



Ecole Supérieure
d'Ingénieurs et de Techniciens
pour l'Agriculture



L'Institut
français
de recherche
scientifique
pour le
développement
en coopération

Gestion de l'eau en riziculture irriguée
dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal.

Essai de bilan hydrique et salin.

Mémoire de fin d'études présenté par: SALVIGNOL Claire (Promotion 89)

Devant la Commission de Jury présidée par:

M. LLORENS Jean-Marc Adjoint de Direction à l'E.S.I.T.P.A.

Membres :

M. BOIVIN Pascal Chargé de recherche en pédologie à l' ORSTOM
Maitre de stage

M. BOUGLE Bernard Ingénieur Agronome
Professeur de stage

M. MOLMY Georges Responsable du Département "Préparation à la Vie
Professionnelle" à l' E.S.I.T.P.A.

Décembre 1993

Direction des Etudes

Bibliothèque



FICHE SIGNALÉTIQUE

Mémoire de fin d'études

AUTEUR

SALVIGNOL Claire

TITRE FRANCAIS

Gestion de l'eau en riziculture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Essai de bilan hydrique et salin.

TITRE ANGLAIS

Water management in irrigated rice fields of the Senegal river valley-middle part. Determination of salt and water balance.

RESUME

Nous avons réalisé un bilan hydrique et salin sur une parcelle rizicole du périmètre de Nianga, dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal.

Le but est, dans un premier temps, de juger de l'efficacité de l'eau d'irrigation. Nous avons notamment dégagé les valeurs d'évapotranspiration réelle du riz d'hivernage, ou encore les volumes infiltrés ou perdus.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés aux conséquences de la gestion de l'eau sur l'environnement. En effet, les excédents d'irrigation, en permettant la remontée des nappes salées, sont à l'origine de phénomènes de dégradation des sols. Aussi, du bilan, nous avons ressorti la quantité de sels exportés de la parcelle, notamment pour une comparaison avec celle extraite du périmètre; ou encore le facteur de concentration des eaux d'irrigation.

L'absence de lessivage vertical au cours de la culture, ou encore l'importance des pertes directes, actrices du lessivage des nappes salées, vont à l'encontre de la préservation de la qualité des sols.

Si le risque d'alcalinisation n'est pas encore réel, la salinisation est bien présente. Des solutions visant à lutter contre la remontée de la nappe, concluent donc notre travail.

MEMOIRE

Oui

Durée de la confidentialité: an(s)

CONFIDENTIEL

Non

PROFESSEUR DE STAGE BOUGLE Bernard Ingénieur Agronome
Résidence de l'Odet
4, rue Joseph HALLIGUEN
29 000 QUIMPER

MAITRE DE STAGE BOIVIN Pascal Chargé de recherche en pédologie - ORSTOM
Centre ORSTOM
B.P. 1386
DAKAR - SENEGAL

ORGANISME DE STAGE ORSTOM Institut français de recherche scientifique pour le
développement en coopération
213, rue La Fayette
75 480 PARIS Cedex 10

DEPARTEMENT 1 - Sciences Economiques et Sociales
Mr MERLE

AUQUEL LE 2 - Sciences et Techniques des Productions Végétales
Mr LLORENS

MEMOIRE EST 3 - Sciences et Techniques des Productions Animales
Melle MOREAU

RATTACHE 4 - Préparation à la Vie Professionnelle
Mr MOLMY

NOMBRE DE PAGES 34 pages + annexes

MOTS CLES Bilan hydrique, sel, évapotranspiration, riz, fleuve Sénégal.

Réservé à l'E.S.I.T.P.A.

NOTES: Observations:

Ecrit

Oral

REMERCIEMENTS

L'élaboration de ce travail n'aurait pu être sans la participation, de près ou de loin, de nombreuses personnes, nommément citées ou non, que je tiens à remercier ici.

Je remercie, à travers son directeur Mr G. BASTIEN, tout le personnel de l'ESITPA, enseignant ou non, qui a contribué à ma formation et au bon déroulement de ma scolarité.

Je remercie vivement les personnes qui ont bien voulu encadrer mon stage:

Au Sénégal, Mr P. BOIVIN, chargé de recherche en pédologie, et maître de stage,
Mr L. SEGUIS, chargé de recherche en hydrologie,
et Mr J.C. POUSSIN, chargé de recherche en agronomie.

Tous trois travaillant à l'ORSTOM de Dakar, ils ont accepté de me faire participer à un de leurs programmes en cours, je les en remercie.

En France, Mr B. BOUGLE, ingénieur agronome, et professeur de stage,
et Mr J.M. LLORENS, adjoint de direction à l'ESITPA, et président de la commission de soutenance.

Ils m'ont guidée pour la rédaction de ce travail, je leur en suis reconnaissante.

Je remercie encore les membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail.

Je remercie Mr H. POUPON, directeur des relations extérieures à l'ORSTOM, qui m'a fait partager son expérience du Sénégal, m'a aidée dans la recherche du stage, puis s'en est assuré du bon déroulement.

Je remercie Mr P. MATHIEU, de m'avoir accueillie dans son centre ORSTOM à Dakar.

Je remercie tous les membres du laboratoire de pédologie, qui ont permis le déroulement du stage dans les meilleures conditions. Melle P. GARNIER, par son enthousiasme et sa disponibilité, en a été particulièrement actrice, qu'elle en soit remerciée.

Je remercie tous mes collaborateurs de terrain, et tout particulièrement Mr D. BACHARI, sans qui l'obtention de toutes les données nécessaires aux conclusions de ce travail n'aurait pu être possible.

Je remercie, à travers son ingénieur délégué Mr A. DIA, le personnel de la SAED de Nianga, pour le temps qu'il a consacré à la réponse à mes questions.

Je remercie Mr A.I. DIACK, paysan à Guia, qui a concouru au bon déroulement de nos expérimentations.

Je remercie tous les Sénégalais(es) qui, par leur accueil chaleureux, ont permis que je garde le meilleur souvenir de ce séjour dans leur pays.

Je remercie, enfin, tous mes ami(e)s, et mes parents, leur soutien tout au long de mes études m'a été précieux.

RESUME

Nous avons réalisé un bilan hydrique et salin sur une parcelle rizicole du périmètre de Nianga, dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal.

Le but est, dans un premier temps, de juger de l'efficacité de l'eau d'irrigation. Nous avons notamment dégagé les valeurs d'évapotranspiration réelle du riz d'hivernage, ou encore les volumes infiltrés ou perdus.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés aux conséquences de la gestion de l'eau sur l'environnement. En effet, les excédents d'irrigation, en permettant la remontée des nappes salées, sont à l'origine de phénomènes de dégradation des sols. Aussi, du bilan, nous avons ressorti la quantité de sels exportés de la parcelle, notamment pour une comparaison avec celle extraite du périmètre; ou encore le facteur de concentration des eaux d'irrigation.

L'absence de lessivage vertical au cours de la culture, ou encore l'importance des pertes directes, actrices du lessivage des nappes salées, vont à l'encontre de la préservation de la qualité des sols.

Si le risque d'alcalinisation n'est pas encore réel, la salinisation est bien présente. Des solutions visant à lutter contre la remontée de la nappe, concluent donc notre travail.

ABSTRACT

We realized a salt and water balance in a rice field of the Nianga's area, in the Senegal river valley - middle part.

At first, the aim was to estimate the efficiency of the water of irrigation. We mainly took measurements of the real evapotranspiration of rice in rainy season, and calculated the lost or infiltrated volumes.

Then, we studied the consequences of water management for environment. In fact, the irrigation surplus, which allow the salt underground water level to rise, are the origin of soil damages.

So thanks to the results, we brought out the amount of the salt exported from the parcel, notably to compare with that extracted from the area, or the factor of concentration of irrigation water.

The absence of vertical leaching during the cultivation, or the important direct loss, which act on the leaching of salt underground water level, go against the preservation of the quality of soils.

If the risk of alkalisation is not yet real, the salinisation exists. Solutions to fight against the rising of the underground water level end our work.

SOMMAIRE

Avant-propos	p 1
1 - INTRODUCTION GENERALE	p 2
1.1 - Le contexte	p 2
1.2 - Les conséquences	p 2
1.3 - Les perspectives	p 3
1.4 - Les risques de dégradation	p 3
1.4.1 - La salinisation	p 3
1.4.2 - La sodisation	p 3
1.4.3 - L'alcalinisation	p 4
1.5 - La problématique	p 5
2 - MATERIEL ET METHODE	p 7
2.1 - Le site	p 7
2.2 - Préliminaire	p 8
2.3 - Pour déterminer.... ..	p 9
2.3.1 - les éléments du bilan hydrique	p 9
2.3.1.1 - Les volumes d'eau dans le sol	
2.3.1.2 - Les volumes apportés ou évacués	
2.3.1.3 - Les pertes	
2.3.2 - les éléments du bilan salin	p 12
3 - RESULTATS	p 13
3.1 - Une mesure de l'évapotranspiration réelle du riz	p 13
3.2 - Une infiltration négligeable	p 16
3.3 - Des pertes directes variables	p 18
3.4 - Le bilan hydro-salin	p 19
3.4.1 - A l'échelle parcellaire	p 19
3.4.1.1 - Le bilan hydrique	
3.4.1.2 - Le bilan salin	
3.4.1.3 - Le facteur de concentration des eaux	
3.4.2 - A l'échelle du périmètre	p 21
3.4.2.1 - Le bilan hydrique	
3.4.2.2 - Le bilan salin	

4 - FONCTIONNEMENT DU PERIMETRE	p 25
4.1 - Fonctionnement hydrique	p 25
4.2 - Fonctionnement salin	p 26
4.3 - A l'avenir ?	p 26
Conclusion	p 28
Bibliographie	p 29
Liste des sigles	p 33
Annexes	

AVANT-PROPOS

L'étude présentée a été effectuée au département "eaux continentales" de l'ORSTOM, dans le cadre du volet pédologique du programme "Fleuve Sénégal". Ce programme, mis en place en 1989, vise à rechercher l'optimisation des aménagements hydro-agricoles réalisés pour la mise en valeur de la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Cette mise en valeur fait suite à la mise en eau de deux importants barrages.

Le laboratoire de pédologie de l'ORSTOM est chargé de la caractérisation des sols, de l'étude de leur comportement, ainsi que des conséquences que celui-ci induit.

Le laboratoire d'hydrologie s'intéresse au fonctionnement hydrologique de cuvettes, aussi bien d'un point de vue quantitatif que qualitatif.

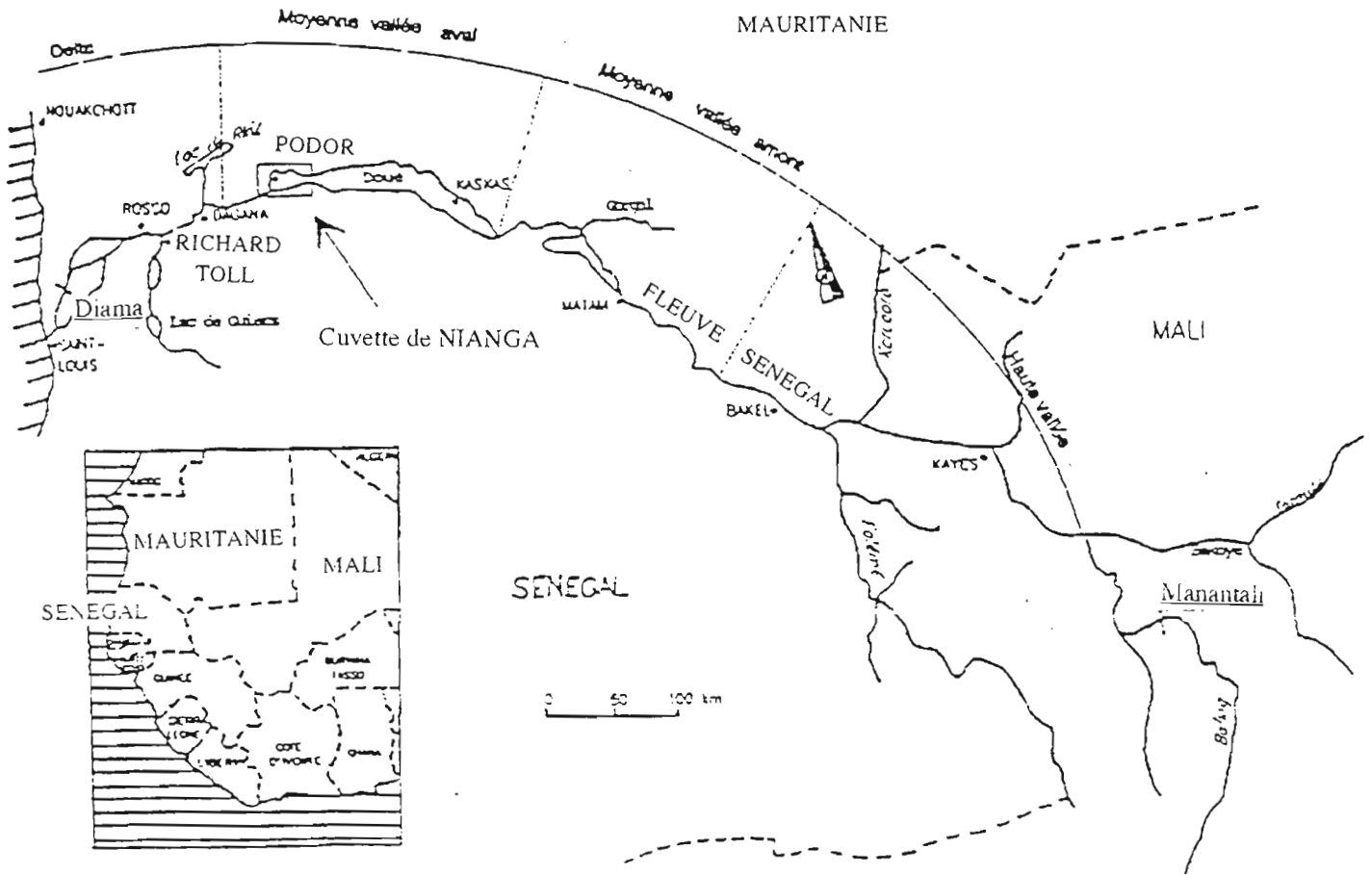
Ainsi, c'est dans le cadre d'un programme commun qu'a été réalisé un essai de bilan hydrique et salin sur une parcelle rizicole de la cuvette de Nianga, près de Podor (à 200 km de la côte).

Le but est de quantifier, à l'échelle d'une parcelle, les besoins en eau du riz, à travers le calcul de l'évapotranspiration réelle, dont nous n'avons trouvé aucun précédent pour cette zone. A ces besoins sont liées les pertes, que nous voulons quantifier, puis étudier leur devenir, et leurs conséquences éventuelles sur le milieu.

Au niveau salin nous nous attacherons à quantifier et à chercher l'origine de la salinité. Nous travaillerons à l'échelle de la parcelle puis nous envisagerons celle du périmètre.

Après l'introduction générale expliquant les motivations de notre étude, suivra la présentation du protocole expérimental. Ensuite viendront les résultats, dont l'approfondissement devra permettre d'expliquer le fonctionnement hydro-salin du périmètre étudié.

Carte 1: Localisation de la cuvette de Nianga - Région du fleuve Sénégal



Source: Guillerme, 1993.

1 - INTRODUCTION GENERALE

1.1 - Le contexte

Il nous a semblé plus opportun d'entrer directement dans le vif du sujet. Le contexte économique, politique et social de l'après-barrages est analysé, d'une façon qui nous a semblé complète, dans un ouvrage tel que celui de Crousse, Mathieu et Seck (1991), auquel il sera possible de se reporter.

Le régime du fleuve Sénégal ayant été régularisé avec la construction des barrages anti-sel de Diama (1986) et réservoir de Manantali (1987) (cf carte 1), le rythme des aménagements s'est accru, et 240 000 ha sont actuellement irrigables sur la rive gauche du fleuve (Sodefitex, 1993).

En raison de la nature des sols généralement très argileux, et des habitudes alimentaires, l'irrigation dans la vallée a une vocation essentiellement rizicole. Ainsi, sur la rive gauche, la riziculture couvre plus de 90% des superficies cultivées sous irrigation (Sodefitex, 1993).

Les aménagements hydro-agricoles peuvent être réalisés sous trois formes: grands périmètres, périmètres intermédiaires, ou Périmètres Irrigués Villageois (PIV), suivant le niveau de technicité de la réalisation. Cependant, avec la Nouvelle Politique Agricole (NPA) (1984), qui prévoit le désengagement de l'Etat, les grands périmètres d'origine, de financement et de conception étatiques, laissent place à la privatisation. Ainsi, on assiste au développement d'une multitude de PIV privés au dépend de grands aménagements, aux normes bien définies.

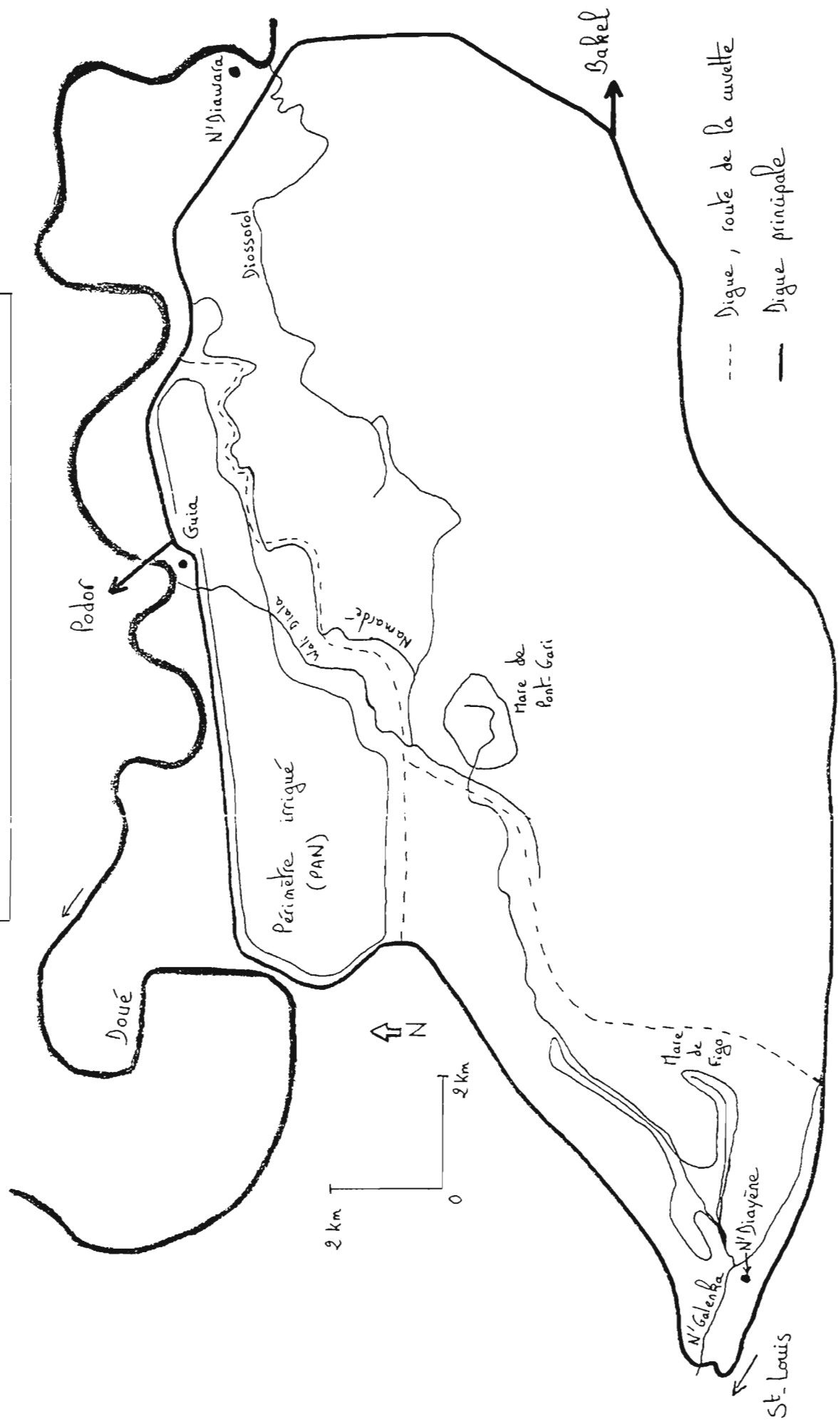
1.2 - Les conséquences

Le PIV est une forme d'aménagement favorisant l'agriculture familiale et l'organisation villageoise (Crousse, Mathieu, Seck, 1991). Cependant, son principe étant d'être peu coûteux en investissements et en moyens de production, les aménagements sont sommaires, et leur maîtrise en est rendue difficile. Ainsi, les surfaces des PIV ne sont pas planées, et le réseau se caractérise par des canaux en matériaux non stabilisés, ou encore par l'absence de drainage. De même, la simplicité de l'alimentation, au moyen de vannes à glissières, se fait aux dépens de l'efficacité de l'irrigation et donc de son coût (Hecq et Dugauquier, 1990).

La résultante est, d'une part, un problème de compétitivité et, d'autre part, un accroissement des risques environnementaux.

- Le manque de compétitivité trouve son origine dans les techniques utilisées mais également dans l'organisation sociale. En effet, en s'intéressant à cette organisation en castes hiérarchisées, on comprend mieux pourquoi les paysans des PIV se tournent primordialement vers l'autoconsommation. Ainsi, les castes nobles préfèrent s'investir dans différentes formes de PIV (Lericollais, 1993): cela leur permet de

Carte 2 : La cuvette de Nianga



--- Digue, route de la cuvette
 — Digue principale

Source : Seguis, Dubee, 1998.

diminuer les risques, mais pas d'intensifier; quant aux autres castes, la superficie en leur possession est juste suffisante à la satisfaction de leurs propres besoins.

- La multiplication des PIV risque également d'accroître la dégradation des sols déjà observée: en effet, sur l'ensemble des PIV de la région, la salinité a en moyenne été multipliée par 10 (en conductivité globale) en moins de 10 ans, tous types de sols confondus (de Poitevin, 1993).

1.3 - Les perspectives

Dégager des surplus est un des grands axes de la recherche, par l'augmentation des rendements, ou par la diversification des cultures, le problème principal étant les débouchés.

Ainsi, lors de l'atelier ISRA-ORSTOM (St-Louis, fin octobre 1993) portant sur la culture irriguée, ont été évoquées l'influence des pratiques culturales sur l'élaboration du rendement (Poussin, 1993) ou encore les possibilités de diversification des cultures (Dancette et Gay, 1993).

Un autre moyen de dégager des surplus est d'agir sur les charges; or, la plus pesante en agriculture irriguée est l'eau. Ainsi, sur le Périmètre Autonome de Nianga (PAN), qui sert de cadre à notre étude (cf cartes 1 et 2), la redevance hydraulique de 41 000 Francs CFA / ha (30% des charges totales), jusque là subventionnée, devra progressivement passer à 65000 Francs CFA / ha (entretien M. N'Dao, 1993). Ceci explique la mise en place d'une étude ayant pour objectifs l'évaluation de l'efficacité de l'eau en riziculture irriguée, et la prise en compte des conséquences de sa gestion sur l'environnement.

1.4 - Les risques de dégradation (Boivin et al., 1993)

1.4.1 - La salinisation

D'une manière générale, la salinité provoque une augmentation de la pression osmotique de la solution du sol et empêche ainsi l'absorption racinaire. Pour améliorer les sols salins il faut assurer le lessivage des sels solubles.

En agriculture irriguée, c'est le risque le plus couramment évoqué. Dans la vallée elle est chlorurée-sodique et est due à des poches de sel, d'origine marine (transgressions marines du quaternaire), que l'on trouve en profondeur, piégées dans les sédiments. L'irrigation par submersion, en contribuant au tassement des sols en profondeur, provoque la remontée de la nappe en surface. Ensuite, des conditions d'évaporation permanente sont à l'origine de l'ascension des sels par capillarité.

En riziculture, la nécessité d'une lame d'eau en charge en permanence maintient les sels en profondeur; et, les premiers centimètres de sol suffisent au développement du riz. En conséquence, la salinité n'est pas un facteur limitant pour cette culture. Par contre, cela limite fortement les possibilités de diversification; ainsi, la salinité des PIV de la région a déjà atteint les seuils de tolérance de l'oignon et de la tomate (de Poitevin, 1993).

1.4.2 - La sodisation

Les performances des cultures peuvent être affectées par la toxicité directe du sodium, ou par son influence sur la perméabilité du sol. L'effet du sodium dépend de la concentration des autres ions dans la solution du sol, ceci est exprimé par le SAR* (Sodium Absorption Ratio).

Une étude menée par les pédologues de l'ORSTOM a permis de confirmer la présence (déjà identifiée en 1973 par FAO/SEDAGRI), dans la cuvette de Nianga, en dépit de pH acides, de sols à alcalis. Ils se caractérisent par une fixation abondante de sodium (Exchangeable Sodium Percentage (ESP*) > 15%) sur le complexe d'échange.

Des sols à ESP supérieurs à 10% étaient présents en quantité non négligeable (37% des analyses). Cette valeur de l'ESP est généralement considérée comme un seuil critique à l'observation de problèmes physico-chimiques (dispersion des argiles...). Les extraits de pâte saturée et l'analyse de l'eau d'irrigation ont révélé des SAR supérieurs à 15, condition au risque d'alcalinisation.

On notera que les sols ont, avant mise en culture, un pH acide (4,5 en moyenne), et un complexe d'échange riche en cations bivalents, ces deux facteurs étant susceptibles de protéger (pour combien de temps ?) les sols. Cependant, il faut savoir que la dégradation de la structure du sol après sodisation est difficilement récupérable.

1.4.3 - L'alcalinisation

La concentration de l'eau d'irrigation, du fait de son alcalinité résiduelle relativement importante, peut aboutir à plus ou moins long terme à la hausse du pH du sol, et à la sodisation du complexe d'échange. Ce phénomène est appelé alcalinisation. De façon plus explicite, dès son produit de solubilité atteint, la calcite est le premier minéral à précipiter: il précipite une mole de CO_3^{--} pour une mole de Ca^{++} .



Si on apporte une eau légèrement excédentaire en carbonates, la concentration de l'eau va conduire à une accumulation résiduelle de carbonates. Ceci va entraîner la hausse du pH et une augmentation du SAR de la solution.

Le pH élevé (en présence de carbonates de Na) peut causer la dissolution de la matière organique, cela crée des tâches noires en surface ("tâches de mazout"), qui ont pu être observées dans le périmètre de Nianga.

L'alcalinisation a pour conséquence, du fait de la sodisation du complexe d'échange, l'effondrement de la structure du sol. De plus, l'élévation du pH tend à insolubiliser certains oligo-éléments, tel le zinc, sous forme d'hydroxydes; et à créer des conditions favorables à la volatilisation des engrais azotés. En conséquence, on comprend aisément que la valeur agronomique du sol devient très faible.

* Teneur en sodium échangeable par rapport à la capacité d'échange

$$\text{ESP} = \frac{100 (-0.0126 + 0.01475 \text{ SAR})}{1 + (-0.0126 + 0.01475 \text{ SAR})} \quad \text{Exchangeable Sodium Percentage}$$

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\frac{\sqrt{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}}{2}} \quad \text{Sodium Absorption Ratio}$$

$\text{Na}^+, \text{Ca}^{++}, \text{Mg}^{++}$: teneurs en milli-équivalents de la solution du sol

D'après Memento de l'Agronome, 4^{ème} édition, 1991.

Nous avons vu que le sol est un peu protégé (pH acide, cations bivalents), cependant l'alcalinisation est irrécupérable. Aussi, il serait important d'évaluer l'échéance des risques dans le temps et dans l'espace; et pour cela, un suivi de la qualité des sols ou une étude par modélisation pourrait être entrepris.

La concentration de l'eau d'irrigation est à l'origine de cette dégradation; elle est facilitée par la dynamique évaporatoire permanente en surface, conséquence de la remontée de la nappe suite à un excédent d'irrigation.

Les zones à risque d'alcalinisation sont donc celles où l'évaporation est forte, et d'autant plus lorsqu'elles sont surélevées puisque l'"effet mèche" vient augmenter ce risque. Ainsi ce sont les bordures de parcelles, ou canaux qui sont les premières concernées.

La concentration de l'eau d'irrigation est inévitable, cependant, pour lutter contre la dégradation des sols, il faut chercher à la réduire, et il faut également assurer une fraction de lessivage.

L'origine des problèmes de conservation des sols évoqués est, dans tous les cas, une nappe affleurante.

1.5 - La problématique

Toutes ces observations nous ont permis de mettre l'accent sur les pertes en eau d'irrigation. En effet, celles-ci entraînent non seulement la dégradation des aménagements, des coûts de pompage élevés, mais aussi sont à l'origine de la remontée des nappes en surface.

C'est dans cette optique que les laboratoires de pédologie et d'hydrologie de l'ORSTOM de Dakar ont voulu réaliser un bilan hydro-salin sur une parcelle rizicole du grand périmètre de Nianga.

Pourquoi une parcelle rizicole du périmètre de Nianga?

Ce bilan est réalisé dans la continuité d'un programme de recherches sur ce périmètre.

D'autre part, nous avons évoqué l'importance des superficies occupées par la riziculture (cf 1.1), cette culture est, de plus, le lieu "idéal" de concentration des eaux; c'est pourquoi l'étude aura pour support une parcelle rizicole.

Enfin, le choix de cette parcelle devra permettre d'obtenir des résultats représentatifs d'une zone géographique, la plus étendue possible.

Le bilan devra, notamment, permettre de dégager, au niveau de la parcelle, les résultats suivants:

- la valeur de l'évapotranspiration réelle (ETR) du riz d'hivernage
- le calcul de la fraction de lessivage assurée au cours de la culture, et donc pouvant enrayer l'engrenage de dégradation des sols
- la valeur des pertes directes journalières
- la quantité de sels exportée
- l'estimation du facteur de concentration des eaux parcellaires, conditionnant un risque éventuel d'alcalinisation.

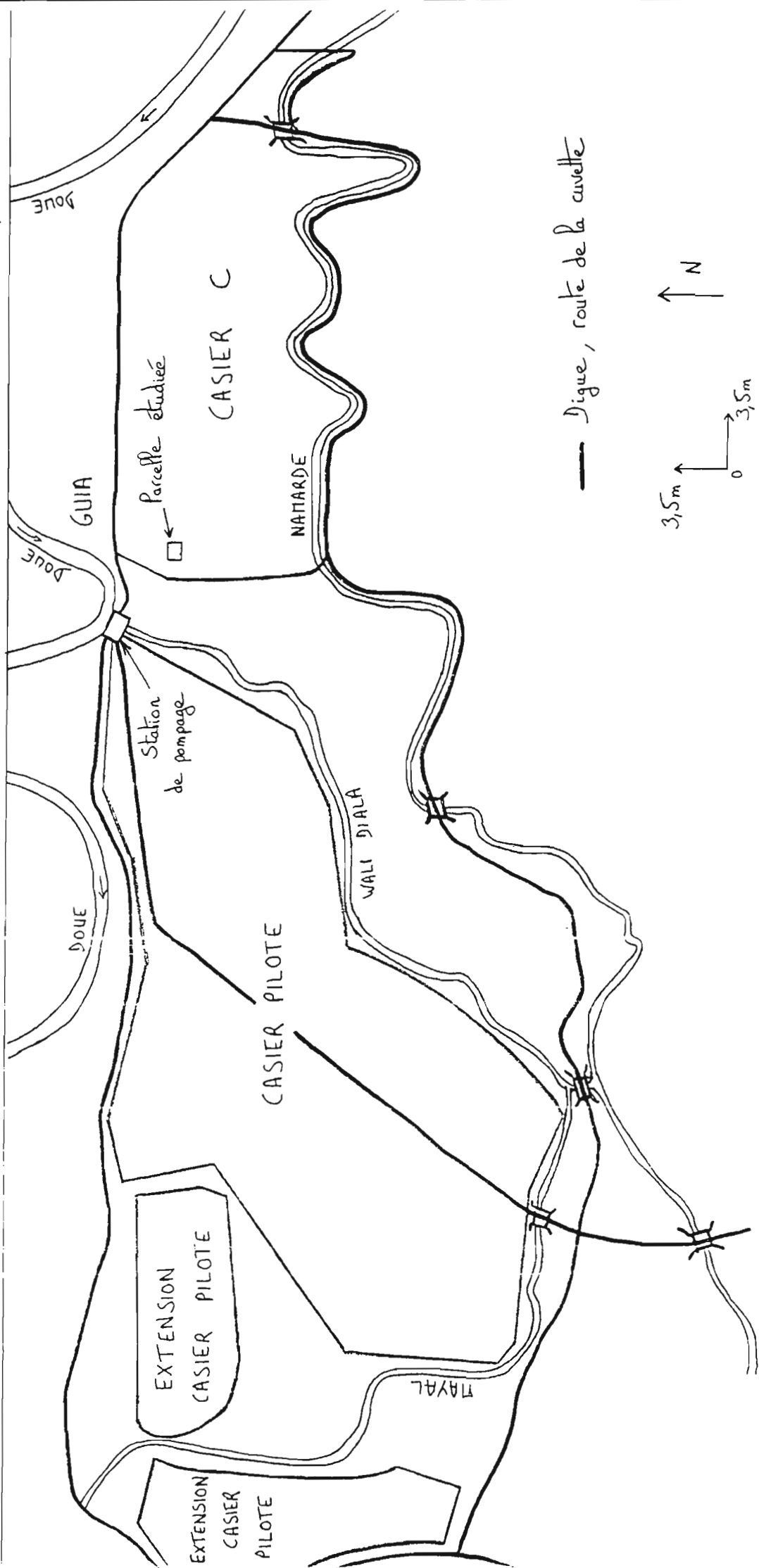
Par ailleurs, en parallèle, au niveau du périmètre, un bilan plus global mettra en évidence:

- la consommation en eau du périmètre
- la quantité de sels extraite du périmètre.

Enfin, en reliant ces deux échelles, nous espérons mieux comprendre le fonctionnement du périmètre. D'un point de vue hydrique, nous cherchons plus particulièrement à mieux cerner les flux des pertes. Au point de vue salin, nous voudrions aboutir au mécanisme de transferts des sels.

Carte 3 : Plan du périmètre de Nianga (PAN)

Source: SAED



2 - MATERIEL ET METHODE

2.1 - Le site

- Le périmètre (PAN) (cf carte 3)
Superficie aménagée: 1 200 ha
Alimentation en eau: station de pompage à Guia dans le marigot du Doué, défluent du fleuve Sénégal.
Drain principal: Wali-Diala
Disposition du périmètre (Sarr, 1993): le PAN, dont l'aménagement est de type tertiaire avec maîtrise complète de l'eau, est divisé en trois casiers:
 - le casier Pilote, réalisé en 1975, d'une superficie de 650 ha
 - le casier C, réalisé en 1984, couvrant 350 ha
 - et, le casier de l'Extension, réalisé en 1989, couvrant 200 ha.La parcelle étudiée est issue du casier C. Ce casier est un aménagement tertiaire simplifié, en ce sens où il n'est pas muni de canaux tertiaires. Le réseau d'irrigation est composé d'un canal principal et de six canaux secondaires sur lesquels sont directement branchés les modules à masques alimentant les irrigateurs. Par contre, le réseau de drainage compte la gamme complète de canaux.
Les parcelles sont regroupées en mailles hydrauliques, qui constituent des unités autonomes exclusivement gérées par les groupements de producteurs.

