

UNIVERSITE DE OUAGADOUGOU

**INSTITUT
DES SCIENCES DE LA NATURE**

**INSTITUT
DU DEVELOPPEMENT RURAL**

**CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNOLOGIQUE
(C.N.R.S.T.)**

**INSTITUT D'ETUDES
ET DE RECHERCHES AGRICOLES
(I.N.E.R.A.)**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté en vue de l'obtention du
DIPLOME D'INGENIEUR DU DEVELOPPEMENT RURAL

OPTION : AGRONOMIE

Thème

**« CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MECANISMES
D'ALIMENTATION HYDRIQUE D'UNE CULTURE PLUVIALE
DE SORGHO EN FONCTION DE DIFFERENTES
TECHNIQUES CULTURALES »**

(Station Expérimentale de Saria-Burkina Faso)

S O M M A I R E

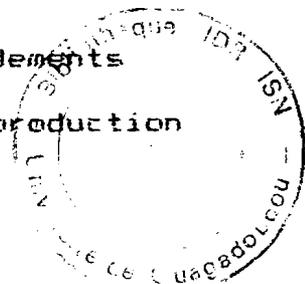
	PAGES
REMERCIEMENTS	
LISTE DES ABREVIATIONS	
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	4
I.1. LE BILAN HYDRIQUE	4
1.1. Les éléments du bilan hydrique	4
1.2. Conclusion	6
I.2. ACTIONS DES TECHNIQUES CULTURALES SUR LE BILAN HYDRIQUE	6
2.1. Actions des techniques culturales sur le régime hydrique du sol	6
2.1.1. Effets du travail du sol sur le stock d'eau	6
2.1.2. Effets du travail du sol sur l'économie de l'eau	7
2.1.3. Effets de la matière organique sur le stock d'eau	7
2.2. Actions des techniques culturales sur l'enracinement des cultures	7
2.2.1. Effets du travail du sol sur le système racinaire	7
2.2.2. Effets de la fertilisation sur le système racinaire	8
2.3. Conséquences agronomiques du travail du sol et de la fertilisation	9
I.3. METHODES D'EVALUATION DU BILAN HYDRIQUE D'UNE CULTURE	9
3.1. La méthode du bilan d'énergie	10
3.2. La simulation du bilan hydrique	11
3.3. La méthode neutronique et tensiométrique	12

3.3.1. Notions théoriques et équations de base	12
3.3.1.1. Equation de la conservation	12
3.3.1.2. La loi de Darcy généralisée	13
3.3.1.3. Expressions du bilan hydrique	14
3.3.2. Méthodes d'estimation des composantes du bilan	15
3.3.2.1. La méthode du "plan de flux nul"	15
3.3.2.1. La méthode du "flux de Darcy" pour l'estimation du drainage	15
3.3.2.2. Estimation du ruissellement : $RN(t)$	15
3.3.2.3. Estimation de la consommation en eau : $ETR(t)$	16
3.3.3. Utilisation des mesures neutroniques et tensiométriques simultanées pour l'estimation du bilan	16
3.3.3.1. Calcul des stocks et des variations de stock	16
3.3.3.2. Estimation du gradient de charge hydraulique : dH/dZ	17
3.3.3.3. Détermination de la relation conductivité hydraulique-teneur en eau : $K(\theta)$	18
3.4. Conclusion	18
CHAPITRE II. PRESENTATION DU MILIEU - MATERIELS ET METHODES D'ETUDE	19
II.1. PRESENTATION DU MILIEU	19
1.1. Localisation	19
1.2. Le climat	19
1.2.1. Les précipitations	19
1.2.2. Les températures	21
1.2.3. Les vents	21
1.2.4. Humidité relative et demande évaporative	21
1.3. La végétation	22
1.4. Les sols	22



II.2. MATERIELS ET METHODES D'ETUDE	24
2.1. Matériel végétal	24
2.2. Dispositif d'étude et traitements	24
2.2.1. Dispositif d'étude	24
2.2.2. Fertilisation et densité de semis	25
2.3. Calendrier cultural	25
2.4. Méthodes de mesures	26
2.4.1. Mesures de la teneur en eau	26
2.4.2. Mesures de la pression d'eau	27
2.4.2.1. Mesures de la charge hydraulique	27
2.4.2.2. Mesures du niveau de la nappe	29
2.4.3. Méthode de caractérisation hydrodynamique	29
2.4.4. Mesures et observations phénologiques	29
2.4.4.1. Etude de l'enracinement	29
2.4.4.2. Comptage de poquets levés	29
2.4.4.3. Mesures des hauteurs de plants	30
2.4.4.4. Observations sur les dates d'épiaison-floraison	30
2.4.4.5. Caractéristiques mesurées à la récolte	31
CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSIONS	32
III.1. RESULTATS DE LA CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE	32
1.1. Présentation des résultats	32
1.2. Détermination de la relation $K(\theta)$	34
1.3. Validité de l'utilisation de la relation $K(\theta)$	38
1.4. Conclusion	38

III.2. DYNAMIQUE DE L'EAU A LA PARCELLE	39
III.3. EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LES BILANS HYDRIQUES	46
3.1. Principe du calcul des composantes du bilan hydrique	46
3.1.1. Estimation du drainage	46
3.1.2. Détermination du ruissellement et de la consommation en eau	47
3.2. Résultats des bilans hydriques	47
III.4. EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LA CROISSANCE ET LE DEVELOPPEMENT DES PLANTES	50
4.1. Effets des traitements sur la levée	50
4.2. Effets des traitements sur la croissance en hauteur	50
4.3. Effets des traitements sur l'enracinement	52
4.4. Effets des traitements sur les dates d'épiaison-floraison	56
4.5. Conclusion	57
III.5. EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LA PRODUCTION	58
5.1. Caractéristiques des rendements	58
5.2. Consommations en eau et production de la culture	60
5.3. Conclusion	68
CONCLUSION GENERALE	69
BIBLIOGRAPHIE	71
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX	77
ANNEXES	



REMERCIEMENTS

Ce travail est le fruit d'une collaboration franche de la part de nombreuses personnes et de l'appui de plusieurs institutions. Chacun à son niveau a apporté "sa pierre indispensable à la construction de l'édifice".

Qu'il nous soit cependant permis d'adresser nos sincères remerciements à :

SOME B. Léopold et QUATTARA Badiori, chercheurs à l'INERA, qui ont su assumer avec abnégation la lourde responsabilité de notre encadrement.

ABOU F., chef de la Station de Saria, pour les facilités dont nous avons bénéficiées pendant le stage.

ZOMBRE P., enseignant à l'ISN-IDR, pour avoir fait siens nos problèmes et pour sa constante disponibilité à nous conseiller.

Mr. NICOU R., Délégué du CIRAD BURKINA FASO. Il nous a toujours accordé des facilités pour notre travail et nous a suivi depuis le terrain jusqu'à la rédaction du mémoire.

QUATTARA K. et KAMBIRE S.H. pour tout ce qu'ils ont enduré et apporté : labeur physique de terrain, discussions et suggestions constructives.

MM VAUCLIN M. et CHOPART J.L. qui, dans le cadre du projet R3S/PF2, ont apporté un précieux concours technique qui a permis de traiter les données du terrain.

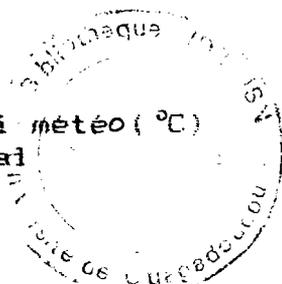
Tout le personnel des Stations de Saria et de Kamboinsé et particulièrement QUEDRAGO I., DAO O., ZONGO A., GUEL A., pour tout ce qu'ils ont fait pour nous.

Que tous les camarades stagiaires (NANEMA F., DABIRE R., NANEMA C.), les parents et amis trouvent ici notre reconnaissance pour le soutien moral durant ce stage.

Nous tenons enfin à signifier à SAWADOGO Elisabeth notre profonde gratitude pour la frappe et la présentation de ce document.

LISTE DES ABREVIATIONS

CIEH	Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques
CILSS	Comité Permanent Interétats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
D = Dr	Drainage (mm)
DE	Déficit hydrique (mm)
dH/dZ	Gradient de charge hydraulique
ETM	Evapotranspiration Maximale (mm)
ETP	Evapotranspiration Potentielle (mm)
ETR	Evapotranspiration Réelle (mm)
ETRA	Evapotranspiration Réelle Apparente (mm)
Ev bac	Evaporation du bac normalisé type classe A (mm)
FAO	Food and Agriculture Organisation of the United Nations
h	Pression effective de l'eau (cm d'eau)
H	Charge hydraulique (cm d'eau)
Hv	Humidité volumique
INERA	Institut d'Etudes et de Recherches Agricoles
IRAT	Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et de Cultures Vivrières
JAS	Jour Après Semis
K(O)	Conductivité hydraulique (mm/h)
Kc ; K'c	Coefficient cultural
θ	Teneur volumique en eau (cm ³ /cm ³)
P	Pluie (mm)
Po	Pression atmosphérique (mb)
q	Densité volumique de flux ou flux (mm/j)
Qe	Flux de chaleur latente vers l'atmosphère
Qh	Flux de chaleur sensible vers l'atmosphère
RN	Rayonnement net
R = RN (bis)	Ruiss = Ruissellement (mm)
AS	Variation de stock (mm)
SAT	Satisfaction des besoins en eau
Δt	Intervalle de temps
Ta	Température de l'air mesurée dans l'abri météo (°C)
Ts	Température de surface du couvert végétal
Z	Profondeur ou cote (cm)
Zr	Front racinaire (cm)



INTRODUCTION

Depuis plus de deux décennies, le Burkina Faso, comme les autres pays sahéliens, connaît une sécheresse dont l'évolution dans le temps échappe encore à toutes les prévisions. Néanmoins, on constate quand on analyse des séries chronologiques portant sur plusieurs années, une baisse importante de la pluviométrie en plus de sa très grande variabilité spatio-temporelle (ELDIN, 1984 ; BALDY, 1985, SIVAKUMAR et GNOUMOU, 1987), compromettant très souvent l'alimentation en eau des végétaux.

Les aléas climatiques ne constituent pas les seules entraves à l'agriculture burkinabè. D'autres facteurs viennent en effet aggraver leurs méfaits. Ce sont entre autres :

- la faible fertilité des sols qui se caractérise par de faibles réserves en eau utile (DANCETTE, 1984 ; SOME, 1989) et par une teneur en matière organique et en éléments nutritifs très limitée (PNUD/FAO 1980, cité par SIVAKUMAR et GNOUMOU 1987 ; SEDOGO, 1981),
- des pratiques culturales archaïques qui ont pour conséquence une exploitation abusive des sols sans grand souci de restaurer leurs potentialités initiales,
- la poussée démographique incontrôlable, l'analphabétisme et la pauvreté des masses paysannes.

Tous ces facteurs ont contribué de façon plus ou moins marquée à la baisse de la production agricole, cause principale de la famine qui peut survenir de nos jours.

Face à cette situation, une politique agricole efficace s'avère nécessaire si l'on veut augmenter les productions agricoles dans l'objectif au moins de l'autosuffisance alimentaire. Elle consisterait par exemple, à défaut d'éradiquer la sécheresse, à chercher à s'y adapter. L'agriculture burkinabè est essentiellement pluviale et c'est pourquoi l'eau constitue l'un des facteurs les plus limitants des productions végétales. Il faut alors mettre un accent particulier sur les recherches ayant pour but d'améliorer l'alimentation hydrique des cultures.

Plusieurs études ont été réalisées sur des techniques de culture tels que le travail du sol et la fertilisation organo-minérale qui ont montré des effets favorables sur l'alimentation en eau des cultures dans la zone soudano-sahélienne (CHARREAU et NICOU, 1971 ; PICHOT et al, 1981 ; SEDOGO op. cité ; NICOU et al, 1987 ; SOME op. cité). Il ressort aussi de ces travaux que les effets des pratiques culturales sont très variables selon les conditions pédoclimatiques (CHOPART et al, 1981)). Un aspect essentiel réside donc dans la maîtrise des mécanismes qui régissent les interactions eau-sol-plante-techniques culturales en vue de comprendre le déterminisme de la productivité des cultures. Cela permettra de proposer aux producteurs des façons culturales appropriées pour gérer les faibles ressources en eau, en tenant compte du niveau de fertilité des sols et de leurs conditions socio-économiques.

Bien que le Burkina Faso renferme une microhétérogénéité agro-pédoclimatique (SOME op. cité), il n'est pratiquement pas possible de mener des études dans tous les milieux. On peut cependant conduire les recherches dans de grandes zones homogènes dans l'espoir d'extrapoler les résultats obtenus sur un site à d'autres qui appartiennent au même ensemble que lui.

C'est pour toutes ces considérations que l'Institut d'Etudes et de Recherches Agricoles (I.N.E.R.A) a initié une étude dans la Station Agricole de Saria dont les sols sont largement représentatifs du Centre du pays communément appelé Plateau Central (JENNY, 1964 ; SEDOGO, op. cité). Le thème de l'étude "Amélioration de l'Alimentation Hydrique des Cultures par les Techniques Culturales en Zone Soudano-Sahélienne" entre dans le cadre d'un travail en réseau concernant plusieurs pays membres du Comité Permanent Interétats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS). Pour cette première campagne, la priorité a été accordée au sorgho, céréale de base dans le Plateau Central dont il représente plus de 50% des superficies cultivées et environ 60% de la production céréalière (SEDOGO, op. cité) et même du pays (1,05 millions d'hectares et plus de 50% du total de la production céréalière (FAO 1986, cité par SOME 1989).

Les techniques culturales de base font intervenir le labour et la matière organique, vu leur importance dans l'amélioration des rendements des cultures. D'autres techniques de travail du sol sont comparées au labour.

Le présent mémoire a été réalisé dans le cadre de cette étude sous-régionale et a pour thème : "CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MECANISMES D'ALIMENTATION HYDRIQUE D'UNE CULTURE PLUVIALE DE SORGHO EN FONCTION DE DIFFERENTES TECHNIQUES CULTURALES."

Le travail a consisté au suivi hydrique de la parcelle, à l'étude de l'enracinement ainsi qu'aux observations et mesures phénologiques sur la culture.

Le mémoire comprend trois parties. La première est consacrée à l'étude bibliographique. La deuxième partie développe la méthodologie utilisée pour acquérir les données. Les résultats sont analysés dans la troisième partie en relation avec les observations agronomiques réalisées sur la culture.

A la fin de cette étude, une conclusion générale viendra récapituler les objectifs de départ et les résultats obtenus, puis elle tirera les premiers enseignements qui en découleront. Quelques suggestions seront faites à l'intention des essais futurs.

CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. LE BILAN HYDRIQUE

I.1. Les éléments du bilan hydrique

L'établissement du bilan hydrique en culture pluviale consiste à déterminer au niveau d'une parcelle, d'une part la quantité d'eau reçue (pluie, ruissellement et remontées capillaires) et d'autre part la quantité d'eau perdue (évapotranspiration, ruissellement hors de la parcelle, percolations au-delà de la zone racinaire).

Pour un intervalle de temps donné, l'expression du bilan hydrique peut s'écrire :

$$P - \Delta S \pm R \pm Dr - ETR = D \quad (1)$$

avec

P = pluie

ΔS = variation de stock

R = ruissellement (+ ou - selon que l'eau ruissellée entre ou sort de la parcelle) ;

Dr = drainage (+ ou - selon qu'il y a remontée capillaire ou percolation) ;

ETR = évapotranspiration réelle.

- Dans le calcul du bilan hydrique, la pluie est la donnée mesurée et souvent la plus disponible. En agriculture strictement pluviale, elle constitue la seule offre en eau. Lorsque le régime de la pluie est supérieur au régime d'infiltration de l'eau dans le sol, l'eau peut ruisseller hors de la parcelle contrairement à une infiltration trop importante qui peut occasionner des percolations au delà de la zone colonisée par les racines. Dans ces deux cas l'eau échappe à la consommation des plantes.

- Le stock d'eau est la quantité d'eau restant après prélèvement par les plantes et les pertes par évaporation ou par drainage. Ses variations dans le temps conditionnent fortement l'alimentation hydrique des cultures.

- L'ETR est un paramètre qui caractérise avec l'ETM (évapotranspiration maximale), la consommation en eau d'un couvert végétal. L'ETM est une évaluation de la consommation en eau d'une surface cultivée dont les plantes sont bien alimentées en eau et en éléments minéraux et dont la croissance végétative se réalise dans de bonnes conditions sanitaires (IRAT/OIEA, 1983). ETM est liée à la demande évaporative de l'atmosphère et au stade de développement de la culture par les relations suivantes :

$$K_c = \frac{ETM}{ETP} \quad \text{et} \quad K'c = \frac{ETM}{Ev \text{ Bac}}$$

avec

K_c et $K'c$ = coefficients culturaux ;

ETP = évapotranspiration potentielle ;

Ev Bac = évaporation d'eau libre en bac normalisé classe A installé sur un sol nu.

Quand l'apport d'eau ne suffit pas à satisfaire les besoins en eau de la culture, le régime de l'évapotranspiration qui devient inférieur à celui de l'ETM, est alors celui de l'ETR. Dans ces conditions il se crée dans la plante un manque d'eau qui peut compromettre sa croissance et en fin de compte son rendement (FAO, 1980). Pour une culture pluviale, la connaissance de l'ETR est donc primordiale car sa comparaison avec l'ETM permet d'apprécier le niveau de satisfaction des besoins en eau (SAT) et de quantifier le déficit hydrique (DE) tout au long du cycle de la culture.

On a :

$$SAT = ETR/ETM$$

$$DE = ETM - ETR \quad (\text{CHAROY et al., 1984 ; Le CORVEC et GUIDEAU 1984}).$$



1.2. Conclusion

Les composantes du bilan hydrique sont dépendantes de facteurs liés entre eux par le système eau-sol-plante-atmosphère. On peut donc supposer qu'en agissant sur certains facteurs accessibles, l'homme est en mesure de modifier favorablement le bilan hydrique. Le travail du sol et la fertilisation sont des pratiques culturales à même d'influencer positivement le bilan hydrique d'une culture.

1.2. ACTIONS DES TECHNIQUES CULTURALES SUR LE BILAN HYDRIQUE

Les actions portent notamment sur le régime hydrique du sol et le système racinaire des cultures. Il en résulte des conséquences agronomiques.

2.1. Actions des techniques culturales sur le régime hydrique du sol

2.1.1. Effets du travail du sol sur le stock d'eau

Les techniques de préparation du sol telles que le scarifiage et surtout le labour accroissent le stock d'eau du sol par une amélioration de l'infiltration de l'eau de pluie (CHARREAU et NICOU, 1971).

En effet ces travaux qui éclatent le sol (scarifiage) ou le retournent (labour), augmentent la "rugosité" et la porosité des horizons ameublés, réduisent le ruissellement et offrent une plus grande capacité de stockage en surface (CHARREAU et NICOU op cité ; Llamas, 1985). Cet effet est surtout spectaculaire en début de saison des pluies et a été mis en évidence par des relevés de profils hydriques réalisés dans différentes zones du Burkina Faso (SOME, 1982a ; DOAMBA, 1982 ; DAKIO, 1983 ; QUATTARA 1984 ; TRAORE, 1984 ; QUATTARA, 1989). Une synthèse bibliographique a été proposée sur les résultats des essais de travail du sol réalisés au Burkina Faso (SOME, 1982b).

Le buttage après un labour est une technique additionnelle qui se pratique au moment où l'effet du labour sur l'infiltration de l'eau commence à s'estomper. L'effet du buttage sur la circulation et la rétention de l'eau est accru par le cloisonnement des billons ; l'eau captée est emprisonnée dans les bassins de microcaptage et ne peut plus ruisseler, d'où une infiltration plus importante (NICOU et al, 1987 ; DUGUE, 1989 ; SOME, 1989).

2.1.2 Effets du travail du sol sur l'économie de l'eau

Les travaux de préparation du sol, notamment le labour, ont toujours un effet favorable pour la maîtrise de l'enherbement des cultures. Cela réduit la part d'eau consommée par les mauvaises herbes et permet d'économiser l'eau emmagasinée dans le sol (CHARREAU et NICOU, op. cité) au profit des cultures.

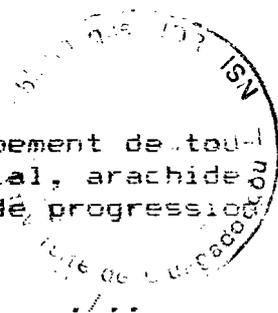
2.1.3 Effets de la matière organique sur le stock d'eau

On admet généralement une action de la matière organique notamment le fumier sur les propriétés de rétention et de transfert hydrique du sol (CISSE, 1986). Les effets de la matière organique sur ces caractéristiques sont fonction entre autres facteurs, de la texture du sol (taux d'argile et de limons) et de sa structure (FEUSTEL 1936 ; JAMISSON 1953 et 1958, cités par CISSE 1986). La matière organique agit en augmentant la microporosité du sol (DUTHIL, 1973). Pour les sols tropicaux, l'accroissement des réserves en eau du sol intéresse les horizons de surface riches en matière organique (SIBAND 1972, cité par CISSE 1986).

2.2. Actions des techniques culturales sur l'enracinement des cultures

2.2.1. Effets du travail du sol sur le système racinaire

Le labour influence nettement le développement de toutes les cultures : mil, sorgho, maïs, riz pluvial, arachide, cotonnier. Le labour agit en augmentant la vitesse de progression du front



racinaire et surtout le degré de colonisation du sol par les racines (CHOPART, 1980, 1983). La colonisation du sol par les racines, qui peut être caractérisée par la profondeur de l'enracinement et la répartition des racines dans le sol, a été observée lors de nombreux travaux réalisés au Burkina Faso notamment sur des cultures de mil et de sorgho (SOME, 1982a ; DOAMBA, 1982 ; DAKIO, 1983 ; QUATTARA 1984 ; DUGUE, 1989 ; KAMBOU, 1989). En station comme en milieu paysan, ces auteurs ont observé une influence favorable du travail du sol sur la densité racinaire dans les couches superficielles.

Mais le labour améliore aussi la colonisation du sol par les racines en profondeur surtout en début et en milieu de cycle (CHOPART, op. cité ; SOME et NICOU, 1983).

Le mode d'action du travail du sol sur l'enracinement des cultures réside dans la modification favorable des caractéristiques physiques du sol telle que la porosité dont l'augmentation va de paire avec la diminution de la résistance mécanique à la pénétration (MAERTENS, 1964).

2.2.2. Effets de la fertilisation sur le système racinaire

La teneur en ions minéraux du milieu stimule la rhizogenèse par une action sur toute la plante et par une action spécifique sur les racines uniquement (CALLOT et al, 1982). Ceci a pour conséquence une amélioration de la colonisation du sol par les racines.

La matière organique a un effet sur la croissance et le développement du système racinaire, effet qui résulte de l'action des acides organiques de faibles poids moléculaires issus de sa décomposition (LIESKE 1932 et 1935, cités par CISSE, 1986). Ces acides organiques accroissent le nombre et la longueur des racines. La matière organique a également une incidence sur le système racinaire par son action sur le redressement de la fertilité chimique des sols et par sa contribution à la formation d'une bonne structure dans le profil cultural (SEDOGO, 1981 ; CISSE, op. cité).

./..

2.3. Conséquences agronomiques du travail du sol et de la fertilisation

Il ressort des analyses précédentes que le travail du sol et la fertilisation jouent un rôle important dans le stockage et la conservation de l'eau dans le sol ainsi que dans l'amélioration de la fertilité physico-chimique des sols. Ces conditions sont favorables à la croissance et au développement du système racinaire tant en surface qu'en profondeur, ce qui permet une amélioration de l'alimentation hydrique et minérale des cultures d'où une augmentation de leurs rendements.

Une combinaison judicieuse travail du sol-fertilisation peut avoir un effet tampon en cas de stress hydrique permettant d'obtenir des rendements acceptables (CHOPART et al, 1981 ; CHARREAU et NICOU op. cité ; PIERI, 1984 ; PIERI 1985, CISSE et al. 1987, cités par REYNIERS et FOREST 1988).

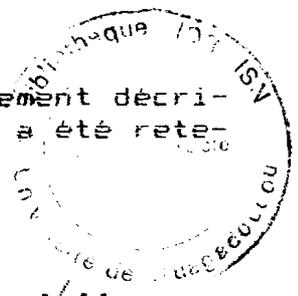
Pour toutes ces raisons, le travail du sol et la fertilisation organo-minérale peuvent être envisagés comme des méthodes de lutte contre la sécheresse.

1.3. METHODES D'EVALUATION DU BILAN HYDRIQUE D'UNE CULTURE

Trois méthodes sont couramment utilisées pour évaluer le bilan hydrique d'une culture. Ce sont :

- la méthode du bilan d'énergie
- la simulation du bilan hydrique
- la méthode neutronique et tensiométrique.

Les deux premières méthodes seront sommairement décrites, l'accent étant mis sur la troisième méthode qui a été retenue dans le cadre de la présente étude.



