



UNIVERSITE LOUIS PASTEUR

Université Louis Pasteur  
Institut de Mécanique des Fluides  
STRASBOURG



URA CNRS 854

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du grade de

**Docteur de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg**

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur : Agrohydrologie

par

**Bernard REBIERE**

---

# **Effet d'un excès d'eau sur la croissance d'une culture de blé d'hiver**

---

Identification d'une variable de stress et analyse de la réponse de la culture



Unité de Bioclimatologie



*Soutenue le 25 novembre 1996 à l'ULP devant le jury constitué de :*

Michèle TREMOLIERES	Rapporteur interne et présidente
Raymond BONHOMME	Rapporteur externe
Pavel KABAT	Rapporteur externe
Lothaire ZILLIOX	Directeur de thèse
Nadine BRISSON	Examineur
François LIMAUX	Examineur
Pierre RENAULT	Examineur invité
Daniel ZIMMER	Examineur invité

TH-HC 45

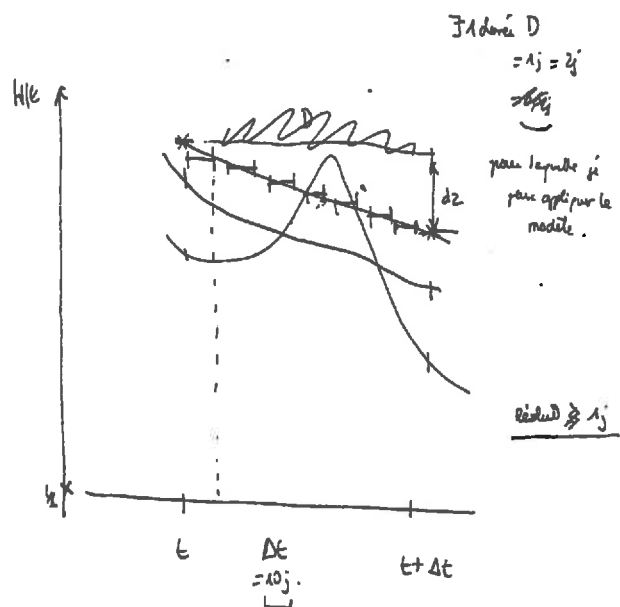
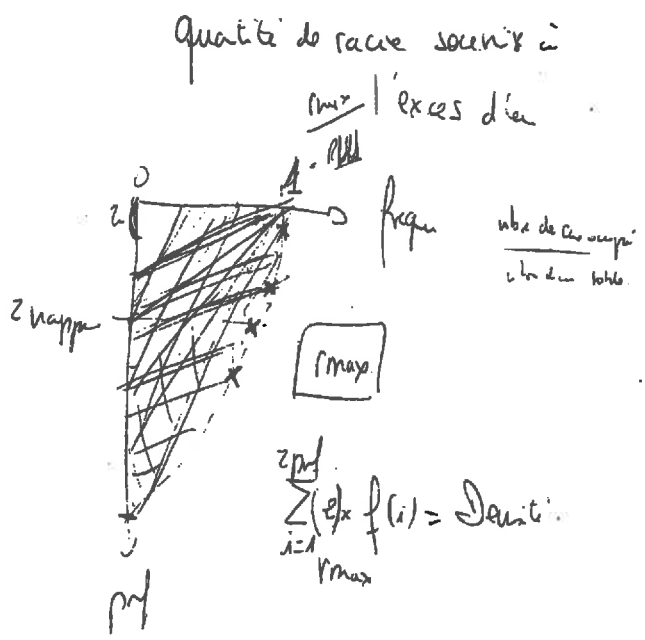
**INRA**  
 STATION DE SCIENCE DU SOL

15 JUL. 1997

Domaine Saint Paul - Site Agroparc  
 84914 AVIGNON CEDEX 9

# AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire est le fruit d'une étroite collaboration entre la station de Bioclimatologie de l'INRA d'Avignon et la division "Ouvrages pour le drainage et l'étanchéité" du Cemagref d'Antony. Bien que quelques centaines de kilomètres séparent ces deux laboratoires, il n'en reste pas moins que leur volonté a été commune et leur implication complémentaire. Ma contribution au bon déroulement de cette collaboration fût aisée et se résume à "l'hiver en Région Parisienne et l'été en Avignon". Difficile de trouver meilleure contribution, mais croire que l'été le thésard était cigale serait sans compter sur la ténacité des deux principaux encadreurs de ce travail, Nadine Brisson et Daniel Zimmer, qui n'encourageaient qu'au labeur. Un de leur principal point commun fût leur attachement perpétuel au "crobart" et c'est là que mon travail commençait. Jugez plutôt de mon mérite...



*Nadine tentant de m'expliquer le calcul de la proportion de racines envoyées à partir des données expérimentales, je crois me souvenir que nous étions d'accord, heureusement...*

*Réflexion sur la recherche d'une durée de prise en compte d'une contrainte hydrique transitoire selon Daniel, plutôt convaincant non !*

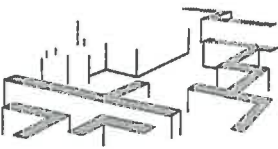
Chacun d'eux a été à l'initiative d'un grand nombre de ces oeuvres et pour cela je les en remercie car il semble que cela ait été une méthode efficace pour avancer dans ce travail de recherche.

La contribution et les encouragements d'Emile Lorre et de Pierre Renault n'en ont été que plus précieux. Emile Lorre, ingénieur du GREF, fût à l'origine de ce travail et a collaboré à la mise en

place des expérimentations et au couplage des modèles de bilan hydrique. Il a été un soutien permanent, même après son départ du *Cemagref*. Les croissants de Chez Paul y sont pour beaucoup. Pierre Renault, chargé de recherche à la station Science du Sol de l'INRA d'Avignon, a accepté de mettre à ma disposition son laboratoire, son savoir-faire et de partager son expérience sur les transferts d'oxygène. Mon seul regret fût que les électrodes aient été si difficiles à fabriquer et si fragiles à manipuler. "Elles partirent à 50 et n'arrivèrent qu'à 7".

Que ces quatre précieux animateurs de ma thèse trouvent ici toute ma reconnaissance et mon admiration.

Les expérimentations ont nécessité beaucoup de main d'oeuvre. Le dévouement et l'enthousiasme de Tony Cuccinella ont contribué à leur bon déroulement et ceci malgré les conditions de travail. Salutations à un bricoleur de génie qui ne se prend pas au sérieux.



L'équipe ne serait pas complète sans Patrick Ranaivo et D<sup>r</sup> Marie-Laure Casals, tous deux thésards respectivement au *Cemagref* et à l'INRA.

Ensemble, nous avons partagé les affres, les joies et les espérances d'un thésard. Bonne route à tous les deux.

J'exprime toute ma reconnaissance à MM Pavel Kabat, Chef du département d'Agrohydrologie au Winand Staring Centre for Land, Soil and Water Research à Wageningen, Raymond Bonhomme, directeur de recherche à l'Institut National de Recherche Agronomique de Thiverval-Grignon et M<sup>me</sup> Michèle Trémolières, professeur à l'Institut de Botanique de Strasbourg, pour avoir accepté de juger mon travail en ayant la charge de rapporteurs. J'exprime également toute ma reconnaissance à M<sup>r</sup> Lothaire Zilliox, directeur de recherche au CNRS de Strasbourg pour avoir accepté d'être mon directeur de thèse et en tant que tel de juger mon travail. Je remercie enfin François Limaux, ingénieur agronome à la Chambre d'Agriculture de Nancy, d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse afin d'apporter un avis de professionnel averti sur mon travail.

*A suivre.*

---

# RESUME DE LA THESE DE BERNARD REBIERE

---

## **Effet d'un excès d'eau sur la croissance d'une culture de blé d'hiver**

### **Identification d'une variable de stress et analyse de la réponse de la culture**

L'étude de l'effet d'un excès d'eau sur la croissance et le développement d'une culture de blé d'hiver a fait l'objet de nombreuses recherches. Il s'avère que celles-ci sont très fragmentaires et ne permettent pas de construire des outils analytiques permettant de simuler la réponse de la plante en terme de croissance tels qu'ils peuvent exister en sol sain. En raison de la variabilité des approches et des domaines concernés la définition d'un excès d'eau pour la plante n'est pas claire et sa caractérisation peu précise. L'objectif du travail a été de déterminer une variable de stress et de construire des fonctions permettant de décrire la réponse de la plante à un excès d'eau en vue de leur intégration dans un modèle de croissance et développement de culture.

Les expérimentations menées en cuves lysimétriques, avec des contraintes de profondeur de nappe imposées en régime permanent, ont permis d'aboutir au choix d'une variable de stress permettant d'expliquer la réponse de la plante à un excès d'eau. A partir d'un suivi expérimental spécifique sur la genèse d'un milieu asphyxiant nous avons montré que la saturation en eau du sol constituait une gêne pour l'accroissement racinaire. En conséquence, nous avons choisi comme variable de stress la proportion du système racinaire ennoyé. Nous avons construit des fonctions stress permettant de décrire la réduction de la croissance racinaire, de l'expansion foliaire et du niveau d'activité photosynthétique maximal avec la variable de stress. Le paramétrage de ces fonctions a été réalisé par calage à partir des données expérimentales.

L'application des formulations construites sur le régime permanent montre la difficulté de prendre en compte une contrainte en régime transitoire (conditions de plein champ, parcelle drainée). Nous avons présenté une méthode d'estimation de la contrainte. Elle repose sur l'optimisation des fonctions stress à partir des données expérimentales de plein champ pour des durées variables de prise en compte de la contrainte. Cette démarche nous a conduit à retenir comme variable de stress la proportion moyenne du système racinaire ennoyé pendant une durée de deux jours.

Nous avons adapté les fonctions de stress afin de les introduire dans un modèle de croissance et développement de culture. Le modèle BLEX, à base plutôt physique, est le résultat du couplage du modèle de culture GOA avec un modèle de gestion de nappe en parcelle drainée, SIDRA, permet d'estimer la variable de stress et de simuler ses effets sur la croissance racinaire, l'expansion foliaire et l'accumulation de biomasse. Nous avons vérifié le fonctionnement du modèle puis avons mené une validation sommaire. Le modèle permet de restituer correctement le comportement de la plante aux situations d'excès d'eau. L'analyse des effets de cette contrainte sur les mécanismes agro-physiologiques élémentaires permet bien de retrouver l'effet global sur le rendement à l'échelle parcellaire.

Le modèle a révélé que la méthode de calcul de la variable de stress n'était pas adaptée pour l'estimation des contraintes lors de la formation de la nappe dans le profil de sol. Il a permis de montrer que sur un système drainant, il n'existait pas de relation linéaire, entre les réductions de rendement dues à un excès d'eau et la profondeur de la nappe. Nous avons présentés deux exemples d'applications théoriques du modèle BLEX. Ces applications ont permis de démontrer son utilité pour raisonner l'écartement des drains lors de la conception d'un réseau de drainage et pour valider des approches simplifiées de l'effet d'un excès d'eau sur le rendement. Les résultats mettent en évidence qu'il existe un effet seuil de la profondeur de la nappe sur la réduction du rendement. Ce seuil est proche de la profondeur de labour et est similaire avec le seuil de profondeur de nappe critique utilisé par certains auteurs pour estimer la contrainte d'engorgement imposée à la plante. Enfin le modèle a permis de déterminer des facteurs de sensibilité de la plante selon son stade de développement.

---

# SOMMAIRE

---

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b><u>CHAPITRE I : MOYENS MIS EN OEUVRE</u></b>	
1. MOYENS EXPERIMENTAUX.....	9
2. LES MODELES UTILISES.....	40
<b><u>CHAPITRE II : EFFET D'UN EXCES D'EAU SUR UNE CULTURE DE BLE D'HIVER</u></b>	
1. EXCES D'EAU ET ELABORATION DU RENDEMENT.....	64
2. GENESE D'UN MILIEU ASPHYXIANANT POUR LA PLANTE.....	72
3. EXCES D'EAU ET CROISSANCE RACINAIRE.....	83
4. EXCES D'EAU ET ACCUMULATION DE BIOMASSE .....	105
<b><u>CHAPITRE III : MISE EN OEUVRE ET VERIFICATION DU MODELE BLEX</u></b>	
1. PREDICTION DES DATES D'APPARITION ET DE DISPARITION DE LA NAPPE.....	134
2. MISE AU POINT DES FONCTION DE STRESS .....	146
3. ACQUISITION DES PARAMETRES DU MODELE.....	154
4. VERIFICATION ET VALIDATION LOCALE DU MODELE.....	160
<b><u>CHAPITRE IV : VALIDATION ET APPLICATION DU MODELE BLEX</u></b>	
1. VALIDATION ET SENSIBILITE DU MODELE BLEX .....	173
2. APPLICATIONS ET INTERET DU MODELE .....	189
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>196</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>201</b>
<b>NOTATIONS.....</b>	<b>211</b>

# INTRODUCTION GENERALE

Contexte :

Dès la fin du IV<sup>ème</sup> siècle avant Jésus Christ, le philosophe grec Théophraste, auteur de nombreux ouvrages sur les plantes, observait que le blé n'est pas une culture aux exigences très précises. Il notait que tout ce qu'elle demande est une terre qui ne soit pas trop meuble ni trop compacte, ni trop légère ni trop lourde, ni trop sèche ni trop humide (Baumont, 1967). Il suffit d'observer la variabilité de la production d'une région à une autre, d'une année à une autre pour constater que l'observation de Théophraste décrit bien une réalité. "Sur les mêmes surfaces, avec des travaux du même ordre, avec le même effort des cultivateurs, les récoltes peuvent, d'un an à l'autre, varier du simple au double du fait des conditions atmosphériques, de l'humidité ou de la sécheresse, de la grêle, de la rouille, des dégâts d'insectes...." (Baumont, 1967). Un dicton russe veut que ce soit le ciel, non la terre qui produise le blé. Lorsqu'il est envisagé à l'échelle du globe, le facteur météorologique ne joue pas un rôle considérable. En effet, le rendement mondial moyen par hectare est relativement stable. L'augmentation constante depuis 1948 est due aux progrès de la sélection variétale et des pratiques culturales (Baumont, 1967). A l'échelle nationale ou régionale les rendements varient autour de cette tendance générale en fonction des climats annuels (Figure 1.1).

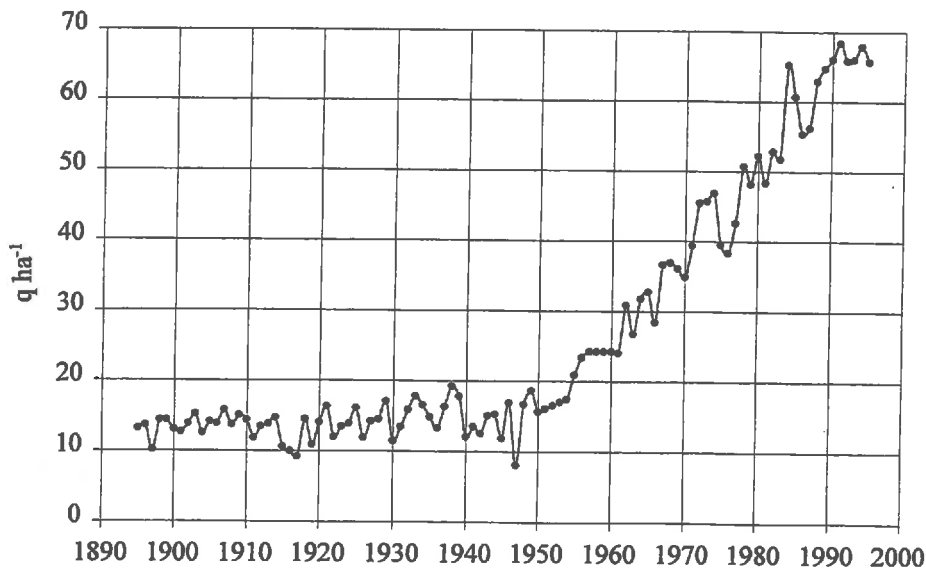


Figure 1.1 : Evolution du rendement national français moyen en quintaux par hectare, (Baumont, 1967 ; AGPB, 1995)

Aujourd'hui même si le contexte économique est différent et les risques de disette ou de famine nationale éloignés, il n'en reste pas moins que l'évaluation des potentialités agronomiques d'une région ou d'une parcelle agricole, sous un contexte pédologique et climatique donné, revêt un caractère important pour la gestion de la production agricole.



L'utilisation de modèles de simulation de cultures a pu montrer leur intérêt et leur utilité dans une perspective d'aménagement et d'aide à la décision (DRAINMOD, CERES, HYDRA, SOYGRO, SWATRE...) (Pereira et *al*, 1995). Ces outils présentent des niveaux de complexité et d'intégration des mécanismes variables. Leur construction repose sur la prise en compte des interactions entre les facteurs pédologiques, climatiques et la plante.

Les cultures d'hiver sont fréquemment soumises, sous nos pédoclimats (notamment pour le Nord de la France), à des périodes d'engorgement en eau du sol. Il est à présent établi que, chez le blé et pour de nombreuses autres cultures céréalières, la composante la plus variable et la plus explicative du rendement est le nombre de grains par m<sup>2</sup> (Meynard, 1988 ; Meynard et Aubry, 1988). Elle dépend de la biomasse végétative mise en place à la floraison, donc pendant les phases précoces du cycle de la culture (Meynard 1988). Le nombre de grains par m<sup>2</sup> se met en place au cours des périodes hivernales et printanières, périodes pour lesquelles les risques d'excès d'eau sont importants. Dans de telles conditions, l'étude de l'effet d'un engorgement en eau du sol sur la croissance de la plante revêt un grand intérêt pour l'orientation des pratiques culturales et des aménagements permettant de lever la contrainte. Même si la littérature témoigne de la mise en oeuvre de nombreuses recherches sur ce thème, il apparaît que ces études sont très fragmentaires et essentiellement qualitatives (Meynard, 1985). Il reste de nombreux éléments à apporter sur la caractérisation de la contrainte d'engorgement, la quantification du stress subi par la plante en condition d'excès d'eau et des conséquences sur sa croissance.

En conséquence, dans les modèles de croissance et développement de culture, l'effet d'un excès d'eau est souvent pris en compte de façon empirique ou statistique (Cavazza et Rossi Pisa, 1988 ; Pons, 1988 ; Kanwar et *al*, 1988 ; Evans et *al*, 1991 ; Ahmad, 1992). Le plus souvent une contrainte moyenne est estimée sur la durée du cycle, pondérée ou non par des facteurs de sensibilité de la culture selon les phases de développement. Cette contrainte est appliquée en fin de cycle sur le rendement final (voir introduction du chapitre 2). Ce type de modélisation ne permet généralement pas de suivre l'état physiologique de la plante ainsi que les effets de la contrainte à court et long termes. Or, une modélisation de type mécaniste est utile lorsqu'on cherche à valider des mécanismes observés et à étudier leur condition d'extrapolation temporelle et spatiale. De plus, cette approche est souvent incontournable lorsqu'il s'agit de définir des critères de décision utilisables dans la pratique pour les décideurs et les aménageurs.

### Qu'appelle-t-on "excès d'eau" :

Le terme "excès" d'eau est ambigu. Il renvoie à une "normalité" que les sciences de description et de caractérisation du milieu ne peuvent définir (Hervé, 1988). Il y a excès d'eau lorsqu'il y a trop d'eau pour un objet et un objectif déterminé (Penel, 1988). Dans le cadre de la gestion agronomique des cultures, le terme "excès" est finalisé par le peuplement végétal géré par l'agriculteur (Jannot, 1988). L'excès d'eau est la manifestation variée, dans le temps et dans l'espace, d'une gêne dans le processus de production (Penel, 1988).

"Excès d'eau" est souvent associé avec "hydromorphie". L'hydromorphie définit le déclenchement de processus physico-chimique et biochimique spécifiques qui apparaissent lorsque la saturation en eau de tout ou d'une partie du sol dépasse une durée minimale (Favrot, 1988). On parle également d'engorgement (Figure 1.2).

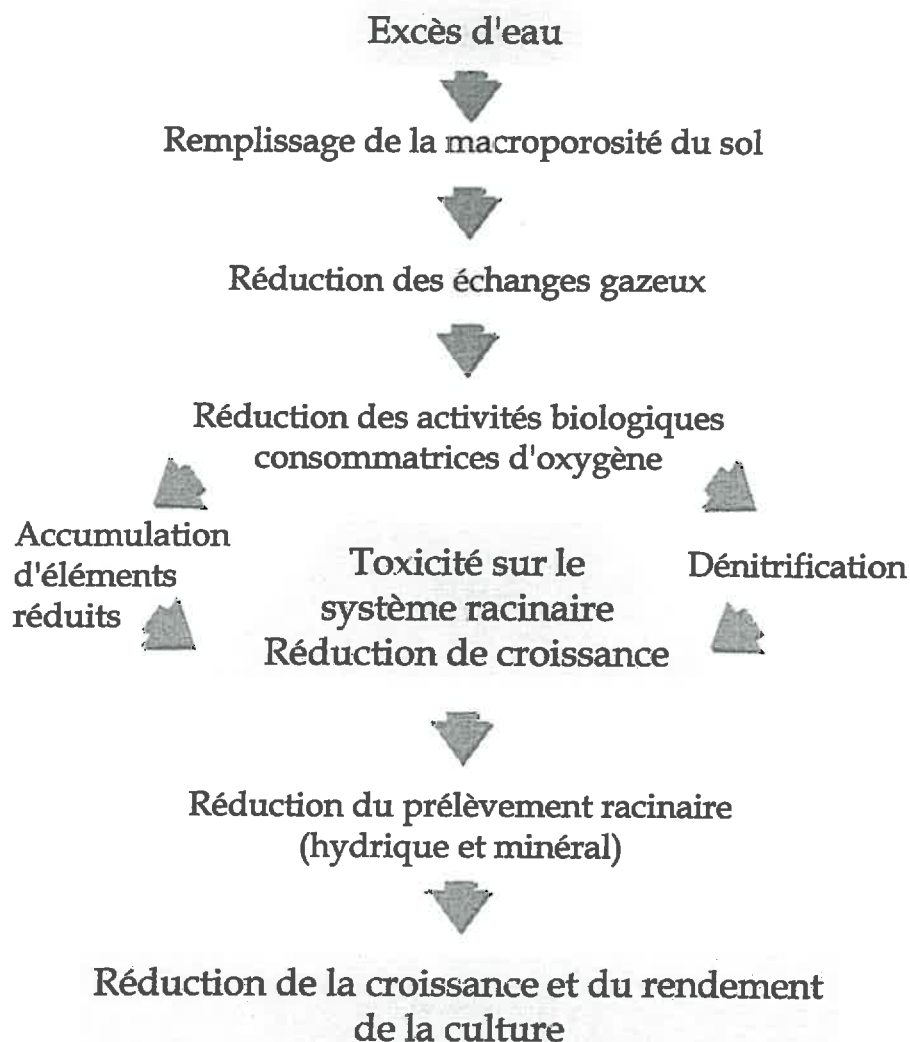


Figure 1.2 : Mécanismes dus à un excès d'eau conduisant à une réduction de la croissance d'une culture (adaptée d'après Patwardhan et al, 1988)

Nous sommes amenés à caractériser l'excès d'eau de différentes manières.

- Pour l'hydraulicien la variable "hauteur de nappe" peut-être utile à la caractérisation de l'excès d'eau à condition de savoir quelles sont les variables, dérivées de celle-ci, qui sont pertinentes (durée, intensité, fréquence). Ce type d'information ne doit être recueilli que s'il a déjà été établi qu'il existait une liaison entre la hauteur de nappe et la variable agronomique étudiée, densité de plantes, nombre d'épis par m<sup>2</sup>, accumulation de matière sèche (Penel, 1988).
- Le pédologue considère l'origine de l'eau en excès (pluie, ruissellement, nappe), les formes d'excès d'eau (imbibition, stagnation, submersion), les causes (hydrologique, pédologique ou anthropique) et la nature des transferts hydriques. Son diagnostic repose sur l'observation de traits morphologiques révélateurs de l'hydromorphie (Favrot, 1988).
- Pour l'agronome, l'excès d'eau conduit à la création de conditions asphyxiantes au niveau des systèmes racinaires venant perturber le processus de production végétale et gêner les interventions culturales (Meynard et al, 1981 ; Massé et Capy, 1988 ; Meynard et Aubry, 1988 ; Collas et Tiercelin, 1988 ; Papy, 1988).

Il n'existe pas un critère unique de caractérisation de l'excès d'eau. Ce critère dépend du contexte pédoclimatique, il peut être la profondeur d'apparition de taches d'oxydo-réduction (Meynard, 1988), le niveau piézométrique hivernal (Pons, 1988) ou encore une durée minimale de saturation en eau du sol (Favrot, 1988). Dans tous les cas, la caractérisation de la contrainte devra être nécessairement objective et analytique. Les critères hydrodynamiques les mieux adaptés pourront être employés (Meynard et Aubry, 1988). Les variables utilisées doivent être quantifiables et directement liées ou dérivées de la contrainte.

### **Choix d'un modèle de croissance et développement de culture :**

Les choix faits dans la construction ou l'utilisation d'un modèle dépendent des objectifs que l'on s'est fixés.

- Souhaitons-nous travailler à une échelle régionale ou parcellaire ?
- Quel est le contexte agronomique, climatique et pédologique ?
- Avons-nous un objectif d'application du modèle ?

On doit prendre l'outil le mieux adapté à la question posée et au contexte agro-pédo-climatique concerné (Brisson et al, 1996). Un modèle de culture est une représentation simplifiée de la culture. On distingue généralement les modèles empiriques/simples et les modèles mécanistes/cognitifs (Figure 1.3).

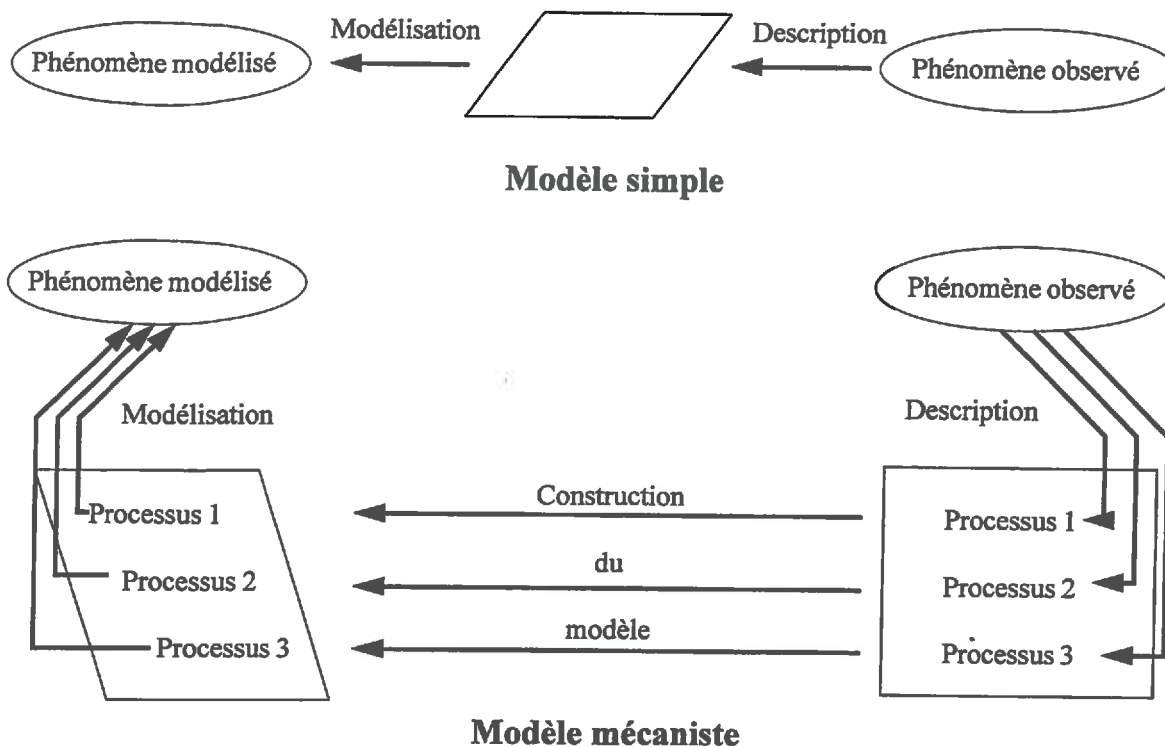


Figure 1.3 : Comparaison schématique d'un modèle simple et mécaniste (adaptée d'après Penning de Vries et al, 1989)

Les modèles cognitifs décrivent la croissance de la plante selon des processus distincts tels que la photosynthèse, l'expansion foliaire, la croissance racinaire... Chaque processus est quantifié en fonction des facteurs environnementaux, rayonnement, température, disponibilité en eau et en éléments minéraux... (Penning de Vries et al, 1989).

Nous nous sommes placés d'emblée dans une schématisation proposée par les modèles cognitifs. Ces modèles s'appuient sur deux principes en interaction, un principe génétique et un principe trophique. Ils comportent un module simulant la croissance nette du couvert végétal et un modèle de développement simulant l'enchaînement du programme génétique et pilotant le module de croissance (Brisson et Delécolle, 1991). Nous distinguons deux grands types de modèles selon la fonction de pilotage trophique de l'échelle de développement.

1 - La croissance de la plante est décrite par l'apparition et la disparition d'organes identifiables en termes de sources et de puits : approche morphogénétique (ARCWHEAT, SOYGRO, CERES). Pour l'ensemble des espèces, il apparaît difficile de définir les stades "initiateurs" du flux des assimilats vers les organes et de mise en place des structures végétales. Il en va de même pour les stades "d'arrêt" permettant de jouer sur la durée des phases (Brisson et Delécolle, 1991). Même s'ils sont proches du fonctionnement de la plante, leur mise en œuvre et leur application présentent des difficultés. Par exemple, pour une culture céréalière, le

modèle est très sensible aux qualités des prédictions lors de la mise en place des structures végétales.

2 - La croissance de la plante est décrite de façon globale. Il n'existe plus de notion de puits et sources. L'accumulation de surface foliaire est modélisée à partir d'une somme de degrés jours (CERES, GOA). L'accumulation de biomasse est rapportée à l'ensemble du couvert végétal. Ces modèles, dont le fonctionnement se rapproche de celui des modèles simples, sont adaptés pour des applications telles que l'évaluation des potentialités agricoles et ont des propriétés d'extrapolation spatiale et temporelle intéressantes.

Développé pour l'estimation des potentialités d'une culture de maïs dans des contextes pédo-climatiques rencontrés sur la Communauté Européenne, le modèle GOA a été adapté à la culture de blé (Brisson et *al*, 1995). Son examen a montré une bonne adéquation entre les suivis expérimentaux que nous étions capables de réaliser et la conceptualisation retenue. Si la seule contrainte prise en compte était le déficit hydrique, l'étude du module de bilan hydrique a permis de dégager des modalités de son adaptation à la simulation de la saturation en eau du profil de sol (Rebière, 1992 (Chapitre I, § 2)).

### **Importance de l'adéquation entre modélisation et expérimentation :**

Notre objectif est de quantifier les mécanismes qui conduisent à des pertes de rendement dues à l'excès d'eau. L'échelle d'observation est la parcelle et les données climatiques sont renseignées, le plus couramment, au pas de temps journalier. Ceci étant dit, nous devons sélectionner les variables descriptives de notre système les plus pertinentes compte tenu de notre échelle d'observation et de nos objectifs. De plus, les mesures réalisées doivent pouvoir être reliées à ce que nous sommes capables de modéliser.

Si l'excès d'eau dans un sol conduit à la réduction de la disponibilité en oxygène, à une diminution du potentiel d'oxydo-réduction et à une modification de la concentration et de la dynamique des éléments en solution dans le sol, la mesure des variables caractérisant cet état à notre échelle d'observation ainsi que leur estimation par les modèles n'est pas chose facile. Il apparaît donc indispensable de sélectionner une ou plusieurs variables intégratrices rendant compte d'un état contraignant permettant d'estimer l'intensité de la contrainte et d'expliquer la réponse de la plante. Les choix faits s'appuient sur les études présentées par de nombreux auteurs. Ces travaux permettent de relier un état de saturation à un niveau d'asphyxie (Anaya et Stolzy, 1972 ; Flübler et *al*, 1976 ; Cannell et *al*, 1980 ; Trought et Drew, 1982 ; Gillham, 1984 ; Thomson et *al*, 1989 ; James et Box, 1991 (Chapitre II, § 2)).

Si la conséquence d'un excès d'eau est une réduction de la respiration racinaire fournissant l'essentiel de l'énergie requise pour le fonctionnement de la voie aérobie et une orientation du métabolisme vers la voie anaérobie, il n'est pas envisageable de réaliser des observations à l'échelle physiologique. Nous avons donc sélectionné des variables plus globales décrivant l'état de croissance de la plante et sa sensibilité à la contrainte. Leur sélection repose sur les observations réalisées par les nombreux auteurs ayant travaillé sur ce thème de recherche (Williamson et Kriz, 1970 ; Anaya et Stolzy, 1972 ; Cannell et al, 1980 ; Trought et Drew, 1980 ; Sojka et Stolzy, 1980 ; Meynard et al, 1981 ; Cannell, 1984 ; Saglio, 1985 ; M'Barek Ben Naceur, 1987 ; Pons, 1988 ; Favrot, 1988 ; Massé et Capy, 1988 ; Bousqué, 1992 (voir Chapitre II § 3 et 4)).

La Figure 1.4 présente une schématisation de la démarche suivie pour l'étude de l'effet d'un excès d'eau sur la croissance et le développement d'une culture de blé d'hiver et montre la nécessité d'une adéquation entre expérimentation et modélisation.

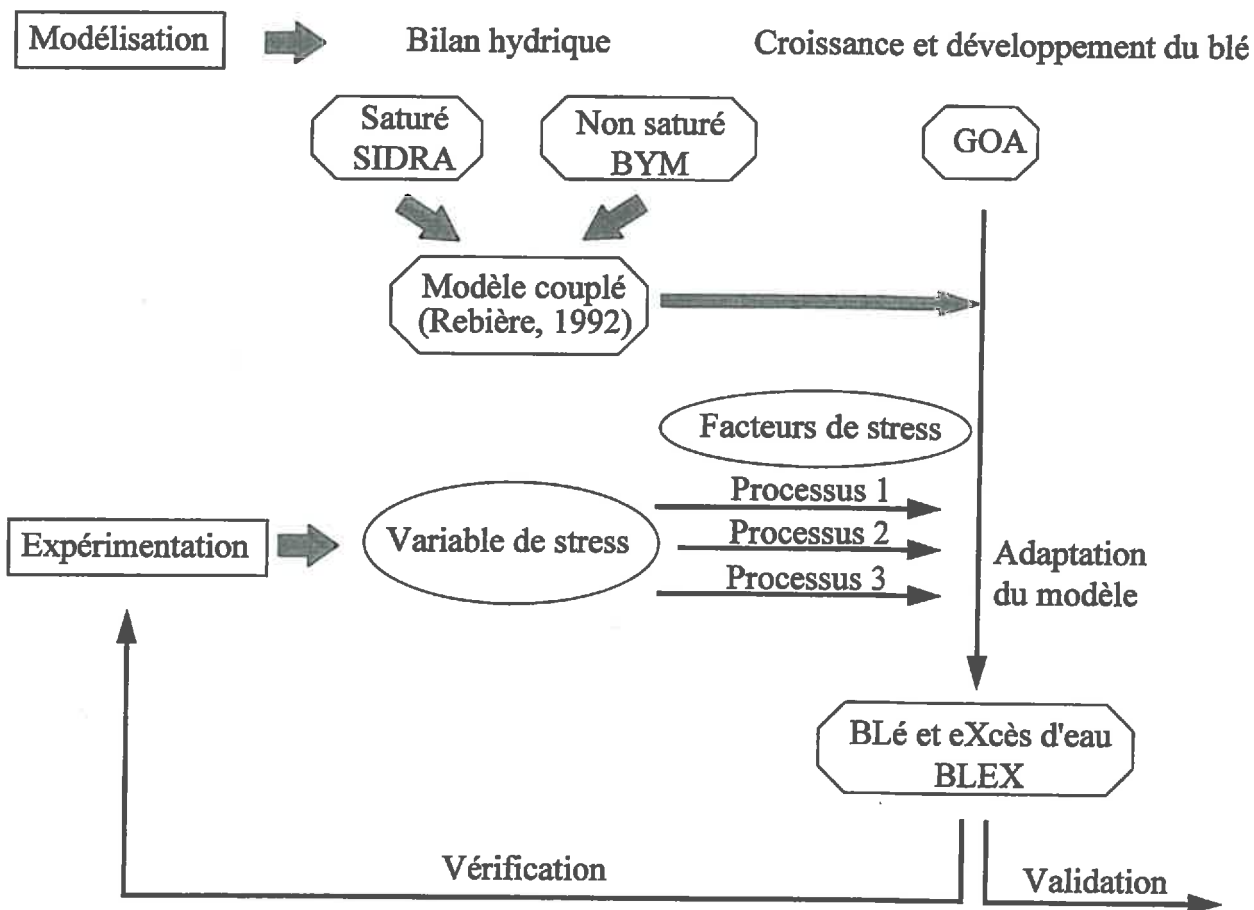


Figure 1.4 : Schématisation de la démarche pour la prise en compte de l'effet d'un excès d'eau dans un modèle de croissance et développement d'une culture de blé d'hiver (SIDRA est un modèle de simulation du drainage et BYM un modèle de bilan hydrique adapté aux modèles de simulation de culture)

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce document poursuivait trois objectifs principaux.

- 1 - L'étude des mécanismes conduisant à la genèse d'un milieu asphyxiant : l'objectif était d'identifier une variable permettant d'estimer l'intensité de la contrainte et d'expliquer la réponse de la plante.
- 2 - La quantification de l'effet de la variable de stress sur la croissance racinaire, l'expansion foliaire et l'accumulation de biomasse : l'objectif était de construire des formalisations décrivant la réponse de la plante, fonctions stress.
- 3 - L'intégration des fonctions stress obtenues dans un modèle de croissance et développement de la plante : l'objectif était de vérifier les mécanismes identifiés et de juger de la robustesse de l'approche au travers de validations (extrapolation spatiale et temporelle).

Dans le chapitre I, nous avons présenté les moyens mis en oeuvre pour répondre aux objectifs fixés. Nous avons présenté les expérimentations réalisées ainsi que le suivi expérimental qui leur était associé. Nous avons décrit le modèle de croissance et développement d'une culture de blé d'hiver, GOA et le module de bilan hydrique adapté à la simulation des transferts d'eau sur une parcelle drainée.

L'étude de la genèse d'un milieu asphyxiant a permis d'apporter des éléments de réponse quant à la caractérisation de la contrainte d'engorgement. Nous avons analysé les conséquences d'une telle contrainte sur la croissance racinaire et l'accumulation de biomasse et en avons proposé une formalisation (Chapitre II).

L'application du modèle de bilan hydrique à la simulation des transferts d'eau sur une parcelle drainée a nécessité une étude approfondie du fonctionnement hydrologique et notamment des mécanismes de formation et de disparition de la nappe perchée temporaire. Nous avons proposé une méthode de prédiction des périodes de présence de la nappe dans le profil de sol. Nous avons décrit les modalités d'intégration des fonctions stress à l'excès d'eau construites et paramétrées sur les données expérimentales. Nous avons présenté des méthodes de mesure ou d'estimation des paramètres du modèle. Une fois ces paramètres acquis, nous avons procédé à une vérification de son fonctionnement sur nos résultats expérimentaux (Chapitre III).

Le chapitre IV a été consacré à la validation du modèle de croissance et développement de la plante, BLEX, sur plusieurs campagnes de mesure. Le domaine d'utilisation ainsi que les applications et l'intérêt du modèle y ont été discutés.

# CHAPITRE I

## MOYENS MIS EN OEUVRE

1 - Les moyens expérimentaux

2 - Les modèles utilisés



<b>1. MOYENS EXPERIMENTAUX .....</b>	<b>9</b>
1.1 Expérimentation en conditions contrôlées .....	9
<i>Description du dispositif expérimental</i> .....	9
<i>Protocole expérimental</i> .....	12
<i>Variables mesurées</i> .....	14
1.2 Expérimentation en plein champ.....	21
<i>Description du site expérimental</i> .....	21
<i>Expérimentation sur la parcelle 1</i> .....	26
1.3 Caractérisation des campagnes de mesures.....	31
<i>Expérimentation en cuves lysimétriques</i> .....	31
<i>Expérimentation en plein champ</i> .....	34
1.4 Discussion .....	37
<b>2. LES MODELES UTILISES .....</b>	<b>40</b>
2.1 Modélisation de la croissance et du développement de la plante.....	40
<i>Le module de développement</i> .....	40
<i>Le module de croissance</i> .....	44
2.2 Modélisation du bilan hydrique d'une parcelle drainée soumise à un excès d'eau temporaire	45
<i>Description du système modélisé</i> .....	46
<i>Fonctionnement hydraulique du système drainant (modèle SIDRA)</i> .....	47
<i>Bilan hydrique sur la zone non saturée, calcul de la recharge nette</i> .....	49
<i>Calcul de la consommation en eau de la plante</i> .....	54
2.3 Couplage entre le modèle hydrique et le modèle de plante .....	57
<i>Calcul des facteurs de stress</i> .....	57
<i>Description des fonctions stress</i> .....	58
<b>3. CONCLUSION .....</b>	<b>60</b>

## 1. MOYENS EXPERIMENTAUX

Les expérimentations sur l'étude de l'effet d'un excès d'eau sur les cultures ont été le plus souvent réalisées dans des conditions contrôlées : sur des substrats artificiels, en hydroponique ou sur sol inerte, ou encore sur sol naturel (Robert et *al*, 1980 ; Davies et Hillman, 1988 ; Thomson et *al*, 1989 ; Bousqué, 1992). Les facteurs contrôlés sont l'état hydrique du sol et son aération (Belford, 1981 ; Trought et Drew, 1982 ; Cannell et *al*, 1985 ; Meyer et Barrs, 1988 ; James et Box, 1991). Ces études ont permis de dissocier les effets positifs (nutrition des plantes) des effets négatifs (anoxie, toxicité de certains éléments) de la physico-chimie des sols. Dans des conditions agricoles, en plein champ, l'étude des mécanismes est plus complexe en raison du nombre de facteurs mis en jeu et de leurs interactions.

Une expérimentation en conditions semi-contrôlées, "cuves lysimétriques", permet de maîtriser et d'isoler le facteur que l'on cherche à étudier. En ce qui nous concerne, nous avons cherché à :

- 1 - Identifier et quantifier la genèse d'un milieu asphyxiant ;
- 2 - Identifier un indicateur de contrainte jouant sur la croissance de la plante ;
- 3 - Quantifier ses effets sur la culture.

L'objectif de l'expérimentation menée en plein champ était d'évaluer dans quelle mesure les mécanismes observés dans des conditions semi-contrôlées pouvaient être extrapolés à la parcelle.

Nous présentons tout d'abord le dispositif expérimental en cuves lysimétriques, le protocole et le suivi expérimental qui lui sont associés (§ 1.1). Nous décrivons ensuite le site expérimental en plein champ, sa situation géographique, les conditions climatiques et le contexte pédologique. L'expérimentation ayant été réalisée sur une seule des parcelles de ce site, nous présentons les caractéristiques de cette parcelle, le protocole et le suivi expérimental réalisés (§ 2.2). Une synthèse des caractéristiques générales des campagnes de mesures est présentée (§ 2.3).

### **1.1 Expérimentation en conditions contrôlées**

#### **• Description du dispositif expérimental**

Le dispositif est constitué d'un ensemble de 5 "cuves lysimétriques" installées à l'extérieur, hors du sol, dans des conditions climatiques naturelles. Il a été mis en place sur le centre de recherche du Cemagref, commune d'Antony, département des Hauts de Seine (France).

Chacune des cuves, d'une surface de 0.32 m<sup>2</sup> (0.8 x 0.4) et d'une profondeur de 1 m, est assez grande pour disposer d'un nombre suffisant de plantes et permettre le suivi de la croissance racinaire jusqu'à des stades de développement avancés (Figure 1.1).

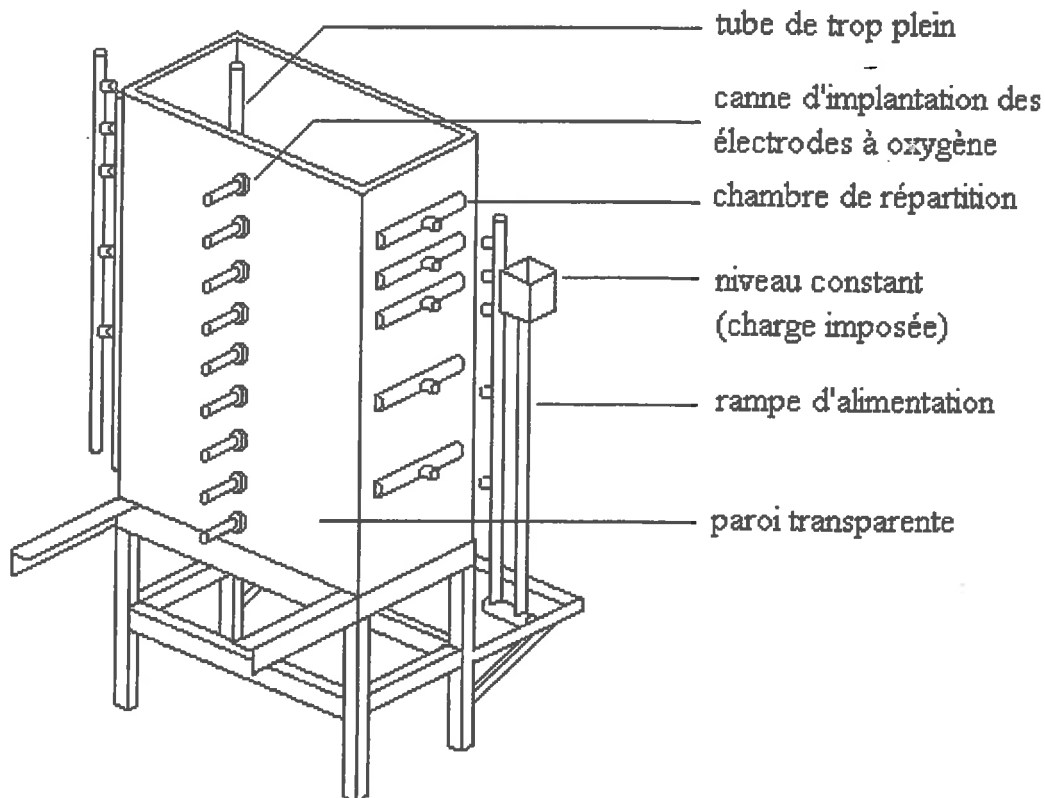


Figure 1.1 : Vue générale du système expérimental en cuve

Le blé a été implanté à la densité agricole, soit un maximum de 90 plantes par cuve. Le nombre de plantes étant limité, aucune mesure destructive n'a été effectuée. Pour suivre la croissance racinaire nous avons imaginé un système intermédiaire entre le rhizotron et la cartographie *in situ*. Les parois sur la longueur sont transparentes (plexiglass...). L'isolation du système racinaire, vis à vis de la lumière et de la température, était assurée par des plaques de polystyrènes doublées d'une feuille d'aluminium. Les mesures des échanges gazeux (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) au dessus du couvert végétal ont été réalisées avec une chambre de type fermé (voir détails page 20). Le maintien de la nappe à une hauteur constante était assurée par une alimentation à niveau constant :

- l'entrée de l'eau dans la cuve était assurée par une rampe d'alimentation avec un niveau constant permettant de fixer la charge à imposer (Figure 1.1).
- une évacuation était prévue en fond de cuve, le fond de cuve d'une hauteur de 5 cm était isolé du massif de sol par une grille, en inox, permettant un écoulement gravitaire de l'eau quand la contrainte était levée.

Au centre d'une des faces, tous les 10 cm sur la hauteur de la cuve, étaient implantées des sondes à oxygène et des sondes températures (Figure 1.1). L'étanchéité était assurée par des manchons avec joints toriques. La canne était fixée sur la cuve par un collier de serrage (Figure 1.2).

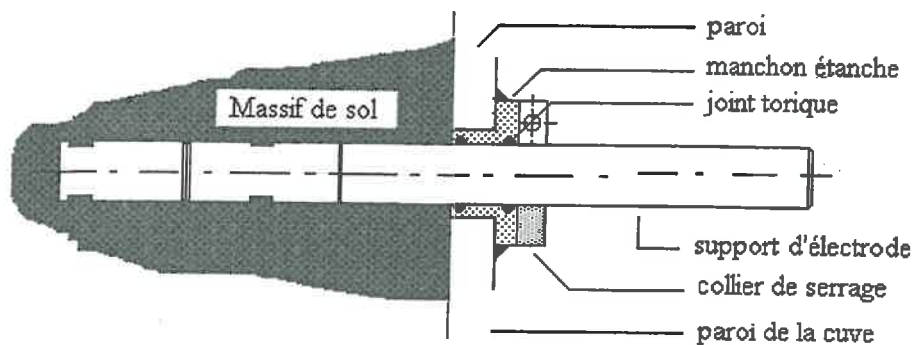


Figure 1.2 : Détail de l'implantation de la canne à oxygène (longueur = 30 cm et  $\varnothing = 2$  cm) ou des sondes température

### ➤ Choix du type de sol et reconstitution en cuve

Le sol retenu était de type hydromorphe ; il provenait du site expérimental d'Arrou, situé dans le département de l'Eure et Loir (voir description § 2.2). De la surface du sol au plancher imperméable, nous distinguons deux horizons :

- A<sub>p</sub> : structure polyédrique nette, peu compact, poreux, limons ;
- B<sub>t</sub> : structure prismatique peu nette, peu compact, argiles limoneuses.

Les deux horizons décrits ont été reconstitués dans les cuves. En proportion, l'horizon labouré a conservé la même épaisseur qu'au champ, soit 30 cm. L'horizon sous-jacent occupait le reste de la cuve. Avant la reconstitution, le sol a été mis à sécher à l'extérieur, tamisé grossièrement afin de conserver une structure en agrégats puis homogénéisé par horizon. Le remplissage a été réalisé de façon homogène entre les cuves. Les caractéristiques granulométriques du sol reconstitué sont résumées sur le Tableau 1.1.

	Argile (%)	Limons (%)		Sables (%)		densité moyenne
		Fins	Grossiers	Fins	Grossiers	
Horizon	0 - 2 $\mu$	2 - 20 $\mu$ m	20 - 50 $\mu$ m	50 - 200 $\mu$ m	0.2 - 2 mm	
A <sub>p</sub> (30 cm)	23	34	37	3	3	1.3
B <sub>t</sub> (60 cm)	29	32	35	2	2	1.5

Tableau 1.1 : Estimation des caractéristiques du sol reconstitué en cuve

• **Protocole expérimental**

Nous disposons de 5 cuves lysimétriques dont l'affectation est présentée dans le Tableau 1.2.

Identification des cuves	Surface (m <sup>2</sup> )	Traitement	
Cuve 1	0.36	plante	engorgement
Cuve 2	0.38	plante	témoin
Cuve 3	0.32	plante	engorgement
Cuve 4	0.32	plante	engorgement
Cuve 5	0.32	plante	engorgement

Tableau 1.2 : Description du dispositif expérimental

Le protocole expérimental a été construit de façon à assurer la combinaison des facteurs relatifs à la durée et à l'intensité de la contrainte. Deux campagnes de mesure ont été menées. La première, avec un semis tardif (variété Furio), a été menée sur une période s'étalant de mars 1993 à août 1993. La seconde, avec un semis normal (variété Soissons), a été réalisée de novembre 1993 à août 1994. L'objectif de la première campagne était de tester l'ensemble du dispositif et de préciser le protocole et le suivi expérimental pour la seconde campagne. Malgré un suivi expérimental simplifié, quelques enseignements ont pu être tirés qui ont été confirmés au cours de la campagne suivante.

➤ **Protocole expérimental au cours de la campagne 1993**

Au cours du cycle de développement de la culture une seule contrainte a été imposée. Le système racinaire était temporairement ennoyé. Les stades d'application de la contrainte ont été relativement avancés dans le cycle. La profondeur de la nappe imposée pendant une durée de 33 jours était variable selon le traitement. Le détail du protocole est présenté dans le Tableau 1.3.

Combinaison des facteurs et identification des traitements	
<p>Profondeur de la nappe (cm)</p> <p>Durée</p> <p>Pas d'excès d'eau : témoin</p>	<p>Profondeur de la nappe (cm)</p> <p>30</p> <p>33 j</p> <p>Mi montaison Fin floraison</p> <p>Durée(j)</p> <p>Excès d'eau : cuves 1 et 5 (répétition)</p>

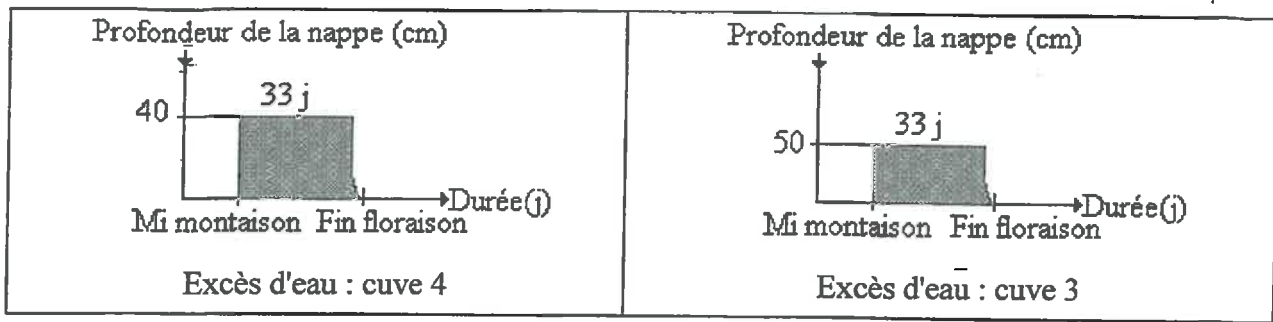


Tableau 1.3 : Protocole expérimental suivi au cours de la campagne 1993

➤ Protocole expérimental au cours de la campagne 1993-1994

Au cours du cycle de développement de la culture, deux niveaux de contrainte ont été imposés. Dans les deux cas, le système racinaire a été ennoyé temporairement. Les stades d'application ont été relativement avancés dans le cycle, stades mi-montaison puis floraison. La profondeur de la nappe est fixée respectivement, au cours des deux contraintes, à 50 puis 30 cm de la surface du sol. Les durées de contrainte étaient respectivement de 12 puis de 33 jours. Elles ont été nommées respectivement contrainte 1 et contrainte 2. La combinaison des différents facteurs est présentée dans le Tableau 1.4.

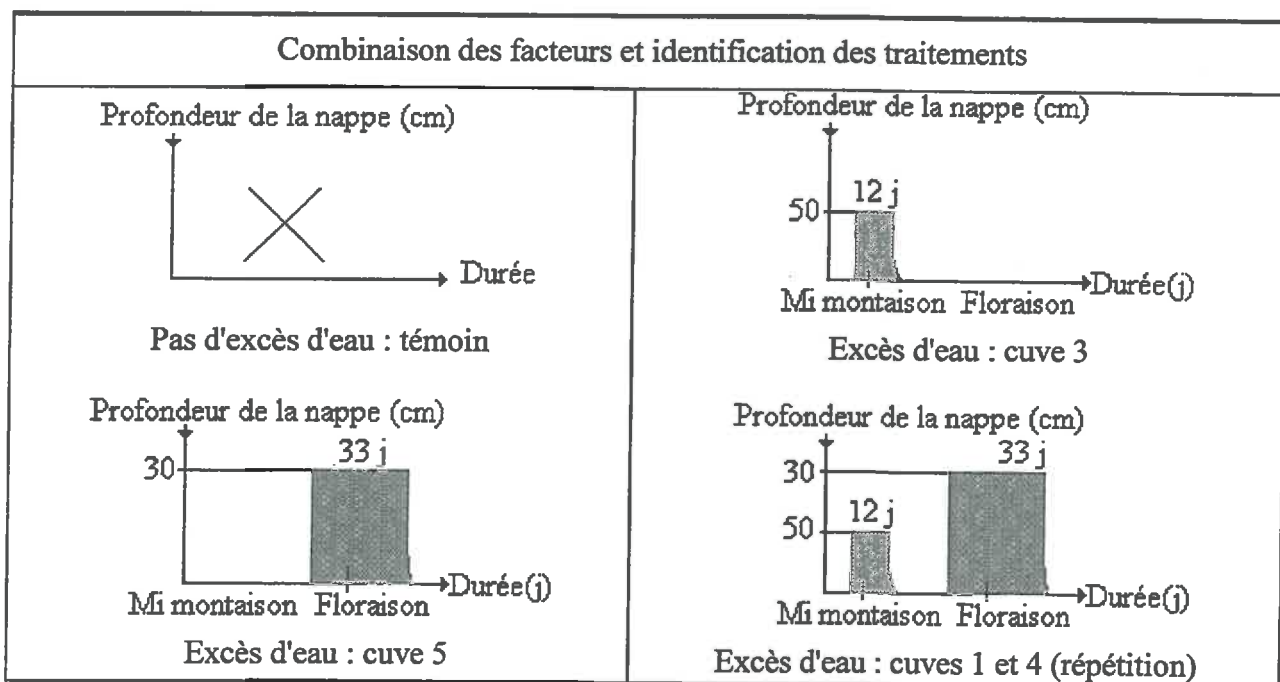


Tableau 1.4 : Protocole expérimental suivi au cours de la campagne 1993-1994

En raison de problèmes liés à la mise au point du dispositif de mesure de la concentration en oxygène et de difficultés d'organisation dues au suivi expérimental en plein champ, les

contraintes hydriques ont été imposées tardivement dans le cycle de développement de la plante : mi-montaison. Les premières contraintes ont été imposées en phase de croissance. L'occurrence des contraintes sur le système expérimental par rapport à celle de plein champ ainsi que les conséquences sur l'analyse des résultats expérimentaux seront discutées en conclusion (page 38).

### • Variables mesurées

Nous avons mesuré en continu ou de façon ponctuelle des variables permettant de caractériser le fonctionnement du système sol-plante-atmosphère. Les dates des mesures ponctuelles ont été calées sur les périodes des contraintes. Nous disposons ainsi de l'état initial, de l'évolution du système au cours de la contrainte et de l'état final.

#### ➤ Données climatiques

Les données climatiques (ETP, rayonnement global et température) ont été fournies par la station météorologique de l'INRA de Thiverval-Grignon, choisie pour sa proximité avec le site expérimental (20 km). La pluviométrie a été mesurée au pas de temps horaire sur le site expérimental d'Antony.

#### ➤ Caractéristiques du sol

La hauteur de nappe, la pression de l'eau du sol et la température ont été mesurées (Tableau 1.5).

	Cuve 1	Témoin	Cuve 3	Cuve 4	Cuve 5
Piézométrie	oui	-	oui		
Tensiométrie	10, 20, 30, 40, 50, 60 et 70 cm	-	-	-	-
Température	-	20 et 40 cm	5, 25, 45 et 65 cm	-	

Tableau 1.5 : Suivi expérimental en continu (les valeurs indiquent la profondeur des mesures)

La concentration en oxygène de la solution du sol a été mesurée à l'aide d'électrode à oxygène de type Clark. Le principe de fonctionnement des électrodes, l'étude du signal mesuré, leur sensibilité et leur étalonnage sont présentés en détail dans l'annexe 1.1. La concentration en oxygène a été mesurée uniquement au cours de l'expérimentation 1993-1994. Deux profils en oxygène ont été suivis sur les cuves 3 et 4 (Tableau 1.6). Les mesures ont été réalisées dans la

journee, en moyenne toutes les 4 heures, pendant la mise en place et le retrait de la nappe. Pendant la contrainte, elles ont été réalisées tous les jours lorsque cela a été possible.

	Cuve 3	Cuve 4
Contrainte 1	10, 30 et 50 cm	-
Contrainte 2	10, 30 et 50 cm	20, 30, 50 et 70 cm

Tableau 1.6 : Profondeur des mesures de la concentration en oxygène

### ➤ Développement et croissance de la plante

Les stades de développement ont été notés suivant l'échelle de Jonard. Les trois principales variables mesurées, caractérisant l'état de croissance de la culture, ont été la surface foliaire, la profondeur et la densité racinaire. Les mesures ont été réalisées en moyenne tous les 15 jours en dehors des contraintes et à des pas de temps rapprochés (5 jours en moyenne) lors de leur mise en place. Le nombre de plantes étant limité (60 par cuve) des mesures destructives n'ont pas pu être réalisées, des protocoles adaptés ont donc été mis en oeuvre.

#### Mesure de la surface des feuilles :

La surface des feuilles a été déterminée manuellement en mesurant la longueur et la largeur de chaque feuille en croissance. Les mesures ont été réalisées sur 5 plantes par traitement choisies au hasard à la levée. Toutes les parties vertes de la plante ont ainsi été mesurées. Afin de déterminer la relation entre "longueur, largeur" et surface des feuilles, nous avons procédé, sur l'expérimentation en plein champ, à des mesures de longueur et largeur de feuilles puis de surface par planimétrie.

La relation entre les variables explicatives «longueur» et «largeur» et la variable à expliquer «surface» est la suivante :

$$\text{Surface} = \alpha (\text{largeur} * \text{longueur})^\beta \quad (\text{éq. 1.1})$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres issus du calage de l'équation 1.1 sur des données expérimentales, la longueur et la largeur des feuilles étant exprimées en cm et la surface en cm<sup>2</sup>.

Les résultats de la régression (régression linéaire en logarithme) sont présentés dans le Tableau 1.7. La vérification de la fonction sur le jeu de données de la régression est présentée sur



la Figure 1.3. Une validation a été menée sur des plantes "tests" pour lesquelles nous avons déterminé par ces deux méthodes, relation "longueur-largeur" et planimétrie, la surface totale des feuilles. Les résultats de cette validation sont présentés sur la Figure 1.4.

Modèle	$\alpha$	$\beta$	n	erreur standard sur l'estimation	$r^2$
feuille	0.52	1.11	176	0.16	0.95

Tableau 1.7 : Résultats du calage du modèle de surface foliaire et validation (n est le nombre d'observations et  $r^2$  le coefficient de détermination)

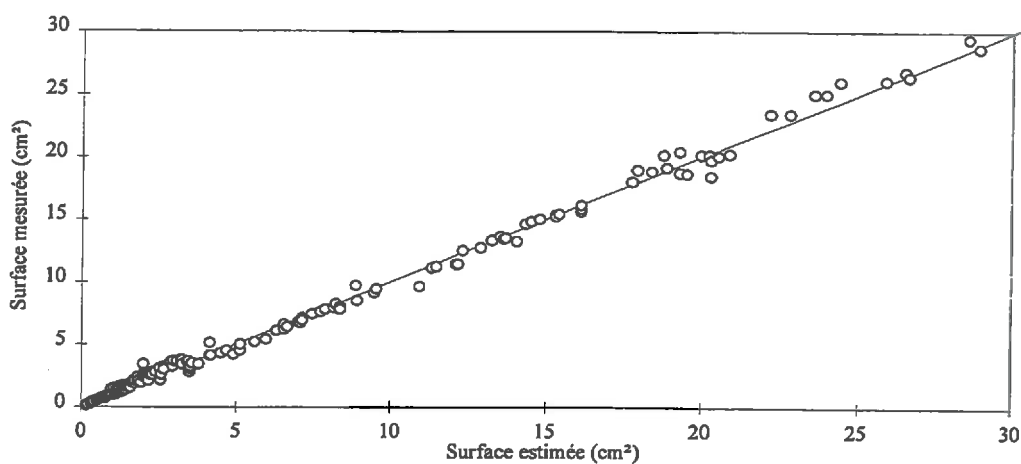


Figure 1.3 : Comparaison entre simulations et observations de la surface d'une feuille

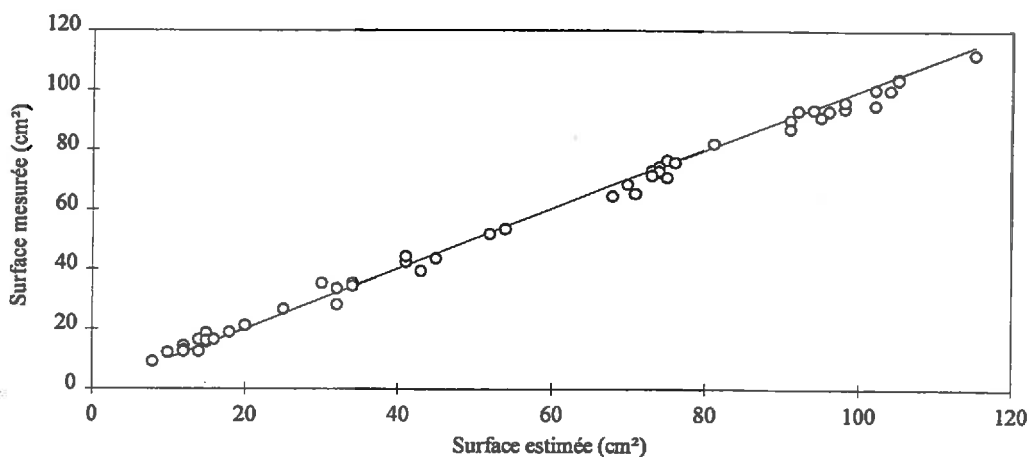


Figure 1.4 : Comparaison entre simulations et observations de la surface des feuilles d'une plante entière

La même relation a été utilisée pour déterminer la surface foliaire pour les deux expérimentations bien que les variétés aient été différentes. La surface des feuilles a été rapportée à la surface du sol concerné. La variable ainsi calculée est appelée LAI (Leaf Area Index pour indice foliaire).

$$LAI = \frac{\text{Surface foliaire [L}^2\text{]}}{\text{Surface du sol [L}^2\text{]}} \quad (\text{éq. 1.2})$$

### Mesure de la croissance racinaire :

Selon la fonction du système racinaire à laquelle on s'intéresse, les critères utilisés pour qualifier ou quantifier l'enracinement ne sont pas les mêmes (Tableau 1.8).

Variable	Dimension	Utilisation	Mise en oeuvre et applications
Biomasse	M	Répartition des assimilats et estimation de l'apport de matière organique au sol	Fastidieuse et nécessite la prise de précautions, domaine de la recherche
Profondeur	L	Extraction hydrique et minérale potentielle, méthode du bilan	Facile, information partielle, applications pratiques
Longueur de racines	L	Extraction hydrique et minérale, méthode des flux	Fastidieuse, nombreuses répétitions, domaine de la recherche
Fréquence	-	Caractérisation spatiale, capacité d'extraction	Fastidieuse mais nécessite peu de matériels, applications pratiques

*Tableau 1.8 : Variables utilisées pour caractériser l'enracinement et domaines d'utilisation (adapté d'après Tardieu, 1988)*

Le suivi expérimental de chaque critère fait appel à différentes méthodes qui peuvent être destructives (carottage, prélèvements de massif, cartographie ...) ou non destructives (endoscopie, rhizotrons...). Notre objectif étant de suivre l'évolution de la distribution spatiale des racines, nous avons réalisé des cartographies verticales et estimé les densités racinaires. Cette mesure apporte de nombreux renseignements pratiques tels que la profondeur d'enracinement, la distance entre racines et leur distribution sur un plan vertical. Elle permet de diagnostiquer la présence d'obstacles à l'enracinement, de caractériser la résistance du sol à la pénétration des racines et de comparer la capacité d'extraction des systèmes racinaires.

La croissance des racines a été suivie par cartographie des traces des racines sur les parois transparentes de chacune des cuves. On a observé les impacts racinaires à travers une paroi transparente quadrillée. Les dimensions des mailles du quadrillage étaient de 2 x 2 cm. Sur chaque maille, nous avons noté l'absence ou la présence de racines (Maertens, 1988). Les mesures ont été effectuées sur une largeur de 60 cm parallèlement au rang de semis et à une

distance d'environ 5 cm. 2 répétitions ont été réalisées. On appellera densité racinaire la fréquence de présence des racines. Elle a été calculée pour chaque couche horizontale d'une épaisseur de 2 cm. Elle est comprise entre 0 et 1.

$$d(z) = \frac{\text{Nombre de mailles avec au moins une racine}}{\text{Nombre totale de mailles}} \quad \text{---} \quad \text{(éq. 1.3)}$$

où  $d(z)$  est la densité racinaire par couche horizontale d'épaisseur 2 cm.

La représentation graphique de la variation de la densité racinaire avec la profondeur est identifiée comme un profil de densité racinaire (Figure 1.5).

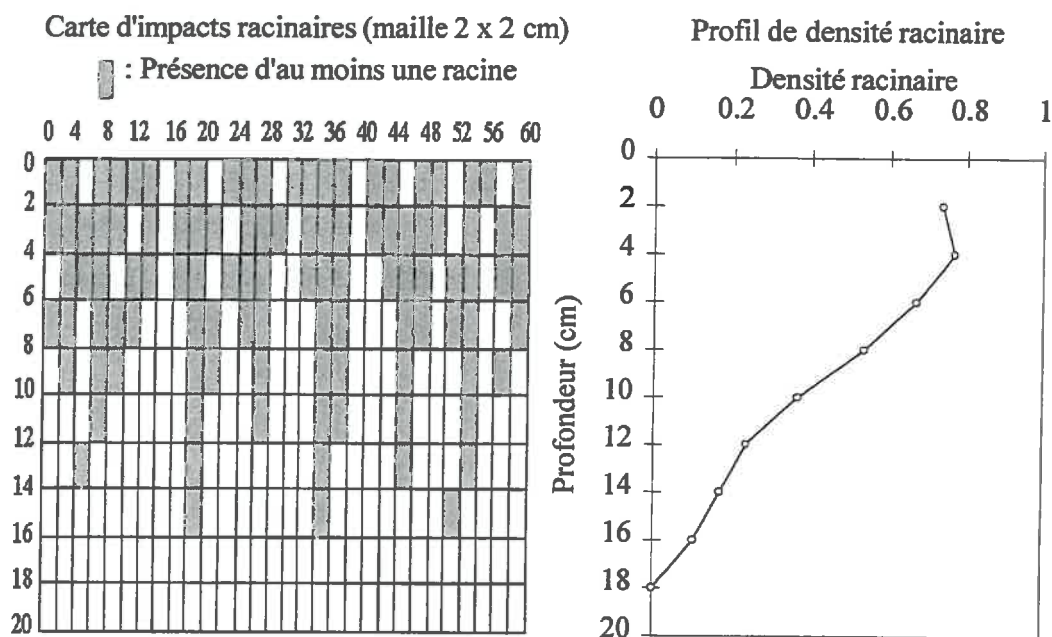


Figure 1.5 : Illustration de la méthode de calcul d'un profil de densité racinaire à partir des cartographies verticales (sur cet exemple : la profondeur racinaire est de 16 cm)

La profondeur racinaire, notée  $z_{rac}$ , est la profondeur maximale d'enracinement au moment de la mesure. C'est la couche la plus profonde où plus de 10% des cases sont occupées par une racine. Cette méthode permet d'éliminer, dans le calcul de la profondeur d'enracinement, les cas particuliers (exemple : racines utilisant des passages préférentiels) non représentatifs du comportement de l'ensemble du système racinaire.

Dans des conditions de semis à la densité agricole, distance inter-rangs d'environ 14 cm et inter-plants de 2 à 3 cm (soit environ 280 plantes / m<sup>2</sup>), sur une profondeur donnée, 1 case sur 10 occupée par une racine représente en moyenne 1 racine pour 6 plantes. En pourcentage cela fait

16.7% de plantes ayant au moins une racine à cette profondeur pour un seul plan vertical. Entre deux rangs nous comptons en moyenne 6 plans verticaux d'une épaisseur de 2 cm. Au total 100% des plantes ont au moins une racine à la profondeur indiquée. Même si deux répétitions ont été réalisées, la question de la représentativité des mesures reste posée. En effet, nous avons mesuré uniquement des "effets de bord" dus à la paroi. Les systèmes expérimentaux étant identiques, nous avons admis que ces effets étaient comparables d'un traitement à l'autre.

#### Mesure de l'activité photosynthétique :

Les mesures de l'état de croissance des plantes ont été complétées par des mesures d'activité photosynthétique et de transpiration de la culture. Ces mesures ponctuelles ont été réalisées à différentes heures de la journée. Le système de mesure était une chambre fermée dérivée du système de mesure par la pince LI-COR. Sa conception tenait compte de la surface et de la hauteur du couvert végétal (Sappe et *al*, 1992). Le circuit primaire constitué par la pince LI-COR était alimenté par un circuit secondaire comprenant la chambre, une pompe et une rampe de prise d'échantillon. La rampe était constituée d'un tube perforé disposé en diagonale dans la chambre et d'un tube de retour de gaz échantillonné dans la chambre (Figure 1.6). L'ensemble des tests relatifs au fonctionnement de ce système (qualité de la paroi, système d'échantillonnage, acquisition de données) a été réalisé à la station bioclimatologie de l'INRA d'Avignon. La paroi a été choisie pour ses propriétés de rétention de vapeur d'eau et de gaz carbonique.

La mesure durait en moyenne 3 minutes. Connaissant l'état initial dans la chambre (teneur en CO<sub>2</sub> et pression de vapeur, la pression atmosphérique et la température ambiante), l'analyseur avec une fréquence de mesure en moyenne de 5 secondes donnait l'évolution des conditions à l'intérieur de la chambre. Les variables mesurées ont été la concentration en CO<sub>2</sub> (ppm), la tension de vapeur (mbars) et la température de l'air dans la chambre (°C). Entre chaque mesure la chambre était largement aérée.

Un ajustement exponentiel est réalisé sur les chroniques de concentrations en CO<sub>2</sub> et de tension de vapeur. Les pentes des dérivées à l'origine correspondent aux flux qui nous intéressent (Figure 1.7). L'activité photosynthétique et l'évapotranspiration ont été exprimées dans l'unité du système international, respectivement en  $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$  et  $\text{W m}^{-2}$ .

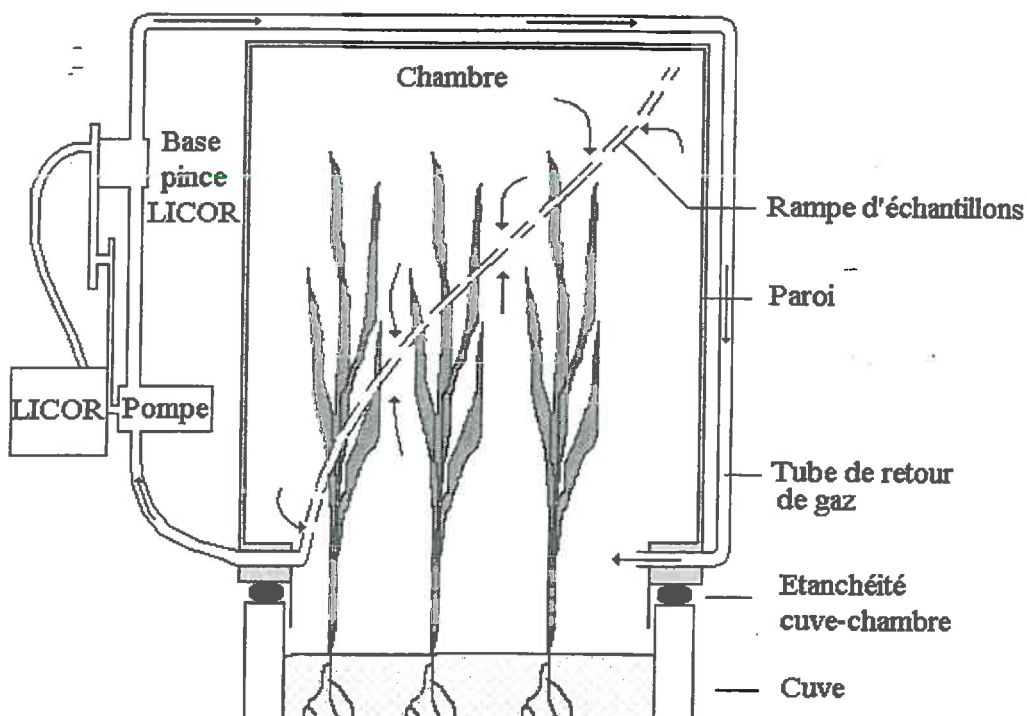


Figure 1.6 : Schéma de la chambre de mesure

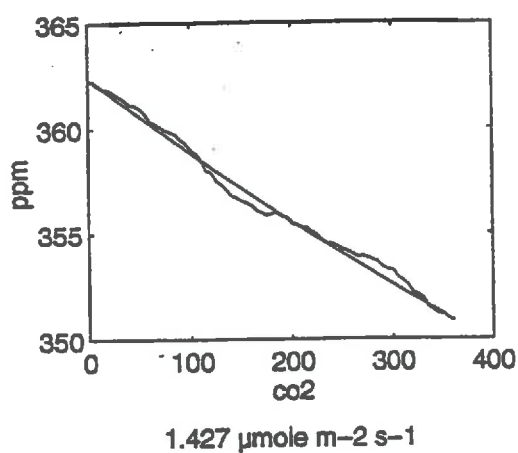


Figure 1.7a : Photosynthèse

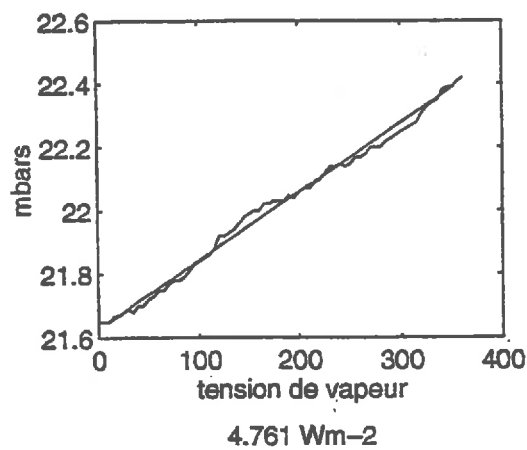


Figure 1.7b : Évapotranspiration

Figure 1.7 : Illustration de la méthode d'extraction des données de flux instantanés

Selon les phases de fonctionnement de la plante, intensité de la respiration et de la photosynthèse, nous avons accès à la vitesse de production ou de consommation en  $\text{CO}_2$ , et à l'évapotranspiration du couvert végétal. Ce principe de mesure a permis d'établir un bilan net de la photosynthèse (Figure 1.8).

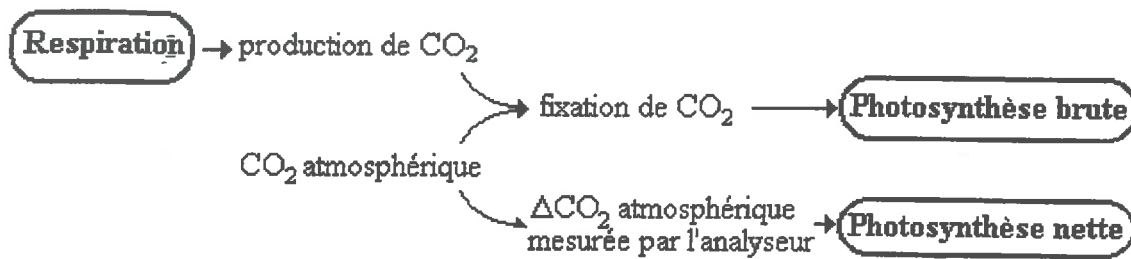


Figure 1.8 : Comparaison entre grandeurs mesurées et valeurs de la photosynthèse brute

Pour les expérimentations 1993 et 1993-1994, les dates de mesures relatives à la croissance de la plante sont présentées dans l'annexe 1.2.

## 1.2 Expérimentation en plein champ

### • Description du site expérimental

Le site expérimental est situé dans la région du Bassin Parisien, département de l'Eure et Loir. Mis en place en avril 1972, il est installé sur la commune d'Arrou chez M. Gourdet.

