

TH-HC57

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE MONTPELLIER II

-- SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC --

T H E S E

présentée à l'Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

SPECIALITE : Physiologie

Formation Doctorale : Bases de la production végétale

Ecole Doctorale : Biologie des systèmes intégrés- Agronomie- Environnement

**ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DU MIL (*Pennisetum glaucum* L.)
DANS LA ZONE SAHELO-SOUDANIENNE
PAR LA MESURE DU DEBIT DE SEVE
-CAS DES SOLS DEGRADEES-**

par

Isabelle RIVIERE

Soutenu le 15 Octobre 1993 devant le jury composé de :

M. MACHEIX Jean-Jacques	Professeur, USTL, Montpellier	Président
M. GANRY Francis	Directeur de Recherches, CIRAD, Montpellier	Rapporteur
M. LOUGUET Philippe	Professeur, Université Paris Val de Marne	Rapporteur
M. REYNIERS François-Noël	Agrophysiologiste, CIRAD, Montpellier	Examineur
M. VALANCOGNE Charles	Directeur de Recherches, INRA, Bordeaux	Examineur
M. BERGER André	Directeur de Recherches, CNRS, Montpellier	Directeur de Thèse

AVANT-PROPOS

Je remercie de tout coeur :

Monsieur F.N. REYNIERS, l'instigateur de ce passionnant sujet. Je ne lui dirai qu'un mot : malgré la diminution et en parallèle à la diminution, on observe bien une diminution quoique cette diminution, etc. Merci pour TOUT (ce serait trop long à énumérer)... et surtout d'avoir cru en moi ! J'espère bien continuer dans la voie qu'il m'a ouverte et rester une élève fidèle.

Monsieur le Pr. J.J. MACHEIX de me faire l'honneur de participer au jury de soutenance et de m'avoir mise en rapport, il y a quatre ans, avec F.N. REYNIERS : ce fut le début d'une grande aventure !

Monsieur F. GANRY d'avoir accepté de juger ce travail malgré son emploi du temps chargé.

Monsieur le Pr. P. LOUGUET d'avoir accepté d'être rapporteur. Qu'il me pardonne d'avoir mis sa vue à rude épreuve...

Monsieur A. BERGER d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse. Ses qualités scientifiques autant qu'humaines ont été une grande source d'enrichissement. Lors de sa mission au Sénégal, j'ai aussi pu apprécier sa souplesse pour sortir par la fenêtre d'une voiture dont la porte était coincée...

Monsieur C. VALANCOGNE de s'être investi à fond dans ce partenariat avec le CIRAD, de m'avoir enseigné avec pédagogie la technique de mesure du débit de sève puis d'avoir assuré une assistance technique sans relâche malgré la distance. A ce propos, je bénis l'inventeur du fax de nous avoir permis de rester en contact... quand les contacts des régulateurs de tension m'ont lâchement fait défaut. Je lui suis de même infiniment reconnaissante des nombreuses discussions par lesquelles il a tenté de combler mes lacunes dans le domaine de la Bioclimatologie et de ses critiques impitoyables sur le premier manuscrit... et donc constructives !

Toute l'équipe de Bordeaux, et en particulier :

Monsieur C. RIOU de m'avoir accueillie avec toute sa gentillesse dans son laboratoire de Bioclimatologie de l'INRA;

Sylvia, la marraine de certains capteurs, pour sa gaîté et sa complicité dans le travail; Alain, aux doigts de fée, d'avoir réalisé dans son atelier magique les supports des thermocouples; Madame ROURE pour son amabilité et son efficacité face aux tracasseries administratives. Ce fut un véritable plaisir de travailler avec eux.

A Montpellier, Monsieur D. PICARD, directeur du CIRAD-CA et l'Unité de Recherche "Gestion de l'Eau", dirigée par Monsieur F. FOREST, de m'avoir accueillie dans des conditions de travail optimales. Je remercie toute l'équipe URGE de m'avoir soutenue dans les moments de doute, et en particulier :

François AFFHOLDER, le spécialiste du bilan hydrique ... et des Rolling Stones, pour son encadrement sur le terrain et ses conseils judicieux aussi bien lors des expérimentations que lors de la rédaction. Il a largement contribué à approfondir mes relatives connaissances en Agronomie. Certains résultats au champ lui reviennent... et c'est avec impatience que nous attendons de lire ses différentes publications en préparation. Je ne doute pas qu'il trouve un

jour sa fameuse équation qui régit le monde;

Christine et Nathalie qui méritent bien leur surnom de fées du logis; Christian et Alain, les dieux de l'informatique, de m'avoir initiée à certains logiciels graphiques... et ludiques; toute la joyeuse bande du PSI : Eric, Hélène, Olivier, Paule, Monica, Renée pour nos fous rires et leur soutien moral.

Monsieur D. BABRE pour ses analyses de sol et d'avoir toujours été disponible pour répondre avec une égale gentillesse à mes questions novices sur les Sciences du sol.

Messieurs G. POCHIER et E. VIRICELLE, délégués successifs du CIRAD au Sénégal, d'avoir facilité sur place la gestion de mon budget de fonctionnement.

Francis BOUTES, Volontaire du Service National au CNRA de Bambey, pour sa collaboration précieuse et amicale qui se poursuit actuellement par la rédaction d'un article. Merci aussi à Laurent RUIZ et à tous les VSN qui se sont succédés pour leur aide technique et leur présence amicale.

Monsieur L. CISSE, en temps que Directeur du CNRA de Bambey de m'avoir accueillie pendant deux ans dans son centre sans démentir l'hospitalité sénégalaise et en temps que chercheur, d'avoir permis les prélèvements de sol à Thilmakha.

Monsieur M. DIAGNE de m'avoir accueillie avec chaleur et humour dans son laboratoire d'Agroclimatologie.



Messieurs Abdoulaye FAYE et Ass DIOP sans qui ce travail n'aurait pu se réaliser. Leur intérêt pour ce travail et leur dévouement de chaque instant ont été un cadeau précieux. Au cours de mon séjour se sont créés des liens amicaux que ni le temps, ni la distance n'altéreront.

Sitor N'DOUR, Pierre N'DOUR, le malicieux Antoine SARR, Moussa TOUNKARA pour son amour des plantes... après le football et d'avoir assuré les pesées nocturnes, Saliou SENE, gardien du savoir (griot)... et du matériel, Monsieur DIOUF, bibliothécaire et doyen respecté du centre, Rosalie, ma documentaliste préférée, toute l'équipe du CERAAS, dirigée par Messieurs D.J.M. ANNEROSE et J.L. KALFAHOUI... et toutes les personnes du CNRA de Bambey qui d'une façon ou d'une autre, mais toujours avec le sourire, m'ont aidé

durant ces deux années sénégalaises. Diaredief !

Le Ministère de la Recherche et de la Technologie de m'avoir accordé une allocation de recherche pendant trois ans.

En revanche, je ne remercie pas l'écran du micro-ordinateur qui a eu la malencontreuse idée d'implorer, les vaches qui ont brouté mes plantes (l'amour du mil a ses limites !), les oiseaux qui ont picoré la coupelle du pyrromètre, etc.

Enfin, je dédie ce travail de longue haleine à ma grand-mère, pétillante de vitalité, qui a toujours su trouver les mots pour m'encourager.

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	9
1ERE PARTIE : POSITION DU PROBLEME	13
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU MILIEU	
1- Le climat	
1-1- Les facteurs géographiques et aérologiques	
1-2- Les précipitations	15
1-3- Les températures	17
2- Les sols	
3- La culture du mil dans l'agriculture sénégalaise	19
4- Vers une auto-suffisance alimentaire ?	23
CHAPITRE 2 : DIAGNOSTIC HYDRIQUE DU DEFICIT DE PRODUCTIVITE CEREALIERE DANS LA ZONE SAHELO-SOUDANIENNE	25
1- L'échelle du pays	
2- L'échelle du terroir	29
2-1- Historique	
2-2- Evolution des systèmes de production et dégradation des ressources naturelles	
3- L'échelle du champ	33
3-1- Productivité variable	
3-2- Composition minérale du sol en relation avec la pluviométrie	35
3-3- Conséquences sur l'enracinement	37
4- Conclusion	39
CHAPITRE 3 : FONCTIONNEMENT HYDRIQUE	41
A- TRANSFERT D'EAU DANS LE CONTINUUM-SOL-PLANTE-ATMOSPHERE	
1- Interface sol-racine	
2- Dans la plante	43
3- Interface plante-atmosphère	45
B- FLUX HYDRIQUES AU NIVEAU DE LA PARCELLE	47
1- Notion d'hydrosystème agricole	
2- Mesures de l'évapotranspiration	48
2-1- Echelle de la parcelle	
2-1-1- Le bilan hydrique	
2-1-2- Les méthodes météorologiques	49
a- Les méthodes aérodynamiques	
b- La méthode des fluctuations	50
2-2- Echelle de la feuille	
2-3- Echelle de la plante	
2-3-1- Intérêts de la mesure du débit de sève brute	51
2-3-2- Applications	
2-3-3- Les différentes techniques	52
CHAPITRE 4 : LA PERCEPTION DU STRESS HYDRIQUE PAR LA PLANTE ET LES INDICATEURS DE CE STRESS	53
A- LA PERCEPTION DU STRESS HYDRIQUE PAR LA PLANTE	
1- Considérations épistémologiques	
2- Les différents niveaux de perception	55
B- LES INDICATEURS DU STRESS HYDRIQUE	58
1- Mesures de l'état hydrique au niveau racinaire	
2- Mesures de l'état hydrique au niveau foliaire	
CONCLUSION DE LA 1ERE PARTIE : LA PROBLEMATIQUE	61

2EME PARTIE : TECHNIQUES UTILISEES ET ADAPTATION REALISEE POUR L'ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DU MIL	63
CHAPITRE 1 : CARACTERISATION DES FACTEURS REGULANT LE FLUX HYDRIQUE DANS LE CONTINUUM	
A- MATERIEL VEGETAL	
B- CARACTERISATION DES FACTEURS DE L'OFFRE	64
1- Mesures de l'état hydrique du sol	
1-1- Humidité pondérale du sol	
1-2- Humidité volumique du sol	
2- Mesures des paramètres racinaires	65
2-1- Poids	
2-2- Volume	
2-3- Densité racinaire au champ	
C- CARACTERISATION DES FACTEURS DE LA DEMANDE	67
1- Mesures de la surface foliaire	
1-1- Par planimètre optique	
1-2- Par formule d'estimation	
1-3- Par pesées	
2- Mesures de l'état hydrique foliaire	69
2-1- Teneur relative en eau	
2-2- Potentiel hydrique foliaire	
2-3- Résistance stomatique	
3- Mesures de la demande climatique	70
3-1- Les appareils	
3-2- Calcul de l'ETP Penman	71
3-3- Relation entre les deux références utilisées	77
D- CARACTERISATION DU FLUX HYDRIQUE	
1- Bilan hydrique	
2- Mesures du débit de sève brute	79
2-1- Principe du capteur à bilan de chaleur	
2-2- Réalisation du capteur	81
2-2-1- L'élément chauffant	
2-2-2- Les sondes de température	
2-2-3- Le fluxmètre thermique	83
2-3- Schéma d'ensemble du montage	85
CHAPITRE 2 : ADAPTATION DE LA TECHNIQUE DU BILAN DE CHALEUR POUR UNE TIGE HERBACEE	
1- Modifications du capteur	
1-1- Détermination de l'espacement optimal entre les sondes de température et l'élément chauffant	87
1-2- Modification du support des thermocouples	91
2- Précision de la méthode	
2-1- Serre	93
2-2- Laboratoire	
2-3- Problème rencontré : dérive du K_{lat}	97
2-4- Discussion	
CHAPITRE 3 : VALIDATION DE LA MESURE DU DEBIT DE SEVE BRUTE SUR LE MIL	99
1- En pot : comparaison avec les pesées	
1-1- Problèmes rencontrés	
1-2- Echelle horaire	101
1-3- Echelle journalière	
1-4- Discussion	102
2- Au champ : comparaison avec le bilan hydrique	103
2-1- Dispositif	
2-2- Résultats	105
2-3- Discussion	107
3- Conclusion	109

3EME PARTIE : FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DU MIL ET CONSEQUENCES DE LA DEGRADATION DES SOLS	111
CHAPITRE 1 : ETUDE D'UNE CONTRAINTE HYDRIQUE EN POT	
1- Introduction	
2- Dispositif	
3- Résultats	113
3-1- Effet de la contrainte hydrique sur les paramètres racinaires et foliaires	
3-2- Comparaison entre les fonctionnements hydriques du brin-maître et des talles	
3-3- Evolution des débits de sève horaires	117
3-3-1- Lors du stress	
3-3-2- Lors de la récupération	121
3-4- Evolution des paramètres physiologiques	
3-5- Evolution des débits de sève journaliers	127
4- Discussion	129
5- Conclusion	131
CHAPITRE 2 : EFFETS DES SOLS DEGRADEES SUR L'ALIMENTATION HYDRIQUE EN REGIME PLUVIAL	133
1- Introduction	
2- Dispositif	
2-1- Caractérisation des conditions de fertilité	135
2-2- Régime hydrique	
3- Résultats	
3-1- Evolution du stock hydrique sous culture et de l'ETR moyenne au cours du temps	
3-2- Masses racinaires et composantes du rendement	139
3-3- Evolution de l'indice de surface foliaire (LAI)	143
3-4- Relation entre les débits de sève et les facteurs de l'offre et de la demande	
3-5- Dynamiques horaires	145
4- Discussion	147
5- Conclusion	
CHAPITRE 3 : EFFETS DES SOLS DEGRADEES SUR L'ALIMENTATION HYDRIQUE AVEC CONTROLE DE L'APPORT D'EAU	149
1- Introduction	
2- Dispositif	
2-1- Caractérisation des conditions de fertilité	151
2-2- Régime hydrique	
3- Résultats	155
3-1- Evolution des surfaces foliaires au cours du traitement et relation avec la transpiration moyenne	
3-1-1- Première partie du cycle	
3-1-2- Deuxième partie du cycle	
3-2- Effets de l'apport de chaux sur les paramètres racinaires et foliaires	159
3-2-1- A 41 jours après semis	
3-2-2- En fin de cycle	165
3-3- Relation entre la transpiration et les facteurs de la demande	167
3-3-1- Première partie du cycle	
3-3-2- Deuxième partie du cycle	171
3-4- Relation entre la transpiration et les facteurs de l'offre	173
3-4-1- Première partie du cycle	
3-4-2- Deuxième partie du cycle	175
3-5- Dynamiques horaires	177
DISCUSSION ET CONCLUSIONS GENERALES	181
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	191
LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX	205
ANNEXES	209

INTRODUCTION

L'alimentation hydrique est déterminante pour la productivité des céréales, surtout dans la zone sahélo-soudanienne où l'alimentation humaine reste un problème majeur. La stabilisation des rendements demeure alors un objectif prioritaire dans cette zone caractérisée par une pression démographique. Les sols sont fragiles et s'épuisent du fait d'une culture continue à faible intrant. De plus, les précipitations faibles et aléatoires rendent crucial le facteur hydrique pour ce type d'agriculture.

Dans ce contexte, les travaux de recherche rassemblent des études variées et complémentaires, à différentes échelles d'espace et de temps, organisées en un schéma général dont la finalité est de stabiliser la productivité, voire de l'améliorer quand cela est possible. Ceci passe par une protection et une meilleure gestion des ressources naturelles indispensables. Dans ce schéma général, se situent à une extrémité les études agronomiques à l'échelle du terroir ou de la parcelle, visant à tester l'impact des techniques culturales sur l'amélioration des rendements en fonction des caractéristiques de l'écosystème agricole. A l'autre extrémité de ce schéma, la physiologie végétale se situe à l'échelle de la plante et de la cellule et décrit les mécanismes internes contrôlant les processus de croissance et de résistance à la sécheresse.

L'étude présentée ici s'insère entre ces deux disciplines et rentre dans le domaine de l'écophysiologie en intégrant les facteurs de l'environnement de la plante agissant sur le fonctionnement physiologique et notamment hydrique de celle-ci.

Le but de ce travail est d'établir des relations de cause à effet entre les caractéristiques de l'écosystème (faible fertilité chimique, acidité des sols, sécheresse édaphique épisodique en cours de culture) et le fonctionnement hydrique de la plante. Pour cela, nous cherchons à identifier les effets de la dégradation des sols sur la croissance et le fonctionnement de la plante dans des conditions hydriques variées. Les conséquences sur la gestion de l'eau sur l'ensemble du cycle de la culture de mil seront évaluées selon les organes de la plante affectés par les contraintes de cet écosystème.

Afin de réaliser ce travail, nous verrons au cours de la *première partie* :

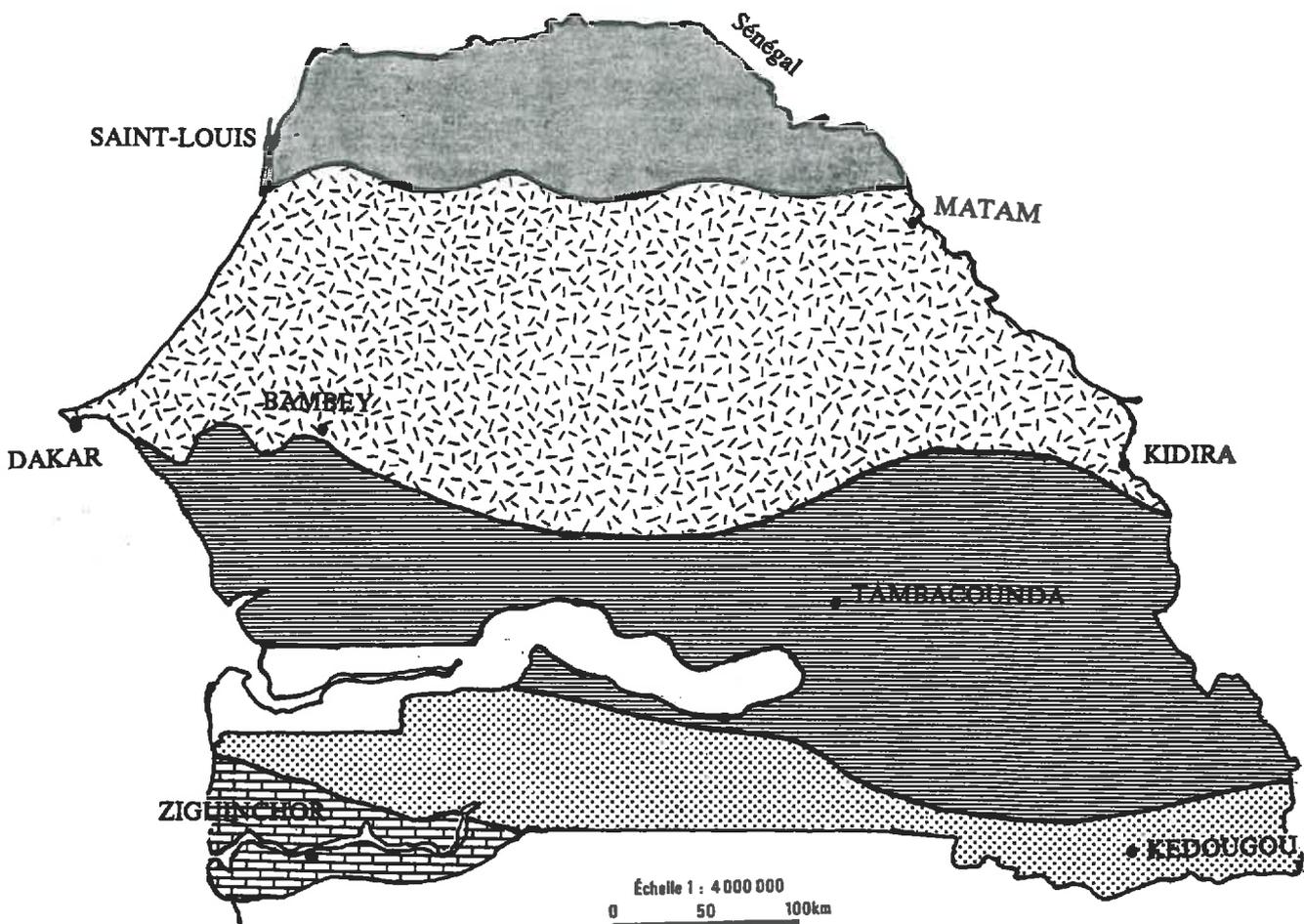
- une étude du milieu sahélo-soudanien, où s'est déroulée la partie expérimentale de ce travail, nécessaire à la compréhension des différents types de facteurs qui ont conduit à la situation actuelle de l'agriculture au Sénégal. Un diagnostic hydrique du déficit de productivité céréalière dans la zone sahélo-soudanienne sera ensuite effectué à différentes échelles.

- une revue des connaissances actuelles sur le fonctionnement hydrique de la plante et sur la perception du stress hydrique par la plante, permettant de choisir une démarche adaptée à notre étude .

La *deuxième partie* est essentiellement méthodologique et présente, outre les techniques utilisées pour l'étude de l'effet des sols dégradés sur l'alimentation hydrique du mil, les résultats obtenus pour l'adaptation de la mesure du débit de sève brute sur le mil.

Enfin la *troisième partie* est consacrée à l'étude du fonctionnement hydrique du mil et des conséquences de la dégradation des sols sur l'alimentation hydrique.

Fig. 1 : Les domaines biogéographiques du Sénégal (d'après l'atlas Jeune Afrique)



- Domaines biogéographiques :
-  Domaine sahélien
 -  Domaine sahélo-soudanien
 -  Domaine soudanien
 -  Domaine soudano-guinéen
 -  Domaine subguinéen

1ERE PARTIE : POSITION DU PROBLEME

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU MILIEU

Avancée occidentale du continent africain et faisant transition entre le Sahara aride et les régions guinéennes humides et forestières, le Sénégal comprend plusieurs domaines géographiques se succédant du Nord au Sud du pays qui sont définis par les conditions climatiques (fig. 1). Le Sénégal est un état du Sahel, "Sahil" en arabe signifiant bordure, rivage, désignant dans le cas présent la limite du désert (Sahara et Mauritanie).

La dénomination des différents domaines géographiques provient du fait que le climat en est la caractéristique principale. La délimitation de ces zones est basée sur la position des isohyètes, qui est par ailleurs sujet de débat, car elle est influencée par le choix de l'horizon de calcul des moyennes inter-annuelles (ALBERGEL, 1988).

Ainsi la limite entre la zone sahélo-soudanienne et la zone soudanienne est légèrement variable selon les auteurs (NDIAYE, 1983; DEAT et BOCKEL, 1985; RIBSTEIN, 1990). Le centre agronomique de Bambey, où s'est déroulée la partie expérimentale de ce mémoire, se situant à la limite de ces deux zones, est classiquement considéré dans la partie sahélo-soudanienne. Cette présentation du milieu sera donc centrée sur la description de cette zone.

La présentation du milieu va nous permettre de préciser les conditions d'environnement des cultures. Ces conditions sont définies par les caractéristiques du climat et des sols représentant des contraintes pour l'agriculture pluviale.

1- Le climat

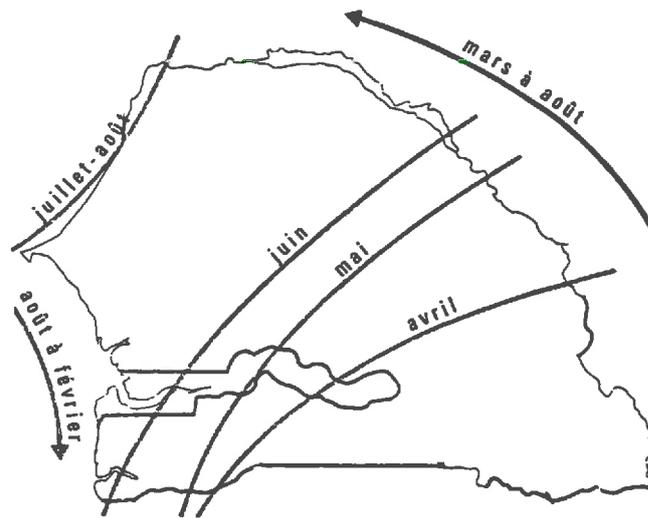
1-1- Les facteurs géographiques et aérologiques

Les grands traits climatiques sont le résultat conjoint de facteurs géographiques et aérologiques. Les premiers facteurs s'expriment par la latitude qui confère au territoire des caractères tropicaux, et par la position de Finistère ouest-africain qui détermine des conditions climatiques différentes dans la région littorale et dans l'intérieur. Les seconds facteurs s'expriment par l'alternance sur le pays de trois masses d'air principales, l'alizé maritime, l'harmattan et la mousson, dont les déplacements sont facilités par la platitude du relief (LEROUX, 1983).

La zone sahélo-soudanienne de l'intérieur du Sénégal n'est concernée que par les deux dernières masses d'air, précédemment citées :

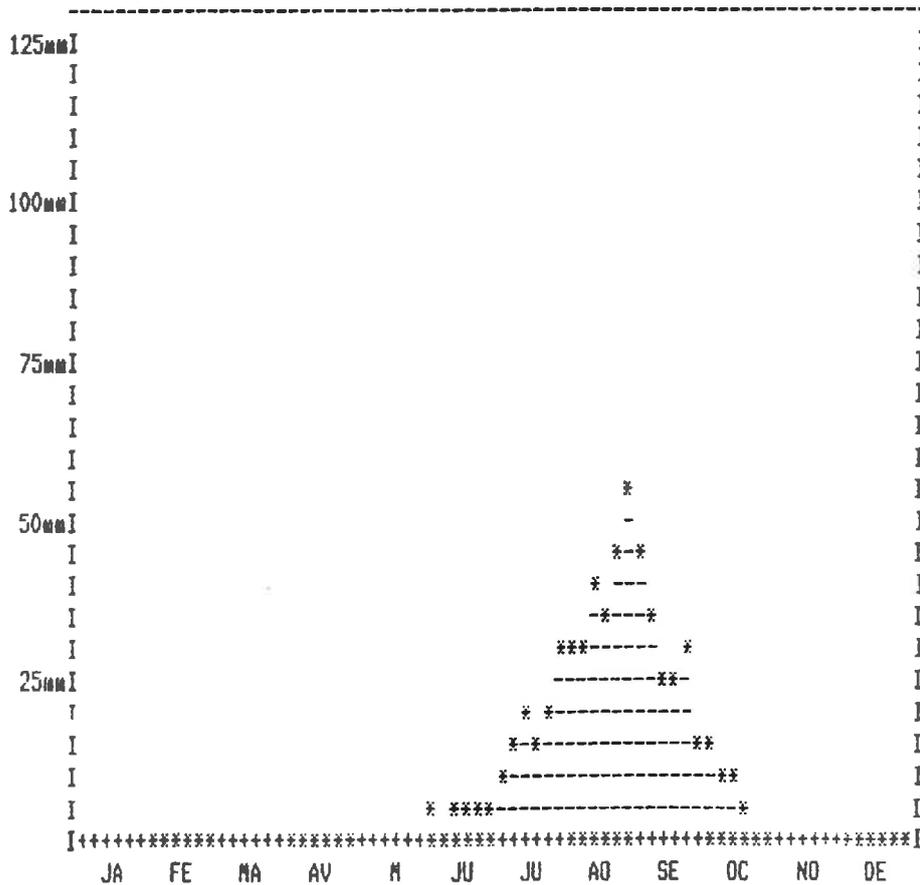
- l'harmattan, de direction Est dominante, branche finissante de l'alizé continental saharien, est caractérisé par une grande sécheresse liée à son long parcours continental, et par des amplitudes thermiques très accusées; frais ou froid la nuit, il est chaud à torride le jour. Sa sécheresse s'accompagne d'une très forte capacité d'évaporation.

Fig. 2 : Positions moyennes mensuelles du front intertropical, F.I.T. (atlas Jeune Afrique)



Tab. 1 : Tableau pluviométrique à la station de Bambey sur la période 1940-1985

Pluviométrie totale moyenne = 599.2 mm.



- la mousson provient de l'alizé issu de l'anticyclone de Saint-Hélène dans l'Atlantique Sud. Elle bénéficie d'un très long trajet maritime qui la rend particulièrement humide. Elle pénètre sur le pays en période estivale selon une direction Sud-Ouest et elle s'assèche relativement en fonction de sa pénétration vers l'intérieur. Elle est marquée par une faible amplitude thermique. Ainsi que le révèlent les positions moyennes de la trace au sol du Front Inter Tropical (F.I.T., défini comme le plan de contact entre la mousson et les alizés), qui marque la limite extrême de l'avancée de la mousson, elle pénètre sur le territoire en avril et s'étend progressivement jusqu'en juillet-août (fig. 2). Elle opère ensuite un retrait, lent en septembre et octobre, puis très brutal en novembre (LEROUX, 1983).

1-2- Les précipitations

L'année climatique au Sénégal est divisée en deux saisons principales par le critère pluviométrique : une longue saison sèche s'étend de novembre à avril, mai ou juin, selon la région, suivie de la saison des pluies qui dure donc le reste de l'année.

Dans la zone sahélo-soudanienne, on retiendra, parmi toutes les valeurs proposées selon les auteurs (SIVAKUMAR et al., 1979; COUREL, 1984), que la pluviométrie totale varie entre 300 et 700 mm répartie sur 3 à 5 mois.

A Bambey, la pluviométrie totale moyenne calculée sur la période 1940-1980 est d'environ 600 mm, essentiellement répartie sur les mois de juillet à octobre (Tab. 1).

Mais, des analyses fréquentielles montrent une diminution de la moyenne annuelle de la pluviométrie dans le Sahel ces 20 dernières années (MOREL, 1992) et tout le monde s'accorde pour parler de sécheresse, quelque soit la définition que les spécialistes veulent bien lui donner (SAARINEN, 1966; RIOU, 1989; SIVAKUMAR, 1991), pendant la période 1968-1985.

On pouvait penser que cette sécheresse ne serait qu'un épisode climatique de courte durée, mais sa persistance est maintenant admise par tous les observateurs. Les pays touchés se sont regroupés en un comité inter-Etats de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) pour mettre en commun leurs efforts face à cet aléa climatique.

Les pluviométries totales enregistrées à la station agronomique de Bambey, pour les années 1990, 1991 et 1992, n'ont pas dépassé les 400 mm par an. On est loin de la moyenne annuelle citée précédemment.

Outre les faibles quantités de précipitations, les caractéristiques fondamentales de la pluviométrie, en zone sahélo-soudanienne, sont la variabilité inter-annuelle et la répartition aléatoires de ces pluies. De plus, il existe des périodes sèches intermittentes, au cours de la saison des pluies, qui sont définies différemment des périodes de sécheresse (GLANTZ, 1987). Ces caractéristiques représentent les contraintes climatiques de la culture pluviale et sont accentués par la sécheresse (BOULIER et JOUVE, 1990).

Afin de répondre aux préoccupations des agriculteurs, des études fréquentielles sur les précipitations en relation avec des prévisions de rendement annuel, ont été menées par

différents instituts de recherche (CIRAD, programme AGRHYMET de la Coopération Française, ORSTOM). Un modèle stochastique de la pluviométrie au Sahel a été proposé en vue d'une application agronomique (GOZE, 1990). Par ailleurs, l'ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics) a publié un bulletin répertoriant la durée et la fréquence des périodes sèches en Afrique de l'Ouest (SIVAKUMAR, 1991).

1-3- Les températures

Les températures, en permanence élevées, sont liées à la latitude tropicale du Sénégal, mais elles varient dans le temps avec les saisons, notamment avec les pluies qui les abaissent, et dans l'espace, avec la proximité ou l'éloignement de l'océan. La continentalité explique d'abord l'augmentation générale de la température vers l'intérieur. L'amplitude thermique, aussi bien diurne qu'annuelle, suit la même progression : elle est faible sur le littoral et s'accroît considérablement vers l'intérieur du pays (LEROUX, 1983).

On trouvera en annexe les données climatiques mesurées à la station agronomique de Bambey.

2- Les sols

Les sols au Sénégal se sont développés sur un manteau sableux éolien de 1 à 10 m d'épaisseur, reposant sur des calcaires et marnes tertiaires.

On observe deux types de sols : les sols *dek*, enrichis en argile et en matières organiques, se rencontrent dans les inter-dunes, tandis que les *dior* (ferrugineux tropicaux peu lessivés) constitués sur des dunes et des dépressions au modelé atténué sont des sols sableux, sans drainage organisé, à profil homogène et à horizon humifère peu marqué (BONFILS et FAURE, 1956; CHARREAU, 1961; CHARREAU et NICOU, 1971). Parmi les sols dior, on classe aussi les sols de type mixte (dior-dek) qui proviennent de l'action de l'érosion éolienne et du ruissellement sur le modelé, par transfert d'éléments fins, à l'échelle de temps géologique.

Le terme dior est un nom vernaculaire signifiant "facile à travailler". C'est sur les sols dior, couvrant la majeure partie des surfaces, que sont cultivés le mil et l'arachide.

Ces sols sont profonds et drainent bien (jusqu'à 50 à 250 mm/h à saturation : CHARREAU et NICOU, 1971; HAMON, 1978) mais ils ont une faible porosité globale (30 à 40%), proche de la porosité texturale, qui est due à la compaction du sol, l'hétérométrie des sables conduisant à un arrangement très compact des particules (NICOU, 1974). Leur caractéristique physique telle que la rétention d'eau (environ 75 mm d'eau sur 1 m de profondeur : DANCETTE et al., 1974; VACHAUD et al., 1978; HAMON, 1978) est médiocre.

Les sols dior sont à texture essentiellement sableuse : les sables quartzes représentent 96 % du sol; la faible fraction argileuse est constituée de kaolinite, de sesquioxides et de

Tab. 2 : Caractéristiques principales des sols dior (d'après CHARREAU, 1961; CHARREAU et NICOU, 1971)

Nom vernaculaire	DIOR
Classification pédologique	Sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés
Texture S % L % A %	Sableuse 96 1 3
Fertilité chimique Taux matière organique (%) CEC (meq/100 g) P assimilable Truog (ppm)	Très faible 0.4 2.0 8.0
Comportement hydrique	Bonne infiltration, faible rétention d'eau, mais profondeur importante : forte capacité de stockage

silice colloïdale (PIERI, 1977).

Leur capacité d'échange cationique est très faible : 1 à 3 meq/100 g de sol (BONFILS et FAURE, 1956). La capacité d'échange cationique (CEC) est définie par la quantité de cations évaluée en milliéquivalents (meq) retenue par 100 g de terre. Elle dépend de la teneur en argile, de la nature des argiles et du pourcentage de matière organique. A titre de comparaison, la CEC dans les sols argileux peut atteindre 60 meq/100 g de sol (CALLOT et al., 1982).

Les sols dior sont naturellement pauvres en éléments minéraux et en matières organiques (Tab. 2).

3- La culture du mil dans l'agriculture sénégalaise

Les seules cultures pluviales vivrières possibles dans la zone centre-nord du Sénégal sont l'arachide et les céréales tels que le mil et le sorgho (fig. 3) car elle sont tolérantes aux conditions d'aridité du milieu. Selon KASSAM (1976), le mil nécessite un minimum de 200 à 250 mm d'eau. C'est une plante rustique apte à produire en milieu peu fertile (RACHIE, 1974). Le mil est donc la céréale par excellence des pays du Sahel, correspondant à un milieu où il ne rencontre guère de culture concurrente. Dans le bassin arachidier, au Sénégal, les rendements moyens varient entre 400 à 600 Kg/ha.

Tous les auteurs (PORTERES, 1950; FERRARIS, 1973; RACHIE, 1974) s'accordent à donner au mil penicillaire (*Pennisetum glaucum* L.) une origine ouest africaine, d'où il se serait propagé sur toute la bordure Sud du Sahara.

Au Sénégal, les populations de mil cultivées se divisent en deux grandes familles, qui se distinguent par la précocité qu'elles manifestent en période normale de culture pluviale :

- les formes tardives, ou Sanio (cycle semis-récolte de 130 à 150 jours) sont sensibles à une photopériode de jours courts : ils ne fleurissent que si la longueur du jour est suffisamment faible (12 h).

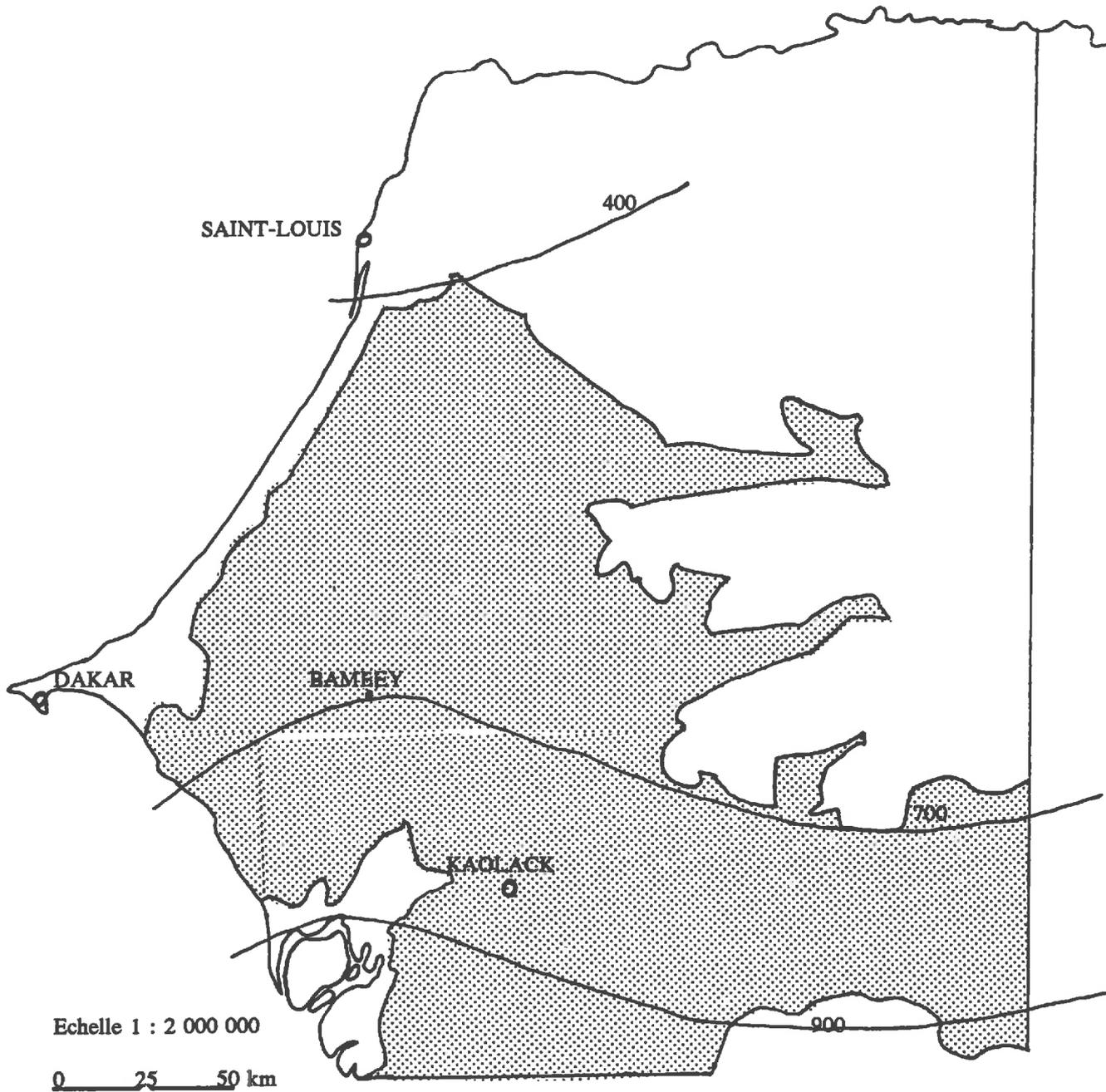
- les formes hâtives (cycle de 80 à 100 jours) sont appelées Souna. Elles préfèrent les jours courts, mais peuvent fleurir en jours longs (CARRIOLS in CERIGHELLI, 1955; PERNES, 1984).

Au Sénégal, seul le Souna a bénéficié d'efforts soutenus de sélection qui ont abouti à la constitution d'une nouvelle population synthétique, le Souna III, ou IRAT P2 (ISRA, 1975; LAMBERT, 1983c), au cycle moyen de 85 à 90 jours. Il a été vulgarisé dès les années 1970 en milieu paysan. Depuis, le matériel a certainement fortement dégénéré et les intercroisements (d'autant plus probables que le mil est allogame) avec les Sounas locaux pourraient constituer des populations mixtes (DIOUF, 1990).

Depuis la sécheresse des années 70, le Souna a progressivement remplacé le Sanio dans le bassin arachidier car son cycle plus court est mieux adapté à la durée de la saison des pluies. Le Sanio n'est plus présent qu'au Sud du pays. L'arachide est la seule production entièrement commercialisée, elle est essentiellement une culture de rente, alors que le mil

Fig. 3 : Le bassin arachidier au Sénégal (d'après l'atlas Jeune Afrique)
La partie grisée concerne l'arachide, le mil et les quelques jachères

400 Isohyète (en mm)



Tab. 3 : Croissance de la production de céréales et croissance de la population au Sénégal
(source : Ministère du Développement rural Sénégalais)

Période	Production moyenne de céréales sur la période	Production qui aurait été nécessaire pour maintenir le même taux d'auto-suffisance	Déficit additionnel
1961-1965	563	563	
1966-1970	705	652	+ 50
1971-1975	620	756	- 135
1976-1980	732	877	- 145

(en milliers de tonnes)

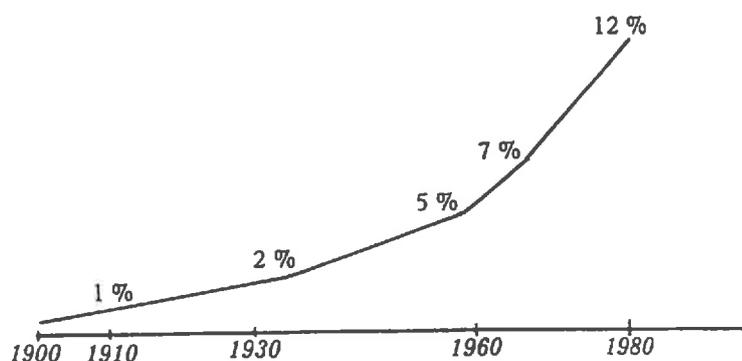
Les chiffres de production concernent mil, sorgho, maïs et riz paddy.

Pendant la période 1961-65, le Sénégal était loin d'être auto-suffisant sur le plan de l'approvisionnement en céréales, puisque les importations moyennes se sont montées à 210 000 tonnes par an.

La deuxième colonne indique comment aurait dû évoluer la production de céréales pour suivre la progression démographique (3 % par an environ) et donc maintenir à peu près constant le taux d'auto-suffisance alimentaire.

Le déficit se creuse pendant la période sèche et il se creuse encore plus depuis 1976 : le Sénégal devient de plus en plus dépendant (GIRI, 1983).

Fig. 4 : Part des céréales consommées dans le Sahel venant de l'extérieur (importations plus aide alimentaire moyennes sur plusieurs années) (d'après GIRI, 1983)



reste à plus de 95 % autoconsommé (source SO.DE.VA, 1978 in SIBAND, 1981).

L'agriculture tient un rôle primordial dans la vie quotidienne des Sénégalais comme dans l'économie générale du pays. La majorité des Sénégalais sont les héritiers de civilisations paysannes anciennes et les trois quarts d'entre eux sont des ruraux vivant directement des produits de la terre dans le cadre de petites exploitations familiales d'où ils tirent à la fois leur alimentation quotidienne et leurs revenus monétaires. Au niveau national, l'économie tout entière, y compris une grande partie du secteur industriel et des échanges extérieurs, a pour base essentielle la production agricole (PELISSIER, 1983).

4- Vers une auto-suffisance alimentaire ?

Dans ce contexte agro-économique, nombreux sont ceux (économistes, politiques, décideurs, ...) qui se demandent si l'agriculture sénégalaise arrivera à atteindre une auto-suffisance alimentaire :

On observe une forte population doublant à chaque génération, la caractéristique essentielle étant l'accélération de cette croissance depuis 1960 (GIRI, 1986). Pour atteindre cette auto-suffisance alimentaire, la production agricole doit suivre l'accroissement des besoins alimentaires pour éviter les importations coûteuses en céréales et/ou la dépendance engendrée par l'aide alimentaire. Or cela n'est pas le cas :

- le tableau 3 sur la croissance de la production de céréales et croissance de la population de 1961 à 1980 au Sénégal montre que le déficit céréalier se creuse de plus en plus.

- la figure 4 montre la part des céréales consommées dans le Sahel venant de l'extérieur (importations plus aide alimentaire moyennes sur plusieurs années) de 1900 à 1980 : en 1983, la population du Sahel, dont celle du Sénégal, devient de plus en plus dépendante de l'extérieur pour sa nourriture quotidienne (GIRI, 1983). Cette évolution ne semble pas s'être améliorée depuis la dernière décennie (GALLAIS, 1989).

L'augmentation de la population n'est qu'un des facteurs responsables de cette situation. Des études agronomiques ont aussi montré une baisse de la productivité des céréales par des observations au champ (CHOPART et NICOU, 1987; GARIN et al., 1990) et par simulation du bilan hydrique au niveau régional (REYNIERS et FOREST, 1990).

Face à cette situation, on en vient à se demander si l'insuffisance des ressources naturelles conduit fatalement à cette évolution ou si ces ressources, notamment la pluviosité qui est le principal facteur limitant du milieu sahélo-soudanien, sont correctement valorisées. Il apparaît alors nécessaire de faire une revue bibliographique des différents facteurs provoquant une diminution des rendements et d'évaluer la part respective de la ressource pluviométrique dans ce déficit.

Fig. 5 : Potentialités calculées sur la période 1970-1985 et réalités de la production du mil au Mali (source : IER Mali)

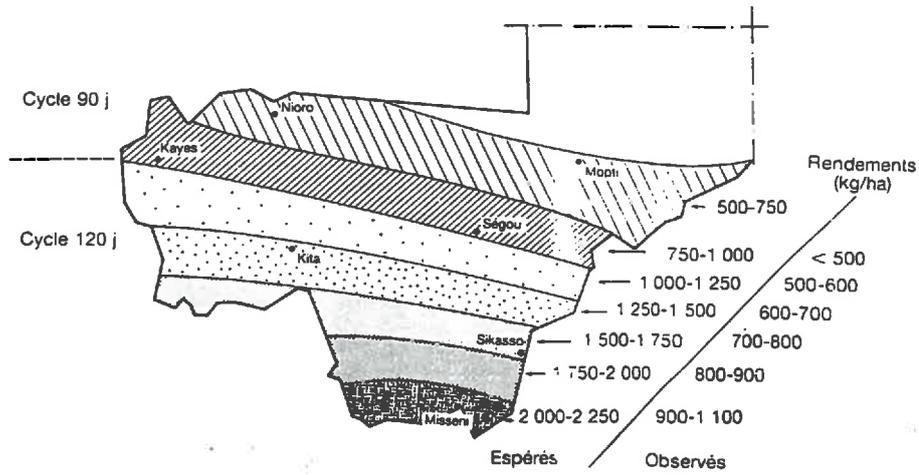
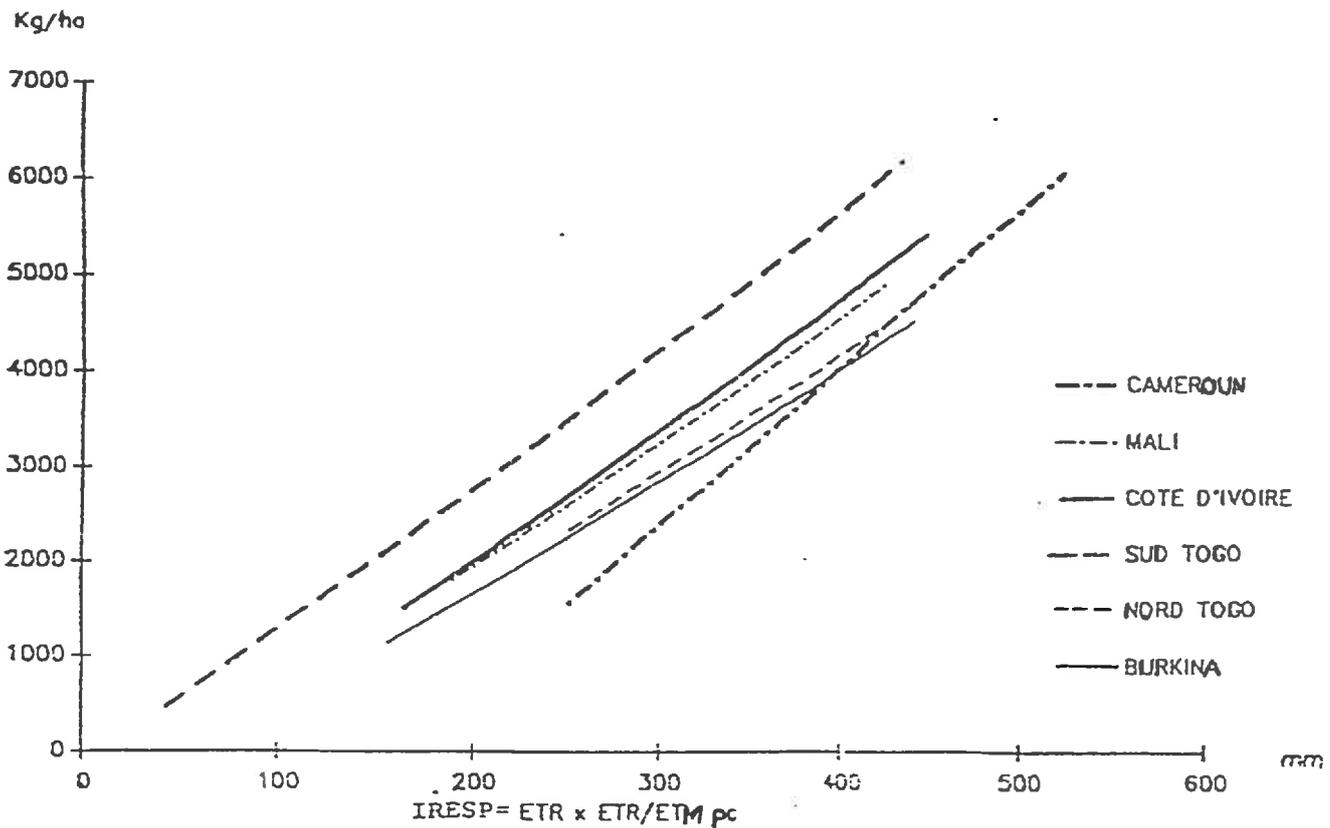


Fig. 6 : Relation entre IRESP (indice de rendement espéré) et rendements mesurés dans différents pays de l'Afrique sub-sahélienne (d'après GIRARD et ADRI, 1991)



CHAPITRE 2 : DIAGNOSTIC HYDRIQUE DU DEFICIT DE PRODUCTIVITE CEREALIERE DANS LA ZONE SAHELO-SOUDANIENNE

Pour appréhender les facteurs susceptibles d'avoir provoqué une baisse de la productivité de céréales et avant d'en souligner les interactions dans le contexte agro-climatique de la zone sahélo-soudanienne, il est indispensable de se situer à différentes échelles. Le problème de transfert d'échelle est évoqué par de nombreux auteurs (JARVIS et MC NAUGHTON, 1986; VALENTIN et al., 1989; RAUNET, 1990; REYNIERS, 1991) dans les études sur le fonctionnement hydrique.

Tout en privilégiant une simplification de la présentation (c'est-à-dire en limitant le nombre d'échelles), cette étude du diagnostic hydrique se subdivise en 3 niveaux qui sont le pays, le terroir et le champ paysan.

1- L'échelle du pays

Une étude sur les zonages de potentialités de production du mil montre que les rendements en céréales ne sont pas à leur niveau potentiel (REYNIERS et FOREST, 1990). L'exemple donné est celui du Mali : la figure 5 représente les écarts entre les potentialités calculées sur la période 1970-1985 et les réalités de la production du mil au Mali. Les rendements espérés sont calculés par l'intermédiaire d'un modèle de simulation du bilan hydrique (FRANQUIN et FOREST, 1977, FOREST, 1984) : ce modèle permet d'estimer l'évapotranspiration réelle ETR et l'évapotranspiration maximale ETM de la culture afin d'établir un indice de satisfaction des besoins en eau, ETR/ETM. A partir de cet indice, dont l'intérêt a été démontré par ROBELIN (1984) sur du maïs, les travaux de FOREST et LIDON (1982), REYNIERS et FOREST (1988), POSS et al. (1988), CORTIER et al. (1988) ont abouti à la création de l'indice de rendement potentiel IRESP (Indice de Rendement ESPéré) :

$$\text{IRESP} = \text{ETR}_{\text{cycle}} \times (\text{ETR}/\text{ETM})_{\text{phase critique}} \quad \text{en mm}$$

Puis la régression entre cet indice et les rendements mesurés en station donne la relation suivante :

$$\text{Rendement (Kg/ha)} = a \times \text{IRESP} + b$$

les coefficients numériques a et b dépendent des cultures et des régions. La corrélation rendement/IRESP est bonne pour des itinéraires techniques performants et homogènes comme ceux réalisés en station de recherche. En ce qui concerne les rendements paysans, la relation est plus fluctuante pour les raisons que nous verrons dans le paragraphe 3-1, à l'échelle du champ.

La figure 6 donne un exemple de la relation trouvée pour du maïs, en condition de culture intensifiée dans différents pays de l'Afrique sub-sahélienne, entre l'IRESP et les

Tab. 4 : Evaluation (en %) du ruissellement et du drainage sous culture dans le Siné-Saloum, Sénégal
 (d'après RUELLE et al., 1989 in REYNIERS et FOREST, 1990)

Termes du bilan hydrique :	Mil		Arachide **
	*	**	
Ruissellement	27	51	25
Drainage sous les racines	20	1.5	28
ETR estimée	53	47.5	47
Pluviométrie	702		702

* Rendement supérieur à 600 Kg/ha de mil (grain).

** Rendement inférieur à 600 Kg/ha de mil (grain) et d'arachide (gousse).

rendements mesurés. Cette relation établie avec l'IRESP permet alors de calculer les rendements espérés pour une pluviométrie observée, en prenant les valeurs, les plus adaptées à la zone étudiée, des paramètres d'entrée du modèle de simulation, qui sont :

- *la durée du cycle* : elle est choisie, dans la mesure de l'éventail disponible des durées de cycle des variétés (90 ou 120 jours pour le mil), de façon à être calée sur la durée de la saison des pluies. Les cycles de 90 jours sont mieux adaptés au Nord, et ceux de 120 jours au Sud.

- *la date de semis* : elle est fonction de la date d'arrivée des premières pluies, selon le choix d'un semis en sec ou en humide. Il faut aussi évaluer le risque de l'installation, immédiatement après le semis, d'un épisode sec compromettant le développement de la culture et obligeant parfois le paysan à ressemer.

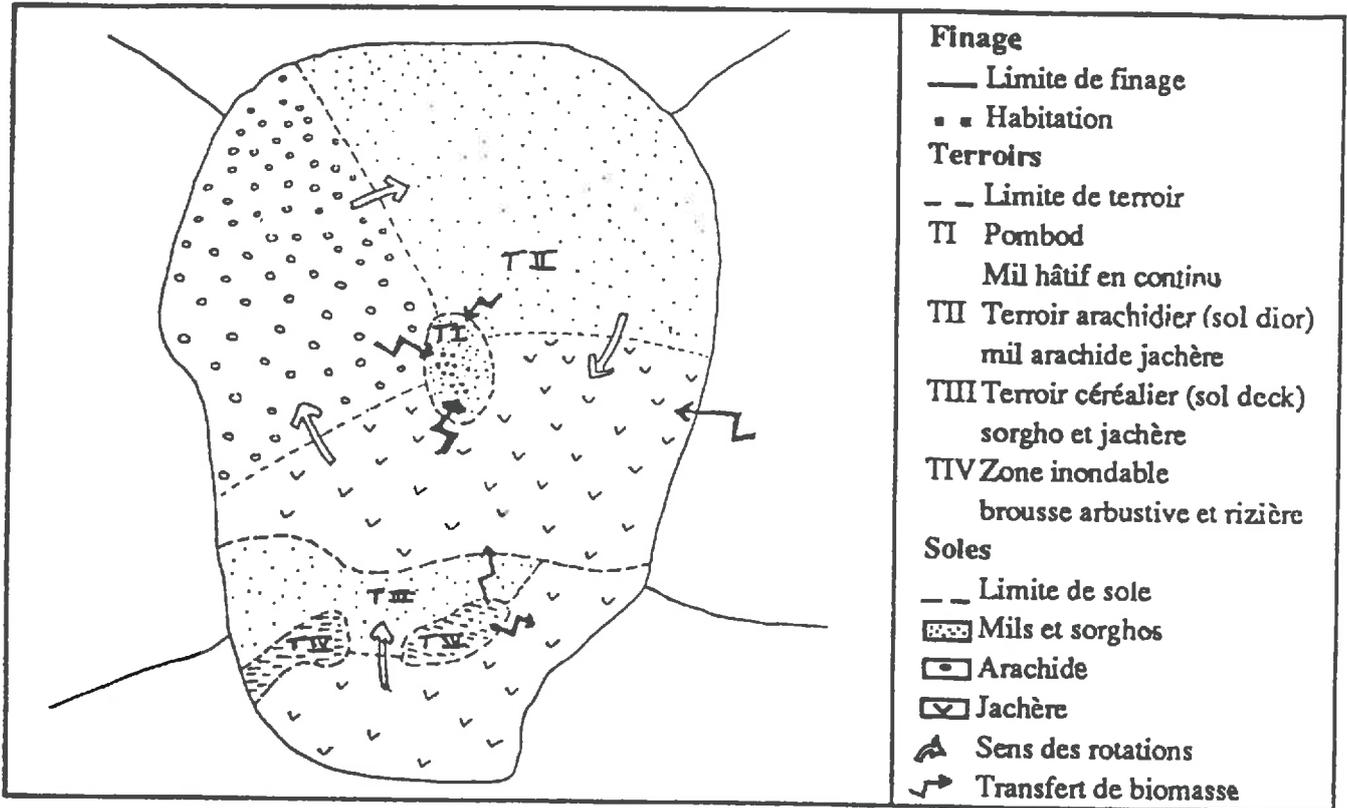
- *la réserve utile racinaire (RUR)* : elle est définie comme étant le volume du réservoir d'eau du sol exploitable par les racines de la culture. Cette notion intègre d'une part la réserve utile (RU) du sol, qui est fonction des propriétés physiques du sol telles que la structure, la texture, la profondeur, la capacité de rétention, la teneur en matière organique, et d'autre part les propriétés d'enracinement (profondeur et densité) de la culture. C'est un paramètre important de l'alimentation hydrique et donc du rendement. L'effet d'une augmentation de RUR de 80 à 140 mm sur le rendement espéré du maïs au Mali est fonction des zones avec un gain moyen d'environ 500 Kg par hectare (REYNIERS et FOREST, 1990). Il faut toutefois signaler que l'estimation de la RUR est souvent empirique et reste encore approximative.

Le zonage effectué au Mali (fig. 5) indique clairement que parallèlement à une augmentation du Nord vers le Sud du pays des ressources pluviométriques, les écarts entre potentialités (calculées en conditions optimales en station) et productivités réelles mesurées en milieu paysan se creusent. Cela signifie que la proportion de pluies utilisées pour l'élaboration du rendement (c'est-à-dire par l'alimentation hydrique de la culture) a diminuée avec les hauteurs de pluies et cela au profit des autres flux hydriques générés à partir des pluies: le ruissellement et le drainage. Par ailleurs, une étude au centre du Sénégal (Tab. 4) montre qu'environ 50% seulement des pluies sont utilisées pour l'alimentation hydrique de la culture.

Par contre dans la partie Nord, les écarts entre rendements espérés et rendements observés sont moindres en relation avec une pluviosité plus faible et des pertes par ruissellement et par drainage négligeables. Ainsi, dans la moitié Sud du Mali agricole, l'exploitation optimale des précipitations sous forme d'alimentation hydrique permettrait de doubler les rendements de céréales, à condition d'une fertilisation suffisante (REYNIERS et FOREST, 1990).

Ce diagnostic est à la fois valable pour l'ensemble de la zone sahélo-soudanienne et pour les périodes où le déficit pluviométrique n'est pas l'unique cause de la baisse de l'alimentation hydrique (AFFHOLDER, 1991b).

Fig. 7 : Gestion ancienne du terroir en pays Sérère (d'après PELLISSIER, 1983)



2- L'échelle du terroir

2-1- Historique

L'exemple pris pour illustrer cette étude est le système agraire du pays Sérér du Sénégal qui, il y a une trentaine d'années, était cité comme exemple de gestion rationnelle du milieu, reproductible à long terme et capable de nourrir et de fournir un revenu à une population dense de 50 à 60 habitants au km² (GARIN et al., 1990).

Ce système agraire était en équilibre après l'introduction de l'arachide (PELISSIER, 1966) en 1840 (cette date fait référence aux premières exportations commerciales en provenance du Sénégal vers la France, d'après SCHILLING, 1992) bien que l'espace soit déjà saturé. L'insertion de l'arachide s'est traduite par une rotation triennale (fig. 7).

Puis 4 facteurs ont contribué à la déstructuration du système (GARIN et al., 1990):

- l'accroissement démographique : la densité actuelle est de 100 à 130 habitants au km².

- les sécheresses pendant la période 1968-1985.

- la mise en oeuvre de nouvelles règles d'accès à la terre : l'interprétation de la loi foncière sur le domaine national de 1964 et la mise en place des communautés rurales après 1972 ont accéléré la mise en culture des jachères, les paysans craignant que les terres laissées vacantes soient redistribuées (GASTELLU, 1981).

- la généralisation de la culture attelée, permise par les efforts d'équipement consentis à cette époque par les sociétés de développement, a facilité cette nouvelle extension des terres cultivées (HAVARD, 1986).

2-2- Evolution des systèmes de production et dégradation des ressources naturelles

La sécheresse a accentué l'évolution des systèmes de production déjà amorcée par l'augmentation de la population sur l'évolution des systèmes de production et de dégradation des ressources naturelles en zone sahélo-soudanienne (BOULIER et JOUVE, 1990).

Ce schéma (fig. 8) rassemble les étapes de cette évolution et les relations de cause à effet entre les faits suivants :

- l'accroissement de la pression foncière, l'extension des cultures sur les zones de forêt et de parcours du bétail, la réduction du nombre et du temps de jachères. Autrefois, ce temps atteignait souvent plus de 10 ans, ce qui évitait un épuisement trop rapide des sols cultivés. En pays Sérér, la rotation biennale mil précoce/arachide a remplacé la rotation triennale classique arachide/mil/jachère.

- la surexploitation et la dégradation des espaces sylvo-pastoraux : notamment la raréfaction du parc à *Acacia albida*, légumineuse qui joue un rôle essentiel dans l'entretien de la fertilité (CHARREAU et VIDAL, 1965; DANCETTE et POULAIN, 1968), sous le

Fig. 8 : Schéma général d'évolution des systèmes de production et de dégradation des ressources naturelles en zone sahélo-soudanienne (d'après BOULIER et JOUVE, 1990)

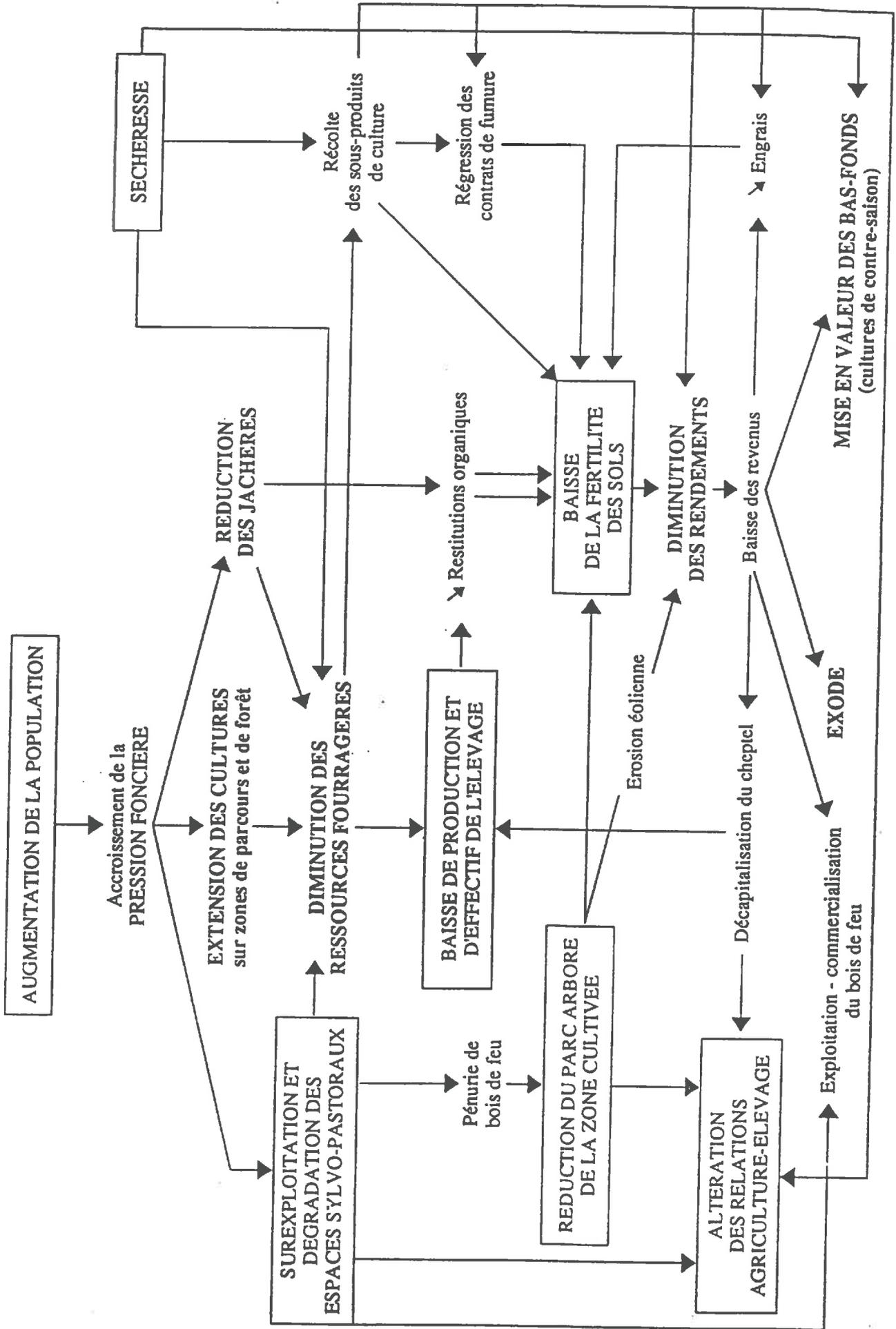
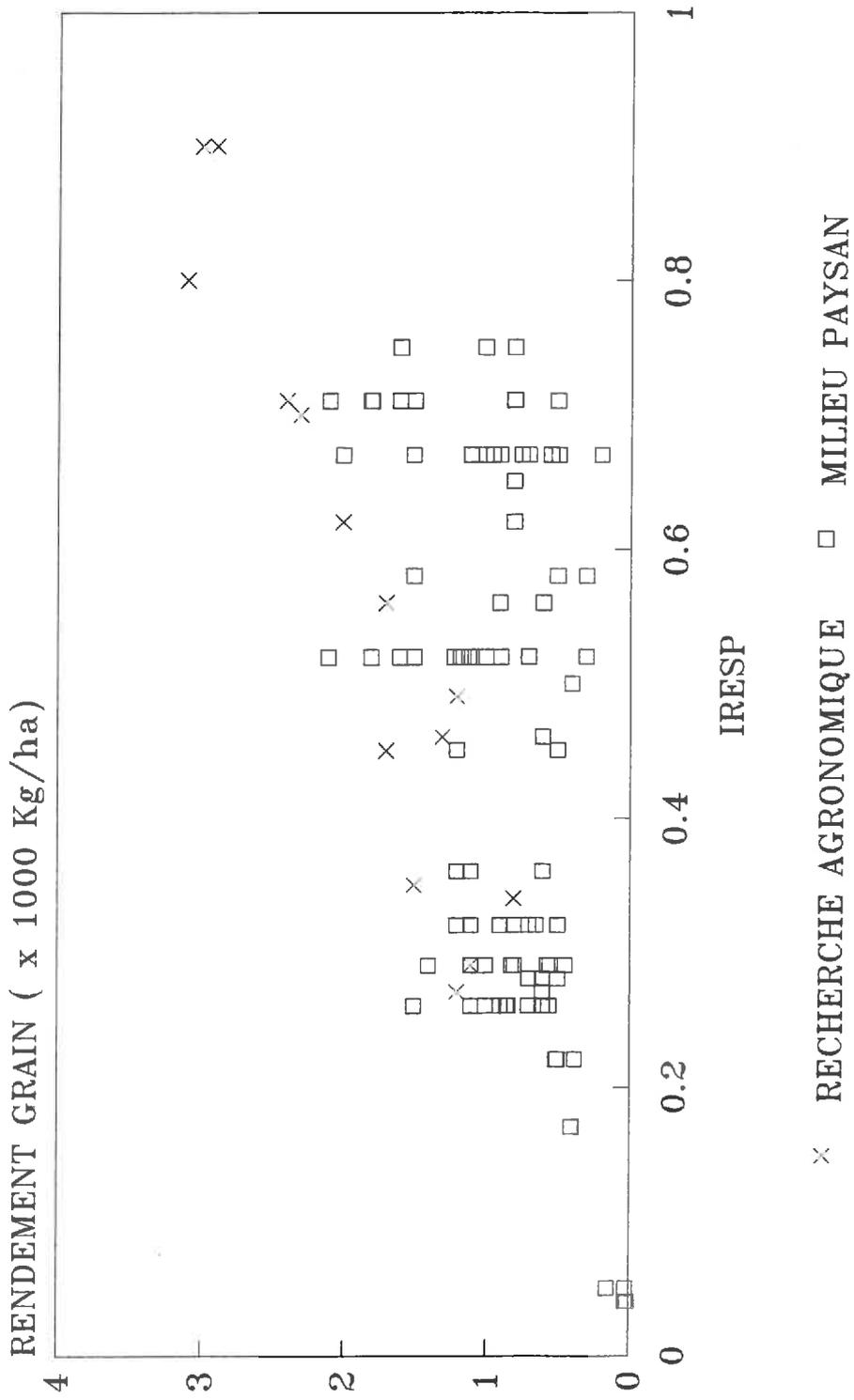


Fig. 9: Relation entre l'indice hydrique IRESP et le rendement du mil en station et en milieu paysan, d'après AFFHOLDER (1991b)



double effet de la mortalité due à la sécheresse et des prélèvements de bois de feu (LERICOLLAIS, 1987). De plus, ce parc n'est plus entretenu par les paysans en conséquence directe de l'application du code forestier sur la gestion des ressources forestières (LOUPE, 1989) : en effet, les paysans ne sont plus propriétaires des arbres et donc ne se sentent pas concernés par le renouvellement de ce parc; ils sont même contraints à payer une amende si on les surprend à élaguer les branches, cet arbre fourrager fournissant un complément azoté et énergétique indispensable à l'entretien des animaux en saison sèche (CTFT, 1989).