- La parcelle
Superficie nette irriguée: 1,13 ha. Afin de pallier une différence de hauteur trop importante entre les deux extrémités de la parcelle (cf figure 2 p 10), celle-ci a été séparée en deux par une diguette centrale, munie de deux orifices assurant la communication lors d'un apport ou d'une vidange.

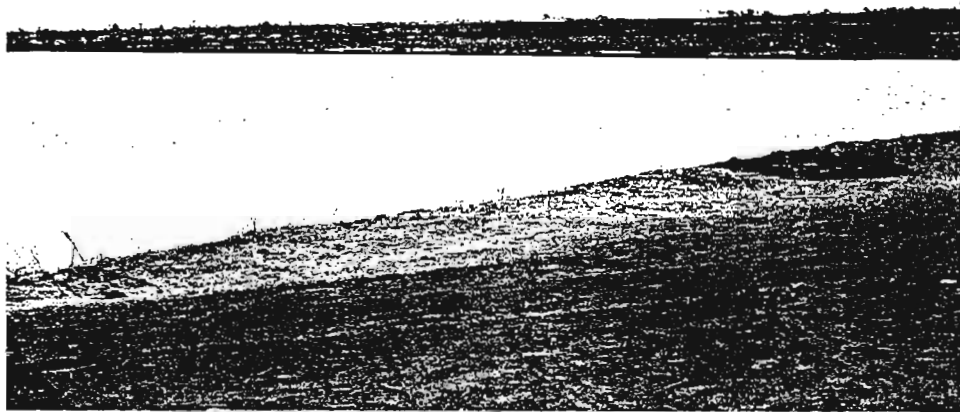
Sols: unité géomorphologique: "delta de rupture" (zone de transition entre les "hautes levées" et la cuvette de décantation) (Michel, 1973)
nom vernaculaire : "Fondés", soit 38% de sable, 32% de limons, et 30% d'argile (d'après analyses de sol - laboratoire de chimie de l'ORSTOM de Dakar-Hann, 1993. cf annexe 9).

Elle a été choisie pour trois raisons:

Sa position plus élevée a facilité la conception et l'installation du canal de vidange dans lequel sont mesurés les débits évacués.

Le deuxième critère de choix a été la représentativité. En effet, d'une part, la parcelle est située sur une unité géomorphologique étendue, relativement homogène (Boivin et al., 1993). D'autre part, le rendement attendu lors de la campagne précédente semblait bien caractériser la maille hydraulique, et ceci en dépit du niveau technique du paysan qui nous a semblé plutôt "meilleur" que la moyenne.

Enfin, le propriétaire voisin, appartenant à la même famille, travaillait déjà en collaboration avec l'ORSTOM.



La première parcelle irriguée ou le début du tour d'eau.



Une semaine plus tard, c'est la vidange de la parcelle.

- La culture (riz):

Saison: hivernage

Date de semis: 15/08/1993

Variété: Jaya

- La période:

Les résultats présentés concernent la période allant de début août, démarrage de la campagne d'hivernage, jusqu'à la date arbitraire du 21 septembre 1993 (fin septembre pour le périmètre). L'étude n'a pu être étendue jusqu'à la fin de la campagne: le bilan est donc réduit aux premiers mouvements d'eaux, cependant ceux-ci sont les plus importants pour le bilan salin qui n'en souffre donc pas.

2.2 - Préliminaire

Courant juin, un premier repérage du site a été effectué ainsi que quelques mesures d'évapotranspiration qui nous ont confirmé l'homogénéité de la parcelle. Nous avons également évalué l'importance de l'infiltration afin de travailler avec un matériel de mesures adapté. Le protocole expérimental prévoyait des prélèvements pour analyses de sol, qui ont été réalisés à la fin de la campagne de contre-saison, afin de mieux connaître le matériel sur lequel nous travaillons. Cependant, ne disposant pas des résultats complets de ces analyses, nous ne pourrions approfondir ce point. Enfin, nous avons pu apprécier la façon dont est gérée l'eau.

La gestion de l'eau

- A l'échelle de la parcelle

A la mise en eau, une lame d'eau est apportée pour saturer le sol, c'est la phase d'imbibition. Un ou deux jours après cette irrigation, le semis est effectué à l'aide de semences prégermées, la lame d'eau compte une trentaine de centimètres; une telle hauteur empêche tout dégât par les oiseaux.

Environ une semaine après l'irrigation, la vidange de la parcelle permet de fortifier l'enracinement des jeunes plants, et de lessiver les parcelles éventuellement salées.

Puis, trois semaines après le semis, la parcelle est à nouveau mise en eau, des irrigations d'entretien assureront le maintien d'une lame d'eau d'une vingtaine de centimètres jusqu'en fin de campagne.

Enfin, une dizaine de jours avant la récolte, la parcelle est drainée afin de faciliter les opérations de récolte.

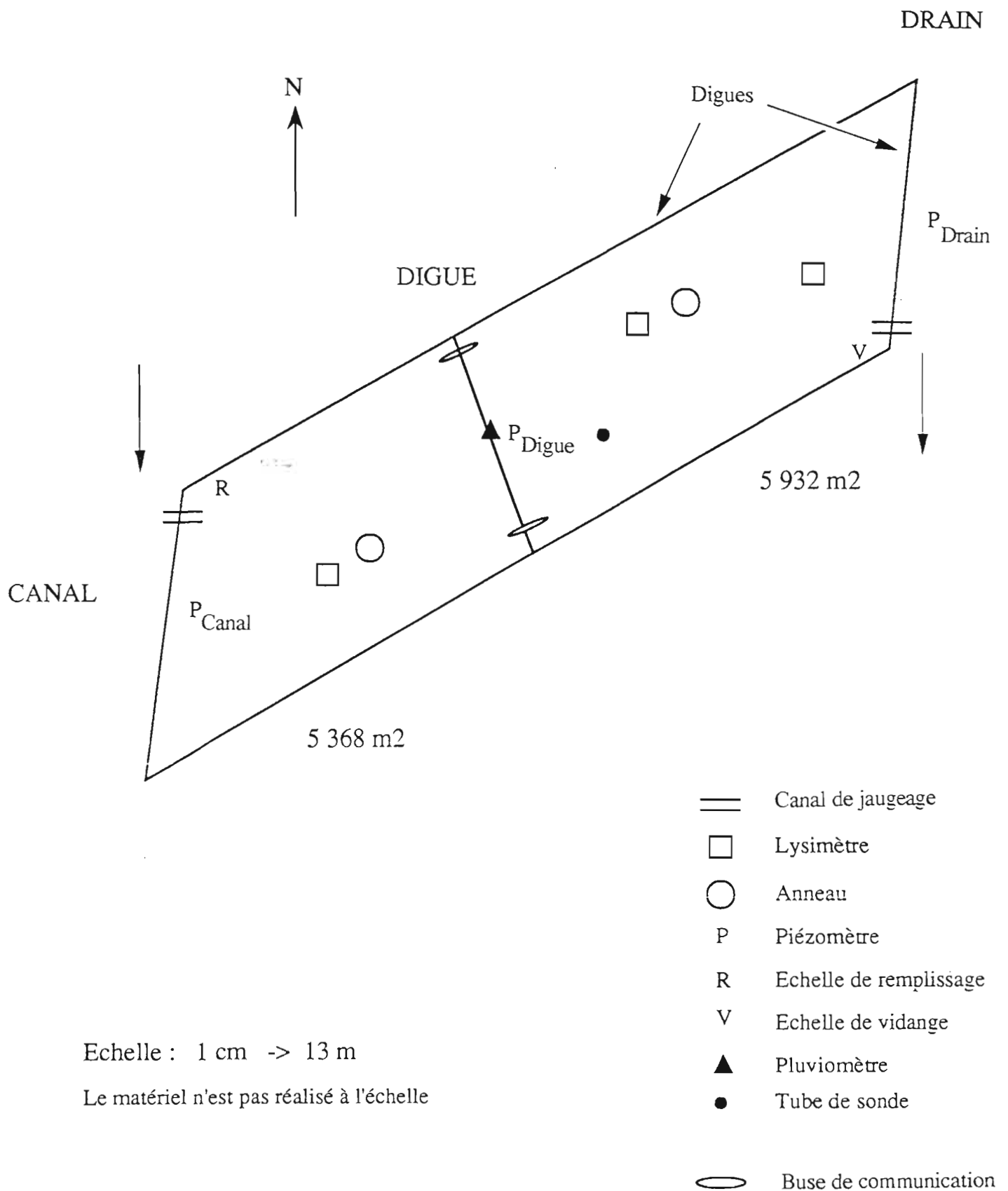
- A l'échelle de la maille hydraulique

Les paysans établissent un tour d'eau strict pour la première irrigation de la campagne. Par la suite, les différents autres apports se font suivant les désirs de chacun. Si deux paysans souhaitent irriguer en même temps, un arrangement à l'amiable sera trouvé.

- A l'échelle du périmètre

La station de pompage est, depuis le désengagement de l'Etat, sous la direction de l'Union des SUMA (Section d'Utilisation en commun du Matériel Agricole), pivot de l'organisation paysanne; cependant, la SAED (Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta du fleuve Sénégal et des vallées du fleuve Sénégal et de la Falémé) a gardé un rôle d'appui-conseil, notamment lors de l'établissement du calendrier de pompage.

Figure 1: Représentation schématique de la parcelle et de la situation du dispositif expérimental



Echelle : 1 cm -> 13 m

Le matériel n'est pas réalisé à l'échelle

2.3 - Pour déterminer....

La figure 1 présente la disposition spatiale du dispositif expérimental, constitué de deux canaux de jaugeages, pour les mesures des volumes entrés et évacués; trois lysimètres, deux anneaux, et deux échelles limnimétriques, pour les mesures des pertes; trois piézomètres; un tube pour les mesures de sondes; et, un pluviomètre.

Nous avons choisi arbitrairement d'appeler les piézomètres, lysimètres et anneaux "canal", "digue" ou "drain", suivant leur proximité au canal d'aménée, à la diguette centrale, ou au drain.

2.3.1 - les éléments du bilan hydrique

2.3.1.1 - *Les volumes d'eau dans le sol*

- Mesures d'humidité pondérale

Des prélèvements à la tarière ont été effectués début août, avant le démarrage de la campagne, puis fin août, avant la vidange, afin d'évaluer respectivement les stocks d'eau initial et à saturation contenu dans le sol. L'échantillonnage est constitué par neuf points répartis sur l'ensemble de la parcelle, les prélèvements sont effectués tous les 20 cm jusqu'à 120 cm, puis tous les 30 cm jusqu'à 180 cm.

Pour connaître les volumes d'eau stockés à partir des humidités pondérales ainsi obtenues, nous avons mesuré la densité du sol à l'aide d'une sonde gamma-densimétrique Campbell (Type CPN 502-1.5) (cf annexe 1.5). Les comptages bruts, lus tous les 10 cm jusqu'à 80 cm, ramenés à un comptage standard donnent un comptage réduit. Nous introduisons celui-ci dans l'équation du constructeur pour obtenir la densité apparente humide, puis sèche. Au delà de 80 cm, nous considérons que la densité ne varie plus.

- Profils d'humidité

Nous avons réalisé un suivi des profils d'humidité du sol à l'aide d'un humidimètre neutronique Solo 25 (cf annexe 1.4) afin, notamment, de réaliser les prélèvements de sol saturé au moment opportun.

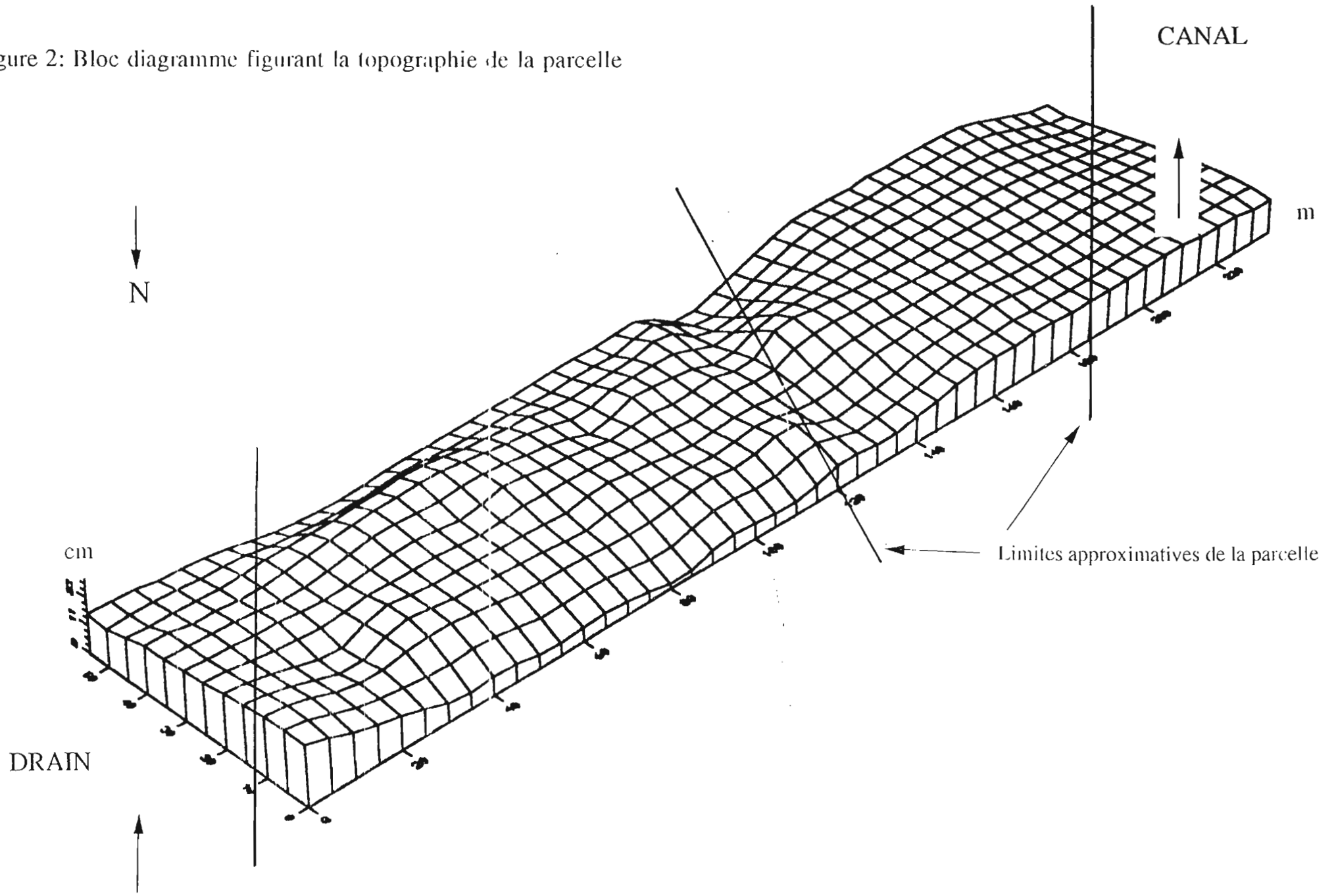
Nous regrettons cependant la longueur du tube d'accès, qui ne nous a permis de faire des mesures que jusqu'à 60 cm. D'autre part, la mesure de surface doit être prise avec précaution en raison du volume effectif de mesure qui est une sphère d'autant plus grande que le sol est humide. Enfin, nous ne perdons pas de vue que ces mesures sont réalisées dans un seul tube même si, pour 1,13 ha supposés homogènes, cela est tout à fait acceptable.

2.3.1.2 - *Les volumes apportés ou évacués*

- Volumes d'entrées et de sorties d'eau

Deux canaux de jaugeages à seuil épais (cf annexe 1.1) ont été conçus, afin de contrôler respectivement le remplissage et la vidange de la parcelle. Le principe consiste à rendre le niveau d'eau dans le canal indépendant du niveau aval. Pour atteindre cette indépendance, on utilise un seuil, le plus tranchant possible, qui rend l'écoulement torrentiel à la sortie du canal. Ainsi, le débit transitant dans le canal est uniquement fonction de la hauteur à l'entrée du canal. Pour réaliser des jaugeages au micromoulinet, il est indispensable que l'écoulement soit laminaire; c'est pourquoi, la partie située à l'amont du seuil est prévue la plus longue possible.

Figure 2: Bloc diagramme figurant la topographie de la parcelle



Lors de l'installation, les côtés des canaux ont été légèrement déformés par tassage, ce qui induit une modification de la section, et est donc une source d'imprécisions. Ainsi, en assimilant la déformation à un triangle isocèle d'1 cm de hauteur et de base la hauteur du canal (cf "c" sur annexe 1.1), on estime à 4% l'erreur faite sur la section mouillée.

La mesure du débit (ou jaugeage) s'obtient en mesurant, à l'aide d'un micromoulinet, la vitesse du courant en différents points de la section mouillée.

Le micromoulinet est une hélice, fixée sur un axe, et qui tourne librement autour de celui-ci. Il est relié à un compteur, qui enregistre le nombre de tours effectués par l'hélice en trente secondes.

La largeur des canaux étant de 0,5 m, nous avons effectué les mesures de vitesses sur quatre verticales espacées de 10 cm. Puis, à chaque verticale, un comptage a été effectué à quatre profondeurs différentes (la hauteur moyenne de l'eau dans le canal est de l'ordre de 30 cm) (cf annexe 1.2 pour la présentation d'une feuille de relevés).

Nous avons jaugé en continu pendant chaque ouverture des canaux afin de disposer d'un maximum de mesures et de pouvoir ainsi aboutir à des résultats fiables.

Les jaugeages sont ensuite dépouillés à l'aide du logiciel HYDROM: les débits trouvés tracés en fonction du temps nous donnent un hydrogramme, à partir duquel est calculé le volume d'eau écoulé (par intégration de la surface comprise entre le tracé de l'hydrogramme et l'axe des temps en abscisse).

Lors de la première irrigation de la parcelle, une rupture de la digue de chaque côté du canal a permis l'entrée incontrôlée d'un important volume d'eau, et, par conséquent, a rendu le résultat des jaugeages invalide. Pour pallier cette situation, le volume d'eau entré a été recalculé à partir des autres éléments du bilan; le détail est présenté en annexe 6.1.

• Hauteur d'eau

Deux échelles (cf annexe 1.1), situées aux deux extrémités de la parcelle (près des canaux) (cf figure 1 p 9), permettent le suivi de la lame d'eau dans la parcelle, et donc celui des volumes apportés, évacués ou perdus.

Ces échelles sont inclinées à 60° par rapport à la verticale; ainsi, les dénivelés lus sont dilatés, et une meilleure précision est obtenue.

• Topographie (cf figure 2 et annexe 3.1)

La topographie n'est pas un outil direct de mesure d'un des paramètres du bilan. cependant elle participe à la vérification ou à la précision des mesures que nous venons de présenter, ce qui justifie sa place dans ce paragraphe.

La parcelle n'étant pas un simple récipient à fond plat, la baisse de son niveau d'eau ne suffit pas pour en évaluer les pertes. Afin de tenir compte des parties éventuellement exondées, nous avons deux possibilités:

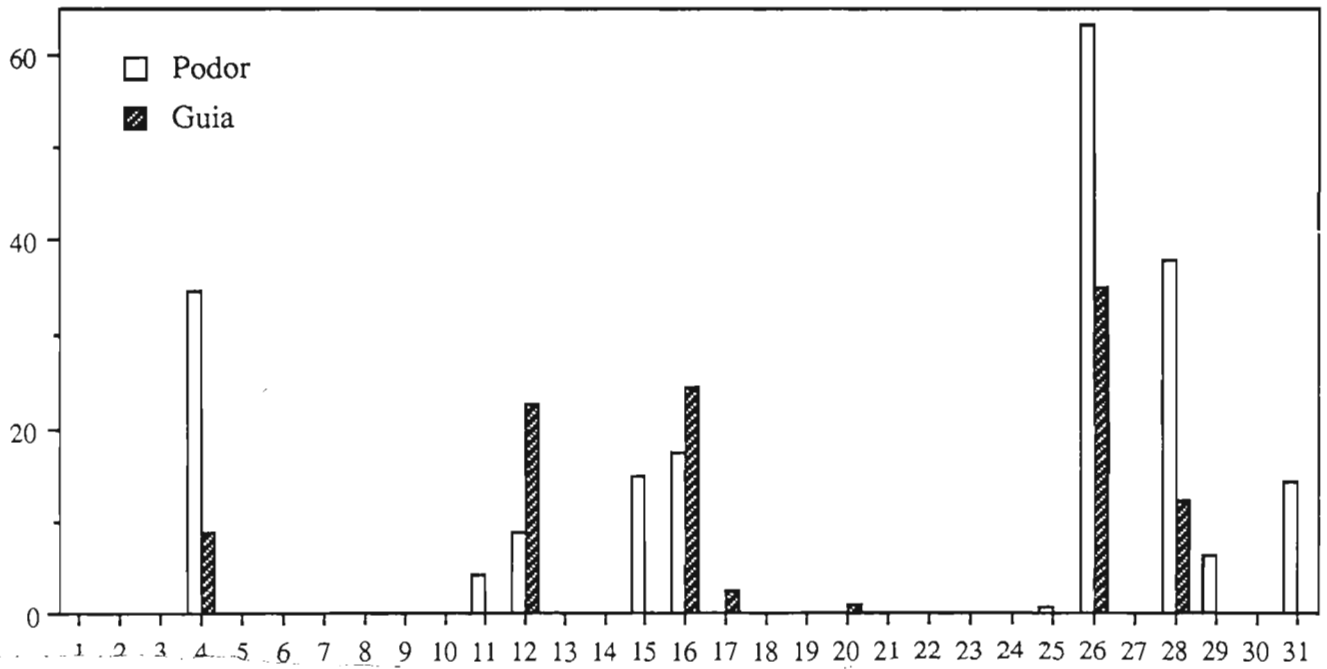
réaliser des jaugeages, afin de déterminer le volume exact d'eau entré

ou réaliser une carte de la topographie parcellaire, à partir de laquelle nous pouvons établir une relation entre la hauteur d'eau et le volume d'eau réellement présent. Nous avons choisi de travailler avec ces deux méthodes afin de pouvoir les confronter.

Toutefois, nous noterons que la topographie, soit une centaine de mesures avec un niveau Nikon AZ-1S, a été effectuée avant le travail du sol, ce qui ne reflète donc pas tout à fait le relief en place, et surtout elle n'a pas été reliée à un repère fixe, ce qui nous oblige à quelques imprécisions regrettables !

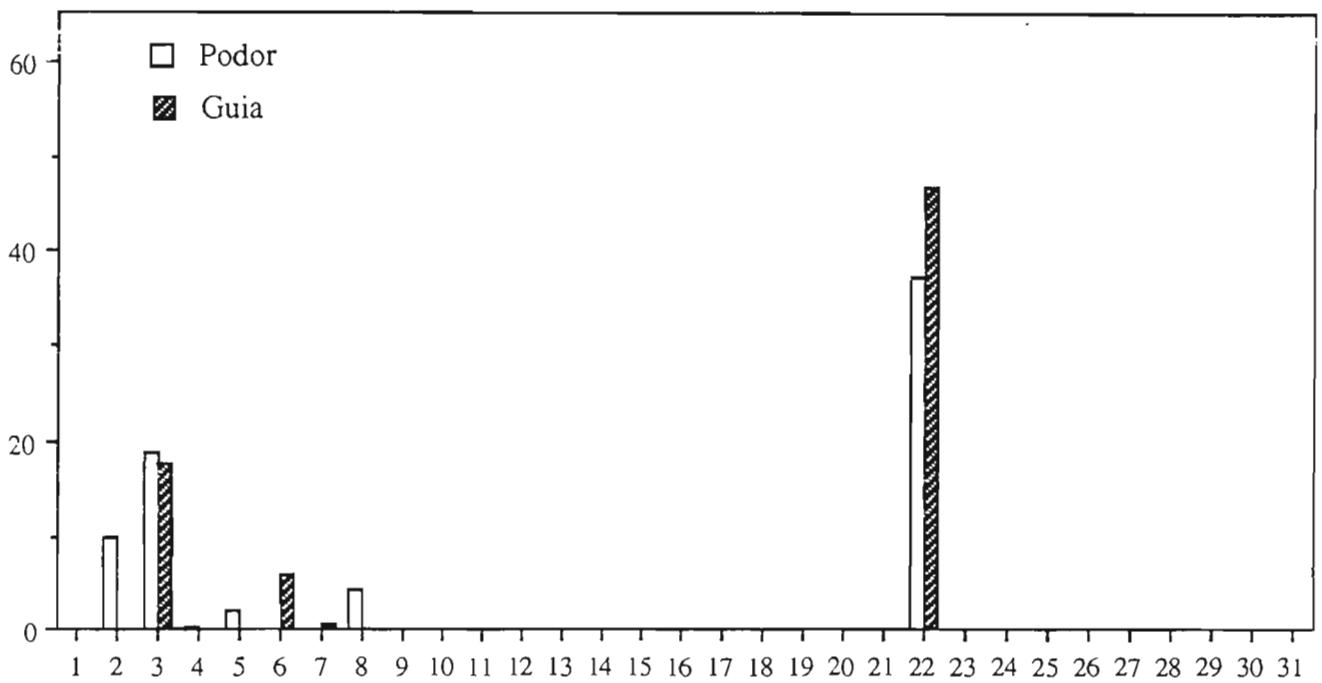
Pluviométrie comparée Podor-Guia Août 1993

Précipitations (mm)



Pluviométrie comparée Podor-Guia Septembre 1993 (jusqu'au 22)

Précipitations (mm)



Nous avons établi, pour chaque demi-parcelle, un abaque du volume d'eau présent en fonction de la hauteur à l'échelle limnimétrique (cf annexe 3.2). Pour cela, nous avons calculé pour chaque échelle son zéro absolu, qui correspond au volume d'eau présent dans la parcelle alors que la lecture sur l'échelle est nulle.

Les coordonnées spatiales des échelles, non établies, ont du être approximées, ce qui induit un pourcentage d'erreur. Cependant, les zones concernées étant assez homogènes, et connaissant la différence de cote entre les deux échelles, cela nous permet de minimiser cette erreur (zéro absolu + ou - 1), et de prendre ces abaques comme un véritable support.

Nous avons vérifié la cohérence des jaugeages en nous appuyant, notamment, sur ces abaques (cf annexe 3.3), et c'est ainsi que nous avons, en particulier, remis en cause le volume de vidange jaugé.

- Précipitations

Un pluviomètre (type Association) a été installé au milieu de la parcelle à un mètre au dessus du sol. Celui-ci est indispensable, étant donné les importantes variations du champ pluviométrique en climat semi-désertique. Ainsi à Guia, pour le mois d'août 1993, les précipitations (cf graphe 1) n'ont atteint que 52% des valeurs enregistrées à Podor, distant de six kilomètres. En septembre 1993, les quantités tombées ont été à peu près identiques pour ces deux stations, mais réparties un peu différemment dans le temps. S'agissant d'une rizière, nous considérons la totalité des pluies comme efficaces.

2.3.1.3 - Les pertes

- Evapotranspiration et infiltration

En annexe 1.3 on trouvera la représentation schématique du matériel utilisé, et la figure 1 (p 9) en rappellera la disposition spatiale dans la parcelle.

Les pertes par évapotranspiration sont déterminées par le suivi de la lame d'eau dans un lysimètre (0,36 m²). Celui-ci est une cuve étanche implantée dans la parcelle juste après le travail du sol, et remplie de terre en ayant le souci de reconstituer, dans la mesure du possible, les différents horizons. Il faut ensuite veiller à ce que le riz y soit semé puis entretenu de façon identique au reste de la parcelle. Nous répartissons trois lysimètres dans la parcelle, tous trois étant placés à une quinzaine de mètres du bord.

D'autre part, le suivi de la hauteur d'eau à l'intérieur d'un anneau (0,88 m²), enfoncé de 25 à 30 cm dans le sol, permet d'évaluer les pertes par évapotranspiration et infiltration. Nous disposons de deux anneaux de ce type, implantés à quelques mètres de deux des lysimètres, pour une comparaison des résultats.

Pour ces deux types de dispositifs, les mesures sont effectuées quotidiennement. L'infiltration est déterminée par différence entre les mesures lysimétriques et celles dans les anneaux.

- Hauteur de la nappe

Trois piézomètres permettent le suivi des variations du niveau de la nappe au niveau du drain, et dans la parcelle (au milieu et aux abords du canal) (cf figure 1 p. 9). Cela nous permettra de dater le recharge de la nappe.

La margelle des piézomètres est à 1,15 m au dessus du sol. La mesure du niveau piézométrique est faite à la margelle au moyen d'une sonde à signal lumineux.

2.3.2 - les éléments du bilan salin

- Carte de conductivité électrique

A l'aide d'un conductivimètre électromagnétique Geonics EM 38, nous mesurons, avant la première irrigation et après la première vidange, la conductivité de la parcelle. Cela nous permet d'obtenir son évolution dans le temps et dans l'espace. Notons toutefois que des restes d'eau après la vidange nous ont gênés pour rétablir une carte complète.

La carte de conductivité électrique nous offre une bonne caractérisation des poches de sel (Boivin et al., 1993), même si elle ne nous donne pas une relation directe avec la quantité de sel présent dans le sol.

- Conductivité de l'eau

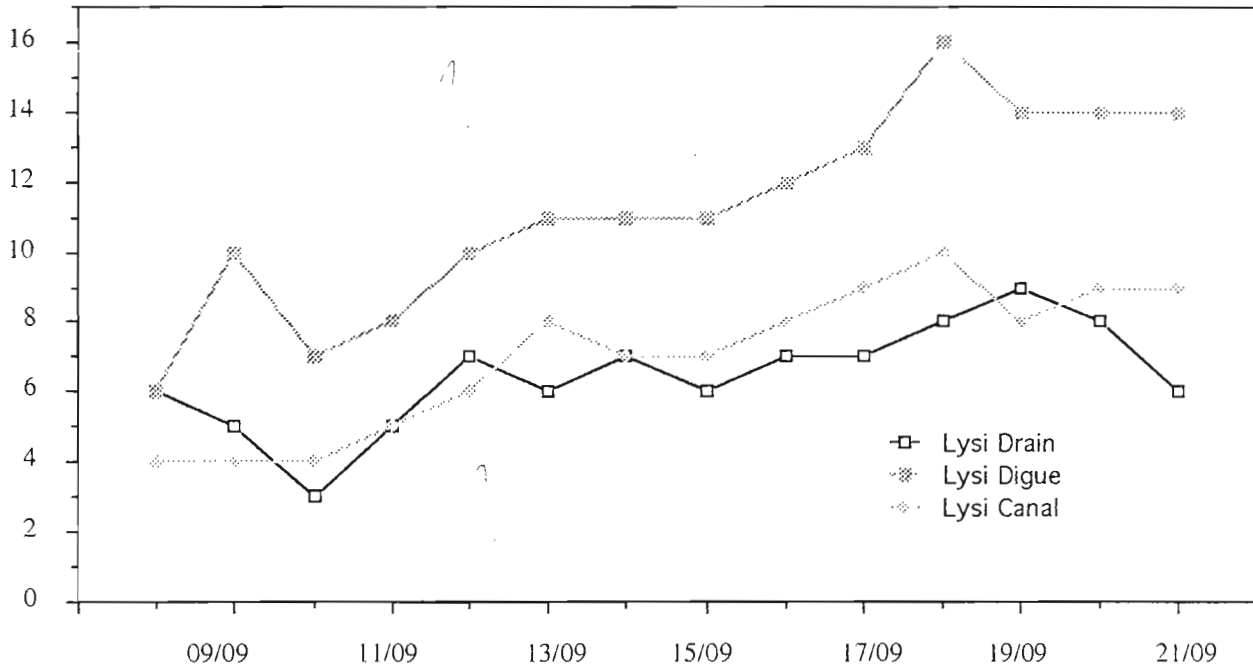
La mesure de conductivité d'une solution est en relation directe avec la salinité de celle-ci. Les coefficients de cette relation "conductivité-salinité" sont déterminés à partir de l'étalonnage de l'appareil.

Pour des raisons pratiques, nous avons utilisé deux conductivimètres: un WTW (modèle IP 65) pour les mesures parcellaires, et un HANNA (modèle HI 8733) pour le périmètre. Le principe de leur étalonnage est présenté en annexe 2.

Au niveau de la parcelle, afin d'évaluer la quantité de sel entrée et évacuée, nous mesurons la conductivité de l'eau lors de chaque mouvement d'eau. D'autre part, nous suivons également la conductivité de la nappe phréatique, en effectuant des prélèvements dans les piézomètres.

A l'échelle du périmètre, des mesures de conductivité sont réalisées dans les principaux drains. Cependant, des pluies survenues pendant la période correspondant à la première vidange des parcelles nous ont gênés pour en réaliser un suivi rigoureux. Pour aboutir aux volumes de sel, à partir de la conductivité de l'eau, il nous faut connaître les volumes d'eau évacués. Nous réalisons régulièrement, à cet effet, des jaugeages au micromoulinet au niveau de l'ouvrage de vidange du périmètre. X

ETR (mm)



Grphe 2: Mesures d'évapotranspiration dans les différents lysimètres

3 - RESULTATS

3.1 - Une mesure de l'évapotranspiration réelle du riz

- Valeur

Les mesures d'évapotranspiration ont été effectuées entre la deuxième mise en eau (07/09), soit 24 jours post-semis, et le 21/09, nous avons juste réalisé une interpolation pour la valeur non mesurée de la journée du 12/09.

L'ETR moyenne du riz est de **8 mm/jour**. Dans un souci d'être plus proche de la réalité, nous avons établi deux moyennes pour la période: avant le 15/09: 6,5 mm/jour; et après le 15/09, soit un mois après le semis ce qui correspond à l'approche du tallage: 9,4 mm/jour. Les valeurs d'ETR trouvées sont donc bien fonction du stade du riz, ce qui est rassurant quant à leur fiabilité.

- Référence

Des calculs d'évapotranspiration du riz (d'après $ET_0 * kc$), réalisés à Richard Toll (cf carte 1 p 2), confirment l'ordre de grandeur mesuré. En effet, pour la même variété, avec un semis au 01/08, le résultat est de 920 mm pour l'ensemble du cycle (Raes, 1992), soit 7,5 mm/jour.