Par sa situation géographique, son contexte climatique et pédologique, le périmètre expérimental est représentatif de la région agricole du Faux-Perche qui couvre une surface de 50 000 ha. De façon plus générale, il est représentatif des sols limoneux peu perméables à nappe perchée temporaire nombreux en France sous climat océanique (Guyon et *al*, 1984). Cette catégorie de sol représente 70 à 80% des situations en sols drainés français soumis à un excès d'eau temporaire (Lesaffre et Zimmer, 1991). L'expérimentation a été conduite par le Cemagref sous le patronage de la D.D.A. de l'Eure et Loir, avec le concours de l'INRA de Versailles et de la Chambre Départementale d'Agriculture. Les objectifs de cette expérimentation ont beaucoup évolué au cours du temps. Lors de sa mise en place à l'époque où le drainage par tuyaux enterrés faisait ses débuts en France, il s'agissait d'acquérir des références dans ces sols pour juger de l'opportunité du drainage, de sa faisabilité et pour dimensionner les ouvrages.

En France, la compréhension du fonctionnement hydraulique d'une parcelle drainée doit beaucoup aux données acquises sur ce site. La prise de conscience, autour des années 1980, de l'extension de la pollution des eaux par les composés azotés ont orienté les objectifs vers un diagnostic du risque de lessivage d'azote. Les résultats agronomiques issus de ce site, largement

complétés par des résultats issus d'enquêtes sur la région, ont permis d'aboutir à un grand nombre de préconisations tant sur le dimensionnement des réseaux de drainage (écartement des drains, profondeur de pose...) que sur l'orientation des pratiques culturales et des itinéraires techniques.

Le champ expérimental comprend un ensemble de 7 parcelles drainées de deux hectares chacune et une parcelle-témoin non drainée. Chaque parcelle est isolée hydrauliquement par un drain de ceinture. Les caractéristiques des aménagements hydrauliques réalisés sur chacune des parcelles sont présentées dans le Tableau 1.9. Chaque parcelle drainée est reliée à une chambre de mesure dans laquelle les mesures de débit et les analyses complémentaires concernant les eaux de drainage sont réalisées. Le site expérimental a été décrit en détail par Lesaffre (1988) et Zimmer (1988). Le périmètre expérimental est présenté dans l'annexe 1.3.

Parcelle	Surface (ha)	Ecartement des drains (m)	Drains	Gravillonnage des tranchées	Profondeur de l'imperméable	Observations
1*	2.006	10	PVC	Non	0.8 m	griffage (sept. 1980)
2**	2.006	15	PVC	Oui	0.8 m	sous-solage (sept. 1980) drainé à nouveau en 1981
3**	1.992	15	PVC	Non	0.7 m	griffage (sept. 1980)
4**	1.990	20	PVC	Oui	0.8 m	sous-solage (été 1978 et sept. 1980)
5	Témoin non drainé					drainage en janv. 1992
6**	2.004	10	Poterie	Non	0.7 m	griffage (sept. 1981)
7**	2.004	15	Poterie	Oui	0.8 m	griffage (sept. 1981)
8**	2.004	20	PVC	Non	0.8 m	sous-solage (été 1978 et sept. 1981)

Tableau 1.9 : Description des parcelles expérimentales du site d'Arrou, \* parcelle sur laquelle nous avons réalisé notre expérimentation et avons vérifié le fonctionnement du modèle BLEX, \*\* parcelles sur lesquelles le modèle BLEX a été validé (la profondeur de pose des drains est comprise entre 0.75 et 0.85 m)

### ➤ Contexte climatique

Le climat est de type océanique ; la moyenne pluviométrique annuelle (1974 à 1994) est de 654 mm avec un écart-type égal à 126 mm. Sur la même période, la moyenne de l'ETP annuelle est de 796 mm avec un écart-type de 90 mm. Les précipitations sont régulièrement réparties sur l'année. L'ETP est supérieure à la pluviométrie en moyenne d'avril à septembre (Figure 1.9).

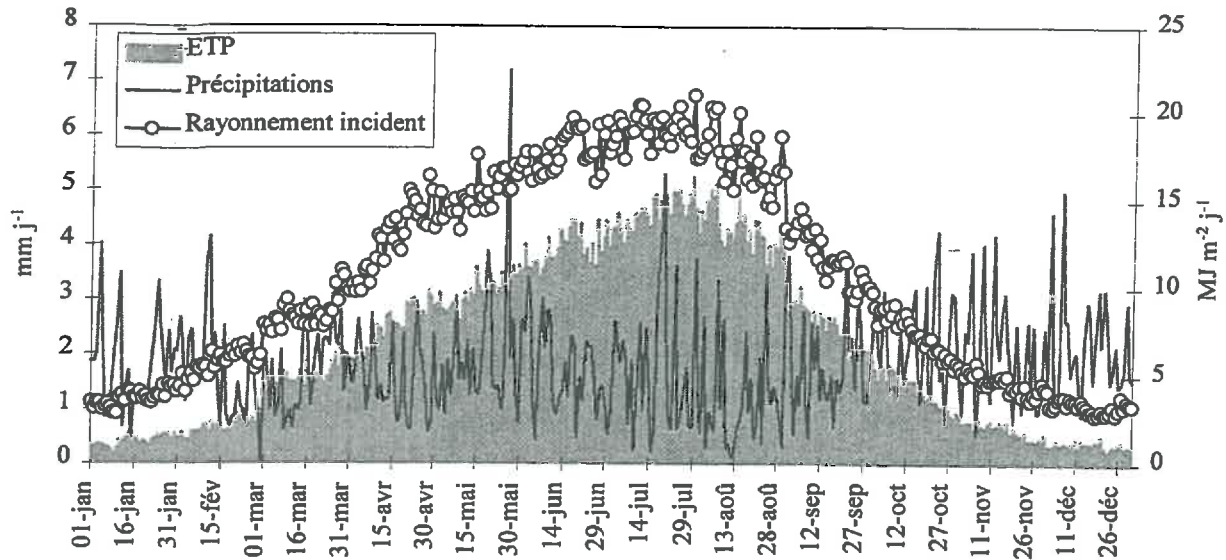


Figure 1.9 : Chronique journalière de précipitations, d'ETP et de rayonnement incident (moyenne sur 21 ans, (1974-1994), station de la Météorologie Nationale de Chateaudun-Jallans)

La période humide (Précipitations > ETP) s'établit en moyenne entre la fin du mois de septembre et la fin du mois de mars. Les précipitations atteignant une intensité supérieure à  $10 \text{ mm j}^{-1}$  ne dépassent pas en moyenne 20 jours sur l'année (Figure 1.10).

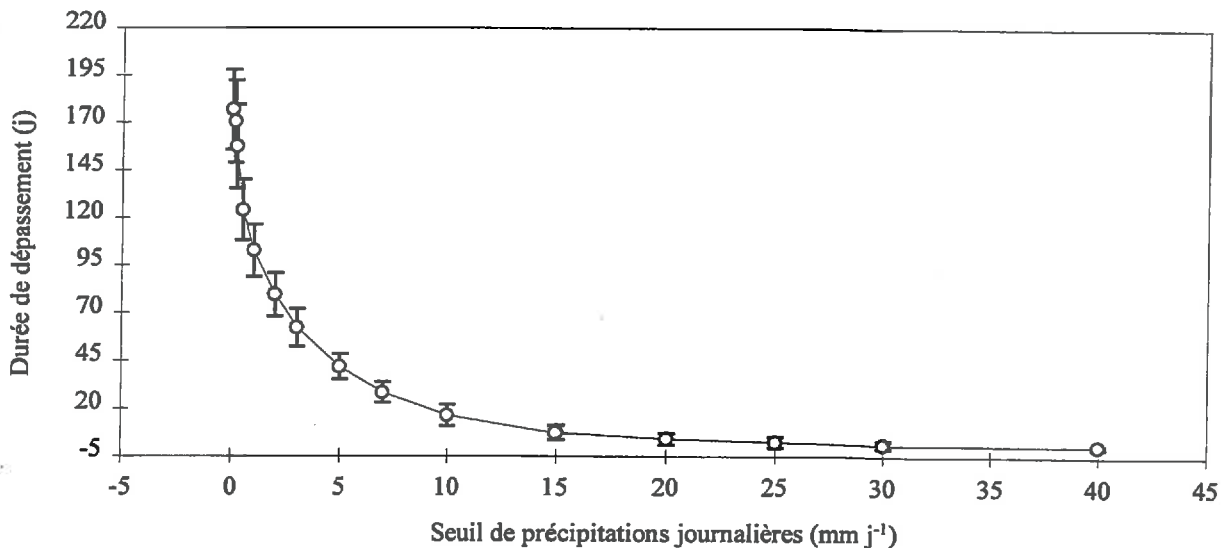


Figure 1.10 : Durée de dépassement moyenne d'un seuil de précipitations (moyenne sur 21 ans (1974-1994), station de la Météorologie Nationale de Chateaudun-Jallans)

En moyenne, les températures maximales sont enregistrées entre la mi-juillet et la mi-août. L'amplitude thermique journalière est maximale l'été et minimale l'hiver (Figure 1.11). Le



nombre moyen de jours par an où la température minimale est négative est de 71 avec un écart-type de 13 et il est de 18 avec un écart-type de 10 pour la température moyenne journalière.

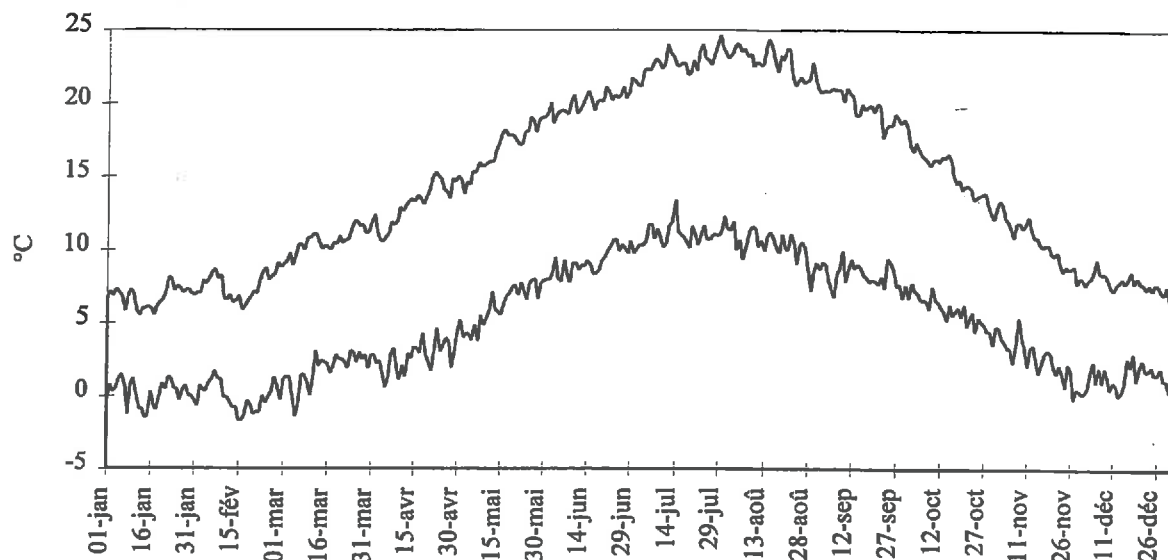


Figure 1.11 : Chronique journalière de températures maximales et minimales (moyenne sur 21 ans (1974-1994), station de la Météorologie Nationale de Chateaudun-Jallans)

Les jours où les températures sont négatives s'étalent entre le mois de décembre et le mois de mars. Les premières gelées apparaissent vers la fin du mois de novembre, les dernières au début du mois d'avril (Figure 1.12).

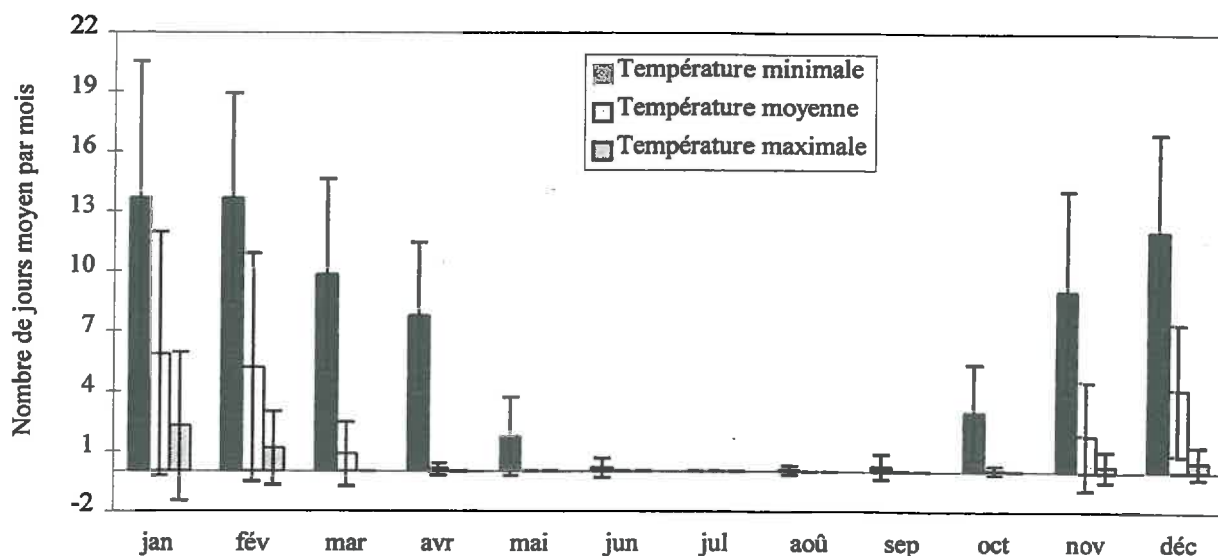


Figure 1.12 : Nombre moyen de jours par an où la température est négative (moyenne sur 21 ans (1974-1994), station de la Météorologie Nationale de Chateaudun-Jallans)

➤ *Contexte pédologique*

La roche mère est constituée de limons des plateaux chargés de silex. Le sol est de type lessivé, sa texture est argilo-limoneuse dans sa partie inférieure (50 à 130 cm) et limoneuse à limono-argileuse en surface.

L'augmentation progressive, en profondeur, de la teneur en argile et de la densité apparente du sol ainsi qu'une diminution de la porosité apparente et de l'activité biologique conduisent à émettre l'hypothèse que la conductivité hydraulique décroît depuis la base de l'horizon labouré vers la profondeur. Celle-ci devient très faible lorsqu'apparaissent les premières glosses grises remplies d'argiles déferrifiées d'illuviations secondaires (Lesaffre, 1988). L'ensemble des caractéristiques pédologiques sont présentées dans l'annexe 1.3.

➤ *Contexte agronomique*

Les successions culturales ainsi que les itinéraires culturaux résultent de décisions prises par l'agriculteur. Les cultures dominantes sont le blé d'hiver, l'escourgeon et le maïs ensilage. La culture de colza a été introduite sur ce site à partir de 1993. Le Tableau 1.10 présente la succession des cultures pour chaque campagne et chaque parcelle.

Parcelle	1	2	3	4	5	6	7	8
1974-1975	Blé							
1975-1976	Escourgeon					Blé		
1976-1977	RGI + Maïs en.	Seigle + Maïs en.		RGI + Maïs en.		Maïs grain		
1977-1978	Blé							
1978-1979	Blé					Escourgeon		
1979-1980	Escourgeon					Maïs grain		
1980-1981	RGI					Blé		
1981-1982	Blé	RGI + Maïs en.		Blé		Blé		
1982-1983	Blé					Maïs en.		
1983-1984	Maïs en.					Blé		
1984-1985	Blé	Pois			Blé	Blé		
1985-1986	Blé					Maïs en.		
1986-1987	Maïs grain					Blé		
1987-1988	Blé							

Parcelle	1	2	3	4	5	6	7	8
1988-1989	Blé					Pois		
1989-1990	Pois					Blé		
1990-1991	Blé					Maïs en.		
1991-1992	Maïs en.			Maïs grain		Blé		
1992-1993	Blé					Escourgeon		
1993-1994	Blé	Escourgeon				Colza		
1994-1995	Colza					Blé		
1995-1996	Blé					Pois		

Tableau 1.10 : Succession des cultures, de 1974 à 1995, site expérimental d'Arrou (RGI, ray-grass italien ; en., ensilage ; RGI + maïs, le ray grass est pratiqué en dérobé)

Depuis 1972, la quantité de données accumulées sur ce site est importante. Ces données concernent aussi bien la croissance et le développement des cultures (maïs ensilage et grains, seigle, escourgeons, blé tendre, ray-grass, etc...) que le suivi du fonctionnement hydraulique des parcelles (piézométrie, débitmétrie, tensiométrie, humidité, pluviométrie, etc...). Des suivis expérimentaux plus épisodiques concernent l'acquisition de paramètres hydrodynamiques, de contrôles d'évolution des caractéristiques pédologiques (texture, structure, diagnostic de fertilité, etc...). Les données disponibles issues de suivis expérimentaux à l'échelle du périmètre expérimental sont présentées dans l'annexe 1.3. La quantité et la qualité des données disponibles font de ce site un terrain idéal pour l'étude de l'effet d'un excès d'eau sur la croissance et le développement des cultures. Même s'ils sont souvent extrapolés à tout le site expérimental, les résultats expérimentaux sur le fonctionnement hydraulique d'une parcelle drainée et la réponse agronomique proviennent de suivis plus spécifiques sur la parcelle 1.

### • Expérimentation sur la parcelle 1

#### ➤ Caractéristiques de la parcelle 1

La parcelle 1 est assez homogène d'un point de vue pédologique. Le fonctionnement du réseau de drainage au cours de la période hivernale se rapproche d'un cas idéal pour la modélisation des transferts d'eau en milieu saturé. Les infiltrations profondes, au cours de la saison de drainage intense sont quasiment nulles et la restitution du réseau de drainage est maximale. Ces caractéristiques font que cette parcelle peut être assimilée à un lysimètre géant.

### ➤ *Protocole expérimental*

Sur une parcelle drainée, le point essentiel est la différence entre la zone située à la verticale du drain et celle située à l'inter-drain. Au cours de la période hivernale, lorsque la nappe perchée temporaire est installée, les conditions hydriques varient selon la distance par rapport aux drains. L'étude de la forme de la nappe a permis de mettre en évidence une forme elliptique dont la hauteur maximale est mesurée à mi-distance entre deux files de drains (Figure 1.13).

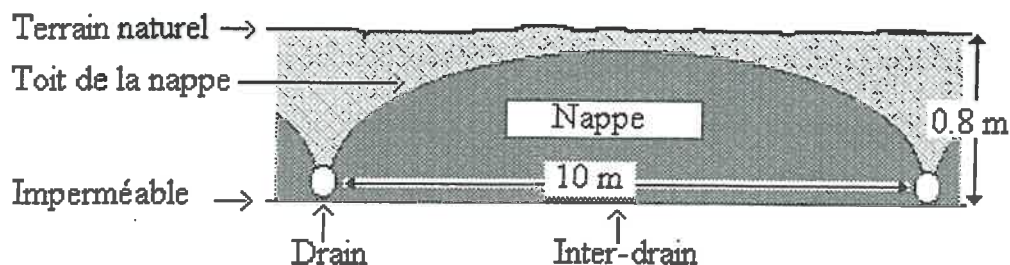


Figure 1.13 : Coupe transversale d'une nappe en parcelle drainée

Au cours de la campagne 1993-1994, l'ensemble du suivi hydrométrique a été disposé à l'inter-drain, lieu où la contrainte hydrique est la plus forte. En ce qui concerne le suivi agronomique, nous avons considéré qu'il y avait deux traitements, l'un à l'inter-drain, l'autre au niveau du drain. Le dispositif situé au niveau du drain a été considéré comme étant "le témoin" ; il représentait la situation potentielle de la parcelle. Le dispositif situé au niveau de l'inter-drain a été considéré comme étant le "traitement" ; il représentait la situation la plus défavorable de la parcelle pour la croissance des cultures.

Les visites sur le site ont été calées par rapport aux stades de développement de la culture. Elles ont permis de réaliser des prélèvements et des mesures agronomiques : suivis ponctuels. La fréquence des mesures a été plus grande au cours de la période hivernale.

### ➤ *Variables mesurées*

Le suivi expérimental concernait l'enregistrement, en continu ou ponctuel, de variables liées au climat, au sol et à la culture.

#### Conditions climatiques :

Le site expérimental était équipé d'un pluviomètre. Les autres données météorologiques ont été fournies par la station de la météorologie nationale de Chateaudun choisie pour sa proximité avec le site expérimental (30 km). Les données fournies par la station au pas de temps journalier ont été, les températures minimales et maximales, les précipitations, l'ETP et le rayonnement global.

**Suivi hydrométrique :**

L'acquisition des données était automatique. Nous avons mesuré la hauteur de nappe au drain et à l'inter-drain (piézométrie ultrasons), le volume d'eau évacué par le réseau de drainage (bac déversoir), l'humidité (sonde neutronique) et la pression en eau du sol (tensiométrie). Ces mesures ont été complétées par des mesures en continu de la température à la surface du couvert végétal et dans le sol à 20, 40 et 60 cm de profondeur. L'ensemble du dispositif de mesures hydrométriques et le détail des périodes de mesures sont présentés respectivement sur la Figure 1.14 et le Tableau 1.11. La sonde neutronique a été étalonnée à partir de prélèvements de sol à la tarière et des mesures de l'humidité pondérale. La densité sèche a été mesurée par prélèvement au cylindre et par gamma-densimétrie (annexe 1.3).

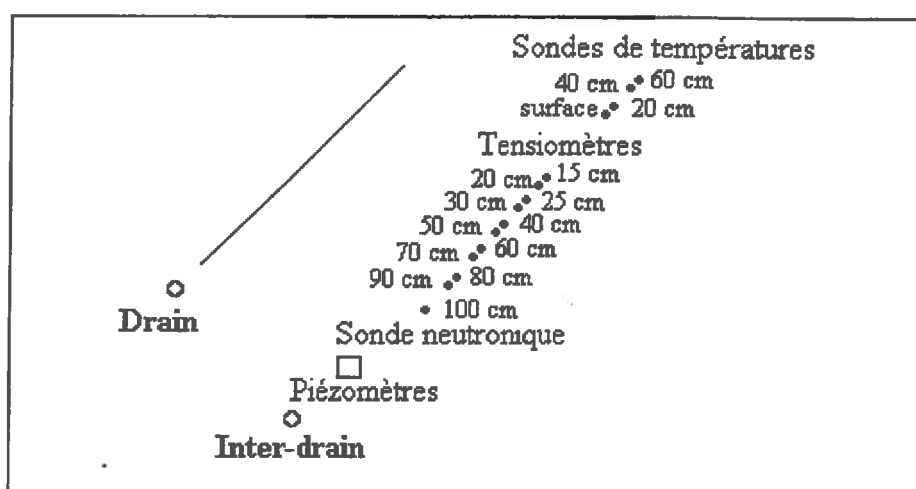


Figure 1.14 : Dispositif de mesures sur la parcelle 1 du site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Mesures	Date début	Date fin	Période de données manquantes
Pluviométrie	06 oct. 1993	23 juin 1994	du 13 nov 1993 au 04 janv. 1994 ; du 21 fév. au 23 juin 1994
Débitmétrie	06 oct. 1993	04 mai 1994	complet
Piézométrie	04 nov. 1993	22 juin 1994	complet
Tensiométrie	04 nov. 1993	22 juin 1994	du 30 mars au 25 mai 1994
Humidité	04 nov. 1993 22 juin 1994	04 fév. 1994 11 juil. 1994	du 01 déc. 1993 au 23 janv. 1994 ; complet
Température	21 déc. 1993	22 juin 1994	complet

Tableau 1.11 : Données disponibles et périodes de mesures, parcelle 1, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

**Suivi agronomique :****Mesure de l'activité photosynthétique :**

Selon le même protocole que pour les cuves, des mesures d'activités photosynthétiques et de transpiration ont été réalisées au drain et à l'inter-drain à différentes heures de la journée. 2 répétitions ont été réalisées. Au cours de la période hivernale, nous disposons au total de 5 jours de données valides.

**Mesure de la croissance racinaire :**

La croissance racinaire en profondeur et en densité a été suivie par cartographies sur un plan vertical. Deux fosses d'accès, au drain et à l'inter-drain, étaient aménagées. Avant chaque mesure la fosse était rafraîchie sur une épaisseur d'environ 50 cm. Les plans verticaux, d'une largeur de 80 cm, sont préparés. Ils étaient parallèles au rang de semis et à une distance d'environ 5 cm de celui-ci. Les racines sont ensuite dégagées puis une grille de maille 2 x 2 cm est apposée sur le plan étudié. Le protocole de mesure et la méthode d'estimation de la densité et de la profondeur racinaire sont identiques à ceux des cuves. Pendant la période hivernale, les mesures ont été effectuées en moyenne toutes les semaines.

Le drainage sur la parcelle 1 a été réalisé en 1973, un griffage a été réalisé en 1980, les différences entre la tranchée de drainage se sont estompées. De plus, les mesures de cartographies racinaires réalisées sur une largeur supérieure à celle de la tranchée (80 pour 50 cm) n'ont pas permis de mettre en évidence de différence de l'enracinement due à la tranchée. En conséquence, nous avons admis que les différences observées sur l'enracinement entre le drain et l'inter-drain étaient dues uniquement à la présence de la nappe.

**Mesure de la surface foliaire :**

Les mesures de surface foliaire ont été réalisées au drain et à l'inter-drain. Afin d'assurer une bonne représentativité des mesures, l'estimation de l'indice foliaire a été réalisée en deux étapes :

- 5 plantes ont été prélevées au hasard sur chacune des deux zones étudiées. La surface des feuilles et des tiges était mesurée par planimétrie. Nous avons mesuré ensuite la masse de matière sèche des différents organes. Le rapport de ces deux grandeurs (biomasse/surface) permet de déterminer la masse surfacique, sa valeur vaut :

$$\text{Masse surfacique (feuille)} = \frac{\text{Masse de matière sèche des feuilles (g)}}{\text{Surface foliaire (cm}^2\text{)}} \quad (\text{éq. 1.4})$$

- La masse de matière sèche des feuilles et des tiges est déterminée à partir d'un prélèvement sur 0.25 m<sup>2</sup> (voir protocole de prélèvement sur les mesures de biomasse). 2 répétitions ont été réalisées. Le LAI a été calculé à partir de cette masse de matière sèche et de la masse surfacique des feuilles calculée précédemment, son expression est la suivante :

$$LAI = \frac{\text{Masse de matière sèche foliaire (g / cm}^2 \text{ de sol)}}{\text{Masse surfacique foliaire (g / cm}^2 \text{ de feuille)}} \quad (\text{éq. 1.5})$$

#### Mesure de la biomasse :

Nous avons procédé à des prélèvements de plante entière (parties aériennes et racinaires). Les prélèvements ont été effectués en moyenne tous les 15 jours sur la profondeur maximale d'enracinement et sur une surface de 0.250 m<sup>2</sup>. Ils ont été effectués sur 3 rangs espacés de 15 cm sur une longueur de 50 cm. La totalité du profil de sol a été prélevée sans distinction par horizons. Au laboratoire, les parties aériennes ont été séparées des parties souterraines au dessous du plateau de tallage. Ne prenant pas en compte les parties souterraines non racinaires, la fraction racinaire pouvait donc être définie comme telle. Les racines ont été extraites par lessivage. L'ensemble, parties aérienne et racinaire, a été mis à l'étuve pendant 24h à 105 °C puis pesé.

Des pertes de biomasse sont inhérentes à ces mesures et à ce type de protocole. Elles sont liées à la respiration pendant la mesure (Van Noordwijk et Floris, 1979), à l'exsudation et à la dégénérescence ou à la perte de racines fines (Lambers cité par Hamblin, 1990 ; Böhm, 1979). Les pertes par respiration peuvent être limitées en diminuant la durée de la manipulation (24h). Celles liées à l'extraction des racines sont limitées par la mise en suspension et le lessivage du sol sur un tamis. En référence à ces auteurs, dans nos conditions expérimentales, les mesures effectuées devraient sous-estimer la biomasse racinaire de 10 à 20%.

#### Mesure des composantes de rendement :

Les stades de développement ont été repérés suivant l'échelle de Jonard. En cours de végétation et à la récolte, nous avons effectué des comptages du nombre de plantes, de talles et d'épis par m<sup>2</sup>. A la récolte, le nombre de grains par épis, le poids de mille grains et le taux d'humidité des grains ont été mesurés. Les rendements ont été calculés à partir de ces comptages. Le rendement moyen (parcelle entière) a été mesuré par l'agriculteur.

Les dates de mesures relatives à la croissance de la plante sont présentées dans l'annexe 1.2.

### 1.3 Caractérisation des campagnes de mesures

- *Expérimentation en cuves lysimétriques*

➤ *Campagne 1993*

L'expérimentation a démarré en avril pour une durée de 5 mois. Le principal objectif de cette campagne de mesure était de préciser le protocole expérimental et de tester le système expérimental. Elle a été menée sur une culture de blé, variété Furio, blé tardif. Le semis a été réalisé le 9 avril avec une distance inter-rangs de 15 cm et inter-plants de 2.5 cm, soit une densité de semis de 280 plantes par m<sup>2</sup>. Les stades de développement de la culture ainsi que les interventions culturales réalisées au cours du cycle sont présentés dans le Tableau 1.12.

Stade de développement	Date	Intervention	Date
Semis	09 avril	Apport d'engrais complet (≈60 unités, 15-20-18)	30 mai
Levée	19 avril	<b>Mise en eau</b>	17 juin
Tallage	06 mai	Apport d'ammonitrate (≈70 unités)	08 juillet
Epi 1 cm	29 mai	<b>Arrêt de la mise en eau</b>	20 juillet
Floraison	10 juillet		
Récolte	24 août		

Tableau 1.12 : Stades de développement et interventions culturales, site expérimental d'Antony campagne 1993

Au cours de cette campagne une seule contrainte d'engorgement a été imposée en cours de montaison. Les hauteurs de nappe ont été mesurées à l'aide d'une canne limnimétrique (cuves 1 et 5) et par sondes ultrasons (cuves 3 et 4) (Figure 1.15).

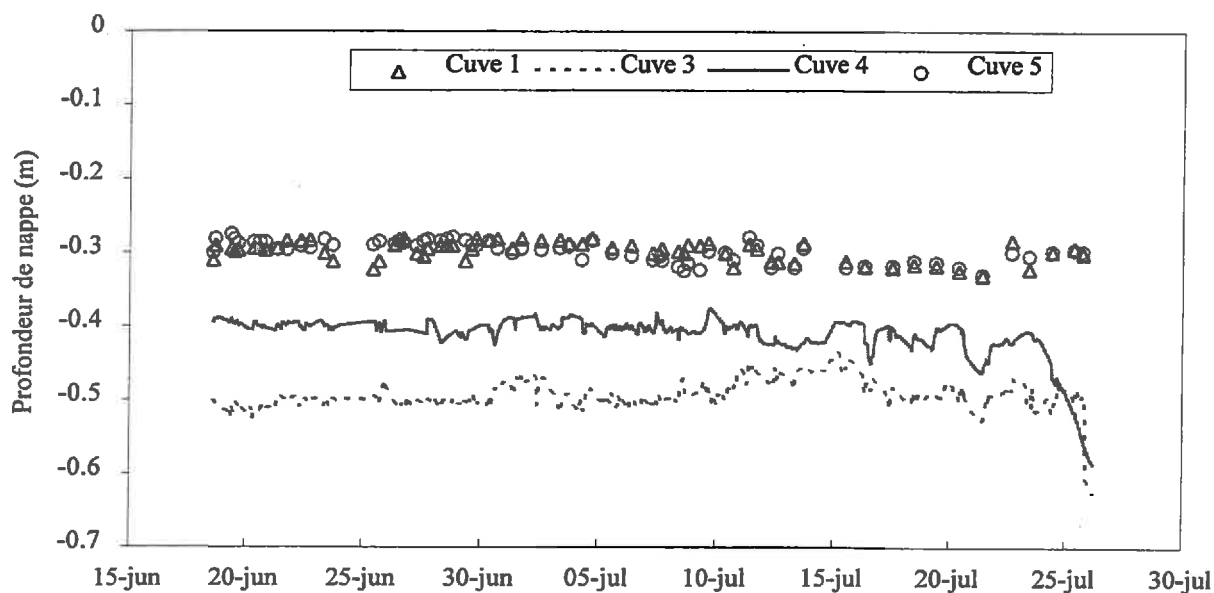


Figure 1.15 : Chronique des profondeurs de nappe site expérimental d'Antony, campagne 1993



Le régime permanent sur les profondeurs de nappe s'établit correctement. Le système de maintien de la hauteur de nappe à un niveau constant donne des résultats satisfaisants.

Les précipitations entre le mois d'avril et d'août ont été de 172 mm (Figure 1.16).

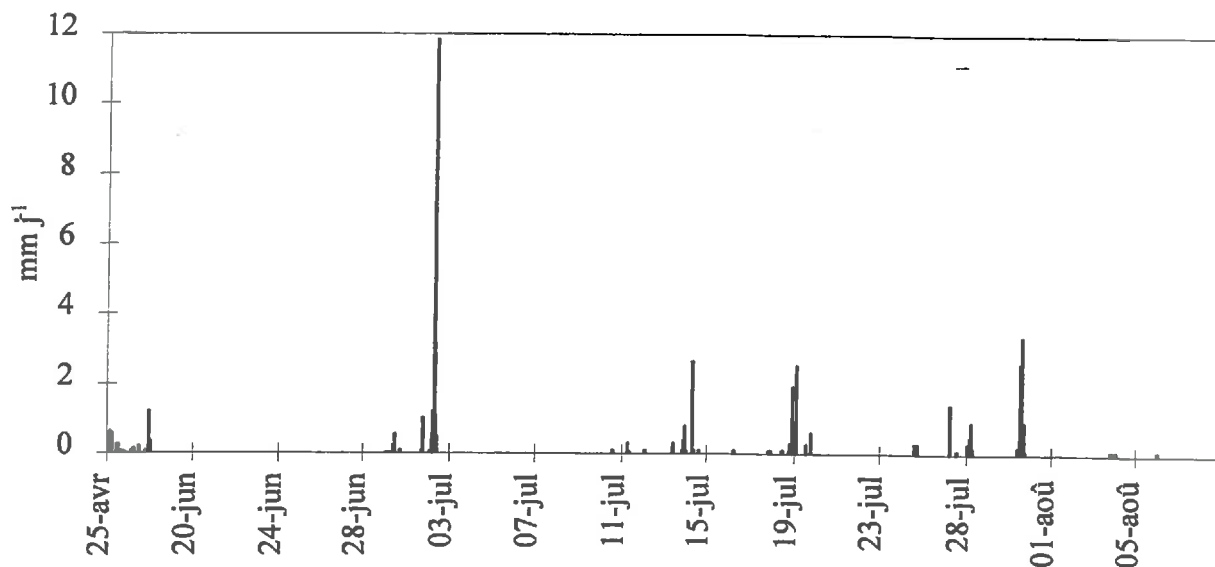


Figure 1.16 : Chronique des précipitations journalières, sur le site expérimental d'Antony, campagne 1993

➤ Campagne 1993-1994

L'expérimentation a démarré en novembre pour une durée de 9 mois. Elle a été menée sur une culture de blé tendre d'hiver, variété Soissons. Le semis a été réalisé le 2 novembre avec une distance inter-rangs de 15 cm et inter-plants de 2.5 cm, soit une densité de semis de 280 plantes par m<sup>2</sup>. Les stades de développement de la culture ainsi que les interventions culturales effectuées au cours du cycle sont présentés dans le Tableau 1.13.

Stade de développement	Date	Intervention	Date
Semis	02 novembre	<b>Mise en eau</b>	
Levée	21 novembre	Début contrainte 1	03 mai
2 feuilles	27 décembre	Fin contrainte 1	21 mai
3 feuilles	04 janvier	Début contrainte 2	03 juin
Début tallage	09 février	Fin contrainte 2	06 juillet
Plein tallage	18 février	Apport d'engrais complet (≈70 unités, 15-20-18)	03 mars
Epi 1 cm	10 mars	Apport d'ammonitrate (≈50 unités)	13 avril
Floraison	15 juin		
Récolte	02 août		

Tableau 1.13 : Stades de développement et interventions culturales, site expérimental d'Antony, campagne 1993-1994

Deux niveaux de contraintes ont été imposées en régime permanent. La première, profondeur de nappe de 50 cm a été imposée sur les cuves 1, 3 et 4 au stade mi montaison. La seconde, profondeur de nappe de 30 cm a été imposée sur les cuves 1, 4 et 5 pendant la floraison (Figure 1.17). Dans les deux cas la nappe remonte dans le système racinaire.

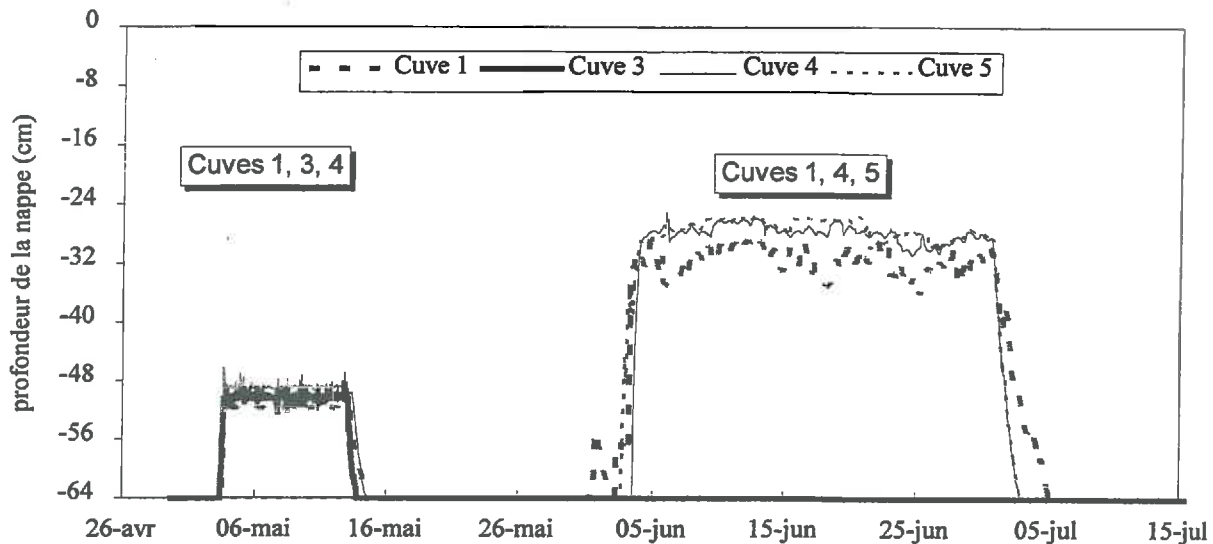


Figure 1.17 : Chronique des profondeurs de nappe, site expérimental d'Antony, campagne 1993-1994

Les précipitations au cours de cette campagne ont été de 467 mm (Figure 1.18).

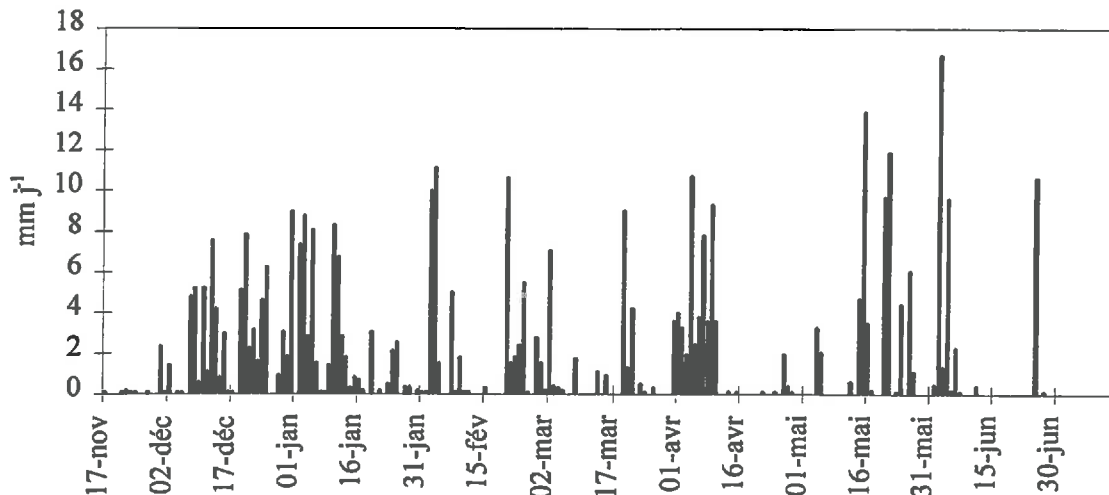


Figure 1.18 : Chronique pluviométrique, moyenne journalière, site expérimental d'Antony, campagne 1993-1994

Les conditions climatiques, moyennes journalières, au cours de cette campagne sont présentées sur la Figure 1.19.

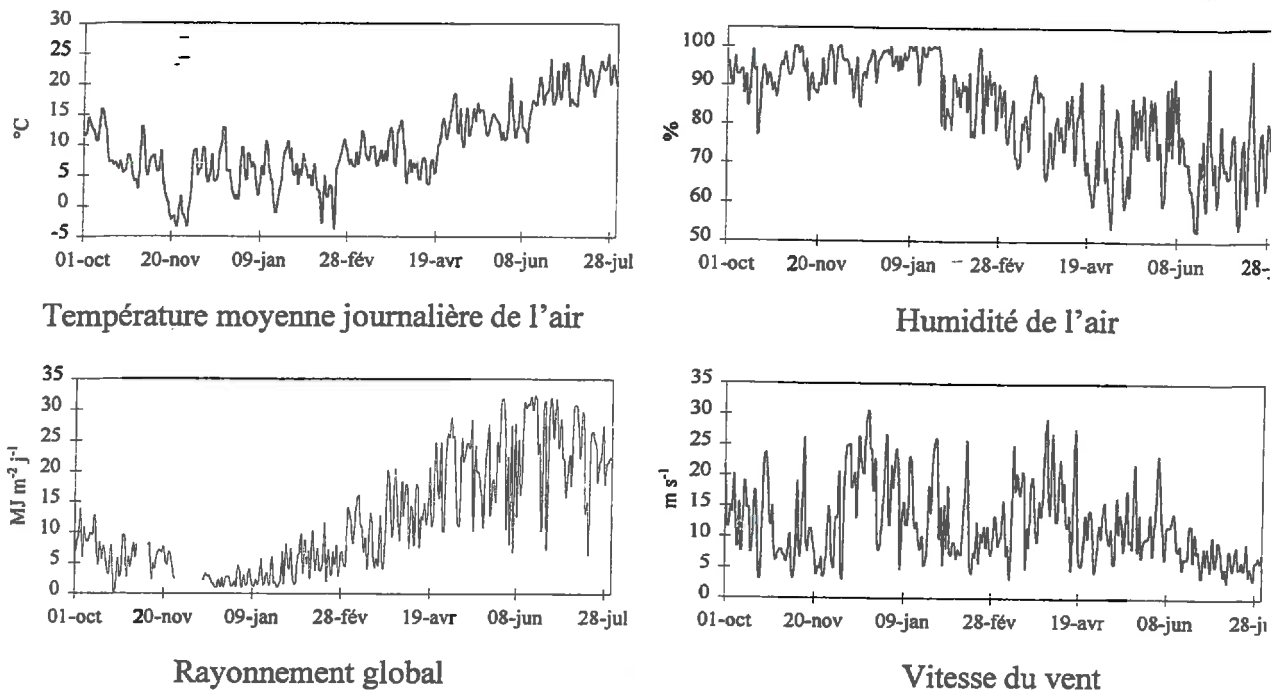


Figure 1.19 : Chroniques des valeurs moyennes journalières du rayonnement global, de la température de l'air et de la vitesse du vent, station météorologique du Stefce, Thiverval-Grignon

• **Expérimentation en plein champ**

L'expérimentation a démarré en octobre 1993 pour une durée de 10 mois. Elle a été menée sur une culture de blé tendre d'hiver, variété Soissons. Le semis a été réalisé le 19 octobre. La densité de semis était en moyenne de 310 plantes par m<sup>2</sup> (125 kg/ha). La préparation du lit de semence et le semis ont été réalisés dans de bonnes conditions. Les stades de développement de la culture et les interventions culturales réalisées sont résumés dans le Tableau 1.14.

Stade de développement	Date	Intervention	Date
Semis	19 octobre		
Levée	04 novembre	Herbicide Quartz (2.2 l/ha)	5 novembre
1 feuille	11 novembre	Ammonitre (61 unités)	08 mars
3-4 feuilles	23 novembre	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> liquide (118 unités)	18 mars
Plein tallage	09 février	Fongicide Opus Team (1.25 l/ha)	21 avril
Epi 1 cm	03 mars	Fongicide Opus Team (1 l/ha)	28 mai
Floraison	27 mai		
Récolte	13 juillet		

Tableau 1.14 : Stades de développement et interventions culturales, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Les précipitations et l'évapotranspiration potentielle au cours du cycle cultural ont été respectivement de 416 mm et 472 mm (Figure 1.20).

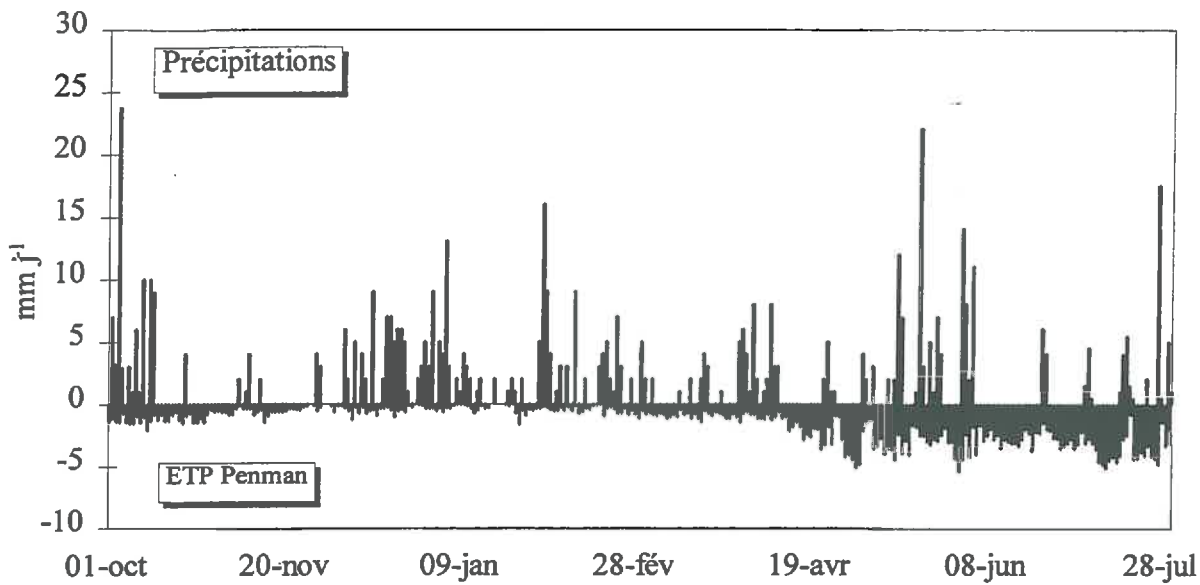


Figure 1.20 : Chronique des précipitations et d'ETP Penman, moyennes journalières, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Les conditions climatiques, moyennes journalières, au cours de cette campagne sont présentées sur la Figure 1.21.

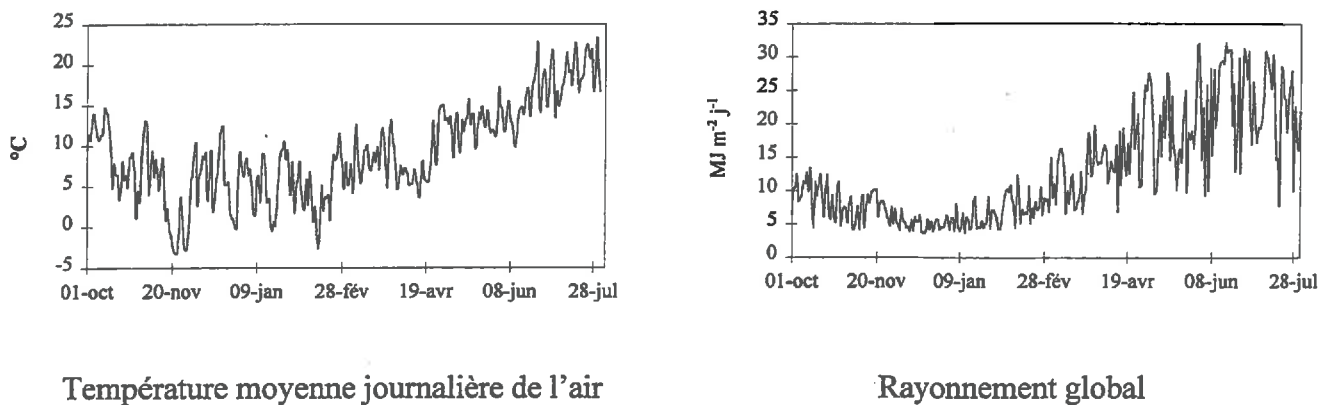


Figure 1.21 : Chroniques des valeurs moyennes journalières du rayonnement global et de la température de l'air, données fournies par la Météorologie Nationale, station de Chateaudun

Au cours de cette campagne, le réseau de drainage a fonctionné en continu durant 2.5 mois (Figure 1.22).

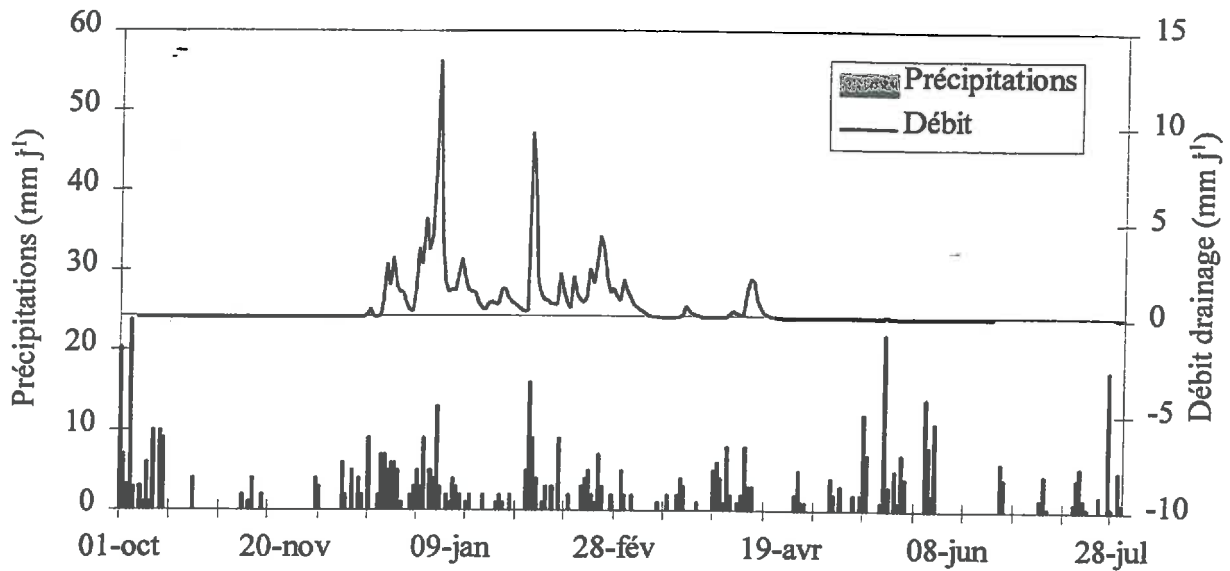


Figure 1.22 : Chronique pluviométrique et débitmétrique, moyennes journalières, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Les durées de dépassement des débits élevés ont été courtes et n'excédaient jamais 4 heures pour des débits supérieurs à 2 l/s/ha. La durée de dépassement du débit de projet (1 l/s/ha), en nombre d'heures, n'a pas excédé 45 heures (Figure 1.23a).

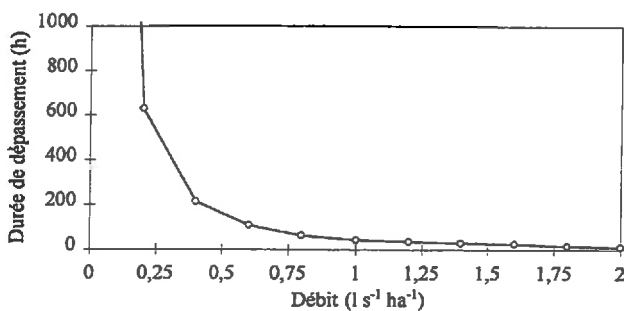


Figure 1.23a : Débit

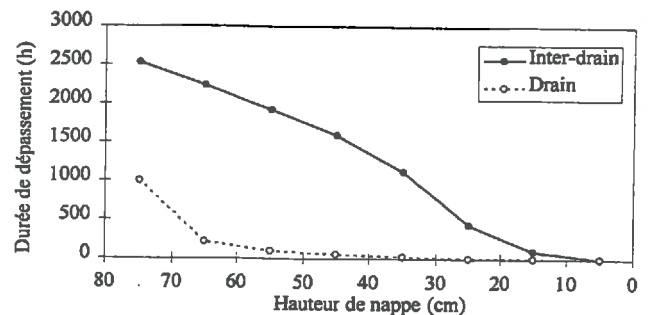


Figure 1.23b : Profondeur de nappe

Figure 1.23 : Durée de dépassement d'un seuil de débit et d'une profondeur de nappe, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

La nappe est restée en permanence dans le profil de sol durant une période de 75 jours (Figure 1.24). Les temps cumulés de présence de nappe à différentes profondeurs sont représentés sur la Figure 1.23b. La contrainte d'excès d'eau subie par la plante sur son cycle peut être estimée en considérant le temps de présence de la nappe dans l'horizon labouré (0-30 cm) (Tableau 1.15).

	Drain	Inter-drain
Horizon labouré 0-30 cm	24 h	1060 h

Tableau 1.15 : Temps de présence de la nappe dans l'horizon labouré au niveau du drain et de l'inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

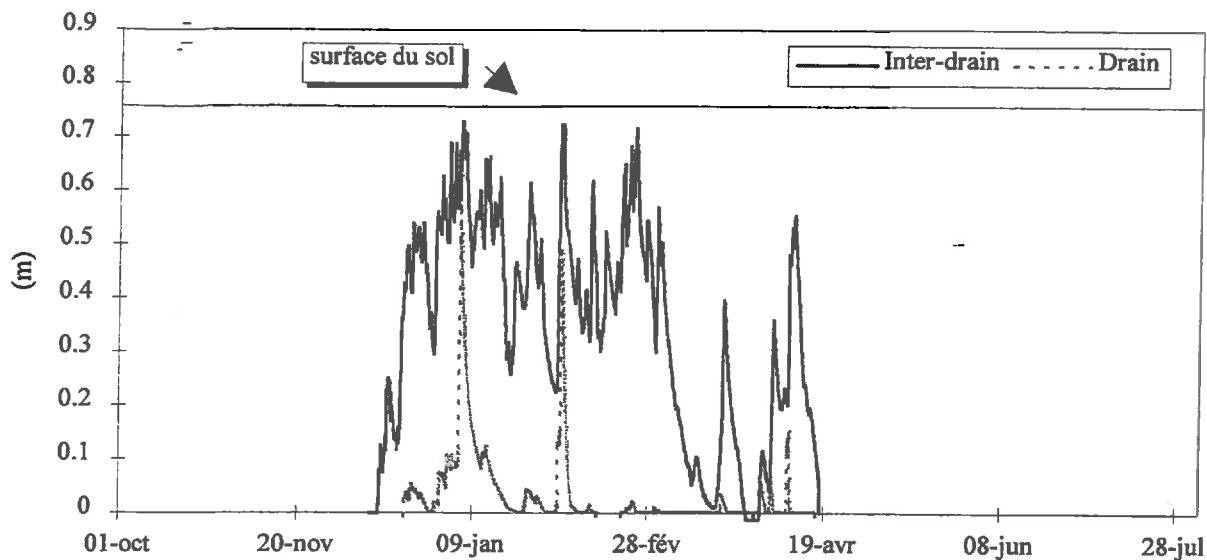


Figure 1.24 : Chronique piézométrique mesurée au drain et à l'inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

## 1.4 Discussion

En raison du caractère pluridisciplinaire de ce travail, le suivi expérimental réalisé a été varié. Il a fait appel à des méthodes fastidieuses comme la mesure de longueur et de largeur de feuilles ou la réalisation de cartographie racinaire ou encore le prélèvement de plantes entières. Des méthodes plus sophistiquées ont été utilisées comme la mesure de l'activité photosynthétique ou le suivi de la concentration en oxygène de la solution du sol. Il a fait également appel à des suivis expérimentaux de routine comme le suivi hydrométrique.

Les variables mesurées n'étaient pas toutes connues avec la même précision. Pour certaines, cette précision a été difficile à estimer. Les mesures de routine peuvent être considérées comme relativement précises. Leur validation est le plus souvent facile à mettre en oeuvre, c'est le cas pour les mesures climatiques ou hydrométriques. L'incertitude pour des mesures dont la précision est difficile à estimer est en partie levée grâce à la réalisation de répétitions. Ce travail a été réalisé chaque fois que cela a été possible (mesures de biomasses). Ces données ont été présentées avec un écart-type. Lorsque des répétitions sont difficilement réalisables, une compensation peut être trouvée en augmentant la fréquence des mesures, c'est le cas pour les mesures de concentrations en oxygène et pour les cartographies racinaires. Leur évolution dans le temps obéit à une logique qui permet de juger de la fiabilité d'une donnée. De plus la réalisation de profils de mesure peut être un moyen de juger de la qualité d'une donnée.

Le fonctionnement hydraulique du système expérimental en cuve a été satisfaisant vis à vis de l'établissement des contraintes en régime permanent. Les parois transparentes ont permis de suivre l'évolution du système racinaire et même d'observer des symptômes, sur les racines, indicateurs de présence d'un milieu anoxique. En revanche l'isolation thermique n'était pas idéale. Au cours du mois de juillet des températures supérieures à 25°C ont été mesurées dans le sol.

Pour l'expérimentation en plein champ, les conditions climatiques, en particulier les fortes précipitations au cours des périodes hivernale et printanière, nous placent dans de bonnes conditions pour étudier l'effet d'un engorgement en eau du sol sur la croissance de la culture.

Lors de la campagne 1993-94, les contraintes ont été imposées tardivement sur le cycle de la culture, indépendamment de notre volonté. Sur le terrain, les contraintes interviennent pendant la période hivernale au cours des stades précoces du développement de la plante (Figure 1.25).

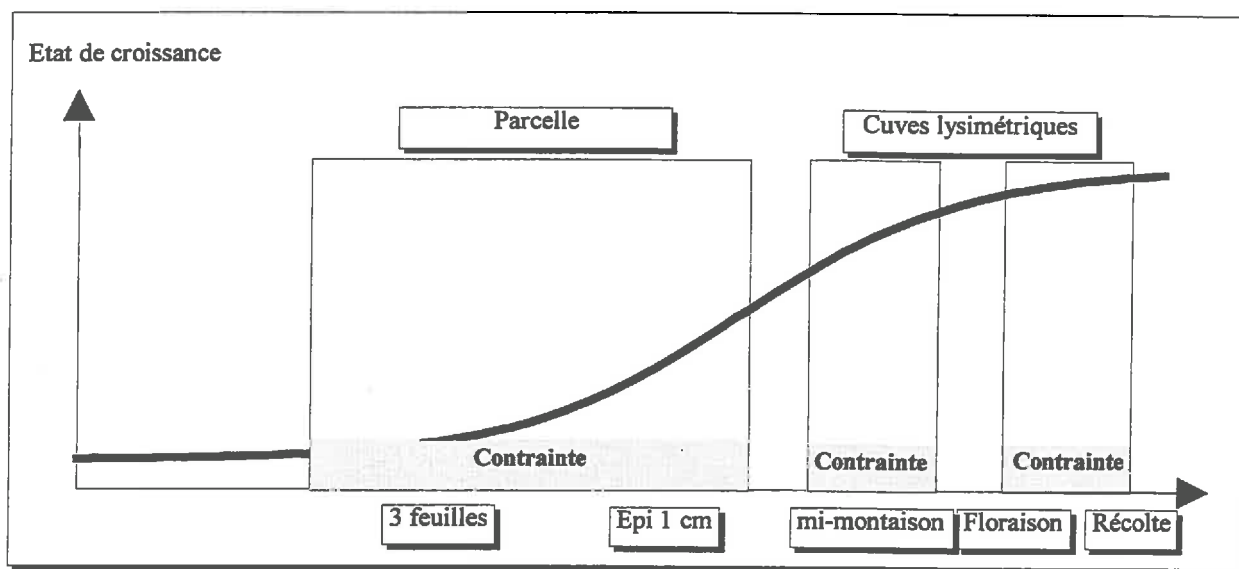


Figure 1.25 : Période d'occurrence des contraintes par rapport à l'échelle de développement et l'état de croissance de la culture

Deux précautions ont été tirées de cet état de fait.

1 - A partir du stade épiaison la croissance du système racinaire est ralentie. Elle s'arrête à la floraison. Lors de l'analyse des résultats expérimentaux, reposant sur la comparaison entre un traitement et le témoin, nous nous sommes attachés à identifier la phase de croissance. Cette vérification nous a permis de sélectionner les données recueillies en phase de croissance et d'éviter d'attribuer certains effets à l'excès d'eau alors que la plante était en phase de sénescence.

2 - Sur les cuves, lors de la mise en place des contraintes, le système racinaire étudié était le système racinaire adventif. Sur le terrain, avant le début du tallage, nous suivions la croissance du système racinaire séminal. Il a été montré que la sensibilité à une hypoxie de ce dernier est plus grande (Cannell et *al*, 1980 ; Trought et Drew, 1982 ; Thomson et *al*, 1989). Ainsi pour une intensité de contrainte identique la sensibilité de la plante risque d'être plus grande et sa réponse différente. La réduction de croissance est d'autant plus importante que les contraintes sont imposées à des stades précoces (M'Barek Ben Naceur, 1987).

Non seulement les deux systèmes expérimentaux n'étaient pas comparables mais en plus les observations réalisées et les mécanismes identifiés n'étaient pas directement extrapolables des cuves vers le terrain. En conséquence, nous avons adopté une démarche particulière lors de l'analyse des résultats (Chapitre II). Un certain nombre de mécanismes ont été identifiés sur les cuves, genèse d'un milieu asphyxiant et sélection d'un critère de caractérisation de l'intensité de la contrainte. Des formalisations ont été alors construites sur ces résultats et ont été ensuite appliquées aux résultats obtenus en plein champ. Cette application n'a pas été directe, elle a tenu compte du caractère de la contrainte (permanente/temporaire) et de la réponse de la plante (paramétrage).



## **2. LES MODELES UTILISES**

La modélisation d'une culture passe par la modélisation de la croissance et du développement de la plante, par la modélisation des transferts d'eau et d'azote dans le système sol-plante-atmosphère et de leurs interactions (effet d'un excès/déficit hydrique ou azotés sur la croissance des plantes).

La modélisation choisie est conceptuelle, modèle GOA. Elle repose sur la notion de "situation potentielle" et de "facteur limitant". Le modèle ne comporte pas de compartiment azote. Le seul facteur limitant pris en compte est le déficit hydrique. Nous présentons :

- le modèle de croissance et développement de la plante (modèle GOA) ;
- le modèle de bilan hydrique (modèle couplé BYM-SIDRA);
- les interactions entre le bilan hydrique et la croissance de la plante (déficit hydrique).

### **2.1 Modélisation de la croissance et du développement de la plante**

De type conceptuel, le modèle GOA fait le parallèle entre une situation potentielle et une situation réelle. Son principe de fonctionnement est le suivant. Deux scénarii sont simulés : le scénario potentiel n'introduisant aucun stress sur la croissance et le développement de la plante et le scénario réel intégrant les contraintes imposées par le modèle de bilan hydrique (déficit hydrique). Les contraintes liées à la nutrition, aux maladies et à l'excès d'eau ne sont pas prises en compte. La présentation de GOA est succincte car il a été utilisé en l'état. La seule adaptation concerne le pas de temps de simulation. Initialement le pas de temps était décadaire, nous l'avons adapté pour une simulation à un pas de temps journalier. Nous présentons ici, pour un pas de temps journalier, le fonctionnement du modèle pour une culture de blé d'hiver. Deux modules peuvent être identifiés, un module de développement et un module de croissance.

- ***Le module de développement***

- ***Echelle de développement***

L'estimation des dates d'apparition des stades de développement repose sur la variable "somme de degrés jours". Pondérée par l'effet de la vernalisation et de la photopériode et elle est définie par :

$$\sum_j^{\text{semis}} T(j) = \sum_j^{\text{semis}} \frac{T_{\min}(j) + T_{\max}(j)}{2} - T_b \quad (\text{éq. 2.1})$$

où  $\Sigma T$  est la somme de degrés jours ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{\min}$  et  $T_{\max}$  sont respectivement les températures minimale et maximale journalière ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_b$  ( $0^{\circ}\text{C}$ ) est la température de base ou zéro de végétation de la culture considérée ( $^{\circ}\text{C}$ ) et l'indice  $j$  indique un pas de temps journalier.

Les stades de développement du blé d'hiver, variété Soissons, ainsi que la somme de degrés jour utilisés dans le modèle sont résumés dans le Tableau 2.1.

Stade	Valeurs des paramètres sur l'échelle de la somme des températures ( $^{\circ}\text{C}$ )
semis	0
levée	150
épi à 1 cm	650
LAI maximal	950
floraison	1150
maturité	1800

Tableau 2.1 : Stade repère et paramétrage dans le modèle GOA, culture de blé tendre d'hiver

### ➤ Expansion foliaire

Les organes explicitement simulés par le modèle GOA sont les feuilles, au travers de la surface foliaire, et le poids de grains, en fin de cycle de la culture via un indice de récolte (Brisson et al, 1995). Sur le cycle de développement, nous distinguons quatre phases dans la dynamique de l'expansion foliaire pilotées par les stades suivants : levée, épi à 1 cm, stade 9 ( $\text{LAI}_{\max}$ ), floraison, récolte (Tableau 2.2).

Stade	Phase	Modèle de calcul
semis - levée	germination	$\text{LAI} = 0$
levée - épi à 1 cm	croissance lente	équation 2.3 et 2.5
épi à 1 cm - stade 9	croissance rapide	équation 2.4 et 2.5
stade 9 (s9) - floraison	constante	$\text{LAI} = \text{constante} = \text{LAI}_{\max}$
floraison - maturité	sénescence	équation 2.8

Tableau 2.2 : Modélisation de l'expansion foliaire potentielle pour une culture de blé d'hiver

La densité de population a un effet sur l'installation du couvert végétal (éq. 2.2). La prise en compte de cet effet est illustrée par la Figure 2.1.

$$ED = e^{\alpha [\ln(\text{densité}) - \beta]} \quad (\text{éq. 2.2})$$

où a et b valent respectivement -0.5 et 1.94, la densité est exprimée en nombre de plante par m<sup>2</sup> et ED est l'effet densité.

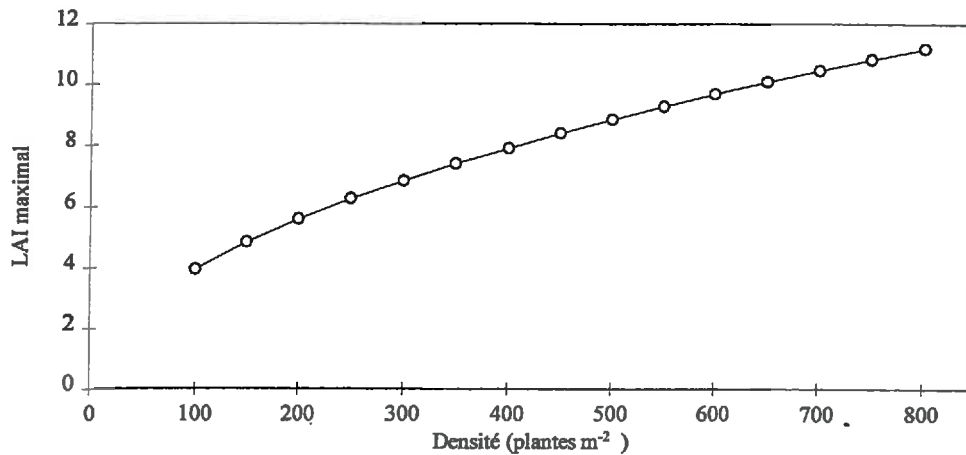


Figure 2.1 : Effet de la densité sur la valeur du LAI maximal

Le modèle calcul des unités pilotant le LAI (ULAI).

**Pour ULAI compris entre 1 et ULAI<sub>max</sub>, phase de croissance lente :**

$$ULAI(j) = 1 + (ULAI_{max} - 1) \frac{\sum_{\text{semis}}^j T(j) - \sum_{\text{levee}}^{\text{semis}} T(j)}{\sum_{\text{epi 1 cm}}^{\text{semis}} T(j) - \sum_{\text{levee}}^{\text{semis}} T(j)} \quad (\text{éq. 2.3})$$

**Pour ULAI compris entre ULAI<sub>max</sub> et 3, phase de croissance rapide :**

$$ULAI(j) = ULAI_{max} + (3 - ULAI_{max}) \frac{\sum_{\text{epi 1 cm}}^j T(j) - \sum_{\text{semis}}^{\text{epi 1 cm}} T(j)}{\sum_{LAI_{max}}^{\text{semis}} T(j) - \sum_{\text{epi 1 cm}}^{\text{semis}} T(j)} \quad (\text{éq. 2.4})$$

avec  $ULAI_{max} = 1.9$

$$\frac{\Delta LAI(j)}{\Delta t} = \frac{\Delta LAI(j)}{\Delta T(j)} * \frac{\Delta T(j)}{\Delta t} \quad (\text{éq. 2.5})$$

$$\frac{\Delta LAI}{T(j)} = \frac{DLAI_{max} * ED * \text{Densité}}{1 + e^{5.5(ULAI_{max} - ULAI)}} \quad (\text{éq. 2.6})$$

avec  $DLAI_{max} = 9 \cdot 10^{-4}$

$$T(j) = \frac{T_{\min}(j) + T_{\max}(j)}{2} - T_b \quad (\text{éq. 2.7})$$

**En phase de sénescence à partir de la floraison :**

$$\frac{\Delta \text{LAI}(j)}{\Delta t} = - \frac{\text{LAI}_{\max}}{\sum_{\text{maturité}}^{\text{semis}} T(j) - \sum_{\text{LAI}_{\max}}^{\text{semis}} T(j)} * \Delta T(j) \quad (\text{éq. 2.8})$$

L'accroissement du LAI, au cours des phases d'expansion lente (éq. 2.3 et 2.6) et rapide (éq. 2.4 et 2.6), en fonction de la somme de températures et de la densité de population est présenté, respectivement, sur la Figure 2.2 et la Figure 2.3.

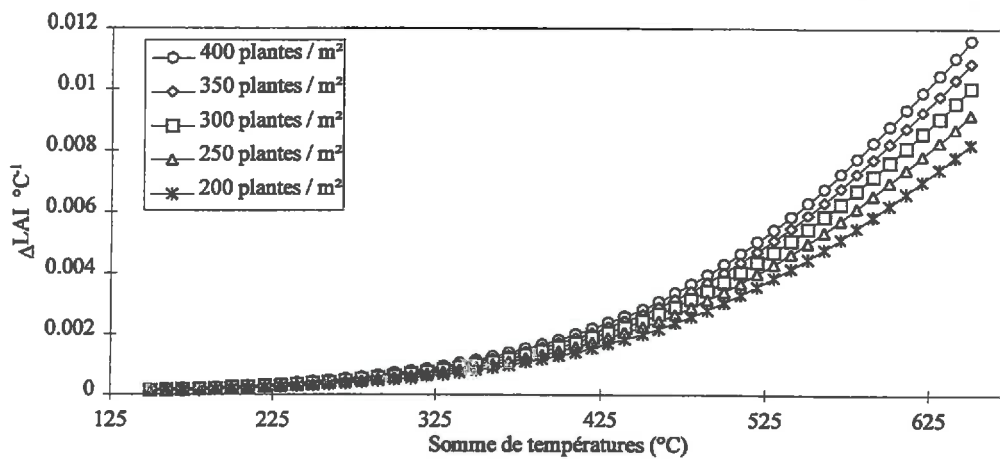


Figure 2.2 : *Accroissement du LAI en fonction de la somme de températures au cours de la phase de croissance lente pour différentes valeurs de densité*

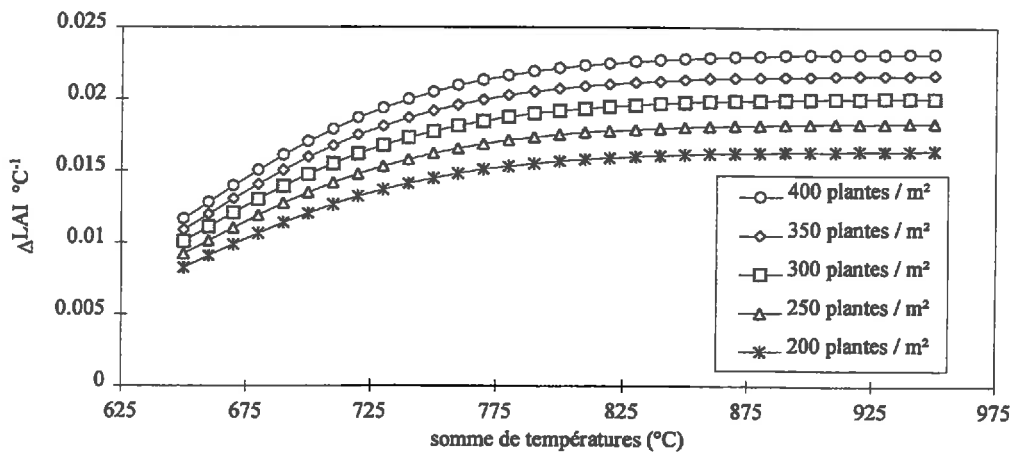


Figure 2.3 : *Accroissement du LAI en fonction de la somme de températures au cours de la phase de croissance rapide pour différentes valeurs de densité*

Ainsi, le module de développement dirige la dynamique de l'expansion foliaire (Figure 2.4).

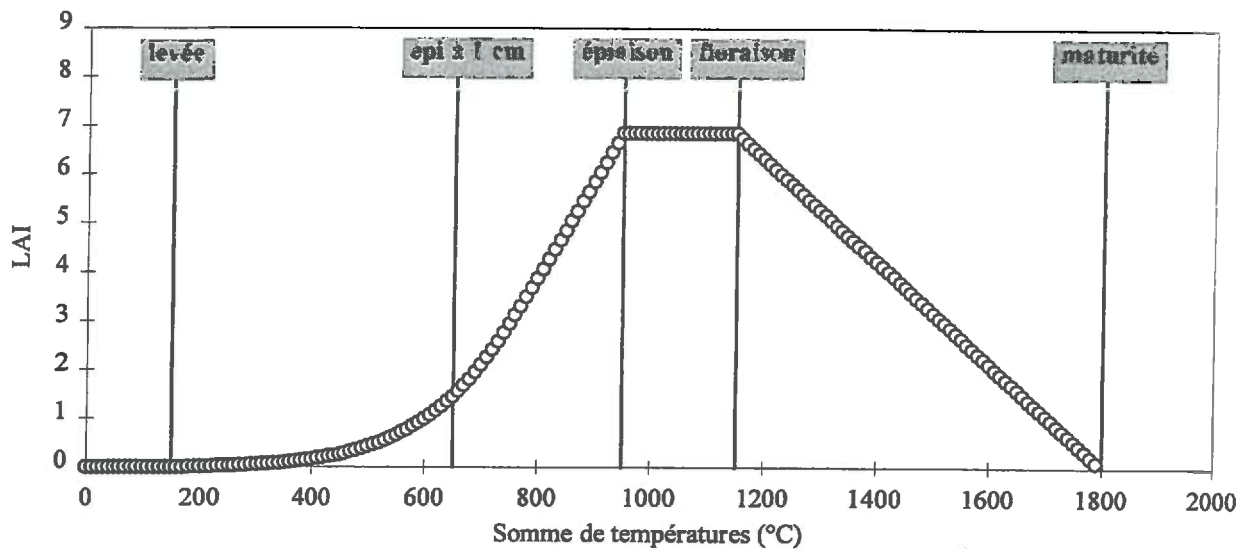


Figure 2.4 : Schématisation du modèle d'expansion foliaire (densité 300 plantes m<sup>-2</sup>)

### • Le module de croissance

L'accumulation de biomasse journalière dépend du rayonnement, de l'indice foliaire, de la température et d'un paramètre de transformation de l'énergie en biomasse aérienne ( $\epsilon_{bmax}$ ).

$$\Delta MS_a(j) = \epsilon_{max} * \epsilon_{bmax} * PAR(j) * \left(1 - e^{-k LAI(j)}\right) * \left(1 - d * \left(1 - \frac{T(j)}{T_{opt}}\right)\right) \quad (\text{éq. 2.9})$$

où  $MS_a$  est la biomasse aérienne (g m<sup>-2</sup>),  $\epsilon_{max}$  est la valeur maximale de l'efficacité d'interception du rayonnement,  $\epsilon_{bmax}$  est la valeur maximale de l'efficacité de transformation (g MJ<sup>-1</sup>), PAR est le rayonnement incident (MJ m<sup>-2</sup>), k est un coefficient d'interception journalier, d est un paramètre d'amplitude décrivant l'effet de la température sur l'accumulation de biomasse et  $T_{opt}$  est la température optimale (°C).

Les valeurs de  $\epsilon_{max}$ , rencontrées dans la littérature, varient entre 0.45 et 0.5. Une valeur moyenne de  $0.48 \pm 0.02$  est proposée par Varlet-Grancher et Bonhomme (1982). La valeur du coefficient k dépend de la géométrie du couvert végétal ou plus globalement du port de la plante. Les valeurs rencontrées dans la littérature présentent, pour une même culture, une grande variabilité (Tableau 2.3). Celle-ci s'explique en partie par la variété des géotypes, le stade de développement auquel elles ont pu être estimées et la méthode de mesure.

Thorne et al (1988) cité par Varlet-Grancher et al (1989)	0.45
Hodge et Kanemasum (1977) cités par Varlet-Grancher et al (1989)	0.66
Ritchie (1985)	0.85
Weir et al (1984)	0.44
Valeur adoptée dans les modèles ARWHEAT, CERES et GOA	0.4

Tableau 2.3 : Principales valeurs du coefficient  $k$  pour une culture de blé

Pour une culture de blé, l'effet de la température sur la photosynthèse a été démontré par Van Keulen et Seligman (1987, voir chapitre II, § 4). L'efficacité de transformation du rayonnement intercepté en biomasse aérienne présente un maximum,  $\varepsilon_{\text{bmax}}$ , pour une température de 12 °C, sa valeur est 4.2 g MJ<sup>-1</sup>. Le coefficient d'amplitude,  $d$ , vaut 0.91. Les valeurs de ces paramètres du modèle GOA, seront vérifiées à partir de nos résultats expérimentaux (Chapitre III, § 2).

A la fin du cycle de développement (maturité), la biomasse accumulée est convertie en poids de grains par l'intermédiaire d'un indice de récolte (HI, pour Harvest Index) dépendant de la culture. La valeur adoptée est de 0.45. Nous comparerons cette valeur avec celle obtenue sur nos résultats expérimentaux (Chapitre III, § 3).

Le fonctionnement du modèle décrit ci-dessus correspond au scénario potentiel. Aucun stress venant perturber la dynamique de croissance de la plante n'est introduit. Les variables de stress liées aux contraintes hydriques sont estimées par le module de bilan hydrique. Elles permettent de faire le lien avec le modèle de croissance et développement de la plante (§ 2.3).