- la diminution des restitutions organiques due aux pertes de matière organique d'origine animale qui était le principal facteur d'intensification de l'agriculture. Ces pertes sont en relation avec la transhumance des troupeaux villageois (GARIN et al., 1990) dont l'effectif est aussi réduit à cause de la diminution des ressources fourragères. Les transferts de fertilité par les animaux des zones non cultivées vers les zones cultivées diminuent par suite de la réduction des parcours et du cheptel. La fabrication du fumier en est affectée (BOULIER et JOUVE, 1990). Ainsi, la réduction de la fréquence des apports organiques est la conséquence d'une dispersion accrue des restitutions dans l'espace qui confirme la stratégie anti-aléatoire par les producteurs avec une volonté de maintenir autant que faire ce peut, un potentiel de production minimal sur de plus grandes surfaces plutôt que de le concentrer sur un nombre réduit de parcelles (GARIN et al., 1990).

Tous ces facteurs tendent à un déséquilibre au niveau des cultures entre les apports et les besoins en éléments minéraux qui se traduit par une baisse de la fertilité des sols et par la diminution des rendements. Ceci a des conséquences sur la chute des revenus des paysans, ce qui les conduit à moins utiliser d'engrais, en concomitance avec l'arrêt, en 1984, de la politique de subvention de l'Etat à l'acquisition d'intrants (AGEL et THEVENIN, 1984). Dans ce contexte, dans les régions où les paysans reconnaissent l'intérêt agronomique des engrais minéraux (comme dans le pays Sérér), l'adoption de cette solution pose alors le problème du coût des engrais et de leur rentabilité, discutable lorsque l'aridité du climat est très accusée (BOULIER et JOUVE, 1990).

3- L'échelle du champ

3-1- Productivité variable

A l'échelle de la parcelle, les rendements du mil ont été analysés en fonction de l'indice hydrique de satisfaction des besoins en eau (IRESP), en milieu paysan et en station de recherche (fig. 9) (AFFHOLDER, 1991b). Ce graphique montre la variabilité des situations : un rapport de 1 à 10 existe entre les moins bons et les meilleurs rendements lorsque les conditions hydriques ne sont pas limitantes. Cette variabilité s'explique par la présence d'autres facteurs limitants qui ne sont pas pris en compte dans l'élaboration de l'indice IRESP.

Tab. 5 : Pertes minérales par lixiviation sous culture au Sénégal (d'après PIERI, 1982)

Lieu	Pluviométrie en mm (année)	Culture (variété)	Drainage (mm)	Pertes (Kg/ha/an)				
				N	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅
Bambey (Sénégal)	507 (1981)	Mil (Souma III)	9.5	0.3	0.8	0.4	0.3	Tr
		Arachide (55-437)	100.6	25.1	54.1	13.6	5.2	Tr

Par exemple à Sob en pays Sérér, la productivité du milieu ne semble pas s'être effondrée dans le temps : les rendements ont régulièrement atteint les 2 tonnes par hectare de gousses d'arachide ou de grains de mil de 1986 à 1988 sur des parcelles non fumées depuis au moins 5 ans (CATTAN, 1987; GARIN et THIAM, 1989). Ces rendements de 2 t/ha sont proches de ceux que l'on obtient sur des parcelles régulièrement fumées à la station agronomique de Bambey, en culture pluviale. Un contrôle de plus en plus sévère des adventices a pu compenser la baisse de la fertilité en pays Sérér (GARIN, 1989), mais la faiblesse des apports exogènes montre que le système actuel ne peut se perpétuer à moyen et long terme sans remettre en cause le potentiel de production agricole (GARIN et al., 1990).

Il ressort de cette étude que si le potentiel de production, tel qu'il peut être obtenu en station de recherche, est parfois atteint, les rendements sont en général limités par les faibles restitutions d'éléments fertilisants et un mauvais contrôle des adventices (AFFHOLDER, 1991b). Une interaction entre la fertilité du sol et l'alimentation hydrique du mil a été par ailleurs mise en évidence par des travaux en station (CISSE, 1986; AFFHOLDER, 1991a).

Les problèmes de fertilité de ces sols impliquent de caractériser les conditions de nutrition minérale de la culture en relation avec la pluviométrie, donc avec la disponibilité en eau, et les conséquences sur l'alimentation hydrique :

3-2- Composition minérale du sol en relation avec la pluviométrie

Outre les pertes minérales par érosion et par ruissellement, on observe des pertes minérales par lixiviation du fait de la nature sableuse et de la distribution très irrégulière des pluies en début de saison de culture (Tab. 5) (PIERI, 1982).

L'enracinement, par sa cinétique d'installation et sa profondeur maximale, est un facteur déterminant de la lixiviation. En effet, il va contrôler les flux de drainage dans les sols cultivés. L'autre facteur déterminant de la perte en cations Ca et Mg est la charge anionique (la charge en nitrates et dans une moindre mesure la charge en chlorures) de la solution du sol : à chaque anion NO_3^- présent dans la solution du sol, au-delà de la zone d'extraction des racines, est associé un peu plus d'un équivalent cationique, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (PIERI, 1979). Ainsi, la pluviosité, l'enracinement et le flux de nitrates vont déterminer l'importance de la lixiviation. Pour les sols ferrugineux tropicaux de la zone sahélo-soudanienne, elle porte essentiellement sur les cations alcalino-terreux (Ca et Mg) et très peu sur le potassium, K (POSS et SARAGONI, 1987).

La période critique en cours de culture est le tout début de la saison des pluies, où l'on observe une intense minéralisation de la matière organique du sol et l'apparition du flux de nitrates (BLONDEL, 1971). Or à cette période, l'enracinement des cultures est peu profond et leur demande en azote quantitativement faible (SIBAND, 1981). Ce "pic de

Fig. 10 : Garniture cationique du complexe absorbant en fonction de l'acidité du milieu (d'après BOLT et BRUGGENWERT, 1976)

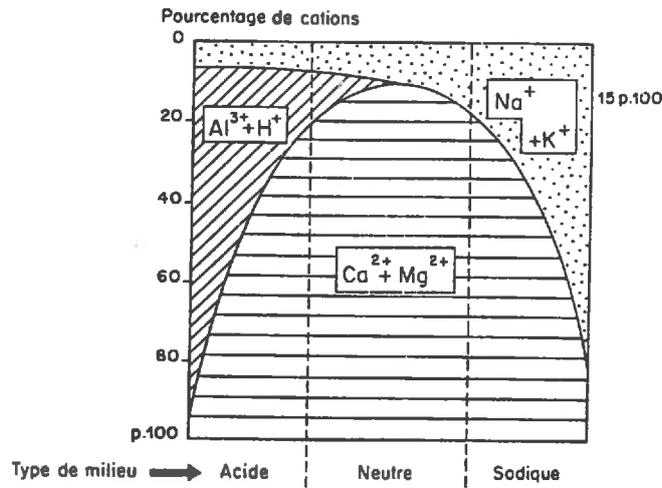


Fig. 11 : Influence sur la disponibilité des éléments nutritifs (d'après LUCAS et DAVIES, 1961)

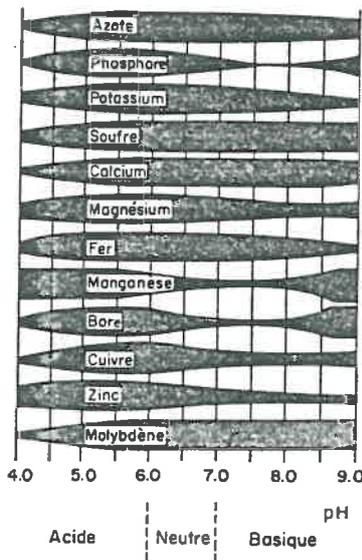
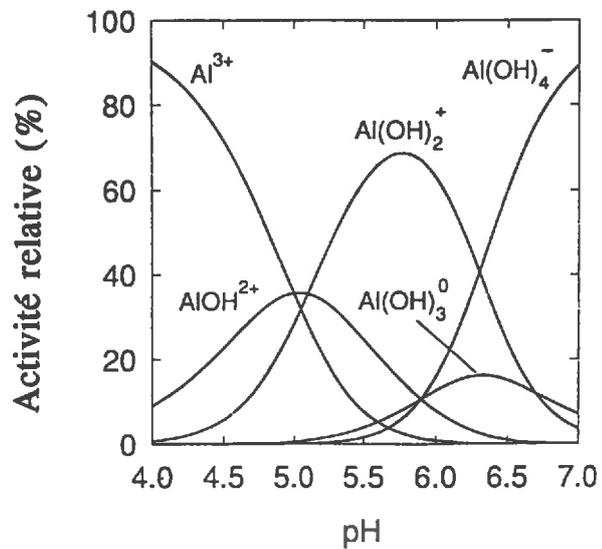


Fig. 12 : Activités relatives en fonction du pH des formes mononucléaires d'Al en admettant l'absence des formes polynucléaires ou des ligands autres que OH⁻ (d'après KINRAIDE, 1991)



minéralisation" peut être plus ou moins accusé (GIGOU, 1982). Mais lorsqu'il est très accusé et de surcroît associé à de fortes pluies induisant un drainage important, comme c'est souvent le cas en début de saison humide, toutes les conditions sont réunies pour favoriser la lixiviation des nitrates, la désaturation cationique des sols, et la libération des ions H^+ . Cela se traduit par une perte en Ca et Mg échangeables et une chute de pH (PIERI, 1989).

La composition cationique du sol variant avec l'acidité du milieu (CALLOT et al., 1982), on observe alors l'apparition d'aluminium échangeable sur le complexe absorbant (fig. 10) : le complexe absorbant possède un fort pourcentage d'ions Al^{3+} et H^+ pour des pH inférieurs à 4. Le rapport entre Al^{3+} et les autres cations (essentiellement Ca^{2+} et Mg^{2+}) est alors augmenté pour des pH acides.

3-3- Conséquences sur l'enracinement

Ces modifications des caractéristiques chimiques du sol vont alors avoir des conséquences sur l'enracinement et par conséquent sur l'alimentation hydrique de la culture:

- *acidité des sols* : le pH du sol a une influence sur la solubilité des éléments minéraux et donc sur leur disponibilité pour la plante (RORISON, 1980) (fig. 11 d'après LUCAS et DAVIES, 1961 in MENGEL et KIRKBY, 1987). Ces éléments, notamment le phosphore (P) et l'aluminium (Al) par leur carence ou leur excès, ont des effets directs et localisés sur la croissance et le développement des racines (CALLOT et al., 1982), indépendamment des effets sur les autres parties de la plante :

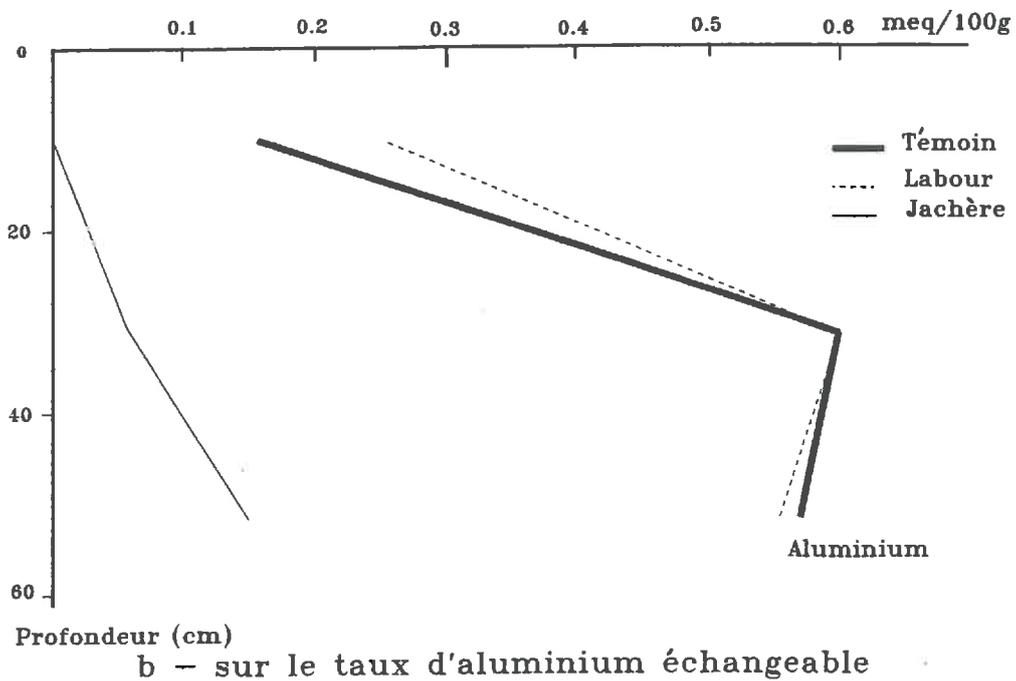
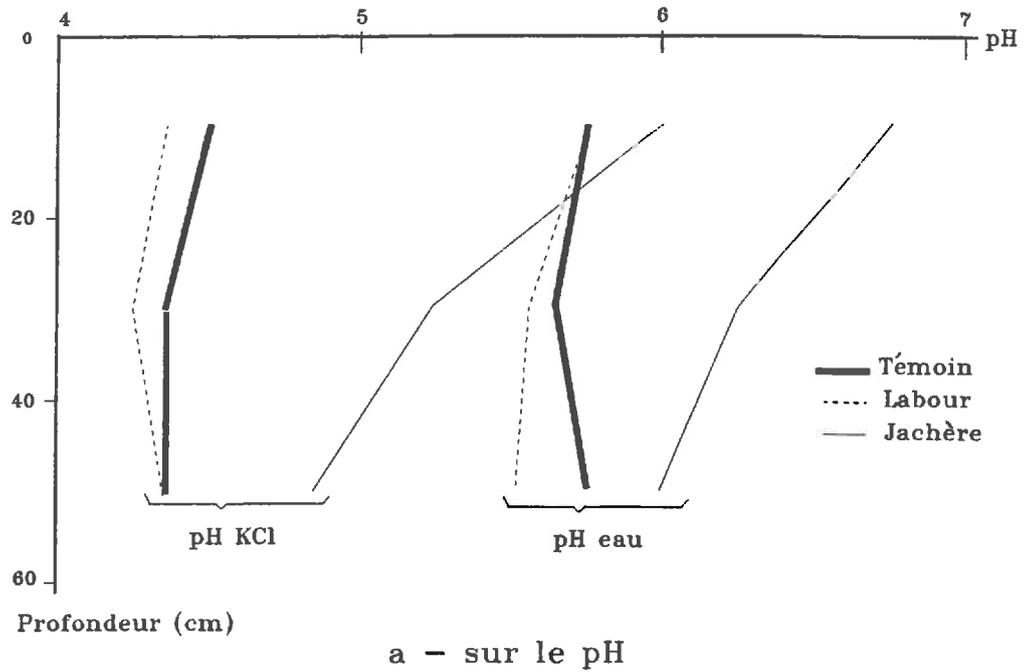
- *carence en P* : lorsque le phosphore est localisé à une portion de racine, la croissance et le développement ne seront favorisés que dans la zone de localisation, c'est-à-dire à l'endroit même où l'élément est apporté à la racine (DREW, 1975).

Après les observations au champ sur le rôle important et bénéfique du phosphore sur la productivité du mil en condition de pluviométrie variable (GREGORY, 1992; HAFNER, 1992), MARSCHNER et VETTERLEIN (1992) ont étudié, en conditions contrôlées dans une chambre climatique, les mécanismes relatifs à l'interaction entre le phosphore et la disponibilité en eau pour la plante. L'accent est mis sur le rôle du phosphore sur l'augmentation de la densité de longueur racinaire impliquant une meilleure alimentation hydrique. Si cet effet est observable en culture en pot (PAYNE et al., 1991), il ne s'est pas vérifié dans les expériences au champ (HAFNER, 1992).

Lors d'une étude sur l'acidification des terres de culture au Sénégal, PIERI (1976) considère que pour des pH < 5, les sols sont très acides et associés à de fortes concentrations en Al^{3+} . Ces observations sont cohérentes avec les résultats de MOORE (1974) cité par MENGEL et KIRKBY (1987) (fig. 12). On observe alors un "nanisme jaune" sur cultures d'arachide dans les régions Sud et Centre-Nord du Sénégal (BLONDEL, 1970), qui est attribué à une toxicité aluminique au niveau des nodosités des racines (PIERI, 1974).

- *toxicité aluminique* : elle est définie comme étant la conséquence d'un taux élevé d'aluminium échangeable (Al^{3+} , forme toxique de l'aluminium) par rapport à la capacité

Fig. 13 : Effets de la culture continue sur le pH (a)
 et sur le taux d'aluminium échangeable (b)
 d'après CHOPART et NICOU (1989)



totale d'échange de cations, soit le taux de saturation de la CEC en aluminium échangeable mesuré dans les conditions de pH du sol (extraction au KCL, sel neutre non tamponné) (PIERI, 1974). On a vu précédemment que ce rapport est modifié par l'acidité du milieu. Le seuil de toxicité peut être calculé par le rapport: $(Al/\text{complexe absorbant}) \times 100$.

La toxicité aluminique a :

- *des effets directs* sur le système racinaire (HORST et al., 1983) par inhibition de la division cellulaire du méristème apical bloquant ainsi l'élongation de l'axe principal et des racines secondaires (HORST, 1987). Les cellules de la coiffe agiraient comme détecteurs du stress (BENNET et BREEN, 1991).

- *des effets indirects* sur les racines (TAYLOR, 1988), essentiellement dûs aux réactions d'antagonisme et/ou de synergie de l'aluminium avec le phosphore (FOY et al., 1978), avec le calcium (KINRAIDE et PARKER, 1987; FOY, 1988; GODBOLD, 1991), avec le manganèse (HORST, 1983) et avec le magnésium (GRIMME et LINDHAUER, 1989; KELTJENS et DIJKSTRA, 1991).

4- Conclusion

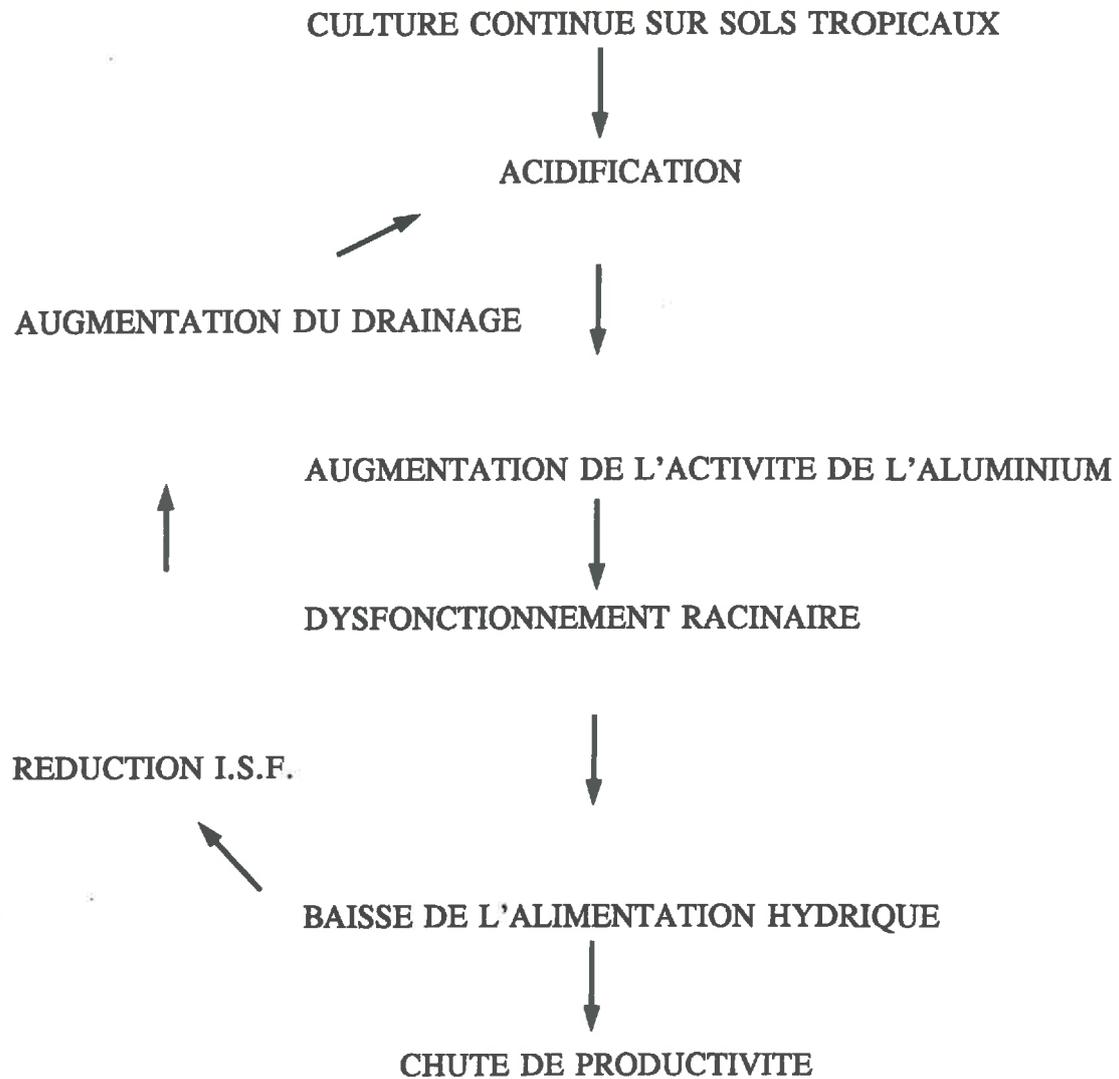
Le diagnostic hydrique, aux 3 échelles d'analyse, montre que la pluviosité n'est pas le seul facteur en jeu. La culture continue est aussi responsable du déficit de productivité céréalière.

Les travaux de CHOPART et NICOU (1989) montrent que la culture continue pendant plusieurs années, avec fertilisation (celle vulgarisée par l'ISRA) mais sans apport de matière organique, entraîne une diminution du pH (fig. 13a), une augmentation du taux d'aluminium échangeable (fig. 13b) et une baisse progressive de la production.

A la suite de ces résultats, l'hypothèse suivante a été proposée (REYNIERS, 1990) : la dégradation des sols, induite par la culture continue, provoquerait une chute de productivité notamment par la baisse de l'alimentation hydrique. Ce processus a déjà été observé dans les cerrados brésiliens sur riz pluvial (REYNIERS, 1985).

Cette hypothèse est schématisée dans la figure 14 : la culture continue entraîne l'acidification du sol par la lixiviation du calcium et corrélativement, en deçà d'un pH de l'ordre de 5, une toxicité aluminique. Celle-ci limite la croissance racinaire et si l'humidité du sol est limitante, un déficit d'alimentation hydrique. L'enchaînement se transforme en un cycle de dégradation: la culture consomme moins d'eau, à pluviosité égale, le drainage augmente d'autant, ainsi que la lixiviation et l'acidification (REYNIERS, 1991). Selon ce schéma, la dégradation des sols agit sur les flux d'eau dans l'écosystème sahélo-soudanien. Il est alors important de savoir quelles sont les conséquences de la culture continue sur les risques de sécheresse d'où la nécessité de mieux comprendre le fonctionnement hydrique des écosystèmes (chapitre 3) et la perception du stress hydrique par la plante (chapitre 4).

Fig. 14 : Hypothèse de l'action de la culture continue sur sols tropicaux (d'après REYNIERS, 1990)



CHAPITRE 3 : FONCTIONNEMENT HYDRIQUE

A- TRANSFERT D'EAU DANS LE CONTINUUM-SOL-PLANTE-ATMOSPHERE

La plante possède une très forte teneur en eau de l'ordre de 80 % de son poids frais, indispensable à sa vie. La photosynthèse assurant la croissance et le développement de la plante, s'effectue grâce à des échanges gazeux au niveau des stomates. L'entrée de CO₂ se fait en contre partie d'une perte d'eau par transpiration. Cette transpiration est considérable par rapport aux besoins de la plante pour sa propre croissance. La transpiration est déterminée par la *demande climatique*. Dans la pratique, cette demande est exprimée par un système de référence tel que l'ETP Penman ou l'évaporation mesurée au bac. Elle est dépendante de l'Indice de Surface Foliaire ISF (ou LAI: Leaf Area Index) et de la structure du couvert.

La plante fait face à cette demande en tenant compte de l'*offre en eau*, déterminée à l'interface sol-racine. L'offre est définie par la quantité d'eau disponible à un instant donné. Elle est dépendante de la nature et de la texture du sol, de la teneur en eau du sol, du volume de sol exploré et de la quantité de racines qui conditionne l'accessibilité de l'eau.

La transpiration (T) dépend de l'importance relative des conditions limitantes que représentent l'offre (O) et la demande (D). Cette notion peut s'exprimer par le système d'équations suivant :

Si $O > D$, alors $T = D$

Si $O < D$, alors $T = O$ en faisant abstraction, pour simplifier, des quantités d'eau stockées dans les réservoirs de la plante.

Pour maintenir un équilibre entre les apports et les pertes d'eau, c'est-à-dire établir une adéquation entre l'offre et la demande, et éviter un déficit hydrique excessif, les plantes vont réguler leur transpiration.

1- Interface sol-racine

Le sol constitue un réservoir d'eau. Les quantités d'eau stockées sont plus ou moins importantes selon la granulométrie, la nature des argiles et le taux de matières organiques. Selon les propriétés hydrodynamiques du sol, des mouvements d'eau se font des zones du sol qui sont restées plus humides vers les racines (HSIEH et al., 1972). Les propriétés structurales du sol (texture, porosité) et l'humidité vont aussi avoir un impact sur le développement des racines, indépendamment du caractère variétal de la plante à avoir un système racinaire puissant et agressif (MAERTENS, 1978)

La dimension du système racinaire permet l'accès à une plus ou moins grande réserve d'eau du sol. La densité en réduisant le trajet moyen de l'eau vers les racines permet une

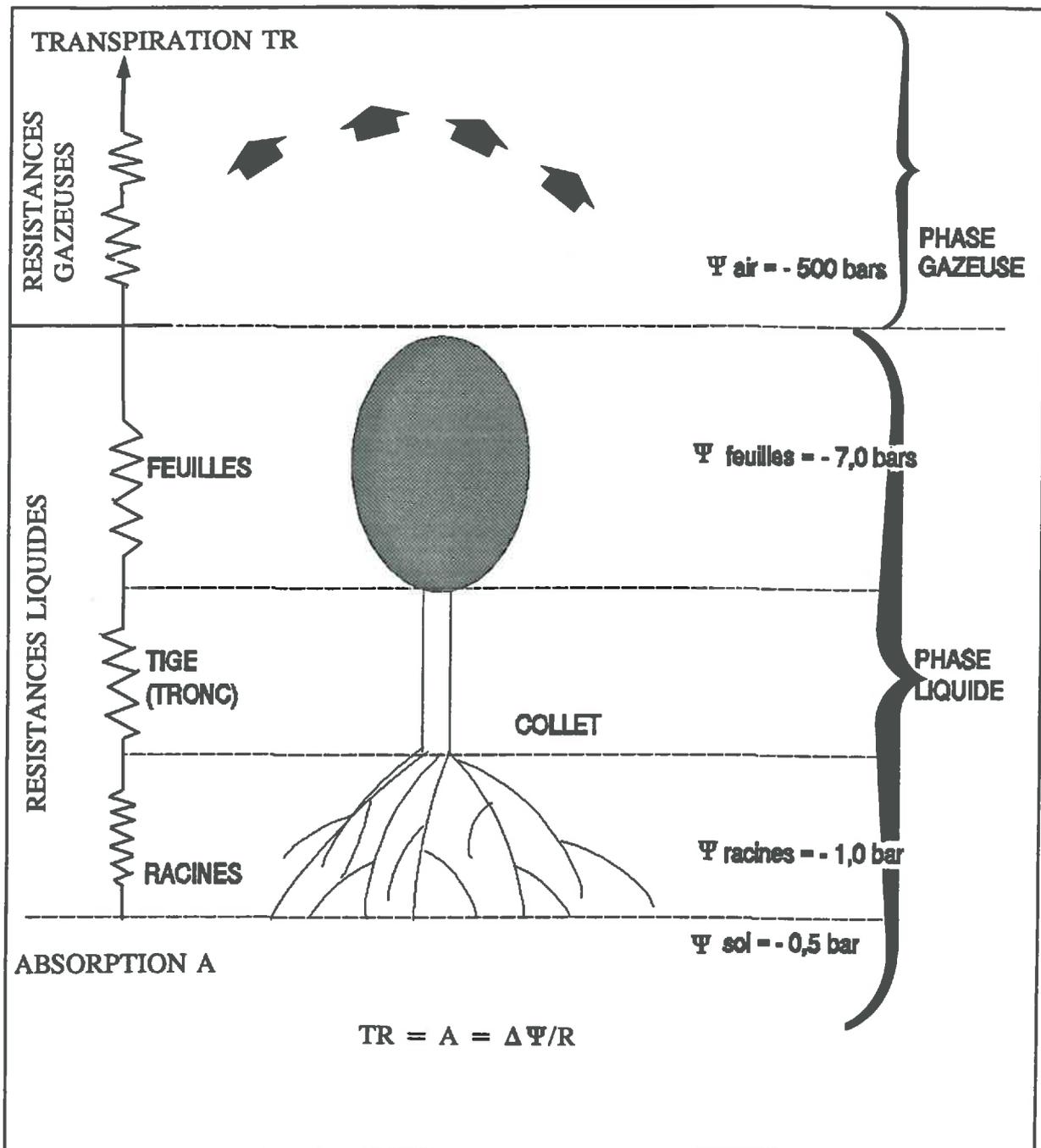


Fig. 15 : Représentation du continuum sol-plante-atmosphère selon le formalisme ohmique

meilleure utilisation de l'eau, pouvant alors compenser une déficience des propriétés hydrodynamiques du sol. A un instant donné, pour un système racinaire donné, le flux d'eau extractible décroît avec l'humidité du sol. A humidité constante, le flux d'eau extractible croît avec la densité et/ou l'extension du système racinaire. Le surdimensionnement du système racinaire permet de faire face en partie à l'abaissement de la mobilité de l'eau lié au dessèchement édaphique.

La répartition des racines, variable selon l'état hydrique des différentes couches de sol, n'est pas sans influence sur l'extraction d'eau (TARDIEU et MANICHON, 1986; LAFOLIE et al., 1991). La partie effective du système racinaire impliquée dans l'absorption est estimée à 1/3 chez des jeunes plants de blé, selon PASSIOURA (1982). L'eau pénètre plus facilement par les parties jeunes mais la résistance aux transferts d'eau est plus élevée. Bien que moins facilement, l'eau pénètre aussi par les parties plus anciennes du système racinaire, ayant une résistance longitudinale moins élevée car situées plus près de la tige (MAERTENS, 1978).

2- Dans la plante

L'eau circule du sol au travers de la plante jusque dans l'atmosphère du fait de l'existence d'une chute continue de potentiel le long de ce trajet, que l'on peut appeler continuum. Les premières définitions du continuum sol-plante-atmosphère sont de PHILIP (1966) et SLATYER (1967). Mais, Van Den HONERT (1948) proposait déjà de considérer le transfert d'eau dans le système plante comme un processus en chaîne où la régulation doit logiquement se faire au niveau de la phase vapeur, c'est-à-dire au niveau des stomates, ce mouvement d'eau pouvant se schématiser sous la forme d'une analogie électrique. La figure 15 représente le continuum sol-plante-atmosphère selon le "formalisme ohmique" avec les différentes valeurs de potentiel hydrique dans les composants du continuum.

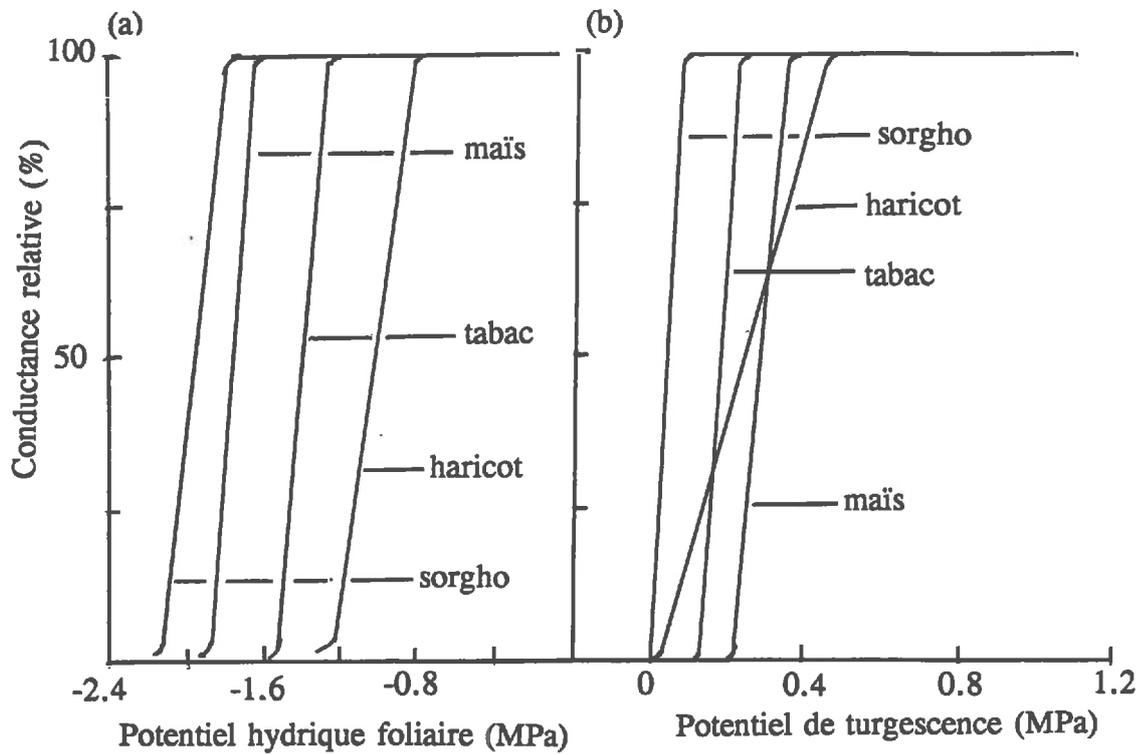
HSIAO et al. (1980) proposent une équation simplifiée pour décrire le flux d'eau dans le continuum où la transpiration (T) est une fonction de la différence entre le potentiel du sol (Ψ_s) et le potentiel foliaire (Ψ_f), et des résistances (R) du sol, des racines et des tiges au flux d'eau en phase liquide :

$$T = (\Psi_s - \Psi_f) / (R_{\text{sol}} + R_{\text{racine}} + R_{\text{tige}})$$

Les différentes résistances dans le continuum ont été quantifiées par BERGER (1971).

La relation entre absorption et transpiration est rarement linéaire à cause de la contribution de la réserve hydrique du végétal à la transpiration. Pour tenir compte de cette réalité, JONES (1978), HSIAO (1982), KATERJI et al. (1983 a, b) ont proposé un schéma amélioré de la circulation de l'eau dans le végétal avec des réservoirs hydriques de la plante. Les tissus de la plante contribuent plus ou moins au flux transpiratoire.

Fig. 16 : Evolution de la conductance foliaire de plusieurs espèces pour un même niveau d'éclairement, en fonction du potentiel hydrique (a) et du potentiel de turgescence (b) du tissu foliaire (d'après DAVIES, 1981)



Les racines constituent le réservoir principal chez les plantes herbacées :

- CRUIZIAT (1974), travaillant au laboratoire sur tournesol, constate que lorsque le végétal se dessèche, ce sont les racines qui fournissent la contribution la plus importante aux pertes totales de la plante, de l'ordre de 60 à 70 %.

- JARVIS (1975) donne des estimations calculées des réserves en eau des différents organes de plante herbacées, exprimées en heures de transpiration. Ces résultats montrent qu'en l'absence de tout flux d'eau provenant du sol, les racines peuvent subvenir à la transpiration deux fois plus longtemps (3 heures) que les feuilles et les tiges (1,6 h).

Malgré ces réserves, les tissus ne peuvent pas assurer une journée complète de transpiration pour des conditions de demande climatique journalière moyenne ou forte, de l'ordre de 5 à 10 mm d'eau/jour.

3- Interface plante-atmosphère

La présence d'une cuticule plus ou moins épaisse recouvrant le tissu épidermique foliaire assure une réduction des échanges hydriques avec le milieu extérieur. Le contrôle de l'intensité de l'assimilation photosynthétique et de la transpiration est assuré par les stomates (LAFFRAY et LOUGUET, 1989). La résistance de l'épiderme est composite et sa valeur est donnée à partir de ces deux composantes par la relation :

$$1/r_{ep} = 1/r_c + 1/r_s$$

relation dans laquelle r_c est la résistance de la cuticule et r_s la résistance dans les stomates qui peut être, elle-même, décomposée en différentes résistances correspondant à deux zones principales de diffusion des molécules d'eau entre la surface des cellules et la surface de la feuille (BERGER, 1971).

La régulation stomatique est sous le contrôle de deux groupes de facteurs :

- *les facteurs endogènes* : l'état hydrique de la feuille et plus précisément le potentiel de turgescence du tissu foliaire est corrélé à l'évolution de la conductance stomatique de plusieurs espèces (fig. 16). Les teneurs en acide abscissique (ABA) endogène dans les vacuoles des cellules stomatiques sont variables selon l'âge de la feuille et le stade de développement de la plante, notamment à la floraison (HENSON et al., 1983) et entrent en jeu dans la régulation stomatique.

- *les facteurs de l'environnement* : les stomates de nombreuses espèces répondent directement aux variations de l'humidité de l'air, ainsi qu'à la lumière, au taux de CO₂ et à la température, indépendamment de l'état hydrique de la feuille (BERGER, 1971).

Les stomates permettent, en condition de sécheresse, la régulation des échanges de CO₂ et de vapeur d'eau de la plante. La fermeture des stomates étant un moyen efficace pour la plante de limiter ses pertes en eau, la sélection des plantes tolérantes à la sécheresse s'est donc portée sur leurs réponses stomatiques. Cependant, il est apparu que le comportement

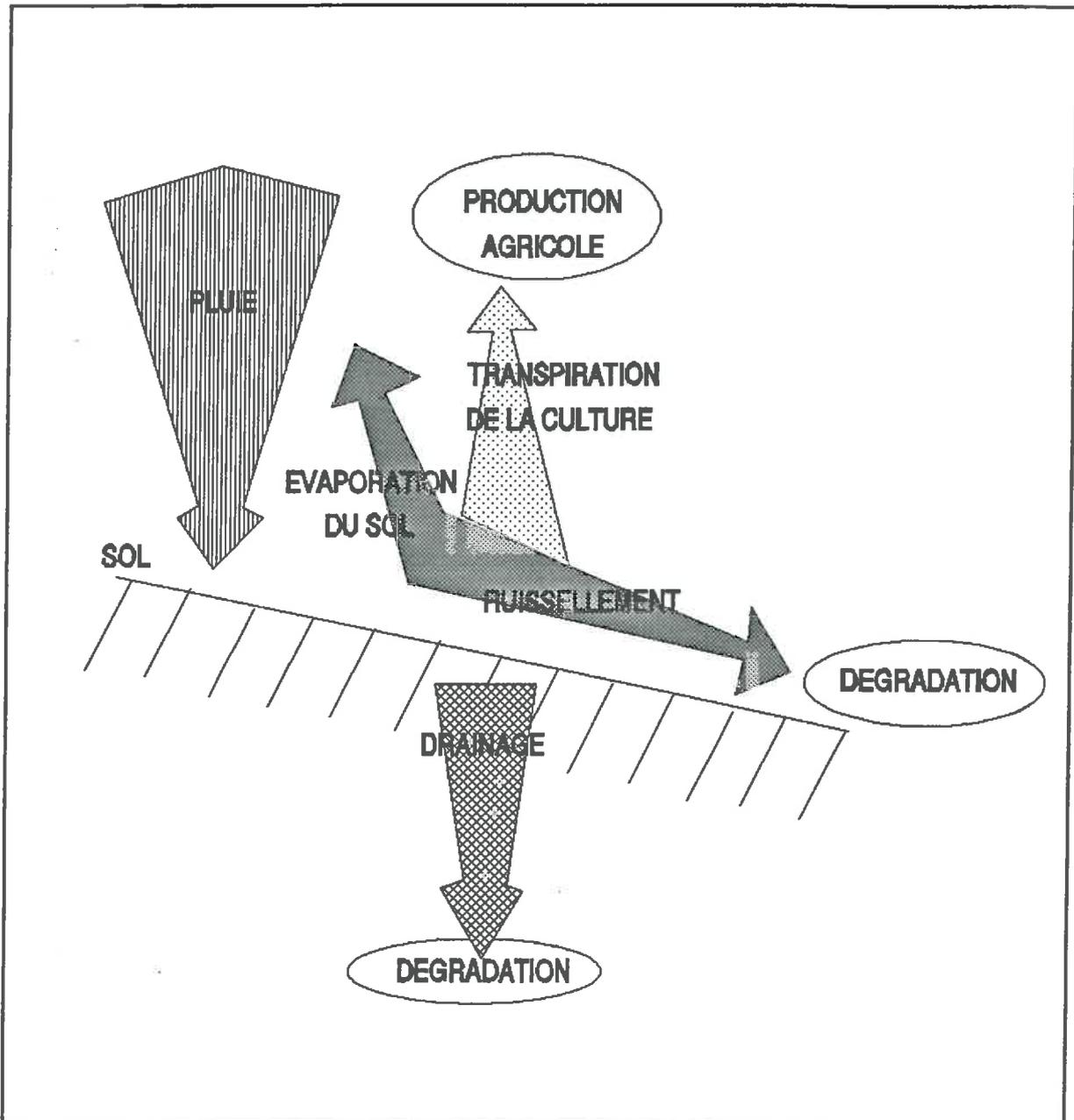


Fig. 17 : Principaux flux dans l'hydrosystème agricole pluvial (d'après REYNIERS, 1991)

stomatique "utile", c'est-à-dire permettant de maintenir un rendement potentiel lors d'une contrainte hydrique, n'est pas simple (JONES, 1987), en raison du dilemme existant entre la diminution des pertes en eau et la diminution de l'assimilation photosynthétique. Des études sur le comportement stomatique de différentes espèces végétales montrent des stratégies variées face à la sécheresse, en relation avec le développement du système racinaire et la diminution du potentiel hydrique.

La réduction de la surface foliaire en réduisant la demande climatique est un autre moyen de contrôler la transpiration pour l'ajuster à l'offre si celle-ci est insuffisante.

Le fonctionnement hydrique des plantes reste un domaine encore assez mal connu de par la grande variabilité des comportements des plantes et une certaine capacité d'adaptation selon la vitesse d'installation de la sécheresse et les épisodes de sécheresse subis auparavant. De plus, la connaissance du rôle physiologique des stomates en liaison avec la sécheresse demeure encore incomplète (LAFFRAY et LOUGUET, 1989).

B- FLUX HYDRIQUES AU NIVEAU DE LA PARCELLE

1- Notion d'hydrosystème agricole

Dans les études sur les flux hydriques en relation avec la production agricole dans la zone sahélo-soudanienne, menées par l'IRAT à une échelle égale ou supérieure à la parcelle, le besoin s'est fait sentir, avec l'acquisition progressive des connaissances, de définir le continuum par une approche plus agro-physiologique faisant intervenir les ressources naturelles, en particulier la pluviométrie : de cette réflexion, est apparu le terme "hydrosystème agricole". L'adjectif "agricole" évite une confusion avec la notion d'hydrosystème définie par les hydrauliciens. Si le concept n'est pas nouveau en soi, son application en agro-physiologie commence à peine à être admise, ce qui tend par ailleurs à justifier cette formulation plus globale du continuum.

L'hydrosystème agricole est donc la partie de l'écosystème agricole conditionnant les flux hydriques générés à partir des pluies (REYNIERS, 1991), l'écosystème agricole étant défini, d'après notre préoccupation d'étudier des mécanismes physiologiques élémentaires, comme une structure composée d'un sol, d'une culture, d'un climat et de leurs interactions. L'intérêt fondamental de la caractérisation du fonctionnement de l'hydrosystème agricole se situe dans la prise en compte des interactions des différents composants du continuum sol-plante-climat sur les flux hydriques. La figure 17 schématise les principaux flux dans l'hydrosystème agricole pluvial (d'après REYNIERS, 1991). Dans les études agro-physiologiques, parmi les flux hydriques générés par les pluies, on insistera sur l'importance de l'ETR comme flux productif et sur l'importance du drainage et du ruissellement comme flux "négatifs" en terme de bilan pour la production agricole et d'effets sur la dégradation des terres.

2- Mesures de l'évapotranspiration

La présentation proposée, allant de l'échelle de la parcelle à l'échelle de la feuille puis à celle de la plante, est basée sur une chronologie historique dans l'évolution des connaissances, cette évolution étant souvent fonction des outils d'étude disponibles.

2-1- Echelle de la parcelle

On distinguera deux types d'approches de détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR) à l'échelle de la parcelle : l'approche par le sol permettant le calcul du bilan hydrique et l'approche par l'atmosphère par les méthodes micrométéorologiques. Ces deux approches se différencient donc par la localisation de l'étude : le bilan hydrique se situe au niveau de l'offre et les méthodes micrométéorologiques au niveau de la demande.

2-1-1- Le bilan hydrique

Si l'enracinement de la culture atteint une profondeur z , l'ETR est calculée par le bilan de tous les flux d'eau perçus au niveau du sol, ce qui se traduit par la relation suivante:

$$ETR = P + I + R + D - [\Delta S]_z$$

avec P : précipitations
 I : irrigation
 R : ruissellement
 D : drainage, soit le flux d'eau à travers la côte z
 ΔS : variation du stock d'eau contenue dans les z premiers centimètres de sol.

La variation du stock d'eau (ΔS) dans le sol est déterminée :

- par la mesure de l'humidité volumique par gravimétrie associée à des mesures de densité apparente du sol (méthode très lourde et répétitive un faible nombre de fois en un même emplacement),

- ou par l'humidimètre à neutrons. La variation de teneur en eau volumique est proportionnelle à la variation du comptage neutronique entre deux dates de mesures. ΔS est alors l'écart entre deux profils d'humidité volumique successifs.

Le stock d'eau peut aussi être calculé par l'intermédiaire de la tension de l'eau dans le sol mesurée par un tensiomètre et/ou un psychromètre. Cependant, l'évaluation du stock d'eau à partir des mesures tensiométriques et psychrométriques n'est pas précise du fait de l'existence d'une relation d'hystérésis entre le potentiel hydrique et l'humidité du sol.

En ce qui concerne la détermination de la variation du stock d'eau dans le sol, les mesures neutroniques présentent de nombreux avantages :

- les mesures sont facilement répétitives en un même emplacement sans perturbation du sol, ni du profil racinaire.
- une fois l'étalement réalisé, l'approche de l'humidité volumique est "directe" (SEGUIN, 1975 cité par VIDEAU, 1989).
- la mesure est intégrée sur un certain volume (sphère d'influence).

Parmi les nombreuses utilisations des mesures neutroniques pour la détermination du bilan hydrique d'une culture, on peut citer les travaux de CISCHE et VACHAUD (1987). Ces auteurs précisent les conditions limitantes de cette étude, notamment la nécessité de l'absence de drainage car on ne sait toujours pas évaluer avec précision ce flux d'eau dans le sol, au champ. Cette méthode présente aussi d'autres inconvénients :

- la précision des résultats ne permet pas de détecter des variations à une échelle de temps inférieure à 5 jours.
- la structure du sol est parfois un obstacle à l'utilisation des sondes à neutrons : dans un sol de type "caillouteux", riche en éléments grossiers, le contact imparfait entre le sol et le tube diminue, voire annule la signification des comptages neutroniques.
- la variabilité spatiale de la pluie affecte la qualité du calcul.

2-1-2- Les méthodes météorologiques

On regroupe sous ce terme toutes les méthodes faisant intervenir la mesure des différents paramètres climatiques, c'est-à-dire la vitesse du vent, la température, la pression, l'humidité de l'air.

a- Les méthodes aérodynamiques

Ces méthodes (classique, combinée avec le bilan d'énergie ou simplifiée) ont l'inconvénient de ne pas être utilisables sur les cultures en rang, comme les vergers de d'arbres fruitiers ou la vigne. Elles comprennent des hypothèses valables uniquement pour des couverts peu rugueux, la rugosité étant définie par l'état d'un couvert végétal dont les composants ont des hauteurs variables. L'utilisation de la méthode du bilan d'énergie est délicate à cause de la détermination problématique de la hauteur optimale pour les mesures, le sol de l'inter-rang et le rang ayant des comportements thermiques et évaporatoires différents.

Parmi les diverses études utilisant ces méthodes micrométéorologiques, on retiendra les travaux de LOHAMMAR cité par HALLDIN et al. (1980) sur les forêts de pins, de ITIER et RIOU (1985) sur le maïs, de RIOU et al. (1989) sur la vigne.

b- La méthode des fluctuations

Les méthodes précédentes ne s'appliquant pas dans le cas des couverts hétérogènes, on a alors recours à l'approche par les fluctuations. Les flux de vapeurs d'eau et de chaleur sont déterminés à partir de la connaissance des écarts instantanés à la vitesse moyenne du vent verticalement et horizontalement dans la direction du vent, des écarts instantanés à la température de l'air et à l'humidité spécifique. Cette méthode évite de passer par les relations flux-gradient utilisées dans les autres approches et sujettes à caution en couverts rugueux. Elle nécessite cependant un appareillage sophistiqué et coûteux.

Les méthodes décrites, à l'échelle de la parcelle, permettent de mesurer l'évapotranspiration où l'évaporation du sol est d'un intérêt secondaire pour les physiologistes. Le flux principal que l'on veut étudier est la transpiration de la plante : c'est ce que vont permettre les mesures à l'échelle de la feuille et à l'échelle de la plante.

2-2- Echelle de la feuille

Les mesures de conductance stomatique permettent d'estimer la transpiration à l'échelle de la feuille. Puis la mesure peut être extrapolée à l'échelle de la plante puis à l'échelle de la parcelle, voire même à celle de la région par des équations intégrant différents facteurs tels que la résistance stomatique, l'indice de surface foliaire (m² de surface foliaire par m² de sol), la densité de culture (JARVIS et MC NAUGHTON, 1986; BRENNER et al, 1991).

Rappelons que la transpiration est considérée comme la somme pondérée de deux conditions limitantes, la transpiration à l'équilibre (λE_{eq}) indépendante de la conductance stomatique et la transpiration imposée (λE_{imp}). Si la culture est bien couplée aux conditions climatiques (c'est-à-dire si l'offre en eau n'est pas limitante), la transpiration d'une feuille individuelle tend vers λE_{imp} . En faisant l'hypothèse que cela est vrai pour toutes les feuilles de la culture et que la transpiration de chaque feuille est additive, une estimation de la transpiration à l'échelle de la plante est obtenue en multipliant la transpiration moyenne des feuilles par la surface foliaire SF, soit:

$$\lambda E_{imp} = (\rho_a c_p / \gamma) k_s D_a SF$$

où k_s est la conductance stomatique moyenne, D_a le déficit de pression de vapeur de l'air, c_p la capacité de chaleur spécifique de l'air à pression constante, ρ_a la densité de l'air et γ la constante psychrométrique.

2-3- Echelle de la plante

Alors que les pesées ne sont utilisables que pour mesurer la transpiration des plantes cultivées en pot ou en lysimètre, la mesure du débit de sève brute permet d'étendre l'étude au champ. Le débit de sève brute, dans le xylème, correspond au flux d'eau absorbée par la plante qui est considéré égal à la transpiration, aux variations d'humidité près des parties aériennes des plantes (VALANCOGNE et GRANIER, 1991).

2-3-1- Intérêts de la mesure du débit de sève brute

La nouveauté fondamentale apportée par cette méthode est la possibilité d'étudier la plante, dans son intégralité, *in situ* alors qu'elle était restée un matériel de laboratoire, avec toutes les contraintes de reproductibilité des conditions du milieu naturel que les études au laboratoire nécessitent.

Comme les mesures de conductance stomatique effectuées à l'échelle de la feuille, la mesure de la transpiration à l'échelle de la plante est extrapolable à la parcelle, et de façon plus simple, en travaillant sur un échantillon représentatif d'individus.

D'autre part, cette méthode permet l'étude de la transpiration des couverts végétaux hétérogènes (VALANCOGNE et GRANIER, 1991) et les systèmes agro-forestiers associant différents types de cultures ce que ne permettent pas toujours les méthodes, à l'échelle de la parcelle, pour les différentes raisons énoncées précédemment.

Enfin, un autre intérêt majeur de cette technique est le pas de temps très fin auquel sont effectuées les mesures, à l'échelle de l'heure, grâce à la continuité et à l'automatisation des enregistrements, ceci étant permis par le développement des outils informatiques (centrales d'acquisition de données) utilisables sur le terrain.

2-3-2- Applications

La mesure du flux de sève, par tous les avantages qu'elle apporte, trouve des applications de plus en plus nombreuses. Sans faire une liste exhaustive des études réalisées, qui sont toutes relativement récentes, on peut citer les travaux suivants :

- la mesure de la consommation d'eau d'un peuplement de Douglas en France (GRANIER et AUSSENAC, 1988), d'une haie de brise-vent au Sahel (BRENNER et al., 1991), d'une culture de canne à sucre à la Réunion (FERRAND, 1992), des lianes au niveau de la canopée de la forêt tropicale camerounaise (BERGER et al., à paraître).

- l'étude des effets du système de conduite et de la sécheresse sur la consommation d'eau de la vigne (VIDEAU, 1989), des transferts hydriques internes chez les arbres (AMEGLIO, 1991), de l'effet d'agents pathogènes (pyrale) sur la conduction de la sève chez le maïs.

On notera que toutes ces études portent essentiellement sur les arbres, bien que depuis

deux ans, elles se développent sur les cultures annuelles.

2-3-3- Les différentes techniques

Les méthodes **thermiques** de détermination du débit de sève brute se classent en trois groupes (VALANCOGNE et NASR, 1987) :

- les méthodes basées sur l'*étude de la vitesse de transfert d'une impulsion de chaleur*: on calcule à partir de cette donnée la vitesse de sève dans les tissus conducteurs. Pour calculer le débit de sève brute d , il faut estimer la section du bois A où circule la sève à la vitesse V : $d = A \times V$, et tenir compte de la variation de cette vitesse selon la profondeur dans le tronc ou procéder à un étalonnage (COHEN et FUCHS, 1989).

- les méthodes basées sur le *suivi de la température au niveau d'une source de chaleur continue* (GRANIER et AUSSENAC, 1988) : on mesure la température d'une aiguille chauffante de puissance constante insérée radialement dans le xylème. La température de cette sonde décroît lorsque la vitesse de sève augmente: la chaleur est transportée par convection dans le flux de sève. Cette méthode nécessite aussi la connaissance de la section du bois conducteur, mesurée par carottage. Cette méthode, comme la précédente, donne la vitesse moyenne de la sève dans le xylème. Elle est bien adaptée à des arbres adultes mais n'est pas utilisable sur de petites plantes car les mesures ne sont pas possibles pour des épaisseurs du xylème fonctionnel inférieures à 2 cm.

- les méthodes basées sur l'*analyse du bilan thermique en présence d'une source de chaleur de puissance connue* (SAKURATANI, 1981 et 1984) : en présence d'une source de chaleur connue, on calcule les flux de chaleur conductifs et les pertes de chaleur latérales. Du bilan de chaleur sur l'élément de tige délimité par le capteur, on déduit le flux de chaleur convectif associé au flux de sève puis le débit de sève lui-même. Cette méthode ayant été utilisée avec succès sur un certain nombre de plantes, a été mise en oeuvre dans le présent travail pour étudier le fonctionnement hydrique du mil.

Nous allons maintenant présenter la perception du stress hydrique par la plante et les indicateurs connus pour mesurer ce stress. Cette revue fait le bilan des connaissances actuelles et présente l'évolution de la recherche dans ce domaine largement étudié.

CHAPITRE 4 : LA PERCEPTION DU STRESS HYDRIQUE PAR LA PLANTE ET LES INDICATEURS DE CE STRESS

Le stress hydrique est défini par rapport aux conséquences qu'il provoque. De ce fait, la notion de stress hydrique peut être variable selon l'aspect auquel on s'attache. Du point de vue de l'agronome, le stress hydrique provoqué par un manque d'eau est lié à l'apparition d'accidents en cours de culture et à une baisse de la production. Cependant, du point de vue de la plante une réduction de croissance n'est pas forcément une catastrophe si cela lui permet de survivre. Dans ce contexte, le concept de perception du stress hydrique par la plante prend toute son importance.

A- LA PERCEPTION DU STRESS HYDRIQUE PAR LA PLANTE

1- Considérations épistémologiques

Les mesures des teneurs en eau dans les différents organes de la plante pour déterminer son statut hydrique ont été abandonnées depuis que SCHOLANDER (1965) a proposé l'utilisation d'un nouvel appareil de mesure, la chambre à pression, permettant de quantifier rapidement les potentiels hydriques. A cette époque, la notion du continuum sol-plante-atmosphère, qui avait progressé dans la communauté scientifique est alors énoncée par PHILIP (1966) et SLATYER (1967). Cette notion a alors permis une avancée considérable dans la recherche sur les relations hydriques dans la plante (KRAMER, 1988). Mais il semble que l'apparition simultanée de ces deux "événements" scientifiques ait provoqué une certaine confusion parmi quelques physiologistes. Cette confusion est exprimée dans l'idée que le flux de l'eau dans la plante se faisant en réponse aux différences de potentiel hydrique justifie l'importance accordée au potentiel hydrique (SALISBURY et ROSS, 1978).

Cependant, après l'engouement dû à l'utilisation attrayante du formalisme ohmique, certains auteurs se sont posés des questions sur la validité du concept du potentiel hydrique, emprunté au domaine de la physico-chimie et appliqué au système plante, pour expliquer la perception du stress hydrique par la plante. Ces auteurs ont alors suscité un débat, fort intéressant par ailleurs, avec leurs collègues (KRAMER, 1988; PASSIOURA, 1988; SCHULZE et al., 1988). Parmi les travaux, dont ceux de WALTER et KREEB (1970), à l'origine de cette réflexion et de ce débat, on peut citer les expériences de SINCLAIR et LUDLOW (1985) présentant les difficultés à mettre en relation les processus métaboliques avec le potentiel hydrique. Ces auteurs proposent alors d'exprimer le statut hydrique de la plante en terme de teneur relative en eau (TRE) afin d'avoir une meilleure corrélation avec la photosynthèse, la synthèse des protéines, la réduction des nitrates et la sénescence foliaire. Cependant, bien que la TRE soit pratique pour comprendre le comportement des cellules déshydratées, cette mesure n'est pas applicable au sol, et KRAMER (1988) remarque alors

que le potentiel hydrique a la plus large application, ce qui entretient la confusion sur le rôle du potentiel hydrique.

Il est actuellement admis que le potentiel hydrique ne traduit pas la perception du stress hydrique par la plante (TURNER, 1986), mais cela ne doit pas pour autant remettre en question le concept fondamental du potentiel hydrique (PASSIOURA, 1988). Il y a d'ailleurs maintenant, un consensus général sur le fait que les gradients de potentiel sont la force motrice du transfert d'eau à travers la plante (SCHULZE et al., 1988).

Si le potentiel hydrique foliaire, dans sa globalité, est rarement relié à la perception du stress hydrique par la plante, il faut alors considérer séparément ses deux composantes, la pression osmotique et la pression de turgescence, dans les études sur les relations hydriques entre le sol et la plante (PASSIOURA, 1988; De RAISSAC, 1992). Les rôles physiologiques de ces deux potentiels sont très importants : le potentiel osmotique agissant directement dans l'absorption d'eau par les racines et indirectement dans le maintien de la turgescence cellulaire, le potentiel de turgescence agissant principalement dans l'élongation et la division cellulaire, ainsi que dans la régulation stomatique (BEGG et TURNER, 1976).

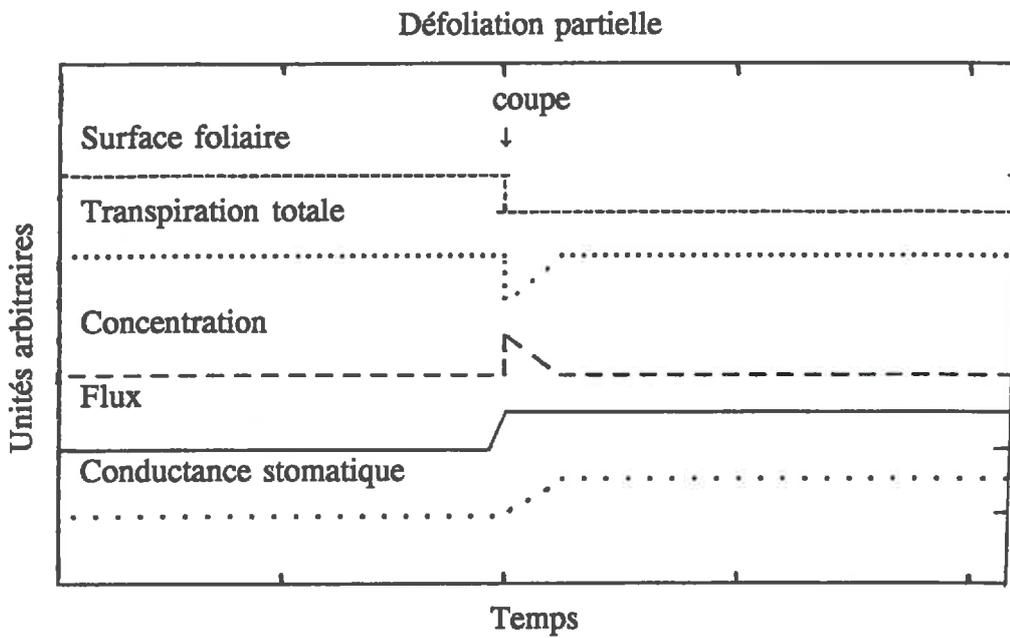
2- Les différents niveaux de perception

Depuis quelques années, une nouvelle approche souligne le rôle des racines comme premiers récepteurs du stress hydrique en fonction du potentiel hydrique du sol (TURNER, 1986). Les racines enverraient des messages hormonaux (acide abscissique, phosphore) aux parties aériennes qui répondraient à ce signal par la fermeture des stomates. Cette réponse stomatique, due à un signal non hydraulique (par opposition au signal hydraulique que représente le potentiel hydrique) provenant des racines, interviendrait donc dans un deuxième temps, dans la plante (BATES et HALL, 1981; DAVIES et MEINZER, 1990; DAVIES et ZHANG, 1991). Cette théorie ne remet pas en question le lieu principal de régulation de la transpiration, c'est-à-dire les stomates, comme le supposait Van Den HONERT (1948). Elle essaye d'identifier la véritable hiérarchie dans la perception du stress par les organes de la plante.

Cependant, cette hypothèse ne fait pas l'unanimité et le rôle des racines en temps que premiers récepteurs d'un stress hydrique est sujet de débat (KRAMER, 1988; PASSIOURA, 1988). Le principal argument contre cette théorie, basée sur des résultats essentiellement obtenus au laboratoire, provient de l'observation au champ d'un flétrissement des feuilles bien avant que les racines ne souffrent d'un manque d'eau dans le sol (TAZAKI et al., 1980). Sans contester ce fait, PASSIOURA (1988) contre-argumente qu'au moins une partie du système racinaire est plus fréquemment affectée par un déficit hydrique des couches superficielles du sol, avant que ne le soient les feuilles par une forte demande évaporative. SCHULZE et al. (1988) pensent que les signaux non hydrauliques provenant des racines sont importants au champ, même si le potentiel hydrique foliaire est plus bas que celui des racines. Cette hypothèse du signal non hydraulique, allant des racines vers les feuilles, serait

Fig. 18 : Simulation des réponses de la canne à sucre à une défoliation partielle (d'après DAVIES et MEINZER, 1990)

La conductance stomatique et la transpiration sont cohérentes avec les réponses observées. La concentration et le flux d'un promoteur putatif de l'ouverture stomatique assure son émission à un taux constant dans le xylème.



particulièrement adaptée dans les premiers stades de dessèchement du sol où l'état hydrique des tiges n'est pas perturbé (DAVIES et MEINZER, 1990).

Ce débat souligne la nécessité de bien caractériser le stress hydrique subi par la plante, que ce soit au champ ou en pot, c'est-à-dire préciser la durée, la fréquence, l'intensité du stress et les organes de la plante touchés par ce stress. Dans toute étude comportant un stress hydrique, il faudrait évaluer l'importance relative des signaux hormonaux par rapport aux signaux hydrauliques (SCHULZE et al., 1988), les signaux non hydrauliques représentant une régulation stomatique de type "feed-forward" de l'état hydrique foliaire (c'est-à-dire opérant avant une baisse trop importante du potentiel hydrique foliaire) et les signaux hydrauliques une régulation de type "feed-back" (DAVIES et MEINZER, 1990).

La théorie d'un signal non hydraulique provenant des racines (DAVIES et ZHANG, 1991) demande encore à être testée, notamment sur les points suivants :

- la valeur du seuil de potentiel hydrique racinaire, pour laquelle les signaux hormonaux sont envoyés aux feuilles, reste à définir (LAFOLIE et al., 1991).

- on connaît depuis longtemps l'augmentation du taux d'acide abscissique (ABA) en réponse à une contrainte hydrique, que ce soit par une augmentation de sa synthèse (MILBORROW et NODDLE, 1970) ou par une diminution de sa dégradation (ITAI et BENZIONI, 1976). Des expériences sur des plants de canne à sucre bien irrigués et partiellement défoliés suggèrent que c'est surtout le flux d'ABA des racines vers les feuilles qui régulent la conductance stomatique, plus que la concentration en ABA dans la sève brute (fig. 18). Mais le mécanisme induisant l'augmentation de la synthèse d'ABA et son exportation à partir des racines, lors d'un stress hydrique, reste peu connu.

Les résultats de MARSCHNER et VETTERLEIN (1992) sur du mil cultivé en pot et de TARDIEU et al. (1992) sur du maïs cultivé au champ ne sont pas conformes à cette théorie. En effet, ces auteurs n'observent pas de fermeture stomatique après qu'une partie des racines ait perçu une diminution de la disponibilité en eau dans le sol. TARDIEU et al. (1992) suggèrent que le manque de réponse stomatique à la déshydratation d'une partie du système racinaire localisée dans les couches supérieures de sol pourrait être le résultat de deux mécanismes coexistant contrôlant la concentration d'ABA dans le xylème : la synthèse d'ABA dans les racines localisées dans le sol sec et la dilution de l'ABA dans le flux d'eau provenant des racines localisées dans le sol humide. On peut aussi interpréter ces résultats par l'existence d'un autre mécanisme, hydraulique cette fois-ci, de contrôle de la conductance stomatique (TARDIEU et al., 1991) et/ou par la fermeture des stomates seulement en conditions de sécheresse sévère, tout du moins pour le mil, conformément aux études au champ d'HENSON et al. (1982).

Les différentes perturbations du métabolisme, notamment de la photosynthèse et de la synthèse des protéines, ne sont que les conséquences des étapes précédemment citées.

B- LES INDICATEURS DU STRESS HYDRIQUE

1- Mesures de l'état hydrique au niveau racinaire

Les manipulations sur les racines étant délicates, sauf en conditions spéciales d'étude au laboratoire, l'état hydrique des racines est le plus souvent estimé par la mesure du potentiel hydrique du sol dans la zone racinaire (TURNER, 1975; TARDIEU et al., 1990) en condition d'équilibre hydrique entre les deux compartiments (sol et racines), c'est-à-dire avant que le flux transpiratoire ne débute avec le lever du jour. Le potentiel hydrique racinaire peut être déterminé par un modèle de simulation, établi sur la base théorique d'un potentiel hydrique identique pour toutes les racines à un instant donné (BRUCKLER et al., 1991).

