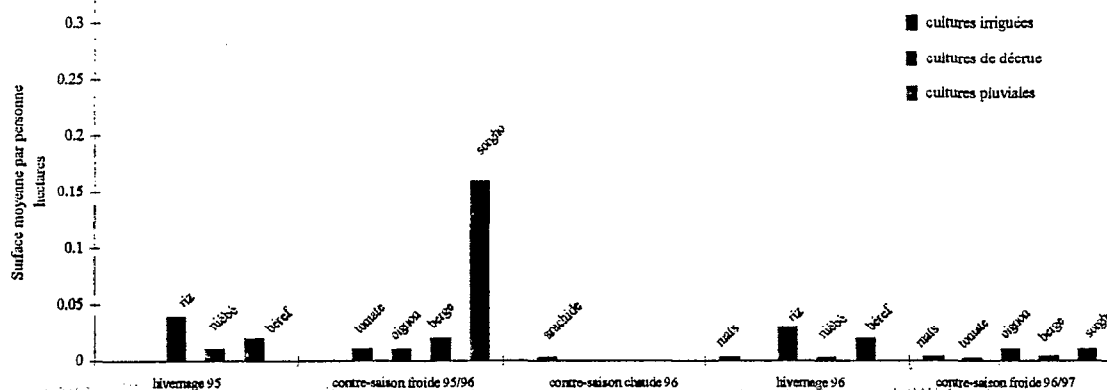


FIG. 6 - Assolement par campagne pour l'ensemble des quatre villages.

Cette diminution de la culture irriguée s'observe dans chacun des quatre villages (page suivante). Ngaolé (fig. 7) abandonne même toute exploitation pendant l'hivernage 1996, mais consacre une place de choix à l'oignon pendant la contre-saison froide pendant deux années consécutives. Seul Guédé-Village (fig. 9) accroît son riz d'hivernage entre 1995 et 1996, et reste fidèle à la production de tomate en 1996/97. Le village peul de Nguendar (fig. 10) apparaît celui s'impliquant le moins dans la culture irriguée, par la concurrence qu'y exerce l'élevage et du fait de son éloignement par rapport à la cuvette de Nianga, où se trouvent toutes ses parcelles. Son vaste terroir de *jeeri* lui permet de conserver des cultures pluviales : *niébé* (haricot) et *béref* (courge). Mais la pluviosité, trop faible et trop aléatoire ne permet plus la production de mil. Nous aborderons le caractère exceptionnel des cultures de décrue en 1995/96 dans la troisième partie.

Organisations paysannes, crédit et endettement

Une approche complémentaire

Notre deuxième angle d'approche de l'agriculture irriguée est l'échelle collective, par les organisations paysannes, plus précisément les groupements d'intérêt économique (GIE). Les GIE gèrent les périmètres irrigués, que ce soit au plan technique ou au plan financier. Certes, la science économique privilégie l'acteur et ne peut se cantonner au cadre exigu de la parcelle. Mais la culture irriguée ne se comprend que par cette double entrée. En effet, la forte dépendance des comportements individuels, aux décisions collectives des GIE, implique de prolonger notre analyse des économies familiales par celle des organisations paysannes.

Nous observons ainsi les vingt GIE de nos quatre villages. Chaque GIE contrôle un ou plusieurs périmètres, ou, dans le cas des cuvettes de Nianga, de Guédé ou de Mbantou, une ou plusieurs mailles hydrauliques, sous-ensembles d'une cuvette. Une reconstitution laborieuse de la composition de chaque GIE permet d'en esquisser le profil : attributaires initiaux et actuels des parcelles, mode d'acquisition, exploitants effectifs et cultures par campagne depuis l'hivernage 1995, forme de tenure.

Ici aussi l'enquête s'est enlisée dans un efficace brouillage des informations. Parfois, aucune liste des attributaires n'existe. Le plus souvent, celle des attributaires actuels n'est pas à jour, les dons de parcelles, les héritages ou les ventes n'étant pas pris en compte. Dans quelques cas, le contournement des règles rigides d'affectation des

parcelles, lors de la création d'un aménagement, complique les investigations. Ainsi, à un seul attributaire officiel peut correspondre parfois deux attributaires réels, qui se partagent la superficie allouée.

Le schéma s'obscurcit encore pour recenser les véritables exploitants des parcelles. Ceux-ci sont dissimulés lorsqu'ils ne sont pas attributaires. Comme nous l'avons vu, c'est le cas des prêts de parcelles, des locations, des situations de métayage (*rem-petiem*).

Cette construction complexe de l'utilisation virtuelle des périmètres irrigués présente heureusement ses failles, par les incohérences avec les déclarations du recensement des « unités économiques », signalées dans la première partie. Après deux répétitions de cette enquête sur les périmètres irrigués, levant partiellement le voile, nous nous sommes résignés à réaliser pour la quatrième fois ce travail, mais dans le périmètre lui-même, parcelle après parcelle. Cette inquisition, outre qu'elle lasse certains enquêteurs, suscite bien sûr des réactions, voire alimente des rumeurs. Des réunions d'explication et de sensibilisation semblent, le plus souvent, permettre de poursuivre les investigations.

L'impasse de l'endettement

Les vingt GIE de nos quatre villages font donc l'objet d'un suivi, parallèle à celui de l'échantillon « d'unités économiques ». Gestion technique tout d'abord : politique de mise en valeur du périmètre, calendrier d'irrigation, commande et distribution d'intrants, acquisition et entretien des équipements, commercialisation. Mais, gestion financière surtout, par enregistrement de tous les flux monétaires : emprunts et remboursements, achats et ventes, paiement des prestations et des salaires, etc. Nous débutons progressivement ces suivis, par quelques GIE.

Nous mettons l'accent sur les problèmes d'endettement et d'accès au crédit. De fait, les GIE constituent le passage obligé pour l'accès au crédit institutionnel, ce qui explique le succès de cette forme juridique d'organisation paysanne. L'approche individuelle, à travers le suivi des « unités économiques », complète cette étude du crédit et de l'endettement. Un soin particulier sera porté à l'enregistrement des différentes sources de financement : Caisse nationale de crédit agricole (CNCAS), crédits par les fournisseurs ou les industriels, prêts usuraires, appuis de migrants. Ces investigations se réalisent en étroite collaboration avec la CNCAS, afin de confronter les informations obtenues et de reconstituer un historique des emprunts et de l'endettement de chaque GIE.

L'endettement représente actuellement le principal obstacle au développement de la culture irriguée dans le département de Podor. Il entrave la politique d'intensification, réduisant ou empêchant l'utilisation des intrants (engrais, herbicides, produits phytosanitaires) et participant à la quasi-disparition de la double culture sur une même parcelle. Contrairement à ce qui se clame fréquemment, il n'y a pas de problème de crédit : tout GIE ayant remboursé ses emprunts précédents voit son dossier de demande de crédit auprès de la CNCAS accordé. En revanche, il y a un lourd problème d'endettement, général à l'ensemble du département, voire de la Vallée. Cette situation bloque progressivement toute la production agricole et explique la régression des cultures irriguées, relevée dans nos quatre villages et que l'on retrouve dans tout le département, comme nous le verrons dans la troisième partie.

Ce contexte ne semble pas alarmer outre mesure les agriculteurs, habitués probablement à traverser des phases difficiles, habitués aussi à une intervention extérieure providentielle. Paradoxalement, celle-ci semble aujourd'hui indispensable, pour dégripper un mécanisme sur le point de s'arrêter et relancer le processus productif. L'autofinancement de l'agriculture irriguée dans le département de Podor a toujours été déficient et le démarrage d'une nouvelle campagne dépend fortement du crédit. Endettés, nombre de GIE abandonnent la culture irriguée ou ne mettent en valeur qu'une fraction de leurs périmètres. Nous observons ainsi une réorganisation spatiale de certains périmètres, les exploitants ayant pu cotiser pour l'achat des intrants et du gas-oil pour la pompe, se regroupant dans la même portion de périmètre, sans se soucier des attributions initiales de parcelles. Ne produisant pas ou peu, ces GIE ne dégagent pas les liquidités nécessaires au remboursement des emprunts. Un cercle vicieux !

Assolement par campagne

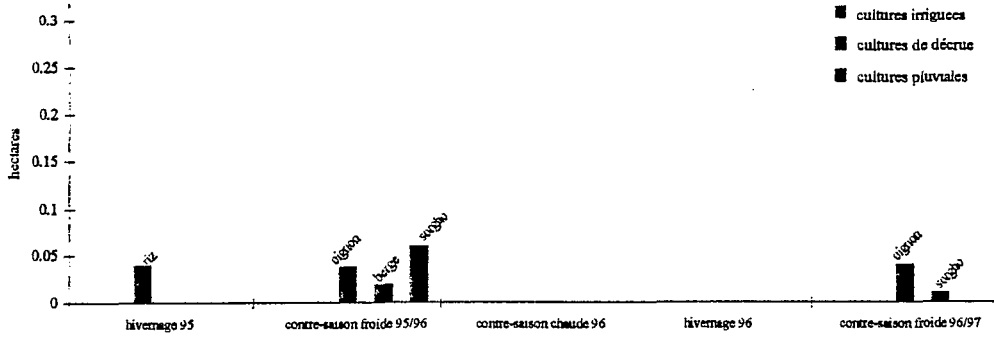


FIG. 7 - Ngaolé : Surface moyenne par personne

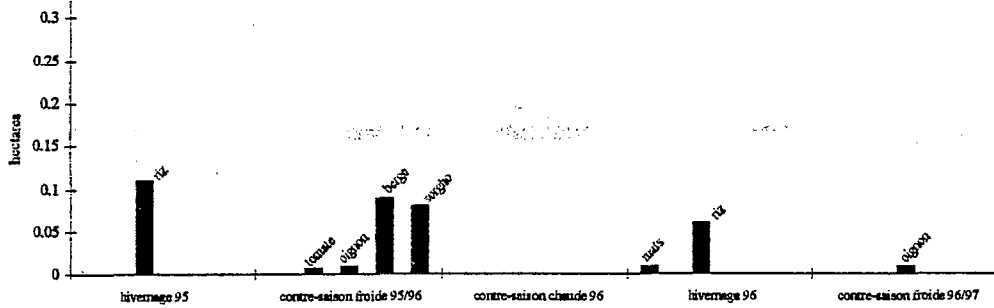


FIG. 8 - Ouro-Madiou : Surface moyenne par personne

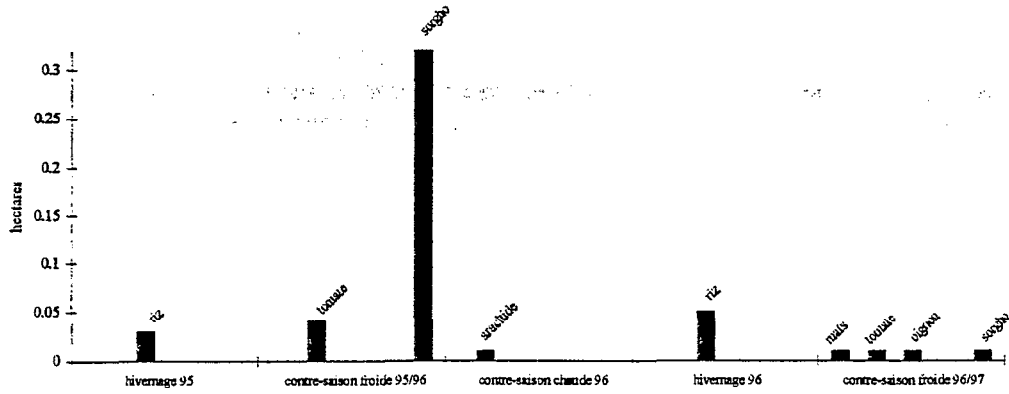


FIG. 9 - Guédé-Village : Surface moyenne par personne

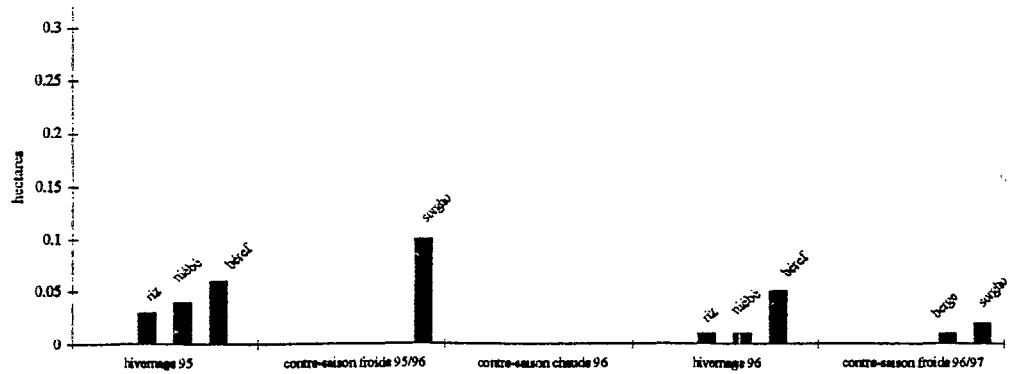


FIG. 10 - Nguendar : Surface moyenne par personne

Mais cet appui extérieur doit s'accompagner d'un programme de sensibilisation et de formation. Notamment, certains agriculteurs semblent peu conscients du changement des contextes économique, politique, voire géopolitique. La politique de désengagement de l'État, imposée par les plans d'ajustement structurel, même si elle a été brutale, semble irréversible. Une règle, de bon fonctionnement de tout système de crédit, qu'il soit étatique, privé ou mutuel, devrait ainsi être progressivement intériorisée : un emprunt se rembourse. Aussi, d'un point de vue pédagogique, si les règles d'octroi des prêts devraient être provisoirement assouplies, il nous semble peu souhaitable de passer une nouvelle fois l'éponge.

Un programme de formation devrait accompagner cette politique de relance de l'agriculture irriguée. Sans réelle transition, les organisations paysannes ont récupéré des aménagements hydro-agricoles, pour la gestion desquelles elles étaient peu préparées et dont la rentabilité reste toujours à démontrer. Les problèmes actuels de gestion, qu'elle soit technique ou financière, sont patents, ainsi que le démontre l'étude réalisée par un stagiaire, dont les conclusions sont reprises ci-dessous. Une amélioration de cette gestion s'avère indispensable.

Une gestion financière désastreuse

Nous avons encadré un étudiant du DESS d'Économie du développement de l'Université de Paris X-Nanterre. Ses travaux, menés en étroite collaboration avec le reste de l'équipe de recherche en économie, sont une première étape de notre analyse de la gestion des GIE. Ils se focalisent sur Guédé-Village, qui présente la particularité d'avoir de nombreux GIE et d'exploiter tous les types de périmètres, comme nous l'avons vu dans la première partie. Nous étendrons la méthodologie adoptée, aux organisations paysannes de nos trois autres villages.

L'étude de la gestion financière de ces dix GIE révèle tout d'abord un problème dans la répartition des rôles dans les bureaux. Les fonctions exactes de chaque membre du bureau se montrent souvent mal délimitées ou mal respectées. Plusieurs personnes détiennent les documents comptables, sans qu'une règle claire de répartition ressorte. Souvent, personne ne sait qui détient les factures, les bons CNCAS, les bordereaux de livraison ou les cahiers de pesées. Plusieurs individus conservent ces documents, sans logique évidente. Outre des conditions de stockage déplorables, il s'en suit des pertes de documents, ce qui ne semble pas inquiéter grand monde. Le spectacle d'un sac de papiers en vrac, que l'on déverse à même le sol, ne laisse pas impassible l'observateur extérieur.

Ceci ne facilite pas la reconstitution des comptes, pour les cinq dernières années. L'absence de nombreuses données, pour certaines campagnes entières, ou seulement certaines rubriques, limite l'interprétation des résultats. Outre le manque de transparence dans les comptes et quelques malversations, on observe des manipulations comptables pour alléger le déficit de certaines campagnes. Néanmoins, deux constantes se dégagent de ces comptes de campagne : la baisse alarmante des recettes des GIE et l'accroissement de l'endettement. La production des périmètres régresse, du fait de la conjonction de la régression des surfaces cultivées et de celle des rendements.

Nous avons déjà abordé ce sujet de l'endettement, mais les résultats de Guédé-Village l'illustrent de manière cruelle. Cet endettement s'avère plus ou moins grave, mais il se généralise. En fait, l'endettement des GIE ne fait que refléter celui de ses membres. Aucune mesure systématique n'est prise contre les mauvais payeurs et les dettes anciennes, absorbées parfois par les autres agriculteurs du GIE, passent souvent aux oubliettes. Aucune trace de l'endettement individuel cumulé n'existe. Selon les interviews menées par le stagiaire, certains membres justifient leur comportement par leur manque de confiance envers le bureau et, n'osant pas s'exprimer lors des assemblées générales, préfèrent manifester leur mécontentement en ne remboursant pas la totalité de leur dette. D'autres agriculteurs se disent découragés en voyant que leurs versements servent à couvrir les impayés des autres. Des producteurs endettés vendent ainsi du riz au marché hebdomadaire. Tout comme dans nos trois autres villages, des retraits de parcelles pénalisent depuis deux ans certains mauvais payeurs. Mais cette mesure ne se montre pas systématique et demeure provisoire. L'attributaire endetté peut récupérer sa parcelle, après versement des sommes dues.

La Caisse nationale de crédit agricole apparaît comme la principale victime de ce grave problème de remboursement. Cette institution ne connaît que très mal la situation financière réelle de ses clients. Le principe de solidarité des membres du GIE se montre peu efficace lorsque ces derniers sont tous endettés auprès de leur GIE. Les recours restent limités, du fait de la lenteur des procédures judiciaires et de l'absence de véritable garantie. Que ces affirmations n'alimentent pas toutefois le dogme de la sécurisation foncière par la privatisation des terres.

Aucun marché foncier n'existe dans la Vallée et les quelques transactions observées dans nos quatre villages ne se caractérisent pas par la transparence, condition pour l'émergence d'un marché véritable.

Les comptes de campagne des GIE de Guédé-Village soulignent aussi un endettement important au détriment des industries de la tomate (SOCAS et SNTI), incitant ces deux sociétés privées à ne plus accorder de livraisons d'intrants à crédit. Les engagements vis-à-vis de la COPARE (ancien Fed-PME), pour l'achat d'un tracteur et de motopompes, ne sont pas respectés également. Certains GIE restent débiteurs auprès de fournisseurs d'engrais. Nous enregistrons aussi des négociants indélicats, encaissant les bons CNCAS, puis disparaissant dans la nature sans avoir livré.

L'évaluation de l'endettement cumulé dépasse les 60 millions de F CFA pour l'ensemble des GIE de Guédé-Village. Soit plus de 30 000 F par habitant, sans tenir compte de l'endettement individuel. Au podium, trois GIE se dégagent, avec respectivement 14, 12 et 9 millions de dettes.

Une gestion technique défaillante

Ces conclusions pessimistes se retrouvent dans la gestion technique des GIE. Les observations, de notre stagiaire à Guédé-Village, montrent une mauvaise concertation dans les bureaux, ralentissant les prises de décision. Le manque de concertation s'y manifeste, le président jouant un rôle écrasant dans le processus de prise de décision. En fait, le bureau effectif se limite à deux ou trois personnes dynamiques, qui imposent souvent leurs volontés aux autres membres du bureau et à l'ensemble du GIE.

Les assemblées générales jouent rarement leur rôle et se limitent à entériner des décisions préalablement arrêtées. En fait, ces assemblées générales servent plus à divulguer les orientations déjà prises qu'à véritablement contrôler le bureau. Certains membres ne sont d'ailleurs pas avertis de la future tenue d'une réunion et les informations diffusent à partir des quelques membres présents. De toute façon, il demeure socialement mal vu de s'opposer ouvertement à un président, généralement âgé, et les quelques rares présomptueux, passant outre à cette règle, se voient rarement suivis par les autres participants du même avis.

L'organisation des campagnes agricoles pourrait facilement être améliorée, en respectant mieux les calendriers culturels. Les retards deviennent systématiques, hypothéquant souvent la récolte future. Ceux-ci s'expliquent parfois par les difficultés d'obtention d'un financement, mais la lenteur et la complexité de la préparation d'une campagne endossent la principale responsabilité. Le plus grave est qu'un décalage important se répercute sur la campagne suivante, provoquant, par cumul sur plusieurs années, des retards étonnants. Des lacunes surgissent aussi dans l'irrigation, par l'inexistence d'un tour d'eau ou par l'absence de respect de ses règles.

Nous relevons enfin un entretien insuffisant, que ce soit des aménagements eux-mêmes ou du matériel. Les canaux d'irrigation ne bénéficient d'aucune réfection, par manque de mobilisation collective ou de financement. Ou alors les interventions sont trop tardives, comme nous le constatons pour un IT de Guédé-Village lors de la contre-saison chaude 1997. L'état du matériel se trouve en harmonie. Tous les équipements fournis par les Italiens en 1989 agrémentent le paysage par les cadavres qui gisent ici ou là. Un IT a toutefois racheté un tracteur et un autre, un camion. Les nombreuses pannes de motopompes perturbent souvent le programme d'irrigation.