## 2.2 Modélisation du bilan hydrique d'une parcelle drainée soumise à un excès d'eau temporaire

Notre objectif est de construire un modèle de bilan hydrique, adapté aux modèles de simulation de cultures, décrivant les transferts d'eau sur une parcelle drainée. Dans ce travail, nous sommes partis d'un modèle de bilan hydrique existant qui est couplé avec GOA : le modèle BYM (Brisson, 1989, Brisson et al, 1992). Ce modèle n'était pas applicable sur des sols marqués par des engorgements temporaires ou permanents. Dans le cadre de mon travail de DEA (Rebière, 1992), j'ai couplé BYM avec un modèle hydraulique (SIDRA) assurant la gestion de la saturation du sol pour simuler la situation d'excès d'eau sur une parcelle drainée. Nous

appellerons par la suite ce modèle « modèle couplé ». C'est ce modèle couplé que nous présentons ici. Nous présentons le système modélisé ainsi que les hypothèses et les conditions aux limites qui l'accompagnent. Nous décrivons l'intégration des équations de l'hydraulique en milieu saturé et l'établissement du bilan hydrique.

### • Description du système modélisé

Une parcelle agricole drainée peut-être matérialisée par un bloc de sol vertical dont la base correspond à la profondeur maximale d'enracinement. L'engorgement du sol est provoqué par la présence d'un écran peu perméable à l'infiltration de l'eau en profondeur. En période d'excès d'eau climatique, une nappe se forme au dessus de cet horizon. Nous avons repris la schématisation de Lesaffre (1988).

Latéralement, le domaine d'étude s'étend entre deux plans verticaux localisés respectivement à l'inter-drain et au drain (Figure 2.5). Ces limites constituent des plans de flux nuls. Vers le bas, le domaine est borné par l'horizon dit imperméable sur lequel repose les drains. La surface libre de la nappe perchée constitue l'interface entre la zone non saturée et la zone saturée.

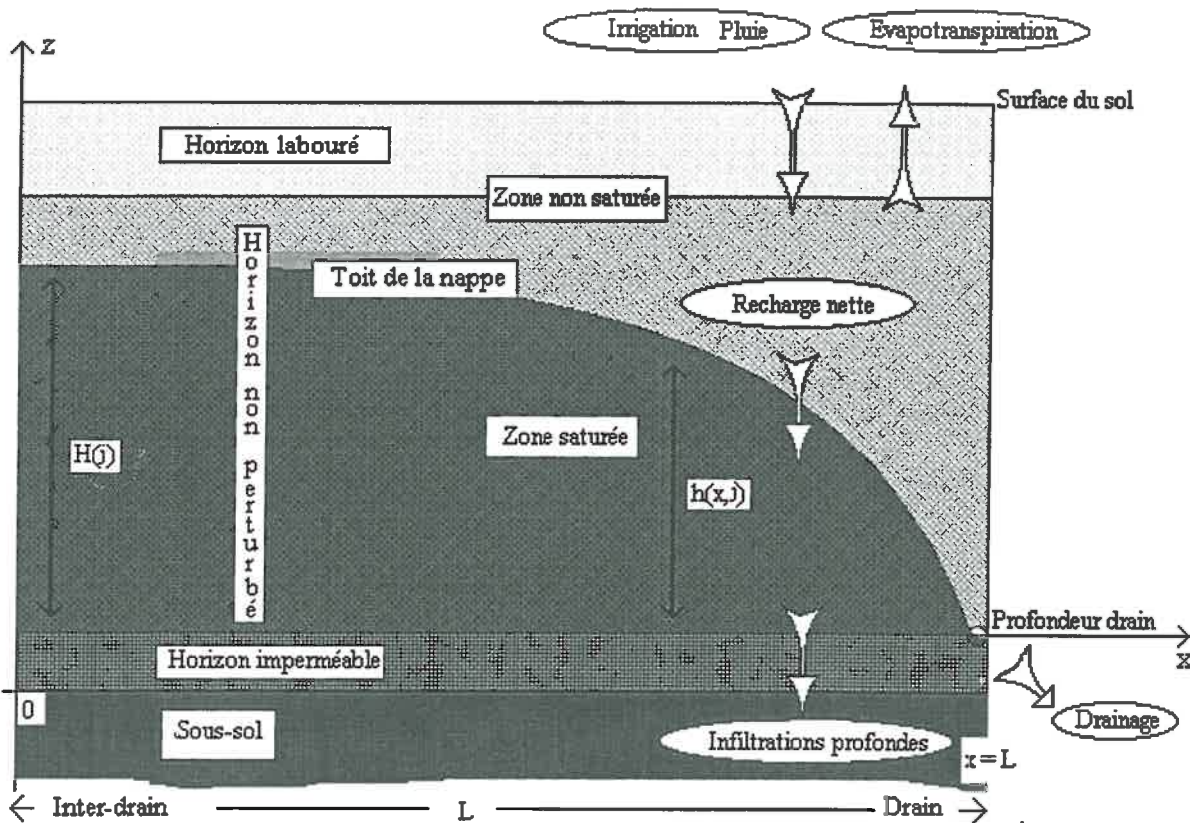


Figure 2.5 : Schématisation du système étudié et des transferts d'eau,  $L$ , demi écartement,  $H(t)$ , hauteur de nappe à l'inter-drain au temps  $t$  et  $h(x,t)$ , hauteur de nappe à l'abscisse  $x$  et au temps journalier.

• **Fonctionnement hydraulique du système drainant (modèle SIDRA)**

Le profil de sol est découpé en deux compartiments : un compartiment non perturbé surmonté par une couche labourée. Chacun d'eux est caractérisé par des propriétés hydrodynamiques élémentaires :

- une conductivité hydraulique horizontale et une porosité de drainage homogènes dans l'horizon labouré,  $K_{lab}$ ,  $\mu_{lab}$  ;
- une conductivité hydraulique horizontale équivalente et une porosité de drainage, au sommet de l'horizon non perturbé.

L'hétérogénéité verticale des paramètres dans l'horizon non perturbé est décrite par une fonction puissance de la cote. On suppose que la variation de la porosité de drainage est directement proportionnelle à la racine carrée de la variation de la conductivité hydraulique horizontale. Cette loi de variation traduit la propriété des sols dit de Erkin (Guyon, 1983). Une méthode pour estimer ces paramètres est présentée dans l'annexe 3.2.

$$\mu(h) = \left(\frac{h}{H}\right)^p \mu(H) \quad (\text{éq. 2.10})$$

$$\tilde{K}(h) = \left(\frac{h}{H}\right)^m \tilde{K}(H) \quad (\text{éq. 2.11})$$

où  $m$  et  $p$  sont les coefficients d'hétérogénéité verticale avec  $m = 2p$ ,  $\mu(h)$  est la porosité de drainage à la surface libre de la nappe [adimensionnel] et  $\tilde{K}(h)$  est la conductivité hydraulique horizontale équivalente [ $L T^{-1}$ ].

Les variables de sortie du système modélisé sont : la hauteur maximale de la nappe localisée à l'inter-drain,  $H(t)$  [L] et le débit surfacique des drains,  $Q(t)$  [ $L T^{-1}$ ]. Les hypothèses suivantes président à l'établissement des équations descriptives du système saturé (Lesaffre, 1988) :

- à l'inter-drain, les lignes de courant dans la nappe sont horizontales (hypothèses de Dupuit-Forchheimer),
- il n'y a ni puits, ni sources au sein de la nappe, l'eau et le sol sont incompressibles,
- les infiltrations profondes sont nulles,
- l'écoulement dans les drains reste à surface libre, l'entrée de l'eau dans les drains se fait sans pertes de charges, le drain est dit « idéal ».



Les équations développées pour la modélisation des écoulements souterrains reposent sur la proportionnalité entre le débit de filtration et la perte de charge correspondante établie par Darcy (1803-1858). Les applications des résultats de Darcy à l'étude de divers types d'écoulements souterrains sont surtout dues à l'un de ses contemporains, Dupuit (1804-1866). Les formules développées constituent de nos jours le point de départ des recherches sur les écoulements souterrains (Carlier, 1972). Les transferts d'eau en milieu saturé sont gouvernés par les principes de la mécanique des milieux continus : conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Ces principes se traduisent par deux équations descriptives :

- l'équation de continuité établie à partir de la constitution d'un bilan hydrique au sein de la nappe,
- l'équation dynamique résultant de l'intégration de la loi de Darcy.

L'équation dynamique, moyennant certaines hypothèses, notamment sur la forme de la nappe (Lesaffre, 1988), peut être partiellement résolue analytiquement. Le modèle SIDRA adopte cette démarche et propose un mode d'intégration numérique de l'équation différentielle du temps, non linéaire et du premier ordre. Avec les drains reposant sur l'imperméable, son expression est :

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{C\mu(H)} [Rn(j) - J(H)] \quad (\text{éq. 2.12})$$

$$C = 2 \int_0^1 (1 - X) W(X) dX \quad (\text{éq. 2.13})$$

$$J(H) = \tilde{K}(H) \frac{H^2}{L^2} \quad (\text{éq. 2.14})$$

où C est un facteur de forme de nappe [adimensionnel],  $X = x / L$  représente l'abscisse réduite,  $W(X) = h(x, j) / H(j)$  représente la hauteur de nappe réduite à l'abscisse réduite X,  $Rn(j)$  la recharge nette [L] et  $J(H)$  la fonction de Hooghoudt [ $LT^{-1}$ ].

Sur sols de Erkin, avec les drains reposant sur l'imperméable, on démontre que la forme de la nappe est constante et répond à l'équation :

$$W(X) = (1 - X^2)^{\frac{1}{2+m}} \quad (\text{éq. 2.15})$$

L'hypothèse de forme de nappe constante a pu être validée expérimentalement par le calcul du ratio entre la hauteur de nappe à une distance fixe du drain et la hauteur de nappe à l'inter-drain. Ce ratio est relativement constant tant que le toit de la nappe reste sous l'horizon labouré mais augmente dès que la nappe remonte dans l'horizon labouré (Zimmer, 1988).

Le débit surfacique des drains,  $Q(j)$ , peut être calculé, connaissant  $dH/dt$ , à partir de l'équation suivante :

$$Q(j) = Rn(j) - \mu(H) B \frac{dH}{dt} \quad (\text{éq. 2.16})$$

$$B = \int_0^1 W(X) dX \quad (\text{éq. 2.17})$$

où  $B$  est un facteur de forme de nappe.

Le système drainant, dont la limite supérieure est constituée par le toit de la nappe, est sollicité par une recharge pluviométrique nette. Cette recharge est le résultat de l'établissement d'un bilan hydrique sur la zone non saturée dont le principe est présenté ci-après.

• ***Bilan hydrique sur la zone non saturée, calcul de la recharge nette***

Nous avons repris une schématisation existante (Brisson et al, 1992) que nous avons extrapolée à l'interface non saturée/saturée. Le domaine d'étude est constitué par une colonne de sol comprise entre la surface du sol et une limite inférieure définie comme le minimum des deux grandeurs suivantes :

- la profondeur maximale atteinte par le système racinaire (limite biologique),
- la profondeur d'apparition d'un obstacle à l'enracinement (limite physique).

Les précipitations sont totalement transmises à la surface du sol, l'interception foliaire et le ruissellement de surface sont négligés. Les propriétés hydriques du sol sont exprimées par une humidité à la capacité au champ, notée " $\theta_{cc}$ ", une humidité au point de flétrissement permanent, notée " $\theta_{pf}$ ", une teneur en eau à la saturation, notée " $\theta_{sat}$ ". On suppose que ces propriétés sont homogènes sur l'ensemble du profil de sol prospecté par les racines. Le paramètre  $\theta_{cc}$  définit la capacité de rétention en eau du sol. Au delà de cette limite, l'eau, "eau gravitaire" est drainée vers le sous-sol ou vers la nappe si elle est présente. L'estimation de ces paramètres est présentée dans le chapitre III (§ 3). Nous y discuterons également la prise en compte d'une hétérogénéité verticale pour les paramètres hydrodynamiques,  $K(H)$  et  $\mu(H)$  par rapport à l'hypothèse faite sur l'homogénéité des humidités caractéristiques.

La zone non saturée est modélisée comme la superposition de 3 réservoirs.

- Formant l'interface avec la surface, il y a le mulch affecté par l'évaporation. Par définition sa teneur en eau correspond à l'humidité résiduelle, notée " $\theta_r$ ". Sa profondeur,  $x_m$ , varie en fonction des épisodes pluvieux et de la demande évaporative de l'atmosphère.
- Sous le mulch, se trouve le réservoir racinaire dont la taille augmente avec la croissance racinaire. La teneur en eau de ce réservoir résulte d'un bilan hydrique prenant en compte l'absorption racinaire. Cette dernière est supposée homogène sur l'ensemble de la profondeur du réservoir. Cette hypothèse autorise les remontées capillaires à l'intérieur du réservoir racinaire.
- Le troisième réservoir assure l'interface avec le sous-sol. La profondeur de ce réservoir diminue avec la croissance racinaire. Le calcul de sa teneur en eau est le résultat d'un bilan hydrique.

Le modèle de bilan hydrique sur la zone non saturée assure les deux fonctions principales attribuées à ce type de modèle :

- la fonction de régulation de l'évapotranspiration,
- la fonction de gestion de la réserve en eau du sol.

### ➤ Calcul de l'évaporation du sol

La demande climatique, caractérisée par l'évapotranspiration potentielle (ETP), est décomposée en une demande propre liée au sol (évaporation) et une demande spécifique liée à la plante (transpiration). La séparation repose sur la connaissance de l'indice foliaire, LAI. L'évaporation potentielle à la surface du sol ( $ES_0$ ) est estimée comme une fonction d'extinction liée au LAI.

$$ES_0(j) = ETP(j) e^{-\delta_{(es)} LAI(j)} \quad (\text{éq. 2.18})$$

où  $\delta_{(es)}$  est un facteur d'extinction journalier caractérisant la structure du couvert ( $\delta_{(es)} = k - 0.2$ ).

L'évaporation réelle (ES) est ensuite calculée à partir d'un modèle intégrateur des conditions atmosphériques et du type de sol. Ce modèle décrit deux phases de dessèchement à la suite d'un épisode pluvieux. Au cours de la première phase, le cumul de l'évaporation reste inférieur à un seuil  $\tau$ , l'évaporation réelle dépend seulement de la demande évaporative. Le seuil,  $\tau$ , dépend de la texture du sol (Ritchie, 1972). Au cours de la deuxième phase, l'évaporation réelle est réduite. L'intensité de cette réduction dépend de la teneur en eau de la couche superficielle du sol. Elle est décrite par la formule suivante (Brisson et Perrier, 1991) :

$$\sum ES = \sqrt{2a \sum ES_0 + a^2} - a \quad (\text{éq. 2.19})$$

où  $a$  est un paramètre calculé à partir des conditions atmosphériques (vitesse du vent, rayonnement net) et des propriétés du sol (texture).

➤ *Calcul de l'évapotranspiration et de la transpiration maximale de la culture*

L'évapotranspiration potentielle de la culture est fonction de la demande climatique et du LAI. Le rapport entre la demande climatique et l'évapotranspiration potentielle de la culture peut être assimilé à un coefficient cultural dont le calcul est effectué à chaque pas de temps :

$$\begin{aligned} \text{si } LAI(j) < 1.5 & \quad \frac{ETP_0(j)}{ETP(j)} = 1 \\ \text{si } LAI(j) > 5 & \quad \frac{ETP_0(j)}{ETP(j)} = k_c \\ \text{si } 1.5 < LAI(j) < 5 & \quad \frac{ETP_0(j)}{ETP(j)} = \frac{(k_c - 1) LAI(j) + 5 - 1.5 k_c}{3.5} \end{aligned} \quad (\text{éq. 2.20})$$

où  $ETP_0$  est l'évapotranspiration potentielle de la culture [L], 5 et 1.5 sont des valeurs de paramètres dépendant de la culture et  $k_c$  ( $k_c = 1.1$ ) est un coefficient cultural [adimensionnel].

La transpiration maximale de la plante dépend : de l'évapotranspiration potentielle de la culture, de l'évaporation potentielle du sol nu et de son état de sécheresse ( $ES/ES_0$ ) (Brisson et al, 1992).

$$TP_0(j) = (ETP_0(j) - ES_0(j)) \left[ b + (1 - b) \frac{ES(j)}{ES_0(j)} \right] \quad (\text{éq. 2.21})$$

où  $b = 1.1$  est un paramètre en référence aux travaux de Denmead (1970, cité par Brisson, 1989).

Dans des conditions humides,  $ES(j) = ES_0(j)$ , il vient :

$$TP_0(j) = ETP_0(j) - ES_0(j) \quad (\text{éq. 2.22})$$

➤ *Calcul du bilan hydrique (avec ou sans nappe)*

Le calcul du bilan hydrique repose sur la gestion de deux réservoirs. La base du réservoir 1 est constituée par la profondeur d'enracinement ou le toit de la nappe lorsque celle-ci est présente dans le système racinaire. La base du réservoir 2 correspond à la profondeur du sol ou du toit de la nappe lorsqu'elle est présente en dessous du système racinaire. En présence, ou non, de la

nappe dans le profil de sol nous distinguons trois situations selon les descriptions présentée sur la Figure 2.6.

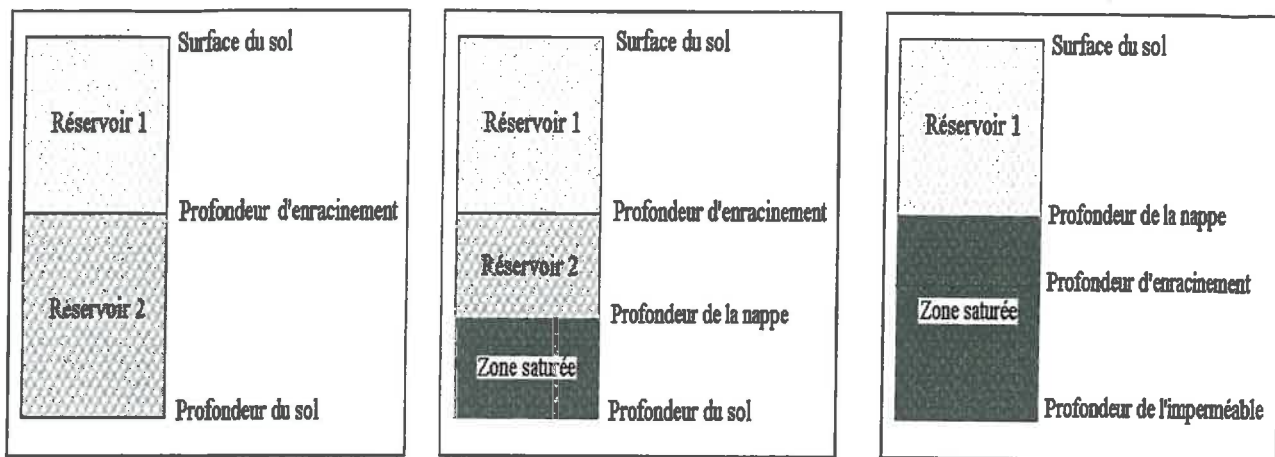


Figure 2.6a : Absence de nappe dans le profil de sol

Figure 2.6b : Nappe en dessous du système racinaire

Figure 2.6c : Nappe dans le système racinaire

Figure 2.6 : Partition du sol dans le modèle couplé

Chaque réservoir a une capacité bornée par l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement (Ritchie, 1981 et Brisson, 1989). Seule l'eau du réservoir 1 est disponible pour la plante. Le bilan hydrique sur ce réservoir permet d'évaluer la réserve en eau du sol disponible pour la plante selon la formulation :

$$W_t(j) = W_t(j-1) + P(j) - TP(j-1) - ES(j) + \int_{z_{rac}(j-1)}^{z_{rac}(j)} r_o(z) dz + \theta_{cc} (PZ(j) - PZ(j-1)) - D(j-1) \quad (\text{éq. 2.23})$$

où  $z_{rac}$  est la profondeur du système racinaire,  $P$  est la lame d'eau apportée par les précipitations [L],  $W_t$  est la réserve totale en eau sur le réservoir 1 [L],  $D$  est le drainage vers le réservoir sous-jacent [L],  $r_o(z)$  est le profil d'humidité sur le réservoir 2 et le terme  $\theta_{cc} (PZ(j) - PZ(j-1))$  est la contribution de la variation de la hauteur de nappe à l'augmentation ou la diminution de la réserve en eau sur le réservoir 1.

Lors d'une pluie, le mulch est alimenté en premier avant le système racinaire. L'eau en excès sur le réservoir 1,  $D$ , est drainée vers le réservoir 2 ou constitue la recharge nette transmise à la nappe si celle-ci est dans le système racinaire (Figure 2.6c). Un bilan hydrique est réalisé sur le réservoir 2. Si la teneur en eau devient supérieure à sa capacité de rétention, l'excédent,  $Drain2$ , pourra constituer soit un drainage vers le sous-sol soit la recharge nette transmise à la nappe si celle-ci est présente en dessous du système racinaire (Figure 2.6b).

La connaissance du profil d'humidité initiale est indispensable pour déterminer la contribution de la croissance du système racinaire à l'augmentation de la réserve en eau du réservoir 1. Ce profil d'humidité est ajusté à une loi polynomiale (Figure 2.7) :

$$r_o(z) = a\sqrt{z} + b \tag{éq. 2.24}$$

où  $r_o(z)$  est le profil d'humidité,  $a$  et  $b$  sont des paramètres issus de l'ajustement.

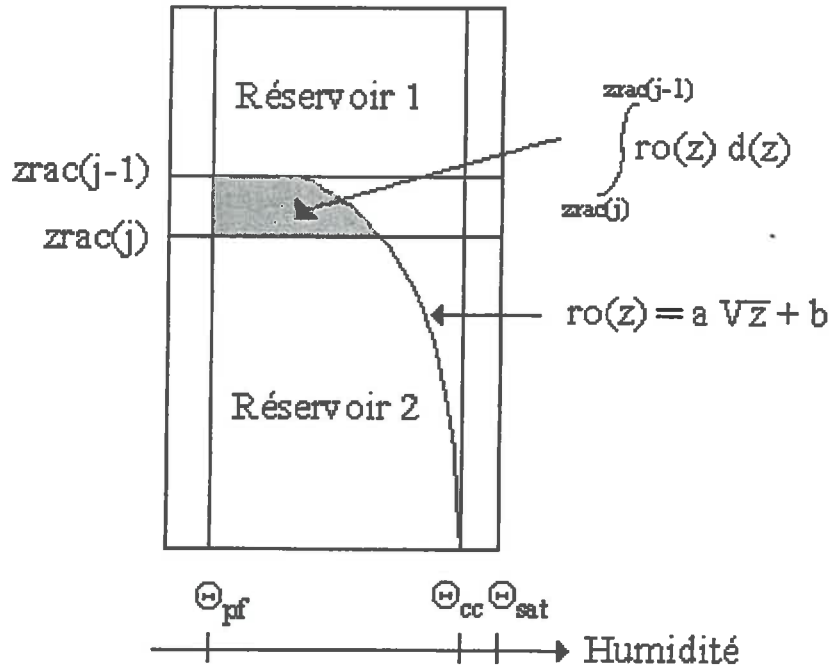


Figure 2.7 : Calcul du supplément de réserve sur le réservoir 1 dû à l'approfondissement du système racinaire

A chaque pas de temps, un nouveau profil d'humidité est calculé sur le réservoir 2. En absence de nappe dans le profil de sol, l'humidité à la base du profil est égale à l'humidité à la capacité au champ (Figure 2.6a) :

$$r_o(z_{max}) = \theta_{cc} \tag{éq. 2.25}$$

$$\bar{\theta}(j) = \frac{1}{z_{max} - z_{rac}(j)} \int_{z_{rac}(j)}^{z_{max}} r_o(z) dz + D(j) \tag{éq. 2.26}$$

où  $\bar{\theta}$  est la teneur en eau moyenne du réservoir 2 [adimensionnel],  $z_{max}$  est la profondeur limite d'enracinement [L],  $PZ$  la profondeur de la nappe [L] depuis la surface du sol.

Si la nappe est présente en dessous du système racinaire (Figure 2.6b) alors l'humidité à la base du profil, base constituée par le toit de la nappe, est égale à l'humidité à la saturation.

$$r_o(PZ) = \theta_{\text{sat}} \quad (\text{éq. 2.27})$$

$$\bar{\theta}(j) = \frac{1}{PZ(j) - z_{\text{rac}}(j)} \int_{z_{\text{rac}}(j)}^{PZ(j)} r_o(z) dz + D(j) \quad (\text{éq. 2.28})$$

Lorsque la nappe est présente dans le système racinaire (Figure 2.6c), le réservoir 2 n'existe plus, la variable D constitue alors la recharge nette transmise à la nappe.

### • Calcul de la consommation en eau de la plante

#### ➤ Disponibilité physique en eau du sol

Le bilan hydrique décrit précédemment nous a conduit au calcul de la réserve en eau totale sur le compartiment racinaire,  $W_t$ . La totalité de cette réserve n'est pas disponible pour la plante. En considérant qu'il n'y pas d'eau disponible dans le mulch, la réserve en eau est répartie sur la profondeur  $z_{\text{rac}} - x_m$  ( $x_m$  est la profondeur du mulch). Ceci revient à pondérer cette réserve par  $z_{\text{rac}}/(z_{\text{rac}} - x_m)$ . Dans le réservoir racinaire, la lame d'eau située en dessous l'humidité au point de flétrissement ainsi que la lame d'eau contenue dans le mulch (humidité résiduelle,  $\Theta_r$ ) ne sont pas disponibles. Le calcul de la réserve physique en eau du sol,  $W_p$ , devient :

$$W_p(j) = \left[ W_t(j) - (z_{\text{rac}}(j) - x_m(j)) * \Theta_{\text{pf}} - x_m(j) * \Theta_r \right] \frac{z_{\text{rac}}(j)}{z_{\text{rac}}(j) - x_m(j)} \quad (\text{éq. 2.29})$$

#### ➤ Disponibilité biologique en eau du sol

La transpiration réelle (TP) est calculée à partir de la transpiration maximale de la culture et de la disponibilité physique en eau dans le sol ( $W_p$ ). La disponibilité en eau pour la plante ( $W_b$ ) tient compte de la capacité de la plante à extraire cette eau et donc de l'architecture de son système racinaire. Le calcul de la disponibilité en eau pour la plante fait intervenir les deux composantes de la croissance racinaire, la profondeur et la densité. La modélisation de la croissance racinaire repose sur une schématisation existante. La schématisation utilisée intègre les effets de contrainte hydrique liée à un déficit en eau.

### Modélisation de la croissance en profondeur :

L'approfondissement du système racinaire est estimé en fonction de la somme des températures moyennes journalières de l'air. Dans des conditions favorables, l'extension du front racinaire est de l'ordre de 15 cm pour 100°C cumulés jusqu'au stade épiaison. Puis la vitesse de progression est fortement réduite jusqu'au stade floraison (7 cm pour 100°C). A ce stade, on assiste à l'arrêt de l'émission de nouvelles racines (Massé et *al*, 1988).

La croissance racinaire en profondeur, sans contrainte, est modélisée comme une fonction linéaire de la température. La profondeur racinaire est initiée à la profondeur de semis.

$$\Delta z_{\text{rac}}(j) = T(j) * v \quad (\text{éq. 2.30})$$

où  $v$  est la vitesse de croissance du système racinaire ( $L \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

### Modélisation de la densité racinaire et capacité d'absorption :

La disponibilité en eau pour la plante est proportionnelle à la réserve utile. Cette dernière est définie par :

$$RU = \Theta_{\text{cc}} - \Theta_{\text{pf}} \quad (\text{éq. 2.31})$$

L'exploitation de cette réserve dépend de la capacité d'extraction de l'eau par le système racinaire. Si la densité racinaire était, tout le long du cycle, optimale vis à vis de l'absorption d'eau, la quantité d'eau disponible serait strictement proportionnelle à la réserve utile ( $z_{\text{rac}}(j) * RU$ ). Or l'état de développement du système racinaire au jour  $j$ , caractérisé par  $z_{\text{rac}}(j)$ , ne permet pas à la plante d'absorber toute l'eau disponible sur le réservoir racinaire. La réserve en eau du compartiment racinaire est pondérée par une fonction de densité racinaire qui évolue avec la profondeur,  $F(z)$  (Brisson, 1989). Cette fonction représente la proportion de réserve exploitable par les racines à la profondeur  $z$  (Figure 2.8).

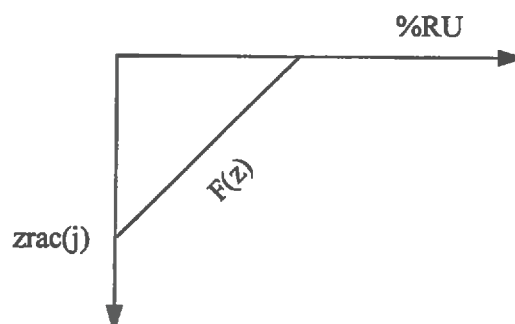


Figure 2.8 : Schématisation de la fonction d'extraction racinaire



La paramétrisation de cette fonction dépend de l'architecture du système racinaire. Elle est conditionnée par la profondeur de labour,  $z_{lab}$ , et la profondeur d'enracinement,  $z_{rac}$ .

Le système racinaire évolue à l'intérieur d'une courbe enveloppe correspondant au développement définitif du système racinaire. La courbe enveloppe représente le pourcentage maximal d'utilisation de la réserve utile. Jusqu'à la base de la couche labourée la fonction de densité racinaire est optimale vis à vis de l'absorption. En dessous de cette limite,  $F(z)$  décroît de façon linéaire avec la profondeur. Un paramètre,  $l_F$ , décrit la pente de cette fonction (Figure 2.9 et Figure 2.10). L'estimation de  $l_F$  est présentée dans le chapitre III (§ 3)

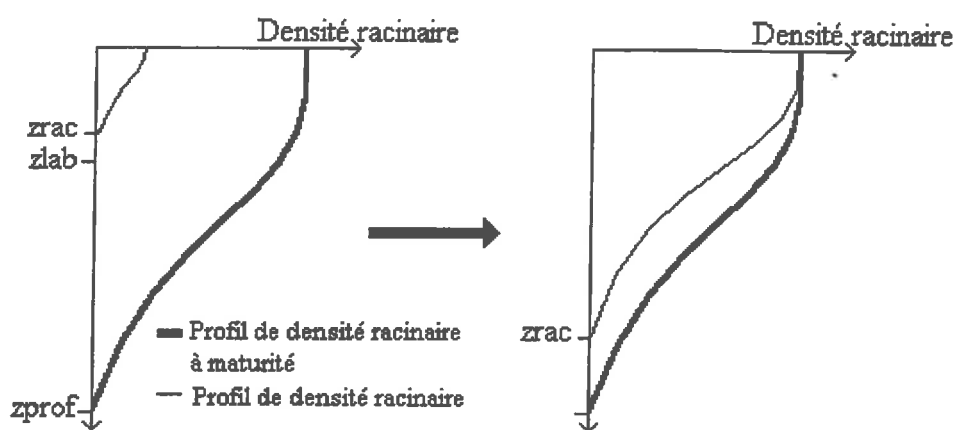


Figure 2.9 : Evolution schématique des profils de densité racinaire (adaptée d'après Brisson, 1989)

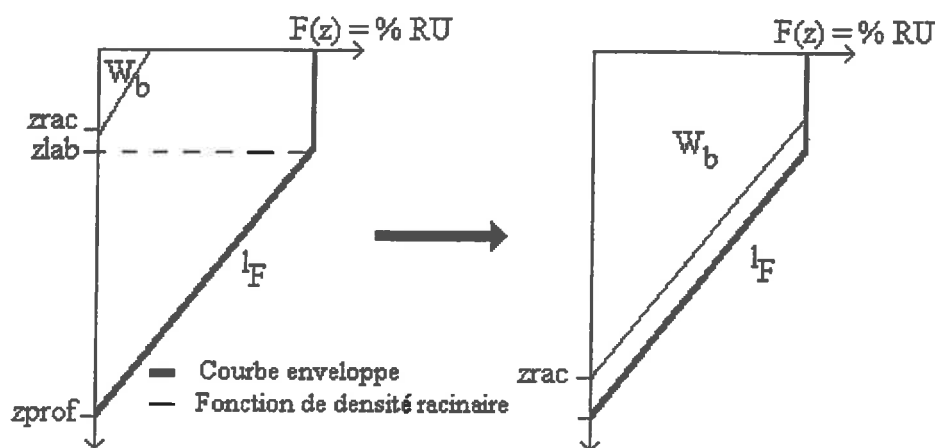


Figure 2.10 : Evolution de la fonction de densité racinaire (adaptée d'après Brisson, 1989).  $F(z)$  est la fonction de densité racinaire, RU est la réserve utile,  $W_b$  est la réserve biologique,  $z_{lab}$  est la profondeur de l'horizon labouré,  $z_{prof}$  est la profondeur maximale d'enracinement et  $l_F$  est la pente de la fonction  $F(z)$ .

Tout le système racinaire participe potentiellement à l'absorption minérale et hydrique.

$$W_b(j) = \int_0^{z_{rac}(j)} F(z) dz \quad (\text{éq. 2.32})$$

La réserve en eau réellement disponible pour la plante ( $W_{av}$ ) peut être considérée comme égale au minimum des deux valeurs des variables  $W_p$  et  $W_b$ . C'est le rapport  $W_{av} / W_b$  qui permet de calculer les facteurs de stress du déficit hydrique.

## 2.3 Couplage entre le modèle hydrique et le modèle de plante

La présence ou l'absence de stress hydrique est une information fournie par le module de bilan hydrique. Les facteurs de stress permettent d'estimer l'intensité de la contrainte. La réponse de la plante à cette contrainte est décrite par des fonctions stress.

### • Calcul des facteurs de stress

Dans l'état initial du modèle de bilan hydrique, seul le facteur de déficit hydrique est estimé. Si on note  $S$  le facteur de stress, on a :

$$S(j) = 1 \quad \text{si} \quad \frac{W_{av}(j)}{W_b(j)} > s(j) \quad (\text{éq. 2.33})$$

$$S(j) = \frac{1}{s(j)} \times \frac{W_{av}(j)}{W_b(j)} \quad \text{si} \quad \frac{W_{av}(j)}{W_b(j)} \leq s(j) \quad (\text{éq. 2.34})$$

où  $s$  est un seuil dont la valeur dépend de la fonction physiologique et de la demande évaporative (Hallaire, 1964 cité par Brisson et *al*, 1992). Slabbers (1980, cité par Brisson, 1989) exprime ce seuil par la formule simplifiée suivante :

$$s(j) = 0.94 + \left( 0.26 + \frac{\Psi_{cr}}{TP_0} \right) \quad (\text{éq. 2.35})$$

où  $\Psi_{cr}$  est une constante liée à l'espèce (- 15 bars pour le blé), il représente le potentiel critique de fermeture stomatique.

La transpiration réelle est calculée à partir du facteur de stress  $S(j)$  :

$$TP(j) = TP_0(j) * S(j) \quad (\text{éq. 2.36})$$

Les autres facteurs de stress affectant l'expansion foliaire ( $S_t$ ) et la croissance racinaire ( $S_r$ ) dérivent du seuil,  $s(j)$ , (Brisson et al, 1992).

$$S_t(j) = S(j) * 1.5 \text{ et } S_r(j) = S(j) * 0.5 \quad (\text{éq. 2.37})$$

Les facteurs de stress prennent pour valeur minimale 0.1.

• **Description des fonctions stress**

Le stress hydrique affecte les principales fonctions impliquées dans le processus de productivité de la culture, durée du cycle, dynamique de l'expansion foliaire, production de matière sèche et accumulation dans les grains (Brisson et al, 1995).

**Réduction de l'expansion foliaire :**

Le déficit hydrique affecte l'expansion foliaire avant le stade "LAI maximal". Il affecte l'accroissement potentiel du LAI.

Si  $S_t > 0.4$ , alors :

$$\Delta LAI(j) = \Delta LAI_0(j) * \sqrt{1 - \left(\frac{1 - S_t(j)}{0.6}\right)} \quad (\text{éq. 2.38})$$

Si  $S_t < 0.4$ , alors :

$$\Delta LAI(j) = 0 \quad (\text{éq. 2.39})$$

où  $\Delta LAI_0$  est l'accroissement potentiel du LAI et  $\Delta LAI$  son accroissement réel.

**Accélération de la sénescence des feuilles et réduction du cycle :**

L'accélération de la sénescence foliaire intervient après le stade floraison pendant la phase de sénescence lente. La sénescence est d'autant plus rapide que le stress hydrique est important.

$$\Delta LAI(j) = -\frac{A}{S_t(j)} \left( \sum T(j) - \sum T(j-1) \right) \quad (\text{éq. 2.40})$$

où A est la vitesse de sénescence de l'indice foliaire, elle vaut  $\frac{LAI_{max}}{\sum_{\text{maturité}}^{semis} T(j) - \sum_{LAI_{max}}^{semis} T(j)}$  (éq. 2.8).

S'il a lieu après le stade "LAI maximal", le déficit hydrique affecte la durée du cycle ce qui joue aussi sur la sénescence.

$$\sum_{\text{maturité}}^{\text{semis}} T(j) = \sum_{\text{maturité}}^{\text{semis}} T(j) - \alpha (1 - S_t(j)) \quad (\text{éq. 2.41})$$

où  $\alpha$  est un paramètre décrivant l'action du stress sur la durée du cycle.

### **Réduction de l'accumulation de matière sèche :**

Le stress hydrique affecte la quantité de matière sèche accumulée depuis la levée.

$$\sum_j^{\text{levé e}} \text{MSa}(j) = \sum_j^{\text{levé e}} \text{MSa}_0(j) e^{(-0.2 * \delta(j))} \quad (\text{éq. 2.42})$$

où  $\delta$  est la somme des valeurs du facteur de stress,  $S(j)$ , depuis la levée.

$$\delta(j) = \delta(j-1) + (1 - S(j)) \quad (\text{éq. 2.43})$$

Si  $\Delta \text{LAI} = 0$  alors :

$$\Delta \text{MSa}(j) = 0 \quad (\text{éq. 2.44})$$

### **Réduction de la progression et de l'extraction racinaire :**

Le déficit hydrique affecte la vitesse de progression du système racinaire en profondeur.

$$\Delta z_{\text{rac}}(j) = \sum T(j) * v * S_r(j) \quad (\text{éq. 2.45})$$

L'extraction racinaire est affectée par le déficit hydrique, le phénomène se limite à 50% de réduction de la réserve utile maximale,  $\text{RU}_{\text{max}}$ .

$$\text{RU}(j) = \text{RU}(j-1) - \lambda * (1 - S_r(j)) \quad (\text{éq. 2.46})$$

où  $\lambda$  est un paramètre décrivant l'action du stress sur l'extraction racinaire.

Le lien avec le modèle de bilan hydrique est réalisé par l'intermédiaire des facteurs stress issus du bilan hydrique. Le stress lié au déficit hydrique agit sur les principales fonctions de croissance et développement de la plante.

### 3. CONCLUSION

Les moyens mis en oeuvre pour répondre aux objectifs fixés dans le cadre de ce travail reposent sur les deux piliers que sont l'expérimentation et la modélisation. Les expérimentations menées en cuves lysimétriques et en plein champ doivent permettre d'identifier des mécanismes tels que la genèse d'un milieu asphyxiant, de caractériser la contrainte d'engorgement et d'acquérir des références sur la réponse de la plante. La modélisation est complémentaire dans le sens où elle est un outil permettant de tester la fiabilité des formalisations construites et de préciser les conditions d'extrapolation de ces dernières. Elle repose sur l'utilisation de modèles existants.

Le caractère conceptuel de la modélisation nécessite de nombreux paramètres dont il est difficile de saisir l'intérêt et le poids dans la présentation faite précédemment. Que cela soit par expérimentation, par calcul, par calage ou en s'appuyant sur la bibliographie, ces paramètres devront être estimés ou mesurés.

Une étude de sensibilité partielle a été menée sur chacun des modèles de bilan hydrique pris indépendamment (Zimmer et Lorre, 1993 ; Brisson et *al*, 1992). Une première étude de sensibilité du modèle de plante a été également réalisée (L'Héritier, 1992). Nous présentons des méthodes d'acquisition pour certains paramètres du modèle et rappelons les principaux résultats obtenus sur les études de sensibilité déjà réalisées (chapitre III, § 3.3).

L'intégration de la contrainte d'engorgement en eau du sol, dans le modèle de croissance et développement de la plante, a nécessité l'extension du fonctionnement du modèle de bilan hydrique vers la simulation des transferts d'eau en milieu saturé. Sur une parcelle drainée, le caractère temporaire de la contrainte est à considérer. En effet, les écoulements enregistrés à la sortie du réseau de drainage ne sont correctement décrits par les formules de l'hydraulique souterraine que lorsque la saturation est atteinte sur l'ensemble du profil de sol jusqu'à l'imperméable (Zimmer, 1988). L'engorgement en eau du sol étant temporaire le module du bilan hydrique décrivant les transferts en milieu saturé est mis en oeuvre temporairement lors des périodes de fonctionnement du réseau de drainage. En dehors de ces périodes c'est le modèle décrivant les transferts d'eau en milieu non saturé qui établit le bilan hydrique.

La mise en oeuvre du modèle couplé repose sur la détermination des périodes de fonctionnement du réseau de drainage. L'application du modèle à la simulation des transferts d'eau sur une

parcelle drainée nécessite donc une étude approfondie de son fonctionnement hydrologique et des mécanismes de formation et de disparition de la nappe perchée temporaire. Cette étude menée sur la parcelle 1 du site expérimental d'Arrou est présentée dans le chapitre III (§ 3.1).

Un organigramme du modèle de croissance et développement de la plante est présenté sur la figure 3.11. Sur cette figure sont schématisés les scénarii potentiels et sous contraintes. Seule la contrainte due à un déficit hydrique est prise en compte. La variable de sortie du modèle susceptible de fournir une indication sur la contrainte d'engorgement en eau du sol est la hauteur de nappe. Ce constat est d'importance puisqu'il oriente l'approche expérimentale. En effet, la définition du facteur de stress et l'étude de la sensibilité de la plante devront reposer sur cette variable.

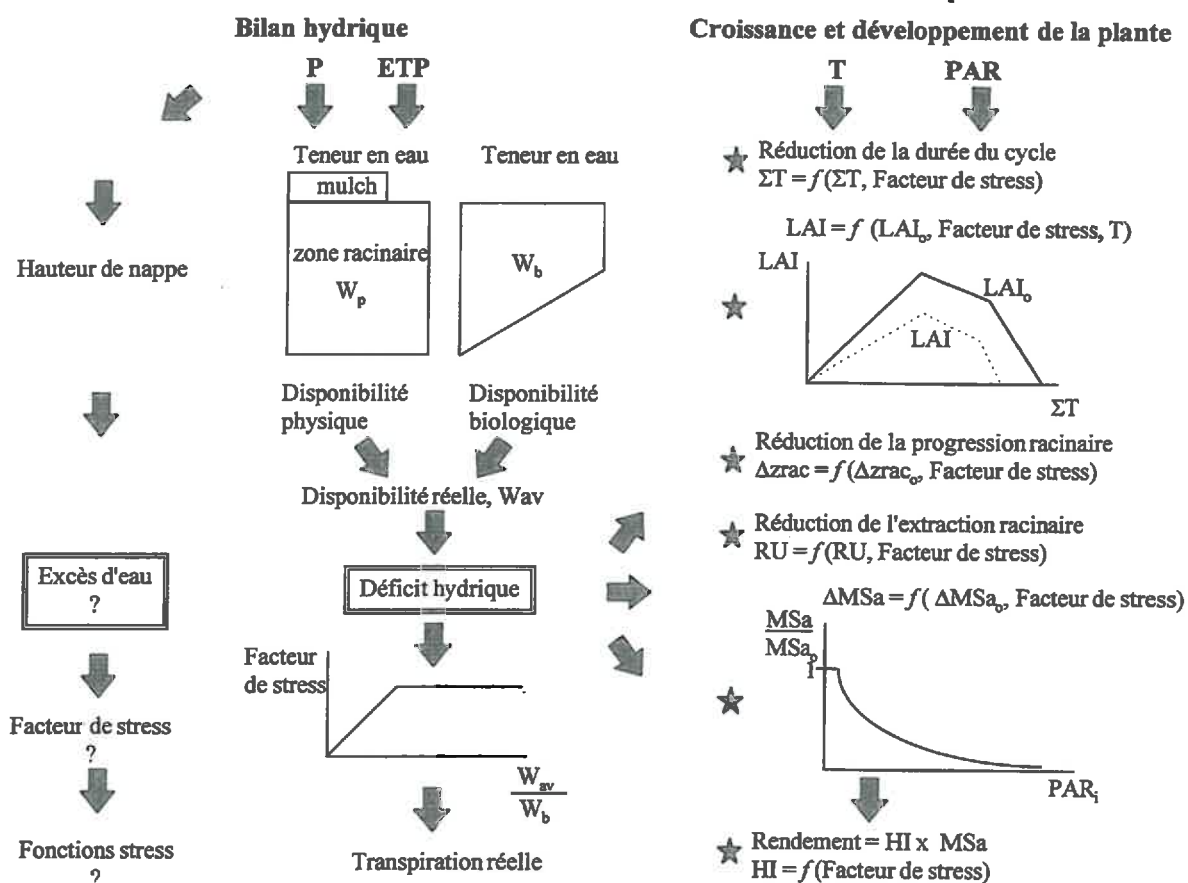


Figure 3.11 : Organigramme du modèle de croissance et développement de la plante

Si aucun stress lié à un excès d'eau n'est décrit, l'approche conceptuelle utilisée dans la construction du modèle de croissance et développement de la plante offre des possibilités d'introduction de cette contrainte. Il s'avère dans un premier temps indispensable d'identifier la contrainte d'engorgement en eau du sol et d'acquérir des références sur la réponse de la plante à cette contrainte. La confrontation entre modélisation et expérimentation au travers des variables descriptives du système permet de proposer la démarche suivie dans notre travail (Figure 3.1).

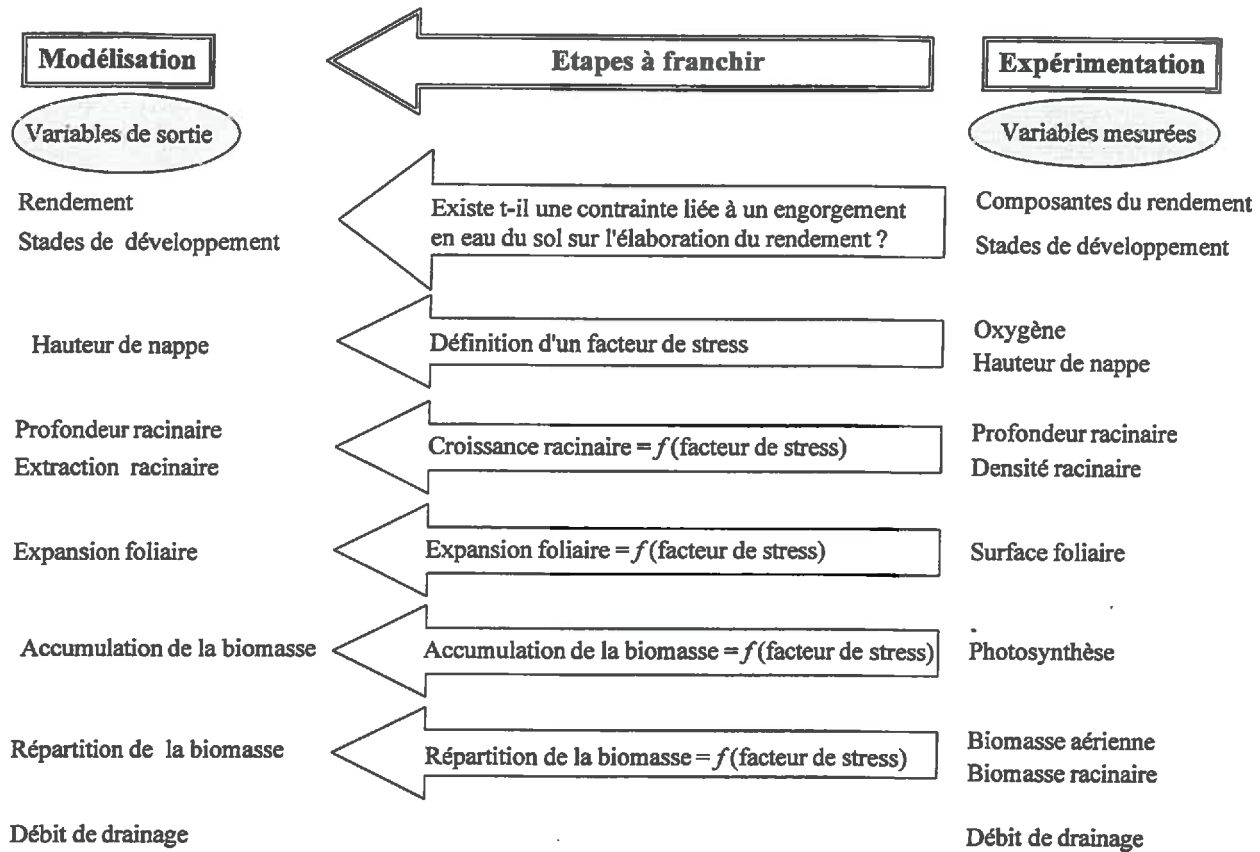


Figure 3.1 : Étapes à franchir pour l'intégration de la contrainte d'engorgement en eau du sol dans le modèle de croissance et développement de la plante GOA

Sur la base de l'analyse des résultats expérimentaux, la première étape consiste à identifier un indicateur d'excès d'eau que nous appellerons : variable de stress. A partir de l'étude de la sensibilité de la plante, la deuxième étape est la quantification des effets d'un engorgement en eau du sol sur sa croissance et son développement et la construction de formalisations décrivant la réponse de la plante que nous appellerons : fonctions de stress (figure 3.2).

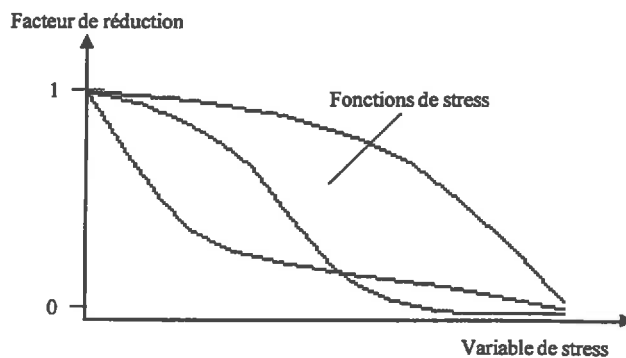


figure 3.2 : Schématisation de l'effet d'un excès sur la réduction des fonctions de croissance

Ces fonctions stress construites et paramétrées sur nos résultats expérimentaux seront introduites dans le modèle de culture GOA. Nous appellerons BLEX le nouveau modèle.

# CHAPITRE II

## EFFET D'UN EXCES D'EAU SUR LA CULTURE DE BLE

- 1 - Excès d'eau et élaboration du rendement
- 2 - Genèse d'un milieu asphyxiant
- 3 - Excès d'eau et croissance racinaire
- 4 - Excès d'eau et accumulation de biomasse



<i>INTRODUCTION</i> .....	63
<b>1. EXCES D'EAU ET ELABORATION DU RENDEMENT</b> .....	<b>64</b>
1.1 Taux de levée .....	65
1.2 Peuplement à la récolte .....	66
1.3 Nombre de grains par épi, poids de 1000 grains et rendement .....	69
1.4 Discussion .....	70
<b>2. GENESE D'UN MILIEU ASPHYXIANT POUR LA PLANTE</b> .....	<b>72</b>
2.1 Relation entre hauteur de nappe, pression en eau du sol et concentration en oxygène.....	73
2.2 Sensibilité de la plante, concentration en oxygène de la solution du sol et variable de stress	77
2.3 Définition de la variable de stress à l'excès d'eau .....	81
2.4 Conclusion .....	82
<b>3. EXCES D'EAU ET CROISSANCE RACINAIRE</b> .....	<b>83</b>
3.1 Croissance racinaire et contrainte d'engorgement .....	84
3.2 Influence de la nappe sur la croissance racinaire : dispositif expérimental en cuves .....	85
<i>Résultats expérimentaux</i> .....	85
<i>Formalisation des effets d'un engorgement sur la croissance racinaire</i> .....	92
<i>Conclusion</i> .....	95
3.3 Comparaison de la situation au drain et à l'inter-drain, expérimentation en plein champ.....	95
<i>Résultats expérimentaux</i> .....	95
<i>Formalisation des effets d'un engorgement sur la croissance racinaire</i> .....	98
<i>Discussion</i> .....	102
3.4 Conclusion .....	103
<b>4. EXCES D'EAU ET ACCUMULATION DE BIOMASSE</b> .....	<b>105</b>
4.1 Effet d'un excès sur l'accumulation de biomasse .....	106
<i>Résultats expérimentaux et interprétation</i> .....	107
<i>Formalisation</i> .....	114
4.2 Excès d'eau et accroissement de la surface foliaire .....	115
<i>Résultats expérimentaux en cuves : contrainte permanente</i> .....	115
<i>Résultats expérimentaux de plein champ : contrainte temporaire</i> .....	117
4.3 Répartition de la biomasse et contrainte d'excès d'eau .....	120
<i>Résultats expérimentaux et interprétation</i> .....	120
<i>Formalisation</i> .....	124
<b>5. DISCUSSION</b> .....	<b>128</b>
5.1 Bilan des résultats .....	128
5.2 Validité de la démarche.....	130

## INTRODUCTION

Les références sur les mécanismes d'élaboration du rendement d'une culture de blé d'hiver dans des conditions d'engorgement en eau du sol sont nombreuses (Luxmoore et *al*, 1972 ; Duthion et Mingeau, 1976 ; Cannell et Belford, 1977 ; Cannell et *al*, 1980 ; Belford, 1981 ; Trought et Drew, 1982 ; Cannell et *al*, 1985 ; Meynard et Limaux 1987 ; Pons, 1988a ; Massé et Capy, 1988). Les résultats présentés sont surtout descriptifs et relèvent d'une approche de type diagnostique. Elle présente l'avantage d'être applicable en terme de diagnostic agronomique mais ne décrit pas les mécanismes intervenant dans l'élaboration du rendement. Ainsi, l'excès d'eau est rarement pris en compte dans les programmes d'évaluation des potentialités agricoles. Il n'est pas possible, aujourd'hui, de disposer de suffisamment de modèles d'élaboration du rendement pour mettre au point par simulation numérique des itinéraires techniques comme on a pu le faire en sol sain (Meynard, 1988).

L'un des objectifs des expérimentations mises en place est de mettre en évidence les mécanismes d'action d'un excès d'eau sur la croissance de la plante et d'identifier les fonctions physiologiques affectées par cette contrainte. En introduction de cette étude, nous analysons les effets d'un engorgement en eau du sol sur l'élaboration du rendement en considérant chacune des composantes du rendement (§ 1).

Si l'eau seule n'est pas préjudiciable au fonctionnement de la plante, un engorgement du sol s'accompagne presque toujours d'un déficit en oxygène (Williamson et Kriz, 1970). L'étude de la genèse d'un milieu asphyxiant lié à un engorgement et de la sensibilité de la plante est menée à partir d'un suivi expérimental spécifique. L'objectif de ce travail est d'identifier et de quantifier la contrainte d'engorgement. Il doit nous conduire à la définition d'une variable de stress (§ 2).

Nous avons quantifié et formalisé l'effet d'un excès d'eau sur la croissance racinaire à partir des résultats expérimentaux obtenus en cuves lysimétriques. Puis nous avons étudié les conditions d'extrapolation de ces formalisations aux résultats expérimentaux obtenus en plein champ (§ 3). Nous avons ensuite quantifié l'effet d'un excès d'eau sur la croissance de la plante. Les variables mesurées étaient l'activité photosynthétique, l'accumulation de matière sèche et sa répartition en fonction de la contrainte. L'analyse des résultats expérimentaux a été orientée par la construction et le calage d'une fonction de stress intervenant sur l'accumulation nette de biomasse journalière. Nous avons étudié enfin l'effet d'un excès d'eau sur la répartition de la biomasse entre parties aériennes et racinaires (§ 4).

## 1. EXCES D'EAU ET ELABORATION DU RENDEMENT

Les chutes de rendement sont fréquentes pour les cultures qui ne sont pas adaptées à une croissance en conditions d'engorgement en eau du sol (Williamson et Kriz, 1970). Pour une culture de blé tendre, sur des sols soumis à des excès d'eau temporaires, les observations montrent qu'il existe une corrélation significative entre le niveau moyen de la nappe pendant la saison hivernale et le rendement final. Pour un ensemble de 3 années et de 33 parcelles, dans les marais de l'ouest (France), Pons (1988a) trouve une relation linéaire entre le niveau piézométrique moyen hivernal et le rendement.

De nombreux auteurs (Kanvar et al, 1988, Cavazza et Rossi Pisa, 1988, Carter et Camp, 1994), utilisant la notion de SEW (Sum of Exceedances of critical Water table depth, pour somme des profondeurs de nappe supérieures à un seuil critique) définie par Sieben (1964), expliquent les variations des rendements en fonction de la variation du niveau piézométrique hivernal. Les démarches sont plus ou moins élaborées. Kanvar et al (1988) ne considèrent que les hauteurs de nappe supérieures à un seuil correspondant à des conditions de drainage défavorable.

$$SEW_s = \sum_{i=1}^n (s - PZ(i)) \quad (\text{éq. 1.1})$$

où PZ est la profondeur de la nappe en dessous de la surface du sol (cm), n est le nombre de jours du cycle végétatif et s est un seuil de profondeur de nappe (cm).

Les relations entre cet indice et les variations de rendement sont supposées linéaires :

$$\text{Rendement} = A - B SEW_s \quad (\text{éq. 1.2})$$

où A et B sont des paramètres calés à partir de données expérimentales.

Cette conceptualisation n'intègre pas la sensibilité de la plante selon la période où intervient l'excès d'eau par rapport à son stade de développement. Une seconde approche, introduite par Hiler (1969) repose sur le concept de SDI (Stress Day Index pour indice de stress journalier). Il permet de quantifier l'effet additif des stress imposés à la plante durant son cycle de croissance (Evans et al, 1990). Il est déterminé à partir d'un stress journalier (SD, Stress Day), qui mesure l'intensité du stress auquel la plante est soumise intégrant sa durée et son intensité, et de la sensibilité de la plante (CS, Crop Sensibility). Les valeurs du paramètre CS dépendent du type de plante et de son stade de développement.

$$SDI = \sum_{i=1}^n SD_i CS_i \quad (\text{éq. 1.3})$$

Cet indice donne l'intensité et la durée du stress que la culture peut subir sans réduction de rendement. Des relations linéaires sont mises en évidence entre le rendement et la valeur de cet indice.

L'expression du potentiel de rendement de la culture est la résultante de l'action des conditions du milieu sur sa croissance tout au long de son cycle de développement. Il existe un synchronisme entre la réalisation des stades de développement, l'accumulation de biomasse et la mise en place des composantes de rendements (Massé et Capy, 1988). Le rendement en grains, pour une culture de blé, peut être calculé en considérant chacune des composantes de rendement.

$$\text{Rendement (g/m}^2\text{)} = \text{plantes/m}^2 * \text{épis/m}^2 * \text{grains/épi} * \text{poids de 1000 grains (g)} \quad (\text{éq. 1.4})$$

Pour une culture donnée, une composante de rendement dépend de l'état antérieur de la culture : cet état définit sa valeur potentielle. Les contraintes du milieu agissent sur l'expression de ce potentiel et par voie de conséquences sur la formation de la composante de rendement suivante. On peut utiliser la valeur d'une composante de rendement comme un indicateur du caractère plus ou moins favorable des conditions pédo-climatiques pendant sa formation. Il faut pour cela connaître les relations potentielles existant entre les composantes de rendement successives et comparer une situation donnée à ces relations pour dater l'apparition du facteur limitant et en analyser les causes (Meynard, 1985).

Les périodes hivernale et printanière, périodes où les risques liés à un engorgement sont majeurs, correspondent à la mise en place du peuplement à la récolte soit le nombre d'épis par m<sup>2</sup>. Le nombre d'épis est conditionné par le taux de levée et le nombre de tiges portant un épi.

## 1.1 Taux de levée

L'organisation des protocoles expérimentaux ne nous a pas permis de mesurer l'effet d'un engorgement sur la mise en place du peuplement à la levée. En cuves lysimétriques, avec une nappe maintenue à 5 cm de la surface du sol, Cannell et Belford (1982) montrent que des conditions d'alimentation déficiente en oxygène sont préjudiciables durant la phase semis-levée (Figure 1.1). Lorsque les conditions redeviennent favorables des retards à la levée de plusieurs jours sont observés. Dans les conditions expérimentales présentées par Cannell et Belford

(1982), la semence n'était pas ennoyée, cependant les conditions hydriques dans le lit de semence étaient saturantes. La teneur en oxygène passe en moins de 48 heures de 20 à 3%.

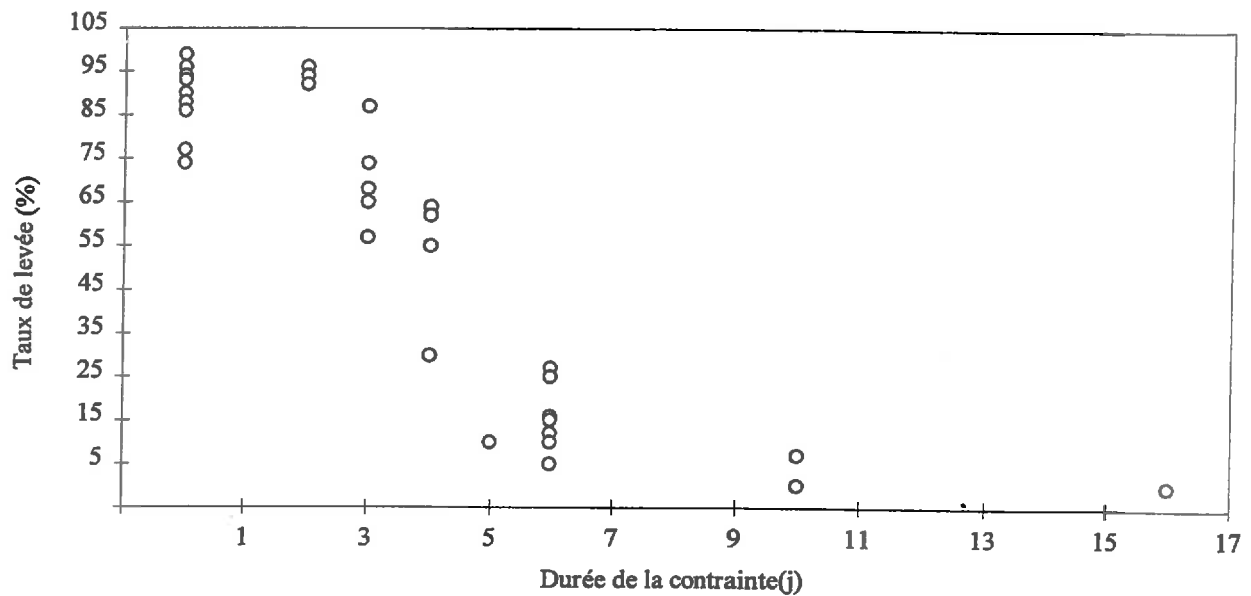


Figure 1.1 : Influence d'un engorgement entre la germination et la levée sur le taux de levée (adaptée d'après Cannell et Belford, 1982)

Sur le site expérimental d'Arrou, les observations réalisées, campagnes de 1974 à 1994, sur blé d'hiver n'ont pas permis de mettre en évidence de différences significatives du taux de levée entre les différents traitements, drainé, non drainé, drain et inter-drain. Les conditions lors du semis, période comprise entre la mi-octobre et la mi-novembre, sont souvent optimales. Le stock d'eau n'étant pas totalement reconstitué, la nappe, au sens strict, n'est jamais présente.

## 1.2 Peuplement à la récolte

Le peuplement à la récolte dépend du nombre de tiges émises et de leur fertilité. Dans des conditions naturelles de culture, la modification du rythme d'apparition des talles est souvent constatée en présence d'un excès d'eau. Ceci est à mettre en relation avec les modifications du régime thermique du sol. Dans des conditions agricoles, le statut thermique d'un sol engorgé est différent de celui d'un sol sain (Massé et Capy, 1988).

Le nombre de tiges par plante est fortement affecté par un engorgement en eau du sol. Les mécanismes évoqués sont d'une part, un ralentissement de l'émission foliaire et, d'autre part, une dégénérescence prématurée des tiges formées (Cannell, 1984 ; Ben Naceur, 1987 ; Bousqué, 1992). Les résultats de l'enquête « Drainage » effectuée en 1978 sur le département de l'Eure et Loir, montrent que les parcelles drainées ont un peuplement à la récolte beaucoup plus fort que

les parcelles non drainées (Alliot, 1979). Dans le cas des parcelles drainées à fort rendement, l'effet peuplement est très explicatif. En revanche pour les parcelles non drainées, l'augmentation du rendement ne semble pas liée au peuplement à la récolte (Tableau 1.1).

	Peuplement	Parcelles dont le rendement est supérieur à 60 quintaux / ha	Parcelles dont le rendement est inférieur à 60 quintaux / ha
Parcelles drainées	560 épis / m <sup>2</sup>	597 épis / m <sup>2</sup> (n = 14)	500 épis / m <sup>2</sup> (n = 9)
	Peuplement	Parcelles dont le rendement est supérieur à 50 quintaux / ha	Parcelles dont le rendement est inférieur à 50 quintaux / ha
Parcelles non drainées	430 épis / m <sup>2</sup>	438 épis / m <sup>2</sup> (n = 13)	425 épis / m <sup>2</sup> (n = 10)

Tableau 1.1 : Comparaison des peuplements entre parcelles drainées et non drainées, n est le nombre d'observations (d'après Alliot, 1979)

Les résultats obtenus en plein champ, sur le site expérimental d'Arrou, vont dans le sens des observations présentées dans la bibliographie. Il existe une différence significative entre le nombre de tiges vertes par m<sup>2</sup> au drain et à l'inter-drain (Figure 1.2).

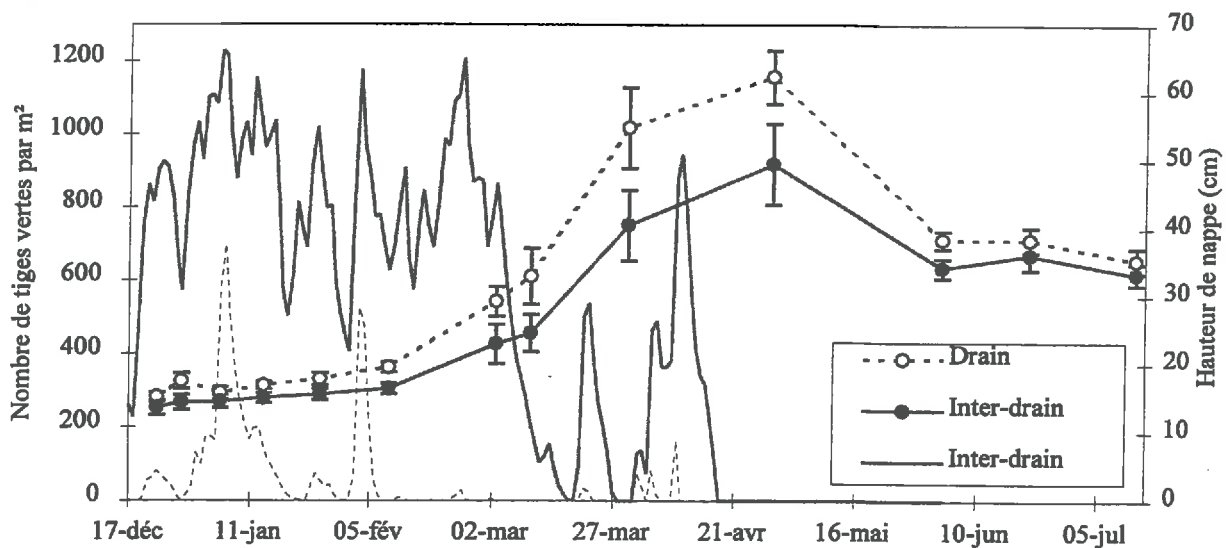


Figure 1.2 : Comparaison de l'évolution du nombre de tiges vertes entre la situation au drain et l'inter-drain, parcelle 1, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Au regard des observations réalisées, les deux mécanismes évoqués précédemment semblent coexister. Lors des prélèvements sur site, nous avons distingué, pour l'estimation des surfaces foliaires et de la biomasse, les organes verts des organes desséchés. Nous pouvons ainsi estimer le nombre total de talles émises. Ce dernier est significativement supérieur au drain par rapport à l'inter-drain (Figure 1.3).

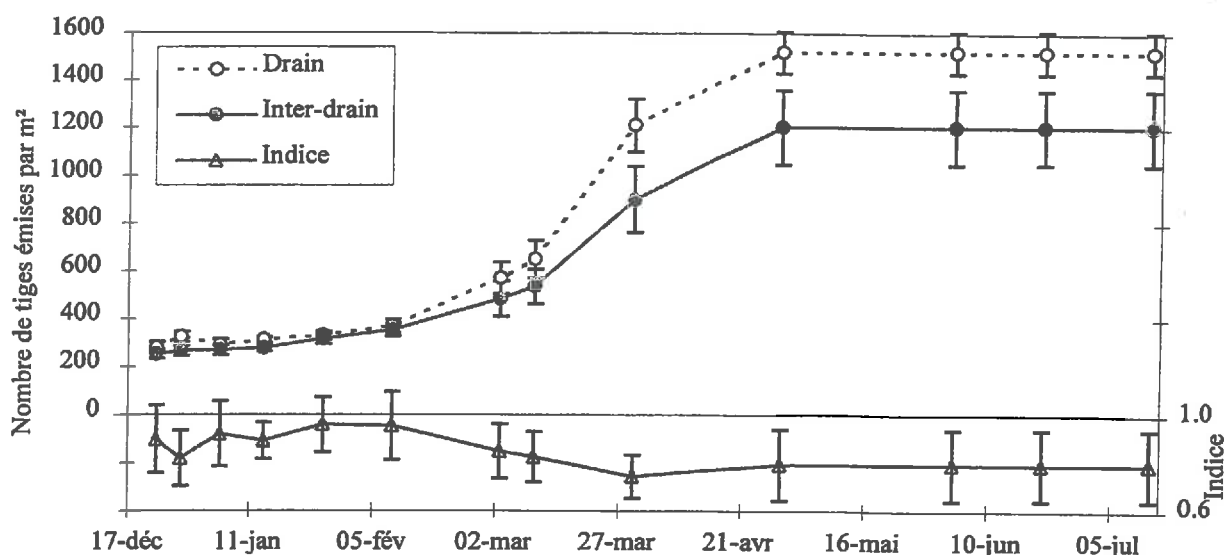


Figure 1.3 : Comparaison de l'évolution du nombre de tiges totales émises entre la situation au drain et à l'inter-drain (l'indice représente le rapport entre l'inter-drain et le drain), parcelle 1, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

La limitation de l'émission de talles semble être responsable, en partie, de la réduction du peuplement à la récolte. En revanche, les observations ne permettent pas de distinguer s'il s'agit d'un arrêt de l'émission ou d'un avortement ou d'une dégénérescence avant que la talle soit visiblement émise. Bousqué (1992) montre que la réduction du nombre de talles est due à une diminution du nombre de talles du second et troisième ordre.

Le devenir d'une talle émise (régression ou formation d'un épi) est fortement dépendant des conditions de nutrition et fait intervenir des phénomènes de compétitions (Masle-Meynard, 1981). La comparaison du taux de talles desséchées entre le drain et l'inter-drain est défavorable à l'inter-drain. Un plus grand nombre de talles formées régresse sous l'effet de la contrainte d'engorgement. Lors de l'installation définitive du peuplement, la dynamique de régression ne semble pas affectée. Néanmoins, le peuplement à la récolte, nombre d'épis fertiles au stade épiaison, est significativement différent entre le drain et l'inter-drain (Tableau 1.2).

	Drain		Inter-drain	
	1982-83	1993-94	1982-83	1993-94
Nombre d'épis par m²	498	477 ± 20.8	420	404 ± 16.72
Coefficient de tallage ( n = 11)	2	1.68 ± 0.18	1.69	1.46 ± 0.16

Tableau 1.2 : Comparaison des coefficients de tallage entre la situation au drain et à l'inter-drain, parcelle 1, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994 (n est le nombre de répétitions pour chaque traitement)

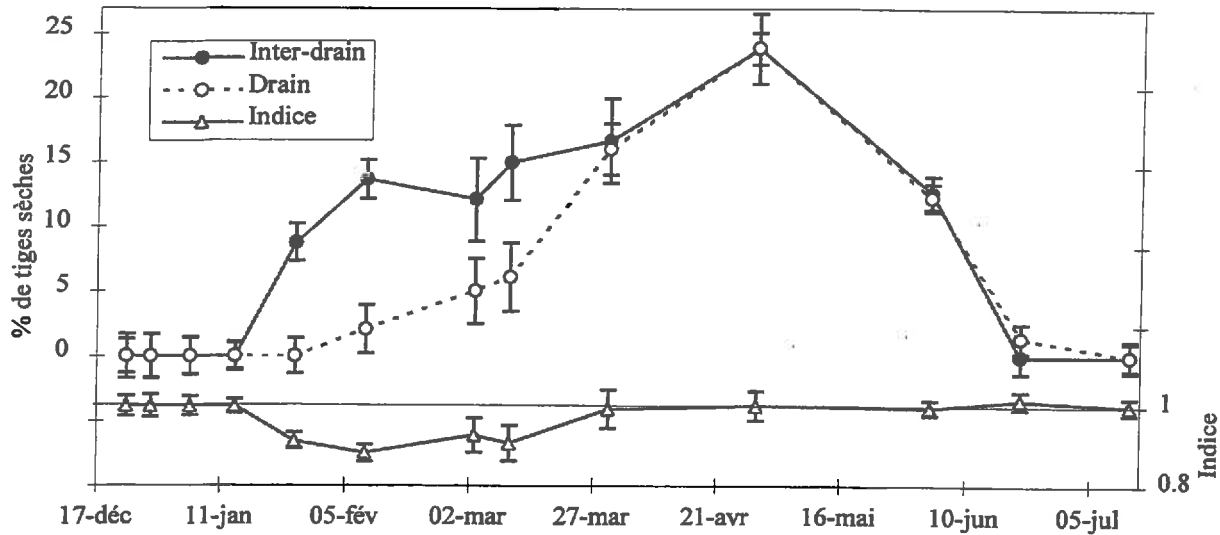


Figure 1.4 : Comparaison de l'évolution du taux de tiges desséchées entre la situation au drain et l'inter-drain (l'indice représente le rapport entre l'inter-drain et le drain), parcelle 1, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Le nombre d'épis au m<sup>2</sup> se met en place dès le début du tallage, la mise en place de cette composante se poursuit au delà du stade épi 1 cm (Massé et Capy, 1988). Les effets d'un excès d'eau hivernal peuvent parfois être compensés par un apport d'azote au cours du mois de mars. Pour cette région, l'effet de cet apport est d'autant plus efficace qu'il est réalisé au début du mois de mars (Alliot, 1979). Les conditions de portance du sol ne permettent pas toujours de réaliser cet apport. Au cours de la campagne agronomique 1993-1994 sur le site expérimental d'Arrou, cet apport a pu être réalisé sur parcelles drainées le 08 mars.

### 1.3 Nombre de grains par épi, poids de 1000 grains et rendement

L'élaboration du nombre de grains par m<sup>2</sup> dépend de nombreux facteurs comme l'alimentation hydrique et minérale et des accidents climatiques (températures élevées). Si l'élaboration du potentiel est sensible aux conditions hivernales et notamment aux excès d'eau, son expression finale en nombre de grains par épi puis en poids de 1000 grains a plus à craindre d'un déficit hydrique et des températures élevées (échaudage). Ces conditions sont fréquentes dans le Sud de la France, mais le risque est également important lorsque la culture est implantée sur un sol peu profond, caillouteux ou sableux dans le Nord de la France. Des conditions climatiques particulières, notamment de sécheresse, peuvent étendre ce risque à l'ensemble des zones de culture (Longchamp, 1983). L'enracinement revêt dans ce cas un caractère important. Comme



nous avons pu le voir, les excès d'eau perturbent l'enracinement en profondeur et en densité. Les plantes ayant souffert d'un excès d'eau hivernal, lors de périodes de déficit hydrique sont à nouveau dans une situation défavorable si la compensation n'a pas pu être correctement réalisée au cours du printemps.

Au cours de la campagne 1993-1994, sur le site expérimental d'Arrou, le deuxième apport a été effectué le 18 mars (118 unités de nitrate sous forme liquide). Malgré cet apport, les rendements finaux sont restés médiocres par rapport au potentiel de la culture sur parcelle saine. Le nombre de grains par épi ainsi que le poids de 1000 grains ne sont pas significativement différents entre le drain et l'inter-drain (Tableau 1.3). Les valeurs potentielles des composantes de rendement pour la même variété de blé (Soissons) sur cette région nous ont été fournies par l'ITCF de la Minière.

	Drain	Inter-drain	Situation potentielle		
Nombre de plantes / m <sup>2</sup> (janvier)	312 ± 10.6	278 ± 14.1	87	217	325
Nombre d'épis / m <sup>2</sup> (n = 11)	477 ± 20.8	404 ± 16.7	449	461	523
Nombre de grains / épi (n = 60)	35.62 ± 0.81	35.09 ± 0.66	53	50	41
poids de 1000 grains (15%) (n = 5)	38.92 ± 0.86	39.41 ± 0.77	44.8	44.0	44.1
Rendement (qx / ha) (15%)	66.13 ± 5.85	55.9 ± 4.45	106	102	95.2

*Tableau 1.3 : Synthèse des résultats sur les composantes de rendement et comparaison avec les valeurs potentielles, parcelle 1, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994 (n est le nombre de répétitions, 15 % est le taux d'humidité)*

Le rendement à la parcelle mesuré par l'agriculteur est de 57.2 qx / ha (15%) avec un poids de 1000 grains de 36.79 (15%).

## 1.4 Discussion

Pour la région agricole du Faux-Perche se sont les conditions climatiques et pédologiques, au cours de la mise en place du peuplement à la sortie de l'hiver, pour les densités de semis les plus courantes, qui expliquent en grande partie la variabilité des rendements en grains mesurés. Cette remarque peut être élargie à la région du grand Nord-Ouest de la France. Cette observation semble justifier l'importance attachée à l'état de croissance de la culture au stade épi 1 cm. En effet, les relations établies entre la biomasse aérienne au stade épi 1 cm, le nombre

d'épis par m<sup>2</sup> et le nombre de grains par m<sup>2</sup> permettent de prédire correctement, à partir de l'état de croissance de la culture à ce stade, le rendement attendu à la récolte. Ces relations mettent bien en évidence l'importance de la date et des conditions de semis et des contraintes hivernales (Meynard, 1987). Etablies sur la région du Bassin Parisien, ces relations semblent justifiées. En revanche leur extrapolation vers des zones géographiques où les contraintes hivernales sont similaires est loin d'être évidente. En effet, les conditions pédologiques et climatiques au cours de l'élaboration du nombre de grains par épillets puis de remplissage des grains peuvent devenir déterminantes sur le rendement.

La démarche d'analyse des effets d'un excès d'eau sur l'élaboration du rendement est essentiellement descriptive et n'intègre que partiellement les effets liés à une telle contrainte. En effet, la contrainte est ramenée à la seule prise en compte d'une hauteur de nappe. L'étude sur les composantes du rendement correspond en fait à un diagnostic. Elle ne permet donc pas de décrire les mécanismes d'action d'un engorgement en eau sol et d'identifier les fonctions physiologiques affectées. Il paraît important dans un premier temps de mieux définir la variable de stress.

## 2. GENESE D'UN MILIEU ASPHYXIANT POUR LA PLANTE

Les mécanismes impliqués dans la genèse d'un milieu asphyxiant, dans des conditions de plein champ, sont complexes. Les expérimentations au laboratoire ou in situ dans des conditions contrôlées permettent d'apporter des éléments de réponse sur la quantification de ce facteur limitant et sur la sensibilité de la plante.