2- Mesures de l'état hydrique au niveau foliaire

- *Le potentiel hydrique foliaire* (BERGER, 1971; KATERJI et al., 1988) mesuré à différentes heures de la journée :

Le potentiel de base, mesuré en fin de nuit en conditions non évaporantes (obscurité, saturation de l'humidité relative,...), représentant donc un état d'équilibre entre les états hydriques du sol et de la plante en l'absence de transpiration importante, est un intermédiaire entre les indicateurs "sol" et "plante". Il a longtemps été considéré comme un des indicateurs les plus sensibles, surtout pour caractériser la capacité de récupération de la plante dans la nuit, après plusieurs jours de contrainte hydrique. Ceci est surtout vrai pour la culture en pot où il est fréquent d'observer un assèchement relativement rapide du sol lors du stress hydrique. De plus, l'humidité du sol peut être considérée comme relativement homogène dans le pot (hormis les effets d'écoulement préférentiel sur les parois internes) ce qui n'est pas le cas au champ où les grandeurs caractérisant l'état hydrique du sol sont fortement variables spatialement, notamment selon un gradient avec la profondeur (TARDIEU et al., 1990). Ainsi, le potentiel de base peut avoir une signification faible au champ pour déterminer l'état hydrique de la plante, dans la mesure où la plante peut récupérer totalement ses pertes en eau dans la nuit. Cette récupération peut être expliquée par la descente du front racinaire, importante chez le mil (CHOPART, 1983), à des profondeurs où l'humidité du sol permet une récupération totale de l'état hydrique de la plante dans la nuit, mais aussi par des remontées capillaires d'eau à partir des couches de sol non enracinées (TARDIEU et al., 1990). Cependant, cette récupération totale d'eau la nuit n'est parfois pas suffisante pour satisfaire la demande évaporative en cours de journée et on peut alors observer un enroulement des feuilles dès les premières heures d'ensoleillement, après récupération totale de l'état hydrique, comme cela a été constaté sur une culture de riz pluvial au Brésil (De RAISSAC, comm. pers.). Donc, pour l'étude au champ, la mesure du potentiel hydrique foliaire à midi, heure GMT, semblerait plus discriminante; cependant, les résultats de KATERJI et al. (1988) sur la tomate montrent que cette mesure à midi est pratiquement

insensible contrairement au potentiel de base. Ces résultats contradictoires peuvent être interprétés comme étant une conséquence de la stratégie que l'espèce végétale adopte en conditions de sécheresse. En effet, si l'espèce en question observe un comportement isohydrique (PARCEVAUX, 1963), c'est-à-dire qu'elle maintient un potentiel hydrique relativement élevé dans les tissus végétaux pendant la période chaude de la journée, comme la tomate, le potentiel hydrique foliaire ne serait pas un critère intéressant. Dans le cas d'une espèce ayant un comportement anisohydrique (comportement inverse au cas précédent) le potentiel hydrique foliaire pourrait être au contraire un critère intéressant (KATERJI et al., 1988). Les observations concernant le potentiel de base doivent donc être nuancées dans certaines situations.

- *Le coefficient d'enroulement des feuilles* est aussi un paramètre intéressant pour identifier le stress hydrique perçu par la plante (HSIAO et al., 1984), qui est à prendre en compte dans les modèles de simulation (FERNANDEZ et MC CREE, 1991).

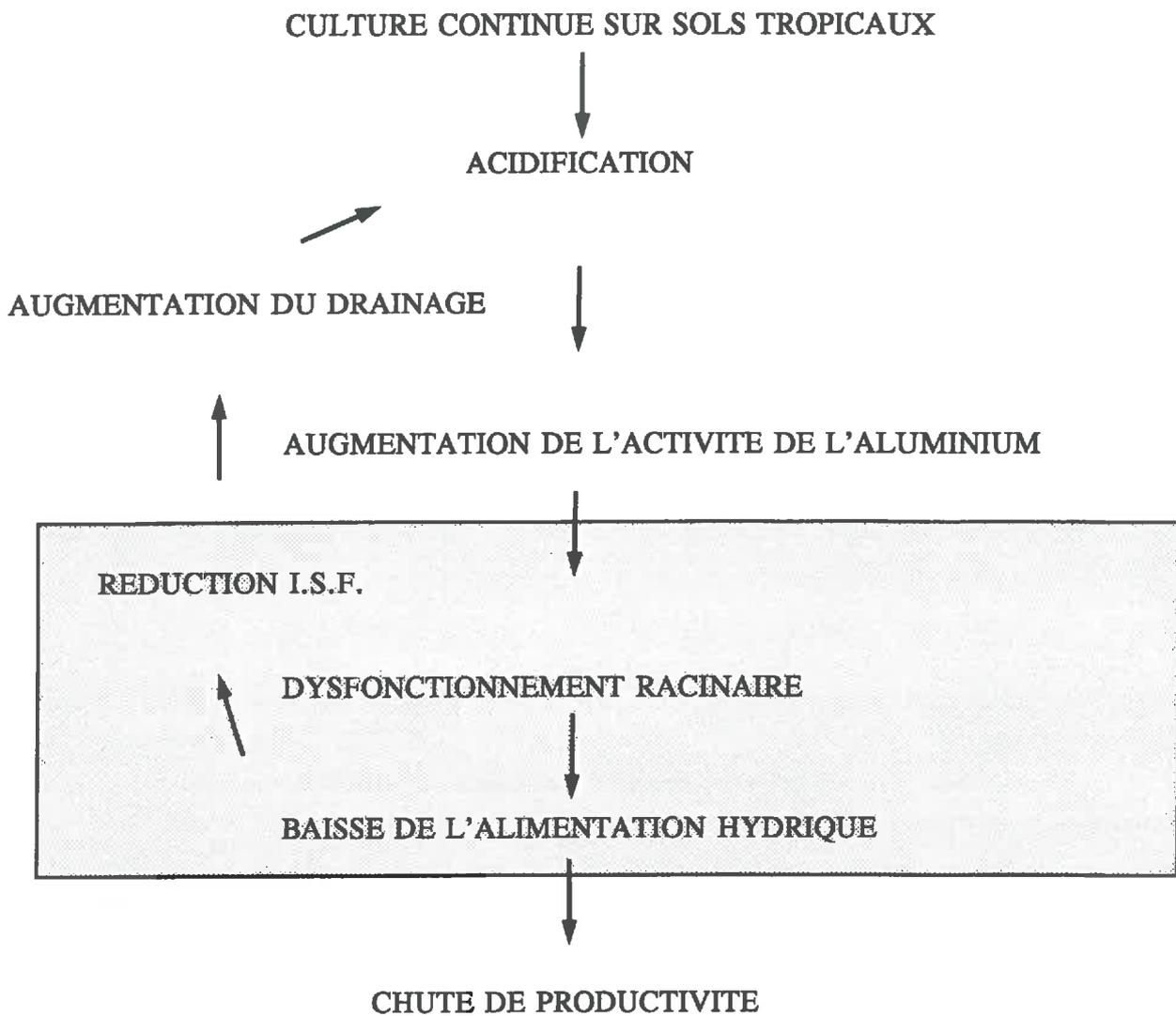
- *Le degré d'ouverture des stomates* est un indicateur utilisé depuis longtemps (BERGER et al., 1966; BERGER, 1971). Cependant, l'influence directe du déficit de pression de vapeur de l'air, DPV, sur la fermeture stomatique de certaines espèces, comme chez le mil (BLACK et SQUIRE, 1979; SQUIRE, 1979), compromet l'utilisation de cette mesure comme indicateur d'un stress dû à un manque d'eau dans le sol (SELLES et BERGER, 1990).

- *La variation journalière du diamètre du tronc ou de la tige*, par des capteurs de déplacement, étant étroitement reliée à l'eau disponible dans le sol, est reconnue pour être un bon indicateur du stress hydrique pour les plantes anisohydriques. Ce paramètre est utilisé pour le pilotage de l'irrigation de certains arbres (SELLES et BERGER, 1990) et de quelques plantes annuelles, notamment la tomate (SCHOCH et al., 1990).

- *Le stress hydrique perturbant le métabolisme de la plante*, de nombreux physiologistes ont tenté de mesurer des paramètres physiologiques foliaires modifiés par un déficit hydrique comme indicateurs de stress. Parmi tous les paramètres étudiés, certains sont des indicateurs bien corrélés avec la tolérance à la sécheresse (bien que définie indépendamment de la productivité), comme la tolérance protoplasmique (DASSA-GIRARD, 1987; ANNEROSE, 1990; LOUGUET et al., 1993) rendant compte de la tolérance à la déshydratation, d'autres indicateurs tels que l'accumulation de proline (WALDREN et al., 1974; MONNEVEUX et NEMMAR, 1986) ou la fluorescence des chlorophylles, rendant compte de l'état photosynthétique (HAVAUX et al., 1988; RIVIERE, 1989), mesurés dans les feuilles de plantes stressées ne sont sensibles que sur certaines espèces, notamment sur le blé. Ces deux derniers indicateurs sont à l'étude sur le mil pour le criblage de cultivars tolérants à la sécheresse dans des expériences menées en phytotrons.

- *l'émission acoustique d'ultrasons* due à la cavitation brutale dans des vaisseaux du xylème est aussi un indicateur de stress hydrique (MILBURN, 1973; TYREE et SPERRY, 1989a). Ce phénomène peut apparaître pour des potentiels hydriques modérément faibles et s'accroît fortement pour de faible niveau de potentiel hydrique. Il a été identifié sur des

Rappel de la Fig. 14 : Hypothèse de l'action de la culture continue sur sols tropicaux (d'après REYNIERS, 1990)



arbres (CRUIZIAT et TYREE, 1990) et sur le maïs (TYREE et al., 1984), mais n'a pas été étudié sur le mil.

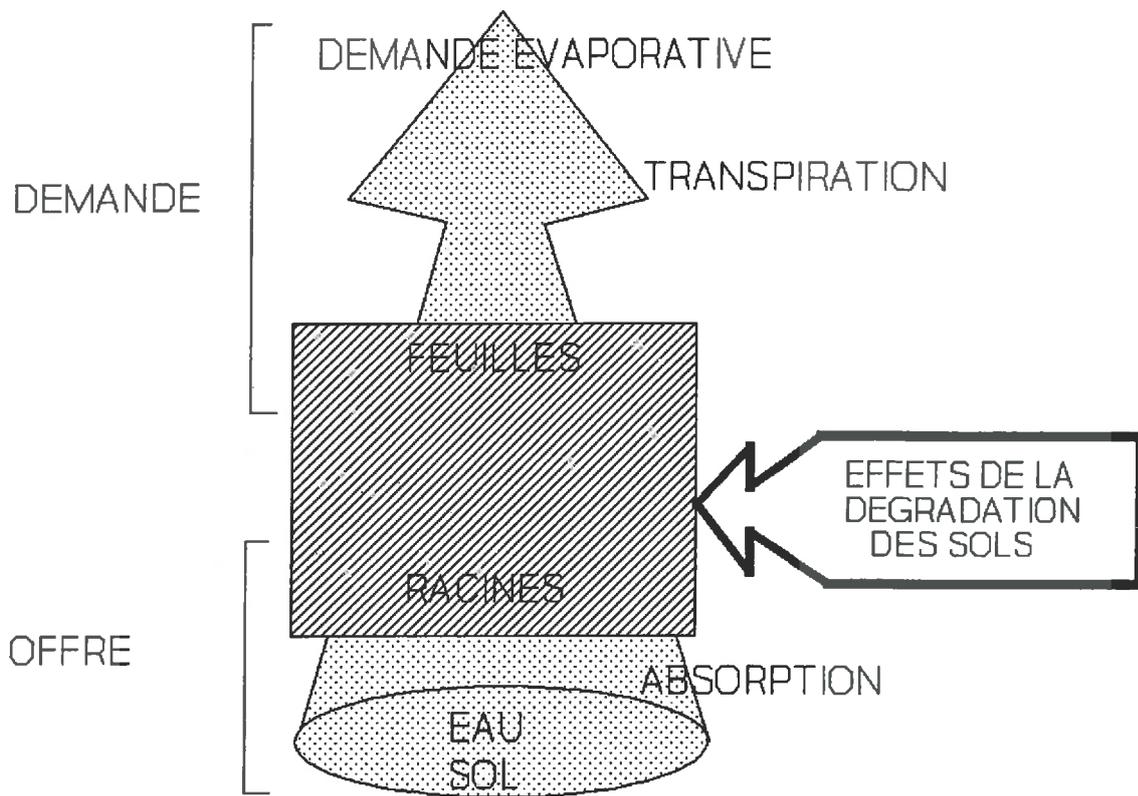
CONCLUSION DE LA 1ERE PARTIE : LA PROBLEMATIQUE

L'étude bibliographique sur le fonctionnement hydrique tant à l'échelle du continuum sol-plante-atmosphère qu'à l'échelle de la parcelle, et les connaissances sur la perception du stress hydrique par la plante, nous ont conduit à aborder le problème de l'effet de la culture continue des sols sur la baisse des rendements, dans un contexte d'agriculture sahélienne à faibles intrants, **par une approche éco-physiologique**. Nous avons vu que la culture continue augmente la vulnérabilité de la culture à des creux pluviométriques. A la fin du deuxième chapitre, nous avons présenté (cf. fig. 14) les étapes successives d'un processus qui conduit à une chute de productivité. Dans ce cycle de transformations, nous nous intéressons au maillon le plus hypothétique, celui de l'effet de la dégradation du sol sur l'alimentation hydrique du mil. Nous allons d'une part, chercher à vérifier cette relation et d'autre part, analyser quel est, des racines ou (et) des feuilles, l'organe qui a régulé, à la baisse, l'alimentation hydrique (fig. 19)

La consommation d'eau est équivalente à la valeur la plus faible entre absorption racinaire et transpiration des feuilles. Aussi dépend-elle du rapport entre racines et feuilles. Pour obtenir des rapports de valeurs différentes, le suivi de la transpiration a été effectué aux stades végétatif et remplissage du grain. D'autre part, la transpiration a été suivie en sol humide et en sol en cours d'assèchement. Cette deuxième condition exige une quantité supérieure de racines pour satisfaire la demande.

Les mesures de transpiration seront mises en relation avec l'évolution du stock d'eau du réservoir sol, au cours du cycle de développement, ceci afin de comparer les stratégies éventuelles dans la consommation d'eau par les plantes cultivées selon l'état de dégradation du sol.

Nous travaillerons donc essentiellement sur la transpiration à l'échelle de la plante : pour cela, la mesure du flux de sève est particulièrement bien adaptée à notre étude car elle s'applique à la plante entière et permet de faire abstraction de l'évaporation du sol. De plus, le pas de temps utilisable par cette technique, de l'ordre de la demi-heure, nous permet d'analyser finement les mécanismes en jeu, ce que ne permettent pas de faire les autres techniques de mesure des flux hydriques.



MECANISMES PHYSIOLOGIQUES A IDENTIFIER :

- au niveau racinaire
- au niveau foliaire

D 'UN POINT DE VUE :

- croissance
- fonctionnement

Fig. 19 : Recherche des mécanismes physiologiques relatifs à la diminution de l'alimentation hydrique du mil due à la dégradation des sols.

2EME PARTIE : TECHNIQUES UTILISEES ET ADAPTATION REALISEE POUR L'ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DU MIL

CHAPITRE 1 : CARACTERISATION DES FACTEURS REGULANT LE FLUX HYDRIQUE DANS LE CONTINUUM

A- MATERIEL VEGETAL

La plante étudiée est le mil souna III, communément cultivée en milieu paysan dans la région de Bambey. C'est une variété locale traditionnelle améliorée. Son cycle semis-récolte est de 90 jours.

C'est une plante qui talle fortement. Dans les conditions précaires où le mil est cultivé, le développement des talles apporte une sécurité vis-à-vis des aléas climatiques et concourent à la rusticité de cette plante (LAMBERT, 1983a). Chez le Souna III, on compte en moyenne 10 talles primaires et 18 talles secondaires par pied dont 5 seulement évolueront vers l'épiaison. L'orientation d'une talle vers la fructification est sous l'influence de nombreux facteurs (LAMBERT, 1983b). La tige principale est appelée brin-maître.

Des informations nombreuses et disparates existent sur différents traits morpho-physiologiques de résistance à la sécheresse opérant chez le mil. La vigueur du développement initial, la remobilisation des réserves carbonées des tiges, l'extension continue du système racinaire et, dans certaines conditions, la réponse des stomates à la sécheresse de l'air sont des caractères de résistance au déficit hydrique clairement établis chez le mil. En revanche, l'ajustement osmotique et la résistance des tissus à la déshydratation semblent n'avoir qu'un rôle mineur. Aucune information n'est disponible sur la conductivité hydraulique de la plante entière, et celle concernant l'impact du déficit hydrique sur l'efficacité de la transpiration sont contradictoires. Dans l'ensemble, l'intérêt effectif de ces différents caractères de résistance à la sécheresse dans l'élaboration du rendement reste mal connu, que ce soit dans les essais au champ dont les résultats souvent corrélatifs sont difficiles à interpréter en terme de fonctionnement de la plante, ou qu'il s'agisse de travaux en conditions contrôlées difficiles à extrapoler en milieu naturel (WINKEL et DO, 1993).

Parmi les différentes stratégies observées dans le monde végétal face à la sécheresse, le mil développe préférentiellement une stratégie d'évitement.

B- CARACTERISATION DES FACTEURS DE L'OFFRE

1- Mesures de l'état hydrique du sol

1-1- Humidité pondérale du sol (expériences en pot)

La même quantité de sol sec a été mise dans chaque pot, soit $PS = 15 \text{ Kg}$. L'augmentation de poids, due à la croissance de la plante, est négligeable par rapport à la transpiration totale journalière de la plante (de l'ordre de 2 % à 40 jours après semis).

Les pots bâchés, pour éviter l'évaporation du sol, sont pesés chaque matin à la même heure (P_j) avec une balance électronique METTLER de précision 1 g.

L'humidité pondérale (HP) du sol est calculée ainsi :

$$HP = (P_j - P_o) \times 100 / PS$$

où P_j : poids (pot + plante + eau) du jour j
 P_o : poids (pot + plante) initial
 PS : poids sec du sol

Dans l'expérimentation en pot concernant la fin du cycle de développement, ne faisant pas de pesées, la quantité d'eau dans le pot bâché est évaluée par différence entre la quantité d'eau apportée chaque matin et le débit de sève journalier de la plante entière du jour précédent :

$$Q_j = (Q_{j-1} - DS_{j-1}) + A_j$$

où Q_j : quantité d'eau du jour j, en litre
 Q_{j-1} : quantité d'eau du jour précédent
 DS_{j-1} : débit de sève journalier de la plante entière, mesuré le jour précédent
 A_j : apport d'eau le matin du jour j.

L'humidité pondérale du sol de chaque pot est alors estimée en divisant la quantité d'eau calculée pour chaque jour par le poids sec du sol, soit 15 Kg. La quantité d'eau maximale dans le pot est fixée à 1 litre. Cette valeur limite a été mesurée par pesées lors de l'expérimentation sur les jeunes plantes avec le même sol.

1-2- Humidité volumique du sol (mesures au champ)

La mesure de l'humidité volumique du sol au champ se fait par mesure neutronique avec une sonde à neutrons de type TROXLER. Les mesures de l'humidité volumique du sol

sont faites depuis la surface, tous les dix centimètres jusqu'à une profondeur de 370 cm, avec un pas de temps de 7 jours et à compter du semis, sur les deux parcelles (Témoin et Compost).

Le principe de la sonde à neutrons repose sur le propriété qu'a l'hydrogène de ralentir les neutrons rapides. Si l'on place dans le sol une source de neutrons rapides, ces derniers sont d'autant plus ralentis que le sol est humide.

La mesure se fait au moyen d'un tube en alliage d'aluminium enfoncé verticalement dans le sol où il est laissé en permanence; un bon contact entre la terre et le tube est une condition essentielle de précision de la mesure. La source de neutrons rapides, accompagnée du détecteur de neutrons lents, est amenée à la profondeur désirée. Le nombre de neutrons lents détectés par unité de temps est proportionnel à l'humidité volumique.

La détermination précise de la valeur de l'humidité volumique θ_v nécessite un étalonnage pour déterminer les coefficients a et b de la régression :

$$\theta_v = aN + b$$

qui lie θ_v et le comptage neutronique N (rapporté à un comptage de référence, généralement dans de l'eau). L'étalonnage gravimétrique nécessite la détermination des densités apparentes d'échantillons de terre prélevés dans chaque horizon pour passer de la teneur en eau massique, déterminée par la différence de poids de l'échantillon avant et après passage à l'étuve, à la teneur en eau volumique.

2- Mesures des paramètres racinaires

2-1- Poids

A la fin de chaque expérimentation en pot, les racines de chaque plante sont mises à l'étuve à 60°C pendant 48 h, puis pesées avec une balance électronique METTLER ayant une précision au 10 millième de gramme.

2-2- Volume

Les volumes racinaires sont déterminés par le déplacement d'une colonne d'eau contenue dans une éprouvette de 1 litre.

2-3- Densité racinaire au champ

Des monolithes de sol de (90 x 90) cm² centrés sur un poquet ont été dégagés à la floraison dans les deux parcelles (Témoin et Compost). On a ensuite découpé le monolithe horizontalement en tranches de 10 cm d'épaisseur et verticalement en carrés de 30 x 30 cm

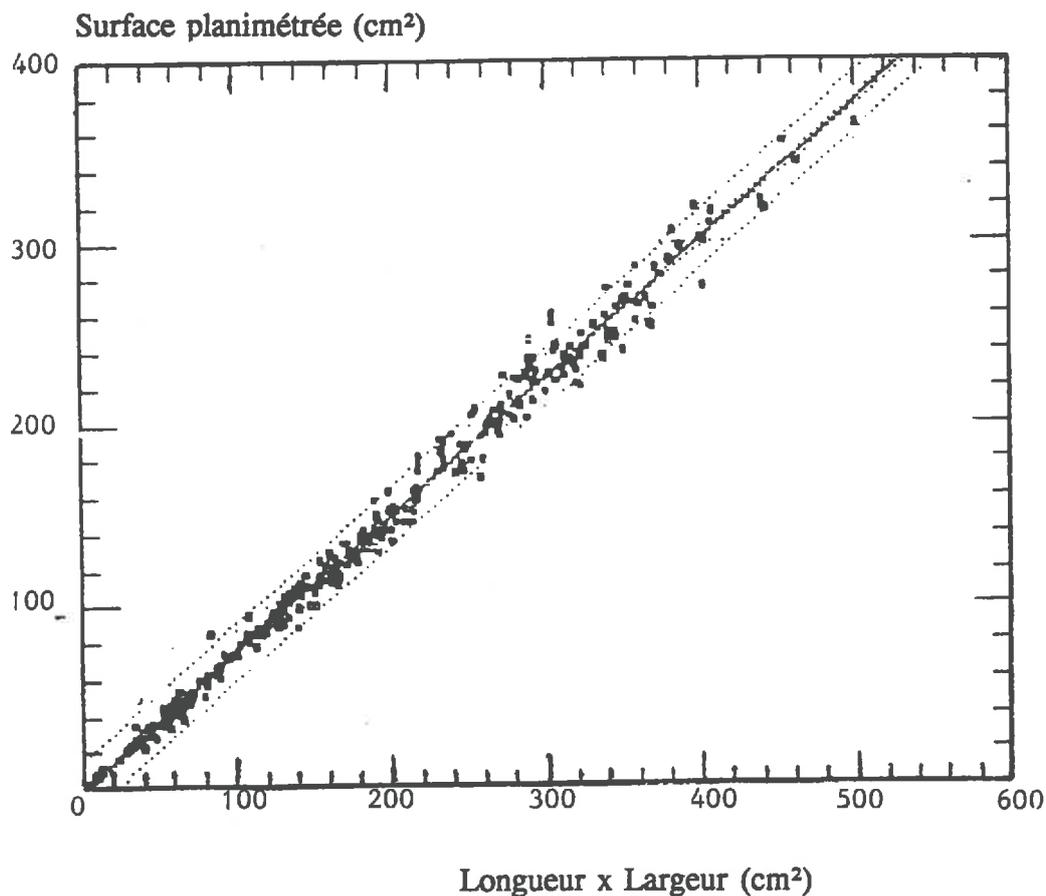
Tab. 6 : Nombres moyens de stomates par mm² observés sur les empreintes de l'épiderme de la face supérieure , de la face inférieure et de la gaine d'une feuille de mil.

	Face supérieure	Face inférieure	Gaine
Nombre moyen de stomates par mm ²	118	102	109

La gaine est un prolongement de l'épiderme de la face inférieure de la feuille. Les empreintes sont réalisées par application d'une couche fine de vernis à ongle transparent sur la troisième feuille en partant de l'apex du brin-maître de quatre plantes bien arrosées, puis prélevées délicatement et observées au microscope sur une lame quadrillée.

Fig. 20 : Relation entre la surface foliaire mesurée par planimètre optique et les mesures de longueur et largeur d'une feuille obtenue pour différents stades de développement du mil (d'après LEROUX, 1988).

La régression obtenue est $SF = 0.147 + 0.751 (L \times l)$ avec $R^2 = 0.99$



soit pour chaque horizon de 10 cm, neuf cubes de 10 x 30 x 30 cm³.

Les racines de chacun de ces cubes ont été triées et lavées puis pesées après ressuyage sur papier filtre humide (poids frais) et pesées après séjour de 24 h à l'étuve (poids sec).

C- CARACTERISATION DES FACTEURS DE LA DEMANDE

1- Mesures de la surface foliaire

Trois méthodes ont été utilisées pour mesurer les surfaces foliaires selon la disponibilité du planimètre optique.

1-1- Par planimètre optique

L'appareil utilisé est un planimètre optique LICOR 3000. Les mesures sont faites sur toutes les feuilles développées plus les touffes (talles non développées).

Pour caractériser le débit de sève en fonction la surface foliaire de la tige équipée du capteur de débit de sève, la surface de la gaine entourant la tige est aussi prise en compte et mesurée à partir de la hauteur et du diamètre de la tige. Le comptage du nombre de stomates sur la gaine (Tab. 6) permet de penser à une participation effective de la gaine dans la transpiration de la plante.

1-2- Par formule d'estimation

En l'absence de planimètre, la surface foliaire est estimée à partir de la longueur et de la plus longue largeur de la feuille. On dispose d'une relation étroite liant ces différents paramètres et établie sur le mil au Sénégal pour différents stades de développement (fig. 20).

On a vérifié les coefficients de l'équation pour des plantes cultivées en pot en comparant les surfaces obtenues par la mesure de la longueur et de la largeur, et les surfaces mesurées par le planimètre sur plusieurs feuilles.

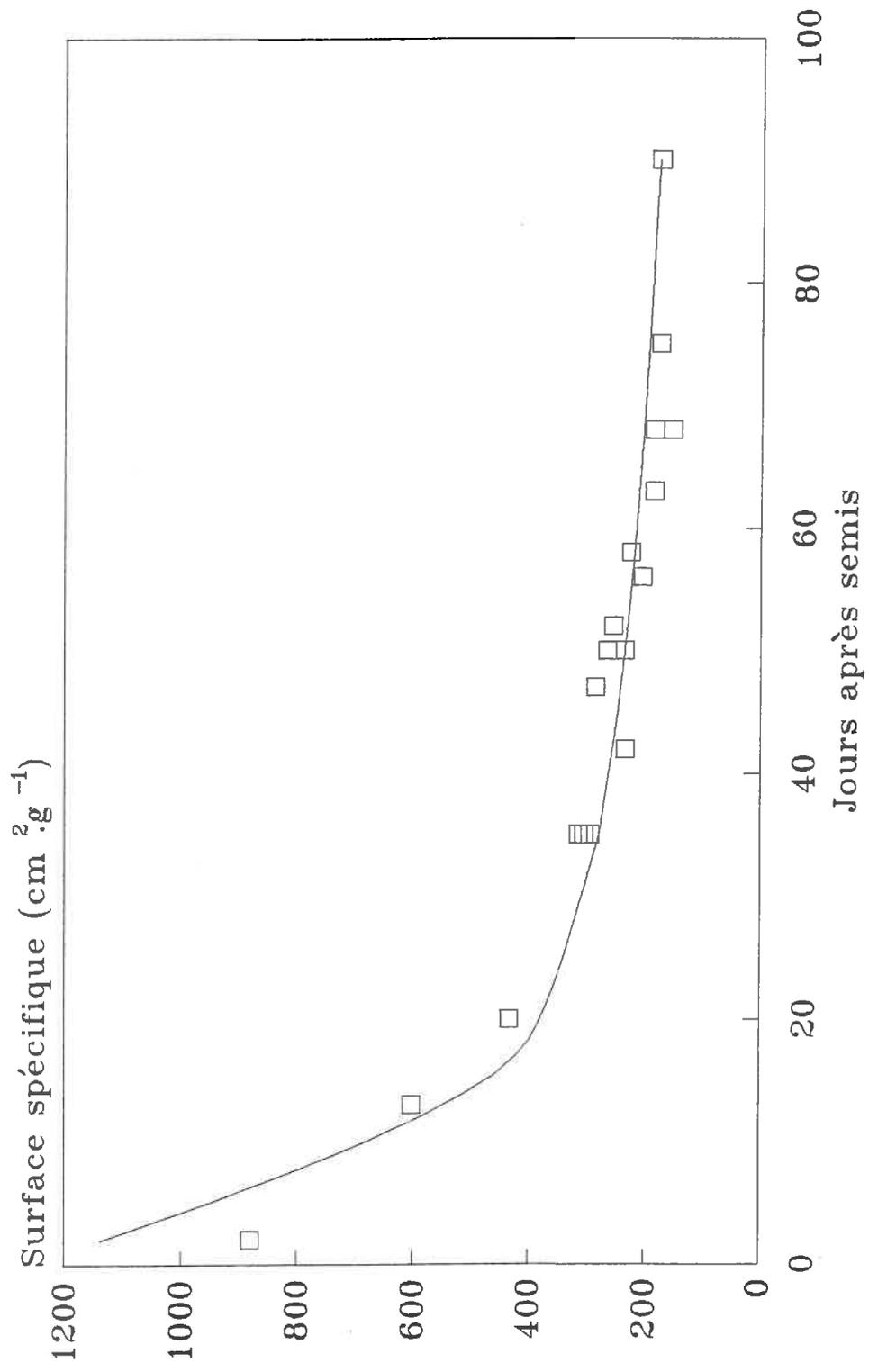
1-3- Par pesées

Au champ, les mesures de surfaces foliaires ont aussi été faites tous les quinze jours sur quatre poquets choisis au hasard dans les deuxième lignes de bordure de chaque parcelle (Témoin et Compost) par les poids secs de feuilles.

Une relation établie sur le mil permet de connaître la surface spécifique des feuilles pour chaque jour après semis (fig. 21) et permet ainsi de calculer la surface foliaire par la relation :

$$\text{Surface foliaire} = \text{Surface spécifique} \times \text{Poids sec}$$

Fig. 21 : Evolution de la surface spécifique du mil
en fonction du jour après semis
d'après AFFHOLDER, 1992



2- Mesures de l'état hydrique foliaire

Ces mesures ont été effectuées pour caractériser le stress hydrique subi par la plante dans l'étude d'une contrainte hydrique en pot (3^e partie- Ch1). Toutes ces mesures sont effectuées sur la troisième feuille en partant de l'apex de la tige principale (DO et al., 1989).

2-1- Teneur relative en eau

Des fragments de feuilles sont prélevés à 10, 12 et 15 h et aussitôt placés dans des flacons hermétiques. Au laboratoire, ces fragments sont pesés (poids frais) puis placés dans de l'eau distillée pendant 8 heures avant la mesure du poids à pleine turgescence. Enfin, les fragments sont placés 24 h à l'étuve pour la mesure du poids sec.

La teneur relative en eau se calcule alors :

$$\text{TRE} = (\text{Poids frais} - \text{Poids sec}) / (\text{Poids turgescence} - \text{Poids sec})$$

Elle s'exprime en pourcentage.

2-2- Potentiel hydrique foliaire

Les mesures de potentiel hydrique foliaire sont faites à la même heure par une presse hydraulique CAMPBELL. La détermination du potentiel hydrique par cette méthode repose sur le même principe que celui de la chambre à pression (SCHOLANDER et al., 1965). Elle consiste à appliquer une pression sur la feuille et à observer le point d'apparition de la sève du xylème. La pression appliquée à ce point est égale, au signe près, au potentiel hydrique foliaire.

On prélève un fragment de feuille à partir de l'apex que l'on place rapidement dans la presse, recouvert d'un morceau de papier filtre. La presse est refermée et la pression est appliquée régulièrement avec des incréments successifs et égaux de 0.7 bars jusqu'à apparition de la sève.

Nous avons retenu pour chaque mesure, le premier point d'apparition de la sève sur le papier filtre.

2-3- Résistance stomatique

L'appareil utilisé est un poromètre à diffusion de vapeur d'eau DELTA-T. La mesure de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau au niveau d'une feuille, réalisée avec cet

appareil, permet d'avoir une estimation du degré d'ouverture moyen de ses stomates et donc une évaluation de l'importance du phénomène transpiratoire.

Son principe de fonctionnement est d'attribuer la variation d'humidité relative observée dans la chambre de mesure contenant la feuille, à sa transpiration. A partir de la connaissance du volume de la chambre (V), de la somme des résistances dans la chambre (Ra) et du gradient de pression de vapeur d'eau entre la feuille et la chambre $d(P(f-a))$, la résistance de la feuille (Rs) peut être déterminée par la formule suivante :

$$R_s = [S \cdot dt \cdot d(P(f-a)) / V \cdot dP_{abs}] - R_a$$

avec dP_{abs} : variation d'humidité absolue dans la chambre pendant dt
S : surface foliaire incluse dans la chambre

La résistance calculée par cette méthode correspond à la somme de la résistance stomatique, cuticulaire et de la couche limite. L'erreur sur la mesure de la résistance stomatique est d'autant plus grande que cette résistance est faible. De plus, les différences importantes de températures qui se manifestent sur le site expérimental entre la feuille et la chambre de mesure influencent notablement l'estimation de $d(P(f-a))$ et donc l'estimation de Rs. Ceci nous a obligé dans les conditions de Bambej à étalonner l'appareil avant les mesures puis systématiquement toutes les trente minutes d'utilisation.

Les mesures sont effectuées sur les deux faces de la 3^{ème} feuille de la tige principale et la résistance à la diffusion est estimée en supposant que les deux faces transpirent en parallèle, selon la formule suivante :

$$1/R_s = 1/R_{s_{sup}} + 1/R_{s_{inf}}$$

avec $R_{s_{sup}}$: résistance de la face supérieure
 $R_{s_{inf}}$: résistance de la face inférieure

Dans cette étude, nous utiliserons principalement la notion de conductance stomatique définie par $k_s = 1/R_s$.

3- Mesures de la demande climatique

3-1- Les appareils

La station de Bambej est équipée d'un bac d'évaporation classe A. La mesure du niveau d'eau se fait avec une pointe limnimétrique équipée d'un vernier. Le calcul de

l'évaporation se fait par différence en tenant compte de la pluviométrie et des recharges effectuées pendant 24 h.

Parmi les données météorologiques, pas toujours disponibles, fournies par une station automatique CIMEL, sujette à de nombreuses pannes, nous avons utilisé les mesures de rayonnement global journalier pour la campagne 1990, date à laquelle nous avons pas encore reçu l'équipement pour les mesures météorologiques, propre à cette étude.

Cet équipement destiné à évaluer l'ETP PENMAN pour caractériser la demande climatique, comporte :

- un pyranomètre pour la mesure du rayonnement global, R_g
- un pyrromètre (ou bilanmètre) pour la mesure du rayonnement net, R_n
- un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent
- un psychromètre à thermocouples (réalisé à la station de bioclimatologie de l'INRA de Bordeaux) équipé d'un ventilateur, pour mesurer l'humidité de l'air.

Les jours où la station CIMEL ne marchait pas lors de la campagne 1990, nous avons estimé le rayonnement global par la formule de TURC (1961) à partir de la durée du jour et de la durée d'insolation exprimées en heures. Nous avons utilisé les coefficients calculés par DANCETTE et WILLIOT (1971) pour la station de Bambeay :

$$R_g = RG_0 \times (0.32 + 0.40 \text{ ss/ss}_0)$$

avec ss_0 : durée du jour en heures (fonction de la latitude)

ss : durée d'insolation en heures

RG_0 : rayonnement solaire reçu sur une surface horizontale en l'absence d'atmosphère

La durée d'insolation est relevé journalièrement par un observateur sur un héliographe CAMPBELL.

Tous les appareils sont installés au champ pour la campagne 1991, sauf le pyrromètre dont la coupelle a été détériorée par les oiseaux lors de l'essai en pot précédent. Les données climatiques sont enregistrées sur les centrales d'acquisition de données au même pas de temps (20 mn) que les données concernant les capteurs de débit de sève. Le pyranomètre et le pyrromètre sont branchés sur la même centrale, l'anémomètre et le psychromètre sur l'autre.

3-2- Calcul de l'ETP Penman

L'utilisation de l'ETP Penman pose quelques problèmes car ce calcul utilise des formules d'estimation avec des approximations. Mais malgré cette imprécision, la formule de PENMAN (1948) sert toujours de référence et est largement utilisée (CHOISNEL, 1988),

parfois avec des variantes comme la formule de la Météorologie Nationale en France, mise au point par BROCHET et GERBIER (1975), qui nécessite moins d'informations climatologiques. Les coefficients de la formule de PENMAN, établis à l'origine en climat océanique, notamment ceux pour le calcul du rayonnement net, ont été ajustés pour la région de Bambey au Sénégal (DANCETTE et WILLIOT, 1971) et l'Afrique centrale (RIOU, 1975).

Le calcul de l'ETP Penman repose sur le principe du bilan d'énergie de surface d'un couvert végétal bien alimenté en eau :

$$\text{ETP} = \frac{P' \cdot R_n/L + \Gamma \cdot E_a}{P' + \Gamma} \quad (\text{mm d'eau / jour})$$

avec :

- P' , la dérivée par rapport à la température de la pression de vapeur d'eau saturante; P' dépend de la température moyenne de l'air.

- R_n , le rayonnement net au dessus de la culture

- L , la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($L = 2.47 \text{ MégaJoules.m}^{-2}$)

- Γ , la constante psychrométrique ($66 \text{ Pascal.}^\circ\text{C}^{-1}$)

- E_a , le pouvoir évaporant de l'air, $E_a = f(u) \cdot (P(T) - p)$,

$f(u)$, une fonction du vent,

$P(T)$, la pression de vapeur d'eau saturante à la température moyenne de l'air,

T , pour la journée,

p , la pression de vapeur d'eau dans l'air déduite de l'humidité relative moyenne, HR , de la journée ($p = HR \cdot P(T)$, à diviser par 100 si HR en %)

Le calcul de R_n (en MégaJoule. m^{-2} / jour) quand il n'est pas directement mesuré est le suivant :

$$R_n = (1-a) \cdot R_g + R_a - R_t$$

avec :

- a , l'albédo, 0.20 pour une culture verte,

- R_g , le rayonnement global mesuré, ou estimé (en MégaJoule. m^{-2} / jour),

- R_a , le rayonnement de l'atmosphère dans les grandes longueurs d'onde,

- R_t , le rayonnement terrestre dans les grandes longueurs d'onde ($= \sigma \cdot T_s^4$, avec T_s ,

la température de surface du sol en $^\circ\text{K}$ et σ , la constante de STEFAN, $\sigma = 4.95 \cdot 10^{-9}$ MégaJoule. $\text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{K}^{-4}$ / jour).

$R_a - R_t$ peut être estimé par une formule de type BRUNT :

Fig.22: Régression entre le rayonnement net (Rn) et le rayonnement global (Rg). Valeurs horaires mesurées en juillet 1991.

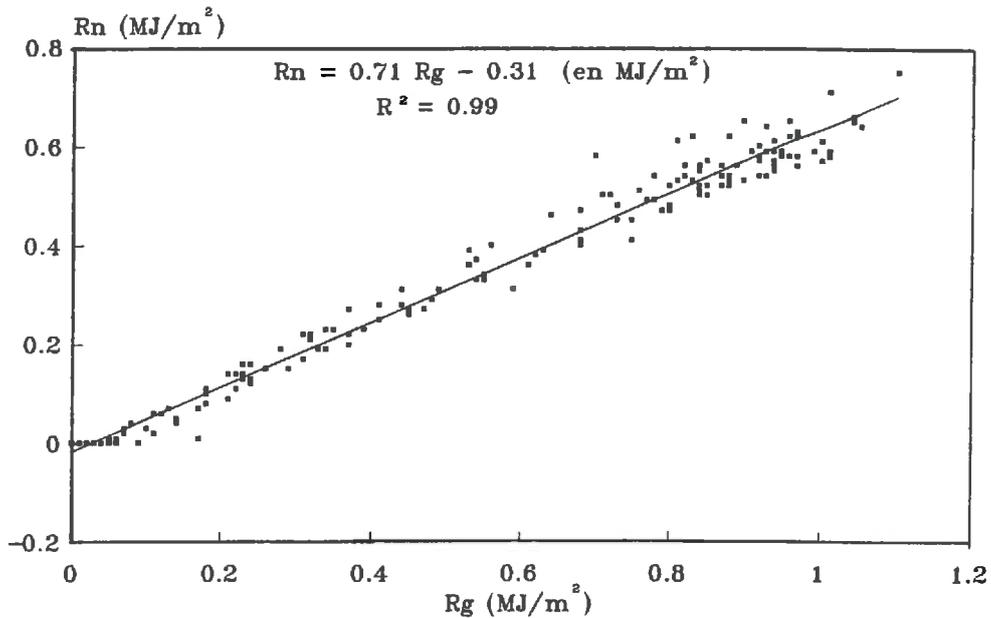
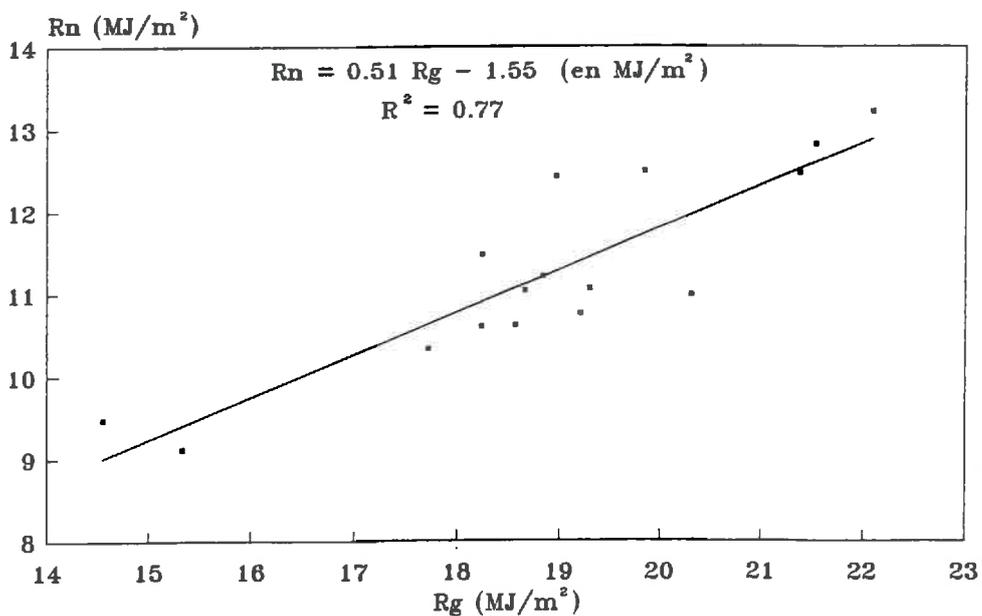


Fig.23: Régression entre le rayonnement net (Rn) et le rayonnement global (Rg). Valeurs journalières mesurées en juillet 1991.



$$Ra-Rt = -\sigma \cdot T^4 \cdot (0.34 - 0.008 \sqrt{p}) \cdot (0.1 + 0.9 ss / ss0)$$

RIOU (1975) propose pour l'Afrique centrale :

$$Ra-Rt = -\sigma \cdot T^4 \cdot (0.35 - 0.0042 \sqrt{p}) \cdot (0.5 + 0.5 ss / ss0)$$

p étant exprimé en Pascal.

Parmi tous les coefficients proposés pour le calcul du Rn, nous avons finalement retenu ceux de BRUNT (1932, 1939) cité par CHOISNEL (1988), car c'est l'estimation qui se rapprochait le plus de nos valeurs de Rn, mesurées sur la période où le pyrromètre fonctionnait :

$$Ra-Rt = -\sigma \cdot T^4 \cdot (0.56 - 0.08 \sqrt{p}) \cdot (0.1 + 0.9 ss / ss0)$$

La formule de BRUNT a été établie pour des conditions de ciel clair. Le terme correctif (0.1 + 0.9 ss / ss0) a été rajouté et ajusté par Penman et est donc valable pour la gamme des pressions partielles de vapeur d'eau observées en climat océanique.

D'autre part, nous avons cherché une régression liant les valeurs horaires ou journalières de Rg et de Rn, pour estimer Rn à partir de Rg pour l'expérimentation au champ de la campagne 1991 (fig. 22 et 23).

Le calcul du pouvoir évaporant de l'air Ea (en mm/jour) est le suivant :

$$Ea = 0.0026 \times (1 + 0.54 U) \times (P(T) - p)$$

avec U la vitesse du vent mesurée à 2 m au dessus de la culture, en m.s-1. Les pressions de vapeur d'eau sont exprimées en Pascal.

Les données mesurées toutes les 20 mn et enregistrées sur la centrale d'acquisition Campbell sont extraites du fichier de base puis traitées par un programme de calcul de l'ETP Penman donnant les valeurs journalières.

Notre utilisation de la formule de Penman est critiquable pour plusieurs raisons :

- à l'échelle de temps utilisée (20 mn) : en effet, cette formule, bien que fondée au départ sur un raisonnement physique précis de bilan d'énergie, résulte d'un ajustement statistique établi au niveau décadaire, notamment en ce qui concerne le second terme de l'équation. Les calculs perdent en représentativité en passant de l'échelle décadaire à l'échelle de la journée (CHOISNEL, 1988), et donc d'autant plus en passant à l'échelle horaire. De plus, on néglige le flux de chaleur dans le sol.

- *pour l'étude en pot* : les valeurs de R_n ne sont plus significatives à cause de l'interférence du milieu environnant (béton, sable). On a donc retenu les valeurs de R_g ou de l'EV bac pour caractériser la demande climatique lors de l'étude en pot.

3-3- Relation entre les deux références utilisées

Selon la disponibilité des appareils, nous avons utilisé l'EV bac ou l'ETP Penman comme référence de demande climatique. La comparaison entre ces deux référentiels a été faite par IMBERNON et AUCKENTHALER (1983) en région tropicale : à la saison des pluies, le rapport EV bac / ETP Penman est voisin de 1 alors qu'à la saison sèche, ce rapport se rapproche de 2.

D- CARACTERISATION DU FLUX HYDRIQUE

1- Bilan hydrique

Au champ, l'évapotranspiration de la parcelle (ETR) est déterminée par la méthode du bilan hydrique : si l'enracinement de la culture atteint une profondeur z , l'ETR est calculée par le bilan de tous les flux d'eau perçus au niveau du sol, ce qui se traduit par la relation suivante:

$$ETR = P + I + R + D - [\Delta S]^z_0$$

avec P : précipitations

I : irrigation

R : ruissellement

D : drainage, soit le flux d'eau à travers la côte z , fréquemment négligé

ΔS : variation du stock d'eau contenue dans les z premiers centimètres de sol.

Les apports d'eau d'origine strictement pluviale sont mesurée par un pluviomètre sur le site même. La variation du stock d'eau (ΔS) dans le sol est mesurée par une sonde à neutrons de type TROXLER (cf. paragraphe B-1-2, Mesures de l'humidité volumique du sol). La variation de teneur en eau volumique est proportionnelle à la variation du comptage neutronique entre deux dates de mesures. ΔS est alors l'écart entre deux profils d'humidité volumique successifs. Le ruissellement est contrôlé par un anneau de garde autour du tube d'accès de la sonde à neutrons et le drainage est négligeable. L'ETR est exprimée en mm/jour.

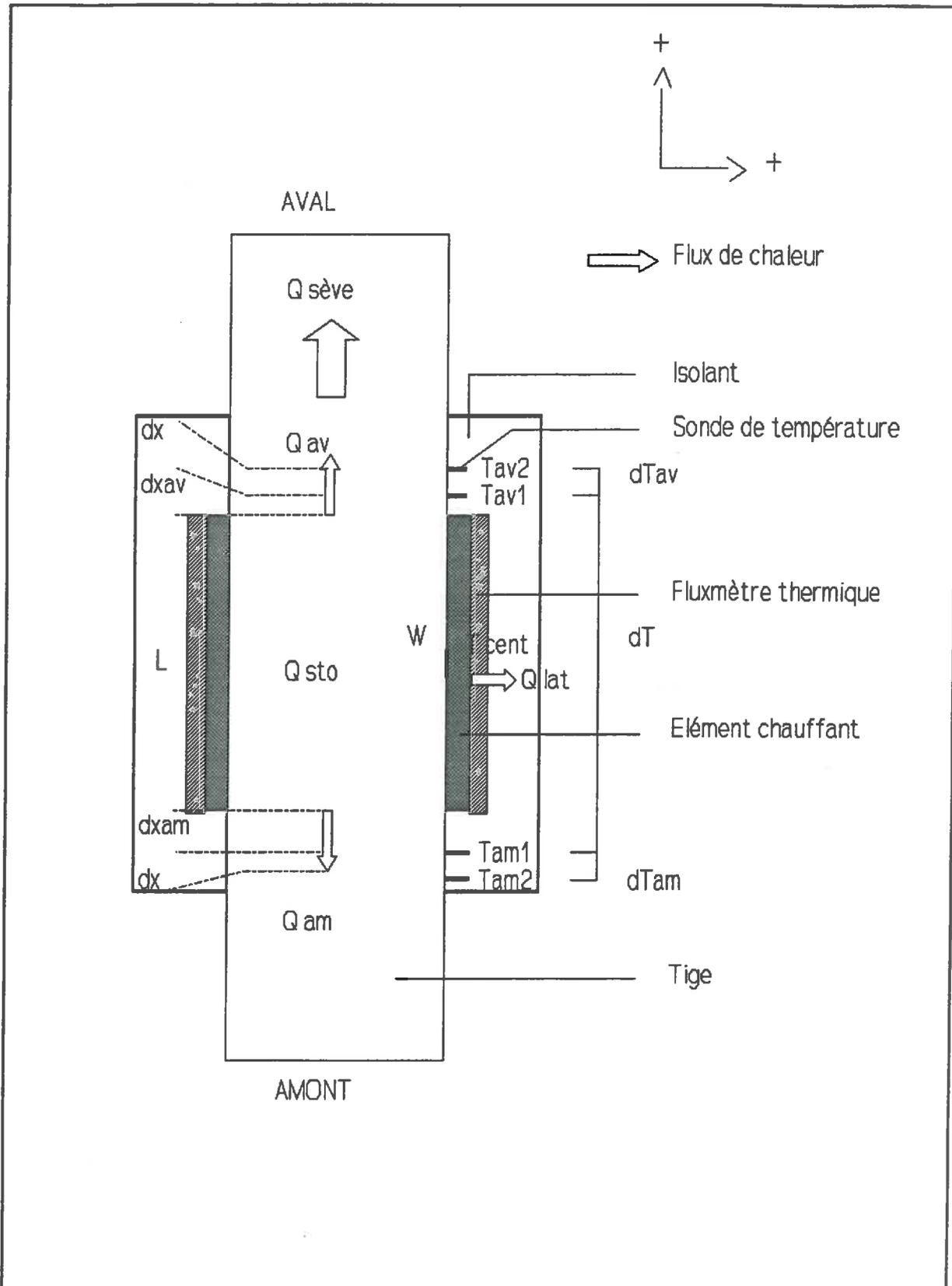


Fig. 24 : Schéma du capteur de débit de sève

2- Mesures du débit de sève brute

Ce capteur permet de calculer le débit de sève dans une tige de 1 à 2 cm de diamètre par la mesure des flux de chaleur engendrés par un ruban chauffant entourant la tige.

2-1- Principe du capteur à bilan de chaleur (d'après VALANCOGNE et GRANIER, 1991)

Le ruban chauffant (fig. 24) disposé autour de la tige délivre une puissance constante connue W qui contribue à élever la température du segment. Il en résulte au niveau des surfaces externes de ce volume, des flux de chaleur (exprimés en Watt) :

- Q_{am} et Q_{av} , par conduction selon l'axe de la tige, respectivement vers l'amont et vers l'aval,
- Q_{lat} , par conduction vers l'air environnant,
- $Q_{sève}$, par convection associée au débit de sève ds ,

et une augmentation d'énergie calorifique stockée par unité de temps Q_{sto} liée à l'augmentation de température du volume considéré.

Sous réserve qu'il n'y ait pas d'évaporation ou de condensation de l'eau, le principe de conservation de l'énergie permet d'exprimer le bilan énergétique du volume V par l'équation suivante :

$$W = Q_{av} - Q_{am} + Q_{lat} + Q_{sève} + Q_{sto}$$

en adoptant la convention que les flux allant vers le haut (aval) ou radialement vers l'extérieur sont positifs.

Par ailleurs le flux de chaleur $Q_{sève}$ est proportionnel au débit de sève ds ($m^3 \cdot s^{-1}$) et à l'échauffement de la sève δT ($^{\circ}C$) lors de la traversée du segment chauffé :

$$Q_{sève} = c_{eau} \cdot ds \cdot \delta T$$

avec c_{eau} , chaleur volumique de la sève brute (assimilable à celle de l'eau = $4.18 \text{ MJ} \cdot m^{-3} \cdot ^{\circ}C^{-1}$).

La combinaison de ces deux premières relations conduit à l'équation suivante :

$$ds = (W - Q_{av} + Q_{am} - Q_{lat} - Q_{sto}) / (c_{eau} \cdot \delta T)$$

Pour éviter que le terme δT ne s'annule, il est nécessaire de créer une dissymétrie entre l'amont et l'aval dans le positionnement des sondes de température; les sondes aval doivent être plus proches de l'élément chauffant, soit $\delta x_{av} < \delta x_{am}$ (cf. fig. 24).

Ainsi, le débit de sève brute ds (exprimé en $m^3.s^{-1}$) peut être calculé si on mesure les différents flux de chaleur Q_{av} , Q_{am} , Q_{lat} , Q_{sto} et l'échauffement δT de la sève.

2-2- Réalisation du capteur

2-2-1- L'élément chauffant

Il est constitué d'un enroulement de fil de constantan autour d'un ruban souple, alimenté par une tension constante pouvant aller jusqu'à 5 V. La tension est réglée en fonction de la résistance de l'élément chauffant mesurée en bout de câble (40 à 70 Ω selon le diamètre du fil de constantan utilisé) de façon à obtenir un échauffement de 10 à 15°C de la tige à débit de sève nul, ce qui correspond à une puissance de l'ordre de 0.3 W pour une tige de 1 cm de diamètre. On observera alors la température centrale, T_{cent} , les premières nuits pour régler définitivement la tension fournie au capteur.

Dans le cas de l'étude d'un stress hydrique, nous avons travaillé avec une puissance plus faible, de l'ordre de 0.23 W afin que la température de la tige ne dépasse pas 55°C en milieu de journée, valeur seuil fixée dans le programme car provoquant des dégâts physiologiques.

2-2-2- Les sondes de température

Les flux de chaleur amont et aval, Q_{am} et Q_{av} , sont estimés en appliquant la loi de conduction de la chaleur (loi de Fourier). Les sondes de température constituées d'un thermocouple cuivre-constantan sont maintenues sur un support rigide. Elles permettent de mesurer les écarts de température $\delta T_{am} = (T_{am1} - T_{am2})$ et $\delta T_{av} = (T_{av2} - T_{av1})$ entre des sections transversales espacées de δx , respectivement distantes de δx_{am} et δx_{av} des extrémités amont et aval de l'élément chauffant :

$$Q_{am} = -k A_{am} (dT/dx)_{am} \approx -k A_{am} (T_{am1} - T_{am2})/\delta x$$

$$Q_{av} = -k A_{av} (dT/dx)_{av} \approx -k A_{av} (T_{av2} - T_{av1})/\delta x$$

avec k , conductivité thermique de la tige ($0.6 W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$), A_{am} et A_{av} , respectivement aire des sections transversales (m^2) amont et aval au niveau des positions moyennes de mesure de δT_{am} et δT_{av} .

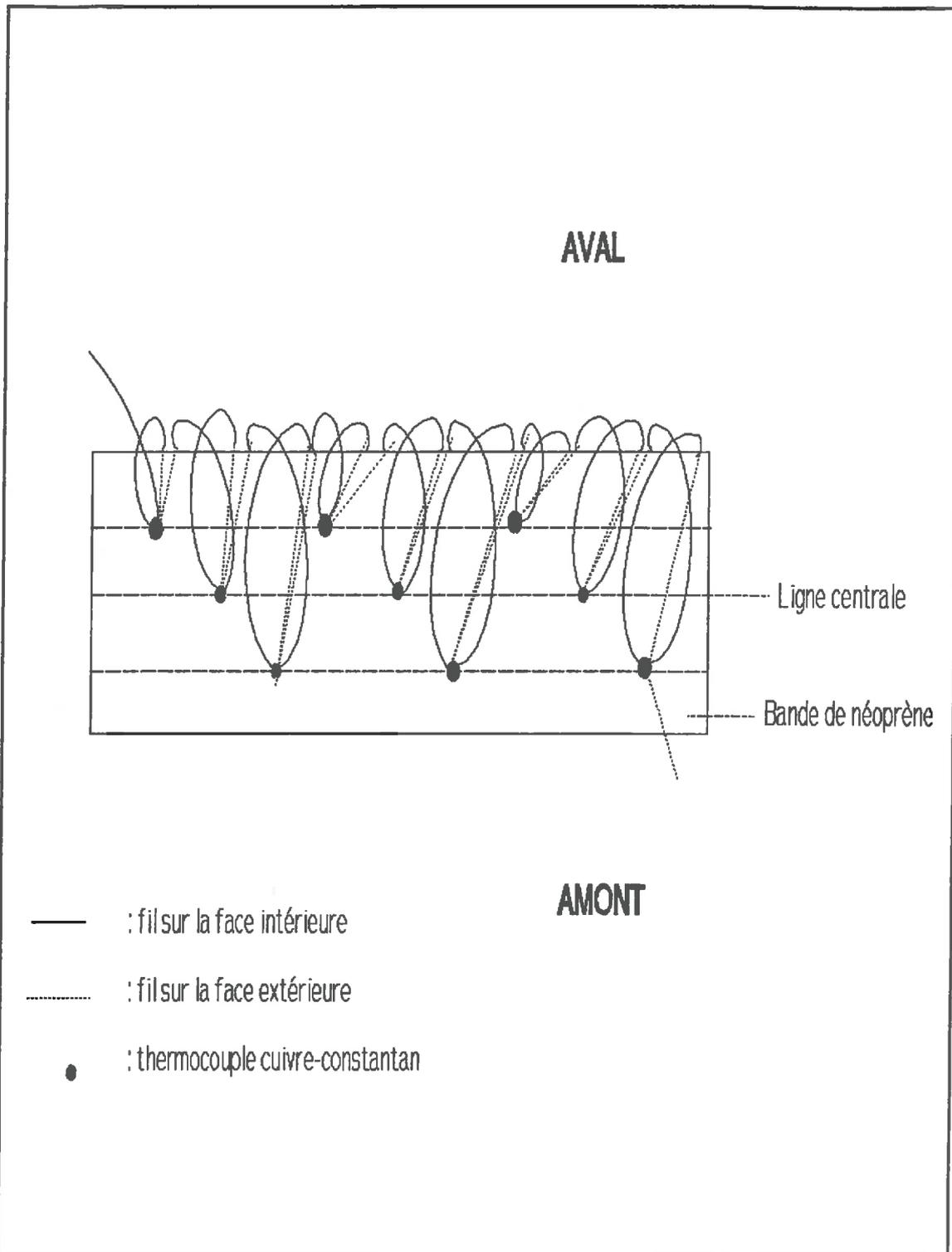


Fig. 25 : Schéma du fluxmètre thermique.

L'échauffement de la sève δT est déterminé par la mesure de $\delta T + (T_{av} - T_{am})/2$ en utilisant les thermocouples déjà installés. Cette formule, légèrement différente de celle de SAKURATANI permet de mesurer l'échauffement de la sève en position médiane des thermocouples.

Le flux de chaleur stockée dans le volume du capteur, Q_{sto} , est évalué à partir de la variation δT de la température moyenne du volume chauffé pendant un intervalle de temps δt . $\delta T/\delta t$ est estimé à partir de la température T_{cent} mesurée par un thermocouple cuivre-constantan fixé sur la tige par du ruban adhésif au milieu du volume :

$$Q_{sto} = c_{biom} \cdot V \cdot \delta T_{cent} / \delta t$$

avec c_{biom} , chaleur volumique du tronc (2.6 à 3.0 MJ.m³.°C⁻¹), V, volume (m³) considéré dans le bilan de chaleur ($V = (A_{am} + A_{av})(L + \delta x_{am} + \delta x_{av} + \delta x)/2$), $\delta T_{cent} / \delta t$, l'estimation de la dérivée par rapport au temps de T_{cent} (°C.s⁻¹).

2-2-3- Le fluxmètre thermique

Le flux de chaleur latérale Q_{lat} est évalué grâce à un fluxmètre thermique constitué par une bande de néoprène collée sur toute la périphérie de l'élément chauffant. Des thermocouples cuivre-constantan montés en série entre les deux faces constituent une thermopile qui permet de mesurer l'écart de température δT_{lat} entre l'intérieur et l'extérieur de la bande (fig. 25). Le flux de chaleur latéral est donné par la relation :

$$Q_{lat} = -K_{lat} \cdot \delta T_{lat}$$

avec K_{lat} coefficient de conduction (W.°C⁻¹) du fluxmètre qui dépend du matériau utilisé, de la forme et de la dimension du fluxmètre.

La détermination de K_{lat} est faite in situ dans des conditions de débit de sève nul (VALANCOGNE et GRANIER, 1991) :

$$K_{lat} = \text{MINIMUM}_{\text{nocturne}} \{ -[W - (Q_{av} - Q_{am}) - Q_{sto}] / \delta T_{lat} \}$$

Les conditions de débit de sève pratiquement nul ont des chances de se réaliser en fin de nuit, à condition que le sol soit assez humide et l'humidité de l'air élevée pour ne pas limiter l'alimentation en eau. On observe la valeur minimale pour plusieurs nuits consécutives et quand ce minimum est stable, on considère que K_{lat} est égal à ce minimum.

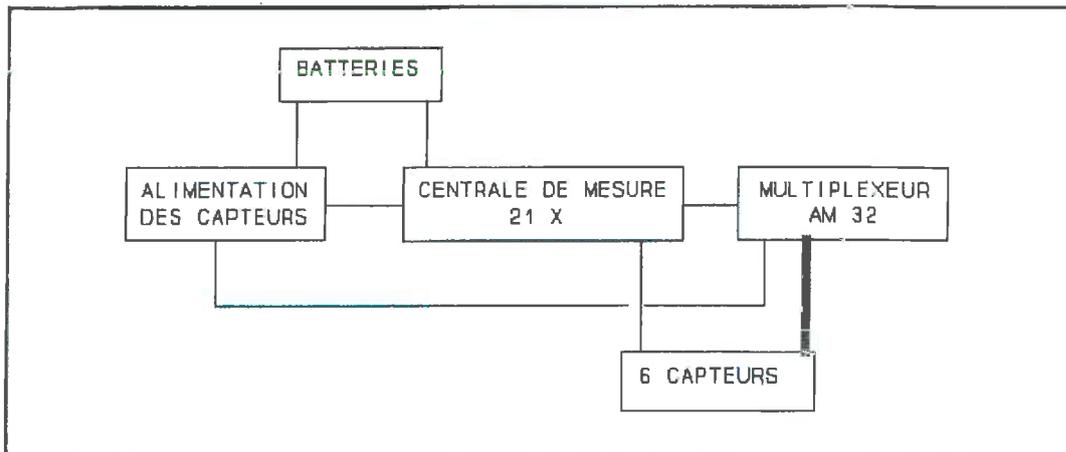


Fig. 26 : Schéma d'ensemble du montage

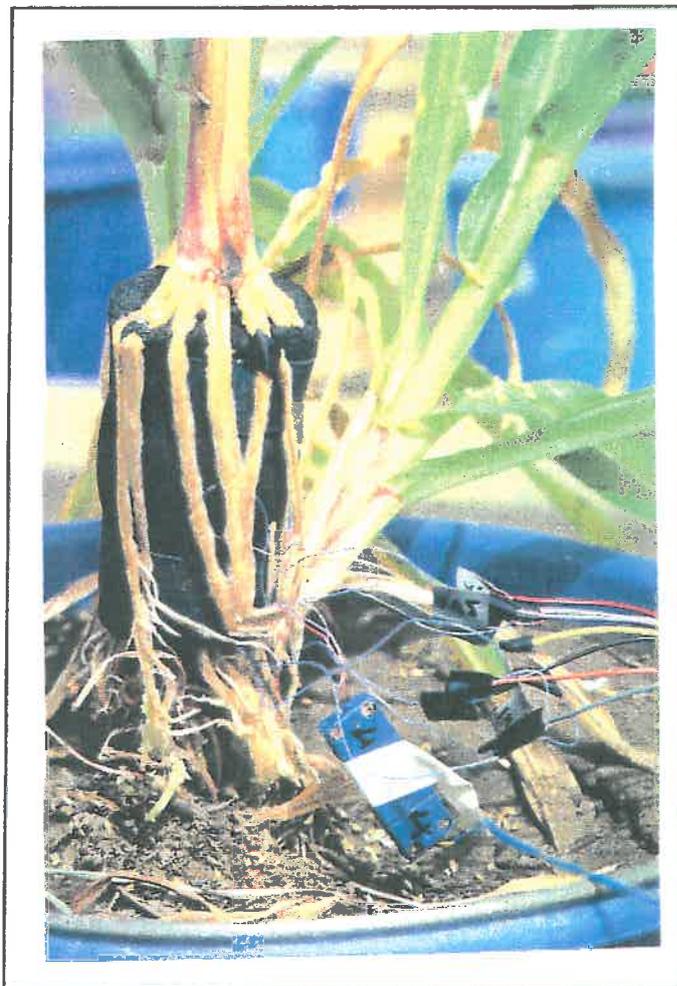


Photo : Formation de racines recouvrant et endommageant le capteur

2-3- Schéma d'ensemble du montage (fig. 26)

Le capteur est installé sur le premier entre-noeud permettant la pose du capteur, à la base de la tige. Il faut éviter de recouvrir un noeud car la néoformation de racines (favorisée par le confinement) peut provoquer des dégâts à l'intérieur du capteur (photo).

On dispose de deux fois l'équipement schématisé sur la figure 26.

Le multiplexeur AM32 permet de commuter 32 voies sur une des voies de la centrale de mesure et donc de brancher 6 capteurs de débit de sève. Chaque capteur occupe 5 voies sur l'AM32 et une voie sur la 21X pour une mesure directe de T_{cent} . Il reste 2 voies disponibles sur le multiplexeur afin de brancher les appareils de mesures climatiques et une voie sur la 21X pour une mesure de température. Chaque système est alimenté par deux batteries de 12V (240 A/h) et a une autonomie de 4 à 5 jours. Les programmes d'enregistrement des données sont rentrés dans chaque centrale 21X (annexe 2) qui sont mises en route simultanément. Enfin les données sont transférées sur le micro-ordinateur par l'intermédiaire d'un module de stockage et traitées par des programmes de calcul du débit de sève horaire et journalier (annexe 3).

CHAPITRE 2 : ADAPTATION DE LA TECHNIQUE DU BILAN DE CHALEUR POUR UNE TIGE HERBACEE

La première phase de cette étude a été d'adapter la technique de mesure du débit de sève à l'étude d'une tige de faible diamètre comme celle du mil. Cette technique est utilisée en routine à Bordeaux pour l'étude de l'alimentation hydrique de petits arbres et de la vigne.

Le passage à une plante herbacée a nécessité une miniaturisation mais aussi une nouvelle conception du capteur, inspirée d'après les études réalisées par SAKURATANI (1981, 1984). Pour cela, plusieurs tests ont été faits à Bordeaux sur du maïs.

1- Modifications du capteur

Dans tous ces tests, le maïs est cultivé en pot bâché pour éviter l'évaporation du sol. Le pot est placé en continu sur une balance électronique reliée à un micro-ordinateur qui enregistre l'évolution horaire du poids. Au laboratoire comme en serre, les plantes sont maintenues sous un fort éclairage par des lampes simulant en intensité et dans le temps le rayonnement global extérieur.

Les expériences préliminaires effectuées sur du maïs ont permis de tester différents capteurs de débit de sève :

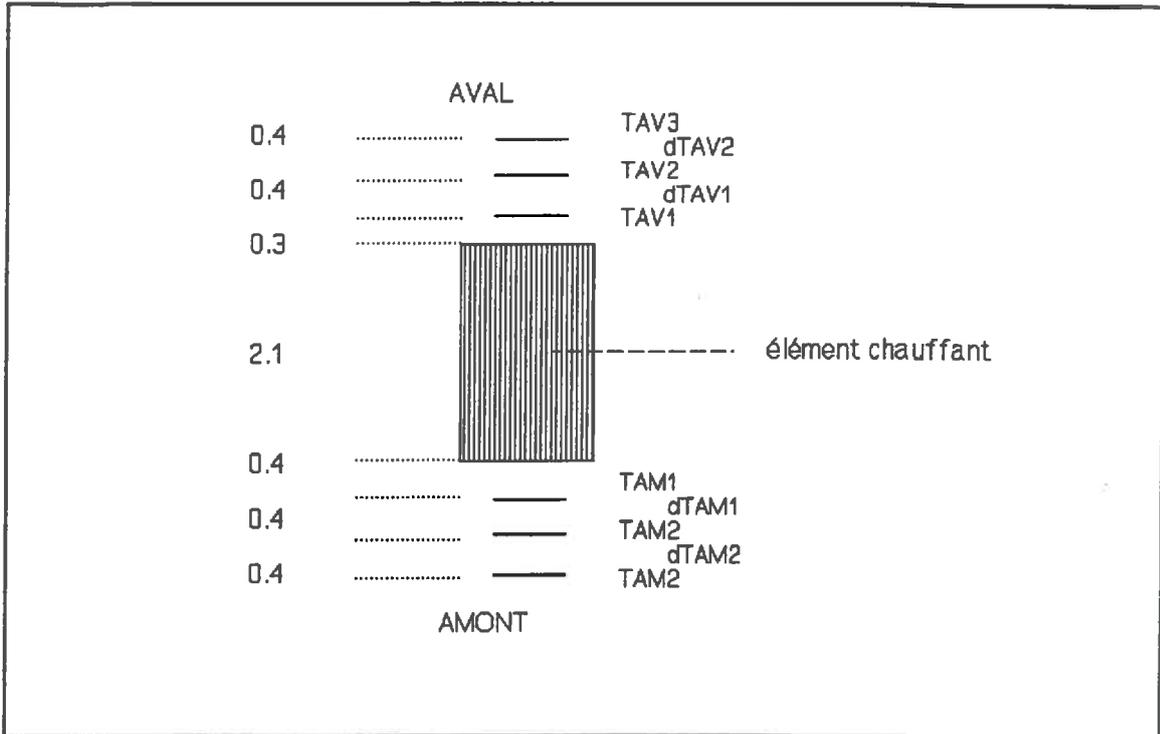
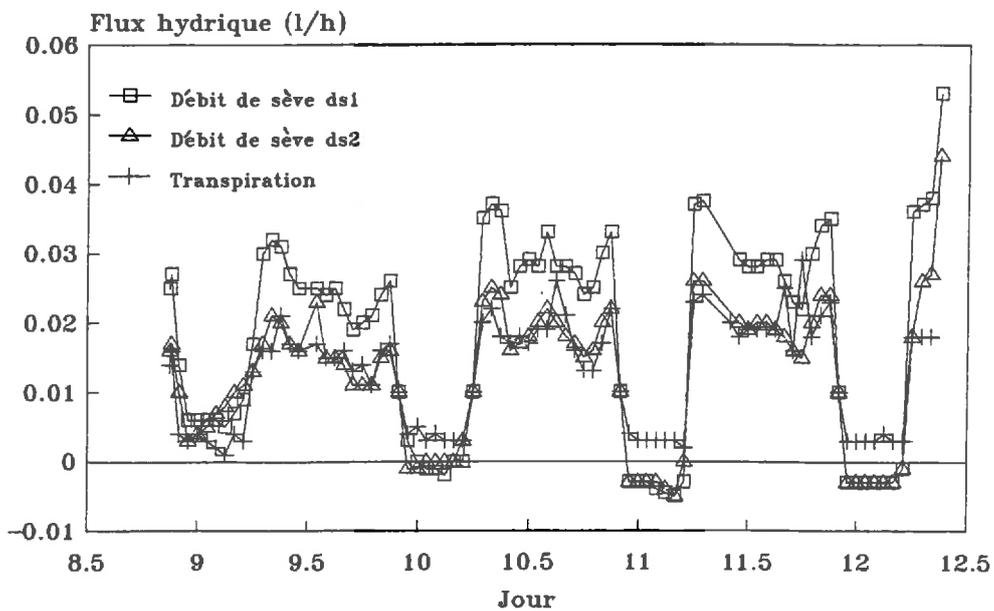


Fig. 27 : Position des sondes de températures dans le capteur ISA1 pour la mesure des débits de sève ds1 et ds2 (distances en cm)

Fig. 28 : Evolution horaire des débits de sève ds1 et ds2 mesurés par le capteur ISA1 et de la transpiration mesurée par pesées.