Agriculture irriguée et cultures de décrue

Le regain des cultures de décrue

Pendant deux années agricoles consécutives, en 1994/95 et 1995/96, le paysage de début de saison sèche se caractérise par des étendues sans fin de sorgho de décrue. Alors qu'elle était abandonnée depuis vingt ans, comment expliquer le regain d'intérêt pour cette pratique, pilier de l'agriculture avant l'introduction des aménagements hydro-agricoles. Afin de répondre à cette question et d'évaluer l'ampleur du phénomène, nous avons entrepris cette recherche ponctuelle, en collaboration avec André Lericollais, géographe Orstom.

Les cultures de décrue apparaissent en début de saison sèche, sur les terres basses de la vallée alluviale du fleuve, immergées par la crue lors de la saison des pluies. Seule l'humidité emmagasinée dans le sol assure l'approvisionnement hydrique de la plante. La régulation du régime du fleuve par le barrage de Manantali écrête les crues, limitées voire insignifiantes certaines années. Elle se conjugue à l'endiguement qui protège les aménagements hydro-agricoles, mais stérilise des zones immenses, non exploitées par la culture irriguée, mais inaccessibles à la crue. Ainsi, la cuvette de Nianga ne couvre que le dixième des 10 000 hectares endigués.

TABLEAU I
Évolution des surfaces de décrue entre 1970/71 et 1995/96
Arrondissement de Thillé-Boubakar et de Gamadji
Hectares

Unités naturelles	Surface totale	cote moyenne	décrue 70/71	décrue 95/96	Variation	Pourcentage
pna	8 600	4,2	670	100	- 570	- 85 %
pnb	8 000	3,7	1 490	1 620	130	+ 9 %
pnc	3 200	0	0	310	310	
pnd	12 000	4,9	3 615	3 320	- 295	- 8 %
pne	7 800	0	0	350	350	
pnf	17 800	5,6	1 630	4 260	2 630	+ 161 %
png	5 400	5,4	1 565	1 520	- 45	- 3 %
pnh	4 900	6	95	880	785	+ 826 %
pni	11 800	6,3	1 950	3 640	1 690	+ 87 %
pnj	3 200	6,1	770	970	200	+ 26 %
pnk	6 400	0	0	950	950	
pnl	5 600	5,6	0	110	110	
pnm	9 800	6,1	2 400	2 690	290	+ 12 %
Total Gamadji	104 500		14 185	20 720	6 535	+ 46 %
pta	3 450	2,9	500	700	200	+ 40 %
ptb	5 500	3,1	955	1 750	795	+ 83 %
ptc	2 600	0	0	100	100	
ptd	8 500	3,7	1 245	1 550	305	+ 24 %
pte	4 000	0	0	650	650	
ptf	12 300	4,2	100	950	850	+ 850 %
Total Thillé-Boubakar	36 350		2 800	5 700	2 900	+ 104%
TOTAL	140 850		16 985	26420	9 435	+ 56 %

Les crues exceptionnelles de 1994 et, surtout, de 1995 s'expliquent par la coïncidence d'une bonne pluviosité et de l'absence de retenue à Manantali, pour des travaux et des contrôles. Un survol en avion, en février 1996, de la moitié occidentale du département de Podor, couvre les deux arrondissements concernés par nos investigations des deux premières parties : ceux de Thillé-Boubakar et de Gamadji. Il permet une évaluation des surfaces de décrue, selon la même méthode que celle retenue par l'OMVS en 1970/71. L'inventaire des aires de décrue se fait par observation directe, en reportant leurs contours sur des cartes et des photos aériennes au 1/50 000^e.

Le tableau I regroupe les superficies de décrue, calculées par André Lericollais, par arrondissement et par « unité naturelle ». Ces unités naturelles reprennent celles définies en 1970 par l'OMVS et renvoient aux cartes d'exploitation de la Vallée, publiées alors par cet office. Il en ressort que les surfaces de décrue sont largement supérieures en 1995/96 à celles relevées en 1970/71 : plus de 26 000 hectares, soit plus d'une fois et demie le niveau de 1970/71. Cette étendue fait plus que doubler dans l'arrondissement de Thillé-Boubakar. Quoique moins spectaculaire en valeur relative, cette augmentation s'avère plus importante en valeur absolue dans l'arrondissement de Gamadji. La tentative d'interprétation des variations, unité naturelle par unité naturelle, n'a pas abouti, l'évolution dans certaines d'entre elles ne s'expliquant guère.

L'assolement de l'ensemble de nos quatre villages (fig. 6) montre que les surfaces de décrue occupent un peu moins des deux-tiers des superficies cultivées durant l'année agricole 1995/96 (hivernage 95, contre-saison froide 95/96, contre-saison chaude 96), soit 18 ares par personne. En fait, deux terroirs de décrue sont concernés. Tout d'abord, les berges (*falo*, pluriel *pale*) du lit majeur du fleuve et des grands marigots qui sillonnent la plaine alluviale. Un maraîchage minutieux s'y pratique : patate douce essentiellement, associée ou non à du niébé et du maïs, correspondant à 2 ares par personne. Surtout, les bassins de décantation (*kolangal*, pl. *hohalde*) du lit majeur, au-delà des bourrelets de berge. Le sorgho y règne, associé généralement à quelques pieds de niébé, sur une étendue de 16 ares par personne.

L'importance spatiale des cultures de décrue en 1995/96 se dégage indéniablement. Elle dépasse celle des cultures irriguées cette année-là, avec 7 ares par personnes : 4 ares de riz d'hivernage, 2 ares respectivement pour l'oignon et la tomate de contre-saison froide. Précisons toutefois que ces parts relatives masquent une grande diversité en matière d'intensification, que ce soit par rapport à la terre, pour les consommations intermédiaires ou pour le travail. Les cultures de décrue, particulièrement le sorgho, observent des densités faibles : de l'ordre de 8 000 pieds à l'hectare (enquête MISOES, 1962). Les rendements étaient de 1 tonne à Guédé-Chantier (MAYMARD, 1957). Nous n'avons pas fait ces mesures pour la campagne 1995/96.

Le caractère éphémère du phénomène

Comment expliquer ce succès des cultures de décrue en 1995/96 ? D'abord par le profond attachement à cette pratique culturale. Certains de nos interlocuteurs affirment même y apporter plus de soin qu'aux cultures irriguées. Les cultures de décrue ne requièrent aucun apport financier et ne nécessitent qu'un faible investissement en travail. Le risque encouru semble nul ou tout au moins acceptable. Ceci explique la poursuite des semis très tardifs, alors que les chances de récolte se montrent très aléatoires.

En fait, tout l'espace de décrue se voit exploité. Ainsi, les disparités importantes observées entre nos différents villages d'enquête ne font que rendre compte de la disponibilité en cuvettes. Guédé-Village (fig. 9) dispose d'immenses étendues, tandis que les trois autres localités n'ont que de faibles superficies, les aménagements hydro-agricoles accaparant leurs anciennes cuvettes, comme à Ngaolé (fig. 7) ou à Ouro-Madiou (fig. 9). Tandis que l'endiguement de la cuvette de Nianga neutralise une bonne part du terroir de décrue de Nguendar.

La culture dans les cuvettes de décrue constitue un biais pour actualiser, pour confirmer les droits fonciers. L'absence de culture, dans des pans entiers du terroir pendant vingt ans, risquait de laisser tomber en désuétude ces droits. C'est en fait une façon de prendre rang, en cas de futur aménagement. Aussi, une parade à une attribution à un autre agriculteur par la Communauté rurale. Les droits fonciers traduisent en effet la profonde hiérarchie qui caractérise encore la réalité *hapulaar*. Certains groupes statutaires n'ont toujours pas un accès direct à la terre et doivent passer par les familles dont ils dépendent. Ceci explique l'importance des métayages pour le sorgho de décrue dans nos enquêtes, dans une proportion bien plus élevée que pour les cultures irriguées. En effet, la hiérarchie sociale fut gommée dans l'attribution des parcelles de nombreux aménagements, le bailleur de fonds imposant souvent une égalité d'accès à l'agriculture irriguée.

La troisième raison est l'habitude des populations de la Vallée de saisir au vol toute opportunité. Ce comportement prouve une forte adaptabilité aux conditions du milieu ou du contexte économique. La difficulté d'accès au crédit, déjà évoquée, justifie enfin le succès des cultures de décrue. La régression de la culture irriguée, particulièrement le riz, qu'elle provoque, incite les populations à trouver une production à même d'assurer leur alimentation.

En fait, le sorgho de décrue entretient des relations de complémentarité et de concurrence avec les cultures irriguées, surtout le riz encore une fois. Complémentarité économique tout d'abord : outre qu'il participe à l'alimentation familiale, le sorgho génère des revenus monétaires complémentaires. Les résidus de récolte et les pieds non arrivés à maturité représentent un fourrage apprécié du bétail en pleine saison sèche. Mais aussi concurrence dans le calendrier de travail : le semis de sorgho coïncide avec la récolte de riz d'hivernage et, surtout, sa récolte correspond à la mise en place du riz de contre-saison chaude, participant à l'abandon de cette campagne en 1996.

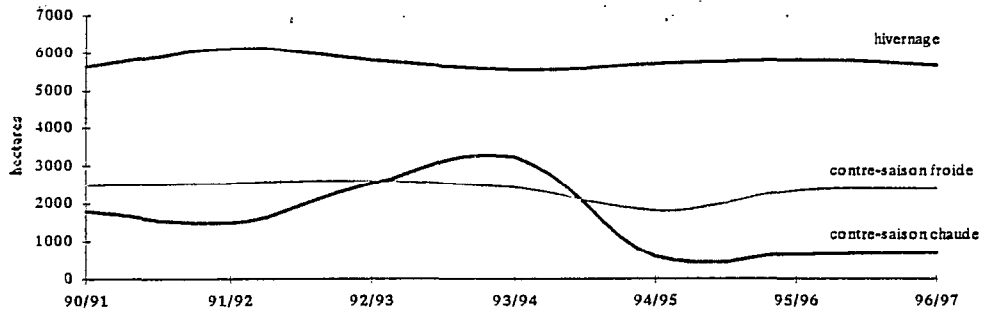


FIG. 11 - Surfaces cultivées par cycle dans les périmètres irrigués du département de Podor

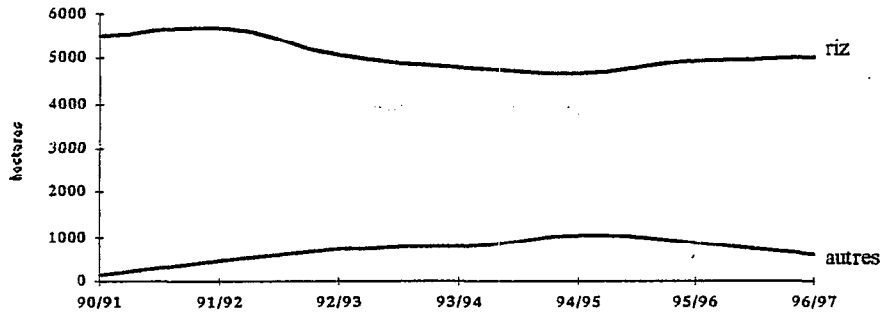


FIG. 12 - Cultures d'hivernage des périmètres irrigués du département de Podor

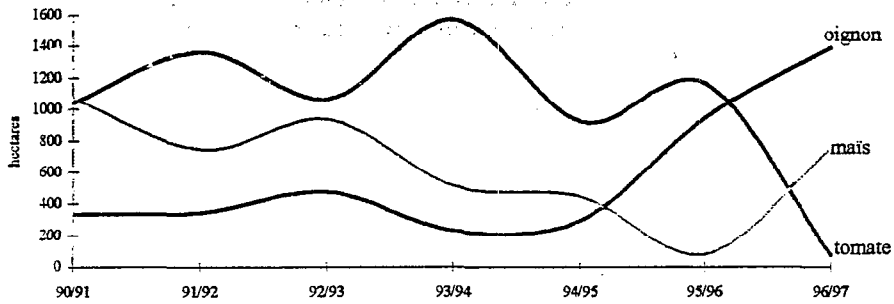


FIG. 13 - Cultures de contre-saison froide dans le département de Podor

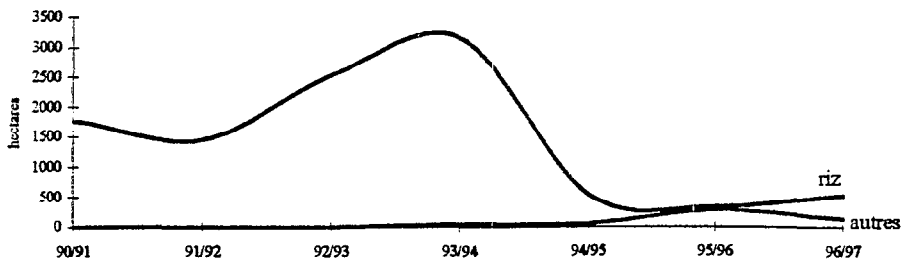


FIG. 14 - Cultures de contre-saison chaude dans le département de Podor

Mais la figure 6 illustre de manière très significative le brutal abandon des cultures de décrue, l'année agricole suivante. Les superficies deviennent ridicules, chutant dans nos quatre villages à 1 are par personne pour le sorgho et à 0,4 are pour les cultures de berge. La situation est la même dans chacune de ces quatre localités (fig. 7 à 10). En 1996, la pluviosité se montre moins favorable et, surtout, une bonne partie de la crue est absorbée par le barrage de Manantali. C'est tout juste si le fleuve sort de son lit mineur.

Le caractère exceptionnel de ce phénomène ne lui ôte pas son intérêt, en prouvant l'attrait que présentent les cultures de décrue. Cette situation relance aussi le débat sur la troisième vocation du barrage de Manantali : la création de crues artificielles. Si cette perspective semble alléchante, soyons conscient que ce lâcher, en début de saison des pluies, alors que la pluviosité future reste hypothétique, entre fortement en concurrence avec la production d'électricité. Une fois les installations hydro-électriques enfin installées, le choix sera rude entre une énergie rentable, alors que la pénurie électrique nécessite actuellement des coupures tournante à Dakar en période chaude. La production éminemment extensive du sorgho risque de ne pas peser lourd dans la balance, d'autant que le Mali n'est pas concerné.

Que ceci ne vienne pas alimenter l'argumentaire des supporters de l'intensification de la culture de sorgho de décrue. Certes des aménagements légers permettraient de faciliter la pénétration de la crue, d'en allonger la durée et d'en accélérer la vidange. Des apports d'engrais, des semences sélectionnées amélioreraient aussi les piètres performances. Mais ces investissements briseraient la logique qui soutend le succès de cette pratique culturale, par les problèmes de coût, de risque financier, de gestion collective et d'entretien qu'ils introduiraient.

Le recul de l'agriculture irriguée

Les cultures de décrue influencent donc l'agriculture irriguée, par la concurrence qu'elles exercent sur la contre-saison chaude 1996. Mais d'autres facteurs entrent en jeu. En 1996/97, alors que les cultures de décrue retrouvent le statut auquel elles furent confinées pendant vingt ans, les superficies irriguées ne décollent pas (fig. 6). Au blocage inquiétant de l'endettement s'ajoute le mauvais entretien des aménagements hydro-agricoles, signalé à Guédé-Village, et le vieillissement des pompes.

Cette tendance se retrouve dans l'ensemble du département de Podor, comme le montre la base Saed. En collaboration avec cette structure d'encadrement, nous avons laborieusement contrôlé et corrigé cette base de données. Nous disposons ainsi maintenant d'un historique, de l'hivernage 1990 à la contre-saison chaude 1996/97, de chaque périmètre du département de Podor, avec précision de la superficie par culture pour chaque campagne. Nous ne présenterons ici que les évolutions pour l'ensemble de ce département.

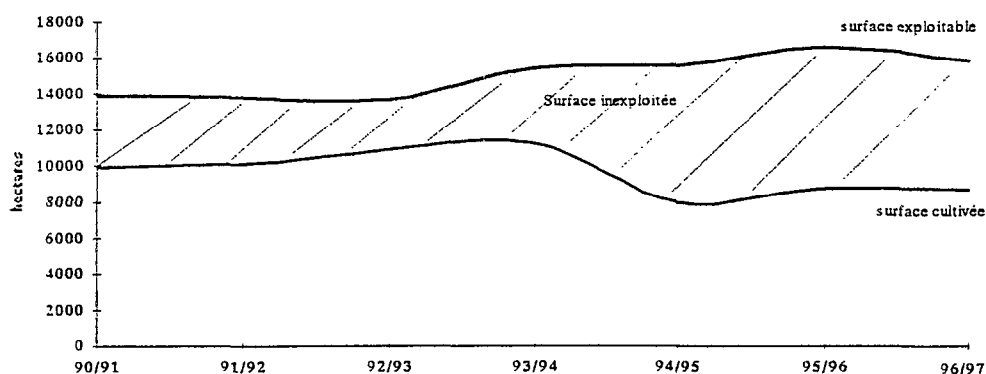


FIG. 15 - Evolution des surfaces cultivées et exploitables des périmètres irrigués du département de Podor

Après une lente progression, la surface cultivée des périmètres irrigués régresse depuis 1994/95, puis se stabilise (fig. 15). En fait, il s'agit de la surface cumulée, les parcelles en double culture se voyant comptabilisées deux fois. Dans le même temps, la surface exploitable de ces mêmes aménagements n'évolue guère. Il en découle un

accroissement de la surface inexploitée (fig. 15) et, par ricochet, une baisse de l'intensité culturale (fig. 16). Cette dernière équivaut au quotient de la surface cumulée sur la surface exploitable. Globalement, les périmètres servent donc moins d'une fois par an. Le sommet se situe en 1992/93, avec un coefficient de 0,79. Cette valeur décline en deux ans, pour atteindre 0,51. Concrètement, cela veut dire qu'une parcelle n'est exploitée qu'une année sur deux en moyenne. Heureusement, la tendance s'inverse les deux années suivantes, mais bien timidement.

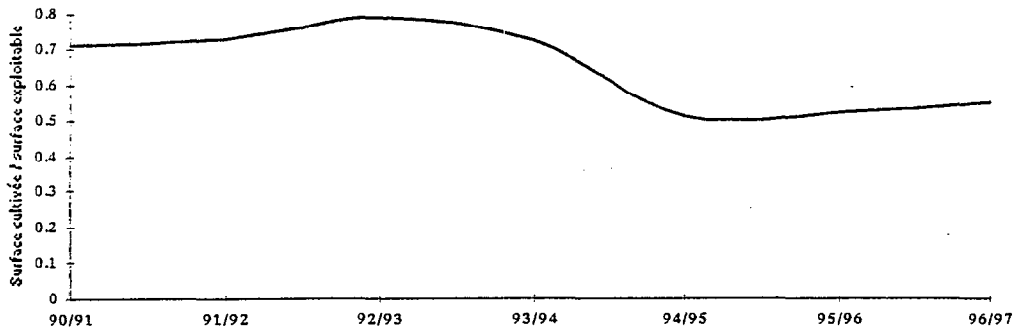


FIG. 16 - Evolution de l'intensité culturale dans les périmètres irrigués du département de Podor

La quasi-disparition de la double culture, par abandon de la contre-saison chaude (fig. 11), endosse la responsabilité du fléchissement de cet indicateur de performance. En effet, les surfaces d'hivernage et de contre-saison froide demeurent assez stables, avec même une légère progression pour la contre-saison froide depuis deux ans. Cette absence de double culture se montre lourde de conséquences pour le futur. En matière d'irrigation avec aménagement coûteux, on ne peut parler d'intensification avec un seul cycle de culture par an. La double culture représente une condition nécessaire, non suffisante certes, à une rentabilisation financière des investissements. On peut considérer que celle-ci ne constitue pas un objectif en soi, mais cessons de parler d'intensification et de rentabilité financière dans un tel contexte. D'autres critères de performances conviennent mieux alors. Nous proposons celui de « rentabilité sociale ».

Le riz pâtit le plus du recul des cultures irriguées (fig. 17). Ce résultat provient encore une fois de l'abandon de la contre-saison chaude, les surfaces d'hivernage demeurant assez stables. Il est vrai que cette céréale était la seule production de cette campagne (fig. 14). Les rendements rizicoles ne paraissant pas grimper, dans une hypothèse optimiste de leur stabilité depuis 1993/94, il s'en suit une baisse de la production rizicole dans le département de Podor, ce qui va à l'encontre de l'objectif d'autosuffisance alimentaire.