3.1. La méthode du bilan d'énergie

Le principe de la conservation de l'énergie appliquée au niveau du couvert végétal permet d'écrire l'équation du bilan d'énergie sous la forme (SEGUIN et ITIER, 1984) :

$$RN = S + Q_h + Q_e \quad (2)$$

avec

RN = rayonnement net ;
 S = flux de chaleur dans le sol ;
 Q_h = flux de chaleur sensible vers l'atmosphère ;
 Q_e = flux de chaleur latente vers l'atmosphère.

A l'échelle journalière, S = 0. L'expression simplifiée du bilan d'énergie peut alors s'écrire en remarquant que Q_e = ETR (si Q_e > 0) :

$$RN = Q_h + ETR \quad (3)$$

L'estimation de ETR peut se faire par deux méthodes.

- La méthode du rapport de BOWEN (PERRIER et al 1976, cités par SEGUIN et ITIER 1984). Elle est basée sur la mesure des gradients verticaux de température et de tension de vapeur d'eau au dessus du couvert végétal dans la zone des flux conservatifs. L'ETR est obtenue par la relation :

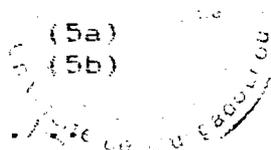
$$L \times ETR = \frac{RN-S}{1+B} \quad (4)$$

où L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, B est le rapport de BOWEN = Q_h/L × ETR.

- La méthode de la thermométrie infra-rouge qui consiste à estimer le flux de chaleur sensible Q_h par les mesures de la température de surface du sol et de celle de l'air puis on déduit la valeur de ETR à partir de la mesure simultanée de RN (ég. 3). Il existe de nombreuses équations pour estimer ETR à l'échelle journalière. Celles proposées par JACKSON et SEGUIN et rapportées par IMBERNON et al (1983) sont :

$$ETR_j = RN_j - 0,64 (T_s - T_a) \quad \text{JACKSON} \quad (5a)$$

$$ETR_j = RN_j - 1,0 - 0,25 (T_s - T_a) \quad \text{SEGUIN} \quad (5b)$$



Il existe de nombreux ouvrages spécialisés qui développent les théories sur la méthode du bilan d'énergie. On peut retenir en exemples : ITIER et PERRIER (1976), cité par MINISTÈRE DE LA COOPERATION (1979) ; PERRIER (1975), JACKSON et al. (1977) et SEGUIN et ITIER (1983) cités par SOME (1985).

3.2. La simulation du bilan hydrique

Aucune mesure simple de terrain ne permet d'évaluer de façon aisée l'ETR d'une culture. On peut cependant en se basant sur une modélisation empirique des relations eau-sol-plante, l'estimer par le calcul en réalisant une simulation du bilan hydrique du semis à la récolte.

D'une façon générale, les modèles de simulation existant utilisent en entrée (CHAROY et al, 1978, 1984) :

- des paramètres climatiques (pluie, ETP) ;
- des paramètres édaphiques (modèle de ruissellement, réserve utilisable) ;
- des paramètres dépendant de la culture (ETM par stade végétatif).

L'ETR est calculée par une régression mathématique (Eagleman 1971, cité par CHAROY et al 1984) qui la fait dépendre de l'humidité relative Hr et de l'ETM (en valeurs journalières).

$$ETR_j = a ETM_j + bHR + cHR^2 + dHR^3 \quad (6)$$

(a, b, c, d) sont des paramètres déterminés à partir de modèles expérimentaux de régression.

Plusieurs modèles de simulation sont actuellement disponibles. On peut citer entre autres, le logiciel Bilan Hydrique pluvial (BIP) de FOREST (1984) et ses versions BILJAN et BILJAS (Le CORVEC et QUIDEAU, 1984), le logiciel Programme de Bilan de l'Eau (PROBE) de CHOPART et SIBAND.

3.3. La méthode neutronique et tensiométrique

En agriculture pluviale déficitaire, le drainage peut être déterminant dans la production agricole et doit par conséquent être cerné avec la plus grande précision (DAUDET et VALANCOGNE, 1976). Les mesures neutroniques et tensiométriques simultanées peuvent permettre d'avoir des valeurs assez exactes de ce terme du bilan hydrique.

3.3.1. Notions théoriques et équations de base

3.3.1.1. Equation de la conservation

A l'échelle macroscopique, la conservation de la masse d'eau (supposée incompressible) pour un écoulement vertical peut s'écrire :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial Z} - A(Z,t) \quad (7)$$

où t est le temps ; Z la profondeur orientée positivement vers le bas, l'origine étant à la surface du sol ; θ est la teneur volumique en eau ; q est la densité volumique de flux ; $A(Z,t)$ représente le taux volumique d'extraction d'eau par le système racinaire.

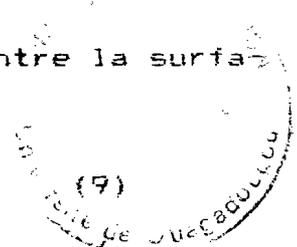
En intégrant $A(Z,t)$ entre la surface du sol ($Z=0$) et la profondeur maximum d'enracinement $Z_r(t)$ au temps t , on obtient le taux de transpiration réelle $T_r(t)$ (VAUCLIN, 1989).

$$\text{En effet : } \int_0^{Z_r(t)} A(Z,t) dz = T_r(t) \quad (8a)$$

$$A(Z,t) = 0 \text{ pour } Z > Z_r(t) \quad (8b)$$

De même l'intégration de l'équation (7) entre la surface du sol et une cote Z quelconque conduit à :

$$\frac{\partial S_z^Z(t)}{\partial t} = q_0(t) - q_z(t) - \int_0^{Z_r(t)} A(Z,t) dz \quad (9)$$



où $S_0^z(t) = \int_0^z \theta dz$ est le stock hydrique de la tranche de sol 10×10 à l'instant t ; $q_0(t)$ et $q_z(t)$ sont les flux d'eau à la surface et à la profondeur Z , respectivement.

3.3.1.2. La loi de Darcy généralisée

Dans l'équation (7), q s'exprime par la loi de Darcy généralisée aux milieux poreux non saturés par la relation :

$$q = - K(\theta) \frac{dH}{dZ} \quad (10)$$

où $K(\theta)$ est la conductivité hydraulique qui est une fonction très fortement croissante de l'humidité ; H est la résultante de tous les champs de force qui s'exercent sur l'eau du sol (HILLEL, 1984).

En ne considérant que les champs de force gravitationnelle et matricielle, H s'exprime par :

$$H = h(\theta) - Z \quad (11)$$

L'expression quantitative de H est l'énergie potentielle par unité de poids ou charge hydraulique ; H est aussi appelée potentiel total.

Dans l'équation (11), $h(\theta)$ est la pression effective de l'eau à la cote Z qui est fonction de θ . Les variations de la fonction $h(\theta)$ dans le profil déterminent la direction et influencent le régime du mouvement de l'humidité du sol et le prélèvement en eau par les plantes (HILLEL op cité). h est aussi appelée potentiel matriciel par unité de poids ou tension ou encore suction. Par définition, elle exprime la différence entre la pression de l'eau du sol et la pression atmosphérique et est par conséquent négative dans la zone non saturée du sol et positive dans la zone saturée (VACHAUD et al, 1977).

La charge hydraulique et la pression effective s'expriment en unités de pression (plus couramment en cm d'eau).

./..

3.3.1.3. Expressions du bilan hydrique

A partir des équations précédentes, diverses expressions du bilan hydrique sont possibles en considérant les deux situations suivantes :

- les tensiomètres indiquent la présence d'un plan de flux nul situé à une profondeur Z_0 plus grande que la profondeur maximum d'enracinement (Z_r). En rapprochant les équations (8) et (9) on peut écrire :

$$\frac{\partial S_{Z_0}^{Z_0}(t)}{\partial t} = q_0(t) - \int_0^{Z_r(t)} A(z,t) dz = q_0(t) - TR(t) \quad (12)$$

En considérant d'une part l'équation (12), et d'autre part en posant $q_0(t) = R(t) - RN(t) - Ev(t)$ (13) où $R(t)$ sont les entrées (pluie, ruissellement), $RN(t)$ le ruissellement hors de la parcelle et $Ev(t)$ l'évaporation, l'expression du bilan hydrique devient :

$$\frac{\partial S_{Z_0}^{Z_0}(t)}{\partial t} = R(t) - RN(t) - ETR(t) \quad (14)$$

$ETR(t)$ est le taux d'évapotranspiration réelle de la culture.

- le profil de charge hydraulique peut mettre en évidence un plan de flux nul situé dans la zone racinaire, ou son absence. Dans ces conditions, il convient de considérer une cote $Z_0 > Z_r(t)$ dans l'équation (9) de sorte qu'en tenant compte de l'équation (13), le bilan hydrique soit de la forme :

$$\frac{\partial S_{Z_0}^{Z_n}(t)}{\partial t} = R(t) - RN(t) - ETR(t) - q_{z_n}(t) \quad (15)$$

$$\text{avec } q_{z_n}(t) = -K(\theta) \left. \frac{dH}{dz} \right|_{Z_n} \quad (15b)$$

3.3.2. Méthodes d'estimation des composantes du bilan

3.3.2.1. La méthode du "plan de flux nul"

D'après l'équation (14), cette méthode ne s'applique que lorsque la cote Z_0 est située en dessous de la profondeur d'enracinement, ce qui peut être le cas lors des périodes de sécheresse marquée, au stade de croissance juvénile de la culture (VAUCLIN, 1989). En cas de "périodes humides" son application entraînerait une sous-estimation systématique de l'ETR (DAUDET et VACHAUD, 1977 ; DAUDET et VALANCOGNE, op cité).

3.3.2.2. La méthode du "flux de Darcy" pour l'estimation du drainage

Cette méthode impose le choix d'une cote Z_n (fixe dans le temps) supérieure à la profondeur maximum d'enracinement à travers laquelle le flux doit être estimé par la loi de Darcy (Eq (15b) (DAUDET et VACHAUD, op cité ; RUELLE et al, 1983 ; VAUCLIN, 1989). Bien qu'elle apparaisse plus générale que la méthode précédente, la grande difficulté de son application réside dans la connaissance de la relation $K(\theta)$ à la cote Z_n , ainsi que la mesure du gradient dH/dZ à cette même cote.

3.3.2.3. Estimation du ruissellement: $RN(t)$

Lorsqu'on ne peut pas mesurer le ruissellement et si les conditions pédoclimatiques ne le favorisent pas, l'hypothèse la plus simple consiste à considérer ce terme nul dans les équations (14) et (15). On obtient directement la valeur de $ETR(t)$.

Une autre possibilité est d'estimer $RN(t)$ par l'algorithme suivant (VAUCLIN, 1989) : en supposant que $RN(t) = 0$ dans les équations (14) et (15), cela conduit à estimer une évapotranspiration réelle apparente ($ETRA(t)$). En considérant d'autre part que les plantes consomment au plus à l'ETM, le ruissellement se produit quand $ETRA(t) > ETM(t)$; sa valeur est alors :

$$RN(t) = ETRA(t) - ETM(t) \quad (16)$$

./..

3.3.2.4 Estimation de la consommation en eau : ETR(t)

A partir des équations (14) et (15), il est possible de calculer la valeur de l'ETR dès que les autres termes du bilan sont connus.

Dans le cas où $ETRA(t) < ETM(t)$, on a alors :

$$ETR(t) = ETRA(t) \quad (17)$$

Il convient de noter que toutes les équations ci-dessus fournissent des valeurs instantanées. Il est donc possible d'obtenir les valeurs moyennes des grandeurs recherchées sur une période $\Delta t = t_2 - t_1$ en intégrant ces équations.

$$\text{Exemple : } \bar{\Delta S}_0^z = (\bar{R} - \bar{RN} - \bar{ETR}) \Delta t \quad (18)$$

3.3.3. Utilisation des mesures neutroniques et tensiométriques simultanées pour l'estimation du bilan

3.3.3.1. Calcul des stocks et des variations de stock

La connaissance expérimentale des profils hydriques permet de calculer les stocks par la méthode des rectangles (VAUCLIN, op. cité) selon que les pas de mesures neutroniques sont constants ou irréguliers. Le stock hydrique de la tranche $[0, z]$ est donné par (DAUDET et VACHAUD, 1977 ; Luc, 1978) :

$$S_0^z(t) = [\theta_i \cdot \Delta Z]_0^z \quad (19)$$

(mm)

où $S_0^z(t)$ est le stock au temps t ; θ_i est l'humidité volumique en pourcentage à la cote Z_i ; ΔZ est le pas de mesure (mm) ; $\theta_i \cdot \Delta Z$ est le stock à la cote Z_i .

La variation de stock hydrique entre deux dates de mesure s'obtient simplement par :

$$\Delta S_0^z = S_{t_2} - S_{t_1} \quad (20)$$

./..

3.3.2. Estimation du gradient de charge hydraulique : $\frac{dH}{dz}$

En encadrant la cote de mesure Z_n par deux tensiomètres (haut et bas), le gradient de charge peut être approximé par :

$$\left. \frac{dH}{dz} \right|_{Z_n} = \frac{H_2 - H_1}{Z_2 - Z_1} \quad (21)$$

H_1 = charge hydraulique mesurée par le tensiomètre à la cote $Z_1 < Z_2$

H_2 = charge hydraulique mesurée par le tensiomètre à la cote Z_2

Compte tenu de l'orientation de l'axe oz et de l'équation de Darcy, le gradient de charge donne le sens de l'écoulement hydrique (figure 4) (LUC 1978).

$\frac{dH}{dz} < 0 \implies q > 0$ l'écoulement est dirigé vers le bas (infiltration, percolation) ;

$\frac{dH}{dz} > 0 \implies q < 0$ l'écoulement est ascendant (évaporation, remontée capillaire) ;

$\frac{dH}{dz} = 0 \implies q = 0$ à tout extremum de la fonction $H(z)$ correspond un plan de flux nul séparant une zone de sol soumise à évaporation d'une zone soumise à une percolation.

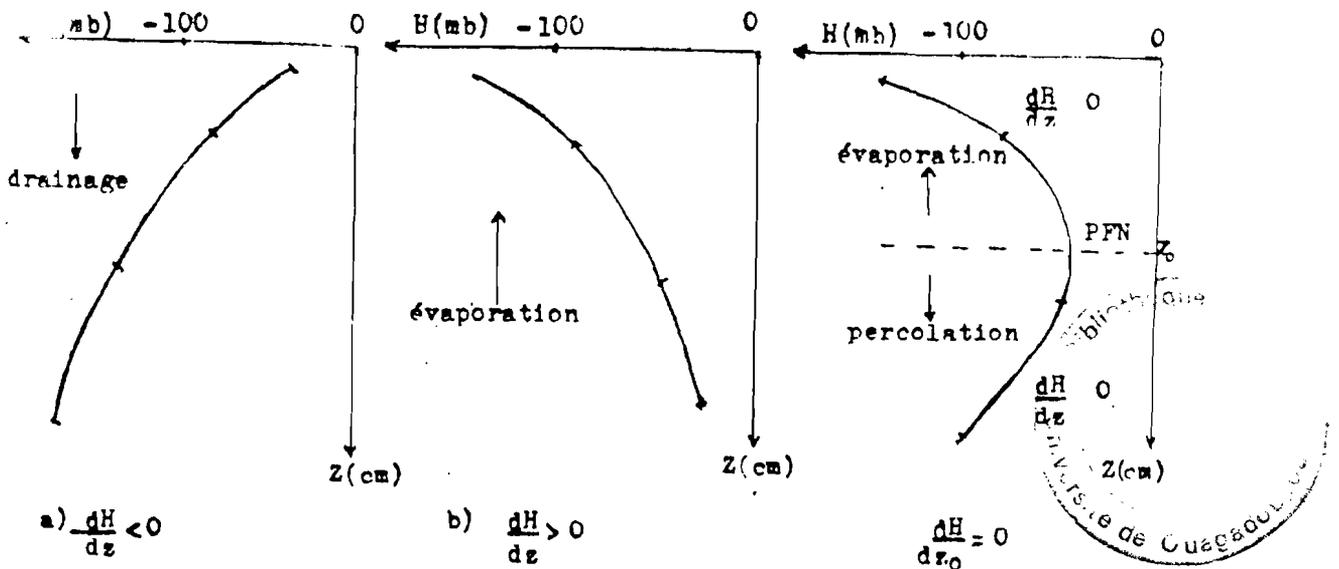


Fig. 4 : Profils de charge et détermination du sens de l'écoulement

3.3.2. Détermination de la relation conductivité hydraulique-teneur en eau : $K(\theta)$

La relation $K(\theta)$ peut être déterminée lors d'un essai de caractérisation hydrodynamique (VACHAUD et al, 1977) ou l'on associe les mesures neutroniques et tensiométriques. La grande variabilité spatiale de $K(\theta)$ impose bien souvent de caractériser chaque site de mesure, si l'on veut obtenir une bonne estimation des composantes du bilan général, du flux en profondeur en particulier (VAUCLIN, 1989).

3.4. Conclusion

Les trois méthodes décrites précédemment permettent toutes d'évaluer le bilan de l'eau d'un couvert végétal. Il serait cependant difficile de les appliquer toutes en même temps, vu l'ampleur du travail et le coût des matériels. Compte tenu des objectifs de l'étude, une bonne évaluation des flux d'eau en profondeur est indispensable. La méthode neutronique et tensiométrique paraît la mieux indiquée pour cela.

./..

./..

CHAPITRE II. PRESENTATION DU MILIEU - MATERIELS ETMETHODES D'ETUDEII.1. PRESENTATION DU MILIEU1.1. Localisation

La Station de Recherches Agricoles de Saria est située à 23 km à l'Est de Koudougou et à 80 km au Sud-Ouest de Ouagadougou. Saria se trouve à 12°16'N de latitude et 2°9'W de longitude à une altitude de 300 mètres environ.

1.2. Le climat1.2.1. Les précipitations

Le climat de Saria est du type tropical sec, caractérisé par une courte saison des pluies de mai à octobre, suivie d'une longue saison sèche de novembre à avril. La moyenne annuelle des précipitations est d'environ 800 mm. Seulement, la pluviométrie connaît une telle variabilité spatio-temporelle, que son expression doit se faire en termes de fréquences ou de probabilité d'occurrence (FOREST 1982, cité par DANCETTE 1984 ; IRAT/CIEH, 1983 ; ELDIN, 1984 ; SIVAKUMAR et GNOUMOU, 1987 ; SOME, 1989). La variabilité des précipitations à Saria peut être mise en évidence par une analyse de la pluviométrie en examinant les moyennes mobiles arithmétiques (figure 2) et le tableau 1.

Tableau 1 : Analyse fréquentielle des pluies de Saria sur 21 ans de 1968 à 1988

(D'après QUATTARA 1989)

Probabilité que pluviométrie > x	Seuil x en mm						
	Année	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct
0,8	699,0	34,8	72,0	137,4	154,9	103,0	4,4
0,5	746,9	74,8	107,8	154,3	194,8	134,0	22,8
0,2	926,5	89,5	150,6	224,4	278,2	180,0	55,4

./...

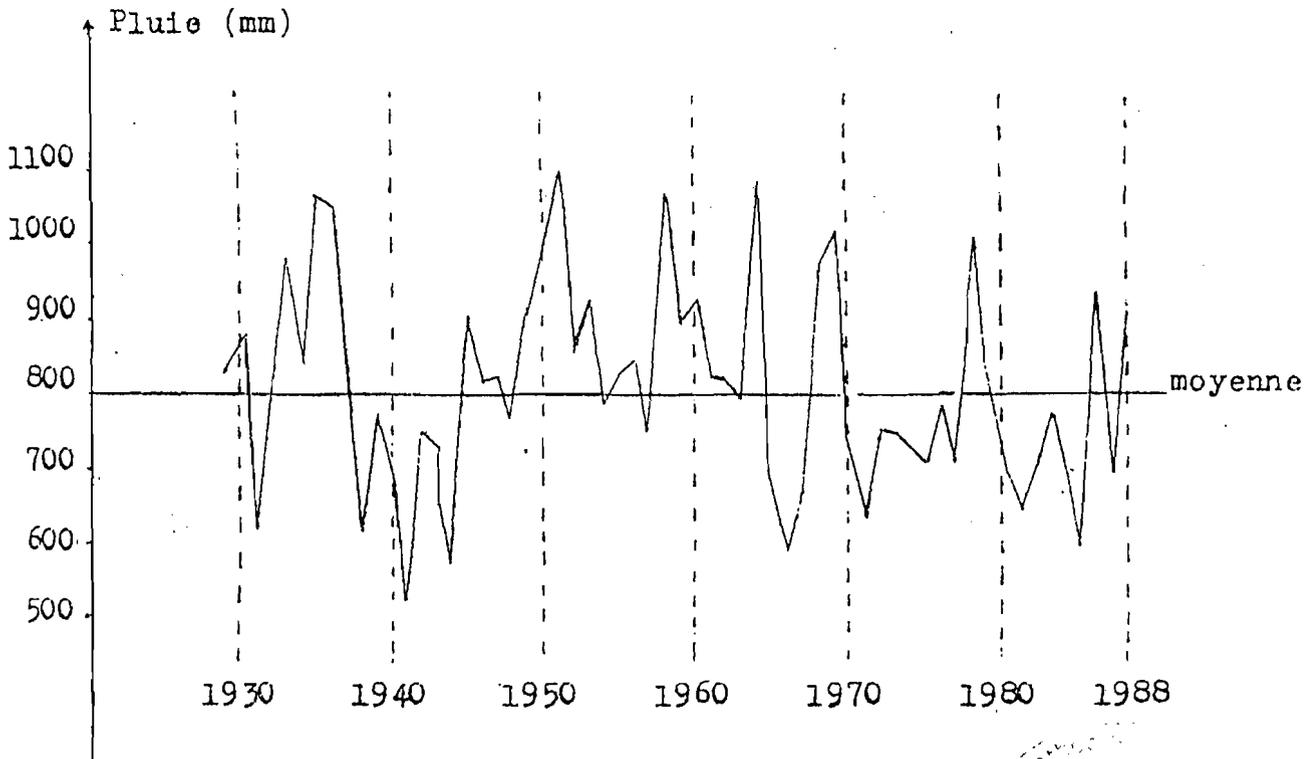
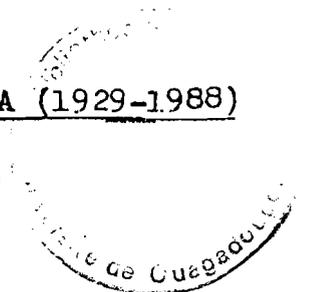


Fig. 2 : Pluviométrie annuelle de SARIA (1929-1988)

(d'après OUATTARA, 1989)



Il apparaît que depuis 1970 les périodes de sécheresse sont plus longues. Les années 1988 et 1989 peuvent être considérées comme des cas exceptionnels de bonne pluviosité ; on a enregistré respectivement 935 mm et 925 mm. Selon l'analyse fréquentielle (tableau 4), ces deux campagnes représentent des situations observées 2 années sur 10.

1.2.2. Les températures

Les températures moyennes annuelles de Saria sont d'environ 28°C. Les maxima mensuels se situent en mars-avril (38°C) et les minima (15°C) en décembre-janvier. Les températures deviennent modérées en saison des pluies (23°C-28°C) (SIVAKUMAR et GNOUMOU, op. cité).

1.2.3. Les vents

Le régime des vents est sous l'influence de deux anticyclones :

- l'anticyclone saharien ou l'harmattan qui génère une masse d'air chaud et sec se déplaçant dans la direction Nord-Est entre les mois de Novembre et d'Avril ;
- l'anticyclone situé dans l'Atlantique Sud, de direction Sud-Ouest et d'où provient la mousson, qui apporte les pluies.

1.2.4. Humidité relative et demande évaporative

L'humidité relative exprime la valeur en pourcentage de la teneur maximale de l'air en eau. Elle descend à moins de 20% en saison sèche (15% en Février) et dépasse 60 à 80% en hivernage (ROOSE et al, 1979).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la demande évaporative. Elle est en moyenne de 2096 mm en année sèche, 826 mm en année moyenne et 1713 mm en année humide (ROOSE, 1981).

1.3. La végétation

Elle résulte de la combinaison de l'action anthropique (feux de brousse, surpâturage, forte pression démographique) et de facteurs pédoclimatiques (ROOSE et al, op. cité). La flore arborescente est à dominance Butyrospermum parkii, Parkia biglobosa, Acacia albida et des essences introduites dont Mangifera indica (manguier) (TERRIBLE, 1978).

La strate arbustive est dominée par des fourrés d'espèces divers, de Combretacées dont Guiera senegalensis et Combretum micranthum. La strate herbacée est essentiellement constituée de Pennisetum spp., Andropogon gayanus, espèces par excellence des jachères. Les dalles latéritiques et les sols peu profonds sont colonisés par Loudetia togensis, Cymbopogon giganteus, Schoenfeldia gracilis. Il n'y a pratiquement plus de jachère.

1.4. Les sols

Les sols de Saria sont situés sur une pénéplaine au relief très effacé reposant sur un vieux socle granito-gneissique. Le long de la toposéquence on observe en haut de pente des sols ferrugineux tropicaux lessivés gravillonnaires ou indurés ; plus bas se trouvent les sols hydromorphes moyennement ou peu humifères. Les cuirasses et les carapaces, très peu profonds au sommet, s'enfoncent au fur et à mesure que l'on descend (JENNY, 1964 ; SEDOGO, 1981).