1-1- Détermination de l'espacement optimal entre les sondes de température et l'élément chauffant

Dans un premier temps, nous avons réalisé un capteur dont les sondes de température sont insérées dans de petites aiguilles enfoncées dans la tige de maïs. Ce système est utilisé pour l'étude du débit de sève sur pommiers.

Sur ce capteur (ISA1), nous avons placé six sondes de température, soit trois à l'amont et trois à l'aval de l'élément chauffant, selon le schéma de la figure 27.

Soient les sondes T_{av1} et T_{am1} , respectivement à 0.3 et 0.4 cm de l'élément chauffant et les sondes T_{av2} et T_{am2} à 0.7 et 0.8 cm de cet élément. Ces deux positions délimitent deux volumes différents chauffés, soient $V_1 = 4.22 \text{ cm}^3$ et $V_2 = 5.28 \text{ cm}^3$, rentrant en compte dans le calcul des débits de sève ds_1 et ds_2 . Le débit de sève ds_1 est calculé avec les écarts de température dt_{av1} et dt_{am1} , et ds_2 avec les écarts dt_{av2} et dt_{am2} .

La fig. 28 donne l'évolution horaire de la transpiration mesurée par pesée et des débits de sève calculés pour chaque position des sondes de température, d'un pied de maïs au cours de 4 journées consécutives. Le débit de sève ds_2 se rapproche le plus de la transpiration mesurée par pesée, surtout dans la journée. En fin de nuit et au levée du jour, les débits de sève calculés sous-estiment la transpiration de manière constante.

L'utilisation des aiguilles contenant les sondes de température s'est avérée peu pratique dans notre cas car les graminées à tige pleine supportent mal l'insertion de sondes dans la moelle provoquant de fortes nécroses. Nous avons donc dû recourir à des mesures de surface.

Une coupe dans la tige de maïs, quelques heures après que le pied ait été sectionné au niveau du collet dans une solution de bleu de méthylène, montre que les vaisseaux conducteurs du xylème sont dispersés dans toute la moelle.

Nous avons donc réalisé un deuxième capteur (ISA2) en maintenant les sondes en surface, tout en conservant les deux mêmes espacements entre les sondes de température et l'élément chauffant, du capteur précédent (ISA1, cf. fig.27). Afin de vérifier que la mesure de la température sur la surface de la tige représente bien la température moyenne d'une section transversale de tige, nous avons comparé les mesures de débit de sève avec les valeurs de transpiration obtenues par pesées.

Le tableau 7 donne les valeurs journalières de la transpiration mesurée par pesée et des débits de sève ds_1 et ds_2 pour 3 journées consécutives. L'essai est réalisé au laboratoire.

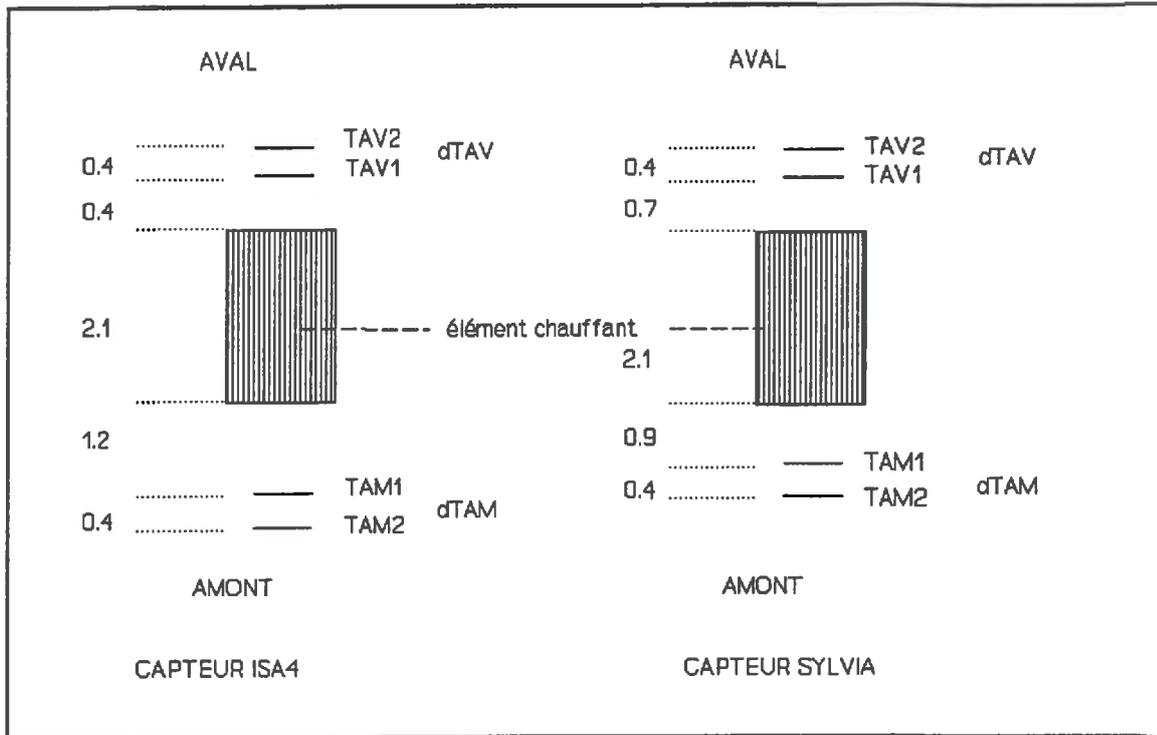
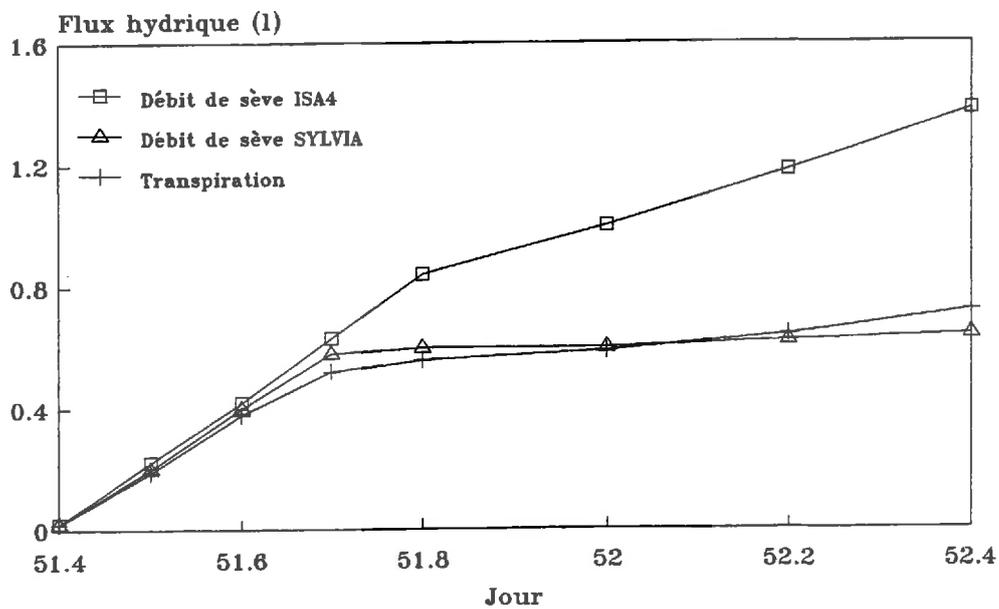


Fig. 29 : Espacement entre les sondes de température et l'élément chauffant dans les capteurs ISA4 et SYLVIA (distances en cm).

Fig. 30 : Valeurs cumulées sur 24 heures des débits de sève mesurés par les capteurs ISA4 et SYLVIA et de la transpiration mesurée par pesées



Tab. 7 : Valeurs journalières de la transpiration mesurée par pesée et des débits de sève ds_1 et ds_2 pour deux espacements des sondes du capteur ISA2. Entre parenthèses sont figurés les déficits par rapport à la transpiration.

Date	Transpiration (l/j)	ds_2 (l/j)	ds_1 (l/j)
19/01	0.215	0.186 (-13 %)	0.149 (-30 %)
20/01	0.230	0.212 (-8 %)	0.184 (-20 %)
21/01	0.165	0.154 (-6 %)	0.127 (-23 %)

Le débit de sève journalier calculé avec les écarts de température dt_{av_2} et dt_{am_2} (position la plus éloignée de l'élément chauffant) estime le mieux la transpiration avec une erreur moyenne par défaut de 9 % sur l'ensemble des 3 jours de mesures. Alors que le débit de sève ds_1 sous-estime la transpiration de 23 % en moyenne sur les 3 jours. Cette erreur peut être due à la proximité de l'élément chauffant.

Toujours dans l'optique de déterminer l'espacement optimal entre les sondes de température et l'élément chauffant du capteur de débit de sève, deux autres capteurs ont été réalisés, appelés respectivement ISA4 et SYLVIA, et montés sur la même tige de maïs. Dans le capteur ISA4, l'espacement entre les sondes de température (T_{av_1} et T_{am_1}) et l'élément chauffant est accentué par rapport au capteur SYLVIA (fig. 29).

Les capteurs sont espacés d'un entre-noeud afin d'éviter des interférences dans les flux de chaleur, le capteur SYLVIA étant placé au dessus du capteur ISA4.

La figure 30 représente les sommes cumulées sur 24 heures des valeurs de débit de sève (ds) et de la transpiration (Tr) mesurées toutes les 20 minutes. Dès le milieu de la journée du jour 51, la courbe ds ISA4 s'écarte de la courbe de transpiration (Tr) pour s'en éloigner de plus en plus au cours du temps. La somme sur 24 heures du débit de sève mesuré par ce capteur surestime de 50 % la quantité d'eau totale transpirée. Tandis que le capteur SYLVIA estime la transpiration avec un déficit de 7 % seulement.

Il en résulte que l'augmentation de l'espacement entre les sondes de température et l'élément chauffant, réalisée sur le capteur ISA4, n'améliore en rien la précision du capteur pour le calcul du débit de sève et au contraire conduit à une surestimation de la transpiration journalière.

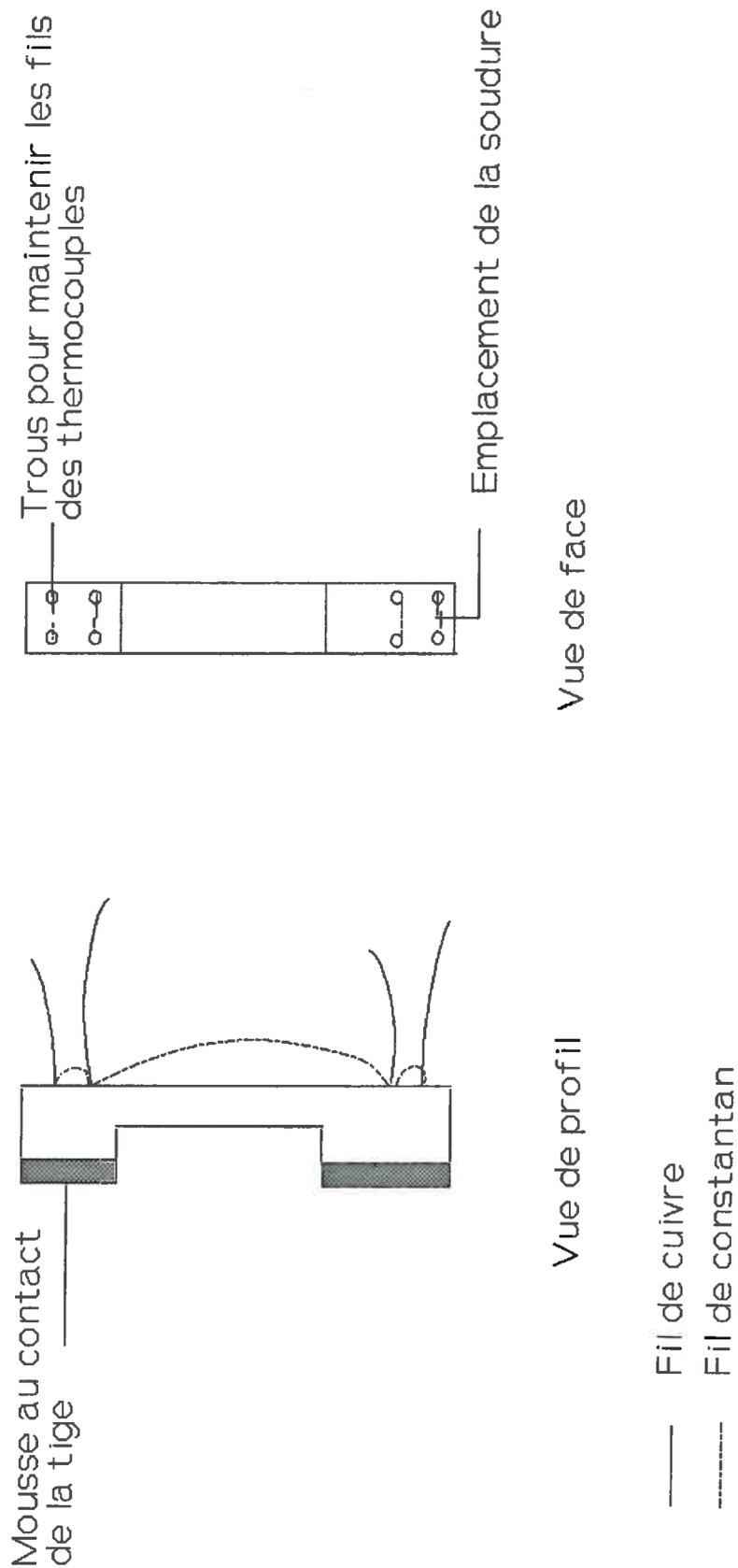


Fig. 31 : Schéma du gabarit maintenant fixe les thermocouples. Les fils de cuivre et de constantan sont soudés ensemble après passage dans les trous.

Ces expériences soulignent l'importance de la localisation des sondes pour déterminer les écarts de température à l'amont et à l'aval de l'élément chauffant pour la précision dans l'estimation de la transpiration, le gradient de température n'étant pas homogène le long de la tige de part et d'autre de l'élément chauffant.

Pour les capteurs que nous avons utilisés à Bambey, nous avons donc choisi les distances respectives de 0.7 et 0.9 cm pour placer les sondes T_{av} et T_{am} de part et d'autre de l'élément chauffant.

1-2- Modification du support des thermocouples

Suite aux tests décrits précédemment, des gabarits en PVC ont été réalisés, au laboratoire de bioclimatologie de l'INRA de Bordeaux, pour maintenir à la surface de la tige et à une distance déterminée de l'élément chauffant, les thermocouples mesurant les écarts de température dt_{am} et dt_{av} .

Une série de capteurs de débit de sève ont été réalisés à Bambey selon le diamètre des tiges de mil à équiper avec ce gabarit. Ces capteurs ont été utilisés pendant la première année d'expérimentations.

Une analyse des données mesurées par les capteurs installés au champ puis l'examen des capteurs au démontage, attirent l'attention sur quelques problèmes :

- beaucoup de sondes de température ne sont plus à leur position optimale après la pose des capteurs ; cela est particulièrement grave pour l'évaluation de l'échauffement de la sève qui peut être très critique à faible débit de sève, particulièrement la nuit.
- le contact entre le capteur et la tige est souvent lâche ; cela peut provoquer des défauts plus ou moins graves dans les échanges de chaleur et donc fausser l'évaluation du débit de sève.

Pour résoudre ces problèmes, un autre type de gabarit a été conçu à la station de bioclimatologie de Bordeaux : chaque soudure est alors maintenue fixe sur le gabarit et ne peut glisser ou se tordre le long de la tige lors de l'installation du capteur (fig. 31).

De nouveaux capteurs ont donc été réalisés pour la deuxième année d'expérimentation avec ces nouveaux gabarits. Par ailleurs, le contact entre la tige et le capteur a été amélioré en renforçant la fixation du capteur autour de la tige. En outre, la pose des capteurs est faite de préférence aux heures les plus chaudes où la contraction de la tige est maximale.

2- Précision de la méthode

La précision de la mesure du débit de sève est évaluée par comparaison avec la transpiration mesurée par pesées.

Fig. 32 : Evolution horaire de la transpiration et du débit de sève mesuré sous la serre par le capteur ISA2

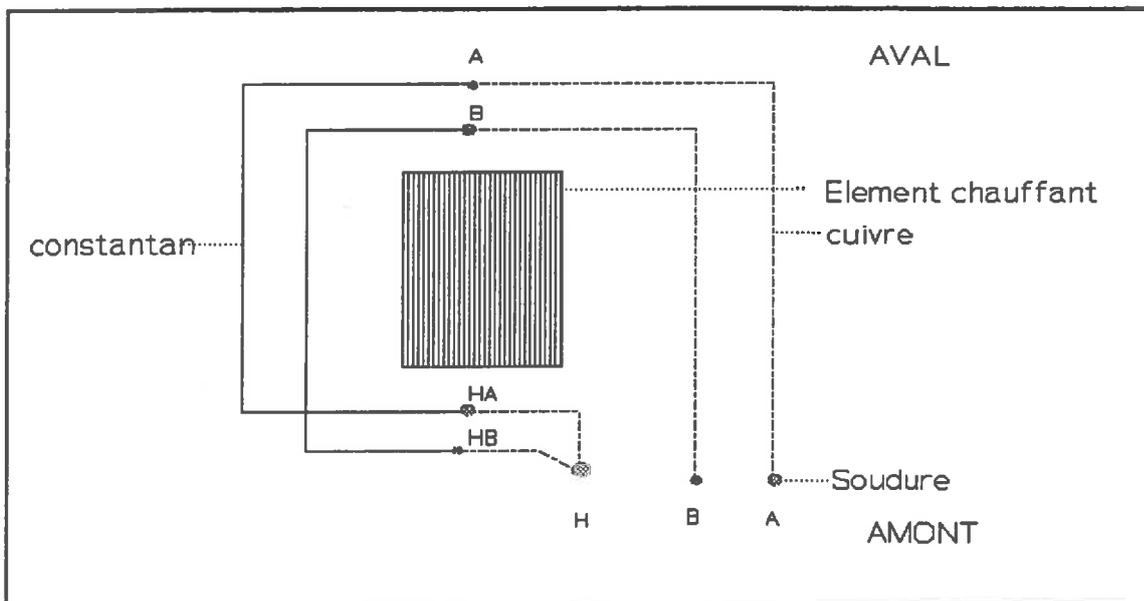
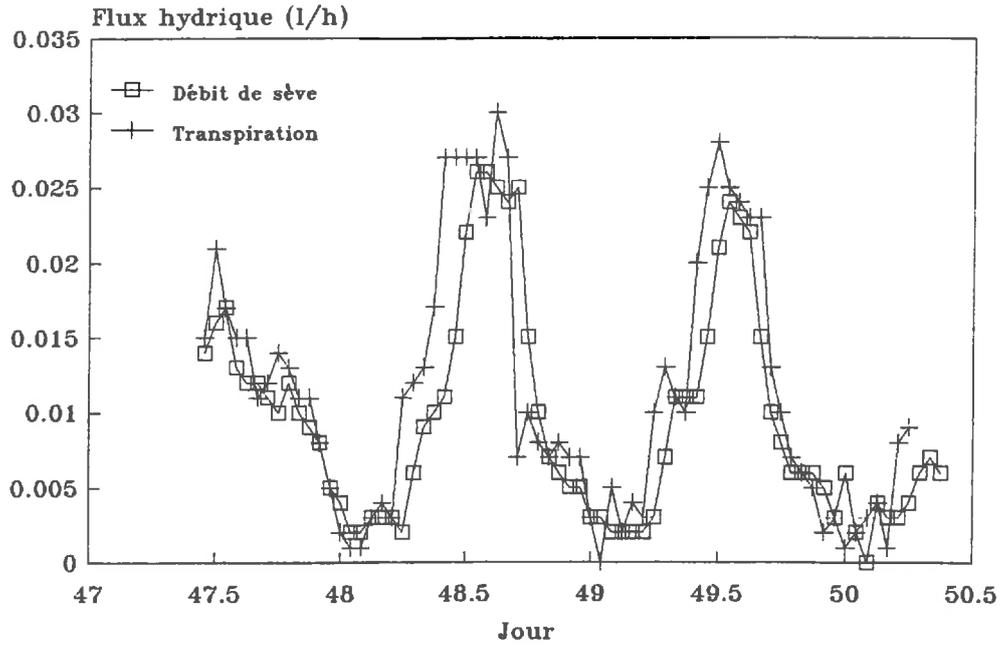


Fig. 33 : Montage thermoélectrique du capteur Dynamax.

2-1- Serre

Le capteur ISA2 (cf. fig. 27) a été testé sur un pied de maïs placé dans la serre, donc dans des conditions de température et d'éclairement différentes du laboratoire. La figure 32 donne les courbes de transpiration mesurée par pesée et de débit de sève calculé à l'échelle horaire.

Le maximum de transpiration pour le jour 48 atteint 0.03 l/h. Pour ce même jour, la courbe de débit de sève est décalée dans le temps par rapport à la transpiration mais ce phénomène s'estompe les jours suivants. Le débit de sève sous-estime la transpiration en début de matinée du jour 48 et toute la durée du jour 49.

En valeur journalière (cumul sur 24 heures), le déficit est de 13 % pour le jour 48 et de 18.5 % pour le jour 49. Ces résultats sont donc moins bons que ceux enregistrés au laboratoire (cf. Tab. 7).

Il est difficile d'interpréter cette perte de précision du capteur si ce n'est par un léger déplacement des sondes comme nous l'avons observé par la suite au champ à Bambey. Les facteurs extérieurs (température ambiante, degré d'humidité) peuvent influencer sur la précision du capteur bien qu'il soit isolé thermiquement du milieu extérieur, aussi bien au laboratoire qu'en serre, par un film plastique aluminisé.

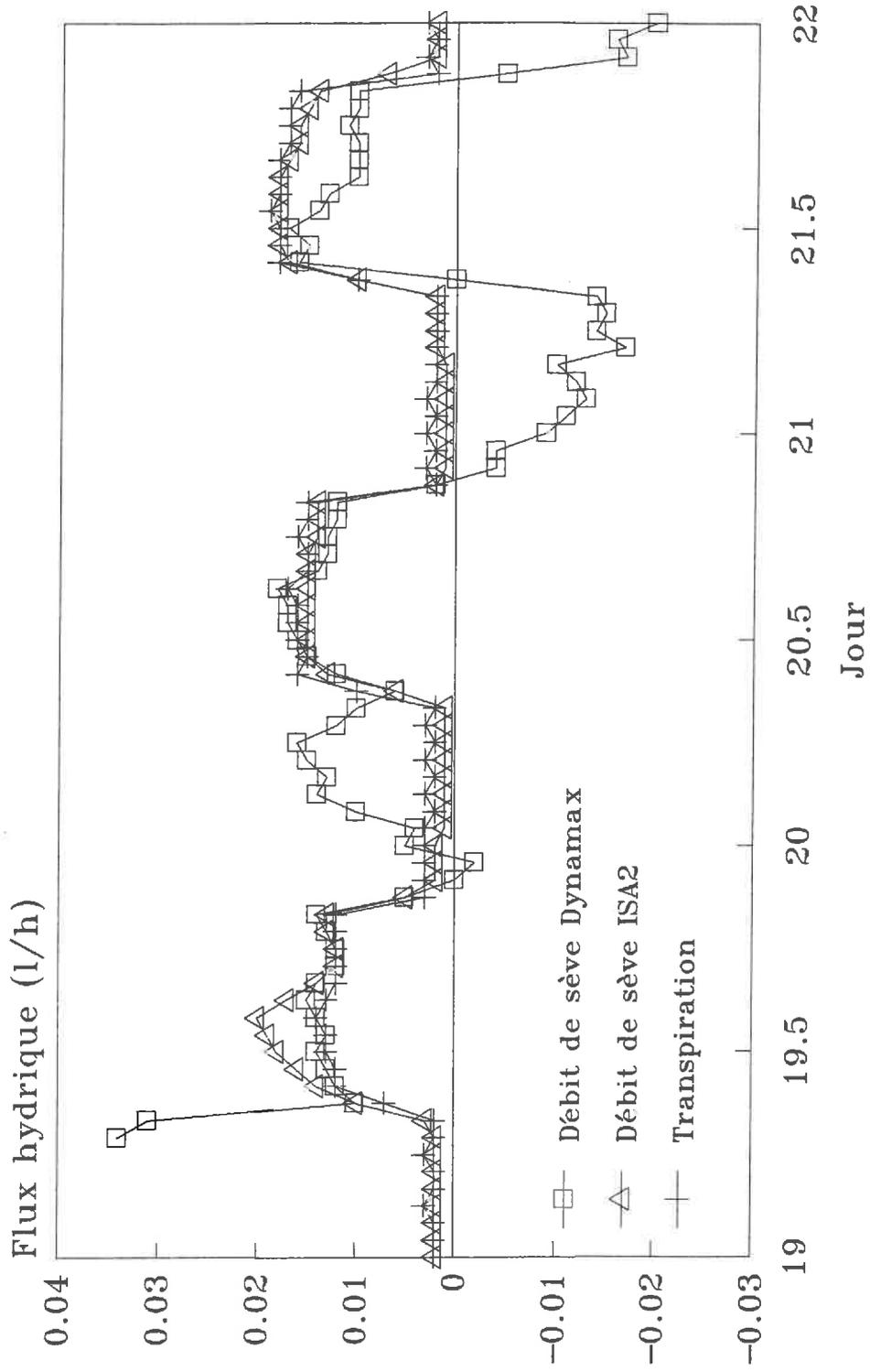
2-2- Laboratoire

C'est au laboratoire que nous obtenons les meilleurs résultats avec un débit de sève journalier estimant la transpiration avec un déficit de 7 % seulement (capteur SYLVIA, fig. 30).

Au cours de la mise au point des capteurs de débit de sève pour les tiges herbacées, nous avons reçu un capteur de fabrication américaine, Dynamax (STEINBERG et al., 1989) mis au point par BAKER et van BAVEL (1987). Le principe de la mesure du débit de sève par le capteur Dynamax est sensiblement le même que par nos capteurs (méthode du bilan de chaleur).

La différence essentielle réside dans le montage thermoélectrique (fig. 33) qui supprime une mesure en mesurant la somme des deux signaux ($dt_{am} + dt_{av}$). Dans la pratique, ce dispositif permet d'économiser un canal sur la centrale de mesure. Ce système ne mesure pas la température dans la zone chauffée ce qui peut présenter certains inconvénients tels que l'absence du terme de stockage Q_{av} dans le calcul du bilan de chaleur. De plus, il ne peut y avoir de contrôle des conditions d'utilisation du capteur, à savoir une optimisation de la valeur de la puissance produite par l'élément chauffant, c'est-à-dire chauffer le plus possible pour améliorer la précision, tout en évitant un chauffage excessif qui perturberait la plante.

Fig. 34 : Evolution horaire de la transpiration et des débits de sève mesurés par les capteurs ISA2 et Dynamax montés sur la même tige de maïs



$$\begin{aligned} \text{Ainsi } A-H &= dt + dt_{av} \\ B-H &= dt_{am} + dt \end{aligned}$$

ce qui permet de déterminer :

- $(A-H) + (B-H) = 2 [dt + (dt_{am} + dt_{av})/2]$ qui correspond à l'échauffement pris dans le calcul du flux de chaleur convectif.

- $(A-H) - (B-H) = dt_{av} - dt_{am}$ correspondant à la perte de chaleur axiale par conduction et permettant de calculer le flux de chaleur convectif :

$$Q = -K_{bois} \times (dt_{av} - dt_{am}) \times S_{bois} \quad (\text{soit } Q = Q_{av} - Q_{am})$$

où K_{bois} : coefficient de conductivité thermique de la tige (= 0.6 Watt.m⁻¹.°C⁻¹)
 S_{bois} : aire de la section transversale de la tige.

Il nous a paru intéressant de comparer les résultats de ce capteur Dynamax et ceux d'un de nos capteurs (ISA2), montés sur le même pied de maïs, espacés par un entre-noeud afin d'éviter toute interférence entre les flux de chaleur des deux capteurs.

La figure 34 donne les débits de sève horaires, ds_2 et ds dynamax, calculés par ces deux capteurs ainsi que la transpiration (Tr) mesurée par pesée, pour 3 jours consécutifs.

L'évolution de ds_2 suit bien la courbe de transpiration alors que le capteur Dynamax donne un débit de sève "fantaisiste", important dans la nuit du jour 20 au jour 21. Ce problème vient de valeur de dT très faible pendant la nuit que nous évitons dans notre capteur par un montage dissymétrique des sondes de température amont et aval. On note cependant une bonne corrélation avec la transpiration pour les journées 19 et 20.

Il est à signaler que ce capteur est de plus en plus utilisé, notamment sur la canne à sucre à la Réunion et donne satisfaction, mais la validité des mesures de débit de sève n'a pas été contrôlée par des pesées à l'échelle horaire ou journalière.

Il est intéressant de retenir les caractéristiques techniques de ce capteur :

- mesure de deux écarts seulement de température économisant un canal sur la centrale de mesure

- l'élément chauffant est un circuit imprimé, moins fragile que notre montage avec 9 soudures.

- enfin, tous les fils du capteur devant être reliés à la centrale de mesure, sont assemblés dans une prise multibroches, facilitant le montage et le démontage du capteur pour une utilisation prolongée.

Ces caractéristiques sont à l'étude pour nos capteurs mais n'ont pas été testées dans le cadre de cette thèse.

Fig. 35 : Evolution du coefficient Klat
mesuré pour le capteur ISA2

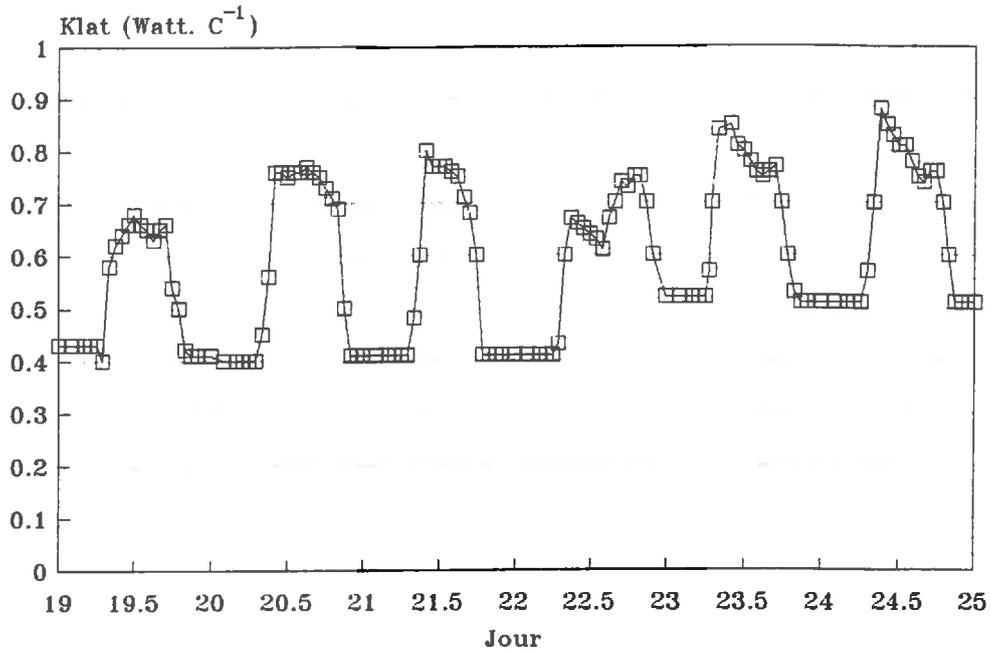
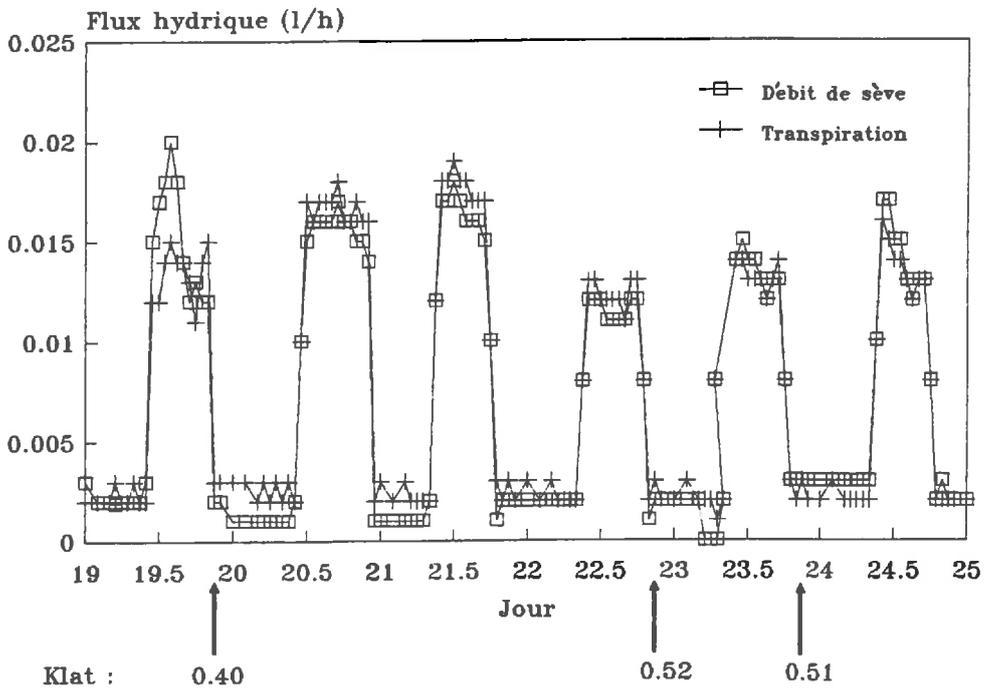


Fig. 36 : Ajustement du coefficient Klat
pour le calcul du débit de sève.



2-3- Problème rencontré : dérive du K_{lat}

Nous avons vu dans le paragraphe 1-1 que le capteur ISA2 donnait des valeurs de débit de sève de plus en plus proches de celle de la transpiration (cf. Tab. 7).

Parallèlement au cours de cette période (du 19/01 au 25/01), nous avons étudié l'évolution du coefficient de conduction du fluxmètre, K_{lat} (fig. 35). Ce coefficient permet de mesurer le flux de chaleur latéral selon la relation :

$$Q_{lat} = - K_{lat} \times dt_{lat}$$

Rappelons que le coefficient K_{lat} est choisi parmi les valeurs minimales de la quantité X observées sur plusieurs nuits consécutives :

$$X = \{-[W - (Q_{av} - Q_{am}) - Q_{sto.}] / dt_{lat}\}$$

- où
- W : puissance fournie au capteur
 - Q_{av} et Q_{am} : flux de chaleur conductifs aval et amont
 - $Q_{sto.}$: flux de chaleur stockée dans le volume délimité par le capteur.

C.VALANCOGNE justifie cette formule d'après le bilan de chaleur :

$$Q_{lat} = [W - (Q_{av} - Q_{am}) - Q_{sto.}] - Q_{sève}$$

$$\text{et } K_{lat} = - Q_{lat} / dt_{lat}$$

La quantité $(Q_{av}-Q_{am})$ est maximum à débit de sève nul donc $[W - (Q_{av} - Q_{am}) - Q_{sto.}]$ est alors minimum, alors que dt_{lat} qui intervient au dénominateur pour le calcul de K_{lat} est maximum.

Sur la figure 35, on observe que la valeur minimale calculée de K_{lat} n'est pas stable au-delà de 4 nuits consécutives, cette valeur augmente les jours suivants. De façon générale, on constate une instabilité du minimum de K_{lat} calculé sur plusieurs capteurs et sur une période d'utilisation de une à deux semaines.

On est donc amené à ajuster cette valeur au cours du temps pour le calcul du débit de sève (fig. 36). De cette façon seulement, le débit de sève estime correctement la transpiration mesurée par pesées.

2-4- Discussion

Les variations du minimum de K_{lat} peuvent avoir plusieurs causes possibles : le terme $Q_{sto.}$, estimé d'une manière approchée, peut être à l'origine d'une certaine variabilité de K_{lat} .

calculé. Si Q_{no} est élevé ou varie rapidement, cela peut engendrer une erreur sensible sur le calcul de K_{lat} . De plus, si les plantes subissent une sécheresse prononcée, les tissus de la plante se dessèchent et alors les conductivités thermiques amont et aval de la tige diminuent. En cas de sécheresse trop accentuée, la tige se rétracte entraînant un mauvais contact entre la tige et l'élément chauffant ce qui provoque aussi une variation de K_{lat} .

Un premier programme de calcul du coefficient K_{lat} donnait un fichier de valeurs calculées pour la nuit et au levée du jour parmi lesquelles on choisit la valeur minimale. Par la suite, ce programme a été modifié pour donner toutes les valeurs horaires du K_{lat} , la valeur la plus faible n'étant pas forcément pour la période nocturne, surtout dans les conditions de Bambey lors des stress hydriques.

Le même problème quant au choix de la valeur de K_{lat} , s'est rencontré dans l'utilisation des capteurs Dynamax sur la canne à sucre à la Réunion. Pour ce capteur, des problèmes d'isolement électrique sont aussi à l'origine des fluctuations du minimum de K_{lat} , la mousse isolante pouvant prendre plus de 20 % d'humidité.

CHAPITRE 3 : VALIDATION DE LA METHODE DE MESURE DU DEBIT DE SEVE BRUTE SUR LE MIL

Après les tests réalisés à Bordeaux sur du maïs, on a vérifié que les capteurs de débit de sève fonctionnaient bien sur le mil. Pour cela des expériences ont été menées en pot avec contrôle de la transpiration par pesées. D'autre part au champ, la mesure du débit de sève brute a été comparée avec les valeurs d'évapotranspiration obtenues par bilan hydrique à partir des mesures d'humidité volumique du sol.

1- En pot : comparaison avec les pesées

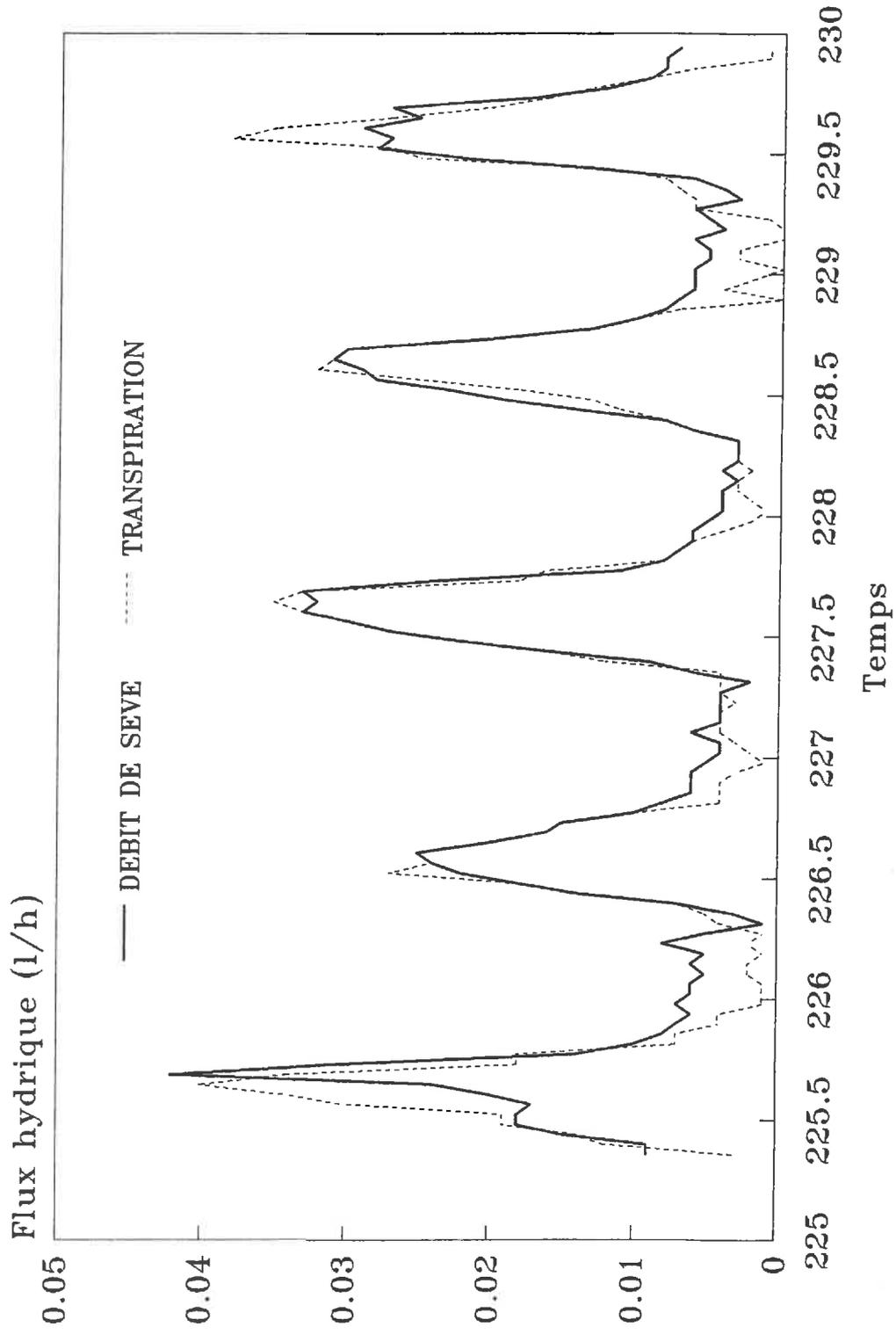
Les premiers capteurs réalisés à Bambey ont été testés sur du mil cultivé en pot et placé sur une balance électronique. Ne disposant pas de système d'enregistrement automatique des pesées, les relevés ont été faits manuellement toutes les heures (jour et nuit), ce qui limite dans le temps ce type d'expérimentation.

Plusieurs problèmes d'ordre technique ont entravé cette première étude au Sénégal.

1-1- Problèmes rencontrés

- Un des premiers problèmes rencontrés provient de la culture du mil en pot : les premières plantes cultivées sont étiolées et ne présentent pas de talles ou alors des talles très peu développées ne permettant pas toujours la pose d'un capteur de débit de sève. Nous

Fig. 37 : Evolution horaire du débit de sève et de la transpiration mesurés sur du mil



avons par la suite amélioré les conditions de culture (démariage plus précoce, meilleure exposition) favorisant un meilleur développement des plantes.

- Alors qu'à Bordeaux, nous n'avons jamais eu d'incident avec le boîtier d'alimentation des capteurs de débit de sève, les régulateurs de tension se sont montrés peu fiables dans les conditions de Bambey, claquant souvent ou entraînant parfois le surchauffage des plantes (jusqu'à 80°C !).

- Les mesures de transpiration par pesées se sont avérées délicates d'une part, par la présence de vent et d'autre part par les nombreuses coupures d'électricité nécessitant une remise à zéro de la balance et donc un déplacement du pot modifiant la position de la bulle, indiquant l'horizontale, difficile à régler. Pour ces raisons, les courbes de transpiration présentant parfois des valeurs aberrantes ont été lissées.

1-2- Echelle horaire

La figure 37 donne l'évolution horaire du débit de sève et de la transpiration mesurée par pesée : on observe une évolution parallèle des courbes, mise à part le jour 225 où le débit de sève est légèrement décalé dans le temps par rapport à la transpiration, le pic maximum se produisant plus tard.

Pour les quatre derniers jours observés, les débits de sève sont bien en phase avec la transpiration. Les pics horaires de transpiration sont supérieurs à ceux du débit de sève, surtout pour le jour 229. Ces écarts peuvent être dûs aux erreurs faites sur les mesures de transpiration, mentionnées précédemment.

Les différences essentielles entre les courbes de débit de sève et de transpiration s'observent la nuit : alors que la transpiration s'annule, il persiste un faible débit de sève nocturne, de l'ordre de 0.01 l/h.

1-3- Echelle journalière

Les valeurs cumulées sur 24 heures du débit de sève et de la transpiration sont données dans le tableau 8.

Tab. 8 : Valeurs journalières de la transpiration mesurée par pesée et du débit de sève ds. Entre parenthèses sont figurés les déficits par rapport à la transpiration.

Jour julien	Transpiration (l/j)	Débit de sève (l/j)
225	0.264	0.255 (- 3 %)
226	0.211	0.247 (+ 17 %)
227	0.301	0.307 (+ 2 %)
228	0.250	0.286 (+ 14 %)
229	0.264	0.282 (+ 7 %)

Sur l'ensemble des cinq journées, le débit de sève surestime en moyenne la transpiration de 7 % : cet écart est essentiellement dû aux valeurs nocturnes (cf. fig. 37).

Ces résultats sont aussi bons que ceux obtenus sur du maïs au laboratoire.

1-4- Discussion

Si la technique de la mesure du débit de sève sur le mil dans les conditions de Bambej donne entière satisfaction sur des plantes bien irriguées (cf. paragraphe précédent), certaines difficultés sont apparues lors de l'application d'un stress hydrique associée aux températures élevées rencontrées en milieu de journée :

- Lors de la contrainte hydrique, la température interne (T_{int}) de la plante s'élève et peut dépasser fréquemment 55°C en milieu de journée. Pour éviter les risques de surchauffe subis par la plante (dessèchement précoce de la tige), on est amené, au cours des expérimentations, à diminuer la tension fournie à l'élément chauffant tout en respectant une tension d'alimentation minimum nécessaire pour engendrer des flux de chaleur suffisamment élevés pour la précision du calcul de débit de sève.

Pour répondre à ce problème, Valancogne (à paraître) utilise depuis peu, une puissance de chauffage ajustée. Le système d'acquisition de données commande deux niveaux

de chauffage selon la température mesurée sur la tige : un niveau minimum est obligatoirement imposé si la température de la tige atteint un seuil que l'on a choisi (45° C, par exemple). Cela évite des surchauffes la nuit, mais surtout le jour sur des plantes subissant un stress hydrique. Par contre, lorsque le débit de sève est moyen ou élevé, une puissance de 2 à 4 fois le niveau de base, est fournie pour avoir une meilleure précision.

- lors d'un stress hydrique prononcé, on observe une forte variation du K_{st} pour les différentes raisons exposées précédemment : les valeurs ont été ajustées chaque jour. La valeur minimale choisie pour le K_{st} ne correspond pas forcément aux heures de la nuit, mais plutôt en milieu de journée où le débit de sève s'annule. Le K_{st} ayant une forte influence sur les valeurs faibles de débit de sève, nous avons parfois observé des valeurs aberrantes de débit de sève lors d'une forte contrainte hydrique, notamment un débit de sève élevé la nuit et négatif le jour. Les valeurs aberrantes du débit de sève la nuit ont été corrigées selon l'hypothèse d'un flux nocturne presque nul, que l'on observe sur des plantes bien alimentées en eau (fig. 36 et fig. 37).

- Il apparaît que la méthode n'est pas adaptée pour mesurer la transpiration des plantes subissant un déficit hydrique prononcé et surtout rapide (en 24 h). La méthode est peu précise pour les faibles transpirations car trop dépendante de la valeur du coefficient K_{st} qui ne peut être déterminée, dans ce cas, avec assez de précision.

2- Au champ : comparaison avec le bilan hydrique

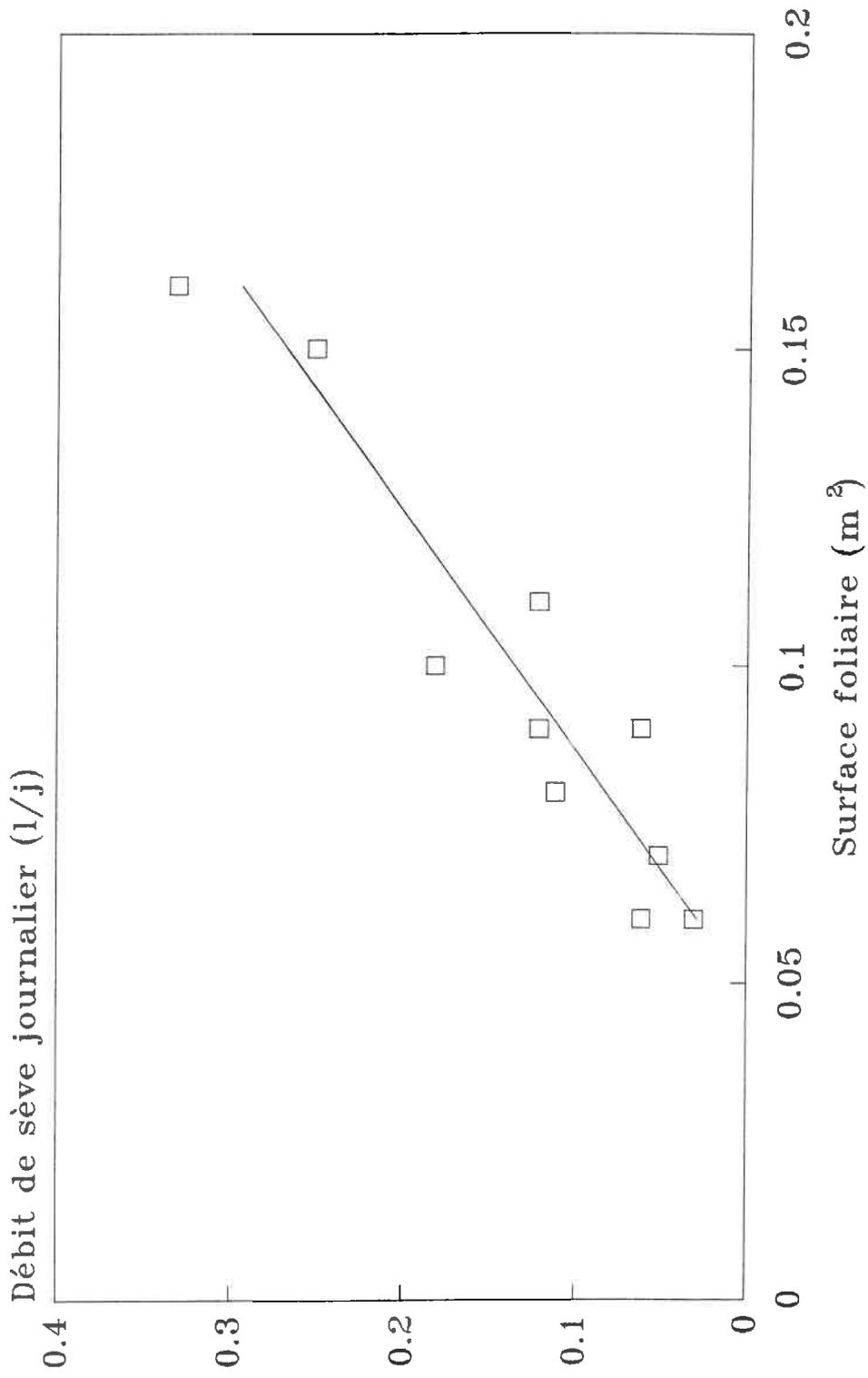
Le but de cette expérience est de comparer les valeurs de débit de sève mesurées sur une tige puis extrapolées à la parcelle avec l'ETR d'une parcelle de mil, calculée par bilan hydrique à partir des précipitations et de l'humidité volumique du sol.

2-1- Dispositif

Nous avons travaillé sur deux parcelles de mil, situées sur un essai longue durée qui a fait l'objet d'une rotation annuelle mil-arachide. Les deux parcelles ont reçu 25 % de la fumure minérale vulgarisée par l'ISRA, la FMV pour le mil étant de 150 Kg/ha d'engrais tertiaire 10-21-21 (N-P-K). Sur une des deux parcelles, le sol est restauré par apport de compost organique à raison de 3 T de MS/ha chaque année. Le régime hydrique est strictement pluvial.

Pour chaque parcelle, six capteurs de débit de sève sont installés sur les plantes entourant le tube d'accès de la sonde à neutrons.

Fig. 38: Relation entre le débit de sève d'une tige
équipée d'un capteur et sa surface foliaire
à 50 JAL au champ.



2-2- Résultats

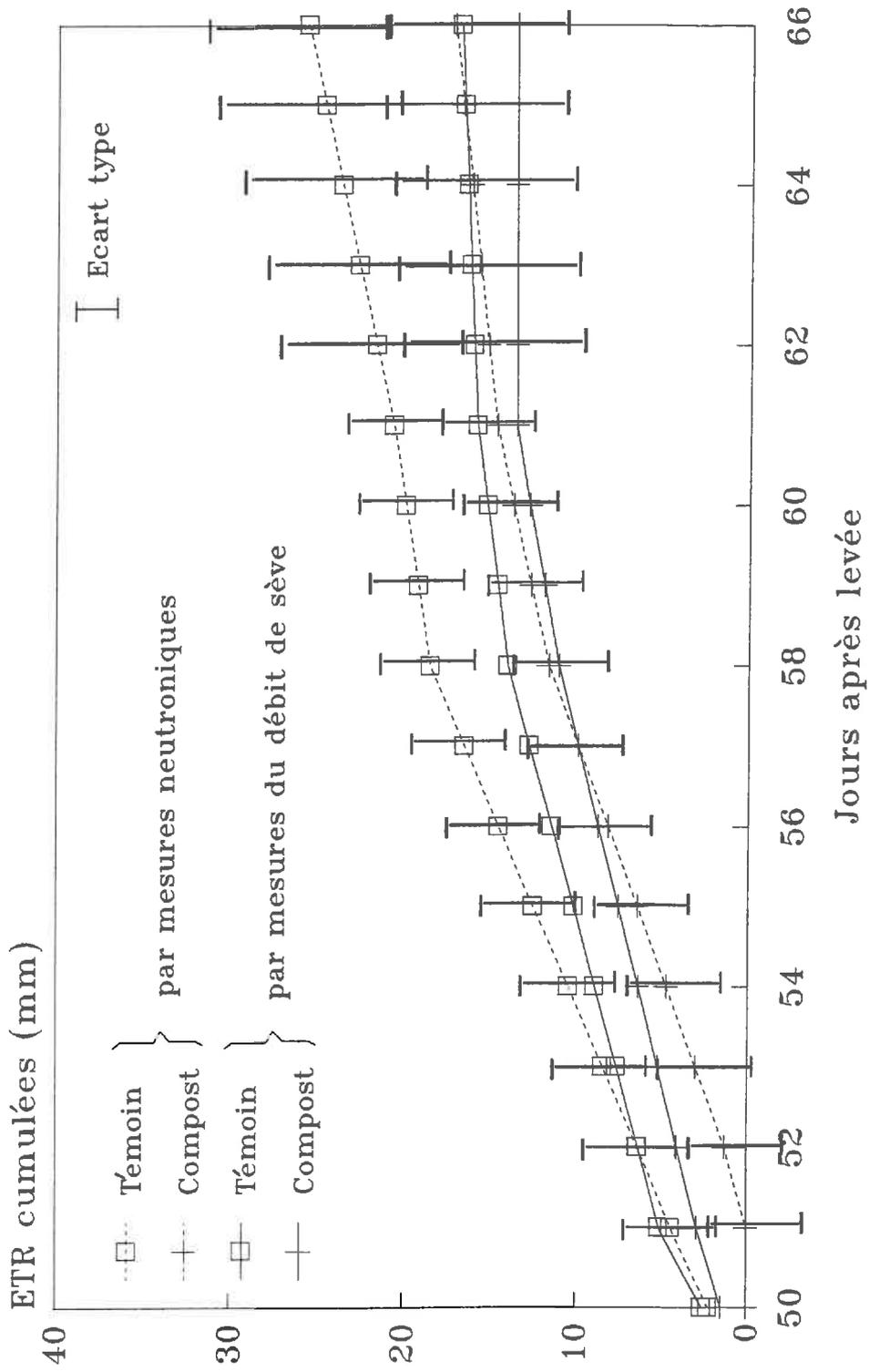
Afin d'extrapoler les mesures de débit de sève de la tige à la parcelle, nous avons étudié la relation entre les débits de sève (ds) et les surfaces foliaires (SF) des tiges équipées de capteur, pour chaque jour. La relation obtenue est du type $ds = a_j SF + b_j$, avec a_j dépendant de la demande climatique du jour j . La figure 38 montre la relation obtenue pour le 50^{ème} jour. Les valeurs des coefficients a et b , obtenus pour chaque jour, sont données dans le tableau 9 ainsi que les coefficients de corrélation R^2 . Sur l'ensemble des jours observés, les coefficients b étant très faibles, on peut les considérer égales à 0. La relation entre le débit de sève et la surface foliaire est proportionnelle. Elle nous permet de normaliser le débit de sève par la surface foliaire pour appréhender la consommation hydrique à l'échelle de la parcelle.

Tab. 9 : Valeurs des coefficients a_j , b_j et du coefficient de corrélation R^2 de la relation entre les débits de sèves et les surfaces foliaires, obtenue pour chaque jour j .

Jour après levée	a_j	b_j	R^2
50	2.65	-0.13	0.86
51	2.01	-0.04	0.65
52	1.73	-0.06	0.70
53	1.35	-0.06	0.81
54	1.13	-0.03	0.61
55	1.40	-0.04	0.70
56	1.02	-0.01	0.48
57	1.25	-0.01	0.55
58	1.55	-0.04	0.77
59	2.16	-0.08	0.72
60	1.98	-0.08	0.77
61	1.94	-0.09	0.90
62	2.08	-0.13	0.90
63	2.25	-0.08	0.98
64	1.07	-0.04	0.99
65	1.12	-0.04	0.99
66	1.50	-0.05	0.98

Les débits de sève mesurés sur les tiges sont alors divisés par la surface foliaire des tiges (feuilles + gaine de la tige) puis la moyenne du débit de sève par m^2 de surface foliaire pour chaque parcelle est multipliée par l'indice de surface foliaire de la parcelle. Les débits

Fig.39: Comparaison entre l'ETR calculée à partir des mesures neutroniques et à partir des mesures du débit de sève moyen sur les parcelles Témoin et Compost



de sève moyens sont donc exprimés en mm/jour et comparés à l'évapotranspiration calculée par bilan hydrique.

La figure 39 montre les résultats obtenus pour une quinzaine de jours à partir du 5 octobre, date à laquelle on a posé les capteurs de débit de sève. Les plantes sont âgées de 50 à 66 jours. Afin d'établir la comparaison entre les deux méthodes de mesure, nous avons calculé la moyenne journalière du débit de sève de chaque parcelle, sur les mêmes périodes où ont été calculées les valeurs d'ETR par le bilan hydrique. Les résultats sont présentés en valeurs cumulées sur toute la période considérée.

Les mesures de débit de sève et d'ETR par le bilan hydrique concordent pour indiquer une transpiration supérieure de la parcelle Témoin par rapport à celle de la parcelle Compost. Les écarts entre les consommations d'eau dans les deux parcelles sont plus faibles quand ces consommations sont mesurées par les débits de sève.

Pour les deux parcelles, on observe un écart de plus en plus grand entre les valeurs de débit de sève et les valeurs d'ETR, indiquant une augmentation dans le temps de la composante évaporation, non prise en compte par le débit de sève, qui s'explique par une baisse de l'indice foliaire sur les deux parcelles suite à un dessèchement des feuilles. Cet écart peut aussi être dû au cumul des valeurs augmentant ainsi les erreurs notamment dans le calcul du bilan hydrique sur une courte période.

De façon générale, les résultats indiquent que les mesures de débit de sève, ramenées à l'échelle de la parcelle, sont cohérentes avec les résultats que l'on peut obtenir par des méthodes classiques de mesure de la consommation d'eau au champ.

L'effet de l'apport de compost sur la consommation hydrique du mil au cours du temps sera étudié ultérieurement dans la troisième partie (Ch. 2).

2-3- Discussion

Afin de réaliser cette étude comparative, nous avons choisi les plantes situées autour des tubes d'accès des sondes à neutrons. Or ces plantes ne sont pas toujours représentatives de la surface foliaire et du diamètre des tiges de mil au sein de la parcelle, notamment sur celle ayant reçu du compost. Ceci peut poser un problème pour extrapoler nos mesures de débit de sève à l'échelle de la parcelle.

Cependant, nous obtenons une relation de proportionnalité entre le débit de sève et la surface foliaire (Tab. 9). Cette relation nous permet alors de considérer que notre échantillonnage des plantes n'a pas d'influence sur les résultats concernant la consommation hydrique à l'échelle de la parcelle.

Si l'application de la technique de mesure du débit de sève pour l'étude du mil se révèle satisfaisante, elle fait ressortir une limite quand à l'étude du fonctionnement hydrique des plantes herbacées : en effet, malgré un effort de miniaturisation du capteur, on est

contraint de respecter un diamètre minimum de la tige de mil pour la pose des capteurs de débit de sève. Ce diamètre minimum est de l'ordre de 8 mm et correspond en moyenne à une plante au *stade floraison*. L'étude de la consommation hydrique d'une culture de mil est donc exclue dans les premiers stades de développement par cette technique. Cependant, une miniaturisation supplémentaire du capteur qui est le facteur limitant dans cette étude, est envisageable. Un circuit imprimé pour réaliser l'élément chauffant semblait pouvoir résoudre ce problème, mais son utilisation n'a pas donné entière satisfaction du fait de sa trop grande rigidité empêchant de bons contacts thermiques. L'utilisation d'un ruban mince de caoutchouc semblerait être la solution (VALANCOGNE, comm. pers.). Une amélioration technique pour réduire la fragilité du système, essentiellement des thermocouples du fluxmètre thermique, serait encore nécessaire.

3- Conclusion

Après l'adaptation du capteur pour la mesure du débit de sève brute sur tige herbacée en France, les mesures ont été validées sur du mil au Sénégal :

- les débits de sève horaires sont en phase avec les courbes de transpiration avec cependant une moins bonne précision la nuit. Les valeurs cumulées sur la journée estiment la transpiration journalière de la plante avec un écart moyen de 6 %, ce qui est aussi bon que les résultats obtenus sur du maïs à Bordeaux, malgré les moins bonnes conditions d'utilisation des appareils de mesure (balance électronique).

- la méthode a été comparée avec le calcul de l'ETR par bilan hydrique et malgré l'erreur sur les mesures neutroniques à un faible pas de temps (de 5 à 10 mm environ), il n'y a pas de disproportion en ce qui concerne la comparaison des deux méthodes. Les résultats sont compatibles et permettent d'évaluer la composante évaporation du sol au cours du temps. Celle-ci augmente en parallèle avec une baisse de l'indice foliaire de la culture.

L'échantillonnage est facilité par une relation de proportionnalité entre les débits de sève et la surface foliaire des tiges équipées de capteur. Cette relation permet d'extrapoler les mesures effectuées sur quelques tiges à l'échelle de la parcelle.

Cependant, le mil est une plante qui talle fortement. Les talles sont reconnues pour avoir un rôle compensateur dans la production de grains, il y a ajustement de la population de talles suite à des conditions hydriques défavorables. On peut alors se demander si les talles ne bénéficient pas d'une alimentation hydrique privilégiée par rapport au brin-maître qui se traduirait par une consommation hydrique différente en condition d'offre en eau limitante. Au quel cas, lors de l'échantillonnage pour l'installation des capteurs, nous devons tenir compte de la position de la tige, talle ou brin-maître. Ce point sera étudié dans la troisième partie consacrée à l'étude du fonctionnement hydrique du mil.

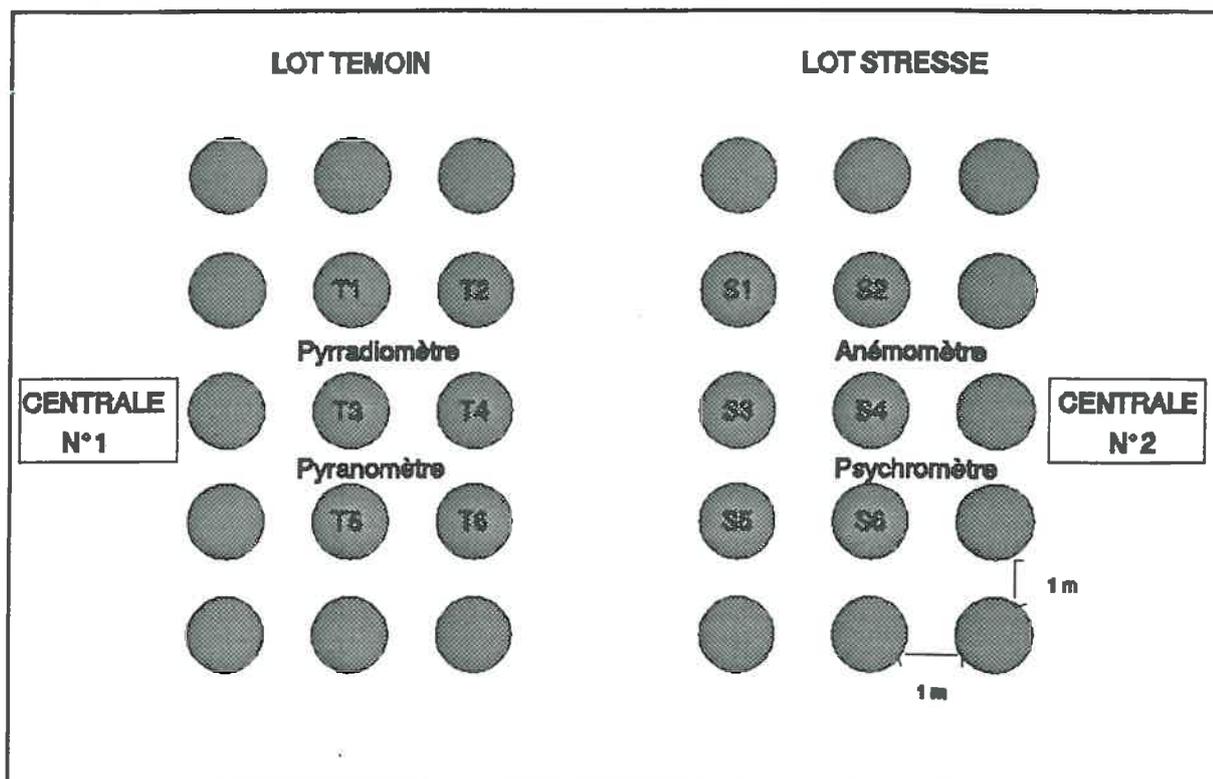


Fig. 40 : Schéma du dispositif pour l'étude d'une contrainte hydrique en pot

Fig. 41 : Calendrier d'arrosage et des mesures physiologiques

TRE : Teneur relative en eau
 CS : Conductance stomatique
 PF : Potentiel hydrique foliaire
 SF : Surface foliaire

	TRE	CS	CS	PF	PF	TRE	CS	CS	PF	PF	TRE	TRE	CS	CS	PF	PF	TRE	CS	CS	PF	PF	SF						
2l	_____												_____															
1l						_____																						
0.5l											_____																	
Jours	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203								

3EME PARTIE : FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DU MIL ET CONSEQUENCES DE LA DEGRADATION DES SOLS

Avant d'étudier l'effet des sols dégradés sur l'alimentation hydrique du mil dans différents milieux de culture, au champ (chap. 2) et en pot (chap. 3), en condition d'offre en eau limitante ou non et de déterminer l'impact de la correction du sol sur les facteurs de l'offre et sur les facteurs de la demande, nous allons dans un premier temps, caractériser le fonctionnement hydrique de la plante soumise à un déficit hydrique. Cette étude, présentée dans le premier chapitre, devrait nous permettre par la suite de mieux identifier les modifications, au niveau de la plante, induites par la dégradation des sols et les interactions avec les effets propres à une sécheresse édaphique.

CHAPITRE 1 : ETUDE D'UNE CONTRAINTE HYDRIQUE EN POT

1- Introduction

Le but de cette série d'expériences est de tester la possibilité de détecter l'apparition d'une contrainte hydrique sur le débit de sève par l'application d'un stress contrôlé dans son intensité et sa durée, et de caractériser la réponse de la plante par rapport à son architecture (talles et brin-maître, surface foliaire et masse racinaire) et par rapport à l'évolution de quelques paramètres physiologiques au cours du temps. Nous examinerons aussi les capacités de récupération de la plante après la contrainte hydrique par l'étude des dynamiques horaires du débit de sève.