Sur des plants de blé, Luxmoore (Luxmoore et Stolzy, 1972) trouve que la teneur en oxygène du milieu doit diminuer jusqu'à 7% pour que la respiration soit réduite de moitié. Thomson et *al* (1989) étudient l'élongation du système racinaire sur de jeunes plants de blé soumis pendant 48h à des niveaux d'aération variables. Même si les conditions expérimentales sont différentes les résultats mettent en évidence un effet seuil à partir duquel on observe une réduction de la croissance racinaire. Le seuil critique semble être autour de 0.115 moles d'oxygène par m<sup>3</sup> de solution (soit une teneur en oxygène de 9%, Figure 1.1).

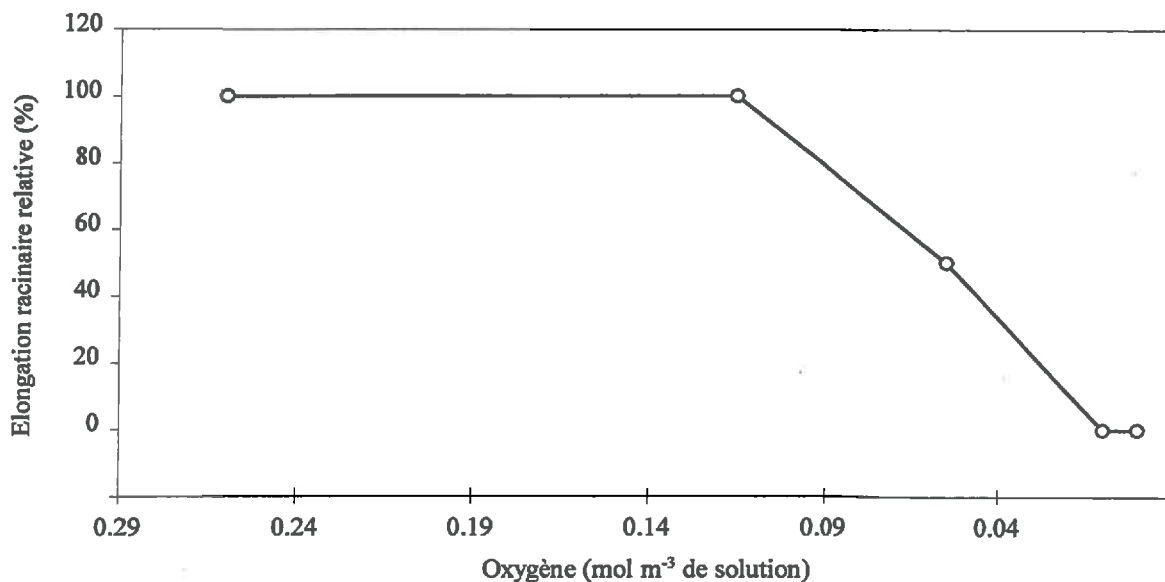


Figure 2.1 : Relation entre élongation racinaire et concentration en oxygène (adaptée d'après Thomson et al, 1989)

Lorsque les plantes sont remises dans des conditions favorables (de 0.01 à 0.26 mol m<sup>-3</sup> d'oxygène) seulement 70% des racines reprennent leur élongation. Pour les autres, on observe la formation de racines latérales due à la perte de la dominance apicale. Les résultats expérimentaux précédents montrent qu'il existe un effet seuil de la teneur en oxygène du milieu sur la croissance racinaire. Notre objectif est de caractériser les conditions d'aération et les mécanismes qui conduisent à l'apparition de ce facteur limitant de la croissance de la plante dans le cas d'un engorgement en eau du sol. Nous décomposons notre démarche en 3 étapes (Figure 2.2) :

- 1 - Quelle relation existe-t-il entre la saturation en eau et la teneur en oxygène du sol ?
- 2 - A quel moment apparaît une asphyxie induisant une réduction de croissance des racines ?
- 3 - Quelle variable de stress à l'excès d'eau choisir ?

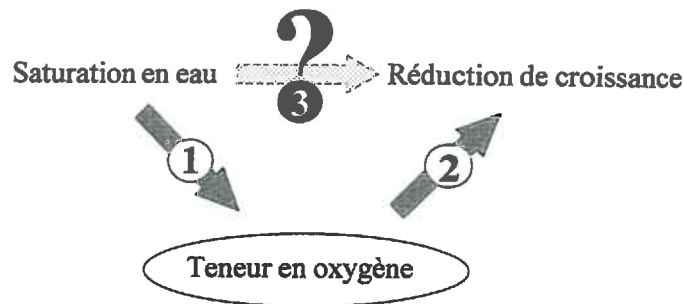


Figure 2.2 : Schématisation de la démarche pour la définition d'une variable de stress

## 2.1 Relation entre hauteur de nappe, pression en eau du sol et concentration en oxygène

L'oxygène diffuse vers les racines en fonction des gradients de concentration. Si l'eau est stagnante, le prélèvement par les racines de l'oxygène dissous à leur voisinage entraîne la formation autour de celles-ci d'une couche limite dans laquelle le gradient d'oxygène, pourtant élevé, n'assure qu'un débit d'oxygène très faible. Ceci est lié à la faiblesse du coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau ( $1 \text{ cm}^2$  par jour, soit  $10^4$  fois plus faible que dans l'air). Dans de telles conditions, la présence d'une nappe dans le profil de sol provoque l'épuisement de la teneur en oxygène de la zone saturée. L'effet du déplacement sur l'oxygénation de la solution est évident mais l'importance qu'il peut avoir au niveau d'un sol est limité (Hallaire et Katerji, 1985).

L'un des objectifs de l'expérimentation menée en cuves lysimétriques était d'identifier les mécanismes qui conduisent à la genèse d'un milieu asphyxiant. Un suivi expérimental spécifique a été mené à cet effet : suivi de la pression en eau du sol, de la hauteur de nappe et de la concentration en oxygène lors de la mise en place des contraintes d'engorgement. Le principe de mesure de la concentration en oxygène est présenté en annexe 1.1. Le protocole de mesure est décrit dans le chapitre 1. Les conditions expérimentales au démarrage de chaque contrainte sont résumées dans le Tableau 2.1.

Contrainte	Date	stade	Profondeur nappe	Température moyenne (sol)
Contrainte 1	03 mai	≈ mi-montaison	50 cm	16 °C
Contrainte 2	04 juin	≈ fin montaison	30 cm	18 °C

Tableau 2.1 : Synthèse des conditions expérimentales lors de la mise en oeuvre des contraintes

Les mesures de concentration en oxygène sont réalisées à des pas de temps de l'ordre de la demi-journée. Au démarrage de la contrainte, il existe un gradient de teneur en oxygène dans le profil de sol. Lorsque la nappe se forme, ce gradient est modifié (Figure 2.3 et Figure 2.4). La formation de la nappe commençant par la base du profil, la vitesse d'épuisement du milieu en oxygène est plus grande à ce niveau. La vitesse d'épuisement est à mettre en relation avec les fortes températures au moment de l'expérimentation et le stade de développement de la plante. Nous appellerons par la suite : "traitement" les cuves avec contrainte et "témoin" la cuve sans contrainte.

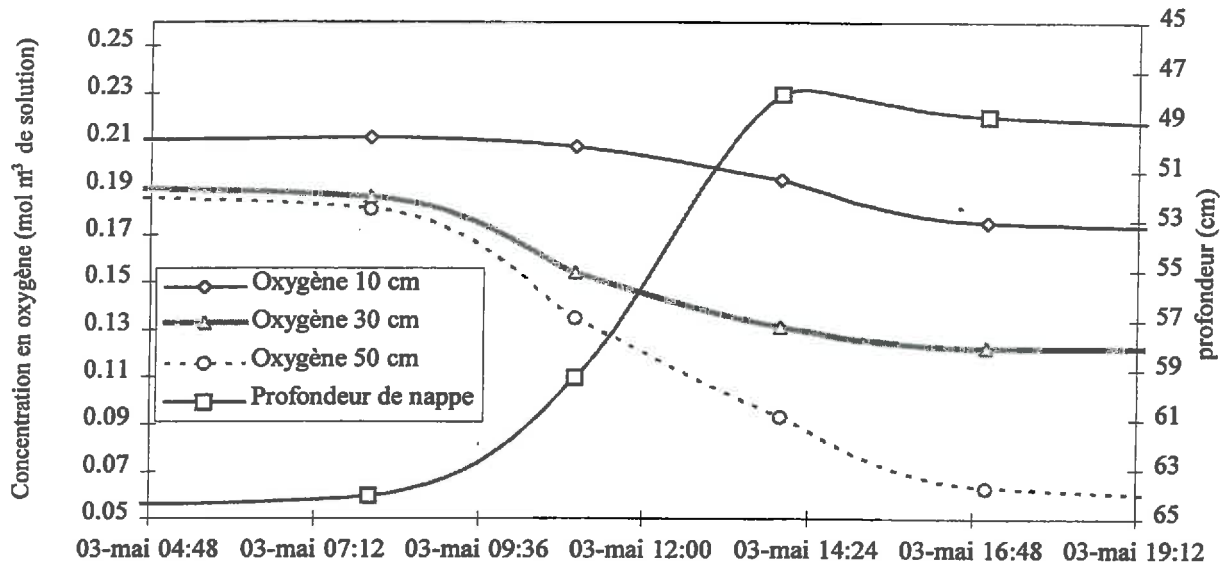


Figure 2.3 : Chronique de profondeur de nappe et de concentration en O<sub>2</sub> (contrainte 1), site expérimental d'Antony, campagne 1993-1994, traitement 3

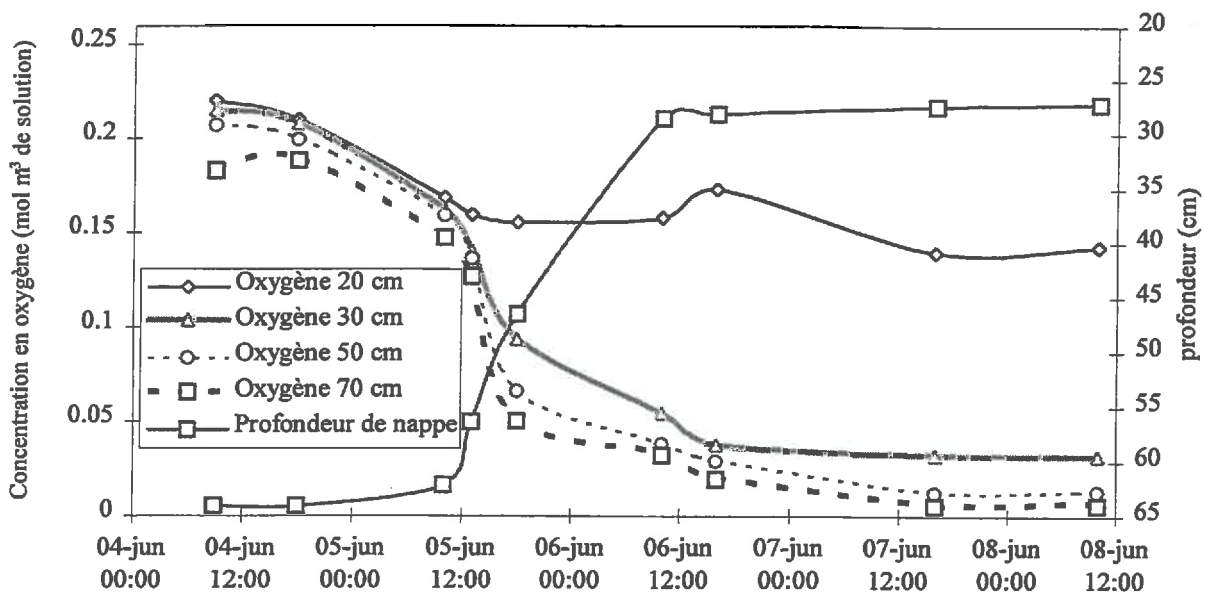


Figure 2.4 : Chronique de profondeur de nappe et de concentration en O<sub>2</sub> (contrainte 2), site expérimental d'Antony, campagne 1993-1994, traitement 4

Lorsque la nappe est formée nous atteignons rapidement, en moins de 24h, le seuil critique des  $0.115 \text{ mol m}^{-3}$  décrit par Thomson et *al* (1989) (Figure 2.5). Au delà de 48 h, la concentration en oxygène ne diminue plus de façon significative avec la durée de présence de la nappe. Il semble s'établir un équilibre entre demande (respiration des racines et des micro-organismes, réactions chimiques...) et apport en oxygène (diffusion). Cet équilibre dépend des conditions expérimentales, température, état de développement de la plante et biochimie du sol.

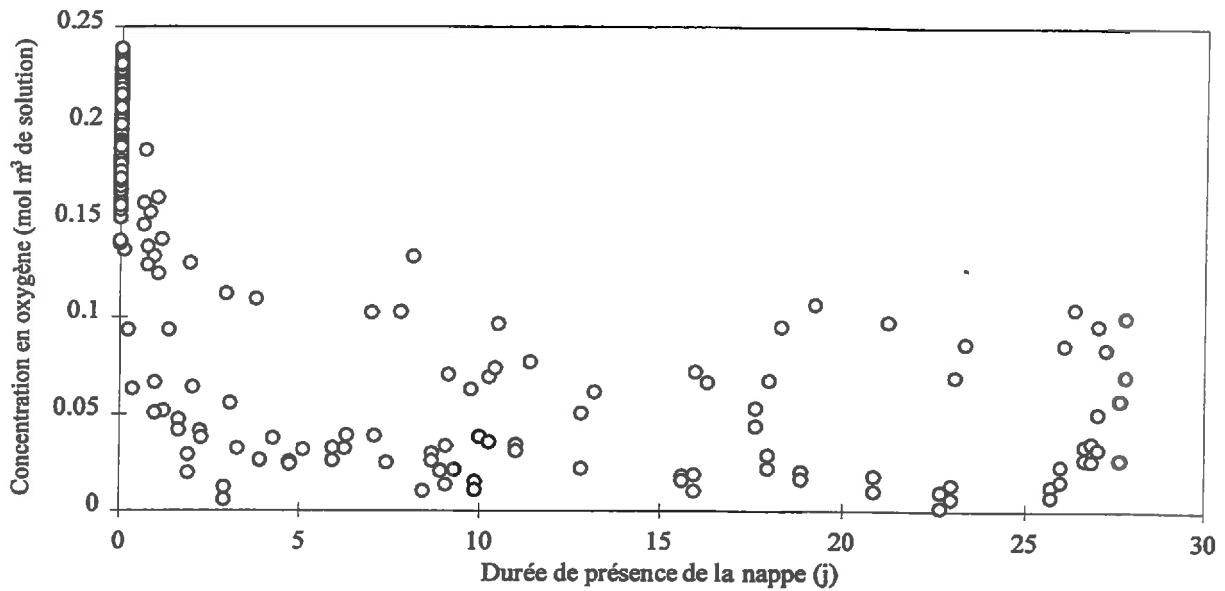


Figure 2.5 : Effet de la durée de présence de la nappe sur la concentration en oxygène de la solution, site expérimental d'Antony, campagne 1993-1994, traitement 3 et 4

Lorsque la pression du sol tend vers la pression à saturation, la concentration en oxygène passe au dessous du seuil critique (Figure 2.6).

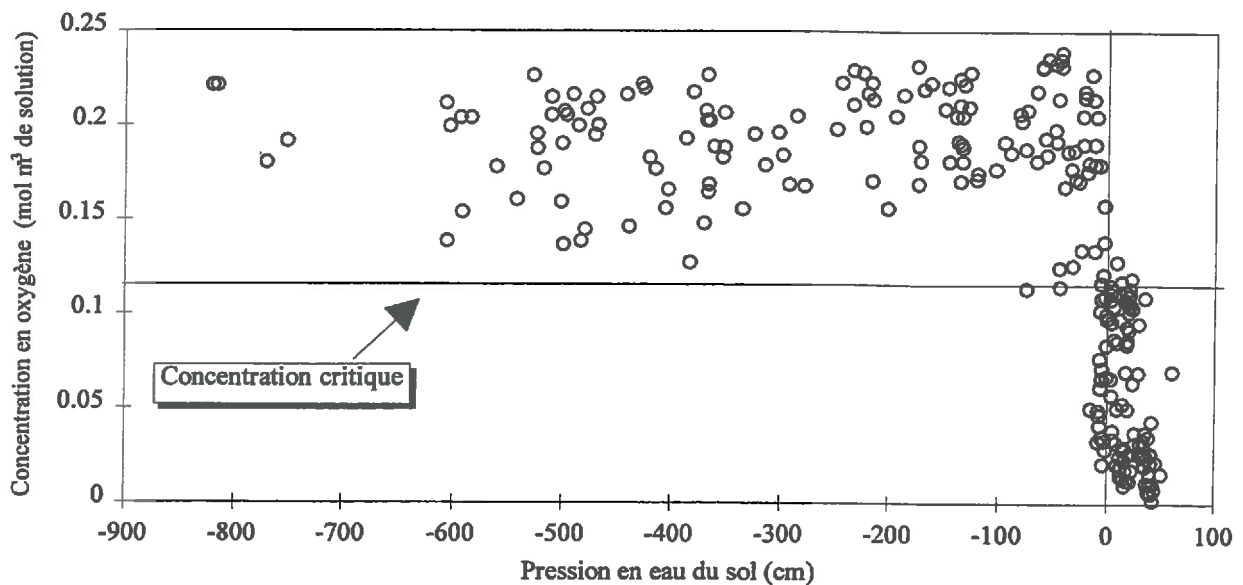


Figure 2.6 : Relation entre pression du sol et concentration en oxygène, site expérimental d'Antony, campagne 1993-1994, traitement 3

Dans un milieu poreux tel qu'un sol, la saturation ne se limite pas à une pression positive. En effet, même si l'observation, dans nos conditions expérimentales, d'une pression nulle ou positive correspond bien à la présence d'une nappe, au dessus de la nappe, on définit la présence d'une zone, "la frange capillaire", où l'humidité est proche de la saturation. La mesure de la hauteur de nappe par piézométrie ne renseigne pas sur l'état hydrique et l'épaisseur de cette zone. Pour ce type de matériaux, argilo-limoneux, de petits changements de la teneur en eau peuvent entraîner des variations importantes de la pression (Figure 2.7). Ainsi la saturation ne se limite pas à l'épaisseur de sol occupée par la nappe. Malheureusement nous n'avons pas suivi de façon spécifique l'état d'aération de la frange capillaire. Ces résultats vont dans le sens de ceux présentés par Grable et Siemer (1968, travaux cités par James et Box, 1991). Ces auteurs montrent que le coefficient de diffusion de l'oxygène devient limitant pour la croissance des plantes dès que la phase gazeuse est discontinue. Flübler et *al* (1976) estiment que la probabilité pour que ce coefficient devienne insuffisant pour les besoins de la plante est de 50% lorsque le potentiel de succion du sol est de 0.08 bars. Cette probabilité augmente lorsque le potentiel de succion du sol diminue.

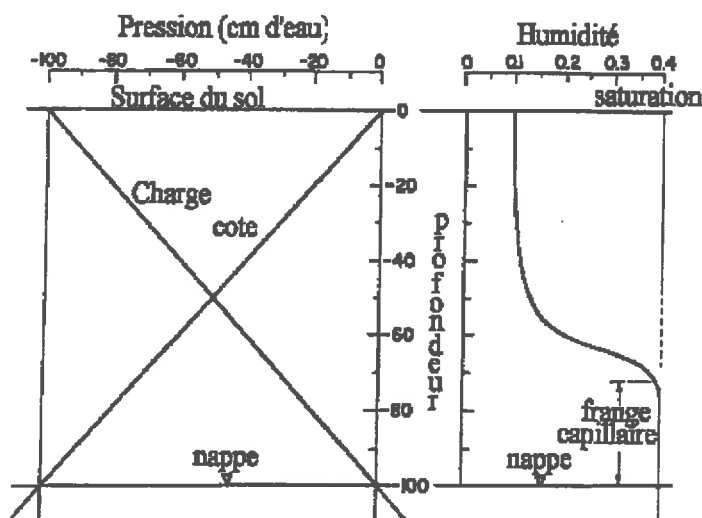


Figure 2.7 : Schématisation de l'effet de la frange capillaire sur le profil d'humidité (d'après Gillham, 1984)

Au regard des résultats expérimentaux, on peut formuler l'hypothèse que, dans un sol, la saturation en eau induit une réduction de la quantité d'oxygène disponible pour la plante. Il semble d'autre part que la vitesse d'épuisement du milieu en oxygène soit très rapide. Ces résultats doivent être mis en relation avec la sensibilité de la plante afin de voir s'il existe une réduction de son potentiel de croissance en rapport avec le seuil de concentration en oxygène décrit. Dans de telles conditions, on peut s'attendre à ce que la respiration des racines soit réduite. Cette réduction provoque une accumulation d'éthylène et d'éthanol dans la sève (Fulton et Erickson, 1964). La diminution de l'activité des racines limitant la circulation d'eau dans la plante, l'absorption de l'eau et des éléments minéraux est alors perturbée (Périgaud, 1967 ; Duthion, 1976).

## 2.2 Sensibilité de la plante, concentration en oxygène de la solution du sol et variable de stress

Dans le paragraphe suivant (§ 3) nous reviendrons longuement sur l'effet de l'excès d'eau sur la croissance racinaire. Ici nous souhaitons simplement mettre en relation un état de croissance de la plante avec ce qui caractérise l'asphyxie (oxygène/saturation) afin de définir notre variable de stress à l'excès d'eau. Un milieu devient asphyxiant s'il limite une fonction physiologique qui réduit la croissance de la plante. Par conséquent, à partir de l'analyse de l'évolution d'une variable de croissance nous pourrions conclure s'il y a présence ou absence de conditions défavorables à la croissance. Nous avons choisi comme variable l'accroissement en densité du système racinaire.

La croissance racinaire est caractérisée par une vitesse d'approfondissement et une vitesse de colonisation du profil de sol. La sensibilité de la plante en terme de croissance racinaire est analysée par l'intermédiaire du calcul de l'accroissement racinaire journalier en densité. Il est calculé par tranche de sol de 10 cm à partir des mesures de cartographies racinaires (le protocole de mesure et la méthode de calcul de la densité racinaire sont décrits dans le chapitre I). Son expression est la suivante :

$$\Delta d(h) = \int_h^{h+10} d(z) dz / \Delta t \quad (\text{éq. 2.1})$$

où  $d(h)$  est la densité racinaire moyenne par couche de sol d'une épaisseur de 10 cm et  $h$  (cm) est la profondeur à la base de la couche de sol considéré.

Les dates de réalisation des cartographies sont synthétisées dans le Tableau 2.2.

Contrainte 1			Contrainte 2		
Date	Cartographie	Contrainte	Date	Cartographie	Contrainte
28 avril	oui		31 mai	oui	
03 mai		début	03 juin		début
06 mai	oui		08 juin	oui	
11 mai	oui		21 juin (≈floraison)	oui	
14 mai	oui		01 juillet		fin
16 mai		fin	05 juillet	oui	

Tableau 2.2 : Chronologie des mesures de cartographies racinaires



Lorsque la concentration en oxygène du milieu devient inférieure à  $0.12 \text{ mol m}^{-3}$ , la vitesse de croissance racinaire est ralentie puis devient nulle (Figure 2.8).

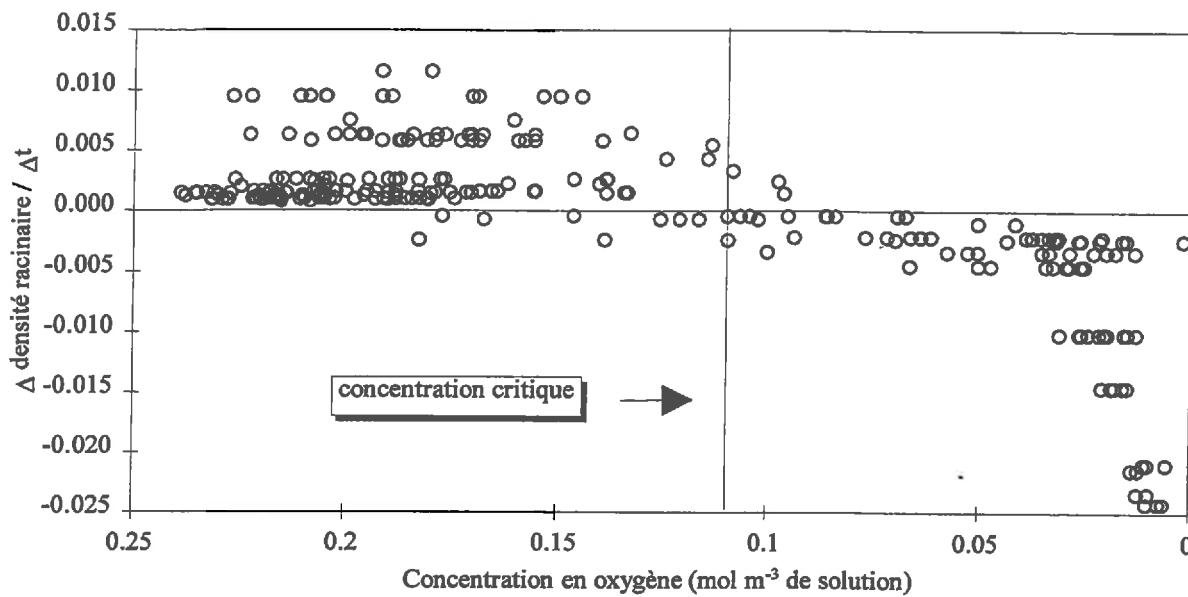


Figure 2.8 : Relation entre concentration en oxygène et croissance racinaire en densité, site expérimental d'Antony, campagne 1993-1994, traitement 3 et 4

La réponse de la plante est rapide. En effet, dès le troisième jour, nous enregistrons une réduction de l'accroissement racinaire moyen journalier. Par cette observation, nous rejoignons les résultats présentés par Thomson et *al* (1989). Ces auteurs enregistrent un effet sur la croissance racinaire après un temps d'exposition de 48h à une contrainte de déficit en oxygène. Drew (1992) note que lorsque le milieu devient anaérobie, l'orientation du métabolisme de la plante vers la fermentation se réalise en quelques heures.

La réduction de l'accroissement racinaire est mesurée par le rapport de l'accroissement de densité racinaire entre traitement et témoin. Son expression est :

$$I_a(h) = \frac{\Delta d(h)_{\text{traitement}}}{\Delta d(h)_{\text{témoin}}} \quad (\text{éq. 2.2})$$

Par construction, si la valeur de ce rapport est proche de 1, il n'y a pas d'effet de la contrainte. Si ce rapport est supérieur à 1, l'accroissement du système racinaire du traitement est supérieur à celui du témoin. S'il est inférieur à 1, l'accroissement du système racinaire du traitement est inférieur à celui du témoin. Enfin si ce rapport est négatif, on mesure alors à une régression du système racinaire sur le traitement. On vérifie par ailleurs que l'accroissement journalier du

système racinaire du témoin est toujours positif. En fait l'excès d'eau provoque à la fois un ralentissement de la croissance racinaire et une nécrose des racines. Avant la floraison, c'est un bilan ces deux mécanismes que nous observons. Après floraison, nous observons uniquement la nécrose. Les mécanismes observés sont alors différents. La vérification précédente, accroissement positif, permet d'étudier l'effet d'un excès d'eau en phase de croissance racinaire.

Lorsque la concentration en oxygène diminue, on observe une réduction de l'accroissement racinaire (Figure 2.9). Il existe un effet seuil de la concentration en oxygène. En effet, on ne note pas de différence significative entre traitement et témoin tant que la concentration en oxygène est supérieure à  $0.12 \text{ mol m}^{-3}$ . Lorsqu'elle est inférieure à ce seuil on mesure une réduction de l'accroissement racinaire.

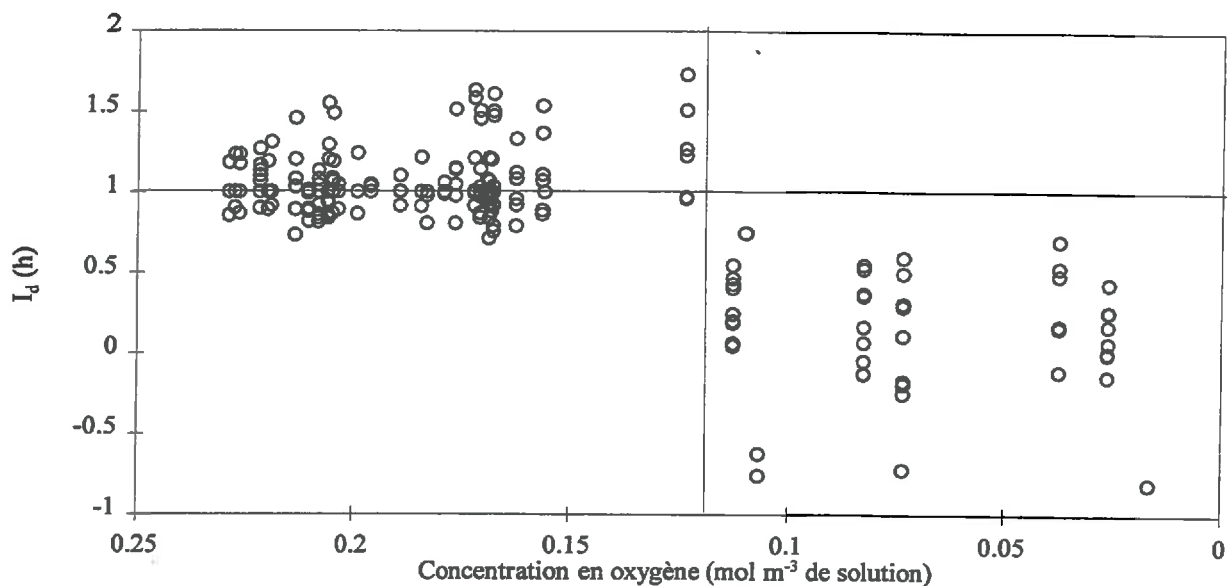


Figure 2.9 : Evolution du rapport entre traitement et témoin de l'accroissement racinaire en fonction de la concentration en oxygène de la solution du sol, site expérimental d'Antony, campagne, 1993-1994, traitements 3 et 4

Il ne semble pas y avoir une corrélation significative entre la variable  $I_d(h)$  et la concentration en oxygène en dessous du seuil. Ceci s'explique par les durées de présence de la nappe qui viennent moduler la réponse de la plante. Afin de mettre en évidence la dépendance qui existe entre l'intensité (concentration en oxygène), la durée (jour) de la contrainte et la réponse du système racinaire, nous avons représenté l'ensemble des résultats expérimentaux sous forme de carte (Figure 2.10). La surface interpolée est obtenue par la méthode de la "courbure minimale". Au regard de la variabilité des mesures expérimentales, la réduction de la croissance racinaire est significative lorsque  $I_d(h)$  devient inférieur à 0.5.

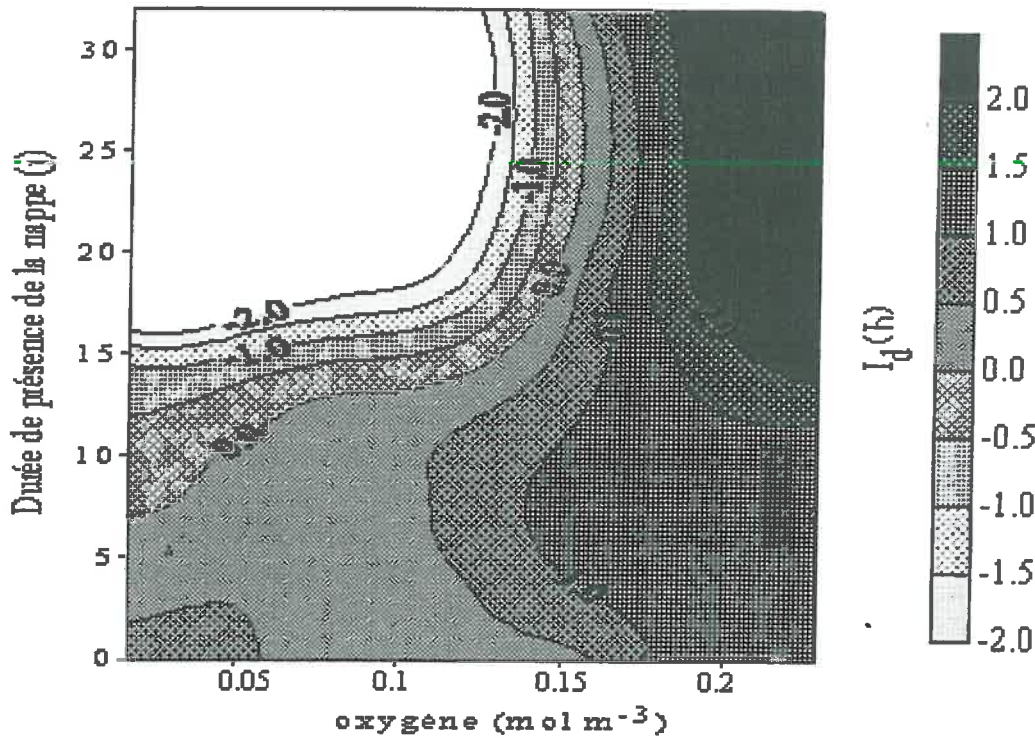


Figure 2.10 : Surface de réponse du ratio d'accroissement de densité racinaire en fonction de la concentration en oxygène et de la durée de la contrainte (l'intensité des colorations représente le rapport des accroissements racinaires journaliers en profondeur entre les traitements et le témoin,  $I_d(h)$ )

Cette représentation met en évidence le seuil critique de la concentration en oxygène (valeur comprise entre 0.1 et 0.15 mol m<sup>-3</sup>) sur l'accroissement racinaire. En dessous de ce seuil la croissance racinaire est fortement réduite. Cette réduction est d'autant plus importante que le temps de présence de la nappe est long. Pour une concentration en oxygène de la solution du sol inférieure à 0.05 moles par m<sup>3</sup>, on observe une régression du système racinaire à partir de 7 jours de présence de la nappe. Les concentrations en oxygène mesurées en dessous de 0.15 moles m<sup>-3</sup> correspondent à des mesures réalisées dans des couches de sol saturées en eau.

Pour les couches non saturées, nous observons un accroissement significatif du rapport  $I_d(h)$ . Il semble donc exister une compensation, la plante augmente le nombre de sites d'absorption dans les couches de sol non ennoyées. Nous reviendrons sur cette observation dans le paragraphe suivant (§ 3).

Plusieurs enseignements peuvent être extraits de ces résultats expérimentaux :

- la croissance racinaire est sensible à un déficit en oxygène, il semble exister un effet de seuil, la croissance racinaire est réduite dans un premier temps, puis selon l'intensité du stress et la durée de la contrainte une régression du système racinaire est mise en évidence ;

- le seuil critique de concentration en oxygène de la solution du sol pour la croissance racinaire coïncide avec la saturation en eau du sol.

Ces résultats expérimentaux sont obtenus dans des conditions particulières et grâce à un suivi spécifique. Dans des conditions au champ un tel suivi n'est pas concevable pour quantifier la contrainte. La définition d'une variable de stress ne peut alors reposer que sur la connaissance d'un état de saturation du sol.

### 2.3 Définition de la variable de stress à l'excès d'eau

La variable de stress doit permettre de relier des modifications de la dynamique de croissance de la plante à un événement ou à une contrainte donnée. Pour la grande majorité des expérimentations en plein champ, la seule variable indicatrice de l'état de saturation ou du niveau d'anoxie est la hauteur de nappe dans le profil de sol. La définition de la variable de stress doit s'appuyer sur la hauteur de nappe et sa position par rapport au système racinaire. Cette définition intéresse également la modélisation. En effet, les possibilités offertes par cette dernière, telle que nous l'avons décrite dans le chapitre I (§ 1.2), sont limitées lorsque que l'on veut caractériser un milieu asphyxiant. En effet, les mécanismes modélisés concernent uniquement les transferts d'eau et l'état d'engorgement du sol est décrit par une hauteur de nappe.

A partir des résultats expérimentaux présentés, nous pouvons formuler l'hypothèse que les horizons engorgés sont défavorables à la croissance racinaire. La définition de la variable de stress s'oriente donc vers une variable de type "tout ou rien" c'est à dire "présence ou absence de contrainte". Le calcul de la proportion de sol engorgé repose sur la connaissance de la hauteur de la nappe et de l'épaisseur de la frange capillaire. Dans de telles conditions, la proportion du système racinaire soumis à un engorgement peut permettre d'estimer l'intensité de la contrainte imposée à la culture. L'expression de l'intensité de la contrainte est :

$$SEE (\%) = \frac{\int_{PZ-w}^{z_{max}} d(z) dz}{\int_0^{z_{max}} d(z) dz} \quad (\text{éq. 2.3})$$

où SEE (pour stress excès d'eau) est la proportion du système racinaire soumis à un engorgement, PZ est la profondeur de la nappe [L], w est l'épaisseur de l'horizon défavorable au dessus la nappe [L], z<sub>max</sub> est la profondeur maximale d'enracinement [L].

## **2.4 Conclusion**

Le suivi de la concentration en oxygène à l'aide des micro-électrodes nous a permis de caractériser et d'étudier la genèse d'un milieu asphyxiant. L'épuisement en oxygène de la solution du sol est rapide dans le cas d'un engorgement (48 h). Au delà de 48 h on atteint un état d'équilibre qui dépend des conditions expérimentales au moment de la contrainte.

Dans nos conditions expérimentales, le profil de sol occupé par la nappe constitue une zone défavorable à la croissance de la plante. La proportion du système racinaire présent dans cette zone peut être choisie comme variable de stress. La confrontation de la variable de stress avec les modifications de la dynamique de croissance de la plante doit permettre de vérifier si la réponse de la plante à un excès d'eau peut être expliquée par cette seule variable.

### 3. EXCES D'EAU ET CROISSANCE RACINAIRE

Les racines sont les organes de la plante qui enregistrent et transmettent un ensemble d'informations liées à l'absence ou la présence de contraintes hydriques et édaphiques. Outre les aspects d'ancrage dans le sol, elles assurent les fonctions de nutrition et d'extraction d'eau. La compréhension de leur fonctionnement et de leur réponse à une contrainte donnée est une étape essentielle pour l'étude du fonctionnement de la plante entière.

La proportion de sol colonisé par les racines est un bon révélateur de la qualité de l'enracinement et des contraintes du milieu. Cette proportion est décrite par deux variables : la densité racinaire et la profondeur d'enracinement (Paillard et *al*, 1992). Pour la culture de blé, de nombreuses connaissances ont été acquises sur la progression du système racinaire. Ces connaissances concernent aussi bien les méthodes de suivi expérimental <sup>(1)</sup> que l'étude de l'enracinement lui-même <sup>(2)</sup> et les approches modélisatrices qui en découlent <sup>(3)</sup>.

Les deux dispositifs expérimentaux, en cuves et en plein champ, ont des objectifs complémentaires vis à vis de l'étude de l'enracinement. L'expérimentation en plein champ est complémentaire dans le sens où nous avons testé dans quelles mesures les mécanismes identifiés ou les hypothèses formulées à partir des résultats obtenus sur un dispositif contrôlé pouvaient être extrapolés à des situations de plein champ. Nous présentons, sur la base d'une étude bibliographique, les principaux acquis sur le comportement des racines en présence d'un excès d'eau. Ensuite, nous analysons, à partir des résultats expérimentaux obtenus en cuves lysimétriques, les effets de la présence d'une nappe sur la croissance racinaire en profondeur et en densité et en dégageons une formalisation. A partir de la comparaison de la situation au drain et à l'inter-drain, nous proposons une caractérisation de la parcelle étudiée vis à vis de l'enracinement. Nous étudions les conditions d'extrapolation des formalisations obtenues sur cuves lysimétriques à la situation de plein champ et discutons l'effet du mode d'application de la contrainte et ses conséquences sur l'estimation de la variable de stress.

---

<sup>(1)</sup> : Baldy, 1973 ; Tardieu et Manichon, 1986 ; Maertens, 1988 ; Tardieu, 1988a ; Tardieu, 1988b ; Fouere et Picard, 1988 ; Taylor et *al*, 1991 ; Girardin et *al*, 1991 ; Kendall et Leath, 1991.

<sup>(2)</sup> : Richards et Passioura, 1981 ; Keppler et *al*, 1984 ; Tardieu, 1988c ; Massé et *al*, 1988 ; Colnenne et *al*, 1988 ; Barraclough et *al*, 1991 ; James et Box, 1991 ; Massé et *al*, 1991.

<sup>(3)</sup> : Feddes et *al*, 1976 ; Jones et *al*, 1991 ; Rasiah et *al*, 1992 ; Brisson et *al*, 1992 ; Paillard et *al*, 1992 ; Rickman et *al*, 1992 ; Schmidhalter et *al*, 1994.

### 3.1 Croissance racinaire et contrainte d'engorgement

Le système racinaire du blé est constitué par les racines séminales qui se développent à partir de la semence et par les racines adventives qui se développent à partir de la base du maître brin et des talles. Le développement des racines séminales est proportionnel à la température. Elles dégènèrent au printemps. Au stade floraison, elles ne constituent que 5% de la totalité des racines. Les racines adventives ont un maximum de croissance au cours de la montaison, elles se développent jusqu'au stade floraison.

Comme nous l'avons démontré dans le paragraphe précédent (§ 2), l'apparition d'un milieu asphyxiant coïncide avec la saturation en eau du profil de sol. La conséquence est une asphyxie racinaire et la perturbation de la croissance des racines. Pons (1988b), sur la base de résultats expérimentaux obtenus sur parcelles drainées avec des techniques de drainages diverses, montre que la profondeur d'enracinement début montaison est corrélée de façon étroite avec le niveau moyen de la nappe en hiver (Figure 3.1). Le niveau piézométrique est mesuré toutes les semaines.

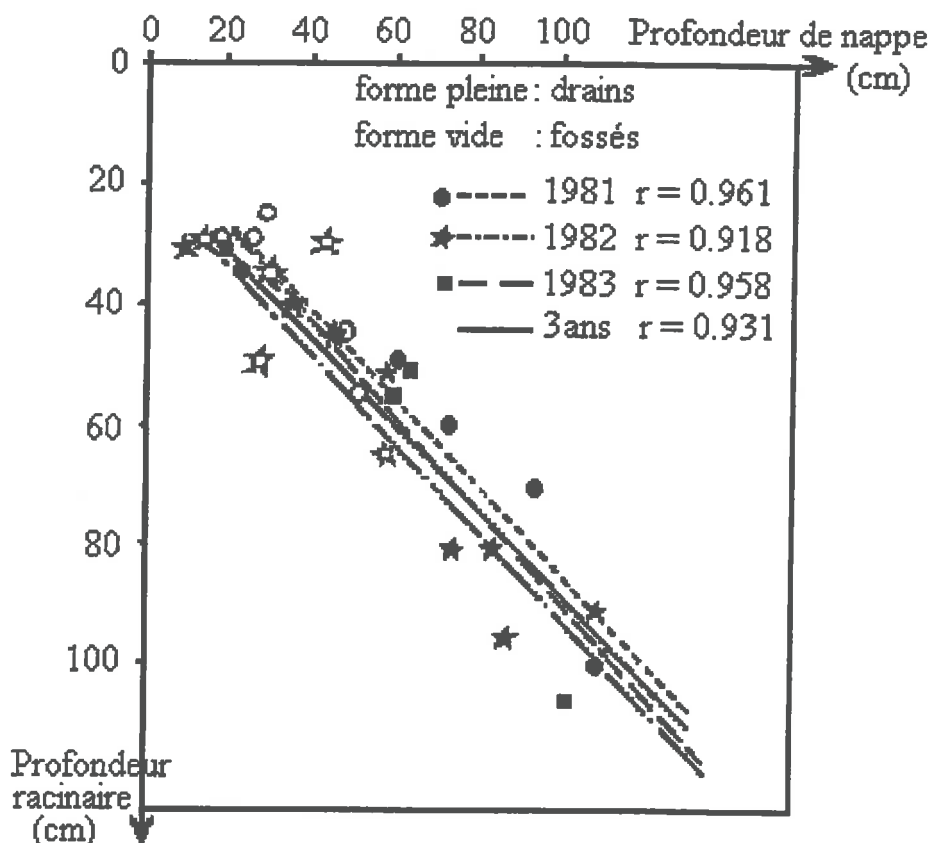


Figure 3.1 : Relation entre profondeur racinaire au stade début montaison et profondeur de nappe moyenne hivernale, culture de blé (d'après Pons, 1988b)

Pour un ensemble de 3 campagnes et de 28 parcelles, cet auteur trouve une relation linéaire entre la profondeur racinaire au stade début montaison,  $z_{rac}$ , et la profondeur moyenne de la nappe en hiver,  $\overline{PZ}$ .

$$z_{rac} = 0.73 \overline{PZ} + 14.5 \quad (r = 0.931) \quad (\text{éq. 3.1})$$

Cet auteur montre qu'au cours de la montaison l'enracinement n'est pas indépendant de la profondeur atteinte au début de cette phase. Néanmoins l'allongement des racines va dépendre du bilan climatique pendant la montaison. Ces résultats sont obtenus dans des conditions expérimentales spécifiques aux marais de l'Ouest, avec des sols d'origine fluvio-marine. Des contraintes de stabilité structurale et de salinité s'ajoutent aux contraintes d'engorgement. Néanmoins, la position de la nappe semble être un bon indicateur d'un niveau de contrainte globale ce qui justifie notre choix de la variable de stress.

### 3.2 Influence de la nappe sur la croissance racinaire : dispositif expérimental en cuves

Dans un premier temps, l'analyse des données en fonction de la contrainte d'engorgement est descriptive. Elle a été réalisée à partir des cartographies racinaires réalisées sur les cuves lysimétriques. Un tel dispositif a permis de maintenir un niveau de contrainte constant et d'éliminer la variabilité spatiale de certains facteurs tels que la densité du sol, sa compacité ou la présence d'obstacles à l'enracinement. La comparaison des résultats expérimentaux entre traitements a permis de relier les différences observées avec la variation de la contrainte. Nous dégageons une formalisation des mécanismes observés.

- *Résultats expérimentaux*

- *Accroissement racinaire et position de la nappe*

L'évolution du profil de densité racinaire, en présence d'une nappe, présentée sur la Figure 3.2 est représentative de l'ensemble des observations réalisées sur les cuves au cours des deux campagnes de mesures. Au démarrage de la contrainte (16 juin) les profils de densités racinaires étaient comparables entre le témoin (non soumis à excès d'eau) et le traitement (profondeur de nappe de 40 cm).



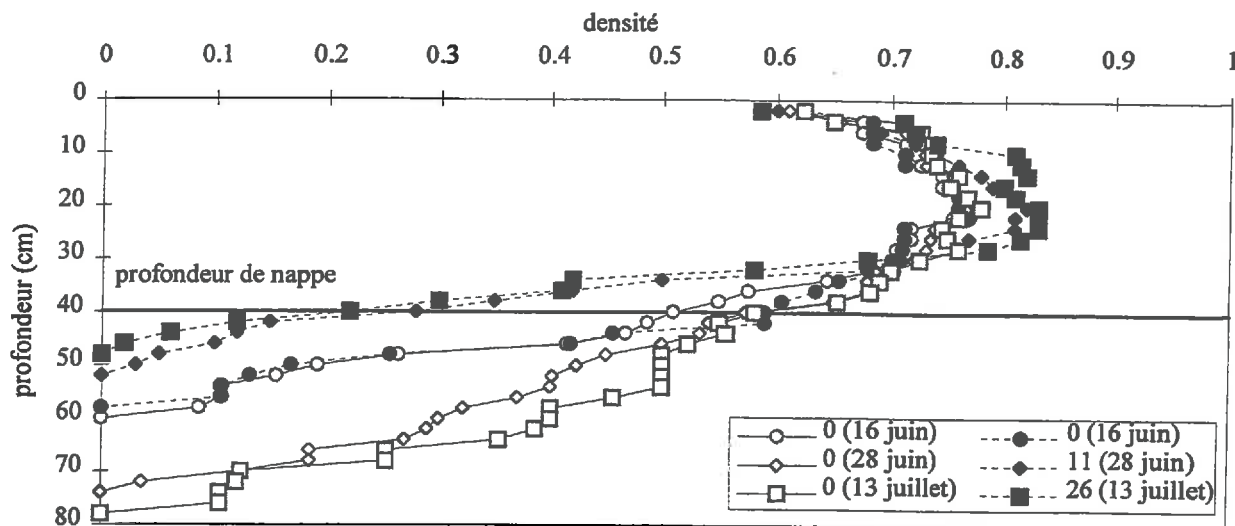


Figure 3.2 : Comparaison de l'évolution des profils de densité racinaire en présence d'une nappe (Antony, campagne 1993, ----traitement 1, —témoin)

Lors de la mise en place de la contrainte, le système racinaire a été en partie ennoyé. Dès le 4<sup>ème</sup> jour, les profils de densité racinaire se sont nettement différenciés. Nous avons enregistré une régression racinaire dès le 4<sup>ème</sup> jour, elle s'accroît au 11<sup>ème</sup> jour (28 juin). La densité racinaire était réduite pour l'ensemble des points de mesure situés dans la nappe. L'observation était facilitée par des symptômes caractéristiques, en particulier une coloration rosée suivie de nécroses des racines. Les mêmes mécanismes, réduction de la croissance puis régression racinaire, ont été observés dans la couche de sol situé juste au dessus de la nappe. En moyenne, cette couche avait une épaisseur inférieure à 10 cm. Dans les couches supérieures, nous avons enregistré une augmentation significative de la densité racinaire sur le traitement par rapport au témoin.

Nous avons comparé l'évolution des densités racinaires moyennes pour chaque horizon d'une épaisseur de 10 cm (Figure 3.3).

Dans l'horizon de surface (0-10cm), la densité racinaire n'a pas été modifiée de façon significative quelle que soit la hauteur de nappe (Figure 3.3a). Lors de la mise en place des contraintes elle était proche de son maximum ce qui rendait difficile l'observation d'une augmentation de la densité due à l'excès d'eau. En revanche, la densité racinaire, durant les contraintes, était supérieure à celle du témoin dans les horizons sous-jacents (10-30cm) (Figure 3.3b, Figure 3.3c et Figure 3.3d pour les traitements 1,3 et 4, contrainte 1). Ces horizons n'étaient pas engorgés d'eau. La densité racinaire augmentait dès les premiers jours de la contrainte.

D  
e  
n  
s  
i  
t  
é

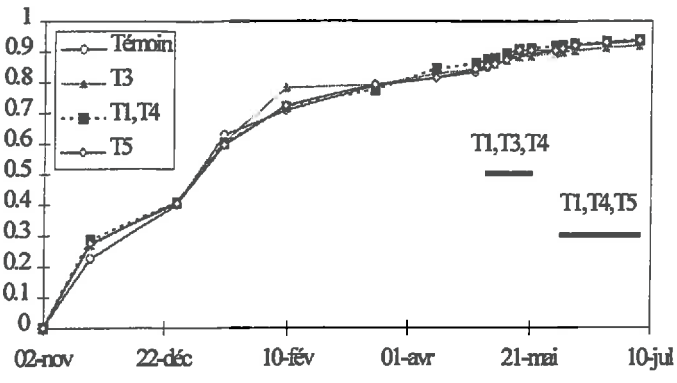


Figure 3.3a : Profondeur du sol 0.1m

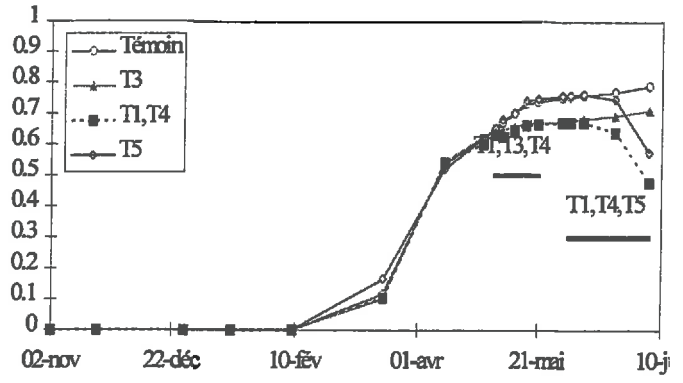


Figure 3.3e : Profondeur du sol 0.5m

r  
a  
c  
i  
n  
a  
i  
r  
e

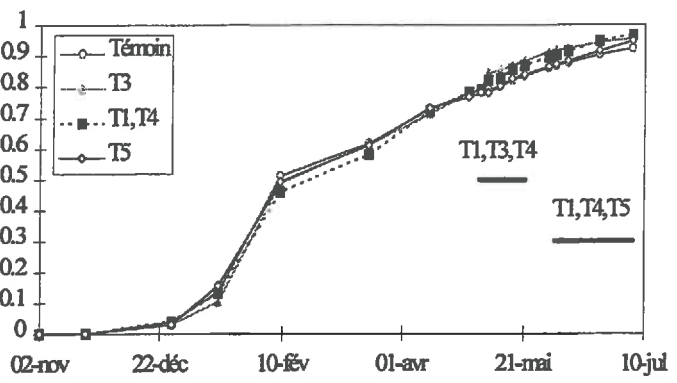


Figure 3.3b : Profondeur du sol 0.2m

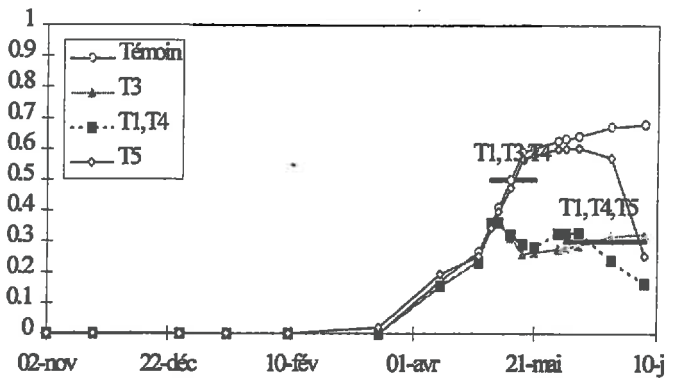


Figure 3.3f : Profondeur du sol 0.6m

m  
o  
y  
e  
n  
n  
e  
p  
a  
r

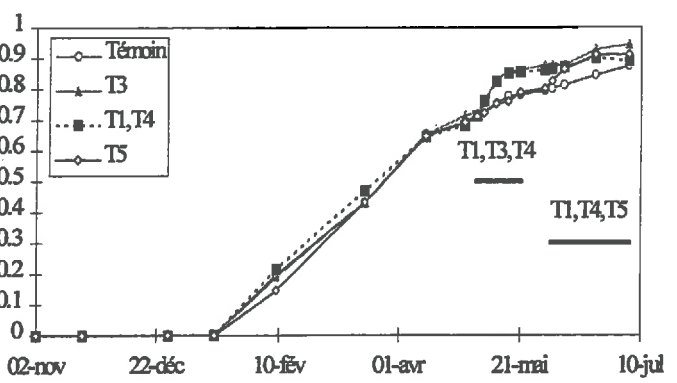


Figure 3.3c : Profondeur du sol 0.3m

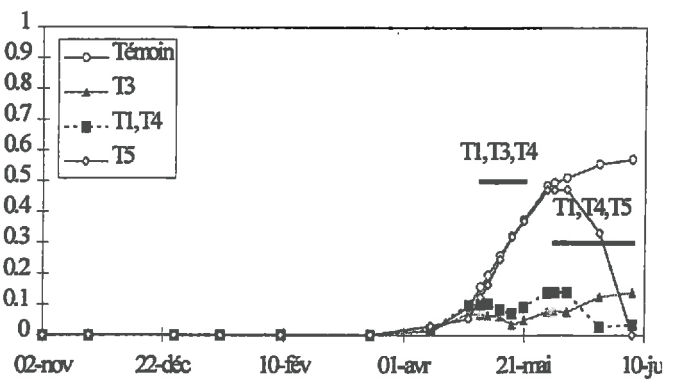


Figure 3.3g : Profondeur du sol 0.7m

h  
o  
r  
i  
z  
o  
n

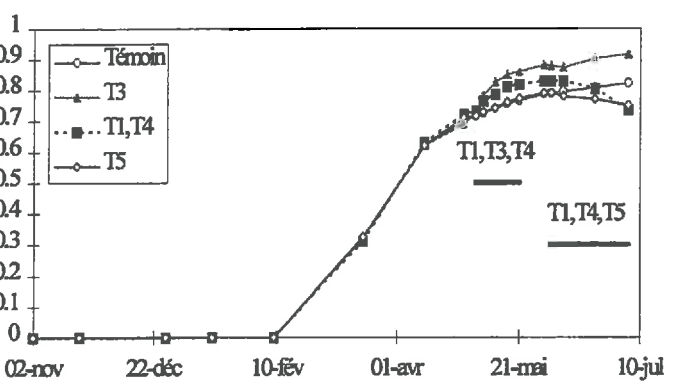


Figure 3.3d : Profondeur du sol 0.4m

Les traits horizontaux représentent la profondeur de nappe en mètre pour chacun des traitements 1, 3, 4 et 5 respectivement : T1, T3, T4 et T5.

Figure 3.3 : Evolution de la densité racinaire par horizon pour les différents traitements, site expérimental d'Antony, campagne 1993-1994

Dans l'horizon situé juste au dessus la nappe (40-50cm) la densité racinaire moyenne était réduite par rapport au témoin (Figure 3.3d pour les traitements 1,4 et 5, contrainte 2). Même si les mesures piézométriques n'indiquaient pas la présence d'une nappe dans cet horizon, il semble qu'il soit défavorable à la croissance racinaire. Pour les horizons ennoyés, l'accroissement racinaire a été stoppé dès les premiers jours de la contrainte puis nous avons observé une régression racinaire (Figure 3.3e et Figure 3.3f).

Comme nous l'avons mis en évidence précédemment (Chapitre II, § 2), l'horizon de sol situé au dessus la nappe est défavorable à la croissance racinaire. La comparaison, entre témoin et traitements, des valeurs de l'accroissement journalier en densité, par couche de sol d'une épaisseur de 2 cm a permis de mettre en évidence cet horizon et d'estimer son épaisseur,  $w$ . Le rapport des accroissements journaliers de densité entre les traitements et le témoin vaut :

$$I_d(z) = \frac{\Delta d(z)_{\text{traitement}}}{\Delta d(z)_{\text{témoin}}} \quad (\text{éq. 3.2})$$

où  $I_d(z)$  est le rapport des accroissements de densité racinaire entre les traitements et le témoin par couche de sol d'épaisseur 2 cm.

Au cours de la contrainte 1, le traitement 5 peut être considéré comme une répétition du témoin. Ainsi nous avons calculé  $I_d(z)$  en prenant, au numérateur de l'équation 3.2, l'accroissement calculé sur les traitements ou une répétition du témoin. La moyenne des valeurs obtenues en considérant l'ensemble des données de cartographies tous traitements confondus est présentée sur la Figure 3.4.

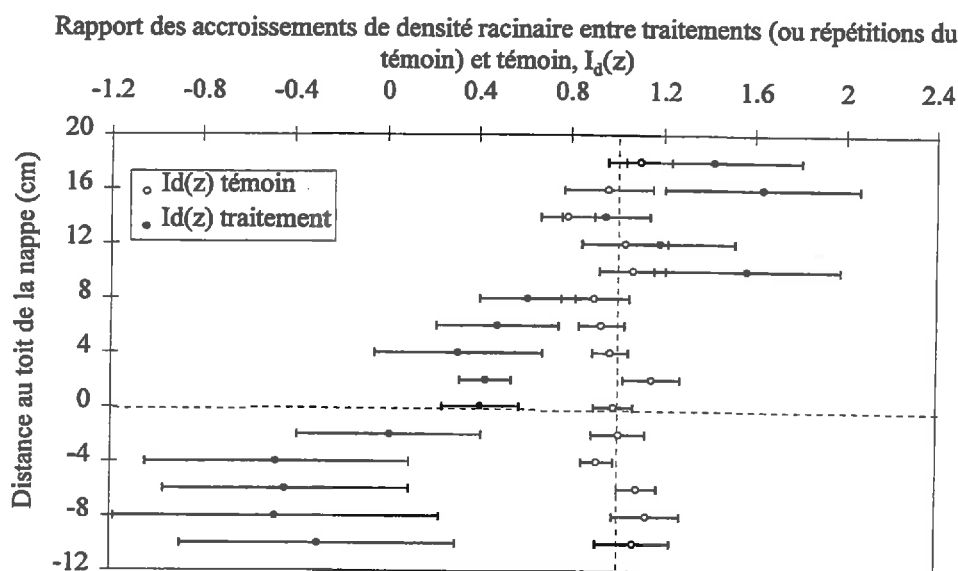


Figure 3.4 : Relation entre distance au toit de la nappe et rapport des accroissements de densité,  $d(z)$ , entre les traitements et le témoin, site expérimental d'Antony, campagne 1993-1994, (les distances sont positives au dessus du toit de la nappe)

En moyenne, la franche capillaire a une épaisseur de  $5.60 \pm 1.51$  cm. Les valeurs minimales et maximales observées sont respectivement égales à 2 et 10 cm (29 observations).

### ➤ Sensibilité de la plante à une contrainte d'engorgement

La sensibilité de la plante à une contrainte peut être mesurée à partir de la comparaison entre une situation « potentielle » et des situations « limitantes ». Nous suivons, ainsi, l'évolution du rapport de l'accroissement racinaire en profondeur (éq. 3.2) et en densité (éq. 3.3) entre traitements et témoin. Dans ce cas, le système racinaire est considéré dans son ensemble sans distinction par horizon. Ces rapports valent respectivement :

$$I_z = \frac{(\Delta \text{zrac})_{\text{traitement}}}{(\Delta \text{zrac})_{\text{témoin}}} \quad (\text{éq. 3.3})$$

$$I_d = \frac{\Delta \left( \int_0^{z_{\text{max}}} d(z) dz \right)_{\text{traitement}}}{\Delta \left( \int_0^{z_{\text{max}}} d(z) dz \right)_{\text{témoin}}} \quad (\text{éq. 3.4})$$

où  $I_z$  et  $I_d$  sont les valeurs du rapport des accroissements entre le traitement et le témoin respectivement pour l'accroissement en profondeur et en densité et  $z_{\text{max}}$  est la profondeur maximale d'enracinement.

Les accroissements racinaires, en profondeur et densité, sont calculés entre les observations au temps  $t$  et  $t+\Delta t$ . La situation "limitante" est à la fois dépendante de la hauteur de nappe, de sa durée de présence et de l'architecture du système racinaire. Nous devons composer avec des hauteurs de nappes distinctes (nappe à 50, 40 et 30 cm en dessous de la surface du sol), des proportions de racines ennoyées différentes (définissant la variable de stress, § 2) et des durées d'imposition des contraintes variables (3, 5, 8, 13, 18 et 32 jours). Lors de l'application des différentes contraintes, certains traitements, absence de la contrainte 1 (traitement 5) et absence de la contrainte 2 (traitement 3) peuvent être utilisées comme des répétitions du témoin. Les données sont synthétisées dans le Tableau 3.1.

Variable	Intensité, SEE(%)		Durée (j)		$I_z$ ou $I_d$		Nombre d'observations
	max.	min.	max.	min.	max.	min	
Profondeur	56.4	0	32	0	1.4	-1.6	108
Densité	56.4	0	32	0	1.4	-1.1	100

Tableau 3.1 : Synthèse des résultats expérimentaux sur les cartographies racinaires, site expérimental d'Antony, campagnes 1993 et 1993-1994

La variable de stress, SEE(%), a été définie page 81 (éq 2.3). Nous l'avons calculée entre deux périodes de mesures espacées en moyenne de 7 jours. Afin de mettre en évidence l'effet combiné de l'intensité (SEE(%)) et de la durée de la contrainte sur la croissance racinaire, nous avons représenté l'ensemble des résultats expérimentaux sous forme de carte (Figure 3.5 et Figure 3.6). La surface interpolée est obtenue par la méthode de la "courbure minimale".

La réponse de la plante à une contrainte d'engorgement est une réduction de la croissance racinaire. La courbe de croissance nulle est observée pour des intensités de contrainte relativement faibles. La vitesse de régression est d'autant plus grande que SEE(%) est grande (Figure 3.5). L'allure des lignes d'iso-valeurs traduit la relative indépendance des valeurs du rapport de l'accroissement en profondeur avec la durée de la contrainte. Cette observation rejoint celle réalisée sur la Figure 2.5 de la page 75. Après 2 jours de présence de la nappe il s'instaure un état d'équilibre. Au delà de 48h, le caractère contraignant lié à la nappe n'évolue plus avec sa durée de présence.

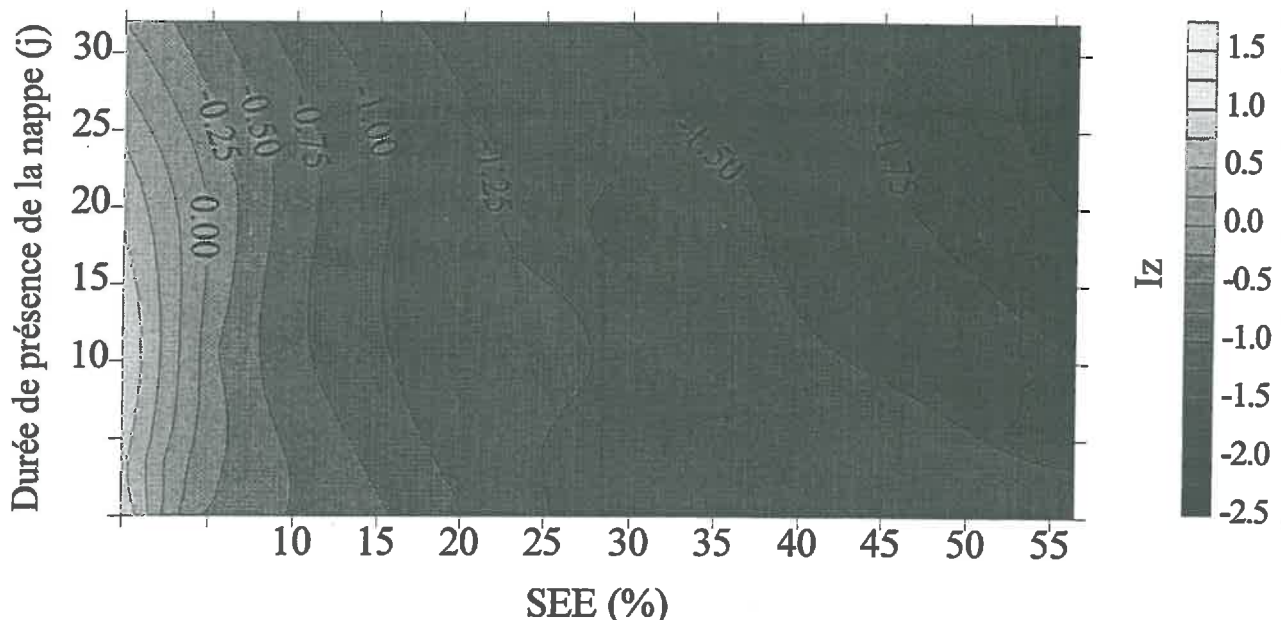


Figure 3.5 : Surface de réponse du ratio d'approfondissement racinaire,  $I_r$ , en fonction de l'intensité et de la durée de la contrainte, données expérimentales, site d'Antony, campagnes 1993 et 1993-1994 (l'intensité des colorations représente le rapport des accroissements racinaires en profondeur)

La densité racinaire paraît moins sensible à l'excès d'eau que la croissance en profondeur. La courbe de croissance nulle est repoussée vers des intensités de contrainte plus fortes (Figure 3.6). L'indice  $I_d$  est intégrateur d'un ensemble de mécanismes mis en évidence à partir de l'observation des profils de densité racinaire. La capacité de la plante à augmenter la densité racinaire dans les horizons de sol non engorgés modifie la perception de sa sensibilité.

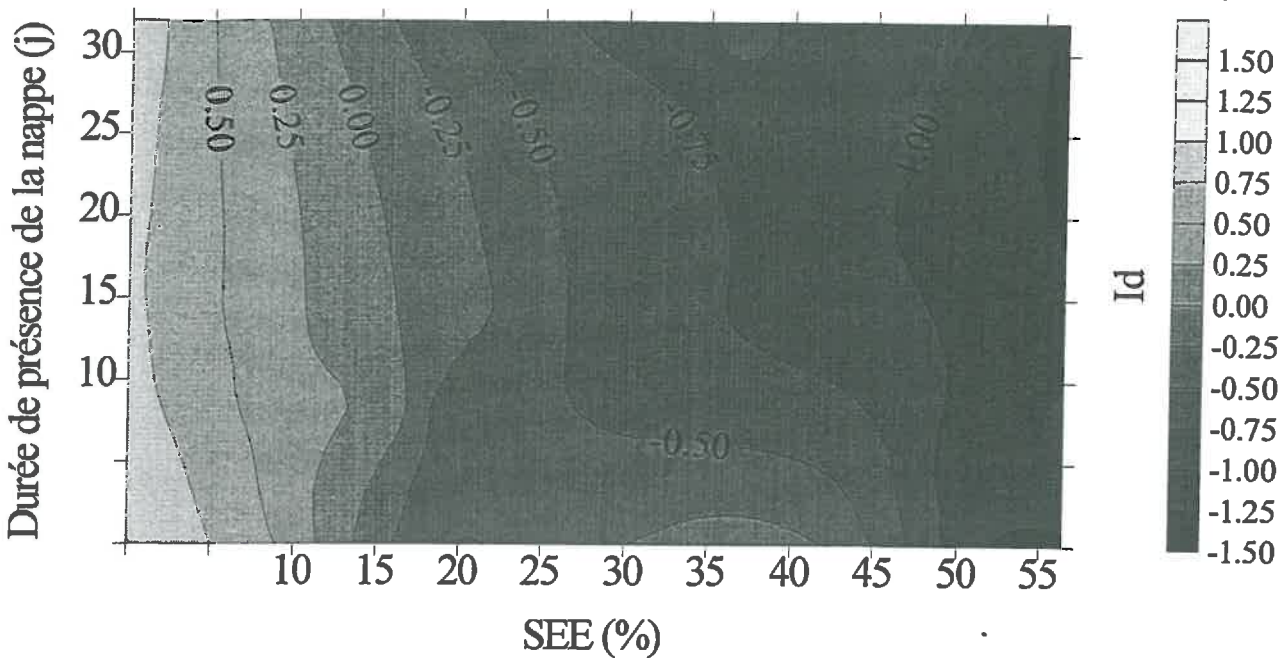


Figure 3.6 : Surface de réponse du ratio d'accroissement de densité racinaire,  $I_d$ , en fonction de l'intensité et de la durée de la contrainte, données expérimentales site d'Antony, campagnes 1993 et 1993-1994

Les valeurs de  $I_d$  supérieures à 1 pour des contraintes non nulles montrent que la compensation peut jouer un rôle important. La plante tend à conserver sa capacité d'absorption en augmentant le nombre de sites d'absorption dans les parties du sol non ennoyées. La perte de la dominance apicale peut être à l'origine d'une augmentation du nombre de ramifications le long de l'axe racinaire. On atteint, ici, les limites de notre suivi expérimental. Le maillage de 2 x 2 cm permettant de noter l'absence ou la présence de racines n'est pas assez fin pour aller au delà de cette interprétation. De plus, l'enracinement d'une plante peut-être en quantité surabondante par rapport à ses besoins ; le travail d'absorption serait partagé entre les différentes racines sans qu'aucune n'atteigne son potentiel (Callot et al, 1982). L'analyse des données montre une corrélation non négligeable entre SEE(%) et la durée de présence de la nappe. Cette corrélation peut être due aux conditions expérimentales en cuves. Nous n'avons pas d'autres éléments d'explication (Tableau 3.2).

n = 108	Accroissement en profondeur		
Coef. cor.	$I_z$	SEE(%)	Durée
$I_z$		-0.907	-0.725
SEE(%)			0.580
Durée			

n = 100	Accroissement en densité		
Coef. cor.	$I_d$	SEE(%)	Durée
$I_d$		-0.959	-0.643
SEE(%)			0.571
Durée			

Tableau 3.2 : Matrice de corrélation entre durée, intensité de la contrainte,  $I_z$  et  $I_d$  ( n est le nombre d'observations)

L'analyse des données sous forme graphique conduit, lorsque l'on cherche à expliquer les variables  $I_z$  et  $I_d$ , à retenir comme variable explicative  $SEE(\%)$  (Figure 3.7 et Figure 3.8).

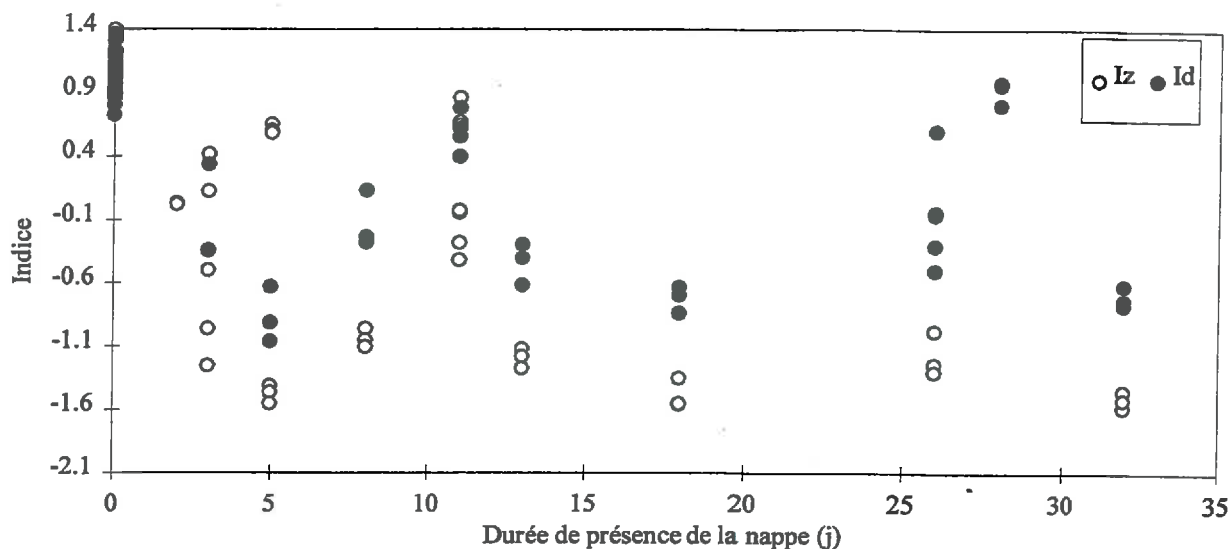


Figure 3.7 : Relation entre valeurs des indices  $I_z$  et  $I_d$  et durée de présence de la nappe, site expérimental d'Antony, campagnes 1993 et 1993-1994

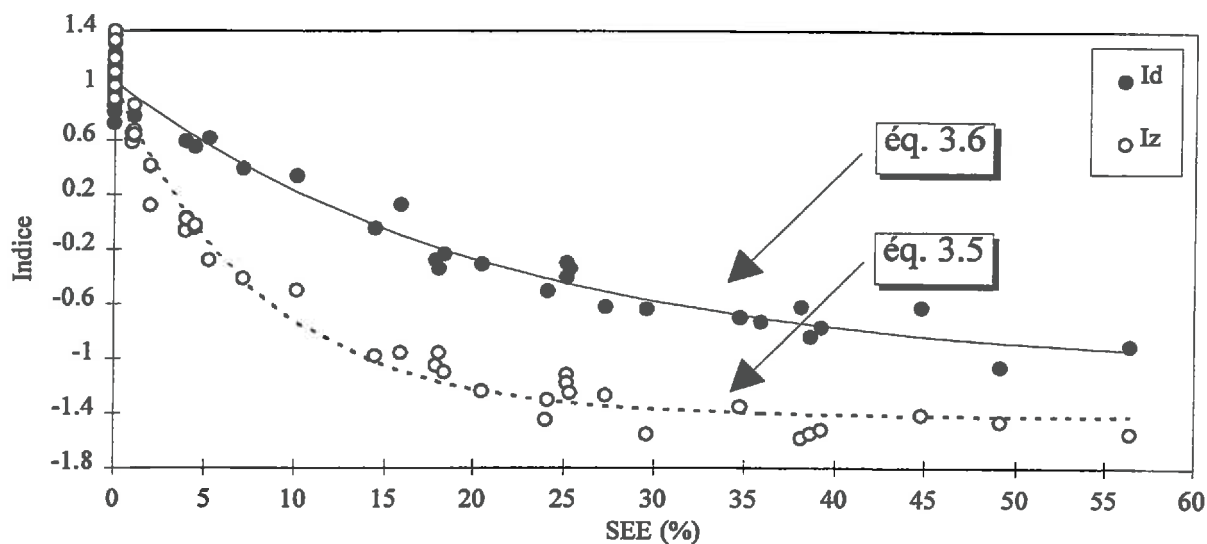


Figure 3.8 : Relation entre valeurs des indices  $I_z$  et  $I_d$  et  $SEE(\%)$ , site expérimental d'Antony, campagnes 1993 et 1993-1994

• **Formalisation des effets d'un engorgement sur la croissance racinaire**

La réduction de l'accroissement du système racinaire, en profondeur et densité, peut être approchée par les formalisations suivantes (Figure 3.8) :

$$\Delta z_{rac_{traitement}} = \Delta z_{rac_{témoin}} * (\alpha e^{-\beta SEE(\%)} + \text{Constante}) \tag{éq. 3.5}$$

$$\Delta \left( \int_0^{z \max} d(z) dz \right)_{\text{traitement}} = \Delta \left( \int_0^{z \max} d(z) dz \right)_{\text{temoin}} * (\alpha e^{-\beta \text{SEE}(\%)} + \text{Constante}) \quad (\text{éq. 3.6})$$

Le calage des paramètres est obtenu en minimisant la somme des écarts au carré entre valeurs observées et prédites de  $I_z$  et  $I_d$ . Les résultats du calage des équations 3.6 et 3.7 sont présentés dans le Tableau 3.3 et le Tableau 3.4 respectivement pour l'approfondissement et l'accroissement en densité.

n = 108	r <sup>2</sup> = 0.988	Estimation de l'écart-type résiduel = 0.100
Paramètre		Estimé
Constante		-1.425
α		2.428
β		0.125

Tableau 3.3 : Résultat de la régression multiple, variable à expliquer  $I_z$  (n est le nombre d'observation, r<sup>2</sup> le coefficient de détermination)

n = 100	r <sup>2</sup> = 0.971	Estimation de l'écart-type résiduel = 0.108
Paramètre		Estimé
Constante		-1.076
α		2.106
β		0.048

Tableau 3.4 : Résultat de la régression multiple, variable à expliquer  $I_d$  (n est le nombre d'observation, r<sup>2</sup> le coefficient de détermination)

La comparaison entre valeurs observées et valeurs estimées montre une bonne adéquation des résultats du modèle pour l'approfondissement et l'accroissement racinaire lorsqu'il existe une contrainte (Figure 3.9 et Figure 3.10). Les différences observées pour une contrainte nulle sont expliquées par la variabilité des observations. Pour des contraintes fortes, le modèle sous-estime la sensibilité de la plante. La répartition des résidus est homogène pour la prédiction de l'approfondissement racinaire. En revanche, pour les prédictions de  $I_d$ , l'analyse des résidus montre une prédiction moins bonne pour des valeurs fortes de contrainte.