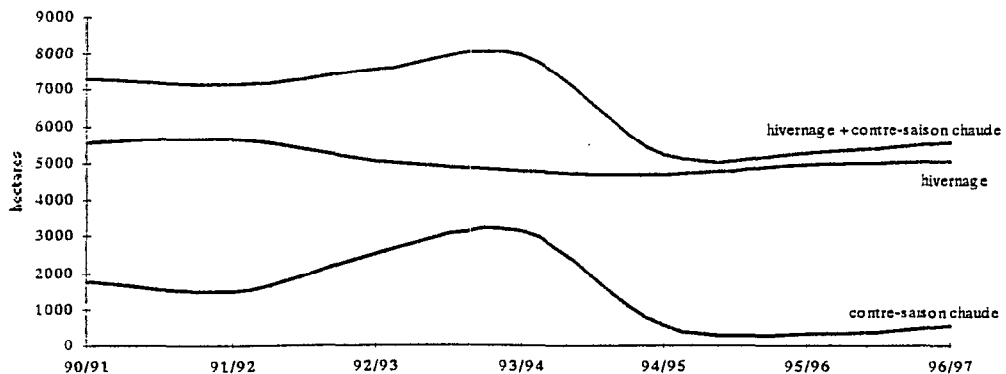


FIG. 17 - Surfaces de riz dans le département de Podor

Seules les cultures de contre-saison froide tiennent le coup (fig. 11). L'oignon fait une percée depuis deux ans (fig. 13). Après un déclin régulier, le maïs redémarre cette année, profitant de l'effondrement de la tomate. Sans

cet événement exceptionnel, les cultures de contre-saison froide progresseraient de manière honorable. Ce désintéressement pour la tomate provient de la partie de bras de fer entre les usiniers (SOCAS, SNTI) et les représentants de la profession agricole, dans un contexte préélectoral, propice aux surenchères. Les négociations sur le prix d'achat achoppèrent et rares sont les GIE poursuivant cette spéculation en 1996/97. La précocité et le ton des négociations au sein de l'interprofession augure de la reprise de cette culture lors de la contre-saison froide 1997/98. Tout au moins si l'endettement ne fait pas encore des siennes. Les usiniers, qui assuraient jusqu'ici la livraison à crédit des intrants et du gas-oil, se dégagent de cette fonction essentielle et renvoient en touche sur la Caisse du crédit agricole. Que se passera-t-il pour les très nombreux GIE endettés pour la riziculture ? L'endettement et l'accès au crédit, resurgissent encore...

Publications

LE ROY (X.), 1997. - *Économies familiales, organisations paysannes et crédit dans la vallée du fleuve Sénégal : programme de recherche.*

LE ROY (X.), 1997. - *La place des cultures de décrue dans les systèmes de production irrigués.*

LE ROY (X.), FOFANA (M.B.), KANE (M.), 1997. - *Historique des périmètres irrigués du département de Podor.*

LE ROY (X.), KANE (M.), LY (M.), YERO (B.), SY (M.), 1997. - *Périmètres irrigués de Ngaolé, Ouro-Madiou, Guédé-Village et Nguendar : attributaires et mode d'acquisition ; exploitants, cultures et surfaces par campagne.*

LE ROY (X.), LY (M.), KANE (M.), 1997. - *Recensement socio-démo-agricole des unités économiques de Ngaolé.*

LE ROY (X.), LY (M.), KANE (M.), 1997. - *Recensement socio-démo-agricole des unités économiques de Ouro-Madiou.*

LE ROY (X.), YERO (B.), KANE (M.), 1997. - *Recensement socio-démo-agricole des unités économiques de Guédé-Village.*

LE ROY (X.), SY (M.), KANE (M.), 1997. - *Recensement socio-démo-agricole des unités économiques de Nguendar.*

VECLIN (Th.), 1997. - *Gestions financière et technique des GIE de producteurs agricoles à Guédé-Village dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal.* Rapport de stage, DESS Analyse économique et stratégies du développement, Université Paris X-Nanterre.

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

Rap/Rech/N°4

Avril - Mai, 1997

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 :

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

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

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

$C(h) = d\theta/dh$ 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 antérieures (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.

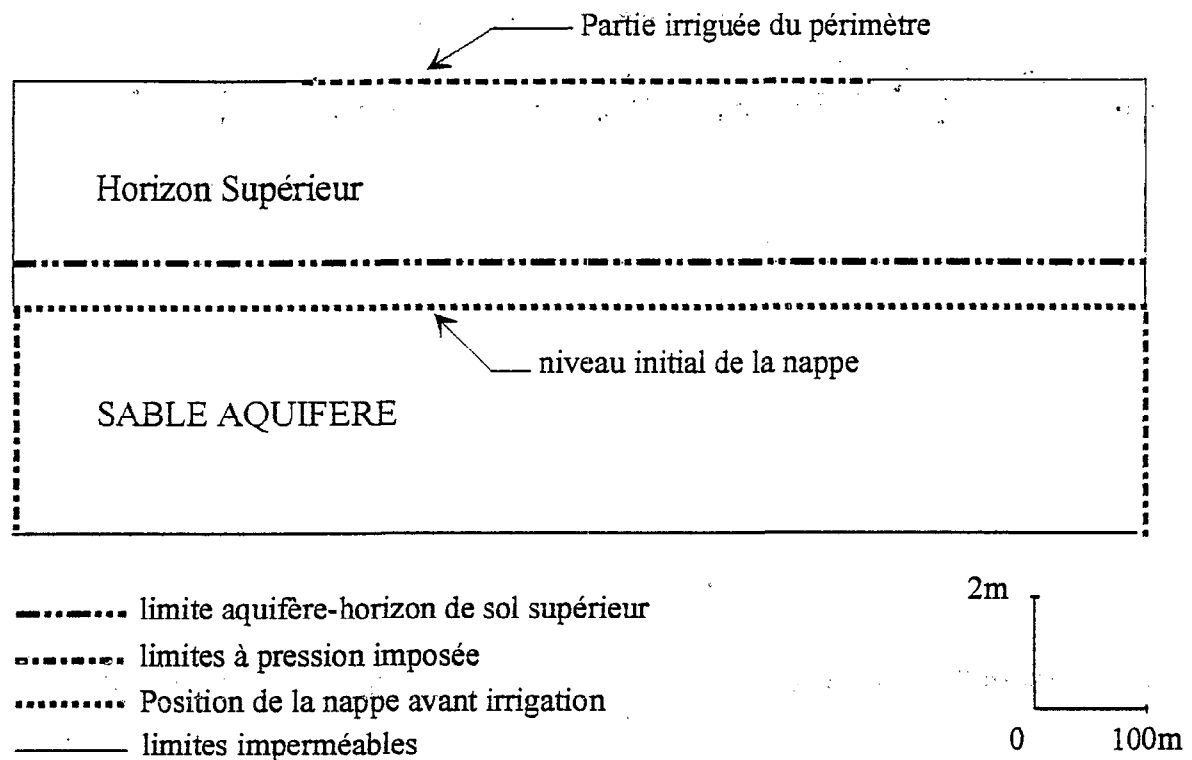


Figure 1 : *Domaine de simulation et conditions aux limites : transect simulé pour un PIV de 20 hectares et de forme rectangulaire ayant 500 m de longueur et 400 m de largeur.*

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.

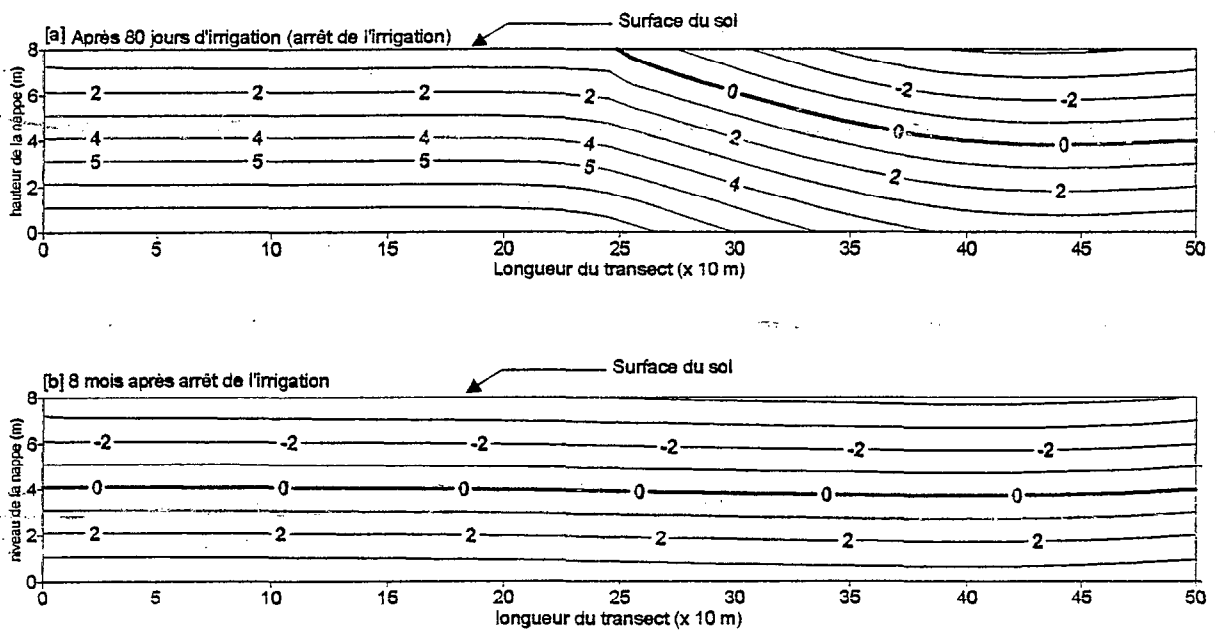


Figure 2 : Position de la nappe à l'arrêt de l'irrigation [a]; et 8 mois après l'arrêt de l'irrigation [b], l'isovaleur de pression égale à 0 correspond à la surface de la nappe.

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

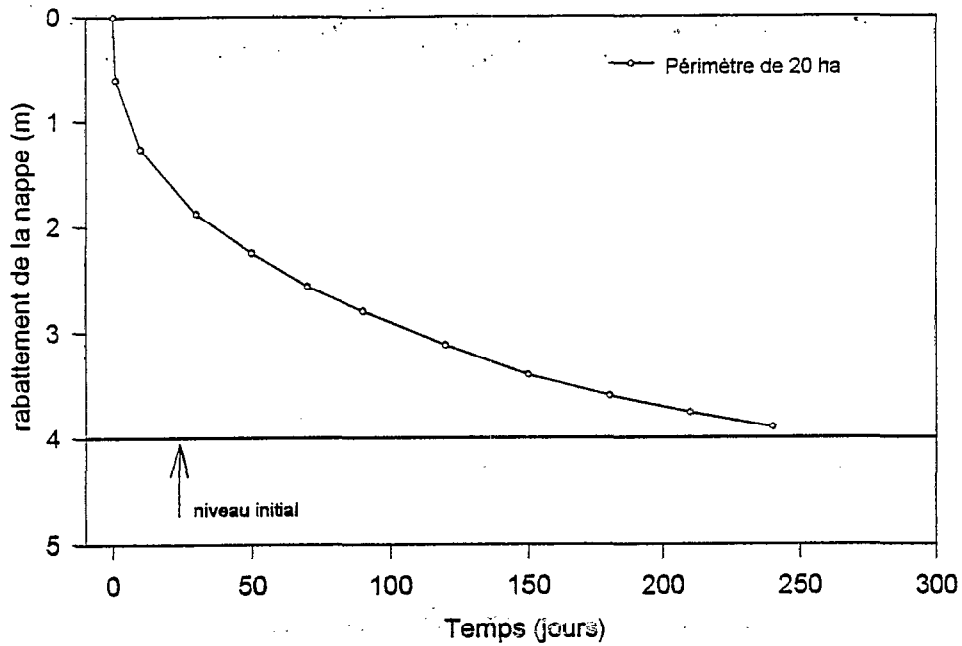


Figure 3 : rabattement de la nappe dans le temps à l'arrêt de l'irrigation

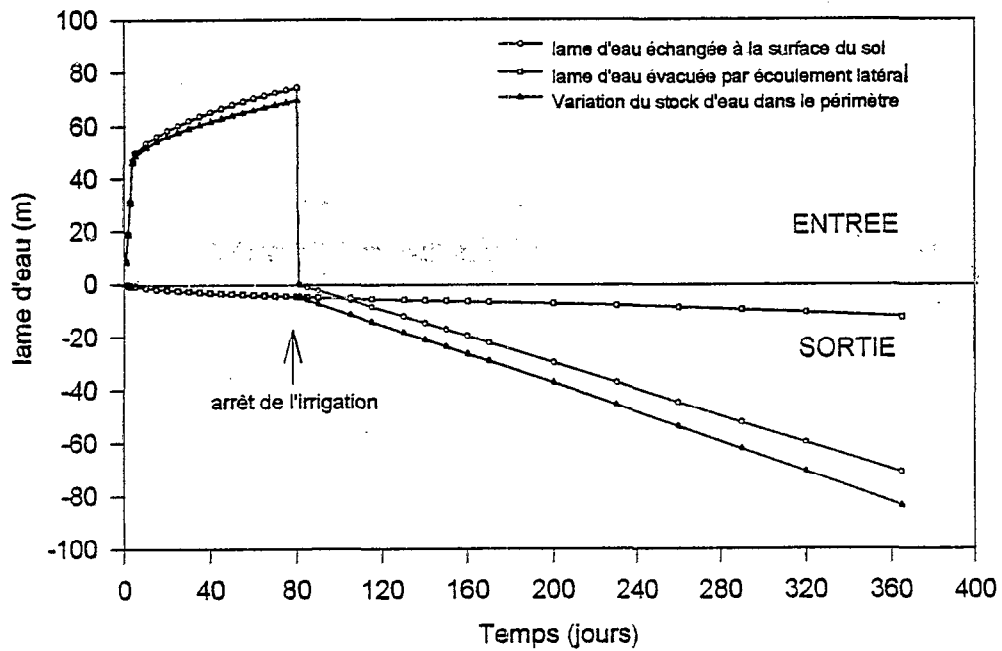


Figure 4 : Evolution des différentes lames d'eau échangées à travers le périmètre pour une riziculture simple sur un fondé.

- 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.

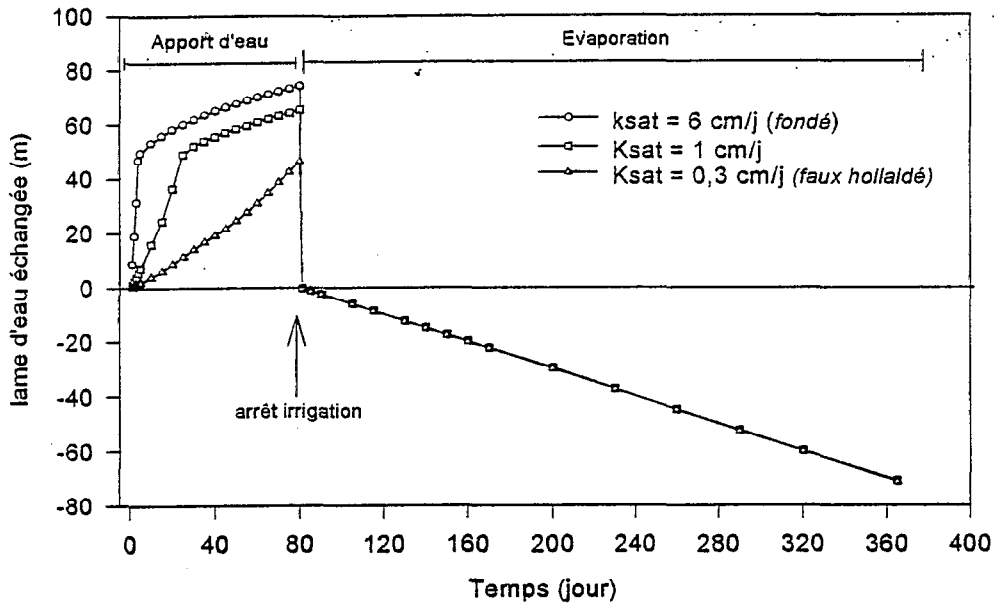


Figure 5 : Evolution de la lame d'eau échangée à travers le périmètre en fonction de la perméabilité de l'horizon de sol supérieur.

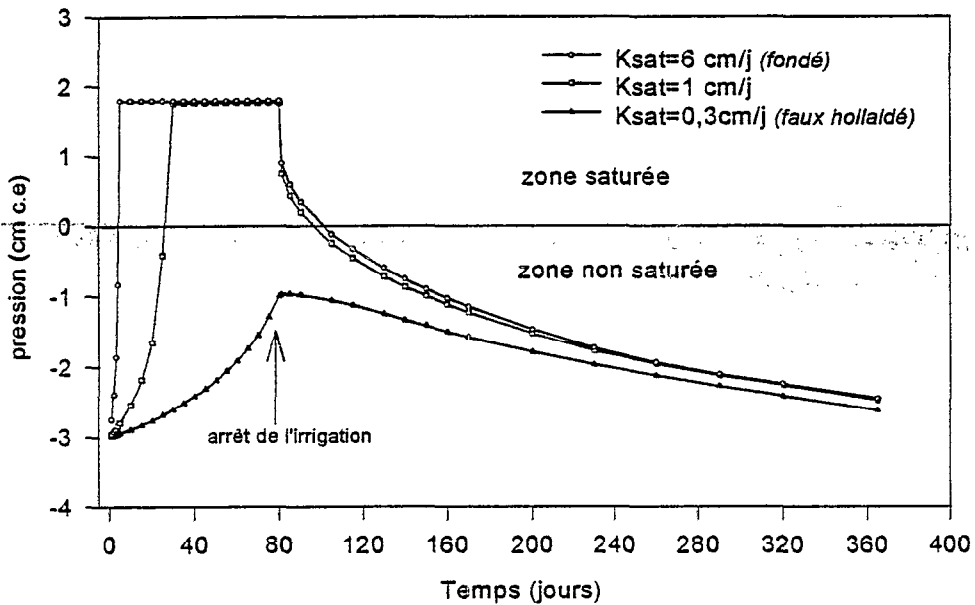


Figure 6 : Evolution de la pression à 1,70 m de profondeur en fonction de la perméabilité de l'horizon de sol supérieur.

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).

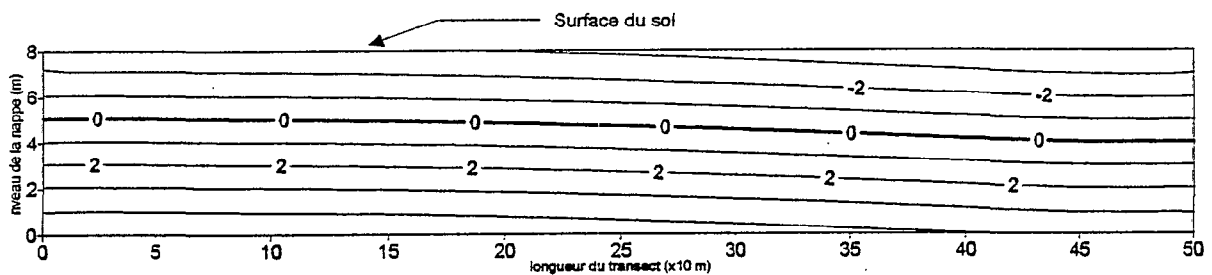


Figure 7 : Position du niveau de la nappe 3 mois et demi après l'arrêt de l'irrigation : c'est la situation à la veille de la seconde culture.

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 figure 8). Ce pendant nous observons une humidification des horizons supérieurs pendant la période d'irrigation.

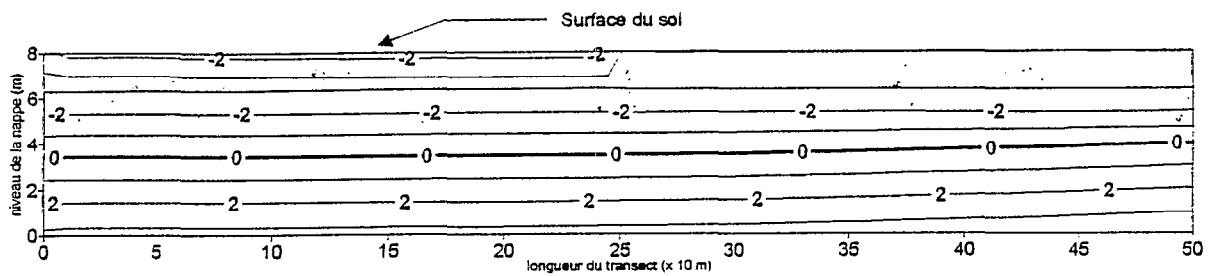


Figure 8 : Essai de simulation sur du sol de type hollaldé, le front d'humidité n'atteint pas la nappe.

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.