2- Dispositif

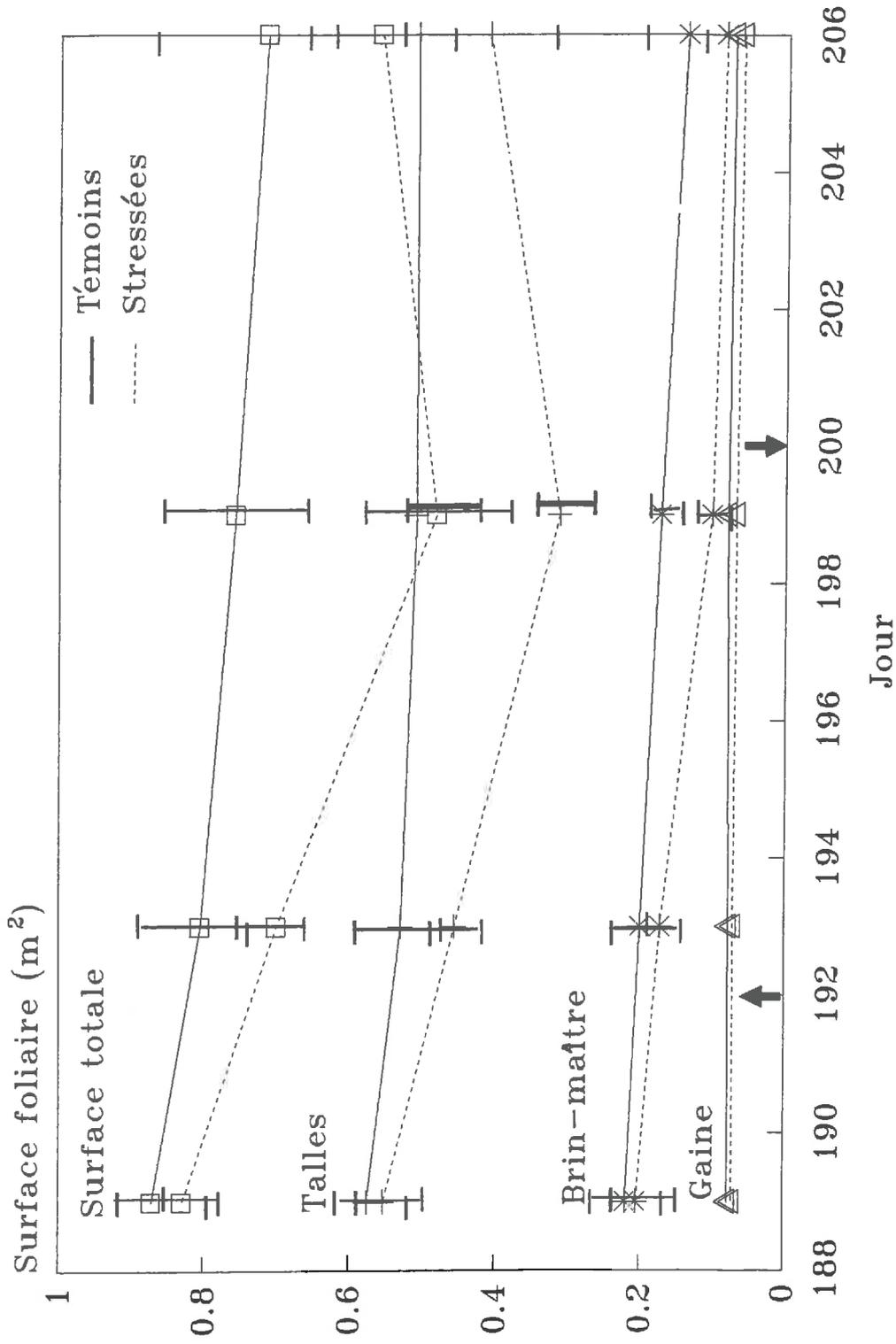
Les plantes sont cultivées dans des pots de 15 litres contenant un sol sableux prélevé dans une parcelle expérimentale de la station, régulièrement cultivée en mil. La figure 40 schématise l'ensemble du dispositif. L'expérience est menée sur deux lots de plantes différenciés par l'arrosage, pendant 22 jours à la fin du cycle de développement, date à laquelle on a posé les capteurs :

- un lot de plantes témoins : apport de 2 litres d'eau distillée par jour,
- un lot de plantes stressées : apport de 2 litres, 1 litre, 0.5 litre puis de nouveau 2 litres par jour selon le calendrier de la figure 41.

L'eau est apportée en deux fois dans la journée, à 9 h et à 17 h. Au cours du traitement, on enregistre une averse de 3.3 mm le soir du jour 191 correspondant à un apport de 0.058 litre d'eau par pot.

Par beau temps, on mesure le contenu relatif en eau, la conductance stomatique et le potentiel hydrique foliaire à 10 h et à 15 h (cf. fig. 41). La surface foliaire est mesurée

Fig. 42 : Effet du traitement hydrique sur les surfaces foliaires des plantes témoins et stressées



Arrosage/aux témoins : \blacktriangle : 50%, \blacktriangledown : 100%

quatre fois au cours du traitement en distinguant les feuilles et les gaines du brin-maître et des talles de chaque plante. A la fin du traitement, on mesure la matière sèche de la partie végétative et des épis, ainsi que le volume et le poids des racines. Les mesures climatiques sont enregistrées par la centrale de mesure au même pas de temps (20 mn) que les mesures de débit de sève.

3- Résultats

3-1- Effet de la contrainte hydrique sur les paramètres racinaires et foliaires

Le tableau 10 donne pour les deux lots de plantes, les moyennes du poids de matière sèche, du nombre d'épis, du poids par épis et de la masse volumique des racines.

Tab. 10 : Moyenne par traitement des paramètres mesurés à la récolte

Traitement	Poids de MS (g)	Nombre d'épis	Poids par épis (g)	MV racinaire (g/cm ³)
TEMOIN	254.12 a	2.20 a	12.99 a	0.583 a
STRESSE	239.16 a	1.82 a	10.65 a	0.628 a

Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

On n'observe aucune différence significative entre les deux lots de plantes pour chaque paramètre mesuré. Cette observation s'explique par le fait que la contrainte hydrique est appliquée à 67 jours après le semis, après la phase sensible du mil.

Par ailleurs les racines ne sont pas affectées par ce stress hydrique tardif : l'observation des racines, amas dense tapissant les parois du pot, ne décèle pas de nécrose chez les plantes stressées.

La figure 42 donne les valeurs moyennes des surfaces foliaires vertes pour les deux lots de plantes au cours du temps. On a distingué le brin-maître (feuilles et gaine) et l'ensemble des talles. Pour chaque date de mesure, on a fait une analyse de variance mono-factorielle pour déterminer l'effet du traitement hydrique sur les différentes surfaces foliaires de la plante (Tab. 11).

Pour la surface foliaire totale, l'effet du traitement n'est visible qu'à la fin de la contrainte hydrique (0.5l) au jour 199. Avant, l'analyse de variance ne montre aucun effet significatif du traitement hydrique.

Au jour 199, les talles sont les plus sensibles au stress hydrique, l'analyse de variance faisant ressortir deux groupes distincts entre les moyennes des deux lots de plantes. La surface foliaire du brin-maître des plantes stressées diminue aussi de façon significative. Par contre, on n'enregistre aucune différence significative entre les gaines des brin-mâtres de chaque lot.

Tab. 11 : Valeur du F de l'analyse de variance réalisée pour tester l'effet du traitement hydrique au cours du temps sur les surfaces foliaires. T : arrosage du lot Témoin S : arrosage du lot Stressé

Jour	Traitement	Brin-maître	Gaine du Brin-maître	Talles	Total
189	T : 2l S : 1l	0.21 NS	0.10 NS	0.06 NS	0.14 NS
193	T : 2l S : 0.5l	0.72 NS	0.40 NS	2.15 NS	2.17 NS
199	T : 2l S : 0.5l	5.86 *	1.99 NS	10.27 *	10.54 **
206	T : 2l S : 2l	3.08 NS	2.17 NS	1.49 NS	2.34 NS

NS : non significatif au seuil de 5 %

* : significatif au seuil de 5 %

** : significatif au seuil de 1 %

Une semaine après la fin de la contrainte hydrique (jour 206), avec un apport d'eau équivalent dans les 2 lots, les surfaces transpirantes totales mesurées sur les plantes stressées redeviennent équivalentes à celles des plantes témoins : il y a eu **récupération au niveau des talles** qui avaient le plus souffert de la contrainte hydrique.

Le nombre de feuilles n'ayant pas augmenté entre les deux dernières dates de mesure, cette récupération est due à une croissance de la surface foliaire déjà formée. La surface foliaire des talles chez les plantes témoins est constante pour les deux dernières dates de mesure (cf. fig. 42).

Fig. 43 : Relation entre le débit de sève d'une tige équipée d'un capteur et sa surface foliaire en pot $R^2 = 0.91$

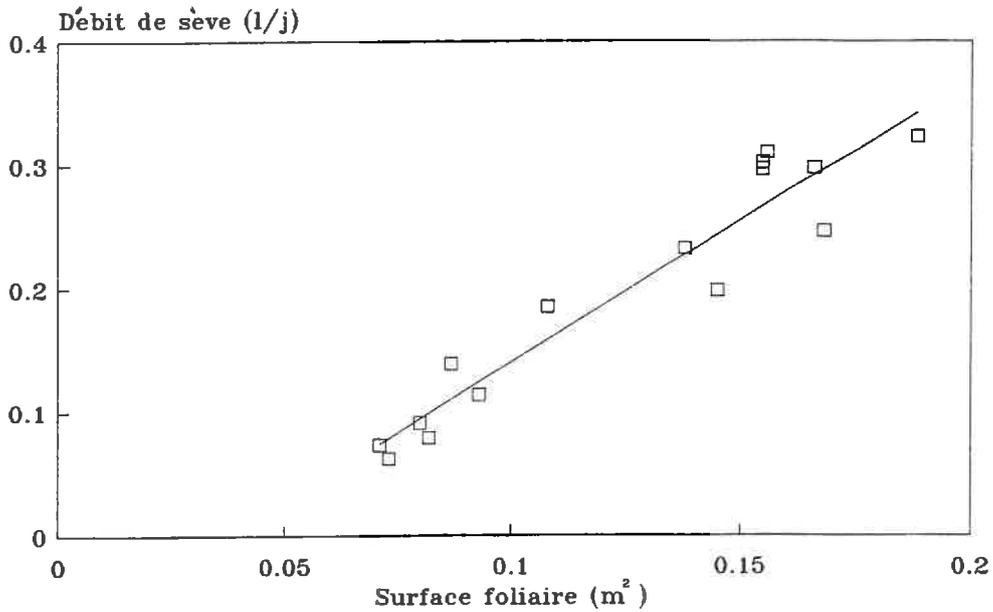
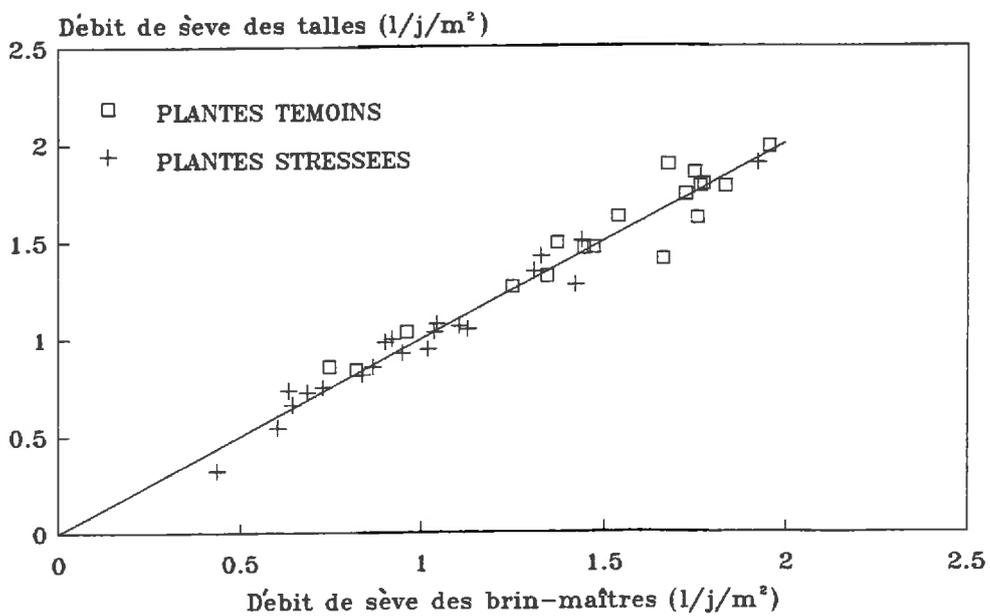


Fig. 44: Comparaison entre les débits de sève par m² de surface foliaire des brin-mâtres et des talles de mil en pot.



On observe donc une sensibilité légèrement plus marquée (au seuil de 5 %) de la surface foliaire des talles en réponse au stress hydrique et une certaine récupération, qui nous conduit à penser à un fonctionnement hydrique différentiel entre brin-maître et talles.

3-2- Comparaison entre les fonctionnements hydriques du brin-maître et des talles

Nous avons alors comparé les débits de sève moyens du brin-maître et des talles par unité de surface foliaire pour essayer de différencier leur fonctionnement hydrique. Pour cela, nous avons examiné au préalable la relation entre le débit de sève et la surface foliaire des tiges, brin-maître et talles confondues, bien alimentées en eau (fig. 43) : on obtient une relation linéaire et positive avec un coefficient de corrélation de 0.91. Cette relation permet alors de normaliser les débits des sèves par la surface foliaire afin de comparer les consommations hydriques des différentes tiges (fig. 44).

La figure 44 ne montre pas de différence systématique entre les débits de sève par m² de surface foliaire des brin-maîtres et des talles. On observe tous les cas de figure (débit de sève supérieur, inférieur ou égal à celui de la tige principale) et ceci aussi bien lors du stress que lors de la récupération.

On peut donc considérer chaque tige comme des unités équivalentes au point de vue fonctionnement, ce qui facilitera l'échantillonnage pour la pose des capteurs de débit de sève.

3-3- Evolution des débits de sève horaires

3-3-1- Lors du stress

Sur la figure 45 sont superposées les courbes de débit de sève moyen du lot Stressé pour quatre jours successifs :

Au jour 189, les plantes reçoivent 2 litres d'eau par jour et la courbe a une forme en cloche, symétrique. Elle sert de référence pour les jours suivants où les plantes ne reçoivent plus qu'un et 0.5 litre par jour. Le maximum horaire de débit de sève pour le jour 189 est de 0.062 l/h. Dès l'apport de 1 litre, la valeur maximale du débit de sève chute : 0.040 l/h le jour 190 puis 0.033 l/h le jour 191.

Les jours 190 et 191, on observe un décrochage de la courbe par rapport à la courbe témoin avant que la demande climatique, évaluée par le rayonnement global, soit maximale. Le décrochage se fait de plus en plus en tôt en relation avec une diminution de la quantité d'eau dans le pot. Ainsi, quand l'alimentation hydrique est suffisante, le maximum de consommation d'eau est à peu près synchrone avec le maximum de demande climatique, par contre quand l'alimentation est déficiente, le maximum de consommation précède d'autant plus le maximum de la demande climatique que la sécheresse est plus accentuée, en rapport avec une faible réserve en eau dans les pots.

Fig.45 : Evolution du débit de sève horaire
lors d'une contrainte hydrique progressive

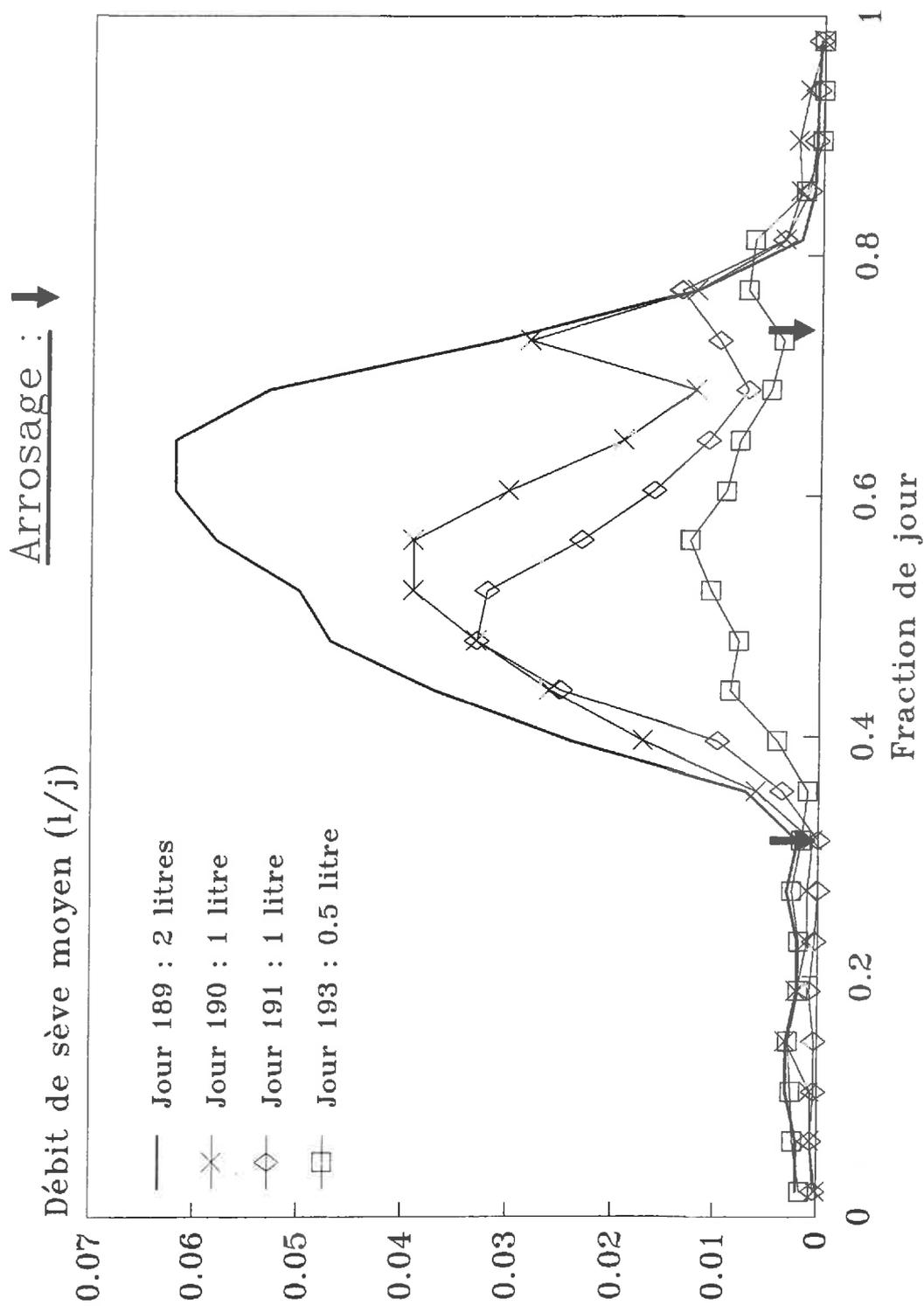


Fig. 46 : Evolution du débit de sève horaire
lors de la reprise de l'arrosage (↓)
Jour 200 : apport de 2 litres

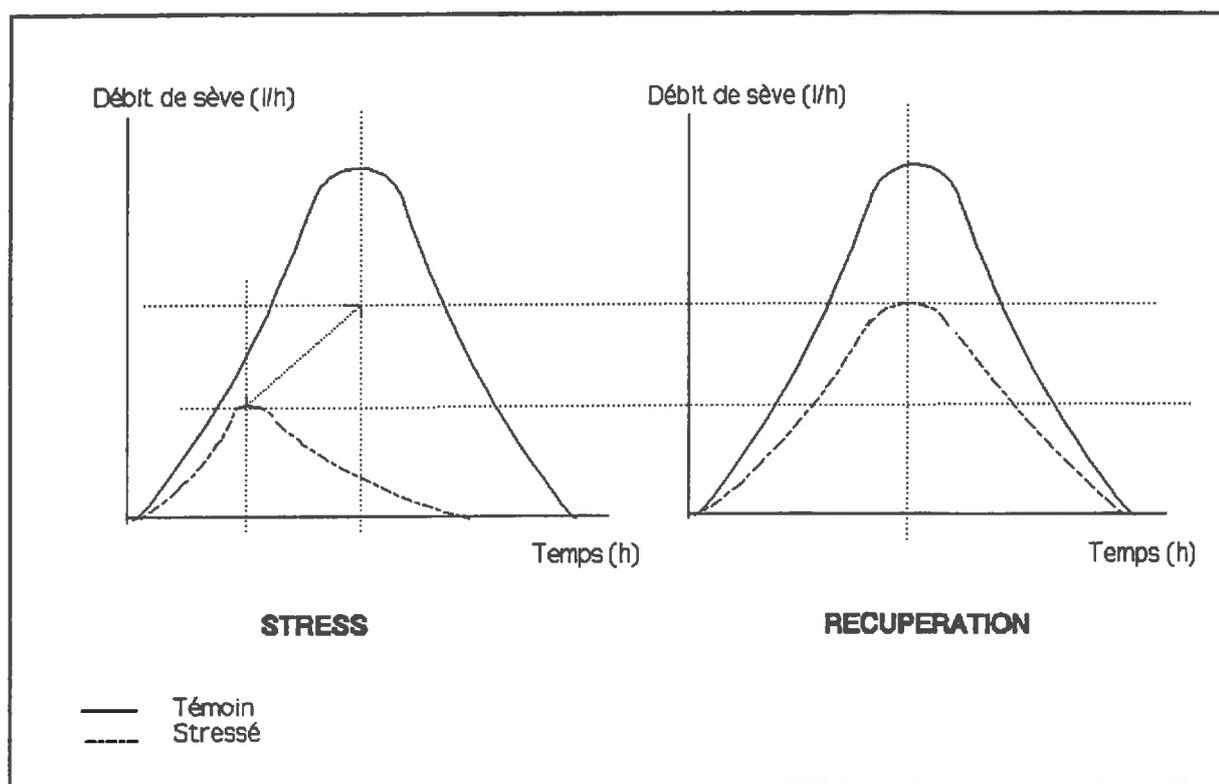
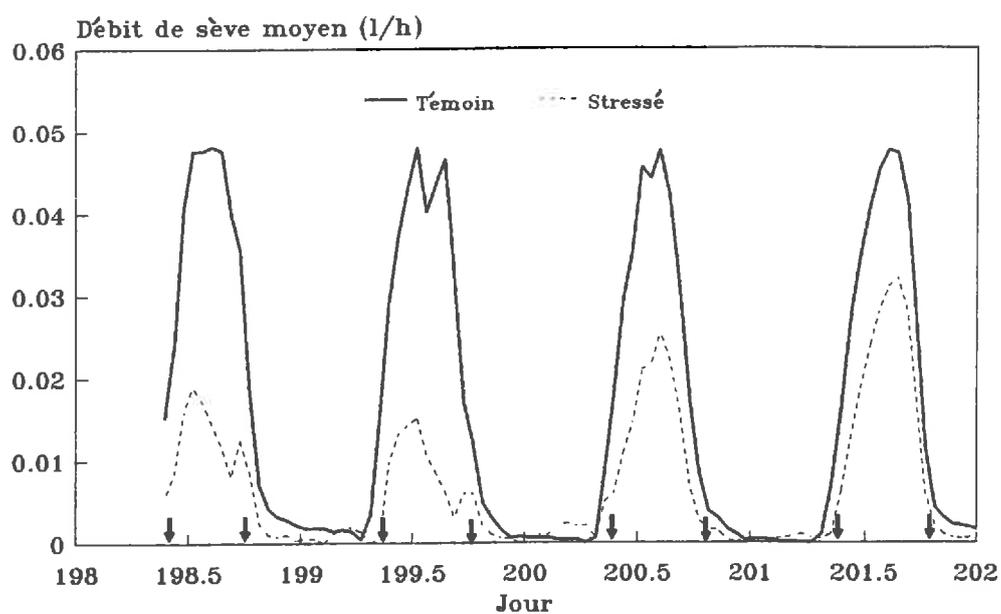


Fig. 47 : Courbes types d'évolution du débit de sève pendant et après une contrainte hydrique

Pour ces deux journées, le deuxième pic de débit de sève correspond au deuxième apport d'eau vers 17 h : il y a une reprise instantanée de la transpiration. Les plantes réagissent très vite à l'apport d'eau.

Puis pour un arrosage de 0.5 litre (jour 193), le pic de débit de sève chute à 0.013 l/h, soit 70 % en moins que la veille. On retrouve le décrochage caractéristique avant l'heure où le rayonnement global horaire est maximum, puis le second pic de transpiration dû à un apport d'eau. Les jours suivants pour un arrosage de 0.5 litre, les courbes de débit de sève horaire (non représentées sur la fig.) présentent les mêmes caractéristiques.

On peut donc parler d'une courbe type de débit de sève pour les plantes stressées avec deux phases caractéristiques :

- *première phase* : une montée plus ou moins parallèle à celle de la courbe témoin (jour 199 : fig. 46) jusqu'à un maximum qui précède systématiquement la valeur maximale du débit de sève du témoin.

- *deuxième phase* : un décrochage plus ou moins rapide (sommet arrondi ou pointu comme pour le jour 199).

Quant au second pic de transpiration que l'on retrouve tous les jours à la même heure, il est dû au protocole expérimental, à savoir un apport d'eau à 17 h.

3-3-2- Lors de la récupération

La reprise se fait progressivement : le pic de débit de sève augmente d'un jour à l'autre (fig. 46). Dès l'apport de 2 litres (jour 200), le pic s'est déplacé dans le temps, il se produit plus tard comme sur la courbe témoin. Les courbes de débit de sève reprennent immédiatement l'allure des courbes témoins (courbe en cloche symétrique).

A partir de ces résultats, on a représenté des courbes théoriques du débit de sève horaire lors du stress hydrique et lors de la récupération (fig. 47).

La vitesse de récupération des plantes préalablement stressées est sûrement due à une ouverture rapide des stomates en réponse à une meilleure alimentation hydrique, ce que nous allons vérifier en étudiant l'évolution de la conductance stomatique lors du traitement hydrique (stress et récupération).

3-4- Evolution des paramètres physiologiques

Les figures 48, 49 et 50 donnent respectivement les valeurs moyennes obtenues à partir de 6 mesures de la conductance stomatique, de la teneur relative en eau et du potentiel hydrique foliaire à 10 h et à 15 h pour les dates de mesures indiquées sur le calendrier de la fig. 41. Sur chaque graphe, les lettres a et b au dessus de chaque histogramme indiquent des moyennes différentes au seuil de 1 pour cent.

Fig.48 : Valeurs moyennes de la conductance stomatique au cours du temps. (a et b : moyennes de 6 mesures, différentes au seuil de 1 pour cent).

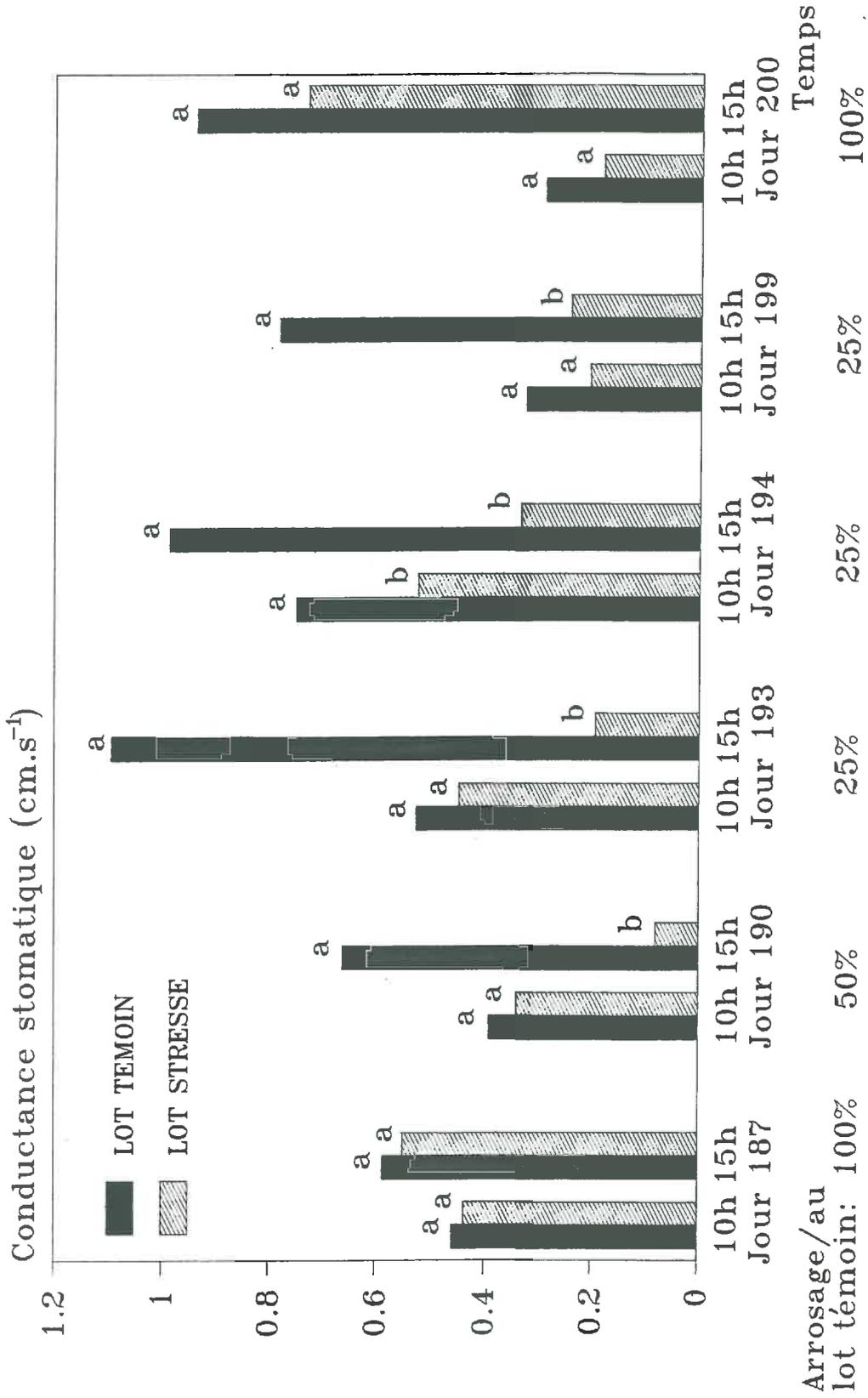


Fig.49 : Valeurs moyennes de la teneur relative en eau au cours du temps. (a et b : moyennes de 6 mesures, différentes au seuil de 1 pour cent).

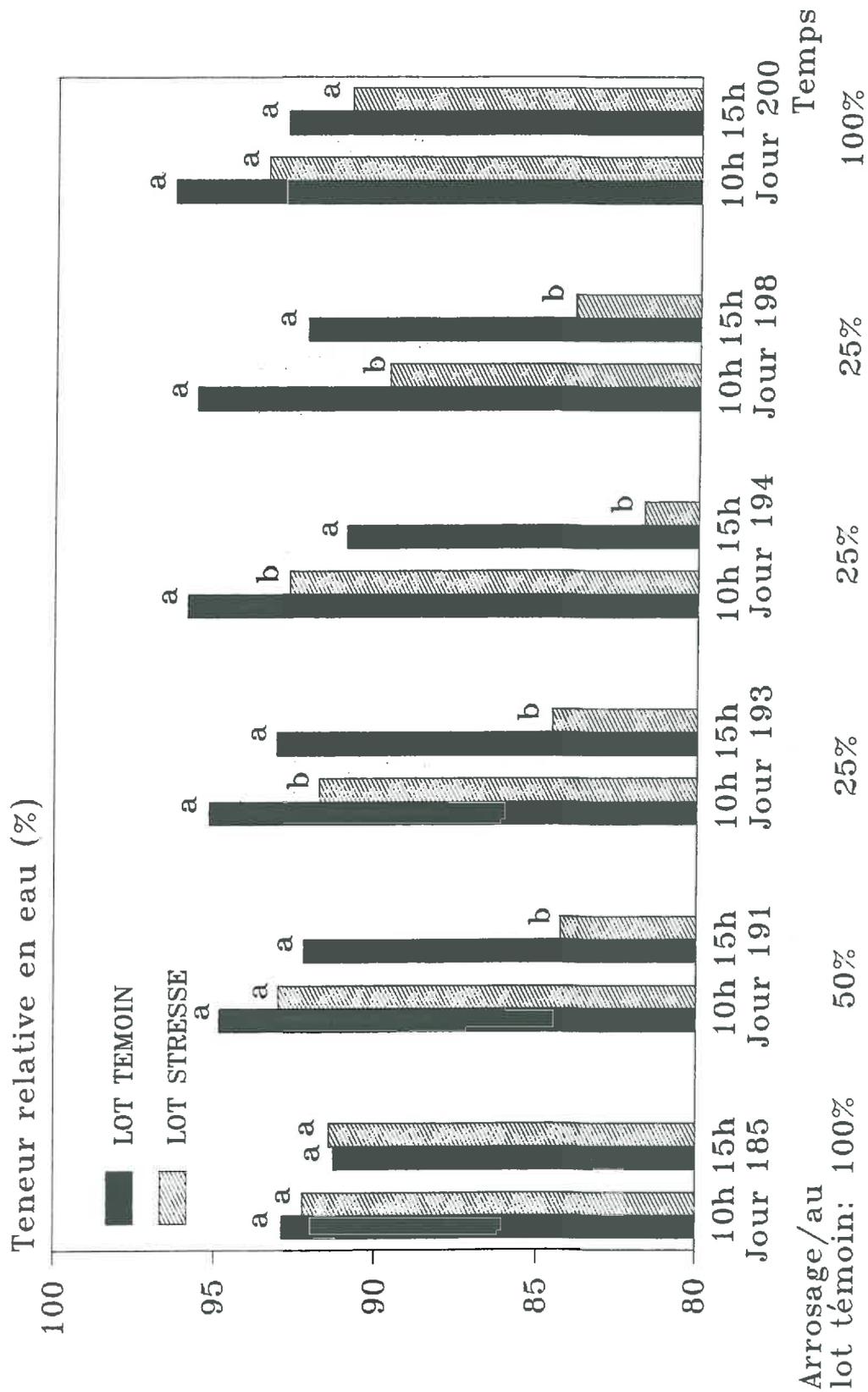
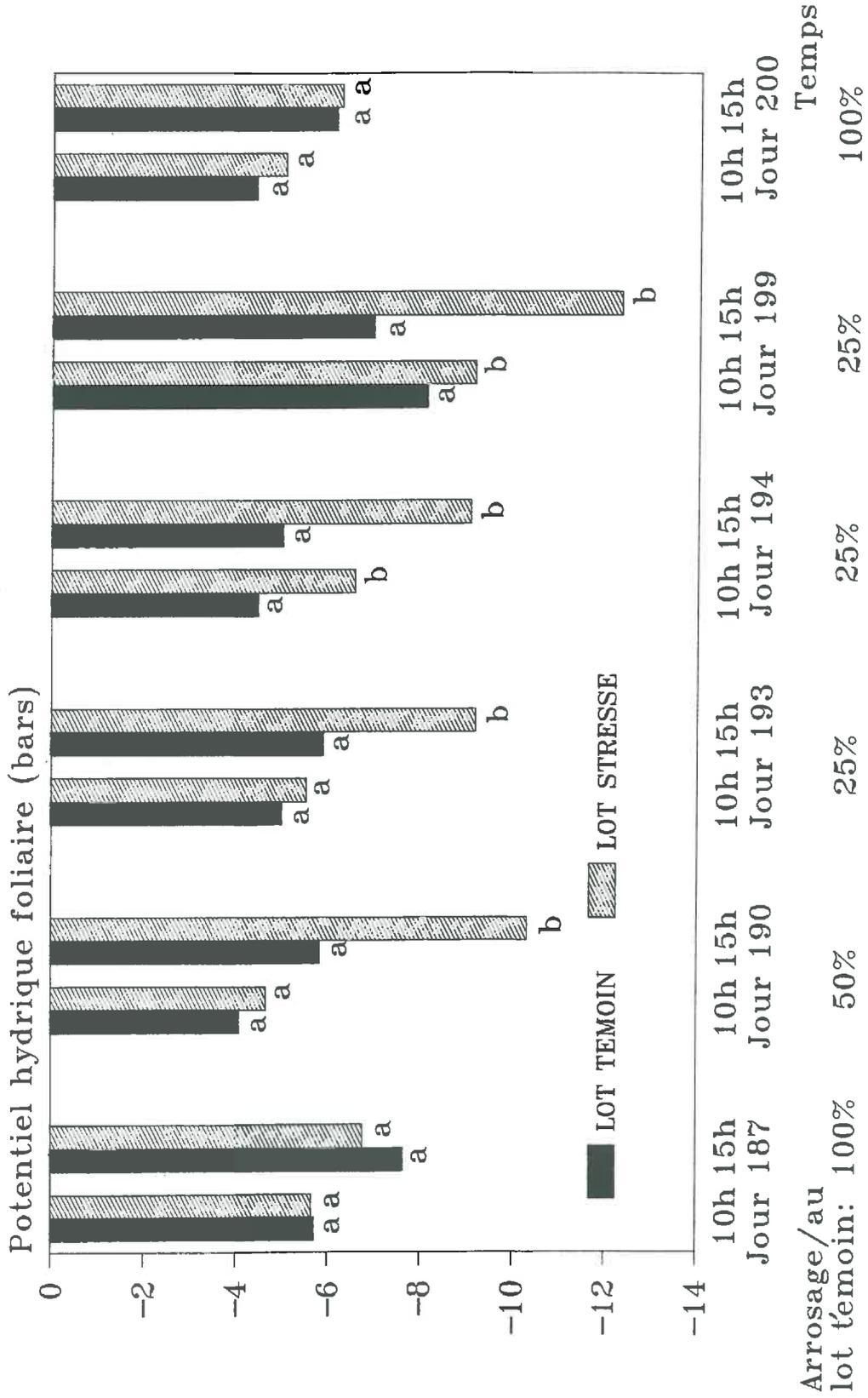


Fig.50 : Valeurs moyennes du potentiel hydrique foliaire au cours du temps. (a et b : moyennes de 6 mesures, différentes au seuil de 1 pour cent).



La conductance stomatique (fig. 48) est d'emblée très sensible à une réduction de l'arrosage de 50 % par rapport aux témoins. La régulation stomatique intervient dès le jour 190 avec un effet du traitement significatif au seuil de 1 pour mille, évitant ainsi une perte excessive d'eau dans les feuilles. Alors que la conductance stomatique des plantes témoins augmente à 15 h, celle des plantes stressées chute.

On observe plus tardivement, une baisse de la teneur relative en eau (fig. 49) pour les plantes stressées, à partir du jour 191, soit à la fin du cycle d'arrosage de 50 % par rapport aux témoins, et pour 15 h seulement. La teneur relative en eau diminue en relation avec l'intensité du stress hydrique. Pour un arrosage de 25 % par rapport aux témoins, les différences entre les 2 lots deviennent significatives dès 10 h du matin. Cependant la TRE des feuilles des plantes stressées ne descend jamais au dessous de 82 %.

L'effet du traitement hydrique sur le potentiel hydrique foliaire (fig. 50) est significatif au seuil de 1 % dès le début du cycle d'arrosage de 50 % par rapport aux témoins (jour 189). Puis, cet effet s'atténue les jours suivants jusqu'à la fin du cycle d'arrosage de 50 % (jour 191). Les jours 194 et 199, on retrouve un effet très significatif (au seuil de 1 pour mille) du traitement hydrique conduisant à deux groupes distincts au sein des moyennes des deux lots de plantes. Le potentiel hydrique des plantes stressées diminue à 15 h tout en se maintenant à des valeurs relativement élevées. La valeur la plus faible enregistrée pour les plantes stressées est de -12 bars à 15 h le dernier jour du stress. Les valeurs du potentiel hydrique foliaire semblent indiquer que le stress est modéré ce qui permet de penser que les plantes n'ont pas trop souffert. Cependant ces valeurs apparaissent trop élevées en comparaison avec les valeurs de conductance stomatique, ce point sera discuté dans le paragraphe 4.

Sur le tableau 12, sont reportées les valeurs moyennes de la conductance stomatique (CS), du potentiel hydrique foliaire (PF) et de la teneur relative en eau (TRE) des lots Témoin et Stressé à 10 h et à 15 h pour le sixième jour du stress (arrosage de 25 % par rapport aux témoins) et le premier jour de la récupération (arrosage de 100 % par apport aux témoins).

Au sixième jour de stress, l'effet de la contrainte hydrique est encore plus marqué. Les différences observées entre les deux lots de plantes sont plus importantes à 15 h, heure à laquelle la demande climatique est à son maximum, qu'à 10 h : en parallèle avec une baisse du potentiel hydrique foliaire et de la teneur relative en eau des feuilles, la conductance stomatique des plantes stressées chute dans l'après-midi. Cette diminution correspond à la phase descendante des courbes horaires de débit de sève. Inversement, chez les plantes témoins, on observe à 15 h une conductance stomatique accrue ainsi qu'un débit de sève horaire maximum.

Fig. 51 : Evolution horaire du rayonnement net au cours du jour 200

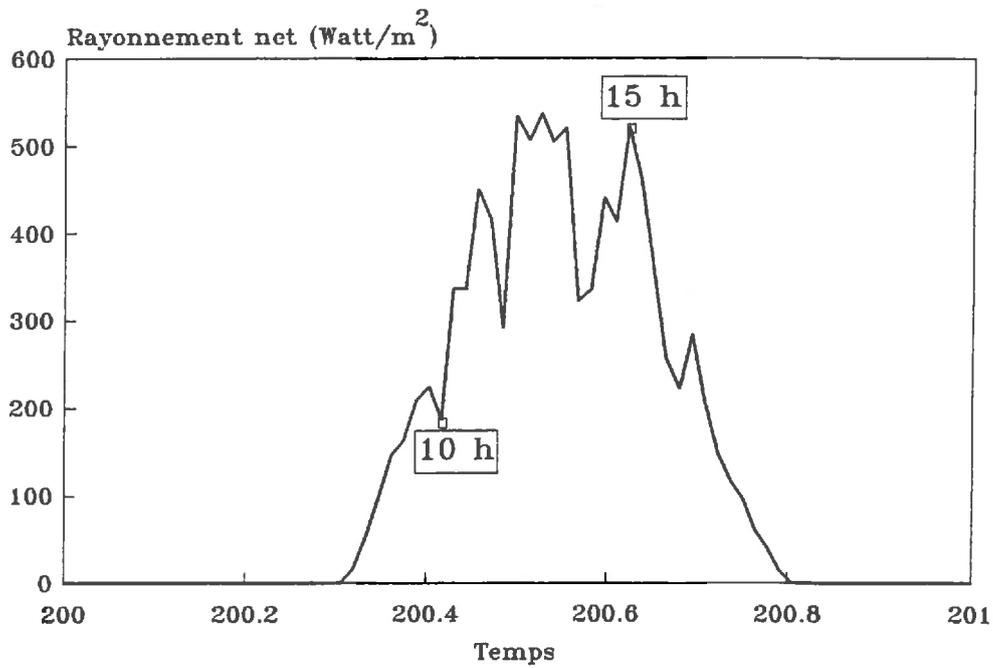
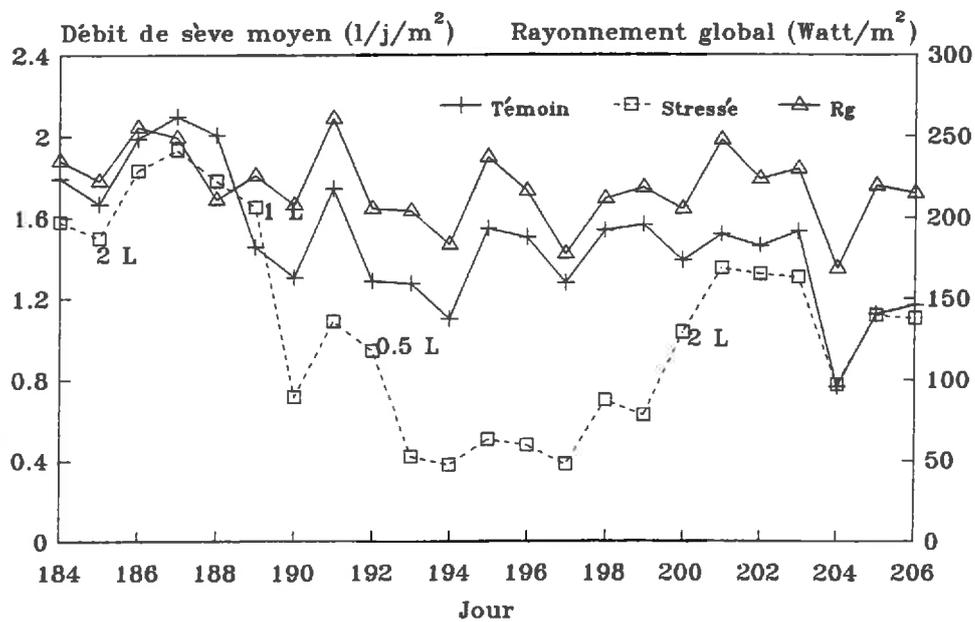


Fig.52 : Effet de la contrainte hydrique sur l'évolution du débit de sève journalier par m² de surface foliaire



Tab. 12 : Effet du traitement hydrique sur l'évolution des paramètres physiologiques

		6 ^e Jour de stress (J 194)		1 ^{er} jour de récupération (J 200)	
		10 h	15 h	10 h	15 h
CS (cm/s)	Témoin	0.74 a	0.98 a	0.28 a	0.93 a
	Stressé	0.52 b	0.33 b	0.17 a	0.72 a
PF (bars)	Témoin	-4.5 a	-5.0 a	-4.4 a	-6.2 a
	Stressé	-6.6 b	-9.1 b	-5.1 a	-6.3 a
TRE (%)	Témoin	95.84 a	90.34 a	96.27 a	92.73 a
	Stressé	92.64 b	81.67 b	93.37 a	90.79 a

Les moyennes suivies de lettres différentes indiquent des différences significatives entre les lots au seuil de 1 %

Dès l'arrêt de la contrainte hydrique, la conductance stomatique des plantes stressées redevient équivalente à celle des plantes témoins à 10 h comme à 15 h et correspond à une augmentation du débit de sève. Le premier jour de récupération (J 200), les faibles conductances stomatiques observées à 10 h dans les deux lots de plantes correspondent à un faible rayonnement (fig. 51). On n'enregistre plus de différence significative au niveau du potentiel hydrique foliaire entre les deux lots de plantes et la teneur relative en eau des plantes stressées se maintient à 15 h comme dans le cas des plantes témoins.

La récupération est immédiate au niveau des paramètres physiologiques et explique une reprise rapide du débit de sève des plantes stressées.

3-5- Evolution des débits de sèves journaliers

Le débit de sève moyen journalier par unité de surface foliaire du lot stressé chute de 1.8 l/j/m² à 0.5 l/j/m² en fin de contrainte alors qu'à la même date, le débit de sève des plantes témoins est de 1.5 l/j/m² (fig. 52). Dès que l'apport d'eau n'est plus limitant, le débit de sève moyen par m² de surface foliaire des plantes stressées rejoint sensiblement celui des plantes témoins pour être équivalent quatre jours après la fin du stress hydrique. Il y a donc récupération complète et progressive de la transpiration totale journalière chez les plantes stressées.

Tab. 13 : Comparaison du débit de sève moyen par m² de surface foliaire des plantes stressées et témoins avant et après la contrainte hydrique pour un rayonnement global (Rg) équivalent.

Débit de sève (l/j/m ²) :	AVANT STRESS : (J 188) Rg = 211 W/m ²	APRES STRESS : (J 205) Rg = 219 W/m ²
TEMOIN	2	1.1
STRESSE	1.78	1.1

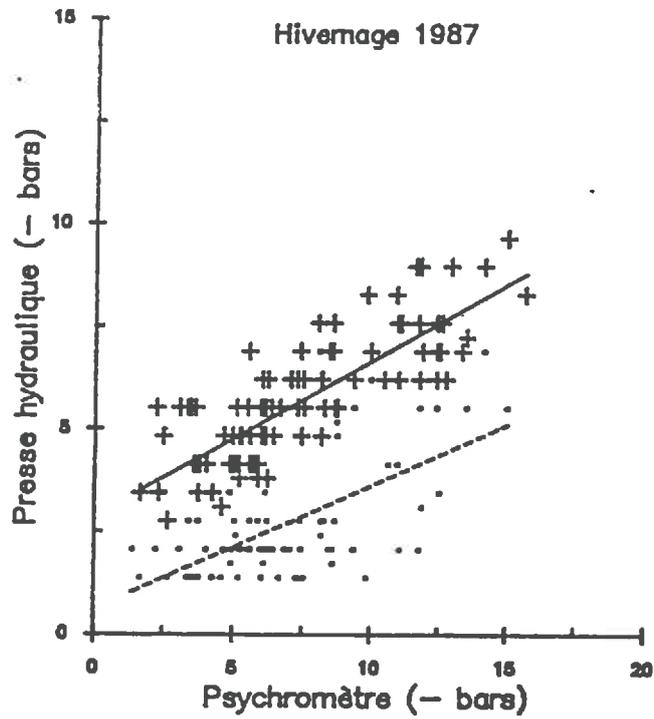
On constate alors que le débit de sève pour les deux lots de plantes est inférieur à celui observé avant la contrainte hydrique, pour un apport d'eau (2 litres) et un rayonnement global équivalents (Tab. 13). Cette baisse générale du débit de sève en fin de cycle de développement, est équivalente dans les deux lots de plantes, et ne peut donc être attribuée comme une conséquence du stress hydrique. La conductance stomatique des feuilles étant équivalente à ces deux dates de mesure, cette diminution s'explique par le jaunissement des feuilles, dû à un vieillissement, au jour 205 qui correspond à 89 jours après semis (cf. fig. 42), réduisant la surface foliaire effectivement évaporante.

4- Discussion

Si la dynamique du potentiel hydrique foliaire correspond plus ou moins bien à l'évolution de la contrainte hydrique dans le temps et dans son intensité, les valeurs obtenues lors de la réduction de l'arrosage semblent cependant anormalement élevées, surtout associées à des conductances stomatiques très faibles. LUDLOW et MUCHOW (1988) trouvent un seuil d'état hydrique létal, défini par le seuil de potentiel hydrique foliaire pour lequel les feuilles commencent à se dessécher, de - 30 bars chez le mil contre - 130 bars pour des graminées C4 fourragères. Mais la définition de ce seuil reste imprécise car dépendante du pourcentage de flétrissement retenu par l'observateur et n'a guère de signification physiologique. Par ailleurs, les travaux de LOUGUET (1993) montrent que le complexe enzymatique foliaire du mil est détérioré pour un potentiel hydrique foliaire de - 15 bars. Le mil est donc très peu tolérant à la sécheresse par rapport au sorgho dont le potentiel peut descendre jusqu'à - 20 bars.

L'utilisation de la presse hydraulique peut être mise en cause, d'une part par le manque de précision de la mesure (cf. 2^e partie, Ch.1-C-2-2) pour déterminer l'apparition ponctuelle de la sève sur le papier filtre et d'autre part, par l'absence d'étalonnage avec une

Fig. 53 : Relation entre le potentiel hydrique de l'arachide mesuré à la presse hydraulique et au psychromètre à thermocouple. Les points 1 obtenus à la presse sont indiqués par des (.) et les points 2 par des (+). D'après ANNEROSE, 1990.



- . Point n°1 : Sortie de sève à la nervure principale
- + Point n°2 : Sortie de sève aux nervures secondaires

autre méthode de mesure du potentiel hydrique.

ANNEROSE (1990) utilisant la même presse hydraulique pour déterminer le potentiel foliaire de l'arachide, a comparé ses mesures avec celle obtenues par des psychromètres à thermocouples (fig. 53). Pour cette comparaison, la foliole opposée à celle utilisée pour la mesure à la presse hydraulique est prélevée pour une détermination du potentiel au psychromètre. Différents points d'apparition de la sève peuvent être observés chez l'arachide. Les deux points principaux correspondent à l'apparition de la sève au niveau de la section de la nervure principale (point 1) puis au niveau de la section des nervures secondaires (point 2). Les résultats indiquent que le potentiel hydrique mesuré à la presse hydraulique est fortement corrélé à celui déterminé au psychromètre ($R^2 = 0.67$ pour le point 2). Cependant pour les deux types de points observés, l'utilisation de la presse hydraulique conduit à une surestimation du potentiel hydrique réel.

Nos valeurs sont aussi de tout évidence surestimées et sans étalonnage propre à notre étude, il est difficile d'évaluer la marge d'erreur.

5- Conclusion

La contrainte hydrique progressive puis la récupération ont été suivies au niveau des débits de sève horaires et journaliers, en relation avec l'évolution de quelques paramètres foliaires indicateurs de l'état hydrique de la plante. Ces expériences menées au cours d'un essai en pot font ressortir une rapidité de réponse des stomates au facteur hydrique, ainsi qu'une sensibilité à l'intensité du stress (diminution de l'apport d'eau journalier). La régulation stomatique s'effectue dès la réduction de l'arrosage de 1 litre permettant aux plantes de maintenir une teneur relative en eau relativement élevée au début de la contrainte hydrique. Le retour à un arrosage non limitant peut être suivi sur l'ensemble des caractères physiologiques mesurés, notamment sur la conductance stomatique qui redevient équivalente à celle des plantes témoins à 10 h comme à 15 h. La capacité de récupération des plantes préalablement stressées est totale et si le débit de sève total journalier atteint progressivement celui des plantes témoins, le pic horaire de débit de sève se repositionne d'emblée à l'heure où la demande climatique est à son maximum.

L'évolution horaire du débit de sève des plantes stressées puis de nouveau bien arrosées s'explique par la réponse rapide des stomates à la contrainte hydrique. Une courbe synthétique a été définie, rendant compte du décrochage précoce du débit de sève horaire par rapport à celui des plantes témoins, provoqué par un manque d'eau dans le pot. La récupération se traduit par une courbe en cloche symétrique avec de nouveau un maximum de débit de sève horaire synchrone dans les deux lots de plantes.

Ce type de réponse a été caractérisé dans des conditions expérimentales précises : la culture dans des pots de 15 litres a provoquée des dessèchements rapides du sol et une apparition immédiate du stress hydrique. Or des expériences sur arbres fruitiers

(VALANCOGNE, comm. pers.) montrent que le stress hydrique ne se caractérise pas par le même type d'évolution de la transpiration selon que le stress hydrique se met en place très rapidement ou lentement. D'autre part, l'évolution horaire du débit de sève telle que nous l'avons observée est dépendante des heures d'arrosage. Pour ces raisons, la réponse au stress hydrique, décrite au cours de ce chapitre, n'est pas extrapolable pour d'autres conditions expérimentales (champ, bac de végétation).

Ces résultats ont indiqué deux types de réponse du système foliaire à la contrainte hydrique :

- un mécanisme rapide de réaction par le contrôle stomatique et le flétrissement des feuilles.
- un mécanisme lent, lors de la récupération, par une reprise partielle de la croissance des feuilles

L'observation de la densité racinaire à la fin du traitement ne montre aucune conséquence du stress subi. On note une certaine reprise de la croissance des feuilles des talles qui avaient le plus souffert de la contrainte hydrique. Cependant les débits de sève ramenés à l'unité de surface foliaire ne permettent pas de distinguer un fonctionnement hydrique différentiel entre les deux types de tiges, brin-maître et talle. A ce propos, SIBAND (1981) note que chaque talle mise en place installe un système racinaire nodal qui va la desservir. Nos résultats montrent une bonne interconnexion entre ces différents systèmes racinaires puisque l'eau absorbée par l'ensemble des racines de la plante est répartie entre les différentes tiges.

Cette absence de différenciation entre les tiges d'un poquet, en ce qui concerne la consommation hydrique aussi bien en condition d'offre en eau limitante qu'en condition satisfaisante, va simplifier l'échantillonnage des tiges pour la pose des capteurs de débit de sève au champ.

D'après la relation de proportionnalité trouvée entre les débits de sève et les surfaces foliaires des plantes bien alimentées en eau, au champ (2^e partie : fig. 38 et Tab. 9) et en pot (fig. 43), on admettra systématiquement cette relation dans les expérimentations qui suivent. Cette hypothèse va nous permettre de comparer les rapports de débits de sève sur la surface foliaire (DS/SF) pour des plantes ayant des tailles différentes.

CHAPITRE 2 : EFFETS DES SOLS DEGRADÉS SUR L'ALIMENTATION HYDRIQUE EN RÉGIME PLUVIAL

1- Introduction

La dégradation des sols, due à la culture continue, s'exprime par une baisse de la fertilité et s'observe par une diminution des rendements. D'un point de vue chimique, cette dégradation correspond à une acidification entraînant, dans les conditions de faible capacité d'échange cationique (CEC), la présence d'aluminium.

Des études agronomiques (CISSE, 1986; CHOPART et NICOU, 1987) ont montré l'intérêt des techniques culturales telles que l'apport de compost, de fumure, de phosphates, le chaulage, le labour ou encore la rotation des cultures mil/arachide pour améliorer les rendements sur sols dégradés. Si par la recherche agronomique, l'amélioration des rendements sur ces sols est possible, il reste que les mécanismes physiologiques, intervenant dans l'alimentation hydrique sur sols dégradés, ne sont pas encore élucidés, notamment en ce qui concerne les effets sur les différents organes de la plante, ou encore leur interaction.

Dans le but d'étudier ces mécanismes, nous avons travaillé au champ sur deux parcelles expérimentales dont les rendements ont été suivis pendant plusieurs années consécutives (AFFHOLDER, 1991a) : on observe une baisse des rendements de l'ordre de 50 % en 5 ans qui est enrayée par l'apport de compost organique. Les analyses de sol effectuées en 1990 montrent que la perte de productivité de la parcelle Témoin s'explique essentiellement par la baisse du taux de calcium échangeable. Le compost agit principalement en compensant les exportations des divalents Ca et Mg, et en maintenant le statut physico-chimique du sol (JAILLARD, 1990).

Outre la comparaison des consommations hydriques de chaque parcelle (avec et sans apport de compost) en liaison avec l'évolution du stock hydrique du sol au cours du temps, on examinera les effets de la correction du sol sur les parties racinaires et aériennes des plantes. Les résultats seront analysés sous l'angle de l'intérêt d'un amendement organique en fonction du risque de sécheresse en cours de culture comme cela est fréquemment rencontré en culture pluviale dans la zone sahélo-soudanienne.

2- Dispositif

Les expérimentations se sont déroulées sur un essai de longue durée, sur le site dit Sole C, qui fait l'objet d'une rotation annuelle mil-arachide. Les deux parcelles étudiées ont reçu 25 % de la fumure minérale vulgarisée pour la culture par l'ISRA, la FMV pour le mil est de 150 Kg/ha d'engrais ternaire 14-7-7 (N-P-K sous forme d'urée, SuperP et KCL). Ces deux parcelles sont équipées de tubes d'accès pour la sonde à neutrons; nous avons placé 6 capteurs de débit de sève sur les plantes des poquets situés autour d'un tube.

Tab. 14 : Pluviométrie (en mm) relevée pendant les expérimentations au champ de 1990 et 1991.

Jours	1990					1991				
	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct
1	0	0	0	7	28	0	0	0	20	0
2	0	0	0	0	0	0	0	1	50	0
3	0	0	4.5	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	22	0	0	0	0	9	0
5	0	0	8.5	0	12	0	0	0	34	0
6	0	0	15	0	0	0	0	0	0	9
7	0	0	9.5	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	31	6
10	0	0	0	7	0	0	6	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	2	6
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
15	0	9.5	0	0	0	0	0	4	18	0
16	0	34	0	0	0	0	0	32	0	0
17	0	9	11.5	29	0	0	0	3.1	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
20	2.5	0	7	3	14.5	0	0	0	0	0
21	0	1.2	0	0	0	0	0	0	9	0
22	0	0	21	0	0	0	28	3	0	0
23	0	0	20	0	0	0	0	11	0	0
24	0	2.5	0	0	0	0	3	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0
27	0	0	3.5	13	0	0	2	0	13	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	14	0	0.5	0	0	0	8	0	0	0
30	0	5	0	0	0	0	0	2	0	0
31		0	0		0		0	0		0
TOTAL :	375.2					328.1				

Deux expérimentations ont été conduites correspondant respectivement à la saison de culture des années 1990 et 1991 :

- lors de la campagne 1990, le semis a eu lieu le 20 juillet. A cause de problèmes techniques, les mesures de débit de sève sur les deux parcelles se sont succédées dans le temps, à la fin du cycle de développement de la culture, de 70 à 82 jours après semis sur la parcelle Compost et de 85 à 93 jours après semis sur la parcelle Témoin. Les stades de développement étant alors décalés, l'analyse des résultats pour la comparaison des deux parcelles ne sera faite que partiellement.

- en 1991, un premier semis a eu lieu le 31 juillet, suivi d'une période sèche. La levée s'est faite le 17 août, le lendemain de la première pluie utile : les dates sont exprimées en jours après levée. Cette deuxième expérimentation bénéficie de capteurs de débit de sève améliorés qui ont été posés début octobre. Les mesures de surface foliaire et de débit de sève ont lieu sur des plantes âgées de 50 à 66 jours après levée.

2-1- Caractérisation des conditions de fertilité

Sur une des deux parcelles, le sol est restauré par apport de compost organique, à raison de 3 T de MS/ha chaque année. Il contient 1.81 % de N, 0.37 % de P, 0.60 % de K, 2.10 % de Ca et 0.80 % de Mg. Le compost apporte en moyenne chaque année 63.4 Kg/ha de N, 13.0 Kg/ha de P, 21.0 Kg/ha de K, 73.5 Kg/ha de Ca et 28.0 Kg/ha de Mg. Ce compost anaérobie est produit par un fermenteur biogaz de l'unité Transpaille de la Sole C. Les parcelles seront appelées "Témoin" et "Compost".

2-2- Régime hydrique

Le régime hydrique est strictement pluvial : la pluviométrie pour chaque année est indiquée dans le tableau 14. Le total annuel est supérieur en 1990 avec 375.2 mm contre 328.1 mm en 1991. De plus pour la campagne 1991, on observe un épisode sec dans la première quinzaine d'août après le semis du 31/07.

3- Résultats

3-1- Evolution du stock hydrique sous culture et de l'ETR moyenne au cours du temps

Ces données sont obtenues par humidimétrie neutronique (AFFHOLDER, 1992) et représentent les cumuls des stocks de 0 à 200 cm de profondeur sous la culture :

Les figures 54 et 55 montrent l'évolution du stock hydrique pour les deux parcelles respectivement pour les années 1990 et 1991 ainsi que les précipitations à la même échelle. En 1990, le stock hydrique sous la parcelle Compost est d'emblée inférieur à celui de la

Fig. 54 : Evolution du stock hydrique cumulé sur 0 à 200 cm de profondeur sous les deux parcelles en 1990, d'après AFFHOLDER (1992)

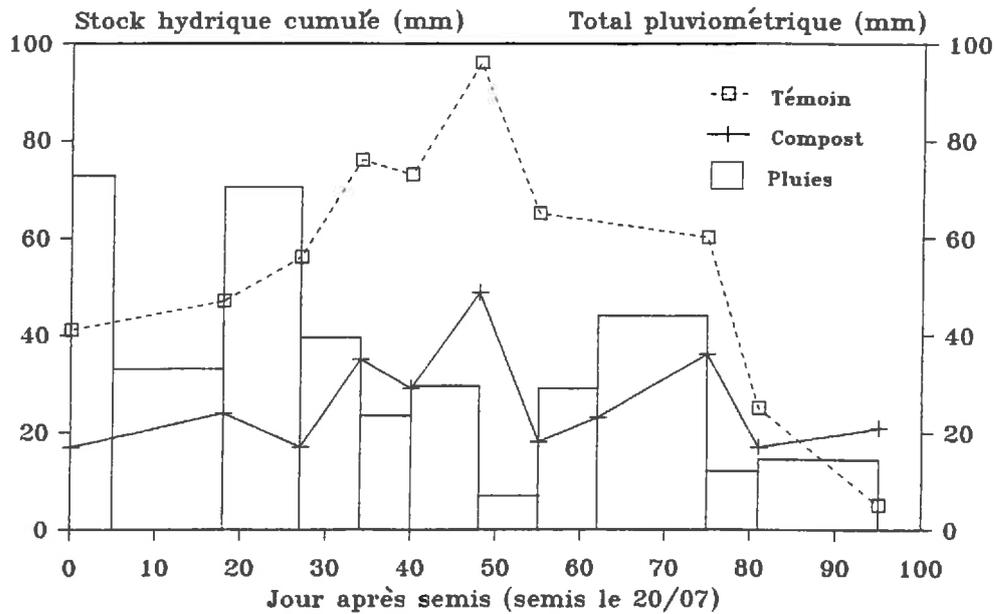


Fig. 55 : Evolution du stock hydrique cumulé sur 0 à 200 cm de profondeur sous les deux parcelles en 1991, d'après AFFHOLDER (1992)

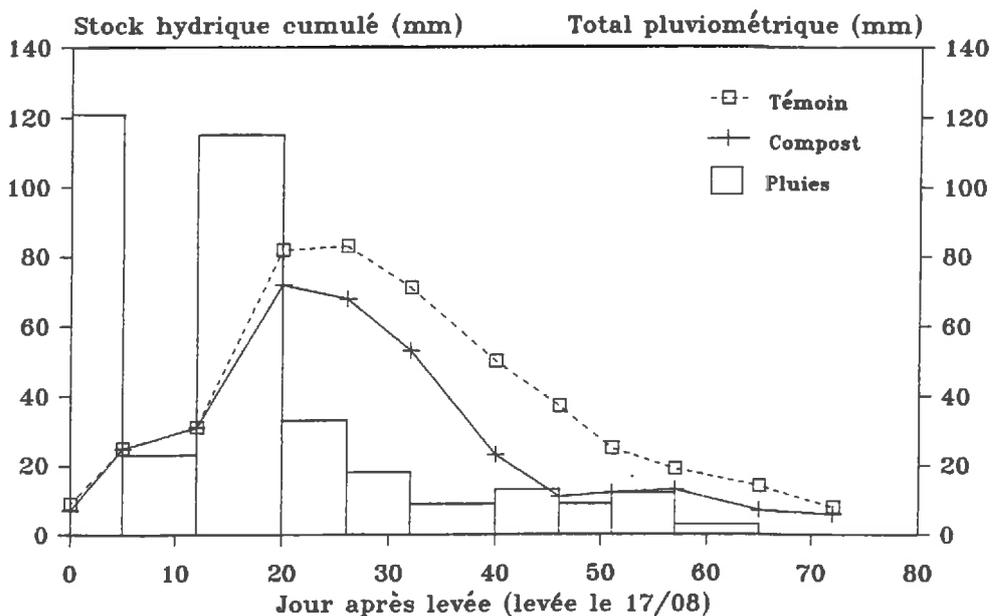


Fig.56 : ETR moyennes du mil au cours du temps en 1990, d'après AFFHOLDER (1992)

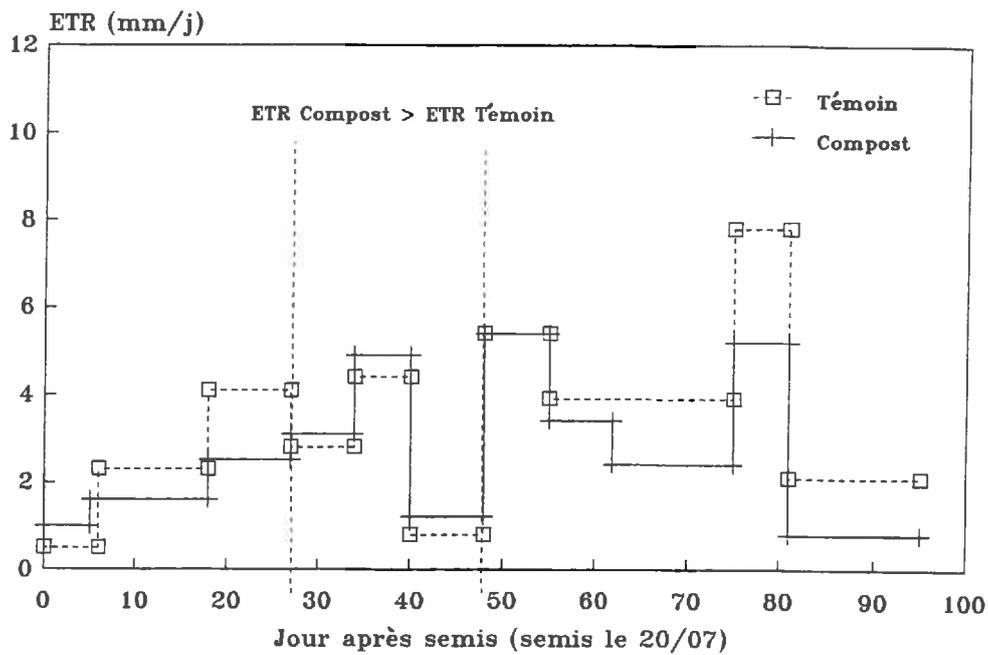
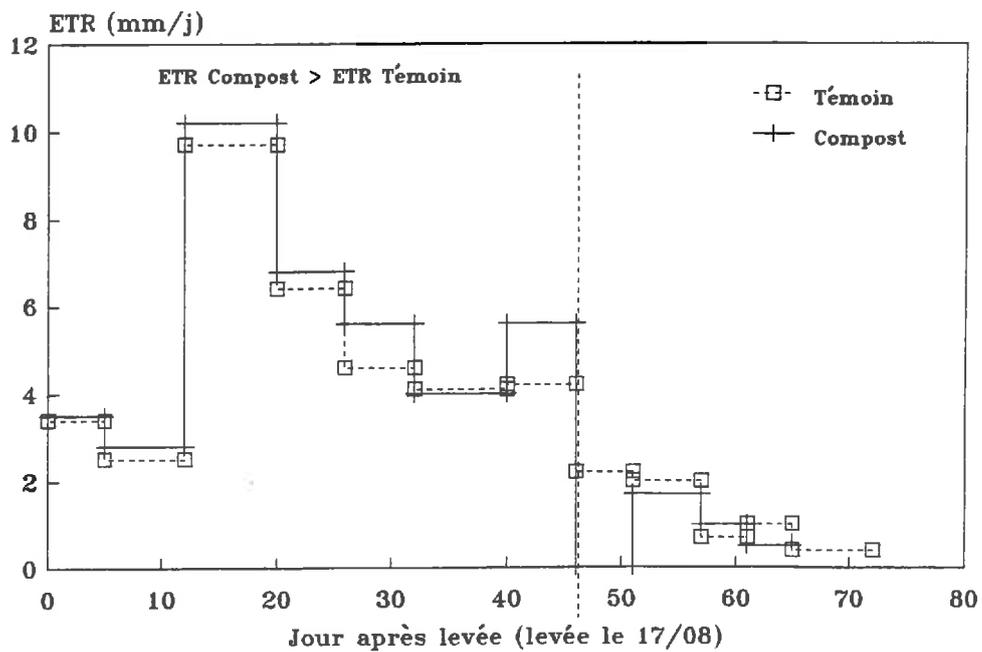


Fig.57 : ETR moyennes du mil au cours du temps en 1991, d'après AFFHOLDER (1992)



parcelle Témoin : l'ETR de la parcelle Compost, calculée par bilan hydrique n'est supérieure à l'ETR de la parcelle Témoin que sur la période de 27 à 48 jours après semis (fig. 56), alors qu'en 1991 où les stocks hydriques sont équivalents au début de la culture dans les deux parcelles, l'ETR de la parcelle Compost dépasse l'ETR de la parcelle Témoin de 0 à 46 jours après levée (fig. 57). Puis pour les deux années, l'ETR de la parcelle Témoin dépasse alors l'ETR de la parcelle Compost jusqu'à la récolte.