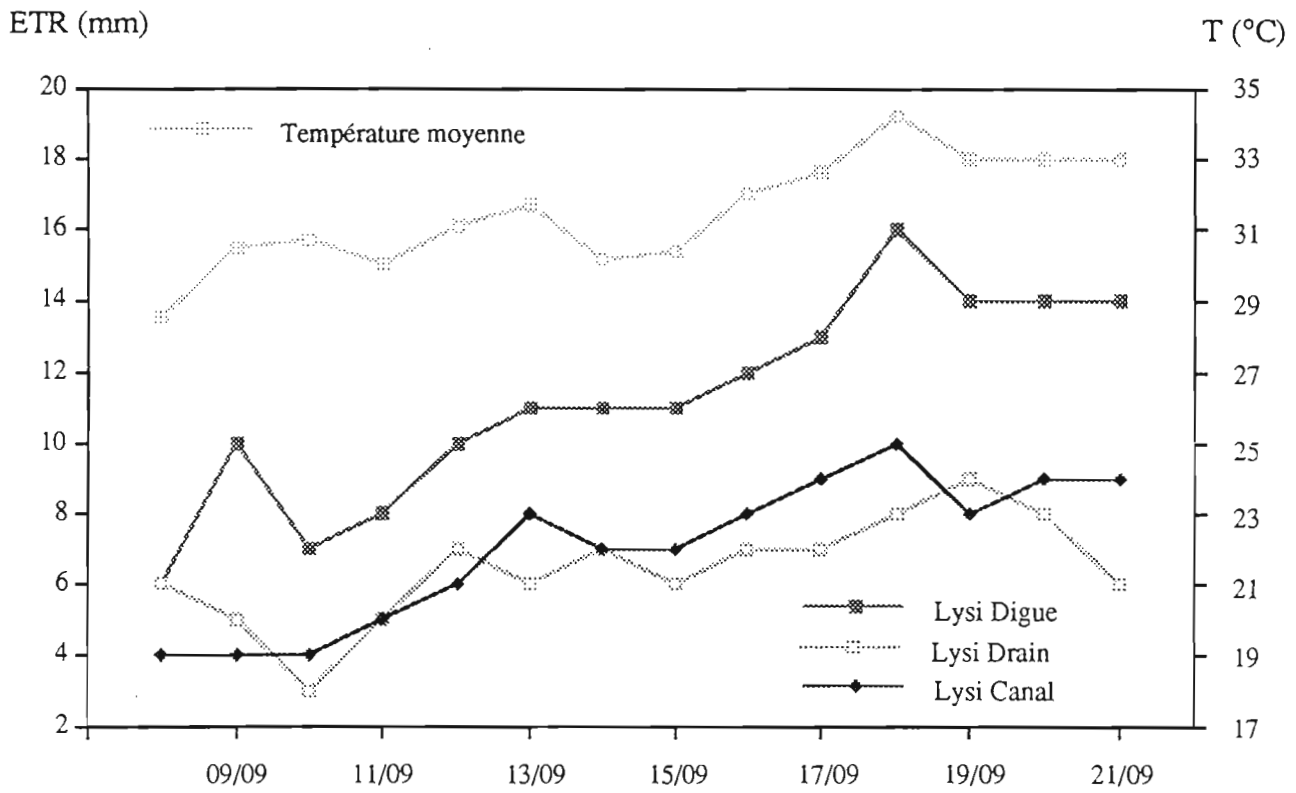
- Analyse

Nous observons des variations importantes entre les différents lysimètres (cf graphe 2). celles-ci sont liées à l'échantillon. Ainsi, dans le lysimètre "digue", par exemple, le riz est très dense et vigoureux. Ces variations sont, d'une manière générale, représentatives des différents états du riz de la parcelle, et nous donnent donc une valeur d'ETR moyenne proche de la réalité parcellaire.

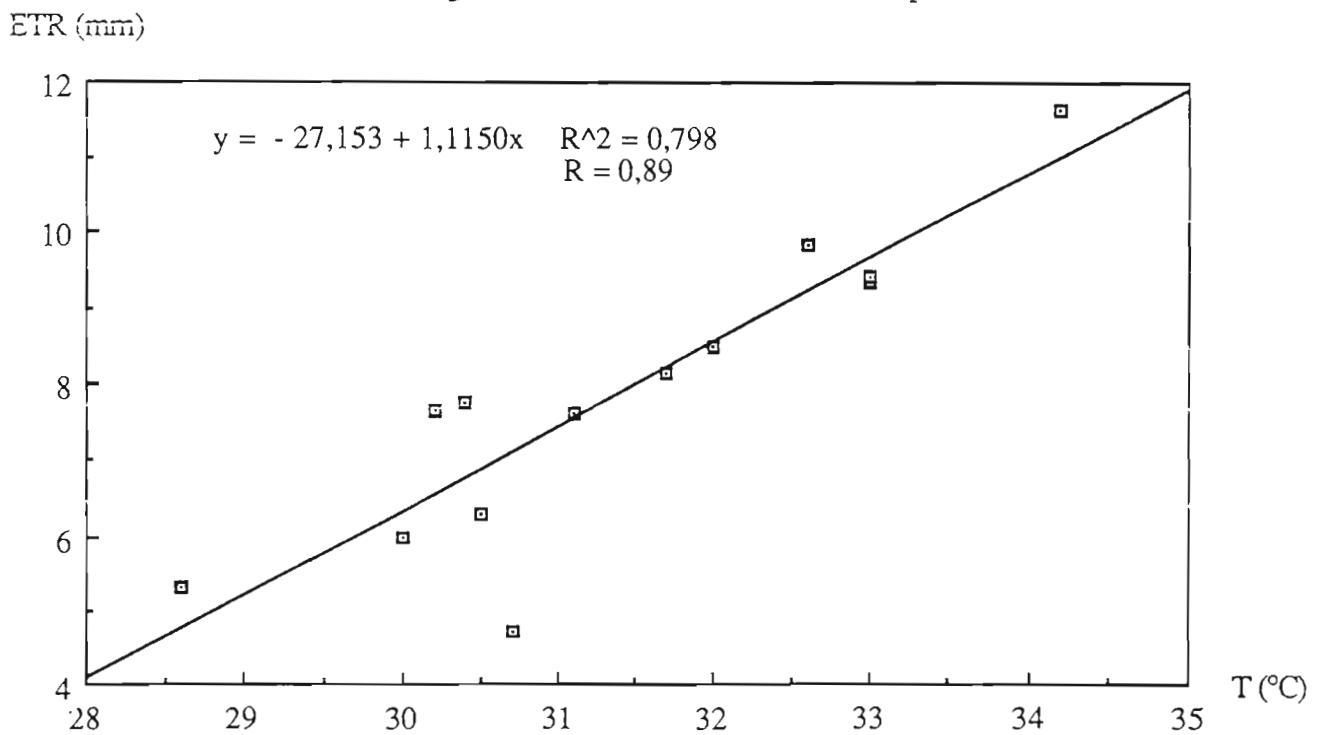
Afin d'apprécier l'influence des facteurs climatiques sur l'ETR, nous établissons les corrélations qui les unissent. Ainsi, l'ETR est fortement corrélée, d'une part, positivement avec la température, d'autre part, négativement avec l'hygrométrie (cf graphes 3 et 4 p.14). Nous n'avons pu dégager que des corrélations très faibles (cf annexe 4) entre nos mesures d'ETR et les valeurs de la station météorologique de Podor d'insolation, de vitesse du vent ou encore de nébulosité (corrélation négative).

Ces résultats nous amènent à déterminer, à l'aide d'une régression multiple (cf tableau 1, graphe 5 p. 15), l'équation reliant l'ETR aux deux facteurs qui lui sont le plus corrélés. La suppression d'une valeur excentrée nous permet de faire passer le coefficient de corrélation de 0,91 à 0,96. Ce coefficient très élevé nous indique que deux paramètres suffisent à donner une bonne estimation de l'ETR que nous avons mesurée.

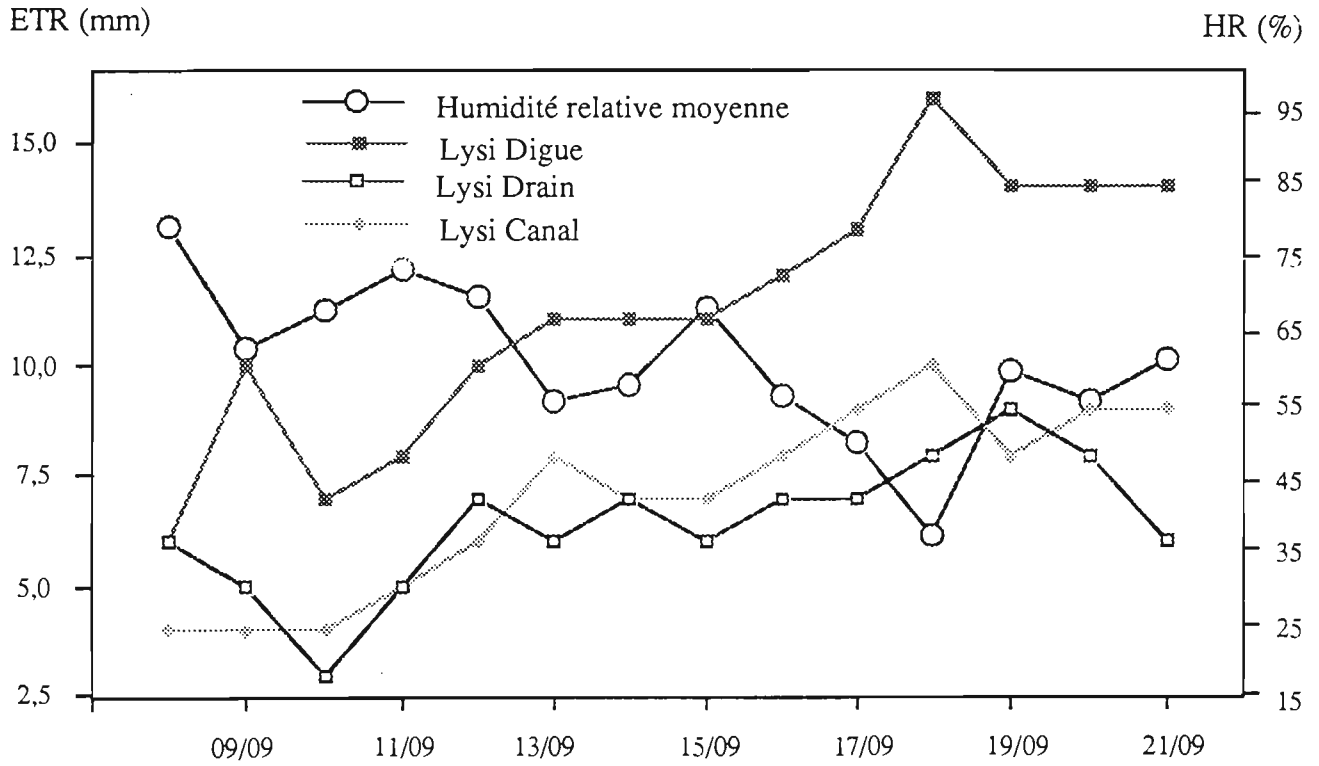
Graphe 3: Influence de la température sur l'ETR



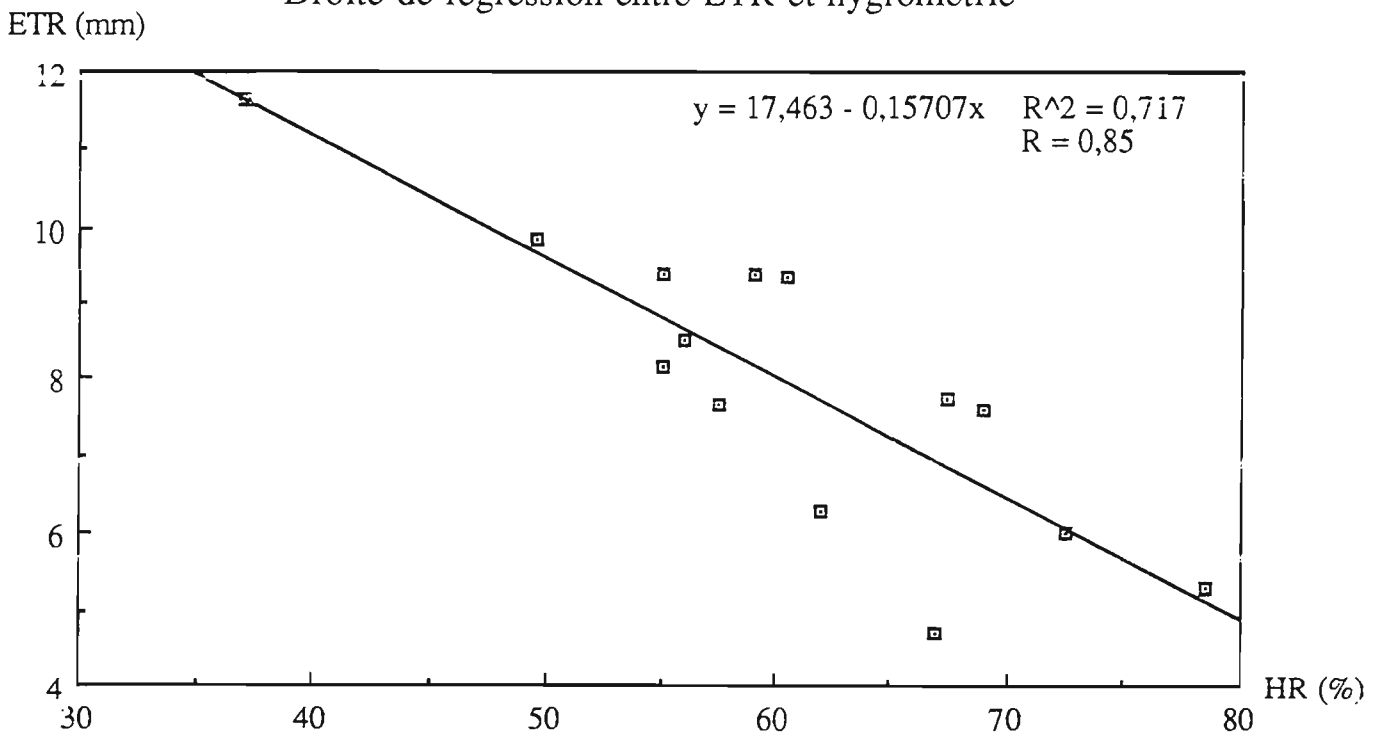
Droite de régression entre l'ETR et la température



Graphe 4: Influence de l'hygrométrie sur l'ETR



Droite de régression entre ETR et hygrométrie



Coefficients de corrélation (14 Valeurs)

ETR-Température	0,8931
ETR-Hygrométrie	-0,8465

Régression multiple

ETR - combinaison linéaire "hygrométrie-température"

	14 Valeurs	13 Valeurs
Coeff. de corrélation	0,91181	0,96561

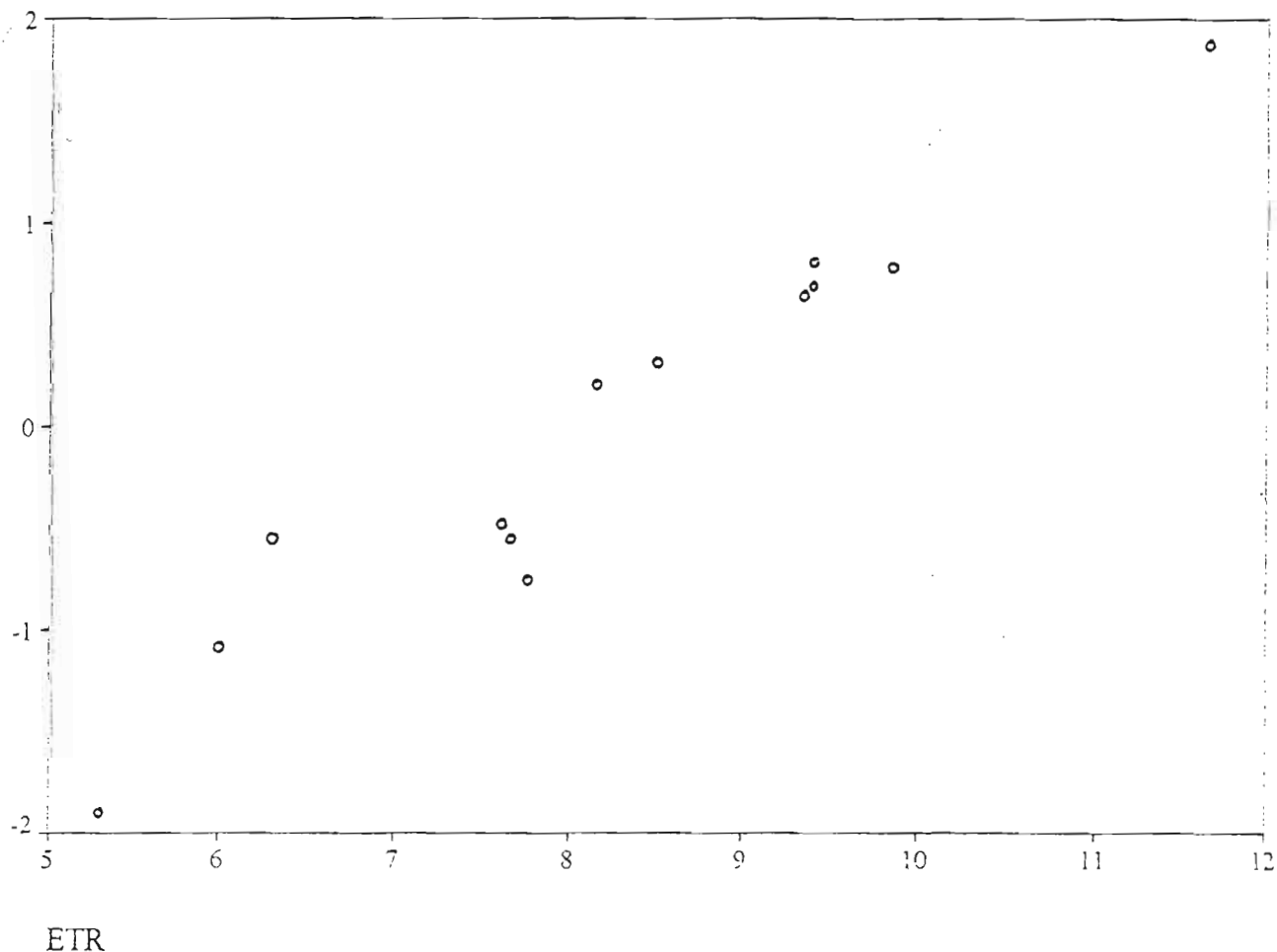
Valeurs des coefficients multiplicateurs dans l'équation (13 Valeurs)

	Coefficients	Coeff. standardisés
Température	0,771818	0,162476
Hygrométrie	-0,49568	0,024284
(Constante)	-13,166438	6.389419

Tableau 1: Récapitulatif de quelques valeurs de la régression multiple

Nous réalisons la régression avec la condition: ETR>5 (13 valeurs). L'équation de corrélation entre l'ETR et la combinaison linéaire de la température et l'hygrométrie est alors la suivante:

$$\text{ETR (mm/jour)} = 0,77 \cdot \text{Température (}^\circ\text{C)} - 0,05 \cdot \text{Hygrométrie (\%)} - 13,17$$



Graphe 5: Relation ETR - combinaison linéaire de l'hygrométrie et la température
ETR > 5 (13 cas)

Les valeurs standardisées des coefficients multiplicateurs nous indiquent que la température est le facteur explicatif prépondérant de l'ETR.

Afin de juger de la validité de la relation établie, qui devra déjà être vérifiée avec les mesures de fin de campagne, il serait judicieux de répéter l'expérience.

En effet, la pluviométrie enregistrée à Podor en début de campagne, replacée dans un diagramme de fréquence (annexe 5), nous indique que les mesures enregistrées ne sont pas des plus courantes. Aussi, même si nous avons montré que les variations pluviométriques entre Podor et Guia sont importantes, la reprise de l'expérience permettrait de vérifier l'absence d'influence de ce paramètre climatique, et donc d'infirmier le caractère éventuellement exceptionnel des résultats.

3.2 - Une infiltration négligeable

- Valeur

Par différence avec les mesures lysimétriques, on décèle, dans les anneaux, une infiltration moyenne très faible: 2 mm/jour, et peu durable: les quatre premiers jours de la période. Par la suite, elle n'est plus perceptible.

- Analyse

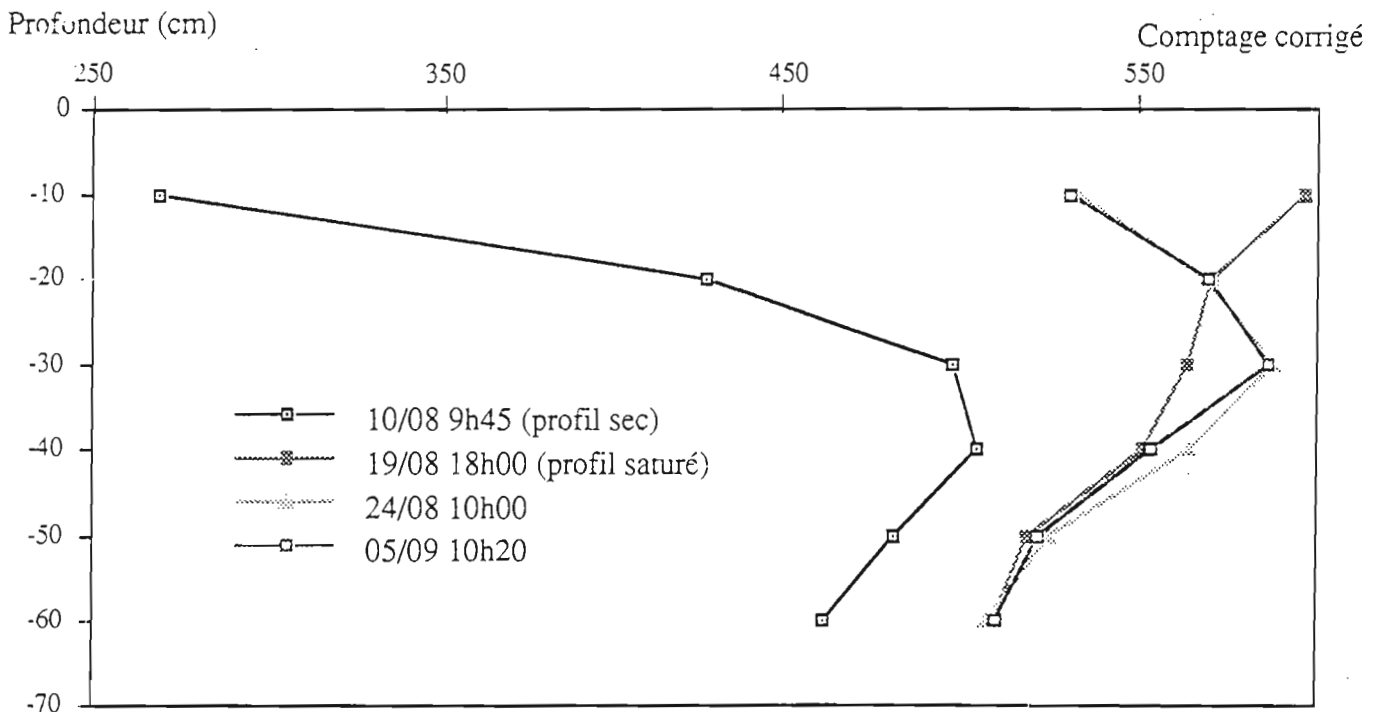
Cette mesure correspond-t-elle à une recharge du sol ou à un transfert de l'eau à travers le sol vers la nappe ?

En comparant le profil du 05/09 (soit un peu avant la mise en eau) avec les profils sec et saturé (cf graphe 6), nous estimons qu'environ 1/5^{ème} du volume n'est pas comblé dans les 15 premiers centimètres, ce qui correspondrait parfaitement avec un volume d'infiltration de 2 mm/jour pendant quatre jours.

Cependant, ce raisonnement est basé sur une mesure de sonde de surface, dont nous avons déjà mis en doute la validité.

Cette remarque se justifie d'autant plus qu'à 30 cm, deux mesures bien distinctes ont été relevées au delà du profil que nous avons estimé "saturé".

Pouvons-nous imputer cela à une erreur de mesure ? Des prélèvements de sol et le calcul de leur humidité pondérale auraient permis davantage de précisions.

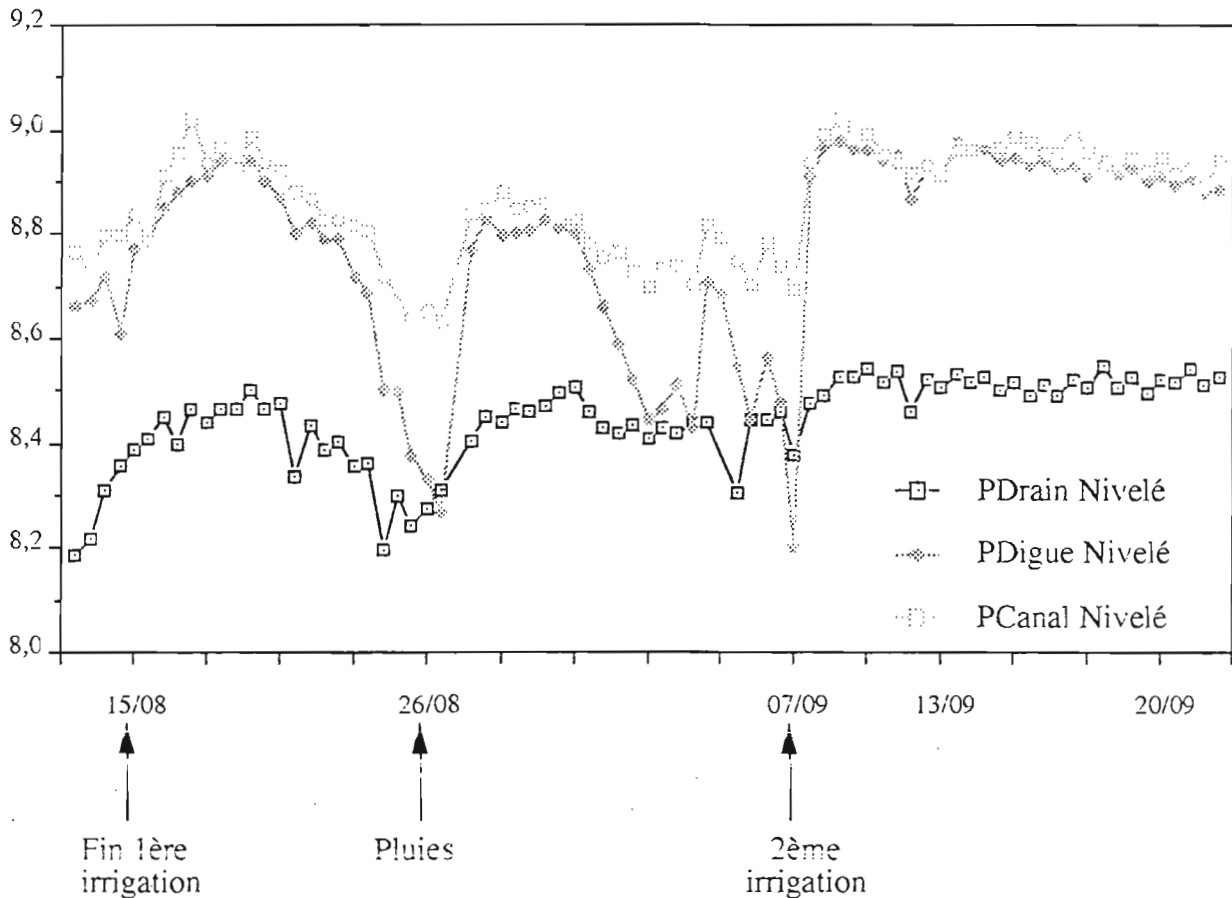


Graphe 6: Comparaison de deux profils aux profils sec et saturé

En conséquence, nous choisissons de rechercher une réponse à notre question initiale dans le suivi des piézomètres, qui eux nous donnent une mesure directe et dont nous sommes sûrs de la fiabilité.

Lors de la deuxième mise en eau, nous mesurons une remontée de la nappe sur 65 cm dans le piézomètre "digue" et 17 cm dans le piézomètre "canal" (cf graphe 7) (cf figure 1 p 9). Ces deux mesures ne sont pas incohérentes: en effet, le niveau dans le piézomètre "canal" étant resté plus haut pendant l'assec, du fait de sa proximité avec le canal constamment en eau, il est normal qu'à la mise en eau il remonte moins.

H Nappe (m)



Graphe 7: Variations des hauteurs piézométriques corrigées par le nivellement

Le nivellement topographique (cf annexe 1.6) n'intervient pas ici, dans le sens où le piézomètre "digue" est situé à une altitude légèrement inférieure (- 18 mm) au piézomètre "canal".

Ceci étant, la remontée de la nappe sur 65 cm ne signifie pas qu'il y avait 100% du profil à resaturer sur cette hauteur.

En définitive, la recharge en eau du sol est confirmée mais non quantifiable; toutefois, étant donné la faible valeur d'infiltration mesurée, on peut penser qu'elle a entièrement servi à cette recharge.

Le résultat de cette analyse est la certitude de l'absence de lessivage vertical.

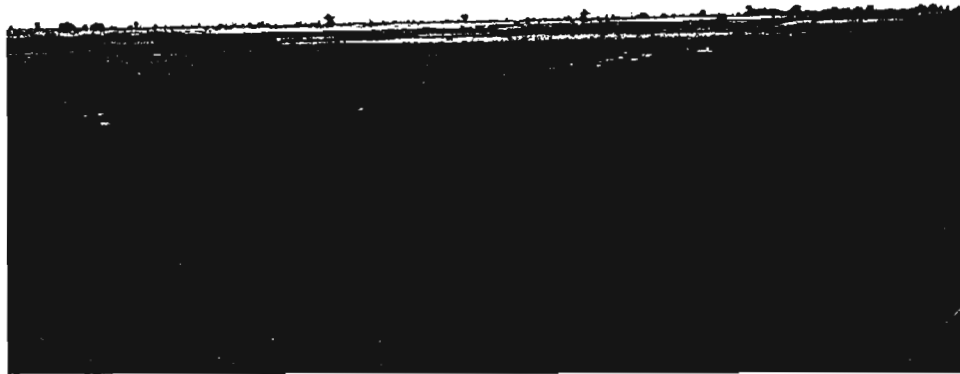
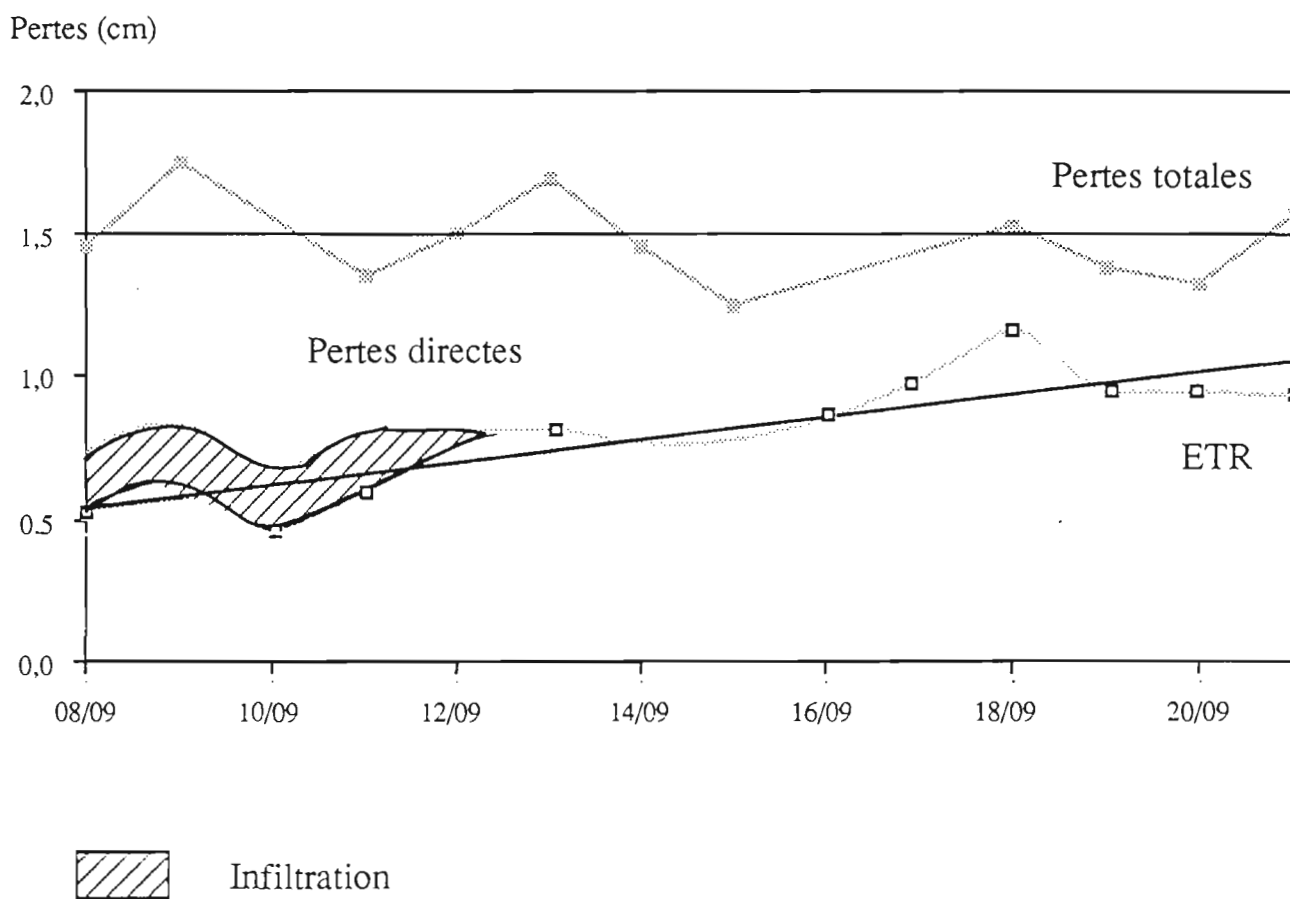


Illustration du décalage du stade du riz avec la parcelle voisine
(à droite "notre" parcelle)



Graph 8: Composition des pertes totales moyennes enregistrées aux échelles en début de campagne

Nous avons choisi de placer les anneaux non loin d'un lysimètre afin d'effectuer un rapprochement des résultats. Cependant, la comparaison des mesures de chaque dispositif ne nous a pas permis de dégager de tendances significatives (cf annexe 4.4). En effet, comme nous l'avons vu (cf 3.1), les échantillons sont très variables. Ainsi, au niveau du canal, nous avons observé un riz plus chétif au démarrage dans le lysimètre que dans l'anneau; tandis que, près de la digue, c'est le riz du lysimètre qui présente un fort potentiel.

3.3 - Des pertes directes variables

- Valeur

Les pertes totales, mesurées aux échelles limnimétriques, sont en moyenne de 15 mm/jour.

Les pertes directes sont évaluées par la mesure des pertes totales de laquelle sont déduites l'ETR et l'éventuelle infiltration, cela nous donne une moyenne de 6,5 mm/jour. Cependant, cette valeur est variable dans le temps et dans l'espace comme nous allons le voir.

- Nature

Les pertes directes se réalisent par "suintement" à travers les diguettes, elles sont importantes puisque visibles, mais difficilement maîtrisables.