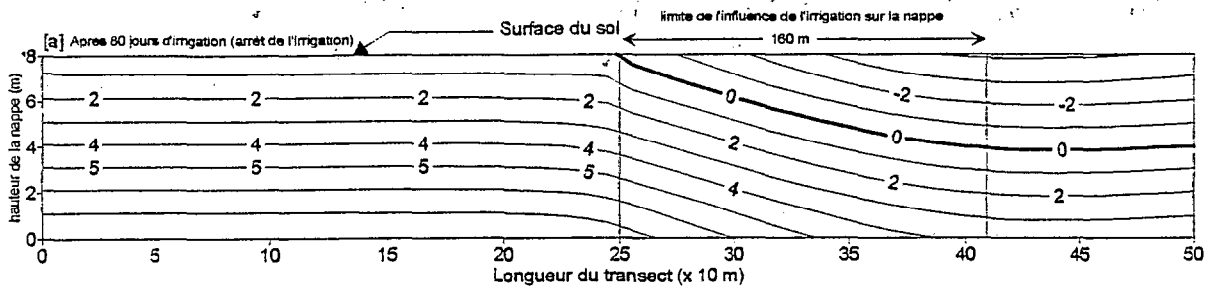


Figure 9 : Limite de l'extension latérale de l'influence des eaux d'irrigation sur le niveau de la nappe pour une riziculture sur du sol de type fondé.

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 négligeables et laisse supposer que la distance choisie est acceptable comme distance inter-périmètres.

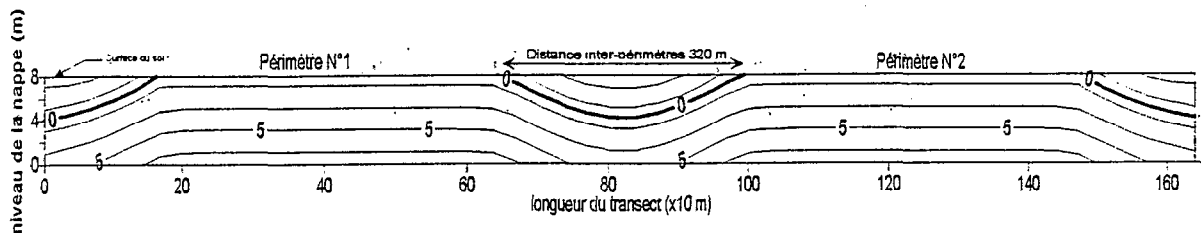


Figure 10 : position de la nappe à l'arrêt de l'irrigation pour deux périmètres voisins dans lesquels nous avons une riziculture inondée, les périmètres étant irrigués en même temps.

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.

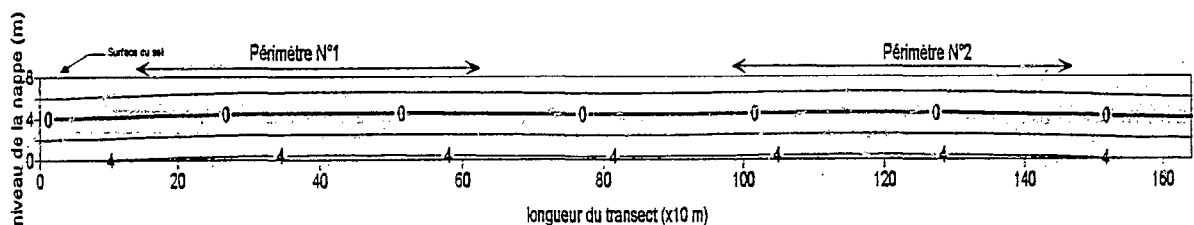


Figure 11 : position de la nappe 8 mois après arrêt de l'irrigation au niveau de deux périmètres voisins.

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.

Nous pouvons donc en déduire que l'existence des grands aménagements (> 500 hectares) peut mener à une remontée de nappe généralisée conduisant à un engorgement continu des sols. Ceci s'explique par le fait que plus la taille du périmètre est grande plus les volumes d'eau apportés à la nappe sont importants. Si l'aquifère n'est pas assez perméable pour permettre des transferts latéraux importants, ou si les limites naturelles (cours d'eau) sont proches et en relation directe avec la nappe, il va de soi que l'eau arrivant à la nappe s'accumule et que cette dernière devient affleurante. Ce cas d'une remontée généralisée des nappes est observée au niveau de la cuvette de Nianga dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal.

Eviter l'existence de grands aménagements devient alors un impératif pour ne pas faire remonter la nappe d'une manière générale. Il est alors, suivant les résultats de l'étude, souhaitable de procéder par de petits aménagements de types PIV séparés par une distance inter-périmètres suffisante pour éviter l'engorgement complet des sols cultivés.

4.4. Influence de la taille des aménagements sur le rabattement de la nappe.

L'influence de la taille des aménagements sur le rabattement de la nappe se traduit par une plus ou moins grande difficulté par l'aquifère à évacuer par des écoulements latéraux l'eau provenant des infiltrations profondes. Les limites de la superficie aménagée étant fixes (limites naturelles), nous essayerons de simuler, l'évolution du rabattement de la nappe à l'arrêt de l'irrigation suivant les tailles des périmètres. Nous avons considéré ainsi 4 périmètres dont le premier est un carré de 16 hectares avec 400 m de côté et les trois autres rectangulaires de largeur 400 m sur une longueur de 500 m, 600 m et 700 m soit des périmètres de 20 ha, 24 ha et 28 ha. Les résultats illustrés à travers la figure 12 ci-dessous montrent l'influence de la taille du périmètre sur le rabattement de la nappe, celui-ci étant très peu différent suivant les tailles de périmètres choisies. Seulement, on constate qu'à partir d'une taille de périmètre égale à 28 hectares, l'engorgement du sol devient très important et le rabattement de la nappe est fortement influencé par la limite naturelle imposée lors des simulations et représentées ici par la charge hydraulique imposée à droite du domaine (voir figure 1). Egalement la distance entre le périmètre et la limite latérale (150 m pour le périmètre de 28 ha), est inférieure à la limite d'extension latérale de l'influence des eaux d'irrigation sur le niveau de la nappe estimée plus haut (§ 4.3.) à 160 m.

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).

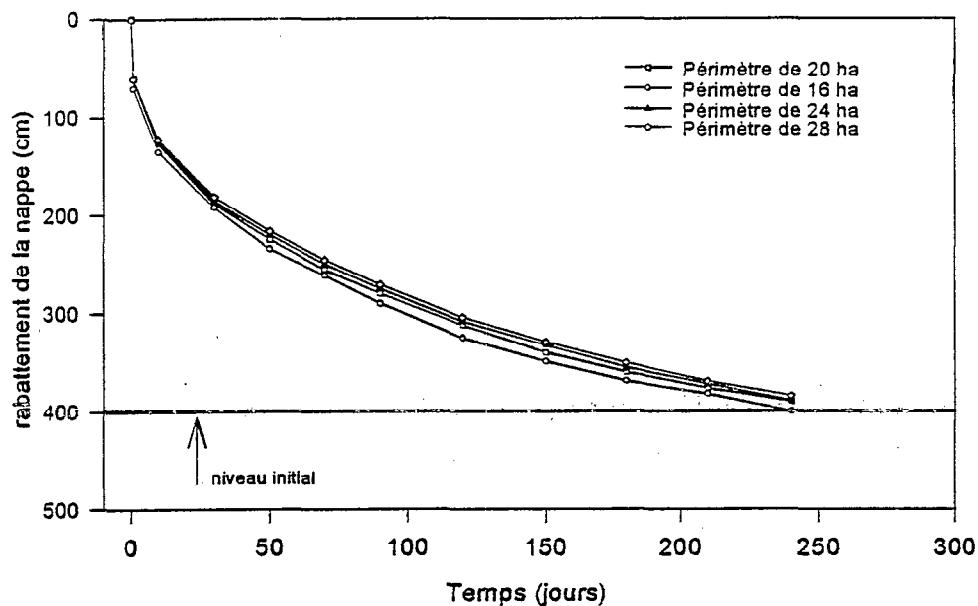


Figure 12 : Evolution du rabattement de la nappe suivant la taille des périmètres.

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 avale 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 119,5cm/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.

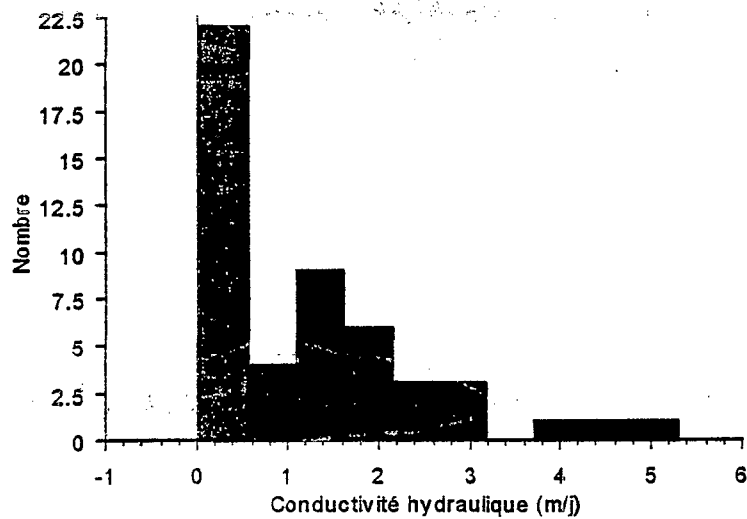


Figure 13 : Histogramme des valeurs de conductivité hydraulique

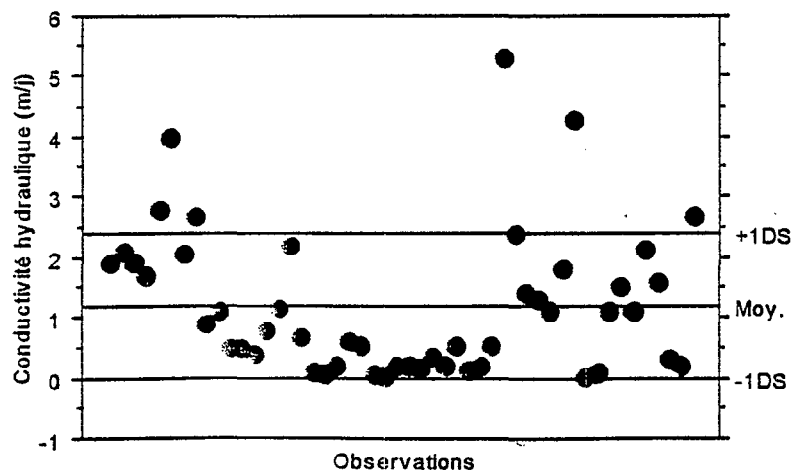


Figure 14 : Nuage de points univarié

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.

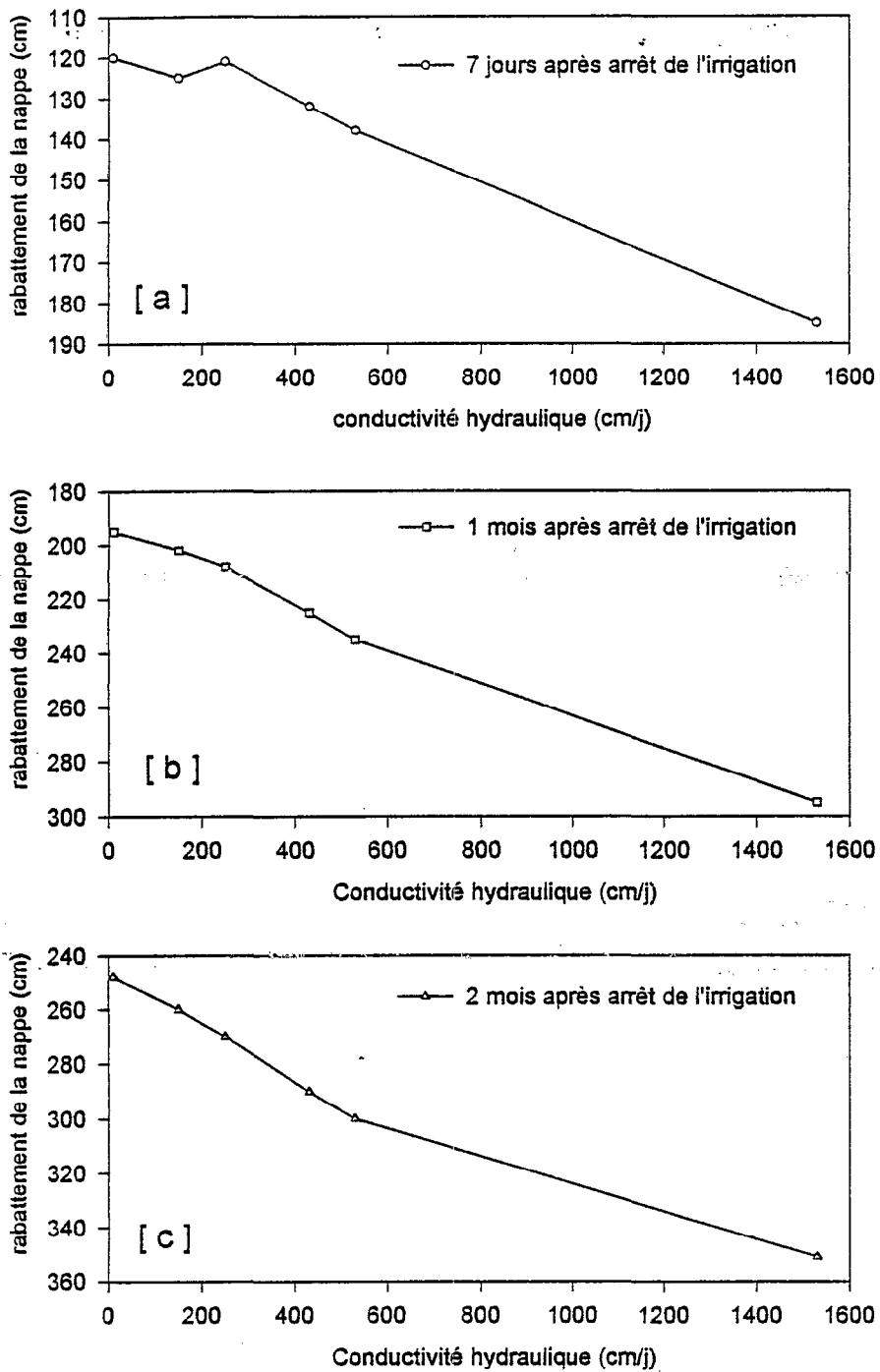


Figure 15 : Evolution du rabattement de la nappe avec la conductivité hydraulique de l'aquifère : [a] 7 jours ; [b] ; 1 mois et [c] ; 2 mois après arrêt de l'irrigation

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.

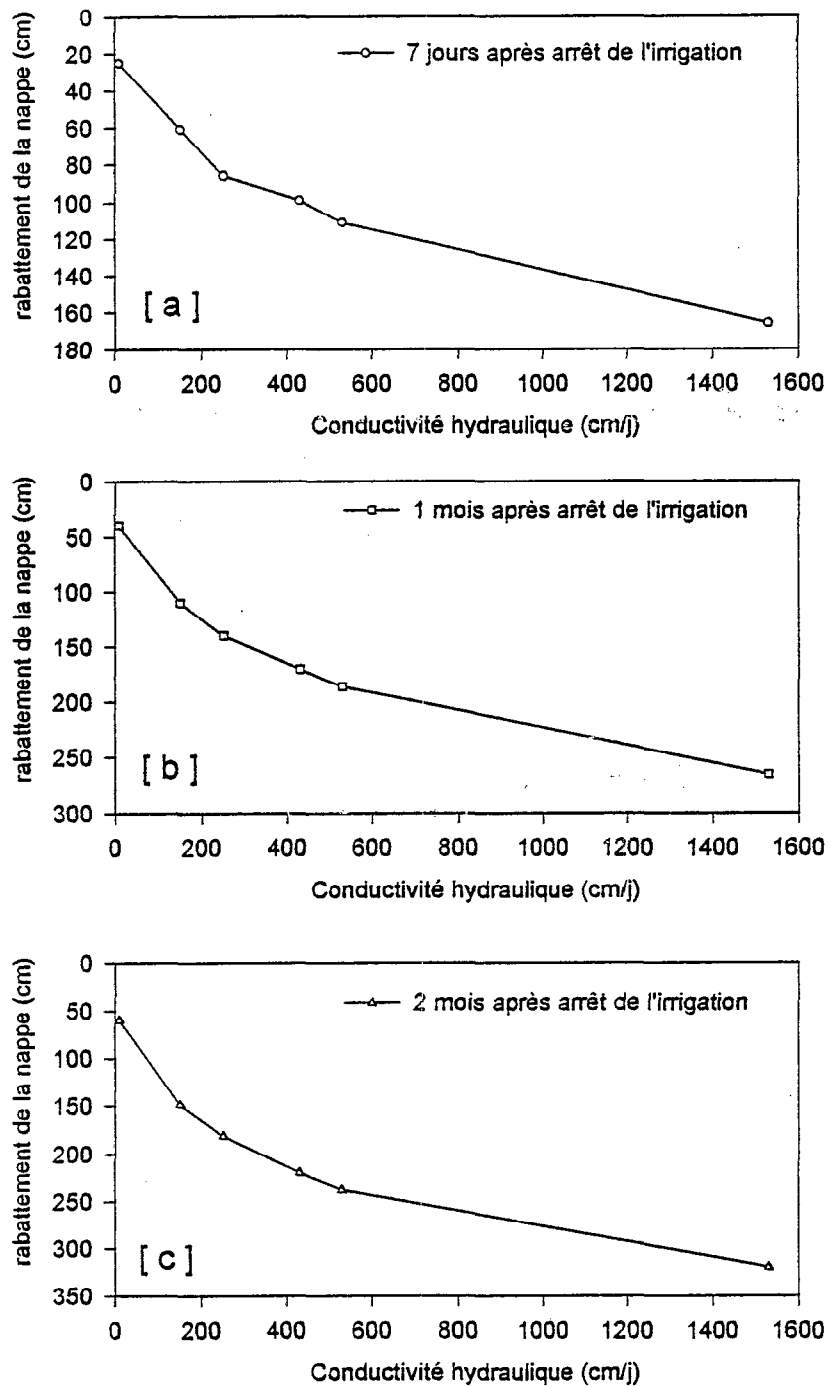


Figure 16 : Evolution du rabattement non influencé de la nappe avec la conductivité hydraulique de l'aquifère: [a] 7 jours ; [b] ; 1 mois et [c] ; 2 mois après arrêt de l'irrigation.

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).

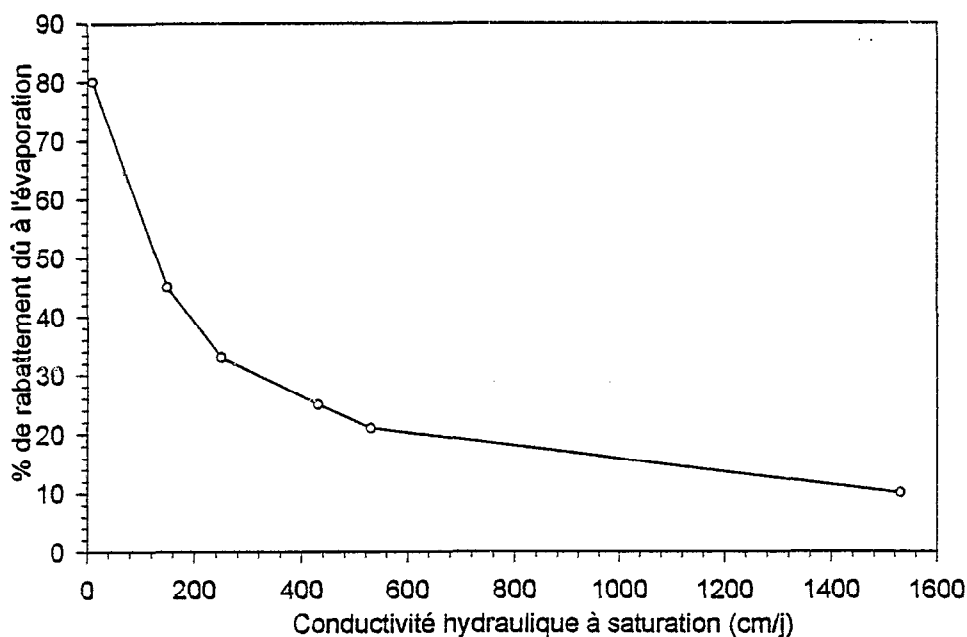


Figure 17 : Evolution du pourcentage de rabattement dû à l'évaporation

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).