L'évolution du stock hydrique sous la culture pour les deux années s'explique par une consommation élevée, observée dans un premier temps dans le traitement Compost entraînant, à cause d'une ré-alimentation insuffisante de la réserve hydrique du sol par les pluies, un assèchement plus rapide du sol que sur le traitement Témoin.

3-2- Masses racinaires et composantes du rendement

La figure 58 présente pour l'année 1991, les masses totales de racines sèches par dm³ de sol en fonction de la profondeur dans les deux traitements. L'apport de compost a un effet très marqué sur la masse de racines sur les 10 premiers centimètres de profondeur puis les masses sont équivalentes dans les horizons plus profonds. Dans le traitement Compost, les racines atteignent 150 cm de profondeur alors que dans le traitement Témoin, on observe des racines jusqu'à 180 cm. Cette différence peut être attribuée à une moindre descente du front d'humectation dans le traitement Compost, qui est liée à la plus forte consommation hydrique observée pendant toute la première partie du cycle pour ce traitement (fig. 57).

Les composantes du rendement sont présentées dans le tableau 15 :

Tab. 15 : Effet de l'apport de compost sur les composantes du rendement en 1991 (d'après AFFHOLDER, 1992)

	Nombre de poquets / ha	Nombre de tiges / poquet	Nombre d'épis fertiles / tige	Nombre de grains / épis fertiles	Poids de mille grains (g)	Rendement grain (Kg/ha)
COMPOST	11319 a	7.40 a	0.35 a	3835 a	5.22 a	632 a
TEMOIN	10905 a	5.39 b ***	0.44 a	3655 a	6.20 b *	494 a

* Différence significative au seuil de 5 %

*** Différence significative au seuil de 1 %

L'apport de compost a essentiellement un effet positif sur le nombre de tiges par hectare. Le nombre d'épis fertiles par tige et le nombre de grains par épis ne sont pas améliorés. Par contre l'apport de compost a un effet négatif sur le remplissage des grains ce qui est expliqué par la baisse de la consommation hydrique observée à partir de 45 jours après levée. Il en résulte une production de grains par hectare équivalente entre les deux traitements.

Fig. 58 : Masses racinaires par dm^3 de sol en fonction de la profondeur pour l'année 1991 d'après AFFHOLDER, 1992.

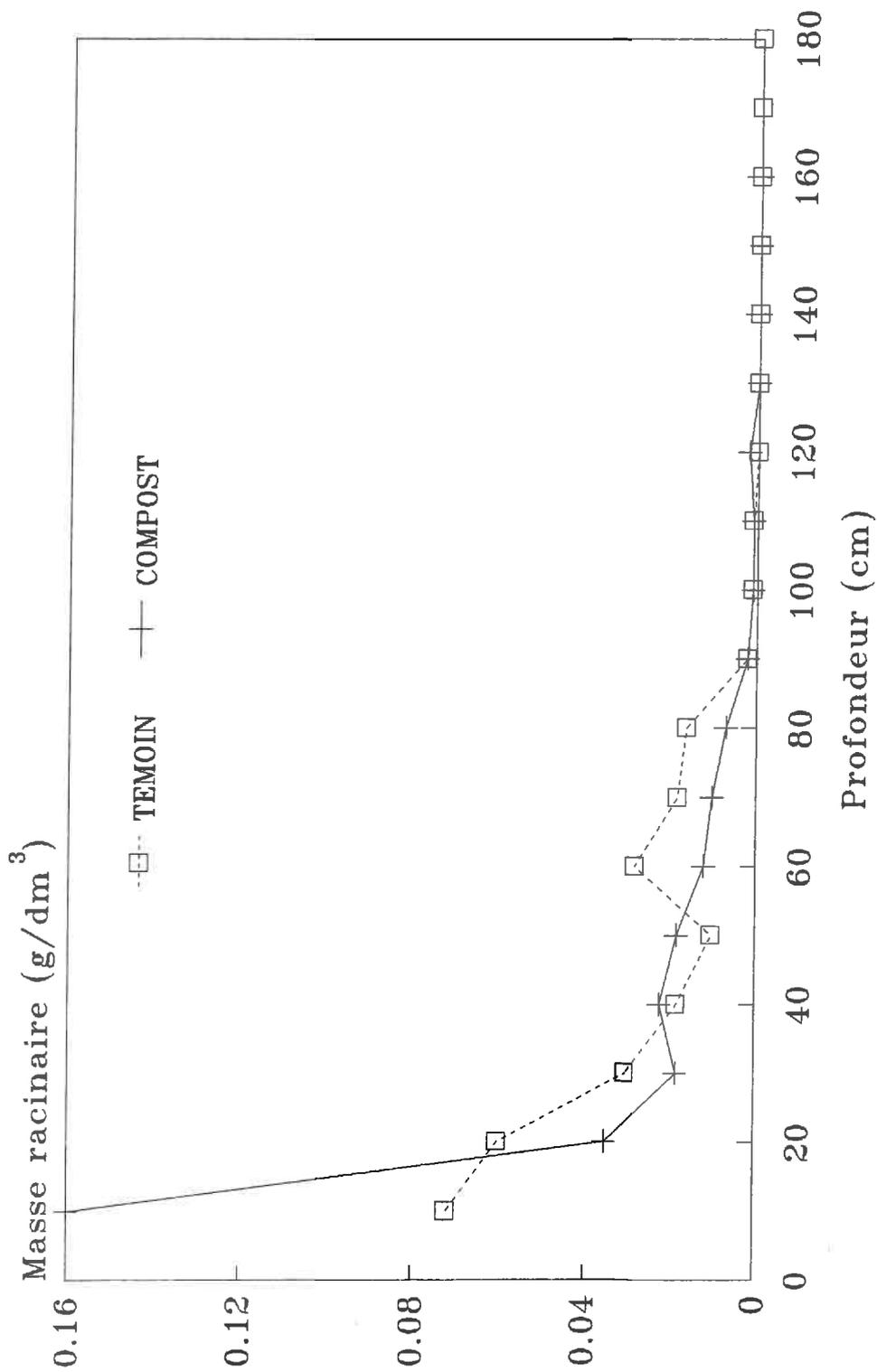


Fig.59: Evolution de l'indice de surface foliaire dans les deux parcelles en 1990

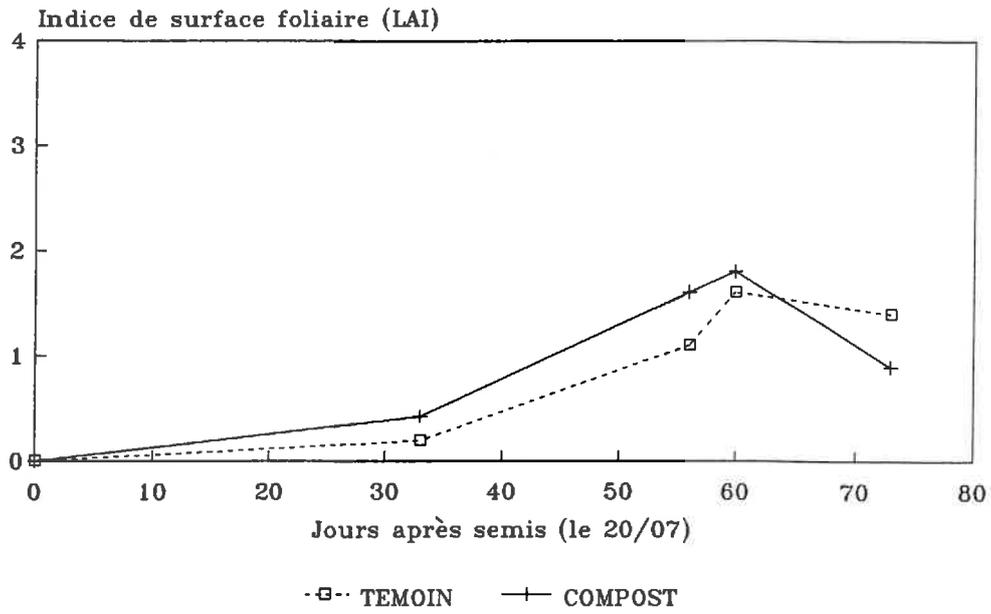
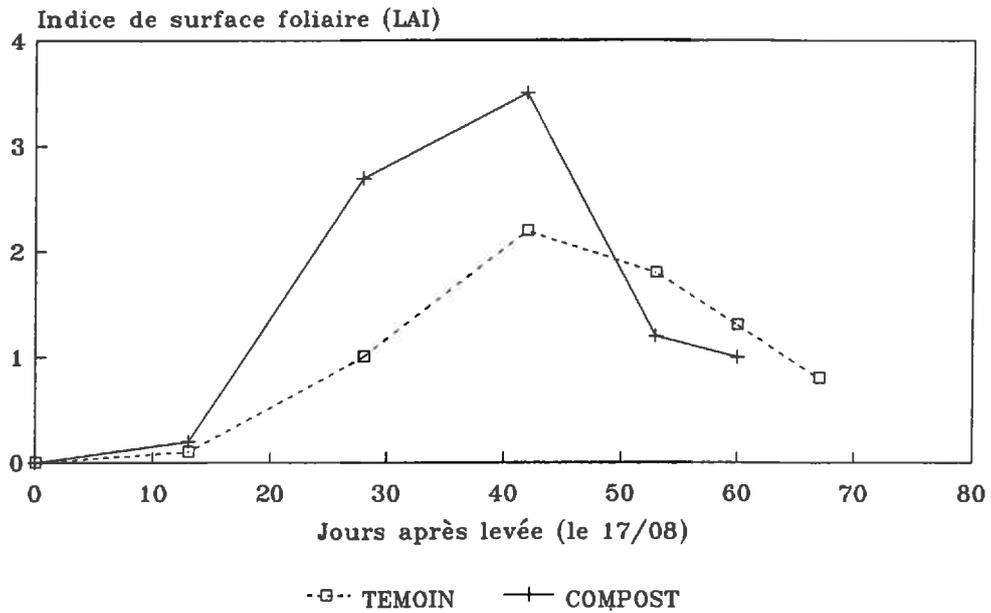


Fig.60: Evolution de l'indice de surface foliaire dans les deux parcelles en 1991



3-3- Evolution de l'indice de surface foliaire (LAI)

L'indice de surface foliaire est calculé d'après la surface foliaire, mesurée par le poids de matière sèche de feuilles de quatre poquets choisis au hasard dans les deuxièmes lignes de bordure et ramenée au m² de sol cultivé. Les valeurs sont extrapolées par des droites entre les différentes dates de mesure.

L'évolution de l'indice de surface foliaire des deux parcelles pour l'année 1990 est présentée sur la fig. 59. En fin de cycle, on observe que de manière générale, les tiges sont plus grêles sur la parcelle Témoin que sur la parcelle Compost, mais le feuillage est encore vert alors qu'il est complètement sec à cette période sur la parcelle Compost.

L'évolution de l'indice de surface foliaire des deux parcelles pour l'année 1991 est présentée sur la fig. 60. L'apport de compost provoque une croissance foliaire supérieure jusqu'à 42 jours après levée puis la surface foliaire chute plus rapidement que sur la parcelle Témoin. Le dessèchement foliaire s'atténue sur la parcelle Compost entre 53 et 60 jours après levée du fait des 12 mm de pluies tombées pendant cette période.

L'apport de compost favorise donc la croissance foliaire en condition hydrique satisfaisante, par contre provoque un effet négatif dès que l'eau est limitante.

3-4- Relation entre les débits de sève et les facteurs de l'offre et de la demande

Pour l'année 1991, le fonctionnement hydrique des deux parcelles est analysé :

- par rapport à la demande, c'est-à-dire en fonction de la surface foliaire d'un poquet
- puis par rapport à l'offre, c'est-à-dire en fonction de l'humidité relative du sol.

Etude du fonctionnement hydrique par rapport à la demande :

On travaille sur les débits de sève moyens d'un poquet, ramené à l'unité d'ETP, en fonction de la surface foliaire moyenne du poquet. Le débit de sève moyen par poquet est calculé à partir de la moyenne des débits de sève mesurés sur chaque tige, ramenés au m² de surface foliaire puis cette moyenne est multipliée par la surface foliaire moyenne d'un poquet.

En 1991, on observe une augmentation du débit de sève moyen en fonction de la surface foliaire du poquet dans les deux parcelles (fig. 61). Dans la gamme de 0.6 à 0.9 m², le débit de sève moyen par unité d'ETP est supérieur dans la parcelle Témoin à celui de la parcelle Compost pour une surface foliaire équivalente.

Fig.61: Effet de l'apport de compost sur le taux de débit de sève moyen du poquet en fonction de sa surface foliaire.

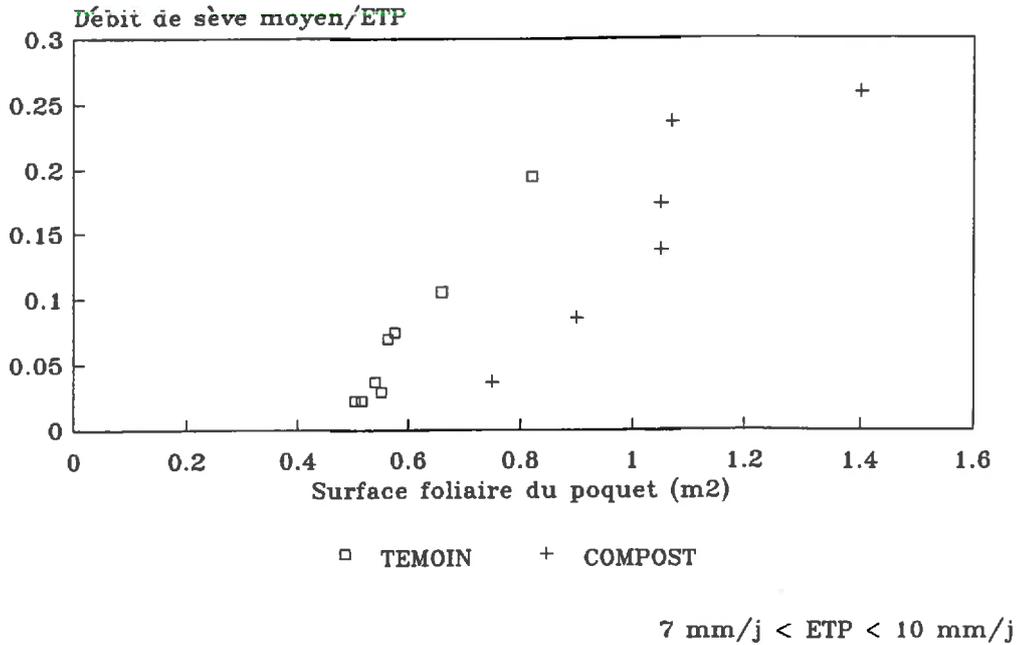
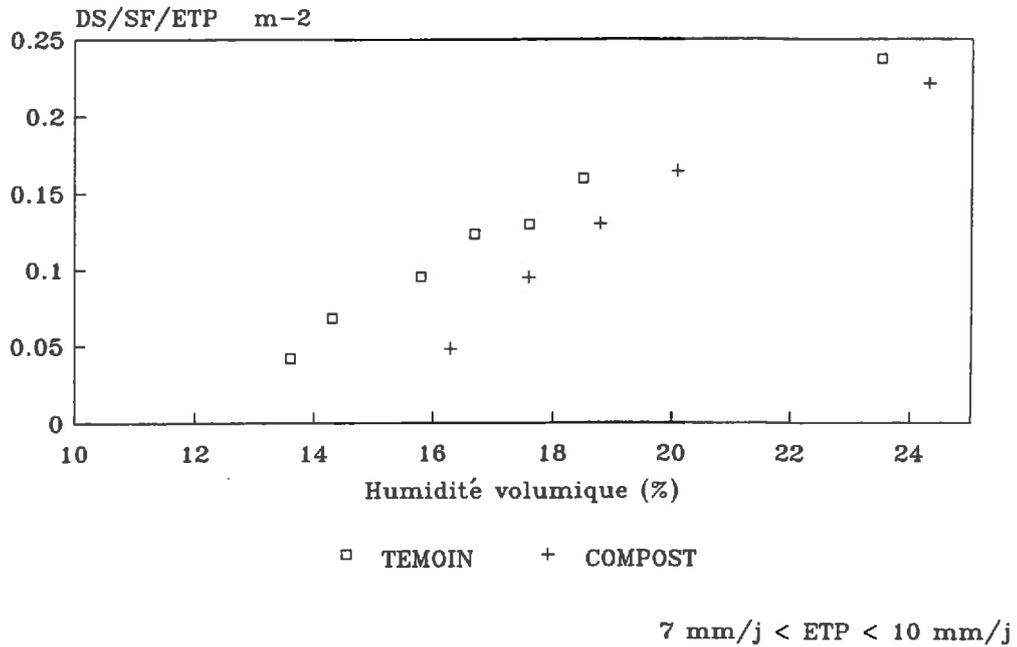


Fig. 62: Effet de l'apport de compost sur le taux de débit de sève en fonction de l'humidité volumique du sol.



Etude du fonctionnement hydrique par rapport à l'offre :

L'humidité relative du sol est calculée à partir des données du bilan hydrique interpolées pour chaque jour. L'utilisation des rapports DS/SF/ETP permet l'étude sur plusieurs jours d'observations.

Dans la gamme d'humidité du sol de 16 à 24 %, le taux de débit de sève DS/SF/ETP est supérieur dans la parcelle Témoin à celui de la parcelle Compost à humidité du sol équivalente (fig. 62). Cependant, les différences s'estompent avec une humidité du sol croissante.

Contre toute attente, l'ensemble de ces résultats montre un moins bon fonctionnement des plantes cultivées sur la parcelle ayant reçu du compost, relativement à la surface foliaire et aussi à l'humidité relative du sol. Ceci est vrai pour la fin du cycle de développement où le stock hydrique de la parcelle Compost s'est épuisé. Pour cette période, l'observation des dynamiques horaires du débit de sève, mesurés sur la parcelle Compost, devrait nous permettre de détecter si les plantes subissent un stress au cours de la journée.

3-5- Dynamiques horaires

L'évolution au cours du temps des débits de sève moyens journaliers pour cette période rend compte de façon plus précise de la différence d'alimentation hydrique entre les deux parcelles. Nous choisirons alors sur cette courbe, les jours pour un examen détaillé des dynamiques horaires de débit de sève.

Les figures 63 et 64 montrent respectivement pour les années 1990 et 1991, un plus fort débit de sève moyen sur la parcelle Témoin que sur la parcelle Compost. Les valeurs de rayonnement global sont reportées sur la figure pour 1990 et les ETP journalières et les hauteurs de pluies pour 1991. En 1990, les débits de sève suivent l'évolution journalière du rayonnement global, bien que les débits mesurés sur la parcelle Compost répercutent faiblement les baisses de R_g pour les jours 77 et 79, ce qui peut s'expliquer par un niveau déjà faible de flux de sève. En 1991, l'évolution des débits de sève suit l'évolution de l'ETP au cours du temps jusqu'à 59 jours après levée puis les débits de sève chutent dans les deux parcelles malgré des ETP élevées, parallèlement au dessèchement de la surface foliaire. A 63 jours après levée, on ne mesure plus de débit de sève dans la parcelle Compost alors que le débit de sève moyen de la parcelle Témoin se maintient à une valeur très faible.

Nous retiendrons les jours 53 et 54 de l'année 1991 où les mesures de débit de sève sur les deux parcelles sont synchrones pour l'observation des débits de sève horaires :

Sur la figure 65 sont reportées les courbes de débit de sève horaire moyen par m^2 de surface foliaire, mesuré sur les parcelles Témoin et Compost. L'évolution du rayonnement global indique l'heure où la demande climatique est maximale. Pour le jour 53 après semis,

on observe un décrochage du flux mesuré sur la parcelle Compost situé à 9h30, avant que le rayonnement global n'atteigne son maximum horaire vers midi, alors que le flux mesuré sur la parcelle Témoin augmente régulièrement et parallèlement à l'évolution de la demande climatique. Cependant, le flux sur la parcelle Compost reprend immédiatement après 9h30 pour atteindre un pic horaire à midi comme le flux mesuré sur la parcelle Témoin. Le jour 54, après les 6 mm de pluies tombées la veille (fig. 64), la courbe horaire du débit de sève de la parcelle Compost ne présente plus de décrochage et augmente régulièrement bien qu'en retard par rapport à l'évolution du rayonnement global. Les pics horaires sont synchrones dans les deux traitements.

4- Discussion

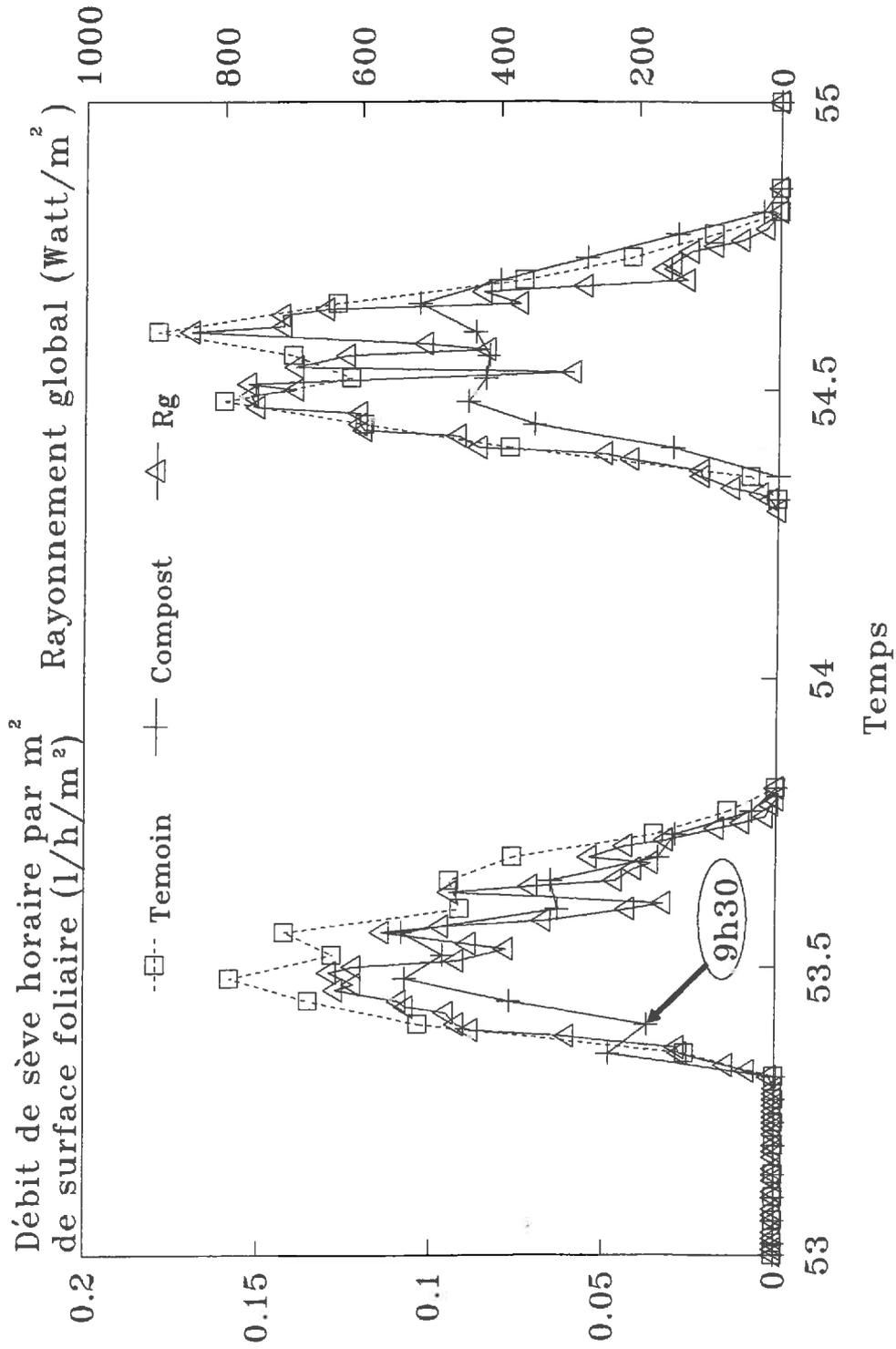
L'examen du débit de sève horaire de la parcelle Compost ne décèle pas nettement de stress hydrique, selon la courbe type définie dans le premier chapitre (cf. fig. 47) car malgré un décrochage en début de matinée, le maximum horaire est simultanément à celui de la parcelle Témoin et correspond à l'heure où la demande climatique est la plus forte. Cependant, on sait que le stock hydrique de la parcelle Compost a fortement diminué à partir de 45 jours après levée. Avec une réserve en eau plus importante, les plantes cultivées au champ ne répondent pas aussi fortement et rapidement au déficit hydrique que les plantes cultivées en pot. Ceci pourrait expliquer l'absence d'effet de la contrainte hydrique sur les courbes horaires du débit de sève. Les courbes horaires de débit de sève du mil obtenues en réponse à un stress hydrique en pot (cf. fig. 45) ne sont pas observées au champ. Ces résultats sont en concordance avec les observations de VALANCOGNE (com. pers.) sur arbres fruitiers stressés au champ.

Par un effet positif, en début de culture, sur la croissance de la plante, tant au niveau racinaire que foliaire, l'apport de compost entraîne une alimentation hydrique supérieure tant que le stock hydrique du sol le permet. Puis, l'alimentation hydrique par rapport à la surface foliaire et à l'humidité relative du sol est pénalisée dès que l'offre en eau diminue, ce qui correspond dans le temps à la moitié du cycle. Dans la zone sahélo-soudanienne où les pluies sont faibles et surtout aléatoires, l'apport d'amendement organique peut alors être sans effet sur les rendements et même avoir les effets contraires à ceux recherchés, si l'on considère l'ensemble du cycle de développement. Si l'amendement organique améliore la fertilité des sols dégradés, l'effet sur les rendements de la culture peut devenir négatif en cas de creux pluviométrique en cours d'hivernage. Ces observations confirment les résultats précédents sur l'effet de l'amendement organique (CISSE, 1986; AFFHOLDER, 1992).

5- Conclusion

En fin de cycle, la comparaison du fonctionnement hydrique entre les deux traitements relativement à la surface foliaire et à l'humidité du sol ne montre pas d'effet positif de la

Fig.65 : Dynamique horaire du débit de sève moyen mesuré sur les parcelles Témoin et Compost les jours 53 et 54 après levée en 1991



restauration du sol par amendement organique. Il est alors difficile d'identifier les mécanismes physiologiques induits par la dégradation des sols. Ces résultats sont associés au fait que les stocks hydriques sont devenus différents dans les deux parcelles, au stade où nous avons posé les capteurs de débit de sève. Cette différence d'offre en eau introduit un biais pour la comparaison des consommations hydriques entre les deux parcelles. Le régime hydrique pluvial ne permet pas de se placer dans les conditions adaptées à notre étude en introduisant une variation dans l'offre en eau des deux parcelles. Il apparaît alors nécessaire de contrôler cette offre en eau dans les deux traitements pour comparer des fonctionnements hydriques, *toutes conditions étant égales par ailleurs*. Pour cela, nous avons choisi de suivre l'expérimentation en pot. De plus, cette méthode nous permettra aussi de suivre la transpiration journalière des plantes en début de cycle par des pesées.

CHAPITRE 3 : EFFETS DES SOLS DEGRADÉS SUR L'ALIMENTATION HYDRIQUE AVEC CONTRÔLE DE L'APPORT D'EAU

1- Introduction

Nous nous proposons alors :

- de suivre de façon précise dans le temps, les facteurs de l'offre et de la demande régissant le flux d'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère, à savoir la quantité d'eau disponible dans le sol, la croissance racinaire, la croissance foliaire et la demande évaporative.
- pour comparer, toutes conditions étant égales par ailleurs, la transpiration du mil sur sol dégradé et sur sol restauré,
- et analyser les mécanismes intrinsèques à la plante qui sont à l'origine d'une baisse de l'alimentation hydrique.

2- Dispositif

L'étude a été divisée en deux parties : une première expérimentation porte sur la première partie du cycle (de 0 à 41 jours après le semis), une deuxième jusqu'à la fin de cycle (après la floraison, à 59 jours après semis). Ces deux expérimentations correspondent à deux techniques de mesure du flux hydrique, pesées et mesure de flux de sève, sur des plantes différentes. Pour caractériser la demande climatique, nous avons utilisé l'EVbac dans la première expérimentation. Pour la deuxième expérimentation, disposant d'un équipement plus complet pour les mesures climatiques, nous avons estimé la demande climatique par l'ETP Penman.

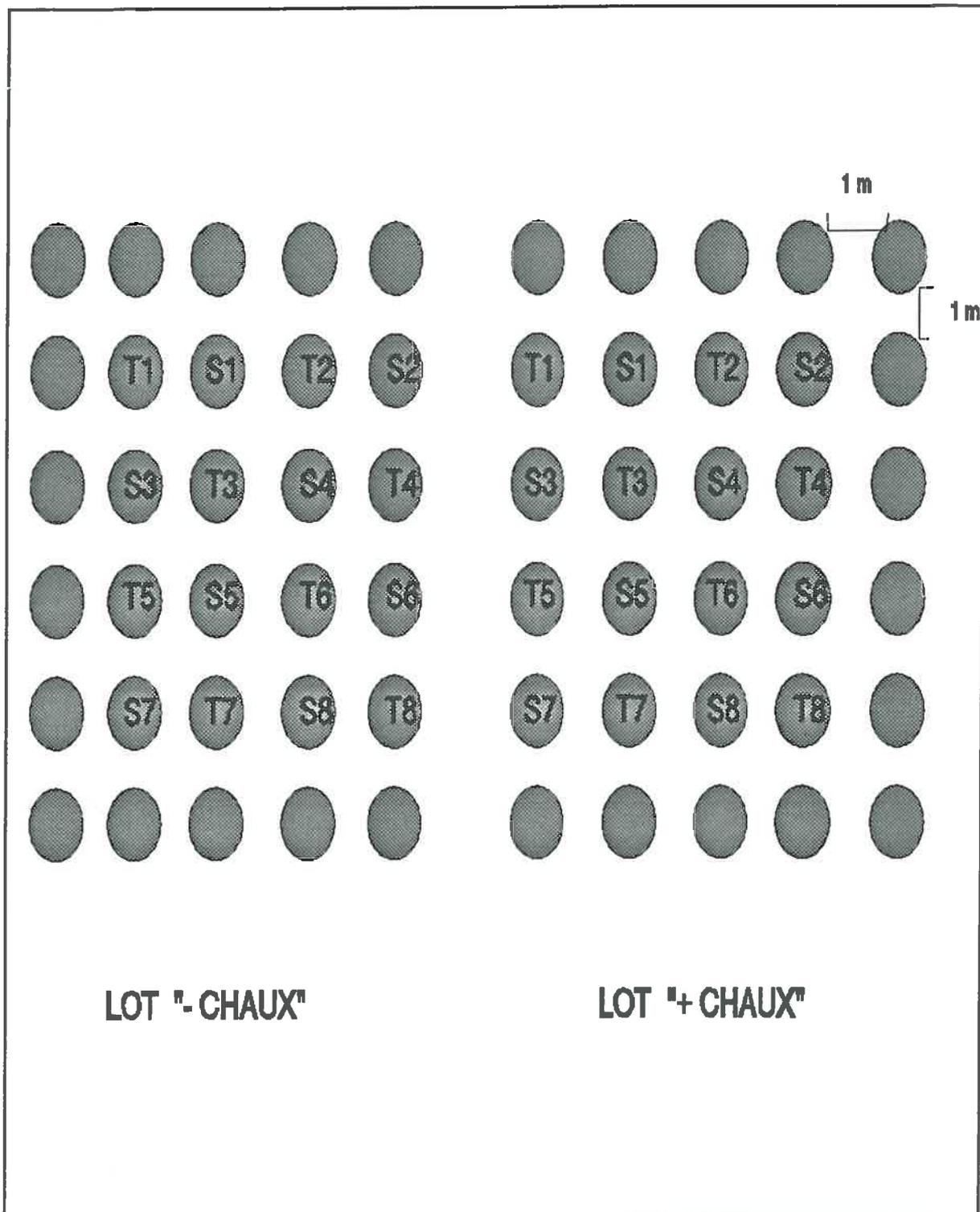


Fig. 66 : Schéma du dispositif de la première expérimentation en pot. T1 à T8 : plantes du lot Témoin, S1 à S8 : plantes du lot Stressé.

On sème trois graines par pot, puis après 5 jours on démarie à raison d'une plante par pot. Les plantes sont séparées en 4 lots de 8 plantes dans la première expérimentation (fig. 66). Dans la deuxième expérimentation, le nombre de capteurs de débit de sève disponibles (12 au total) réduit le nombre de plantes étudiées dans chaque lot : on dispose de trois plantes dans chaque lot élémentaire.

2-1- Caractérisation des conditions de fertilité

Le sol provient d'un site d'expérimentation ISRA de Thilmakha et présente un état de dégradation prononcée tel que les paysans ont abandonné depuis plusieurs années ces terres qui ne produisent plus. Le prélèvement a été effectué après la saison des pluies de 1991. Les résultats de l'analyse de sol (complexe d'échange cationique et solution du sol) utilisé dans les pots, sont présentés dans le tableau 16 :

On observe une faible teneur en éléments minéraux dont le calcium avant restauration (traitement "- chaux"), la teneur étant relevée par apport de chaux (traitement "+ chaux"). L'effet du chaulage se fait aussi nettement sentir en augmentant la CEC et le pH.

Avant l'apport de chaux, le sol présente une teneur en aluminium de 0.17 meq/100 g dans le complexe d'échange cationique soit un taux de saturation en aluminium de 41 % par rapport à la CEC.

La restauration de la fertilité se fait à Bambeby par apport de chaux vive, dont la quantité est calculée en fonction du volume total de terre à amender : 0.3 g de chaux par Kg de sol. De plus, les deux traitements reçoivent de la fumure minérale (engrais tertiaire + urée) à raison de 0.036 g d'N et de 0.0189 g de P_2O_5 , et de K_2O par Kg de sol.

2-2- Régime hydrique

Le régime hydrique est indiqué dans le tableau 17 : chaque lot de plantes, défini par le traitement précédent, est divisé en deux lots élémentaires dont l'un est arrosé sans restriction (cf. fig. 66 : plantes T) et l'autre avec des quantités d'eau limitantes puis nulles (cf. fig. 66 : plantes S). Des quantités d'eau sont apportées en sorte de maintenir l'humidité pondérale du sol, HP (en %) à un niveau choisi. Les apports d'eau correspondant à une humidité pondérale de 10 % sont considérés comme non limitants, tout en évitant un drainage éventuel dans le pot.

Dans la deuxième expérimentation, on a étudié la capacité de récupération des plantes en renouvelant l'arrosage, après arrêt total pendant 3 jours.

Tab. 16 : Analyses du sol prélevé à Thilmakha pour les expérimentations en pots (d'après BABRE, 1992).

a- Le complexe d'échange cationique :

Traitement	Ca	Mg	K	Na	Al	Mn	H	Σ	CEC	pH	Al/CEC
- CHAUX meq/100g	0.13	0.06	0.06	0.04	0.17	0.01	0.04	0.51	0.41	4.67	41 %
+ CHAUX meq/100g	0.59	0.06	0.06	0.04	0.03	0.00	0.01	0.79	0.65	5.41	4 %

la méthode d'analyse est celle de l'apport du cobaltihexamine.

b- La solution du sol

Traitement	Ca	Mg	K	Na	Al	Mn	Fe	NH ₄	pH
- CHAUX mmol/l	55	14.7	70	35.2	0.7	3.8	0.4	0.0	4.20
+ CHAUX mmol/l	121.2	11.4	52.2	37.4	0.0	1.6	5.8	10	6.19

Tab. 17 : Présentation du traitement hydrique pour les lots de plantes stressées

- Pour la 1^{ère} expérimentation (jusqu'au stade 41 jours) :

Jour Après Semis (JAS) :	de 0 à 26	de 32 à 34	de 35 à 41
Humidité Pondérale (HP) :	10 % *	6.6 %	Arrêt de l'arrosage

- Pour la 2^{ème} expérimentation (jusqu'à 90 jours) :

JAS :	de 0 à 62	de 63 à 66	de 67 à 69	de 70 à 90
HP :	6.6 %	Arrêt de l'arrosage	Reprise	Arrêt de l'arrosage

* Les quantités d'eau sont apportées en sorte de maintenir l'humidité pondérale du sol, HP (en %) à un niveau choisi. Les apports d'eau correspondant aux humidités pondérales de 10 % et 6.6 % sont considérés comme non limitants, tout en évitant un drainage éventuel dans le pot.

Fig.67: Evolution de la surface foliaire verte au cours du temps de 0 à 40 JAS.

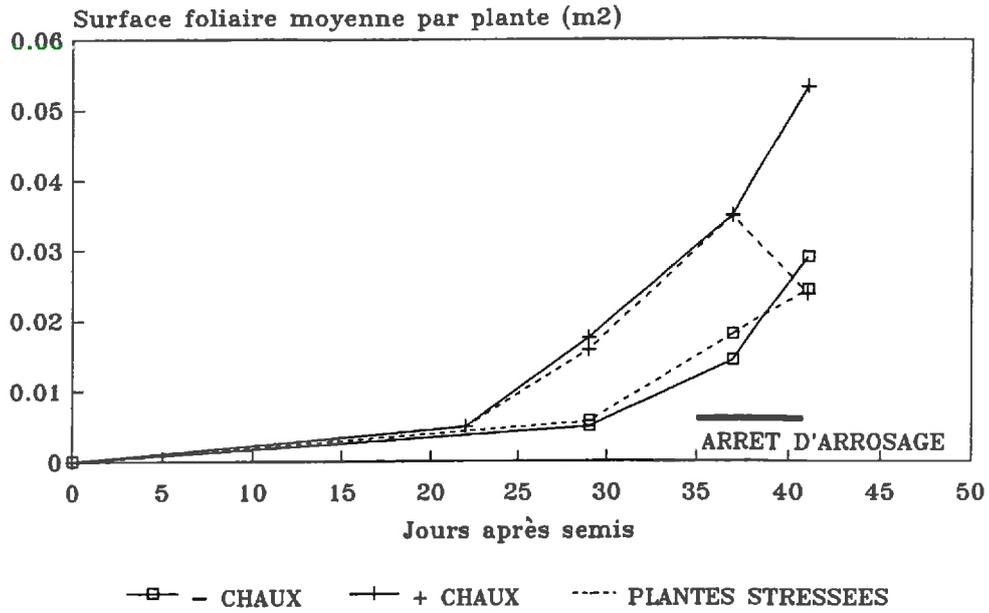
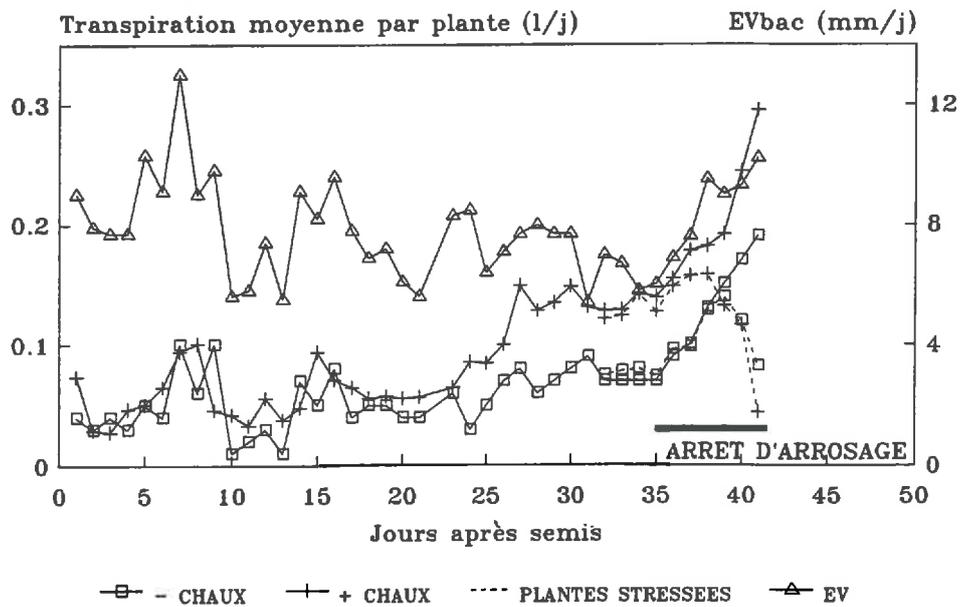


Fig.68: Evolution de la transpiration moyenne journaliere par plante



3- Résultats

3-1- Évolution des surfaces foliaires au cours du traitement et relation avec la transpiration moyenne

3-1-1- Première partie du cycle

L'évolution de la surface foliaire verte au cours du temps est comparée entre les deux lots de plantes (fig. 67). On observe à partir de 22 JAS un effet positif de l'apport de chaux sur la surface foliaire. A 32 JAS, la réduction de l'arrosage pour obtenir une humidité pondérale du sol de 6 % (cf. Tab. 17), n'a pas d'effet sur l'évolution de la surface foliaire, dans les deux lots. L'arrêt de l'arrosage de 35 à 41 JAS, provoque à 37 JAS, une diminution nette de la surface foliaire verte moyenne par plante du lot "+ chaux". Cette diminution est due à une sénescence précoce des feuilles déjà formées. Pour le lot "- chaux", l'effet de l'arrêt de l'arrosage est plus tardif et s'exprime par un ralentissement dans la croissance de la surface foliaire moyenne totale par plante.

L'évolution de la transpiration moyenne journalière par plante (fig. 68) est, de même, comparée entre les deux lots de plantes : la transpiration suit les variations journalières de l'EVbac. Parallèlement à l'évolution de la surface foliaire, la transpiration du lot "+ chaux" augmente sensiblement à 22 JAS, par rapport à la transpiration du lot "- chaux".

De même que sur la surface foliaire, la réduction de l'arrosage pour obtenir une humidité du sol de 6 %, reste sans effet sur la transpiration des deux lots de plantes. L'arrêt total de l'arrosage à 35 JAS provoque une diminution plus importante de la transpiration du lot "+ chaux" que dans le lot "- chaux". Cette diminution de la transpiration moyenne par plante correspond pour chaque lot, à la date de diminution de sa surface foliaire (fig. 67), à savoir 37 JAS pour le lot "+ chaux" et 40 JAS pour le lot "- chaux".

3-1-2- Deuxième partie du cycle

L'évolution de la surface foliaire verte des tiges (fig. 69) est comparée entre les deux lots de plantes. Entre les différentes dates de mesures, les points sont extrapolés par des droites. On se situe en phase de sénescence foliaire dans les deux lots de plantes. Sur les plantes bien irriguées, la surface foliaire des tiges des plantes cultivées sur sol restauré par apport de chaux est, à 59 JAS, supérieure à celle des tiges des plantes cultivées sur sol dégradé. Puis, la sénescence foliaire est plus prononcée en présence de chaux telle qu'à 75 JAS, les surfaces foliaires des tiges appartenant aux plantes non stressées des deux lots deviennent équivalentes.

L'arrêt de l'arrosage après 63 JAS provoque une sénescence importante des feuilles des plantes cultivées sur sol restauré par apport de chaux. La reprise de l'arrosage après 66 JAS ne permet pas d'enrayer le dessèchement foliaire contrairement aux plantes cultivées sur

Fig.69: Evolution de la surface foliaire verte au cours du temps de 59 à 75 JAS.

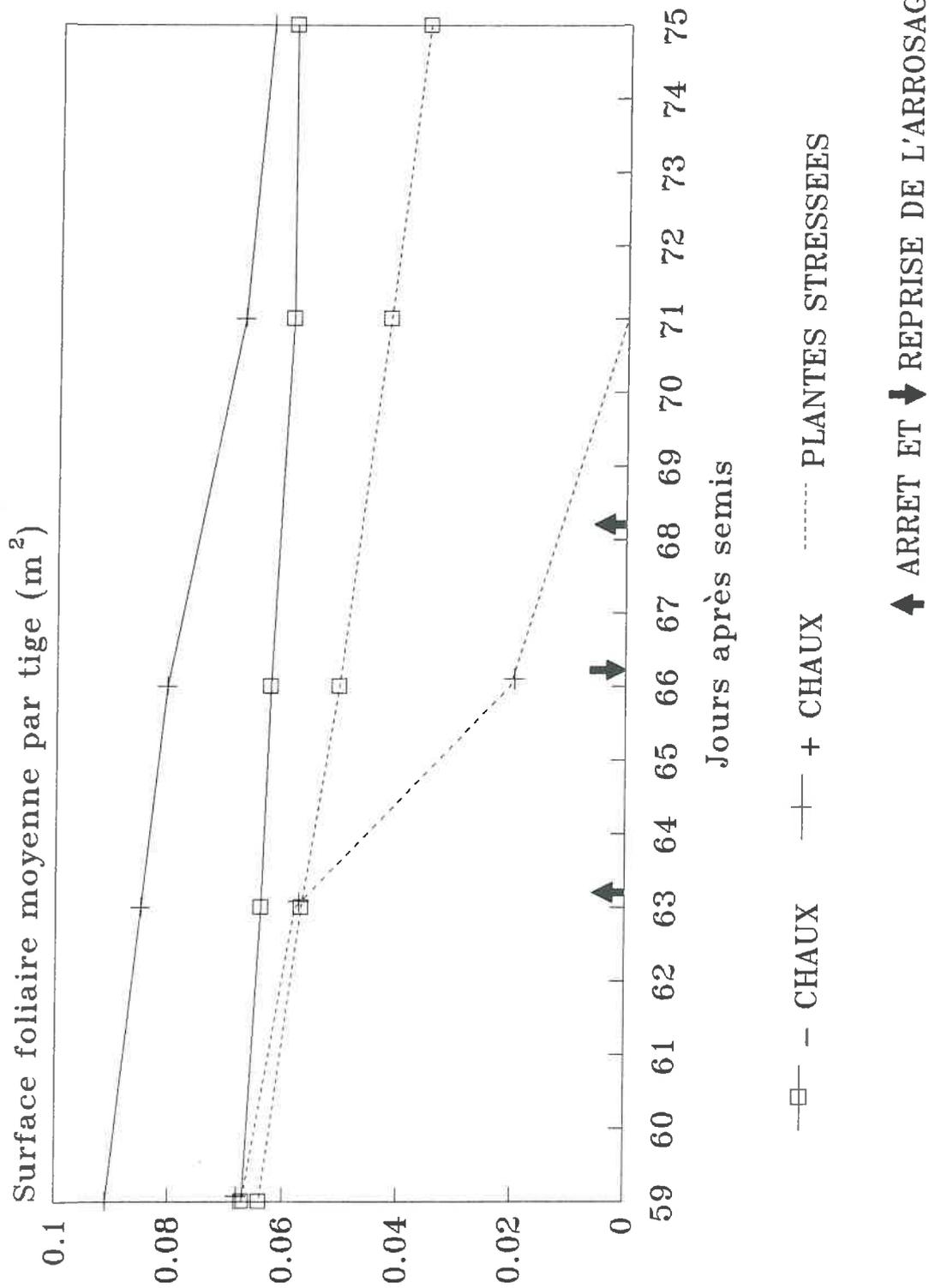
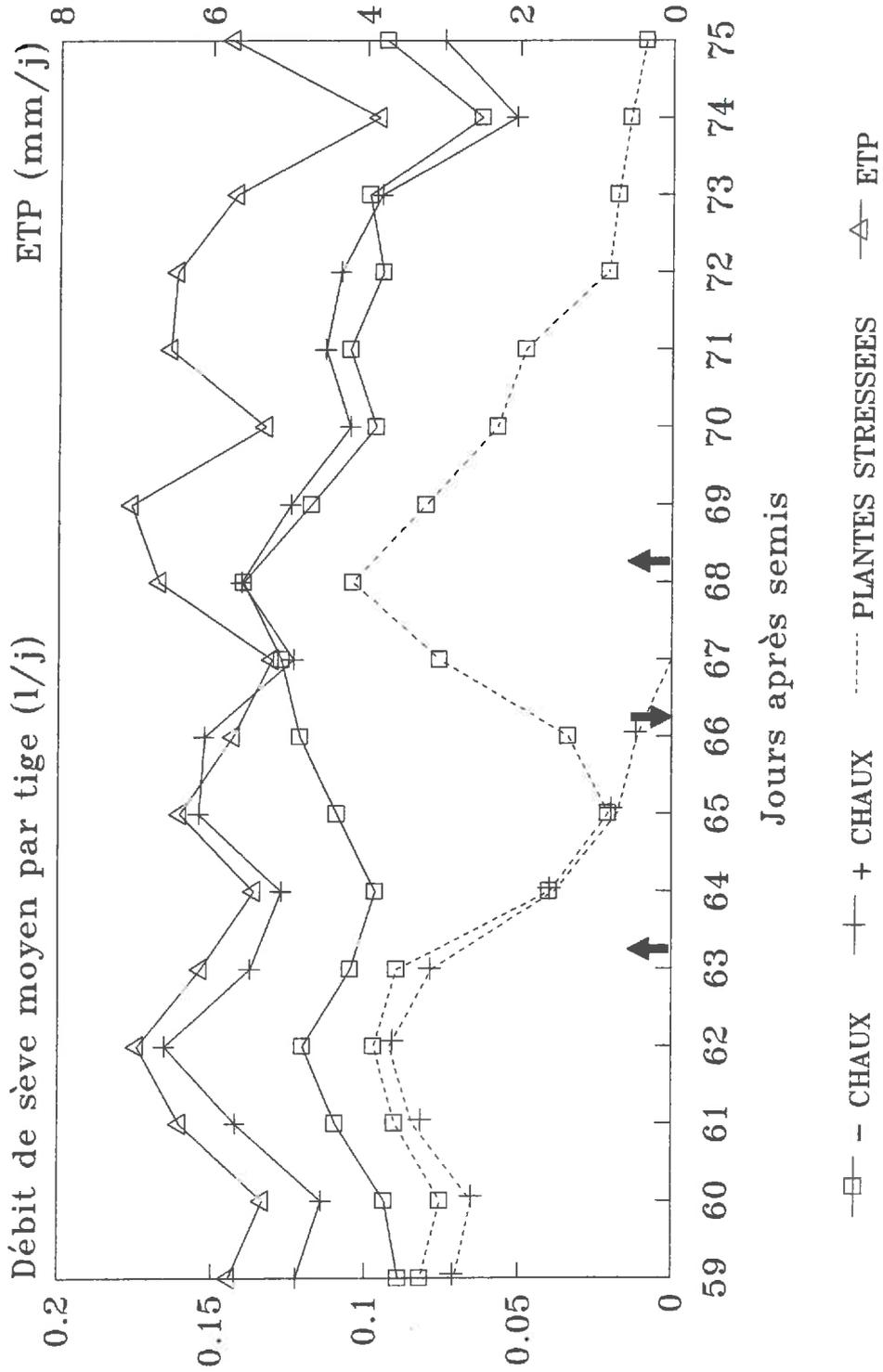


Fig.70: Evolution du débit de sève moyen par tige au cours du temps



↑ ARRET ET ↓ REPRISSE DE L'ARROSAGE

sol dégradé.

L'évolution du débit de sève moyen par tige est comparée entre les deux lots de plantes (fig. 70). L'évolution de l'ETP Penman au cours du temps permet de comprendre les fluctuations inter-journalières du débit de sève moyen des plantes bien arrosées, dues à la demande évaporative.

Parallèlement à la surface foliaire, le débit de sève moyen des tiges des plantes bien alimentées en eau est supérieur dans le lot "+ chaux" à celui du lot "- chaux" puis devient égal à partir de 67 JAS. Trois jours après l'arrêt de l'arrosage, le débit de sève moyen des tiges appartenant aux plantes cultivées sur sol restauré par apport de chaux chute fortement. Puis suite à une surface foliaire complètement desséchée, le débit de sève moyen est alors trop faible, à la reprise de l'arrosage, pour être mesuré par les capteurs. Ces tiges ne peuvent récupérer à la reprise de l'arrosage et sont abandonnées pour l'étude du deuxième stress hydrique à partir de 69 JAS.

Pour le lot "- chaux", le débit de sève moyen par tige diminue consécutivement au premier arrêt de l'arrosage. La reprise de l'arrosage après 66 JAS permet au débit de sève des tiges appartenant aux plantes préalablement stressées d'atteindre le niveau de débit de sève observé avant le stress hydrique. La récupération est donc totale dans le lot "- chaux" après le premier arrêt de l'arrosage. Lors du deuxième arrêt, le débit de sève diminue progressivement et tend vers 0 à 75 JAS.

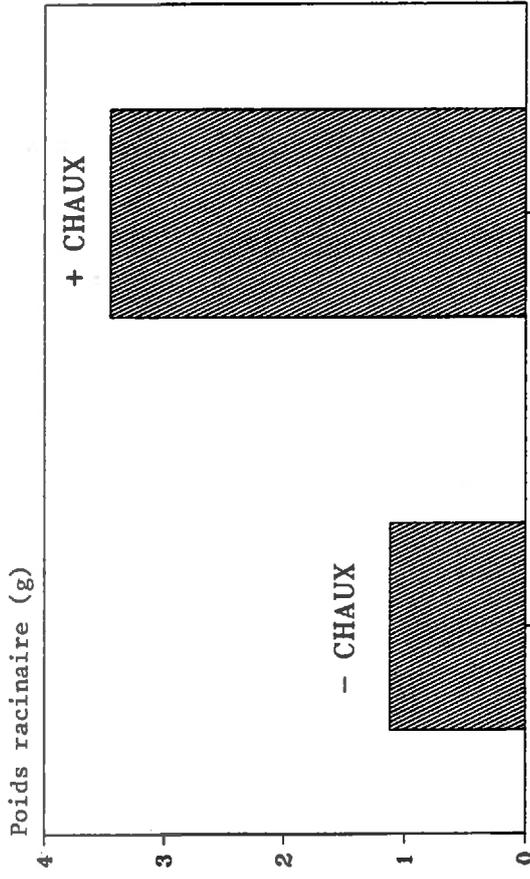
Sur l'ensemble du cycle, pour un apport d'eau non limitant, la chaux augmente la croissance foliaire. Parallèlement, la transpiration ou le débit de sève moyen sont augmentés. Suite à un arrêt de l'arrosage et en présence de chaux, les feuilles sont fortement sensibles au stress hydrique. L'appareil foliaire se dessèche alors plus rapidement que sur sol dégradé et la transpiration ou le débit de sève moyen chute sans possibilité de récupération pour les plantes âgées.

3-2- Effets de l'apport de chaux sur les paramètres racinaires et foliaires

3-2-1- A 41 jours après semis

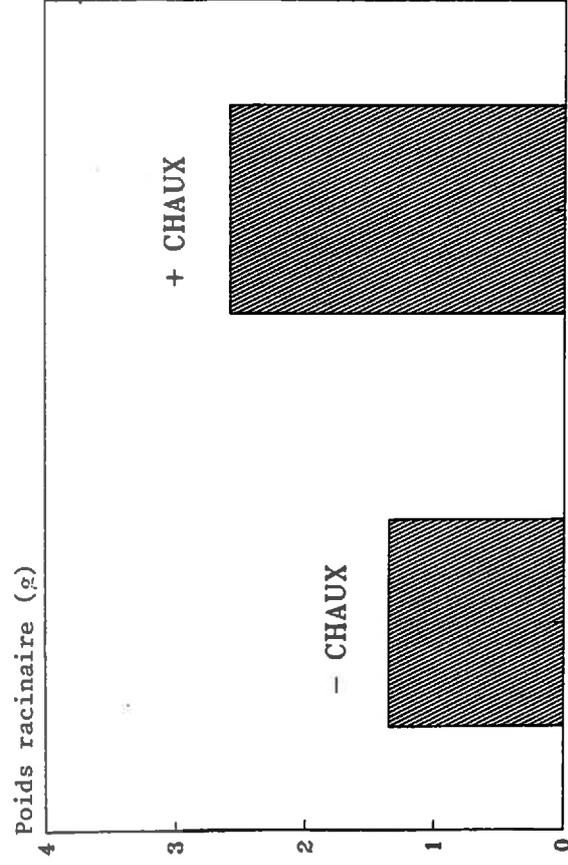
Sur la figure 71 sont comparés les poids de matière sèche de racines par plante, mesurés à la fin du traitement à 41 JAS, dans le lot "- chaux" et le lot "+ chaux", en condition d'apport d'eau non limitant (A), correspondant à une humidité pondérale du sol de 10 % (cf. tab. 17) et en condition d'apport d'eau limitant (B), correspondant à un arrêt de l'arrosage. L'apport de chaux multiplie par un facteur 3 le poids de matière sèche de racines en condition d'apport d'eau non limitant, et par 2 seulement quand l'apport d'eau est

Fig.71: Effet de l'apport de chaux sur le poids racinaire au 41e jour



A - APPORT D'EAU NON LIMITANT

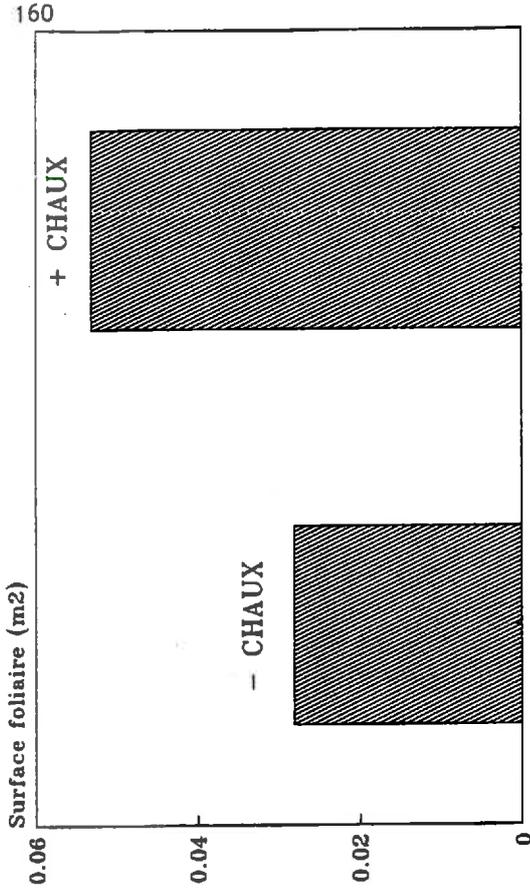
=> x 3



B - APPORT D'EAU LIMITANT

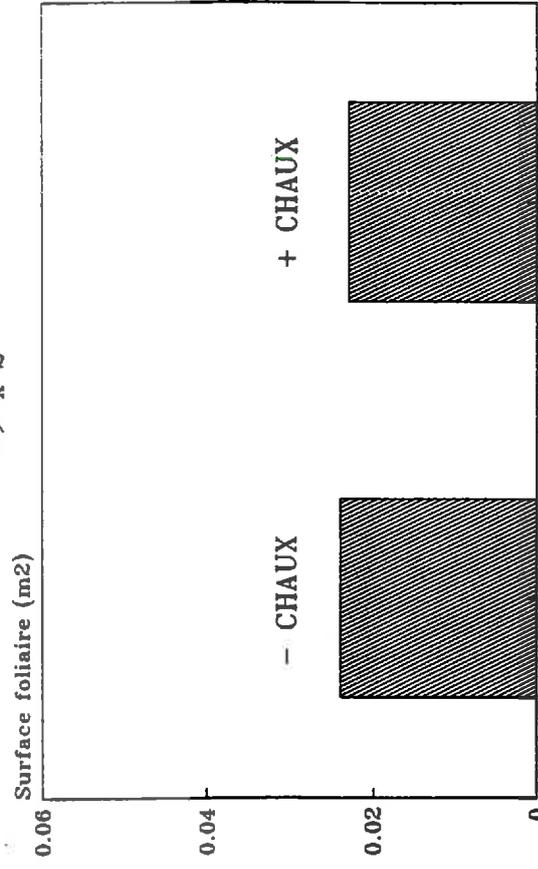
=> x 2

Fig.72: Effet de l'apport de chaux sur la surface foliaire au 41e jour



A - APPORT D'EAU NON LIMITANT

=> x 2



B - APPORT D'EAU LIMITANT

=> =

limitant.

Sur la figure 72 sont comparées les surfaces foliaires par plante, mesurées à la fin du traitement à 41 JAS, dans le lot "- chaux" et le lot "+ chaux", en condition d'apport d'eau non limitant (A) et limitant (B). L'apport de chaux multiplie par un facteur 2 la surface foliaire quand l'eau n'est pas limitante et n'a pas d'effet sur la surface foliaire quand l'eau est limitante.

Sur la figure 73 sont comparés les poids de matière sèche de feuilles par plante, mesurés à la fin du traitement à 41 JAS, dans le lot "- chaux" et le lot "+ chaux", en condition d'apport d'eau non limitant (A) et limitant (B). L'apport de chaux multiplie par un facteur 2.5 le poids de matière sèche de feuilles en condition non limitante et par un facteur 1.85 quand l'apport d'eau est limitant.

On remarque que dans le lot "+ chaux", le poids de matière sèche de feuilles est à peine diminué par l'arrêt de l'arrosage (B) par rapport à un apport d'eau non limitant (A), alors que la surface foliaire a été diminuée par 2 (figure 72) par sénescence des feuilles. Ceci peut s'expliquer en partie par une augmentation du poids spécifique des feuilles comme cela est fréquemment observé lors d'un stress hydrique (BLANCHET et al., 1977) mais surtout provenir de la prise en compte des parties foliaires desséchées dans la mesure de la matière sèche. Les rapports entre les poids de matière sèche de racines et de feuilles pour chaque lot en condition d'apport d'eau limitant ou non, sont indiqués dans le tableau 18. Alors que le tableau 19 présente les rapports exprimés en poids de matière sèche de racines *sur la surface foliaire*.

Tab. 18 : Effet de l'apport de chaux sur le rapport poids de matière sèche de racines/ poids de matière sèche de feuilles à 41 JAS, en condition d'apport d'eau limitant ou non

	- CHAUX	+ CHAUX
Apport d'eau non limitant	0.75	0.92
Apport d'eau limitant	0.83	0.85

Selon le paramètre foliaire (poids ou surface) utilisé dans le calcul du rapport racines/feuilles, les résultats sont différents :

- le rapport entre les poids de matière sèche de racines et de feuilles n'a pas été modifié par l'apport de chaux en condition d'apport d'eau limitant (Tab. 18).
- par contre, l'apport de chaux a doublé le rapport poids de matière sèche de racines/surface foliaire en condition d'apport d'eau limitant (Tab. 19).