Cela pourrait également être des pertes par les cavités creusées par les rongeurs dans les diguettes, ou encore les débordements ou autres négligences, telles un tuyau mal bouché. Ces pertes sont en fait des fuites, donc elles peuvent être colmatées. Ainsi, au niveau de la parcelle, nous avons essayé de les minimiser (le premier remplissage faisant exception !) par le rehaussement d'une diguette ou encore la vigilance (cf rongeurs).

- Analyse (cf graphe 8)

Les pertes totales sont en moyenne stables au cours du temps; cependant, leur composition varie. En effet, en schématisant, nous avons, au début de la période, 50% de pertes directes, 33% d'ETR, et le complément d'infiltration; et nous terminons avec 66% d'ETR et 33% de pertes directes.

Pour expliquer cette baisse des pertes directes au cours du temps, nous pensons à la charge hydrique de la parcelle aval. En effet, la mise en eau de cette parcelle fut retardée pour cause de resemis, puis elle subit une succession d' "irrigation-drainage" de dessalage. Ce dernier point pourrait d'ailleurs expliquer certains écarts des pertes autour de la moyenne.

A cette variation temporelle vient s'ajouter une variation spatiale, constatée par la différence de pertes mesurées aux deux échelles. La baisse à l'échelle de remplissage est moins sensible du fait de son environnement (cf canal et parcelle amont), déjà en équilibre hydrique.



Quelques jours avant la rupture de la digue...

3.4 - Le bilan hydro-salin

3.4.1 - A l'échelle parcellaire

3.4.1.1 - Le bilan hydrique

Il est établi par la comparaison des apports et des pertes sur deux périodes distinctes.

- Période du 13/08 au 20/08 (cf annexe 6.3.1)

$$\text{Irrigation} + \text{Précipitations} = \text{Imbibition} + \text{Pertes} + \text{Vidange} + \text{Volume restant}$$

Au volume recalculé de la première mise en eau ($4\,279\text{ m}^3$, cf annexe 6.1), nous ajoutons celui des précipitations sur la période (300 m^3). Le total des apports est alors de $4\,579\text{ m}^3$.

Le second membre de l'équation est constitué de quatre termes.

Tout d'abord, le volume d'eau permettant de saturer le sol ($1\,608\text{ m}^3$), dont le calcul est présenté en annexe 6.2.

Ensuite, les pertes totales (723 m^3), mesurées aux échelles, nous n'avons pas sur cette période de distinction entre évapo(transpi)ration et pertes directes.

D'autre part, il y a la vidange, dont nous avons déjà évoqué (cf 2.3.1.2) la nécessité de réévaluer le volume jaugé, à la hausse ($2\,007\text{ m}^3$).

Enfin, et corrélé à cette vidange, il y a le volume d'eau restant sur la parcelle à la fin de celle-ci (192 m^3). Le détail de ces deux dernières données se trouve en annexe 3.3.

Le total des utilisations faites de l'eau apportée est $4\,530\text{ m}^3$.

L'égalité entre les deux membres est presque (aux approximations près) parfaite. Cependant, le volume d'irrigation ayant été déduit d'une équation similaire (établie le jour précédant la vidange), et le volume évacué également corrigé, ce taux d'erreur très faible est logique.

- Période du 07/09 au 21/09 (cf annexe 6.3.2)

$$\text{Lame d'eau du 21/09} = (\text{Apports} - \text{Pertes}) \text{ du 07/09 au 21/09}$$

L'eau a été apportée sous trois formes: une mise en eau ($2\,372\text{ m}^3$), deux ajouts (1058 m^3), et une pluie (7 m^3). Le total du volume apporté est $3\,437\text{ m}^3$.

Les utilisations faites de cette eau sont, d'une part, les pertes totales journalières, soit l'évapotranspiration et les pertes directes; et, d'autre part, la hauteur de la lame d'eau à la fin de la période, soit le 21/09 ($1\,005\text{ m}^3$).

Pour établir notre bilan, nous déduisons les pertes du volume apporté, ce qui nous donne un résultat de 895 m³. Puis nous comparons ce résultat au volume d'eau restant dans la parcelle soit 1 005 m³. La différence traduit une erreur de 12 %.

Aussi, même si d'après Touma (hydrologue ORSTOM), un bilan établi à 20 ou 30% près est déjà "honorable", nous avons cherché une éventuelle source d'erreur.

Nous avons constaté qu'en recalculant la lame d'eau du 21/09 à l'aide des abaques, avec les zéros absolus des échelles diminués de la valeur "1" (marge d'erreur que l'on s'est accordée), la différence n'est plus que de 4 m³, soit une erreur négligeable (cf annexe 6.3.2). Cependant, nous avons bien conscience que cette correction n'est pas des plus satisfaisantes puisqu'on ne voit pas pourquoi les zéros adoptés seraient à revoir uniquement pour ce calcul. D'ailleurs la vérification des jaugeages eux-mêmes est, comme nous l'avons vu précédemment (cf 2.3.1.2), basée sur les abaques.

Nous avons simplement montré que notre positionnement des échelles, même s'il est très proche de la réalité, n'est pas pour autant parfait. D'autre part, les autres mesures effectuées peuvent difficilement être remises en cause.

3.4.1.2 - *Le bilan salin* (cf annexe 7.1)

L'étalonnage du conductivimètre nous a permis d'établir la relation suivante (cf annexe 2.1):

$$\text{Salinité (mg/l)} = 0,49473 * \text{Conductivité (}\mu\text{S/cm)} - 5,2835$$

Ainsi, d'après la conductivité moyenne (60 $\mu\text{S/cm}$) et le volume d'eau de la première irrigation, nous concluons à un apport de 104 kg de sel. La quantité de sels exportés est évaluée à 176 kg, à raison de 143 kg lors de la vidange et 33 kg par les pertes directes. Nous aboutissons donc à un bilan négatif de 72 kg.

En se rapportant à un cycle rizicole et pour 1 ha, on trouve une quantité de sels extraite de 761 kg/ha.

La fiabilité de ces résultats est en relation directe avec celle, déjà évoquée, des volumes d'eau concernés.

Régulation de la salinité

3.4.1.3 - *Le facteur de concentration des eaux*

N'ayant pas mesuré la conductivité des eaux parcelles régulièrement, nous avons réalisé une simulation, en nous basant sur les résultats de la campagne, afin de juger de l'évolution du facteur de concentration de leur salinité. Nous simulons la transformation des caractéristiques salines de l'eau suite à une irrigation, puis à une succession d'ajouts de 1 200 m³ (à 60 $\mu\text{S/cm}$) tous les huit jours (cf annexe 7.2).

Le volume d'eau restant chaque jour est déterminé en déduisant 7 mm de pertes et 8 mm d'évapotranspiration du volume de la veille.

Nous remarquons alors que pour atteindre 145 $\mu\text{S/cm}$, conductivité moyenne de l'eau mesurée lors de la vidange, il est nécessaire de réaliser 11 apports d'eau. Ceci implique que la salinité de l'eau vidangée n'était pas atteinte par la seule concentration de l'eau, mais aussi par la diffusion de sel depuis le sol.

Période	Vol. pompés (milliers m3)	Débit de pompage (m3/s)	Vol. vidangés (milliers m3)	Débit de vidange (m3/s)	Bilan (milliers m3)	Consommation en eau du périmètre (mm/jour/ha)	Superficies emblavées (hectares)
11/08 au 31/08/92 et 19/09 au 19/11/92	15 184	2,17	5 849	0,84	9 335	9,8	1 175
13/08 au 28/09/93	7 348	1,85	3 868	0,97	3 480	7,5	1 012

Tableau 2: Bilan hydrique du périmètre de Nianga

Chiffres campagne 1992: (Seguis,1993)

D'autre part, la dynamique de concentration est asymptotique: le facteur de concentration se stabilise aux environs de "2,7".

Une simulation de la concentration de l'eau du Doué d'un facteur 2,7 montre que le pH de l'eau passerait de 6,9 à 7,3. Cette très légère augmentation n'est pas suffisante pour engendrer un risque d'alcalinisation.

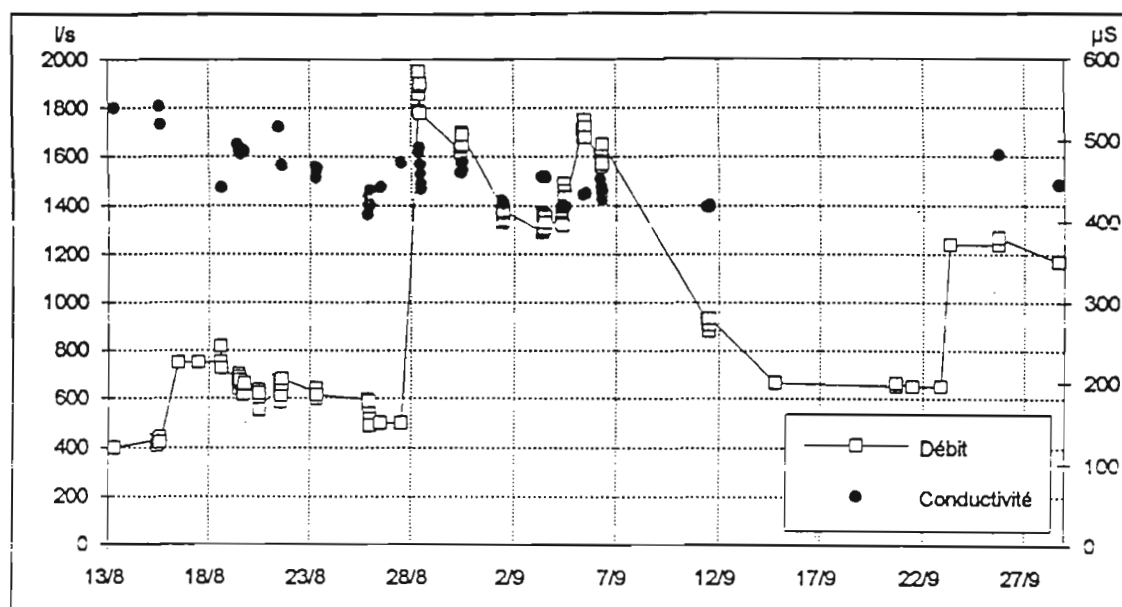
Cette conclusion se limite, cependant, à la période culturale, et nécessiterait de s'intéresser à l'avenir à la période interculturelle.

3.4.2 - A l'échelle du périmètre

3.4.2.1 - Le bilan hydrique (cf tableau 2)

La vidange est constituée des trop-pleins des canaux d'irrigation, des colatures des parcelles et du drainage de la nappe. Elle représente en ce début de campagne plus de 50% des apports, ce qui signifie que pour 2 m³ pompés, plus d'1 m³ va retourner dans le milieu naturel.

Les variations observées au niveau de l'hydrogramme de vidange (cf graphe 9), mis à part le 28/08, se justifient par les précipitations. A cette date, on constate une augmentation très forte du débit qui ne peut être due aux seules précipitations. Au niveau de notre maille hydraulique, cela coïncide avec des vidanges de parcelles; cela reste à confirmer à l'échelle du périmètre par les observations de la SAED.



Graphe 9: Hydrogramme de vidange du périmètre et conductivité de l'eau

Période	Sels importés (tonnes)	Sels exportés (tonnes)	Bilan (tonnes)	Pour 1 cycle rizicole (120 jrs) Qté sel extraite du périmètre (tonnes/ha)	Superficies emblavées (hectares)
11/08 au 31/08/92 et 19/09 au 19/11/92	690	2 227	-1 531	1,9	1 175
13/08 au 28/09/93	360	1 081	-721	1,8	1 012

Tableau 3: Bilan salin du périmètre de Nianga

Chiffres campagne 1992: (Seguis,1993)

La consommation en eau du périmètre, soit les volumes pompés auxquels sont déduits les volumes évacués, ramenée par jour et par hectare est du même ordre de grandeur que la mesure de l'évapotranspiration parcellaire (8 mm/jour), ramenée aux mêmes unités.

Cette consommation en eau du périmètre est en fait légèrement majorée par rapport à la mesure parcellaire. Ceci pourrait s'expliquer par des pertes dans les canaux d'irrigation; nous estimons les pertes dans les drains, collecteurs terminaux, faibles.

Trois sortes de pertes sont prévisibles au niveau des canaux irrigateurs:

- les pertes par infiltration, cependant la conception des canaux à l'aide d'éléments stabilisants, les rend faibles.
- les pertes directes, elles consistent en un écoulement par les nappes, donc elles finissent dans les drains et n'interviennent donc pas.
- les pertes par débordements. elles sont réelles. elles ont été constatées. elles sont difficilement chiffrables, mais semblent être le facteur d'explication prépondérant de la majoration de la consommation journalière du périmètre.

En ce qui concerne la fiabilité des résultats, les volumes pompés sont calculés par la SAED à partir de données du constructeur, vérifiées sur le terrain (entretien M. N'Dao. 1993), leur fiabilité est donc liée à celle de ces vérifications expérimentales, que nous ne pouvons juger.

La mesure des volumes vidangés comporte, quant à elle, forcément une incertitude. Il s'agit, en effet, d'une mesure de terrain, dont nous avons déjà vu les problèmes rencontrés au niveau de la parcelle; et, de plus le suivi n'est pas quotidien, ce qui oblige à des interpolations entre deux valeurs.

Ceci dit, la consommation en eau du périmètre témoigne de la cohérence des mesures parcellaires.

3.4.2.2 - Le bilan salin (cf tableau 3)

• Le bilan

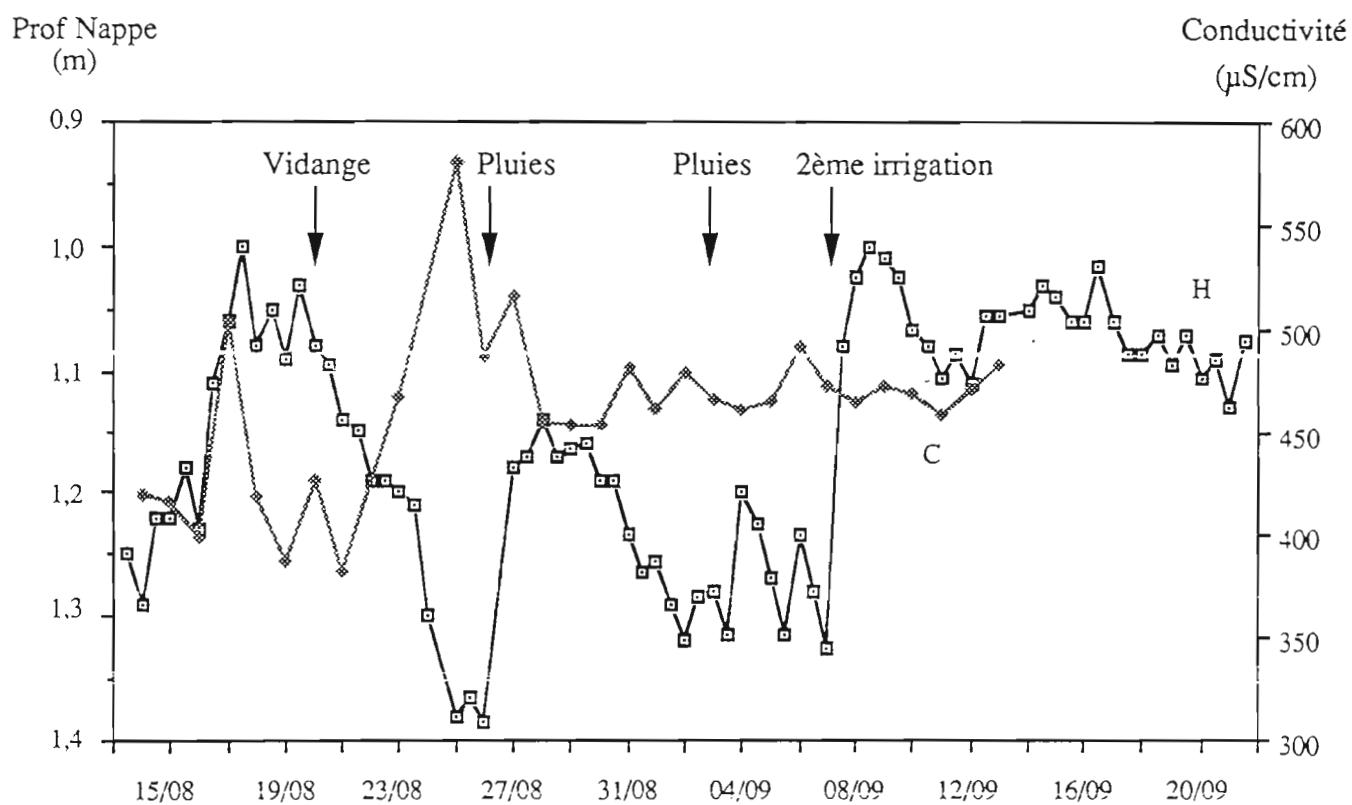
Le conductivimètre utilisé, différant, pour des raisons pratiques, de celui ayant servi aux mesures parcellaires, la relation conductivité-salinité est devenue (cf annexe2.2):

$$\text{Salinité (mg/l)} = 0,53176 * \text{Conductivité } (\mu\text{S/cm}) + 13,53$$

On constate que, malgré les variations de débits, la conductivité des eaux de vidange reste relativement constante: environ 450 $\mu\text{S/cm}$. Sachant, de plus, que la conductivité du Doué est d'environ 60 $\mu\text{S/cm}$ durant l'hivernage, nous concluons à un bilan salin négatif pour le périmètre.

La quantité de sels extraite du périmètre, rapportée au cycle rizicole et à l'hectare (1,8t/ha en hivernage 1993), représente plus du double de celle mesurée à l'échelle parcellaire (761 kg/ha).

L'étalonnage du conductivimètre ne pouvant être remis en cause, la fiabilité des résultats ne dépend que, comme pour la parcelle, de celle des volumes d'eau concernés.



Graphe 10: Variations de la hauteur piézométrique (H) et de la conductivité (C) de la nappe après la 1ère mise en eau _ Cas du piézomètre "canal"

- Autres résultats

- > Carte de conductivité électromagnétique

La carte de conductivité de la parcelle (cf annexe 7.3), réalisée avant la première mise en eau, nous en donne les variations spatiales; cependant, nous n'avons rien pu dégager de significatif. En effet, les valeurs les plus élevées (> 150 mS/m) se retrouvent plutôt en bordures de parcelle, soit les points les plus bas, alors qu'on aurait pu les attendre, à l'inverse, sur les points les plus hauts (cf "effet mèche").

Il est à noter qu'un quadrillage similaire, effectué à l'échelle de la maille, révèle une amplitude de variations plus importante (22 à 460 mS/m), mais la moyenne est identique à celle de la parcelle, soit 100 mS/m.

Après la vidange la carte de conductivité de la parcelle a été partiellement reproduite. nous y avons indiqué les endroits gorgés d'eau, estimant que ceux-ci pouvaient influencer la valeur lue. La comparaison des deux cartes, nous donne les variations temporelles de conductivité. Nous constatons l'augmentation quasi générale de toutes les valeurs, celle-ci s'explique par l'évaporation de surface faisant suite à la vidange.

En définitive, cette carte nous confirme la remontée saline en conditions favorables d'évaporation.

- > Conductivité piézométrique

Nous comparons l'évolution de la hauteur de la nappe et sa conductivité dans chaque piézomètre, afin d'y rechercher une explication aux transferts des sels.

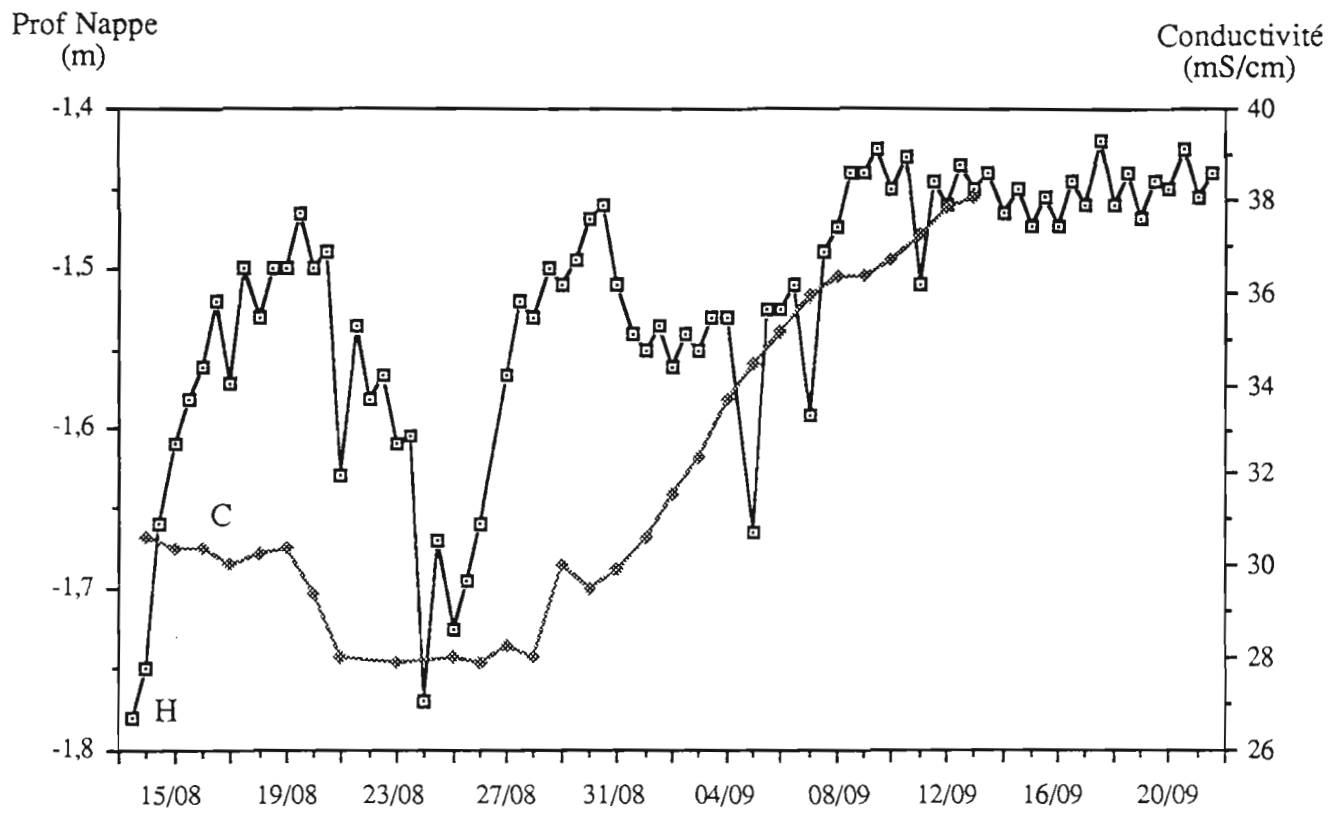
* Tout d'abord, l'amplitude et la fréquence des variations de la conductivité dans le piézomètre "digue" (cf annexe 7.4) sont imputées à une erreur de manipulation. En effet, les prélèvements pour les mesures ont été effectués à l'aide d'un préleveur non rincé, et ayant servi juste avant pour le piézomètre "drain", dont la conductivité de l'eau est très élevée. Cela rend les données inexploitable.

* Au niveau du piézomètre "canal", nous observons (cf graphe 10):

-> à la mise en eau, la nappe et sa conductivité évoluent dans le même sens: lors de sa remontée, la nappe traverse des horizons salés qui induisent sa recharge en sel. Puis rapidement, la conductivité chute; nous pensons que cela est lié à l'intervention d'un biais: la stratification des eaux. L'eau salée, plus lourde, ne pourrait alors être captée qu'avec un préleveur à clapet, ce dont nous ne disposons pas.

-> à la vidange, alors que la nappe descend, sa conductivité augmente: cette valeur de conductivité ne correspondrait-elle pas la conductivité réelle que nous aurions toujours dû lire?

-> avec les précipitations, la conductivité baisse: nous envisageons alors l'hypothèse d'un écoulement préférentiel le long du piézomètre. Cependant, par la suite, en dépit des variations de la nappe dues aux pluies ou aux irrigations, la conductivité se stabilise.



Graphe 11: Variations de la hauteur piézométrique (H) et de la conductivité (C) de la nappe après la 1ère mise en eau _ Cas du piézomètre "drain"

* Nous nous intéressons alors au piézomètre "drain"(cf graphe 11).

La conductivité qui est mesurée dans ce piézomètre est nettement plus élevée que dans les autres, du fait de sa situation à proximité du drain.
D'une manière générale, elle tend à suivre l'augmentation de la hauteur piézométrique. Ceci se conçoit parfaitement puisque le piézomètre est situé sur un flanc du drain, donc une zone sensible d'évaporation et de concentration des eaux.

Ces deux expérimentations, tout en montrant leurs limites, permettent de confirmer certains points déjà vus.

L'interprétation des résultats présentés va maintenant nous permettre de mieux comprendre le fonctionnement hydro-salin du périmètre, et d'en dégager également les points à approfondir.

4 - FONCTIONNEMENT DU PERIMETRE

4.1 - Fonctionnement hydrique

- Efficience de l'irrigation

L'efficience de l'irrigation appliquée au champ, soit le rapport entre le volume d'eau utilisé par le riz et le volume d'eau apporté dans la parcelle, est de 0,4.

On peut se demander la signification réelle à donner à ce chiffre sur une campagne incomplète. Cependant l'efficience totale du périmètre, soit le rapport entre le volume utilisé par les cultures et le volume d'eau pompé, a été estimée à 0,3 pour Nianga. Or, en hivernage 1992, Raes et Sy l'ont évaluée à 0,37 (Raes et Sy, 1993): nous considérons donc que l'ordre de grandeur de nos chiffres est acceptable même si la campagne n'est pas terminée.

Ces efficacités traduisent le déséquilibre entre volumes pompés et besoins. Au niveau de la parcelle, cela signifie d'importantes pertes directes; à l'échelle du périmètre, nous l'avons vu (cf 3.4.2.1), de nombreux débordements.

- Flux des pertes

L'infiltration étant nulle au centre de la parcelle, nous en concluons que les pertes directes consistent en un flux d'eau à travers la bordure de la parcelle longeant le drain.

Cependant, afin d'affiner la direction du flux, il serait intéressant de réaliser deux expériences, complémentaires à notre protocole expérimental.

-> Tout d'abord, un transect d'anneaux, depuis le milieu de la parcelle jusqu'en bordure côté drain, pourra être réalisé afin de confirmer ce flux. Une comparaison pourra être faite avec une autre bordure. De la même manière, on aurait pu envisager un transect de piézomètres afin de suivre la variation de la hauteur de la nappe jusqu'au niveau du drain.

Le suivi, par jaugeage, du débit dans le drain permettrait également de confirmer ce flux.

-> Ensuite, au niveau du côté "drain", la réalisation de saignées dans la digue, permettant de recueillir l'eau à différentes hauteurs, aurait pour objectif de déterminer où a réellement lieu le flux, en quelle quantité et avec quelle concentration en sels.

4.2 - Fonctionnement salin

A l'échelle de la parcelle, nous avons vu (cf 3.4.1.3) que la salinité exportée n'était pas due au seul fait de la concentration des eaux, mais également à un processus de diffusion depuis le sol.

A l'échelle du périmètre, nous avons constaté (cf 3.4.2.2) l'importance de la quantité de sels extraite du périmètre en regard des exportations parcellaires. D'autre part, des mesures de conductivité réalisées dans les différents drains du périmètre montrent que celle-ci est toujours nettement supérieure dans les drains qu'à la sortie des parcelles. Nous déduisons de ces deux observations que la salinité exportée du périmètre résulte d'un drainage des nappes salées et non d'un lessivage de la tranche de sol cultivée.

4.3 - A l'avenir ?

Tout d'abord, nous avons évoqué (cf 1.4.3) la nécessité d'assurer une fraction de lessivage afin de désaliniser en partie les sols, et donc de supprimer tout obstacle à la diversification des cultures.

Cependant, nous avons vu (cf annexe 1.5) que dès 50 cm, le sol a une densité apparente sèche de 1,65 g/cm³, soit 38 % de porosité. La structure compacte du sol conditionne cette faible porosité, donc le peu d'aération du sol, la circulation difficile de l'eau et l'absence de lessivage vertical. Dans ce type de sol, il convient donc d'améliorer la structure du sol.

Nous avons vu (cf 1.4) que l'origine des problèmes de conservation des sols, que sont la salinité, la sodisation ou l'alcalinisation, est une nappe affleurante. Aussi, un des meilleurs moyens de lutter contre ces risques de dégradation serait de limiter la remontée de la nappe.

- Pour cela, nous pensons, tout d'abord, à la diminution des pertes, donc, notamment, à une meilleure adaptation des volumes pompés aux besoins.

Cela suppose, comme l'a suggéré L. Seguis lors de l'atelier ISRA-ORSTOM (Seguis et al., 1993), de savoir si la diminution des volumes pompés est envisageable sans porter préjudice au fonctionnement hydraulique des canaux d'irrigation. Il faudra déterminer (ou vérifier auprès de la SAED) la cote minimale d'eau dans les canaux nécessaire au fonctionnement du réseau.

De même, au niveau des paysans, la fixation de la redevance hydraulique non plus à l'hectare mais à l'échelle d'une maille, donc d'un groupement de producteurs, avait été envisagée afin de responsabiliser les paysans et de faire des économies d'eau. Cependant, les débitmètres ayant été endommagés, cette expérience n'a pas abouti (entretien M. N'Dao, 1993).

Avec le désengagement de l'Etat, les paysans se sont vus confier la gestion de l'ensemble du réseau hydraulique... cela sera-t-il à l'origine de changements ?, comme le souhaite la SAED,... les premiers mois de fonctionnement semblent démontrer le contraire.

Le changement des mentalités, même s'il est loin d'être une chose facile, semble être la base d'importantes améliorations.

Il est, en effet, nécessaire que les paysans cessent de croire que toute l'eau qui entre dans leur parcelle ne sert qu'à la croissance du riz. Des actions de formation prévues (mais non encore mises en oeuvre) par la SAED vont d'ailleurs dans ce sens.

D'autre part, au niveau, notamment, de la SAED, on espère ne plus entendre comme seule réponse à propos du problème de la salinisation des sols: "ce n'est pas comme dans le delta où là ils ont vraiment beaucoup de sel...", tout en montrant quelques mesures de conductivités réalisées en 1991 dans les drains du périmètre... La participation de cet organisme à l'atelier ISRA-ORSTOM aura été, sans aucun doute, l'occasion d'une prise de conscience.

Par ailleurs, un meilleur planage des parcelles permettrait une gestion plus rigoureuse de l'eau apportée. Cependant, l'intervention d'engins de travaux publics entraîne un coût que le paysan ne pourrait supporter. De plus, cette amélioration, uniquement valable après un changement de la "politique" de pompage, n'est pas prioritaire.

- Une autre voie d'amélioration consisterait à agir directement sur la remontée de la nappe.

Pour cela, la diversification des cultures, en permettant de limiter les recharges excessives de la nappe, serait une solution.

De même, P. Boivin a recommandé, lors de l'atelier pré-cité, l'introduction de parcelles boisées en Eucalyptus, qui contribueraient à l'abaissement de la nappe (Boivin et al., 1993).

- Enfin, une extension de l'étude à l'échelle de la cuvette permettrait sans doute de dégager d'autres solutions.

CONCLUSION

Cette étude aura montré l'importance de prévoir dans le protocole expérimental différentes méthodes censées aboutir au même résultat. En effet, cela permet de pallier une éventuelle défaillance de l'une d'elles, du fait d'une erreur de manipulation, d'un problème technique, ou de toute autre imprévue...

La mise en valeur des superficies irrigables de la moyenne vallée du fleuve Sénégal est essentiellement orientée vers la riziculture. Cela n'est pas sans conséquence sur les problèmes de conservation des sols: en effet, la riziculture recharge les nappes jusqu'à les rendre affleurantes, provoquant simultanément la remontée des sels en surface, et la création d'une dynamique de concentration des eaux.

En nous intéressant plus particulièrement au périmètre de Nianga, nous avons montré qu'il n'y avait pas de lessivage vertical au cours de la culture du riz, ce qui est contraire à la préservation de la qualité des sols.

Nous avons, également, vu l'importance des pertes directes, actrices du lessivage des nappes salées. Or, la conservation des sols est en fait avant tout un problème de gestion de l'eau; ces mesures vont donc, là encore, à son encontre.

Pour lutter contre la salinisation, des solutions simples, essentiellement basées sur un changement des comportements, existent. Par contre, l'alcalinisation a des effets irréversibles, il est donc nécessaire de la prendre en compte rapidement...

BIBLIOGRAPHIE

ANGLADETTE A., 1966. Le riz, G.-P. Maisonneuve et Larose, Paris, 930 p..

Atlas Jeune Afrique, 1983, Sénégal, Jeune Afrique, Paris, 72 p..

BADO L., Sept. 1975, Etude pédologique au 1/20 000 d'une partie de la cuvette de Nianga. Région de Ndiayène (Moyenne vallée du fleuve Sénégal), ORSTOM, Dakar-Hann, 105 p..

BOIVIN P., BRUNET D., GASCUEL C., ZANTE P., NDIAYE J.P., 1993, "Les sols "lourds" de la vallée alluviale, région de Nianga-Podor: répartition, caractéristiques, aptitudes et risques liés à leur mise en valeur", NIANGA, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, Atelier ISRA-ORSTOM, St-Louis, Sénégal, octobre 1993, à paraître.

CROUSSE B., MATHIEU P., SECK S.M., 1991, La vallée du fleuve Sénégal. Evaluations et perspectives d'une décennie d'aménagements, Karthala, Paris, 380 p..

DANCETTE C., GAY J.P., 1993, "La diversification des cultures", NIANGA, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, Atelier ISRA-ORSTOM, St-Louis, Sénégal, octobre 1993, à paraître.

DIA A., BOIVIN P., SEGUIS L., 1993, "Le projet N'Galenka amont", NIANGA, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, Atelier ISRA-ORSTOM, St-Louis, Sénégal, octobre 1993, à paraître.

DIOUF M., 1993, L'eau dans le système sol-plante-atmosphère: concepts. méthodes d'étude. applications, Mémoire de DEA de biologie végétale, UCAD, Faculté des sciences et techniques, Département de biologie végétale, 132 p..

ENDA Tiers Monde et Ministère français de la Coopération, 1986, Enjeux de l'après-barrage. Vallée du Sénégal, ENDA Tiers Monde et Ministère de la Coopération, Paris, 632 p..

FAO/SEDAGRI, 1973, Cartes pédologiques et géomorphologiques de la vallée et du delta du fleuve Sénégal au 1/50 000 ème, FAO, Dakar.

GUILLIERME L., 1993, Variabilité et organisation des sols vertiques de la région de Nianga-Podor, Mémoire ENSAR, 30p. + annexes.

HECQ J., DUGAUQUIER F., 1990, "Périmètre irrigué villageois de Guia au Sénégal", Périmètres irrigués en Afrique sahélienne, CTA, Wageningen, Pays-Bas, p. 41 à 66 et p.209 à 221.

Ingénieurs et chercheurs du CIRAD, ORSTOM, BDPA-SCETAGRI, GRET, 1991, Memento de l'Agronome, Ministère de la Coopération et du Développement, Paris, 1635p..