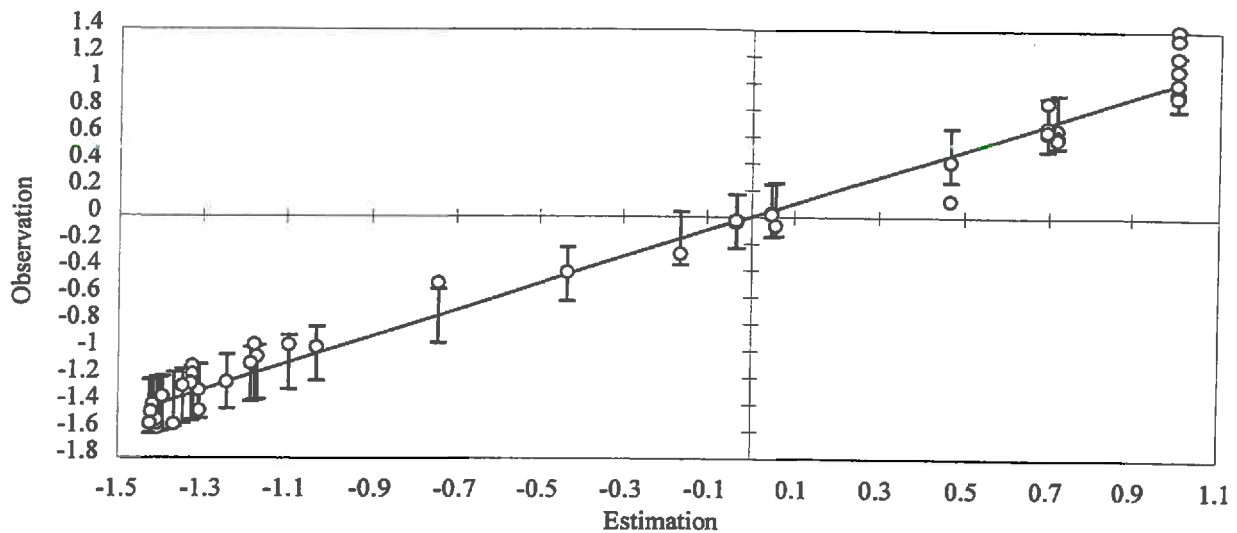


Figure 3.9 : Valeurs de l'approfondissement racinaire journalier observées et prédites par le modèle avec un intervalle de confiance de 95% sur les prédictions

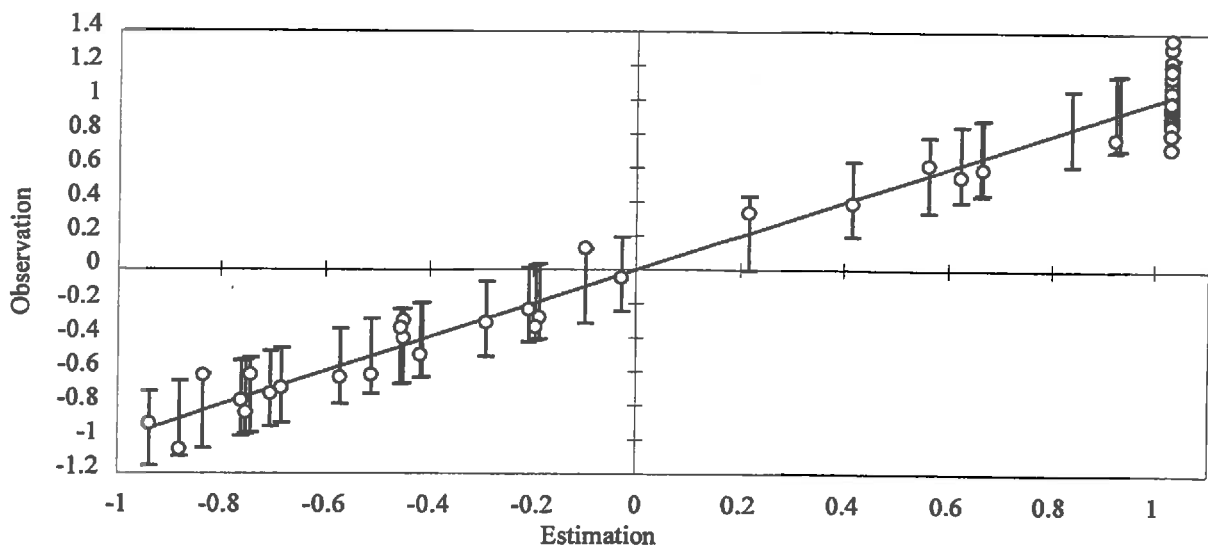


Figure 3.10 : Valeurs de l'accroissement journalier de densité racinaire observées et prédites par le modèle avec un intervalle de confiance de 95 % sur les prédictions

Nous vérifions par ailleurs les limites en zéro et à l'infini pour les formalisations proposées (Tableau 3.5). Théoriquement la limite lorsque SEE(%) tend vers 0 doit être égale à 1.

	SEE(%) → 0	SEE(%) → ∞
$I_z = \alpha e^{-\beta \text{SEE}(\%)} + \text{Constante}$	$= \alpha + \text{Constante} = 1.003$	$= \text{Constante} = -1.425$
$I_d = \alpha e^{-\beta \text{SEE}(\%)} + \text{Constante}$	$= \alpha + \text{Constante} = 1.030$	$= \text{Constante} = -1.076$

Tableau 3.5 : Etude des limites en zéro et l'infini des équations 3.5 et 3.6

- **Conclusion**

De cette première étape, nous pouvons conclure que la nappe constitue un obstacle à l'enracinement. Plusieurs enseignements peuvent être tirés :

- la présence de la nappe modifie l'allure du profil de densité racinaire ; deux mécanismes sont mis en évidence, une dégénérescence dans les horizons engorgés d'eau lorsque la durée de la contrainte augmente et une compensation dans la zone non saturée ;
- la profondeur de nappe seule n'est pas suffisante pour quantifier la contrainte, la proportion du système racinaire soumis à une asphyxie racinaire apparaît comme le facteur de stress rendant le mieux compte du niveau de contrainte ;
- l'intensité de la contrainte est la variable la plus explicative de la réponse de la plante en terme de croissance racinaire ;
- la formalisation, décroissance exponentielle en fonction de l'intensité de la contrainte, décrit correctement la réduction de l'accroissement en densité et profondeur du système racinaire soumis à une contrainte d'engorgement.

Ces résultats se rapportent à des données acquises dans des conditions particulières de culture et de mode d'imposition de la contrainte. L'objectif du travail de thèse étant de travailler à l'échelle parcellaire nous avons, d'une part, regardé s'il existait, dans des conditions de plein champ, des effets liés à l'excès d'eau sur la croissance racinaire et, d'autre part, vérifié si les mécanismes identifiés étaient comparables. Une fois cette étape franchie, nous avons étudié les conditions d'extrapolation des formalisations obtenues sur cuves, contrainte en régime permanent, à la simulation de la croissance racinaire in situ, contrainte en régime transitoire.

### **3.3 Comparaison de la situation au drain et à l'inter-drain, expérimentation en plein champ**

- **Résultats expérimentaux**

Dans des conditions de plein champ, les fluctuations de la hauteur de nappe dépendent des conditions climatiques et des paramètres hydrodynamiques du milieu. La contrainte hydrique imposée par la hauteur de nappe n'est pas permanente. Sur parcelle drainée deux situations extrêmes peuvent être considérées, la situation à l'inter-drain et la situation au drain. Les conditions pédologiques (texture, structure, densité) peuvent être considérées comme homogènes. En revanche, lors des périodes pluvieuses avec une nappe installée dans le profil de

sol, les conditions hydriques varient entre le drain et l'inter-drain. Les temps de présence de la nappe dans le profil de sol sont plus grandes à l'inter-drain (Figure 1.23b page 36). Les différences observées sur la réponse de la plante peuvent être interprétées en fonction de la présence de la nappe.

En l'absence de nappe (jusqu'au 19 décembre), le suivi de l'accroissement racinaire en profondeur et en densité ne permettait pas de mettre en évidence de différence entre le drain et l'inter-drain. Les indices  $I_z$  et  $I_d$  étaient voisins de 1 (Figure 3.11 et Figure 3.12).

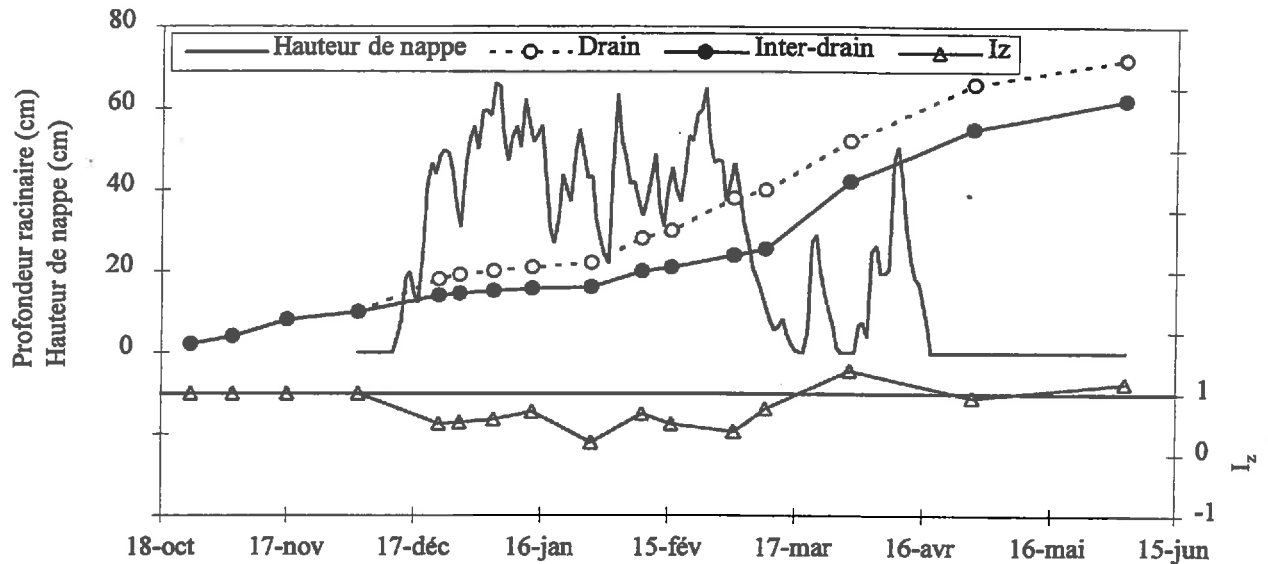


Figure 3.11 : Chronique de hauteurs de nappe à l'inter-drain, de profondeurs racinaires et du rapport de l'accroissement journalier en profondeur entre inter-drain et drain,  $I_z$  site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

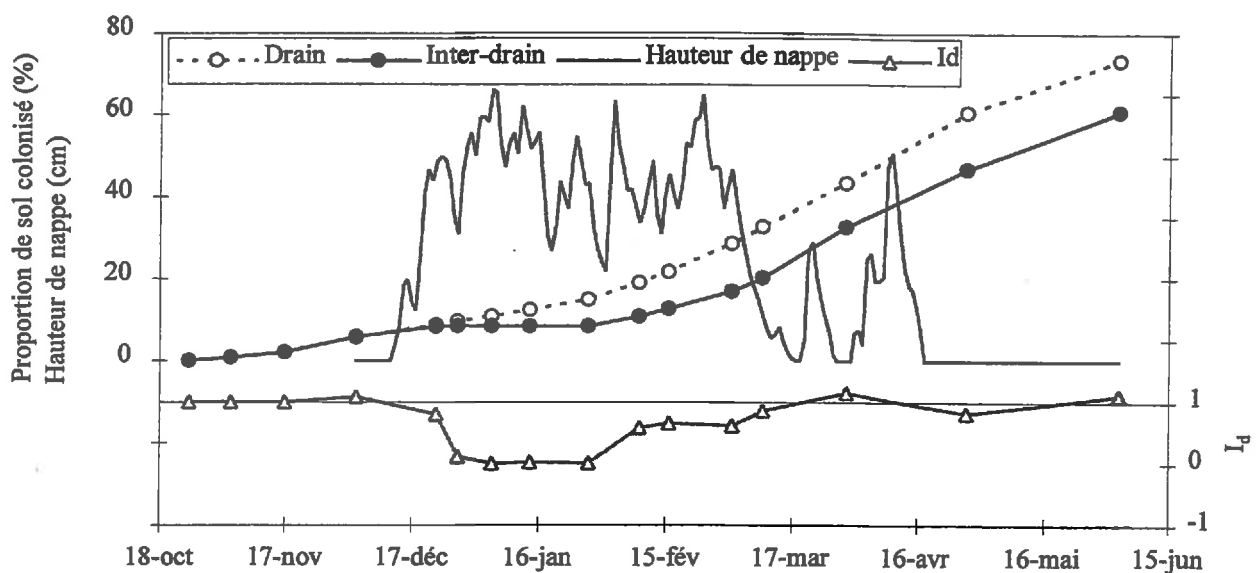


Figure 3.12 : Chronique de hauteurs de nappe à l'inter-drain, de densités racinaires et du rapport de l'accroissement journalier de densité entre inter-drain et drain,  $I_d$  site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994.

Entre les deux situations, les accroissements racinaires se sont différenciés dès l'apparition de la nappe (19 décembre). Les indices  $I_z$  et  $I_d$  étaient inférieurs à 1. Le rapport des accroissements journaliers en profondeur,  $I_z$ , n'était jamais négatif, tout au plus nous observions une réduction de la vitesse d'approfondissement.

Globalement, la colonisation racinaire a été fortement affectée. Nous rejoignons les observations faites sur le système expérimental en cuve, le profil de densité racinaire a été modifié par la présence la nappe (Figure 3.13). Nous avons observé une réduction de la croissance racinaire dans les couches de sol engorgées d'eau. Néanmoins, nous n'avons pas observé de régression. Un élément d'explication peut être apporté en considérant, d'une part, la période d'excès d'eau par rapport au cycle de développement de la plante et, d'autre part, le caractère transitoire de la contrainte. En effet, à la suite d'un épisode pluvieux, le dimensionnement du réseau de drainage et notamment l'écartement entre les files de drains, est calculé de telle sorte que la nappe reste un temps limité dans le compartiment racinaire.

La compensation sur les couches de sol non saturées, telle que nous avons pu la décrire pour les cuves, a été moins nette dans des conditions de plein champ.

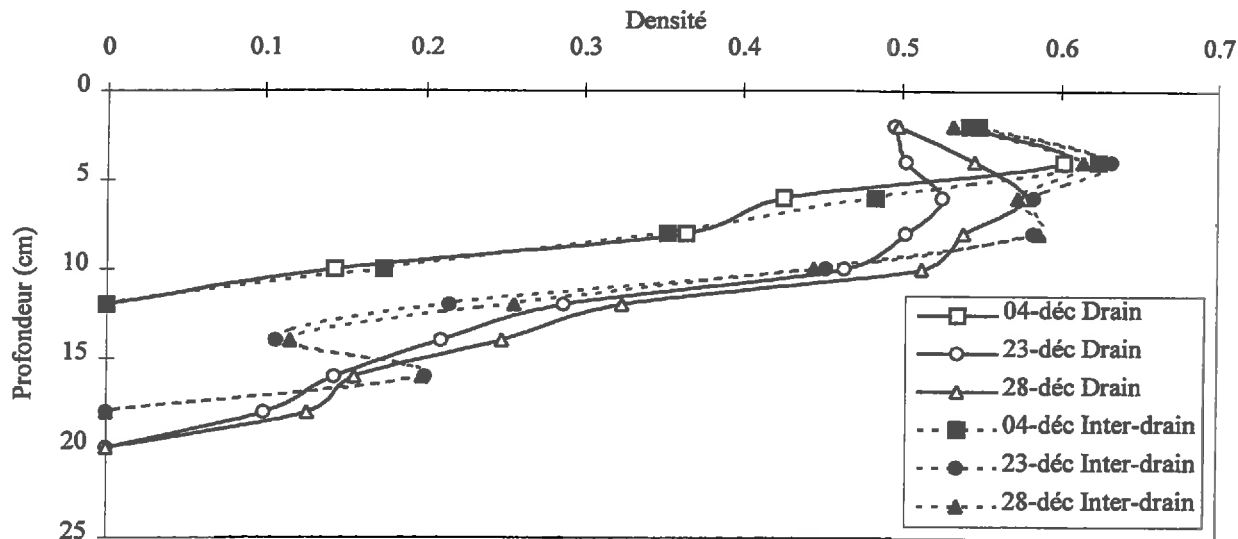


Figure 3.13 : Comparaison de l'évolution des profils de densités racinaires au drain et à l'inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Etant donné le caractère transitoire de la contrainte et le pas de temps d'observation du système racinaire, la relation entre les réductions de l'accroissement racinaire et la variable de stress n'est pas évidente (Figure 3.14). Sur cette figure, la variable de stress représente le pourcentage du système racinaire ennoyé moyen entre deux dates d'observations des profils racinaires, nous l'appellerons  $SEE(\%)_{moy}$ .

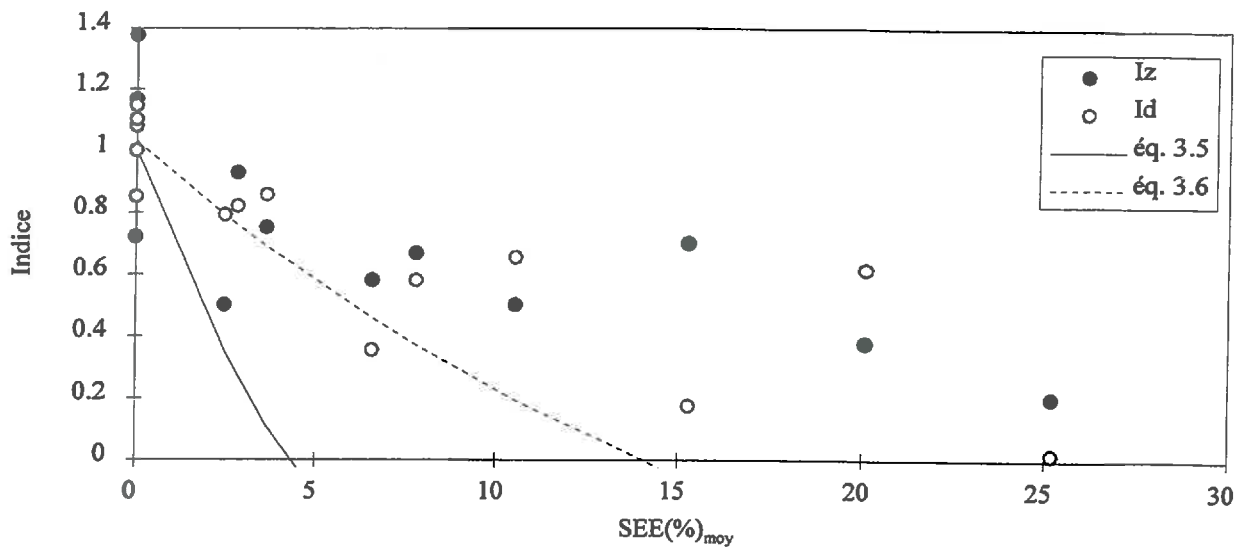


Figure 3.14 : Relation entre rapport des accroissements racinaires journaliers et intensité moyenne de la contrainte hydrique, ( $I_z$  et  $I_d$  sont les rapports entre inter-drain et drain des accroissements racinaires journaliers en profondeur et en densité)

Les corrélations entre variables explicatives et variables à expliquer confirment cette observation (Tableau 3.6).

n = 16	Accroissement en profondeur		
Coef. cor.	$I_z$	SEE(%)	Durée
$I_z$		-0.743	-0.475
SEE(%)			0.445
Durée			

n = 16	Accroissement de densité		
Coef. cor.	$I_d$	SEE(%)	Durée
$I_d$		-0.581	-0.211
SEE(%)			0.445
Durée			

Tableau 3.6 : Matrice de corrélation entre durée, intensité de la contrainte,  $I_z$  et  $I_d$  (n est le nombre d'observation)

• **Formalisation des effets d'un engorgement sur la croissance racinaire**

Entre deux observations, espacées en moyenne d'une semaine, l'intensité de la contrainte varie il devient alors difficile d'identifier et d'interpréter la réponse de la plante à une contrainte donnée. En conséquence, nous nous sommes orientés vers l'utilisation des formalisations construites et calées à partir des résultats obtenus sur cuves lysimétriques en régime permanent. Leurs applications directes aux résultats expérimentaux du terrain ne permettaient pas de décrire correctement la réponse de la plante pour les différentes raisons que nous avons évoquées (Figure 3.14). Nous avons donc calé les paramètres de ces fonctions afin de les adapter aux conditions du terrain.

L'objectif de la démarche était de prédire l'accroissement en profondeur et en densité du système racinaire soumis à une contrainte en régime transitoire et de préciser son mode de calcul. Deux résultats étaient attendus, d'une part, vérifier si la valeur des paramètres des fonctions calées en régime permanent pouvaient être applicables aux résultats expérimentaux obtenus en parcelle drainée, d'autre part, estimer la durée optimale de calcul de la contrainte.

On suppose que l'accroissement du système racinaire au niveau du drain n'est pas influencé par l'excès d'eau. Il représente l'accroissement potentiel du système racinaire. Les données sont reconstituées au pas de temps journalier par interpolation linéaire entre deux observations. Connaissant les valeurs de l'accroissement racinaire en profondeur et densité au niveau du drain et la valeur de l'intensité de la contrainte à l'inter-drain, nous calculons, à partir des équations 3.5

et 3.6, les variables  $z_{rac}$  et  $\int_0^{z_{max}} d(z) dz$  à l'inter-drain.

La variable de stress est obtenue à partir de l'interpolation linéaire des données de profondeur et de densité racinaire mesurées à l'inter-drain entre deux pas de temps. Dans ce cas, l'interpolation linéaire des données mesurées à l'inter-drain a servi uniquement au calcul de l'intensité de la contrainte hydrique. La valeur de  $w$  est identique à celle obtenue en cuve (5.6 cm).

Afin de préciser la prise en compte de la contrainte hydrique en régime transitoire, 4 durées pour le calcul de la variable de stress ont été testées. L'intensité moyenne de la contrainte est calculée en faisant une moyenne glissante pour chacune des durées considérées. Elle est calculée sur des durées de 1, 2, 3, 4 et 5 jours (Figure 3.15).

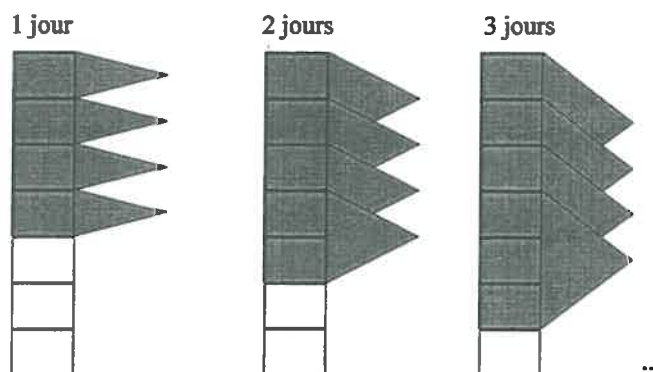


Figure 3.15 : Méthode de calcul de la variable de stress pour des durées variables

Le critère permettant de juger de la qualité des prédictions est la somme des écarts au carré entre valeurs prédites et valeurs observées de la profondeur et de l'intégrale de  $d(z)$  à l'inter-drain, soit 15 observations pour chacune des variables.

L'expression des formalisations utilisées est la même que pour les cuves soit :

$$\alpha e^{-\beta SEE(\%)} + Constante = I_z(\text{ou } I_d) \tag{éq. 3.7}$$

Les équations 3.3 et 3.4 s'écrivent alors :

$$\Delta zrac = \Delta zrac_0 * I_z \tag{éq. 3.8}$$

$$\Delta \left( \int_0^{z_{max}} d(z) dz \right) = \Delta \left( \int_0^{z_{max}} d(z) dz \right)_0 * I_d \tag{éq. 3.9}$$

où l'indice 0 correspond à la situation potentielle de la parcelle, situation au dessus du drain.

Pour  $I_z$ , les paramètres obtenus en régime permanent sont :

$$\alpha = 2.428 \quad \beta = 0.125 \quad Constante = -1.425$$

Pour  $I_d$ , les paramètres obtenus en régime permanent sont :

$$\alpha = 2.106 \quad \beta = 0.048 \quad Constante = -1.076$$

La Figure 3.16 résume la procédure d'ajustement de  $\alpha$  et  $\beta$ .

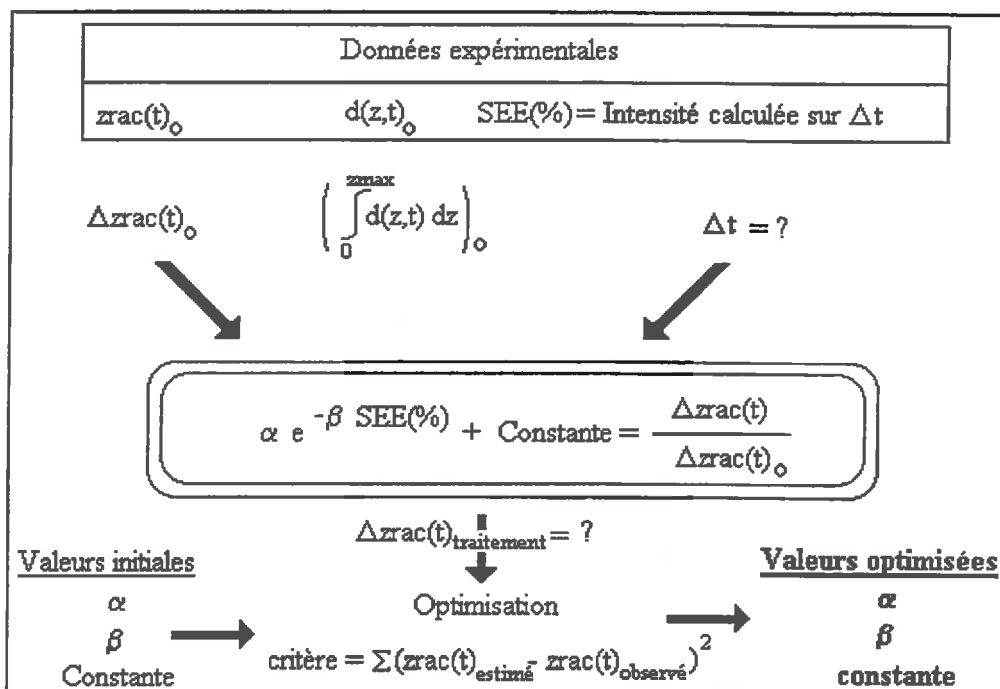


Figure 3.16 : Procédure d'ajustement, exemple pris sur l'approfondissement racinaire

Dans un premier temps, nous avons appliqué les formalisations avec les paramètres initiaux obtenus sur les cuves puis nous avons conduit une optimisation des paramètres sous contrainte. La seule contrainte concerne la limite des fonctions pour  $SEE(\%) = 0$ , elle tend vers la valeur 1. Il vient  $\alpha + Constante = 1$ . Les résultats obtenus en conservant les paramètres du régime permanent puis en optimisant sont synthétisés dans le Tableau 3.7.

	$\Delta t$	Paramètres	Valeur initiale	Critère	Valeur optimisée	Critère
Approfondissement	1	$\alpha$ $\beta$ Constante	2.428 0.125 -1.425	164	2.149 0.151 -1.149	158
	2	$\alpha$ $\beta$ Constante	2.428 0.125 -1.425	212	1.601 0.269 -0.601	149
	3	$\alpha$ $\beta$ Constante	2.428 0.125 -1.425	311	1.353 0.341 -0.353	152
	4	$\alpha$ $\beta$ Constante	2.428 0.125 -1.425	440	1.197 0.378 -0.197	153
	5	$\alpha$ $\beta$ Constante	2.428 0.125 -1.425	620	1.035 0.453 -0.035	155
Accroissement en densité	1	$\alpha$ $\beta$ Constante	2.106 0.048 -1.076	120	2.204 0.177 -1.204	24
	2	$\alpha$ $\beta$ Constante	2.106 0.048 -1.076	87	1.634 0.304 -0.634	19
	3	$\alpha$ $\beta$ Constante	2.106 0.048 -1.076	69	1.400 0.371 -0.400	20
	4	$\alpha$ $\beta$ Constante	2.106 0.048 -1.076	69	1.400 0.371 -0.400	20
	5	$\alpha$ $\beta$ Constante	2.106 0.048 -1.076	48	1.118 0.434 -0.118	23

Tableau 3.7: Résultat de l'application des formalisations aux données expérimentales obtenues sur parcelle drainée

Pour l'approfondissement racinaire, le calcul sur une durée de deux jours de la variable de stress est celui qui donne les meilleurs résultats parmi les durées testées (Figure 3.17).



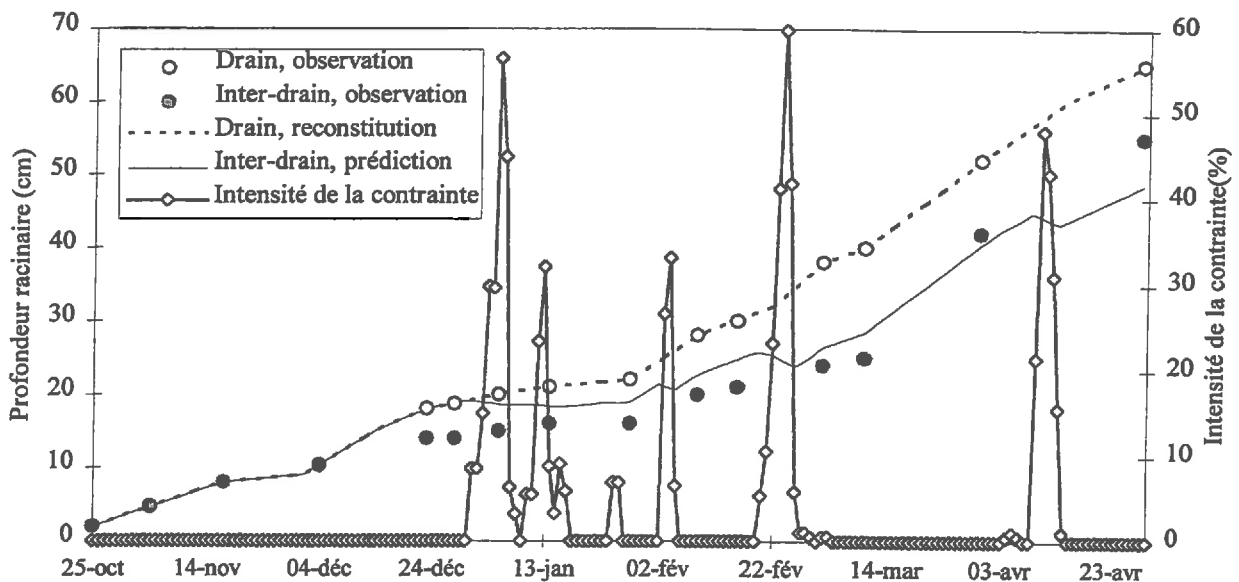


Figure 3.17 : Chroniques observées et estimées de profondeur racinaire au drain et à l'inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Pour l'accroissement de densité, la prédiction s'améliore nettement avec l'optimisation. Les meilleures prédictions sont également obtenues pour un calcul de la contrainte sur 2 jours (Figure 3.18).

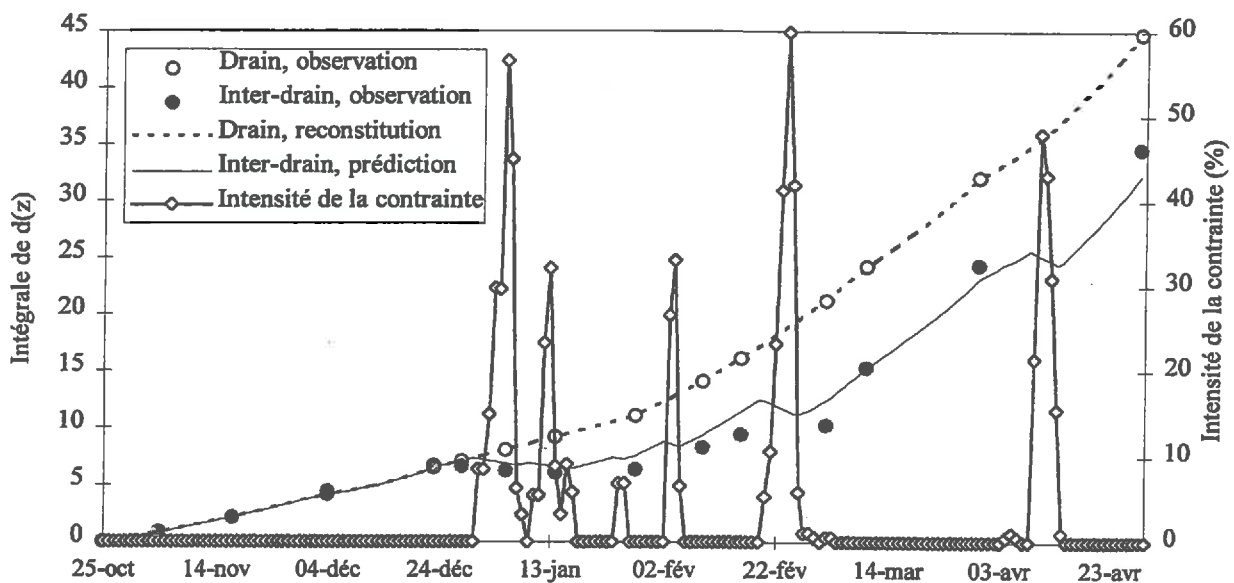


Figure 3.18 : Chroniques observées et prédites de l'intégrale de  $d(z)$  au drain et à l'inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

• Discussion

Qu'elle soit conduite sur la profondeur ou la densité racinaire, l'optimisation des paramètres obtenus en cuves va dans le sens d'une augmentation des effets de la contrainte pour les faibles intensités, la valeur du paramètre  $\beta$  est considérablement augmentée. Etant donné le caractère transitoire de la contrainte, l'effet des faibles contraintes se trouve amplifié. En

revanche, l'effet des fortes contraintes est réduit. Les limites à l'infini sont plus faibles. La contrainte d'engorgement n'étant pas permanente, les conditions de réalimentation en oxygène sont plus favorables. Pour des intensités de contraintes équivalentes la contrainte est alors moins forte.

Un élément d'explication peut être apporté en considérant le mode d'application de la contrainte. Sur cuves lysimétriques, la contrainte est maintenue constante par des alimentations latérales. Il existe une nette différenciation entre la zone saturée et la zone non saturée. En revanche, sur le terrain, la contrainte est due à un apport pluviométrique à la surface du sol. Le transfert de l'eau vers la nappe se fait par infiltration et déplacement d'un front d'humectation. Il n'existe pas à proprement parler, ou seulement en régime de tarissement non influencé par les précipitations, de zone non saturée. La compensation telle que nous avons pu la décrire, sur le système expérimental en cuves lysimétriques, est moins nette.

Un autre élément à considérer est la période du cycle sur laquelle l'excès d'eau est intervenu. Sur les cuves, les contraintes ont été imposées tardivement, en revanche, sur le terrain, les contraintes d'engorgement sont plus précoces. Or, selon les phases du cycle, la vitesse de croissance racinaire est variable, on peut donc s'attendre à ce que la réponse à un excès soit différente.

La durée pendant laquelle la contrainte est prise en compte permettant au mieux d'expliquer la réponse de la plante est de deux jours. Une contrainte a un effet sur la croissance de la plante le jour même de son apparition et le lendemain. Ainsi à la suite d'une contrainte au jour  $j$ , si les conditions redeviennent favorables à  $j+1$ , la plante retrouve son niveau de croissance potentielle à  $j+2$ . Le nombre de données disponibles étant limité et l'approche relativement grossière, il devient difficile d'interpréter ce résultat en terme de rythme biologique et de dynamique de réponse de la plante à une contrainte d'engorgement en eau du sol. Néanmoins, cette approche permet de décrire correctement l'accroissement du système racinaire en condition d'excès d'eau. Une validation sur des données expérimentales acquises dans des conditions pédologiques et climatiques variées permettra de juger de la robustesse de l'approche et peut-être de fournir des éléments d'interprétation.

### 3.4 Conclusion

L'analyse des résultats obtenus en cuves lysimétriques a permis de mettre en évidence la sensibilité de la plante à une contrainte d'engorgement en eau du sol. La variable de stress retenue pour quantifier la contrainte d'excès, "pourcentage du système racinaire ennoyé" permet

d'expliquer la réponse de la plante. Une fonction exponentielle à deux paramètres décrit la réduction de l'accroissement racinaire en profondeur et en densité selon l'intensité de la contrainte. Cette fonction est calée sur les résultats expérimentaux .

Les résultats expérimentaux obtenus sur parcelle drainée montrent qu'il existe une contrainte d'engorgement en eau du sol lorsque l'on se rapproche de l'inter-drain. L'application des fonctions stress obtenues en cuves a permis de préciser les conditions de calcul de la contrainte en condition au champ. La durée de prise en compte de la contrainte hydrique permettant de décrire au mieux la réponse de la plante est de deux jours. Il est difficile de donner une interprétation à ce résultat. Le calage des fonctions sur les résultats de plein champ a conduit à une nouvelle série de paramètres. En raison du caractère transitoire de la contrainte et du mode de calcul de son intensité, l'optimisation des paramètres va dans le sens d'une augmentation des effets de la contrainte sur la croissance racinaire pour les faibles intensités de contrainte et une diminution pour les fortes intensités. La variable de stress "pourcentage du système racinaire ennoyé" permet d'expliquer correctement l'accroissement racinaire en condition d'excès d'eau.

Les fonctions stress construites et calées à partir des résultats expérimentaux décrivent les modifications de la dynamique de croissance racinaire mais ne traduisent pas l'effet d'un excès d'eau sur la croissance globale de la culture. Pour nos expérimentations, celle-ci est estimée à partir des mesures de biomasse. L'étude de la sensibilité de la plante en terme d'accumulation de biomasse est une étape supplémentaire vers l'intégration des effets d'un excès d'eau sur la croissance de la culture.

#### 4. EXCES D'EAU ET ACCUMULATION DE BIOMASSE

L'expression du potentiel de croissance d'une culture dépend de l'action des facteurs pédoclimatiques au cours des processus qui conduisent à la production d'organes récoltables. Ces processus sont l'interception du rayonnement, la conversion du CO<sub>2</sub> fixé en biomasse et la répartition de la biomasse produite vers les organes de la plante (Figure 4-1).

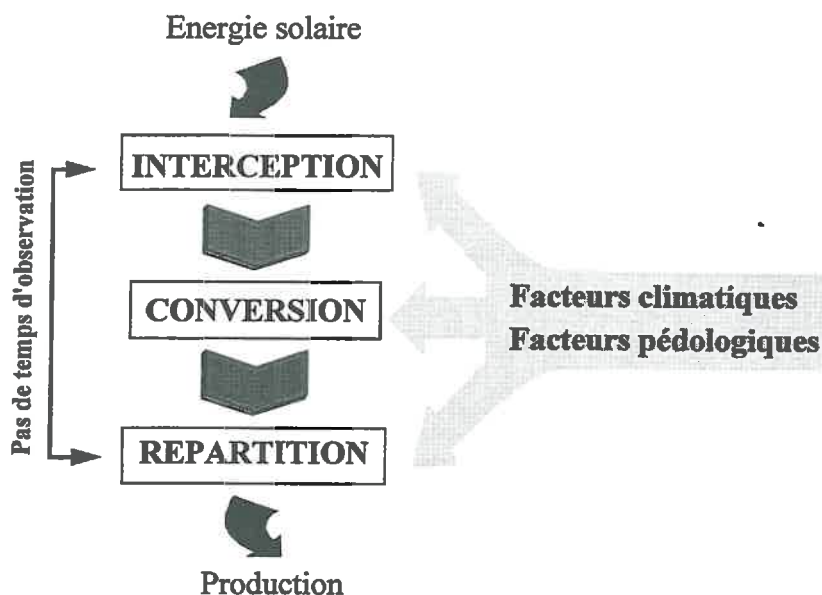


Figure 4-1 : Schématisation des mécanismes de production de grains pour une culture

L'interception du rayonnement par le couvert végétal dépend des propriétés optiques du système sol-couvert végétal (réflexion, transmission) et des caractéristiques géométriques du couvert végétal (efficacité d'absorption ou d'interception). Au cours du cycle de la culture, la production de matière sèche dépend de l'énergie totale interceptée sous forme de rayonnement (Biscoe, 1977). La conversion est la transformation du CO<sub>2</sub> fixé en structure végétale donc en croissance d'organes. La répartition de la biomasse est la fonction par laquelle la totalité des assimilats disponibles pour la croissance est répartie entre les feuilles, les tiges, les racines et les organes de stockage. C'est grâce à cette fonction que se constitue le rendement à la récolte.

L'analyse des effets d'un excès d'eau sur l'élaboration du rendement justifie une étude sur les processus de photosynthèse et d'accumulation de biomasse (Chapitre II, § 1). En effet dans les conditions agricoles, nous avons vu que l'excès d'eau intervenait tôt dans le cycle, au moment où les processus élémentaires sont très importants. Nous analysons l'effet de l'excès d'eau sur l'accumulation de la biomasse à partir de nos résultats expérimentaux et dégageons des formalisations permettant de décrire la réponse de la plante à une telle contrainte.

## 4.1 Effet d'un excès sur l'accumulation de biomasse

La mise en évidence de l'effet d'un engorgement en eau du sol sur l'accumulation de biomasse repose sur l'analyse de données expérimentales de photosynthèse nette, de surface foliaire et de masse de matière sèche. Ces mesures ont été réalisées en plein champ sur parcelle drainée (site expérimental d'Arrou). On distingue deux traitements sur une même parcelle, sans contrainte, situation au drain et avec contrainte, situation à l'inter-drain. Des mesures de photosynthèse et de surface foliaire ont également été réalisées sur les cuves lysimétriques.

La photosynthèse nette dépend du rayonnement incident, du LAI, de la température, de la quantité d'azote dans les feuilles et des variables de stress dû au déficit hydrique ou à l'excès d'eau (Saugier, 1983).

Les analyses de la teneur en azote des feuilles à un stade où la plante était visiblement stressée ne montrent pas de différences significatives entre la situation au drain et à l'inter-drain (Tableau 4.1). Les teneurs en azote mesurées dans les feuilles ne semblent pas constituer un facteur limitant de l'activité photosynthétique. Pour les plantes en  $C_3$ , à partir d'une teneur en azote foliaire de  $40 \text{ mg g}^{-1}$ , l'activité photosynthétique est optimale (Figure 4-2). La teneur en azote mesurée dans les feuilles est de  $45 \text{ mg g}^{-1}$  ( $0.045 \text{ kg N Kg}^{-1}$  de matière sèche). Cette teneur nous renvoie à des niveaux d'activité photosynthétique proches du maximum présenté sur cette Figure.

	Drain	Inter-drain
Azote Kjeldahl ( $\text{mg g}^{-1}$ )	45.7	44.5

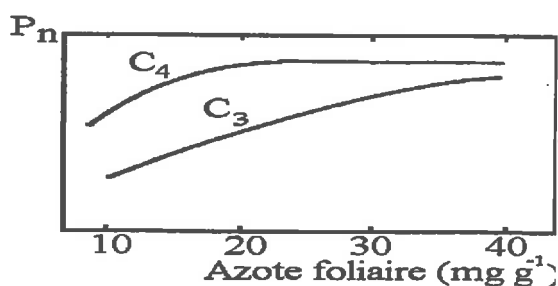


Tableau 4.1 : Résultats des analyses sur feuilles, prélèvements réalisés au stade début tallage, site expérimental d'Arrou, parcelle 1

Figure 4-2 : Schématisation de l'action de concentration en azote des feuilles sur photosynthèse nette,  $P_n$  (d'après Saugier, 1983)

Sur la période hivernale, pour la campagne 1993-1994, les contraintes liées à un déficit hydrique sont absentes et nous conduisent à négliger ses effets pour la période considérée. Il reste donc l'effet de l'excès d'eau que nous cherchons à mettre en évidence. Dans ce cas la variable de stress est SEE(%) (voir Chapitre II, § 3).

• **Résultats expérimentaux et interprétation**

Pour la photosynthèse, sur tout le cycle de développement de la plante, nous disposons d'une dizaine de jours de données dans des conditions d'éclairement, de LAI, de températures et de contraintes hydriques variables (Tableau 4.2).

		Température (°C)	Rayonnement ( $\mu\text{moles de photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	LAI	Photosynthèse. nette ( $\mu\text{moles de CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	SEE(%)
Terrain n = 33	min.	2.0	0	0.12	-1.41	0
	max.	19.0	666	3.50	7.75	25
Cuves n = 92	min.	4.2	0	0.21	-1.42	0
	max.	26.7	1550	6.10	21.1	28

Tableau 4.2 : Synthèse des données de photosynthèse nette et des conditions de mesures (n est le nombre d'observations, max. et min. représentent les valeurs maximales et minimales de chacune des variables mesurées)

Les données recueillies sont présentées, toutes conditions confondues sur la Figure 4-3.

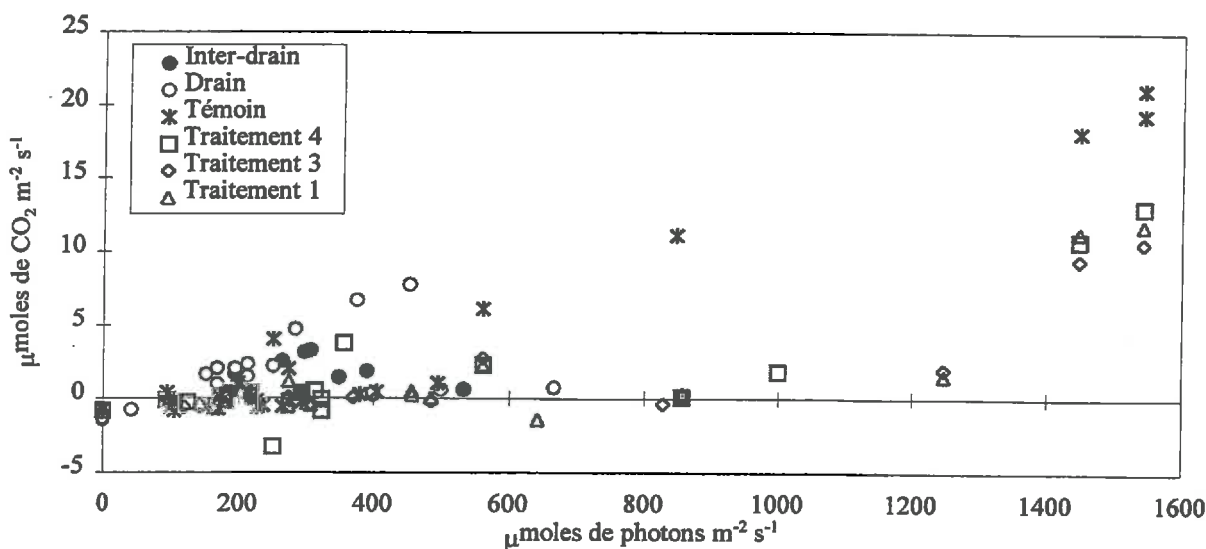


Figure 4-3 : Relation entre photosynthèse nette et rayonnement incident, sites expérimentaux d'Antony et d'Arrou, campagne 1993-1994

Les mesures réalisées sur l'activité photosynthétique permettent de mettre en évidence des différences entre traitements (Figure 4-4). La relation qui peut exister entre la photosynthèse nette et la variable de stress n'est pas évidente en première approche. En effet, les résultats présentés intègrent des conditions expérimentales extrêmement variables. Les surfaces interceptrices (LAI) ainsi que les conditions de températures sont différentes d'un traitement à l'autre. Il faut alors décorréler les effets rayonnement, des effets LAI et des effets températures.

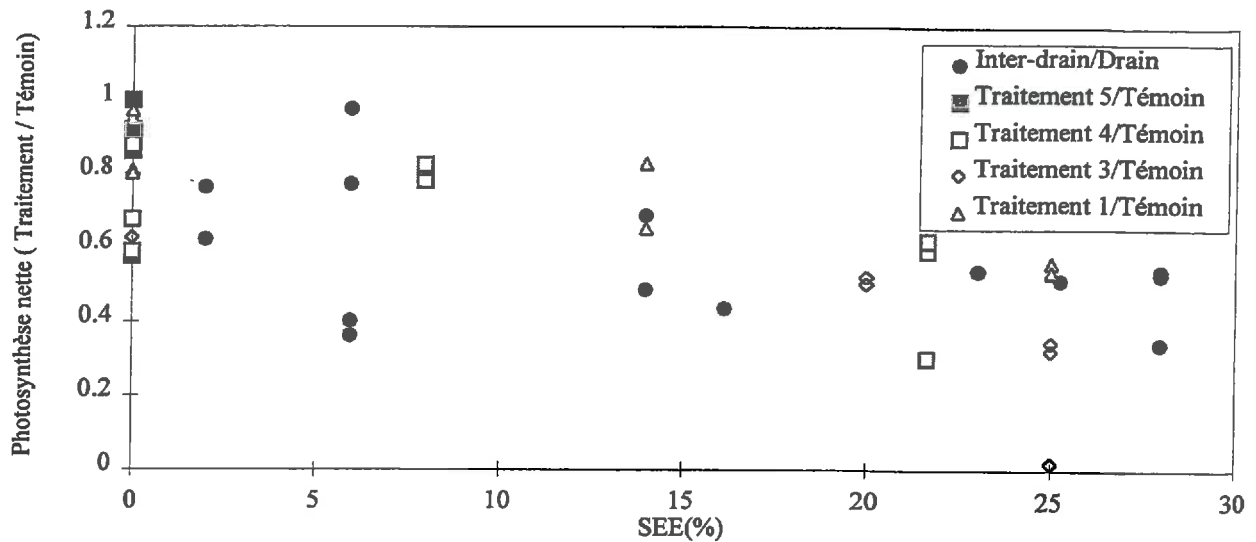


Figure 4-4 : Relation entre photosynthèse nette et contrainte hydrique, sites expérimentaux d'Antony et d'Arrou, campagne 1993-1994

Les surfaces foliaires étant différentes, nous devons représenter l'activité photosynthétique en fonction du rayonnement intercepté (Figure 4-5). Le calcul du rayonnement intercepté est :

$$PAR_i = PAR (1 - e^{-kLAI}) \tag{éq. 4.1}$$

où  $k$  ( $= 0.44$ ) est le coefficient d'extinction journalier (Weir et *al*, 1984), LAI est l'indice foliaire, PAR et  $PAR_i$  sont respectivement le rayonnement photosynthétiquement actif (gamme spectrale comprise entre 400 et 700 nm) incident et intercepté exprimé en  $\mu\text{moles de photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

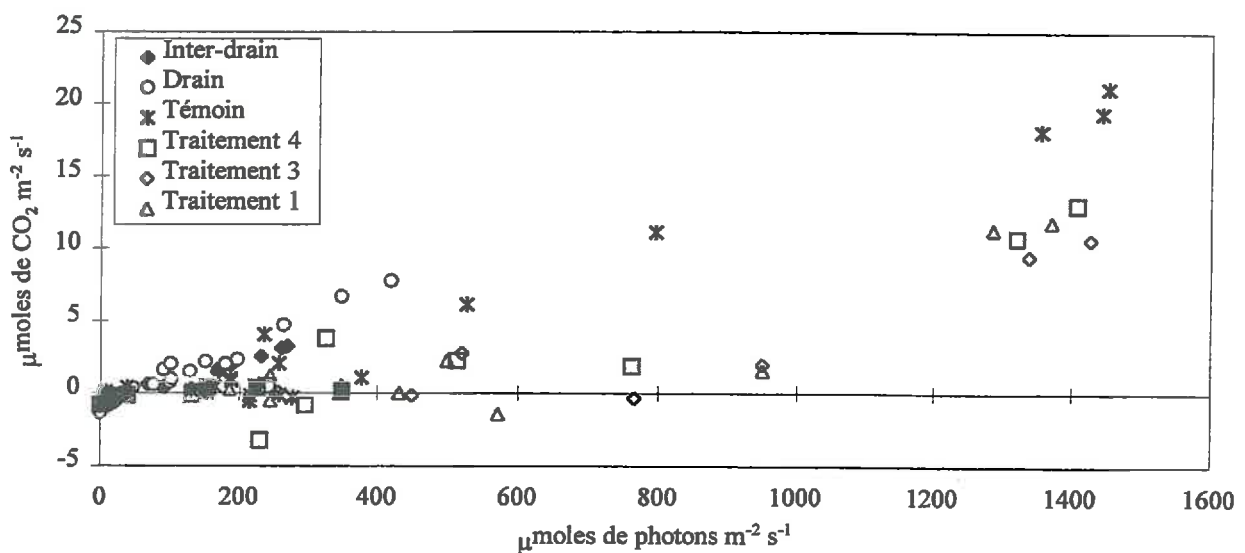


Figure 4-5 : Relation entre photosynthèse nette et rayonnement intercepté, sites expérimentaux d'Antony et d'Arrou, campagne 1993-1994

Les niveaux d'activités photosynthétiques mesurées sont faibles par rapport à ceux rencontrés dans la littérature (pour un rayonnement intercepté de  $1400 \mu\text{moles de photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , l'activité photosynthétique tourne autour de  $30 \mu\text{moles de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Les points de mesure au delà de  $500 \mu\text{moles de photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ont été obtenus sur les cuves donc dans des conditions expérimentales particulières. En effet, au cours des mois de juin et juillet, nous avons mesuré des températures supérieures à  $25^\circ\text{C}$  dans le sol. Or, comme nous l'avons vu la température joue non seulement sur la photosynthèse mais également sur la respiration.

Le système expérimental en cuve présente donc des conditions particulières pour la croissance de la plante, la question de la représentativité des mesures se pose alors.

De plus, toujours sur les cuves, pour un certain nombre de points (Figure 4-5), nous mesurons une photosynthèse nulle pour un rayonnement allant jusqu'à  $800 \mu\text{moles de photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Pour ne pas attribuer de tels effets à l'excès d'eau nous avons introduit la respiration de la plante et du sol. En effet, les données d'activité photosynthétique correspondent à des mesures expérimentales où seul le bilan net d'échange gazeux et notamment de  $\text{CO}_2$  est accessible (voir protocole chapitre I).

Afin de calculer la photosynthèse brute, nous avons été amenés à estimer la production de  $\text{CO}_2$  par la respiration. Par convention, la photosynthèse nette est notée  $P_n$  et la photosynthèse brute  $P_g$ , avec :

$$P_n = P_g - \text{respiration} \quad (\text{éq. 4.2})$$

Le fractionnement de la respiration, par commodité, en deux parties permet de définir une respiration d'entretien,  $R_e$ , et une respiration de croissance,  $R_c$ . (McCree, 1970, Penning de Vries et al, 1989). La respiration d'entretien est proportionnelle à la masse de végétal à entretenir ou à la surface foliaire. La température a un effet direct sur son niveau d'activité.

Il est souvent admis que le niveau de respiration double chaque fois que la température augmente de  $10^\circ\text{C}$  ( $Q_{10}=2$ ) (Van Keulen et Seligman, 1987 ; Penning de Vries et al, 1989). Le flux de  $\text{CO}_2$  provenant de la respiration du sol est également estimé par des fonctions de type  $Q_{10}=2$  (Amthor, 1994).

Nous avons retenu une formulation permettant de prendre en compte la production de  $\text{CO}_2$  par les parties végétales aériennes et souterraines et le flux de  $\text{CO}_2$  provenant de la respiration du sol. Son expression est :



$$(R_c + R_{sol}) = (b \text{ LAI} + c) \times 2^{\frac{T-20}{10}} \quad (\text{éq. 4.3})$$

où  $b$  et  $c$  sont des paramètres calés pour que le nuage des points expérimentaux (Figure 4-5) passe par (0,0),  $R_c$  et  $R_{sol}$  sont respectivement la respiration d'entretien et la respiration du sol exprimées en  $\mu\text{moles de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Les résultats du calage sont regroupés dans le Tableau 4.3.

	b	c
$R_c$	0.4	2.5

Tableau 4.3 : Résultats du calage pour la fonction de respiration d'entretien et du sol

La respiration de croissance, assurant la transformation des assimilats primaires, est proportionnelle à l'activité photosynthétique (McCree, 1970 ; Penning de Vries, 1974).

$$R_c = a P_g \quad (\text{éq. 4.4})$$

où  $a$  est un coefficient de respiration de croissance pris égale à 0.2 et  $R_c$  est la respiration de croissance exprimée en  $\mu\text{moles de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Le Tableau 4.4 regroupe pour différentes graminées, les valeurs du paramètre  $a$  citées dans la littérature.

Plantes	Température	Valeur	
<i>Lolium perenne</i>	15°C	0.25	Jones et al, 1978 cité par Ruget, 1981
	22.5	0.2	Robson, 1973 cité par Ruget, 1981
<i>Lolium multiflorum</i>	20°C	0.23	Hansen et Jensen, 1977
	20°C	0.18	Hansen et Jensen, 1977
<i>Hordeum vulgare</i>	23°C	0.35	Ryle et al, 1976, cité par Ruget, 1981
		0.34	Biscoe et al, 1975
<i>Zea mays</i>	23°C	0.35	Ryle et al, 1976
		0.3	Yamaguchi, 1978 cité par Ruget, 1981

Tableau 4.4 : Valeurs du paramètre  $a$  pour différentes graminées

Les résultats des valeurs de la photosynthèse brute ainsi estimée sont regroupés sur la Figure 4-6.

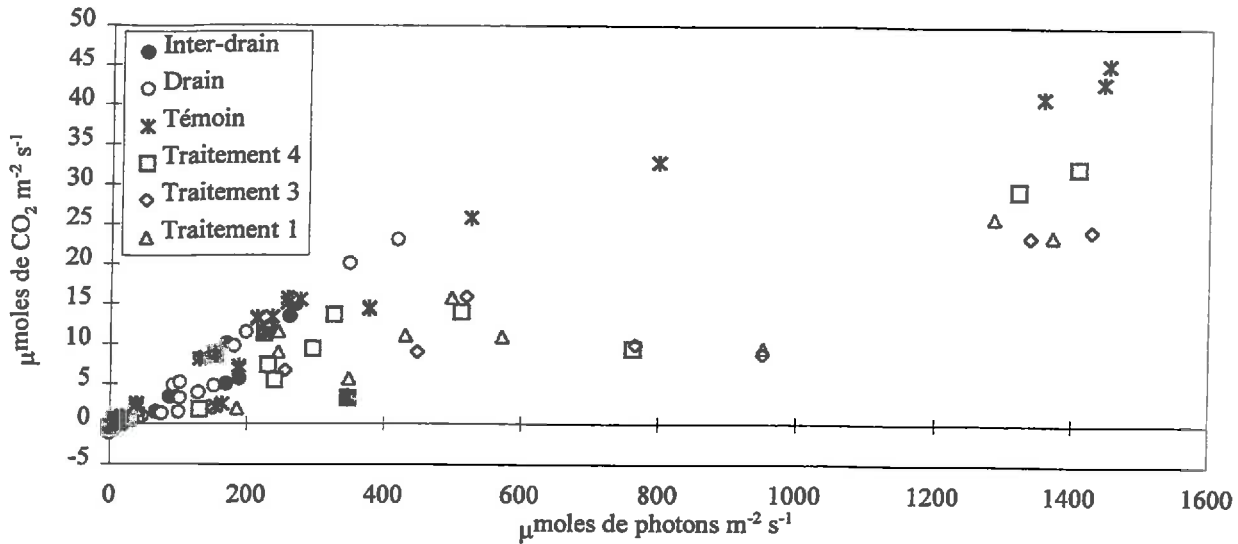


Figure 4-6 : Relation entre photosynthèse brute et rayonnement intercepté, sites expérimentaux d'Antony et d'Arrou, campagne 1993-1994

Nous devons rechercher, pour chaque observation, quel serait son niveau d'activité photosynthétique maximal compte tenu du rayonnement intercepté, du LAI, du niveau de respiration et de la température. Pour cela, en accord avec un grand nombre de travaux antérieurs (Brown, 1969) montrant que la proportionnalité entre la photosynthèse brute et le rayonnement intercepté peut être approchée par l'équation de Michaelis-Menten intégrée sur le couvert végétal (Charles-Edwards et al, 1986) ou par une équation équivalente d'hyperbole rectangulaire, nous avons choisi une formulation classique de la photosynthèse brute :

$$P_g = \frac{\alpha \text{ PAR } P_m}{\alpha k \text{ PAR} + P_m} (1 - e^{-k \text{ LAI}}) * f(T) \tag{éq. 4.5}$$

où  $f(T)$  est l'effet de la température sur la photosynthèse,  $\alpha$  est la pente initiale de la réponse de la photosynthèse à l'éclairement ( $\mu\text{moles de CO}_2 / \mu\text{moles de photons}$ ) et  $P_m$  est la réponse maximale du couvert végétal à un éclairement saturant ( $\mu\text{moles de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

L'activité photosynthétique présente un maximum de fonctionnement vis à vis de la température. Pour une culture de blé, Van Keulen et Seligman (1987) mesurent l'effet de la température sur l'activité photosynthétique (Tableau 4.5).

Température (T)	0	10	25	35	50
$f(T)$	0.0001	1	1	0.01	0.01

Tableau 4.5 : Effet de la température sur le niveau d'activité maximale de la photosynthèse

Nous avons utilisé la formulation suivante :

$$f(T) = 1 - \left(1 - \frac{T}{17}\right)^2 \tag{éq. 4.6}$$

La Figure 4-7 présente une comparaison de la formulation retenue avec les résultats obtenus par Van Keulen et Seligman (1987) pour une température inférieure à 34°C.

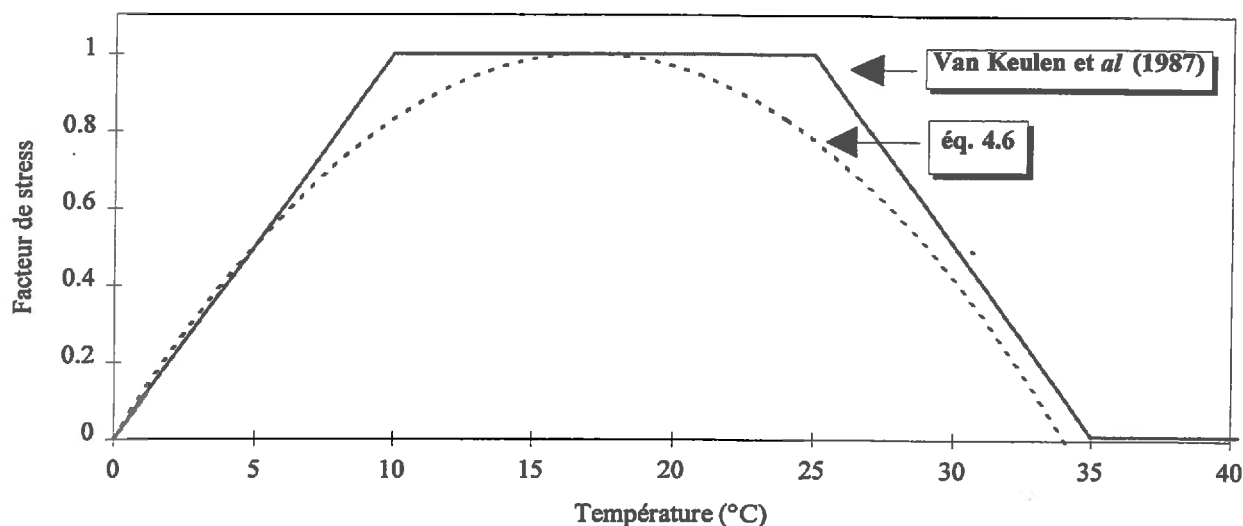


Figure 4-7 : Comparaison des fonctions de prise en compte de la température sur le niveau d'activité photosynthétique

La formulation de la photosynthèse brute décrit une courbe enveloppe représentant, pour chaque traitement, le niveau potentiel d'activité photosynthétique (Figure 4-8). Le calage des paramètres de  $\alpha$  et  $P_m$  sur les données expérimentales est réalisé graphiquement. Les résultats du calage sont :

$$\alpha = 0.07 \text{ } \mu\text{moles de CO}_2 / \mu\text{moles de photons}$$

$$P_m = 48 \text{ } \mu\text{moles de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Les valeurs que nous obtenons pour les paramètres de la photosynthèse brute sont comparables à celles rencontrées dans la littérature pour une culture de blé d'hiver.

$P_m$ ( $\mu\text{moles de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\mu\text{moles de CO}_2 / \mu\text{moles de photons}$ )	
15.78	0.048	Weir et al, 1984
50.51	0.057	Charles-Edwards et al, 198
-	0.066	Van Keulen et Seligman, 1
25.25	-	Penning de Vries et al, 198

Tableau 4.6 : Valeurs de  $P_m$  et de  $\alpha$  pour une culture de blé d'hiver

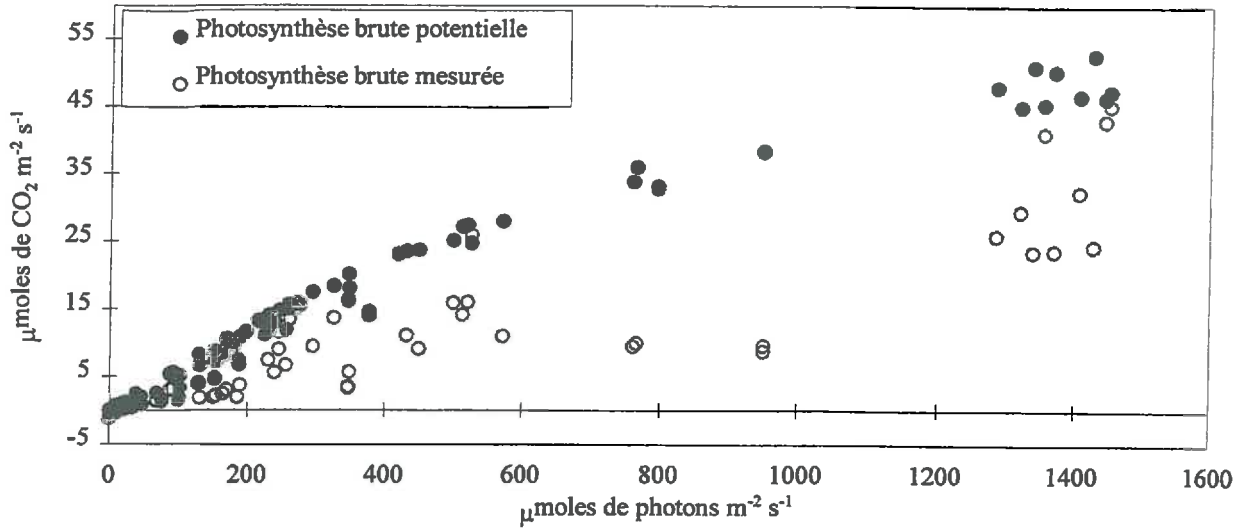


Figure 4-8 : Calage de la courbe enveloppe sur les données de photosynthèse brute, sites expérimentaux d'Antony et d'Arrou, campagne 1993-1994

Les effets de l'ensemble des variables, surface interceptrice, température et niveau de respiration, ayant été pris en compte, les différences observées sont dues à l'effet d'un excès d'eau. Nos observations rejoignent les résultats présentés dans la littérature. Les travaux les plus démonstratifs de l'effet d'un excès d'eau sur la photosynthèse sont ceux réalisés par Sojka (1992). Il montre l'effet d'un stress à l'oxygène sur la fermeture des stomates. La conductance stomatique est fortement réduite lorsque les plantes sont ennoyées. Les conséquences sur la photosynthèse peuvent être importantes (Figure 4-9).

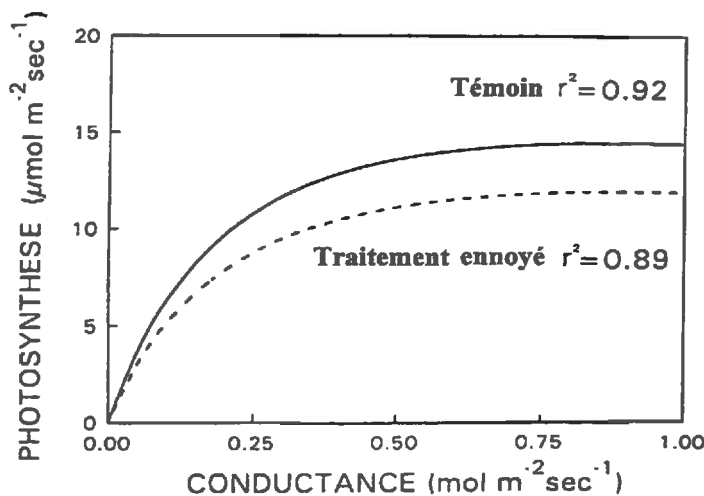


Figure 4-9 : Comparaison des relations entre niveau d'activité photosynthétique et conductance stomatique pour des plants de soja (d'après Oosterhuis et al, 1990)

Sojka (1992) conclue que la régulation de la fermeture stomatique par une anoxie est d'une importance au moins identique à celle provoquée par un déficit hydrique même si l'effet de ce dernier est largement plus documenté.

• **Formalisation**

L'objectif est de décrire l'évolution du niveau d'activité photosynthétique maximale en fonction de la contrainte d'engorgement. Nous avons choisi  $P_m$  comme variable sensible à la variable de stress. Nous retrouvons, en inversant l'équation (4.6), pour chaque observation de  $P_g$  (données expérimentales), la valeur du paramètre  $P_m$ . Son expression est :

$$P_m = \frac{\alpha \text{ PAR } k P_g e^{k \text{ LAI}}}{e^{k \text{ LAI}} (\alpha \text{ PAR} - P_g) - \alpha \text{ PAR}} \quad (\text{éq. 4.7})$$

Pour chaque mesure le rapport entre la valeur réelle de  $P_m$  et sa valeur potentielle  $P_{m0}$  peut être représenté en fonction de la contrainte d'excès d'eau (Figure 4-10). Le rapport entre valeurs réelles et potentielles du paramètre  $P_m$  décroît de façon exponentielle avec la contrainte d'excès d'eau. Nous proposons la relation suivante :

$$\frac{P_m(\text{SEE})}{P_{m0}(\text{SEE})} = P_m(\infty) + (1 - P_m(\infty)) e^{-\delta \text{ SEE}} \quad (\text{éq. 4.8})$$

où  $\delta$  est un paramètre décrivant la décroissance de  $P_m$  avec  $\text{SEE}(\%)$  et  $P_m(\infty)$  la valeur asymptotique de  $P_m(\text{SEE})$ .

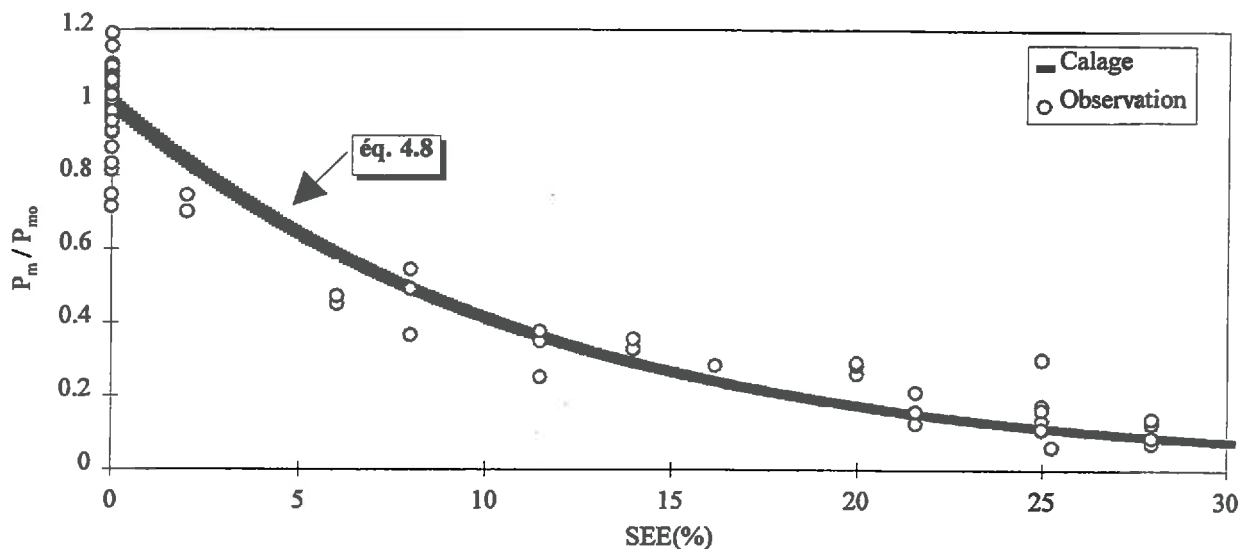


Figure 4-10 : Relation entre valeur du paramètre  $P_m$  et contrainte hydrique, sites expérimentaux d'Antony et d'Arrou, campagne 1993-1994

L'activité photosynthétique est une mesure ponctuelle, en revanche, le calcul de la variable de stress résulte d'un calcul intégré sur 2 jours : c'est le pourcentage moyen de racines envoyées sur une durée de 2 jours avant la date de la mesure. Les résultats du calage sont regroupés dans le Tableau 4.7.

Modèle	$P_m(\infty)$	$\delta$	Estimation de l'écart-type résiduel	n	$r^2$
$P_m$ (SEE)	0.01**	0.09*	0.084	93	0.95

Tableau 4.7 : Résultats du calage de la fonction  $P_m = f(X)$ , n est le nombre d'observations et  $r^2$  le coefficient de détermination, \*\* et \* : significatif à 5 et 1%

Les résultats expérimentaux montrent qu'il existe un effet de l'excès d'eau sur l'activité photosynthétique. La modélisation de la photosynthèse met en évidence l'effet de la contrainte sur le niveau d'activité photosynthétique maximal. Nous proposons une relation fonctionnelle de type exponentielle pour décrire la réponse photosynthétique du couvert végétal à une contrainte d'engorgement. La conséquence directe de cet effet est une réduction de l'accumulation de biomasse et donc une moindre croissance des organes. Dans la suite de l'analyse des résultats expérimentaux, nous verrons dans un premier temps les conséquences de cette réduction sur l'accroissement foliaire en surface puis dans un second temps les conséquences d'un excès d'eau sur la répartition de la biomasse produite entre parties aériennes et racinaires.

## 4.2 Excès d'eau et accroissement de la surface foliaire

Les feuilles sont les organes qui assurent une grande partie de l'interception du rayonnement. De leur surface va dépendre la quantité d'énergie interceptée et le potentiel de croissance de la plante (voir paragraphe précédent).

### • Résultats expérimentaux en cuves : contrainte permanente

Les résultats expérimentaux obtenus sur cuves lysimétriques mettent en évidence l'effet d'un excès d'eau sur la surface des feuilles (Figure 4-11). En phase d'expansion foliaire, nous observons une réduction de l'indice foliaire dès les premiers jours de stress. De même, en phase de sénescence, la sénescence des feuilles semble accélérée pour les plantes soumises à un engorgement (Figure 4-13, traitement 5).

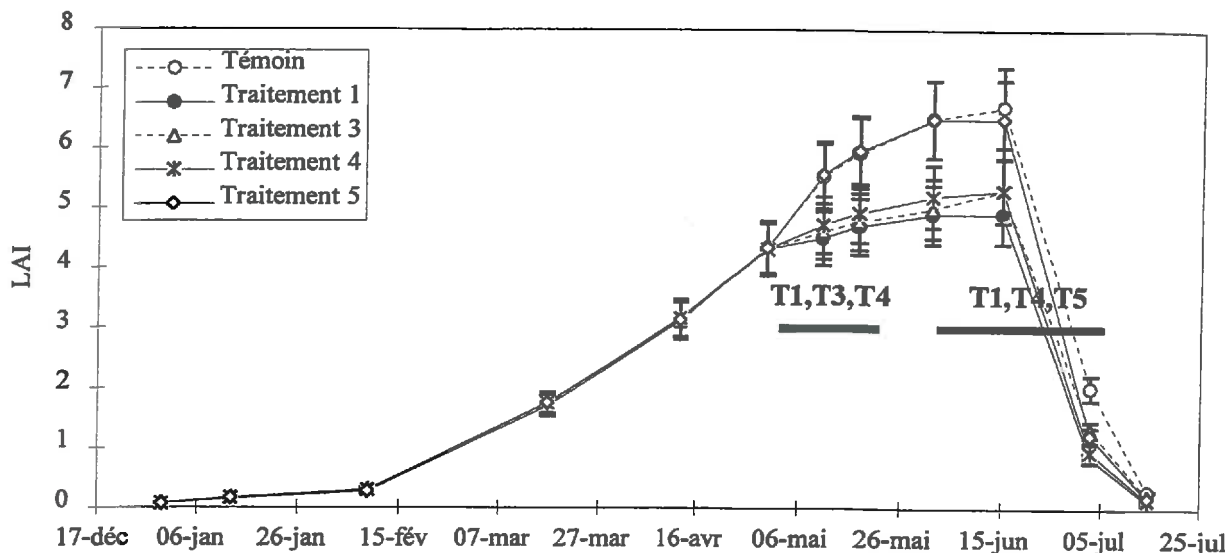


Figure 4-11 : Comparaison de l'évolution du LAI entre témoin et traitement soumis à excès d'eau, site expérimental d'Antony, campagne 1993-1994

Afin de comparer les traitements entre eux, pour des intensités de contraintes variables, nous calculons, en phase d'expansion foliaire, le rapport des taux l'accroissement de l'indice foliaire entre traitement et témoin. Son expression est :

$$I_{LAI} = \frac{\Delta LAI_{\text{traitement}}}{\Delta LAI_{\text{témoin}}} \tag{éq. 4.9}$$

où ΔLAI est calculé entre les observations au temps t et t+Δt.

La Figure 4-12 regroupe les données obtenues sur cuves lysimétriques pour les deux campagnes de mesure et décrit la relation qui existe entre l'accroissement du LAI et la variable de stress. La réduction de l'accroissement du LAI avec la contrainte d'engorgement peut être approchée par la formalisation suivante :

$$\Delta LAI(SEE) = \Delta LAI_0 * e^{(-c SEE)} \tag{éq. 4.10}$$

où LAI<sub>0</sub> et LAI sont respectivement l'indice foliaire du témoin et du traitement, c est un paramètre décrivant la décroissance du LAI avec SEE.

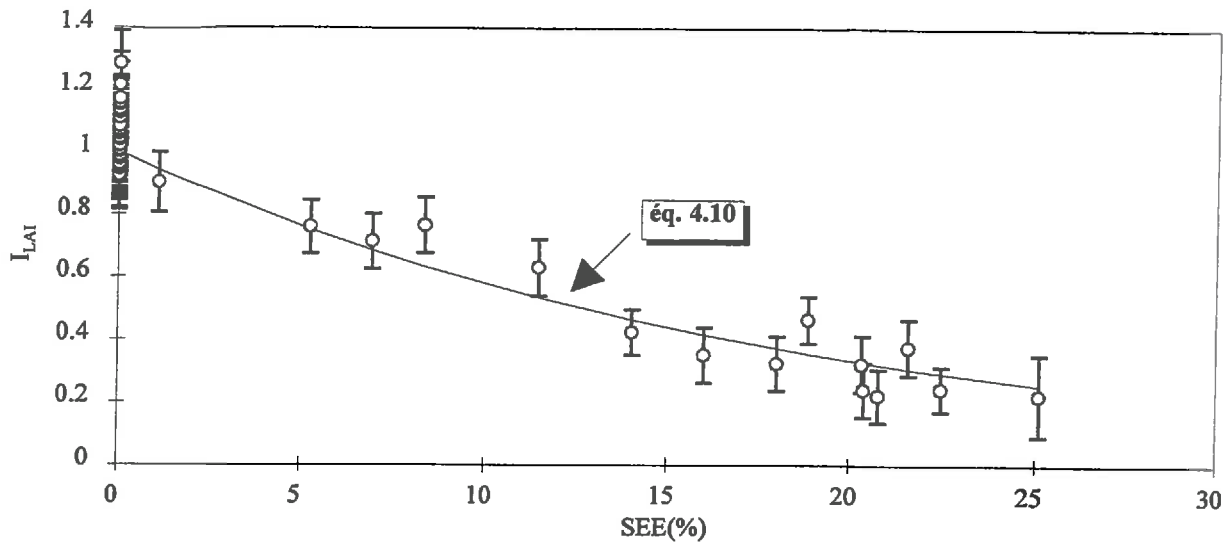


Figure 4-12 : Relation entre accroissement de la surface foliaire et contrainte hydrique, site expérimental d'Antony, campagne 1993 et 1993-1994

Le calage des paramètres est obtenu en minimisant la somme des écarts au carré entre valeurs observées et prédites de  $I_{LAI}$  (Tableau 4.8).