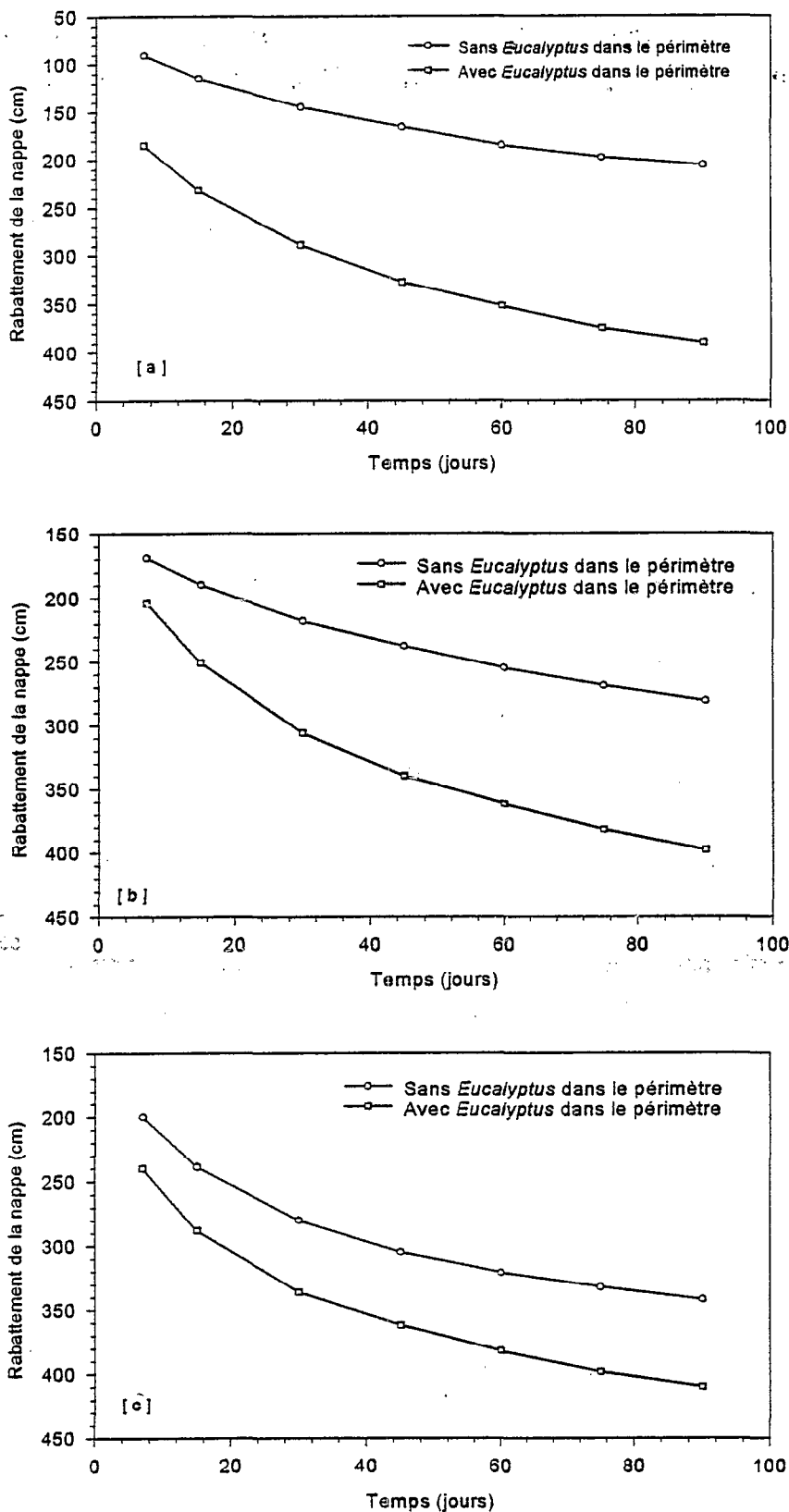


Figure 18 : Evolution comparée du rabattement de la nappe à l'arrêt de l'irrigation avec ou sans présence d'Eucalyptus dans le périmètre et pour différentes valeurs de perméabilité (Ks) pour l'aquifère : [a], Ks= 200 cm/j, [b], Ks= 530 cm/j et [c], Ks= 1530 cm/j.

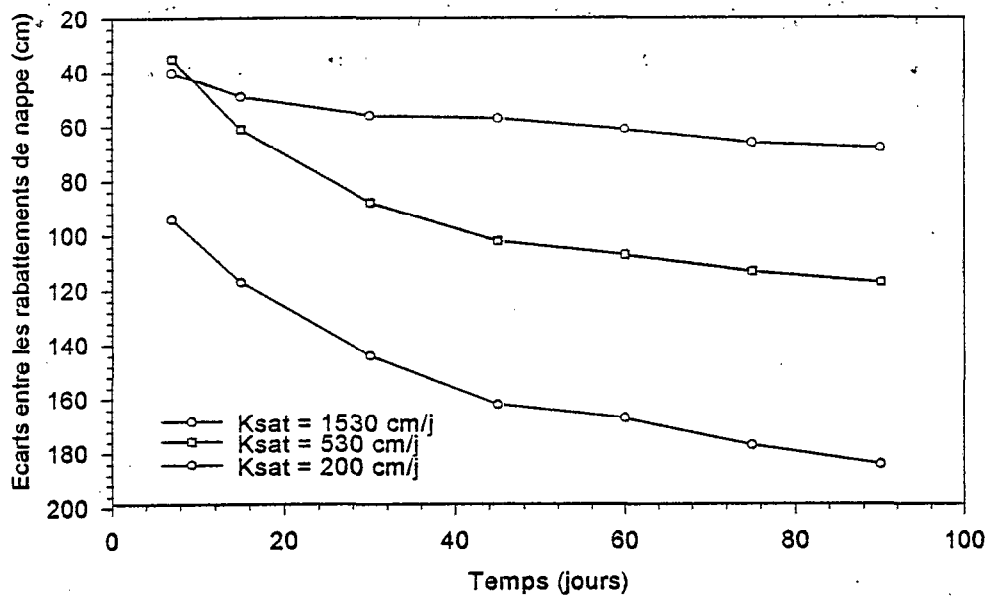


Figure 19 : Evolution dans le temps de l'écart des rabattements de la nappe avec ou sans présence d'Eucalyptus dans le périmètre.

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.

Annexes

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

Matériaux	θ_r [%]	θ_s [%]	α [cm^{-1}]	n [-]	K_s [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 [-]	K_s [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, Wagenningen, 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], $K_s = 200 \text{ cm/j}$, [b], $K_s = 530 \text{ cm/j}$ et [c], $K_s = 1530 \text{ cm/j}$.
- Figure 19 : Evolution dans le temps de l'écart des rabattements de la nappe avec ou sans présence d'Eucalyptus dans le périmètre.

ANNEXE 2

Modélisation du fonctionnement hydro-salin de périmètres irrigués dans la vallée du fleuve Sénégal

Claude HAMMECKER et Rokhaya SAMBA DIENE
ORSTOM-Pédologie Centre de Dakar

Rap/Rech/N°4

Avril - Mai, 1997

Modélisation du fonctionnement hydro-salin de périmètres irrigués dans la vallée du fleuve Sénégal

Claude HAMMECKER et Rokhaya SAMBA DIENE

1. Introduction.

En complément des études de simulation purement hydrodynamique modélisant la recharge des nappes, leur vitesse de rabattement et l'influence du nombre de parcelles irriguées, cette étude prend en compte le transfert des éléments dissous et l'évolution chimique du sol et des solutions lors de leur transfert dans le sol.

Des suivis de terrains des transferts hydro-salins ont été réalisés pendant plus de deux ans sur plusieurs sites de la vallée : N'Diaye dans le delta, Fanaye dans la moyenne vallée et Donaye sur l'Ile à Morphil dans la région de Podor.

Grâce à ces suivis il a été possible d'analyser la dynamique saline de ces sites lors de leur mise en culture qui a pu être comparée aux résultats de modèles numériques simulant les transferts de sels et de solutés dans les sols ainsi que les équilibres chimiques. Par ailleurs la modélisation numérique, lorsqu'elle est validée sur de courtes périodes pour lesquelles on peut la confronter à des résultats expérimentaux, peut également servir d'outil de prévision de l'évolution de la chimie du sol et des solutions sur des échelles de temps plus longues (décennie).

2. Principe de la modélisation et utilisation du modèle LEACHM ©

La modélisation mathématique des transferts d'eau et de solutés est maintenant largement utilisée en science du sol. Elle est basée sur plusieurs relations mathématiques décrivant au mieux les processus physiques et chimiques impliqués.

- Pour le transfert de l'eau dans les milieux poreux non saturés (c'est le cas des sols) c'est l'équation de Richards qui décrit le mieux le phénomène :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] - U(z, t)$$

où:

θ	teneur en eau	K	conductivité hydraulique
t	temps	U	terme source (prélèvement d'eau par les plantes)
z	profondeur	H	potentiel matriciel

- Pour le transfert des solutés dans les milieux poreux on utilise les équations de convection-diffusion en considérant qu'il n'y a pas d'adsorption, ni de volatilisation de certains éléments chimiques :

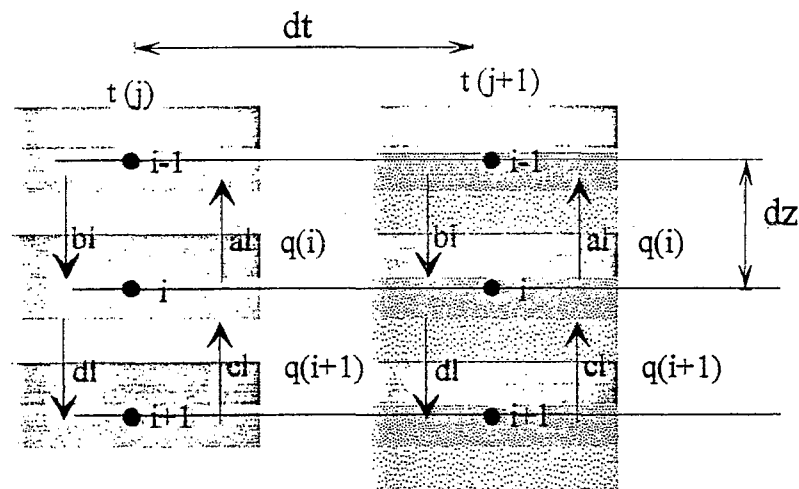
$$\frac{\partial C_L}{\partial t} \theta = \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta \cdot D(\theta, q) \frac{\partial C_L}{\partial z} - q C_L \right]$$

où :

C_L	concentration de la solution en différents éléments dissous	θ	teneur en eau
t	temps	$D(\theta, q)$	coefficient de « diffusion » apparente
z	profondeur	$q C_L$	flux de la solution

$D(\theta, q)$ est un terme global qui renferme le coefficient de diffusion moléculaire et le coefficient de dispersion mécanique.

De par la complexité de ces équations différentielles, il n'existe pas de solutions analytiques. Ces équations sont donc résolues numériquement par la méthode des différences finies en discrétisant le temps et l'espace en intervalles suffisamment petits pour minimiser les erreurs dues à cette méthode de calcul.



- La concentration et l'activité des différentes espèces chimiques est recalculée dans chaque intervalle dz . Les interactions entre la solution et les cations échangeables fixés à la surface des minéraux argileux, sont ensuite calculées à partir de l'équation de Gapon :

$$K_G = \frac{(M^{m+})^{1/m} \cdot XN_{1..n}}{(N^{n+})^{1/n} \cdot XM_{1..m}}$$

où :

K_G coefficient de sélectivité entre les m valence du cation M
cations M et N

(M) activité du cation M en solution XM quantité de M fixé sur la surface
minérale

Pour cette étude 4 cations différents et donc 6 coefficients de sélectivité, ont été considérés :

Ca, Mg, Na et K

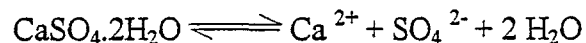
K_{Na-Ca} , K_{Na-K} , K_{Na-Mg} , K_{Ca-Mg} , K_{Ca-K} , K_{Mg-K} .

Dans les rapports précédents l'importance de la nature des cations adsorbés à la surface des minéraux argileux a déjà été évoquée. Pour résumer, c'est la quantité de sodium adsorbée sur le complexe d'échange qui est déterminante sur la qualité structurale du sol. En effet le sodium a la propriété de disperser les argiles ce qui a pour conséquence l'effondrement de la structure du sol qui devient alors « incultivable ». Ce phénomène, associé à l'alcalinisation, est appelé la sodisation. C'est pourquoi on suit particulièrement la proportion de sodium échangeable sur les argiles (ESP) :

$$ESP = X_{Na} \times 100 / (X_{Ca} + X_{Mg} + X_{Na} + X_K)$$

- L'état de saturation de la solution est testé par rapport à différents minéraux susceptibles de précipiter ou de se dissoudre dans le profil étudié. Pour ceci on compare le produit de solubilité K_{min} du minéral testé, au produit de ionique Q_{min} :

pour chaque minéral, comme pour le Gypse par exemple, on a une équation de dissociation :



avec un produit de solubilité connu pour une température donnée : $K_{gypse} = 1.024 \cdot 10^{-2}$ à 25°C

On calcule alors le produit ionique à partir des activités des différents ions en solution

$$Q_{gypse} = \frac{(Ca^{2+}) \cdot (SO_4^{2-}) \cdot (H_2O)^2}{(CaSO_4 \cdot 2H_2O)}$$

et on le compare au produit de solubilité :

$Q/K = 1$: la solution est à l'équilibre avec le gypse

$Q/K < 1$: la solution est sous saturée par rapport au gypse

$Q/K > 1$: la solution est sur saturée par rapport au gypse

Pour cette étude nous avons utilisé le modèle LEACHM © version 3 de Cornell University (Ithaca, New York) qui permet de modéliser une infiltration monodimensionnelle dans le sol en fonction de différentes conditions d'irrigation. Les données de base à introduire dans le modèle sont :

- les propriétés physiques du sol : courbe de rétention d'eau $h(\theta)$ et la conductivité hydraulique à saturation K_s , coefficient de dispersion et de diffusion
- les propriétés physico-chimiques du sol : granulométrie, densité, cations échangeables et capacité d'échange, coefficients de sélectivité.
- les compositions chimiques des solutions dans le sol à différentes profondeurs
- les quantités d'eau apportées lors de l'irrigation, la composition de l'eau, les pluies et les dates des différents apports.
- l'évapotranspiration potentielle hebdomadaire ainsi que les maxima et amplitude de température, sur toute la période de la simulation.

3. Résultats.

Le modèle a été utilisé sur deux sites soumis à des contraintes hydriques et chimiques très différentes :

- A N'Diaye dans le delta, le site est caractérisé par la présence d'une nappe salée à très faible profondeur (30 cm, parfois affleurante) et par la présence d'un stock de calcite et de gypse très important dans le sol.
- A Fanaye dans la moyenne vallée, le sol ne contient ni calcite ni gypse au départ et le site est caractérisé par une absence de nappe (au moins jusqu'à 6 m de profondeur)

3.1. N'Diaye

La composition de l'eau d'irrigation pompée dans le Lampsar est variable dans le temps (tableau I) : elle varie de sulfatée calci-magnésienne à bicarbonatée calci-magnésienne. L'eau de la nappe a été considérée comme stable dans le temps avec un faciès chloruré sodique à sulfaté calcique très net.

Tableau I. Composition de l'eau d'irrigation du Lampsar et de la nappe

mmol/l	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	Alcalinité
22/02/95	3.0	1.90	13.0	0.48	11.0	5.000	2.71
28/04/95	0.16	0.22	0.5	0.04	0.5	0.550	0.71
20/07/95	0.23	0.23	0.71	0.1	0.81	0.46	0.25
03/04/96	0.18	0.19	0.43	0.04	0.4	0.265	0.45
02/05/96	0.38	0.205	0.53	0.04	0.49	0.095	0.68
03/06/96	0.19	0.19	0.47	0.05	0.42	0.105	0.84
04/07/96	0.145	0.165	0.39	0.04	0.34	0.0035	0.48
nappe	14.0	10.5	77.0	1.20	89.0	34.0	1.5

3.1.1 Evolution de l'eau d'irrigation.

Dans un premier temps on a essayé de déterminer l'évolution chimique de l'eau d'irrigation lorsque celle-ci se concentre avant même de réagir avec le sol. Pour ce faire nous avons utilisé un modèle de simulation purement géochimique KINDIS (Fritz, 1975,1981 ; Madé 1991). Le pH de l'eau a été suivi au cours de « l'évaporation » et concentration en considérant deux cas de figures : 1. Pas de contrôle du pH par les minéraux magnésiens (la calcite étant le seul minéral carbonaté autorisé à précipiter) 2. Contrôle du pH par le Magnésium en autorisant la cristallisation de Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Il apparaît clairement (figure 1) que le pH est rapidement contrôlé à des valeurs inférieures à 7.5 lorsque la dolomite précipite, alors que dans le cas d'une concentration non contrôlée par le magnésium le pH monte jusqu'à des valeurs de 8.7 pour un facteur de concentration de l'ordre de 1000. Au delà de ce facteur de concentration la précision des calculs n'est plus fiable car on atteint des forces ioniques supérieures à 1.

Cette étude tend à montrer que l'évolution suivie par l'eau d'irrigation est plutôt du type saline neutre qu'alcaline.

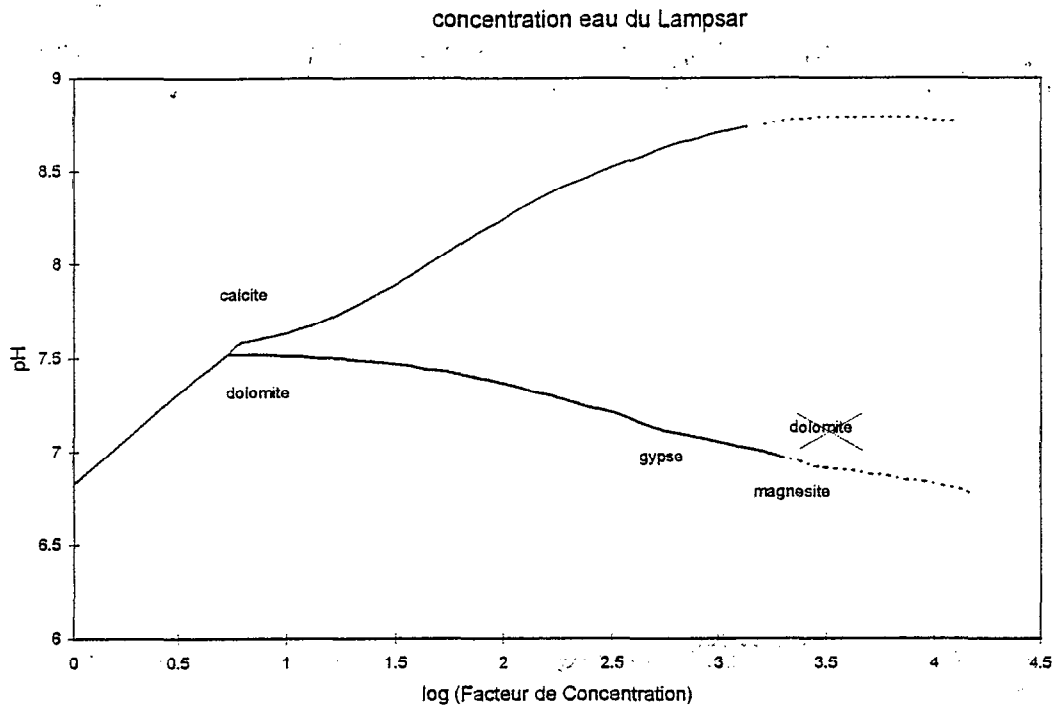


Figure 1 : Simulation de l'évolution du pH de l'eau du Lampsar en fonction du facteur de concentration avec (—) et sans (---) contrôle du magnésium

3.1.2 . Simulation couplée sur 3 campagnes.

Les résultats de la simulation sur 3 campagnes (1 contre saison +2 hivernages) montrent que le profil s'engorge très rapidement et que la nappe reste sub-affleurante pendant une grande partie du temps (Figure 2). Les concentrations des différents ions varient de manière cyclique en fonction des apports d'eau, qui ont tendance à diluer les solutions dans le sol. Cependant, on note une tendance à la concentration des solutions dans le profil de sol, qui est particulièrement marquée dans la partie supérieure (0-33 cm). Il s'agit essentiellement d'une accumulation de Cl, Na, SO₄ et Ca, qui marque une évolution vers une voie saline neutre (Figure 3)

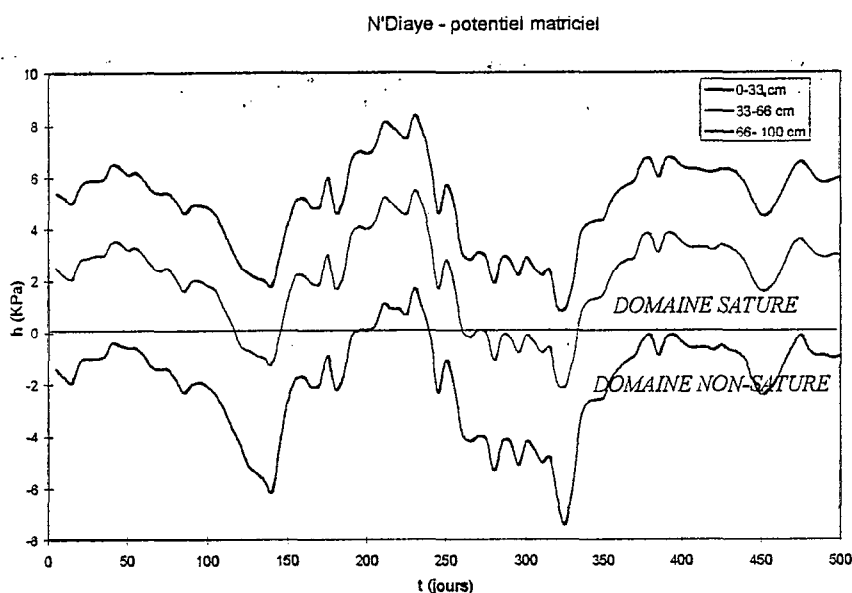


Figure 2 : Evolution du potentiel matriciel pendant les 3 campagnes de culture à trois profondeurs dans le profil.