INRA, 1988, Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère, INRA, Paris, 362 p..

LAVIGNE DELVILLE P., Déc. 1991, La rizière et la valise, Syros-Alternatives, Paris, 230p..

LE BRUSQ J.Y., LOYER J.Y., Janv. 1982, Evolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le Delta du fleuve Sénégal, ORSTOM, Dakar-Hann, 45 p..

LERICOLLAIS A., 1989, "Risques anciens, risques nouveaux en agriculture paysanne dans la vallée du fleuve Sénégal", In: ELDIN M., MILLEVILLE P., Le risque en agriculture, ORSTOM, Paris, p. 419 à 436.

LERICOLLAIS A., 1993, "Histoire de périmètres", NIANGA. laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, Atelier ISRA-ORSTOM, St-Louis, Sénégal, octobre 1993, à paraître.

LOUETTE, 1991, Manuel de vulgarisation agricole et irrigation, SAED, s.l., 119 p..

LOYER J.Y., 1989, "Dégradation saline des sols induite par l'irrigation en domaine sahélien", In: ELDIN M., MILLEVILLE P., Le risque en agriculture, ORSTOM, Paris, p.531 à 539.

LOZET J., MATHIEU C., 1990, Dictionnaire de Science du Sol, Technique et Documentation - Lavoisier, Paris, 384 p..

MANE L., 1993, "Etats de surface des sols non cultivés dans la cuvette de Nianga: description, radiométrie de terrain et imagerie Spot", NIANGA. laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, Atelier ISRA-ORSTOM, St-Louis, Sénégal, octobre 1993, à paraître.

MICHEL P., 1973, Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique, Mémoires ORSTOM, n°63, 3 Volumes, 752 p..

MUSY A., SOUTTER M., 1991, Physique du sol, Presses polytechniques et universitaires romandes, Genève, Suisse, 335 p..

de POITEVIN F., 1993, Etat général des PIV de la région de Nianga et des sols environnants: type textural et évolution saline, Rapport de stage ESAP, 30 p. + annexes.

POUSSIN J.C., 1993, "Gestion technique de la riziculture irriguée", NIANGA. laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, Atelier ISRA-ORSTOM, St-Louis, Sénégal, octobre 1993, à paraître.

RAES D., SY B., SERNEELS S., VAN PASSEL L., Juin 1991, "Analyse du bilan d'eau de deux cuvettes du delta du fleuve Sénégal. Campagne hivernale 1990", Projet Gestion de l'Eau, Bulletin technique n°3, SAED - Centre de NDiaye, St-Louis, Sénégal, 70 p..

RAES D., SY B., 1992, "Analyse de la pluviométrie et de l'évapotranspiration dans la zone du delta du fleuve Sénégal", Projet Gestion de l'Eau, Bulletin technique n°5, SAED - Centre de NDiaye, St-Louis, Sénégal, 67 p..

RAES D., SY B., 1993, "Bilan d'eau et coût d'énergie de périmètres rizicoles. Delta et Vallée du fleuve Sénégal. Campagnes de 1991 et 1992", Projet Gestion de l'Eau, Bulletin technique n°6, SAED, St-Louis, Sénégal, 106 p..

RAES D., DECKERS J., 1993, "Les sols du Delta du fleuve Sénégal. Propriétés physiques et chimiques", Projet Gestion de l'Eau, Bulletin technique n°8, SAED, St-Louis, Sénégal. 84 p..

"Rapport final", 1993, Projet Gestion de l'Eau, SAED, St-Louis, Sénégal, 63 p..

RIJKS D.A., 1976, Développement de la recherche agronomique dans le bassin du fleuve Sénégal. Agrométéorologie, Rapport technique 2, PNUD, Rome, Italie, 171 p..

SAED-INSTRUPA, 1988, Implantation de périmètres irrigués villageois sur le N'Galenka amont. Etude de factibilité, SAED, s.l., 269 p. + annexes et cartes.

SAMB S., 1993, Bilan hydro-salin d'une parcelle expérimentale de riz située sur le périmètre de Nianga. Fleuve Sénégal, Rapport de stage EIER, 20 p. + annexes.

SARR A., 1993, "Le périmètre de Nianga", NIANGA, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, Atelier ISRA-ORSTOM, St-Louis, Sénégal, octobre 1993, à paraître.

SEGUIS L., BOIVIN P., 1993, "Hydrologie d'une cuvette du lit majeur du Sénégal. Exemple de la cuvette de Nianga", NIANGA, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, Atelier ISRA-ORSTOM, St-Louis, Sénégal, octobre 1993, à paraître.

SEGUIS L., DUBEE G., 1992, Cuvette de Nianga - Hivernage 1991. Rapport hydrologique (1^{ère} partie), ORSTOM, Dakar, Sénégal, 28 p. + annexes.

SODEFITEX, Juillet 1993, Projet pilote de développement de systèmes de cultures irriguées de diversification dans la région de Podor (SODEFITEX - ISRA / CIRAD / ORSTOM), Dakar, Sénégal, 15 p. + annexes.

s.l. : sans lieu d'édition

Cette bibliographie a été complétée par:

- la consultation des dossiers de presse du

Ministère de la Coopération et du Développement
57, Bd des Invalides
75 007 PARIS

- des entretiens auprès, notamment, de:

Mr Claude DANCETTE, agronome CIRAD en poste à l'ISRA
Mr Michael DINGKUHN, physiologiste
Mr Madine N'DAO, responsable "Gestion de l'eau" à la SAED de Nianga
Mr Amadou SARR, agronome SAED, directeur du périmètre de Nianga
Mr Alioune SY, comptable de l'Union des SUMA du périmètre de Nianga

- des visites de terrain avec:

Mr BAES, responsable "aménagement" pour le FED à Nianga
et Mr Amadou SARR.

- et, la participation à l'atelier ISRA-ORSTOM:

"NIANGA, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du Sénégal",
les 19, 20 et 21 octobre 1993 à l'ISRA de St-Louis (cf plan du séminaire en annexe 8).

LISTE DES SIGLES

BDPA-SCETAGRI: Bureau de Développement de la Production Agricole -
Aménagement, inventaire et gestion

CIRAD: Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le
Développement

CTA: Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale

DEA: Diplôme d'Etudes Approfondies

EIER: Ecole Inter-Etats des Ingénieurs de l'Equipement Rural (Ouagadougou, Burkina
Faso)

ENDA: ONG Environnement et Développement Tiers Monde (Dakar)

ENSAR: Ecole Nationale Supérieure Agromique de Rennes

ESAP: Ecole Supérieure d'Agriculture de Purpan

ESP: Exchangeable Sodium Percentage

ET₀: EvapoTranspiration de référence

ETR: EvapoTranspiration Réelle

FAO: Food and Agriculture Organisation

Franc CFA: Franc de la Communauté Financière Africaine
(Taux de change fixe: 50 Francs CFA = 1 FF)

FED: Fonds Européen de Développement

GRET: Groupe de Recherches et d'Echanges Technologiques

INRA: Institut National de la Recherche Agronomique

ISRA: Institut Sénégalais de la Recherche Agronomique

kc: coefficient cultural

NPA: Nouvelle Politique Agricole

ONG: Organisation Non Gouvernementale

PAN: Périmètre Autonome de Nianga

pH: potentiel d'Hydrogène
PIV: Périmètre Irrigué Villageois
PNUD: Programme des Nations Unies pour le Développement
PVC: PolyVinyl Chlorure

SAED: Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta du fleuve Sénégal
et des vallées du Sénégal et de la Falémé
SAR: Sodium Absorption Ratio
SODEFITEX: Société de Développement des Fibres Textiles
SUMA: Section d'Utilisation en commun du Matériel Agricole

UCAD: Université Cheikh Anta Diop (Dakar, Sénégal)

Unités utilisées:

Concentration : mg/l -> milligrammes par litre
 méq/l -> milli-équivalents par litre

Conductivité : $\mu\text{S}/\text{cm}$ -> microsiemens par centimètre
 mS/m -> millisiemens par mètre

Débit eau : l/s -> litres par seconde
 sel : mg/s -> milligrammes par seconde

Densité : g/cm^3 -> grammes par centimètre cube

Hauteur d'eau : mm -> millimètre
 cm -> centimètre
 m -> mètre

Humidité pondérale,
Hygrométrie : % -> pourcent

Masse : kg -> kilogramme

Pertes : mm/jour -> millimètres par jour

Surface: ha -> hectare

Température: $^{\circ}\text{C}$ -> degré Celsius

Vitesse du vent: m/s -> mètres par seconde

Volume: m^3 -> mètre cube

ANNEXES

APPREXES

SOMMAIRE DES ANNEXES

Annexe 1:	Matériel utilisé	p I
	1.1 - Canal de jaugeage et échelle limnimétrique	p I
	1.2 - Représentation d'une feuille de jaugeage au micromoulinet	p II
	1.3 - Lysimètre et anneau	p III
	1.4 - Humidimètre neutronique	p IV
	1.5 - Sonde gamma-densimétrique	p V
	1.6 - Nivellement topographique du matériel	p VII
Annexe 2:	Etalonnage des conductivimètres	p VIII
	2.1 - Conductivimètre ayant servi aux mesures parcellaires	p VIII
	2.2 - Conductivimètre ayant servi aux mesures dans le périmètre	p X
Annexe 3:	Abaques topographiques	p XI
	3.1 - Carte de la topographie de la parcelle	p XI
	3.2 - Abaques du volume d'eau présent d'après la lecture aux échelles	p XII
	3.3 - Vérification de la cohérence des jaugeages	p XIV
	3.3.1 - Le volume de vidange	
	3.3.2 - Les volumes apportés	
	3.3.2.1 - Volume du remplissage du 07/09	
	3.3.2.2 - Volume de l'ajout du 12/09	
	3.3.2.3 - Volume de l'ajout du 17/09	
Annexe 4:	Résultats obtenus dans les lysimètres ou les anneaux	p XVII
	4.1 - Influence de l'insolation sur l'ETR	p XVII
	4.2 - Influence de la vitesse du vent sur l'ETR	p XVIII
	4.3 - Influence de la nébulosité sur l'ETR	p XIX
	4.4 - Comparaison des niveaux d'eau dans le lysimètre et l'anneau	p XX
Annexe 5:	Localisation des précipitations de 1993 à Podor dans un diagramme de fréquence	p XXI
Annexe 6:	Bilan hydrique de la parcelle	p XXII
	6.1 - Calcul du volume de la 1ère irrigation	p XXII
	6.2 - Calcul du volume nécessaire à la saturation du sol ...	p XXIII

6.3 - Bilan hydrique de la parcelle	p XXV
6.3.1 - Période du 13/08 au 20/08	
6.3.2 - Période du 07/09 au 21/09	
Annexe 7: Bilan salin de la parcelle	p XXVII
7.1 - Le bilan	p XXVII
7.2 - Suivi de l'évolution du facteur de concentration de la salinité des eaux parcellaires à l'aide d'une simulation	p XXIX
7.3 - Carte de conductivité de la parcelle	p XXXII
7.4 - Variations de la hauteur piézométrique et de la conductivité de la nappe _ Cas du piézomètre "digue"	p XXXIII
Annexe 8: Plan de l'atelier ISRA-ORSTOM	p XXXIV
Annexe 9: Analyse granulométrique	p XXXVII

Le jaugeage



Lors d'un ajout.

Lors de la vidange.



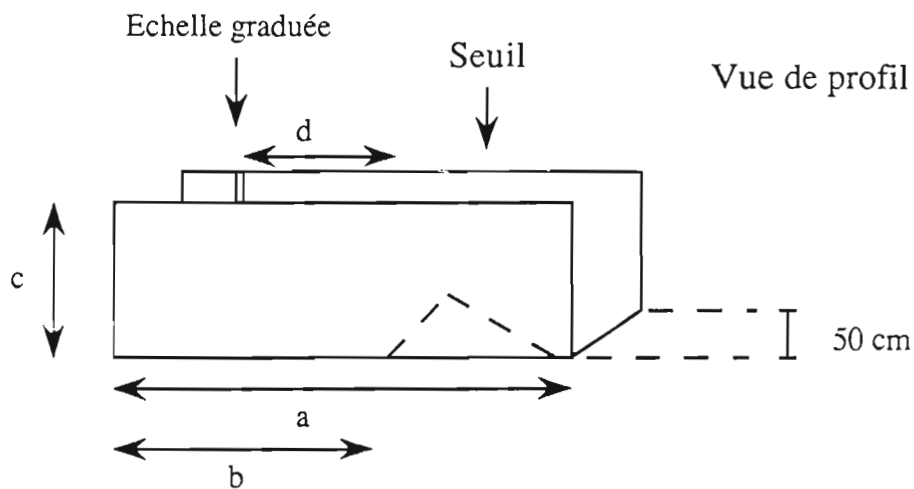
Annexe 1: Matériel utilisé

Annexe 1.1: Canal de jaugeage et échelle limnimétrique

CANAL

Canal d'amenée

- a = 5 m
- b = 3,35 m
- c = 0,65 m
- d = 2,35 m
- e = 0,25 m
- f = 1,50 m



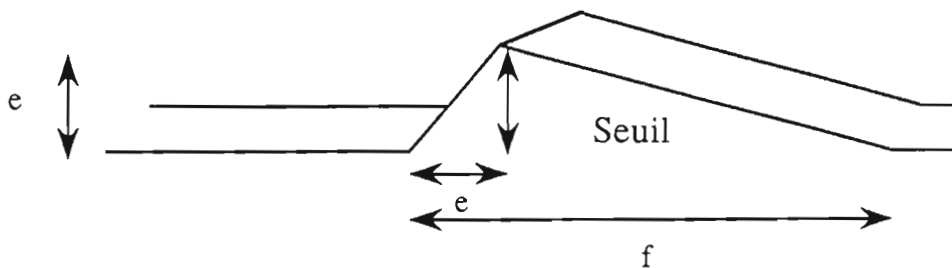
Canal de vidange

- a = 4,70 m
- b = 3,20 m
- c = 0,55 m
- d = 2,10 m
- e = 0,20 m
- f = 1,20 m

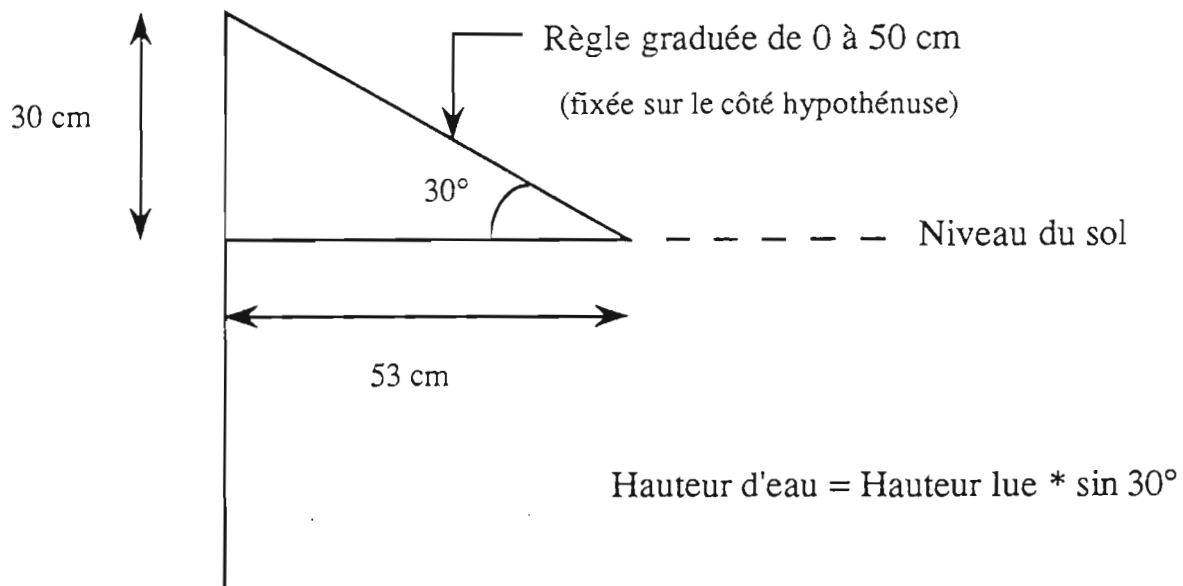
Sens de l'écoulement

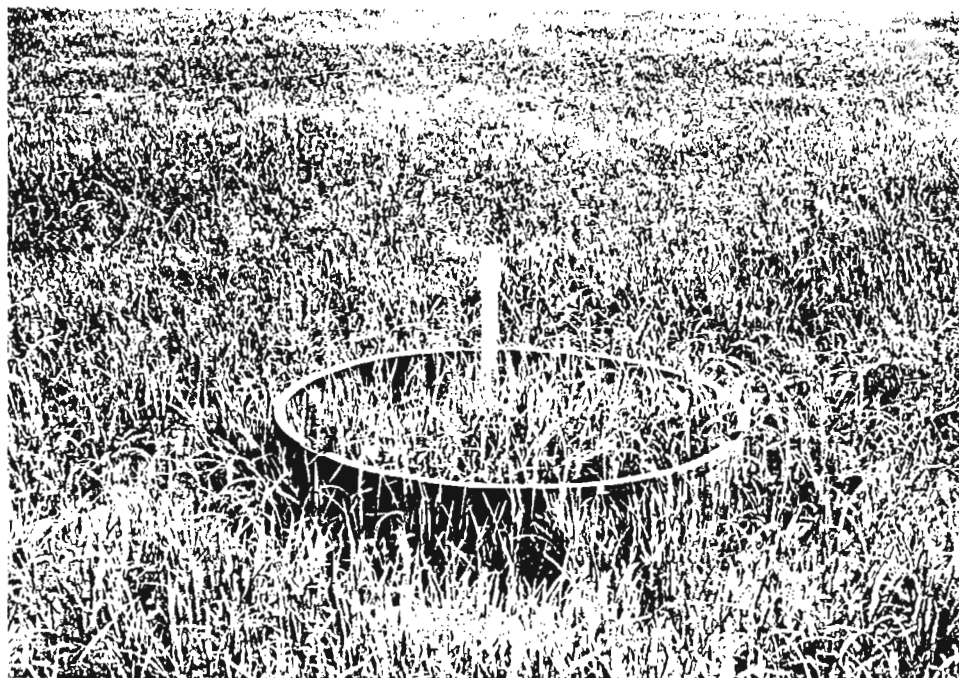


Vue du fond du canal



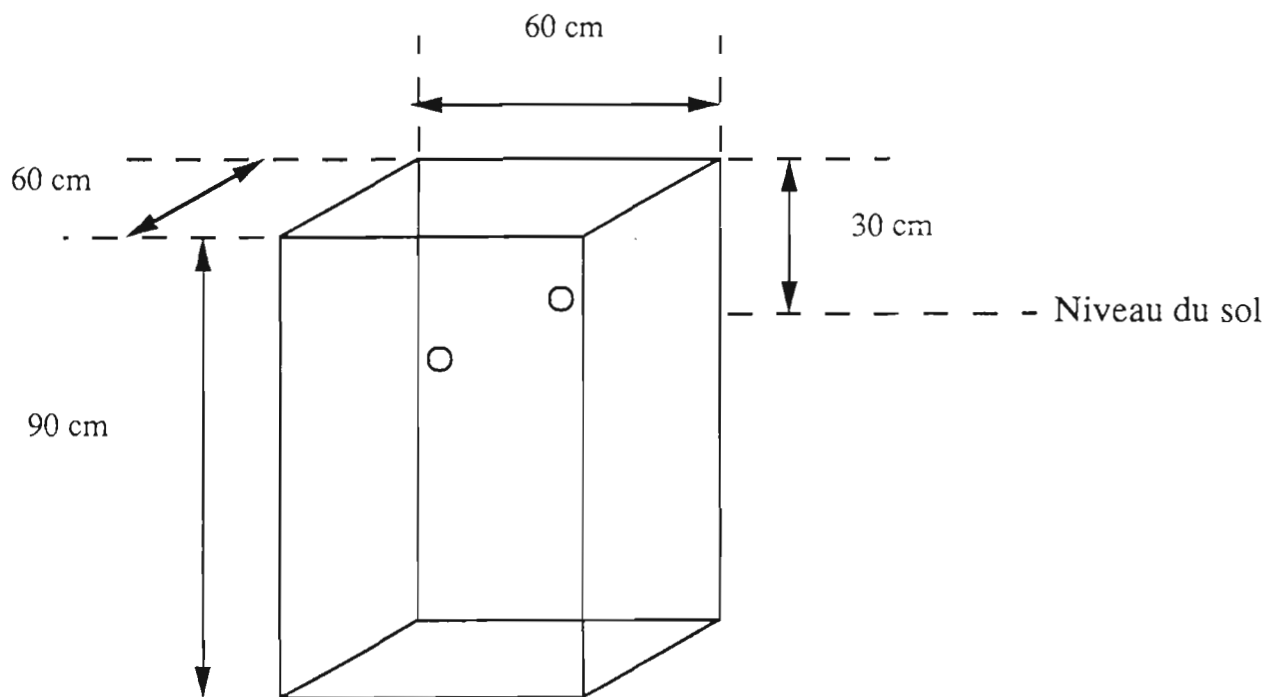
ECHELLE





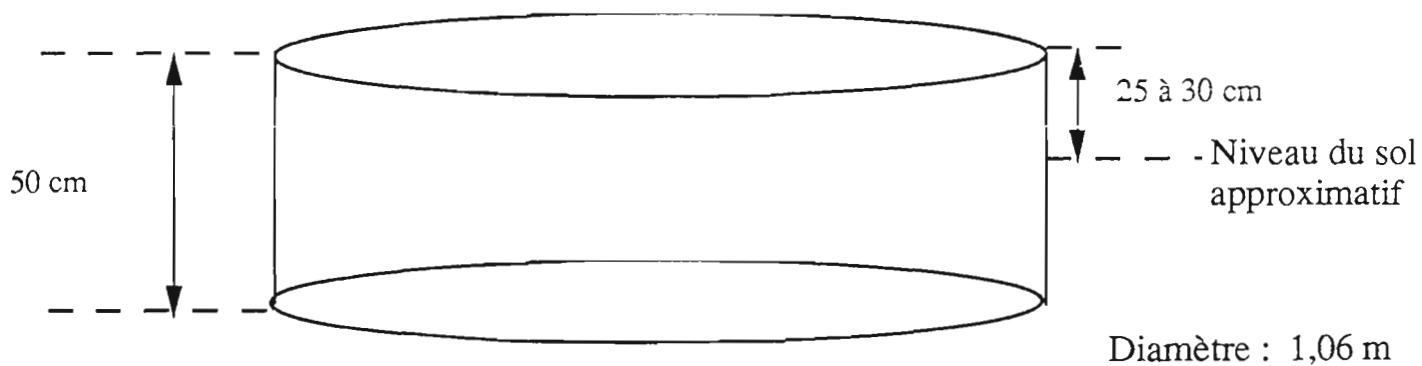
Un anneau pour la mesure de l'évapotranspiration et de l'infiltration.

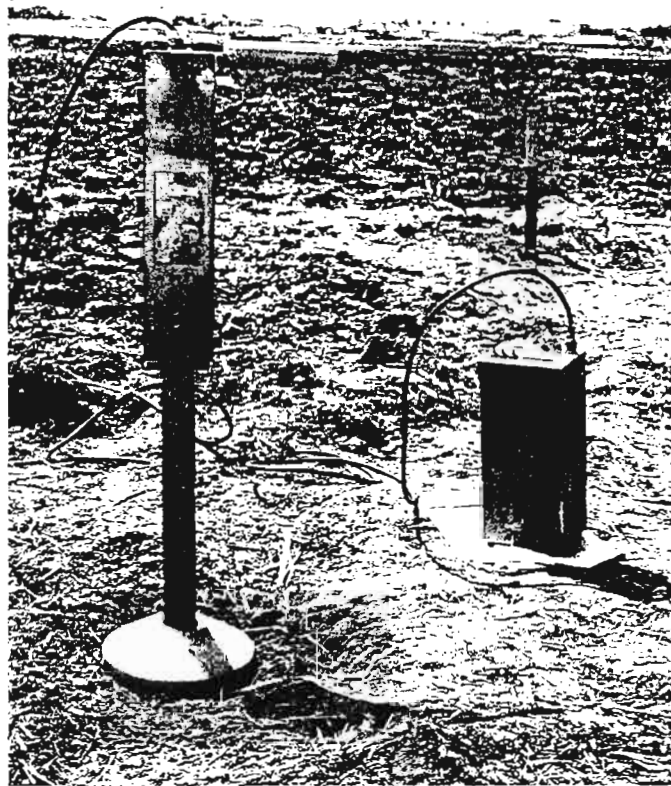
LYSIMETRE (ETR)



- Orifice pour le passage de l'eau (obstrué par un bouchon étanche lors des mesures)

ANNEAU (ETR + infiltration)





l'humidimètre neutronique Sofe 25.

Annexe 1.4: Humidimètre neutronique (Solo 25)

L'humidimètre neutronique permet de déterminer de façon rapide, précise et non destructive, l'évolution de l'humidité des sols, en fonction de la profondeur et du temps.

• Principe

Cet appareil se compose d'une source radioactive d'Amercium/Beryllium, fixée avec un détecteur. Ces deux éléments sont contenus dans une même enceinte, qui constitue la sonde, et que l'on introduit dans le sol à l'aide d'un tube d'accès préalablement installé.

La sonde fonctionne suivant le principe du ralentissement des neutrons.

Les neutrons rapides (1 600 km/s) et à haute énergie, émis par la source d'Am/Be, se heurtent aux noyaux des atomes qui se trouvent sur leur trajectoire et voient ainsi leur énergie cinétique et leur vitesse diminuer. Ce processus, dit de **thermalisation**, conduit à la transformation, par chocs successifs, des neutrons rapides en neutrons lents (8 km/s), dits thermalisés, et qui sont alors captés par le détecteur de la sonde.

Avec des atomes de forte masse, il faut plusieurs centaines de collisions pour thermaliser les neutrons (ex: sol sec). Cependant, avec des atomes d'Hydrogène, de masse équivalente à celle du neutron, la perte d'énergie est grande et seulement une vingtaine de collisions suffisent à ralentir le neutron.

L'Hydrogène de l'eau du sol est donc l'élément essentiel de la thermalisation. En conséquence, plus le sol est humide, plus le nombre de neutrons thermalisés détectés est élevé.

Le taux de comptage est ainsi proportionnel à l'humidité du sol.

• Dans la pratique...

-> Tube d'accès

Le tube d'accès, en aluminium, est clos et étanche à la base, et fermé par un bouchon étanche au sommet. Le trou dans lequel est implanté ce tube est réalisé à l'aide d'une tarière.

-> Comptages standards

Avant et après chaque série de mesures "in situ", on effectue dix mesures standards dans l'eau. Le comptage dans l'eau étant toujours de l'ordre de 1 000, ces mesures sont réalisées dans le but d'éliminer le biais dû aux dérives électroniques (échauffement...), qui entraîne des fluctuations dans les comptages.

Pour chaque cote, le comptage corrigé est donné par la relation :

$$\text{Comptage corrigé} = \frac{\text{Comptage sonde à la cote de mesure}}{\text{Moyenne des comptages standards}}$$

-> Vitesse de comptage

La sonde dispose de deux vitesses de comptage (1 comptage en 12, ou en 20 secondes). Plus le comptage est long, plus la précision est élevée.

1.5 - Sonde gamma-densimétrique (Campbell - Type CPN 502-1.5)

La sonde gamma-densimétrique permet la détermination de la densité apparente du sol.

• Principe

La sonde est basée sur le principe de l'émission et de l'enregistrement des rayons gamma, dont certains sont absorbés par le sol.

A cet effet, elle contient une source radioactive de Cesium, qui produit un rayonnement gamma électromagnétique hautement énergétique, dont l'absorption par le milieu extérieur est d'autant plus forte que le milieu est dense.

• Calculs

-> Comptage standard

Les comptages bruts, lus sur l'appareil à différentes profondeurs, sont rapportés à un comptage standard. Celui-ci est obtenu en moyennant deux séries de dix lectures effectuées avant et après les comptages "in situ"; pour cela, la sonde est bloquée en position "haute" (appareil placé sur sa caisse de transport).

-> Du comptage à la densité apparente sèche

La densité apparente humide est obtenue grâce à une courbe d'étalonnage fournie par le constructeur, et spécifique de l'appareil.

L'équation de la courbe constructeur est la suivante:

$$D_h = B * \ln (A / (R-C)) \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} A &= -2,69094 \\ B &= -3,48919 \\ C &= 6,86551 \end{aligned}$$

où D_h représente la densité apparente humide (en g/cm^3)
et R le comptage réduit, c'est à dire le rapport comptage brut / comptage standard.

La densité apparente sèche (D_s) peut ensuite être déterminée par la relation:

$$D_s = D_h / (1 + H_p)$$

où H_p représente la valeur d'humidité pondérale (en %).

-> Résultats

Profondeur	D_s moyenne	D_s retenue
cm	g/cm^3	g/cm^3
10	1,19	1,20
20	1,38	1,40
30	1,55	1,55
40	1,60	1,60
50	1,65	1,65
60	1,64	1,65
70	1,62	1,65

→ Détail des calculs

Comptage standard = 3338

Prof. (cm)	Comptages bruts		Comptage moyen	R	g/cm ³		
					Dh	Hp	Ds
10	10115	10232	10173	3,048	1,220	8,8	1,12
20	9353	9368	9360	2,804	1,436	12,0	1,28
30	7637	7654	7645	2,290	1,852	17,1	1,58
40	7436	7247	7341	2,199	1,921	16,8	1,64
50	7182	7238	7210	2,160	1,950	17,5	1,66
60	7366	7414	7390	2,214	1,910	16,9	1,63
70	7545	7535	7540	2,259	1,876	16,6	1,61

Comptage standard = 3350

Prof. (cm)	Comptages bruts		Comptage moyen	R	g/cm ³		
					Dh	Hp	Ds
10	9280	9463	9371	2,797	1,442	14,6	1,26
20	8165	8228	8196	2,446	1,731	16,6	1,48
30	7619	7676	7647	2,283	1,858	16,6	1,59
40	7399	7595	7497	2,238	1,892	17,5	1,61
50	7289	7248	7268	2,169	1,943	16,1	1,67
60	7706	7581	7643	2,281	1,859	16,3	1,60
70	7756	7754	7755	2,315	1,833	16,2	1,58

Prof. (cm)	Comptages bruts		Comptage moyen	R	g/cm ³		
					Dh	Hp	Ds
10	9919	9751	9835	2,936	1,321	11,6	1,18
20	8366	8218	8292	2,475	1,708	16,3	1,47
30	7684	7533	7608	2,271	1,866	18,6	1,57
40	7338	7326	7332	2,189	1,928	18,2	1,63
50	7144	7205	7174	2,141	1,964	17,5	1,67
60	7280	7281	7280	2,173	1,940	16,1	1,67
70	7484	7551	7517	2,244	1,887	16,5	1,62

Prof. (cm)	Comptages bruts		Comptage moyen	R	g/cm ³		
					Dh	Hp	Ds
10	(11185)	(11133)	(11159)	(3,331)	(0,951)	13,1	(0,84)
20	8862	8827	8844	2,640	1,574	18,3	1,33
30	8074	7980	8027	2,396	1,770	18,4	1,49
40	7898	7866	7882	2,353	1,804	17,6	1,53
50	7366	7344	7355	2,195	1,923	17,9	1,63
60	7197	7329	7263	2,168	1,944	16,2	1,67
70	7465	7373	7419	2,215	1,909	16,3	1,64

Prof. (cm)	Comptages bruts		Comptage moyen	R	g/cm ³		
					Dh	Hp	Ds
10	9751	9801	9776	2,918	1,337	12,3	1,19
20	8830	9020	8925	2,664	1,554	16,0	1,34
30	7855	8011	7933	2,368	1,792	17,2	1,53
40	7639	7653	7646	2,282	1,858	17,6	1,58
50	7411	7457	7434	2,219	1,906	17,2	1,63
60	7477	7426	7451	2,224	1,902	16,1	1,64
70	7494	7469	7481	2,233	1,895	16,5	1,63

Annexe 1.6: Nivellement topographique du matériel

La margelle du piézomètre "digue" a été placée à une cote arbitraire de 10 m.
L'ensemble du matériel est nivelé par rapport à cette cote.

	Cotes lues sur la mire		Différences		Cotes finales (mm)
	Arrière	Avant	plus	moins	
	0 333				
P Digue	0 248				10 000
	0 162				
		0 763			
P Canal		0 230	0 018		10 018
		-			
		0 795			
P Drain		0 280		0 032	09 968
		-			
		1 605			
Echelle R		1 195		0 947	09 053
		0 785			
		1 665			
Echelle V		1 265		1 017	08 983
		0 865			

Le nivellement est réalisé:
à la margelle des piézomètres
et au sommet des échelles.

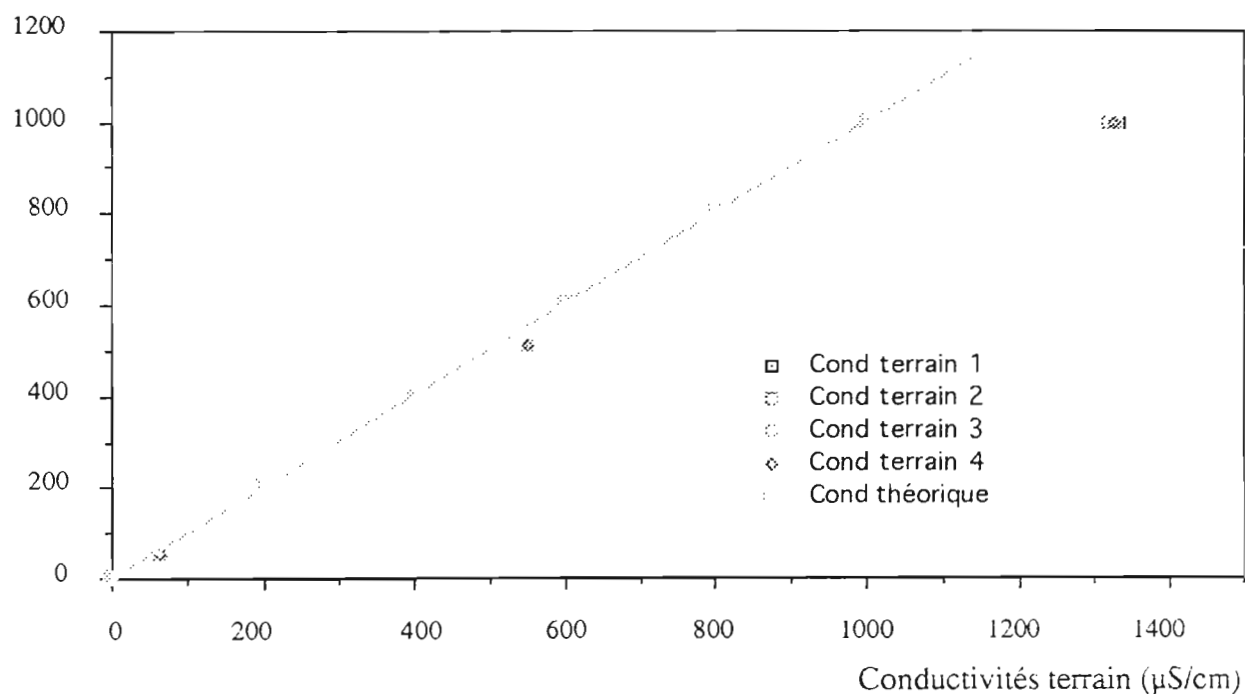
Le positionnement du matériel sur la parcelle est présenté sur la figure 1 p 9.