Caractéristiques du site de l'essai

Le sol sur lequel est implanté l'essai est un remblai jaune, c'est-à-dire constitué de dépôts alluviaux très épais. C'est un sol hydromorphe à pseudogley de profondeur (taches d'hydromorphie à 1,50 m environ) bordant un marigot (BERTRAND, 1989).

Une culture d'homogénéisation en arachide (variété CN 94 C) a été réalisée sur la parcelle d'essai en 1988. Il y a été effectué un travail léger du sol et une fertilisation minérale unique. L'analyse de variance n'a pas montré de différence significative au seuil de 5% entre les traitements ni entre les blocs pour ce qui concerne les rendements des fanes.

Le tableau 2 ci-dessous donne les principales caractéristiques physico-chimiques de l'horizon 0-20 cm.

Tableau 2 : Principales caractéristiques analytiques de l'horizon 0-20 cm

- Granulométrie	
Argile (%)	8,75
Limons totaux (%)	25,81
Sables totaux (%)	65,44
- Masse volumique sèche	
	1,57
- Carbone total (%)	
	0,345
- Azote total (PFm)	
	245,66
- P205 assimilable (PFm)	
	2,4
- Al ³⁺ (meq/100g)	
	0,01
- pH eau	
	5,8

L'analyse granulométrique (réalisée par le Bureau National des Sols) montre que la texture est sablo-limoneuse en surface (0-20 cm) et sablo-argileuse sur l'horizon 40-160 cm, la couche intermédiaire (20-40 cm) étant sablo-argilo-limoneuse. Une telle texture est favorable à l'infiltration de l'eau en surface et à son emmagasinement en profondeur. Mais la faible teneur en argile et la prédominance des sables fins et des limons dans l'horizon 0-20 cm (voir tableau en annexe 4) sont à l'origine des phénomènes de prise en masse étudiés par NICOU (1975). En outre la discontinuité texturale observée peut être un obstacle à la pénétration des racines (PICHOT et al, 1981).

Les teneurs en azote et en carbone sont faibles et assez représentatives de la zone (taux de matière organique généralement inférieur à 1%).

On peut également noter les faibles teneurs en phosphore assimilable et en aluminium échangeable

II.2. MATERIELS ET METHODES D'ETUDES

2.1. Matériel végétal

La variété de sorgho utilisée, ICSV 1049, est issue du croisement entre les variétés E-35-1 et FRAMIDA. Le cycle semis-épiaison dure de 70 à 75 jours et celui du semis-maturité est de 105 à 110 jours. La plante a une panicule compacte à grains blancs. Son rendement moyen assez élevé en essai (2800 kg/ha) et sa résistance aux maladies foliaires, au striga et à la verse encouragent sa vulgarisation en zone comprise entre les isohyètes 700 et 900 mm (CHANTEREAU, communication personnelle).

2.2. Dispositif d'étude et traitements

2.2.1. Dispositif d'étude

Le dispositif mis en place est en Bloc de Fischer avec six (6) traitements à six (6) répétitions. Chaque parcelle élémentaire a une superficie de $7,2\text{m} \times 24\text{m} = 172,8 \text{ m}^2$. Une allée de un (1) mètre est maintenue entre les parcelles et une autre de trois (3) mètres entre les blocs (figure 17). Les différents traitements associent le travail du sol et la fertilisation.

- T1 : Travail manuel (grattage superficiel à la daba) = Témoin ;
- T2 : Travail manuel + engrais minéral (EM) ;
- T3 : Labour à plat (aux boeufs) + engrais minéral ;
- T4 : Labour à plat + engrais minéral + matière organique (Mo) ;
- T5 : Labour à plat + engrais minéral + matière organique + buttage et cloisonnement (BC) ;
- T6 : Scarifiage du sol en humide à l'aide d'une charrue à dents à la traction bovine + engrais minéral + matière organique.

././.

2.2.2. Fertilisation et densité de semis

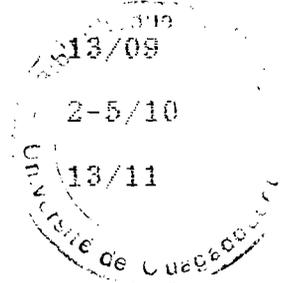
Les doses d'engrais minéraux et de la fumure organique sont celles proposées par les services de la vulgarisation (IFAT, 1980 ; LOMPO et SEDOGO, 1983).

Elles sont de 100 kg NPK (14-23-14)/ha en début de culture, 50 kg urée à la montaison et 5T/ha de fumier (C/N = 19,88 (NANEMA, 1990) tous les deux ans. Le fumier doit être enfoui par les travaux de préparation du sol.

Le sorgho a été semé à la densité de 0,40m entre les poquets et 0,80m entre les lignes et démarré à deux (2) plants par poquet.

2.3. Calendrier cultural

Application fumier et NPK + Travail du sol	2-3/7/89
Semis	10/07
Comptage à la levée	18/07
Resemis	19/07
Démariage	23-24/07
1er sarclage aux boeufs	8-9/08
Sarclage + Urée	18/08
Profils racinaires	23-29/08
Buttage et cloisonnement	24/08
Sarclage aux boeufs	8-9/09
Début épiaison	13/09
Profils racinaires	2-5/10
Récolte	13/11



2.4. Méthodes de mesures

2.4.1. Mesures de la teneur en eau

Les teneurs en eau sont obtenues à l'aide d'une sonde à neutrons (type Solo 25 ; 40 mCi ; source $^{241}\text{Americium-Beryllium}$) (annexe 3). L'appareil comporte une source de neutrons accompagnée d'un détecteur de neutrons lents. Cet ensemble est introduit dans le sol à la profondeur désirée à l'aide d'un tube d'accès en aluminium de 45 mm de diamètre extérieur. Le tube est implanté verticalement dans le sol et sa hauteur aérienne est égale à 20 cm. L'humidimètre mesure pendant un laps de temps donné le flux de neutrons ralentis surtout par les atomes d'hydrogène qui sont essentiellement sous forme d'eau (LUC, 1978 ; RUELLE et al., 1983). Cette valeur peut être convertie en humidité volumique (Hv) par l'intermédiaire d'une équation d'étalonnage de la forme:

$$Hv = a \times \frac{N}{N_0} + b \quad (22)$$

où a et b sont des paramètres dépendant du sol ; N est le comptage brut donné par la sonde ; N_0 est le comptage standard dans l'eau pour tenir compte de l'effet des variations de la température sur le dispositif de comptage.

La sonde à neutrons a été étalonnée au champ à partir de trois (3) séries de mesures neutroniques et gravimétriques réalisées en avril, octobre et décembre 1989. Les masses volumiques sèches ont été mesurées au densitomètre à membrane dans deux fosses creusées au Sud-Est et au Nord-Ouest de l'essai. L'ensemble des résultats d'étalonnage a conduit à établir deux (2) courbes pour tous les sites de mesures, une courbe pour la cote Z = 15 cm pour tenir compte de l'imprécision des mesures de surface (RUELLE et al., 1983 ; COUCHAT, 1983) et une autre pour les cotes Z > 15 cm (annexe 2).

Les équations sont les suivantes :

$$* Z \leq 15 \text{ cm} : Hv = 63,28 \frac{N}{N_0} - 1,518 \quad (r = 0,96 ; n = 60)$$

$$* Z > 15 \text{ cm} : Hv = 62,34 \frac{N}{N_0} - 3,648 \quad (r = 0,93 ; n = 644)$$

n = nombre de couples de données.

././.

Pour le suivi hydrique de la parcelle, seuls les quatre (4) premiers traitements des cinq (5) derniers blocs ont été équipés en tubes d'accès neutronique (soit 20 tubes au total). Les mesures ont été faites à une périodicité de cinq (5) jours en général à partir du 11 Juillet 1989 et aux profondeurs suivantes : 15 cm/25/35/45/65/75/85/95/115/135/155/205 cm.

2.4.2. Mesures de la pression d'eau

2.4.2.1. Mesures de la charge hydraulique

Elles sont indépendantes des mesures de la teneur en eau. Les mesures tensiométriques sont réalisées à l'aide de tensiomètre (type DTM 5000) à cinq (5) manomètres (annexe 3).

Un tensiomètre est un appareil constitué d'une canne en plastique fermée à l'une de ses extrémités par une bougie poreuse en céramique et à l'autre par un bouchon. La canne est introduite dans le sol à la profondeur de mesure où la bougie est en bon contact avec le sol. Un tube fin en plastique relie l'ensemble à une bouteille contenant du mercure. L'ensemble du dispositif est ensuite soigneusement saturé d'eau désaérée (figure 3).

Avec le temps, il va s'établir un équilibre hydrostatique entre l'eau du sol et l'eau dans la bougie, ce qui se traduira par une montée du mercure dans le capillaire en fonction du degré d'assèchement du sol (LUC, op cité ; RUELLE et al, op cité).

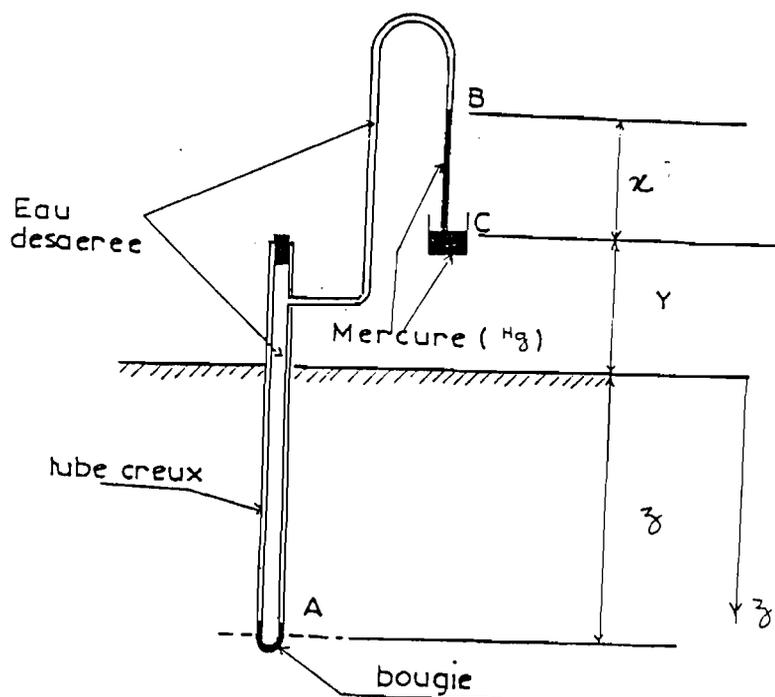


Fig 3 Schéma d'un tensiomètre

On peut donc écrire qu'à l'équilibre :

$$P_w = P_E = P_A + \rho_w g (x + y + z) \quad (23)$$

où P_w est la pression de l'eau du sol à la cote Z ; P_E est la pression de l'eau dans la bougie au point $E = Z$; P_A est la pression à l'interface eau-mercure et vaut $P_B - \rho_{Hg} g x$; ρ_w est la masse volumique de l'eau, g étant la pesanteur.

Par définition, la pression effective de l'eau (h) vaut :

$$h = \frac{P_w - P_o}{\rho_w g} \quad \text{d'où} \quad P_w = P_o + \rho_w g h \quad (\text{avec } P_o = \text{pression atmosphérique})$$

Par conséquent, en remplaçant P_A par $P_B - \rho_{Hg} g x$ (avec $P_B = P_o$) dans l'équation 23 il vient :

$$P_w = P_o + \rho_w g h = P_o - \rho_{Hg} g x + \rho_w g (x + y + z)$$

$$\text{ou } P_o + \rho_w g h = P_o + g \cdot x (\rho_w - \rho_{Hg}) + \rho_w (y + z) \quad (24)$$

soit, avec $\rho_{Hg} = 13,6 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$

En fait la valeur lue sur le tensiomètre est celle de la charge hydraulique qui est liée à h par la relation $H = h - z$

$$\text{d'où } H_{cm} = - 12,6 x + y \quad (25)$$

L'échelle manométrique étant graduée en $12,6 x$, on a une lecture directe de H s'il y a eu un ajustement sur Y .

Sur le terrain, les quatre (4) premiers traitements et quatre (4) derniers blocs ont été équipés en tensiomètres. Ces derniers étaient regroupés en unités de trois (3) et placés à côté de chaque tube aux profondeurs suivantes : 30 cm/115 cm/155 cm. Les relevés tensiométriques ont été journaliers depuis l'installation des appareils jusqu'à la récolte.

2.4.2.2. Mesures du niveau de la nappe

L'importance inattendue de la recharge de la nappe a occasionné l'installation de six (6) piézomètres (en sacrifiant des tubes d'accès) en début septembre dont un (1) à 100 cm, deux (2) à 180 cm et trois (3) à 155 cm. Les mesures piézométriques ont été faites tous les jours jusqu'à la disparition complète de l'eau dans les tubes.

2.4.3. Méthode de caractérisation hydrodynamique

La caractérisation a été faite en Janvier 1990 sur les quatre (4) traitements du bloc VI équipés en tubes d'accès. La méthode utilisée est celle du drainage interne décrite par VACHAUD et al (1977). L'anneau central a un mètre de diamètre. Les tensiomètres sont placés aux cotes 30 cm/60/90/115/135 cm. La lame d'eau apportée a été de 350 mm pour le traitement 3 et 250 mm au niveau des autres sites. Après l'infiltration de l'eau, le sol a été recouvert par une bâche en plastique et de la paille de sorgho. Les mesures d'humidité et de pression ont été réalisées dès la disparition de la lame d'eau et aux temps suivants : 30 mm, 1 heure, 2 heures, 3 heures, 5 heures, 10 heures, 20 heures, puis toutes les 24 heures, et enfin des intervalles de mesures plus grands au fil du temps.

2.4.4. Mesures et observations phénologiques

2.4.4.1. Etude de l'enracinement

La méthode d'étude de l'enracinement est celle proposée par CHOPART (1989), les principaux paramètres racinaires retenus étant la profondeur du front racinaire, le degré de colonisation du sol par les racines et le nombre de racines principales émises par la plante.

Les profils racinaires ont été réalisés sur les quatre (4) premiers traitements à la montaison, au stade laiteux ils ont concerné les cinq (5) premiers traitements. Les études ont été faites uniquement sur les quatre (4) derniers blocs.

Le travail a consisté dans un premier temps à creuser en bordure de parcelle une fosse perpendiculaire à une ligne de semis à 20 cm du pied à étudier. La paroi attenante au pied est aplanie puis on dégage la terre de façon à rendre les racines visibles. On applique ensuite une grille à mailles carrées de 5 cm x 5 cm sur la paroi (large de 80 cm) puis on compte le nombre de racines à l'intérieur de chacune des mailles depuis la surface jusqu'à la profondeur où on n'observe plus de racines. La même opération est répétée à 2 cm du pied. Lors de cette dernière opération, on compte le nombre de grosses racines et l'on repère leur position sur la paroi.

2.4.4.2. Comptage de poquets levés

Dix jours après semis, les poquets levés et/ou non levés ont été comptés sur toutes les lignes de semis.

2.4.4.3. Mesures des hauteurs de plants

Les mesures des hauteurs de plants ont été réalisées sur deux lignes de semis de 20 poquets chacune. Les lignes sont tirées au hasard sur le tiers de la parcelle opposé à la partie instrumentée. Les mesures portant toujours sur les mêmes plants, ont lieu à un mois, deux (2) mois, trois (3) mois après semis et à la récolte. Les plantes sont mesurées depuis la base de la tige jusqu'à l'extrémité de la dernière feuille sauf après l'épiaison où l'on considère l'extrémité de la panicule. Les mesures ont concerné les blocs IV et VI.

2.4.4.4. Observations sur les dates d'épiaison - floraison

Pour savoir quels effets les traitements auraient sur le sorgho pendant cette phase critique (FAO, 1980), les dates caractéristiques suivantes ont été notées pour chaque parcelle :

///

- début épiaison ;
- 50 % épiaison ;
- 100 % épiaison

2.4.4.5 Caractéristiques mesurées à la récolte

Les mesures à la récolte ont porté sur les caractéristiques suivantes :

- nombre de poquets récoltés ;
- nombre total de panicules ;
- nombre de panicules totalement vides ;
- poids des pailles ;
- poids des panicules ;
- poids des grains.

Ces différentes composantes ont été mesurées sur la parcelle utile (38,4 m² soit 120 poquets).

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. RESULTATS DE LA CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE

L'essai de caractérisation avait un double objectif : d'une part trouver $K(\theta)$ à la cote 135 cm pour cette campagne, et d'autre part rechercher les $K(\theta)$ pour d'autres cotes à l'intention des essais futurs.

La quantité des données obtenues a été considérable. On se contentera donc pour ce mémoire, de présenter la méthode de détermination de $K(\theta)$ à la cote 135 cm à travers les résultats du traitement 4.

1.1. Présentation des résultats

Le tableau 3 donne l'évolution temporelle de la teneur en eau à 135 cm et du stock d'eau entre la surface et cette cote.

Tableau 3 : Teneurs en eau à 135 cm et stocks d'eau de la tranche [0-135 cm]

Temps (heures)	θ cm ³ /cm ³	Stock (mm)
Avant essai	0,230	196,7
0	0,259	327,3
9	0,252	310,6
57	0,254	302,9
81	0,250	296,3
105	0,246	293,8
129	0,252	295,3
153	0,248	289,6
177	0,245	280
225	0,251	287,4
249	0,244	284,2
297	0,246	284,2
393	0,252	287,4
441	0,245	279,8
489	0,248	276,4
561	0,241	272,4
609	0,239	267,1
1329	0,234	243,3



4
9,3

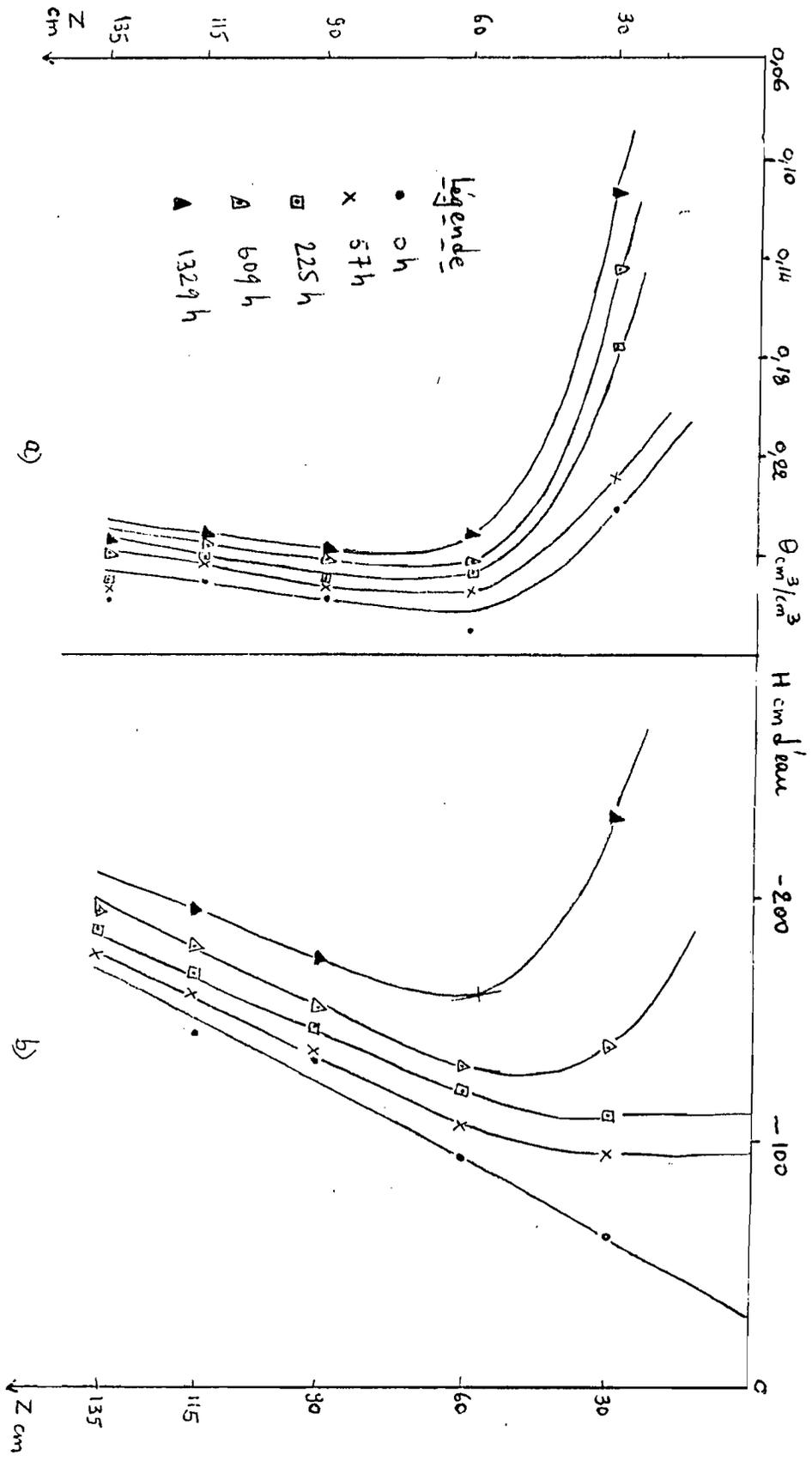


Fig 4 Profiles hydriques (a) et profiles de charge hydrique (b) Essai de caractérisation.

Les charges hydrauliques et les gradients de charge figurent au tableau 4. Il faut noter que les gradients de charge hydraulique, faute de tensiomètres implantés au-delà de la cote 135 cm, ont été estimés par :

$$\frac{dH}{dz} \Big|_{135} = \frac{H_{135} - H_{115}}{20}$$

où H_{135} et H_{115} sont respectivement les charges hydrauliques sur cotes 135 cm et 115 cm. La valeur moyenne du gradient sur toute la période de mesures est égale à (-0,35).

Les profils hydriques et les profils de charge hydraulique sont représentés sur les figures. 4a et 4b.

1.2. Détermination de la relation $K(\theta)$

La conductivité hydraulique est déterminée à partir de l'équation de Darcy :

$$q = -k \frac{dH}{dz} \implies K = - \frac{q}{dH/dz}$$

Les valeurs de q sont obtenues par la relation :

$$q = - \frac{dS_{135}}{dt}$$

D'après la figure 5a la courbe d'évolution du stock en fonction du temps peut être ajustée à une droite de la forme $S = 4 - Lnt$. En correlant S et Lnt , on obtient l'équation suivante :

$$S_{135} = 326,05 - 9,245 Lnt$$

$r = - 0,924$ pour 15 couples de données ;

$$\text{Il vient : } q = + \frac{9,245}{t \text{ (h)}}$$

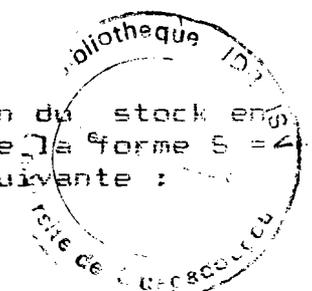


Tableau 4 : Charges hydrauliques aux cotes 115 cm et 135 cm et gradients de charge

Temps (h)	H115 (cm)	dH/dZ	H135 (cm)
Avant essai	- 350	+ 4,3*	- 264
0	- 144	- 2,3*	- 190
9	- 152	- 1,9*	- 190
57	- 162	- 0,4	- 178
81	- 164	- 0,35	- 178
105	- 164	- 0,4	- 180
129	- 164	- 0,4	- 180
153	- 168	- 0,3	- 180
177	- 168	- 0,3	- 180
225	- 170	- 0,35	- 184
249	- 170	- 0,4	- 186
297	- 172	- 0,35	- 186
393	- 178	- 0,3	- 190
441	- 178	- 0,3	- 190
489	- 178	- 0,3	- 190
561	- 180	- 0,25	- 190
609	- 180	- 0,35	- 194
1329	-	-	-

* : valeurs non prises en compte dans le calcul. Le sol est soumis à l'évaporation avant l'essai alors que les mesures tensiométriques ne sont pas encore stabilisées dans les 9 premières heures suivant la fin de l'infiltration.

./...

Une corrélation entre la teneur en eau et le temps (figure 5b) a été faite. Elle a donné l'équation suivante :

$$\theta_{135} = 0,2642 - 0004 \text{ Lnt avec } r = - 0,94 \text{ (n = 10 couples).}$$

Le tableau 5 ci-dessous fournit quelques une des valeurs ainsi obtenues :

Tableau 5 : Valeurs théoriques du flux, de la conductivité hydraulique et de la teneur en eau

Temps (h)	qmm/h	Kmm/h	θ cm ³ /cm ³	θ/θ_0
5	1,85	5,3	0,257	0,886
20	0,46	1,3	0,252	0,869
40	0,23	0,7	0,249	0,858
80	0,115	0,3	0,246	0,848
200	0,046	0,13	0,243	0,837
400	0,023	0,07	0,240	0,827
600	0,015	0,04	0,238	0,820

θ_0 est la teneur en eau à la saturation et vaut 0,29.

La loi $K(\theta)$ est donnée par la formule de BROOKS-COREY :

$$K = K_0 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^B$$

$$\text{ou } \text{Ln}K = \text{Ln } K_0 + B \text{ Ln} \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)$$

./...