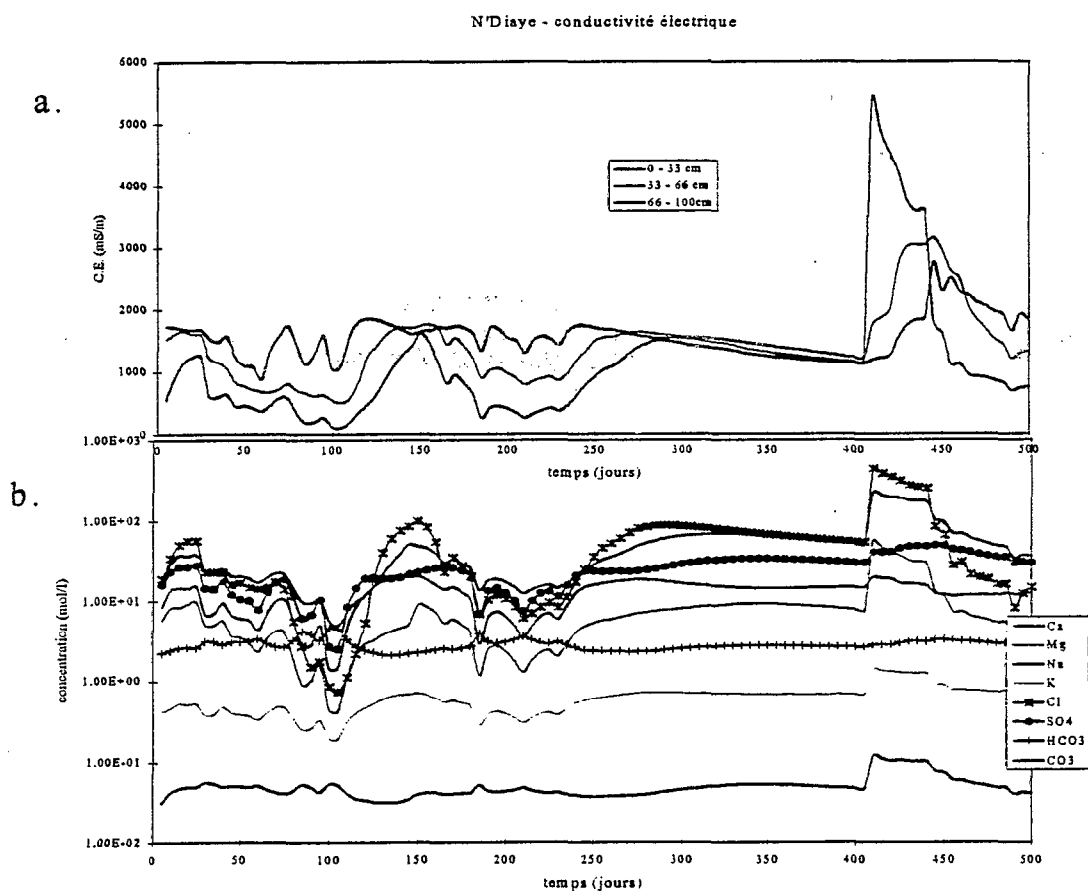


Figure 3 : Evolution (a) de la conductivité électrique (c.f. concentration en ions) de la solution du sol à trois profondeurs dans le profil. (b) de la concentration des différents éléments chimiques de la solution du sol pour les 30 premiers centimètres du profil.

3.1.3 Validation expérimentale.

Le suivi hydrique et chimique sur le site de N'Diaye permet de comparer les valeurs simulées et les valeurs mesurées (voir annexes A1). Le suivi de la conductivité électrique de la solution du sol montre une évolution concordante entre les mesures expérimentales et calculées pour les 250 premiers jours. Par contre pour les 100 derniers jours, le modèle surestime la CE par rapport aux mesures de terrain. Cette tendance se vérifie principalement pour le calcium et le sulfate, mais également pour les autres éléments à l'exception des bicarbonates. Cette divergence trouve une explication dans le fait qu'une pré-irrigation est réalisée sur la parcelle, avant la remise en culture, et que cet apport d'eau ponctuel n'a pas été intégré dans la simulation. Il que cet apport d'eau permette de remettre en solution les sels cristallisés en surface (en particulier le gypse et halite) pendant la période sans culture. Le pH montre une tendance concordante entre le modèle et les mesures de terrain, bien qu'on observe une grande variabilité des mesures.

Cette comparaison permet également de montrer l'importance de la fréquence d'échantillonnage pour pouvoir suivre une éventuelle évolution du système. En effet, au cours d'une campagne la teneur en eau du sol varie sensiblement en fonction des phases d'irrigation et de séchage et de ce fait conditionne fortement la concentration des solutions prélevées. Par ailleurs l'absence de prélèvements pendant la période non cultivée ne permet pas de vérifier l'importante augmentation des concentrations en surface du profil, calculée par le modèle.

3.14. Essai à plus long terme.

Les essais de simulation sur 10 ans (Figure 4) confirment cette tendance à la concentration de la partie supérieure du profil jusqu'à précipiter du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de la halite (NaCl), de la thenardite (Na_2SO_4) et de la calcite (CaCO_3). Ces essais ont été réalisés pour un scénario de double culture et un scénario de simple culture. Il apparaît que lors de la simple culture le phénomène de concentration en surface est amplifié par rapport au scénario à double culture (Figure 5). En effet comme dans les deux cas la nappe est sub-affleurante ou affleurante, la période d'émersion donc d'évaporation est plus importante dans le cas de la simple culture.

Comme la nappe est naturellement haute dans ce site, on a réalisé des essais en imposant arbitrairement des profondeurs de nappe croissantes lors de la modélisation afin de tester son incidence sur l'évolution du profil : ce n'est qu'à partir d'une profondeur de 1.8 m que le phénomène de concentration disparaît et pour une nappe encore plus profonde le profil se désalinise (Figure 6).

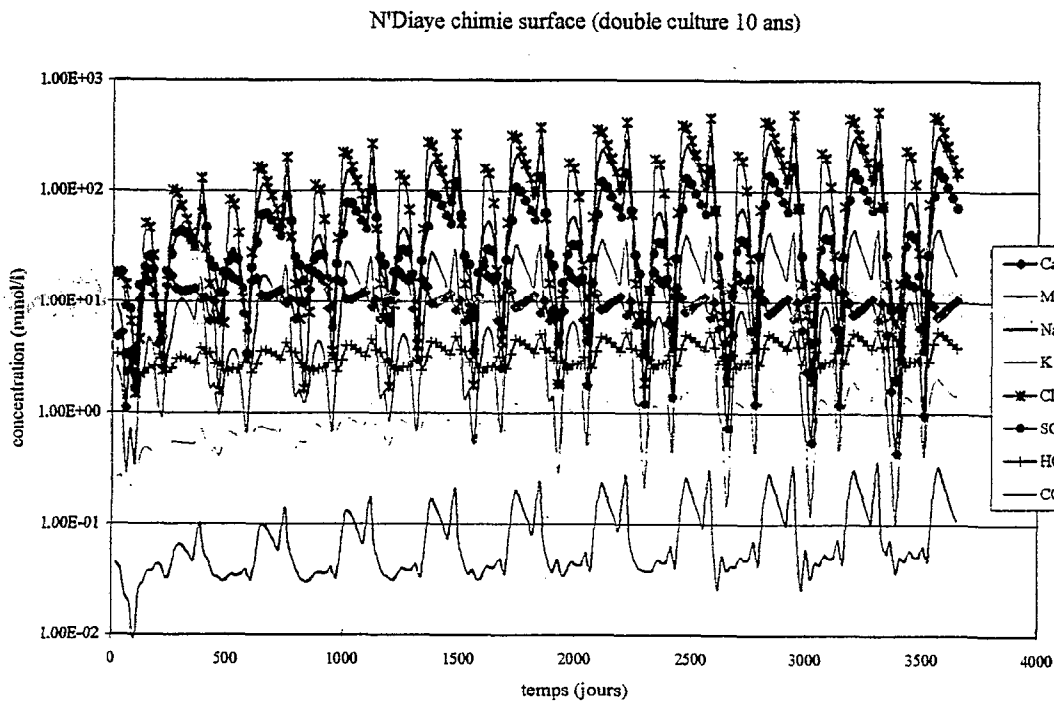
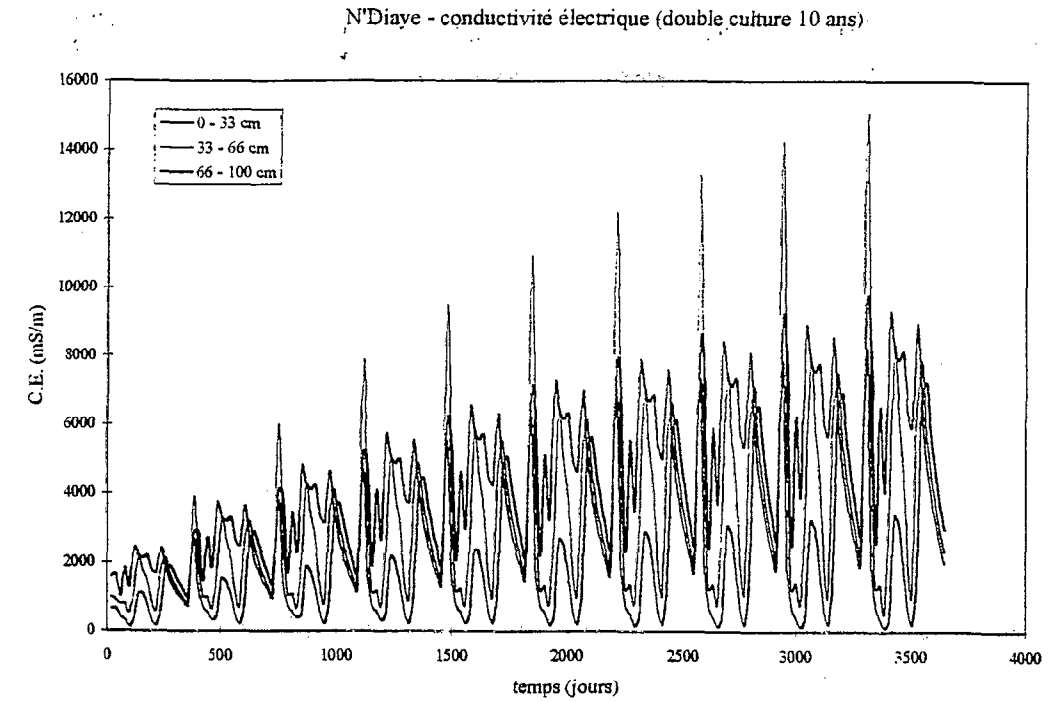


Figure 4 : Simulation numérique de l'évolution sur une période de 10 ans de la conductivité électrique de la solution du sol à trois profondeurs dans le profil et de la concentration des différents éléments chimiques dans les 30 premiers centimètres du profil

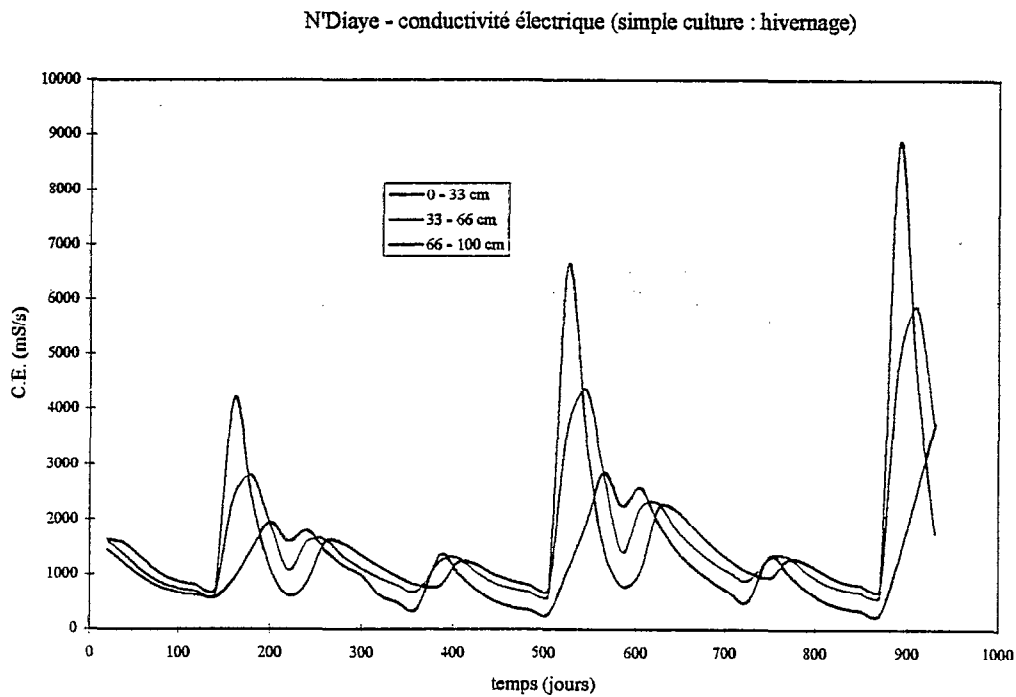
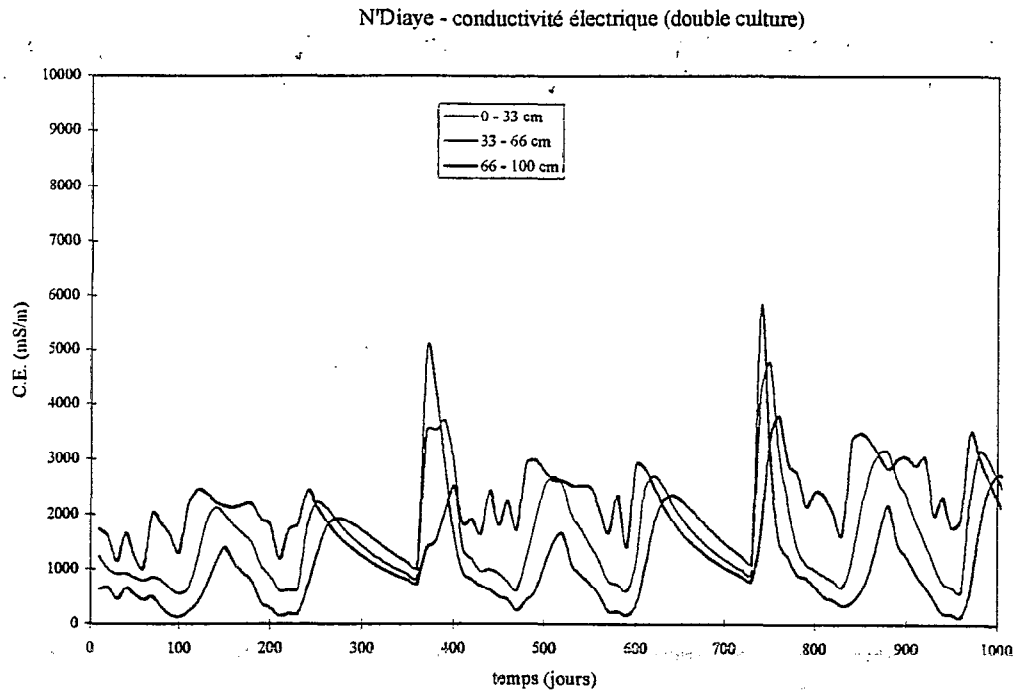


Figure 5 : Simulation numérique de l'évolution de la conductivité électrique de la solution du sol à trois profondeurs dans le profil, pour une double culture et une simple culture sur une durée de 3 ans.

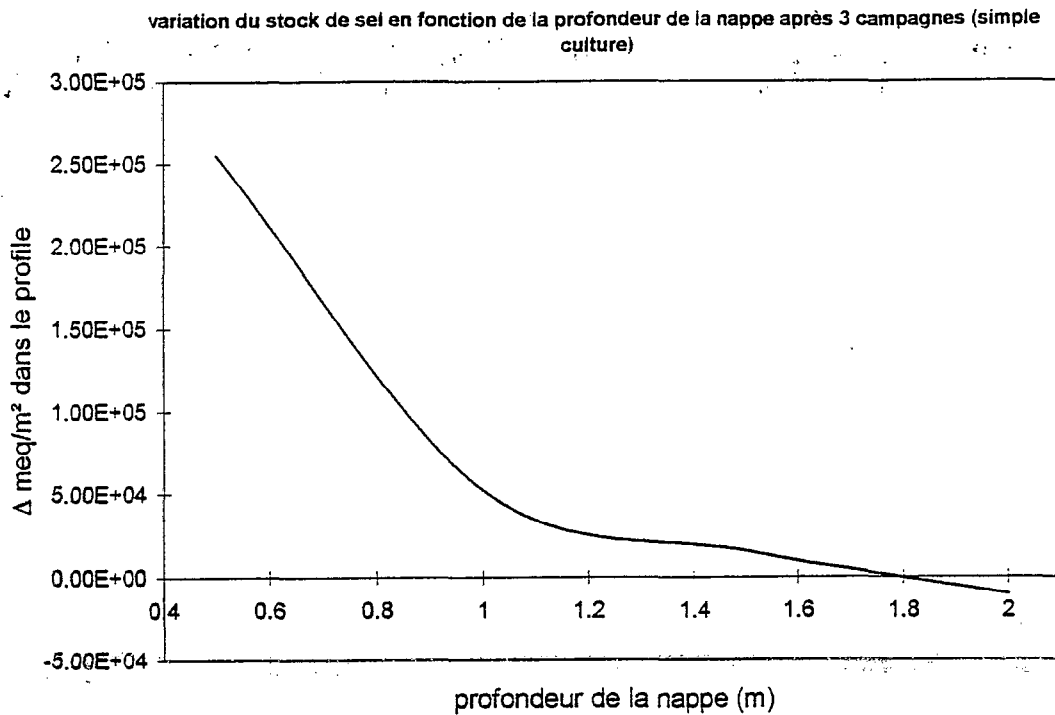


Figure 6 : Variation du stock de sel dans le profil de sol après trois campagnes de culture, en fonction de la profondeur de la nappe.

En conclusion sur le site de N'Diaye on assiste à un phénomène de salinisation du sol lié à la mise en eau et la migration des sels vers la surface au cours des périodes de séchage, qui à long terme peut être néfaste pour les cultures. Ce processus est amplifié par la simple culture par rapport à la double culture. Cependant on a pu montrer que s'il l'on parvenait à rabattre, et maintenir tout au long de la culture, la nappe à une profondeur minimale de 2 mètres ce phénomène s'inverserait. Et l'écoulement vers la nappe permettrait de désaler le profil de sol.

3.2. Fanaye

Sur le site de Fanaye la composition de l'eau du N°Galénka (Tableau II), utilisée pour l'irrigation varie peu et garde toujours un faciès bicarbonaté calci-magnésien, parfois sodique, présentant systématiquement une alcalinité résiduelle calcite positive ($Alc > Ca \times 2$) et dans certains cas une alcalinité calcite + magnésium positive ($Alc > 2 \times (Ca + Mg)$). Le risque d'alcalinisation mentionné dans les rapports précédents (P. Boivin et J.L. Maeght 1995), existe donc potentiellement dans ce cas.

Tableau II. Composition de l'eau d'irrigation du N°Galénka

mmol/l	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	Alcalinité
24/02/95	0.110	0.11	0.10	0.06	0.17	0.015	0.460
25/04/95	0.245	0.255	0.42	0.10	0.19	0.030	1.300
17/05/95	0.140	0.075	0.15	0.04	0.13	0.020	0.710
02/06/95	0.120	0.140	0.10	0.09	0.09	0.010	0.670
02/07/95	0.125	0.125	0.10	0.04	0.10	0.015	0.300
31/08/95	0.330	0.080	0.07	0.06	0.18	0.050	0.670
08/04/96	0.120	0.125	0.20	0.05	0.12	0.180	0.250
10/05/96	0.330	0.115	0.15	0.04	0.09	0.065	0.660

3.2.1. Evolution de l'eau d'irrigation

Comme pour l'eau du Lampsar (utilisé à N°Diaye), on a envisagé un processus de concentration avec et sans contrôle du Magnésium (Figure 7). Par ailleurs on a étudié l'évolution de deux qualités d'eau d'irrigation présentant des fortes différences d'alcalinité (25/04/95 et 31/08/95). Deux comportements distincts apparaissent clairement, d'un côté on assiste à une évolution similaire que pour l'eau du Lampsar, à savoir une évolution en voie saline neutre par le contrôle du Magnésium, et d'un autre côté à une évolution clairement alcaline ou le magnésium ne parvient pas à contrôler l'augmentation du pH. Il faut cependant atteindre des taux de concentration de l'ordre de 1000 pour atteindre une valeur de pH de 8.5 lorsqu'il est contrôlé par le Magnésium et de 8.8 lorsqu'il n'est pas contrôlé.