Annexe 2: Etalonnage des conductivimètres

Annexe 2.1 - Conductivimètre ayant servi aux mesures parcellaires (WTW - modèle IP65)

Nous avons établi la correspondance entre les mesures de conductivité de terrain et celles du laboratoire en réalisant régulièrement, sur le terrain, l'étalonnage du conductivimètre à l'aide de solutions de KCl de différentes concentrations connues.

Conductivité labo
($\mu\text{S}/\text{cm}$)



Courbe d'étalonnage du conductivimètre
à partir de solutions de KCl

Ce graphe nous montre, tout d'abord, que les différentes mesures de terrain varient peu entre elles.

Ensuite, nous remarquons que jusqu'à $600 \mu\text{S}/\text{cm}$ les mesures de terrain sont très proches des mesures théoriques. Ayant essentiellement travaillé avec des conductivités répondant à ce critère, nous considérons que nos mesures de terrain sont assimilables aux mesures de laboratoire.

Nous cherchons ensuite à établir une relation entre conductivité et salinité.

Pour cela, nous avons dilué un échantillon d'eau très salée ($37 \text{ mS}/\text{cm}$), issu d'une mare où s'accumulent des eaux de drainage détournées de leur cours normal. Cet échantillon ayant été préalablement analysé, nous avons pu déterminer la salinité de

chaque dilution et, nous avons, ensuite, mesuré, en laboratoire, la conductivité de chacune d'elles.

Nous traçons un graphe de la salinité en fonction de la conductivité, l'équation de la droite de régression est la relation recherchée.

- Résultats de l'analyse

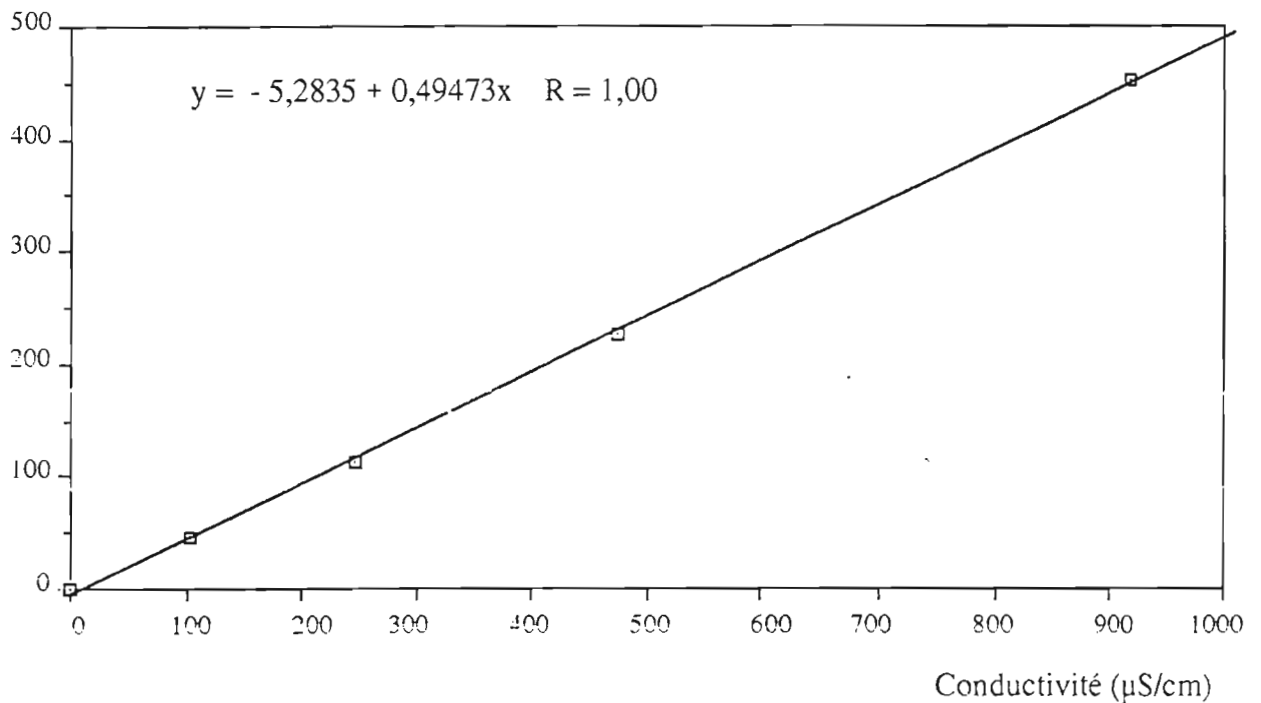
Cette analyse nous confirme que la salinité est à dominante chlorurée-sodique.

pH	EC mS 20°C	Cl méq/l	SO4 méq/l	Ca méq/l	Mg méq/l	Na méq/l	K méq/l	Somme anions	Somme cations
6,46	37	383	8,6	22	35	332	1,9	391,6	390,9

Source: Laboratoire de chimie de l'ORSTOM de Dakar-Hann (1993)

- Droite de régression conductivité-salinité

Salinité (mg/l)



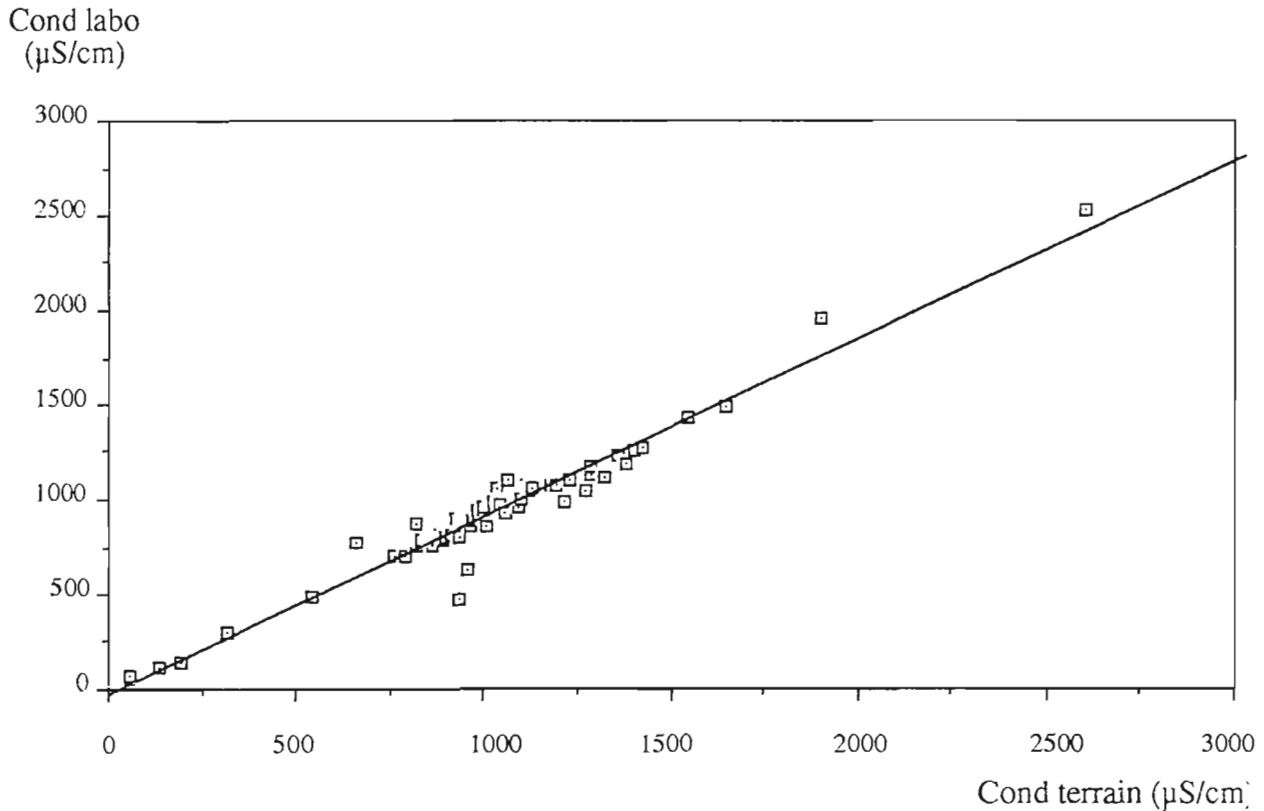
Relation conductivité-salinité
établie à partir d'un échantillon d'eau connu

En définitive, nous adoptons la relation:

$$\text{Salinité (mg/l)} = 0,49473 * \text{Conductivité (}\mu\text{S/cm)} - 5,2835$$

Annexe 2.2 - Conductivimètre ayant servi aux mesures dans le périmètre (HANNA Instr. modèle HI 8733)

L'étalonnage de cet appareil est réalisé en comparant les conductivités mesurées sur le terrain avec celles mesurées au laboratoire à partir des échantillons prélevés au moment de la mesure.



Courbe d'étalonnage du conductivimètre

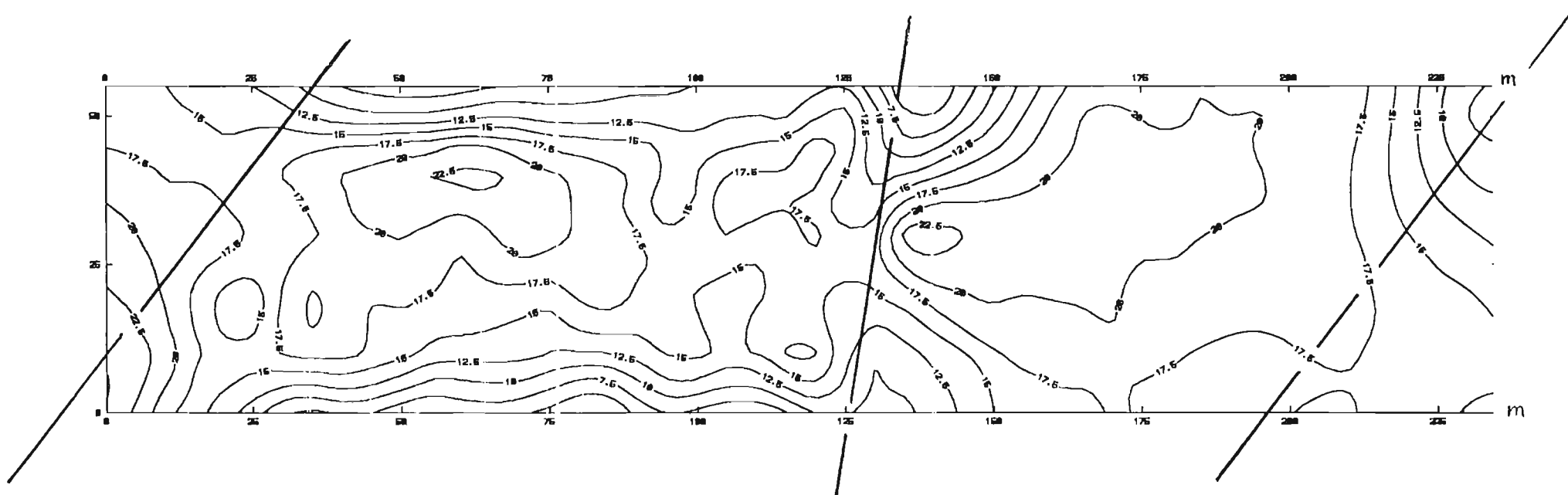
Les valeurs de terrain inférieures à 1 mS/cm sont très proches des valeurs de laboratoire; or, ce sont ces valeurs qui nous intéressent. Nous considérons donc que, dans cet intervalle de valeurs, les mesures de terrain sont assimilables à celles du laboratoire.

Nous utilisons la relation conductivité-salinité, établie, pour cet appareil, par le laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM (Samb, 1993), et qui s'applique aux conductivités inférieures à 1 mS/cm:

$$\text{Salinité (mg/l)} = 0,53176 * \text{Conductivité (µS/cm)} + 13,53$$

Annexe 3: Abaques topographiques

Annexe 3.1: Carte de la topographie de la parcelle



IX

Les hauteurs des courbes de niveaux sont mentionnées en centimètres.

Annexe 3.2: Abaques du volume d'eau présent d'après la lecture aux échelles

Zéros absolus : pour R -> 17 et pour V -> 10

R: échelle de remplissage (cf figure 1 p 9)

V: échelle de vidange

Les lectures aux échelles sont les lectures ramenées à la verticale.

Le volume d'eau lu est celui contenu dans la demi-parcelle où est située l'échelle.

ex: R = 20 cm -> on lit pour 37 (lecture corrigée) -> vol = 1 160,72 m³

V = 26 cm -> on lit pour 36 (lecture corrigée) -> vol = 1111,16 m³

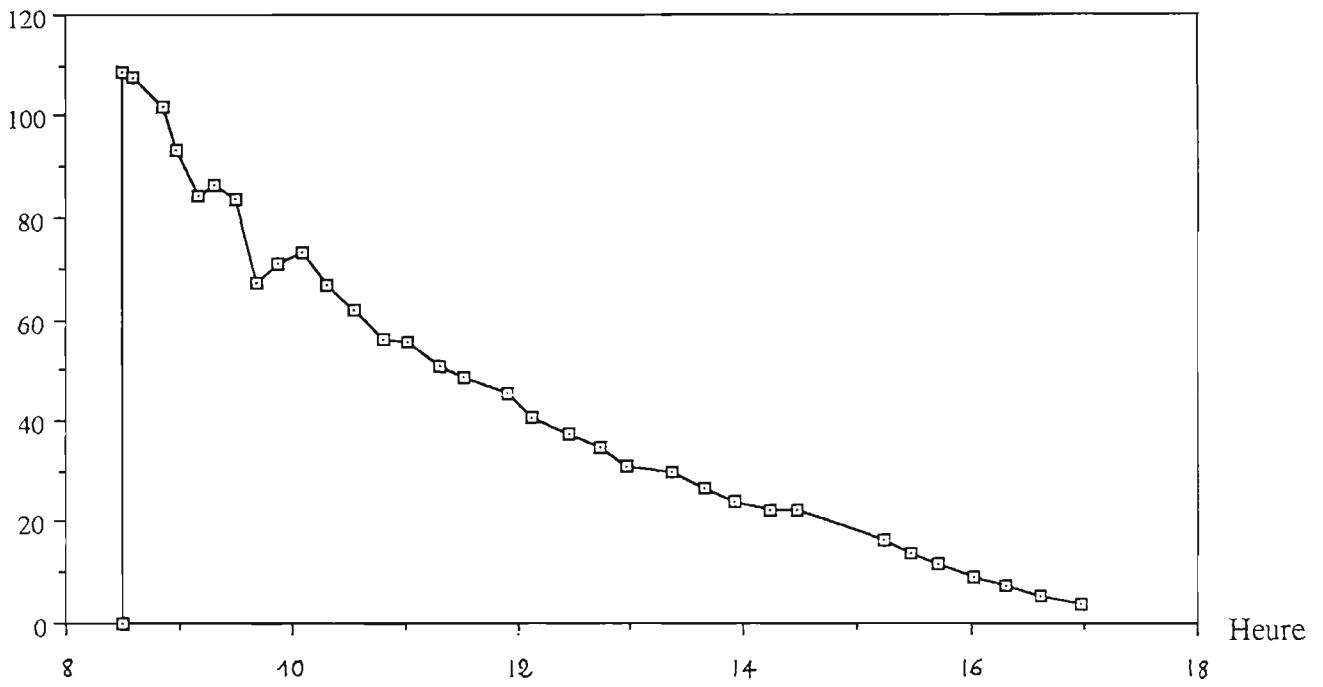
Le volume d'eau présent dans la parcelle est donc de 2 271,88 m³.

Lecture corrigée (cm)	Vol correspondant à V (m ³)	Vol correspondant à R (m ³)
0	0,000	0,000
1	0,000	0,000
2	0,000	0,000
3	0,013	0,004
4	0,096	0,079
5	0,298	0,280
6	0,692	0,648
7	1,577	1,233
8	3,285	2,265
9	6,114	3,916
10	12,964	3,716
11	16,232	9,998
12	24,133	15,247
13	34,093	22,437
14	46,304	31,856
15	62,150	43,990
16	83,673	59,657
17	112,115	79,625
18	147,119	109,411
19	188,710	145,350
20	235,268	187,572
21	285,119	239,991
22	337,406	296,324
23	391,558	353,732
24	446,464	407,106
25	501,755	469,305
26	557,160	527,120
27	612,560	584,720
28	667,960	642,320
29	723,360	699,920

Abaques du volume d'eau présent d'après la lecture aux échelles (suite)

Lecture corrigée (cm)	Vol correspondant à V (m ³)	Vol correspondant à R (m ³)
30	778,760	757,520
31	834,160	815,120
32	859,560	872,720
33	944,960	930,320
34	1000,360	987,920
35	1055,760	1045,520
36	1111,160	1103,120
37	1166,560	1160,720
38	1221,960	1218,320
39	1277,360	1275,920
40	1332,760	1333,520
41	1388,160	1391,120
42	1443,560	1448,720
43	1498,960	1506,320
44	1554,360	1563,920
45	1609,760	1621,520
46	1665,160	1679,120
47	1720,560	1736,720
48	1775,960	1794,320
49	1831,360	1851,920
50	1886,760	1909,520
51	1942,160	1967,120
52	1997,560	2024,720
53	2052,960	2082,320
54	2108,360	2139,920
55	2163,760	2197,520

Débit (l/s)



Hydrogramme de la vidange du 20/08/1993

Annexe 3.3: Vérification de la cohérence des jaugeages

3.3.1 - Le volume de vidange

Volume de vidange calculé d'après les jaugeages = $1\,395\text{ m}^3$ (cf hydrogramme ci-joint)

Calcul d'après les abaques:

- Avant la vidange:

$$\begin{array}{l} R = 19,7\text{ cm} \quad \rightarrow \text{on lit pour } 36,7 \text{ sur l'abaque} \quad \rightarrow 1\,150\text{ m}^3 \\ V = 26,5\text{ cm} \quad \rightarrow \quad \quad \quad 36,5 \quad \quad \quad \rightarrow 1\,139\text{ m}^3 \\ \text{Total} = 2\,289\text{ m}^3 \quad (1) \end{array}$$

- Après la vidange (volume d'eau restant dans la parcelle)

$$\begin{array}{l} V = 7\text{ cm} \rightarrow 17 \rightarrow 112\text{ m}^3 \\ R = 0 \rightarrow 17 \rightarrow 80\text{ m}^3 \\ \text{Total} = 192\text{ m}^3 \quad (2) \end{array}$$

- Pertes totales ayant eu lieu au cours de la vidange

$$8\text{ mm} * 1,13\text{ ha} = 90\text{ m}^3 \quad (3)$$

$$\Rightarrow \text{Volume de la vidange} = (1) - (2) - (3) = 2\,007\text{ m}^3$$

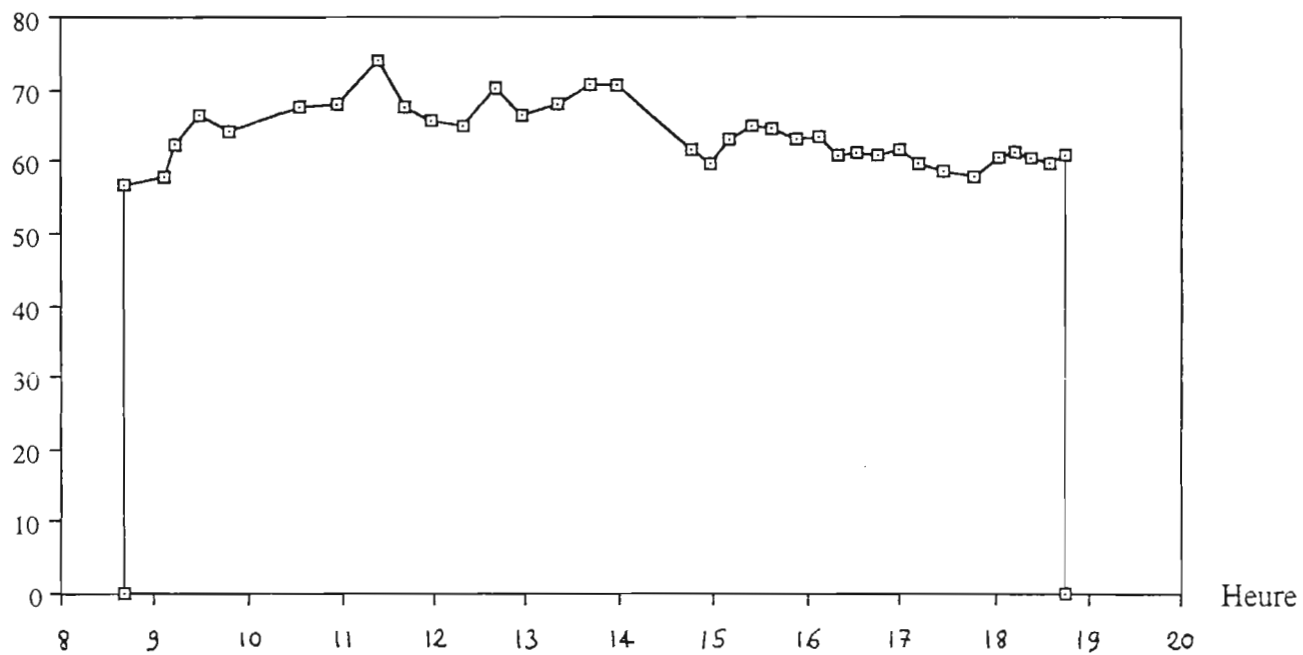
On accepte sans bien comprendre que le volume jaugé a été réellement sous-estimé, les 4% d'erreurs sur la section mouillée ne suffisant pas à l'expliquer.

Cela est-il dû à un problème de fonctionnement de l'hélice du moulinet ? Ou bien faut-il remettre en cause l'abaque topographique ? Ou... ?

En fait, il y a une incohérence dans les jaugeages entre eux: en effet, les hauteurs aux échelles à la fin du remplissage du 07/09 et avant la vidange du 20/09 étaient du même ordre de grandeur, et les volumes concernés ne le sont pas (volume de remplissage = 2372 m^3 et volume de vidange = $1\,395\text{ m}^3$).

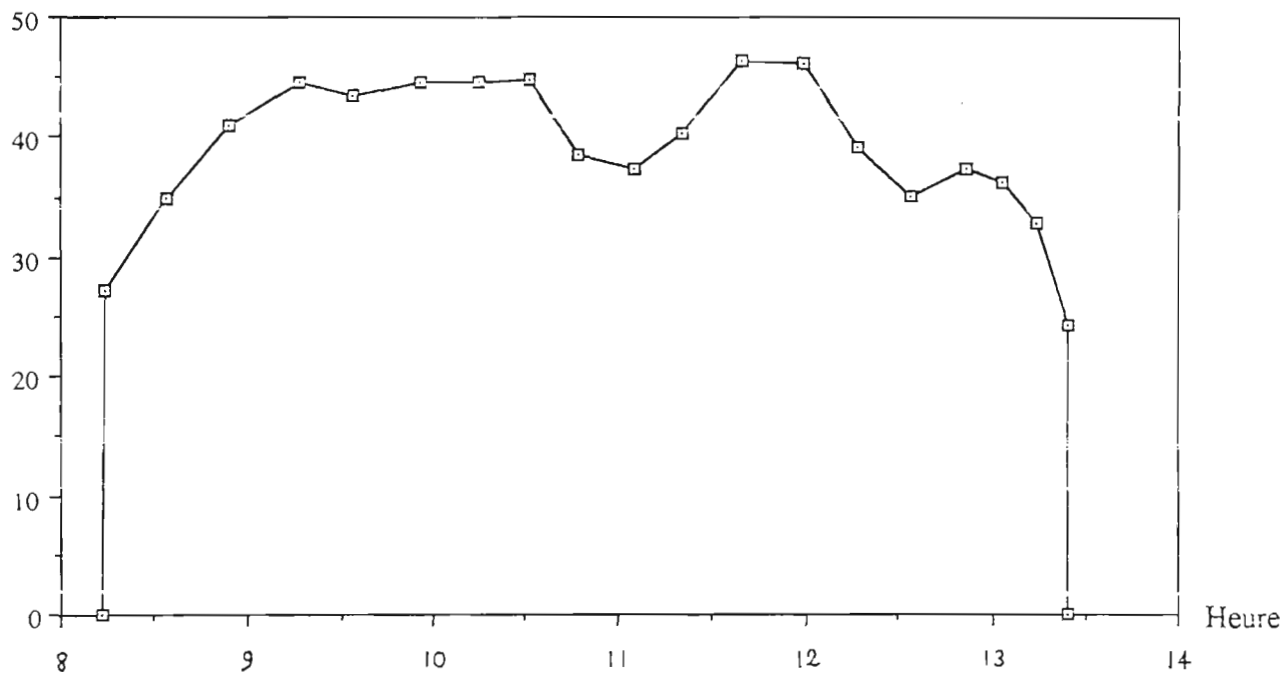
Nous concluons donc à un volume vidangé de $2\,007\text{ m}^3$, et le volume d'eau restant dans la parcelle est de 192 m^3 .

Débit (l/s)



Hydrogramme du remplissage du 07/09/1993

Débit (l/s)



Hydrogramme de l'ajout du 12/09/1993

3.3.2 - Les volumes apportés

3.3.2.1 - Volume du remplissage du 07/09

Volume jaugé = 2 372 m³ (1) (cf hydrogramme ci-joint)

Calcul d'après les abaques

- Après le remplissage

$$R = 20,5 \text{ cm} \rightarrow 37,5 \rightarrow 1\,189 \text{ m}^3$$

$$V = 25 \text{ cm} \rightarrow 35 \rightarrow 1\,056 \text{ m}^3$$

$$\text{Total} = 2\,245 \text{ m}^3$$

- Pertes totales lors du remplissage

$$15 \text{ mm} * 1,13 \text{ ha} = 169 \text{ m}^3$$

$$\Rightarrow \text{Total} = 2\,414 \text{ m}^3 \quad (2)$$

Différence (2) - (1) = 42 m³ soit 1,7% d'erreur

3.3.2.2 - Volume de l'ajout du 12/09

Volume jaugé = 767 m³ (3) (cf hydrogramme ci-joint)

Calcul d'après les abaques

- Avant l'ajout

$$R = 13,5 \text{ cm} \rightarrow 30,5 \rightarrow 806 \text{ m}^3$$

$$V = 20,5 \text{ cm} \rightarrow 30,5 \rightarrow 785 \text{ m}^3$$

$$\text{Total} = 1\,591 \text{ m}^3 \quad (\text{A})$$

- Après l'ajout

$$R = 20,25 \text{ cm} \rightarrow 37,25 \rightarrow 1\,175 \text{ m}^3$$

$$V = 24,5 \text{ cm} \rightarrow 34,5 \rightarrow 1\,028 \text{ m}^3$$

$$\text{Total} = 2\,203 \text{ m}^3 \quad (\text{B})$$

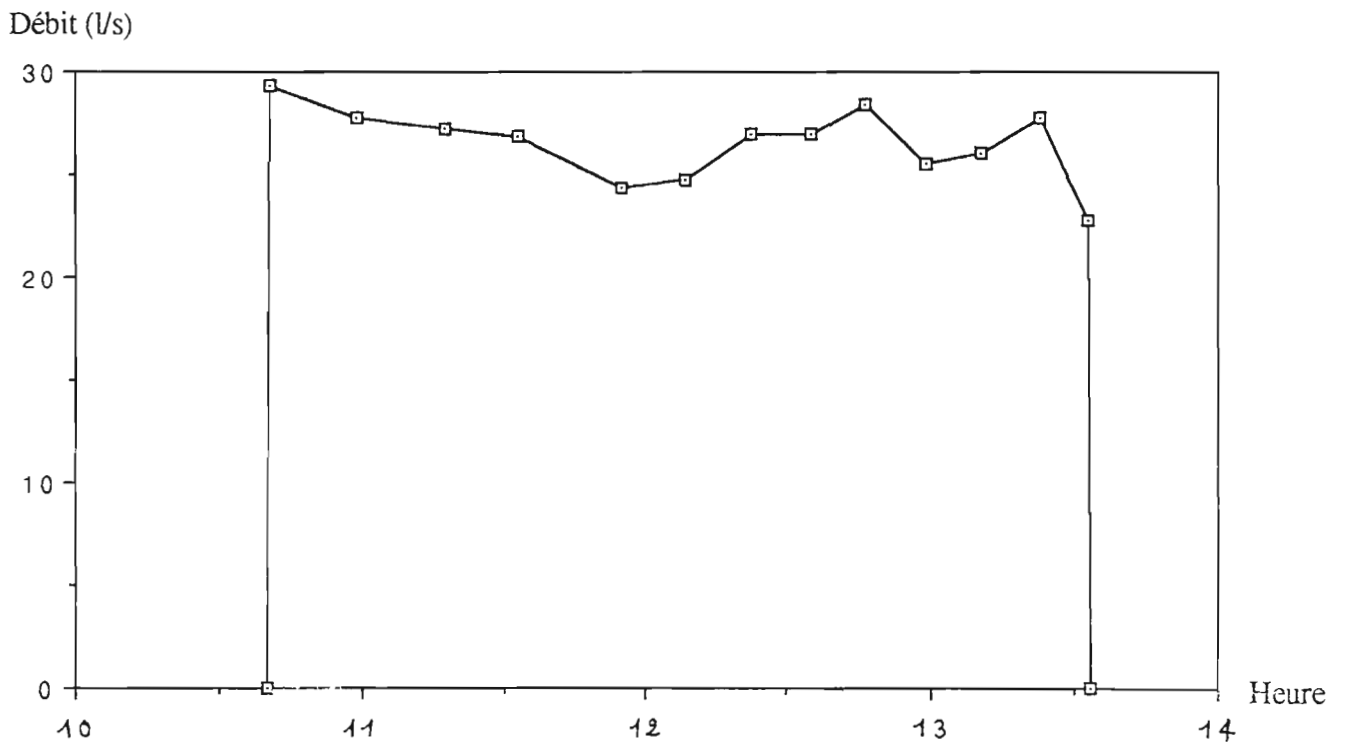
$$\Rightarrow (\text{B}) - (\text{A}) = 612 \text{ m}^3$$

- Pertes totales lors du remplissage

$$10 \text{ mm} * 1,13 \text{ ha} = 113 \text{ m}^3$$

$$\Rightarrow \text{Total} = \text{Pertes totales} + (\text{B} - \text{A}) = 725 \text{ m}^3 \quad (4)$$

Différence: (3) - (4) = 42 m³ soit 5,8% d'erreur



Hydrogramme de l'ajout du 17/09/1993

3.3.2.3 - Volume de l'ajout du 17/09

Volume jaugé = 291 m^3 (5) (cf hydrogramme ci-joint)

Calcul d'après les abaques

• Avant l'ajout

R = 13,3 cm ->	30,3	->	775 m^3
V = 18,7 cm ->	28,7	->	707 m^3
	Total =		1 482 m^3 (C)

• Après l'ajout

R = 14,1 cm ->	31,1	->	821 m^3
V = 21,2 cm ->	31,2	->	845 m^3
	Total =		1 666 m^3 (D)

$$\Rightarrow (D) - (C) = 184 \text{ m}^3$$

• Pertes totales lors du remplissage

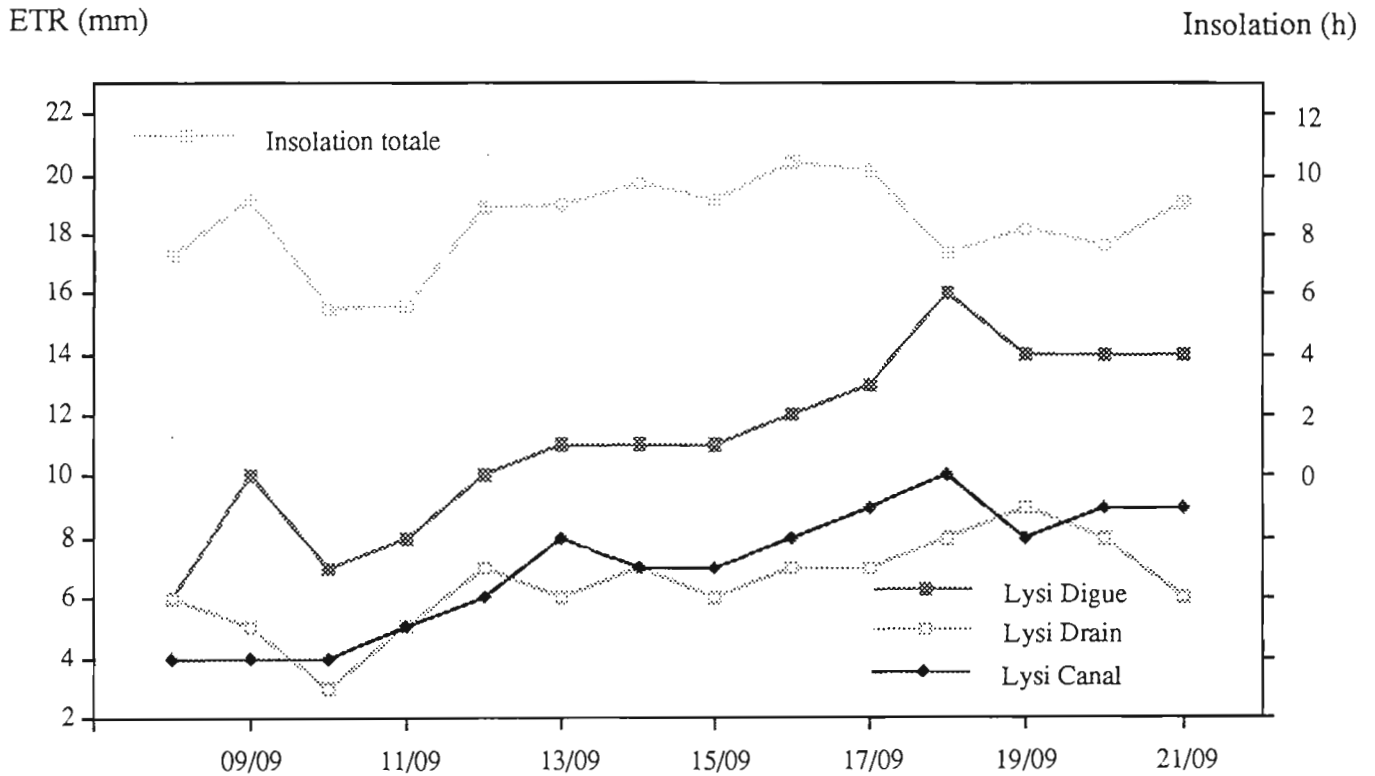
$$10 \text{ mm} * 1,13 \text{ ha} = 113 \text{ m}^3$$

$$\Rightarrow \text{Total} = \text{Pertes totales} + (D - C) = 297 \text{ m}^3 \quad (6)$$