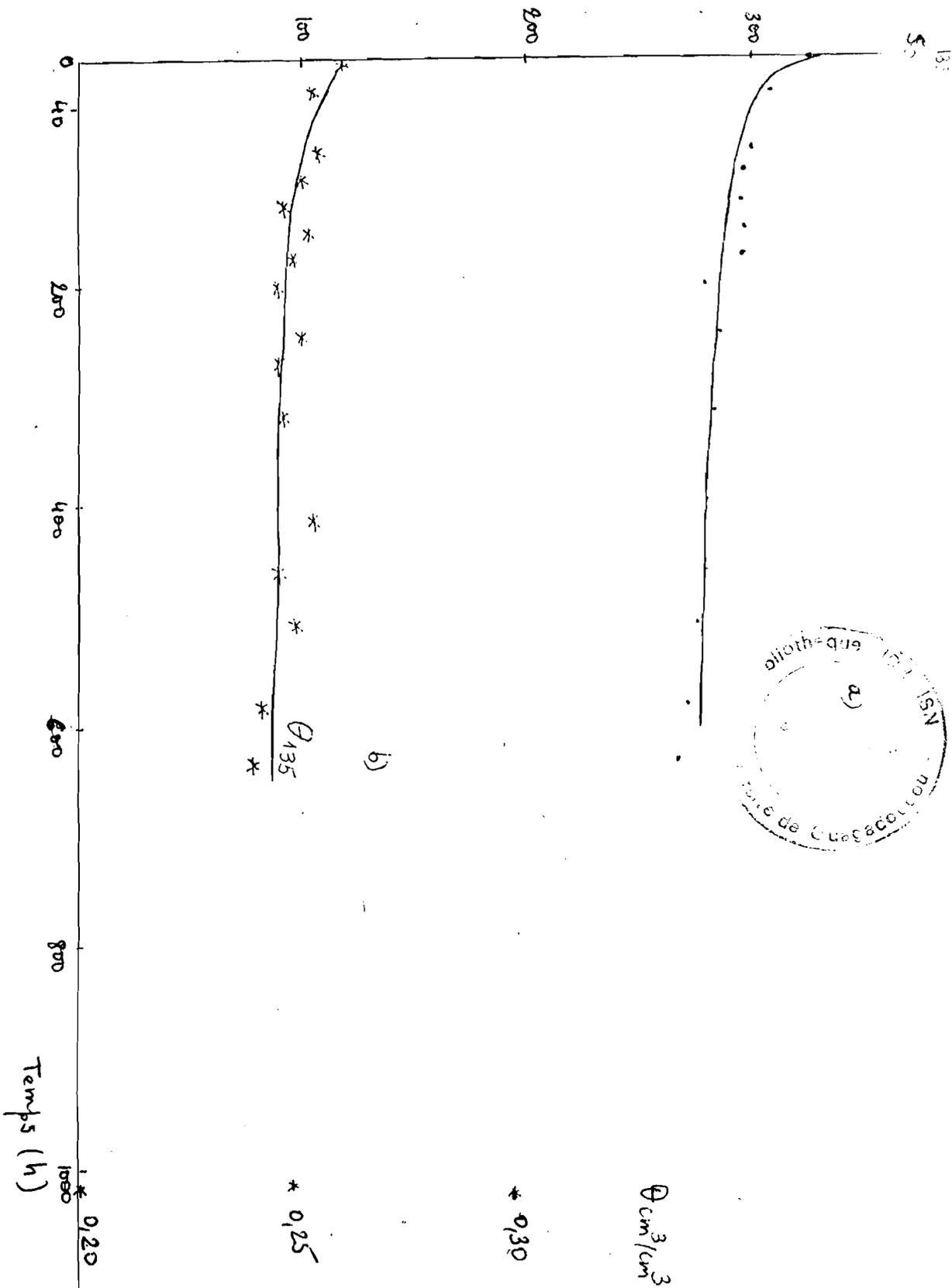


Fig 5 Evolution du stock (0-125cm) (a) et de la teneur en eau à 125cm (b)
Essai de caractérisation.

La relation conductivité hydraulique-teneur en eau est représentée par l'expression :

$$K = 8716 \left(\frac{\theta}{0,24} \right)^{62}$$

(mm/h)

Remarque : K varie fortement avec l'humidité dont la variation est pourtant très faible.

1.3. Validité de l'utilisation de la relation $K(\theta)$

La relation $K(\theta)$ trouvée à la cote 135 cm n'est valable que pour la gamme des teneurs en eau mesurées à cette cote lors de l'essai de caractérisation : $\theta \in [0,234 ; 0,260]$. C'est donc dire qu'on ne peut pas par exemple appliquer la loi de Darcy généralisée lorsque la cote 135 cm est saturée.

III.1.4. Conclusion

Les résultats obtenus avec le site T486 sont caractéristiques des essais classiques de caractérisation hydrodynamique comme le prouvent les profils hydriques, les profils de charge et la courbe $h(\theta)$ (annexe 4). En outre l'intégration des profils hydriques mesurés avant et à la fin de l'infiltration conduit à une variation de stock = 240 mm. En comparant cette valeur à la quantité d'eau apportée (250 mm), on est davantage rassuré sur la fiabilité des données. Cependant, la relation $K(\theta)$ telle que déterminée, est limitée dans son application. Cette dernière remarque est valable pour les autres sites de l'essai car on a obtenu une gamme restreinte de teneur en eau à la cote 135 cm, la panne de la sonde ayant par ailleurs empêché de poursuivre les mesures.

./..

III.2. DYNAMIQUE DE L'EAU A LA PARCELLE

Les résultats présentés dans cette partie sont ceux des traitements 4 et 1 du bloc VI où la caractérisation hydrodynamique a été faite. Ces deux sites serviront d'exemples pour expliquer la dynamique de l'eau.

L'analyse de l'évolution temporelle du stock d'eau, de la teneur en eau à $z = 135$ cm, des charges hydrauliques à 115 cm et à 155 cm, de la piézométrie (moyenne à l'échelle du dispositif) et des profils hydriques pour les deux sites, permet les commentaires suivants (fig. 6, 7, 8, 9, 10 et 11) :

la dynamique de l'eau a été très fortement influencée par la présence de la nappe et les engorgements superficiels (voir figure 17) consécutifs à la distribution pluviométrique. Le sol, dont l'humectation a été progressive du haut vers le bas dans un premier temps par infiltration de l'eau de pluie, a connu par la suite une saturation depuis la profondeur jusqu'à moins de 80 cm à cause de la remontée de la nappe (figures 10 et 11). Tout cela a contribué au maintien d'une forte humidité dans les couches profondes et même en surface où l'on a observé des engorgements par endroits avec la succession des pluies des mois d'août et de septembre. La bonne concordance des appareils de mesure a permis d'observer les mêmes phénomènes pendant la durée de leur fonctionnement.

A titre d'exemple, l'évolution simultanée des charges hydrauliques aux cotes 30, 115 et 155 cm pour chaque traitement est présentée en annexes 6, 7, 8, 9.

Conclusion

Tout au long de la campagne, les teneurs en eau du sol ont été suffisamment élevées pour permettre une bonne croissance et un bon développement de la culture sur toutes les parcelles. L'alimentation hydrique n'a donc pas été un facteur limitant et c'est pour cela qu'on n'a pas observé de différences entre les traitements dans la dynamique de l'eau.

./..

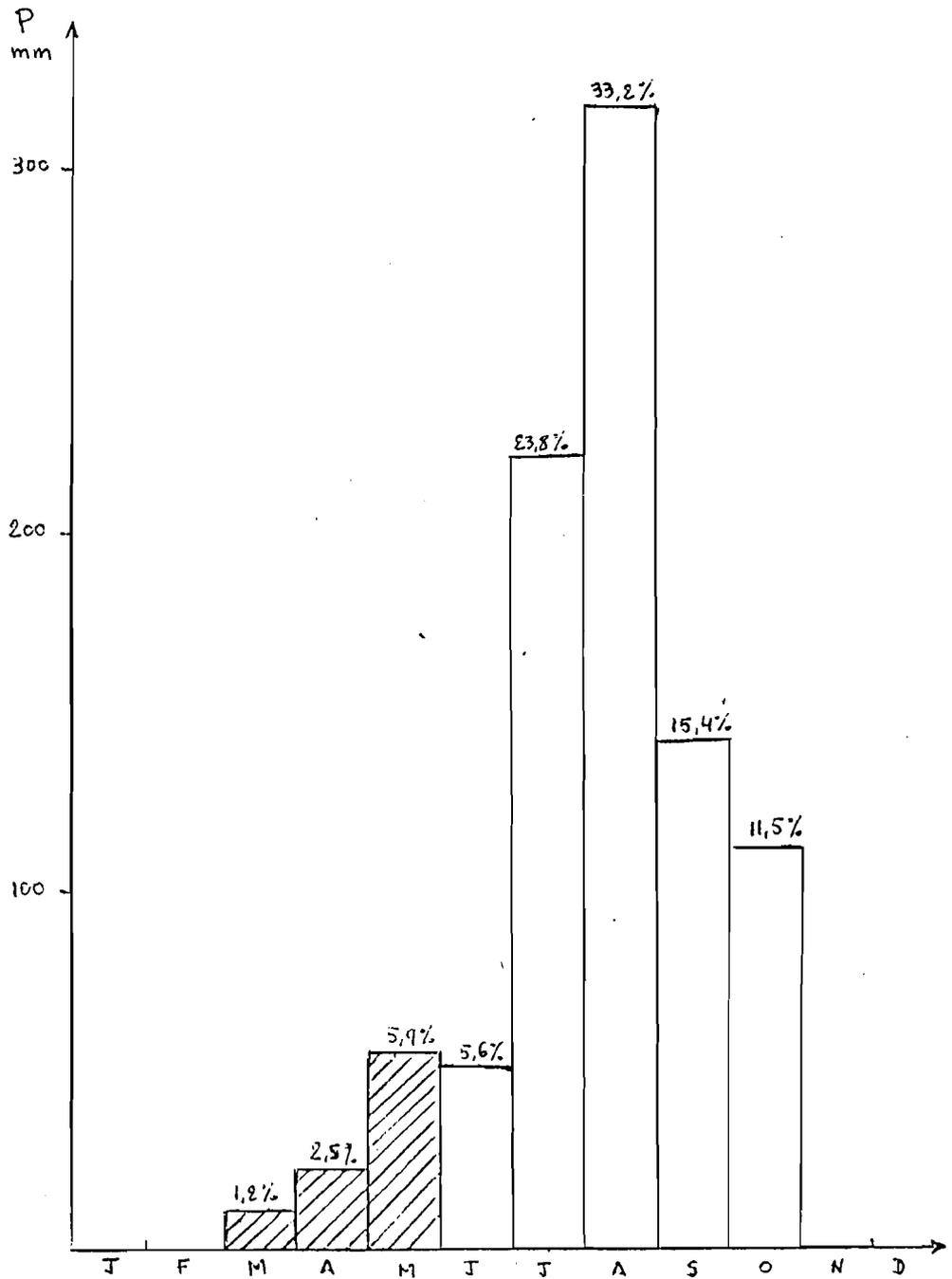


Fig 6 Pluviométrie mensuelle 1989

- ▨ données de la station météo
- données du site de l'essai

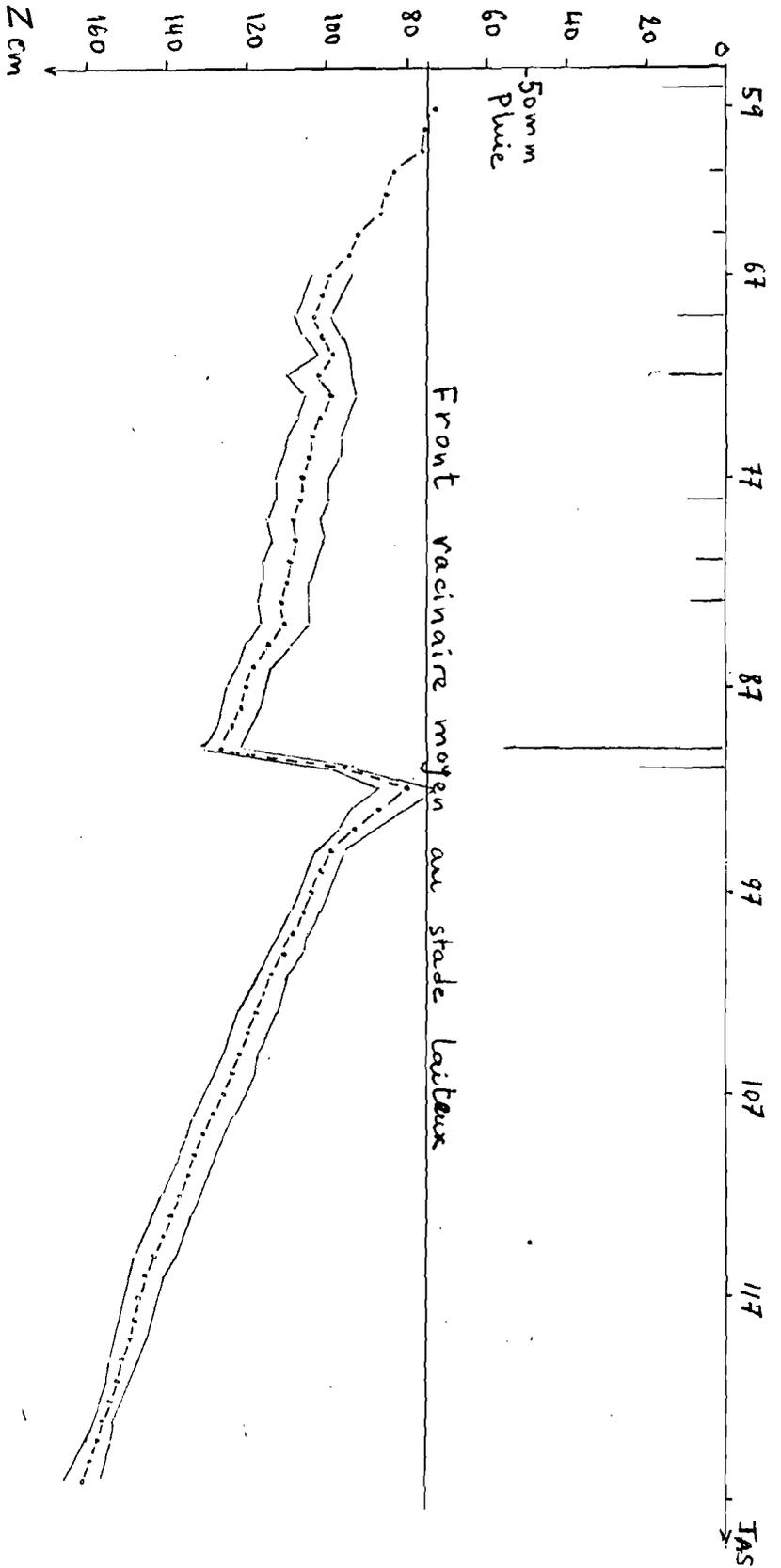


Fig 7 Evolution du niveau moyen de la nappe affecté des écarts-types.
--- moyenne
=== bande des écarts-types.

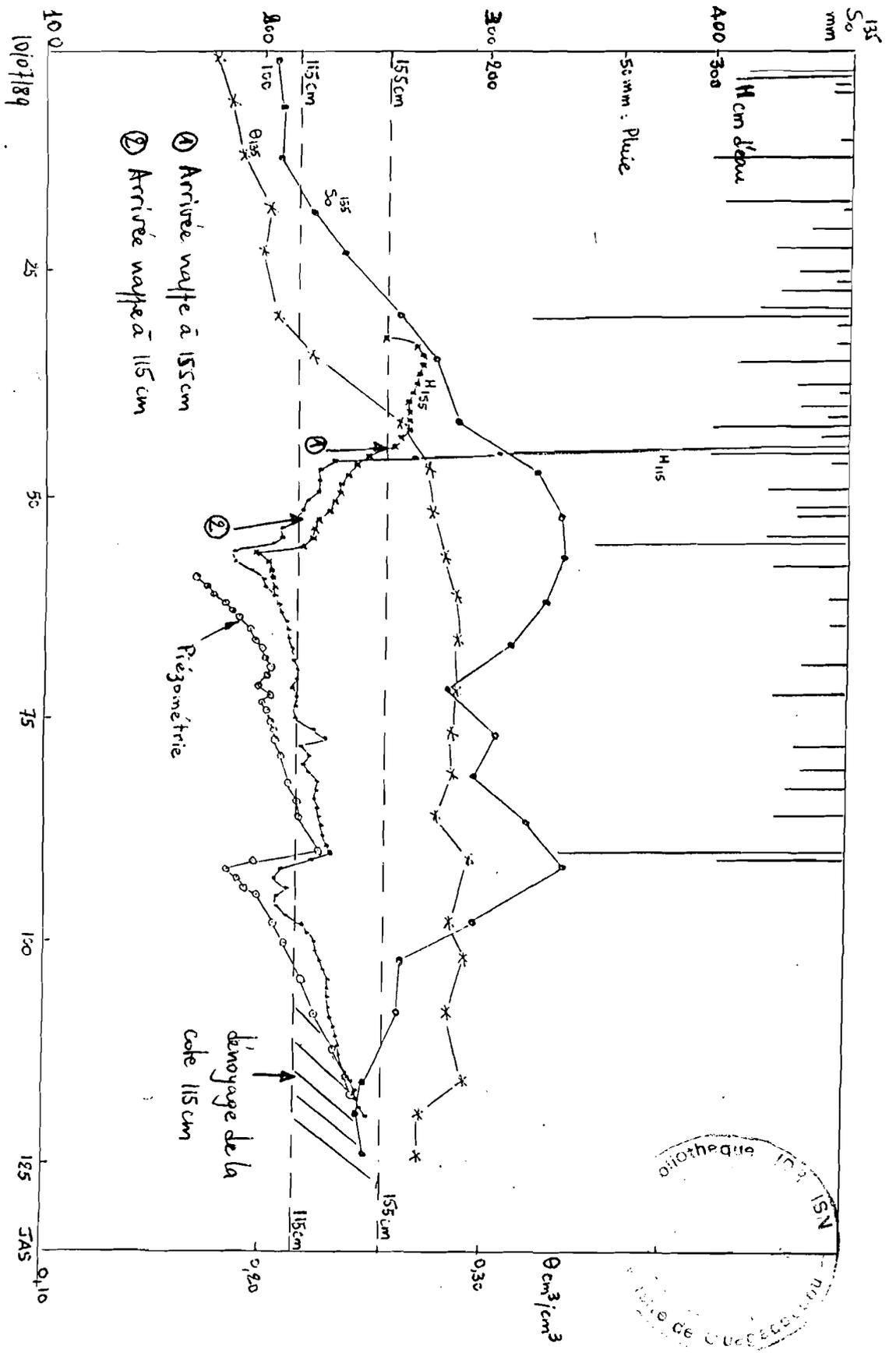


Fig 8 Evolution du stock d'eau à 135 cm, de la teneur en eau à 155 cm, des charges hydrostatiques à 135 cm et à 115 cm et de la piézométrie sur le terrain.

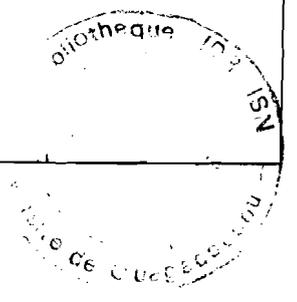


Fig 3 Evolution du stock [0-135cm], de la teneur en eau à 135cm, des charges hydrauliques à 135 et à 115 cm et de la piézométrie sur le traitement 4.