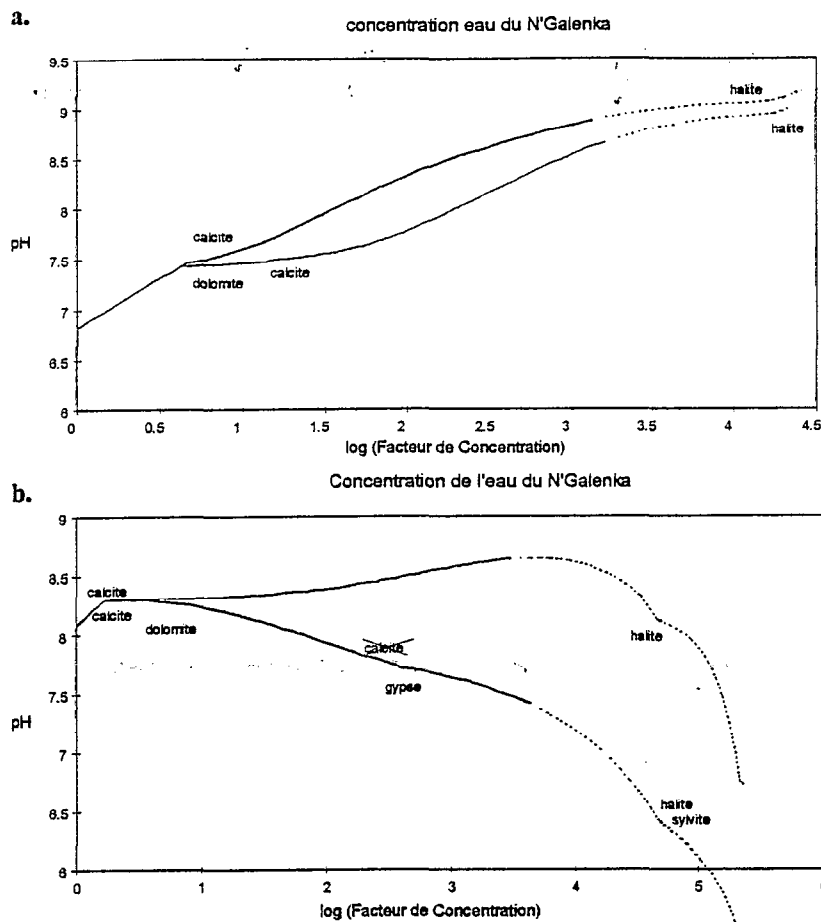


Figure 7 : Simulation de l'évolution du pH de l'eau du N'Galenka en fonction du facteur de concentration avec (—) et sans (---) contrôle du magnésium. a. analyse du 25/04/95 b. analyse du 31/08/95.

3.2.2. Simulation couplée sur 3 campagnes.

Comme pour le site de N'Diaye on se rend compte que les concentrations des solutions dans le sol évoluent de manière cyclique, en fonction des apports d'eau. Le résultat de la simulation pour 3 campagnes de riziculture (1 contre saison et 2 hivernages) montre que la partie supérieure du profil de ce sol (hollaldé) se sature et desature au gré des irrigations mais que dans le mètre supérieur se constitue une réserve d'eau dans le sol qui semble pérenne. Ceci se traduit par une légère concentration des solutions de sol en surface. Les ion dominants dans la partie supérieure du profil (0-33cm) sont HCO_3^- , Na et Cl. Le pH de la solution varie également en fonction des apports d'eau et des périodes de séchage, mais ne semble pas montrer une évolution globale. De manière générale le pH reste toujours inférieur à 8. De même pour le taux de sodium échangeable (ESP), qui est très bas, on n'observe pas d'augmentation significative (Figure 8.)

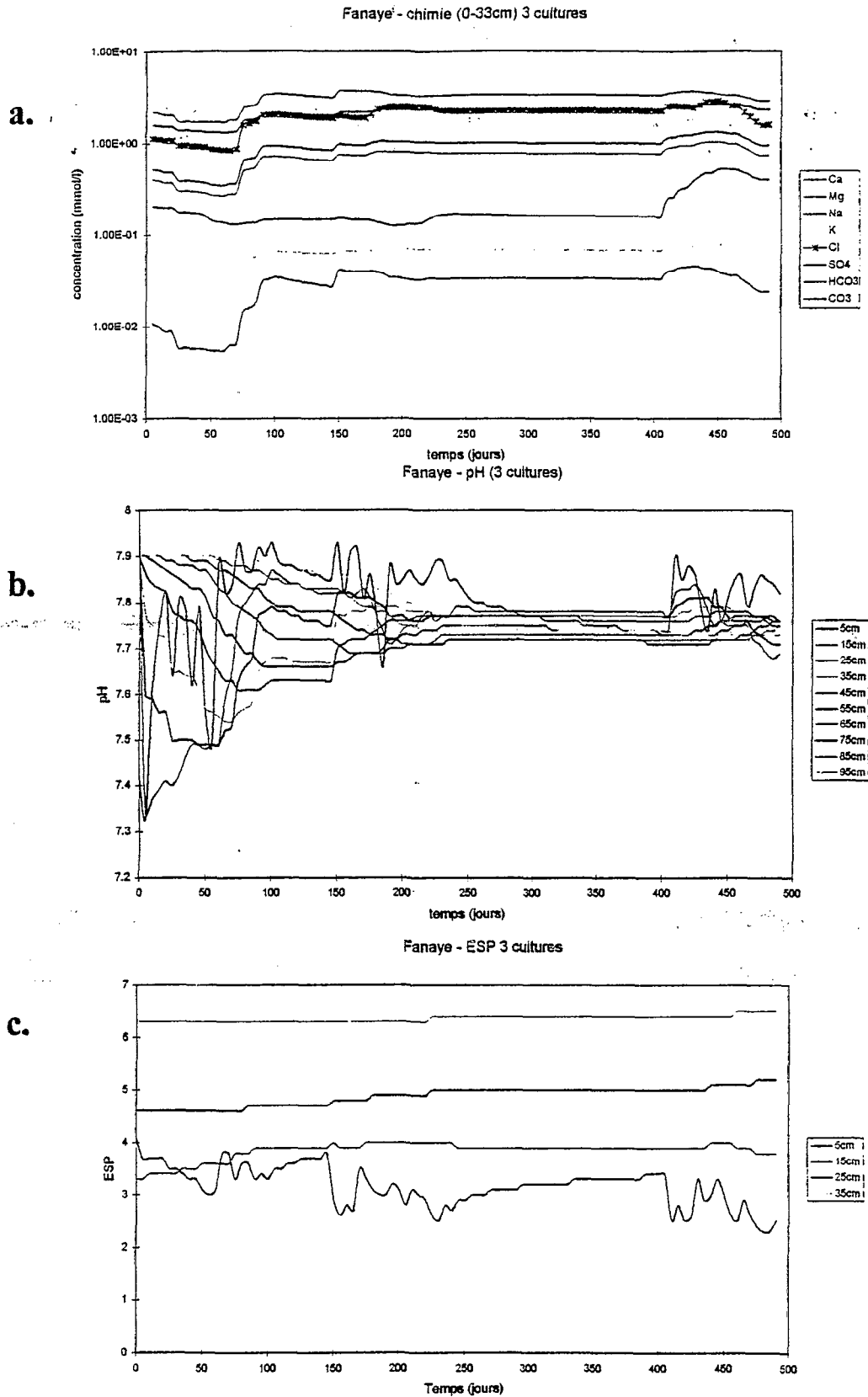


Figure 8 : Simulation numérique pendant 3 saisons de cultures de l'évolution a. de la composition chimique de la solution du sol dans les 30 premiers centimètres du profil. b. du pH de la solution du sol à différentes profondeurs dans le sol. c. du taux de sodium échangeable ESP pour les horizons supérieurs du profil.

3.2.3. Validation expérimentale

On remarque une bonne concordance entre les mesures expérimentales et les valeurs calculées par le modèle pour l'ensemble de éléments chimiques, malgré une longue période sans cultures pendant laquelle il n'y a pas d'échantillonnage dans la parcelle (Annexes A2)

3.2.4. Essais à plus long terme

La simulation sur une période de 10 ans montre qu'après une augmentation de la teneur en sels celle-ci se stabilise à une valeur constante. Le sodium échangeable (ESP) et le pH montrent tous les deux une diminution au cours du temps. Il n'y a donc pas de risque d'alcalinisation, ni même de salinisation sur le site de Fanaye pour les conditions hydrodynamiques et chimiques existant actuellement.

Du fait de l'absence de nappe dans ce site, c'est la conductivité hydraulique du sol qui va déterminer l'évolution chimique des niveaux supérieurs (intéressant directement la riziculture). La conductivité hydraulique mesurée sur ce site présente une variabilité assez forte suivant la méthode utilisée. On a donc testé des scénarios avec des conductivités hydrauliques variables. Les résultats présentés dans la figure 10 concernent les 10 premiers centimètres de sol du profil (qui sont les plus importants pour la riziculture).

Dans tous les cas de figure, hormis les fluctuations liées aux apports d'eau, le pH n'est pas affecté au court du temps, ce qui ne concorde pas avec une l'évolution vers l'alcalinisation.

Par contre la conductivité électrique des solutions, traduisant la concentration totale des solutions, tend à augmenter pour des conductivités hydrauliques K_s de 1 et 10 mm/j. Elle reste inchangée pour une conductivité de hydraulique de 50 mm/j et elle diminue pour un sol ayant une conductivité hydraulique égale à 100 mm/j.

Le sodium échangeable suit la même dynamique que la conductivité électrique, ce qui traduit une évolution vers une voie saline neutre (salinisation), lorsque la perméabilité (conductivité hydraulique) du sol est inférieure à 50 mm/j. Pour situer le sol de Fanaye dans ce contexte, il faut préciser que la conductivité hydraulique la plus faible qui y a été mesurée est de 60 mm/j.

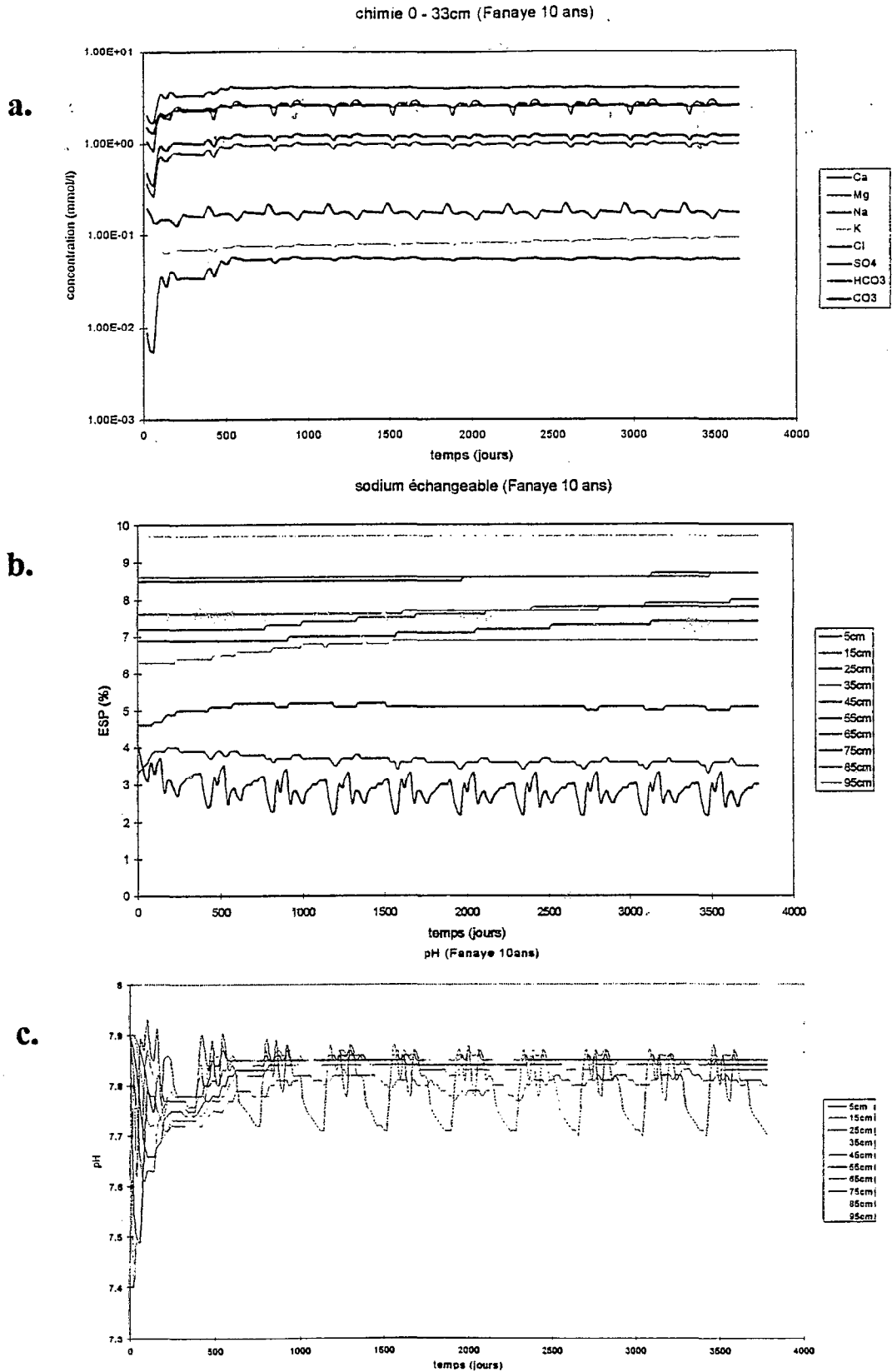


Figure 9: Simulation numérique pendant 10 ans de cultures de l'évolution a. de la composition chimique de la solution du sol dans les 30 premiers centimètres du profil. b. du taux de sodium échangeable ESP c. du pH de la solution du sol à différentes profondeurs dans le sol.

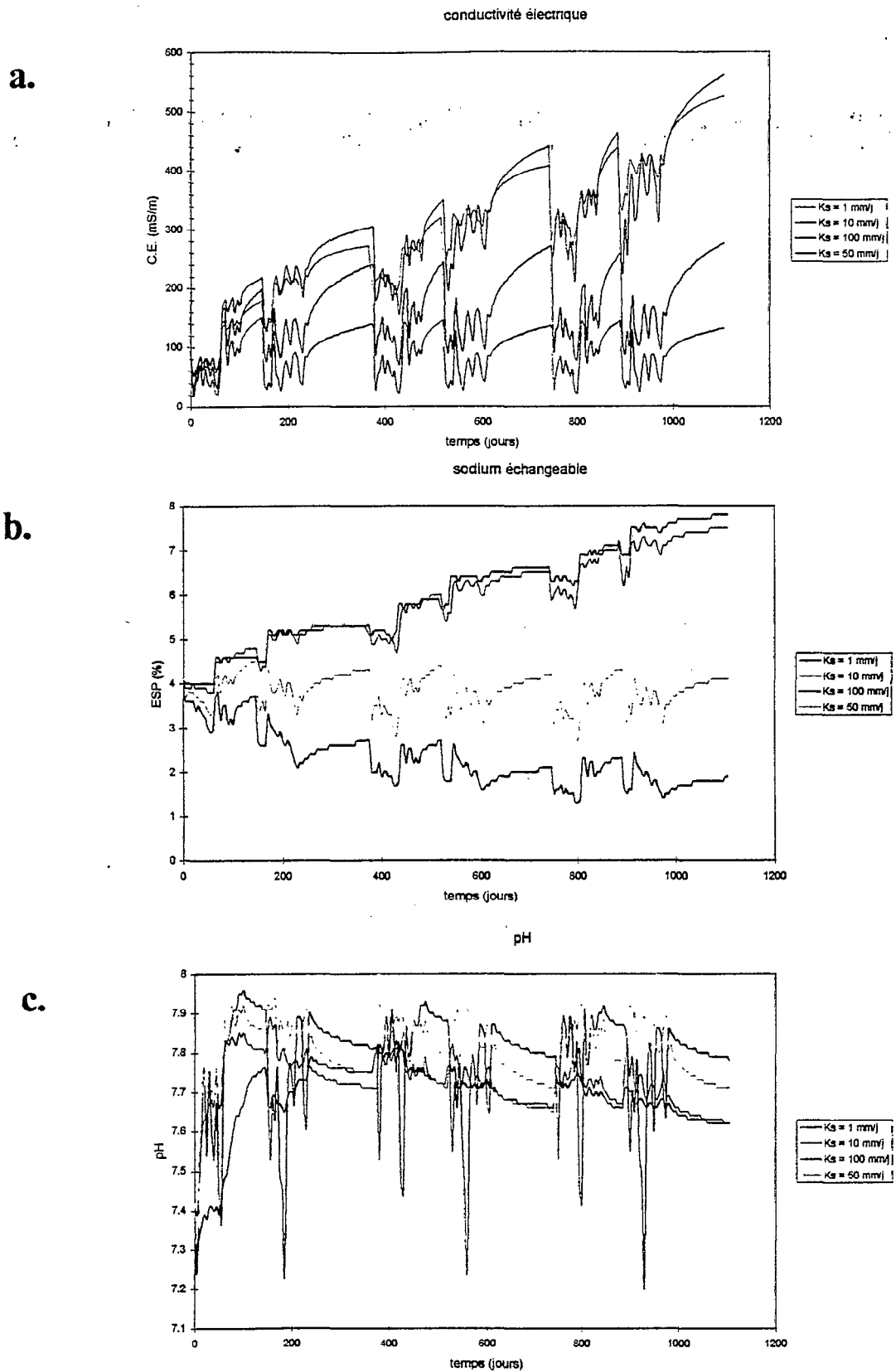


Figure 10 : Simulation de l'évolution a. de la conductivité électrique des solutions dans les 10 premiers centimètres, b. du taux de sodium échangeable ESP, et c. du pH, en fonction de différente conductivités hydrauliques (perméabilités) du sol de Fanaye.

Cependant la situation hydrodynamique actuelle peut évoluer sous l'effet de l'irrigation intense. En effet on peut envisager une apparition et une remontée de nappe jusqu'à proximité de la surface. Ce cas de figure correspond à ce qu'il s'est passé à l'Office du Niger au Mali, où l'irrigation a fait remonter la nappe de 80 m jusqu'à devenir sub-affleurante. On a donc simulé des campagnes d'irrigation sur une période de 10 ans en fixant arbitrairement une nappe à 1 m de profondeur. Dans ces conditions le modèle prédit une concentration saline dans l'horizon superficiel (figure 11), marqué par une augmentation de la conductivité électrique et du sodium échangeable (ESP) et par la précipitation de calcite en surface. Par contre le pH a plutôt tendance à baisser très légèrement traduisant ainsi plus une salinisation qu'un processus d'alcalinisation.

En conclusion, sur le site de Fanaye on constate que dans les conditions chimiques et hydrodynamiques actuelles, le risque d'alcalinisation ou même de salinisation est quasi inexistant de par l'absence de nappe en profondeur. En effet bien que le sol présente une conductivité hydraulique très faible « la fuite » vers le bas est d'autant plus importante qu'il n'y a pas de nappe pouvant la bloquer. Par contre si après une longue période d'irrigation intense une nappe venait à se former, il existerait alors un risque de salinisation.