Modèle	c	Estimation de l'écart-type résiduel	n	$r^2$
$\Delta LAI (X)$	0.055*	0.073	41	0.93

Tableau 4.8 : Résultats du calage du modèle de LAI sur nos données expérimentales, n est le nombre d'observations et  $r^2$  le coefficient de détermination, \* significatif à 5%

### • Résultats expérimentaux de plein champ : contrainte temporaire

Les résultats expérimentaux de plein champ conduisent aux mêmes observations que précédemment. L'indice foliaire est plus faible à l'inter-drain (Figure 4-13). Comme pour la croissance racinaire (voir Chapitre II, § 3), nous ne pouvons pas établir de relation directe entre la réduction de l'accroissement foliaire et la variable de stress. Entre deux dates d'observation la contrainte est variable, la réduction de l'accroissement est le résultat de ce qui s'est passé entre ces deux dates. Ceci nous conduit à une analyse plus poussée permettant de relier l'accroissement journalier de LAI à la contrainte journalière. Par ailleurs nous avons considéré le comportement au drain comme le témoin.



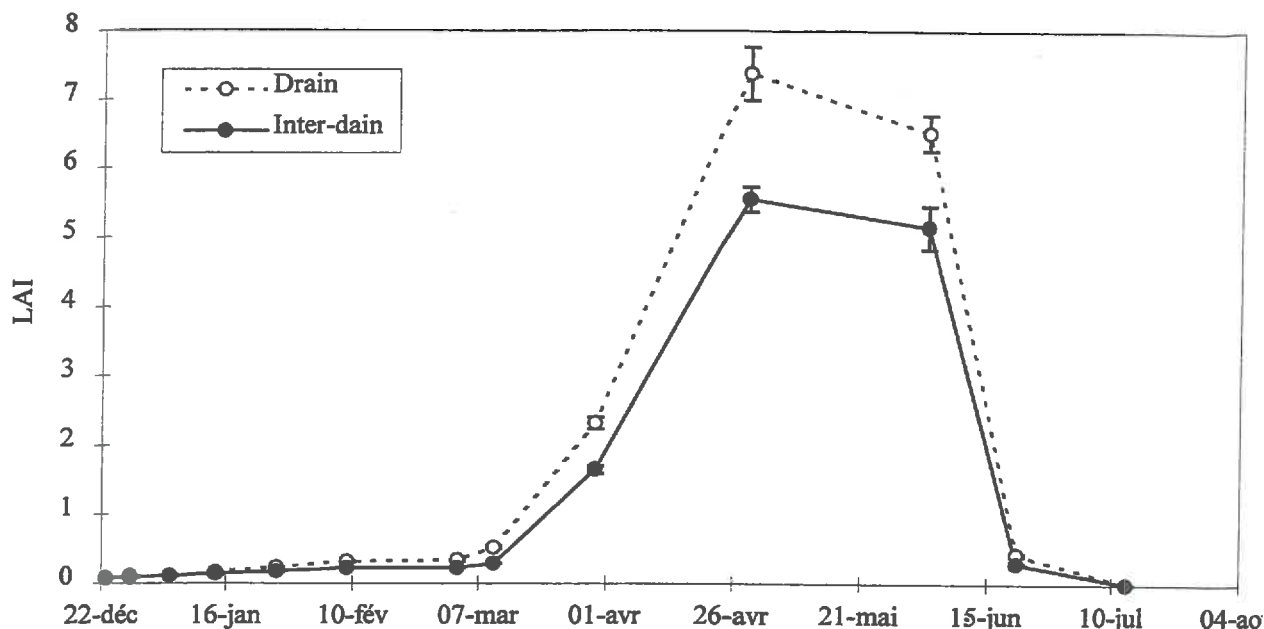


Figure 4-13 : Comparaison de l'évolution du LAI entre drain et inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Nous avons dû lisser la dynamique obtenue avec les mesures obtenues au drain,  $LAI_0$  et  $\Delta LAI_0$ . A partir de ces données expérimentales, une interpolation temporelle au pas de temps journalier, de  $LAI_0$  est réalisée en fonction de la somme de température. L'équation utilisée est la suivante (Baret, 1986) :

$$LAI(j) = K * \frac{1}{1 + e^{-a * (\sum T(j) - T_i)}} - e^{b * (\sum T(j) - T_j)} \quad (\text{éq. 4.11})$$

où T est la température moyenne journalière de l'air, les 5 paramètres de l'ajustement sont :

- k : asymptote haute de la valeur de l'indice foliaire maximal ;
- a : taux de croissance relatif au point d'inflexion ;
- $T_i$  : position du point d'inflexion de la croissance de surface foliaire ;
- b : taux de sénescence relatif à  $T_j$  ;
- $T_j$  : position du point d'inflexion correspondant à la disparition de l'indice foliaire.

Le calage est réalisé sur une série de données expérimentales mesurées au drain (Figure 4-14). Les valeurs des paramètres sont résumées dans le Tableau 4.9.

K	a	$T_i$	b	$T_j$
9	0.01	1100	0.005	2050

Tableau 4.9 : Valeurs des paramètres de l'ajustement de l'équation de reconstitution des données journalières d'indices foliaires

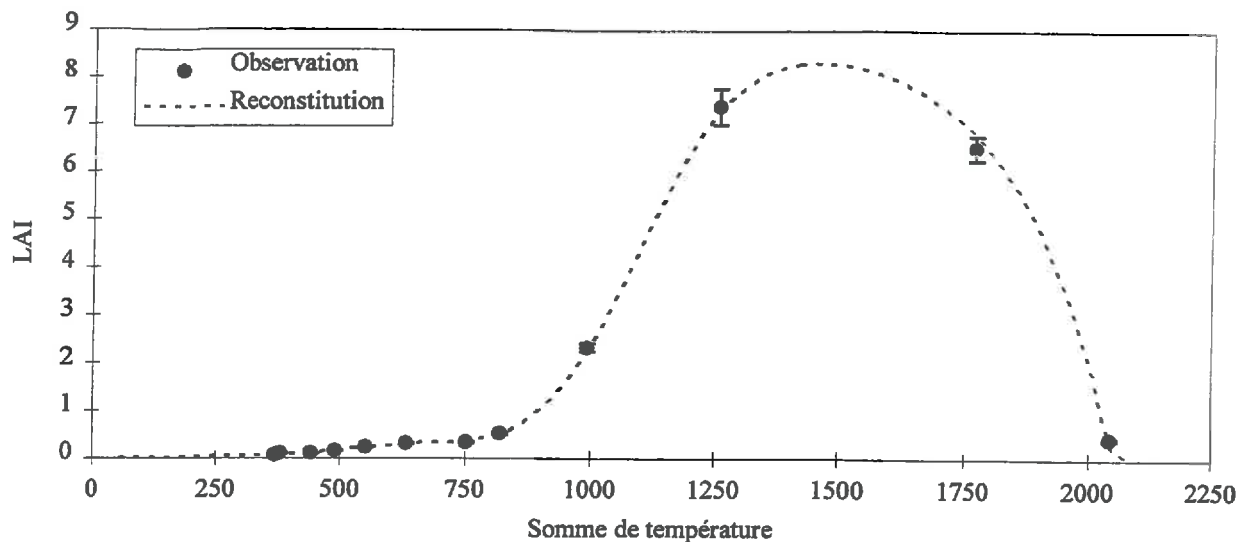


Figure 4-14 : Comparaison des chroniques d'indice foliaire observée et reconstituée

Connaissant le LAI journalier et son accroissement et l'intensité de la contrainte, SEE(%), nous estimons l'accroissement du LAI au niveau de l'inter-drain selon l'éq. 4.10. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 4-15.

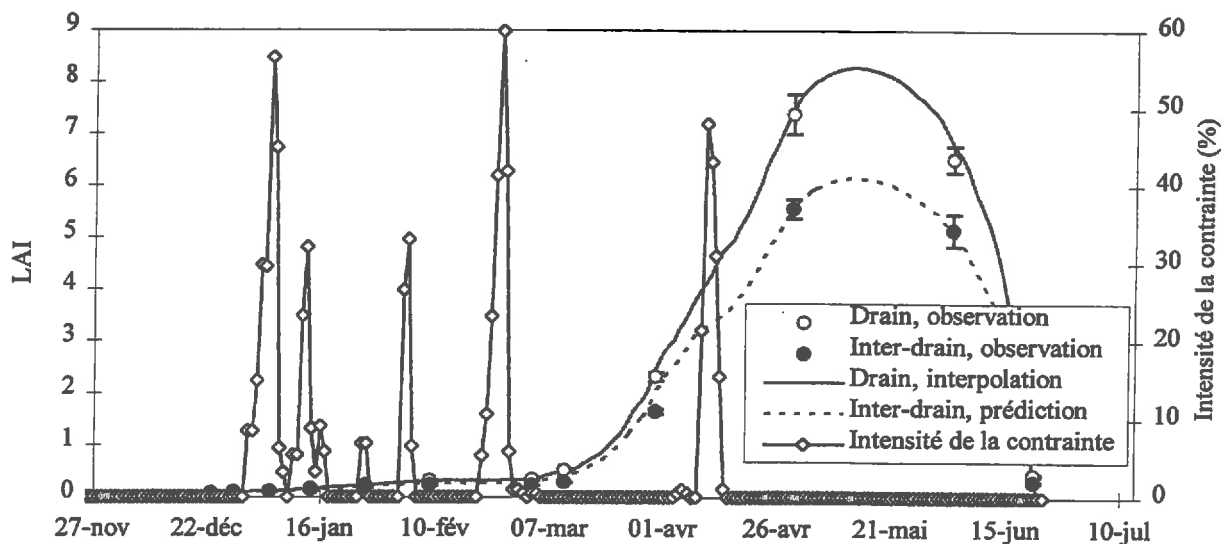


Figure 4-15 : Chroniques observées et estimées de l'indice foliaire au drain et à l'inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Les résultats montre une bonne adéquation entre observations et prédictions (Tableau 4.10).

Modèle	c	Estimation de l'écart-type résiduel	n	r <sup>2</sup>
$\Delta LAI$ (SEE)	0.028*	0.127	12	1

Tableau 4.10 : Résultats du calage du modèle de LAI sur les données in situ, n est le nombre d'observations et r<sup>2</sup> le coefficient de détermination, \* significatif à 5%

La valeur du paramètre  $c$  obtenu est plus faible (0.028 contre 0.055). Cette différence peut être attribuée, d'une part, aux conditions expérimentales et, d'autre part, au stade de développement de la culture. Sur le terrain, contrainte précoce, la culture est phase de croissance lente, en revanche sur les cuves les stades de développement sont plus avancés. On peut s'attendre à ce que les conséquences d'un excès d'eau soient différentes. On peut alors s'interroger sur la variabilité de ce paramètre selon les phases de croissance de la culture. Sur son cycle de développement, il existe des stades où la plante est plus sensible à un excès d'eau. De plus, il existe des phénomènes d'adaptation qui ne sont pas généralisables sur tout le cycle de la culture (Bousqué, 1992). Cet élément sera discuté dans le bilan des résultats.

### 4.3 Répartition de la biomasse et contrainte d'excès d'eau

Les mesures de biomasse sont effectuées uniquement sur le site expérimental d'Arrou. Le protocole de prélèvement et le calcul de la biomasse sont présentés dans le chapitre I (§ 1). L'analyse des données est orientée par deux objectifs qui sont, d'une part, la mise en évidence des effets d'un excès d'eau sur la production de biomasse puis sur sa répartition et, d'autre part, la construction d'une fonction de répartition de la biomasse décrivant la réponse de la plante à une telle contrainte.

#### • Résultats expérimentaux et interprétation

Les résultats des mesures de biomasse réalisées au drain et à l'inter-drain sont synthétisés respectivement sur la Figure 4-16 et la Figure 4-17.

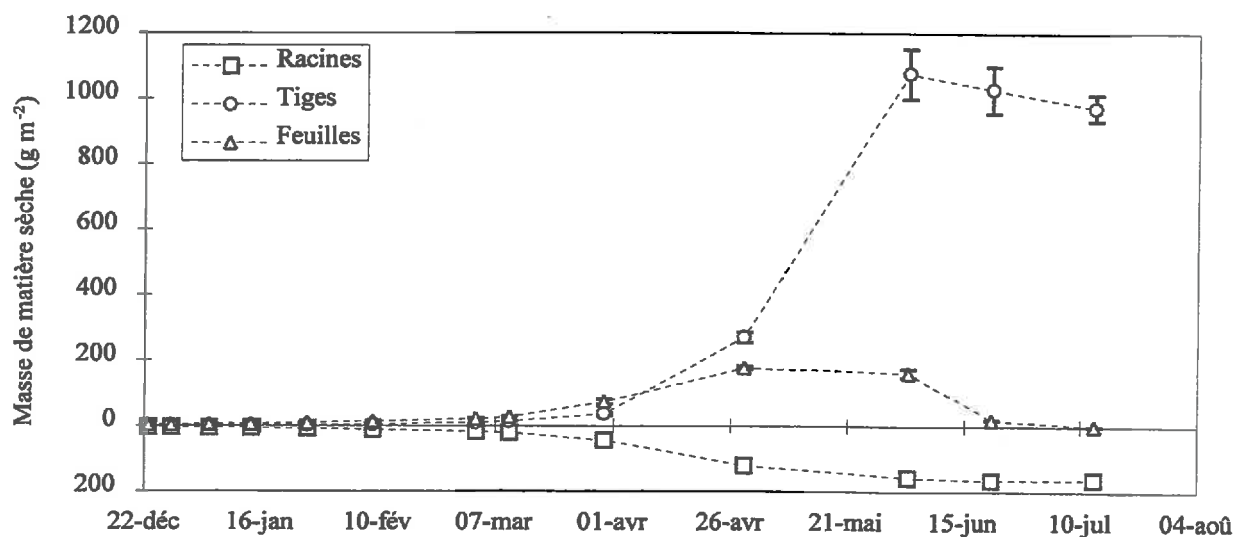


Figure 4-16 : Evolution de la biomasse par organes mesurée au drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

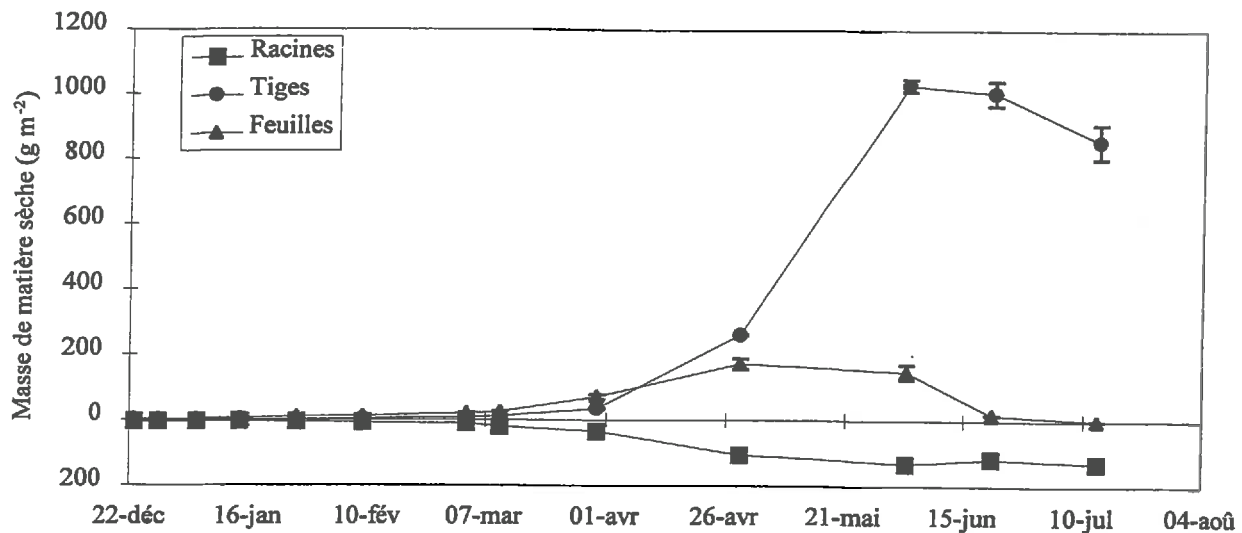


Figure 4-17 : Evolution de la biomasse par organes mesurée à l'inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

La biomasse mesurée correspond à la masse de matière sèche. Elle est mesurée pour chaque organe de la plante, racines, feuilles et tiges. Au niveau de l'inter-drain, les excès d'eau sont présents au cours de la phase végétative du cycle de la plante (levée-début montaison). Au cours de cette phase, la nappe est restée quasiment en permanence dans l'horizon labouré. Corrélativement, la biomasse totale mesurée à l'inter-drain est jusqu'à 30% inférieure à celle mesurée au drain (Figure 4-18).

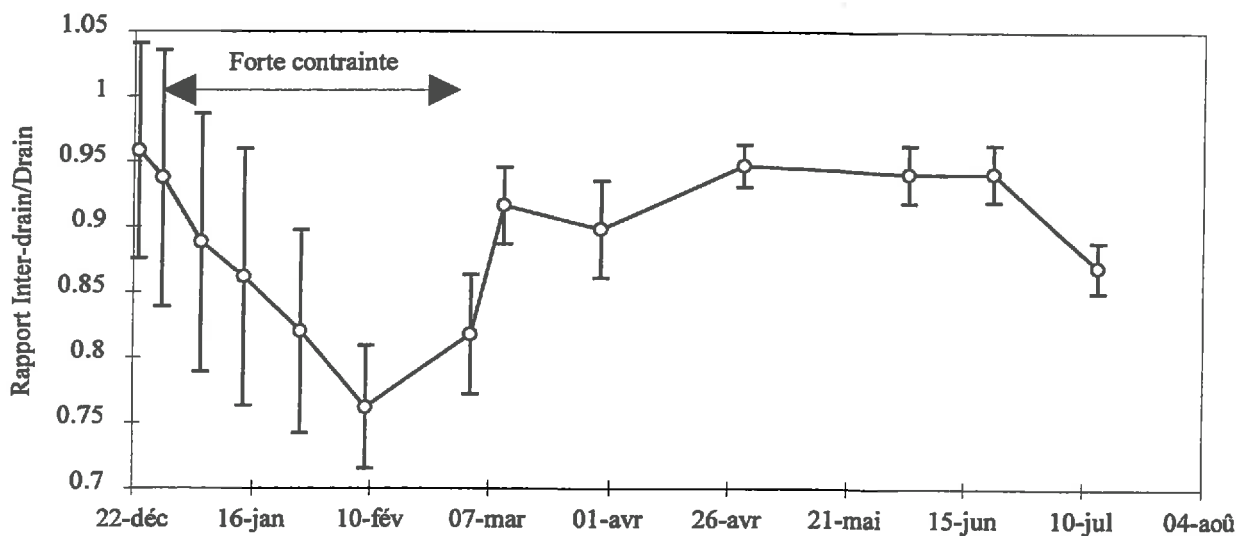


Figure 4-18 : Evolution du rapport des biomasses totales entre l'inter-drain et le drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Tous les organes végétaux ne sont pas atteints avec la même intensité. Le système racinaire semble être le plus affecté par un engorgement.

### ➤ Biomasse racinaire

La fraction de biomasse racinaire,  $f_r$ , mesurée sur notre expérimentation est relativement constante en début de cycle, autour d'une valeur de 0.5, puis décroît régulièrement vers une valeur de 0.07 en fin de cycle (Figure 4-19). Son expression est :

$$f_r = \frac{MS_r}{MS_t} \quad (\text{éq. 4.12})$$

où  $MS_t$  est la biomasse totale ( $\text{g m}^{-2}$ ) et  $MS_r$ , est la biomasse racinaire ( $\text{g m}^{-2}$ ).

Les valeurs les plus couramment rencontrées dans la bibliographie, pour la fraction racinaire en début de cycle, sont comprises entre 0.4 et 0.6 (Baldy, 1973 ; Hirose, 1988 ; Hamlin, 1990 ; Barraclough, 1991 ; Baret et al, 1992). Les variations sont dues aux conditions expérimentales et aux méthodes de calcul. La masse de matière sèche racinaire correspond parfois à la masse de matière sèche des parties souterraines. Baret et al (1992) différencient bien les deux cas. D'autre part, la fraction racinaire peut être calculée à partir de la masse totale de matière sèche avec ou sans épis.

Le rapport des fractions racinaires entre drain et inter-drain est défavorable au système racinaire à l'inter-drain ensuite il semble exister un "rattrapage" (7 mars) (Figure 4-19).

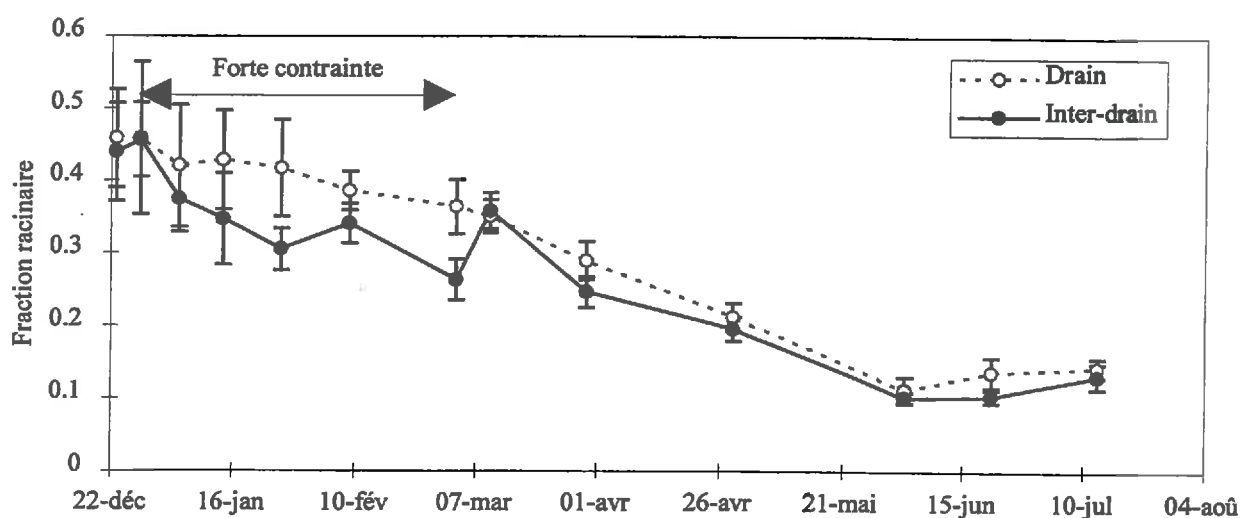


Figure 4-19 : Comparaison de l'évolution de la fraction racinaire entre drain et inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

L'étude de l'évolution des profils d'enracinement enregistrés sur ce site met en évidence une réduction de la colonisation racinaire avec la contrainte hydrique (§ 3). La nappe se comporte non seulement comme un obstacle à l'enracinement en profondeur et en densité dans la zone saturée mais provoque des troubles de l'activité racinaire et perturbe la fonction de distribution

des assimilats. Trought et Drew (1982) montrent que la croissance des racines séminales est particulièrement affectée par un ennoyage. Même si la plante est capable d'émettre des racines nodales en condition d'anoxie, leur dimension, leur nombre ainsi que leur masse sont considérablement réduits.

### ➤ Biomasse foliaire

Nous avons pu montrer l'effet d'un engorgement sur la réduction de la croissance en surface des feuilles. L'analyse des masses surfaciques du système foliaire montre, pour nos conditions expérimentales, une différence significative entre le drain et l'inter-drain. La masse surfacique des feuilles est supérieure au niveau de l'inter-drain (Figure 4-20). Il semble que la distribution des assimilats s'oriente vers une accumulation dans les feuilles alors que leur surface n'augmente pas proportionnellement. Cet effet expliquerait en partie les réductions de LAI.

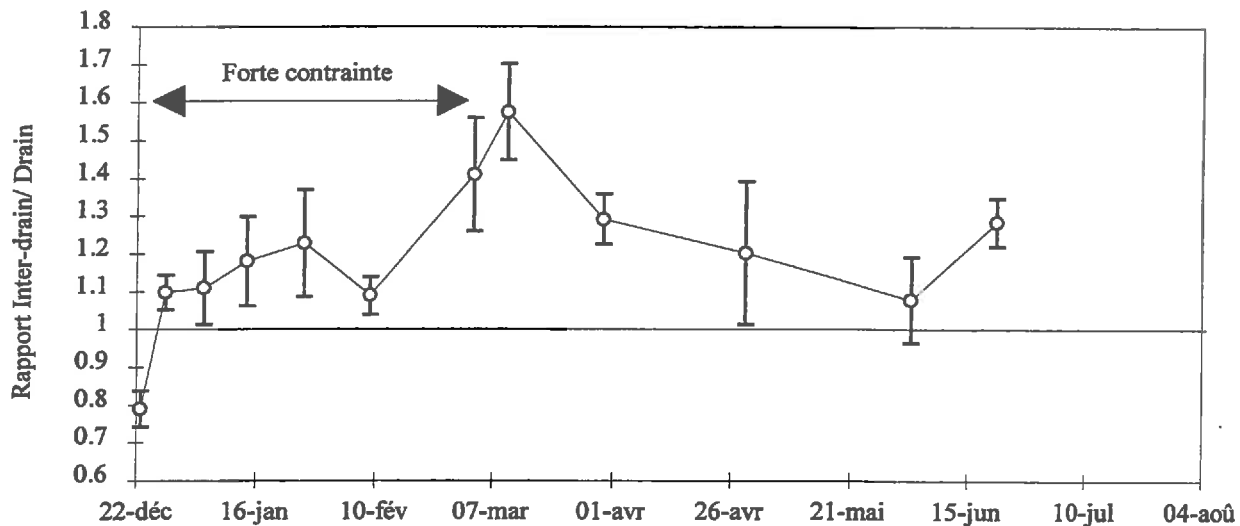


Figure 4-20 : Evolution du rapport des masses surfaciques entre inter-drain et drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

Trought et Drew (1980) notent que cette redistribution est orientée vers les feuilles les plus jeunes. Ils mettent en évidence une sénescence prématurée des feuilles due à une remobilisation des assimilats des feuilles les plus anciennes vers les nouvelles et vers l'apex. Si la fraction de biomasse racinaire est réduite à l'inter-drain, proportionnellement la fraction de biomasse aérienne est supérieure à l'inter-drain par rapport au drain (Figure 4-21). Son expression est :

$$f_a = \frac{MS_a}{MS_t} \quad (\text{éq. 4.13})$$

où  $MS_a$  est la biomasse aérienne ( $\text{g m}^{-2}$ ).

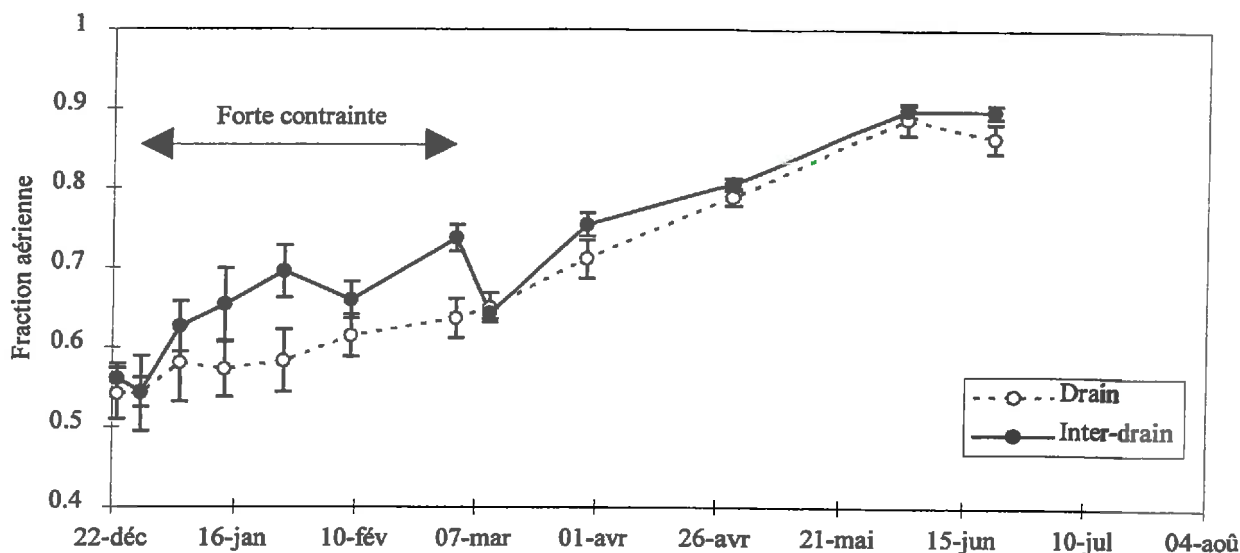


Figure 4-21 : Comparaison de l'évolution de la fraction aérienne entre drain et inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

• **Formalisation**

La formalisation des effets d'un engorgement repose sur la comparaison de l'évolution de la répartition de la biomasse entre parties racinaire et aérienne pour la situation au drain et à l'inter-drain. Sur la base des formalisations existantes nous décrivons la répartition de la biomasse pour la situation potentielle au drain. Ensuite, sur la base de la comparaison entre la situation au drain et à l'inter-drain, nous proposons une formalisation des effets d'un engorgement sur la répartition de la biomasse.

Les coefficients de répartition de la biomasse vers les parties racinaire,  $\alpha_r$ , et aérienne,  $\alpha_a$ , sont définis comme suit :

$$\alpha_r = \frac{\partial MS_r / \partial t}{\partial MS_t / \partial t} = \frac{\partial MS_r}{\partial MS_t} \tag{éq. 4.14}$$

$$\alpha_a = \frac{\partial MS_a / \partial t}{\partial MS_t / \partial t} = \frac{\partial MS_a}{\partial MS_t} \tag{éq. 4.15}$$

La décroissance exponentielle, en fonction d'une somme de température du coefficient de répartition de la biomasse vers les racines est souvent décrite comme telle. Baret et al (1992) proposent une formalisation exprimée à partir des coefficients de répartition  $\alpha_r$  et  $\alpha_a$ , selon l'équation suivante :

$$\alpha_r(\theta^*) = \alpha_r(\infty) + (\alpha_r(0) - \alpha_r(\infty)) e^{-c\theta^*} \quad (\text{éq. 4.16})$$

où  $\alpha_r(\theta^*)$  est le coefficient de répartition de la biomasse vers les racines exprimé en fonction d'une somme de température ( $\theta^*$  seuil de 0) normalisée,  $\alpha_r(0)$  est à la valeur extrapolée au semis de  $\alpha_r$ ,  $\alpha_r(\infty)$  est la valeur asymptotique et  $c$  est un paramètre décrivant la décroissance de  $\alpha_r$  avec  $\theta^*$ .

La normalisation des données par rapport à la somme des températures depuis la levée jusqu'à la floraison permet de comparer les résultats obtenus pour différentes expérimentations sous différentes conditions de température (Baret et al, 1992).

$$\theta^* = \frac{(\theta - \theta_l)}{(\theta_f - \theta_l)} \quad (\text{éq. 4.17})$$

où  $\theta_l$  et  $\theta_f$  sont la somme des températures depuis le semis jusqu'à la levée et jusqu'à la floraison.

Le calage des paramètres est réalisé sur une série de données expérimentales (Figure 4-22). Les résultats du calage sont résumés sur le Tableau 4.11. La distribution des résidus est homogène autour de la valeur moyenne de l'erreur.

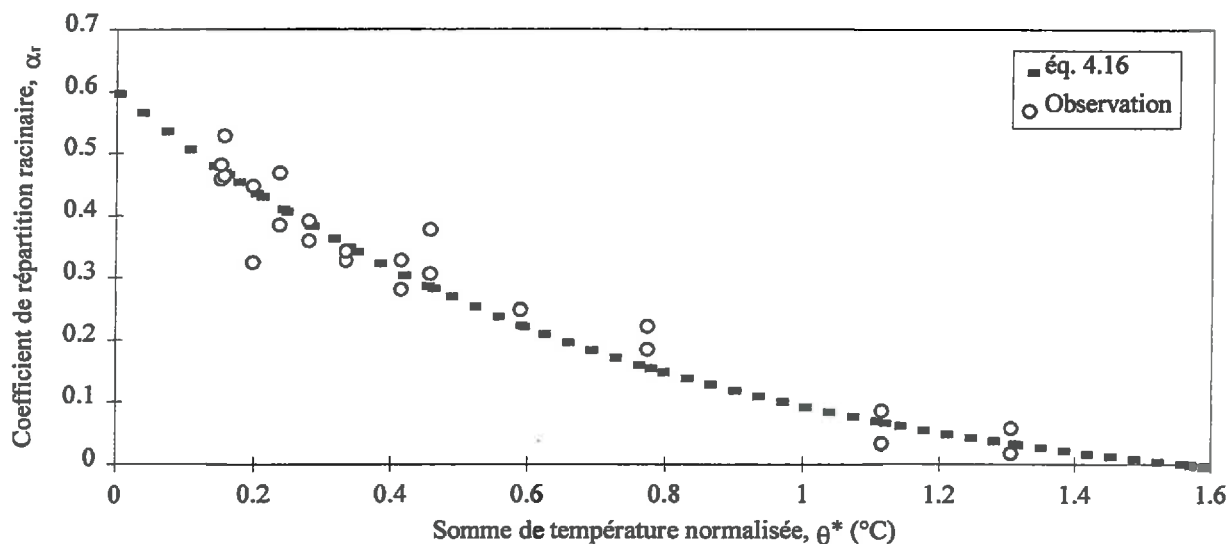


Figure 4-22 : Relation entre coefficient de répartition de la biomasse vers les racines et somme de température normalisée, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

modèle	$\alpha_r(0)$	$\alpha_r(\infty)$	$c_\alpha$	Estimation de l'écart-type résiduel	n	$r^2$
$\alpha_r(\theta)$	0.7	-0.08	$9.5 \cdot 10^{-4}$	0.042	24	0.92
$\alpha_r(\theta^*)$	0.58 (0.48)	-0.18 (-0.15)	1 (0.98)	0.042	24	0.92

(0.48), valeurs trouvées par Baret et al (1992).

Tableau 4.11 : Résultats du calage de l'éq. 4.17 sur nos données expérimentales, n est le nombre d'observations et  $r^2$  est le coefficient de détermination



Le coefficient de répartition de la biomasse aérienne est obtenu à partir de l'accumulation de biomasse  $\partial MS_i / \partial \theta$  et des expressions de  $\alpha_a$  et  $\alpha_r$  :

$$\alpha_a = 1 - \alpha_r \quad (\text{éq. 4.18})$$

Il existe en fonction de l'intensité de la contrainte une répartition variable de la biomasse produite. La fraction de la biomasse aérienne augmente avec l'excès d'eau. La plante favorise le stockage de la biomasse vers les parties aériennes (Figure 4-23). Ici, la variable de stress correspond au pourcentage moyen de racines ennoyées entre 2 dates d'observation.

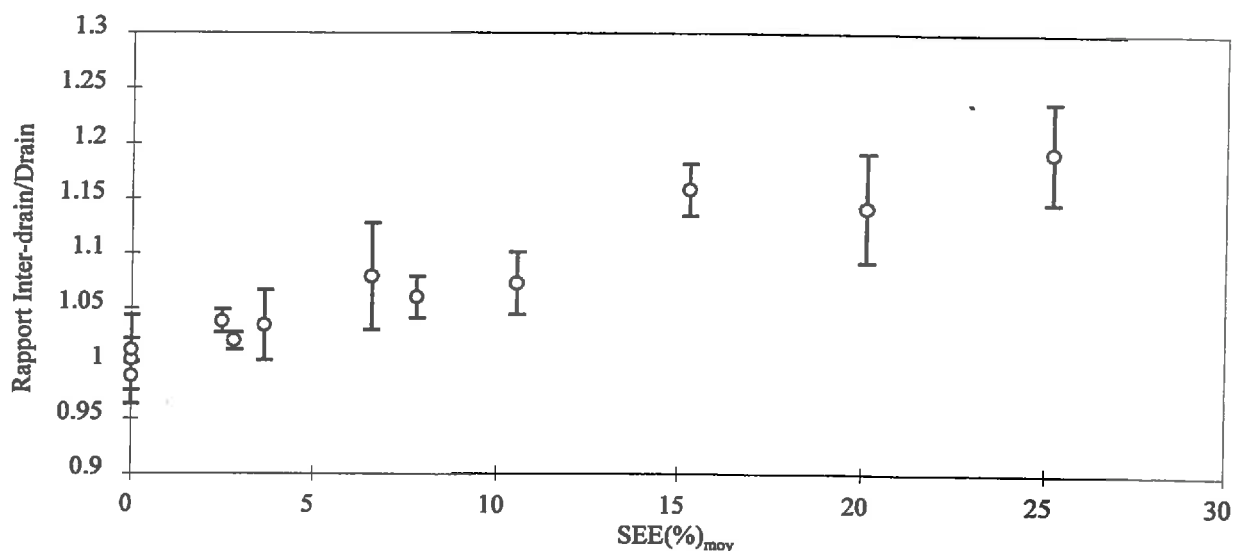


Figure 4-23 : Relation entre le rapport des biomasses aériennes et la contrainte hydrique, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

L'analyse de l'effet de la contrainte sur la répartition de la biomasse repose sur la comparaison de l'évolution des coefficients de répartition de la biomasse pour la situation au drain et à l'inter-drain. La situation au drain constitue dans notre cas le témoin, nous analysons l'évolution de la valeur du rapport des coefficients de répartition entre la situation à l'inter-drain et au drain. Nous cherchons à formaliser l'expression suivante :

$$\alpha_a(\text{Inter-drain})(SEE_{\text{moy}}) = \alpha_a(\text{Drain})f(SEE_{\text{moy}}) \quad (\text{éq. 4.19})$$

Le rapport des coefficients de répartition augmente avec la contrainte hydrique (Figure 4-24).

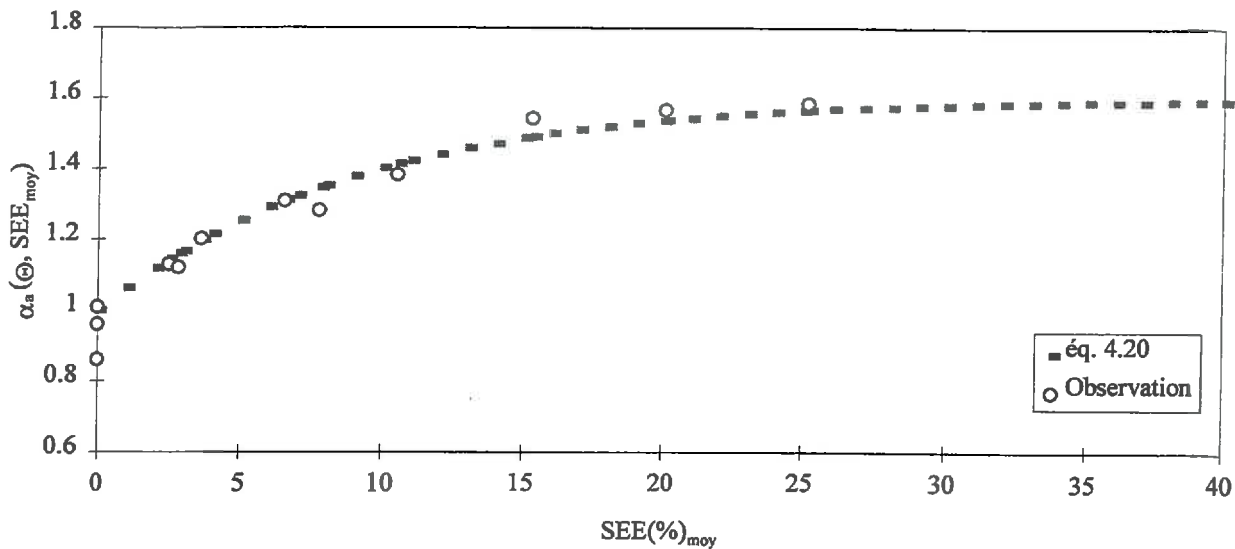


Figure 4-24 : Relation entre coefficient de répartition de la biomasse vers les parties aériennes et contrainte hydrique, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

La variation du coefficient de répartition de la biomasse vers les parties aériennes en fonction de l'intensité de la contrainte peut être décrite par la formalisation suivante (Figure 4-24) :

$$\frac{\alpha_a(\theta, SEE_{moy})}{\alpha_a(\theta)} = \alpha_a(\theta, \infty) + [1 - \alpha_a(\theta, \infty)] e^{-d SEE_{moy}} \quad (\text{éq. 4.20})$$

où  $d$  est un paramètre représentant la croissance du rapport  $\alpha_a(\theta, SEE_{moy}) / \alpha_a(\theta)$  avec  $SEE_{moy}$  et  $\alpha_a(\theta, \infty)$  est un paramètre représentant la valeur asymptotique de  $\alpha_a(\theta, SEE_{moy})$ .

Les résultats du calage sont résumés dans le Tableau 4.12.

Modèle	$\alpha_a(\theta, \infty)$	$d$	Estimation de l'écart-type résiduel	$n$	$r^2$
$\alpha_a(\theta, SEE_{moy})$	1.6	0.11	0.044	11	0.97

Tableau 4.12 : Résultats du calage du modèle de répartition aérienne sur nos données expérimentales,  $n$  est le nombre d'observations et  $r^2$  le coefficient de détermination

## 5. DISCUSSION

### 5.1 Bilan des résultats

La saturation en eau du sol contribue à la genèse d'un milieu asphyxiant défavorable au fonctionnement de la plante. L'analyse des résultats expérimentaux sur l'accroissement racinaire conduit à la définition d'une variable de stress. Sur les cuves lysimétriques, la proportion du système racinaire soumis à un engorgement apparaît comme un bon indicateur du niveau de contrainte. Son expression est la suivante :

$$SEE (\%) = \frac{\int_{PZ-w}^{z \max} d(z) dz}{\int_0^{z \max} d(z) dz} \quad (\text{éq. 5.21})$$

Sur ce système expérimental, la contrainte est imposée par une nappe maintenue à un niveau constant. Nous dégagons des formalisations permettant de décrire l'accroissement en profondeur et en densité du système racinaire en condition d'excès d'eau. L'extrapolation de ces formalisations aux résultats obtenus dans des conditions agricoles permet de préciser les modalités de calcul de l'indicateur de contrainte. La proportion moyenne de racines envoyées pendant une durée de 2 jours explique le mieux la réponse de la plante à la contrainte. Le calage des fonctions stress sur ces données expérimentales décrit correctement la réponse de la plante en terme de croissance racinaire. Les expressions des formalisations, respectivement pour l'accroissement en profondeur et en densité, sont les suivantes :

$$\Delta z_{rac} (SEE) = \Delta z_{rac_0} * (\alpha e^{-\beta SEE} + \text{Constante}) \quad (\text{éq. 5.22})$$

$$\Delta \left( \int_0^{z \max} d(z) dz \right) = \Delta \left( \int_0^{z \max} d(z) dz \right)_0 * (\alpha e^{-\beta SEE} + \text{Constante}) \quad (\text{éq. 5.23})$$

Dans nos conditions expérimentales, le nombre de grains par m<sup>2</sup> détermine le rendement à la récolte. Cette composante se met en place au cours de la phase végétative, phase au cours de laquelle les risques liés à un excès d'eau sont importants. Les résultats expérimentaux montrent une réduction de l'émission de talles due à un engorgement en eau du sol. De plus, le taux de régression des talles augmente avec la contrainte. Ce résultat justifie une étude plus particulière sur les aspects de l'activité photosynthétique et de l'accumulation de biomasse. Nous mettons en évidence une réduction de l'accumulation de biomasse pour les plantes soumises à une contrainte

d'engorgement. Celle-ci est à relier avec la réduction de l'activité photosynthétique. La réduction du niveau d'activité photosynthétique maximale avec la contrainte hydrique peut être décrit par une fonction exponentielle dont l'expression est la suivante :

$$P_m(SEE) = P_{m0} * [ P_m(\infty) + (1 - P_m(\infty)) e^{-\delta SEE} ] \quad (\text{éq. 5.24})$$

En présence d'un excès d'eau, la biomasse produite est préférentiellement orientée vers une accumulation dans les parties aériennes. La masse surfacique des feuilles est supérieure pour les plantes soumises à une asphyxie racinaire. La distribution des assimilats s'oriente vers une accumulation dans les parties aériennes. La variation du coefficient de répartition de la biomasse vers les parties aériennes en fonction de l'intensité de la contrainte est décrite par la formalisation suivante :

$$\alpha_a(\theta, SEE) = \alpha_a(\theta) * [ \alpha_a(\theta, \infty) + [ 1 - \alpha_a(\theta, \infty) ] e^{-d SEE} ] \quad (\text{éq. 5.25})$$

La réduction du nombre de talles et de l'accumulation de biomasse conduit à une réduction de l'expansion foliaire. La surface interceptrice du rayonnement est réduite de façon significative. La réduction de l'accroissement foliaire avec la contrainte est décrite par la fonction suivante :

$$\Delta LAI(SEE) = LAI(t) e^{(-c SEE)} \quad (\text{éq. 5.26})$$

L'évolution de la valeur du facteur de stress en fonction de l'intensité de la contrainte pour chacune des expressions décrites est présentée sur la Figure 5-1.

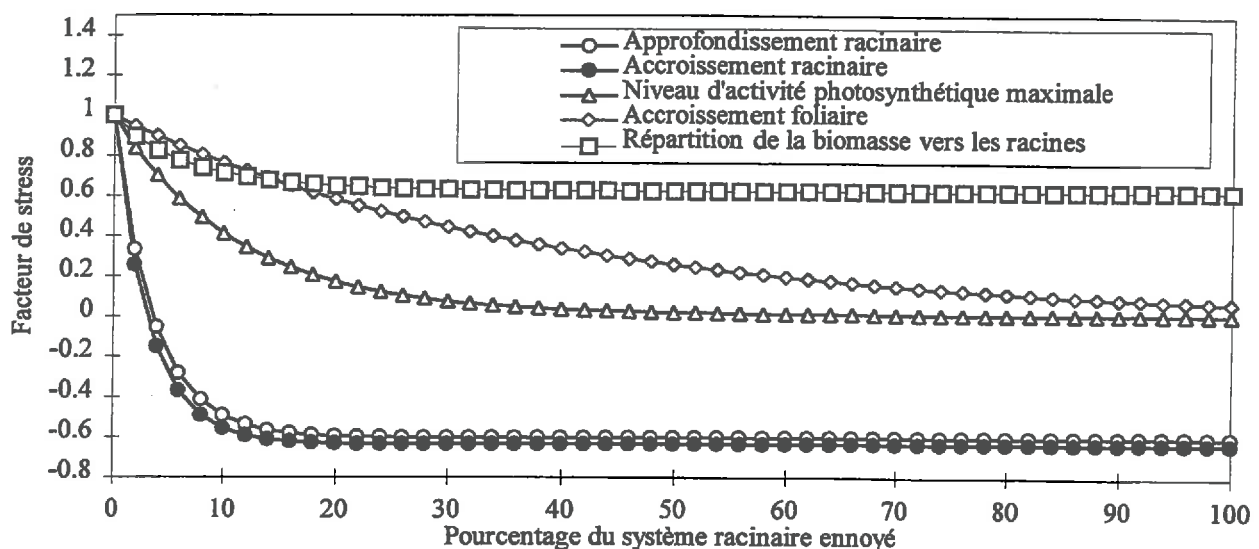


Figure 5-1 : Illustration du calcul du facteur de stress pour chacune des fonctions décrivant la réponse de la plante à une contrainte d'engorgement

## 5.2 Validité de la démarche

La comparaison entre les résultats obtenus sur les cuves et dans des conditions de plein champ a permis de mettre en évidence des différences de réponse de la plante à un excès d'eau. Ces différences ont été le plus souvent attribuées aux conditions expérimentales et surtout aux périodes d'application des contraintes relatives aux stades de développement de la culture. La conséquence directe a été la nécessité de caler les paramètres des fonctions stress de manière à ce qu'elles décrivent au mieux la réponse de la plante. Ces différents calages conduisent à de nouveaux jeux de paramètres adaptés aux conditions de plein champ. On peut s'interroger sur la validité de notre démarche. En effet, de nombreux auteurs, sur plusieurs types de culture, ont mis en évidence l'influence de la période du cycle végétatif pendant laquelle intervient l'asphyxie (Tableau 5.1).

Cultures	
Blé	Bousqué (1992)
	Cannell (1984)
	Cannell et al (1980)
	Davies et Hillman (1988)
	Luxmoore et al (1973)
Orge	Cannell (1984)
	M'Barek Ben Naceur (1987)
Colza	Silvestre (1992)
Soja	Evans et al (1990)
Maïs	Evans et al (1990)
Dactyle	Duru et al (1991)
Fétuque	M'Barek Ben Naceur (1987)

Tableau 5.1 : Liste non exhaustive des travaux mettant en évidence l'influence des stades de développement sur la sensibilité de la plante à une asphyxie racinaire

Ces observations ont conduit les "modélisateurs" à introduire des facteurs de sensibilité selon le stade de développement de la plante (Evans et al, 1990). D'une manière générale il est admis que "les blés asphyxiés pendant la période active du cycle végétatif seront davantage pénalisés car leur système racinaire restera limité jusqu'à la fin du cycle" (Bousqué, 1992).

Comme nous avons pu l'observer sur la Figure 4-19 il semble exister un rattrapage lorsque la contrainte est levée. En effet, il a été mis en évidence que la remise en aération des racines

provoque une stimulation de l'élongation par rapport à celle d'un système racinaire continuellement aéré (Bousqué, 1992). Selon l'intensité des réductions il semble exister des nuances dans l'importance de la compensation. Il existe aussi des mécanismes d'adaptation que nous avons pu mettre en évidence lors de l'analyse des profils racinaires (Chapitre II, § 3). On observe une augmentation du nombre de racines adventives en condition d'anoxie. Bousqué (1992) montre qu'elle se produit uniquement si l'asphyxie intervient pendant le tallage. Ces racines ont une morphologie particulière avec la formation de cavités cellulaires permettant un transfert interne de l'oxygène depuis les feuilles jusqu'au système racinaire (Evans et Ebert, 1960). Il existe également des différences variétales, selon la porosité racinaire, qui procure des tolérances à l'excès d'eau. Ces phénomènes d'adaptation ne sont pas généralisables à tout le cycle du blé.

### Qu'en est-il des conditions pédologiques ?

La plupart des observations décrivant les mécanismes d'adaptation ou de compensation de la plante à une asphyxie sont mises en évidence dans des conditions contrôlées. Dans ce cas, la remise en condition aéré est immédiate. En revanche dans des conditions agricoles, le retour à un état "aéré" n'est pas aussi immédiat lorsque la nappe disparaît. Le sol présente une inertie naturelle et une mémoire. Il suffit de considérer l'ensemble des graphiques mettant en relation la réponse de la plante avec la variable de stress pour mettre en évidence cette inertie. En effet lorsque la nappe n'est plus dans le système racinaire, la variable de stress est nulle. Sur ces figures (Figures 3.8, 3.14, 4.10, 4.12, 4.23) la variabilité des observations lorsque  $SEE(\%) = 0$  est importante et l'inertie du sol constitue un des éléments d'explication. Dans ce cas les mécanismes de compensation et d'adaptation n'ont pas l'importance que l'on pourrait leur accorder.

Les relations fonctionnelles calées sur les résultats de terrain sont intégratrices de l'ensemble de ces phénomènes (adaptation de la plante, inertie du sol). Peut-être pourrions-nous également donner un sens au calcul de la variable de stress sur une durée de 2 jours ?

Nous supposons que les paramètres que nous avons obtenus ont un sens pour la période du cycle de la plante sur laquelle ils ont été calés. Dans des conditions naturelles, les excès d'eau coïncident avec la période levée-début montaison, c'est sur cette période que nos paramètres ont été obtenus. L'introduction des fonctions dans le modèle de culture décrit au chapitre I (§ 2) permettra d'apporter des éléments de discussion quant à la robustesse de la démarche au travers de validations.

# CHAPITRE III

## MISE EN OEUVRE ET VERIFICATION DU MODELE DE CROISSANCE ET DEVELOPPEMENT DE LA PLANTE

- 1 - Gestion de la recharge pluviométrique
- 2 - Calcul du facteur de stress et intégration des fonctions stress à l'excès d'eau
- 3 - Acquisition des paramètres du modèle
- 4 - Vérification du modèle

<b>INTRODUCTION</b> .....	132
<b>1. PREDICTION DES DATES D'APPARITION ET DE DISPARITION DE LA NAPPE</b> .....	134
1.1 Fonctionnement hydrologique d'une parcelle drainée .....	134
<i>Saison d'amorce de drainage</i> .....	134
<i>Saison de drainage intense</i> .....	137
<i>Fin de saison de drainage</i> .....	138
<i>Discussion</i> .....	139
1.2 Modalités de gestion de la recharge nette, mise en oeuvre du modèle couplé.....	140
<i>Approche simplifiée pour la prédiction des dates de fonctionnement du drainage</i> .....	140
<i>Utilisation d'un modèle de bilan hydrique élaboré</i> .....	143
1.3 Conclusion .....	145
<b>2. MISE AU POINT DES FONCTION DE STRESS</b> .....	146
2.1 Calcul de la variable de stress à l'excès d'eau .....	146
2.2 Mise au point des fonctions de stress.....	147
<i>Croissance racinaire en profondeur</i> .....	147
<i>Expansion foliaire</i> .....	149
<i>Accumulation de biomasse</i> .....	150
<b>3. ACQUISITION DES PARAMETRES DU MODELE</b> .....	154
3.1 Bilan hydrique.....	154
<i>Paramètres géométriques du dispositif modélisé</i> .....	154
<i>Paramètres hydrodynamiques du système drainant</i> .....	154
<i>Coefficient de forme de nappe</i> .....	156
<i>Humidités caractéristiques</i> .....	157
3.2 Paramètres décrivant la croissance et le développement de la culture.....	159
<b>4. VERIFICATION ET VALIDATION LOCALE DU MODELE</b> .....	160
4.1 Validation du bilan hydrique .....	161
<i>Teneur en eau sur la zone non saturée et recharge nette</i> .....	161
<i>Profondeur de nappe et débit au drain</i> .....	164
<i>Variable de stress</i> .....	165
4.2 Croissance et développement du blé.....	166
<i>Stades de développement</i> .....	166
<i>Profondeur et densité racinaire</i> .....	166
<i>LAI et biomasse aérienne</i> .....	168
<i>Rendement</i> .....	170
<b>5. DISCUSSION</b> .....	171



## INTRODUCTION

Le modèle BLEX est construit à partir du modèle de culture GOA et du module de bilan hydrique issu du couplage entre BYM et SIDRA (Chapitre I). L'analyse de l'effet d'un excès d'eau sur la croissance de la plante nous a conduit à la définition d'une variable de stress (SEE(%)) et à la construction de fonctions stress à l'excès d'eau (Chapitre II). Ici, nous décrivons l'intégration de l'effet d'un excès d'eau dans le modèle de culture et vérifions son fonctionnement (Figure 1.1).

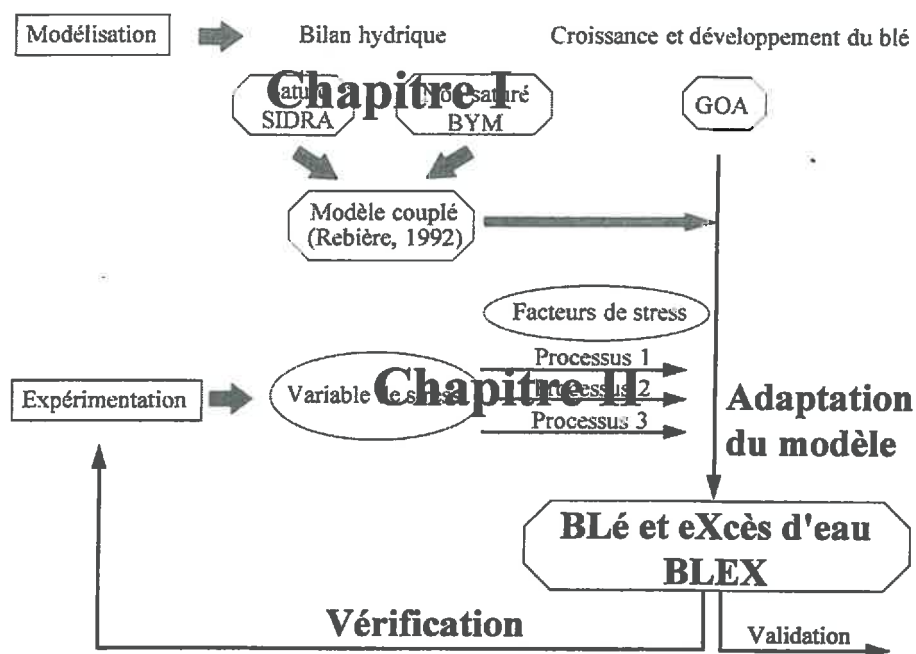


Figure 1.1 : Schématisation de la démarche pour la prise en compte de l'effet d'un excès d'eau dans un modèle de croissance et développement d'une culture de blé d'hiver (SIDRA est un modèle de simulation du drainage et BYM un modèle de bilan hydrique adapté aux modèles de simulation de culture)

L'intégration de la contrainte d'engorgement en eau du sol dans le modèle de croissance et développement de la plante a nécessité l'extension du fonctionnement du modèle de bilan hydrique à la simulation des transferts d'eau en milieu saturé. Sur une parcelle drainée, le caractère temporaire de la contrainte est à considérer. L'incapacité de l'eau à s'infiltrer en profondeur provoque la formation d'une nappe perchée temporaire. Les écoulements enregistrés à la sortie du réseau de drainage ne sont correctement décrits par les formules de l'hydraulique souterraine que lorsque la saturation est atteinte sur l'ensemble du profil de sol jusqu'à l'imperméable (Zimmer, 1988). La modélisation du bilan hydrique sur une parcelle drainée nécessite une étude approfondie du fonctionnement hydrologique et notamment des mécanismes de formation et de disparition de la nappe perchée temporaire (§ 1).

L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis de définir un indicateur de contrainte. Nous présentons la méthode de calcul de la variable de stress dans le modèle de bilan hydrique. Elle assure le lien avec le modèle de croissance et développement de la plante par l'intermédiaire des fonctions stress obtenues à partir des données expérimentales. Nous décrivons l'intégration de ces fonctions dans le modèle (§ 2).

Outre les variables d'entrée, le fonctionnement du modèle nécessite l'acquisition de paramètres (géométriques, hydrodynamiques et agronomiques). Nous présentons des méthodes de mesure ou d'estimation de ces paramètres (§ 3). Une fois ces paramètres acquis, nous procédons à une vérification du modèle à partir des résultats expérimentaux obtenus sur la parcelle 1 du site expérimental d'Arrou (§ 4).

## 1. PREDICTION DES DATES D'APPARITION ET DE DISPARITION DE LA NAPPE : COUPLAGE DU MODELE BYM-SIDRA

La construction du modèle couplé doit intégrer des spécificités liées au fonctionnement hydrologique d'une parcelle drainée. En effet, l'engorgement en eau du sol étant temporaire le module du bilan hydrique décrivant les transferts en milieu saturé est mis en oeuvre temporairement lors des périodes de fonctionnement du réseau de drainage. En dehors de ces périodes c'est le modèle décrivant les transferts d'eau en milieu non saturé qui établit le bilan hydrique. Après avoir décrit les particularités du fonctionnement hydrologique d'une parcelle drainée, nous présentons une méthode permettant de prédire les périodes de fonctionnement du réseau de drainage.

### 1.1 Fonctionnement hydrologique d'une parcelle drainée

L'étude du fonctionnement hydrologique des parcelles drainées par tuyaux enterrés montre qu'au cours d'une campagne, le réseau de drainage passe par trois phases de fonctionnement distinctes (Aldanondo, 1981). Les trois phases de fonctionnement sont l'amorce de drainage (AD), la saison de drainage intense (SDI) et la fin de saison de drainage (FD).

- *Saison d'amorce de drainage*

La saison de drainage débute en moyenne à la mi-septembre lorsque la pluie devient prépondérante par rapport à l'évapotranspiration. Nous assistons à la reconstitution des réserves en eau du sol. Il peut y avoir formation d'une nappe au dessus de l'horizon imperméable avec l'apparition de faibles débits à la sortie du réseau de drainage (Figure 1.1).

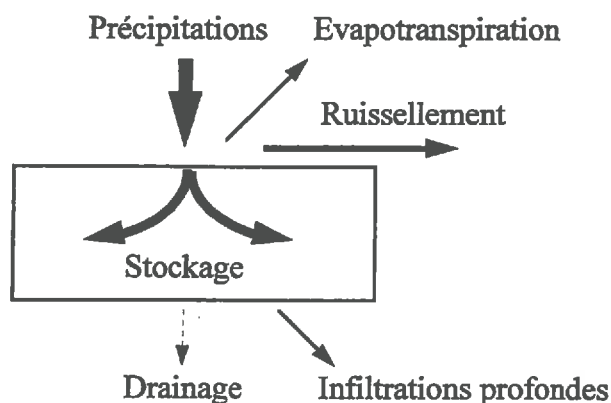


Figure 1.1 : Schématisation du bilan hydrique en saison d'amorce de drainage (la taille des flèches indiquent l'importance relative des termes du bilan hydrique)

Guyon (1983) a mis en évidence un système à deux nappes superposées dès l'apparition des pluies d'automne et propose la schématisation présentée sur la Figure 1.2.

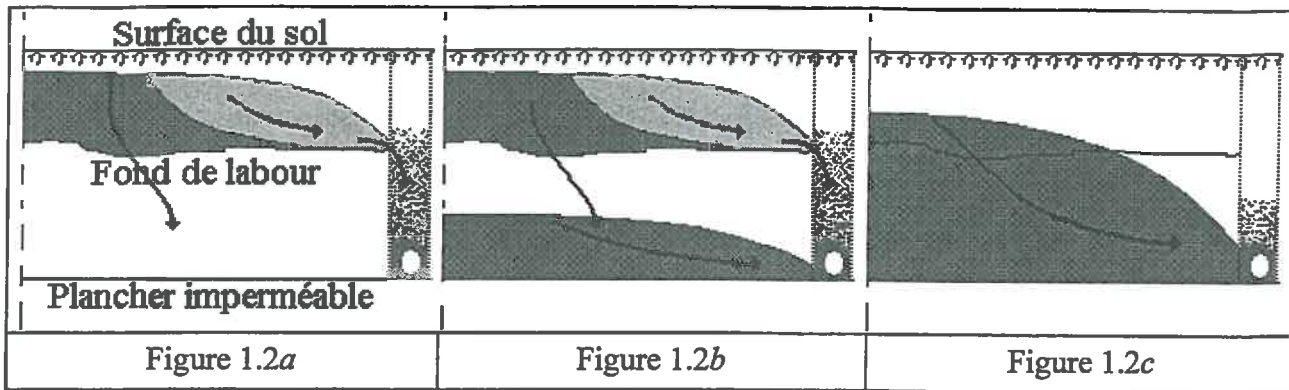


Figure 1.2 : Schématisation de l'évolution du système hydraulique à deux nappes superposées (d'après Guyon, 1983)

"Il se forme d'abord une nappe perchée dans l'horizon superficiel au contact des pluies infiltrées avec le fond du labour ou du griffage, dont une partie des eaux est évacuée par les tranchées, l'autre partie percolant en profondeur (Figure 1.2a), puis une seconde nappe perchée se forme dans l'horizon sous-jacent au contact de l'eau de percolation avec une couche de sol moins perméable (Figure 1.2b). Enfin, généralement avant la fin du mois de décembre, ces deux nappes se résolvent en une seule quand le plancher de la nappe supérieure rejoint le toit de la nappe inférieure (Figure 1.2c)".

Au cours de la phase présentée sur la Figure 1.2b, Guyon (1983) montre que les variations de la nappe inférieure sont lentes. Sans apport pluviométrique, le débit dû à cette nappe peut être estimé à partir la formule du régime permanent (éq. 1.1).

$$Q = \frac{\tilde{K}(H) H^2}{L^2} \tag{éq. 1.1}$$

L'application de cette formule aux résultats expérimentaux montre que le débit ainsi calculé reste inférieur à celui mesuré à la sortie du réseau drainage (Guyon, 1983). Ce résultat tend à montrer la contribution au débit de drainage d'une source autre que la nappe inférieure. L'observation des chroniques piézométriques, débitmétriques et pluviométriques au cours de la campagne 93-94 permet de mettre en évidence des mécanismes allant dans le sens de cette observation (Figure 1.3). Un premier débit (14 décembre) est enregistré après un événement pluvieux (intensité de 8 mm/h) sans présence de nappe inférieure. A la suite d'un second événement pluvieux, nous assistons à la formation de la nappe inférieure sur le plancher imperméable et enregistrons un pic de débit qui ensuite se tarit. Dans le même temps, la nappe continue à monter puis se stabilise. On atteint le "régime permanent" décrit par Guyon (1983), avec un débit de base et une nappe stable.

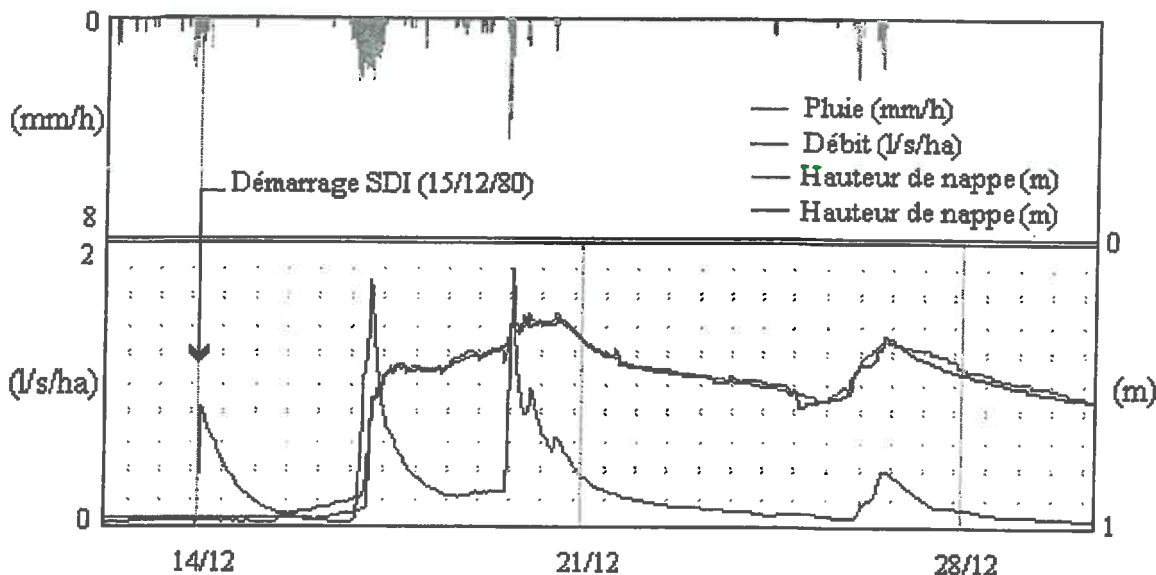


Figure 1.3 : Chronique pluviométrique, débitmétrique et piézométriques à l'inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1980-1981, début de la SDI 15/12/1980

Cette observation montre qu'il existe une alimentation de la nappe par les horizons supérieurs. Le 18 décembre, la nappe passe au dessus du fond de labour, à la suite d'un événement pluvieux (avec des intensités atteignant 4 mm/h pendant plusieurs heures). On revient à un schéma classique de périodes de pics de débit et de remontée de nappe puis de tarissements simultanés. La visualisation de l'évolution des profils tensiométriques (pression mesurée tous les 10 cm à l'inter-drain) permet d'apporter des éléments d'explications complémentaires (Figure 1.4).

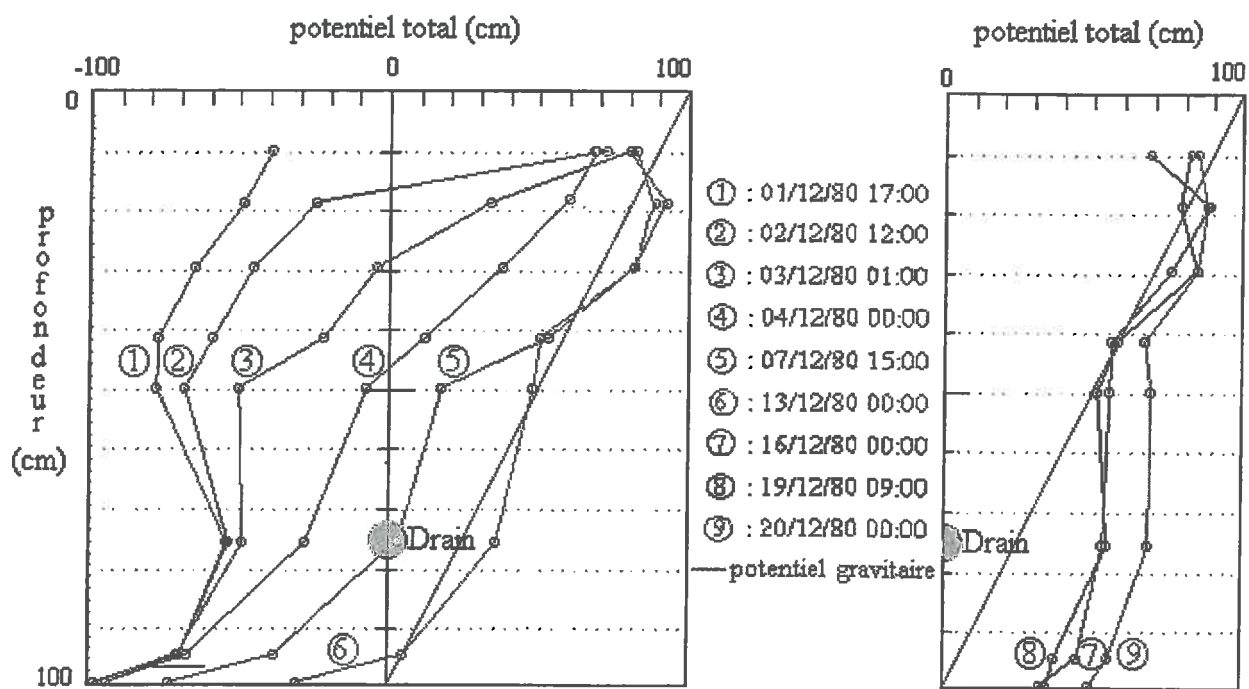


Figure 1.4 : Chronique de profils tensiométriques à l'inter-drain, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994, début SDI le 19/12/1993

L'évolution du potentiel total de l'eau du sol, profils 1 à 4, montre la saturation progressive du profil de sol. A partir du 07 décembre (profil 5), dans l'horizon labouré, le potentiel total est supérieur au potentiel gravitaire traduisant la présence d'une nappe alors même que les couches situées sous l'horizon labouré ne sont pas saturées. Le profil tensiométrique numéro 6 décrit l'existence de deux zones saturées, sur l'horizon imperméable, "nappe inférieure", et sur le fond de labour, "nappe superficielle". Le toit de cette nappe inférieure est toujours situé sous le fond de labour. A partir du profil 7, la nappe inférieure remonte dans l'horizon labouré, puis les deux nappes se résolvent (profil 9).

La date de démarrage de la saison de drainage intense a été estimée, par la méthode des doubles-cumuls (voir § suivant), au 19 décembre. Cette date coïncide avec la saturation totale du profil de sol (profil 8).

### • Saison de drainage intense

Au cours de cette saison, la réponse du réseau de drainage à une pluie est rapide, une seule nappe fluctue en permanence dans le profil de sol (Figure 1.5). Cette nappe est communément appelée «nappe perchée temporaire». La totalité de l'eau parvenant à la surface du sol est restituée par le réseau de drainage.

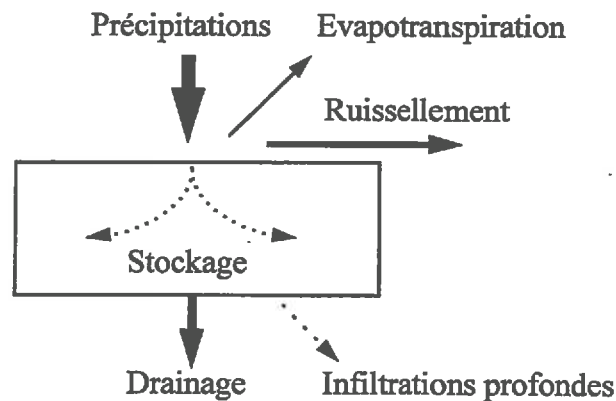


Figure 1.5 : Schématisation du bilan hydrique en saison de drainage intense (la taille des flèches indiquent l'importance relative des termes du bilan hydrique)

La détermination, a posteriori, des dates de démarrage et de fin de la saison de drainage intense repose sur l'exploitation graphique, sous forme de doubles-cumuls, des variables débits et précipitations cumulées.

$$Q(T) = \sum_{t=t_i}^T Q(t) \quad (\text{éq. 1.2})$$

$$P(T) = \sum_{t=t_i}^T P(t) \quad (\text{éq. 1.3})$$

où  $t_i$  est l'instant à partir duquel le cumul est initié et  $T$  est la durée pendant laquelle il est réalisé,  $Q(T)$  et  $P(T)$  sont respectivement les cumuls des débits et des précipitations à partir de  $t_i$ .

Les dates de démarrage et fin de la saison de drainage intense correspondent au début et à la fin de la période où la pente de la courbe de doubles-cumuls est maximale et relativement constante. La pente de la courbe de doubles-cumuls représente le coefficient de restitution (CR) au cours de la saison de drainage intense (Figure 1.6).

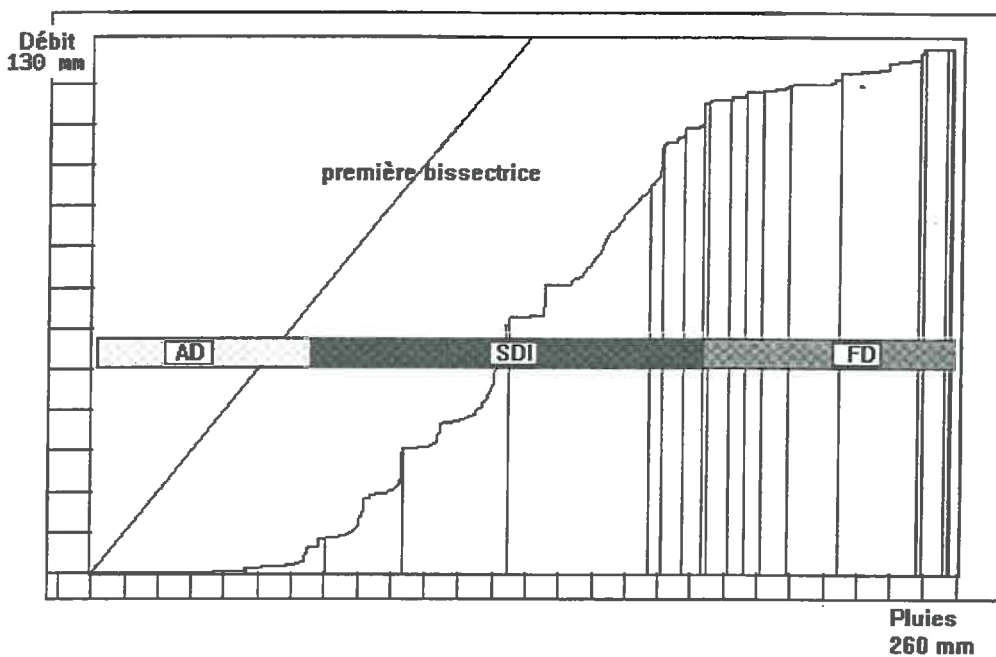


Figure 1.6 : Débits cumulés en fonction des pluies cumulées, site expérimental d'Arrou, Parcelle 1, campagne 1981-82 du 16 novembre au 02 mai (une barre verticale : une semaine), AD : amorce de drainage, SDI : saison de drainage intense, FD : fin de saison de drainage

### • Fin de saison de drainage

L'évapotranspiration devient prépondérante par rapport à la pluie. On assiste à la disparition de la nappe, les réserves en eau diminuent. Il peut persister, au niveau des drains, des écoulements liés à de fortes intensités pluviométriques conduisant parfois à la formation d'une nappe temporaire. (Figure 1.7).

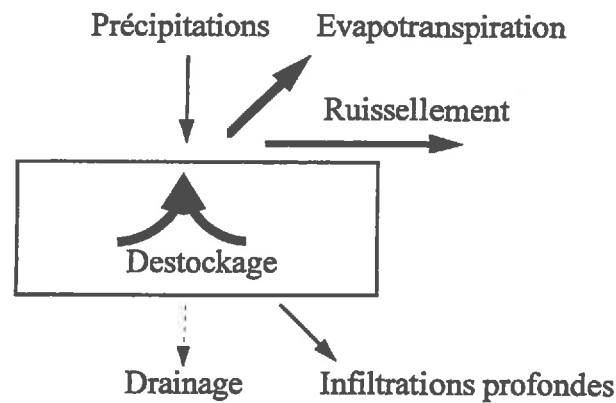


Figure 1.7 : Schématisation du bilan hydrique en fin de saison de drainage (la taille des flèches indiquent l'importance relative des termes du bilan hydrique)

### • Discussion

Avant le démarrage de la SDI, il peut exister des contraintes d'engorgement liées à la formation d'une nappe superficielle : la nappe perchée temporaire se forme généralement avant le démarrage de la SDI. Les conséquences sur la modélisation du bilan hydrique sont grandes. En effet, le modèle doit permettre d'établir un bilan hydrique sur la zone non saturée du sol et de décrire les écoulements en milieu saturé. La saturation du profil de sol et la formation de la nappe perchée étant temporaire, le modèle doit intégrer des modalités de gestion de la formation et de la disparition de la nappe dans le profil de sol. En effet, dans le modèle couplé, le bilan hydrique est établi sur une profondeur de sol donnée. Si le couplage entre zone non saturée et zone saturée est permanent, lorsque la totalité du profil de sol décrit est à la capacité au champ, l'excédent d'eau est traduit en accumulation d'eau (formation d'une nappe) alors que sur le terrain la couche de sol concernée par la reconstitution des réserves en eau risque d'être plus profonde. De plus l'ensemble des termes du bilan hydrique (ruissellement et infiltrations profondes) n'étant pas pris en compte des hauteurs de nappe fictives peuvent être simulées. Nous en déduisons que le couplage ne doit pas être permanent et doit être géré par un paramètre adapté aux conditions de terrain. Deux choix sont possibles pour gérer cette situation. Soit les dates de fonctionnement du réseau de drainage sont imposées comme données d'entrée du modèle ce qui pose des interrogations lorsque ces dates ne sont pas disponibles. Soit ces dates peuvent être prédites par le modèle ce qui nécessite la définition de règles, intrinsèques au modèle, permettant de gérer la formation et la disparition de la nappe et d'établir le couplage avec le modèle saturé.



## 1.2 Modalités de gestion de la recharge nette, mise en oeuvre du modèle couplé

La détermination a posteriori des périodes de fonctionnement des réseaux de drainage a fait l'objet de nombreux travaux (Aldanondo, 1981 ; Guyon, 1983 ; Guyon et Lesaffre, 1986 ; Lesaffre, 1988 ; Zimmer, 1988). En revanche, leur prédiction est peu documentée. Or, prévoir les dates de fonctionnement d'un réseau de drainage est un objectif qui intéresse tant le technicien, qui doit mettre en place une expérimentation dans des conditions particulières qu'il ne peut appréhender sans dispositif expérimental, que l'agriculteur qui trouve là une information utile pour orienter ses interventions culturales. Cette prédiction intéresse également l'hydrologue qui doit faire le lien entre un événement pluvieux et la réponse du bassin versant. Enfin et c'est là l'objectif qui motive cette étude, cette prédiction est un passage obligé pour la modélisation pluri-annuelle du bilan hydrique sur une parcelle drainée soumise à un excès d'eau temporaire. La mise en oeuvre du modèle couplé repose sur la détermination a priori des périodes de fonctionnement du réseau de drainage.