-43-

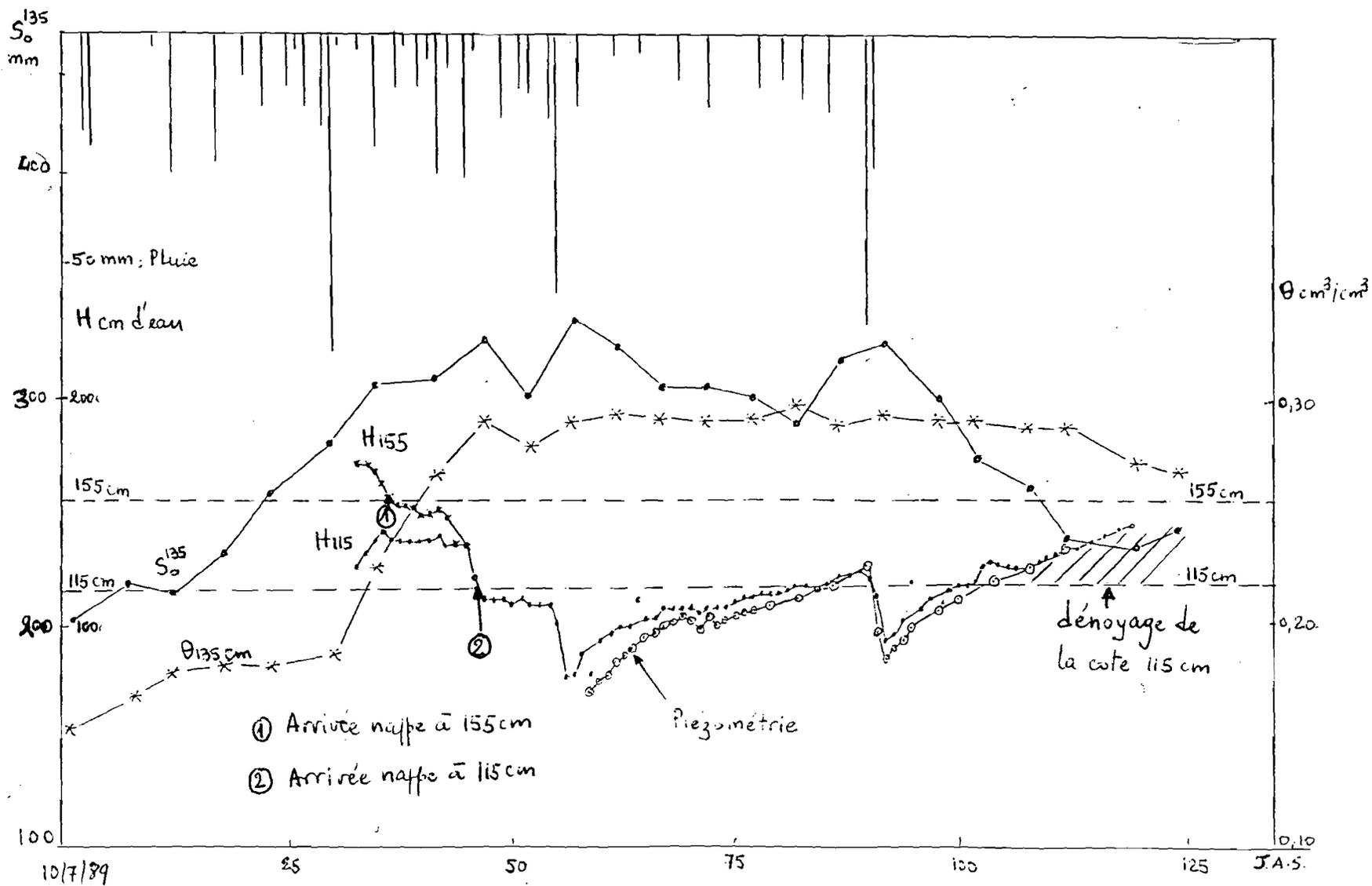


Fig 10 Evolution des profils hydriques sur le témoin

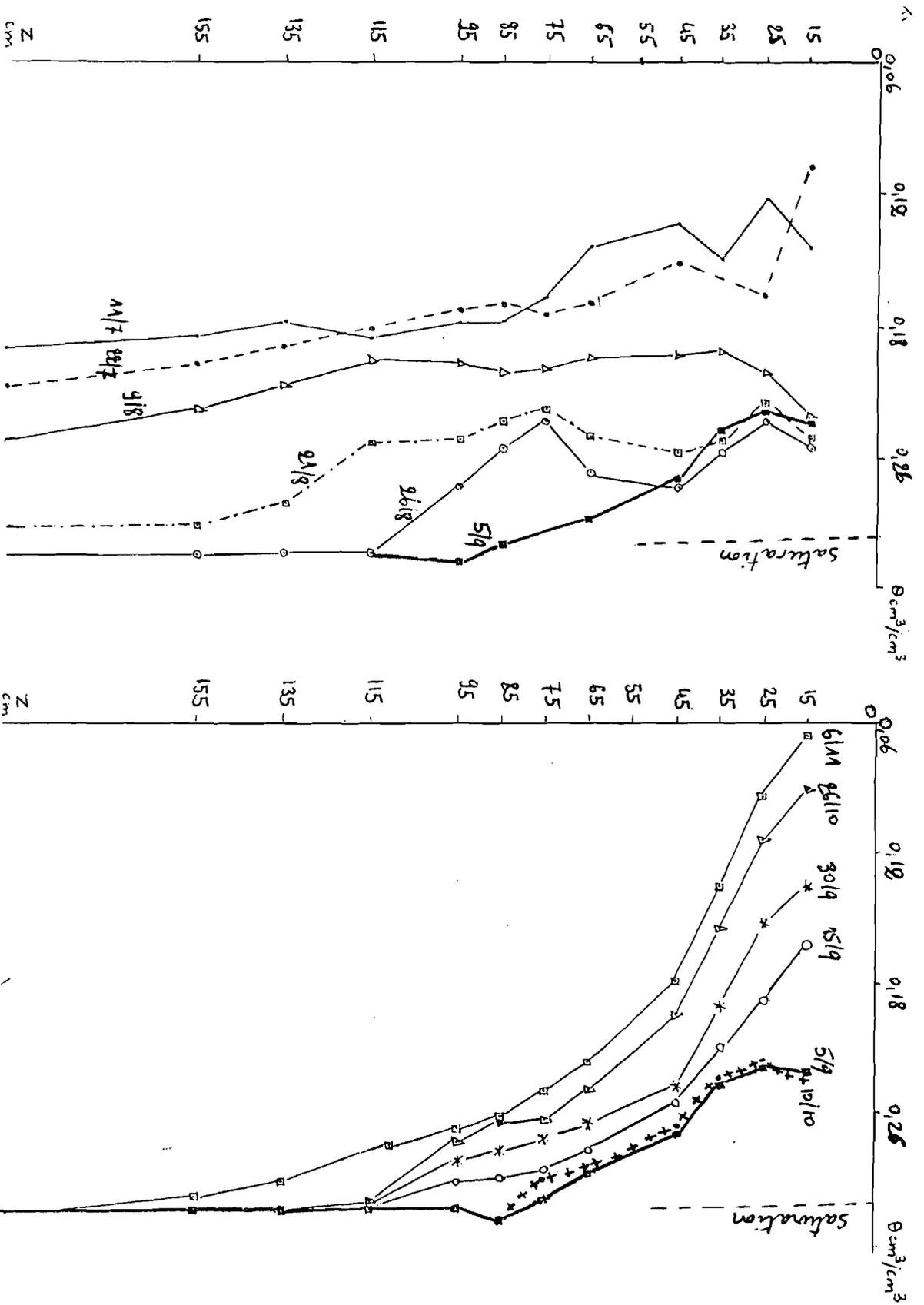
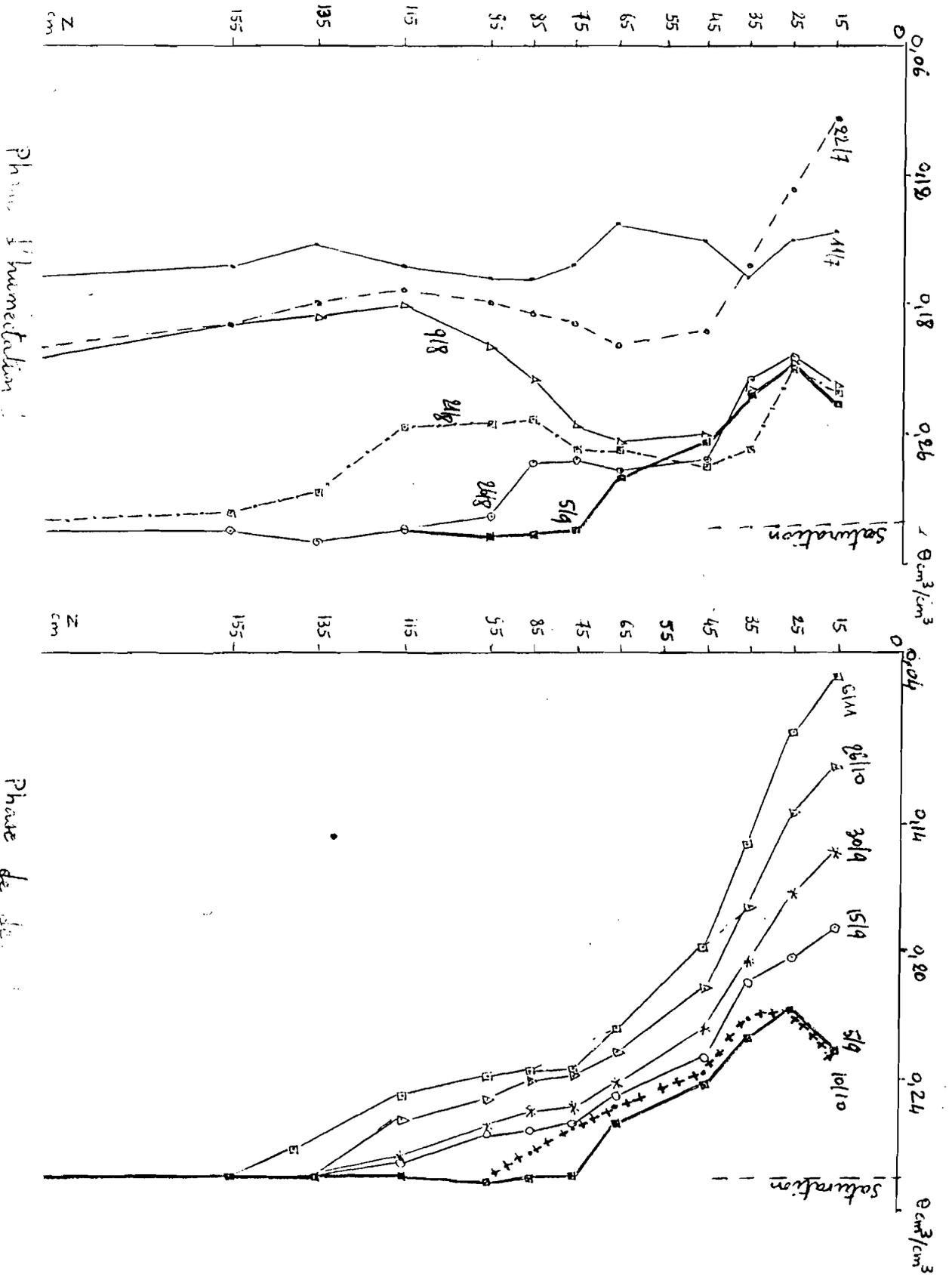


Fig 11 Evolution des profils hydriques sur le traitement 4.



III.3. EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LES BILANS HYDRIQUES

3.1. Principe du calcul des composantes du bilan hydrique

La bonne pluviométrie, la remontée de la nappe et la position des tensiomètres n'ont pas facilité la détermination du drainage et du ruissellement et par conséquent de la consommation en eau de la culture. Il a cependant été possible de calculer cette consommation à partir de la démarche développée ci-dessous.

3.1.1. Estimation du drainage

L'examen des cinétiques $S(t)$, $\theta(t)$, $H(t)$ (figures 8 et 9) conduit à considérer sur l'ensemble de la période de mesures neutro-niques (11/7 ---> 11/11/89) différentes situations :

- premier cas : la nappe est située en-dessous de la cote 205 cm. Le flux à 135 cm est estimé par la variation de stock (ΔS_{135}^{205}) si l'on néglige le flux à 205 cm.

$$q_{mm/j} = \frac{\Delta S_{135}^{205}}{\Delta t}$$

- deuxième cas : lorsque les tensiomètres indiquent un flux descendant à la cote 135 cm et si l'on peut appliquer la loi de Darcy (voir essai de caractérisation hydrodynamique), le flux est estimé par :

$$q_{mm/j} = -K(\theta) \frac{dH}{dz}$$

Les charges hydrauliques sont celles des cotes $Z_1 = 115$ cm et $Z_2 = 135$ cm.

./..

- troisième cas : lorsque la cote 135 cm se trouve dans la zone saturée par suite de la remontée de la nappe, le flux à $Z = 135$ cm est estimé à partir de la vitesse d'évolution de la surface libre de la nappe V_s selon l'expression :

$$q_{mm/j} = V_s \cdot \Delta\theta$$

où $V_s = \frac{Z_{nappe}(t_2) - Z_{nappe}(t_1)}{\Delta t}$ avec (Z_{nappe} = niveau de la nappe au temps t).

$\Delta\theta$ correspond à une pseudo-porosité effective estimée par la différence entre la teneur en eau à saturation de la tranche de sol [115 - 205 cm] et la teneur en eau à l'état le plus sec pour laquelle on admet que la conductivité hydraulique est négligeable.

Il y a percolation si $q > 0$ et remontée de la nappe si $q < 0$. On notera que ces cas décrits ci-dessus se rencontrent successivement du semis à la récolte et que l'application du principe exige un découpage du cycle en différentes phases correspondant à chaque situation.

3.1.2. Détermination du ruissellement et de la consommation en eau

Ces deux termes ont été déterminés selon les hypothèses décrites aux paragraphes 3.3.2.3 (ruissellement) et 3.3.3.4 (ETR).

3.2. Résultats des bilans hydriques

Les bilans hydriques ont été déterminés pour les seize (16) parcelles équipées en tensiomètres. On se contentera ici de présenter les composantes du bilan du traitement 4 du bloc VI en guise d'exemple (tableau 6). Les composantes du bilan hydrique de toutes les parcelles sont présentées en annexe 5.

./..

Tableau 6 : Composantes du bilan hydrique de 1966

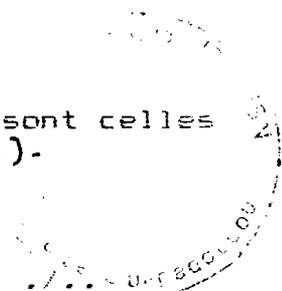
JAS	Date	P mm	D mm	ETRA mm	ETM mm	*R mm	ETR mm	ETR mm/j	
	11/7	49,6	203	19,3	19	29	0	19	1,6
12	22/7	135	214	2,3	67	57	10	57	3,2
30	9/8	127,8	280	9,8	89	40	49	40	3,3
42	21/8	186,8	309	-42	203	79	124	79	5,3
57	05/9	19	335	23	26	50	0	26	2,6
67	15/9	76	305	17	47	116	0	47	2,3
87	05/10	91	317	-14	98	13	84	13	2,6
92	10/10	0	324	30,2	33	71	0	33	2,1
108	26/10	0	261	21	5	43	0	5	0,4
119	6/11		235						
Total		685	+32	67	-	498	267	319	-

La lame d'eau écoulée à 135 cm se décompose en :

* 123 mm de pertes par percolation

* 56 mm de remontées de la nappe

* $ETM = K'c \times Ev$ bac (les valeurs de $K'c$ sont celles d'une variété de sorgho de 120 jours)-



Le tableau 7 donne les consommations globales (en mm) par traitement.

Tableau 7 : Consommations globales (mm)

Blocs Trait.	BIII	BIV	BV	BVI	Total	\bar{X}
T1	411	358	309	342	1420	355 \pm 42,5
T2	356	393	357	322	1428	337 \pm 28
T3	361	317	323	349	1350	337,5 \pm 21
T4	398	339	345	319	1401	350 \pm 33,7

Le tableau ci-dessus montre que les consommations globales sont très variables pour le même traitement. D'une façon générale, ces données n'obéissent pas à une loi particulière qui permette de tirer une relation simple ETR-traitements. On se limitera alors à ces remarques en attendant que d'autres informations viennent les compléter.

./...

III.4. EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LA CROISSANCE ET LE DEVELOPPEMENT DES PLANTES

4.1. Effets des traitements sur la levée

Les comptages de levée ont donné les résultats suivants :

Tableau 8 : Pourcentage de levée

T1	T2	T3	T4	T5	T6
94 %	97 %	85 %	85 %	89 %	95 %

Au regard des données, les parcelles labourées ont connu une levée moins bonne que les autres parcelles. Les conditions du lit de semence en liaison avec les premières pluies auraient joué un rôle défavorable sur les traitements avec labour.

4.2. Effets des traitements sur la croissance en hauteur

La figure 19 présente la croissance linéaire du sorgho. Un mois après semis, seul le témoin a les plantes les plus courtes, les autres traitements étant à égalité. Pendant les 30 jours suivants, le sorgho a connu une croissance active où l'allongement a atteint son maximum comparé à ceux des autres phases. Entre les deuxième et troisième mois, la croissance sera ralentie pour s'annuler après, les plantes ayant leur taille maximum au troisième mois après semis. Tout au long du cycle, le témoin a toujours été inférieur aux autres traitements. Le traitement 4 s'est le plus détaché des autres traitements avec fertilisation après le premier mois.

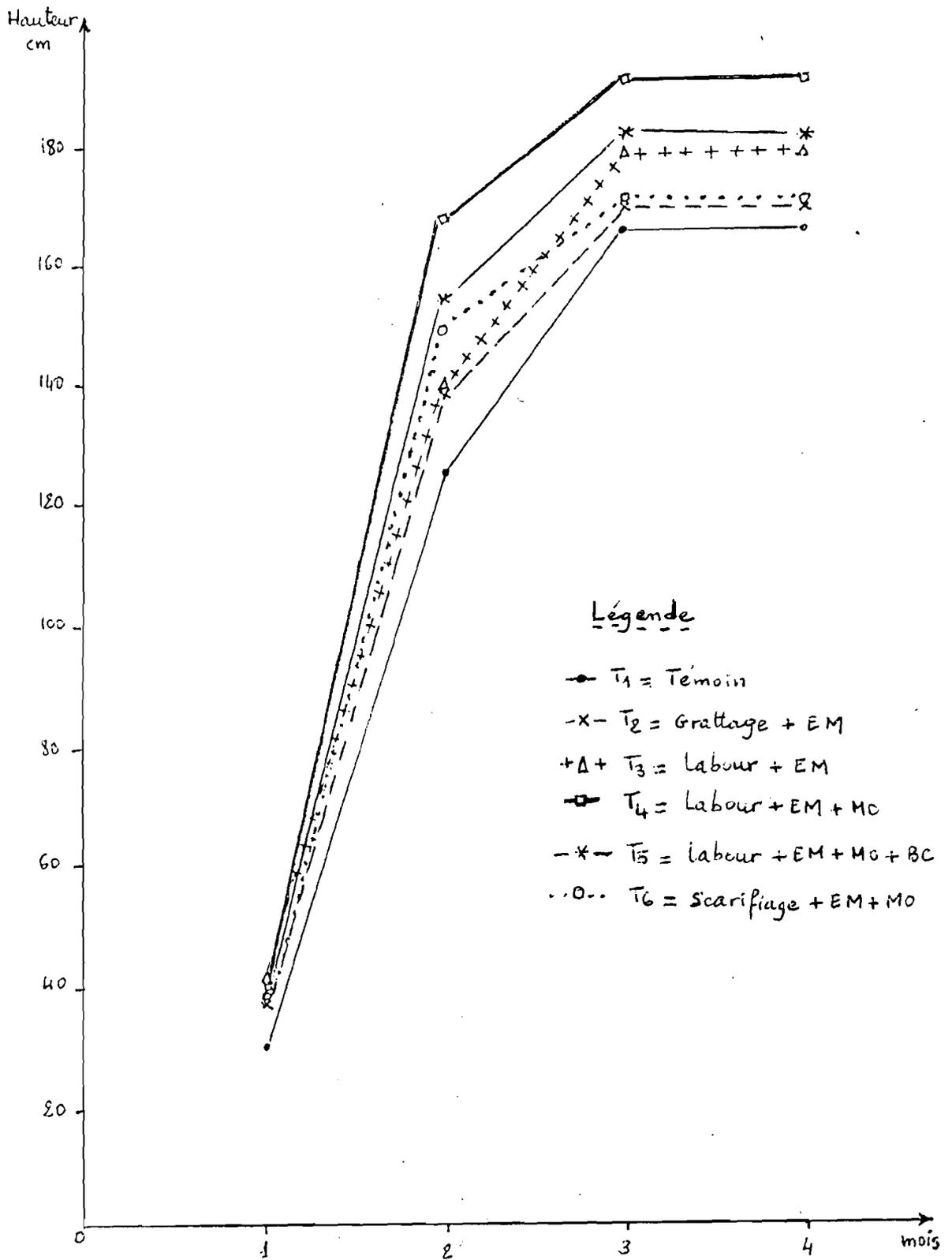


Fig 12 Croissance linéaire du sorgho

Conclusion

L'effet des techniques culturales sur la croissance en hauteur des plantes n'a été vraiment appréciable que pour les engrais minéraux. Il est difficile de trouver des raisons satisfaisantes pour expliquer la performance réalisée par T4 à certains moments. En effet il n'y a pas eu une tendance nette en faveur du travail du sol ou de la matière organique.

4.3. Effets des traitements sur l'enracinement

Les racines sont le passage de l'eau et des éléments minéraux puisés dans le sol. L'étude du système racinaire permet de connaître les possibilités réelles offertes à la plante pour assurer son alimentation hydrique et minérale. Les résultats seront commentés en fonction des paramètres retenus.

La profondeur du front racinaire

Tableau 9 : profondeur d'enracinement (cm)

	T1	T2	T3	T4	T5
Montaison	35	35	60	55	-
Stade laiteux	75	80	75	70	75

Les racines vont plus profondément dans le sol à la montaison sur les traitements avec labour (T3 et T4) alors que T1 et T2 sont égaux. Au stade laiteux, il n'y a pratiquement pas de différences entre les traitements qui ont un front racinaire moyen situé à 75 cm. Cette profondeur correspond au niveau maximum atteint en général par la nappe dans les parcelles. Lors des profils racinaires, on a constaté parfois la nécrose de certaines racines dans les galeries des termites alors qu'elles s'y étaient abondamment ramifiées ; la nappe était montée jusqu'à leur niveau. Il semble donc que la présence de la nappe ait joué un rôle défavorable dans la progression du front racinaire en créant un milieu asphyxiant pour les racines.

Fig 13 Profils de densité racinaire:
 a) Montaïson
 B) Stade laitieux

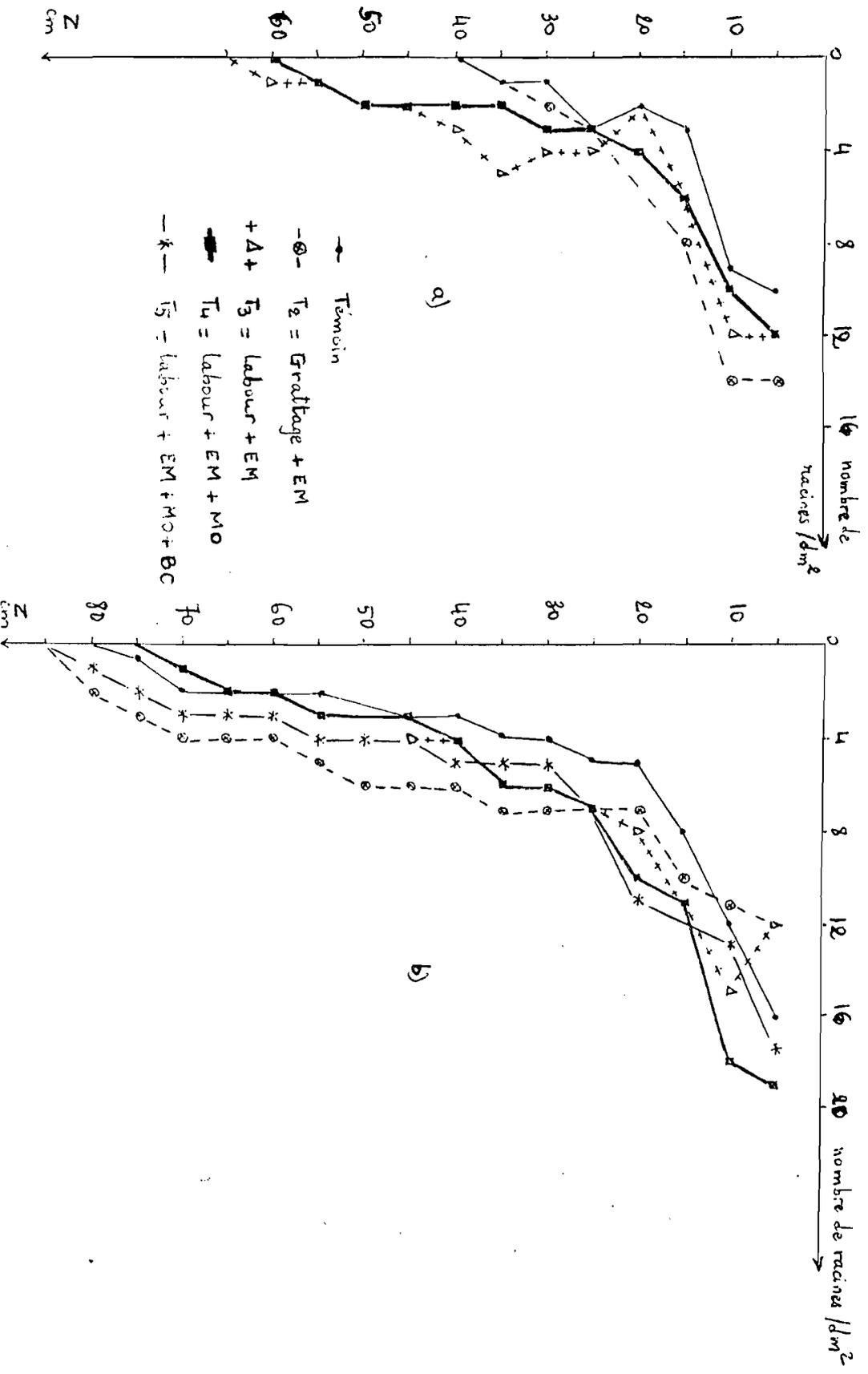
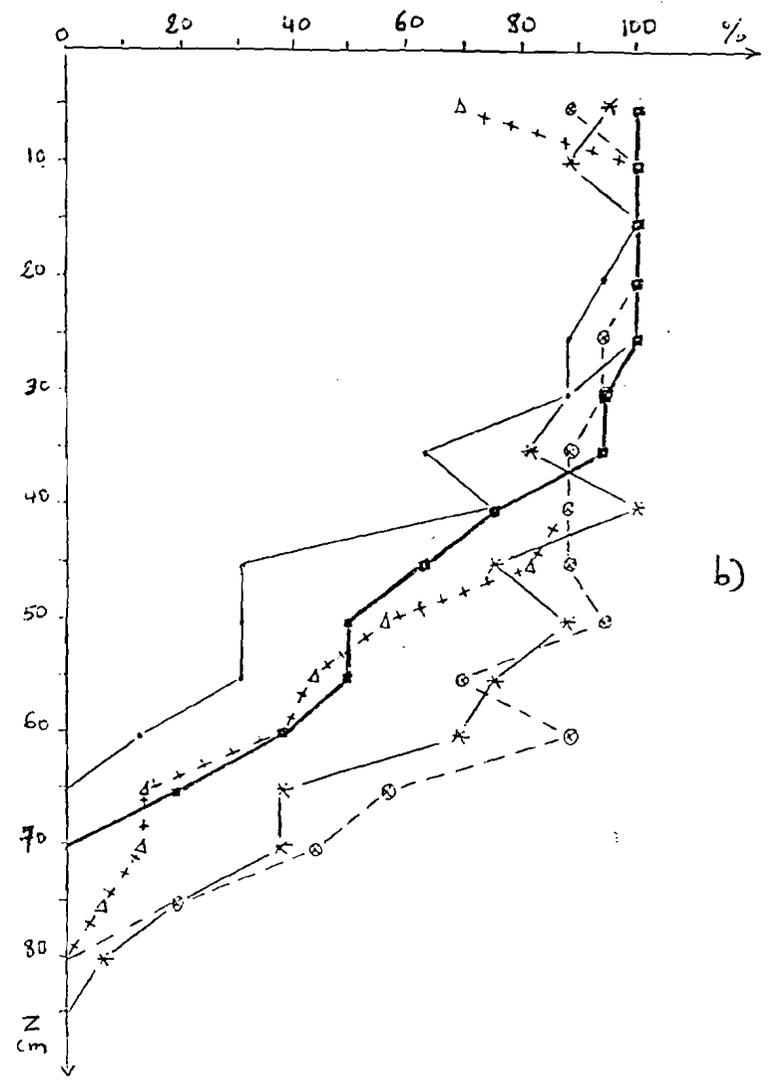
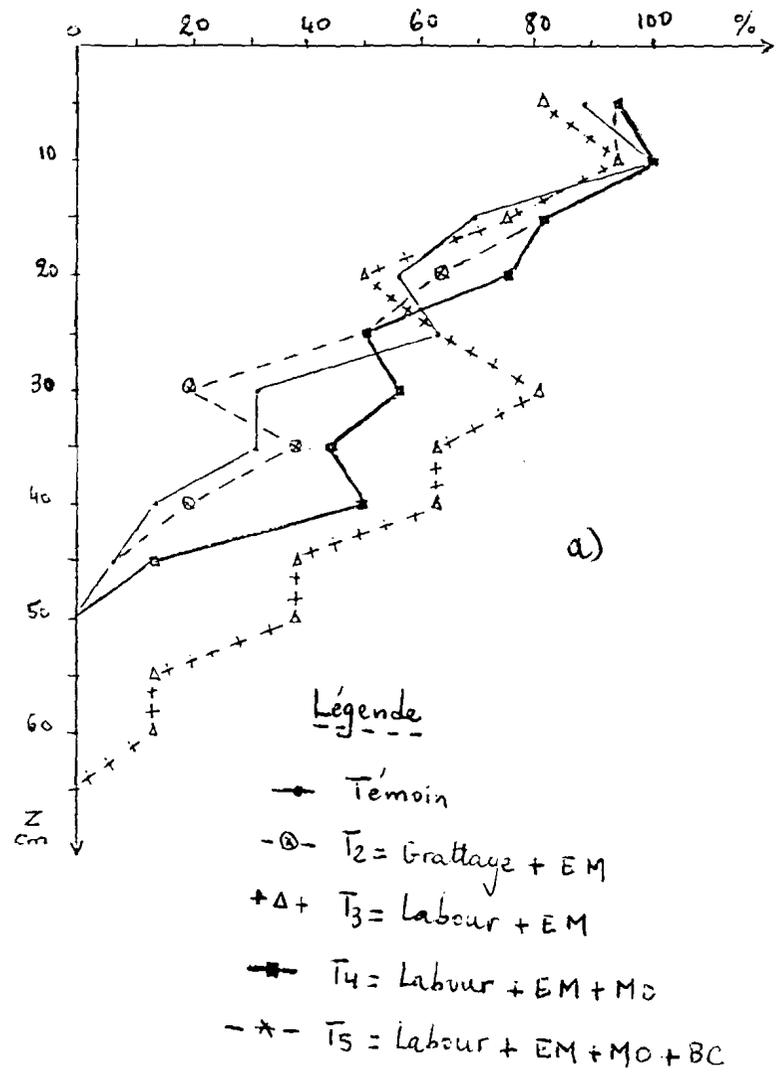


Fig. 14. Pourcentage de cases ayant au moins une racine en fonction de la profondeur.

a) Montaison
b) Stade lacteur

-54-



Légende

- Témoin
- T₂ = Grattage + EM
- +△+ T₃ = Labour + EM
- T₄ = Labour + EM + MO
- *- T₅ = Labour + EM + MO + BC

Le degré de colonisation par les racines

Les courbes de densité racinaire (figure 13) et de répartition des racines dans le profil (figure 14) montrent que la densité racinaire et corrélativement le remplissage des cavités, plus importants en surface, décroissent rapidement avec la profondeur pour tous les traitements. A la montaison, les racines de T2 explorent mieux le sol sur l'horizon [0-20 cm], mais cette légère supériorité s'interrompt en profondeur au profit de T3 et T4.