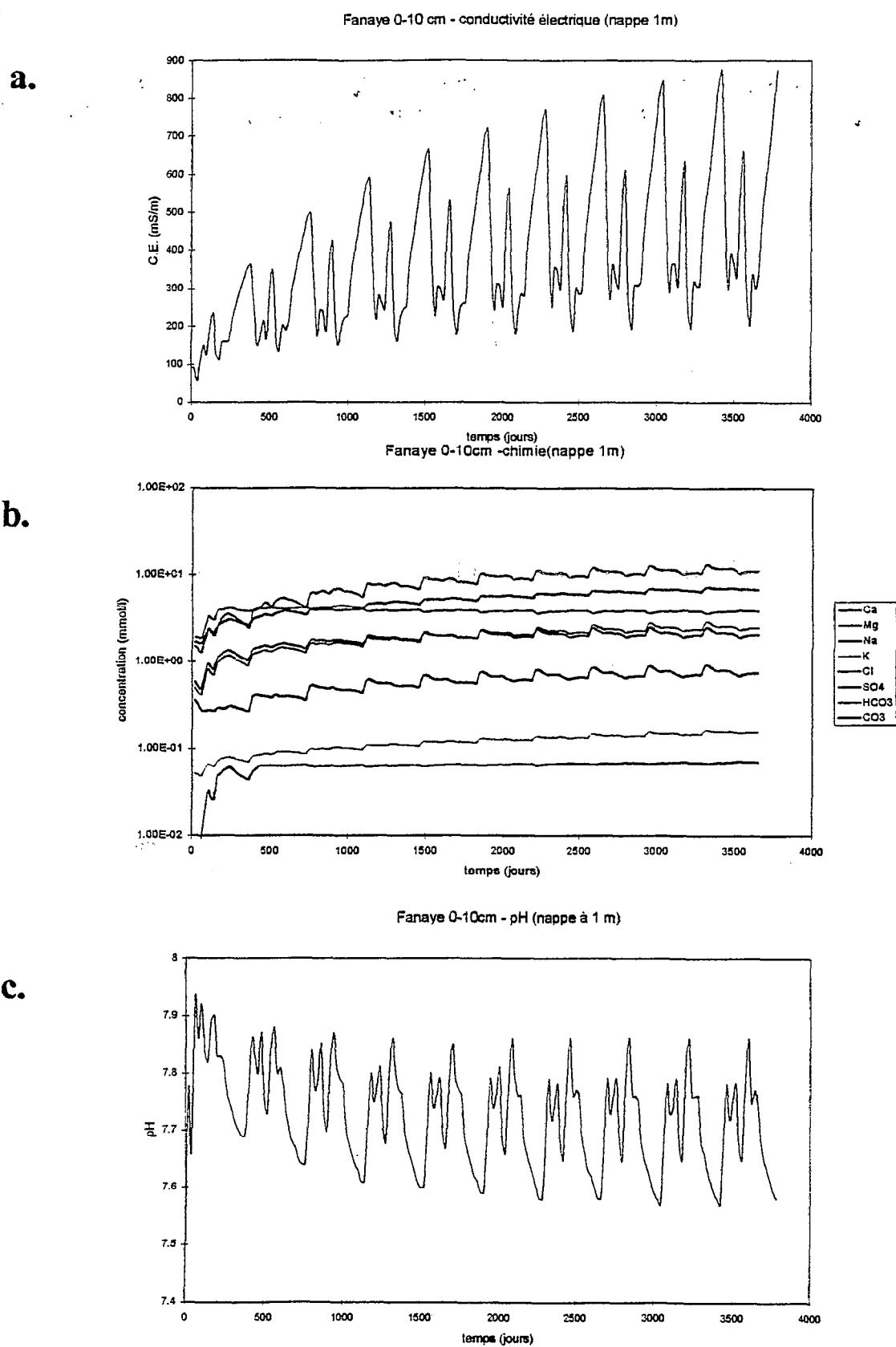


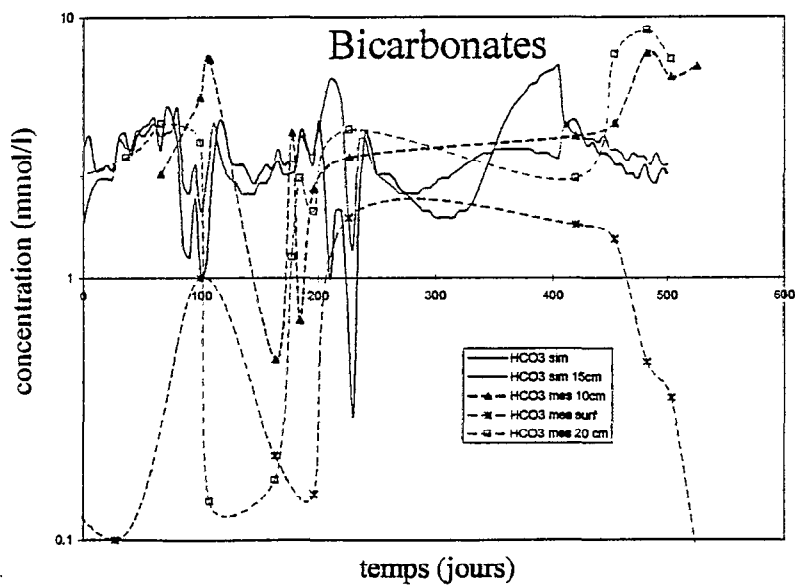
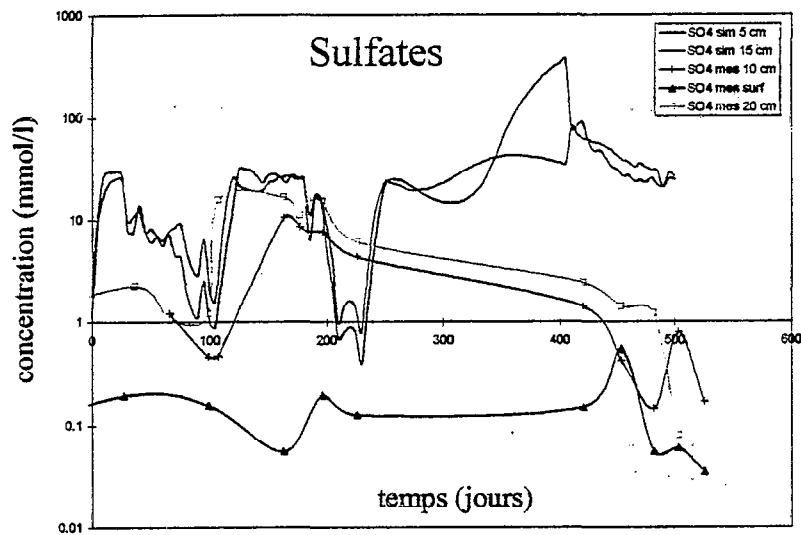
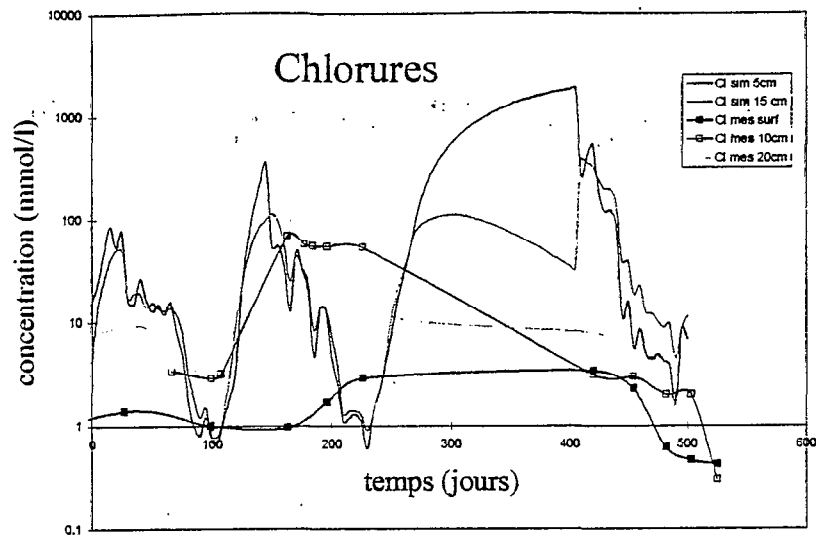
Figure 12 : Simulation numérique de l'évolution a. de la conductivité électrique, b. de la composition chimique, c. du pH de la solution du sol dans les 10 premiers centimètres à Fanaye dans le cas de la présence d'une nappe à 1 m de profondeur.

ANNEXES A1

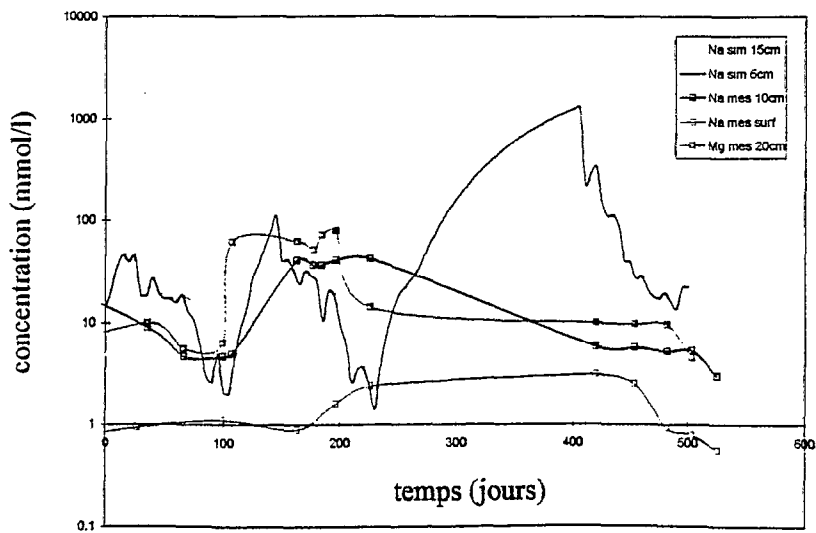
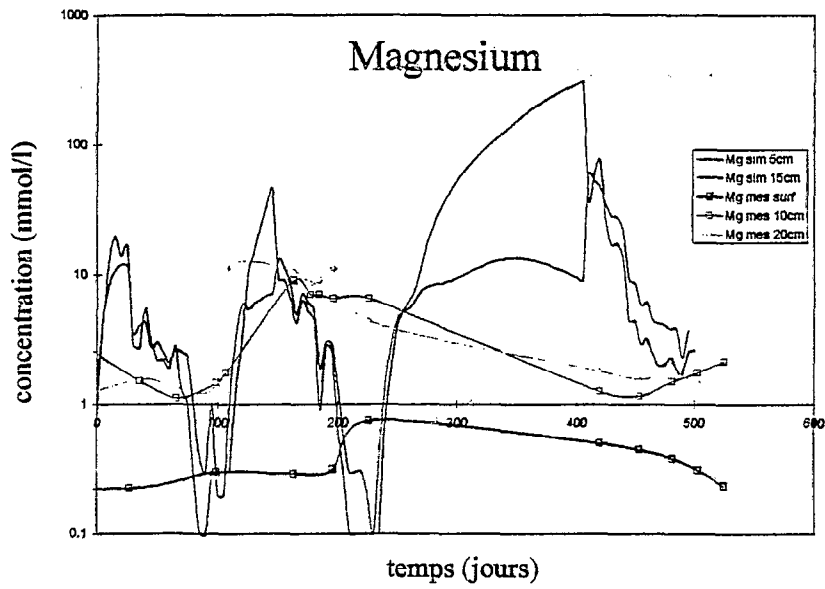
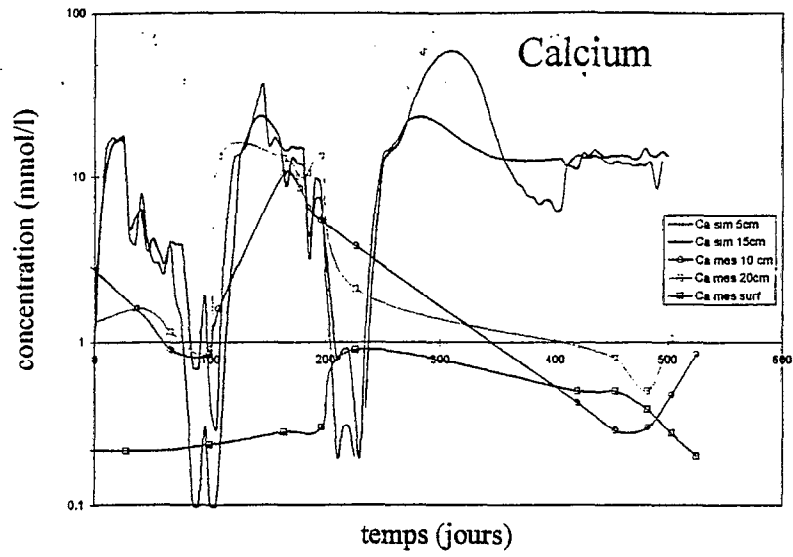
Evolutions des différents éléments chimiques
pendant 3 saisons de cultures à N'Diaye
Comparaisons entre les valeurs expérimentales et
les résultats de la simulation numérique.

Chlorures Cl^-
Sulfates SO_4^{2-}
Bicarbonates HCO_3^-
Calcium Ca^{2+}
Magnésium Mg^{2+}
Sodium Na^+
Potassium K^+
Conductivité électrique C.E.
pH

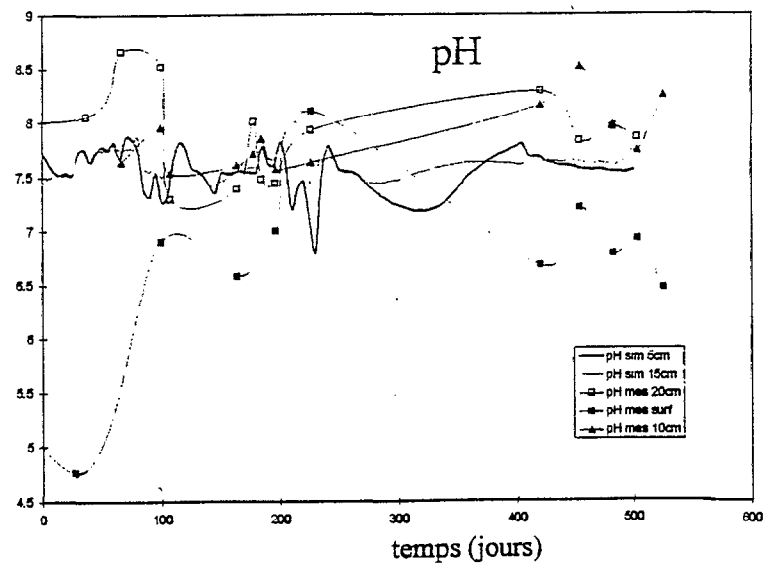
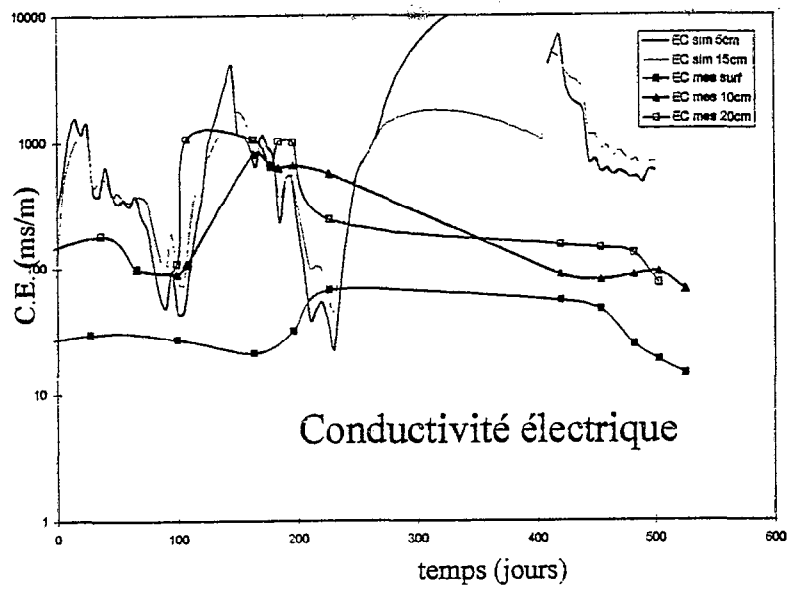
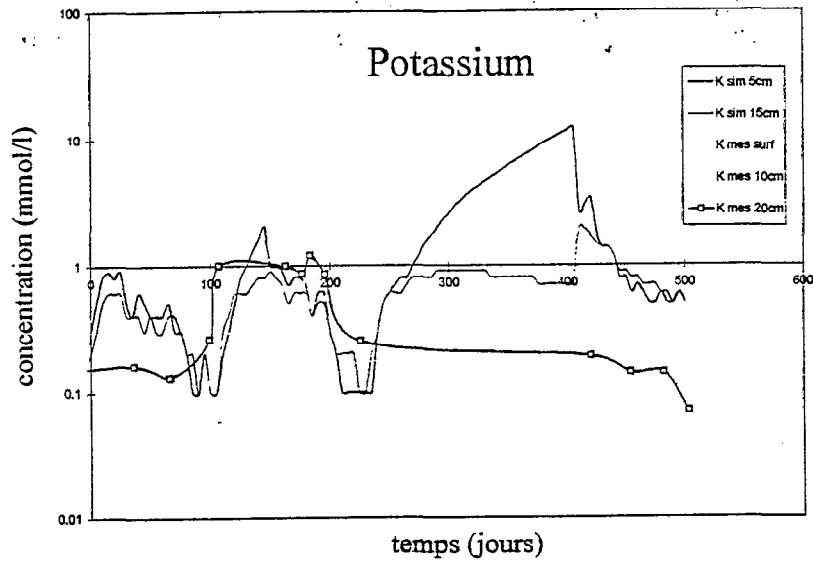
N'DIAYE



N'DIAYE



N'DIAYE

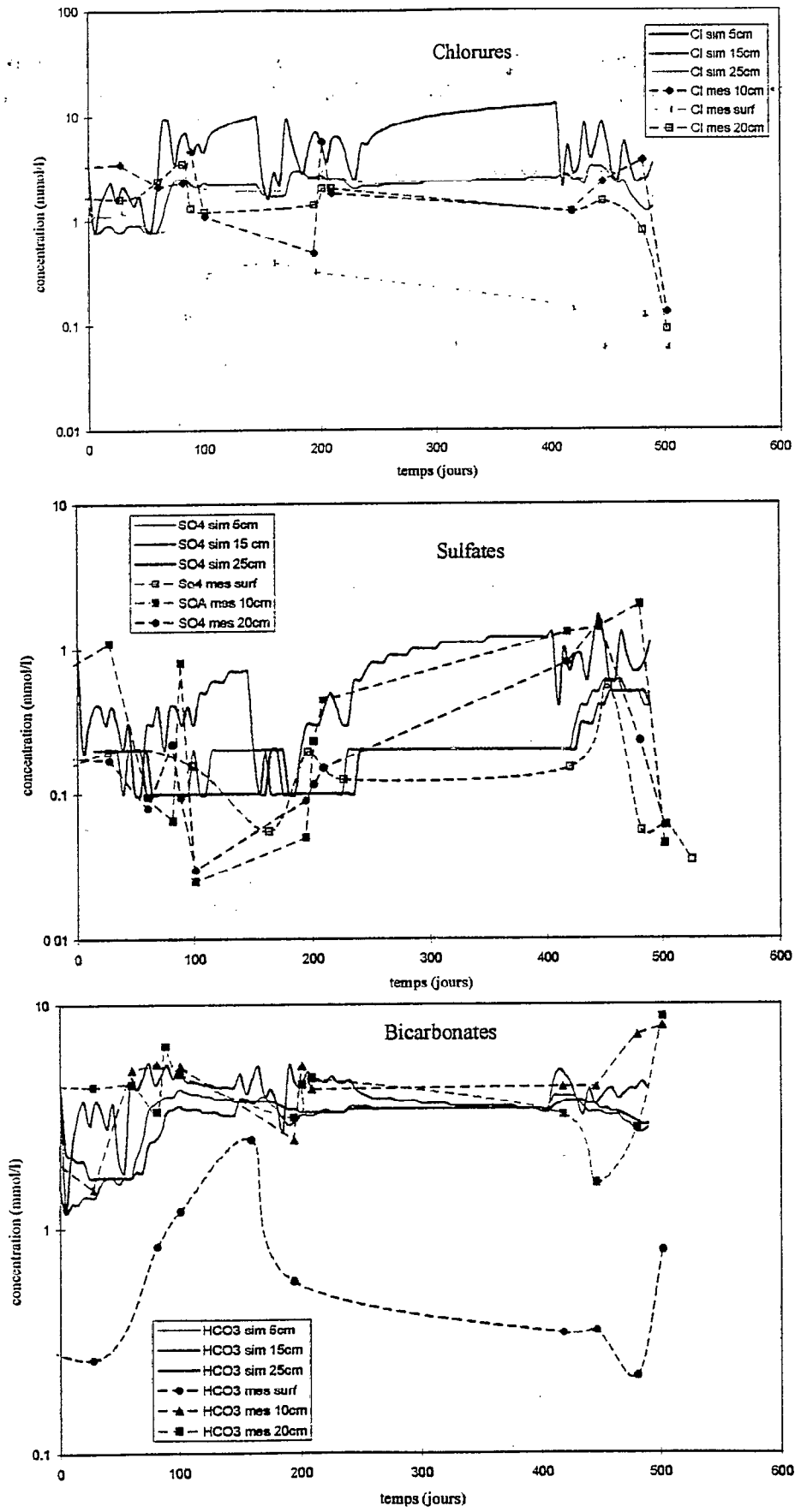


ANNEXES A2

Evolutions des différents éléments chimiques
pendant 3 saisons de cultures à Fanaye
Comparaisons entre les valeurs expérimentales et
les résultats de la simulation numérique.

Chlorures Cl^-
Sulfates SO_4^{2-}
Bicarbonates HCO_3^-
Calcium Ca^{2+}
Magnésium Mg^{2+}
Sodium Na^+
pH

FANAYE



FANAYE