Nous avons élaboré une méthode permettant de prédire le démarrage et la fin de la saison de drainage et de gérer la mise en oeuvre du modèle couplé. Cette méthode est appliquée aux données acquises sur la parcelle 1 du site expérimental d'Arrou depuis 1974.

Nous présentons une approche simplifiée basée uniquement sur un bilan des excédents climatiques puis à l'aide du modèle de bilan hydrique nous déterminons des critères intrinsèques à celui-ci permettant d'initier le couplage du module non saturée avec le module de gestion de la nappe.

- *Approche simplifiée pour la prédiction des dates de fonctionnement d'un réseau de drainage*

### ➤ *Démarrage de la saison de drainage*

Les données expérimentales nécessaires sont les précipitations, l'ETP et la date de démarrage du fonctionnement du réseau de drainage. Un bilan journalier, noté BH, est effectué à partir des variables climatiques P et ETP.

$$BH(t) = P(t) - ETP(t) \quad (\text{éq. 1.4})$$

Le cumul de  $BH(t)$  commence à la fin de la saison de drainage intense de la campagne précédente ( $t_i$ ) déterminée par la méthode des doubles-cumuls. Ainsi, nous sommes assurés de partir avec un stock connu et maximal.

$$BH(T) = \sum_{t=t_i}^T BH(t) \quad (\text{éq. 1.5})$$

Nous recherchons la valeur minimale de la suite  $BH(T)$ . Puis, à partir de la date correspondant à ce minimum, les excédents climatiques ( $P-ETP > 0$ ) sont cumulés. Nous déterminons, pour chaque campagne, la lame d'eau cumulée nécessaire au fonctionnement du réseau de drainage, "restockage,  $L_k$ ".

Pour chaque campagne nous connaissons expérimentalement les dates de démarrage de la saison de drainage. Les caractéristiques des campagnes sont présentées à l'annexe 3.1. La Figure 1.8 illustre la méthode de calcul du terme restockage.

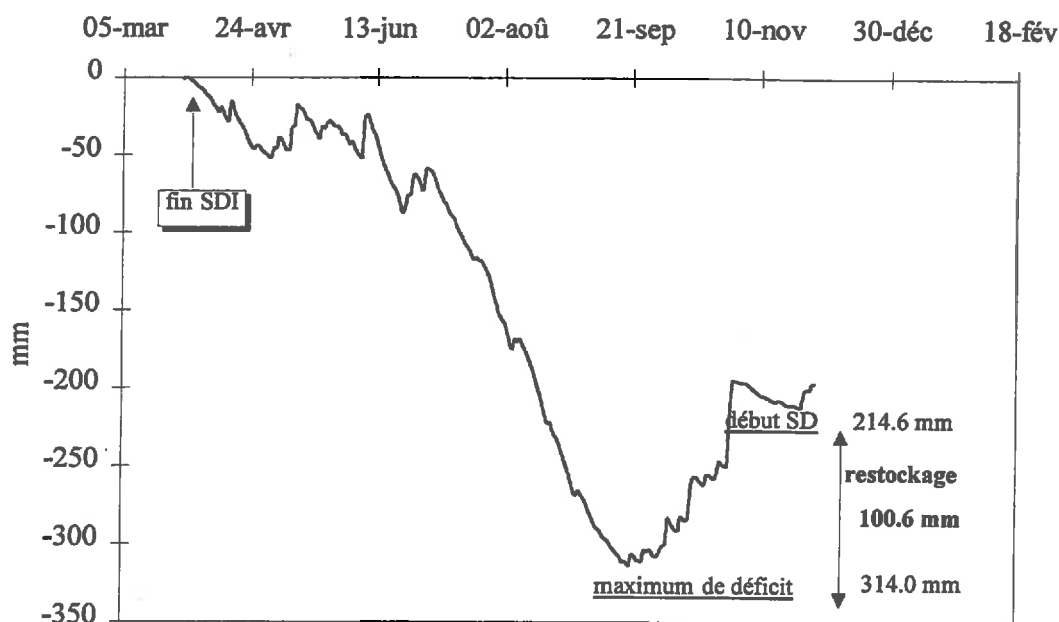


Figure 1.8 : Chronique du bilan climatique cumulé,  $BH(T)$ , données climatiques de la Météorologie Nationale, station de Chateaudun

Les valeurs du paramètre  $L_k$  ainsi obtenues par cette méthode, pour une quinzaine de campagnes de mesures sur la parcelle 1 du site expérimental d'Arrou, sont présentées sur la Figure 1.9 et sont synthétisées dans le Tableau 1.1.

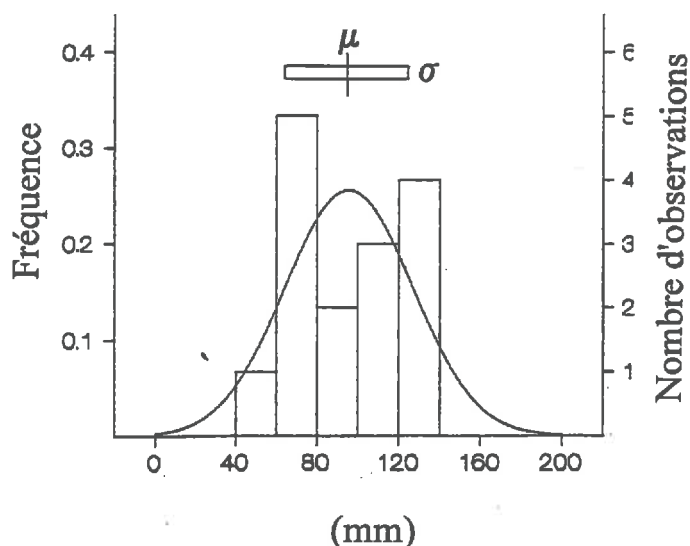


Figure 1.9 : Variabilité inter-annuelle du paramètre restockage,  $L_p$ , bilan climatique P-ETP

➤ Arrêt des écoulements

La comparaison de la courbe de cumul du bilan climatique avec la chronique des débits enregistrée à la sortie du réseau de drainage met bien en évidence le rôle de l'ETP sur l'arrêt des écoulements (Figure 1.10).

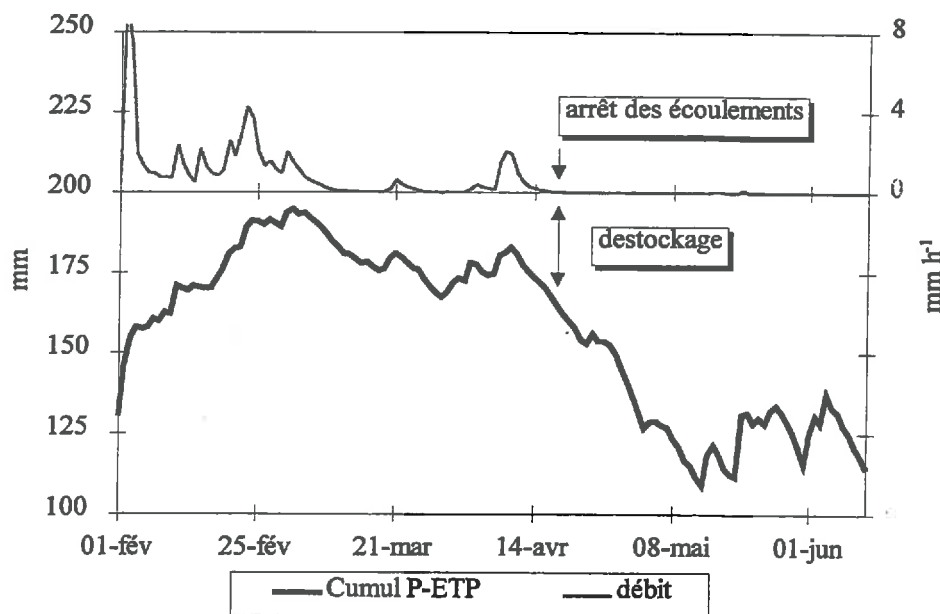


Figure 1.10 : Chronique du débit aux drains et du cumul P-ETP, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994, station météorologique de Chateaudun

Au cours de la saison de drainage, une fois déterminé le maximum de la suite BH(T), les déficits climatiques sont cumulés à partir de la date correspondant à ce maximum. Le cumul prend fin lorsque l'on ne mesure plus de flux à la sortie du réseau de drainage. Les valeurs du terme restockage,  $D_k$ , ainsi calculées sont présentées sur la Figure 1.11 et sont synthétisées dans le Tableau 1.1.

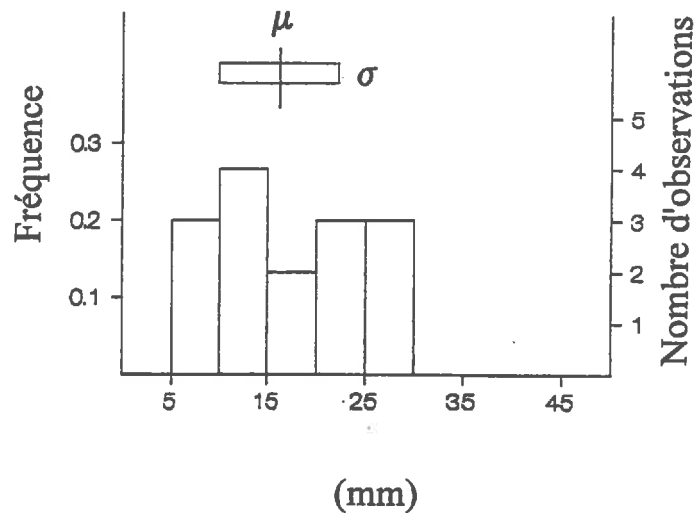


Figure 1.11 : Variabilité inter-annuelle du paramètre destockage,  $D_v$ , bilan climatique P-ETP

### ➤ Discussion

La démarche décrite pour la recherche d'un critère de prédiction de début et de fin de la saison de drainage repose uniquement sur les données climatiques. Elle présente l'avantage d'être simple dans sa mise en oeuvre. On note une variabilité importante des valeurs du paramètre  $L_k$ . Cette variabilité s'explique en partie par le fait que cette méthode repose sur l'ETP et non l'ETR. Au cours de la période hivernale, le bilan climatique cumulé est excédentaire, l'hypothèse faite en prenant l'ETR égale à l'ETP est donc valide. La réserve en eau du sol n'est pas limitante pour le processus d'évapotranspiration. En revanche, au cours de la saison estivale cette hypothèse n'est plus valide et la valeur du déficit maximal estimée ne correspond pas à la réalité. La variabilité du terme restockage, en particulier, pourra être réduite en introduisant les valeurs des coefficients culturaux,  $k$ , tels qu'ils ont été définis par Robelin (1969) ou en utilisant un modèle de bilan hydrique plus élaboré.

#### • Utilisation d'un modèle de bilan hydrique élaboré

Le modèle de bilan hydrique utilisé pour l'identification d'un critère de prédiction des dates de fonctionnement du réseau de drainage est le modèle BYM décrit dans le chapitre I (§ 2). Développé pour des conditions non saturées, ce modèle permet de calculer une ETR journalière et d'estimer le stock d'eau dans le profil de sol.

Le bilan hydrique est réalisé sur une profondeur de sol de 80 cm. La culture la plus souvent implantée sur la parcelle 1 pour les campagnes de 1974 à 1994 étant une céréale d'hiver (escourgeon ou blé) les simulations sont réalisées pour une culture de blé d'hiver.

Suivant la même démarche que celle utilisée pour l'approche simplifiée, nous recherchons la date correspondant au stock d'eau minimal calculé par le modèle. A partir de cette date, les réserves en eau du sol se reconstituent. Une fois ces réserves reconstituées, teneur en eau à la capacité au champ, si les précipitations persistent le modèle BYM simule une variable « Excédent hydrique » vers le sous-sol, variable Drain2. Les lames d'eau ainsi drainées vers le sous-sol sont cumulées jusqu'à que nous observions, au champ, le démarrage de la saison de drainage. La lame d'eau ainsi cumulée depuis la saturation du profil de sol peut être utilisée comme critère de prédiction du démarrage du fonctionnement du réseau de drainage. Au delà de cette lame d'eau, le couplage avec le modèle saturé est initié, la variable Drain2 constitue alors la recharge nette prise comme variable d'entrée dans le modèle de gestion de la zone saturée. Le principe de fonctionnement du modèle de calcul du restockage est illustré dans l'annexe 3.1.

La simulation est réalisée pour les campagnes dont nous disposons les dates de début de fonctionnement du réseau de drainage sur la parcelle 1 du site expérimental d'Arrou, soit environ 15 campagnes. Les valeurs du restockage ainsi calculées sont présentées sur la Figure 1.12 et sont synthétisées dans le Tableau 1.1.

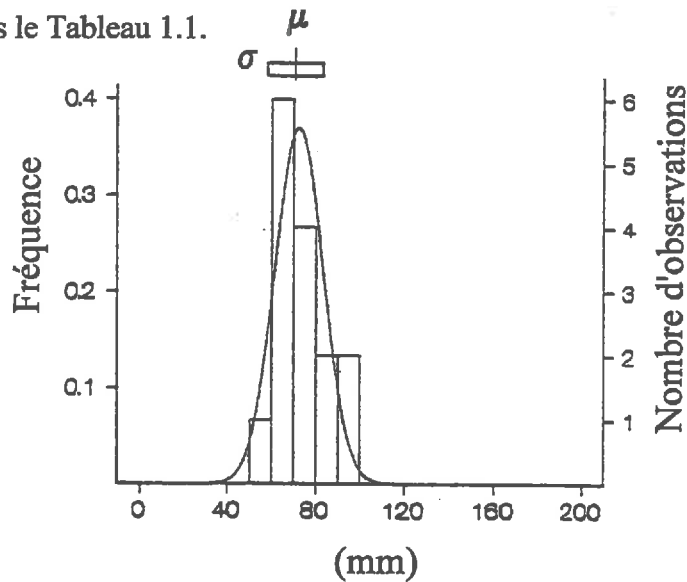


Figure 1.12 : Variabilité inter-annuelle du paramètre restockage,  $L_b$  modèle élaboré

Modèle	Valeur moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Nombre d'observations
Bilan climatique	95	30	15
Bilan climatique (Robelin)	90	12	15
Modèle élaboré	70	8	15

Tableau 1.1 : Valeur moyenne du paramètre "restockage" pour les trois approches

On note une réduction importante de la variabilité de ce terme avec l'approche utilisant le modèle de bilan hydrique. Ceci semble logique au regard du nombre de mécanismes pris en compte. Les valeurs du critère de découplage sont déterminées de la même manière. Les résultats obtenus ne sont pas significativement différents de ceux obtenus par bilan climatique (Tableau 1.2).

Modèle	Valeur moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Nombre d'observations
Bilan climatique	16	7	15
Modèle élaboré	18	5	15

Tableau 1.2 : Valeur moyenne du paramètre "destockage" pour les deux approches

### 1.3 Conclusion

La prédiction des périodes de fonctionnement du réseau de drainage basée uniquement sur un bilan climatique peut conduire à des écarts importants ( $> 50$  mm de P-ETP). La prise en compte de la culture en place via les coefficients culturaux réduit considérablement la variabilité du critère. L'écart maximal ne dépasse pas 20 mm. Cette méthode d'approche par bilan climatique "corrigé" (P-kETP) est fiable pour la prédiction des dates de fonctionnement du réseau de drainage et peut intéresser le technicien, l'agriculteur ou encore l'hydrologue. En revanche, si l'on s'intéresse à la modélisation du bilan hydrique à l'échelle parcellaire, elle n'est pas assez précise. Le décalage entre réalité et prédiction peut introduire une erreur non négligeable dans les applications ultimes du modèle (agronomique, biochimique ... etc.). Dans ce cas, une détermination intrinsèque au modèle, de la valeur du critère de prédiction, permet d'améliorer de façon significative la prédiction. En revanche, étant intrinsèque au modèle, la valeur du critère moyen de prédiction n'a de sens que pour le modèle utilisé pour la déterminer.

Sur le site expérimental d'Arrou, le couplage pourra être initié lorsque le cumul de la lame d'eau drainée vers le sous-sol atteindra la valeur de 70 mm. Cela signifie que ces 70 mm correspondent à des pertes globales du système. Après un déficit climatique de 18 mm en moyenne, le découplage pourra être réalisé. Le modèle de bilan hydrique sur la zone non saturée intègre des règles de genèse et de disparition d'une nappe perchée temporaire. Il établit le couplage avec le système hydraulique (gestion de nappe) et intègre les modifications des modalités de calcul des réserves en eau et des flux transférés. Lors de la mise en oeuvre du couplage, la totalité de la lame d'eau constituant la recharge nette sera transmise intégralement à la nappe puis évacuée par le réseau de drainage. En dehors de la saison de drainage seul le modèle BYM établit le bilan hydrique.

## 2. MISE AU POINT DES FONCTION DE STRESS

L'approche conceptuelle utilisée dans la construction du modèle GOA offre des possibilités d'introduction des effets d'un excès d'eau. Le modèle de bilan hydrique doit permettre d'estimer la variable de stress. Nous présentons la conceptualisation retenue pour estimer la contrainte. Les variables décrivant la croissance de la plante affectée par un excès d'eau sont l'accroissement racinaire, l'expansion foliaire et l'accumulation et la répartition de biomasse. Nous décrivons les modalités d'introduction des fonctions stress dans le modèle de croissance et développement de la plante, BLEX.

### 2.1 Calcul de la variable de stress à l'excès d'eau

La variable de stress, SEE(%), calculée à partir des données expérimentales est le pourcentage moyen de racines ennoyées pendant 2 jours (Chapitre II, § 3). Pour l'estimer nous avons besoin de la profondeur de la nappe, de la profondeur et de la densité racinaire. Nous rappelons son expression :

$$SEE (\%) = \frac{\int_{PZ-w}^{z_{max}} d(z) dz}{\int_0^{z_{max}} d(z) dz} \quad (\text{rappel de l'éq. 2.3, page 81})$$

Le modèle calcule une profondeur de nappe et une profondeur racinaire. En revanche, il ne simule pas la densité racinaire telle que nous l'avons mesurée mais une capacité d'extraction par l'intermédiaire d'une fonction de densité racinaire  $F(z)$ . De nombreux auteurs ont mis en évidence l'importance de la distribution racinaire sur l'efficacité d'absorption de l'eau et des éléments minéraux (Gardner, 1964 ; Maertens et *al*, 1974 ; Massad, 1979, Callot et *al*, 1982). Maertens (1982, cité par Tardieu, 1983) montre que l'eau est très disponible dans un rayon de 3 à 4 cm autour de la racine. Nous interprétons ce résultat en considérant que, sur le maillage utilisé pour réaliser les cartographies racinaire (2 x 2 cm), toute case contenant au moins une racine à une influence sur les cases qui l'entourent. Ainsi une fréquence de présence racinaire,  $d(z)$ , égale à 1 correspond à un pourcentage maximal d'exploitation de la RU. Brisson et *al* (1993) décrivent la conceptualisation utilisée dans le calcul de la capacité d'extraction d'eau à partir des données de densité racinaire. Dans le modèle, l'éq. 2.6 devient :

$$SEE (\%) = \frac{\int_{PZ-w}^{z_{max}} F(z) dz}{\int_0^{z_{max}} F(z) dz} \quad (\text{éq. 2.6})$$

SEE(%) est la moyenne sur deux jours de SEE(j) et SEE(j-1).

## 2.2 Mise au point des fonctions de stress

- *Croissance racinaire en profondeur*

- *Résistance à la pénétration des racines*

Dans BLEX, l'approfondissement racinaire est estimé en fonction de la somme des températures moyennes journalières de l'air (éq. 2.30 page 55). De nombreux travaux montrent que cet approfondissement dépend de la texture, de la structure et de l'humidité du sol (Taylor et Gardner, 1963 ; Maertens, 1964 ; Jones et al, 1991 ; Tardieu, 1988). Nous avons modifié cette équation afin d'introduire l'effet de la résistance du sol à la pénétration des racines.

Sur le site expérimental d'Arrou, l'augmentation en profondeur de la densité et de la teneur en argile entraîne une augmentation de la résistance du sol à la pénétration des racines. Nous avons observé que la densité racinaire diminue fortement lorsque les racines atteignent le plancher imperméable. Jones et al (1991) proposent une modélisation de ce phénomène que nous avons introduite dans le modèle BLEX : on définit 2 densités seuils, BDX (pour maXimal Bulk Density) et BDO (pour Optimal Bulk Density). Ces auteurs montrent que la valeur des seuils est proportionnelle à la teneur en argile du sol, Arg (%).

$$\text{BDX} = 1.6 + 0.004 \text{ Arg} \quad (\text{éq. 2.7})$$

$$\text{BDO} = 1.1 + 0.005 \text{ Arg} \quad (\text{éq. 2.8})$$

La réduction de la vitesse d'accroissement est proportionnelle à l'écart à la valeur maximale, BDX et inversement proportionnelle à la valeur optimale, BDO. Son expression est :

$$\text{SBD}(h) = \frac{(\text{BDX}(h) - \text{BD}(h))}{(\text{BDX}(h) - \text{BDO}(h))} \quad (\text{éq. 2.9})$$

$$\text{si } \text{BD}(h) > \text{BDX}(h) \text{ alors, } \text{SBD}(h) = 0$$

$$\text{si } \text{BD}(h) < \text{BDO}(h) \text{ alors, } \text{SBD}(h) = 1$$

où SBD, pour Stress Bulk Density, est le facteur de réduction de la vitesse d'approfondissement du système racinaire, sa valeur est comprise entre 0 et 1, et BD, pour Bulk Density, est la densité apparente sèche de l'horizon (h) considéré.

$$\Delta z_{\text{rac}0}(t) = \sum T(t) * v * S_r(t) * \text{SBD} \quad (\text{éq. 2.10})$$

L'évolution du facteur de réduction en fonction de la densité du sol est illustrée sur la Figure 2.1.



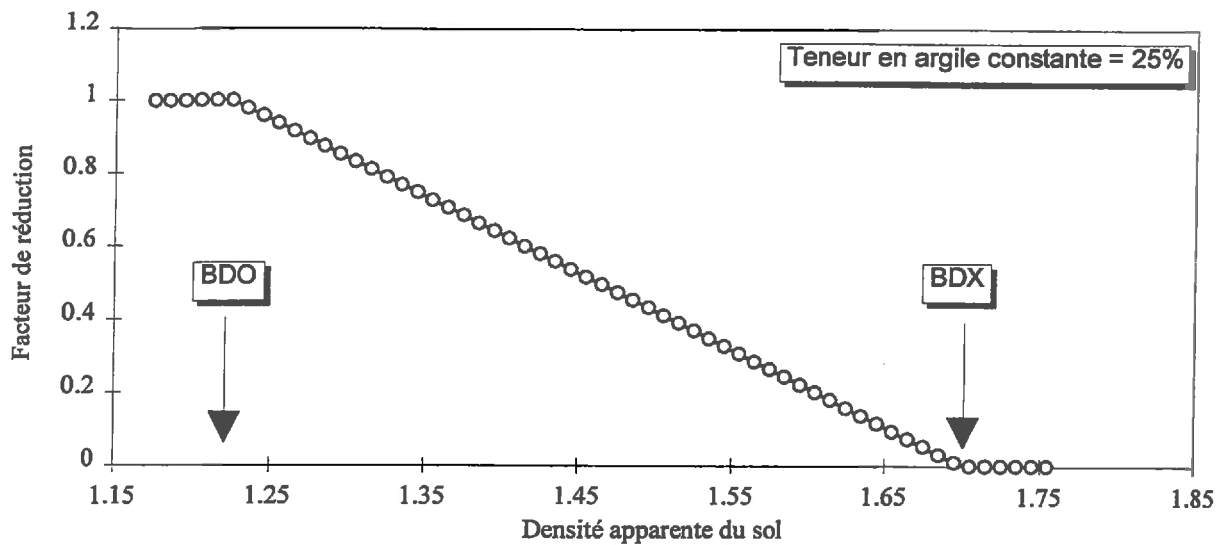


Figure 2.1 : Facteur de réduction de l'approfondissement racinaire avec la densité du sol

Le facteur SBD est calculé pour chaque horizon de sol. Les valeurs des paramètres pour le site expérimental d'Arrou sont résumées dans le Tableau 2.1.

Profondeur (cm)	Densité apparente	Teneur en argile (%)	Densité maximale, BDX	Densité optimale, BDO	Facteur de réduction, SBD
0-10	1.3	24.2	1.70	1.22	0.83
10-20	1.35	23.2	1.69	1.22	0.72
20-30	1.4	29.3	1.71	1.24	0.63
30-40	1.5	35.3	1.74	1.27	0.56
40-50	1.6	32.2	1.73	1.26	0.27
50-60	1.6	37.8	1.75	1.29	0.33
60-70	1.65	34.5	1.74	1.27	0.19
70-80	1.7	28.5	1.71	1.24	0.03
80-90	1.7	33.9	1.74	1.27	0.08
90-100	1.65	31.8	1.73	1.26	0.16
100-110	1.6	34.1	1.74	1.27	0.29
110-120	1.6	31.2	1.73	1.26	0.27

Tableau 2.1 : Valeurs des paramètres de la fonction de résistance à la pénétration racinaire pour la parcelle 1 du site expérimental d'Arrou

Sur cette parcelle, l'imperméable est situé entre 75 et 85 cm de profondeur, c'est là que la résistance à la pénétration est maximale. L'observation confirme l'absence ou la quasi absence de racines en dessous du plancher imperméable. Ce résultat n'est pas le seul fait de la texture et de la densité du sol, globalement les conditions de vie deviennent défavorables en profondeur. Le facteur SBD simule une limitation physique à la progression des racines.

➤ *Effet d'un excès d'eau*

Nous avons montré au chapitre II (§ 3) que l'effet de la nappe sur la dynamique d'approfondissement et de régression du système racinaire pouvait être décrit par la formalisation suivante :

$$F_1(\text{SEE}) = \alpha e^{-\beta \text{SEE}(\%)} + C \quad (\text{rappel de l'éq. 3.7, page 100})$$

En limitant  $z_{\text{rac}}$ , la profondeur racinaire,  $F_1(\text{SEE})$  limite aussi la variable  $W_b$  (voir éq. 2.32 page 57) analogue à la densité racinaire. Par conséquent la capacité d'extraction en eau est réduite en présence d'un excès d'eau. La Figure 2.2 résume le nouveau mode de calcul de la croissance racinaire aussi bien en profondeur ( $z_{\text{rac}}$ ) qu'en densité ( $W_b$ ).

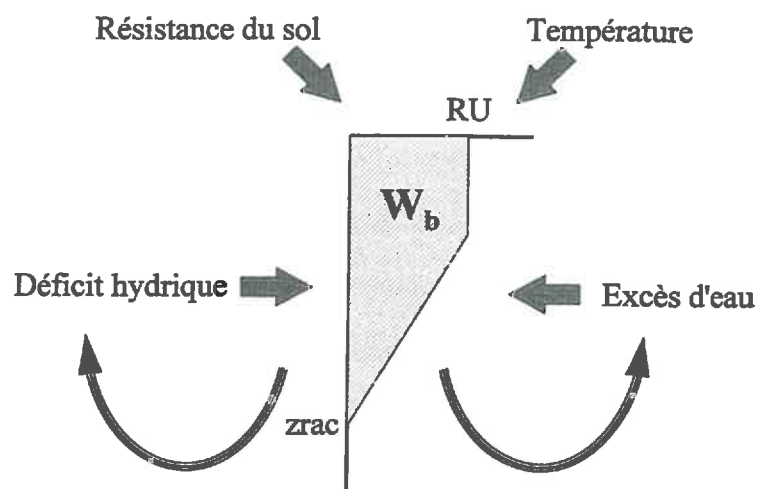


Figure 2.2 : Schématisation du module de croissance et d'absorption racinaire dans BLEX

Nous pouvons noter que l'état du système participe également au calcul de la variable de stress qui jouent sur la croissance de la plante et fait l'interface entre le sol et la plante. Une telle conceptualisation permet de reproduire les effets à court et à long terme d'un stress sur le fonctionnement global de la plante.

- *Expansion foliaire*

Dans BLEX, le calcul de l'accroissement de l'indice foliaire en fonction d'une somme de température. Nous pouvons donc appliquer directement l'éq. 4.10 soit :

$$F_2(\text{SEE}) = e^{-c \text{SEE}(\%)} \quad (\text{rappel de l'éq. 4.10, page 116})$$

• *Accumulation de biomasse*

L'analyse des résultats expérimentaux a permis de mettre en évidence l'effet d'un excès d'eau sur l'accumulation et la répartition de la biomasse. Cependant nos données nous imposaient de travailler à l'échelle horaire alors que le modèle BLEX est au pas de temps journalier. Par conséquent nous ne pouvons pas utiliser directement les formalisations établies au chapitre II (§ 4). Nous proposons la démarche présentée ci-dessous pour générer un jeu de données au pas de temps journalier. Avec ce nouveau jeu de données, nous souhaitons définir  $F_3$  (SEE) telle que :

$$\Delta MS_a = \Delta MS_{a0} * F_3 \text{ (SEE)} \tag{éq. 2.11}$$

Les équations utilisées pour calculer l'accumulation de matière sèche sont les suivantes :

$$P_g(t) = \frac{\alpha \text{ PAR}(t) P_m}{\alpha k \text{ PAR}(t) + P_m} \left(1 - e^{-k \text{ LAI}(t)}\right) * \left[1 - \left(1 - \frac{T(t)}{17}\right)^2\right] \tag{éq. 2.12}$$

$$R_e(t) = b \text{ LAI}(t) \times 2^{\frac{T(t) - 20}{10}} \tag{éq. 2.13}$$

$$R_c(t) = a P_g(t) \tag{éq. 2.14}$$

$$P_n(t) = P_g(t) - R_e(t) - R_c(t) \tag{éq. 2.15}$$

$$F_4 \text{ (SEE)} = P_m(\infty) + (1 - P_m(\infty)) e^{-\delta \text{ SEE}} \tag{éq. 2.16}$$

$$F_5 \text{ (SEE)} = \alpha_a(\theta, \infty) + [1 - \alpha_a(\theta, \infty)] e^{-d \text{ SEE}} \tag{éq. 2.17}$$

Les valeurs des paramètres des équations sont présentées dans le Tableau 2.2.

P <sub>g</sub> (t)			R <sub>e</sub> (t)	R <sub>c</sub> (t)	P <sub>m</sub> (X)		α <sub>a</sub> (θ,X)	
α	P <sub>m</sub>	k	b	a	P <sub>m</sub> (∞)	δ	α <sub>a</sub> (θ,∞)	d
0.07	48	0.4	0.4	0.2	0.01	0.09	1.6	0.11

Tableau 2.2 : Valeurs des paramètres des équations utilisées pour le calcul de l'accumulation de biomasse

L'organisation de la simulation est présentée sur la Figure 2.3.

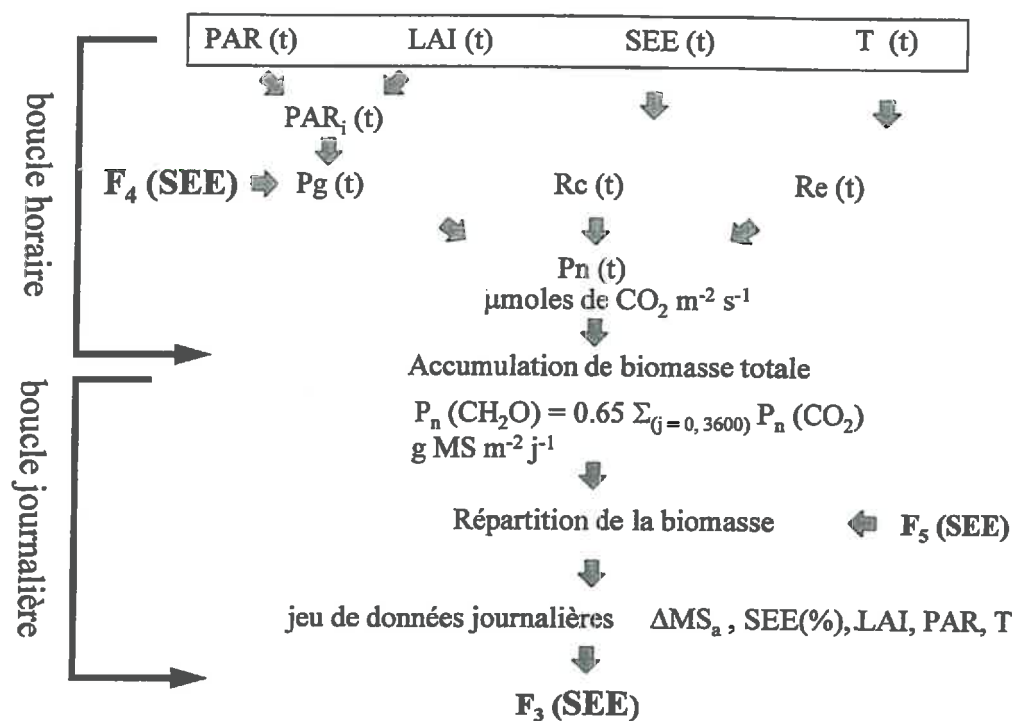


Figure 2.3 : Organisation de la simulation pour le paramétrage de la fonction  $\epsilon_b = f(SEE)$

Comme la température intervient à plusieurs niveaux dans le calcul de la photosynthèse nette,  $P_g(t)$ ,  $R_e(t)$ ,  $R_c(t)$ , il nous a semblé intéressant de recalculer la fonction  $f(T)$  au pas temps journalier (Figure 2.4).

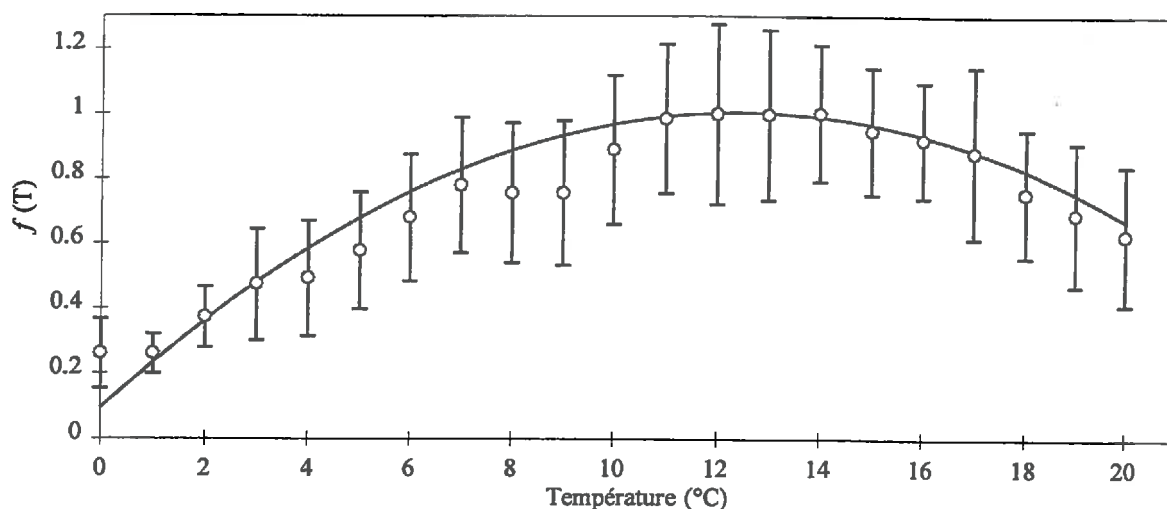


Figure 2.4 : Facteur de réduction l'accumulation de la biomasse aérienne en fonction de la température

Dans le modèle BLEX, l'effet de la température a pour expression :

$$f(T) = \left[ 1 - a \left( 1 - \frac{T}{T_{opt}} \right)^2 \right] \tag{éq. 2.18}$$

où  $a$  est un coefficient d'amplitude et  $T_{opt}$  est la température optimale (°C).

Les résultats du calage ainsi que les valeurs habituellement utilisées dans le modèle BLEX pour une culture de blé d'hiver sont présentés dans le Tableau 2.3.

Modèle	$\varepsilon_{bmax}$	$T_{opt}$	a	$r^2$	erreur standard
$f(T)$	$4.2 \pm 0.72$	12.46	0.91	0.93	0.257
$f(T)_{BLEX}$	4.2	11	0.6		

Tableau 2.3 : Résultats du calage de la fonction  $f(T)$

La formalisation de l'effet d'un excès d'eau nous conduit à une nouvelle équation de l'accumulation de biomasse au pas de temps journalier :

$$\Delta MS_a = f(PAR) f(LAI) f(T) F_3 (SEE) \quad (\text{éq. 2.19})$$

Afin de paramétrer  $F_3 (SEE)$  nous appliquons des valeurs de  $SEE(\%)$  variant entre 0 et 100%. Nous estimons au pas de temps journalier l'accumulation de biomasse aérienne et la fonction  $F_3 (SEE)$  (Figure 2.5).

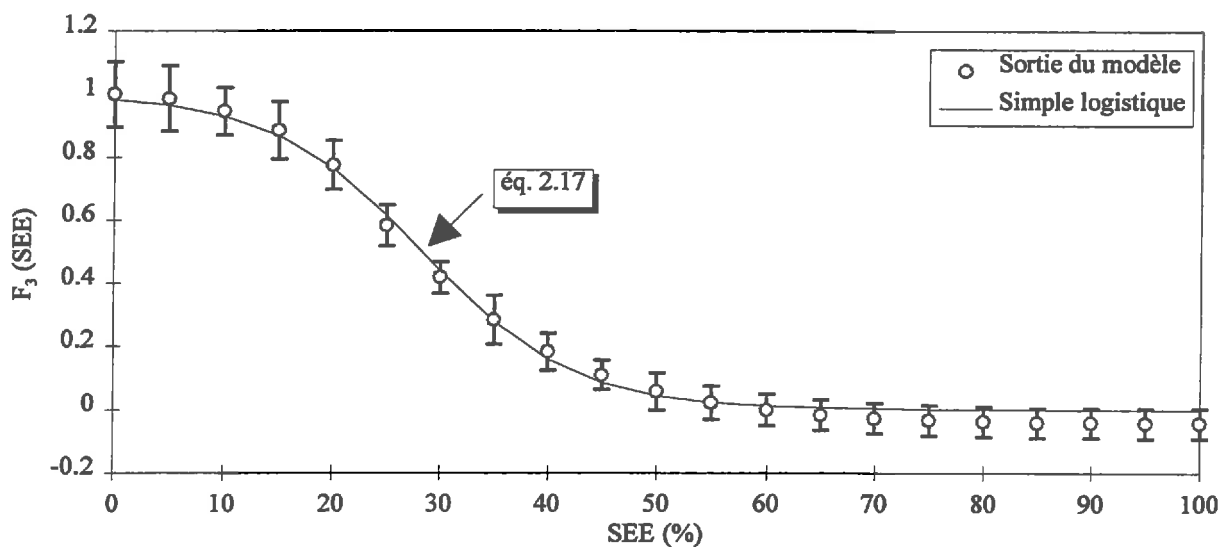


Figure 2.5 : Relation entre valeur du paramètre  $\varepsilon_b$  et contrainte hydrique

L'évolution du rapport des coefficients de conversion en fonction de la variable de stress peut être décrit par une simple logistique :

$$F_3 (SEE) = \left[ 1 - \frac{1}{1 + e^{\eta (X_i - SEE(\%))}} \right] \quad (\text{éq. 2.20})$$

où  $X_i$  est le point d'inflexion et  $\eta$  un paramètre décrivant la croissance de la fonction.

Les résultats du calage sont présentés dans le Tableau 2.4 et sur la Figure 2.5.

Modèle	$X_i$	$\eta$	Estimation de l'écart-type résiduel	n	$r^2$
$F_3$ (SEE)	28.25	0.14	0.026	21	1

Tableau 2.4 : Résultats du calage de la fonction  $\varepsilon_b = f(SEE)$ ,  $n$  est le nombre d'observations et  $r^2$  le coefficient de corrélation au carré.

L'étude expérimentale de l'effet d'un excès d'eau sur la croissance de la plante nous a conduit au calage de fonctions nécessitant l'introduction de nombreux paramètres pour aboutir finalement à trois fonctions stress qui ont été introduites dans le modèle BLEX,  $F_1$  (SEE),  $F_2$  (SEE),  $F_3$  (SEE).

Les relations proposées sont construites et calées à partir de nos résultats expérimentaux. Elles sont dépendantes de la variable de stress choisie. Les valeurs des paramètres n'ont de sens, à ce stade de réflexion, que pour l'expérimentation sur laquelle elles ont été obtenues. Ces relations restent à confirmer par la mise en place d'expérimentations du même type ou plus complètes pour lever quelques incertitudes liées aux dispositifs expérimentaux et à la fiabilité des mesures.

### 3. ACQUISITION DES PARAMETRES DU MODELE

Le caractère conceptuel de la modélisation conduit à introduire de nombreux paramètres. Ils peuvent être mesurés, calés, estimés ou issus de la bibliographie. La vérification du modèle étant conduite à partir des données acquises sur la parcelle 1 du site expérimental d'Arrou, nous présentons les caractéristiques se rapportant à cette parcelle et des méthodes d'acquisition de certains paramètres du modèle. Ces paramètres peuvent être regroupés en 2 familles selon le module auquel ils sont rattachés. Nous distinguons le module de bilan hydrique et le module de croissance et développement de la plante proprement dit.

#### 3.1 Bilan hydrique

- *Paramètres géométriques du dispositif modélisé*

Sur la parcelle 1 du site expérimental d'Arrou, la profondeur de labour (zlab) est estimée à 30 cm. Lors de la réalisation des profils pédologiques (sondage à la tarière), la profondeur d'apparition du plancher imperméable est observée entre 75 et 85 m (Figure 3.1). Sa profondeur moyenne vaut  $81.5 \pm 8$  cm. Les drains espacés en moyenne de 10 m et posés à une profondeur moyenne de 75 cm seront considérés comme reposant sur l'imperméable.

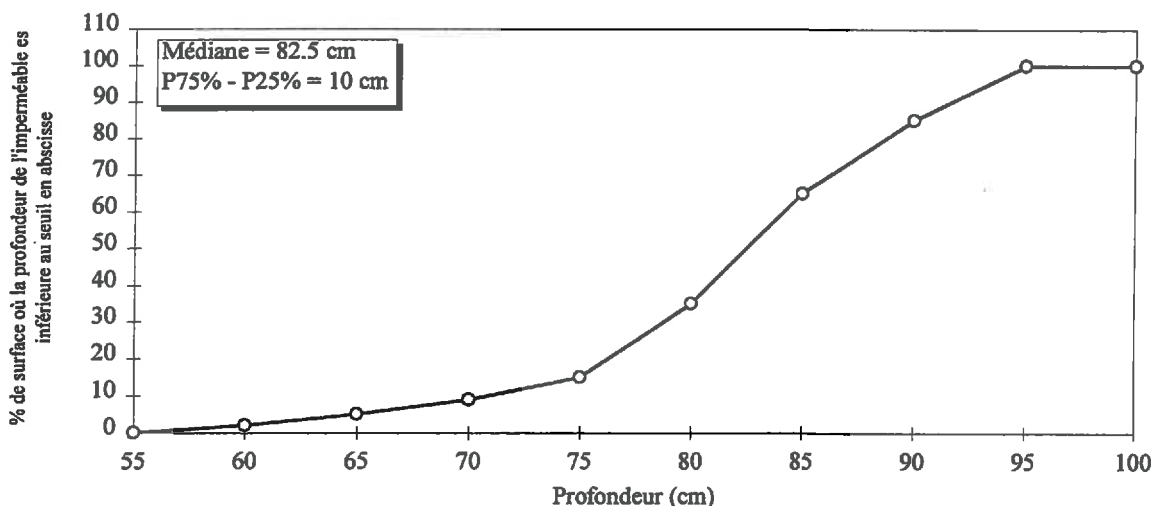


Figure 3.1 : Profondeur d'apparition du plancher imperméable, parcelle 1, Arrou (d'après Guérin, 1983)

- *Paramètres hydrodynamiques du système drainant*

Etant donné l'évolution des caractéristiques pédologiques du profil de sol vers la profondeur, on peut s'attendre à ce que la conductivité hydraulique horizontale à saturation et la porosité de drainage varient d'une manière monotone dans le sens ascendant depuis le substratum

(Guyon, 1983). Armstrong et al (1993) montrent la nécessité de prendre en compte l'hétérogénéité verticale des paramètres hydrodynamiques et notamment de la conductivité hydraulique dans les modèles de simulation du drainage. Ceci est d'autant plus vrai pour des sols peu profonds.

La conductivité hydraulique horizontale équivalente varie dans le profil de sol suivant une loi monomiale fonction puissance de la cote. La variation de la porosité de drainage est directement proportionnelle à la racine carrée de celle de la conductivité hydraulique horizontale équivalente (sols de Erkin). L'hypothèse faite sur la variation de la conductivité horizontale équivalente et de la porosité de drainage est généralement bien vérifiée dans les sols limoneux lessivés. Elle se traduit mathématiquement par les relations suivantes :

$$\mu(z) = \left(\frac{z}{H}\right)^p \mu(H) \tag{éq. 3.1}$$

$$\tilde{K}(z) = \left(\frac{z}{H}\right)^m \tilde{K}(H) \tag{éq. 3.2}$$

L'application de la loi en  $\beta$  sur les tarissements non influencés des débits et des hauteurs de nappe permet de déterminer les propriétés hydrodynamiques du sol. Guyon (1983) décrit une approche méthodologique de l'analyse du tarissement des nappes (annexe 3.2). Au cours des campagnes hydrométriques de 1978 à 1986, nous avons sélectionné 21 épisodes de tarissements non influencés par les précipitations. Nous avons éliminés les épisodes de tarissements trop tardifs dans la saison de drainage (influence de l'évapotranspiration).

Les résultats présentés sur la Figure 3.2 sont obtenus pour une hauteur de nappe (H) de 0.50 cm par rapport au plancher imperméable. Cette hauteur correspond en moyenne à la hauteur à la base de la couche labourée.

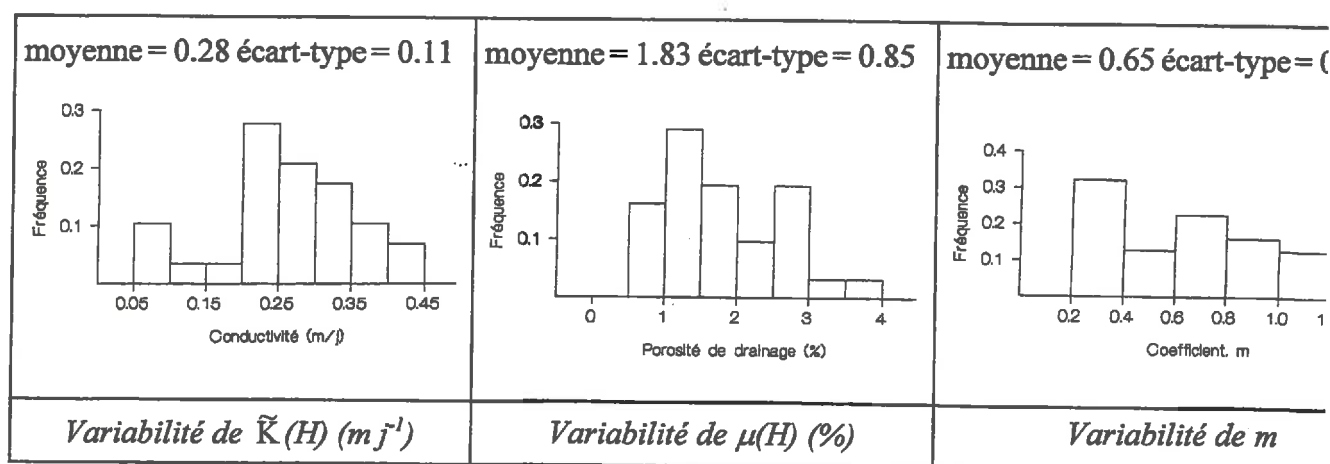


Figure 3.2 : Variabilité des paramètres hydrodynamiques, site expérimental d'Arrou, parcelle 1



La variabilité des paramètres ne peut pas être attribuée seulement à l'échantillonnage. En effet, certaines actions, notamment le griffage (septembre 1980), ont été réalisées avec pour objectif d'augmenter la conductivité et la porosité du sol. L'effet du griffage n'étant pas définitif : le tassement du sol, les cultures et les labours successifs font que les propriétés hydrodynamiques tendent vers leurs valeurs initiales d'avant griffage (Figure 3.3): C'est surtout la porosité de drainage qui a été modifiée par le griffage.

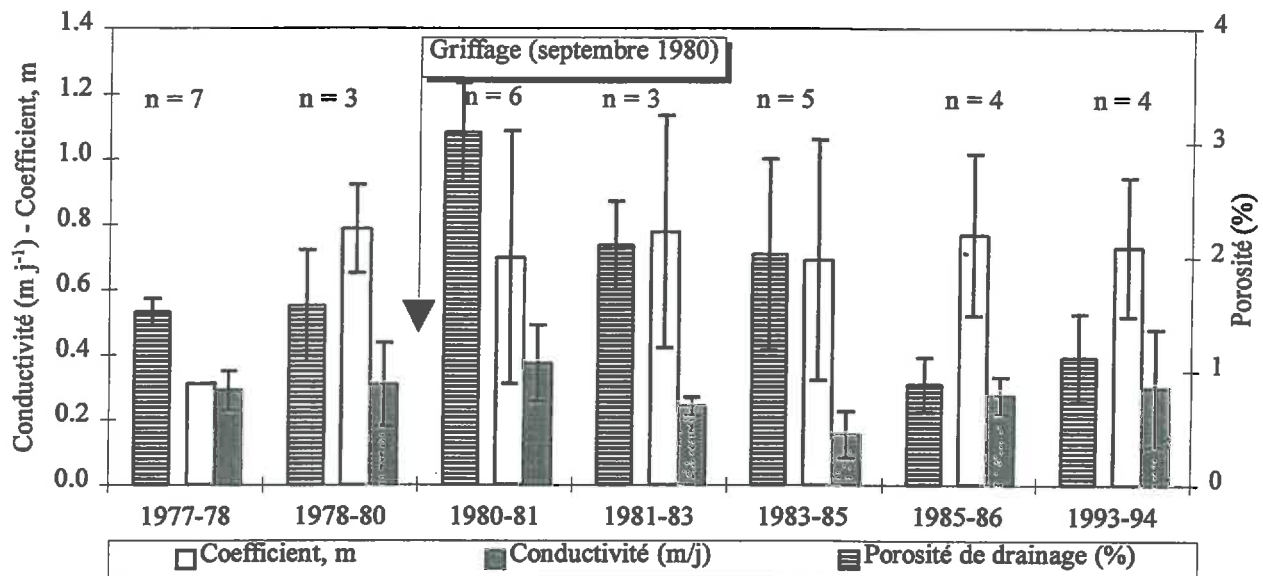


Figure 3.3 : Chronique d'évolution des propriétés hydrodynamiques, parcelle 1, site expérimental d'Arrou, 1978-1986 (n est le nombre d'observations)

Dans la couche labourée, la conductivité hydraulique et la porosité de drainage sont supposées homogènes. Elles valent respectivement,  $2 \text{ m j}^{-1}$  et 2.6%.

• **Coefficient de forme de nappe**

La forme que prend la nappe entre deux files de drains est décrite par l'intermédiaire de coefficients. Dans le cas général, la forme de la nappe et par conséquent ces coefficients dépendent de la hauteur de la nappe. Dans le cas d'un sol homogène et des sols de Erkin, avec les drains reposant sur l'imperméable, les coefficients de forme de nappe sont constants (hypothèse de Boussinesq). Ils valent :

$$A = 0.8624 \quad B = 0.7731$$

Sur le site expérimental d'Arrou, parcelle 1, la constance de forme de la nappe est bien vérifiée (Zimmer, 1988).

La forme de la nappe, outre le bilan hydrique, intéresse également l'estimation de la contrainte d'engorgement en eau du sol à l'échelle de la parcelle. En effet, le modèle étant

monodimensionnel, la simulation est effectuée uniquement au niveau de l'inter-drain. Entre le drain et l'inter-drain la hauteur de nappe est variable et par voie de conséquences l'intensité de la contrainte. La hauteur de nappe à une abscisse  $x$ , (référence prise à l'inter-drain), est définie par :

$$h(x, j) = H(j) \left(1 - X^2\right)^{\frac{1}{2+m}} \quad (\text{éq. 3.3})$$

où  $X = x/L$ .

Par ce concept de forme de nappe, le modèle pourra estimer les variables caractérisant l'état de croissance de la plante ainsi que le rendement à une distance quelconque du drain. Nous verrons la conceptualisation retenue pour calculer le rendement moyen à la parcelle dans le chapitre IV.

### • *Humidités caractéristiques*

Les humidités caractéristiques que sont les teneurs en eau volumiques à la saturation, à la capacité au champ et au point de flétrissement, sont des paramètres difficiles à obtenir en raison de leur variabilité spatiale propre et des variabilités introduites par les méthodes de mesure. De plus, leur définition en tant que paramètre physique n'est pas précise, ainsi pouvons-nous tout au plus espérer obtenir une estimation de leur valeur. La valeur de la capacité de rétention en eau au champ a été estimée en appliquant la formule de Gras et Bretemieux (Appriou, 1987) :

$$\Theta_{cc} = 0.59 A + 0.16 L + 5.47 \quad \text{pour } \Theta_{cc} > 20 \quad (\text{éq. 3.4})$$

$$\Theta_{cc} = 0.51 A + 0.16 L + 7.35 \quad \text{pour } \Theta_{cc} < 20 \quad (\text{éq. 3.5})$$

où  $A$  et  $L$  sont respectivement les teneurs en argile et limons exprimées en %.

Sur le site expérimental d'Arrou, les teneurs en eau volumiques au point de flétrissement sont proportionnelles au taux d'argile, avec un coefficient de corrélation de 0.94 pour des mesures effectuées sur 18 échantillons de 0 à 1 m de profondeur (INRA, CTGREF, 1974).

$$\Theta_{pf4.2} = 0.42 A \quad (\text{éq. 3.6})$$

La teneur en eau volumique à la saturation, correspond à la teneur en eau mesurée lorsque les vides interstitiels du milieu poreux ou fissuré sont complètement emplis d'eau. A partir des mesures d'humidités volumiques et des hauteurs piézométriques, nous avons sélectionné l'ensemble des points de mesures ayant été effectués dans la nappe. Ces valeurs ont été calculées par couche de sol d'une épaisseur de 10 cm. Les profils de teneurs en eau volumiques caractéristiques sont présentés sur la Figure 3.4.

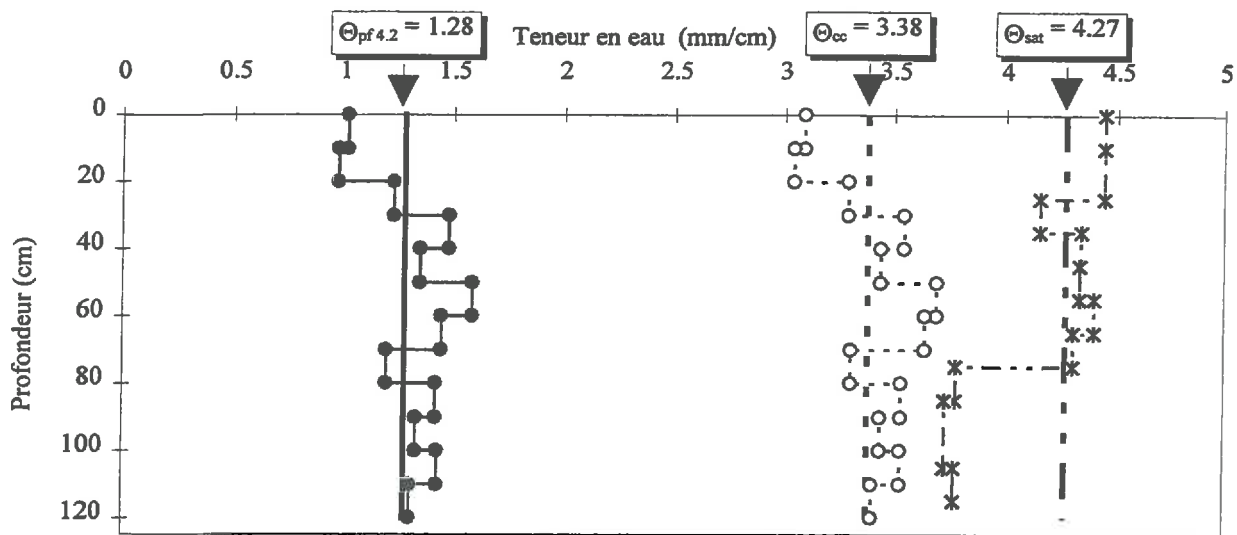


Figure 3.4 : Profil des teneurs en eau volumiques caractéristiques, site expérimental d'Arrou, parcelle 1

L'estimation grossière des teneurs en volumiques caractéristiques n'a pas permis de mettre en évidence une hétérogénéité verticale. Ainsi sur le profil de sol, profondeur de 80 cm, nous avons supposé qu'elles étaient homogènes (Tableau 3.1).

$\Theta_{pf}$ (mm cm <sup>-1</sup> )	$\Theta_{cc}$ (mm cm <sup>-1</sup> )	$\Theta_{sat}$ (mm cm <sup>-1</sup> )	RU (mm)
1.28 ± 0.22	3.38 ± 0.24	4.17 ± 0.28	167.60 ± 37.11
1.29 ± 0.49 <sup>(1)</sup>	3.07 ± 0.14 <sup>(1)</sup>	4.17 ± 0.24 <sup>(2)</sup>	141.44 ± 50.40 <sup>(1)</sup>
-	-	-	160.8 <sup>(3)</sup>

Tableau 3.1 : Valeurs des teneurs en eau volumiques caractéristiques, parcelle 1, site expérimental d'Arrou, <sup>(1)</sup>: INRA et CTGREF (1974), <sup>(2)</sup> INRA et CTGREF (1975), <sup>(3)</sup> Appriou (1987) pour une profondeur de sol de 90 cm.

La réserve utile est obtenue, pour une épaisseur de sol donnée, en calculant la différence entre la réserve en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement (Tableau 3.1) :

$$RU \text{ (mm)} = (\Theta_{cc} - \Theta_{pf}) * h \tag{éq. 3.7}$$

où h est l'épaisseur de la couche en cm.

### 3.2 Paramètres décrivant la croissance et le développement de la culture

Nous avons repris les paramètres du modèle GOA pour une culture de blé, variétés Soissons, présentés dans le Chapitre I (§ 2). Pour mémoire ces paramètres décrivent :

- l'échelle de développement
- la vitesse d'expansion foliaire
- la croissance racinaire
- l'interception du rayonnement et l'accumulation de biomasse (Chapitre III, § 2).

L'indice de récolte est estimé selon l'expression suivante :

$$HI = \frac{\text{Poids de grains } [M L^{-2}]}{\text{Poids de paille } [M L^{-2}]} \quad (\text{éq. 3.8})$$

Les résultats obtenus sur le site expérimental d'Arrou sont présentés dans le Tableau 3.2.

	Biomasse aérienne (Kg ha <sup>-1</sup> )	Rendement * (Kg ha <sup>-1</sup> )	HI
Arrou (1993-1994)			
Drain	1187	661	0.47
Inter-drain	1023	559	0.46
Valeur par défaut dans GOA			0.45

Tableau 3.2 : Valeurs estimées de l'indice de récolte, HI, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994, \* : taux d'humidité 15%

#### 4. VERIFICATION ET VALIDATION LOCALE DU MODELE

Nous avons vérifié le fonctionnement du modèle de culture BLEX à partir des données expérimentales obtenues sur la parcelle 1 du site expérimental d'Arrou (campagne 1993-1994).

Nous parlons de "vérification" pour les fonctions stress que nous avons introduites dans le modèle. En effet, la vérification est conduite à partir des données de terrain qui ont servi au calage des paramètres de ces fonctions. Elle se rapporte donc aux prédictions du modèle en situation "stressée" (inter-drain) (Figure 4.1).

Nous parlons de "validation" pour les modèles de bilan hydrique et de croissance et développement de la plante. Pour le modèle de croissance et développement de la plante, la validation se rapporte aux prédictions en situation potentielle (pas de stress à l'excès d'eau - drain) (Figure 4.1).

Nous parlons de "validation locale" parce qu'elle est réalisée sur une seule parcelle pour une seule campagne de mesures.

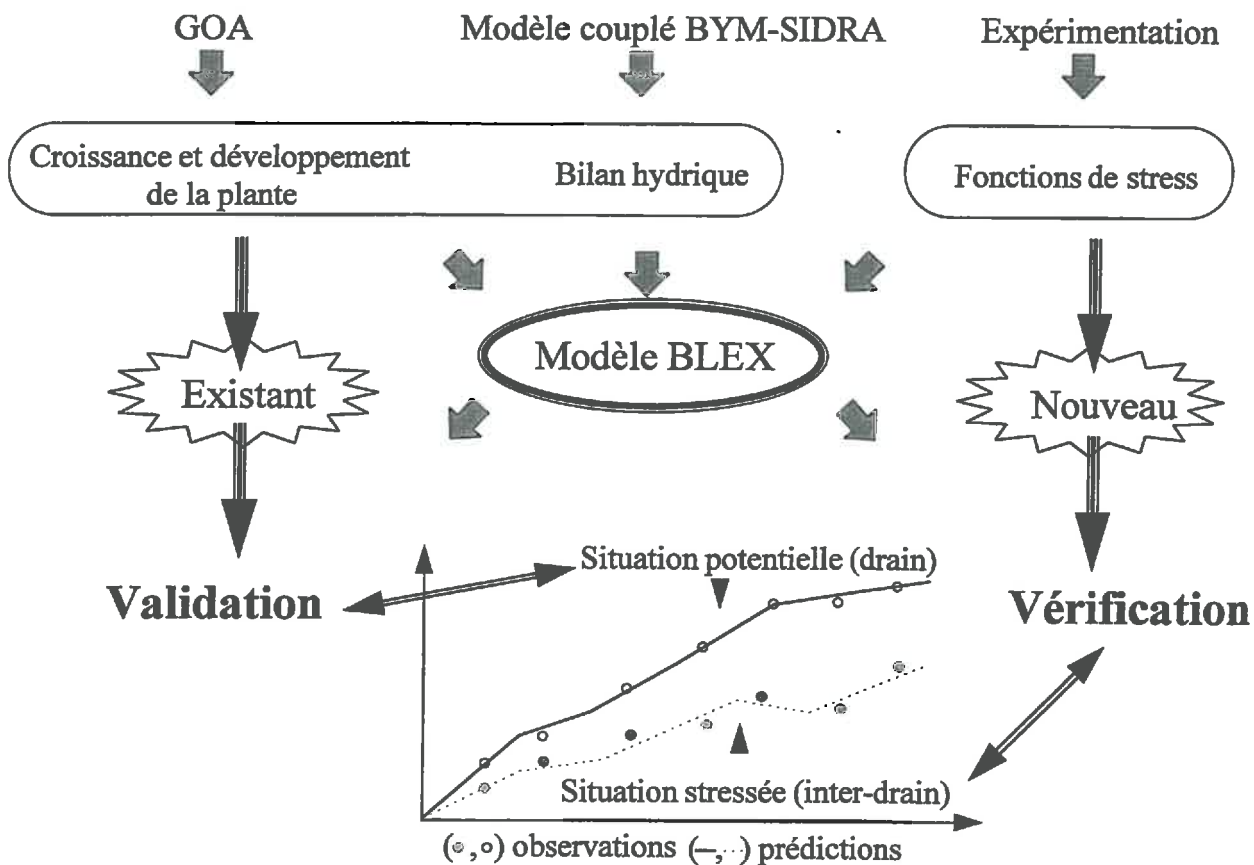


Figure 4.1 : Illustration de la démarche suivie pour la vérification et la validation du modèle BLEX

Nous avons vérifié le fonctionnement du modèle en distinguant les variables du bilan hydrique de celles caractérisant l'état de croissance de la culture. La comparaison entre valeurs observées (estimation sur le terrain) et prédites par le modèle a été faite sous forme graphique.

La simulation débute le 1<sup>er</sup> janvier 1993. Jusqu'au semis, seul le modèle de bilan hydrique fonctionne. Au démarrage de la simulation la réserve en eau est maximale. Le modèle détecte la valeur maximale du déficit climatique (P-ETR). A partir de la date correspondante à ce maximum, les excédents d'eau (recharge nette) sont cumulés jusqu'à satisfaire le paramètre  $L_k$  (70 mm) initiant ainsi le couplage avec le modèle de gestion de nappe (voir ce chapitre, § 1). La simulation démarrant au cours de la saison de drainage de la campagne précédente (période hivernale). Nous sommes ainsi assuré de partir avec un stock d'eau maximal. Au moment du couplage la profondeur de nappe est initiée à la profondeur de l'imperméable.

A la levée, la valeur initiale de la profondeur racinaire est de 2.5 cm.

## 4.1 Validation du bilan hydrique

- *Teneur en eau sur la zone non saturée et recharge nette*

Les teneurs en eau volumiques sur la zone non saturée sont estimées à partir des données tensiométriques et de la relation  $\Psi(\Theta)$  (calage selon la formulation de Campbell (1974) - résultats non présentés). En tendance, il existe une bonne adéquation entre valeurs observées et prédites de la teneur en eau moyenne sur la zone non saturée (Figure 4.2).

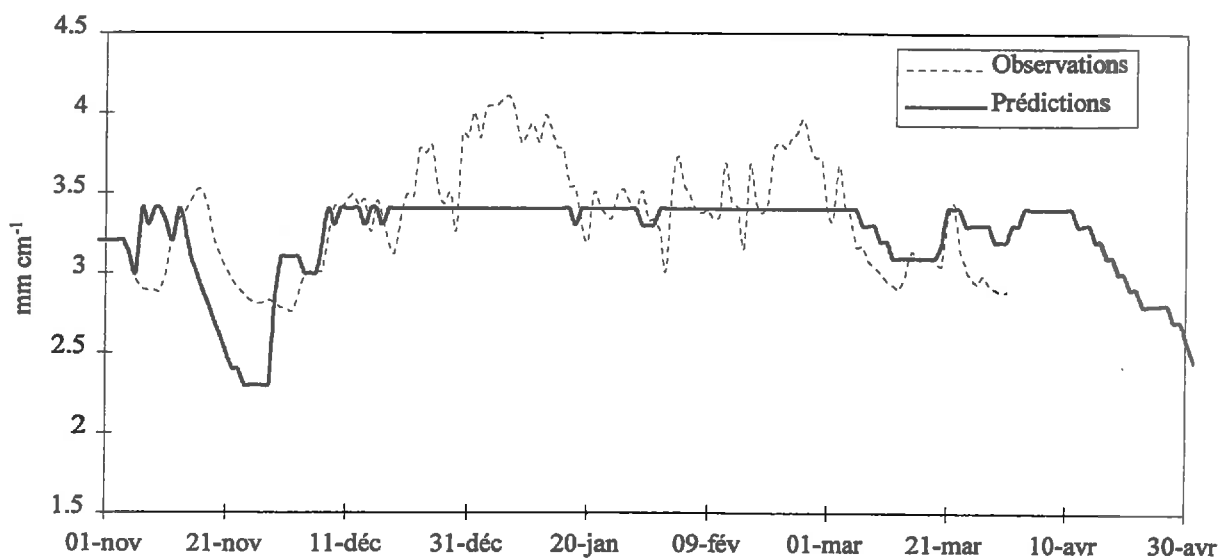


Figure 4.2 : Chroniques des teneurs en eau volumique observées et prédites par le modèle, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994

Selon la gestion du bilan hydrique dans le modèle, la teneur en eau maximale simulée sur la zone non saturée est la teneur en eau à la capacité au champ. Or, les observations montrent qu'elle peut transitoirement être supérieure  $\Theta_{cc}$ . Deux éléments d'explication peuvent être avancés :

- le déplacement d'un front d'humectation qui peut conduire à une saturation transitoire sur la zone non saturée ;
- l'existence d'une franche capillaire au dessus de la nappe qui lorsque cette dernière est proche de la surface du sol peut conduire à une augmentation significative de la teneur en eau moyenne sur la zone non saturée.

C'est ce dernier phénomène que nous observons entre le 31 décembre et le 20 janvier puis entre le 15 février et le 1<sup>er</sup> mars. La nappe est restée en permanence dans la couche labourée sur ces deux périodes (Figure 4.5).

De la bonne simulation de l'état hydrique de la zone non saturée va dépendre la simulation des autres termes du bilan hydrique (profondeur de nappe et débit au drain). En effet, la recharge nette transmise à la nappe est issue de ce bilan hydrique.

Le modèle simule une recharge nette lorsque la teneur en eau sur la zone non saturée est à la capacité au champ (soit  $3.4 \text{ mm cm}^{-1}$ ). Elle est transmise à la nappe uniquement lorsque le couplage est initié, sinon elle contribue à l'alimentation des couches profondes (voir ce chapitre, § 1). Les critères de couplage ( $L_k$ ) et de découplage ( $D_k$ ) prédisent avec une bonne précision les dates d'amorce et de fin de drainage (Tableau 4.1).

	Date observée*	Date prédite
Amorce de drainage	12 décembre	14 décembre
Fin de la saison de drainage	25 avril	22 avril

Tableau 4.1 : Comparaison des dates d'amorce et de fin de la saison de drainage observées et prédites, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994, \* : voir annexe 3.1

Sur la saison de drainage, les teneurs en eau n'étant pas limitante, la demande climatique est satisfaite, l'ETR est égale à l'ETP (Figure 4.5). De plus, la recharge nette journalière est proche du bilan P-ETR (Figure 4.3). En effet, sur cette période, la teneur en eau de la zone non saturée étant proche de la capacité au champ, l'excédent climatique (P-ETR) constitue alors directement la recharge nette.

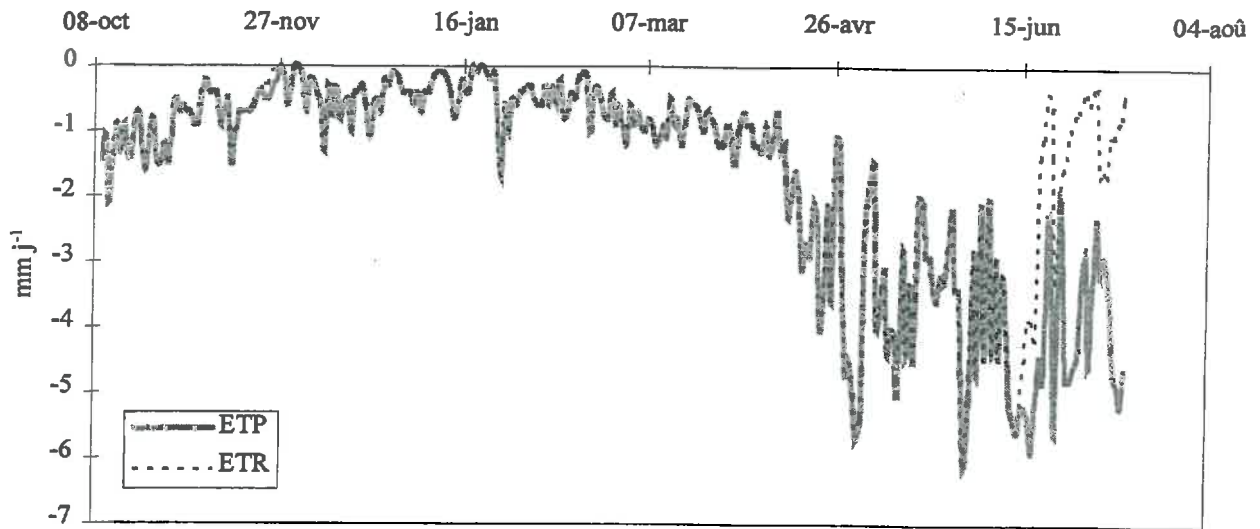


Figure 4.3 : Chroniques des valeurs d'ETP fournies en entrée et des valeurs d'ETR prédites par le modèle, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994

La recharge nette est strictement égale à P-ETP sur une période comprise entre le 20 décembre et le 01 mars. Cette période coïncide avec ce que nous avons appelé la SDI (Saison de Drainage Intense) (Figure 4.4). Les dates de la SDI (19 décembre au 3 mars) ont été déterminées par la méthode des doubles cumuls (voir ce chapitre, § 1).

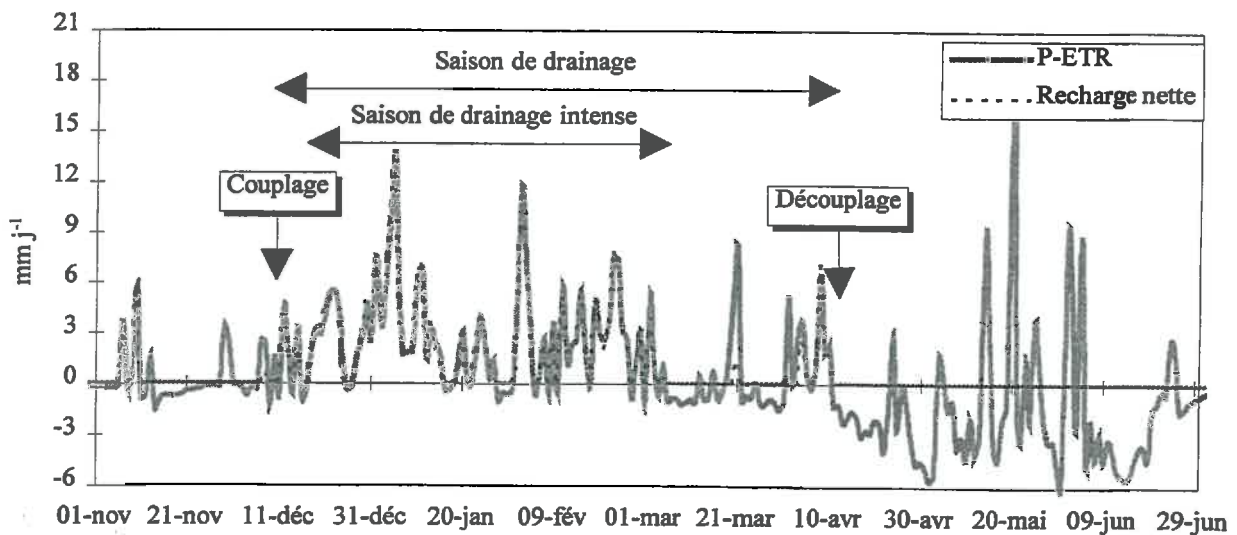


Figure 4.4 : Chroniques des valeurs de P-ETR et de recharge nette estimées par le modèle, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994

Ce résultat permet de valider une des hypothèses faite dans le modèle SIDRA. Dans ce modèle, la recharge nette transmise à la nappe est égale au bilan P-ETP. Ce résultat confirme donc la limite de validité du modèle à la saison de drainage intense. En effet, à partir du 1<sup>er</sup> mars, la réserve en eau n'étant plus maximale, la recharge nette n'est plus égale à P-ETP. Les précipitations contribuent tout d'abord au restockage de l'eau dans la zone non saturée puis



l'excédent est transmis à la nappe. Le couplage avec le modèle BYM a permis d'étendre les conditions d'application du modèle SIDRA à ce que nous avons appelé la saison de drainage.

### • Profondeur de nappe et débit au drain

Le calcul de la variable de stress repose sur la connaissance de la profondeur de la nappe relative à celle du système racinaire. La variable de stress assure le lien entre le modèle de bilan hydrique et le modèle de culture en situation "stressée". En conséquence, la qualité des prédictions du modèle de culture sera très sensible à l'estimation de la profondeur de nappe. Une bonne prédiction de cette variable est donc indispensable.

La Figure 4.5 montre une bonne adéquation entre valeurs mesurées et prédites de la hauteur de la nappe. De plus, sur cette figure nous montrons que le couplage et le découplage s'effectuent bien aux dates d'apparition et de disparition de la nappe dans le profil de sol.

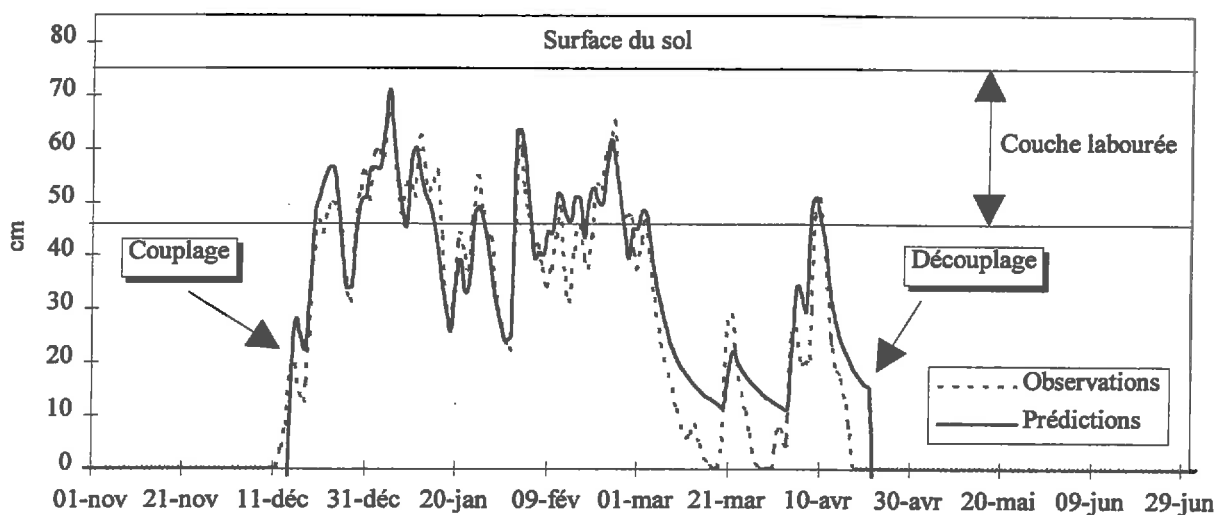


Figure 4.5 : Chroniques des hauteurs de nappe observées et prédites par le modèle, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994

Nous avons comparé les débits de drainage observés et simulés (Figure 4.6). Le modèle surestime les pics de débits en particulier pour les débits faibles ( $< 4 \text{ mm j}^{-1}$ ). Deux éléments d'explication peuvent être avancés :

- l'hypothèse faite en négligeant des termes du bilan hydrique et notamment le ruissellement et l'interception foliaire ;
- une mauvaise estimation des paramètres hydrodynamiques et notamment de la porosité de drainage : le débit semble plus sensible à ce paramètre alors que la hauteur de nappe semble plus sensible à la conductivité hydraulique (Zimmer et Lorre, 1993).