Au stade laitieux, les racines sont plus denses et mieux réparties en surface sur les traitements avec matière organique (T4 et T5) ; en profondeur T2 et T5 sont meilleurs. Dans tous les cas, le témoin (T1) est toujours inférieur aux autres traitements.

Le nombre de grosses racines

L'évolution dans le temps du nombre de racines principales émises par la plante peut être un indicateur de l'état de la plante et de ses réactions aux caractéristiques et contraintes du milieu.

Tableau 10 : Nombre de grosses racines

	T1	T2	T3	T4	T5
Montaison	12	12	14	14	-
Stade laitieux	16	15	14	23	24

Le nombre de grosses racines augmente avec le temps sauf pour T3. Ce nombre est plus important pour les traitements avec matière organique (T4 et T5) au stade laitieux.

Conclusion

Les résultats de l'étude de l'enracinement ont été très hétérogènes à l'intérieur d'un même traitement.

Il ressort d'une façon générale, que le labour a favorisé la progression du front racinaire en début de culture, mais que la présence de la nappe l'aurait peut-être limitée. La fertilisation minérale semble avoir été le facteur le plus déterminant sur le degré de colonisation du sol par les racines, tandis que la matière organique aurait permis une meilleure colonisation des horizons superficiels au stade laiteux en activant la rhizopneuse.

III.4.4. Effets des traitements sur les dates d'épiaison - floraison

Les périodes des épiaisons sont données par le tableau 11 ci-dessous.

Tableau 11 : Périodes des épiaisons en J.A.S

Epiaison Traitements	Epiaison		
	Début	50 %	100 %
T1	68-74	72-75	79-86
T2	66-70	69-75	73-81
T3	65-68	70-74	74-81
T4	65-69	69-74	72-86
T5	65-68	68-72	72-78
T6	65-68	68-73	73-80

Presque toutes les plantes ont épié 81 jours après semis. Celles qui n'étaient pas encore à épiaison avaient beaucoup subi les effets de l'engorgement. L'écart des dates d'épiaison entre le témoin et les autres traitements est de 3 jours au début et à 50 % épiaison et d'une semaine à 100 % épiaison.

Les techniques culturales dans leur ensemble n'ont pas agité de façon remarquable sur ce stade phénologique du sorgho. Tous les traitements avaient la même chance d'arriver à maturité, l'humidité du sol étant partout favorable.

4.5. Conclusion

L'étude de l'enracinement a montré que le système racinaire du témoin était moins dense et moins profond que celui des autres traitements. Ceci implique que le volume de sol exploré par les racines et par conséquent la disponibilité de l'eau pour la culture sont plus faibles chez T1. Mais on a vu précédemment que l'alimentation en eau n'avait pas été un facteur limitant par défaut. On peut alors s'attendre à ce que les consommations d'eau soient les mêmes malgré les différences d'enracinement entre le traitement 1 et les autres.

III.5. EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LA PRODUCTION5.1 Caractéristiques des rendements

Les rendements constituent sans doute le critère le plus en vue pour apprécier la performance des techniques culturales. Ils sont en effet l'aboutissement de tous les efforts consentis et reflètent au mieux les conditions d'alimentation hydrique et minérale des cultures. Les résultats des rendements et de leurs composantes sont illustrés par le tableau 12 ci-dessous :

Tableau 12 : Rendements et composantes du rendement du sorgho

Trai- tement	Paquets récoltés		Nbre total de panicules /ha	Panicules pleines		Poids 1000 grains (g)	Poids panicu- les kg/ha	Poids grains kg/ha	Poids pailles kg/ha	Poids grains ----- Poids pailles
	Total	%		Total	%					
T1	27604	88,3	58854	51302	87,1	25,0	2070	1747	3519	0,40
T2	28385	90,8	61328	55469	90,4	28,5	3349	2721	4590	0,59
T3	28646	91,6	65365	59115	90,4	28,4	3164	2608	4807	0,54
T4	27083	86,6	61198	52083	85,1	28,7	2706	2220	4970	0,44†
T5	27865	89,1	59895	55208	92,0	28,7	3198	2652	4926	0,54
T6	29948	95,8	67708	60156	88,8	29,7	3549	2882	5295	0,54
CV								39,2%	32,8%	
Test de NEWMAN-KEULS								NS	NS	

- Les pourcentages de poquets récoltés sont calculés par rapport au nombre total théorique de poquets (31250/ha). Ceux du nombre de panicules pleines sont calculés par rapport au nombre total de panicules récoltées/ha. Les résultats montrent que ces pourcentages sont assez élevés dans l'ensemble, mais qu'ils sont plus faibles pour le témoin, le T4 constituant un cas exceptionnel.

./...

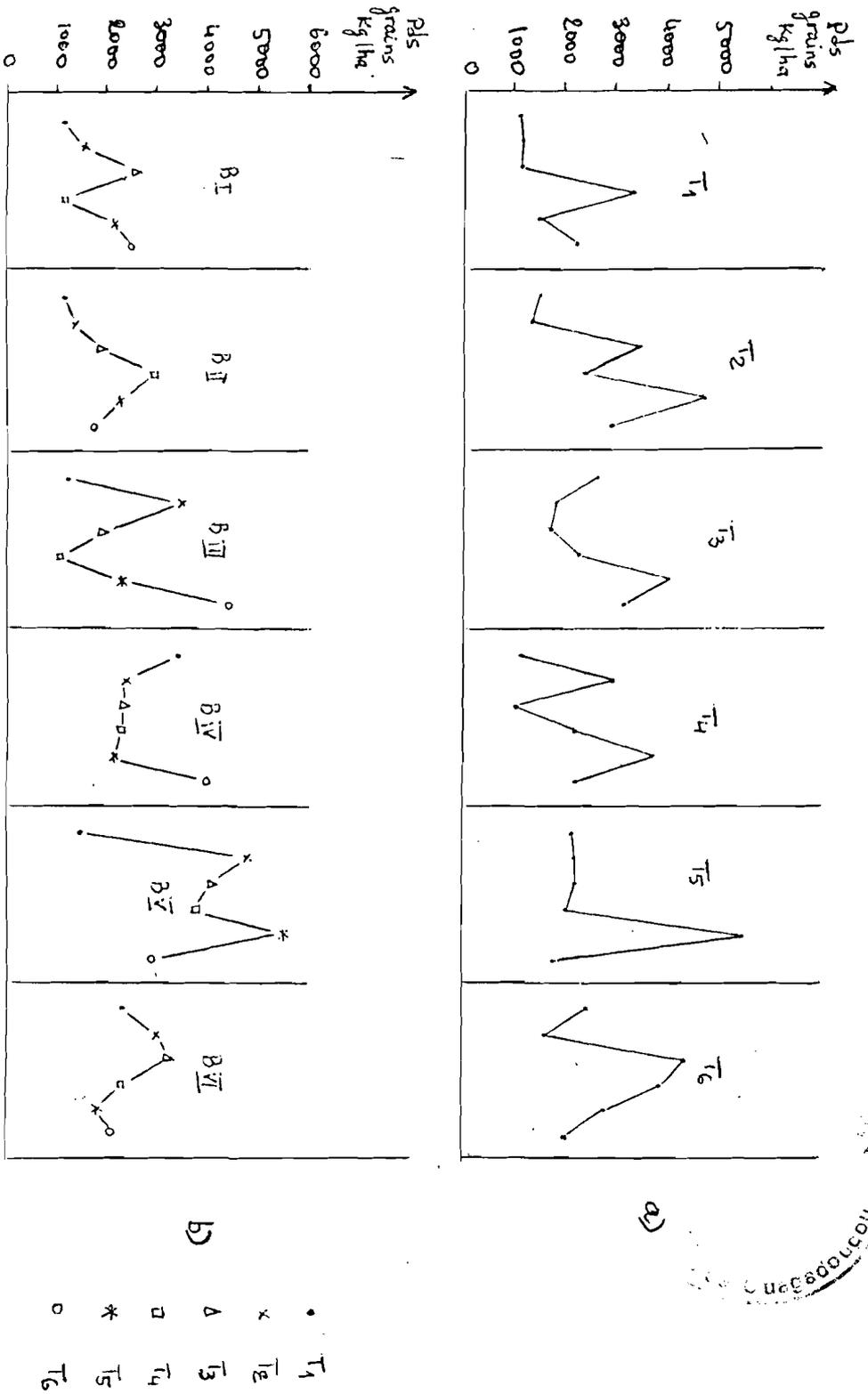


Fig-15 Courbes de variabilité des rendements en Grains
 a) variabilité intra-traitements
 b) variabilité inter-blocs

- On constate, avec les poids de 1000 grains, que seul le témoin a un remplissage des grains moins important que celui des autres traitements. Il n'apparaît pas à ce niveau l'effet du travail du sol et de la matière organique.

- Le rapport poids grains/poids pailles est plus faible pour le T1 et surtout le T4. Le faible rapport de T4 s'expliquerait par le bas rendement en grains observé sur certaines parcelles de ce traitement consécutivement à l'engorgement. On admettra donc que le rapport entre les poids des grains et ceux des pailles sont identiques pour tous les traitements sauf le témoin.

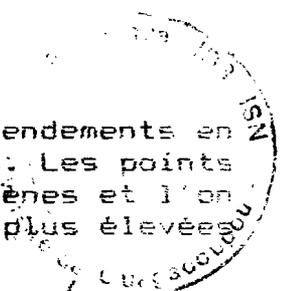
Il faudrait noter que les rendements en grains seraient certainement plus élevés si la culture n'avait subi d'attaques assez remarquables de la part des champignons et des insectes dont des chenilles (il y en avait surtout du genre *Heliothis*), des punaises et des forficules. Ces attaques ont eu lieu au stade laiteux et la compacité des panicules n'a pas permis de découvrir à temps leurs agents.

- L'analyse de variance (STAT-ITCF) réalisée sur les productions en grains et en pailles montre que ces rendements sont très variables (voir coefficients de variation et figure 15). Cela signifie que la part des facteurs aléatoires a été très importante dans l'essai. Quoique les traitements, dans leur ensemble, ne montrent pas de différences significatives entre leurs moyennes au seuil de 5% (la puissance a posteriori = 33% pour les grains et 29% pour les pailles), les rendements du témoin sont bien inférieurs à ceux des autres traitements. En effet les rendements en grains de T1 s'écartent de la moyenne générale de $\pm 362,5$ kg et ceux des pailles s'écartent de la moyenne générale de $\pm 582,5$ kg.

En conclusion, on peut retenir que la part des facteurs non maîtrisables a été importante dans l'essai si bien que les écarts entre traitements sont probablement inférieurs au seuil de 5%. Les engrais minéraux ont été pour l'essentiel, la cause de la différence entre le témoin et les autres traitements.

5.2. Consommations en eau et production de la culture

Les figures 16a et 16b présentent les rendements en grains et en pailles en fonction des ETR globales. Les points sont répartis en trois groupes plus ou moins homogènes et l'on constate aussi que les parcelles qui ont les ETR les plus élevées



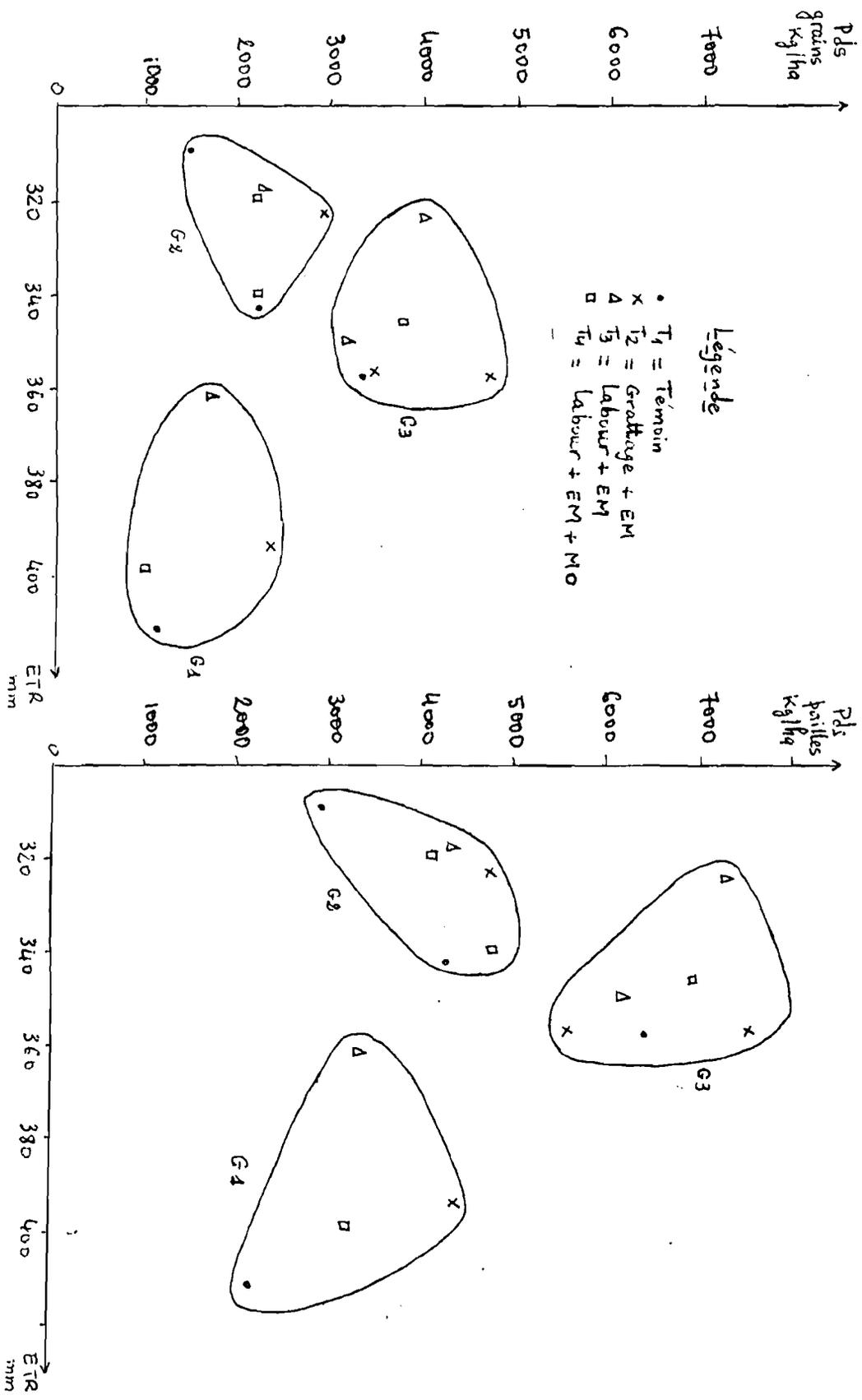
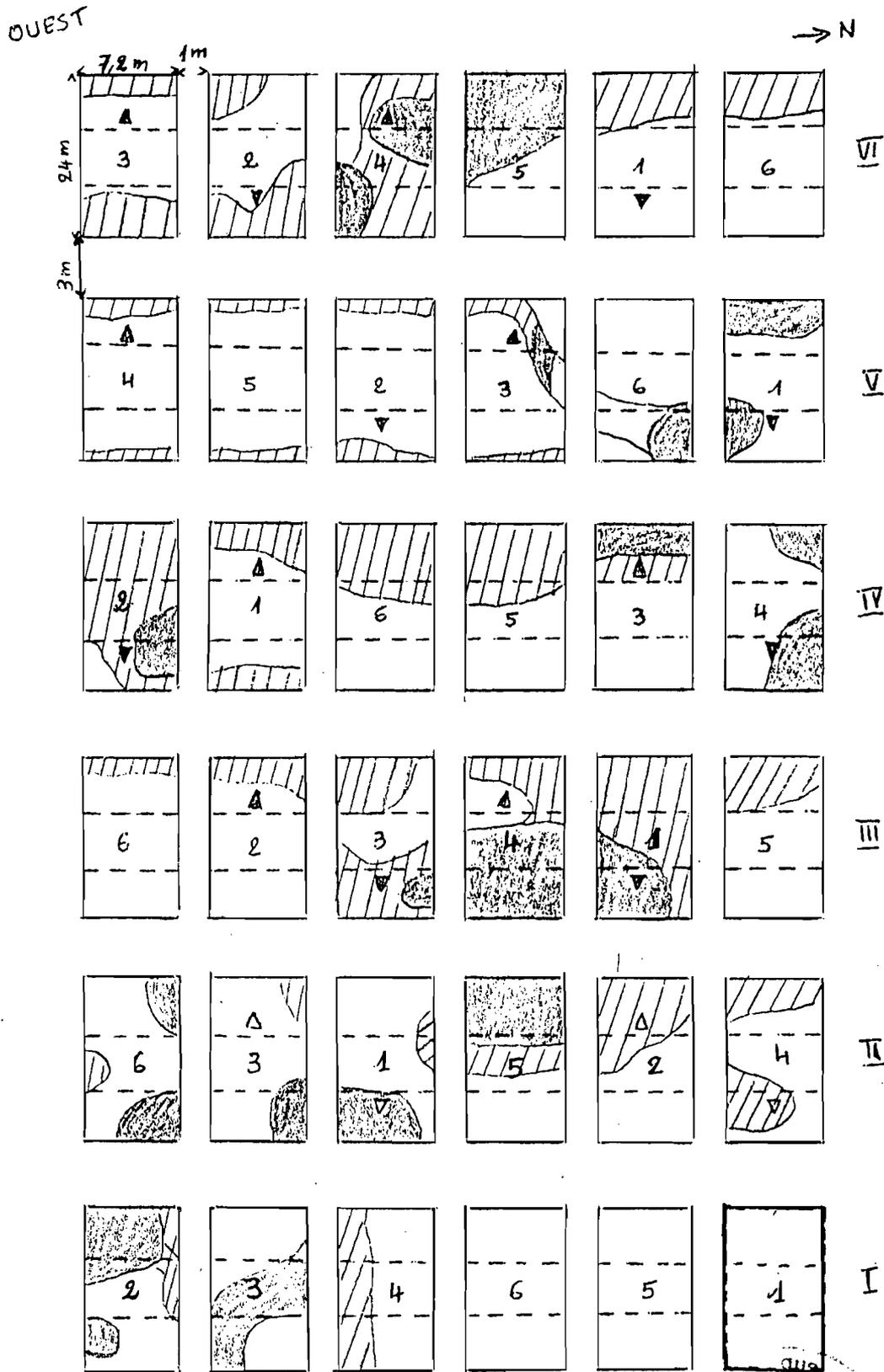


FIG. 16. Relation entre les ETR et les rendements
 a) ETR-rendements en grains
 b) ETR-rendements en pailles

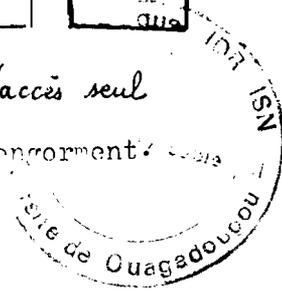


EST

▲ tube d'accès + tensiètres ; △ tube d'accès seul

Fig. 17. Carte de la circulation de l'eau en surface: effet d'engorgement.

- mauvais ressuyage
- ▨ ressuyage moyen
- bon ressuyage



ont les rendements les plus bas, les ETR intermédiaires sont corrélées avec les rendements les plus élevés, tandis que les ETR les plus faibles correspondent aux rendements moyens. Si l'on fait un rapprochement de ces groupes avec les classes de ressuyage représentées sur la carte de la circulation de l'eau en surface (figure 17), on peut définir une relation "consommation en eau-rendement-ressuyage des parcelles".

Les tableaux 13, 14 et 15 rendent compte de "l'effet d'engorgement" où chaque traitement est représenté dans chacune des trois classes de ressuyage. On peut admettre que les ETR globales sont identiques pour tous les traitements dans chaque classe de ressuyage (en imputant les différences à l'imperfection de la méthode utilisée). Les valeurs assez élevées des écart-types des rendements prouvent que même si l'engorgement des parcelles a eu un impact considérable sur leur production, l'effet des traitements, en particulier l'infériorité du témoin, joue un rôle en cela ; l'effet des blocs peut aussi être considéré.

Tableau 13 : Consommation en eau (mm) et rendements en grains (kg/ha) en fonction de la qualité du ressuyage

Mauvais ressuyage			Ressuyage moyen			Bon ressuyage		
Trait.	ETR	Rdt.	Trait.	ETR	Rdt.	Trait.	ETR	Rdt.
T1B3	411	1132	T1B6	342	2239	T1B4	357	3346
T2B4	393	2344	T2B6	322	2930	T2B5	357	4726
T3B3	361	2266	T3B4	317	2266	T3B5	323	4010
T4B3	398	1003	T4B4	339	2213	T4B5	345	3776
\bar{x}	390±21	1686±717	\bar{x}	330±12,3	2412±346	\bar{x}	345,5±16	3964,5±577

Trait. = Traitement

Rdt. = Rendement

./..

Tableau 14 : Consommations en eau (mm) et rendements en pailles (kg/ha) en fonction de la qualité du ressuyage

Mauvais ressuyage			Ressuyage moyen			Bon ressuyage		
Trait.	ETR	Rdt.	Trait.	ETR	Rdt.	Trait.	ETR	Rdt.
T1B3	411	2213	T1B6	342	4297	T1B4	357	6360
T2B4	393	4427	T2B6	322	4739	T2B5	357	7552
T3B3	361	3385	T3B4	317	4562	T3B5	323	7292
T4B3	398	3255	T4B4	339	4818	T4B5	345	6966
\bar{x}	390 ₊₂₁	3320 ₊₉₀₅	\bar{x}	330 _{+12,3}	4554 _{+262,5}	\bar{x}	345,5 ₊₁₆	7047,5 _{+505,4}



Tableau 15 : Percolation (mm), ruissellement (mm) et variations de stock (mm) en fonction du ressuyage

Mauvais ressuyage				Ressuyage moyen				Bon ressuyage			
T	P	R	ΔS	T	P	R	ΔS	T	P	R	ΔS
T1B3	100	230	-30	T1B6	137	202	+40	T1B4	35	324	-24
T2B4	168	291	+1	T2B6	157	261	+21	T2B5	109	285	-17
T3B3	103	262	+1	T3B4	154	250	+11	T3B5	164	262	+13
T4B3	156	153	+28	T4B4	159	272	+27	T4B5	140	245	+12
Total	527	936	0	Total	607	985	+99	Total	448	1116	-16
\bar{X}	132+35,3	234+59,5	0+23,7	\bar{X}	152+10	246+30,8	25+12	\bar{X}	112+56	279+34,2	-4+19,3
P+R	1643	-		P+R	1592	-		P+R	1564	-	

T = Traitement
P = Percolation
R = Ruissellement
ΔS = Variation de stock

L'évolution des charges hydrauliques à 30 cm a été également fonction de l'état de surface des parcelles comme le prouvent les figures 18 et 19.

Comme il est montré que les rendements sont fonction de la consommation en eau et de la qualité du ressuyage des parcelles, il serait intéressant de savoir si l'alimentation hydrique peut expliquer les différences de rendements entre le témoin et les autres traitements.

Pour cela on a calculé les ETR journalières par phase végétative pour voir si le mode de consommation intervenait ou non. Le tableau 16 donne un exemple où les valeurs proviennent des résultats des parcelles dont le ressuyage est bon.

./...