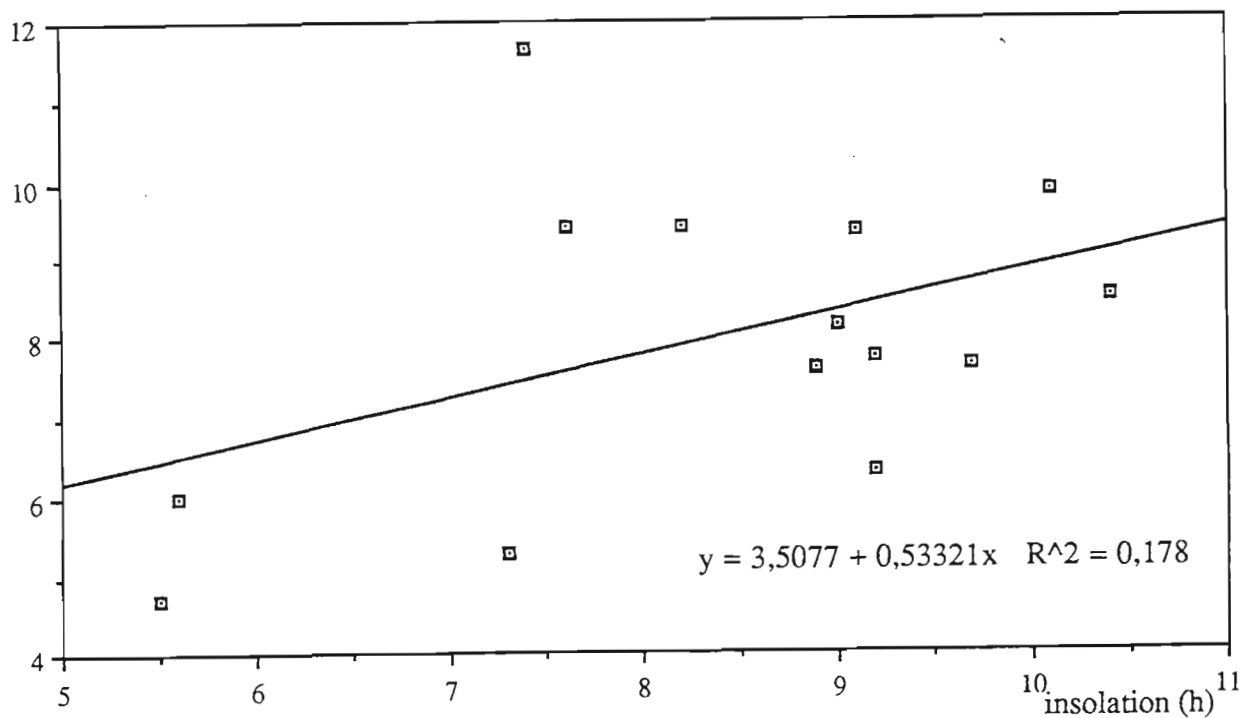
Différence: $(6) - (5) = 6 \text{ m}^3$ soit 2 % d'erreur

Annexe 4: Résultats obtenus dans les lysimètres ou les anneaux

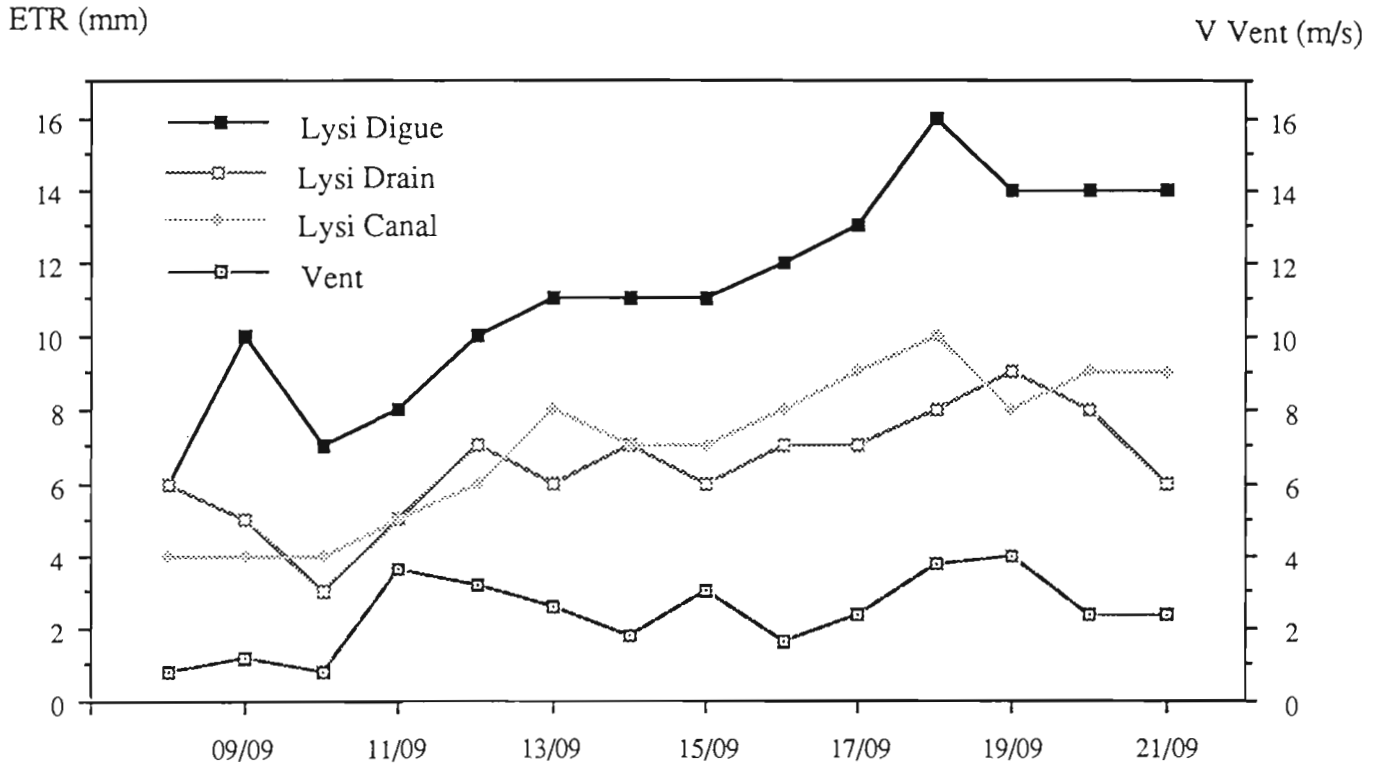
Annexe 4.1: Influence de l'insolation sur l'ETR



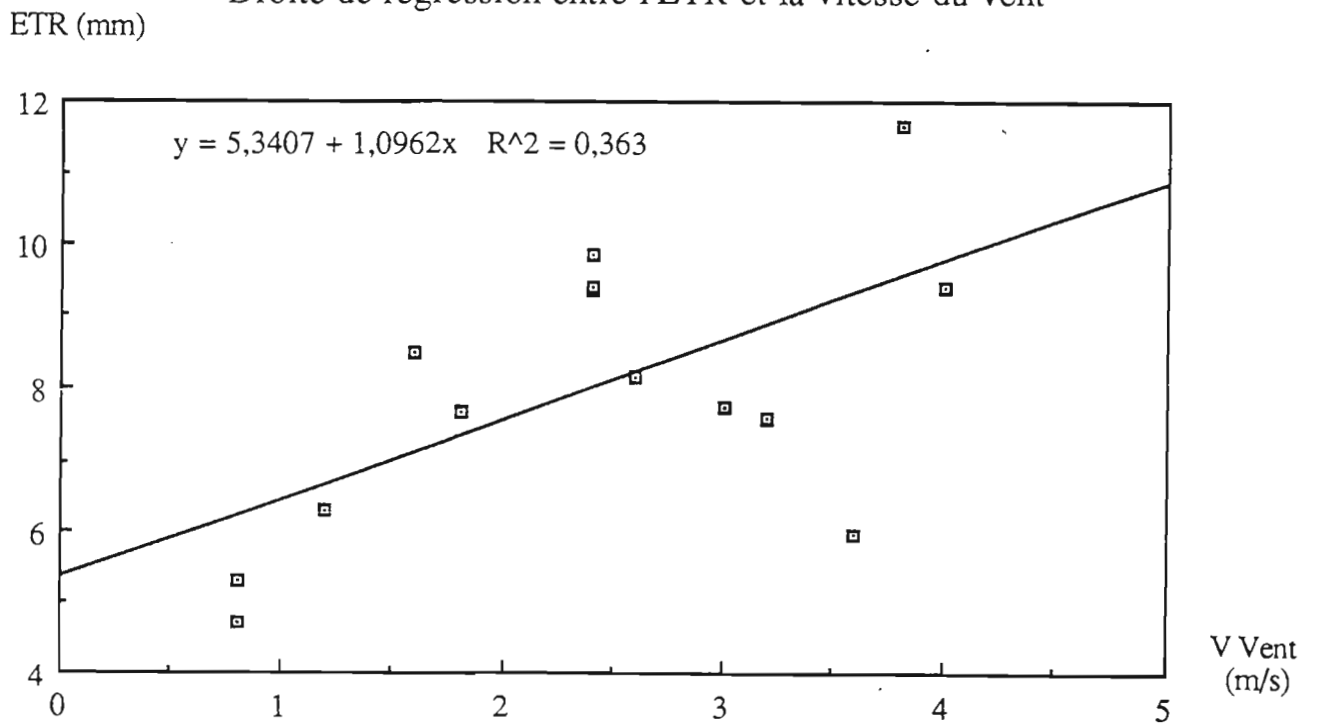
ETR (mm) Droite de régression entre l'ETR et l'insolation



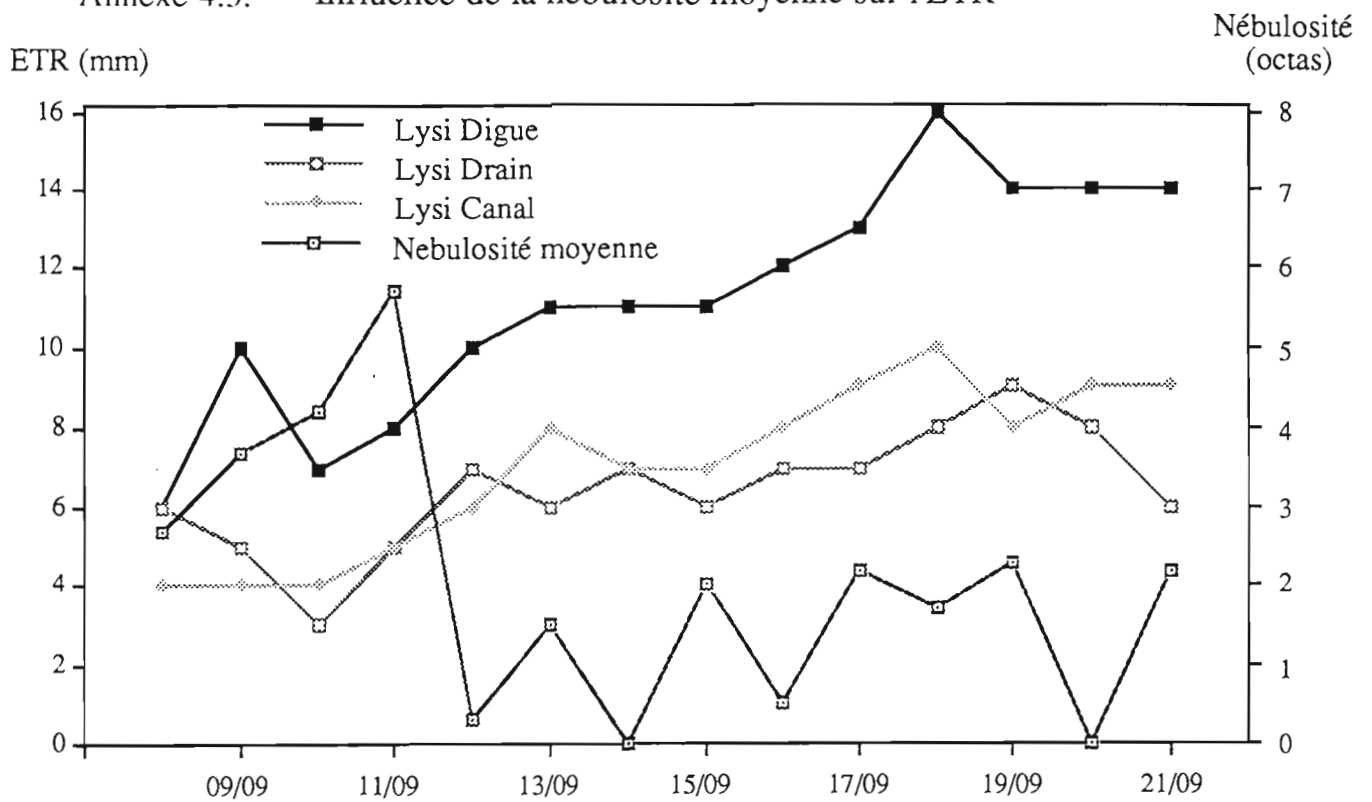
Annexe 4.2: Influence de la vitesse du vent sur l'ETR



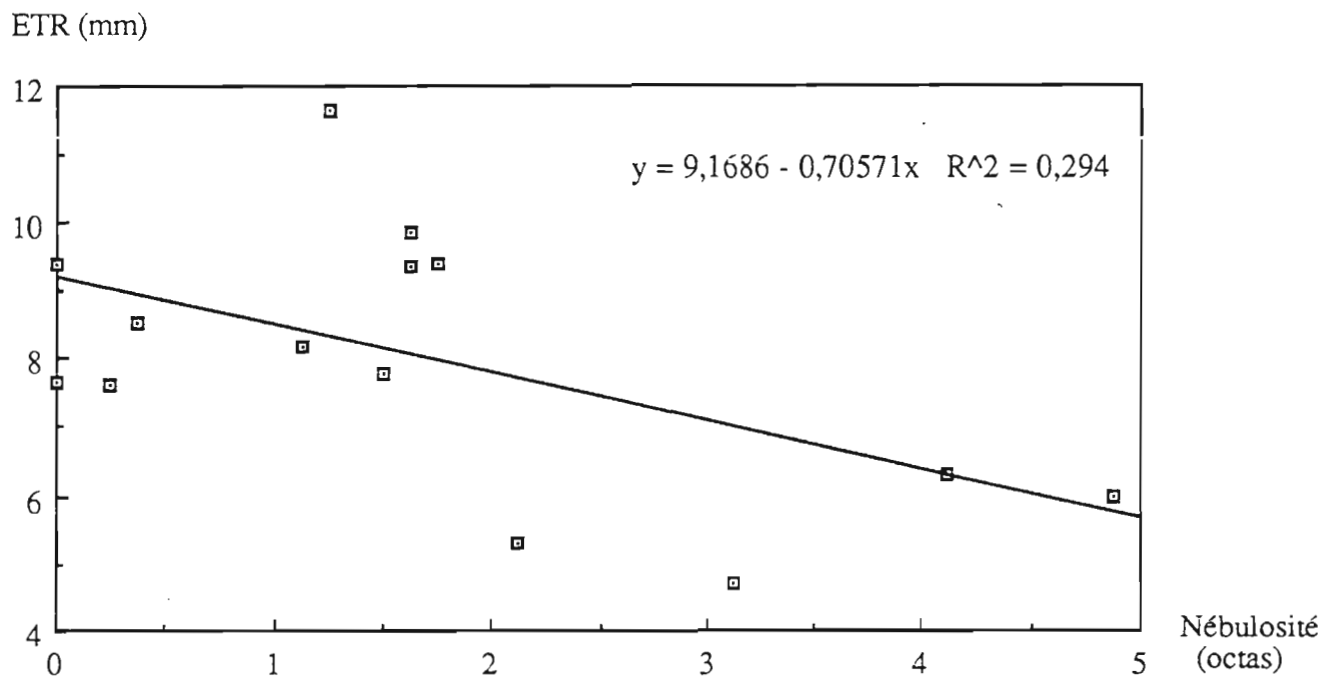
Droite de régression entre l'ETR et la vitesse du vent



Annexe 4.3: Influence de la nébulosité moyenne sur l'ETR



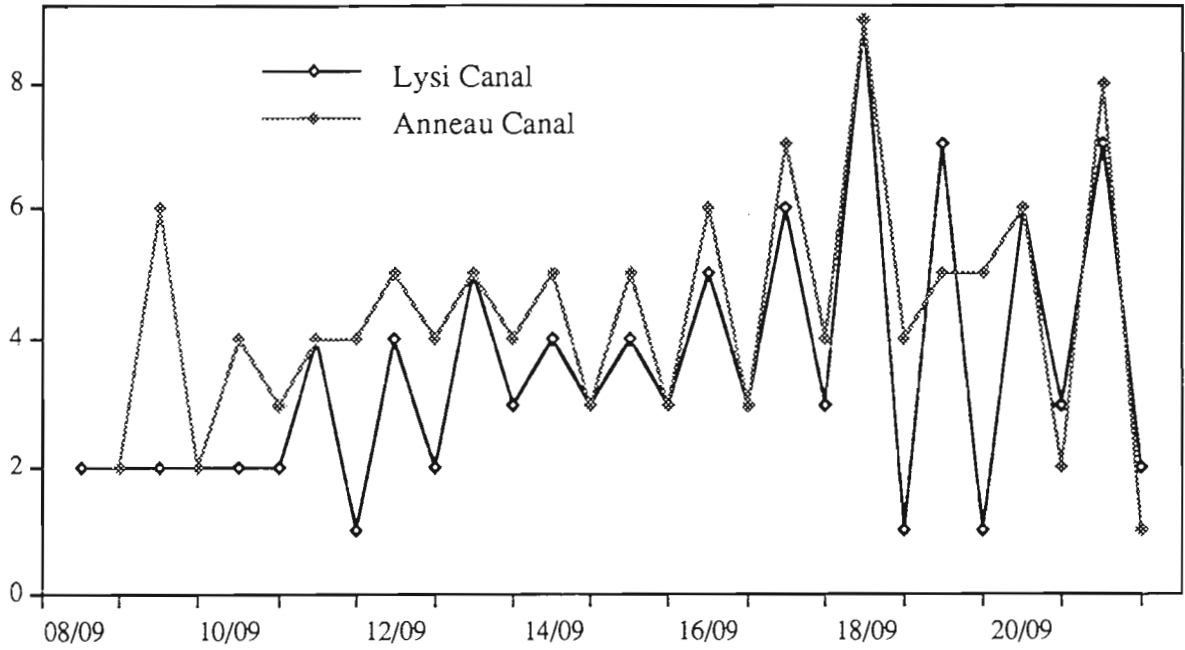
Droite de régression entre l'ETR et la nébulosité



Annexe 4.4: Comparaison des niveaux d'eau dans le lysimètre et l'anneau

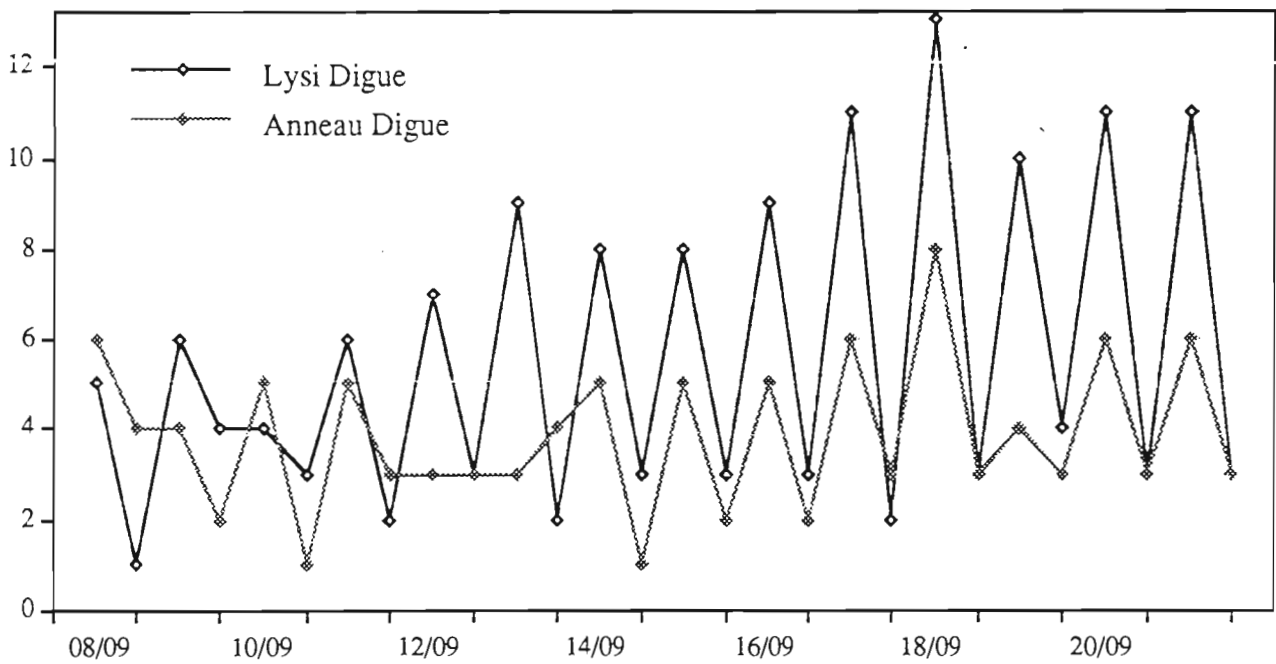
4.4.1 - Lysimètre et anneau "canal"

Pertes (mm / jour)



4.4.2 - Lysimètre et anneau "digue"

Pertes (mm / jour)



Annexe 5: Localisation des précipitations de 1993 dans un diagramme de fréquence

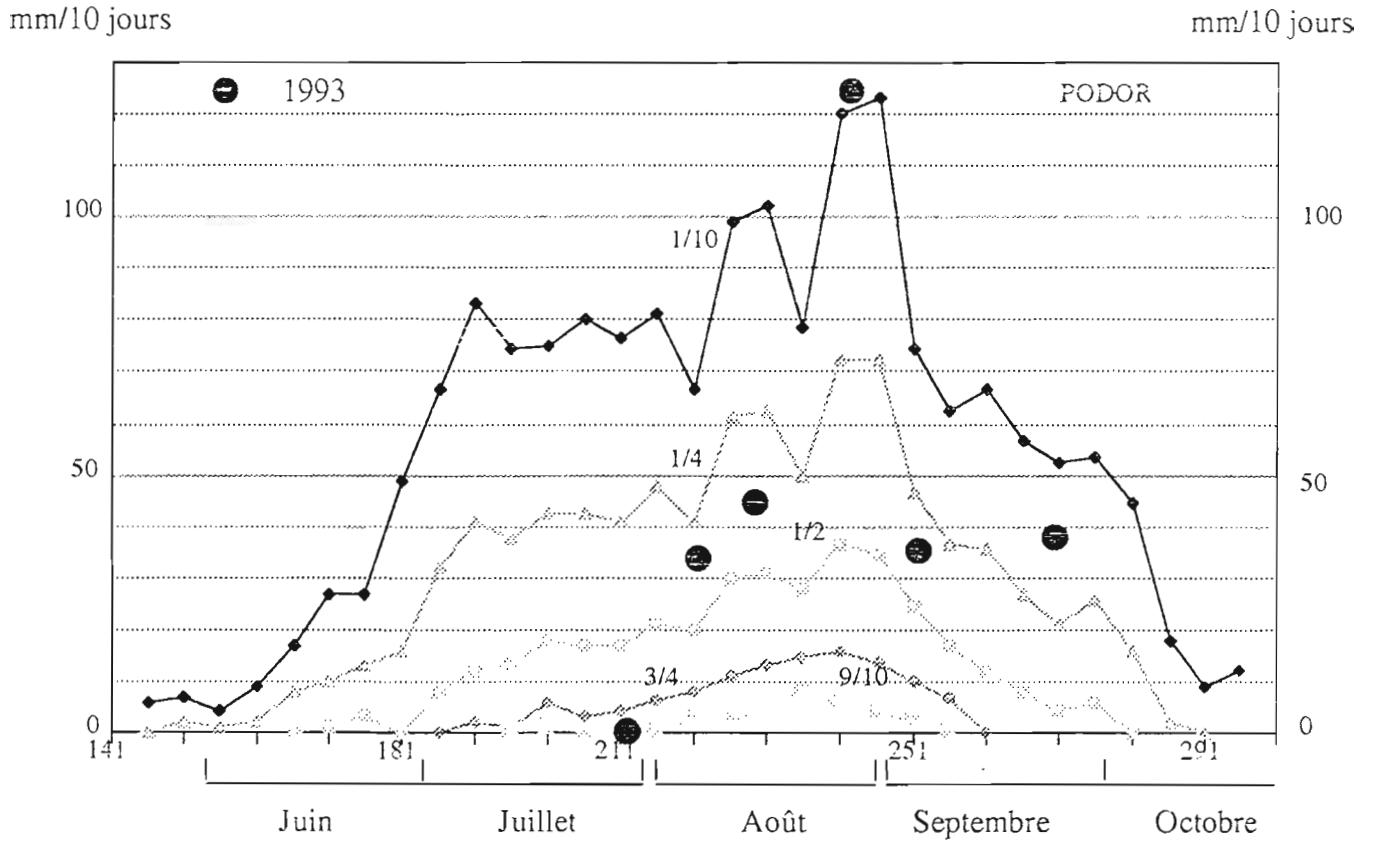


Diagramme d'analyse de la régularité des pluies
(Rijks, 1976)

Annexe 6: Bilan hydrique de la parcelle

Annexe 6.1: Calcul du volume de la première irrigation (13 et 14/08)

Le volume de la première irrigation a été recalculé en établissant un bilan au 19/08 des utilisations faites de l'eau apportée.

Bilan au 19/08

1 608 m³ stockés (cf annexe 6.2)

Pertes du 13 au 19/08: 8 mm/jour * 7 jours * 1,13 ha = 633 m³

Pluies : 26,6 mm * 1,13 ha = 300 m³

Lame d'eau:

R = 20 -> on lit pour 37 sur l'abaque -> 1 160,72 m³

V = 27,2 -> 37,2 -> 1 177,64 m³

Total: 2 388 m³

TOTAL = Volume de l'irrigation = 4 279 m³

Tableau de calcul du volume d'eau nécessaire à la saturation du sol

Horizon en cm	V Total de sol en m ³	Densité en g/cm ³	M Totale de sol en t	Humidité pondérale		V1 en m ³	V2 en m ³	V1 - V2 en m ³	V phase solide en m ³	V des vides en m ³	Taux de saturation en %
				A saturation en %	En sec en %						
0 - 5	565	1,20	678	47,0 45,0	4,3	319 305	29	290 280	256	309	103 98
5 - 20	1695	1,40 1,45	2373 2458	26,8	15,1	636 659	358 371	288 288	895 927	800 767	79 86
20 - 40	2260	1,60	3616	23,3	17,2	842	622	220	1364	896	94
40 - 60	2260	1,65	3729	21,5	17,2	802	641	161	1407	853	94
60 - 80	2260	1,65	3729	21,3	17,2	794	641	153	1407	853	93
80 - 100	2260	1,65	3729	21,5	17,9	802	667	135	1407	853	94
100 - 120	2260	1,65	3729	21,2	18,0	790	671	119	1407	853	93
120 - 150	3390	1,65	5593	21,5	17,0	1203	951	252	2111	1279	94
150 - 180	3390	1,65	5593	21,9	17,8	1225	996	229 0	2111	1279	96

$$V1 - V2 \text{ Total} = 1837 \text{ m}^3$$

$$\mathbf{1608 \text{ m}^3}$$

V1 = Volume d'eau stocké à saturation

V2 = Volume d'eau stocké initialement

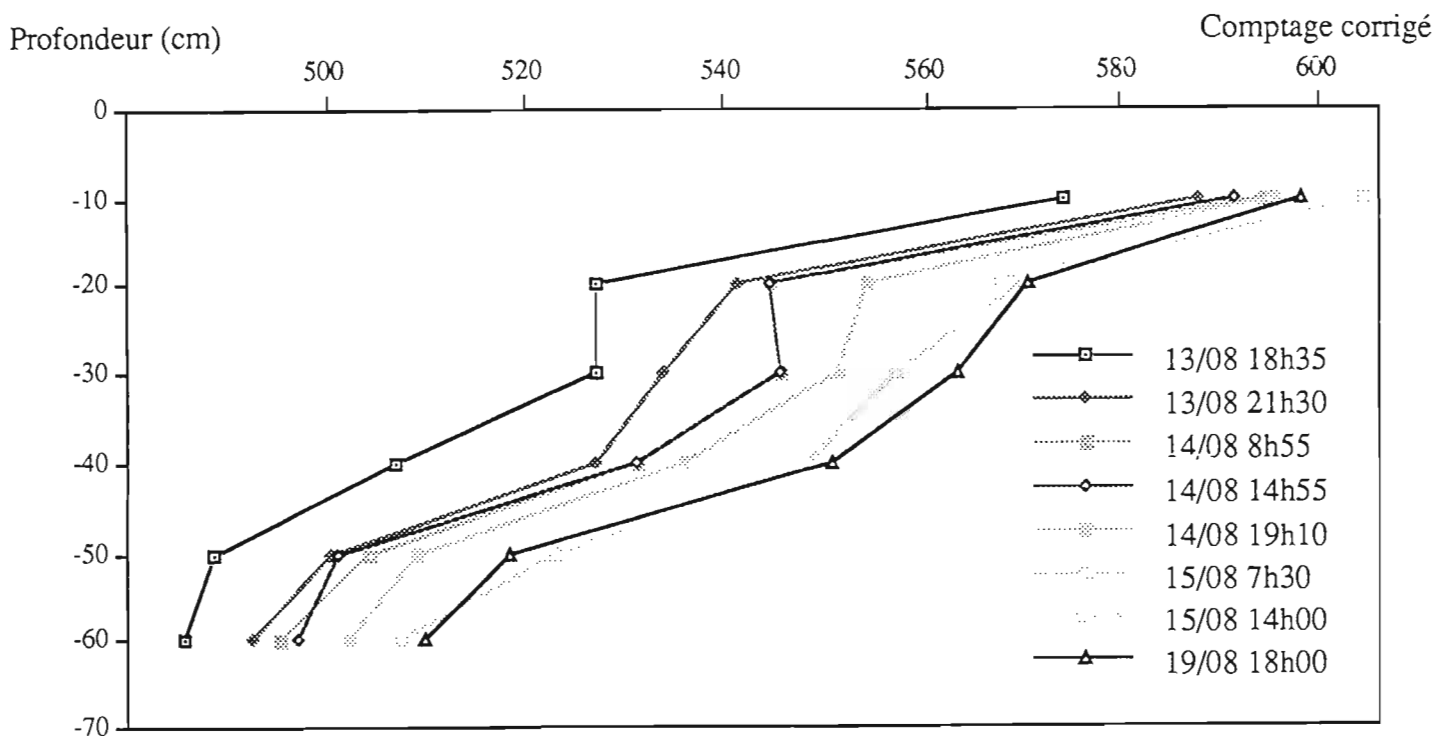
V1 - V2 = Volume recherché = Volume d'eau nécessaire à la saturation du sol

V phase solide = M Totale sol / Densité des particules (2,65 g/cm³)

Les corrections apportées sont en caractères gras.

Annexe 6.2: Calcul du volume nécessaire à la saturation du sol

Nous avons réalisé ce calcul à l'aide des humidités pondérales mesurées lorsque le sol était sec, puis à saturation. Cette saturation a été estimée grâce au suivi des profils d'humidité. Les prélèvements à saturation ont été réalisés le 19 août.



Dynamique de saturation suite à la mise en eau

Le tableau présenté ci-contre donne le détail des calculs auxquels nous avons jugé utile d'apporter quelques corrections:

- Horizon 0 - 5 cm: Nous remarquons que le volume stocké à saturation ($V_1 = 319 \text{ m}^3$) est supérieur au volume des vides ($V_{\text{des vides}} = 309 \text{ m}^3$).

Les prélèvements de terre, au moment de la saturation, sont réalisés à l'aide d'une buse en PVC (Polyvinyl Chlorure) de 50 cm de hauteur, enfoncée d'environ 35 cm dans la rizière. Nous vidons l'eau contenue dans cette buse avant de prélever. Cependant, des restes d'eau ont pu venir fausser le calcul réalisé pour l'horizon de surface et expliquer l'erreur trouvée.

Nous avons donc recalculé le volume stocké à saturation à l'aide d'un taux d'humidité pondérale à saturation plus faible (45%).

• Horizon 5 - 20 cm: Nous remarquons que la valeur du taux de saturation de cet horizon (79%) est faible en regard de celle des horizons inférieurs.

Nous avons mis en doute la valeur de la densité apparente ($d = 1,40\text{g/cm}^3$), puisqu'il s'agit d'une mesure de sonde dans un horizon peu profond, donc, comme nous l'avons vu (cf 2.3.1.1), à prendre avec précaution.

Nous avons réeffectué les calculs avec une valeur de densité un peu plus élevée ($d = 1,45\text{g/cm}^3$), cela permet de corriger en partie le taux de saturation (86%).

• Horizon 150 - 180 cm: Nous estimons, par comparaison avec les horizons inférieurs, que la valeur du volume "V1 - V2" est trop élevée (229 m^3), et choisissons de faire abstraction de cette valeur pour le calcul du volume total d'eau nécessaire à la saturation du sol.

-> En prenant en compte toutes ces corrections, nous trouvons un volume d'eau nécessaire à la saturation du sol:

$$V1 - V2 \text{ Total} = 1\,608\text{ m}^3$$

Annexe 6.3: Bilan hydrique de la parcelle

6.3.1 - Période du 13/08 au 20/08

$$\text{Irrigation} + \text{Précipitations} = \text{Imbibition} + \text{Pertes} + \text{Vidange} + \text{Volume restant}$$

- Apports

Volume entré = 4 279 m³ (cf annexe 6.1)

Précipitations = 26,6 mm * 1,13 ha = 300 m³

$$\Rightarrow \text{Total des apports} = 4\,579 \text{ m}^3 \quad (1)$$

- Pertes

Stockage dans le sol = 1 608 m³ (cf annexe 6.2)

Pertes totales = 8 mm/jour * 8 jours * 1,13 ha = 723 m³

Vidange = 2 007 m³ (cf annexe 3.3.1)

Restes d'eau après la vidange = 192 m³ (cf annexe 3.3.1)

$$\Rightarrow \text{Total des pertes} = 4\,530 \text{ m}^3 \quad (2)$$

- Différence: (1) - (2) = 49 m³ soit une erreur négligeable de 1%

6.3.2 - Période du 07/09 au 21/09

$$\text{Lame d'eau du 21/09} = (\text{Apports} - \text{Pertes}) \text{ du 07/09 au 21/09}$$

- -> Apports

Volume jaugé du remplissage du 07/09 = 2 372 m³

Volume jaugé de l'ajout du 12/09 = 767 m³

Volume jaugé de l'ajout du 17/09 = 291 m³

Précipitations = 0,6 mm * 1,13 ha = 7 m³

$$\Rightarrow \text{Total des apports} = 3\,437 \text{ m}^3 \quad (A)$$

- -> Pertes

Pertes totales = 15 mm/jour * 15 jours * 1,13 ha = 2 542 m³ (B)

- -> Différence: (A) - (B) = 895 m³ (1)

- Lamme d'eau du 21/09

R = 8,5 cm -> on lit pour 25.5 sur l'abaque -> 498 m³

V = 15,1 cm -> 25,1 -> 507 m³

Total = 1 005 m³ (2)

- Différence: (2) - (1) = 110 m³ soit 12% d'erreur

Hypothèse: les zéros absolus permettant la lecture sur les abaques ont été surestimés.