Fig.73: Effet de l'apport de chaux sur le poids foliaire au 41e jour

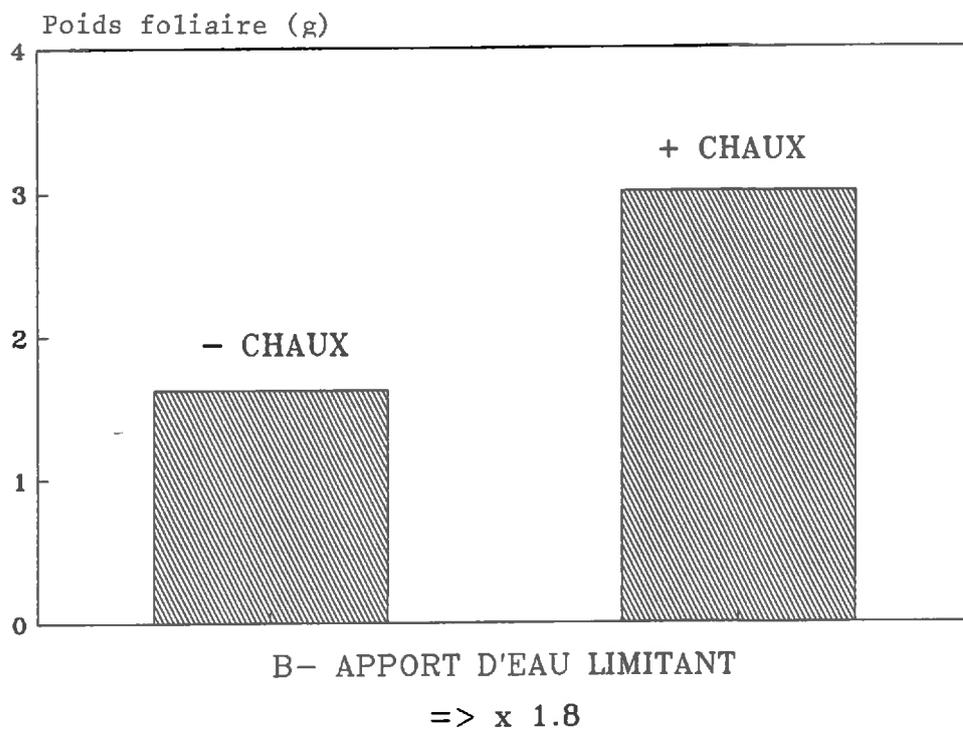
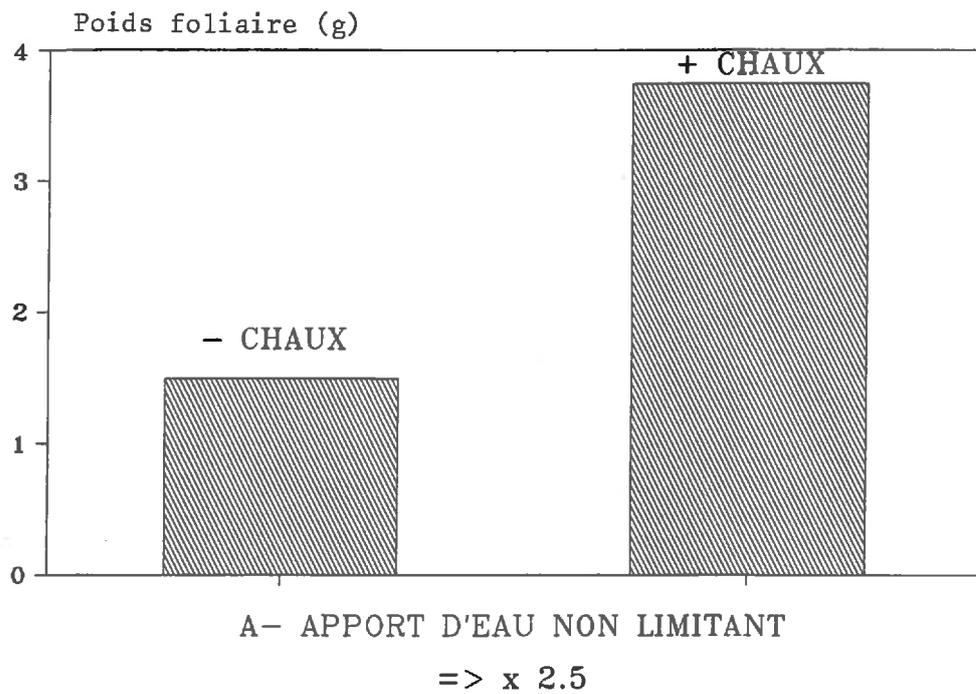
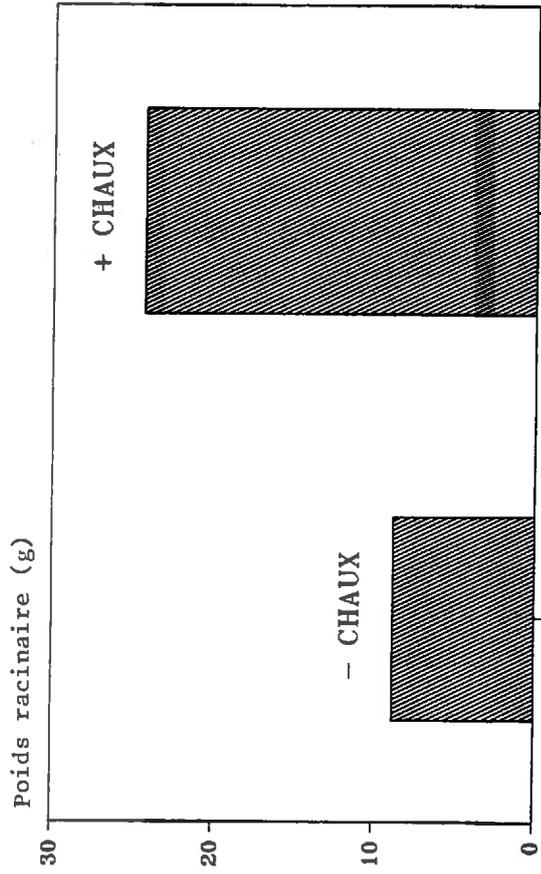
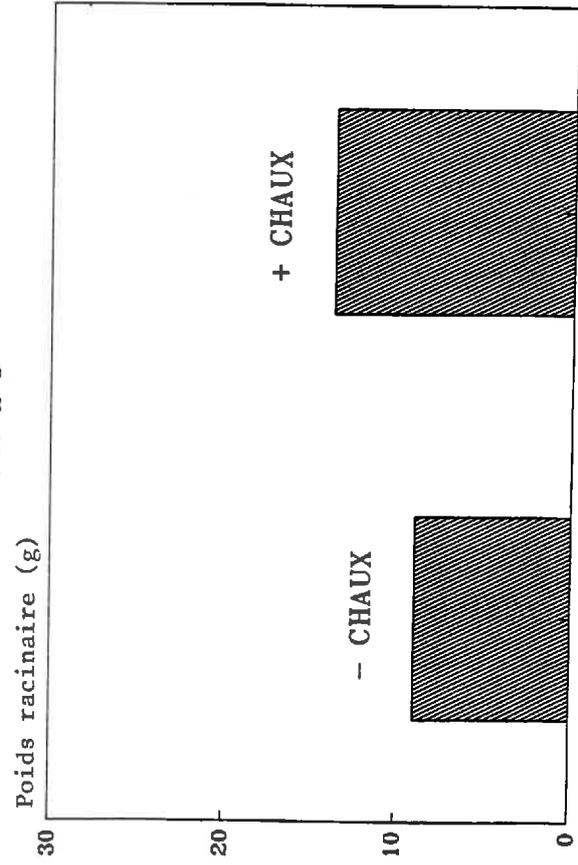


Fig.74: Effet de l'apport de chaux sur le poids racinaire au 90e jour



A - APPORT D'EAU NON LIMITANT

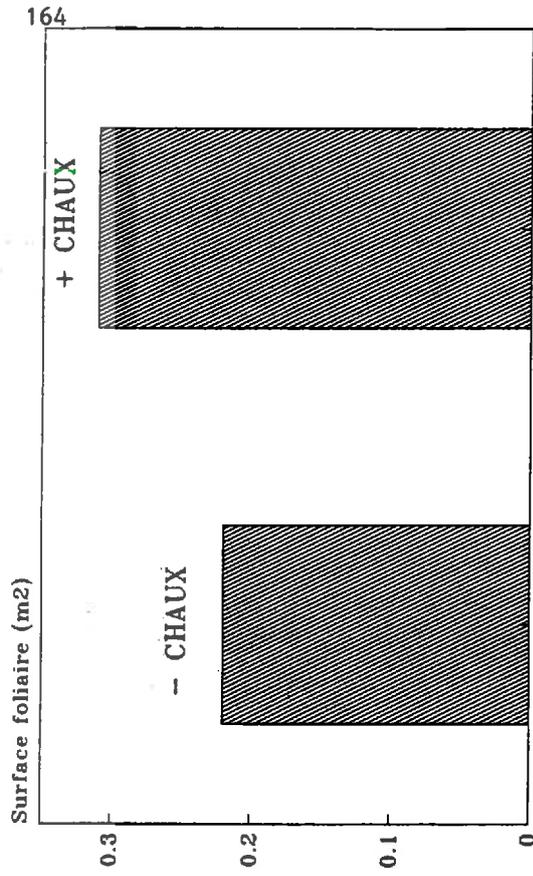
=> x 3



B - APPORT D'EAU LIMITANT

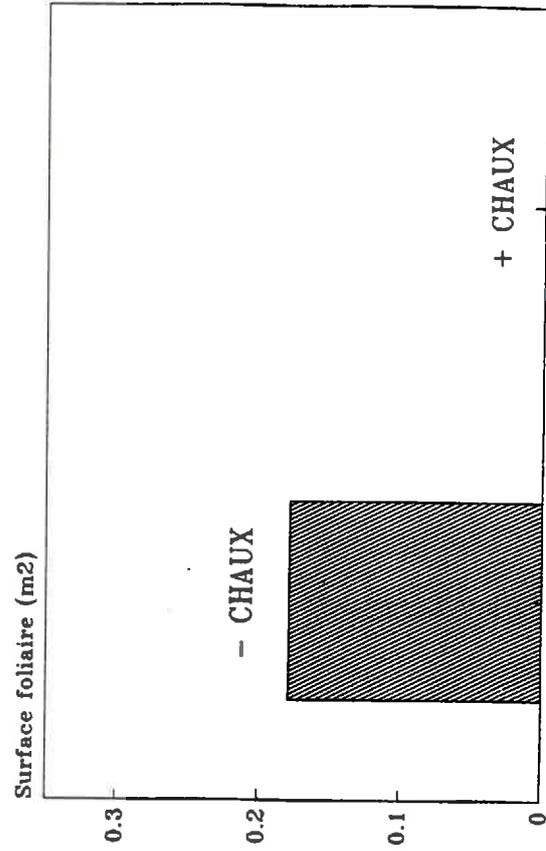
=> x 1.5

Fig.75: Effet de l'apport de chaux sur la surface foliaire au 71e jour



A - APPORT D'EAU NON LIMITANT

=> x 1.4



B - APPORT D'EAU LIMITANT

164

Tab. 19 : Effet de l'apport de chaux sur le rapport poids de matière sèche de racines /surface foliaire (en g/m²) à 41 JAS, en condition d'apport d'eau limitant ou non

	- CHAUX	+ CHAUX
Apport d'eau non limitant	40	65
Apport d'eau limitant	56	112

On a vu que le poids de matière sèche de feuilles n'était pas représentatif de la surface foliaire verte, effectivement photosynthétisante, en condition d'apport d'eau limitant, notamment sur sol restauré par apport de chaux. Le rapport entre les poids de matière sèche de racines et de feuilles n'est donc pas explicatif pour notre analyse de l'importance respective des facteurs de l'offre et de la demande au niveau de la plante dans l'alimentation hydrique. Ainsi, on préférera l'utilisation de la surface foliaire à celle du poids de matière sèche de feuilles pour calculer le rapport racine/feuille. La surface de feuille définissant la surface d'échange du rayonnement et des gaz (CO₂, eau), il est souhaitable de la privilégier. Les longueurs racinaires auraient été intéressantes pour obtenir un rapport homogène, mais cela était plus difficile sur le plan des mesures.

3-2-2- En fin de cycle

Sur la figure 74 sont comparés les poids de matière sèche de racines par plante, mesurés à la fin du traitement, dans le lot "- chaux" et le lot "+ chaux", en condition d'apport d'eau non limitant (A) et en condition d'apport d'eau limitant (B). L'apport de chaux multiplie par un facteur 3 le poids de matière sèche de racines en condition d'apport d'eau non limitant et par 1.5 seulement quand l'eau est limitante.

Sur la figure 75 sont comparées les surfaces foliaires par plante, mesurées à 71 JAS dans les deux lots, en condition d'apport d'eau non limitant (A) et limitant (B). L'apport de chaux multiplie par un facteur 1.4 la surface foliaire quand l'eau n'est pas limitante. Un apport d'eau limitant sur sol restauré par apport de chaux provoque un dessèchement complet des feuilles.

Les rapports entre le poids de matière sèche racinaire et la surface foliaire pour chaque lot sont reportés dans le tableau 20.

On observe que l'apport de chaux (Tab. 20) :

- en condition d'apport d'eau non limitant : a augmenté le rapport racine/feuille à 71 JAS de 48 % essentiellement par un accroissement du poids de matière sèche racinaire

(fig. 74 A), et dans une moindre mesure par l'augmentation de la surface foliaire (fig. 75 A).

- en condition d'apport d'eau limitant : la chaux a augmenté le poids de matière sèche de racines mais surtout a induit un dessèchement complet des feuilles à 71 JAS, tel que le rapport racine/feuille n'est plus calculable.

Tab. 20 : Effet de l'apport de chaux sur le rapport poids de matière sèche de racines /surface foliaire (en g/m²) à 71 JAS en condition d'apport d'eau limitant ou non.

	- CHAUX	+ CHAUX
Apport d'eau non limitant	40	78
Apport d'eau limitant	50	-

Sur l'ensemble du cycle et quelque soit l'apport d'eau, la chaux a augmenté la croissance racinaire plus fortement que la croissance foliaire. Pour un apport d'eau non limitant, la chaux a permis une augmentation du rapport racines/feuilles de 38 à 48 % selon le stade de développement. Conformément aux résultats du paragraphe précédent, on observe qu'en présence de chaux et pour un apport d'eau limitant, une sénescence foliaire prononcée.

3-3- Relation entre la transpiration et les facteurs de la demande

3-3-1- Première partie du cycle

Le fonctionnement des plantes dans les deux traitements est comparé en fonction de la surface foliaire, pour un apport d'eau donné. Pour réduire les fluctuations de la transpiration dues à la demande climatique, nous avons choisi des journées où les EVbac ne diffèrent que de 1 à 2 mm/jour. Toutes les conditions (humidité pondérale du sol, demande évaporative) sont constantes, seule la surface foliaire est variable. La comparaison est faite d'une part :

a- pour un apport d'eau non limitant correspondant à HP > 9 % (fig. 76).

Les points de chaque traitement sont ajustés selon des courbes du type :

$$Y = A + B \cdot \log X,$$

où Y : TR (l/j), et X : Surface foliaire (m²).

Fig.76:Effet de l'apport de chaux sur la transpiration en fonction de la surface foliaire avec stock en eau non limitant

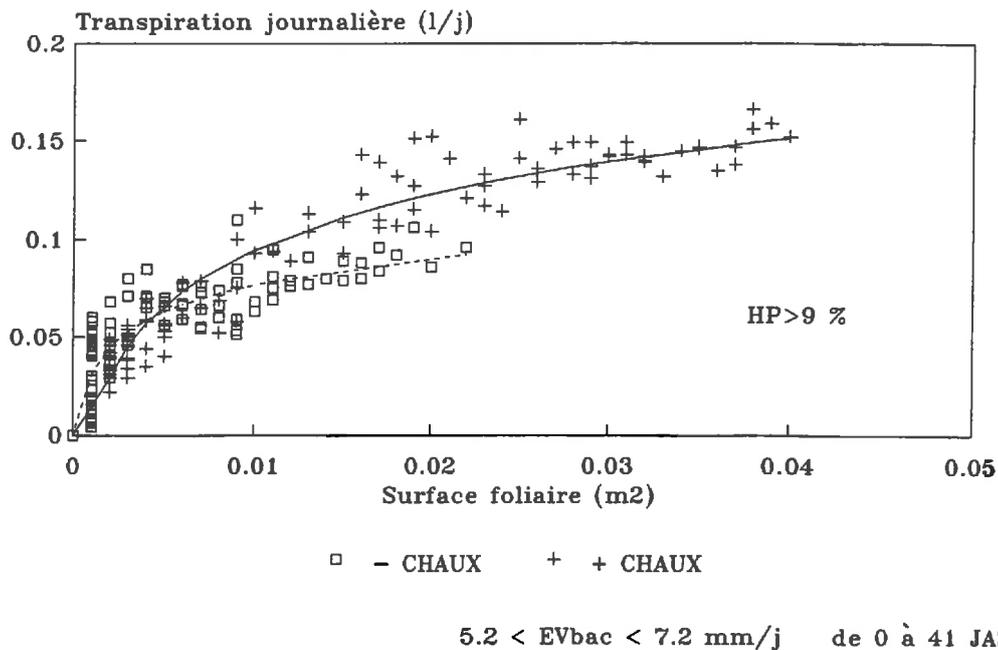
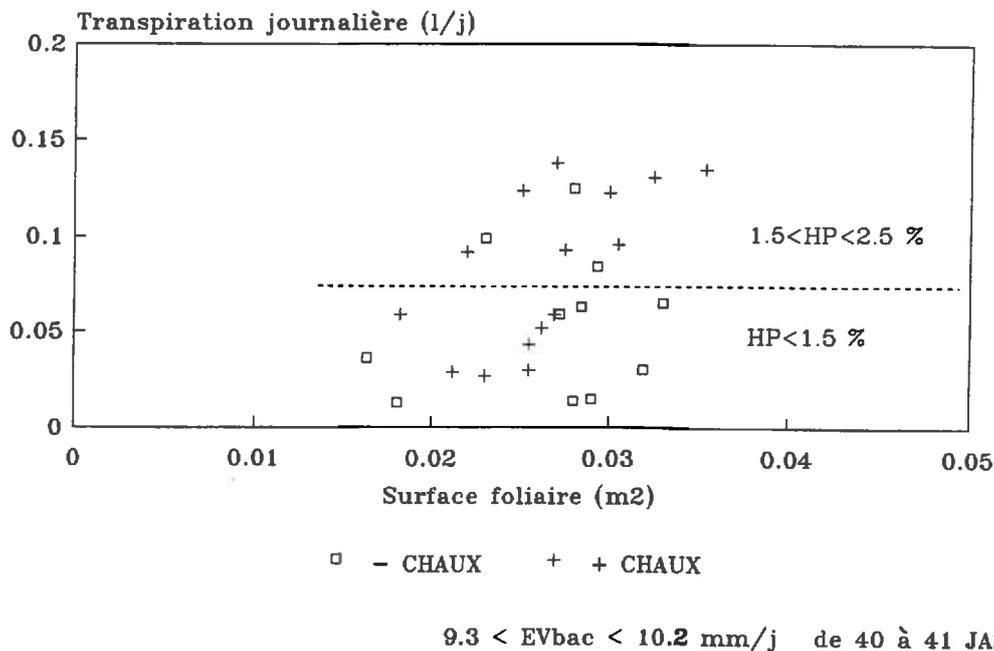


Fig.77:Effet de l'apport de chaux sur la transpiration en fonction de la surface foliaire pour un stock en eau limitant



L'allure générale des deux courbes est identique : on observe une phase d'augmentation rapide de la transpiration en fonction de la surface foliaire jusqu'à des surfaces foliaires atteignant 0.005 m^2 . Cette première phase correspond à la croissance foliaire observée de 0 à 22 jours après le semis (cf. fig. 69). Puis s'installe une deuxième phase plus lente qui commence dans les deux traitements pour un même indice foliaire de 0.02 : le plafonnement observé n'est donc pas dû à un recouvrement des feuilles. On peut présumer une légère régulation stomatique pour satisfaire une demande croissante en présence d'une réserve hydrique malgré tout limitée par la culture en pot par rapport à celle disponible au champ.

A partir d'une surface foliaire supérieure à 0.005 m^2 , en présence de chaux la transpiration journalière est augmentée pour une surface foliaire donnée, en présence de chaux. Cet effet s'amplifie pour des surfaces foliaires croissantes. Dans la gamme de surface foliaire de 0.01 à 0.02 m^2 , l'analyse de variance sur les deux lots montre un effet significatif au seuil de 1 pour mille de l'apport de chaux sur la transpiration moyenne. Pour une surface foliaire de 0.02 m^2 , la transpiration moyenne sur sol chaulé atteint 0.12 l/jour , contre 0.09 l/jour sur sol dégradé.

Cet effet en présence de chaux s'ajoute à l'effet sur l'augmentation de la croissance foliaire au cours du temps, observée à partir de 22 jours après le semis (cf. fig. 69). On observe donc un double effet suite à l'apport de chaux.

Les observations pour lesquelles les surfaces foliaires sont comparables dans les deux lots, c'est-à-dire dans la gamme de 0 à 0.02 m^2 , ne correspondent pas aux mêmes dates : les plantes cultivées sur sol dégradé sont plus âgées. Cependant, avec un écart au maximum de cinq jours, on considère que l'âge physiologique des plantes n'interfère pas sur le comportement des plantes et que la comparaison des transpirations dans les deux traitements pour cette gamme de surface foliaire est cohérente.

b- d'autre part, pour un apport d'eau limitant correspondant à une humidité pondérale du sol $HP < 1.5 \%$ et $1.5 < HP < 2.5 \%$ (fig. 77). Les plantes sont alors âgées de 40 et 41 JAS dans les deux lots, soit à l'arrêt de l'arrosage.

Pour les deux traitements, la transpiration est relativement constante en fonction de la surface foliaire. Des analyses de variance pour chaque gamme d'humidité pondérale ne montrent pas d'effet significatif de la chaux au seuil de 5 % sur la transpiration. La transpiration diminue par contre sensiblement en fonction de l'humidité pondérale. La limitation de l'apport d'eau conduit à des ajustements entre offre et demande dans les deux lots de plantes tels que les pertes en eau des plantes sont équivalentes dans l'intervalle de surface foliaire considéré.

Fig.78:Effet de l'apport de chaux sur le débit de sève en fonction de la surface foliaire avec apport d'eau non limitant

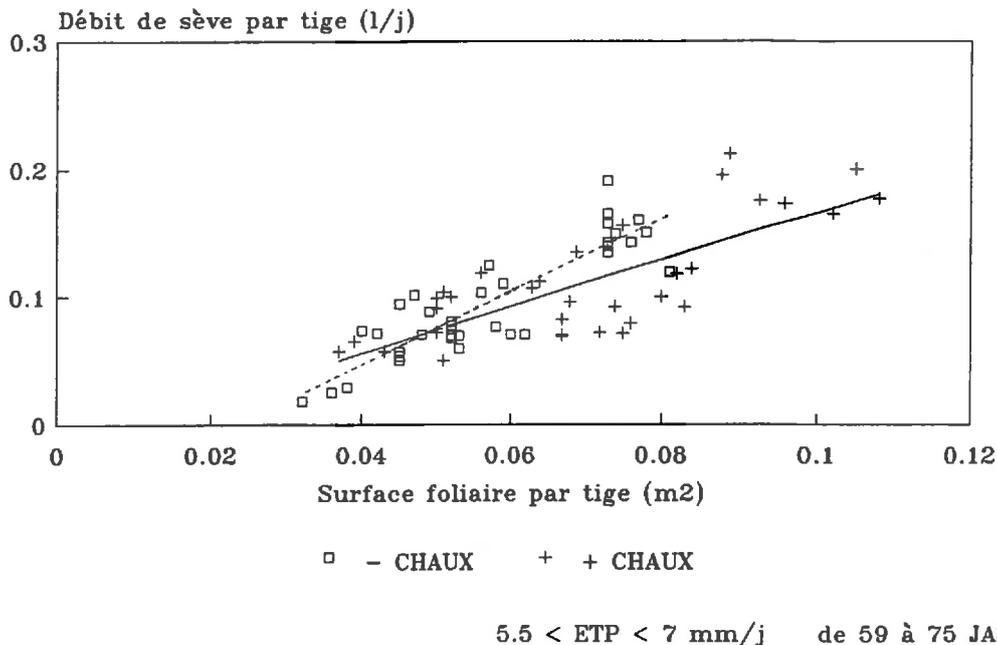
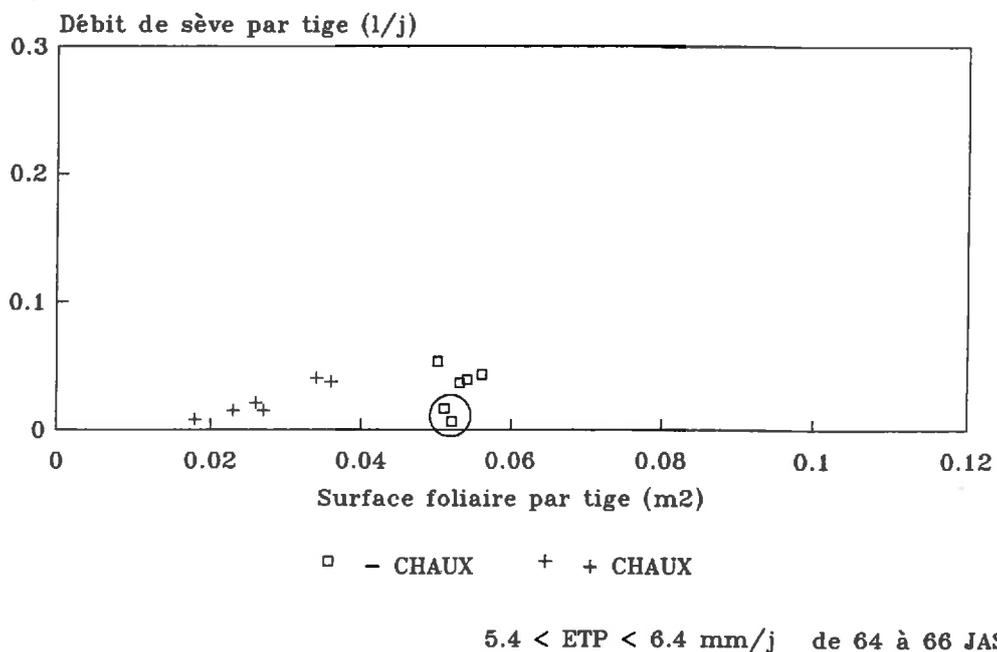


Fig.79:Effet de l'apport de chaux sur le débit de sève en fonction de la surface foliaire lors du premier stress hydrique



3-3-2- Deuxième partie du cycle

De la même façon que pour la première partie du cycle, le fonctionnement des plantes dans les deux traitements est comparé en fonction de la surface foliaire, pour un **apport d'eau donné**. Les débits de sève et les surfaces foliaires utilisés dans cette étude sont ceux mesurés à l'échelle de la tige. La comparaison des débits de sève est faite d'une part :

a- pour un apport d'eau **non limitant** (fig. 78). Le stade de développement s'étale de 59 à 75 JAS pour les plantes sans stress hydrique des deux lots. Durant cette période, nous avons retenu les journées pour lesquelles les ETP sont comprises entre 5.5 à 7 mm/j.

Dans les deux traitements, les débits de sève augmentent en fonction de la surface foliaire. Les plantes cultivées sur sol dégradé ne présentent pas de débit de sève inférieur à celui des plantes cultivées sur sol restauré par apport de chaux pour des surfaces foliaires équivalentes, c'est-à-dire dans la gamme de 0.04 à 0.08 m² par tige. Les droites d'ajustement obtenues par régression linéaire, du type $Y = a + b X$, ne sont pas significativement différentes.

b- pour un apport d'eau **limitant** (fig. 79). Les plantes cultivées sur sol restauré par apport de chaux ayant très rapidement souffert lors du premier stress hydrique, nous disposons de peu d'observations pour ce traitement dans des conditions d'eau limitante. Nous avons donc retenu pour les plantes des deux traitements, la période de dessèchement provoqué par le premier arrêt d'arrosage de 64 à 66 jours après semis. Les ETP varient entre 5.4 et 6.4 mm/j.

Sur sol restauré par apport de chaux, l'augmentation du débit de sève reste proportionnelle à l'augmentation de la surface foliaire. Dans ce traitement, le feuillage ayant fortement diminué, la comparaison entre les débits de sève des tiges dans les deux lots de plantes ne peut se faire à surface foliaire équivalente. Pour les plantes cultivées sur sol dégradé, la gamme de surface foliaire étudiée étant plus étroite, les débits de sève mesurés sur les tiges sont relativement constants et de l'ordre de 0.04 l/j. Cependant, pour des surfaces foliaires de 0.05 m², on observe deux points, entourés sur le graphique, correspondant à des débits de sève très faibles par rapport aux autres observations du même lot. Les deux points correspondent à deux tiges différentes pour le même jour, 65 JAS, en fin de cycle de dessèchement. On étudiera ultérieurement les débits de sève horaires pour cette période afin de détecter un dysfonctionnement hydrique éventuel sur ces deux plantes.

Sur l'ensemble du cycle de développement, les plantes cultivées sur sol dégradé adaptent leur perte en eau quand l'apport d'eau est limitant, de la même façon que les plantes cultivées sur sol restauré par apport de chaux. Par contre, pour un apport d'eau non limitant, les jeunes plantes cultivées sur sol dégradé ont un transfert d'eau diminué (cf. fig. 76).

Fig.80: Effet de l'apport de chaux sur le taux de transpiration en fonction de l'humidité du sol $SF < 0.02 \text{ m}^2$

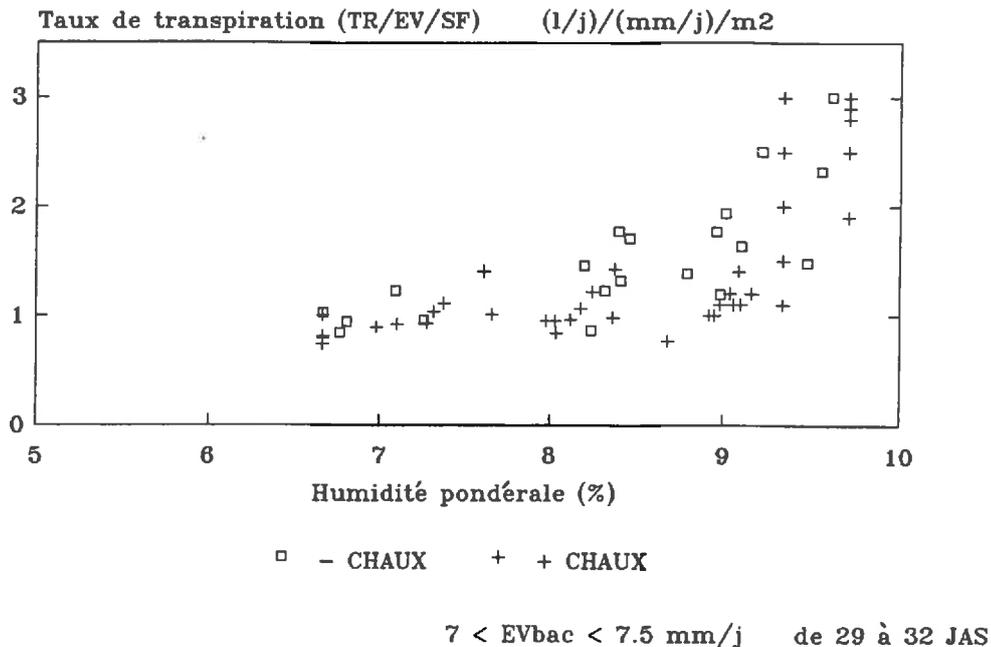
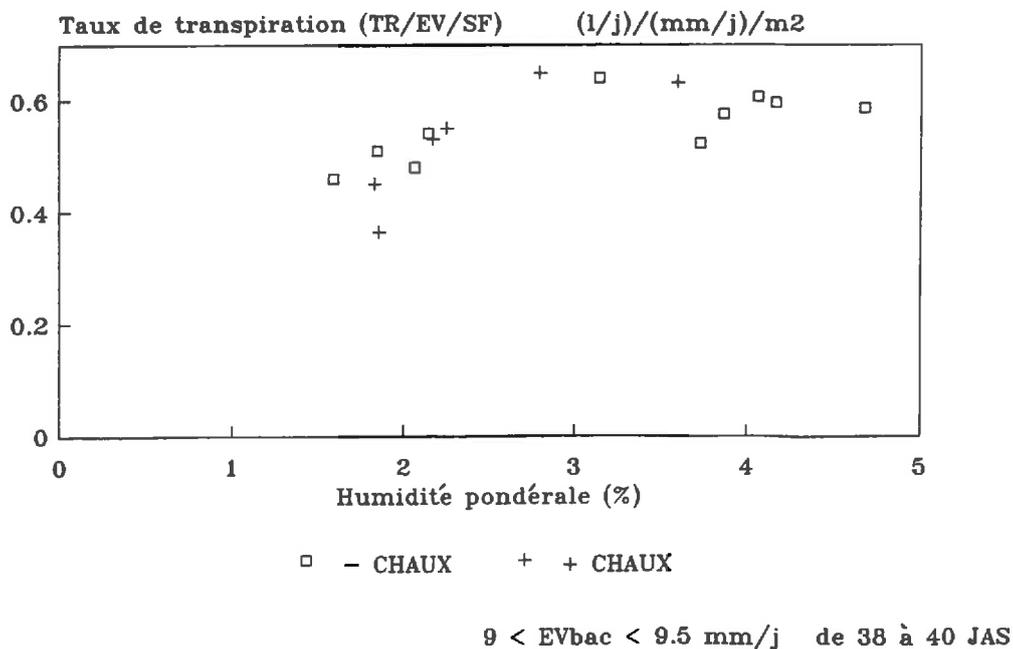


Fig.81: Effet de l'apport de chaux sur le taux de transpiration en fonction de l'humidité du sol $0.02 < SF < 0.03 \text{ m}^2$



Pour expliquer cette baisse, on peut émettre deux hypothèses, sachant que le transfert d'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère est régulé principalement au niveau des stomates et au niveau des racines :

- la diminution du transfert d'eau peut-être due à une **diminution de la conductance stomatique**, auquel cas il faudra identifier les causes possibles (toxicité)

- mais par ailleurs, nous avons vu que même pour un apport d'eau non limitant, la croissance racinaire est affectée sur sol dégradé (fig. 71 A), ce qui peut contribuer à une **réduction de l'offre en eau** (quantité d'eau dans le sol accessible selon le développement racinaire) à humidité du sol égale. Pour vérifier cette deuxième hypothèse, nous allons comparer, sur sol dégradé et sur sol restauré par apport de chaux, les taux de transpiration en fonction de l'humidité du sol.

3-4- Relation entre la transpiration et les facteurs de l'offre

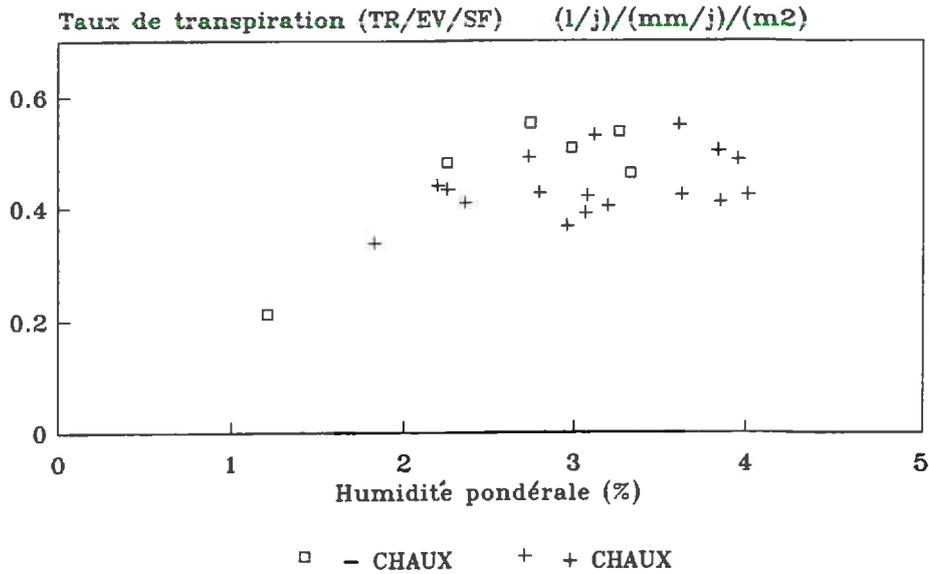
3-4-1- Première partie du cycle

Les observations sont faites pour des humidités pondérales du sol variant de 0 à 9 %. Le stade de développement pour toutes les plantes étudiées (avec stress hydrique) correspond de 29 à 32 JAS pour les humidités les plus fortes et de 38 à 40 JAS pour les humidités les plus faibles. Ces jours ont été choisis pour se situer à des EVbac comparables (Tab. 21).

Nous avons vu précédemment que pour un apport d'eau non limitant, la transpiration augmente légèrement en fonction de la surface foliaire à partir de 0.005 m² dans les deux traitements (cf. fig. 76). Afin de réduire au maximum l'influence de la surface foliaire, nous travaillerons sur des intervalles de 0.01 m² :

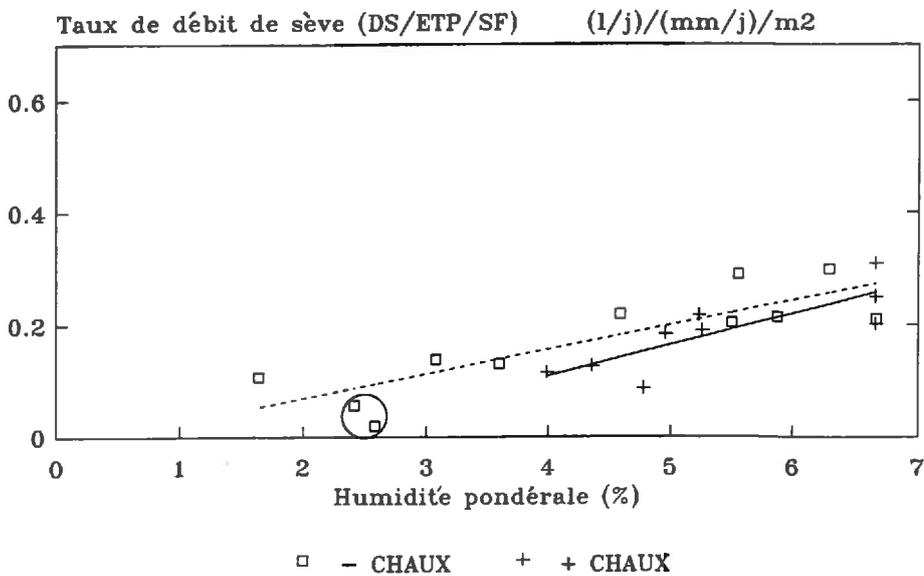
- fig. 80 : SF < 0.02 m²
- fig. 81 : 0.02 < SF < 0.03 m²
- fig. 82 : 0.03 < SF < 0.04 m²

Fig.82: Effet de l'apport de chaux sur le taux de transpiration en fonction de l'humidité du sol $0.03 < SF < 0.04 \text{ m}^2$



$9 < EV_{bac} < 9.5 \text{ mm/j}$ de 38 à 40 JAS

Fig.83 : Effet de l'apport de chaux sur le taux de débit de sève en fonction de l'humidité du sol $0.02 < SF < 0.06 \text{ m}^2$



$5.4 < ETP < 6.9 \text{ mm/j}$ de 60 à 66 JAS

Tab. 21 : EVbac et gammes d'humidité pondérale correspondant aux dates choisies pour étudier la relation entre le taux de transpiration et l'humidité pondérale du sol.

Jour après semis (JAS)	EVbac (mm/j)	Gamme d'humidité pondérale du sol
29	7.7	9 > HP > 8 %
30	7.7	8 > HP > 7 %
32	7	7 > HP > 6.5 %
38	9.5	5 > HP > 3.5 %
39	9	3.5 > HP > 2.5 %
40	9.3	2.5 > HP > 1 %

Dans les deux traitements, le taux de transpiration TR/EV/SF en (l/j)/(mm/j)/m² est relativement constant en fonction de l'humidité du sol puis augmente fortement à partir d'une humidité pondérale de 9 % (fig. 80). Dans la gamme d'humidité pondérale de 6 à 10 %, les taux de transpiration sont équivalents sur sol dégradé et sur sol restauré par apport de chaux.

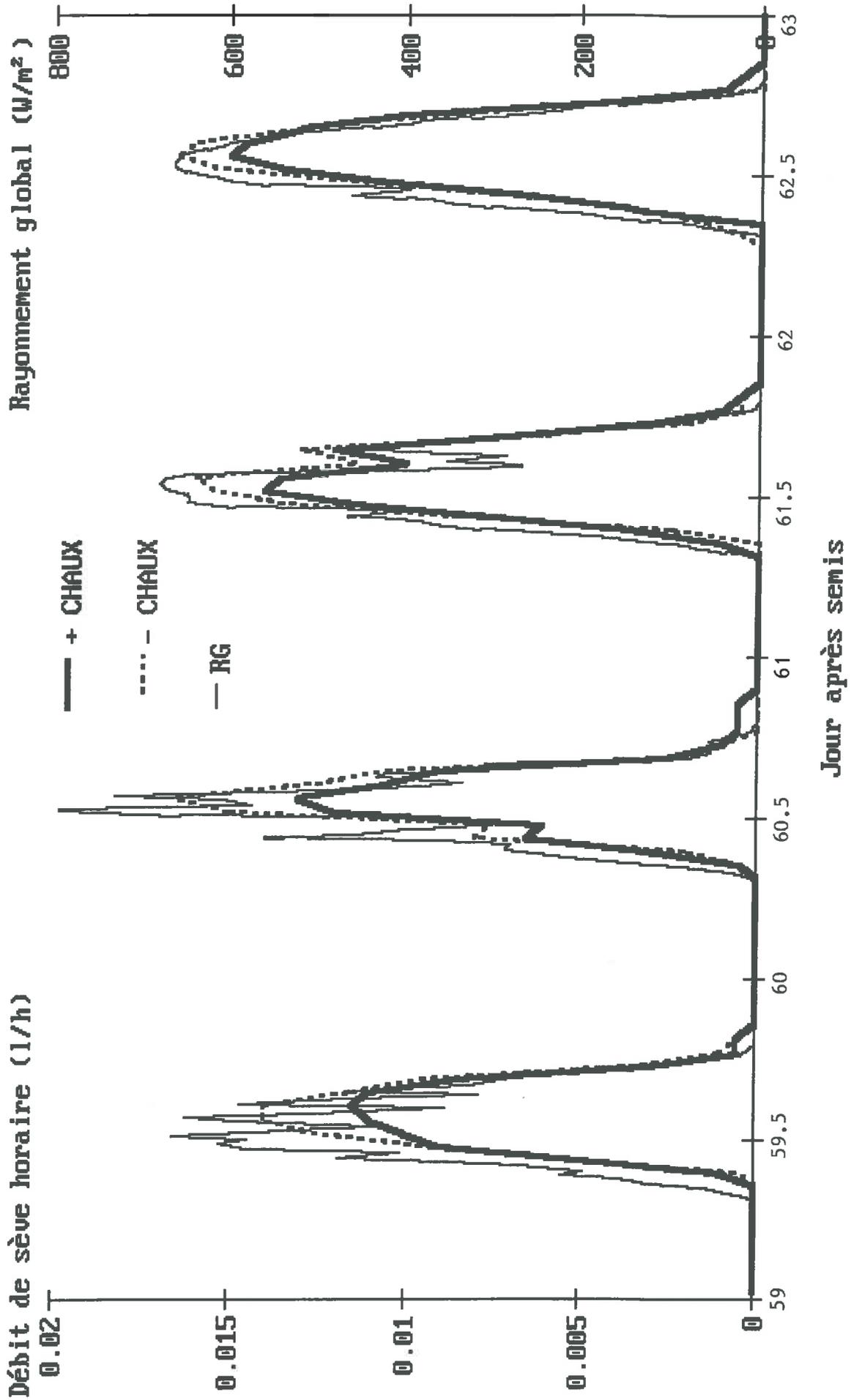
A humidité du sol inférieure à 5 %, pour les deux intervalles de surfaces foliaires considérés (fig. 81 et 82), les taux de transpiration dans les deux traitements ne présentent pas de différence significative quelle que soit l'humidité du sol.

3-4-2- Deuxième partie du cycle

Les observations sont faites pour des humidités pondérales du sol variant de 0 à 7 % (fig. 83). Le stade de développement pour toutes les plantes étudiées correspond de 60 à 66 jours après semis. Ces jours ont été choisis pour se situer à des niveaux d'ETP comparables variant de 5.4 à 6.9 mm/j. D'autre part, on a retenu les tiges pour lesquelles la surface foliaire varie entre 0.02 et 0.06 m².

Les taux de débit de sève dans les deux traitements s'ajustent selon deux droites de régression linéaire qui ne sont pas significativement différentes. A demande équivalente, et dans la gamme d'humidité du sol de 4 à 7 %, les tiges appartenant aux plantes cultivées sur sol dégradé ne présentent pas un taux de débit de sève inférieur à celui mesuré sur les tiges des plantes cultivées sur sol restauré par apport de chaux. Les deux points encadrés, sur la fig. 83, du traitement "- chaux" correspondent à ceux également encadrés dans la fig. 79. De la même façon que dans l'étude précédente (débit de sève en fonction de la surface foliaire), ces points correspondent à des taux de débit de sève inférieurs à ceux attendus et estimés par la régression, en fonction de l'humidité du sol.

Fig. 84 : Effet de l'apport de chaux sur le débit de sève horaire moyen d'une tige AVANT l'arrêt d'arrosage



Il est paradoxal de constater que l'humidité pondérale du sol des plantes du traitement chaulé ne descend pas au dessous de 4 % en fin du premier cycle de dessèchement, soit à 66 jours après semis alors que le stress hydrique dans le sol dégradé diminue l'humidité en dessous de 2 % à la même date. Ces observations posent un problème quant à l'interprétation du dessèchement rapide des plantes du lot "+ chaux" puisque le stock hydrique apparaît moins limitant que dans l'autre traitement où les plantes ont pu récupérer après renouvellement de l'arrosage. Nous essayerons d'expliquer ce comportement par l'étude des débits de sève horaires pendant cette phase de dessèchement du sol.

Sur l'ensemble du cycle, la transpiration ou le débit de sève, pour une demande équivalente déterminée par la surface foliaire et la demande évaporative, des plantes cultivées sur sol dégradé n'est pas diminué par rapport aux plantes cultivées sur sol restauré par apport de chaux. Ceci est valable dans toute la gamme d'humidité du sol observée.

Donc, la diminution de la croissance racinaire observée sur sol dégradé, même pour un apport d'eau non limitant, ne semble pas limiter l'offre en eau. Ce résultat nous permet de choisir parmi les deux hypothèses énoncées à la fin du paragraphe 3-3 : c'est par une diminution de la conductance stomatique que s'explique la baisse du transfert d'eau chez les jeunes plantes cultivées sur sol dégradé avec un apport d'eau non limitant.

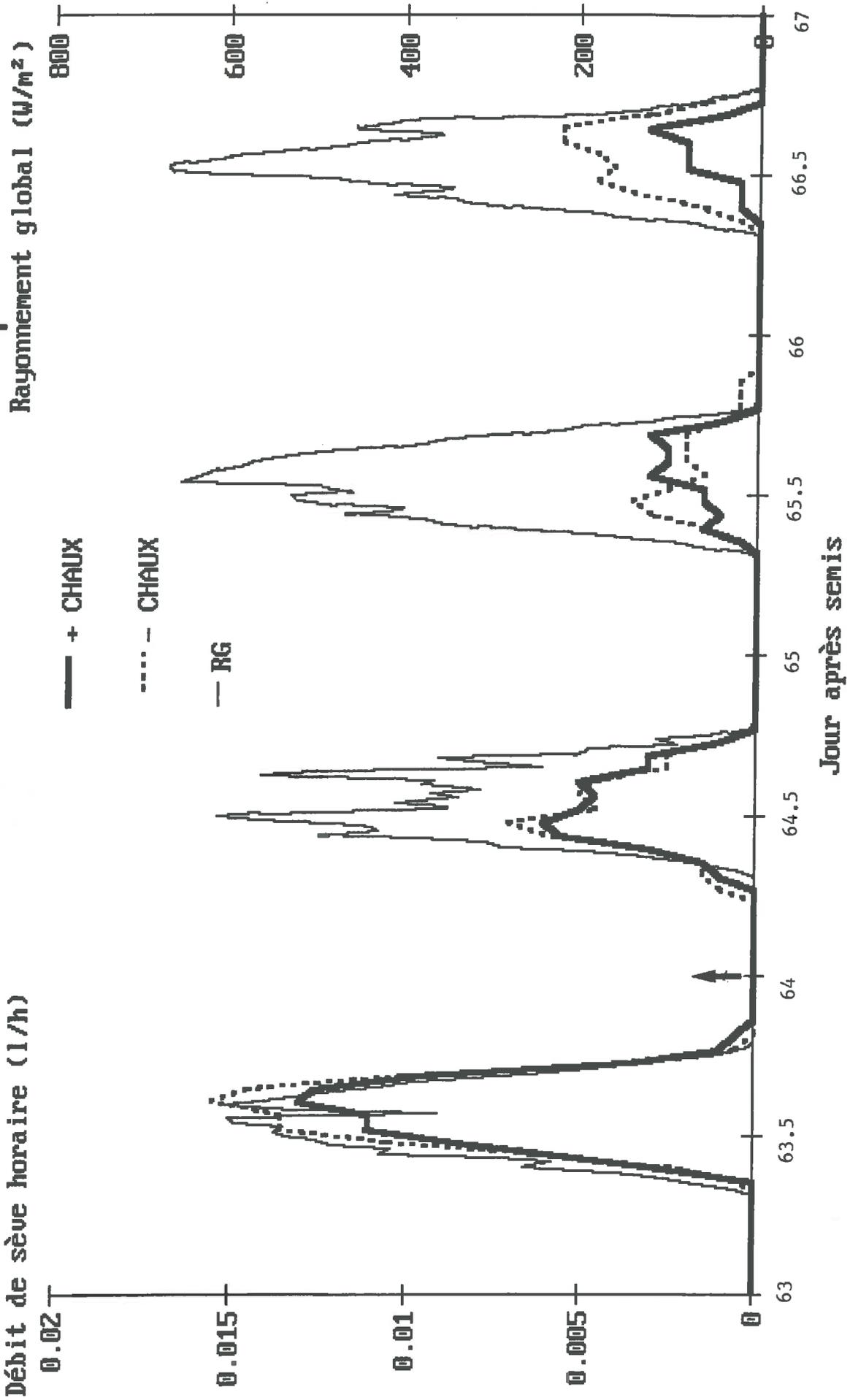
Cette déduction ne peut être vérifiée par des mesures de conductance stomatique, ne disposant pas du poromètre lors de cette expérience, ni par l'étude des dynamiques horaires du débit de sève qui ne concernent que les plantes âgées. En l'absence de mesure directe de conductance stomatique, l'étude suivante permet de comprendre le fonctionnement hydrique des plantes âgées, qui a été indiqué par des points encadrés sur les figures 79 et 83.

3-5- Dynamiques horaires

L'évolution horaire des débits de sève est examinée dans les deux traitements, avant et pendant le premier stress hydrique. Les résultats sont sous la forme de la moyenne des débits de sève (en l/h) mesurés sur les tiges dans chaque traitement. Ils correspondent en total journalier aux courbes en pointillés de la fig. 70. Les surfaces foliaires moyennes par tige sont représentées par les courbes en pointillés de la fig. 69. L'évolution horaire du rayonnement global (en W/m²) permet de situer l'heure à laquelle la demande climatique est maximale.

Avant l'arrêt de l'arrosage de 59 à 63 jours après semis (fig. 84), les courbes horaires dans les deux traitements sont synchrones. Elles sont plus ou moins symétriques en réponse à l'évolution du rayonnement global. Les pics horaires de débit de sève, correspondant aux

Fig. 85 : Effet de l'apport de chaux sur le débit de sève horaire moyen d'une tige lors du premier arrêt d'arrosage (↑)



valeurs maximales du rayonnement global, sont supérieures dans le lot "- chaux" malgré des surfaces foliaires moyennes des tiges équivalentes pour cette période dans les deux traitements, de l'ordre de 0.06 m^2 (fig. 69).

Dès l'arrêt de l'arrosage au matin du jour 64 (fig. 85), les pics horaires de débit de sève dans les deux traitements diminuent en liaison avec un assèchement du sol. Le jour 64, les débits de sève suivent toujours l'évolution de la demande climatique : la diminution observée après 12 h est due à la baisse du rayonnement global et ne correspond pas à un décrochement du débit de sève, qui serait provoqué par une fermeture stomatique, tel que nous l'avons caractérisé dans le premier chapitre selon une courbe de réponse à la contrainte hydrique en pot (fig. 47) .

Au jour 65, l'évolution des débits de sève n'est plus synchrone dans les deux traitements. Le débit de sève dans le traitement "+ chaux" augmente très lentement dans la matinée pour atteindre une valeur maximale en même temps que le rayonnement global, alors que le débit de sève mesuré sur sol dégradé a chuté. Au jour 66, les valeurs maximales de débit de sève sont en retard dans les deux traitements sur l'évolution de la demande climatique. Le débit de sève horaire mesuré sur sol dégradé est supérieur à celui mesuré dans le traitement chaulé. Cette différence s'explique par une surface foliaire moyenne supérieure : 0.05 m^2 dans le lot "- chaux" contre 0.02 m^2 dans le lot "+ chaux" (cf. fig. 69).

L'évolution horaire des courbes de débit de sève mesuré sur les tiges des plantes cultivées sur sol restauré par apport de chaux ne présentent jamais de décrochement avant la maximum horaire du rayonnement global.

Inversement, l'évolution horaire des courbes de débit de sève mesuré sur les tiges des plantes cultivées sur sol dégradé présente un décrochement net avant que le rayonnement global soit maximal, en réponse à la contrainte hydrique. Ce décrochement traduit une fermeture stomatique. Les pertes en eau sur la journée sont alors très diminuées. Cette limitation des pertes en eau, par contrôle stomatique, pourrait alors expliquer la légère reprise observée aussi bien sur le pic maximal du débit de sève horaire le jour suivant (66 JAS), que sur les valeurs cumulées du débit de sève sur 24 heures (débit de sève moyen journalier à 66 JAS : fig. 70), alors que la reprise de l'arrosage n'intervient que le lendemain matin au jour 67 après semis.

Ce fonctionnement hydrique n'est toutefois pas générale. Il n'a été observé que sur deux plantes dont les mesures de débit de sève journalier sont représentées par des points encadrés sur les figures 79 et 83.

Ces résultats sont discutés dans une vue d'ensemble et confrontés aux données bibliographiques, dans la dernière partie, afin d'en tirer les conclusions.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS GENERALES

Face au problème de la lutte contre le déficit hydrique des céréales en Afrique sahélo-soudanienne et plus particulièrement du mil au Sénégal, cette recherche repose sur un schéma synthétique expliquant la baisse des rendements observés sur des sols fragilisés et acidifiés par la culture continue à faible intrant. L'acidification de ces sols, liée à la lixiviation du calcium, entraîne une toxicité aluminique, pour des pH inférieurs à 5, provoquant un dysfonctionnement racinaire et une baisse de l'alimentation hydrique en cas de ressources pluviométriques limitées (REYNIERS, 1990).

Nos résultats montrent bien une baisse des rendements et une diminution de la transpiration du mil sur sol dégradé. Le but de ce travail a été de déterminer les causes et les conséquences de la baisse de ce flux "productif" dans l'hydrosystème agricole.

La méthode :

Nous avons suivi, de façon précise au cours du temps, l'évolution des facteurs de l'offre et de la demande régissant la transpiration, à savoir la quantité d'eau disponible dans le sol, la croissance racinaire, la croissance foliaire et la demande évaporative.

Les interactions entre les facteurs de la transpiration, nous ont amené à expérimenter en faisant varier successivement chacun d'eux et en considérant constant les autres :

- la demande a été considérée équivalente dans les deux traitements pour une même surface foliaire (SF) et une même valeur du référentiel estimant la demande évaporative (EV). Nous avons alors comparé des taux de transpiration TR/SF/EV.

- des stocks hydriques équivalents au même moment, ont été maintenus expérimentalement.

Nous avons expérimenté :

- en station, sur des parcelles avec ou sans apport de compost, au stade remplissage du grain, par mesures de débit de sève.

- en pots, sur des sols acides ou corrigés par apport de chaux et ayant reçu de la fumure minérale, aux stades végétatifs et remplissage du grain, par pesées et mesures de débit de sève.

Adaptation de la technique du débit de sève et son utilisation dans le cadre de cette étude :

Pour adapter la technique de mesure du débit de sève, par la méthode du bilan de chaleur, à l'étude des tiges herbacées et en particulier du mil, nous avons miniaturisé le

capteur. Puis nous avons testé différentes positions des sondes de température dans le but d'améliorer la précision de la mesure pour estimer la transpiration. Les résultats ont donné une estimation de la transpiration journalière avec une erreur maximale de 6 %, dans les conditions de Bambey. Les essais au champ ont contribué à améliorer la conception du capteur ainsi que son installation sur la plante.

Les acquis et les possibilités obtenus par l'utilisation de cette technique :

- Les résultats au champ sur l'ETR ont pu être affinés par la **distinction entre évaporation du sol et transpiration de la culture**.

- Par les **mesures à l'échelle horaire**, nous avons expliqué la diminution de la transpiration, observée en fin de cycle de développement sur la parcelle compostée, par un léger stress hydrique. Ces résultats à l'échelle horaire ont permis d'interpréter les résultats observés sur l'ensemble du cycle de la culture et les conséquences sur les rendements finaux.

- Les **fonctionnements hydriques respectifs du brin-maître et des talles** d'un poquet devaient être vérifiés. En effet, à la suite des résultats de DO et al. (1989) sur les mécanismes de résistance du mil à la sécheresse et de nos observations sur la capacité des feuilles des talles à récupérer plus rapidement, à l'issue d'une contrainte hydrique, nous avons fait l'hypothèse d'un fonctionnement hydrique différentiel par une circulation de l'eau, absorbée par les racines, préférentiellement vers les talles. Cependant, l'étude des débits de sève des différentes tiges d'un poquet a indiqué aucune différence de consommation hydrique, que ce soit en présence d'une contrainte hydrique ou lors de la récupération.

- D'autre part, en l'absence de mesure de conductance stomatique sur les plantes cultivées en sol dégradé, nous avons utilisé l'évolution horaire du débit de sève pour évaluer le transfert d'eau dans la plante et raisonner sur le fonctionnement stomatique. Pour cela, dans une étude préalable, l'évolution horaire du débit de sève a été mise en relation avec des mesures de conductance stomatique, dans une **courbe de réponse au stress hydrique** des plantes cultivées en pots. Un décrochage du débit de sève, par rapport aux témoins bien irrigués, signale une fermeture stomatique des plantes.

Malgré les difficultés rencontrées, notamment dans l'utilisation de cette technique sur les plantes cultivées en pots, les mesures de débit de sève ont largement contribué à l'étude des causes et des conséquences de la dégradation des sols sur l'alimentation hydrique du mil.

Dégradation, acidification et toxicité:

Nous avons caractérisé chimiquement les sols des différents traitements, par le pH et l'évolution des cations, notamment Ca^{2+} et l'aluminium échangeable Al^{3+} (forme toxique). Les analyses de la solution du sol ont indiqué, pour des pH atteignant 4.2, une faible teneur en Ca^{2+} et un taux de saturation de l'aluminium par rapport à la CEC de 41 %. La

comparaison de ces teneurs à celles utilisées dans les tests de toxicité aluminique sur le blé (EDMEADES et al., 1991; KELTJENS et DIJKSTRA, 1991; KOCHIAN et SHAFF, 1991), et sur mil et sorgho (AHLRICHS et al., 1991), permet de dire que nous avons travaillé dans des conditions de toxicité aluminique.

Toutefois, les analyses de sol se sont avérées difficiles à interpréter. Le problème essentiel vient du manque de précision de la technique d'analyse dans le cas des faibles concentrations dans la solution du sol. Nous avons aussi été confrontés au manque de fidélité des mesures. Un travail d'équipe avait déjà souligné les difficultés de caractérisation des sols pauvres en éléments chimiques. Ce problème a conduit l'équipe de sciences du sol du CIRAD, à orienter les recherches sur la mise au point d'une technique plus précise d'évaluation, telle que la colorimétrie. BABRE et FALLAVIER (1990) proposent aussi de tester la mise en oeuvre d'un moyen indirect de mesure de l'activité de l'aluminium par l'utilisation d'une résine cationique.

Si les analyses de sol sont peu fiables, rendant délicate la caractérisation chimique de la dégradation, les analyses biologiques conduisent, en revanche, à des résultats sans ambiguïté.

Dégradation et croissance de la plante :

Dans toutes nos expérimentations, au champ et en pots, il est apparu un effet dépressif net de la dégradation des sols sur la croissance de la plante. Dans les expérimentations en pots, on a ainsi observé que :

- la croissance racinaire est la plus affectée, par un facteur trois.
- la croissance foliaire est diminuée de moitié.

Ces résultats sur la croissance racinaire en sol acide sont conformes aux observations de nombreux auteurs : GRIMME (1984) sur soja, GRIMME et LINDHAUER (1989) sur maïs, EDMEADES et al. (1991), KELTJENS et DIJKSTRA (1991), KOCHIAN et SHAFF (1991) sur blé. Sur mil et sorgho, AHLRICHS et al. (1991) trouvent que les variétés de mil sont moins sensibles que les variétés de sorgho. Ils observent cependant pour une variété de mil, une diminution de la longueur racinaire variant de 4 à 52 %, après 72h, par rapport aux témoins, selon l'acidité des sols.

D'après les résultats de recherche les plus récents, la diminution de la croissance des racines, due à la toxicité aluminique, est expliquée par des mécanismes au niveau du méristème apical (HORST, 1987).

La diminution de la croissance observée aussi bien au niveau des racines qu'au niveau des feuilles, n'a pas été expliquée uniquement par la toxicité aluminique mais aussi par les faibles concentrations en Ca et Mg. La restauration des sols dégradés par apport de chaux

Tab. 22 : Comparaison des densités racinaires en pot et au champ

Densité racinaire: (mg/ cm ³ de sol)	- CHAUX ou TEMOIN	+ CHAUX ou COMPOST
EN POT Apport d'eau limitant	0.135	0.258
AU CHAMP * Régime pluvial	0.054	0.071

* Valeurs moyennes calculées sur les 30 premiers centimètres de profondeur.

vive a eu pour effet d'augmenter les concentrations en calcium.

Cependant, KELTJENS et DIJKSTRA (1991) observent que de fortes concentrations en Ca ne compensent pas la diminution du poids de matière sèche des feuilles et des racines provoquée par l'aluminium. Le magnésium est beaucoup plus efficace pour corriger la toxicité aluminique, probablement par compétition entre ces deux éléments pour se fixer sur les sites récepteurs des racines (KINRAIDE et PARKER, 1987).

Quel que soit l'élément chimique en cause dans le processus physiologique, c'est surtout au rapport entre le calcium, le magnésium et l'aluminium échangeable dans la CEC (ULRICH, 1983), que doit être reliée la diminution de croissance observée.

Dégradation et fonctionnement hydrique :

L'ensemble des résultats indique une diminution de la transpiration sur sols dégradés aussi bien au champ qu'en pots. Cette baisse de la transpiration est, dans sa plus grande part, expliquée par la diminution de la surface foliaire, c'est-à-dire que la transpiration et la surface foliaire évoluent dans les mêmes proportions. Nous reviendrons dans le paragraphe suivant sur ce résultat essentiel, pour en analyser les conséquences.

Cependant, un autre effet de la dégradation des sols a été observé : la baisse de la transpiration par unité de surface foliaire, observée en condition d'offre en eau non limitante sur les jeunes plantes cultivées en pot (fig. 76). Cette diminution du transfert d'eau pouvait être expliquée soit par celle de l'offre en eau, soit par celle de la conductance stomatique.

Selon notre modèle de transpiration, le développement racinaire moindre aurait pu contribuer à diminuer l'offre en eau. Cependant, des taux de transpiration équivalents dans les deux traitements, à humidité du sol égale, nous ont conduit à éliminer cette hypothèse. D'autant plus que les densités racinaires, dans les études menées en pots, sont très élevées par rapport à celles obtenues dans les expérimentations au champ (Tab 22). La diminution du développement racinaire observée sur sol dégradé doit donc être relativisée car le système racinaire reste malgré tout surdimensionné dans la culture en pots.

Le système racinaire n'étant donc pas le facteur limitant de l'alimentation hydrique sur sol dégradé, nous avons alors expliqué la diminution de la transpiration par unité de surface foliaire, par celle de la conductance stomatique. Cette explication n'a pu être vérifiée directement.

Cette diminution du transfert d'eau, expliquée par une baisse de la conductance stomatique, ne s'est observée que sur sol dégradé. En effet, pour les plantes cultivées sur sol fertile, l'étude des dynamiques horaires a indiqué que la réponse à la réduction du stock hydrique dans le pot se faisait par une réduction de la surface foliaire et non par une fermeture stomatique. Ces résultats rejoignent les conclusions d'AZAM-ALI et al (1984) :

Tab. 23 : Synthèse des résultats et données bibliographiques sur l'évolution de la transpiration (T), des racines (R), de la surface foliaire (SF) et de la conductance stomatique (CS), selon les conditions d'expérimentation. ↓ : diminution, ↓↓ : forte diminution, ↑ : augmentation, → : pas d'évolution, par rapport aux témoins (eau non limitante sur sol fertile).

	EAU LIMITANTE		EAU NON LIMITANTE	
	Plantes jeunes	Plantes âgées	Plantes jeunes	Plantes âgées
SOL DEGRADE : Ca ²⁺ faible CEC faible Al ³⁺ /CEC élevé	TR ↓ R ↓↓ SF ↓ TR/SF →	TR ↓ R ↓↓ SF ↓ TR/SF →, sauf 2 plantes où TR/SF ↓ et CS ↓ *	TR ↓ R ↓↓ Effet cumulatif : SF ↓ et TR/SF ↓ TR/SF ↓ expliquée par CS ↓ <i>Grimme et Lindhauer (1989)</i> Effet cumulatif : SF ↓ et CS ↓	TR ↓ R ↓↓ SF ↓ TR/SF → CS → *
SOL FERTILE	TR ↓ R ↓ SF ↓ TR/SF →	TR ↓ R ↓ SF ↓↓ TR/SF → CS → * <i>Azam-ali et al. (1984)</i> <i>Henson et al. (1982)</i> <i>Laffray et al. (1986)</i> <i>Marschner et Vetterlein (1992) :</i> SF ↓↓ CS ↓ qu'en condition de sécheresse sévère	témoins <i>Black et Squire (1979) **</i> <i>Meinzer et Grantz (1990) ***</i> Effet compensatoire : SF ↓ et CS ↑	témoins

* : fonctionnement stomatique déduit de l'étude des débits de sève horaires.

** : SF diminuée par recouvrement des feuilles.

*** : SF diminuée par défoliation partielle.

l'indice foliaire a beaucoup plus d'influence sur l'utilisation de l'eau par le mil que les facteurs proprement physiologiques ou atmosphériques. D'autre part, HENSON et al. (1982) observent que la conductance stomatique du mil n'est diminuée qu'en condition de sécheresse sévère. Pour le mil, les mécanismes physiologiques de résistance à l'échelle foliaire sont peu importants quantitativement (LAFFRAY et LOUGUET, 1986; MARSCHNER et VETTERLEIN, 1992).

La culture sur sol dégradé provoque donc une modification du fonctionnement des plantes en diminuant leur conductance stomatique. Cet effet peut provenir d'une toxicité aluminique comme cela a été trouvé sur des jeunes plants de maïs par GRIMME et LINDHAUER (1989). Il faudrait vérifier que ces résultats obtenus en conditions contrôlées en présence de 0.1 mM d'Al soient reproductibles sur le mil.

L'effet des sol dégradés sur la diminution de la conductance stomatique ne s'est pas retrouvé pas sur les plantes plus âgées. De plus, en présence d'une contrainte hydrique, cet effet de la dégradation des sols est "masqué". Cette différence de sensibilité à l'acidification des sols, selon l'âge physiologique des plantes et leur état hydrique, nous laisse supposer un mécanisme régulateur qui agirait au niveau des racines. Cette hypothèse va dans le sens des conclusions de BENNET et BREEN (1991). Ces auteurs attribuent aux cellules de la coiffe un rôle de détecteur du stress, causé par la toxicité aluminique. Dans ce cas, il faut aussi envisager un signal allant des racines aux feuilles, fréquemment identifié dans la littérature par l'acide abscissique (DAVIES et MEINZER, 1990; DAVIES et ZHANG, 1991).

Comme GRIMME et LINDHAUER (1989), nous avons pu observer que la diminution de la conductance stomatique est simultanée à celle de la croissance foliaire et racinaire. Nous avons qualifié ce double effet de la dégradation des sols, sur la morphologie et la physiologie de la plante, par le terme d'**effet cumulatif**. Il est à opposer à l'**effet compensatoire**, observé par des expérimentations en sol fertile : BLACK et SQUIRE (1979) détectent sur le mil un ajustement entre la surface foliaire et la conductance stomatique tel qu'une réduction de la surface transpirante par plante, obtenue par recouvrement des feuilles, entraîne une augmentation de la conductance des feuilles restantes. De même sur la canne à sucre, MEINZER et GRANTZ (1990) observent, après défoliation partielle de l'appareil foliaire, un ajustement entre la conductance stomatique et la taille de la plante permettant le maintien de l'état hydrique interne.

L'ensemble de nos observations, dans les différentes conditions d'expérimentation (fertilité, apport d'eau, stade de développement) et les données bibliographiques concernant la régulation stomatique du mil ou d'autres plantes cultivées sur sol dégradé, sont regroupées dans le tableau 23.

Dégradation et gestion de la ressource pluviométrique:

Malgré une diminution notable de la masse racinaire, la baisse de l'alimentation hydrique, sur sol dégradé, a été attribuée à la réduction de la surface foliaire, associée en début de culture à une chute de la conductance stomatique, probablement due à une toxicité aluminique. L'hypothèse de départ, basée sur un effet hydrique prépondérant de la dégradation des sols sur les racines, a donc été complétée pour l'écosystème étudié. Si cette hypothèse se vérifie en terme de croissance, il est apparu un contrôle déterminant des facteurs de la demande sur l'alimentation hydrique.

Dans le cadre de cette hypothèse, on craignait que l'alimentation hydrique soit affectée par une réduction de l'offre, entraînant alors une mobilisation partielle de la ressource pluviométrique déjà insuffisante. Mais nous avons identifié un processus différent : la diminution du développement foliaire, observée dès le début du cycle de développement, permet d'économiser des ressources hydriques souvent limitées jusqu'à la phase reproductive, les années à pluviométrie déficitaire comme en 1990 et 1991. Si les années pluvieuses, les rendements sont faibles sur les sols dégradés, ils sont toutefois stabilisés en cas de sécheresse du fait d'une limitation des besoins en eau de la culture.

Cette étude montre qu'en terme de gestion de la ressource pluviométrique dans les conditions du Sahel, les conséquences de la dégradation des sols, sur l'ensemble du cycle de la culture, sont minimisées.

Cette conclusion est spécifique à l'écosystème étudié et ne peut être transférée à une autre culture, sur d'autres sols, dans un autre climat. Par ailleurs, il est probable que l'hypothèse à la base de ce travail, se vérifie dans des sols à acidité plus marquée (affectant d'autant plus la croissance du système racinaire), avec une pluviométrie supérieure et où les potentialités de production sont plus élevées, comme dans les cerrados brésiliens où elle a été établie originellement.

Réunis dans une étude écophysiological de compréhension, ces résultats pourraient conduire aux applications suivantes :

- alimenter des modèles descriptifs des processus physiologiques dans un écosystème donné, par la caractérisation établie de l'importance relative des facteurs de l'offre et de la demande, selon les spécificités du milieu.

- recommander, dans la recherche des variétés adaptées aux spécificités du milieu, que les études soient orientées en tenant compte des interactions eau/fertilité. Cette étude a souligné l'importance de ces interactions, déjà mentionnée par GANRY (1990) dans le cas de l'azote. Un exemple concret est la relation, généralement admise, entre la résistance à la sécheresse et celle à la toxicité aluminique.

- gérer les risques de déficit hydrique inhérents aux aléas climatiques, associés à l'acidification des sols. Dans une perspective d'intensification, le système tel que nous l'avons décrit n'est pas performant. En revanche, il a l'avantage d'assurer des rendements

stables, quelles que soient les conditions pluviométriques. Et c'est souvent l'objectif prioritaire dans cette région.

- définir des itinéraires techniques répondant mieux aux problèmes des paysans de la zone sahélo-soudanienne : une suite logique à ces résultats est de tester, sur mil, l'amendement par de la dolomite, contenant du Ca et surtout du Mg, qui comme nous l'avons signalé, a un effet minimisant la toxicité aluminique.

Ainsi, par une contribution à la compréhension du fonctionnement hydrique de l'écosystème sahélo-soudanien, on espère vivement que ce travail aura des applications concrètes, aussi modestes soient elles, pour lutter contre les effets de la sécheresse et de l'acidification des sols, sur l'agriculture sahélienne à faibles intrants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Revue à comité de lecture :

- AZAM-ALI S.N., GREGORY P.J. et MONTEITH J.L., 1984- Effects of planting density on water use and productivity of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) grown on stored water. *Expl. Agric.*, Vol. 20, pp 203-224.
- BAKER J.M. et van BAVEL C.H.M., 1987- Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant Cell and Environ.*, Vol. 10, pp 777-782.
- BATES L.M. et HALL A.E., 1981- Stomatal closure with soil water depletion not associated with changes in leaf water status. *Oecologia*, Vol. 50, pp 61-65.
- BEGG J.E. et TURNER N.C., 1970- Crop water deficits. *Adv. in Agron.*, Vol. 28, pp 161-217.
- BERGER A., CABALLE G., COUDURIER TH. et SALAGER J.L., à paraître- Flux de sève et conditions climatiques chez les lianes ligneuses forestières.
- BERGER A., FOULETIER B. et LUCK H.B., 1966- Une technique pour recherches histogéniques et biométriques. *Naturalia Monspelienisa*, Série botanique, fascicule 17, pp 15-19.
- BLACK C.R. et SQUIRE G.R., 1979- Effects of Atmospheric Saturation Deficit on the Stomatal Conductance of Pearl Millet (*Pennisetum typhoides* S. and H.) and Groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *J. Exp. Bot.*, Vol. 30, pp 935-945.
- BLANCHET R., GELFI N. et BOSCH M., 1977- Relation entre consommation d'eau et production chez divers types variétaux de soja. *Ann. Agron.*, Vol. 28, n° 3, pp 261-275.
- BLONDEL D., 1970- Relation entre le "nanisme jaune" de l'arachide en sol sableux (dior) et le pH. Définition d'un seuil pour l'activité du Rhizobium. *Agron. Trop.*, Vol. 25, n° 6 et 7, pp 589-595.
- BLONDEL D., 1971- Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux (dior) au Sénégal. *Agron. Trop.*, Vol. 26, n° 12, pp 1303-1333.
- BROCHET P. et GERBIER N., 1975- L'évaporation, aspect agrométéorologique. Evaluation pratique de l'évaporation potentielle. Monog. n° 65 de la Météorologie nationale, 95 p.
- BRUCKLER L., LAFOLIE F. et TARDIEU F., 1991- Modeling root water potential and soil-root water transport : II. Field comparison. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 55, pp 1213-1220.
- BRUNT D., 1932- Notes on radiation in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, Vol. 58, pp 398-418.
- BRUNT D., 1939- *Physical and dynamical meteorology*. Cambridge Univ. Press, pp 136-138.
- CHARREAU C., 1961- Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal. *Agron. Trop.*, Vol 16, n°5, pp 504-561.
- CHARREAU C. et NICOU R., 1971- L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest Africaine et ses incidences agronomiques. *Agron. Trop.*, Vol. 36, n°2, pp 209-255.
- CHARREAU C. et VIDAL P., 1965- Influence de l'*Acacia albida* Del. sur le sol, la nutrition minérale et les rendements des pennisetum au Sénégal. *Agron.*, Vol. 20, n° 6-7, pp 620-625.