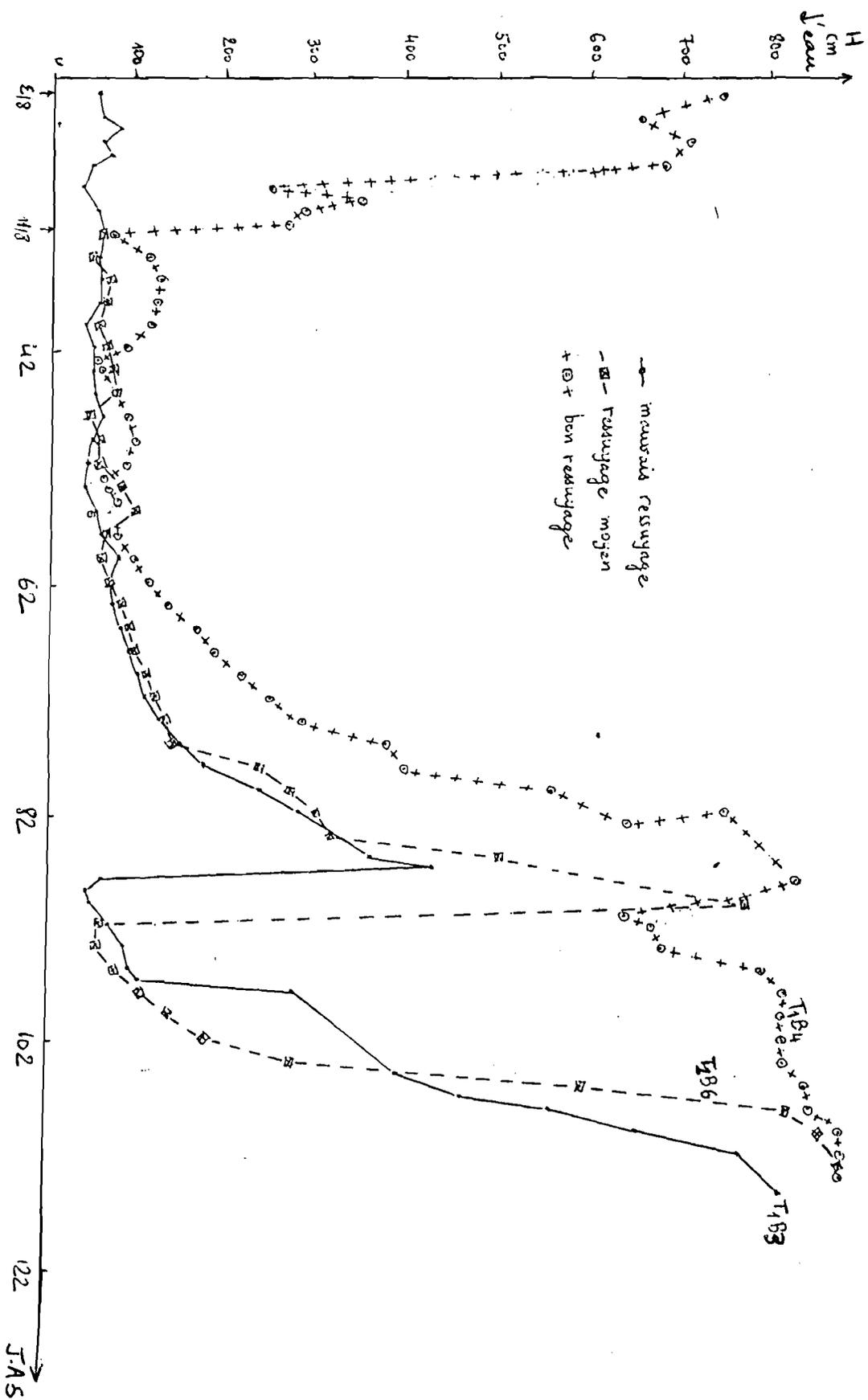


Fig 18 Evolution des pressions atmosphériques sur le terrain pendant l'arpentement.

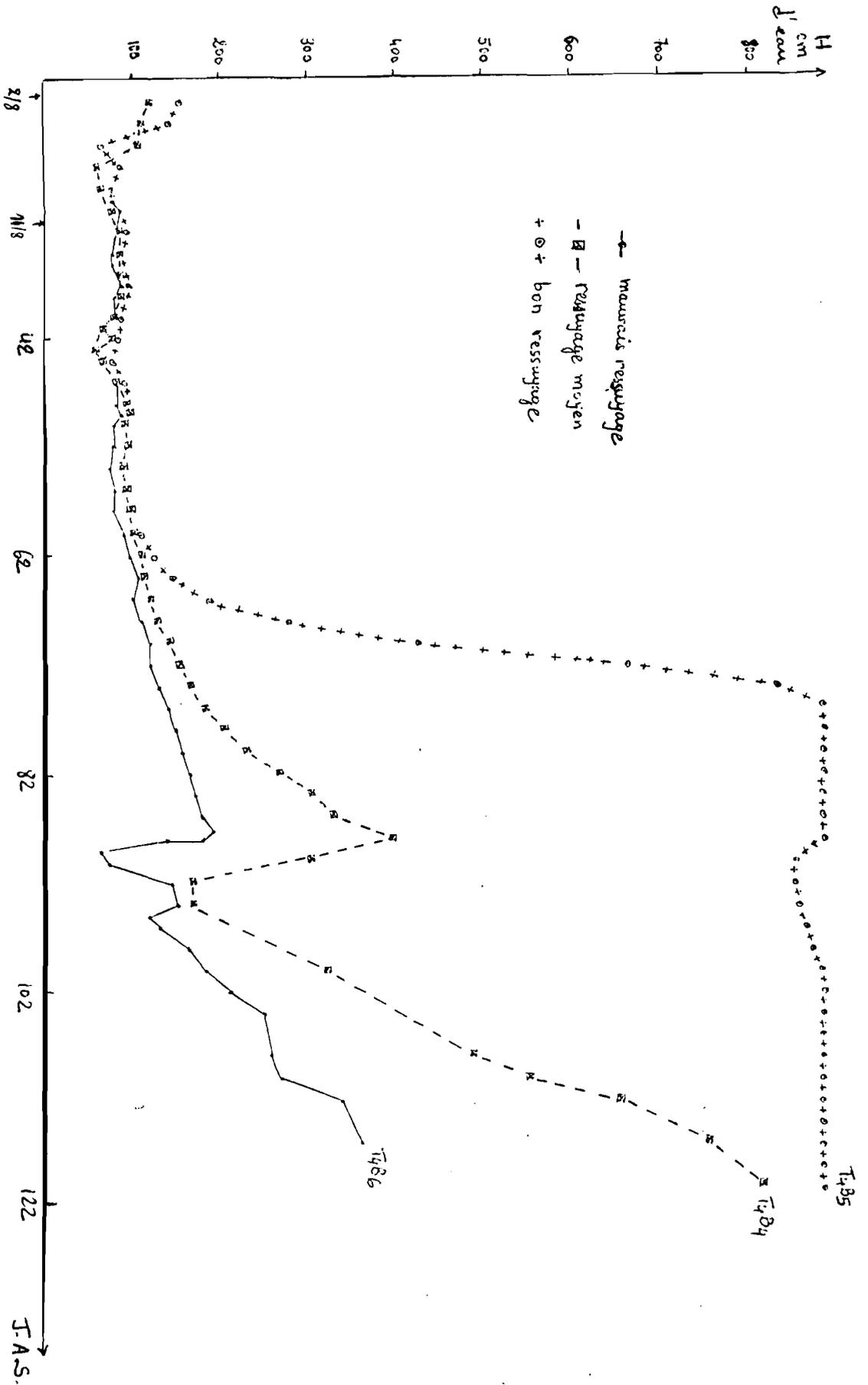


FIG. 19 Evolution des chemins hydrauliques à 30 cm sur le traitement 4
après l'irrigation

Tableau 16 : Consommations en eau journalières moyennes par période (mm)

Périodes (JAS)	T1B4	T2B5	T3B5	T4B5
0-30	3,03±0,38	3,03±0,38	3,03±0,38	3,03±0,38
30-57	3,53±1,66	3,54±1,65	3,23±2,10	3,8 ±1,32
57-87	2,8 ±0,91	2,44±0,36	2,03±0,81	2,6 ±0,7
87-119	1,9 ±0,96	2,29±1,09	1,95±0,84	1,96±1,35

D'une façon générale, les ETR journalières augmentent depuis le semis jusqu'à un mois après semis pour atteindre un pic à la deuxième période (30-57 JAS). Cette période correspond à la phase de croissance active observée avec la croissance en hauteur du sorgho. Les consommations hydriques baissent progressivement après le deuxième mois suivant le semis.

On constate surtout que les consommations sont identiques par période pour tous les traitements. Il n'y a donc pas d'effets des techniques culturales sur le mode d'alimentation hydrique de la culture.

5.3. Conclusion

Les rendements et leurs composantes ont montré encore l'infériorité du témoin par rapport aux autres traitements malgré la grande variabilité constatée. Les résultats des ETR comparés à ceux des rendements ont prouvé de leur côté que les différences observées ne provenaient ni des quantités totales d'eau consommées ni du mode de sa consommation. En effet les ETR globales et journalières sont identiques pour tous les traitements. De plus il n'a pas été possible de trouver une relation classique ETR-rendements. Cette relation se définit aussi en fonction de la qualité du ressuyage des parcelles. Dans ces conditions, on peut admettre que la part de l'évaporation dans les ETR totales a été considérable sur les parcelles engorgées, et que l'estimation des quantités d'eau effectivement consommées a été meilleure pour les parcelles non inondées.

CONCLUSION GENERALE

La présente étude voulait contribuer de façon modeste à la compréhension des mécanismes qui sont impliqués dans l'alimentation hydrique du sorgho dans des conditions pédoclimatiques limitantes. L'effet induit sur la production devait aussi être apprécié.

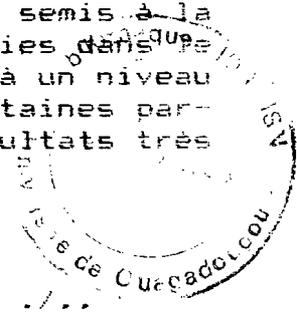
Pour ce faire, la conception des traitements a obéi à l'hypothèse de conditions défavorables du sol (pauvreté physico-chimique) et surtout à celle de déficit pluviométrique. En fait, cette dernière hypothèse est la plus contestable, mais peut-il en être autrement si l'on sait que la sécheresse est à la fois un fait indéniable et le facteur le plus aléatoire qui soit.

Les résultats attendus devaient permettre de comprendre l'interaction travail du sol-fertilisation, en vue de faire des recommandations pour optimiser la production, afin d'éloigner à jamais le spectre de la faim.

Mais les résultats obtenus n'ont pas répondu entièrement aux souhaits formulés ci-dessus. En effet, à la fin de cette étude, on est en mesure d'affirmer que la fertilisation minérale a été le facteur le plus déterminant sur la croissance et le développement ainsi que la production de la culture. Depuis l'enracinement jusqu'aux rendements et leurs composantes en passant par la croissance en hauteur du sorgho, on a observé la dichotomie suivante : l'isolement du témoin par rapport aux cinq (5) autres traitements qui ont toujours constitué un groupe plus ou moins homogène.

La séparation du témoin n'est cependant pas liée à son alimentation hydrique puisqu'il a consommé autant d'eau que les autres traitements, mais certainement à son alimentation minérale plus réduite.

Le fait que les traitements ne se soient pas exprimés se justifie pour une large part dans la façon dont il a plu cette année. En effet, la quantité totale d'eau tombée du semis à la récolte (685 mm) et surtout la répartition des pluies dans un certain temps, ont contribué à la remontée de la nappe jusqu'à un niveau proche de la surface du sol et à l'engorgement de certaines parcelles. Ces conditions de terrain ont rendu les résultats très hétérogènes et leur interprétation difficile.



Malgré cela, on a pu comprendre et expliquer les phénomènes grâce à la méthodologie utilisée. C'est ainsi qu'il a été démontré par exemple que les rendements et leurs composantes étaient corrélés avec les ETR et l'engorgement des parcelles.

L'interprétation des résultats a été rendue possible d'une part à cause du bon fonctionnement des appareils de mesures et à leur manipulation correcte, et d'autre part à cause des initiatives heureuses que l'on a eu en installant les piézomètres, en cartographiant l'engorgement des parcelles et en développant le principe de calcul des composantes du bilan hydrique.

Les résultats de cette année, loin de remettre en cause les avantages reconnus au travail du sol et à la fertilisation, nous enseignent une fois de plus que ces techniques culturales n'ont d'effets bénéfiques que lorsqu'elles sont appliquées dans des conditions spécifiques.

Si l'essai devait se poursuivre, il serait intéressant de resserrer les mailles de mesures tensiométriques aux environs de la limite du front racinaire et de renforcer le réseau piézométrique pour mieux cerner le drainage.

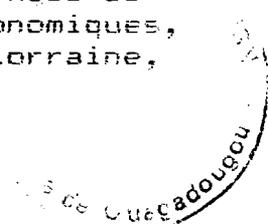
Le contrôle du ruissellement est plus délicat car cela nécessiterait un confectionnement de diguettes autour des parcelles. Mais ces suggestions dépendront fortement de la pluviométrie de la prochaine campagne.

B I B L I O G R A P H I E

- ARRIVETS J., 1973 - Contribution à l'étude de la fertilisation des sorghos locaux sur les sols ferrugineux tropicaux du Plateau Mossi. Compte rendu de 4 années d'expérimentation à Saria (Haute Volta, 1968-71). Rapport IRAT/HV 67 P.
- BALDY CH., 1985 - Contribution à l'étude des applications de la bioclimatologie végétale à l'agrométéorologie des zones arides et semi-arides en climats méditerranéen et tropical. Thèse docteur es-sciences. Faculté des sciences et techniques de Saint-Jérôme. Université d'Aix-Marseille.
- BARRO A., 1988 - Contribution à l'étude des relations Eau-Sol-Plante-Machine. Mémoire de DIAT, CNEARC-ENSAM-INERA.
- BERTRAND R., 1989 - Rapport préliminaire de la mission de reconnaissance morphopédologique des régions de Saria (BURKINA FASO) et de Molobala (MALI). Projet "Mécanismes d'agrégation des sols tropicaux pauvres en argiles gonflantes". Doc. multigr. IRAT 35 P.
- CHARDY J., FOREST F., LEGOUPIL J.C., 1983 - Evapotranspiration. Besoins en eau des cultures. Relations eau-sol. Estimation fréquentielle des conditions d'alimentation hydrique. Publication CIEH Fev. 1983 réédition.
- CHARDY J., DANCETTE C., DUC T.M., FOREST F., FRETEAUD J.P., IMBERNON J., LEGOUPIL J.C., LIDON B., 1984 - Etablissement et diffusion de recommandations agricoles d'un suivi agroclimatique.



- CHARREAU C., NICOU R., 1971 - L'amélioration du profil culturel dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest-Africaine et ses incidences agronomiques. Paris, IRAT, 254 p (Bulletin Agronomique, n.23).
- CHOPART J.L., 1980 - Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide, mil, sorgho, riz pluvial). Thèse de doctorat d'Université. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- CHOPART J.L., KALMS J.M., MARQUETTE J., NICOU R., 1981 - Comparaison de différentes techniques de travail du sol en trois écologies de l'Afrique de l'Ouest. D. IRAT/MONTELLIER. Doc. de travail
- CHOPART J.L., 1989 - Méthodes d'étude de l'enracinement à mettre en oeuvre dans le projet de recherche R3S/PF2 (Amélioration de l'Alimentation Hydrique par les Techniques Culturelles". Atelier R3S/PF2 à Bouaké. 24-28 Avril 1989.
- CHOPART J.L., SIBAND P., 1988 - Logiciel intégré pour le traitement des données d'humédimétrie neutronique : Programme de Bilan de l'Eau (PROBE). Travaux et Documents à l'IRAT/CIRAD (MONTELLIER)
- CIEH/IRAT, 1983 - Valorisation agricole des ressources pluviométriques. Synthèse de l'atelier IRAT/CIEH du 27/11/82 au 04/12/82.
- CISSE L., 1986 - Etude des effets de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du Centre-Nord du Sénégal. Thèse de Diplôme de Doctorat en sciences agronomiques, Institut National Polytechnique de Lorraine, NANCY.



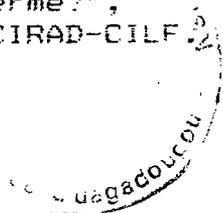
- COUHAT P., 1983 - Les applications de la méthode neutronique dans la recherche agronomique. Colloque international IAFA-SM-267/42.
- DAKIO L., 1983 - Etude de techniques d'économie de l'eau en culture attelée et en culture motorisée. Mémoire de fin d'études ISP, Université de Ouagadougou, Haute Volta.
- DANCETTE C., 1984 - Contrariétés pédo-climatiques et adaptation de l'agriculture à la sécheresse en zone intertropicale. In "la sécheresse en zone intertropicale. Pour une lutte intégrée". Actes du colloque "Résistance à la sécheresse en milieu intertropical : quelles recherches pour le moyen terme? Dakar, Sénégal, 24-27 Septembre-Paris, CIRAD-CILF, P. 27-37.
- DAUDET F.A. et VACHAUD G., 1977 - La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. Ann. Agro 1977, 28 (5) : 503-519.
- DUCREUX et al, 1989 - Travail du sol et économie de l'eau en zone semi-aride et en zone à pluviométrie déficitaire. Rapport final du projet CEE/CEEMAT-INERA, 58 P + annexes.
- DUGUE P., 1989 - Possibilités et limitations de l'intensification des systèmes de culture vivriers en zone soudano-sahélienne. Le cas du Yatenga (BURKINA FASO). Extraits de la thèse de Docteur-Ingénieur en Sciences Agronomiques. Collection "Documents Systèmes Agraires" n.9
- DUTHIL J., 1973 - Eléments d'écologie et d'agronomie, tome II. Edition J.B. Baillière et fils.

- ELDIN M., 1984 - Caractérisation de la sécheresse. Synthèse introductive. In : "La sécheresse en zone intertropicale. Pour une lutte intégrée". Actes du colloque "Résistance à la sécheresse en milieu intertropical : quelles recherches pour le moyen terme?", Dakar, Sénégal, 24-27 Sept - Paris, CIRAD-CILF, P 13-20.
- FOOD and Agriculture Organisation of the United Nations, 1980 - Réponse des rendements à l'eau. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n.23. Rome.
- FOREST F., 1984 - Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. Rapport IRAT/MONTELLIER.
- GOUET J.P. et PHILIPPEAU G., 1989 - Comment interpréter les résultats d'une analyse de variance? Service des Etudes Statistiques, Sept 1989.
- HILLEL D., 1984 - L'eau et le sol : principes et processus physiques. Vander édition. Paris.
- IMBERNON J., ARMAND M., BOURGEON G., BROUWERS M., FORTIER M., FRETEAUD J.P., KOFFI D., 1983 - Bilan hydrique et énergétique à l'échelle d'une parcelle. Compte rendu de fin d'étude ATP-Eau INRA Nov. 1983.
- JENNY H., 1964 - Etudes agropédologiques des stations de Saria et de Farako-Bâ (Haute-volta). Rapport IRAT/ Haute-Volta, Ouagadougou.
- KAMBOU D., 1989 - Action des techniques de travail du sol sur les rendements et le bilan hydrique d'une culture de sorgho en milieu paysan : Réo-Sabou. Mémoire de fin d'études ISN-IDR, Université de Ouagadougou, Burkina Faso.
- LE CORVEC D. et GUIDEAU P., 1984 - Simulation du bilan hydrique d'un sol en culture pluviale. CIEH 2ème édition Avr. 1984.



- LIAMAS J., 1985 - Hydrologie générale : principes et applications. Edit. Gaëtan morin. P. 238-292.
- LUC J.P., 1978 - Caractérisation hydrique des sols, utilisation des mesures d'humidité et de charge "in situ" comparaison avec les mesures de laboratoire. Thèse de Doctorat de Spécialité. USTL Montpellier.
- MAERTENS C., 1964 - La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. Ann. Agron. XV, vol. 5.
- MOUTONNET D., FERROCHET P., COUCHAT P., 1983 - Variabilité spatiale des caractéristiques neutroniques d'un sol : incidence sur la détermination des courbes d'étalonnage des humidimètres à neutrons. Colloque international IAEA-SM-267/28 Avr. 1983.
- NICOU R., 1975 - Le problème de la prise en masse à la dessiccation des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche.
- NICOU R., QUATTARA B., SOME L., 1987 - Effets des techniques d'économie de l'eau à la parcelle sur les cultures céréalières (sorgho, maïs, mil) au Burkina Faso INERA, Ouagadougou.
- QUATTARA B., 1984 - Action des techniques de travail du sol sur le bilan hydrique et les rendements d'une culture de sorgho en fonction du type de sol. Mémoire de fin d'études ISP. Université de Ouagadougou, Haute Volta.
- QUATTARA K., 1989 - Etude de l'action des techniques d'économie de l'eau sur l'amélioration du bilan hydrique d'une culture de sorgho. Mémoire de fin d'études ISN-IDR, Université de Ouagadougou, Burkina Faso.
- PICHOT J., SEDOGO M.P., POULAIN J.F., ARRIVETS J., 1981 - Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques. Agron. Trop. 36 (2) : 122-133.

- REYNIERS F.N., et FOREST F., 1988 - Améliorer l'alimentation hydrique et son efficacité en agriculture pluviale en Afrique au Sud du Sahara. Séminaire ILRI/CTA 25-29 Av.
- ROOSE E., ARRIVETS J., POULAIN J., 1979 - Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés sous sorgho et sous savane soudano-sahélienne Saria (Haute Volta) : synthèse des campagnes 1971-1974 ORSTOM. multigr., 104 P.
- ROOSE E., 1981 - Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Travaux et documents de l'ORSTOM n.130 édit. ORSTOM, Paris.
- RUELLE P., AOUINA M.S., VAUCLIN M., VACHAUD G., 1983 - Bilan hydrique sous culture par mesures tensiométriques, neutroniques et gravimétriques. Rapport IMG, Grenoble. multigr., 70 P.
- SEDOGO M.P., 1981 - Contribution à la valorisation des résidus cultureux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride (matière organique du sol et nutrition azotée des cultures). Thèse de Docteur-Ingénieur, sciences agronomiques, Institut National Polytechnique de Lorraine, NANCY.
- SEGUIN M.B. et ITIER B., 1984 - Caractérisation de l'état de sécheresse par des mesures microclimatiques combinées au bilan énergétique : les mesures locales, la modélisation et l'extension à l'échelle régionale par télédétection. In "la sécheresse en zone intertropicale. Pour une lutte intégrée". Actes du colloque "Résistance à la sécheresse en milieu intertropical : quelles recherches pour le moyen terme?", Dakar, Sénégal, 24-27 Sept-Paris, CIRAD-CILF. P.



- SICOT A.M., 1983 - Variabilité de la teneur en eau et de la réserve hydrique du sol en milieu sahélien, dispersion spatiale et rationalisation du réseau de mesure. Bulletin du G.F.H.N. Nov. 1983. n.14. P. 73-115.
- SIVAKUMAR M.V.R., et GNDUMOU F., 1987 - Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : Burkina Faso. Bulletin d'information n.23, édit. ICRISAT, Patancheru Inde.
- SOME L., 1982a - Gestion de l'eau et intensification des cultures vivrières SABOUNA ORD du Yatenga. Mémoire de fin d'études à l'ISP Option : agronomie Université de Ouagadougou.
- SOME L., 1982b - Synthèse des essais de travail du sol en Haute Volta (période 1960 - 1981) IRAT/HV Doc. interne.
- SOME L., et NICOU R., 1983 - Etude de l'enracinement du blé au Sourou. Rapport IRAT/HV SOMDIAA, Ouagadougou, Haute Volta.
- SOME L., 1985 - Bilan hydrique d'une culture de cotonnier sous deux régimes d'irrigation. Mémoire D.E.A. Sciences agronomiques, option phytotechnie. USTL, Montpellier II.
- SOME L., 1989 - Diagnostic agropédoclimatique du risque de sécheresse au Burkina Faso. Etude de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs. Thèse de Doctorat de Spécialité. USTL, Montpellier II.
- VACHAUD G., DANCETTE C., SONKO S., THONY J.L., 1977 - Méthodes de caractérisation hydrodynamique "in situ" d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. Rapport ISRA Dakar (Sénégal).
- VAUCLIN M., 1989 - Bilan hydrique sous cultures. Programme R3S/PF2. Atelier R3S/PF2 à Bouaké, Côte d'Ivoire du 24 au 28 Avril 1989.