On refait donc le calcul avec leur valeur diminuée de "1", marge d'erreur que l'on s'est accordée.

-> Le volume de la lame d'eau du 21/09 devient:

$$\begin{array}{l} R = 8,5 \text{ cm} \quad \rightarrow \text{on lit pour } 24,5 \text{ sur l'abaque} \quad \rightarrow \quad 438 \text{ m}^3 \\ V = 15,1 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \quad \quad 24,1 \quad \quad \quad \rightarrow \quad 452 \text{ m}^3 \\ \text{Total} = 890 \text{ m}^3 \quad (2) \text{ corrigé} \end{array}$$

-> La différence devient: (2) corrigé - (1) = 4 m^3 soit $0,4\%$ d'erreur

Annexe 7: Bilan salin de la parcelle

Annexe 7.1: Le bilan (entre le 13/08 et le 20/08)

- Sel apporté

Remplissage du 13 et 14/08: 4 279 m³

Conductivité moyenne: 60 μS/cm

d'après l'étalonnage (cf annexe 2.1):

$$\text{Salinité} = - 5,2835 + 0,49473 * \text{Conductivité } (\mu\text{S/cm})$$

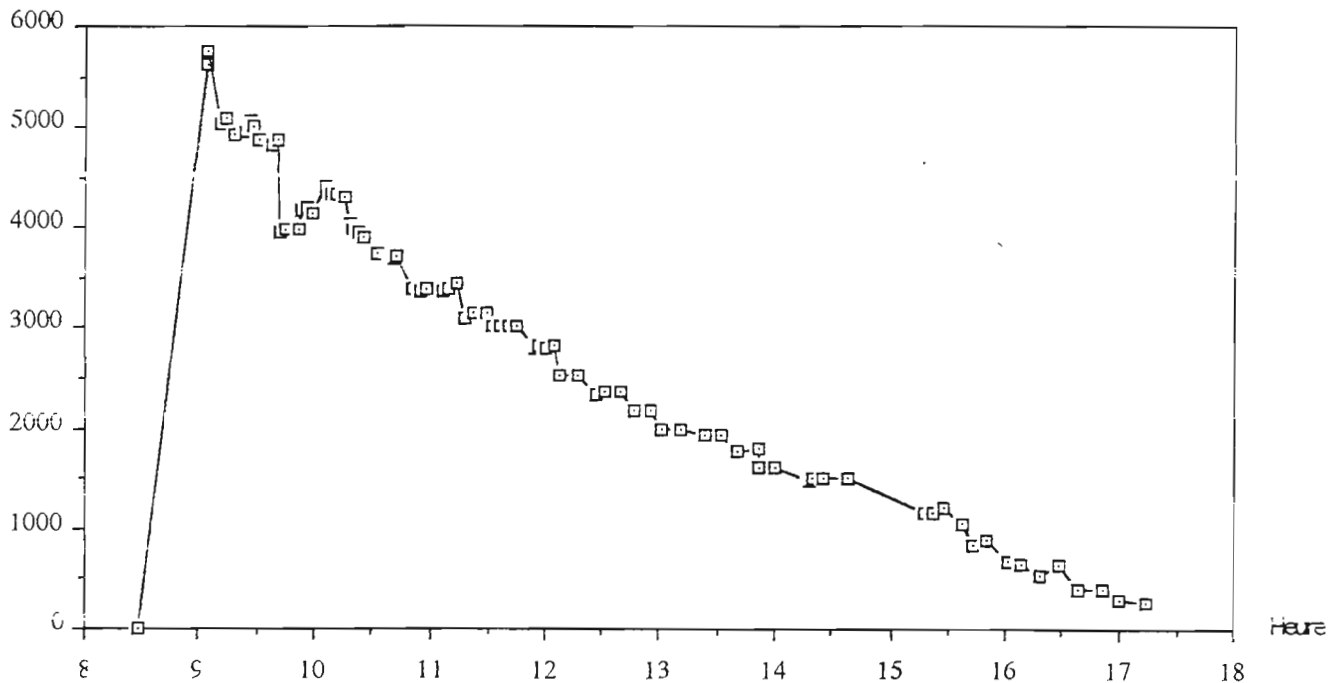
d'où une salinité de 24,4 mg/l

$$\Rightarrow 104 \text{ kg de sel apportés} \quad (1)$$

- Sel exporté
-> Lors de la vidange

D'après l'hydrogramme de vidange de la parcelle et les mesures de conductivité, on établit la courbe des débits de sel en fonction du temps. On intègre la surface comprise entre cette courbe et l'axe des temps: pour 1 395 m³ vidangés, on trouve 90 kg de sel exportés.

Débit sel
(mg/s)



Courbe des débits de sel en fonction du temps
lors de la vidange de la parcelle (20/08/93)

On ramène ce résultat à 2 007 m³, puisque le volume vidangé est sous-estimé (cf annexe 3.3.1), cela donne 129 kg exportés.

On ajoute à cela les 192 m³ restants dans la parcelle après la vidange (cf annexe 3.3.1), dont on fait l'hypothèse qu'ils seront évacués à la conductivité finale mesurée, soit 160 µS/cm et donc une salinité de 71,4 mg/l. Le résultat est de 14 kg de sel supplémentaires.

$$\Rightarrow \text{Total} = 143 \text{ kg de sel exportés lors de la vidange (2)}$$

-> Par les pertes

Les pertes totales sont de 8 mm/jour. On doit leur soustraire les pertes par évaporation qui n'exportent pas de sels, on fait donc l'hypothèse que les pertes directes sont de 6 mm/jour pendant 8 jours.

La conductivité moyenne est estimée égale à celle enregistrée en début de vidange, soit 133 µS/cm et donc une salinité de 60,5 mg/l.

$$\Rightarrow \text{Total} = 33 \text{ kg de sel exportés par les pertes (3)}$$

• Bilan

$$\text{Bilan} = (1) - (2) - (3) = - 72 \text{ kg de sel}$$

On estime qu'un cycle rizicole compte 2 vidanges et 120 jours de pertes à raison de 7 mm/jour, et on en déduit la quantité de sel exportée pour un cycle rizicole et pour 1ha:

$$2 \text{ vidanges: } (2 * 143 \text{ kg}) / 1.13 \text{ ha} = 253 \text{ kg de sel exportés (4)}$$

Pertes:

$$\text{Volume: } 120 \text{ jours} * 7 \text{ mm/jour} * 1 \text{ ha} = 8\,400 \text{ m}^3$$

$$\text{Salinité: } 60.5 \text{ mg/l}$$

$$\Rightarrow 508 \text{ kg de sel exportés (5)}$$

$$\Rightarrow (4) + (5) = 761 \text{ kg /ha exportés au cours d'un cycle rizicole}$$

Annexe 7.2: Suivi de l'évolution du facteur de concentration de la salinité des eaux parcellaires à l'aide d'une simulation

	Vol Initial m3	Vol Pertes m3	Perte Na kg	Sel restant kg	Vol Evaporé m3	Vol restant m3	Ec eau µS/cm	Fact. de concentration
	2300	0,00	0,00	56,12	0,00	2300,00	60,00	1,00
		79,10	1,93	54,19	90,40	2130,50	62,09	1,04
Na Total	158,20	2,01	52,18	180,80	1961,00	64,46	1,09	
kg	237,30	2,10	50,07	271,20	1791,50	67,18	1,15	
56,12	316,40	2,21	47,86	361,60	1622,00	70,32	1,21	
		395,50	2,33	45,53	452,00	1452,50	74,04	1,28
		474,60	2,48	43,05	542,40	1283,00	78,50	1,38
		553,70	2,65	40,39	632,80	1113,50	84,01	1,49
Ajout eau: m3	Vol Initial m3	Vol Pertes m3	Perte Na kg	Sel restant kg	Vol Evaporé m3	Vol restant m3	Ec eau µS/cm	Fact. de concentration
1200	2300	0,00	0,00	69,67	0,00	2300,00	71,91	1,24
		79,10	2,40	67,27	90,40	2130,50	74,51	1,29
Na Total	158,20	2,50	64,78	180,80	1961,00	77,45	1,35	
kg	237,30	2,61	62,16	271,20	1791,50	80,82	1,42	
69,67	316,40	2,74	59,42	361,60	1622,00	84,73	1,50	
		395,50	2,90	56,52	452,00	1452,50	89,33	1,59
		474,60	3,08	53,44	542,40	1283,00	94,88	1,71
		553,70	3,29	50,15	632,80	1113,50	101,71	1,85
Ajout eau m3	Vol Initial m3	Vol Pertes m3	Perte Na kg	Sel restant kg	Vol Evaporé m3	Vol restant m3	Ec eau µS/cm	Fact. de concentration
1200	2300	0,00	0,00	79,43	0,00	2300,00	80,48	1,42
		79,10	2,73	76,70	90,40	2130,50	83,45	1,48
Na Total	158,20	2,85	73,85	180,80	1961,00	86,80	1,54	
kg	237,30	2,98	70,87	271,20	1791,50	90,64	1,62	
79,43	316,40	3,13	67,74	361,60	1622,00	95,10	1,71	
		395,50	3,30	64,44	452,00	1452,50	100,35	1,82
		474,60	3,51	60,93	542,40	1283,00	106,67	1,95
		553,70	3,76	57,17	632,80	1113,50	114,46	2,10
Ajout eau m3	Vol Initial m3	Vol Pertes m3	Perte Na kg	Sel restant kg	Vol Evaporé m3	Vol restant m3	Ec eau µS/cm	Fact. de concentration
1200	2300	0,00	0,00	86,45	0,00	2300,00	86,66	1,54
		79,10	2,97	83,48	90,40	2130,50	89,88	1,61
Na Total	158,20	3,10	80,38	180,80	1961,00	93,53	1,68	
kg	237,30	3,24	77,14	271,20	1791,50	97,71	1,76	
86,45	316,40	3,41	73,73	361,60	1622,00	102,56	1,86	
		395,50	3,60	70,14	452,00	1452,50	108,28	1,98
		474,60	3,82	66,32	542,40	1283,00	115,16	2,12
		553,70	4,09	62,23	632,80	1113,50	123,64	2,29

Suivi de l'évolution du facteur de concentration de la salinité des eaux parcelaires
à l'aide d'une simulation (suite)

Ajout eau m3	Vol Initial m3	Vol Pertes m3	Perte Na kg	Sel restant kg	Vol Evaporé m3	Vol restant m3	Ec eau µS/cm	Fact. de concentration
1200	2300	0,00	0,00	91,51	0,00	2300,00	91,10	1,63
		79,10	3,15	88,36	90,40	2130,50	94,51	1,70
	Na Total kg	158,20	3,28	85,08	180,80	1961,00	98,38	1,78
		237,30	3,43	81,65	271,20	1791,50	102,80	1,87
	91,51	316,40	3,61	78,04	361,60	1622,00	107,94	1,97
		395,50	3,81	74,24	452,00	1452,50	113,99	2,09
		474,60	4,04	70,19	542,40	1283,00	121,27	2,24
		553,70	4,33	65,87	632,80	1113,50	130,25	2,42
Ajout eau m3	Vol Initial m3	Vol Pertes m3	Perte Na kg	Sel restant kg	Vol Evaporé m3	Vol restant m3	Ec eau µS/cm	Fact. de concentration
1200	2300	0,00	0,00	95,15	0,00	2300,00	94,30	1,70
		79,10	3,27	91,87	90,40	2130,50	97,85	1,77
	Na Total kg	158,20	3,41	88,46	180,80	1961,00	101,86	1,85
		237,30	3,57	84,90	271,20	1791,50	106,46	1,94
	95,15	316,40	3,75	81,15	361,60	1622,00	111,80	2,05
		395,50	3,96	77,19	452,00	1452,50	118,10	2,18
		474,60	4,20	72,99	542,40	1283,00	125,67	2,33
		553,70	4,50	68,49	632,80	1113,50	135,00	2,52
Ajout eau m3	Vol Initial m3	Vol Pertes m3	Perte Na kg	Sel restant kg	Vol Evaporé m3	Vol restant m3	Ec eau µS/cm	Fact. de concentration
1200	2300	0,00	0,00	97,77	0,00	2300,00	96,60	1,74
		79,10	3,36	94,40	90,40	2130,50	100,24	1,82
	Na Total kg	158,20	3,50	90,90	180,80	1961,00	104,37	1,90
		237,30	3,67	87,23	271,20	1791,50	109,10	2,00
	97,77	316,40	3,85	83,38	361,60	1622,00	114,59	2,11
		395,50	4,07	79,31	452,00	1452,50	121,05	2,24
		474,60	4,32	75,00	542,40	1283,00	128,83	2,40
		553,70	4,62	70,37	632,80	1113,50	138,42	2,59
Ajout eau m3	Vol Initial m3	Vol Pertes m3	Perte Na kg	Sel restant kg	Vol Evaporé m3	Vol restant m3	Ec eau µS/cm	Fact. de concentration
1200	2300	0,00	0,00	99,65	0,00	2300,00	98,26	1,78
		79,10	3,43	96,22	90,40	2130,50	101,97	1,85
	Na Total kg	158,20	3,57	92,65	180,80	1961,00	106,18	1,94
		237,30	3,74	88,91	271,20	1791,50	111,00	2,03
	99,65	316,40	3,93	84,99	361,60	1622,00	116,59	2,15
		395,50	4,14	80,84	452,00	1452,50	123,18	2,28
		474,60	4,40	76,44	542,40	1283,00	131,11	2,44
		553,70	4,71	71,73	632,80	1113,50	140,89	2,64

Suivi de l'évolution du facteur de concentration de la salinité des eaux parcelaires
à l'aide d'une simulation (suite et fin)

Ajout eau m3	Vol Initial m3	Vol Pertes m3	Perte Na kg	Sel restant kg	Vol Evaporé m3	Vol restant m3	Ec eau µS/cm	Fact. de concentration
1200	2300	0,00	0,00	101,01	0,00	2300,00	99,45	1,80
		79,10	3,47	97,53	90,40	2130,50	103,22	1,88
	Na Total	158,20	3,62	93,91	180,80	1961,00	107,48	1,96
	kg	237,30	3,79	90,13	271,20	1791,50	112,37	2,06
	101,01	316,40	3,98	86,15	361,60	1622,00	118,03	2,18
		395,50	4,20	81,95	452,00	1452,50	124,71	2,31
		474,60	4,46	77,46	542,40	1283,00	132,75	2,48
		553,70	4,78	72,71	632,80	1113,50	142,66	2,68
Ajout eau m3	Vol Initial m3	Vol Pertes m3	Perte Na kg	Sel restant kg	Vol Evaporé m3	Vol restant m3	Ec eau µS/cm	Fact. de concentration
1200	2300	0,00	0,00	101,99	0,00	2300,00	100,31	1,82
		79,10	3,51	98,48	90,40	2130,50	104,11	1,89
	Na Total	158,20	3,66	94,82	180,80	1961,00	108,42	1,98
	kg	237,30	3,82	91,00	271,20	1791,50	113,35	2,08
	101,99	316,40	4,02	86,98	361,60	1622,00	119,07	2,20
		395,50	4,24	82,74	452,00	1452,50	125,82	2,33
		474,60	4,51	78,23	542,40	1283,00	133,93	2,50
		553,70	4,82	73,41	632,80	1113,50	143,94	2,70
Ajout eau m3	Vol Initial m3	Vol Pertes m3	Perte Na kg	Sel restant kg	Vol Evaporé m3	Vol restant m3	Ec eau µS/cm	Fact. de concentration
1200	2300	0,00	0,00	102,69	0,00	2300,00	100,93	1,83
		79,10	3,53	99,16	90,40	2130,50	104,75	1,91
	Na Total	158,20	3,68	95,48	180,80	1961,00	109,09	2,00
	kg	237,30	3,85	91,62	271,20	1791,50	114,06	2,10
	102,69	316,40	4,05	87,58	361,60	1622,00	119,82	2,21
		395,50	4,27	83,31	452,00	1452,50	126,61	2,35
		474,60	4,54	78,77	542,40	1283,00	134,78	2,52
		553,70	4,86	73,91	632,80	1113,50	144,86	2,72

Pertes: 7 mm/jour

Evapotranspiration: 8 mm/jour

Relation conductivité-salinité:

$$\text{Salinité (mg/l)} = 0,49473 * \text{Conductivité (µS/cm)} - 5,2835$$

Conductivité initiale: 60 µS/cm

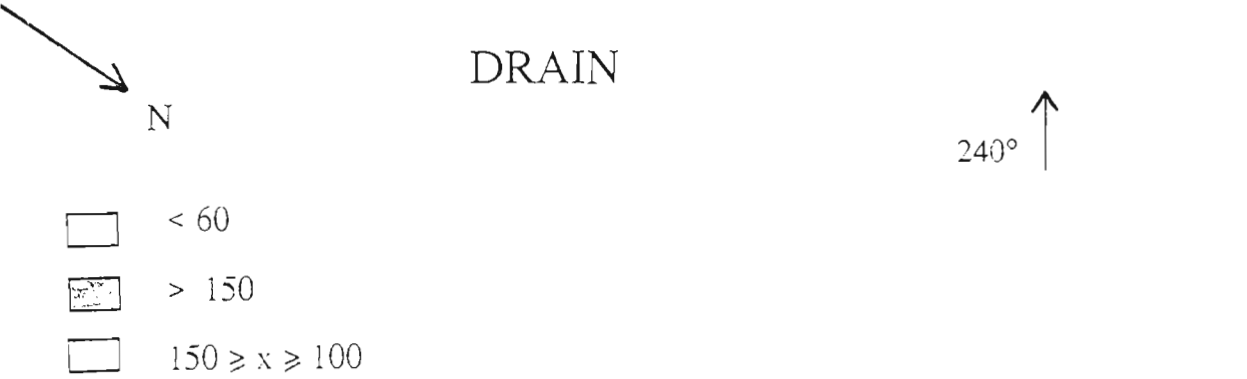
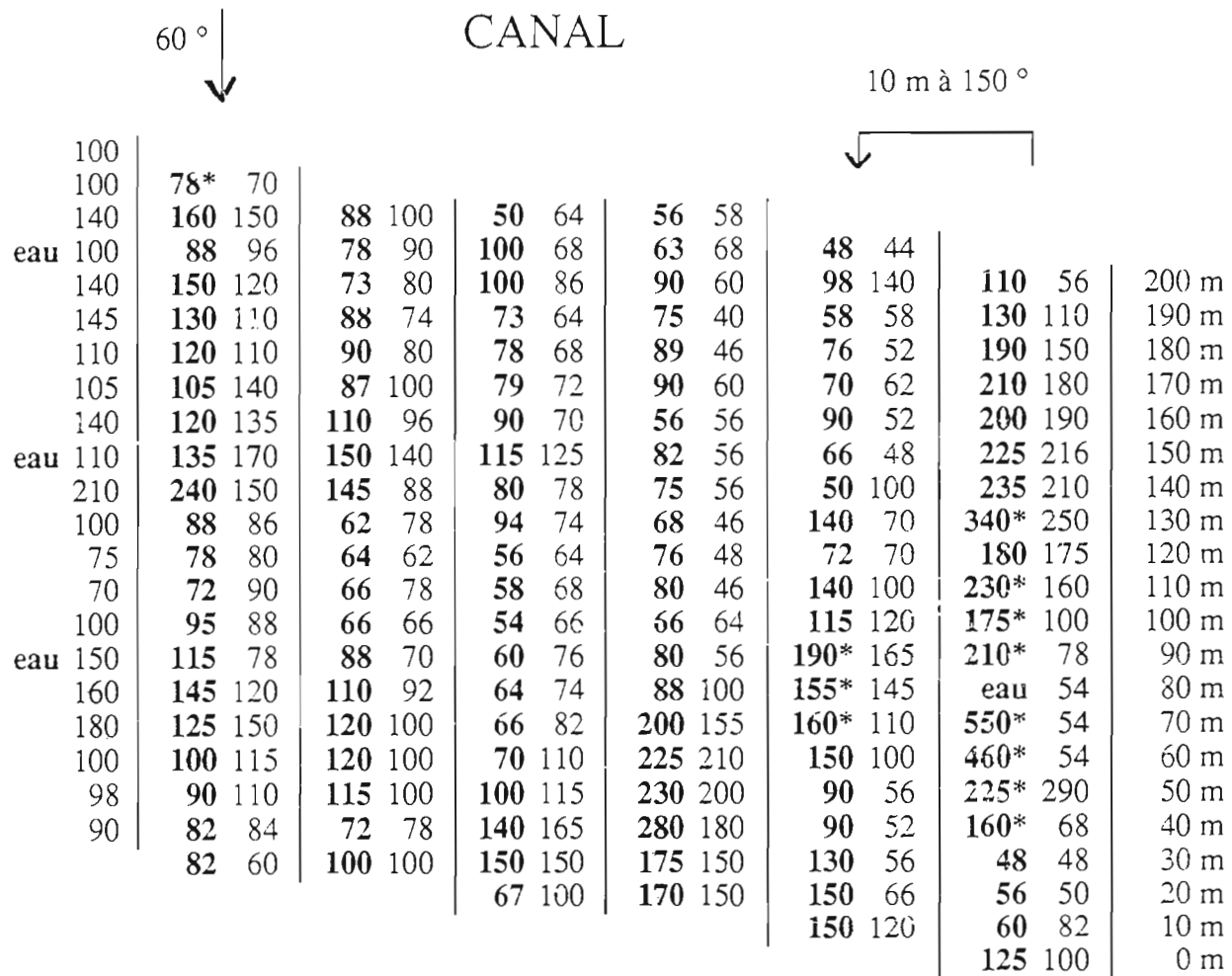
Salinité initiale: 24,4 mg/l

Facteur de concentration = Salinité n / Salinité initiale

Annexe 7.3: Carte de conductivité de la parcelle (en mS/m)

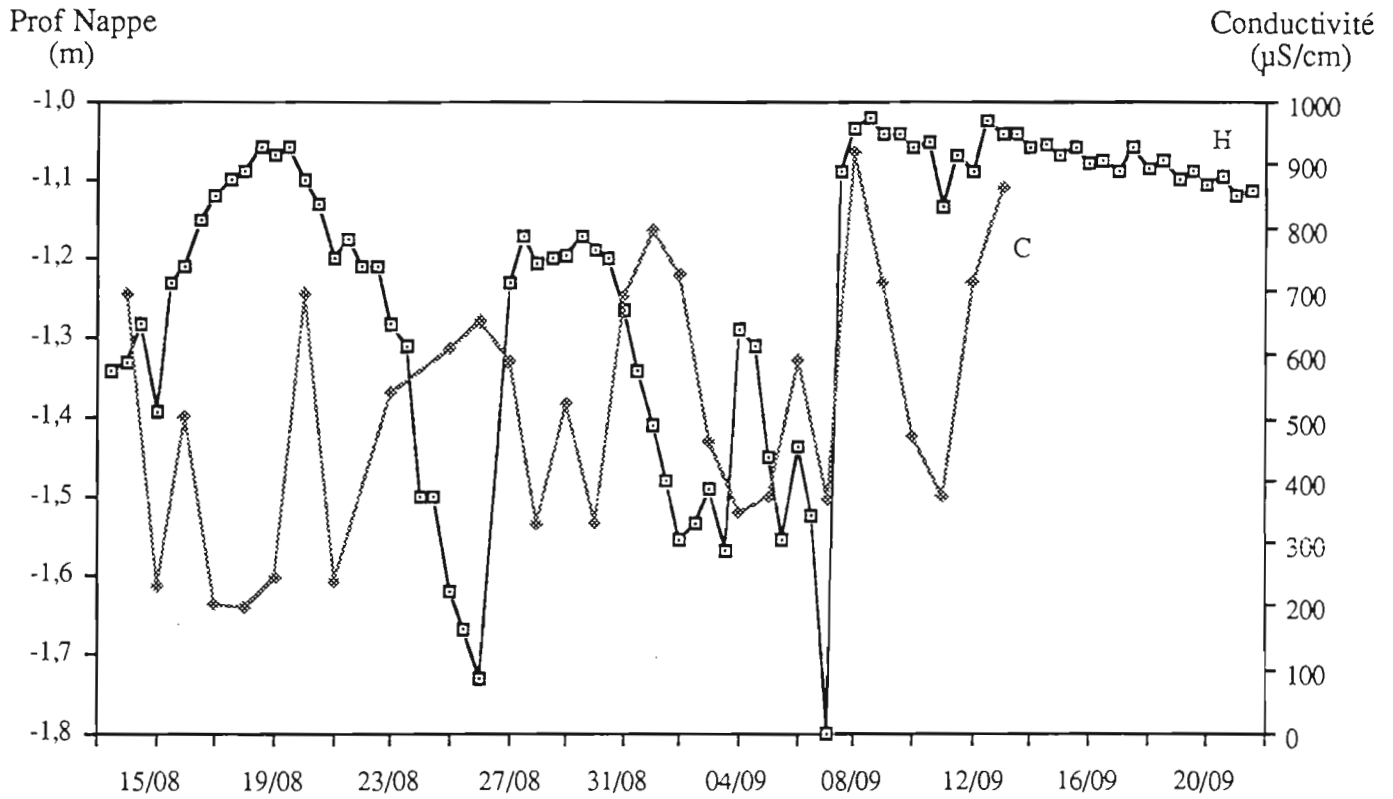
Conductivité le 06/08/93 (avant la 1ère mise en eau)

Conductivité le 26/08/93 (après la vidange)



Le signe * indique la présence d'eau aux alentours de la mesure.

Annexe 7.4: Variations de la hauteur piézométrique et de la conductivité de la nappe
Cas du piézomètre "digue"



Variations de la hauteur piézométrique (H) et de la conductivité (C) de la nappe après la 1ère mise en eau _ Cas du piézomètre "digue"

ATELIER ISRA-ORSTOM

NIANGA,
laboratoire de la culture irriguée
dans la Moyenne Vallée du Sénégal.

Les 19, 20 et 21 Octobre 1993
à l'ISRA de Saint Louis

PROGRAMME

Mardi 19 octobre

9h / OUVERTURE / Mohamed El Habib LY, Philippe MATHIEU

9h30 10h - pause

De 10h30 à 13 h / LA CULTURE IRRIGUEE A PODOR : ETAT DES LIEUX

Animation : Jean-Pierre NDIAYE

- 1) La base de données du CSE de la SAED
Mamadou FAYE, Moussa Bokar FOFANA
- 2) Le périmètre de Nianga
Amadou SARR
- 3) Histoires de périmètres
André LERICOLLAIS

De 14h30 à 18h30 / MILIEUX ET AMENAGEMENTS

Animation : Papa Léopold SARR

- 1) Les caractéristiques agricoles des sols lourds de cuvette
Pascal BOIVIN, Didier BRUNET, Jean-Pierre NDIAYE
- 2) Le fonctionnement hydro-salin de la cuvette de Nianga
Luc SEGUIS, Pascal BOIVIN,
- 3) Inventaire des états de surface
Landing MANE, Pascal BOIVIN

16h30 17h - pause

- 4) La gestion de l'eau dans les périmètres intermédiaires
Tanou BA
- 5) L'introduction de l'arbre dans les périmètres
Abdoukhamane TAMBA
- 6) Le projet Galanka
Abdou DIA, Pascal BOIVIN, Luc SEGUIS

Mercredi 20 octobre**8h30 13 h / PRATIQUES DE LA CULTURE IRRIGUEE**

Animation : Jean-Yves JAMIN

- 1) Utilisation d'un modèle de développement du riz en aide à la décision
Michael DINGKUHN, Pierre-Yves LE GAL, Jean-Christophe POUSSIN
- 2) Fertilisation des cultures irriguées
Jean-Pierre NDIAYE.
- 3) La diversification des cultures
Claude DANCETTE, Jean Pierre GAY
- 4) Itinéraires techniques des paysans
Jean Christophe POUSSIN

Plan de l'atelier ISRA-ORSTOM (suite)

10h 10h30 - pause

- 4) Les cultures maraîchères; contraintes et pratiques
Jacques PAGES
- 5) La lutte contre l'enherbement
Moustapha DIAGNE
- 6) La contribution de l'entomologie à la défense des cultures
Régis GOEBEL

De 14h30 à 18h30 / DYNAMIQUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

Animation : Philippe LAVIGNE-DELVILLE

- 1) La diversification des systèmes de culture à Diawara
Arame SOUMARE
- 2) Les groupements de producteurs de Donaye
Claire TARRIERE
- 3) Peul éleveurs et peul cultivateurs autour de Nianga
Christian SANTOIR

16h30 17h - pause

- 4) Migrations et accès à l'irrigation
Papa Demba DIOUF, Christophe GUILMOTO
- 5) Changements nutritionnels et risques sanitaires dus à la culture irriguée
Eric BENEFIGE, Pascal HANDSCHUMACHER, Kirsten SIMONDON

Jeudi 21 octobre

8h30 13h / L'ENVIRONNEMENT INSTITUTIONNEL

animation : Sidi Mohamed SECK

- 1) L'UJAK une Organisation Paysanne inter-villageoise
Najirou SALL
- 2) Stratégies de formation et de vulgarisation à la SAED
Seydou CAMARA
- 3) Organisations paysannes et désengagement de l'Etat
Ibrahima DIA

10h / 10 30 - pause

- 4) La mécanisation de l'agriculture irriguée dans la vallée
Samba KANTE
- 5) Etude comparative des filières
Mamadou SIDIBE
- 6) Le financement de l'agriculture irriguée dans le Département de Podor
Jean Brice WACKERMANN

De 14h30 à 17 h / PERSPECTIVE DU DEVELOPPEMENT INTEGRE

NOTES DE SYNTHESE

Aménagement et gestion de l'espace agricole: thème 1

Papa Léopold SARR

Maîtrise et choix techniques: thème 2

Jean-Yves JAMIN

Des économies familiales recentrées sur la culture irriguée : thème 3

Philippe LAVIGNE-DELVILLE

Perspectives pour l'aménagement intégré de la moyenne vallée : thème 4

Sidi Mohamed SECK

17h à 18h / CONCLUSION

Perspectives pour la recherche

Pape Abdoulaye SECK et Pierre MILLEVILLE

INTERVENANTS

ADRAO

Michael DINGKUHN, physiologiste

CIRAD

Jean-Yves JAMIN, agronome
Pierre-Yves LE GAL, agronome

DEVELOPPEMENT

Seydou CAMARA, sociologue SAED
Abdou DIA, Ingénieur délégué SAED
Mamadou FAYE, CSE SAED Saint Louis
Moussa Bokar FOFANA, Ingénieur SAED
Najirou SALL, leader paysan UJAK
Amadou SARR, agronome SAED
Papa Léopold SARR, Directeur de la RD du PNVA

DIRECTION DE LA STATISTIQUE ET DE LA PREVISION

Papa Demba DIOUF, démographe

GRET

Philippe LAVIGNE-DELVILLE, agro-économiste

INDEPENDANT / APEC

Sidi Mohamed SECK, géographe

ISRA

Tanou BA Hydraulicien
Claude DANCETTE, agronome CIRAD en poste à l'ISRA
Ibrahima DIA, sociologue
Moustapha DIAGNE, malherbologue
Jean Pierre GAY, agronome CIRAD en poste à l'ISRA
Régis GOEBEL, entomologiste CIRAD en poste à l'ISRA
Samba KANTE, machiniste
Mohamed El Habib LY, Directeur Général de l'ISRA
Jean-Pierre NDIAYE, pédologue, Direction de recherches sur les cultures irriguées
Pape Abdoulaye SECK, Directeur Scientifique de l'ISRA
Jacques PAGÈS, agronome CIRAD en poste à l'ISRA
Mamadou SIDIBE, économiste
Abdoukhamane TAMBA, agro-forestier

ORSTOM

Eric BENEFIGE, médecin-nutritionniste
Pascal BOIVIN, pédologue
Didier BRUNET, pédologue
Christophe GUILMOTO, démographe
Pascal HANDSCHUMACHER, géographe
André LERICOLLAIS, géographe
Landing MANE, géographe
Philippe MATHIEU, Représentant de l'ORSTOM au Sénégal
Pierre MILLEVILLE, agronome
Jean Christophe POUSSIN, agronome
Christian SANTOIR, géographe
Luc SEGUIS, Hydrologue
Kirsten SIMONDON, médecin-nutritionniste
Arame SOUMARE, géographe
Claire TARRIERE, sociologue
Jean Brice WACKERMANN, économiste

Annexe 9: Analyse granulométrique

Les prélèvements pour cette analyse ont été réalisés à deux endroits distincts de la parcelle, du fait d'une différence de couleur des horizons:

au niveau du piézomètre "digue": horizons ocres

au niveau du lysimètre "drain": horizons plutôt bleu - gris

Référence Echantillon	Profond. cm	Argile %	Limon fin %	Limon gros. %	Sable fin %	Sable gros. %	Total %
P Digue	0 - 15	27,0	11,4	21,5	42,6	0,3	102,8
	20	32,9	12,3	19,6	38,2	0,6	103,6
	40	37,5	10,7	24,3	32,4	0,1	105,0
	60	32,7	12,0	28,3	31,1	0,4	104,5
	80	27,6	10,3	28,4	36,5	0,6	103,4
	100	16,6	4,6	15,2	65,5	0,1	102,0
	120	9,7	2,6	14,0	74,0	0,2	100,5
	150	12,7	3,1	13,6	71,9	0,1	101,4
	180	22,5	9,5	26,7	42,3	1,5	102,5
Lysi Drain	0 - 15	32,5	11,9	19,8	37,3	0,6	102,1
	20	39,2	12,7	18,2	31,1	0,8	102,0
	40	47,8	14,5	17,0	23,8	0,5	103,6

Source: Laboratoire de chimie de l'ORSTOM Dakar-Hann

La différence observée est confirmée par des taux d'argile plus élevés au niveau du lysimètre "drain".

La couleur des horizons s'expliquerait alors par une tendance à l'hydromorphie.

Au niveau du piézomètre "digue", la baisse de la teneur en argile vers 120 - 150 cm s'explique par la présence de la nappe, les horizons sont alors essentiellement constitués de sable fin.

Ces résultats, encore incomplets et parvenus très tard, n'ont pu être davantage analysés. Cependant, les différences de taux d'argile, au vu des résultats obtenus dans les lysimètres ou les anneaux, ne semblent pas être suffisamment importantes pour être à l'origine de différences significatives de comportement des sols.