- CHOISNEL E., 1988- Estimation de l'évaporation potentielle à partir des données météorologiques. La Météorologie, 7^{ème} série, n° 23, Juin-août, pp 19-27.
- CHOPART J.L., 1983- Etude du système racinaire du mil (*Pennisetum typhoides*) dans un sol sableux du Sénégal. Agron. Trop., Vol. 38, n° 1, pp 37-50.
- CHOPART J.L. et NICOU R., 1989- Vingt ans de culture continue avec ou sans labour au Sénégal. Agron. Trop., Vol. 44, n° 4, pp 269-281.
- CISSE L. et VACHAUD G., 1987- Méthode simplifiée d'estimation *in situ* des taux d'extraction racinaire. Agron. Trop., Vol. 42, n° 4, pp 241-247.
- COHEN Y. et FUCHS M., 1989- Problems in calibrating the heat pulse method for measuring sap flow. Agronomie, Vol. 9, pp 321-325.
- CORTIER B., POCHIER G. et IMBERNON J., 1988- Le maïs au Sénégal: effets des techniques culturales et des conditions hydriques en culture pluviale. Agron. Trop., Vol. 43, n° 2, pp 85-90.
- CRUIZIAT P., 1974- Détermination des pertes en eau subies par les différents organes d'une plante soumise au dessèchement. Ann. Agron., Vol. 4, pp 539-554.
- CRUIZIAT P. et TYREE M.T., 1990- La montée de la sève dans les arbres. Recherche, Vol. 21, n° 220, pp 406-414.
- DAVIES W.J. et MEINZER F.C., 1990- Stomatal Responses of Plants in Drying Soil. Biochem. Physiol. Pflanzen, Vol. 186, pp 357-366.
- DAVIES W.J. et ZHANG J., 1991- Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. Ann. Rev. Physiol. Plant Mol. Biol., Vol. 42, pp 55-76.
- DO F., DAOUDA O.S. et MARINI P., 1989- Etude agrophysiologique des mécanismes de résistance du mil à la sécheresse. Cas d'un stress hydrique terminal. Rev. Rés. Amélior. Prod. Agr. Milieu Aride, Vol. 1, pp 57-74.
- DREW M.C., 1975- Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. New Phytol., Vol. 75, pp 479-490.
- FERNANDEZ C.J. et MC CREE K.J., 1991- Simulation Model for Studying Dynamic of Flow and Water Status in Plants. Crop Science, Vol. 31, n° 2, pp 391-398.
- FOY C.D., 1988- Plant adaptation to acid, aluminium-toxic soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal., Vol. 19, pp 959-987.
- FOY C.D., CHANEY R.L. et WHITE M.C., 1978- The physiology of metal toxicity in plants. Annu. Rev. Plant Physiol., Vol. 29, pp 511-566.
- FRANQUIN P. et FOREST F., 1977- Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. Agron. Trop., Vol. 32, n° 1, pp 7-11.
- GARIN P., FAYE A., LERICOLLAIS A. et SISSOKHO M., 1990- Evolution du rôle du bétail dans la gestion de la fertilité des terroirs serer au Sénégal. In Les Cahiers de la Recherche Développement, n° 26, juin 1990, pp 65-84.

- GRIMME H. et LINDHAUER M.G., 1989- The Effect of Al and Mg on the transpiration rate of young maize plants. *Z Pflanzenernaehr. Bodenkd.*, Vol. 152, pp 453-454.
- HAYNES R.J., 1982- Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant and Soil*, Vol. 68, pp 289-308.
- HALLDIN S., GRIP H.J., JANSSON, P.E. et LINDGREN A., 1980- Micrometeorology and hydrology of pine forest ecosystem. Theory and Model, In *Structure and Function of Northern Coniferous Forest. An ecosystem study*. Ed. Persson, *Ecological bulletins*, Vol. 32, pp 463-503.
- HAVAUX M., ERNEZ M. et LANNOYE R., 1988- Sélection de variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) et de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) adaptées à la sécheresse par la mesure de l'extinction de la fluorescence de la chlorophylle *in vivo*. *Agron.*, Vol. 8, n° 3, pp 21-27.
- HENSON I.E., ALAGARSWAMY G., BIDINGER F.R. et MAHALAKSHMI V., 1982- Stomatal responses of pearl millet (*Pennisetum americanum* [L.] Leeke) to leaf water status and environmental factors in the field. *Plant Cell and Envir.*, Vol. 5, pp 65-74.
- HENSON I.E., MAHALAKSHMI V., ALAGARSWAMY G. et BIDINGER F.R., 1983- An association between flowering and reduced stomatal sensitivity to water stress in pearl millet [*Pennisetum americanum* (L.) Leeke]. *Annals of Botany*, Vol. 52, pp 641-648.
- HONERT (Van Den) T.H., 1948- Water transport in plants as a catenary process. *Discussions of the Faraday Society*, Vol. 3, pp 146-153.
- HORST W.J., 1983- Factors responsible for genotypic manganese tolerance in cowpea (*Vigna unguiculata*). *Plant and soil*, Vol. 72, pp 213-218.
- HORST W.J., 1987- Aluminium tolerance and calcium efficiency of cowpea genotypes. *J. Plant Nutr.*, Vol. 10, pp 1121-1129.
- HORST W.J., WAGNER A. et MARSCHNER H., 1983- Effect of aluminium on root growth, cell division rate and mineral contents in root of *Vigna unguiculata* genotypes. *Z. Pflanzenphysiol.*, Vol. 109, pp 45-103.
- HSIAO T.C., O'TOOLE J.C., YAMBAO E.B. et TURNER N.C., 1984 - Influence of osmotic adjustment on leaf rolling and tissue death in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Physiol.*, Vol. 75, n° 2, pp 338-341.
- HSIEH J.J.C., GARDNER W.H. et CAMPBELL G.S., 1972 - Experimental Control of Soil Water Content in the Vicinity of Root Hairs. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 36, pp 418-421.
- JARVIS P.G. et MC NAUGHTON K.J., 1986- Stomatal Control of Transpiration: Scaling up from Leaf to Region. *Adv. In Ecol. res.*, Vol. 15, pp 1-49.
- KATERJI N., HALLAIRE M., MENOUX-BOYER Y. et PERRIER A., 1983 a- Transfert hydrique dans le végétal. II.- Détermination au champ des variations de contenu en eau du couvert végétal. *Acta Oecol., Oecol. Plant.*, Vol. 4, n° 18, pp 171-181.
- KATERJI N., HALLAIRE M., PERRIER A. et DURAND R., 1983 b- Transfert hydrique dans le végétal. I.- Modélisation à l'échelle du couvert végétal en conditions naturelles. *Acta Oecol., Oecol. Plant.*, Vol. 4, n° 18, pp 11-26.
- KATERJI N., ITIER B. et FERREIRA I., 1988- Etude de quelques critères indicateurs de l'état hydrique d'une culture de tomate en région semi-aride. *Agron.*, Vol. 8, n° 5, pp 425-433.

- KINRAIDE T.B. et PARKER D.R., 1987- Cation amelioration of aluminium toxicity in wheat. *Plant physiol.*, Vol. 83, pp 546-551.
- KRAMER P.J., 1988- Changing concepts regarding plant water relations. *Plant Cell and Environ.*, Vol. 11, pp 565-568.
- LAFFRAY D. et LOUGUET P., 1989- L'appareil stomatique et la résistance à la sécheresse. *Rev. Rés. Amélior. Prod. Agr. Milieu Aride*, Vol. 1, pp 31-46.
- LAFOLIE F., BRUCKLER L. et TARDIEU F., 1991- Modeling root water potential and soil-root water transport: I. Model presentation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 55, pp 1203-1212.
- LAMBERT C., 1983a- Influence de la précocité sur le développement du mil (*Pennisetum typhoides* Hub. et Stapf) en conditions naturelles. I. Elaboration de la touffe. *Agron. Trop.*, Vol. 38, n° 1, pp 7-15.
- LAMBERT C., 1983b- Influence de la précocité sur le développement du mil (*Pennisetum typhoides* Hub. et Stapf) en conditions naturelles. II. Elaboration du rendement. *Agron. Trop.*, Vol. 38, n° 1, pp 16-26.
- LAMBERT C., 1983c- L'IRAT et l'amélioration du Mil *Pennisetum*. Présentation des travaux. *Agron. Trop.*, Vol. 38, n° 1, pp 78-88.
- MEINZER F.C. et GRANTZ D.A., 1990- Stomatal and hydraulic conductance in growing sugarcane: stomatal adjustment to water transport capacity. *Plant Cell and Environ.*, Vol. 13, pp 383-388.
- MILBORROW B.V. et NODDLE R.C., 1970- Conversion of 5-(1,2-epoxy-2,6,6-trimethylcyclohexyl)-3-methylpenta-cis-2-trans-4-dienoic acid abscisic acid in plants. *Biochem. J.*, Vol. 119, pp 727-734.
- MILBURN J.A., 1973- Cavitation in *Ricinus* by acoustic detection: induction in excised leaves by various factors. *Planta*, Vol. 110, pp 253-265.
- MILBURN J.A. et JOHNSON R.P.C., 1966- The conduction of sap: II. Detection of vibrations produced by sap cavitation in *Ricinus* xylem. *Planta*, Vol. 69, pp 43-52.
- MONNEVEUX P. et NEMMAR M., 1986- Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.): Etude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agron.*, Vol. 6, pp 583-590.
- MONTEITH J.L., 1965- Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.*, Vol. 19, pp 205-234.
- NICOU R., 1974- La prise en masse des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest Africaine. *Agron. Trop.*, Vol 29, pp 1100-1127.
- PARCEVAUX De S., 1963- Transpiration végétale et production de matière sèche. *Ann. Agron.*, Vol. 14, pp 655-742.
- PASSIOURA J.B., 1984- Hydraulic resistance of plants. I: Constant or variable ? *Austr. J. of Plant Physiol.*, Vol. 11, pp 333-339.
- PASSIOURA J.B., 1988- Response to Dr P.J. Kramer's article, "Changing concepts regarding plant water relations", Vol. 11, n° 7, pp 565-568. *Plant, Cell and Environ.*, Vol. 11, n° 7, pp 569-571.
- PAYNE W.A., LASCANO R.J., HOSSNER L.R., WENDT C.W. et ONKEN A.B., 1991- Pearl millet growth as affected by phosphorus and water. *Agron. J.*, Vol. 83, pp 942-048.

PENMAN H.L., 1948- Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. London, Ser. A, Vol. 193, pp 120-145.

PERRIER A., 1975- Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. I. Evapotranspiration et bilan d'énergie des surfaces naturelles. II. Expression et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface mince. III. Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. Ann. Agron., Vol. 26, pp 1-18, pp 105-123, pp 229-243.

PERRIER A., 1977- Etude des variations de l'évaporation à partir d'un modèle analytique prenant en compte les variations verticales des densités de surface foliaire et des résistances stomatiques. La Météorologie VI, Vol. 11, pp 41-46.

PHILIP J.R., 1966- Plant water relations: some physical aspects. Annu. Rev. Plant Physiol., Vol. 17, pp 245-268.

PIERI C., 1974- Premiers résultats expérimentaux sur la sensibilité de l'arachide à la toxicité aluminique. Agron. Trop., Vol. 30, n° 6, pp 685-696.

PIERI C., 1976- L'acidification des terres de culture exondées au Sénégal. Agron. Trop., Vol. 31, n° 4, pp 339-368.

PIERI C., 1977- Minéralogie et propriétés de surface de deux sols sableux du Sénégal. Agron. Trop., Vol. 32, pp 339-351.

PIERI C., 1979- Etude de la composition de la solution d'un sol sableux cultivé du Sénégal, à l'aide de capteurs en céramique poreuse. Agron. Trop., Vol. 34, n° 1, pp 9-22.

PORTERES R., 1950- Vieilles agricultures de l'Afrique Inter-tropicale. Centre d'origine et de diversification variétale primaire et bureaux d'agriculture antérieurs au XVI^e siècle. Agron. Trop., Vol. 5, pp 489-507.

POSS R., SARAGONI H. et IMBERNON J., 1988- Bilan simulé du maïs au Togo méridional. Agron. Trop., Vol. 43, n° 1, pp 18-29.

RAISSAC (De) M., 1992- Mécanismes d'adaptation à la sécheresse et maintien de la productivité des plantes cultivées. Agron. Trop., Vol. 46, n° 1, pp 29-39.

RIOU C., VALANCOGNE C. et PIERI P., 1989- Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne. Vérification expérimentale. Agron., Vol. n° 9, pp 441-450.

SAKURATANI T., 1981- A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. J. Agr. Met., Vol. 37, pp 9-17.

SAKURATANI T., 1984- Improvement of the probe for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method. J. Agr. Met., Vol. 40, pp 273-277.

SCHOCH P.G., LECOMTE A. et L'HOTEL J.C., 1990- Mesures continues en temps réel du diamètre des tiges des plantes annuelles: critères de pilotage de l'irrigation et des conditions microclimatiques sous serres. C. R. Acad. Agric. Fr., Vol. 76, n° 5, pp 13-24.

SCHOLANDER P.F., HAMMEL H.T., BRADSTREET E.D. et HEMMINGSEN E.A., 1965- A sap pressure in vascular plants. Science, Vol. 148, pp 339-346.

SCHULZE E.D., STEUDLE T., GOLLAN T. et SCHURR U., 1988- Response to Dr P.J. Kramer's article, "Changing concepts regarding plant water relations", Vol. 11, n° 7, pp 565-568. Plant Cell and Environ., Vol. 11, n° 7, pp 573-576.

- SELLES G. et BERGER A., 1990- Physiological indicators of plant water status as criteria for irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, Vol. 78, pp 87-100.
- SQUIRE G.R., 1979- The response of stomata of pearl millet (*pennisetum typhoides* S. and H.) to atmospheric humidity. *J. Exp. Bot.*, Vol. 30, pp 925-933.
- STEINBERG S., VAN BAVEL C. et MC FARLAND M.J., 1989- A Gauge to Measure Mass Flow Rate of Sap in Stems and Trunks of Woody Plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, Vol. 114, n° 3, pp 466-472.
- TARDIEU F., KATERJI N. et BETHENOD O., 1990- Relations entre l'état hydrique du sol, le potentiel de base et d'autres indicateurs de la contrainte hydrique chez le maïs. *Agron.*, Vol. 10, pp 617-626.
- TARDIEU F., KATERJI N., BETHENOD O., ZHANG J. et DAVIES W.J., 1991- Maize stomatal conductance in the field; its relationship with soil and plant water potentials, mechanical constraints and ABA concentration in the xylem sap. *Plant Cell and Environ.*, Vol. 14, pp 121-126.
- TARDIEU F. et MANICHON H., 1986- Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II. Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. *Agron.*, Vol. 6, pp 415-425.
- TARDIEU F., ZHANG J. et DAVIES W.J., 1992- What information is conveyed by an ABA signal from maize roots in drying field soil ? *Plant Cell and Environ.*, Vol. 15, pp 185-191.
- TAYLOR G.J., 1988- The physiology of aluminium tolerance in higher plants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, Vol. 19, pp 1179-1194.
- TURC L., 1961- Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, Vol. 12, n° 1, pp 13-49.
- TURNER N.C., 1975- Concurrent comparison of stomatal behavior, water status and evaporation of maize in soil at high and low water potential. *Plant Physiol.*, Vol. 55, pp 932-936.
- TURNER N.C., 1986- Adaptation to Water Deficit: A Changing Perspective. *Aust. J. Plant Physiol.*, Vol. 13, pp 175-190.
- TYREE M.T. et DIXON M.A., 1986- Water stress induced cavitation and embolism in some woody plants. *Physiol. Plant*, Vol. 66, n° 3, pp 397-405.
- TYREE M.T., DIXON M.A., TYREE E.L. et JOHNSON R., 1984- Ultrasonic acoustic emissions from the sapwood of cedar and hemlock. An examination of three hypothesis regarding cavitations. *Plant Physiol.*, Vol. 75, pp 988-992.
- TYREE M.T. et SPEERY J.S., 1989a- Characterisation and propagation of acoustic emission signals in woody plants: towards an improved acoustic emission counter. *Plant Cell Environ.*, Vol. 12, n° 4, pp 371-382.
- TYREE M.T. et SPEERY J.S., 1989b- Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, Vol. 40, pp 19-38.
- VACHAUD G., DANCETTE C., SONKO M. et THONY J.L., 1978- Méthodes de caractérisation hydronymique 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. *Ann. Agron.*, Vol. 29, pp 1-36.
- WALDREN R.P., TEARE I.D. et EHLER S.W., 1974- Changes in free concentration in sorghum and soybean plants under field conditions. *Crop Sci.*, Vol. 14, pp 447-450.

WINKEL T. et DO F., à paraître- Caractères morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse : une revue bibliographique. Agron. Trop.

ZIMMERMANN U. et STEUDLE E., 1978- Physical aspects of water relations of plant cells. Adv. in Bot. Res., Vol. 6, pp 45-117.

Colloques, livres, thèses.... :

AFFHOLDER F., 1991a- Suivi hydrique de l'essai compost Sole C: Campagne 1989 et début de campagne 1990. In Rapport de l'ATP: "Croissance et fonctionnement hydrique racinaire en sols dégradés", novembre 1990, 10 p.

AFFHOLDER F., 1991b- Variabilité des rendements du mil pluvial en milieu paysan sénégalais: Influence de l'alimentation hydrique, de la gestion de la fertilité et du contrôle de l'enherbement. Séminaire International de la Gestion Agroclimatique des Précipitations, Bamako 9-13 decembre 1991, 15 p.

AFFHOLDER F., 1992- Programme agroclimatologie. Rapport d'activité "Pratiques agricoles et valorisation de l'eau" année 1991. ISRA/IRAT-CIRAD, 20 p + annexes.

AGEL C. et THEVENIN P., 1984- La filière arachide au Sénégal, réactualisation 1982/84. Ministère des Relations Extérieures, Paris, 108 p.

AHLRICHES J.L., DUNCAN R.R., EJETA G., HILL P.R., BALIGAR V.C., WRIGHT R.J. et HANNA W.W., 1991- Pearl millet and sorghum tolerance to aluminium in acid soil. In Plant-soil interactions at low pH, Eds. R.J. Wright et al., 1991 Kluwer Academic Publishers, pp 947-951.

ALBERGEL J., 1988- Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Editions de l'ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Paris, 341 p.

AMEGLIO T., 1991- Relation hydrique chez le jeune Noyer, de l'échelle de la journée à celle de l'année, en liaison avec quelques aspects de la physiologie de l'arbre. Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal (Clermont II), Clermont-Ferrand, 121 p + annexes.

ANNEROSE D.J.M., 1990- Recherches sur les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse. Application au cas de l'arachide (*Arachis hypogea* L.) cultivée au Sénégal. Thèse de Doctorat, Université Paris VII, 282 p.

BABRE D. et FALLAVIER P., 1990- Suivi de la composition cationique, du pH du sol et de la solution du sol. Résultats 1989 avant et après culture d'une rotation mil-arachide sur sol deck. In Rapport de l'ATP: "Croissance et fonctionnement hydrique racinaire en sols dégradés", novembre 1990, 13 p + annexes.

BENNET R.J. et BREEN C.M., 1991- The aluminium signal: News dimensions to mechanisms of aluminium tolerance. In Plant-soil interactions at low pH, Eds. R.J. Wright et al., 1991 Kluwer Academic Publishers, pp 703-716.

BERGER A., 1971- La circulation de l'eau dans le système sol-plante. Etude de quelques résistances en relation avec certains facteurs du milieu. Thèse de Doctorat d'Etat, USTL, Montpellier, 224 p.

BOLT G.H. et BRUGGENWERT M.G.M., 1976- Soil chemistry. A- Basics Elements. Ed. Elsevier.

BONFILS P. et FAURE J., 1956- Les sols de la région de Thiès. Ann. du CNRA de Bambey, pp 5-24.

BONNEMAIN J.L., 1978- Transport des produits de la photosynthèse. In Photosynthèse et production végétale, Costes, 2^e ed., Bordas, Paris, pp 171-194.

- BOULIER F. et JOUVE P., 1990- Evolution des systèmes de production sahéliens et leur adaptation à la sécheresse. R3S-CORAF-CILSS. CIRAD-DSA, 143 p.
- BRENNER A.J., JARVIS P.G. et VANDENBELT R.J., 1991- Transpiration from a neem windbreak in the Sahel. In Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone. Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991, IAHS Publ. n° 199, pp 375-385.
- CALLOT G., CHAMAYOU H., MAERTENS C. et SALSAC L., 1982- Mieux comprendre les interactions sol-racine. Incidence sur la nutrition minérale. INRA, Paris, 325 p.
- CATTAN P., 1987- La fertilisation économique adaptée à l'arachide dans la rotation des cultures, résultats des essais conduits par l'opération phytotechnie de l'arachide en 1985 et 1986. ISRA, CIRAD IRHO, 78 p.
- CERIGHELLI R., 1955- Cultures tropicales. I- Plantes vivrières. J.B. Baillièrre et Fils, Eds, Paris, pp 245-288.
- CHOPART J.L. et NICOU R., 1987- Vingt ans de culture continue avec et sans labour en sec dans un sol sableux dunaire au Sénégal. CIRAD-IRAT, Doc. mult., 36 p.
- CISSE L., 1986- Etude des effets d'apports 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 Doctorat, INP de Lorraine, 184 p.
- COUREL M.F., 1984- Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par satellites. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris I, 407 p.
- CTFT, 1989- *Faidherbia albida* (Del). Nogent-sur-Marne: CIRAD-CTFT, 72 p.
- DANCETTE C., MAUBOUSSIN J.C., NICOU R. et TOURTE R., 1974- Pour une meilleure rentabilisation agricole des ressources pluviales dans les sols sableux d'Afrique tropicale sèche. Doc. multig. Bambey, Sénégal.
- DANCETTE C. et POULAIN J.F., 1968- Influence de l'*Acacia albida* sur les facteurs pédoclimatiques et les rendements des cultures. Nouvelle contribution. Bambey: IRAT-CNRA.
- DANCETTE C. et WILLIOT P., 1971- Mesure du rayonnement global à Bambey et corrélation avec les durées d'insolation réelle et possible. Application à l'agriculture. In Conférence technique sur l'agroclimatologie dans les pays semi-arides au Sud du Sahara. OMM, Dakar, 8-20 février 1971, 13 p.
- DASSA-GIRARD M., 1987- Etude comparée des activités phosphatasiques acides et des paramètres hydriques foliaires de cultivars de mil (*Pennisetum americanum* L.) soumis à des contraintes hydriques. Thèse de Doctorat, Université Paris VII, 179 p.
- DEAT M. et BOCKEL N., 1985- Identification des situations agricoles en Afrique sahélienne en vue d'améliorer leur adaptation à la sécheresse. R3S/CIRAD, Montpellier, 84 p + carte.
- DIOUF M., 1990- Analyse de l'élaboration du rendement du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubb.). Mise au point d'une méthode de diagnostic en parcelles paysannes. Thèse de Doctorat, INA-Paris Grignon, 227 p.
- EDMEADES D.C., WHEELER D.M., BLAMEY F.P.C. et CHRISTIE R.A., 1991- Calcium and magnesium amelioration of aluminium toxicity in Al-sensitive and Al-tolerant wheat. In Plant-soil interactions at low pH, Eds. R.J. Wright et al., 1991 Kluwer Academic Publishers, pp 755-761.
- FERRAND P., 1992- Mesure de l'évapotranspiration d'un couvert de canne à sucre par la méthode du débit de sève, méthodologie et applications. Mémoire de fin d'étude, ISTOM, 95 p.
- FERRARIS R., 1973- Pearl millet (*Pennisetum typhoides*). Commonwealth Agricultural Bureau.

FOREST F., 1984- Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. GERDAT, IRAT, Montpellier, Doc. mult.

FOREST F. et LIDON B., 1982- Influence of the rainfall pattern on fluctuations in an intensified sorghum crop yield. In Agrometeorology of Sorghum and Millet in the Semi-Arid Tropics: Proceeding of the International Symposium, 15-20 novembre 1982, ICRISAT, pp 261-273.

GALLAIS J., 1989- Mais qu'est-ce que le Sahel ? In Ministère de la Coopération, Paris, Museum d'Histoire Naturelle, Paris. Sahara sud, Sahel Nord. De l'Atlantique à l'Ennedi. Centre Culturel Français, Abidjan (Côte d'Ivoire), 240 p.

GANRY F., 1990- Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Nancy I, 355 p.

GARIN P., 1989- Evolution des pratiques agricoles depuis 20 ans et leur adaptation à la sécheresse dans un village du Sine au Sénégal. DSA/ISRA, 105 p + annexes.

GARIN P. et THIAM A., 1989- Phytotechnie mil à Sob, village du Sine en 1988. Montpellier, CIRAD-DSA, 14 p.

GASTELLU J.M., 1981- L'égalitarisme économique des sereer du Sénégal. Paris, ORSTOM, Travaux et Documents, n° 128, 808 p.

GIGOU J., 1982- Dynamique de l'azote minéral en sol nu ou cultivé de région tropicale sèche du Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat, USTL, Montpellier, 130 p.

GIRARD X. et ADRI K., 1991- Potentialités de la maïsiculture pluviale en Afrique sub-sahélienne. Rapport au MRES. IRAT, Montpellier.

GIRI J., 1983- Le Sahel demain. Catastrophe ou renaissance ? Eds. KARTHALA, Paris, 325 p.

GIRI J., 1986- L'Afrique en panne. Vingt-cinq ans de "développement". Eds. KARTHALA, Paris, 204 p.

GLANTZ M., 1987- Drought and hunger in Africa: denying famine a future. New York, USA: Cambridge University Press, 457 p.

GODBOLD D.L., 1991- Aluminium decreases root growth and calcium and magnesium uptake in *Picea abies* seedlings. In Plant-soil interactions at low pH, Eds. Wright et al., 1991 Kluwer Academic Publishers, pp 747-753.

GOZE E., 1990- Modèle stochastique de la pluviométrie au Sahel. Application à l'agronomie. Thèse de Doctorat, USTL, Montpellier, 113 p + cartes.

GRANIER A. et AUSSENAC G., 1988- Transfert de l'eau dans l'arbre. Etude de la transpiration d'un peuplement de douglas en conditions naturelles. In Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante atmosphère, Ed. Calvet, INRA, Paris, pp 303-327.

GREGORY P.J., 1992- Concepts of water use efficiency. In Soiland Crop Management for Improved Water Use Efficiency in Rainfed Areas. Proceedings of an International Workshop, Ankara, Turkey, 15-19 May 1989. IRCADA, Aleppo, Syria, Eds Harris, Cooper and Pala, pp 9-20.

GRIMME H., 1984- Aluminium tolerance of soybean plants as related to magnesium nutrition. Proc. VI Intl. Colloq. for Optimization of Plant Nutrition 1, pp 243-249. Montpellier Cedex, France.

- HAFNER H., 1992- Effect of organic and inorganic fertilizer application on growth and mineral nutrient uptake of pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) and ground nut (*Arachis hypogaea* L.) in an acid sandy soil of Niger. Dissertation, Universität Hohenheim, 118 p.
- HAMON G., 1978- Caractérisation hydronymique de deux sols en culture de la région Centre-Nord du Sénégal. Doc. Multig., Bambey, Sénégal.
- HAVARD M., 1986- Le parc de matériels de culture attelée et les possibilités de maintenance dans le département de Fatick: résultats d'enquêtes. ISRA, doc. de travail 87-6.
- HSIAO T.C., 1982- The soil-plant-atmosphere continuum in relation to drought and crop production. In Drought resistance in crops with emphasis on rice, International Rice Research Institute, Philippines, pp 39-52.
- HSIAO T.C., O'TOOLE J.C. et TOMAR V.S., 1980- Water stress as a constraint to crop production in the tropics. In Priorities for alleviating soil-related constraints to food production in the tropics, International Rice Research Institute, Philippines.
- IMBERNON J. et AUCKENTHALER J., 1983- Analyse critique de deux référentiels traduisant la demande évaporative en région tropicale : ETP selon Penman et évaporation du bac A. Montpellier, Doc. interne IRAT, Division recherche-développement.
- ISRA, 1975- Amélioration des Mils au Sénégal. Rapport général d'activités. ISRA/CNRA, 2 vol., doc. mult., 87 p.
- ITAI C. et BENZIONI A., 1976- Water Stress and Hormonal Response. In Water and Plant Life. Problems and Modern Approaches. Eds. Lange et al., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp 225-242.
- ITIER B. et RIOU C., 1985- Une possibilité de suivi de l'état hydrique des cultures en zone semi-aride à partir des mesures micrométéorologiques simples. In les besoins en eau des cultures. Conférence internationale, Paris, 11-14 septembre 1984, INRA, Paris, pp 831-840.
- JAILLARD B., 1990 - Compte rendu de mission au CNRA de Bambey. In Compte-rendu d'état d'exécution 1990 de l'ATP/CIRAD, Novembre 1990.
- JARVIS P.G., 1975- Water transfer in plants. In: Heat and mass transfer in the biosphere. Eds. De Vries et al., New York.
- JONES H.G., 1978- Modelling diurnal trends of leaf water potential in transpiration wheat. J. Appl. Ecol., Vol. 15, n° 2, pp 613-626.
- JONES H.G., 1987- Breeding for stomatal characters. In Stomatal function, Eds. Zeiger et al., pp 431-444.
- KASSAM A.H., 1976- Crops of the West African semi-arid tropics. ICRISAT Hyderabad, India.
- KELTJENS W.G. et DIJKSTRA W.J., 1991- The role of magnesium and calcium in alleviating aluminium toxicity in wheat plants. In Plant-soil interactions at low pH, Ed. R.J. Wright et al., 1991 Kluwer Academic Publishers, pp 763-768.
- KINRAIDE T.B., 1991- Identity of the rhizotoxic aluminium species. In Plant-soil interactions at low pH, Eds. R.J. Wright et al., 1991 Kluwer Academic Publishers, pp 717-728.
- KOCHIAN L.V. et SHAFF J.E., 1991- Investigating the relationship between aluminium toxicity, root growth and root-generated ion currents. In Plant-soil interactions at low pH, Eds. R.J. Wright et al., 1991 Kluwer Academic Publishers, pp 769-778.

- LAFFRAY D., SAINTGUILY A. et LOUGUET P., 1986- Etude comparative des effets d'une contrainte hydrique progressive sur les paramètres hydriques de trois variétés de mil. Comm. Coll. de Djerba, Tunisie (sept. 1986).
- LERICOLLAIS A., 1987- Analyse du changement dans les systèmes agraires Sérers au Sénégal. Bilan et perspectives des recherches. Doc. d'étape ORSTOM, Montpellier, 41 p.
- LEROUX Marcel, 1983- Atlas du Sénégal: Climat. Eds. jeune Afrique, Paris, 72 p.
- LEROUX Murielle, 1988- Suivi hydrique du mil sur la station de Bambey. Hivernage 1988. IRAT/ISRA/CNRA de Bambey, Doc. ron., 14 p.
- LOUGUET P., CANALE N., DESHAGER S., CONTOUR-ANSEL D. et LAFFRAY D., 1993- Tolérance protoplasmique et activité de la phosphoenol pyruvate carboxylase foliaire de cultivars de Mil soumis à des contraintes hydriques contrôlées. In Colloques et Séminaires de l'ORSTOM, à paraître, Réunion thématique Mil, Montpellier, 24-26 novembre 1992.
- LOUPE D., 1989- *Acacia albida*, in Bulletin de liaison des membres du RESEAU ARBRES TROPICAUX, Association silva.
- MAERTENS C., 1978- Exploitation des réserves hydriques du sol par les racines. In le Soja : Fonctionnement et maîtrise de la culture. Brochure INRA offset.
- MARSCHNER H. et VETTERLEIN D., 1992- Root-induced spatial variation in soil water content and its effect on phosphorus uptake and growth of pearl millet (*Pennisetum americanum*) [L.] Leeke under drought conditions. Rapport final, Programme de recherche du réseau R3S (programme fédérateur parcelle, thème II): Amélioration de l'alimentation hydrique et minérale par des techniques culturales en zone soudano-sahélienne. University of Hohenheim, 111 p.
- MENGEL K. et KIRKBY E.A., 1987- Principles of plant nutrition. 4th Ed., International Potash Institute, Bern, Switzerland 1987, 687 p.
- MÜNCH E., 1930- Translocation of materials in plants. Fischer Verlag, Jena.
- NDIAYE P., 1983- Atlas du Sénégal: Végétation et faune. Eds. jeune Afrique, Paris, 72 p.
- PASSIOURA J.B., 1982- The role of root system characteristics in the drought resistance of crop plants. In Drought resistance in crops with emphasis on rice, International Rice Research Institute, Philippines, pp 71-82.
- PELISSIER P., 1966- Les paysans du Sénégal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance. Saint Yrieix, Ed. Fabrègue, 940 p + cartes.
- PELISSIER P., 1983- Atlas du Sénégal: Agriculture. Eds. jeune Afrique, Paris, 72 p.
- PERNES J., 1984- Gestion des ressources génétiques des plantes. Tome 1: Monographies. Ed. ACCT, Paris, pp 159-197.
- PIERI C., 1982- Estimation du bilan des pertes moyennes en eau et en éléments minéraux dans une succession culturale mil-arachide (années 1971 à 1981). Montpellier, IRAT-AIEA, 26 p.
- PIERI C., 1989- Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Eds. Ministère de la coopération et CIRAD-IRAT, 444 p.
- POSS R. et SARAGONI H., 1987- Calage du cycle cultural du maïs et zonage pédoclimatique au Togo méridional. Lomé, ORSTOM-DRA-IRAT, 10 p.

RACHIE K.O., 1974- The millets and minor cereals. A bibliography of the world literature on millet pre 1930 and 1964-1969, and of all literature on other minor cereals. The Scarecrow Press Inc. Metuchen, N.J.

RAUNET M., 1990- Enseignements méthodologiques d'une opération de recherche interdisciplinaire à Madagascar: l'étude du fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé. In *Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales*. Actes des journées de la DRN. CIRAD/IRAT/DRN, Ed. IRAT, Montpellier, pp 83-104.

REYNIERS F.N., 1985- Critères de tolérance à la sécheresse en fonction du milieu édapho-climatique. In *La sécheresse en zone intertropicale*. Pour une lutte intégrée. Ed. CIRAD, Montpellier. pp 199-212.

REYNIERS F.N., 1990- Diagnostic de l'alimentation hydrique des cultures pluviales. In *Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales*. Actes des journées de la DRN. CIRAD/IRAT/DRN, Ed. IRAT Montpellier, pp 137-149.

REYNIERS F.N., 1991- Esquisse d'hydrosystème céréalier soudano-sahélien valorisant les précipitations. Séminaire International sur la Gestion Agroclimatique des Précipitations, Bamako 9-13 décembre 1991, 12 p.

REYNIERS F.N. et FOREST F., 1988- Améliorer l'alimentation hydrique et son efficience en agriculture pluviale en Afrique au Sud du Sahara. Séminaire ILRI/CTA du 25 au 29 avril 1988, HARARE, 25 p.

REYNIERS F.N. et FOREST F., 1990- La pluie n'est pas le seul remède à la sécheresse en Afrique. Les flux hydriques dans le système sol-plante-atmosphère. In *Sécheresse, Science et changements planétaires*. Ed. Libbey, Paris, Vol. 1, n° 1, pp 36-43

RIBSTEIN P., 1990- Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel. Thèse de Doctorat, USTL, Montpellier, 317 p.

RICHMOND J.B., HARPER W.S. et RANKIN J., 1991- Predicting toxicity of reactive "solution" aluminium using kinetic speciation. In *Plant-soil interactions at low pH*, Eds. Wright et al., 1991 Kluwer Academic Publishers, pp 35-42.

RIOU C., 1975- La détermination pratique de l'évaporation: application à l'Afrique Centrale. ORSTOM, Paris, Mémoire n° 80, 236 p.

RIOU C., 1989- La sécheresse: Diagnostics et conséquences. Peut-on en limiter les effets ? Les travaux de l'INRA. INRA Bordeaux, Laboratoire de Bioclimatologie, Doc. ron., 20 p + figures.

RIVIERE I., 1989- L'utilisation de la méthode de mesure de la fluorescence des chlorophylles pour l'étude de la tolérance à la sécheresse chez le soja. Mémoire de DEA, USTL/ENSAM, Montpellier, 32 p + annexes.

ROBELIN M., 1984- Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse. In *Physiologie du maïs*, Ed. INRA, Paris, pp 445-476.

RORISON I.H., 1980- The effect of soil acidity on nutrient availability and plant response. In *Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems*. Eds. Hutchinson and Hadas, Plenum Press, New York, pp 283-304.

RUELLE P., SENE M. et PEREZ P., 1989- Etude expérimentale et modélisation du bilan hydrique d'un bassin versant en zone soudano-sahélienne. In *Rapport Final de l'ATP CNRS.PIREN/INRA/ORSTOM/CIRAD: "Bilans hydriques et minéraux des sols"*, Ed. Vachaud, IMG Grenoble, pp 111-135.

SAARINEN T.F., 1966- Perception of drought hazard on the great plains. Department of Geography, Research Paper n° 106, Chicago, USA: The University of Chicago, 183 p.

SALISBURY F.B. et ROSS C.W., 1978- *Plant physiology*. 2nd Ed., Wadsworth, Belmont.

SCHILLING R., 1992- Synopsis scientifique sur l'arachide pour Agropolis-Museum, CIRAD-IRHO, doc. ron., 20 p.

SIBAND P., 1981- Croissance, nutrition et production du mil (*Pennisetum typhoides* Hubbard et Stapf). Essai d'analyse du fonctionnement du mil en zone sahélienne. Thèse de doctorat d'Etat, USTL, Montpellier, 302 p.

SIVAKUMAR M.V.K., 1991- Durée et fréquence des périodes sèches en Afrique de l'Ouest. ICRISAT, Bulletin de recherche n° 13, ICRISAT, Patancheru (Inde), 181 p.

SIVAKUMAR M.V.K., VIRMANI S.M. et REDDY S.J., 1979- Rainfall Climatology of West Africa: Niger. ICRISAT Information Bulletin n° 5, ICRISAT, Patancheru (Inde), 66 p.

SLATYER R.O., 1967- Plant-Water Relationships. Academic Press, London, New York.

TAZAKI T., ISHIHARA K. et USHIJIMA T., 1980- Influence of water stress on photosynthesis and productivity of plants in humid areas. In Adaptation of Plants to Water and High Temperature, Eds. Turner et Kramer, John Wiley, New York, pp 309-321.

ULRICH B., 1893- Soil acidity and its relation to acid deposition. In Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystem. Eds. B. Ulrich and J. Pankrath, pp 127-146. Reidel, Dordrecht, The Netherlands.

VALANCOGNE C. et GRANIER A., 1991- Intérêt des méthodes thermiques de mesure du flux de sève pour l'étude du bilan hydrique des savanes. In Soil Water Balance in the Sudano-sahelian Zone, Proceeding of the Niamey Workshop, February 1991, IAHS Publ. n° 199, pp 387-400.

VALANCOGNE C. et NASR Z., 1987- Méthodes thermiques de mesure du débit de sève. In Colloque "Le maïs et l'eau", Agen, décembre 1987.

VALENTIN C., CHEVALLIER P., FRITSCH E., MITJA D. et PLANCHON O., 1989- Fonctionnement hydrique à différentes échelles d'un petit bassin versant de savane humide en Côte d'Ivoire. Analyse de l'influence des couvertures pédologiques et végétales. In Rapport Final de l'ATP CNRS.PIREN/INRA/ORSTOM/CIRAD: "Bilans hydriques et minéraux des sols", Ed. Vachaud, IMG Grenoble, pp 219-239.

VIDEAU J-D., 1989- Etude de la consommation d'eau de la vigne en fonction des conditions climatiques. Effets du système de conduite et de la sécheresse. Mémoire de DAA, INA Paris-Grignon, 45 p + annexes.

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

1ERE PARTIE :

- Fig. 1 : Les domaines biogéographiques du Sénégal (Atlas Jeune Afrique) : p 12
 Fig. 2 : Positions moyennes mensuelles du front intertropical, F.I.T. (Atlas Jeune Afrique) : p 14
 Tab. 1 : Tableau pluviométrique à la station de Bambey (ISRA/IRAT) : p 14
 Tab. 2 : Caractéristiques principales des sols dior (d'après CHARREAU, 1961; CHARREAU et NICOU, 1971) : p 18
 Fig. 3 : Le bassin arachidier du Sénégal (Atlas Jeune Afrique) : p 21
 Tab. 3 : Croissance de la production de céréales et croissance de la population de 1961 à 1980 au Sénégal (GIRI, 1983) : p 22
 Fig. 4 : Part des céréales consommées dans le Sahel venant de l'extérieur de 1900 à 1980 (GIRI, 1983) : p 22
 Fig. 5 : Potentialités calculées sur la période 1970-1985 et réalités de la production du mil au Mali (IER Mali) : p 24
 Fig. 6 : Relation entre IRESP (indice de rendement espéré) et rendements mesurés dans différents pays de l'Afrique sub-sahélienne (GIRARD et ADRI, 1991) : p 24
 Tab. 4 : Evaluation du ruissellement et du drainage sous culture dans le Siné-Saloum (d'après RUELLE et al., 1989) : p 26
 Fig. 7 : Gestion ancienne du terroir en pays Sérér (d'après PELISSIER, 1983) : p 28
 Fig. 8 : Schéma général d'évolution des systèmes de production et de dégradation des ressources naturelles en zone sahélo-soudanienne (BOULIER et JOUVE, 1990) : p 31
 Fig. 9 : Indice hydrique et rendement du mil (AFFHOLDER, 1991b) : p 32
 Tab. 5 : Pertes minérales par lixiviation sous culture au Sénégal (PIERI, 1982) : p 34
 Fig. 10 : Garniture cationique du complexe absorbant en fonction de l'acidité du milieu (d'après BOLT et BRUGGENWERT, 1976) : p 36
 Fig. 11 : Influence du pH sur la disponibilité des éléments nutritifs (d'après LUCAS et DAVIES, 1961) : p 36
 Fig. 12 : Activités relatives en fonction du pH des formes mononucléaire d'Al en admettant l'absence des formes polynucléaires ou des ligands autres que OH⁻ (d'après KINRAIDE, 1991) : p 36
 Fig. 13 : Effets de la culture continue sur le pH (a) et sur le taux d'aluminium échangeable (b) (CHOPART et NICOU, 1989) : p 38
 Fig. 14 : Hypothèse sur l'action de la culture continue sur sols tropicaux (REYNIERS, 1990) : p 40
 Fig. 15 : Représentation du continuum sol-plante-atmosphère selon le formalisme ohmique : p 42
 Fig. 16 : Evolution de la conductance stomatique en fonction du potentiel de turgescence (DAVIES et al., 1981) : p 44
 Fig. 17 : Principaux flux dans l'hydrosystème agricole pluvial (REYNIERS, 1991) : p 46
 Fig. 18 : Simulation des réponses de la canne à sucre à une défoliation partielle (DAVIES et MEINZER, 1990) : p 56
 Fig. 19 : Recherche des mécanismes physiologiques relatifs à la diminution de l'alimentation hydrique du mil due à la dégradation des sol : p 62

2EME PARTIE :

- Tab. 6 : Nombres moyens de stomates par mm² observés sur les empreintes de l'épiderme de la face supérieure, de la face inférieure et de la gaine d'une feuille de mil : p 66
 Fig. 20 : Relation entre la surface foliaire mesurée par planimètre optique et les mesures de longueur et largeur d'une feuille obtenue pour différents stades de développement du mil (d'après LEROUX, 1988) : p 66
 Fig. 21 : Evolution de la surface spécifique du mil en fonction du nombre de jours après semis : p 68
 Fig. 22 : Régression entre le rayonnement net (Rn) et le rayonnement global (Rg) obtenue pour les valeurs horaires : p 74
 Fig. 23 : Régression entre le rayonnement net (Rn) et le rayonnement global (Rg) obtenue pour les valeurs journalières : p 74

- Fig. 24 : Schéma du capteur de débit de sève à bilan de chaleur : p 78
 Fig. 25 : Schéma du fluxmètre thermique : p 82
 Fig. 26 : Schéma d'ensemble du montage : p 84
 Photo : Formation de racines recouvrant et endommageant le capteur : p 84
 Fig. 27 : Position des sondes de températures dans le capteur ISA1 pour la mesure des débits de sève ds_1 et ds_2 : p 86
 Fig. 28 : Evolution horaire des débits de sève ds_1 et ds_2 mesurés par le capteur ISA1 et de la transpiration mesurée par pesée : p 86
 Fig. 29 : Espacement entre les sondes de température et l'élément chauffant dans les capteurs ISA4 et SYLVIA (en cm) : p 88
 Fig. 30 : Valeurs cumulées des débits de sève mesurés par les capteurs ISA4 et SYLVIA et de la transpiration mesurée par pesée : p 88
 Tab. 7 : Valeurs journalières de la transpiration mesurée par pesée et des débits de sève ds_1 et ds_2 pour deux espacements de sondes : p 89
 Fig. 31 : Schéma du gabarit maintenant les thermocouples : p 90
 Fig. 32 : Evolution horaire de la transpiration et du débit de sève mesuré sous la serre par le capteur ISA2 : p 92
 Fig. 33 : Montage thermoélectrique du capteur Dynamax : p 92
 Fig. 34 : Evolution horaire de la transpiration et des débits de sève mesurés par le capteur ISA2 et Dynamax montés sur la même tige de maïs : p 94
 Fig. 35 : Evolution horaire du coefficient K_{lat} mesuré sur le capteur ISA2 : p 96
 Fig. 36 : Ajustement du coefficient K_{lat} pour le calcul du débit de sève : p 96
 Fig. 37 : Evolution horaire du débit de sève et de la transpiration mesurés sur du mil : p 100
 Tab. 8 : Valeurs journalières de la transpiration mesurée par pesée et du débit de sève : p 102
 Fig. 38 : Relation entre le débit de sève d'une tige équipée d'un capteur et sa surface foliaire, à 50 JAL au champ : p 104
 Tab. 9 : Valeurs des coefficients a_j , b_j et du coefficient de corrélation R^2 de la relation entre les débits de sève et les surfaces foliaires, obtenue pour chaque jour j : p 105
 Fig. 39 : Comparaison entre l'ETR calculée par le bilan hydrique et le débit de sève moyen sur deux parcelles au champ : p 106

3E PARTIE :

- Fig. 40 : Schéma du dispositif pour l'étude d'une contrainte hydrique en pot : p 110
 Fig. 41 : Calendrier d'arrosage et des mesures physiologiques : p 110
 Fig. 42 : Effet du traitement hydrique sur l'évolution des surfaces foliaires des plantes témoins et stressées : p 112
 Tab. 10 : Moyenne par traitement des paramètres mesurés à la récolte : p 113
 Tab. 11 : Valeur du F de l'analyse de variance réalisée sur les surfaces foliaires : p 115
 Fig. 43 : Relation entre le débit de sève journalier et la surface foliaire d'une tige équipée d'un capteur : p 116
 Fig. 44 : Comparaison entre les débits de sève par m^2 de surface foliaire des brin-maîtres et des talles de mil cultivés en pot : p 116
 Fig. 45 : Evolution des courbes de débit de sève horaire pour une contrainte hydrique progressive : p 119
 Fig. 46 : Evolution des courbes de débit de sève horaire lors de la reprise d'arrosage : p 120
 Fig. 47 : Courbes types d'évolution du débit de sève pendant et après une contrainte hydrique : p 120
 Fig. 48 : Evolution horaire de la conductance stomatique lors du traitement hydrique : p 122
 Fig. 49 : Evolution horaire de la teneur relative en eau lors du traitement hydrique : p 123
 Fig. 50 : Evolution horaire du potentiel hydrique foliaire lors du traitement hydrique : p 124
 Fig. 51 : Evolution horaire du rayonnement net au premier jour de récupération (J 200) : p 126
 Fig. 52 : Effet de la contrainte hydrique sur l'évolution du débit de sève journalier par m^2 de surface foliaire : p 126
 Tab. 12 : Effet du traitement hydrique sur l'évolution des paramètres physiologiques : p 127
 Tab. 13 : Comparaison du débit de sève moyen journalier par m^2 de surface foliaire des plantes stressées et témoins avant et après la contrainte hydrique pour un rayonnement global (R_g) équivalent : p 129

- Fig. 53** : Relation entre le potentiel hydrique de l'arachide mesuré à la presse hydraulique et au psychromètre à thermocouple (d'après ANNEROSE, 1990) : p 130
- Tab. 14** : Pluviométrie (en mm) relevée pendant les expérimentations au champ de 1990 et 1991 : p 134
- Fig. 54** : Valeurs cumulées du stock hydrique des deux parcelles en 1990 : p 137
- Fig. 55** : Valeurs cumulées du stock hydrique des deux parcelles en 1991 : p 137
- Fig. 56** : ETR moyennes du mil au cours du temps en 1990 : p 138
- Fig. 57** : ETR moyennes du mil au cours du temps en 1991 : p 138
- Tab. 15** : Effet de l'apport de compost sur les composantes du rendement (d'après AFFHOLDER, 1992) : p 139
- Fig. 58** : Masses racinaires par dm^3 de sol en fonction de la profondeur pour l'année 1991 : p 141
- Fig. 59** : Evolution de l'indice de surface foliaire dans les deux parcelles en 1990 : p 142
- Fig. 60** : Evolution de l'indice de surface foliaire dans les deux parcelles en 1991 : p 142
- Fig. 61** : Effet de l'apport de compost sur le taux de débit de sève moyen d'un poquet en fonction de sa surface foliaire : p 144
- Fig. 62** : Effet de l'apport de compost sur le taux de débit de sève en fonction de l'humidité relative du sol : p 144
- Fig. 63** : Effet de l'apport de compost sur le débit de sève moyen journalier au champ- Année 1990 : p 146
- Fig. 64** : Effet de l'apport de compost sur le débit de sève moyen journalier au champ- Année 1991 : p 146
- Fig. 65** : Dynamique horaire du débit de sève moyen mesuré sur les parcelles Témoin et Compost pour les jours 53 et 54 après levée de l'année 1991 : p 148
- Fig. 66** : Schéma du dispositif de la première expérimentation en pot : p 150
- Tab. 16** : Analyses du sol prélevé à Thilmakha pour les expérimentations en pots (d'après BABRE, 1992) : p 152
- Tab. 17** : Présentation du traitement hydrique pour les lots de plantes stressées : p 153
- Fig. 67** : Evolution de la surface foliaire verte au cours du temps de 0 à 40 JAS : p 154
- Fig. 68** : Evolution de la transpiration moyenne journalière par plante : p 154
- Fig. 69** : Evolution de la surface foliaire verte au cours du temps de 59 à 75 JAS : p 157
- Fig. 70** : Evolution du débit de sève moyen par tige au cours du temps : p 158
- Fig. 71** : Effet de l'apport de chaux sur le poids racinaire au 41^e jour : p 160
- Fig. 72** : Effet de l'apport de chaux sur la surface foliaire au 41^e jour : p 160
- Tab. 18** : Effet de l'apport de chaux sur le rapport poids sec racine /feuille à 41 JAS, en condition d'apport d'eau limitant ou non : p 161
- Fig. 73** : Effet de l'apport de chaux sur le poids foliaire au 41^e jour : p 163
- Fig. 74** : Effet de l'apport de chaux sur le poids racinaire au 90^e jour : p 164
- Fig. 75** : Effet de l'apport de chaux sur la surface foliaire au 71^e jour : p 164
- Tab. 19** : Effet de l'apport de chaux sur le rapport poids sec de racine /surface foliaire à 41 JAS, en condition d'apport d'eau limitant ou non : p 165
- Tab. 20** : Effet de l'apport de chaux sur le rapport poids sec de racine/ surface foliaire en condition d'offre en eau limitante ou non : p 167
- Fig. 76** : Effet de l'apport de chaux sur la transpiration en fonction de la surface foliaire avec un stock en eau non limitant : p 168
- Fig. 77** : Effet de l'apport de chaux sur la transpiration en fonction de la surface foliaire pour un stock en eau limitant : p 168
- Fig. 78** : Effet de l'apport de chaux sur le débit de sève en fonction de la surface foliaire pour un apport d'eau non limitant : p 170
- Fig. 79** : Effet de l'apport de chaux sur le débit de sève en fonction de la surface foliaire lors du premier stress hydrique : p 170
- Fig. 80** : Effet de l'apport de chaux sur le taux de transpiration en fonction de l'humidité du sol pour $\text{SF} < 0.02 \text{ m}^2$: p 172
- Fig. 81** : Effet de l'apport de chaux sur le taux de transpiration en fonction de l'humidité du sol pour $0.02 < \text{SF} < 0.03 \text{ m}^2$: p 172
- Fig. 82** : Effet de l'apport de chaux sur le taux de transpiration en fonction de l'humidité du sol pour $0.03 < \text{SF} < 0.04 \text{ m}^2$: p 174
- Fig. 83** : Effet de l'apport de chaux sur le taux de débit de sève en fonction de l'humidité du sol pour $0.02 < \text{SF} < 0.06 \text{ m}^2$: p 174

Tab. 21 : EVbac et gammes d'humidité pondérale correspondant aux dates choisies pour étudier la relation entre le taux de transpiration et l'humidité pondérale du sol : p 175

Fig. 84 : Effet de l'apport de chaux sur le débit de sève horaire moyen d'une tige avant l'arrêt d'arrosage : p 176

Fig. 85 : Effet de l'apport de chaux sur le débit de sève horaire moyen d'une tige lors du premier arrêt d'arrosage : p 178

Tab. 22 : Comparaison des densités racinaires en pots et au champ : p 184

Tab. 23 : Synthèse des résultats et données bibliographiques sur l'évolution de la transpiration (T), des racines (R), de la surface foliaire (SF) et de la conductance stomatique (CS), selon les conditions d'expérimentation : p 186

ANNEXE 1 :

Tableaux climatiques obtenus à la station météorologique de Bambey :

	Juin			Juillet			Août			Septembre			Octobre		
	T ^{min}	T ^{moy}	T ^{max}	T ^{min}	T ^{moy}	T ^{max}	T ^{min}	T ^{moy}	T ^{max}	T ^{min}	T ^{moy}	T ^{max}	T ^{min}	T ^{moy}	T ^{max}
1	24,3	29,2	38,4	22,8	28,0	33,5	/	28,0	31,5	23,9	26,5	24,4	28,7	1	28,7
2	25,7	31,5	36,2	23,7	29,3	36,2	23,0	28,9	30,2	21,4	24,8	21,6	27,5	2	27,5
3	23,0	28,6	35,3	23,0	28,1	35,3	24,6	28,0	32,3	23,6	27,0	20,9	25,5	3	25,5
4	23,5	28,7	33,7	22,8	27,0	33,7	25,2	28,1	31,9	23,2	27,7	23,8	28,4	4	28,4
5	24,5	31,2	38,5	20,9	27,7	38,5	25,7	28,4	31,3	20,8	25,5	23,0	28,3	5	28,3
6	28,1	31,7	35,8	23,2	28,0	35,8	25,0	28,1	32,4	24,2	27,3	20,7	28,0	6	28,0
7	24,6	29,1	34,3	23,8	27,5	34,3	24,5	28,3	31,9	24,2	27,5	22,5	28,5	7	28,5
8	21,9	27,0	33,8	22,5	28,3	33,8	24,5	28,3	33,4	23,2	27,7	23,5	29,3	8	29,3
9	21,1	27,3	35,5	23,9	28,3	35,5	25,0	28,9	31,6	24,7	27,2	22,8	28,1	9	28,1
10	22,0	27,2	32,4	22,7	27,3	32,4	25,4	28,9	34,6	21,6	27,2	23,3	29,2	10	29,2
Cumul déc.	236,7	291,5	347,0	229,3	276,1	347,0	222,9	255,1	306,3	232,8	268,4	226,5	282,5		
Moy. déc.	23,9	29,2	34,7	22,9	27,9	34,0	24,8	28,3	34,0	23,3	26,8	22,7	28,3		
11	23,8	29,2	38,5	25,1	28,5	38,5	23,5	28,4	35,5	24,1	27,2	21,9	28,5	11	28,5
12	23,8	30,3	34,6	23,6	28,4	34,6	23,6	28,3	33,3	23,4	27,6	21,8	28,3	12	28,3
13	23,2	27,8	34,7	25,3	28,2	34,7	24,2	28,0	33,7	23,5	27,3	21,5	27,9	13	27,9
14	20,6	26,5	36,3	22,1	27,7	36,3	25,2	28,2	35,4	24,1	26,3	22,1	28,7	14	28,7
15	21,4	27,5	38,9	24,0	28,0	38,9	25,3	29,0	35,0	23,6	27,9	22,9	28,5	15	28,5
16	21,8	28,2	35,8	24,8	27,6	35,8	25,7	28,6	34,9	22,1	27,6	22,0	27,4	16	27,4
17	23,5	28,1	31,7	21,9	28,6	31,7	25,6	28,3	31,9	23,3	27,0	21,8	28,3	17	28,3
18	22,2	27,9	32,8	24,3	27,8	32,8	25,0	28,3	30,6	23,7	25,9	23,5	28,2	18	28,2
19	23,9	28,3	38,0	25,0	28,3	38,0	22,0	28,3	34,0	22,1	26,8	20,6	28,6	19	28,6
20	24,2	29,2	32,5	24,4	27,5	32,5	24,2	27,5	33,6	24,1	28,0	22,4	30,1	20	30,1
Cumul déc.	228,4	294,0	341,6	240,5	278,8	341,6	244,3	281,9	345,3	234,0	273,6	220,5	285,3		
Moy. déc.	22,8	29,4	34,2	24,1	27,9	34,5	24,4	28,2	34,5	23,4	27,4	22,1	28,6		
21	25,3	28,7	33,6	23,2	27,5	33,6	24,9	28,4	33,8	24,2	28,1	20,2	28,8	21	28,8
22	22,2	27,3	34,2	24,1	28,5	34,2	24,1	28,3	32,9	23,6	28,0	22,0	30,0	22	30,0
23	23,1	27,9	32,3	22,6	28,9	32,3	25,1	28,3	35,6	23,6	28,9	22,0	29,0	23	29,0
24	23,3	27,9	35,6	24,5	27,9	35,6	25,1	28,1	33,1	24,5	28,4	20,0	28,0	24	28,0
25	23,4	27,7	34,9	24,7	27,3	34,9	25,2	27,7	31,7	24,5	28,4	20,0	26,1	25	26,1
26	24,9	27,8	33,6	23,7	25,5	33,6	25,2	27,4	33,7	22,9	28,1	18,1	26,8	26	26,8
27	23,8	28,3	31,0	24,4	27,1	31,0	22,5	28,6	32,2	23,8	28,2	20,6	29,0	27	29,0
28	25,0	28,7	32,8	24,2	27,7	32,8	20,6	28,3	32,8	24,2	28,6	20,7	28,2	28	28,2
29	24,9	28,6	32,8	24,3	27,7	32,8	20,6	28,6	31,8	24,6	28,9	21,0	29,9	29	29,9
30	25,4	28,7	34,3	23,8	28,2	34,3	20,1	28,9	31,7	24,6	28,9	21,2	29,5	30	29,5
31														31	27,4
Cumul déc.	241,3	284,8	324,8	236,5	274,2	324,8	257,7	286,9	360,4	239,2	285,8	226,3	312,3		
Moy. déc.	24,1	28,5	32,5	23,4	27,4	32,6	25,4	27,3	36,0	23,9	28,6	20,6	28,4		
Cumul mois	708,4	860,1	1013,4	682,1	834,9	1012,0	724,9	834,9	1012,0	708,0	827,8	673,3	860,3		
Moy. mois	23,6	28,7	33,8	23,4	27,7	32,6	23,4	27,0	32,6	23,5	27,6	21,7	28,4		

Rayonnement global et durée d'insolation

	Juin		Juillet		Août		Septembre		Octobre	
	RG (J/cm ²)	Inso. (h)								
1	1256	6.0	1196	6.1	/	/	1149	7.5	1064	7.6
2	1077	3.3	1353	6.9	1138	7.7	895	4.6	900	3.8
3	1181	6.7	1374	9.1	1351	9.3	1130	6.5	684	1.2
4	1155	4.4	1492	10.6	1183	8.1	1097	7.5	1146	9.4
5	1180	6.6	1513	10.3	1389	9.7	1165	7.7	1126	9.9
6	1057	5.2	1404	8.5	933	3.7	1138	7.7	1195	9.5
7	1377	9.7	1356	7.9	750	2.4	1093	8.5	957	9.6
8	1169	5.4	1362	8.1	1151	8.9	1136	6.2	1179	8.8
9	1398	9.0	1351	8.2	1097	6.8	1136	8.1	1190	10.3
10	798	0.9	1144	5.9	1202	10.3	1266	9.8	1304	9.5
Décade 1	11646	57.2	13545	81.6	10174	67.9	11205	74.1	10745	79.6
11	1337	8.0	1041	4.5	1324	10.3	920	4.3	1228	10.3
12	1249	6.5	1240	9.2	1159	8.9	1287	9.5	1266	9.8
13	1350	9.1	1378	9.1	1425	9.9	963	4.7	1220	9.8
14	1478	9.9	1368	9.8	887	4.9	1232	9.4	1195	9.6
15	1490	9.9	1254	7.2	1347	10.2	1264	9.6	1193	10.0
16	1410	8.7	1159	5.5	969	6.4	1279	9.3	1220	10.0
17	1433	9.1	1288	7.2	1112	7.6	831	5.1	1191	9.7
18	1369	8.9	1248	8.1	1128	9.7	611	0.9	1131	9.6
19	1337	8.1	1328	9.4	943	7.2	1126	7.0	1164	9.9
20	1339	8.7	1269	8.4	1271	8.5	1227	9.2	1066	8.6
Décade 2	13792	66.9	12813	78.4	11595	83.6	10740	69.0	11874	97.3
21	1252	5.8	1368	9.7	1356	11.2	1121	8.0	1115	9.8
22	1337	7.6	1298	9.6	1320	10.2	1280	9.8	971	8.3
23	1343	9.2	957	3.9	1152	9.6	1128	9.1	916	7.2
24	1239	8.0	1066	4.8	1241	9.6	1183	8.5	1019	9.0
25	1222	7.7	885	4.6	758	1.9	586	3.7	956	8.6
26	1234	7.0	510	0.1	1095	7.1	1204	9.4	924	7.9
27	1357	9.8	1076	4.3	1035	9.0	1074	6.8	907	5.8
28	1276	7.8	1087	5.0	971	3.9	1082	7.8	982	9.2
29	1307	9.3	1148	8.0	1098	6.0	1054	7.9	927	7.2
30	1417	10.4	1215	10.6	1016	3.4	831	4.3	963	9.1
31			/	/	985	5.1			1013	9.8
Décade 3	12984	82.6	10840	60.6	12035	77.0	10543	75.3	10583	91.9
Mois	39422	226.7	36798	220.6	33774	228.5	32468	218.4	33212	266.8

	Juin			Juillet			Août			Septembre			Octobre		
	Humidité relative (%)		EvBAC (mm)	Humidité relative (%)		EvBAC (mm)									
	min.	max.													
1	23	76	10.7	42	85	9.8	45	83	9.2	69	98	44	98	8.1	5.3
2	16	54	10.1	35	82	10.5	37	81	7.2	72	98	44	98	4.1	9.2
3	30	69	9.6	30	92	10.9	55	81	7.3	67	98	66	97	1.8	2
4	28	72	9.8	31	89	7.5	52	92	7.3	67	94	43	96	8.4	3
5	15	65	15.5	28	97	10.8	27	85	7.1	63	95	38	98	5.4	4
6	26	61	10.7	24	88	11.5	48	83	7.1	65	98	40	95	4.9	5
7	33	63	10.4	42	85	6.3	50	88	5.6	63	98	37	97	5.8	6
8	43	63	7.0	38	82	11.7	43	89	7.5	57	83	24	90	5.3	7
9	48	69	11.4	35	85	10.2	49	90	7.6	64	84	21	96	6.2	8
10	37	84	6.8	38	83	7.3	44	90	8.1	52	98	18	91	5.6	9
Gumul déc.			102.0			98.5			73.0					60.4	67.8
Moy. déc.			10.2			9.7			7.3					6.0	6.8
11	34	87	10.2	33	82	6.8	38	90	8.9	58	95	22	95	6.4	8.3
12	27	76	11.2	43	86	9.4	43	93	11.4	57	98	24	83	5.8	7.9
13	49	75	9.8	37	87	9.8	50	92	6.8	55	98	28	95	4.8	8.8
14	31	92	6.5	31	78	9.0	47	87	6.4	51	98	27	96	8.3	7.7
15	26	97	9.9	38	82	8.8	40	90	8.2	42	98	25	95	7.0	8.1
16	19	81	10.2	38	87	10.8	61	92	6.0	47	98	38	98	4.6	8.6
17	19	78	10.1	63	100	4.8	45	85	5.4	60	97	16	97	5.6	9.0
18	33	93	10.6	58	83	7.5	48	91	3.0	71	87	26	97	4.8	10.8
19	37	82	8.5	43	89	8.6	73	97	0.5	57	89	18	94	4.7	9.1
20	33	88	9.8	44	86	7.1	61	98	5.3	51	96	16	89	7.0	7.3
Gumul déc.			98.6			82.2			61.7					59.1	85.4
Moy. déc.			9.9			8.2			6.2					5.9	6.5
21	32	88	10.0	42	79	8.5	53	96	6.8	54	94	12	100	5.0	10.0
22	27	68	10.0	40	79	10.2	52	94	8.0	38	95	17	100	7.3	9.4
23	31	87	11.1	50	92	5.4	56	92	7.5	53	85	17	89	6.8	12.4
24	34	89	8.9	49	88	6.8	52	90	7.5	42	98	17	58	7.0	9.3
25	40	88	9.0	48	90	9.8	50	82	6.6	52	83	16	77	4.4	9.1
26	50	90	9.2	78	97	1.5	51	94	3.1	49	95	18	62	8.1	8.9
27	41	87	8.5	63	96	5.5	68	95	3.1	44	98	20	72	8.0	7.1
28	38	83	9.2	54	96	6.8	65	95	4.2	34	97	11	90	6.9	12.7
29	40	92	10.2	55	93	6.5	64	94	8.5	51	98	12	52	6.8	11.5
30	30	94	9.2	55	90	8.1	73	97	3.7	43	94	16	74	6.7	10.0
31				44	89	8.8	63	96	5.2			18	67		6.3
Gumul déc.			85.3			75.5			62.2					63.0	108.7
Moy. déc.			9.5			6.9			5.7					6.3	9.7
Gumul mois			265.9			254.2			188.9					182.5	259.9
Moy. mois			8.9			8.2			6.4					6.1	8.4

ANNEXE 2 :

Programme détaillé pour l'enregistrement de 6 capteurs de débit de sève par la centrale de mesure 21X:

Instructions:	Action:
10	Temps de scrutation = 10s
P10	Mesure la tension des batteries
01:1	Emplacement 1
P20	Lecture de l'AM32
01:1	
02:1	
P87	1ere boucle
01:0	
02:18	Scrute les 18 premiers canaux
P22	Excitation de l'AM32
01:1	
02:1	
03:0	
04:5000	5000 mV
P2	Mesure de dtam, dt et dtav
01:1	1 répétition (sur la 21X)
02:1	Echelle: 5 mV lent
03:1	Lecture sur le canal 1 de la 21X
04:2C (--)	Emplacements indexés (de 2 à 19)
05:25	Multiplificateur
06:0	Ecart
P95	Fin de la 1ere boucle
P87	2e boucle
01:0	
02:6	Scrute les 6 canaux suivant
P22	Excitation de l'AM32
01:1	
02:1	
03:0	
04:5000	

P2 Mesure de dtlat
 01:1 1 répétition sur la 21X
 02:1 Echelle: 5 mV lent
 03:1 Lecture sur le canal 1 de la 21X
 04:27C (--) Emplacements indexés (de 27 à 32)
 05:2.7778 Multiplicateur
 06:0 Ecart

P95 Fin de la 2e boucle

P87 3e boucle
 01:0
 02:6 Scrute les 6 canaux suivant

P22 Excitation de l'AM32
 01:1
 02:1
 03:0
 04:5000

P2 Mesure des tensions U
 01:1 1 répétition sur la 21X
 02:5 Echelle: 5000 mV lent
 03:1 Lecture sur le canal 1 de la 21X
 04:33C (--) Emplacements indexés (de 33 à 38)
 05:1 Multiplicateur
 06:0 Ecart

P95 Fin de la 3e boucle

P20 Fin de lecture de l'AM32

P14 Mesure des Tcent
 01:6 6 répétitions sur la 21X
 02:1 Echelle: 5mV lent
 03:2 A partir du canal 2 de la 21X
 04:1 Code pour le type de thermocouple (Cu-Co)
 05:26 N° d'emplacement de la T° de référence
 06:20 A partir de l'emplacement 20 (de 20 à 25)
 07:1 Multiplicateur
 08:0 Ecart

P17 Mesure de la T° de référence (sur la 21X)
 01:26 Emplacement

P92 => signature du programme= 0118
 01:0
 02:20 Intervalle de sortie= 20mn

03:10	Installation du drapeau de sortie
P77	Choix des unités de temps
01:110	Code pour Jour, Heure-Minute
P71	Moyenne (sortie des données)
01:37	Nombre de répétitions
02:2	A partir de l'emplacement 2
P00	Fin du programme

ANNEXE 3 :

Ordre d'utilisation des différents programmes de calcul du débit de sève et d'apparition des fichiers de données traitées (d'après VALANCOGNE, non publié) :