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 : Profils de charge et détermination du sens de l'écoulement
- Fig. 2 : Pluviométrie annuelle de Saria (1929-1988)
- Fig. 3 : Schéma d'un tensiomètre
- Fig. 4 : Profils hydriques et profils de charge hydraulique. Essai de caractérisation.
- Fig. 5 : Evolution du stock [0-135 cm] et de la teneur en eau à 135 cm. Essai de caractérisation.
- Fig. 6 : Diagramme des précipitations mensuelles
- Fig. 7 : Evolution du niveau moyen de la nappe affecté des écarts-types
- Fig. 8 et 9 : Evolution du stock [0-135 cm], de la teneur en eau à 135 cm, des charges hydrauliques à 135 cm et à 115 cm et de la piézométrie
- Fig. 10 et 11 : Evolution des profils hydriques
- Fig. 12 : Croissance linéaire du sorgho
- Fig. 13 : Profils de densité racinaire
- Fig. 14 : Pourcentage de cases ayant au moins une racine en fonction de la profondeur
- Fig. 15 : Courbes de variabilité des rendements en grains
- Fig. 16 : Relation entre les ETR et les rendements
- Fig. 17 : Carte de la circulation de l'eau en surface : effet d'engorgement
- Fig. 18 et 19 : Evolution des charges hydrauliques à 30 cm : effet d'engorgement.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Analyse fréquentielle des pluies de Saria sur 21 ans de 1968 à 1988
- Tableau 2 : Principales caractéristiques analytiques de l'horizon 0-20 cm
- Tableau 3 : Teneurs en eau à 135 cm et stocks d'eau de la tranche [0-135 cm]
- Tableau 4 : Charges hydrauliques aux cotes 115 cm et 135 cm et gradients de charge
- Tableau 5 : Valeurs théoriques du flux, de la conductivité hydraulique et de la teneur en eau
- Tableau 6 : Composantes du bilan hydrique de T486
- Tableau 7 : Consommations globales
- Tableau 8 : Pourcentage de levée
- Tableau 9 : profondeur d'enracinement
- Tableau 10 : Nombre de grosses racines
- Tableau 11 : Périodes des épiaisons en JAS
- Tableau 12 : Rendements et composantes du rendement du sorgho
- Tableau 13, 14 : Consommation en eau et rendements en fonction de la qualité du ressuyage
- Tableau 15 : Percolation, ruissellement et variation de stock en fonction du ressuyage
- Tableau 16 : Consommations en eau journalières moyennes par période.

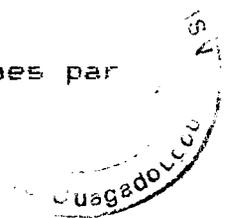


Schéma d'un humidimètre à neutrons

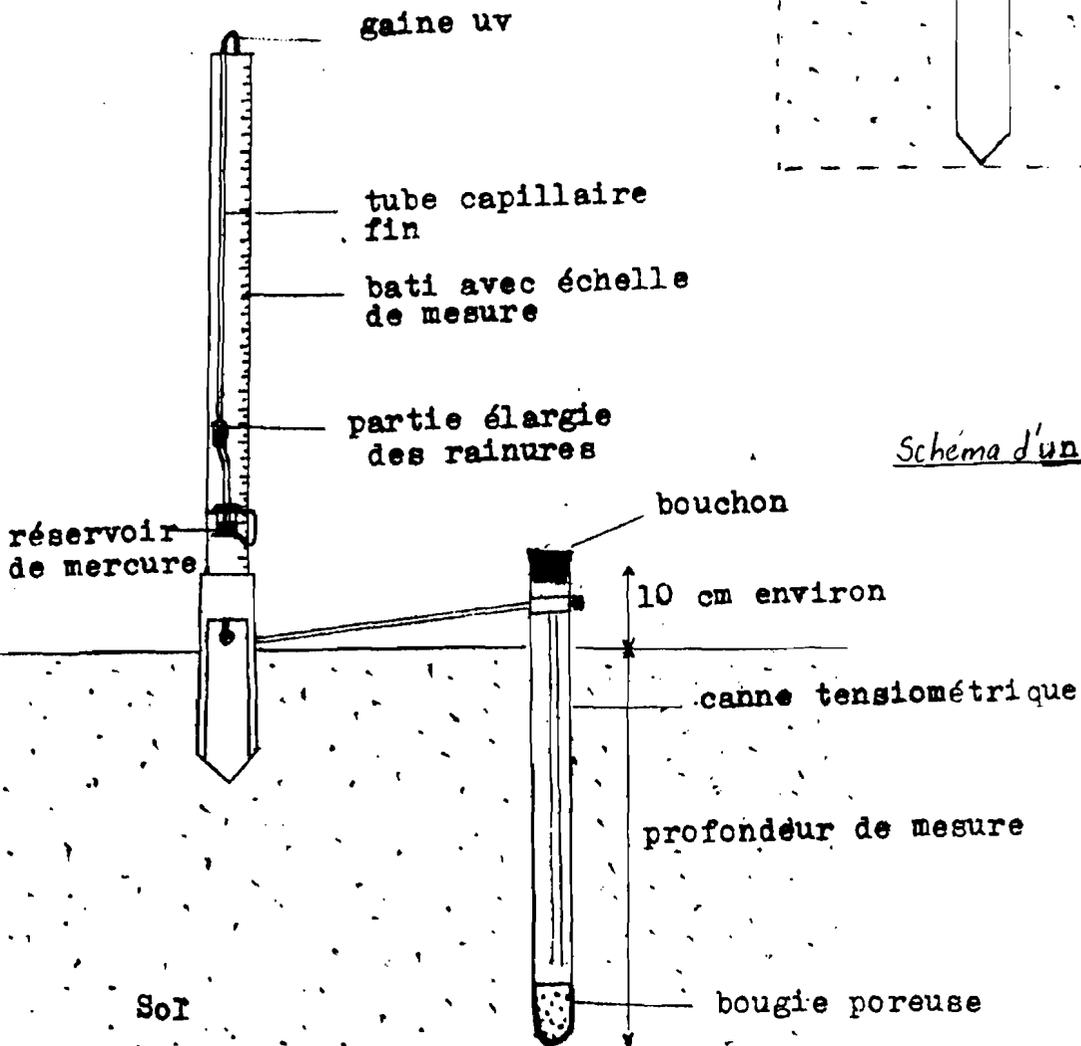
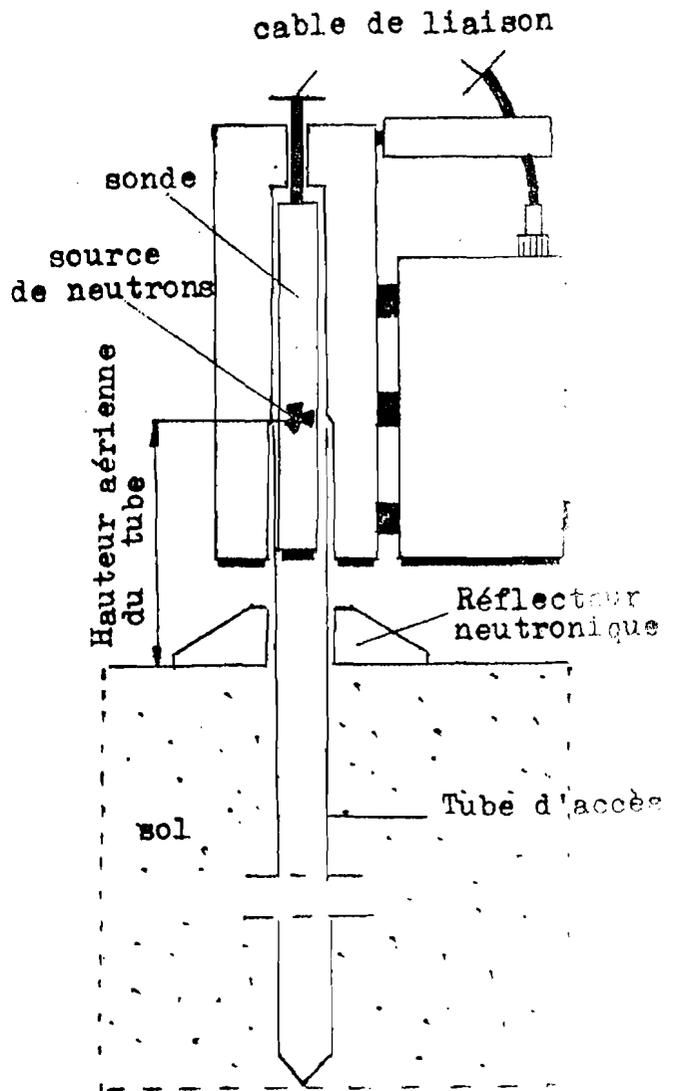
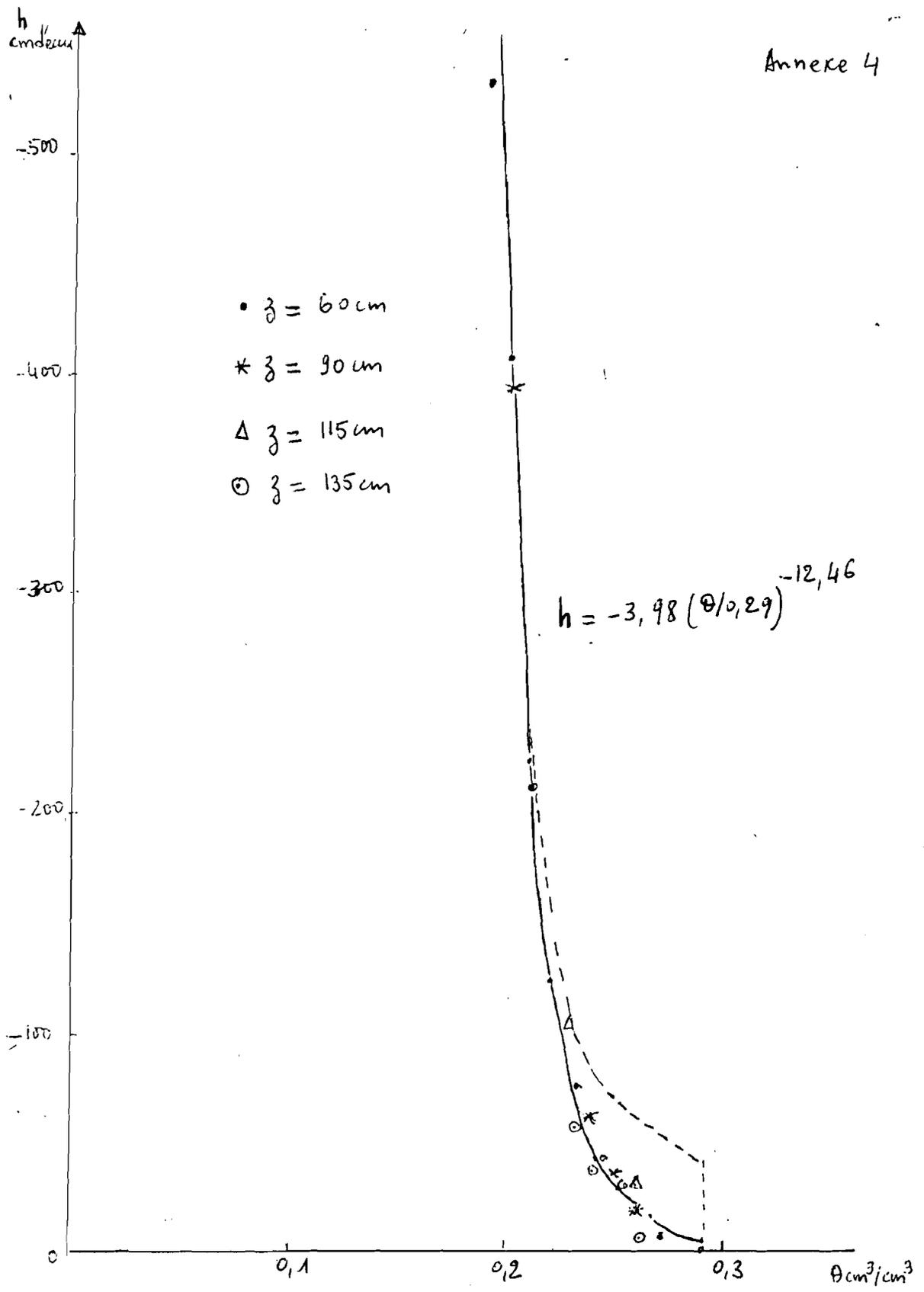


Schéma d'un tensiomètre





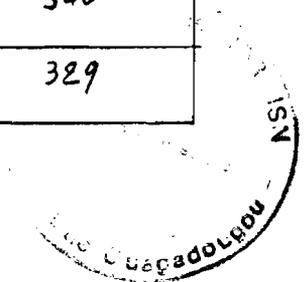
Courbe pression effective de l'eau-teneur en eau.

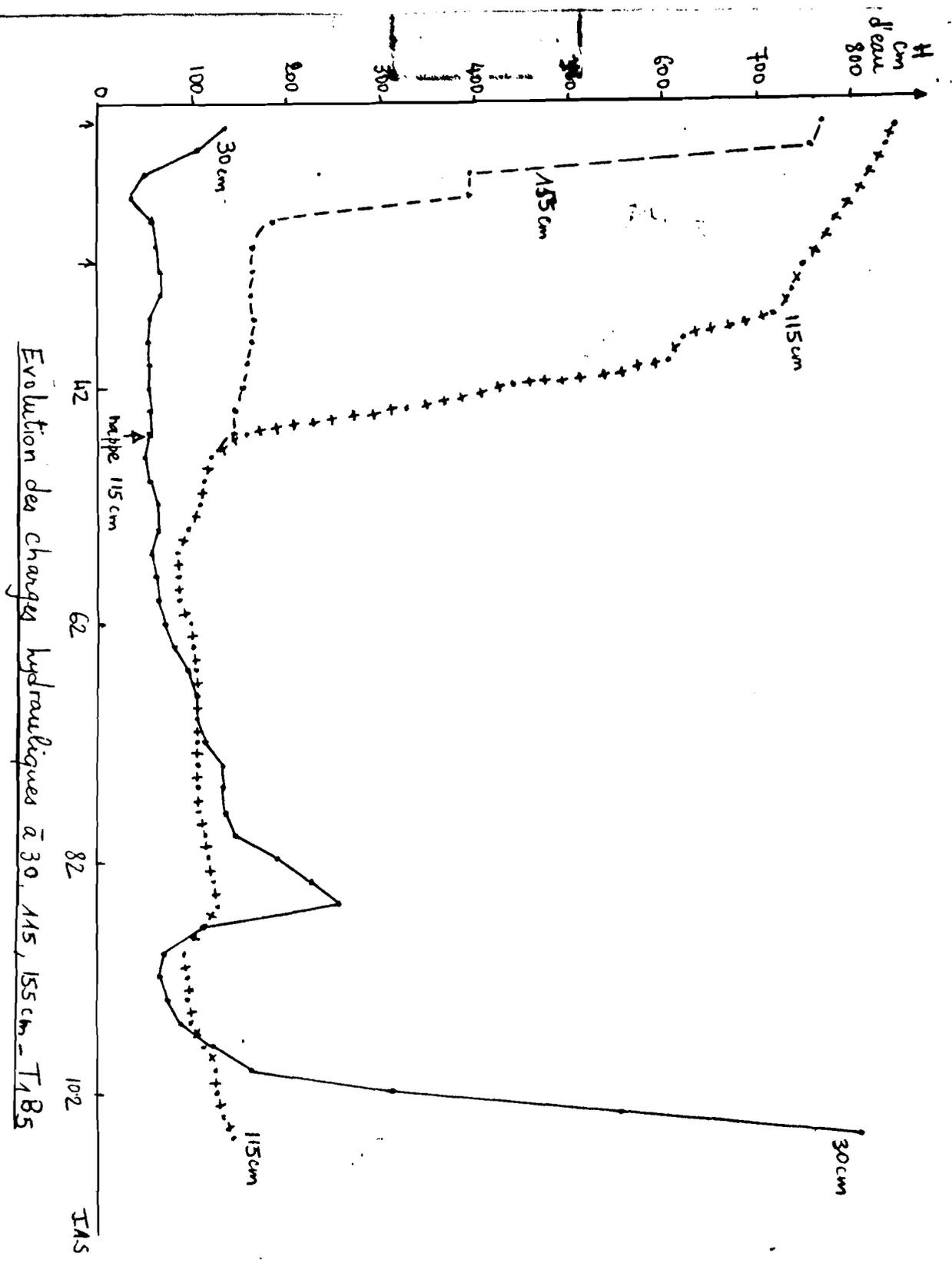
Composantes du bilan hydrique (semis-récolte).

sites	AS mm	D ₁₃₅ mm	R mm	ETR mm
T ₁ B ₃	-30	74 ↑ 26 ↓ 100	230	411
T ₁ B ₄	-24	30 ↑ 5 ↓ 35	324	358
T ₁ B ₅	+30	137 ↑ 43 ↓ 183	220	309
T ₁ B ₆	+40	101 ↑ 36 ↓ 137	202	342
T ₂ B ₃	+8	54 ↑ 49 ↓ 103	268	356
T ₂ B ₄	+1	102 ↑ 66 ↓ 168	291	393
T ₂ B ₅	-17	60 ↑ 49 ↓ 109	285	357
T ₂ B ₆	+21	81 ↑ 76 ↓ 157	261	322
T ₃ B ₃	+1	58 ↑ 45 ↓ 103	262	362
T ₃ B ₄	+11	107 ↑ 154 ↓ 47	250	317
T ₃ B ₅	+13	87 ↑ 77 ↓ 164	262	323
T ₃ B ₆	+24	83 ↑ 31 ↓ 114	230	349
T ₄ B ₃	+28	106 ↑ 50 ↓ 156	153	398
T ₄ B ₄	+27	121 ↑ 38 ↓ 159	272	339
T ₄ B ₅	+12	73 ↑ 69 ↓ 140	245	346
T ₄ B ₆	+32	66 ↑ 56 ↓ 122	267	329

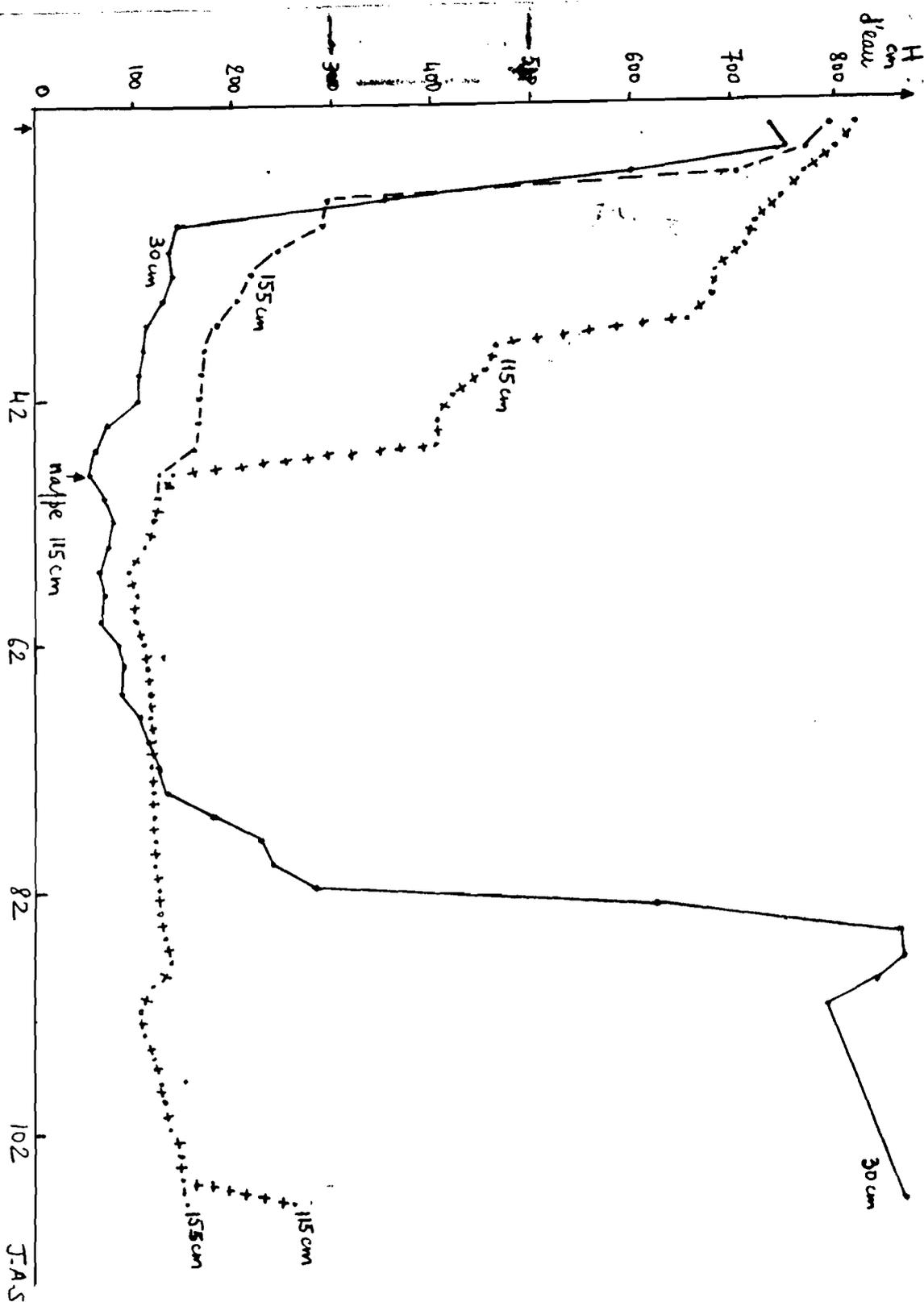
* ↑ remontée capillaire

* ↓ percolation



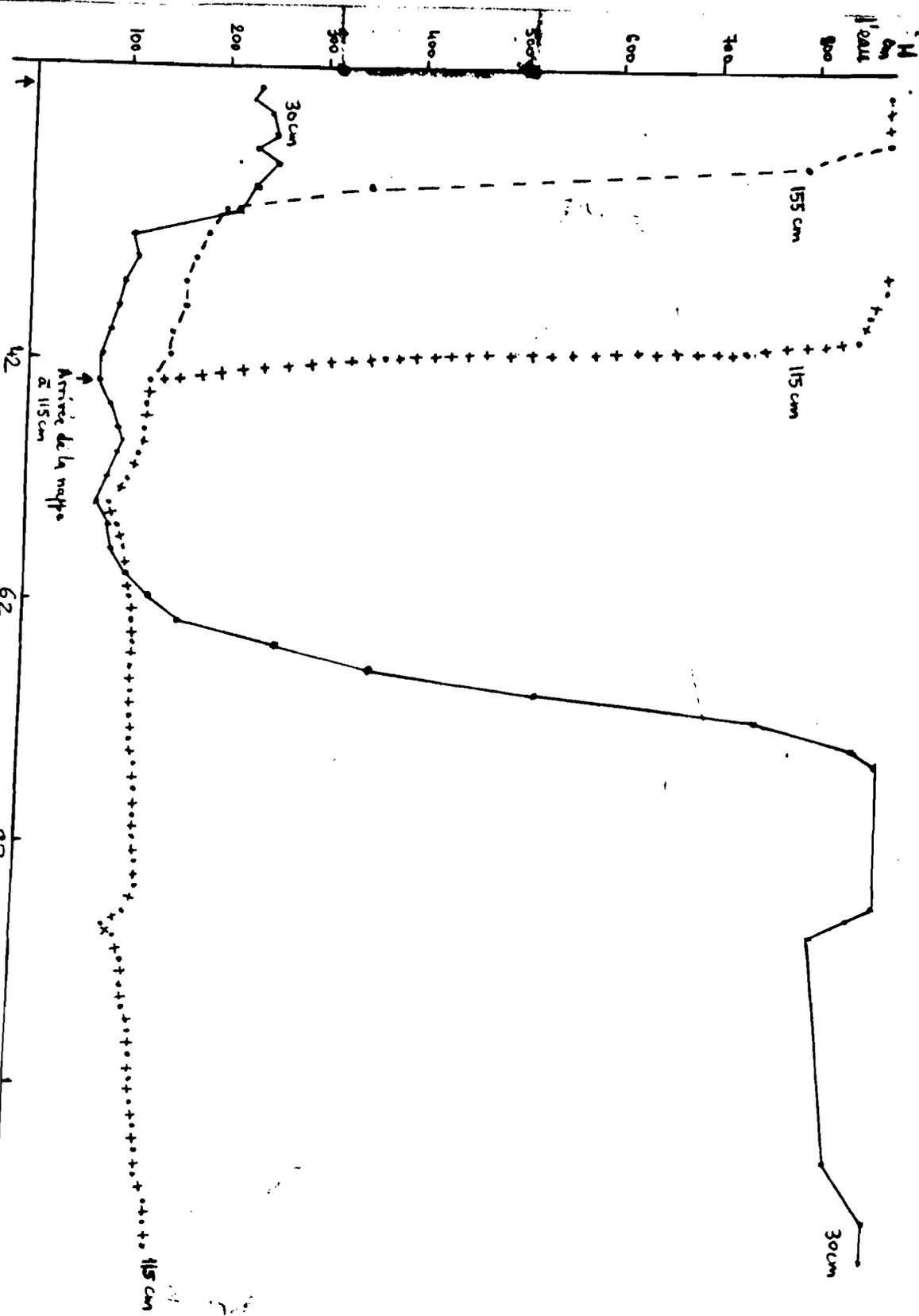


Evolution des charges hydrauliques à 30, 115, 155 cm - T1B5



Evolution des charges hydrauliques à 30, 115, 155 cm - T2 B5

J.A.S



Evolution des charges hydrauliques à 30, 115, 155 cm. Traitement 3 B₁

JAS