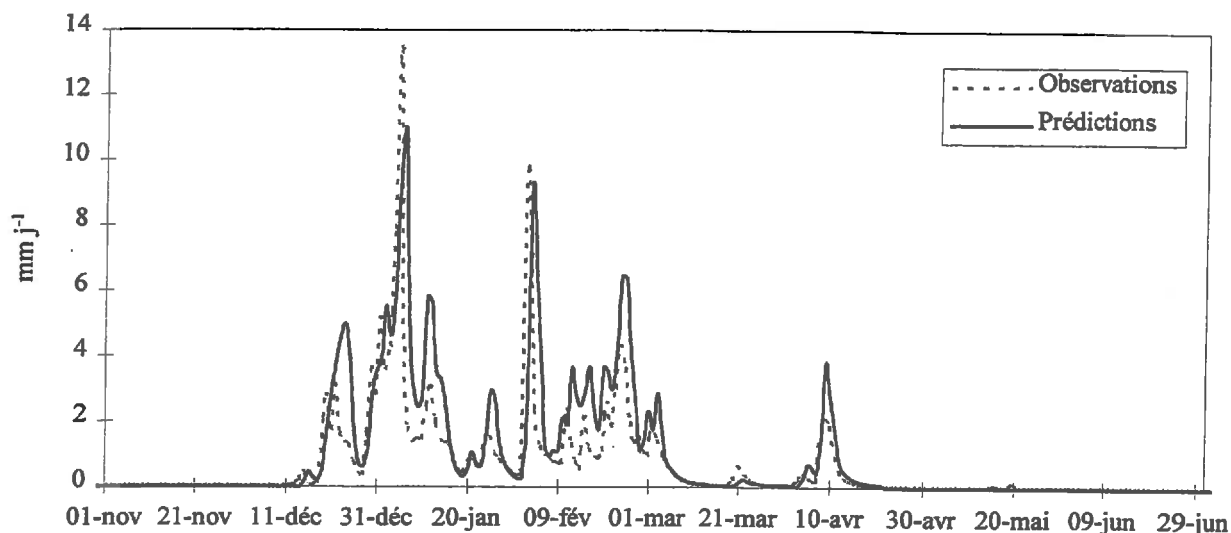


Figure 4.6 : Chroniques des débits au drain observés et prédits par le modèle, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994

• Variable de stress

La comparaison des valeurs observées et prédites de la variable de stress (SEE%) montre que le modèle estime correctement, d'une part, les périodes d'occurrence et, d'autre part, l'intensité des contraintes (Figure 4.7). Le calcul de la variable de stress a été présenté dans le chapitre II (§ 3).

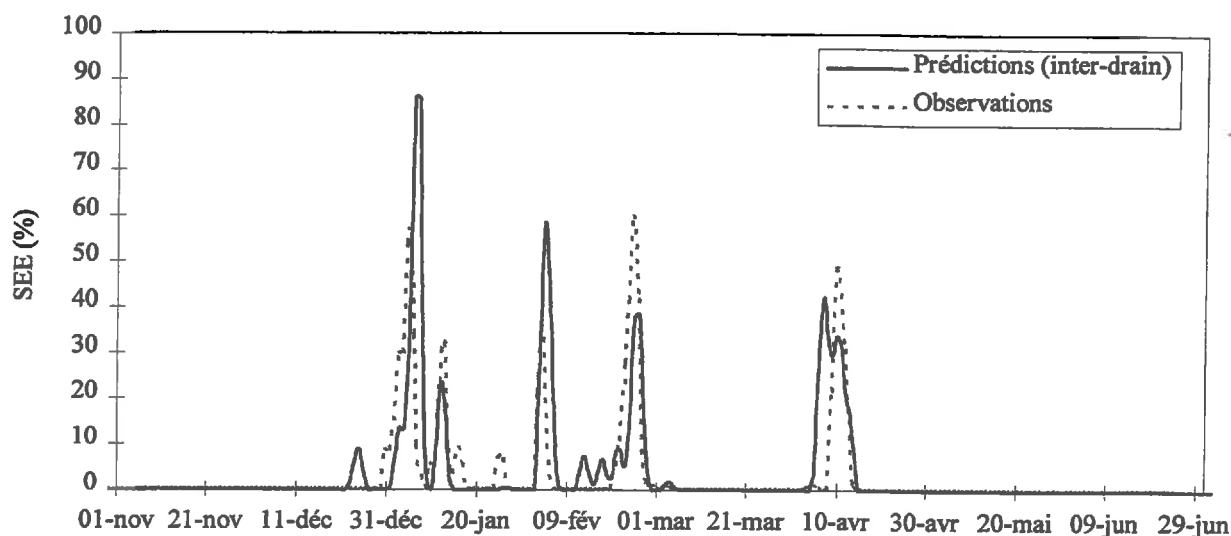


Figure 4.7 : Chroniques des valeurs de la variable de stress observées et prédites par le modèle, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994

Les différences observées sont à relier aux simulations de la profondeur de nappe, de la profondeur et de la densité du système racinaire. Il est important que la variable de stress soit correctement simulée puisqu'elle assure le lien avec le modèle de culture par l'intermédiaire du calcul des facteurs de stress.

## 4.2 Croissance et développement du blé

La simulation est réalisée au drain et à l'inter-drain. Nous mettons en oeuvre les deux scénarios du modèle BLEX décrits dans le chapitre I (§ 2) :

- le scénario potentiel, aucun stress dû à l'excès d'eau n'agit sur la croissance et le développement de la culture (situation au drain) ;
- le scénario "stressé", la variable de stress agit sur la croissance de la culture par l'intermédiaire des fonctions de stress décrites dans ce chapitre au paragraphe 2 (situation à l'inter-drain)

La croissance journalière de la plante, que cela soit pour les racines, le LAI ou la biomasse, est calculée à partir des données climatiques (température et rayonnement) indépendamment de son état de croissance au jour précédent. En conséquence, la qualité des prédictions en situation stressée dépend de la bonne description, d'une part, de la croissance de la plante en situation potentielle et, d'autre part, de la réponse de la plante à un excès d'eau par les fonctions de stress. Nous avons donc validé le modèle BLEX en situation potentielle et avons vérifié son fonctionnement en situation "stressée".

### • Stades de développement

Au regard de l'incertitude liée à l'observation (une visite par semaine en moyenne sur le site) le modèle prédit avec une bonne précision les dates d'apparition des différents stades de développement (Tableau 4.2).

Stade de développement	Date observée	Date prédite
Levée	04 novembre	05 novembre
Epi 1 cm	03 mars	11 mars
LAI <sub>max</sub>	12 mai	08 mai
Floraison	27 mai	28 mai
Maturité		07 juillet
Récolte	13 juillet	

Tableau 4.2 : Comparaison des dates d'apparition des stades de développement observées et prédites, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994

Les observations n'ont pas permis de mettre en évidence de différences dans les dates d'apparition des stades entre la situation au drain et à l'inter-drain, le modèle prédit également les mêmes dates d'apparition des stades quel que soit le traitement.

• *Profondeur et densité racinaire*

Au niveau du drain, la croissance racinaire en profondeur ainsi que la réserve biologique sont correctement décrites par le modèle (Figure 4.8 et Figure 4.9). La date de la levée étant estimée avec une bonne précision, il n'y pas de décalage au démarrage du cycle de la culture.

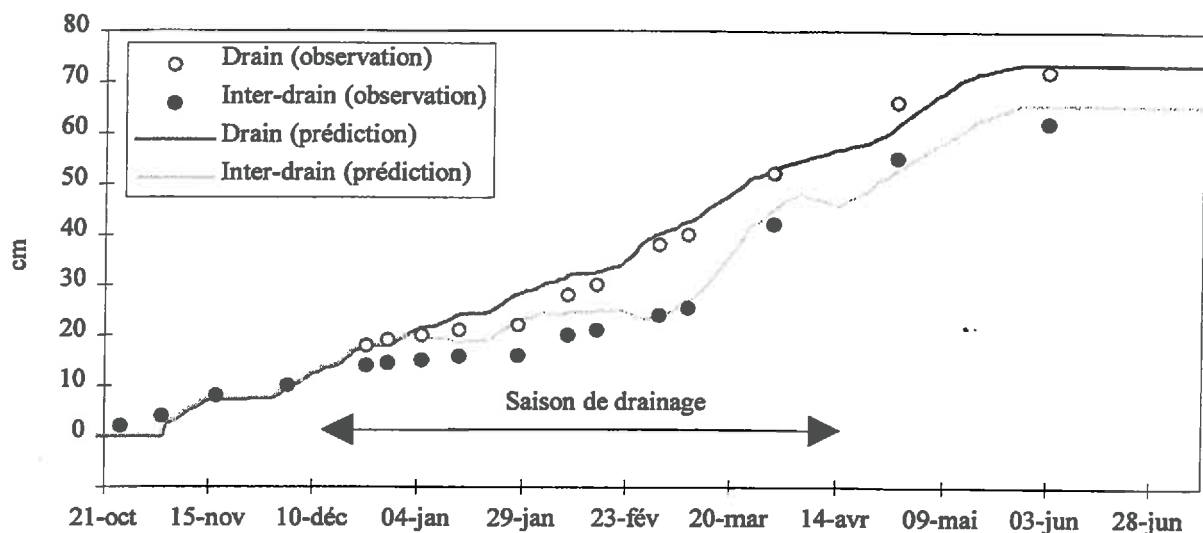


Figure 4.8 : *Chroniques des profondeurs racinaires observées et prédites par le modèle, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994*

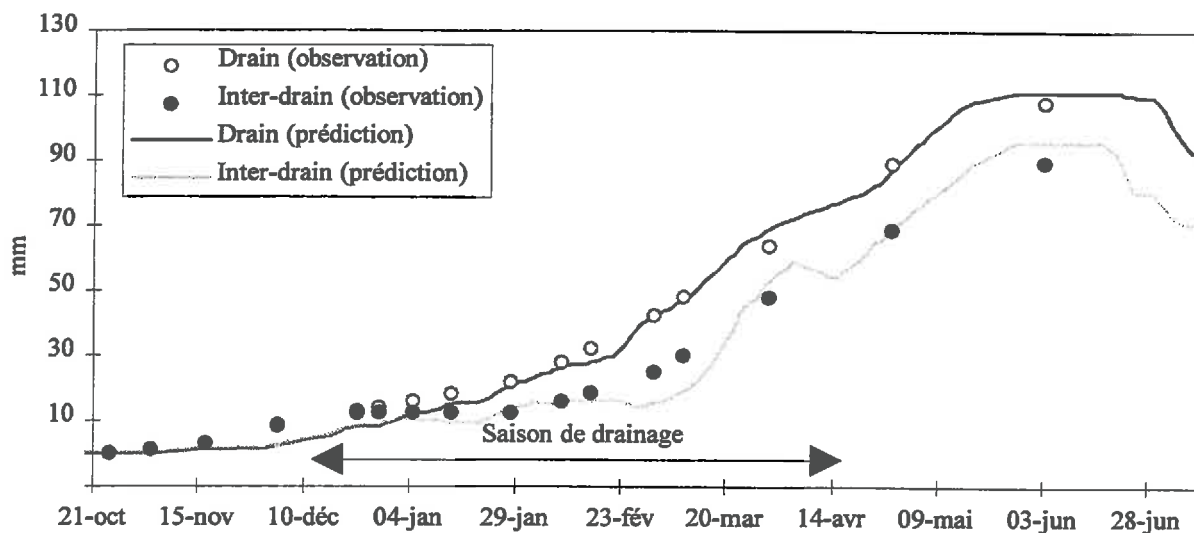


Figure 4.9 : *Chroniques des réserves biologiques,  $W_b$ , observées et prédites par le modèle, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994*

Il semble que la conceptualisation retenue pour estimer l'accroissement racinaire soit bien adaptée à ce type de sol. Comme nous avons pu l'observer à partir des cartographies racinaires, l'enracinement s'arrête au niveau de l'imperméable. La prise en compte de la résistance du sol à la pénétration des racines permet de simuler un obstacle à l'enracinement à ce niveau.

Entre la situation au drain et à l'inter-drain, les deux systèmes racinaires se différencient dès la première contrainte simulée. La fonction stress introduite dans BLEX décrit bien une réduction de l'accroissement avec la contrainte d'excès d'eau. Les valeurs prédites de l'approfondissement racinaire sont proches de celles observées (Figure 4.8). Cependant, l'observation met en évidence une différenciation entre le drain et l'inter-drain plus précoce que celle prédite, avant même qu'une contrainte soit observée. Il semble que la variable de stress ne rende pas totalement compte des contraintes d'excès d'eau au démarrage de la saison de drainage. Nous rejoignons les éléments de discussion exposés dans ce chapitre (§ 1). En effet au démarrage de la saison de drainage, il semble exister un système à deux nappes perchée (Guyon, 1983). La nappe perchée sur la semelle de labour peut conduire à des périodes d'excès d'eau que BLEX ne simule pas. Cette nappe se vidangerait d'une part, par saturation des couche de sol sous-jacentes et, d'autre part, par écoulements préférentiels vers la tranchée de drainage (Guyon, 1983).

Dans le modèle, le calcul de la réserve biologique ( $W_b$ ) repose sur la profondeur d'enracinement. En conséquence, la réduction de la profondeur racinaire due à un excès d'eau conduit à une réduction de la taille du réservoir racinaire (Figure 4.9). La diminution de la réserve biologique due à la réduction de la taille du réservoir racinaire est correctement estimée par le modèle. Ceci justifie notre choix de ne pas introduire de fonction stress venant réduire la capacité d'extraction en eau de la plante (ce chapitre, § 2).

### • *LAI et biomasse aérienne*

#### ➤ *Situation potentielle*

Dans le modèle BLEX, la valeur de l'accroissement du LAI ( $\Delta\text{LAI } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) dépend des stades de développement de la plante (Chapitre I, § 2). Nous avons décrit trois phases de croissance selon les stades de développement de la plante, (1) croissance lente (pendant le tallage), (2) croissance rapide (pendant la montaison) et (3) sénescence (après le floraison).

Les dates d'apparition des stades de développement étant estimées avec une bonne précision, l'enchaînement de ces phases est correctement décrit par le modèle, en particulier la sénescence (Figure 4.10). Si la tendance reste bonne, en revanche le modèle sous-estime le LAI au démarrage du cycle de la plante, phase de croissance lente (zoom de la Figure 4.10). Puis à partir du stade épi à 1 cm (11 mars) les valeurs prédites par le modèle sont proches de celles observées (comparaison sur 4 observations).

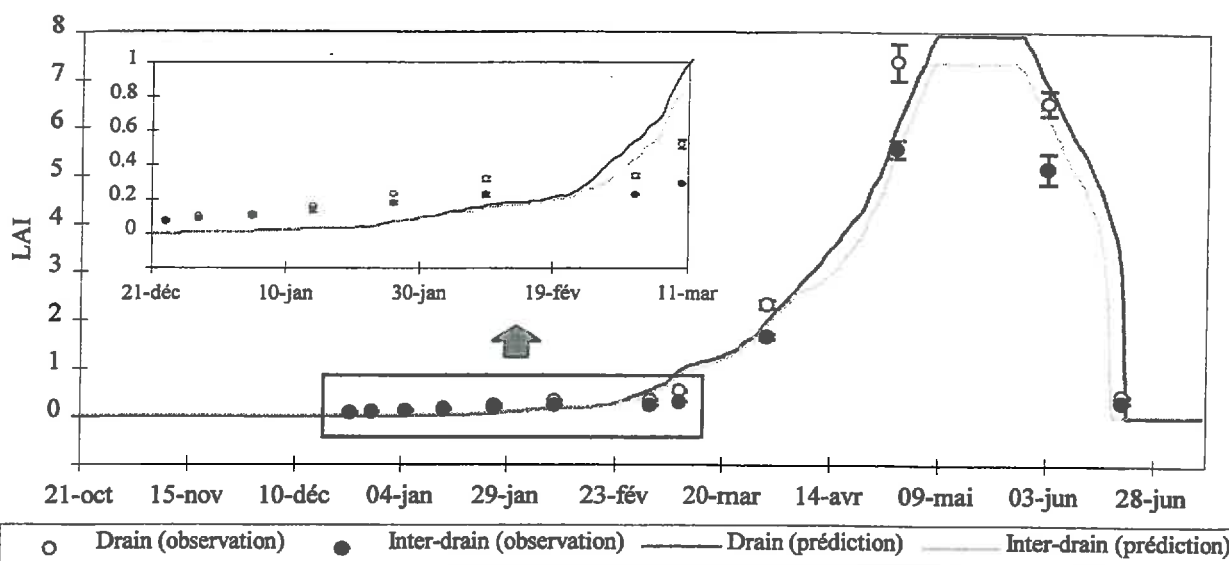


Figure 4.10 : Chroniques des valeurs du LAI observées et prédites par le modèle, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994

Le paramétrage ou les fonctions utilisées pour prédire l'expansion foliaire ne sont pas satisfaisants en phase de croissance lente. C'est surtout à cette phase que nous nous intéressons puisqu'elle coïncide avec la période où les risques liés à un excès d'eau sont importants. Les effets dus à un excès d'eau risquent de ne pas être correctement pris en compte. Cependant, les surfaces concernées étant faibles et le modèle se recalant correctement au cours de la phase de croissance rapide et de la sénescence, les conséquences l'estimation du rendement sont moindres.

Le calcul de la biomasse aérienne reposant sur le LAI les mêmes remarques peuvent être faites à partir de la Figure 4.11. Le modèle sous-estime l'accumulation de biomasse. Au 31 mai on mesure un défaut de biomasse d'environ 200 g m<sup>-2</sup>.

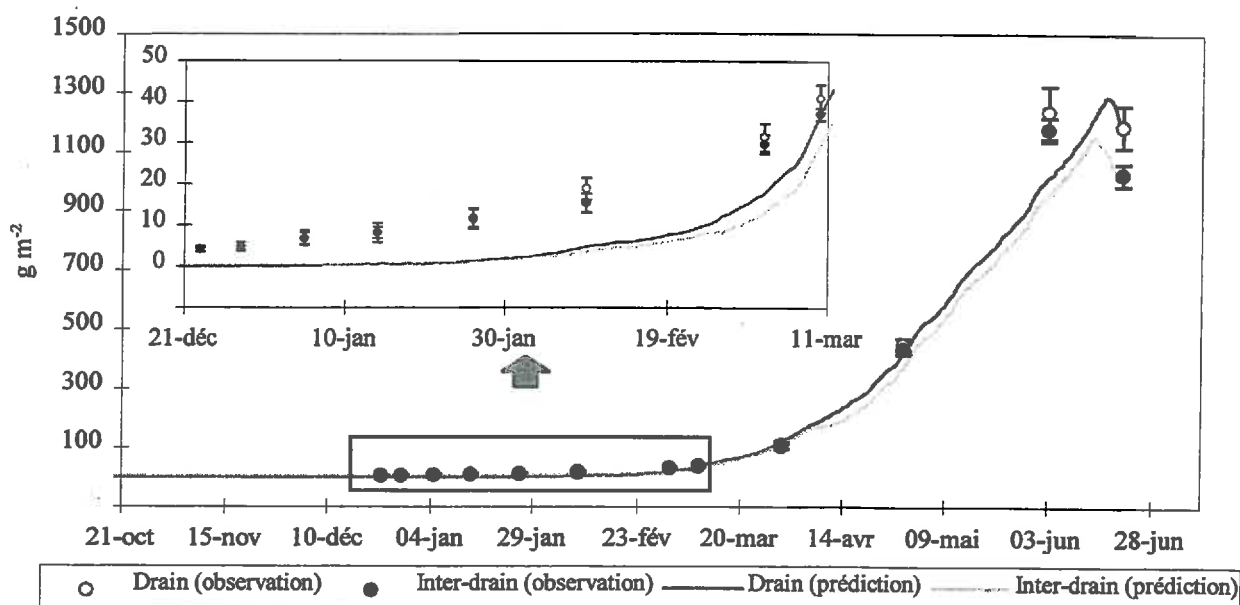


Figure 4.11 : Chroniques des valeurs de la biomasse aérienne observées et prédites par le modèle, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994

➤ *Situation "stressée"*

Globalement les effets d'un excès d'eau sur le LAI et de la biomasse sont bien reproduits par le modèle. Les divergences observées en début de cycle ne sont pas liées à une mauvaise prise en compte de l'effet de l'excès d'eau puisque même en situation potentielle les valeurs de LAI et de biomasse sont sous-estimées.

• *Rendement*

Le rendement est estimé à partir de la biomasse aérienne par l'intermédiaire de l'indice récolte. Nous avons pris la valeur moyenne de l'indice de récolte estimé sur notre expérimentation ( $HI = 0.45 \pm 0.01$ ). La comparaison entre valeurs observées et prédites du rendement sont présentés dans le Tableau 4.3.

	Poids de paille (g m <sup>-2</sup> )	Rendement * (Qtz ha <sup>-1</sup> )	Différence (drain - inter-drain) (Qtz ha <sup>-1</sup> )
<b>Drain</b>			
Observation	1187	66.1	10.2
Prédiction	1208	62.5	08.5
<b>Inter-drain</b>			
Observation	1023	55.9	
Prédiction	1043	54.0	

Tableau 4.3 : Comparaison du rendement entre valeurs mesurées et prédites par le modèle, Arrou, parcelle 1, campagne 1993-1994, \* : taux d'humidité de 15 %.

La prise en compte de l'effet d'un excès d'eau sur chacune des fonctions de croissance permet bien de reproduire l'effet global sur le rendement. Les écarts de rendement entre drain et inter-drain sont voisins de ceux observés (Tableau 4.3).

## 5. DISCUSSION

Globalement le modèle permet de restituer le comportement de la plante aux situations d'excès d'eau. L'analyse des effets de cette contrainte sur les mécanismes agro-physiologiques élémentaires permet bien de retrouver l'effet global sur le rendement.

La vérification du modèle conduit à plusieurs enseignements quant au choix de la variable de stress.

- La variable de stress ne rend pas compte de stress à l'excès intervenant au début du cycle de la culture. En effet, la profondeur racinaire est alors faible, il faut que la nappe remonte dans le système racinaire pour que le modèle simule une contrainte. Or, des effets dus à l'excès d'eau sont mis en évidence avant même que la nappe n'atteigne les racines. Même si nous pouvons imaginer une réduction de la croissance de la plante selon les fonctions stress décrites, il semble important de considérer l'état hydrique de la couche labourée indépendamment de la profondeur de la nappe au démarrage de la phase végétative.
- La variable de stress a un poids important sur la modélisation dans le sens où elle constitue une variable intermédiaire pour décrire l'effet d'un excès d'eau sur la croissance de la culture. L'estimation de cette variable est sensible à la profondeur de la nappe et à la profondeur racinaire. En comparaison avec des modèles reposant sur le calcul de temps de présence de la nappe dans l'horizon labouré qui sont plus robustes, nous décrivons un mécanisme supplémentaire reposant sur une variable intermédiaire à laquelle il est nécessaire de mesurer la sensibilité du modèle. Cette étude est présentée dans le chapitre IV.

La validation du modèle à l'échelle parcellaire se heurte à une difficulté liée à son application au drainage. En effet, les valeurs de rendement disponibles sont fournies par l'agriculteur. Elles se rapportent le plus souvent à la parcelle entière. Or, sur une parcelle drainée, il n'existe pas de zone homogène, nous ne pouvons donc pas estimer les valeurs à l'échelle parcellaire en extrapolant directement les résultats obtenus sur placettes. Nous avons dû mener une étude particulière, à partir de BLEX, pour estimer le rendement moyen à la parcelle. Nous présenterons cette étude dans le chapitre IV avec la validation du modèle.



# CHAPITRE IV

## VALIDATION ET APPLICATION DU MODELE BLEX

1 - Validation du modèle BLEX

2 - Applications et intérêts du modèle BLEX

<i>INTRODUCTION</i> .....	172
<b>1. VALIDATION ET SENSIBILITE DU MODELE BLEX</b> .....	<b>173</b>
1.1 Validation.....	173
<i>Prédictions des périodes de fonctionnement du réseau de drainage</i> .....	174
<i>Prédictions du rendement au drain et à l'inter-drain</i> .....	176
1.2 Calcul du rendement moyen parcellaire.....	179
1.3 Etude de sensibilité des paramètres du modèle.....	184
<i>Synthèse des études précédentes</i> .....	184
<i>Sensibilité du modèle à la variable de stress</i> .....	186
<i>Conclusion</i> .....	188
<b>2. APPLICATIONS ET INTERETS DU MODELE BLEX</b> .....	<b>189</b>
2.1 Influence de l'écartement des drains sur le rendement.....	189
2.2 Effet de hauteur de nappe constante sur le rendement.....	191
2.3 Sensibilité de la plante et période d'excès d'eau.....	193
<i>CONCLUSION</i> .....	195

## INTRODUCTION

La vérification du modèle nous a permis de conclure que BLEX restituait correctement le comportement de la plante aux situations d'excès d'eau et permettait de retrouver leurs effets sur le rendement. Nous avons mené des études complémentaires à cette vérification. Nous avons validé le modèle BLEX dans des conditions climatiques variables pour différentes campagnes de mesures sur le site expérimental d'Arrou. La validation repose sur la comparaison entre valeurs observées et estimées des dates de mise en oeuvre du couplage et du rendement au drain et à l'inter-drain. Le modèle BLEX permet uniquement d'estimer le rendement au drain et à l'inter-drain. Nous présentons une méthode de calcul possible du rendement global à l'échelle de la parcelle (§ 1)

Nous présentons les études de sensibilité réalisées sur chacun des modèles composant BLEX (SIDRA, BYM, GOA) pris de manière indépendante. La prise en compte de l'effet d'un excès d'eau sur la croissance des cultures, nous a conduit à introduire dans le modèle BLEX une variable supplémentaire : variable de stress SEE(%). Nous avons étudié la sensibilité de cette variable sur les résultats du modèle (§ 1).

En raison de sa conceptualisation le modèle BLEX présente de nombreux intérêts tant pour l'estimation des potentialités agricoles parcellaires que pour le raisonnement du dimensionnement des ouvrages hydrauliques permettant de lever la contrainte d'engorgement en eau du sol. Ce modèle peut également constituer un outil permettant de construire ou de valider des approches plus empiriques adoptées pour l'estimation des potentialités agricoles. Nous avons mené une étude succincte sur l'intérêt du modèle dans l'orientation du choix d'un écartement entre les drains. Enfin, nous avons appliqué le modèle à l'étude de l'effet de périodes d'excès d'eau selon le stade de développement de la plante. Cette étude théorique nous a conduit à la définition de facteurs de sensibilité de la plante à l'excès d'eau tels qu'ils ont été définis par Evans *et al* (1990) pour les cultures de maïs et de soja (§ 2).

# 1. VALIDATION ET SENSIBILITE DU MODELE BLEX

## 1.1 Validation

La validation a été menée sur les données acquises sur différentes parcelles du site expérimental d'Arrou. Pour ce faire, nous disposons des mesures du rendement au drain et à l'inter-drain pour 6 campagnes. Pour 4 d'entre elles, nous disposons des données pour des parcelles avec des écartements de drains de 10, 15 et 20 mètres (Tableau 1.1).

Campagne	Ecartement des drains		
	10 m	15 m	20 m
74-75	2	3	2
75-76	1	1	1
77-78	2	3	2
80-81	1	1	1
82-83	1	-	-
93-94	1	-	-

*Tableau 1.1 : Synthèse des données disponibles pour la validation du modèle BLEX, les chiffres correspondent au nombre de parcelles concernées*

Nous disposons au total de 22 couples d'observations. Les données relatives à ces campagnes sont présentées dans l'annexe 1.2. Deux points doivent d'ores et déjà être abordés :

1 - La validation est menée sur différentes parcelles du site dont :

- les dispositions constructives sont différentes (drains en PVC ou poterie, tranchées gravillonnées ou non) (Tableau 1.9, page 22).
- les opérations visant à l'amélioration des conditions de drainage ont été différentes (sous-solage, griffage, nouveau drainage) ou ont été réalisées à des dates variables (1978, 1980, 1993) (Tableau 1.9, page 22).
- les propriétés hydrodynamiques des parcelles sont différentes.

Il apparaît notamment que pour les parcelles ayant un écartement des drains de 15 et *a fortiori* de 20 mètres les infiltrations profondes au cours de la saison de drainage intense sont plus importantes. Les valeurs des coefficients de restitutions calculés sur la SDI sont plus faibles (Lesaffre, 1988 ; Zimmer 1988, voir également les données présentées à l'annexe 4.1).

2 - Par ailleurs, au cours des campagnes, les variétés de blé cultivées par l'agriculteur ont été différentes (Hardi, Talent, Durtal et Soissons).

Ne disposant de l'ensemble des paramètres hydrodynamiques et physiques que pour la parcelle 1 et uniquement pour la variété de blé "Soissons" nous les avons appliqués à l'ensemble du site expérimental pour toutes les campagnes de mesures et à l'ensemble des variétés de blé cultivées. Les paramètres ainsi utilisés ont été identiques à ceux décrits pour la vérification du modèle. Même si la validation ne présente, dans de telles conditions, qu'un intérêt limité, elle reste un moyen utile pour valider le fonctionnement du modèle et juger de sa robustesse.

### • *Prédictions des périodes de fonctionnement du réseau de drainage*

Pour chacune des campagnes de mesures, l'étude des périodes et des phases de fonctionnement du réseau de drainage n'a pas permis de montrer de différences entre parcelles (Zimmer, 1988). Les dates de démarrage et de fin de saison de drainage intense déterminées par la méthode des doubles cumuls pour chacune des parcelles et pour chacune des campagnes sont résumées dans l'annexe 4.1.

Le décalage entre dates observées et prédites par le modèle de l'amorce et de la fin de la saison de drainage est variable selon les campagnes. Il n'excède jamais une semaine (Tableau 1.2).

		74-75	75-76	77-78	80-81	82-83	93-94
Amorce de la saison de drainage	Observation	15/11	02/12	22/12	15/12	25/11	12/12
	Prédiction	15/11	29/11	25/12	14/12	20/11	14/12
Fin de la saison de drainage	Observation	18/05	09/03	07/04	25/05	10/06	25/04
	Prédiction	14/05	14/03	12/04	28/05	05/06	22/04

*Tableau 1.2 : Comparaison des dates observées et prédites d'amorce et de fin de la saison de drainage*

Les conséquences d'un décalage sur le rendement final sont moindres. Lors de la mise en oeuvre du couplage (en moyenne au cours des mois de novembre et décembre), les stades de développement sont peu avancés. Le système racinaire est peu profond. Les conséquences d'une mauvaise estimation de la variable de stress, due à un décalage de la date de la mise en oeuvre du couplage, sur le rendement sont négligeables voire nulles.

En revanche, pour le découplage, les conséquences peuvent être plus importantes et dépendent des conditions climatiques qui suivent la date de découplage. Si le découplage est réalisé en avance par rapport à la date observée, le modèle risque de ne pas prendre en compte les

contraintes dues aux précipitations ultérieures. En revanche si aucun événement climatique majeur n'intervient après le découplage, les conséquences sont nulles.

Si le découplage est réalisé en retard par rapport à la date observée, nous n'observons aucune conséquence sur le rendement. En effet, sans alimentation pluviométrique, la hauteur de nappe simulée est faible. Lors d'un épisode pluviométrique, la lame d'eau précipitée constituera dans un premier temps un terme de restockage sur la zone non saturée puis l'excédent sera transmis à la nappe. La recharge effective alors transmise à la nappe est négligeable. Le risque d'apparition de nouvelles contraintes est faible. Dans le modèle BLEX nous avons donc intérêt à maximiser le terme de déstockage,  $D_k$ .

A titre d'exemple, sur l'ensemble des campagnes, nous avons "forcé" le couplage et le découplage de façon à introduire un décalage dans les dates de mise en oeuvre du modèle couplé. Le forçage est réalisé sur les paramètres  $L_k$  et  $D_k$ . Ces paramètres varient autour de leur valeur nominale (Tableau 1.3).

		Valeur nominale							
$L_k$	100	90	80	75	70 mm	65	60	50	40
$D_k$	-	30	25	22	20 mm	18	15	10	-

Tableau 1.3 : Valeurs des paramètres de couplage et découplage testées dans le modèle BLEX

Les conséquences sur le décalage en nombre de jours entre dates prédites avec les paramètres nominaux et dates obtenues en changeant la valeurs des paramètres selon le Tableau 1.3 sont présentées sur la Figure 1.1. Les conséquences sur le rendement moyen parcellaire (pour un écartement des drains de 10 m) sont présentées sur la Figure 1.2.

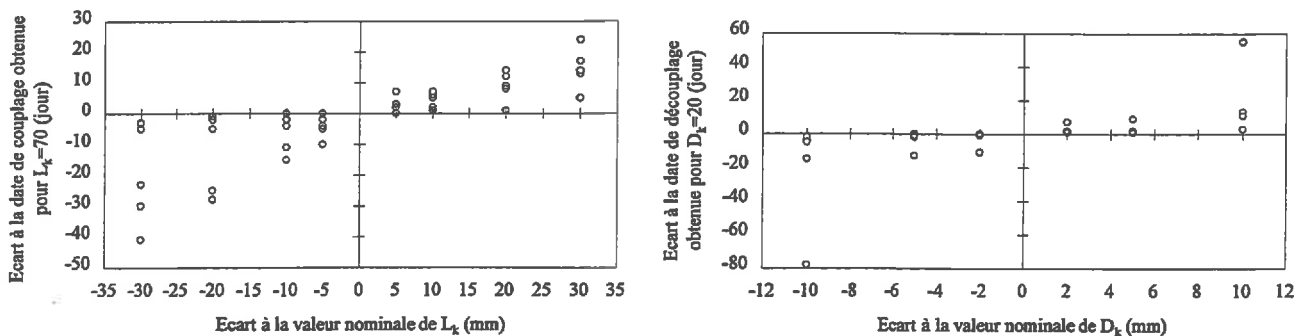


Figure 1.1 : Effet de variation des valeurs des paramètres  $L_k$  et  $D_k$  sur l'estimation des dates de couplage et de découplage dans le modèle BLEX

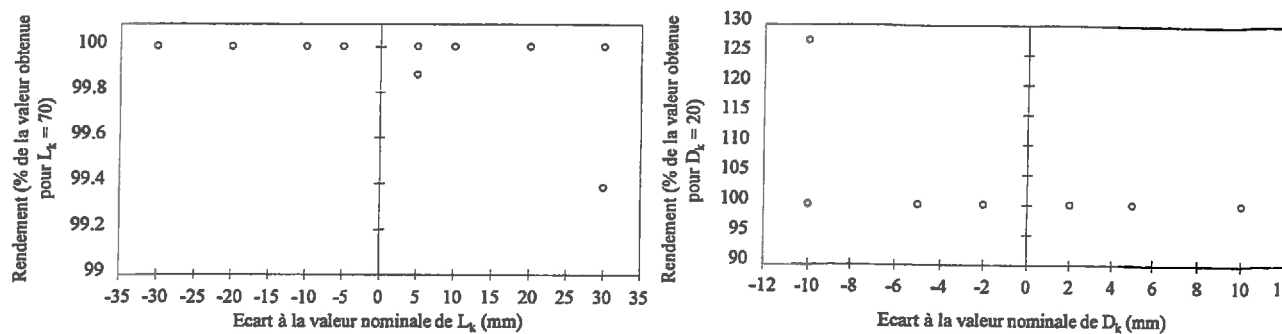


Figure 1.2 : Conséquence des variations des valeurs des paramètres  $L_k$  et  $D_k$  sur le rendement moyen parcellaire (écartement des drains de 10 m)

• **Prédictions du rendement au drain et à l'inter-drain**

Nous avons dans un premier temps comparé les résultats du modèle avec les données mesurées pour la situation potentielle de la parcelle (situation au drain). Pour l'ensemble des campagnes de mesures, le modèle simule correctement le rendement au niveau du drain (Figure 1.3). Quel que soit l'écartement entre drains, le rendement simulé au niveau du drain est identique pour une même année climatique. Les observations sur le terrain confirment ce résultat et mettent en évidence l'absence de différences significatives sur le rendement mesuré au drain selon les écartements.

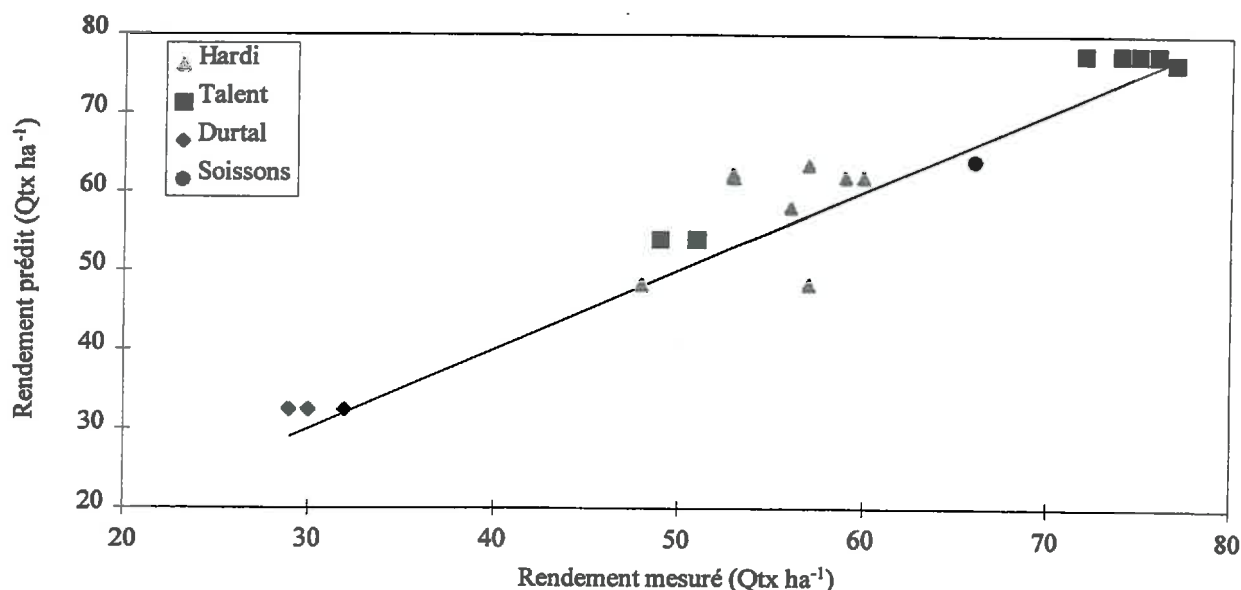


Figure 1.3 : Comparaison entre valeurs observées et prédites du rendement pour la situation au drain

Les différences entre valeurs observées et prédites du rendement n'excèdent pas 10 Qtx ha<sup>-1</sup> (en moyenne 3.6 Qtx ha<sup>-1</sup> avec un écart maximal de 9.2). Néanmoins il existe une différence inter-

parcellaire que le modèle ne permet pas de restituer. En effet, les données d'entrée du modèle sont identiques pour l'ensemble des parcelles, or la profondeur du sol ainsi que les caractéristiques pédologiques du sous-sol diffèrent sensiblement entre la partie haute et la partie basse du site. Cette variabilité pourrait être prise en compte dans le modèle. Pour l'ensemble des variétés, le paramétrage utilisé pour simuler la croissance de la culture est satisfaisant. Ces variétés, dans les conditions expérimentales présentées, ont finalement un comportement agronomique relativement proche.

Les rendements à l'inter-drain sont moins bien simulés (Figure 1.4). L'écart moyen entre valeurs observées et prédites du rendement est de 5.6 Qtx ha<sup>-1</sup> avec un écart maximal de 16.6 Qtx ha<sup>-1</sup>. Les écarts maximaux sont mesurés au cours de la campagne 77-78. La variété alors cultivée est Talent. Pour cette campagne, sur les parcelles avec un écartement des drains de 10 m, la réduction du rendement entre le drain et l'inter-drain est correctement estimée. En revanche pour les parcelles avec un écartement de drain supérieur (15 et 20 m), le modèle surestime largement les chutes de rendement.

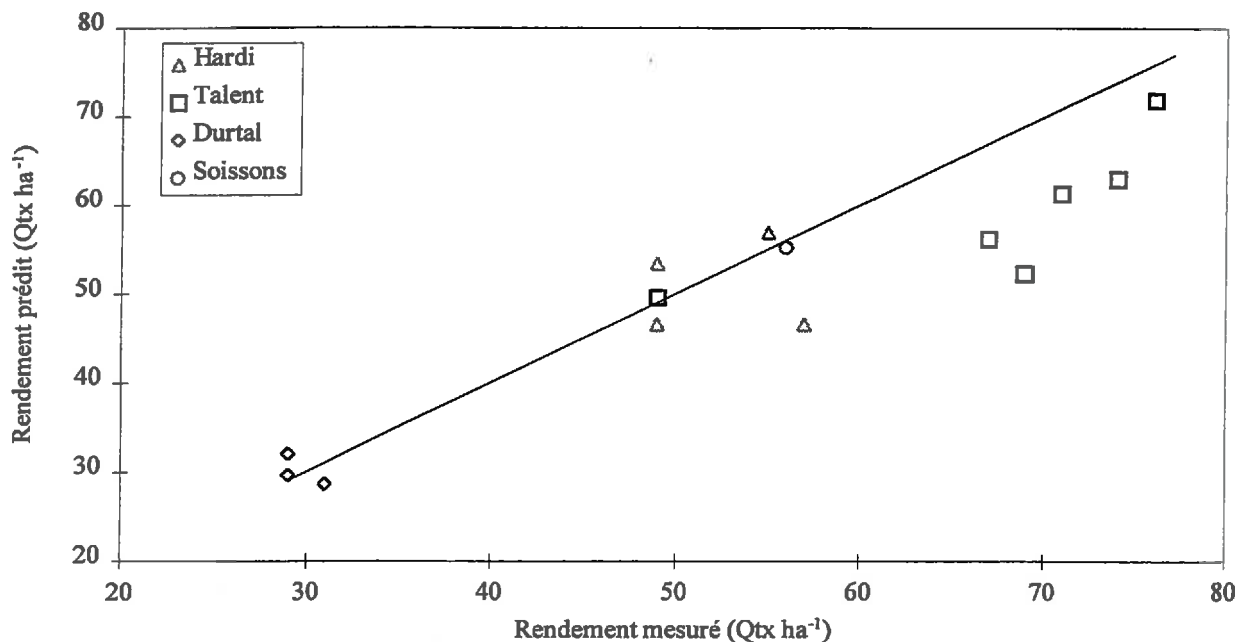


Figure 1.4 : Comparaison entre valeurs observées et prédites du rendement pour la situation à l'inter-drain

La comparaison des écarts de rendement (drain - inter-drain) observés et prédits montre que le modèle a tendance à sous-estimer les rendements à l'inter-drain (Figure 1.5). Globalement, la sous-estimation est d'autant plus importante que l'écartement entre les drains augmente.



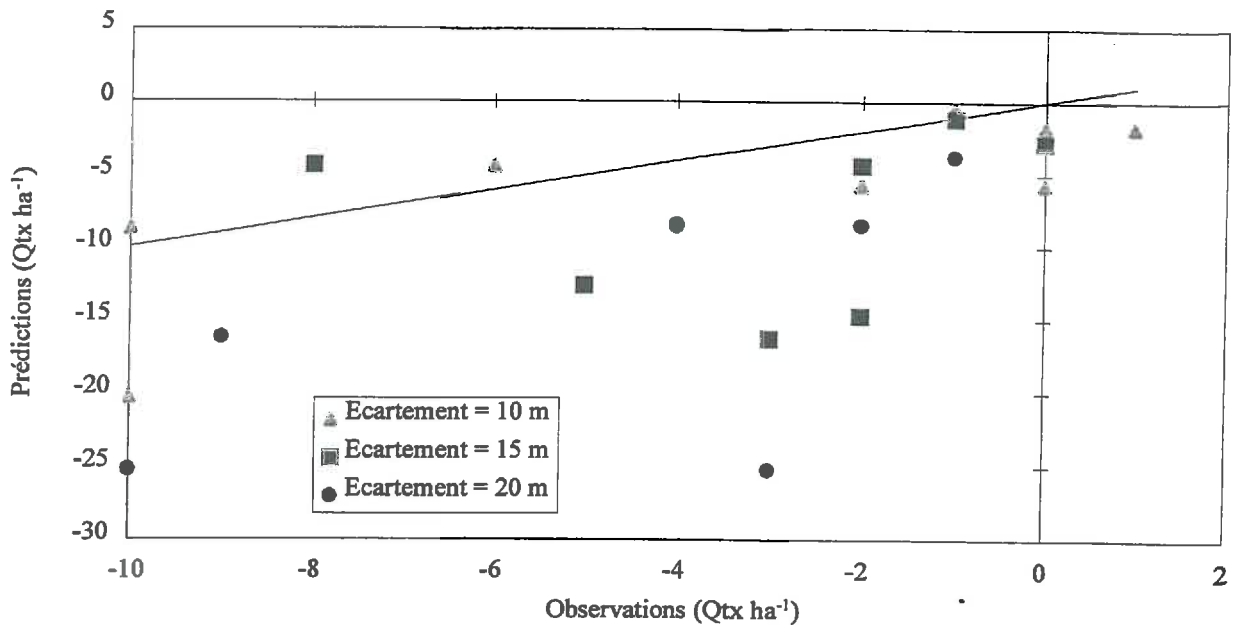


Figure 1.5 : Comparaison entre valeurs prédites et observées des valeurs des écarts de rendement (drain - inter-drain)

Deux éléments d'explication peuvent être avancés :

- 1 - le modèle surestime la variable de stress,
- 2 - les effets de la variable de stress sur la croissance de la plante ne sont pas correctement décrits.

Un élément de réflexion peut être apporté en considérant les coefficients de restitution. Dans le modèle de bilan hydrique, aux variations de stock d'eau près, au cours de la saison de drainage la totalité des précipitations est transmise à la nappe et est restituée par le réseau de drainage. En revanche les coefficients de restitutions calculés expérimentalement sont inférieurs à 100% et mettent en évidence des pertes d'eau dans le système que le modèle ne prend pas en compte. Les hauteurs de nappe sont alors surestimées et par voie de conséquence la variable de stress.

A partir de cette validation sommaire il apparaît d'ores et déjà que la variabilité inter-parcellaire est un facteur important à considérer. Sa prise en compte dans le modèle nécessite l'acquisition des paramètres hydrodynamiques ainsi qu'une description pédologique pour chacune des parcelles. De plus, il serait souhaitable de mener une étude expérimentale plus approfondie sur l'importance des infiltrations profondes et d'en analyser les conséquences sur l'établissement du bilan hydrique sur la profondeur de sol considéré. Nous pourrions alors en dégager des enseignements utiles à la modélisation.

## 1.2 Calcul du rendement moyen parcellaire

La validation du modèle à une plus grande échelle spatiale (validation multi-locale) et temporelle nécessite une étude particulière liée au système modélisé à savoir la parcelle drainée. En effet, le modèle BLEX estime le rendement au drain et à l'inter-drain or, dans la plupart des cas les rendements disponibles sont ceux fournis par l'agriculteur. Ils se rapportent donc à la parcelle entière. En raison de la forme de la nappe et du caractère non linéaire de la réponse de la plante avec le profondeur de la nappe, nous ne pouvons pas extrapoler les valeurs estimées au drain et à l'inter-drain pour calculer le rendement moyen de la parcelle.

Le rendement moyen à la parcelle peut être estimée avec une bonne précision en discrétisant le domaine entre le drain et l'inter-drain. A une distance quelconque de l'inter-drain, la hauteur de nappe vaut :

$$h(x, j) = H(j) \left(1 - X^2\right)^{\frac{1}{2+m}} \quad (\text{rappel de l'équation 3.3, page 157})$$

Nous avons calculé le rendement à des distances variables de l'inter-drain. Pour une parcelle drainée avec un écartement de 5 m, nous avons calculé le rendement à l'inter-drain, à 1, 2, 3, 4 m de l'inter-drain et au drain (Figure 1.6). Le rendement ponctuel calculé pour une abscisse donnée est appliqué sur une distance de 0.5 m de part et d'autre de l'abscisse. Le rendement moyen est calculé comme la moyenne des rendements calculés pour chacune des abscisses. Nous avons choisi de façon arbitraire de discrétiser le domaine en tranche de sol d'une largeur de 1 mètre.

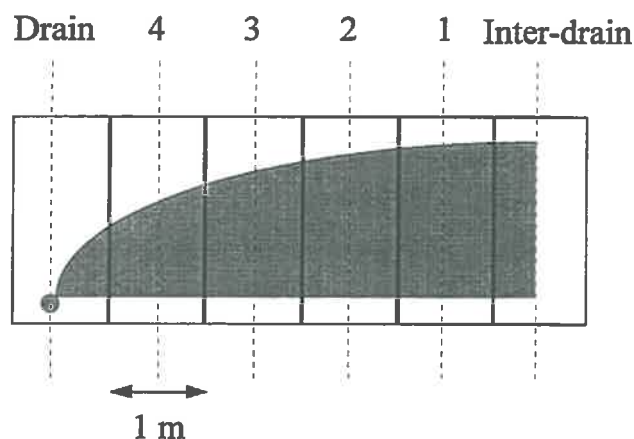


Figure 1.6 : Discretisation du dispositif modélisé pour le calcul du rendement moyen

A titre d'exemple, nous présentons les résultats obtenus sur la parcelle 1 au cours de la campagne 1993-1994. Sur la Figure 1.7 le rendement est exprimé en pourcentage du rendement maximal calculé au drain.

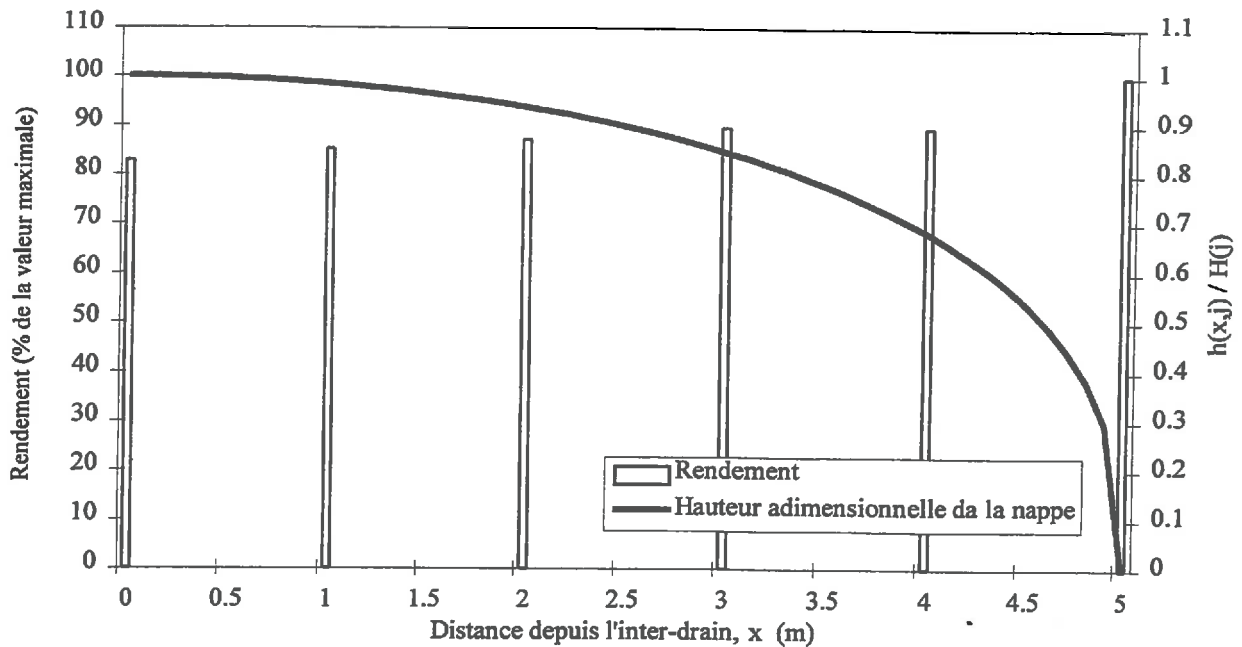


Figure 1.7 : Estimation du rendement pour différentes distances par rapport à l'inter-drain

A 1 mètre du drain, le modèle estime une réduction significative du rendement. La relation entre la réduction du rendement et la hauteur de la nappe n'est pas linéaire. En effet, la présence d'une contrainte conduit à une réduction de la croissance racinaire, cette réduction est distincte selon l'abscisse considérée. On peut alors imaginer qu'une contrainte soit simulée à une distance quelconque de l'inter-drain alors même qu'aucune contrainte n'est simulée à l'inter-drain. C'est ce que nous observons sur la Figure 1.8 autour du 03 mars et du 23 mars pour une distance de 4 mètres depuis l'inter-drain.

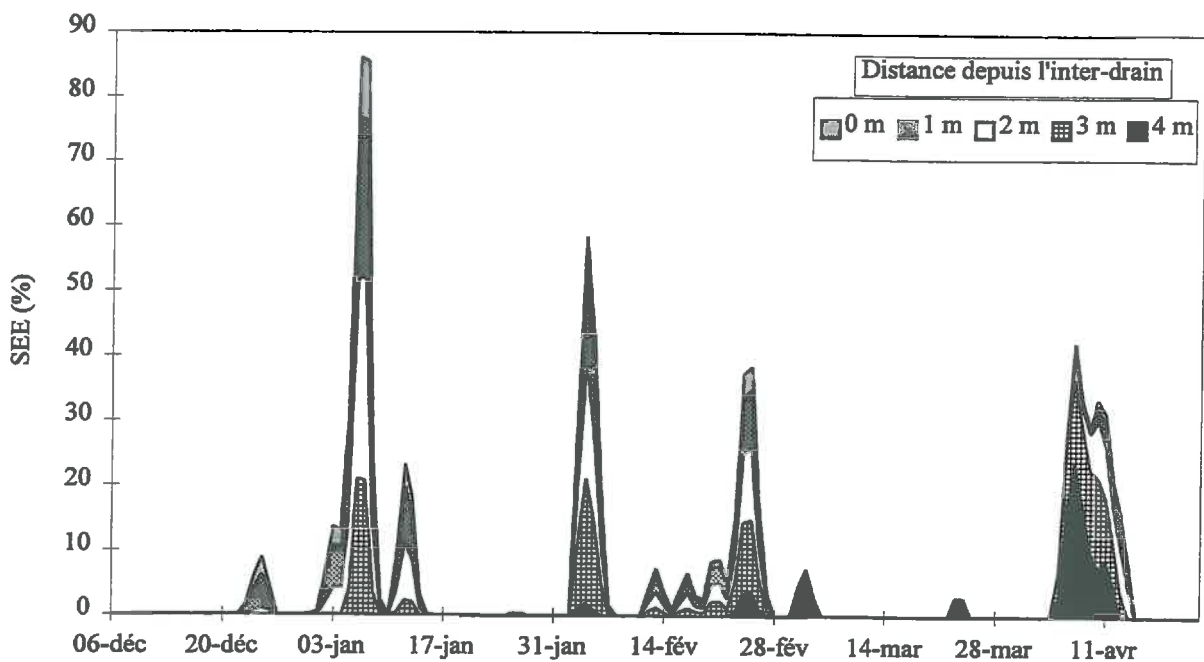


Figure 1.8 : Chronique des valeurs de la variable de stress à différentes distances depuis l'inter-drain

Nous avons appliqué la démarche présentée ci-dessus à l'ensemble des parcelles et des campagnes pour le site expérimental d'Arrou. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 1.9.

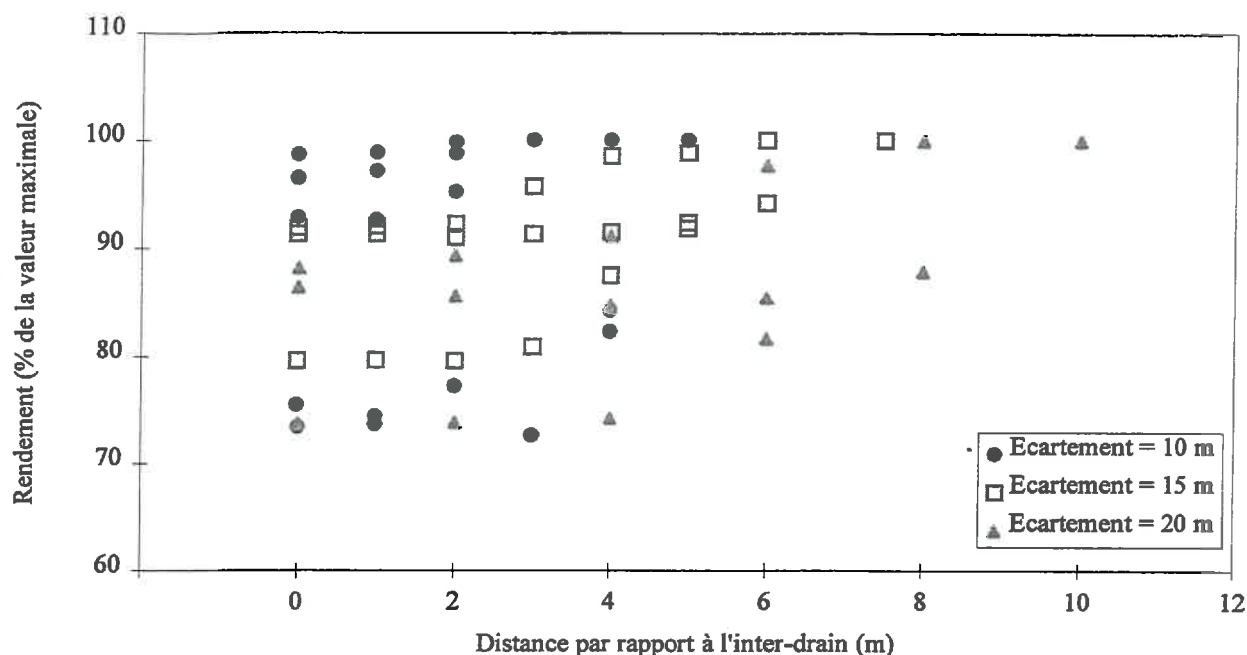


Figure 1.9 : Estimation du rendement pour différentes distances par rapport à l'inter-drain pour des écartements de drains variables

Nous observons une grande variabilité du comportement du système selon les années climatiques et les écartements des drains. Nous confirmons qu'il n'existe pas de relation linéaire entre la distance au drain et la réduction du rendement (Figure 1.10).

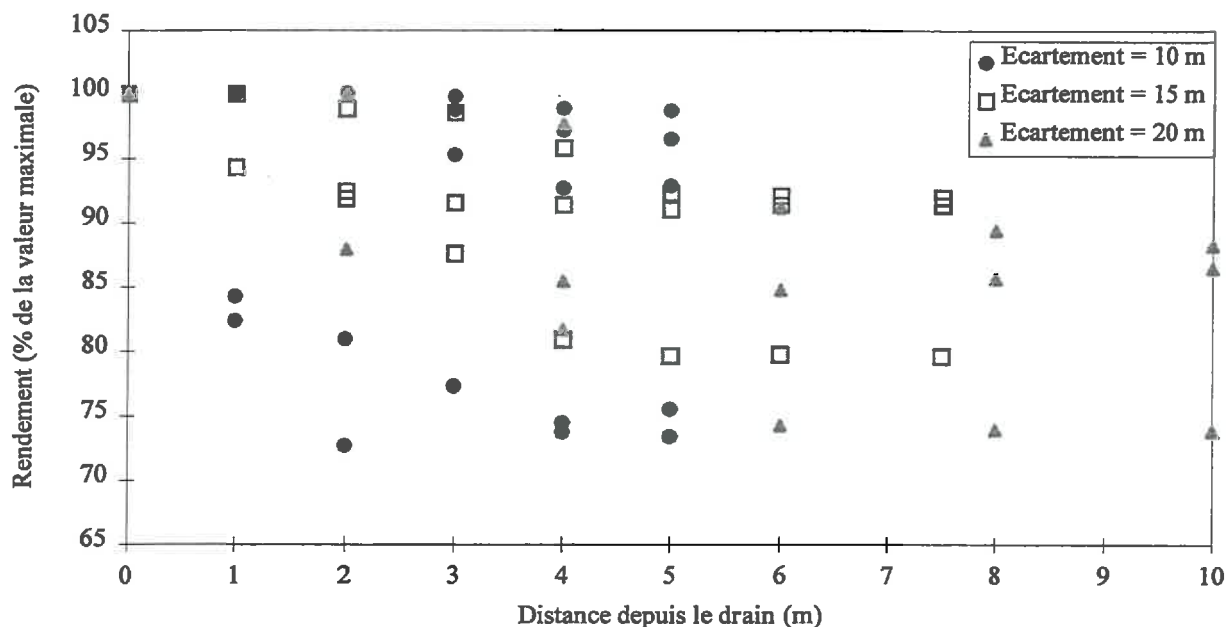


Figure 1.10 : Relation entre distance au drain et réduction du rendement

Cette méthode de calcul du rendement moyen à la parcelle est lourde puisqu'elle oblige à réaliser plusieurs simulations pour une même parcelle. Nous avons cherché à approcher le rendement moyen par une méthode plus simple. Nous avons calculé une contrainte moyenne entre le drain et l'inter-drain, elle vaut :

$$SEE_{\text{moy}}(j) = \frac{1}{L} \int_0^L SEE(x,j) dx \quad (\text{éq. 1.1})$$

en faisant l'hypothèse suivante :

$$\frac{SEE(x,j)}{SEE(j)} = W(x) \quad (\text{éq. 1.2})$$

il vient :

$$SEE_{\text{moy}}(j) = \frac{SEE(j)}{L} \int_0^L W(x) dx \quad (\text{éq. 1.3})$$

comme :

$$\int_0^L W(x) dx = L \int_0^1 W(X) dX = L B \quad (\text{éq. 1.4})$$

finalement, nous obtenons :

$$SEE_{\text{moy}}(j) = B SEE(j) \quad (\text{éq. 1.5})$$

où  $SEE(j)$  est la valeur de la variable de stress à l'inter-drain,  $B$  est un facteur de forme de nappe et  $L$  est le demi-écartement entre les drains.

L'hypothèse faite en posant l'éq. 1.2 doit être validée. A cet effet nous avons réalisé des simulations en discrétisant le domaine par tranche de sol de 1 m (données de la Figure 1.8). Nous avons calculé la contrainte moyenne comme la moyenne des contraintes locales. Nous comparons les contraintes moyennes ainsi obtenues avec celles calculées via l'éq. 1.5 (Figure 1.11). Dans le cas de la campagne 93-94, l'équation 1.5 conduit systématiquement à une surestimation de la contrainte moyenne.

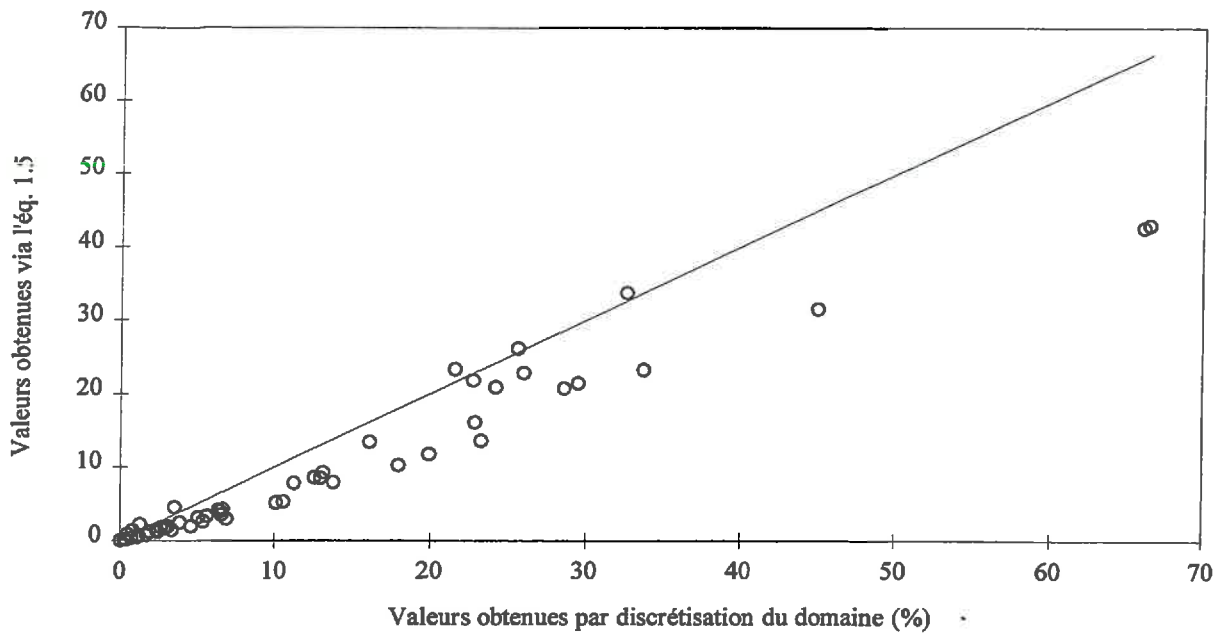


Figure 1.11 : Comparaison des moyennes des contraintes obtenues en discrétisant le domaine et en appliquant l'éq. 1.5, parcelle 1, site expérimental d'Arrou, campagne 93-94

Afin de faciliter l'utilisation du modèle pour le travail qui va suivre nous avons accepté l'hypothèse présentée dans l'éq. 1.2. Il s'avère nécessaire de la valider pour d'autres campagnes climatiques et pour des écartement de drains variables. Nous avons validé les résultats du modèle en introduisant cette méthode de calcul du rendement moyen parcellaire avec les résultats obtenus en discrétisant le domaine et ceux mesurés par l'agriculteur sur plusieurs campagnes (Figure 1.12).

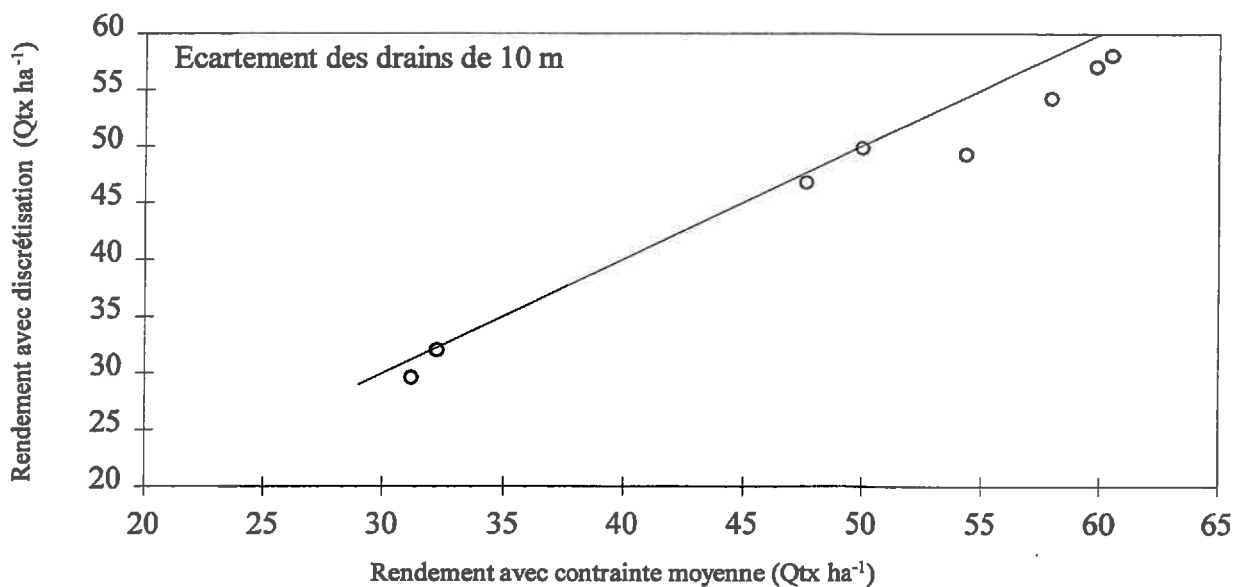


Figure 1.12 : Comparaison des rendements obtenus par discrétisation du domaine et calcul d'une contrainte moyenne pour estimer le rendement moyen avec ceux mesurés par l'agriculteur, site expérimental d'Arrou

Les résultats montrent que le calcul d'une contrainte moyenne permet d'estimer avec une bonne précision le rendement parcellaire.

Dans l'état actuel de développement le modèle BLEX propose les options de simulations suivantes :

- 1 - Simulation à l'inter-drain,
- 2 - Simulation au drain,
- 3 - Simulation moyenne entre le drain et l'inter-drain selon l'éq. 1.5,
- 4 - Simulation à une abscisse quelconque entre le drain et l'inter-drain.

### 1.3 Etude de sensibilité des paramètres du modèle

- *Synthèse des études précédentes*

Le modèle BLEX est le résultat d'un assemblage de 3 modèles : SIDRA, BYM et GOA. Des études de sensibilités sur les paramètres ont été menées sur chacun des modèles pris indépendamment.

➤ *Modèle SIDRA*

Une étude de sensibilité des paramètres du modèle saturé, SIDRA, a été menée à partir des données de débit acquises sur la parcelle 1 du site expérimental d'Arrou (Zimmer et Lorre, 1986). Nous présentons les résultats obtenus par ces auteurs. Les paramètres varient autour de leur valeur nominale (Tableau 1.4).

Couche labourée	Epaisseur	0.23 m
	Conductivité hydraulique	2 m j <sup>-1</sup>
	Porosité de drainage	3 %
Couche non perturbée	Epaisseur	0.52 m
	Conductivité hydraulique équivalente à la base de la couche labourée	0.41 m j
	Coefficient d'hétérogénéité, m	0.74
	Porosité de drainage à la base de la couche labourée	2.6 %
	Coefficient d'hétérogénéité (m = 2p)	0.37
Facteurs de forme de nappe	B	0.7731
	A	0.8624

Tableau 1.4 : Valeurs des paramètres hydrodynamiques du site expérimental d'Arrou (d'après Zimmer et Lorre, 1986)

La qualité des prédictions a été calculée en utilisant le critère dit de Nash appelé aussi efficacité du modèle (Nash et Sutcliffe, 1970), son expression est :

$$e = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs\ i} - Q_{sim\ i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs\ i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (\text{éq. 1.6})$$

où  $Q_{obs\ i}$  et  $Q_{sim\ i}$  sont respectivement les débits observés et simulés au pas de temps horaire et  $\bar{Q}_{obs}$  est la moyenne des débits observés sur la période considérée (saison de drainage intense).

Les coefficients de forme de la nappe sont les paramètres les plus sensibles, une variation de 10% de leur valeur entraîne une diminution de 10% de l'efficacité du modèle. Concernant les paramètres hydrodynamiques, les débits simulés sont plus sensibles aux variations de la porosité de drainage qu'à celles de la conductivité hydraulique. A l'inverse les hauteurs de nappe simulées sont plus sensibles aux variations de la conductivité hydraulique. Le facteur d'hétérogénéité verticale ( $m$ ) n'est pas un paramètre très sensible du modèle (Zimmer et Lorre, 1986). Les valeurs des coefficients de forme de nappe ne sont pas très variables, en revanche les paramètres hydrodynamiques présentent une plus grande variabilité (voir Chapitre 3, § 3).

### ➤ *Modèle BYM*

Deux études de sensibilité ont été menées sur le modèle BYM (Brisson *et al*, 1992). La première a été menée sur les paramètres décrivant le sol dont leur valeur intègre les variabilités naturelles du sol (teneur en eau initiale, profondeur du sol, réserve utile ( $\Theta_{cc} - \Theta_{pf}$ )). La seconde concerne les paramètres qui peuvent être considérés comme constant dans le temps et l'espace à une échelle régionale. Nous présentons les résultats obtenus par Brisson *et al* (1992). Ces études ont été menées pour une culture de Soja.

L'analyse de sensibilité du modèle aux paramètres les plus variables repose ici sur le calcul du rapport entre rendement réel et potentiel. Elle nous conduit à la classification suivante dans l'ordre de sensibilité décroissant : 1) profondeur du sol, 2) teneur en eau initiale et 3) réserve utile.

Les résultats de l'analyse de sensibilité aux paramètres peu variables sont présentés dans le Tableau 1.5. Les paramètres sont classés selon leur influence sur les variations des facteurs de stress au déficit hydrique. Ces facteurs de stress sont directement reliés aux fonctions physiologiques.



Sol	Culture	Climat
1 - <u>Paramètres sensibles</u> (erreur de plus de 10% sur les variations des facteurs de stress pour les intervalles testés)		
	Coefficient culturale, $K_c$ Capacité maximale d'extraction de l'eau du sol, % maximal de RU	
2 - <u>Paramètres peu sensibles</u> (erreur comprise entre 5 et 10% sur les variations des facteurs de stress pour les intervalles testés)		
	Pente de la fonction $F(z)$ , $I_f$ Potentiel critique de fermeture stomatique, $\Psi_{cr}$	
3 - <u>Paramètres insensibles</u> (erreur comprise inférieure à 5 % sur les variations des facteurs de stress pour les intervalles testés)		
Profondeur de labour, $z_{lab}$	Profondeur d'enracinement maximale, $z_{max}$ Profondeur de semis Coefficient d'extinction, $\delta_{(es)}$	Paramètre climatique pour le calcul de l'évaporation, composante climatique paramètre $a$

Tableau 1.5 : Classification de la sensibilité des paramètres dans le modèle BYM (d'après Brisson et al, 1992)

Cette classification met en évidence le rôle des paramètres culturaux et plus particulièrement les paramètres permettant d'estimer les besoins en eau de la culture.

➤ *Modèle GOA*

Nous reprenons les conclusions de l'étude de la sensibilité des paramètres du modèle GOA réalisée par l'Héritier (1992). Parmi les paramètres étudiés, les plus sensibles sont : pour le rendement, l'indice de récolte (HI), pour l'accumulation de la biomasse, l'efficacité de conversion du rayonnement ( $\epsilon_{b_{max}}$ ) et pour l'expansion foliaire, la vitesse de mise en place du LAI au début de phase de croissance rapide ( $ULAI_{max}$ ).

• *Sensibilité du modèle à la variable de stress*

Par rapport aux modèles initiaux, la prise en compte de l'effet d'un excès d'eau sur la croissance de la culture de blé d'hiver, nous a conduit à estimer une nouvelle variable de stress, SEE(%) et à introduire trois nouvelles fonctions stress,  $F_1$  (SEE),  $F_2$  (SEE) et  $F_3$  (SEE) avec un total de 5 nouveaux paramètres. La variable de stress est une variable intermédiaire dont l'estimation repose sur la profondeur de la nappe, la profondeur et la densité racinaire. De sa bonne estimation dépendra en partie la qualité des simulations. Afin de définir avec quelle précision la variable de stress doit être estimée nous avons mené une étude de sensibilité en

introduisant une erreur systématique sur son estimation. Les erreurs sont introduites uniquement lorsque une contrainte est simulée. Nous ajoutons alors à la valeur de SEE(%) une erreur constante choisie dans l'intervalle [-10 ; 10]. L'influence sur les résultats du modèle est mesurée en calculant l'écart, exprimé en pourcentage, du rendement moyen à la parcelle par rapport à la simulation "normale" (pas d'erreur introduite "artificiellement"). Les conditions initiales des simulations ainsi que les simulations réalisées sont résumées dans le Tableau 1.6.

Variété	Densité de semis	Ecartement	Campagne
Soissons	230 (plantes m <sup>-2</sup> )	10 - 15 - 20 (m)	74-75, 80-81, 93-94
Erreur introduite (%)	[-10 ; -7 ; -5 ; -3 ; -2 ; -1 ; 0 ; 1 ; 2 ; 3 ; 5 ; 7 ; 10]		

Tableau 1.6 : Conditions des simulations réalisées pour l'étude de la sensibilité à la variable de stress

La sensibilité du rendement à la variable de stress varie selon les campagnes et les écartements de drains considérés (Figure 1.13). Pour une erreur de 10% sur la variable de stress les écarts de rendement observés varient de 1 à 10 Qtx ha<sup>-1</sup>.

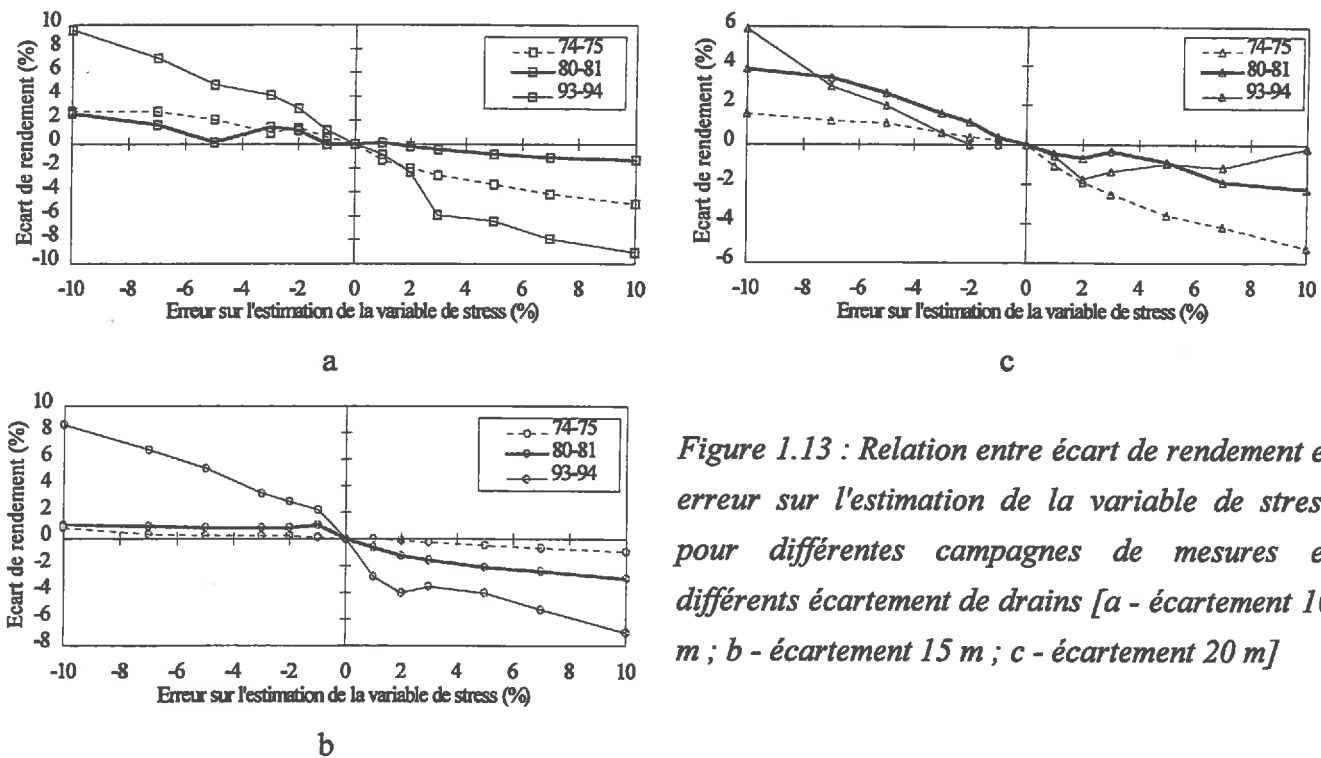


Figure 1.13 : Relation entre écart de rendement et erreur sur l'estimation de la variable de stress pour différentes campagnes de mesures et différents écartement de drains [a - écartement 10 m ; b - écartement 15 m ; c - écartement 20 m]

Pour cette étude, nous nous sommes placés dans le cas extrême où l'erreur sur la variable de stress est systématique. Dans la pratique le modèle sous-estime ou surestime la variable de stress de manière aléatoire. Ainsi les résultats obtenus sont à relativiser. Une étude de sensibilité plus

pertinente pourrait être menée en introduisant une erreur aléatoire. Toutefois ce résultat montre l'importance de cette variable sur les résultats du modèle BLEX.

### • Conclusion

L'intérêt d'une étude de sensibilité est, d'une part, de connaître avec quelle précision les paramètres du modèle doivent être mesurés expérimentalement et, d'autre part, de mettre en évidence les variables qui ont le plus de poids selon l'objectif d'application du modèle. Dans notre cas l'objectif est l'estimation du rendement à une échelle parcellaire. Ainsi au regard de cette étude il semble que nous devons accorder une importance particulière aux paramètres permettant d'estimer les besoins en eau de la plante ( $\Theta_{cc}$  ;  $\Theta_{pf}$  ;  $I_F$ ), aux paramètres entrant dans le calcul de l'accumulation de biomasse et du rendement ( $\varepsilon_{bmax}$ ,  $ULAI_{max}$  et HI) et aux paramètres entrant dans le calcul de la variable de stress (facteurs de forme de nappe (B et C) et paramètres hydrodynamiques, en particulier K(H)).

Si la précision de détermination des dates de mise en oeuvre du modèle de bilan hydrique couplé a un effet limité sur le modèle, en revanche la variable de stress à un poids important sur la qualité des sorties du modèle.

Les études de sensibilité présentées ont été menées sur les modèles pris indépendamment. Une des perspectives pour la suite de ce travail sera de mener une étude de sensibilité plus "ordonnée" sur le modèle pris dans son intégralité. Cette étude devra être étendue aux modifications que nous réalisons dans le modèle notamment sur le calcul de l'approfondissement racinaire. Il faudra alors hiérarchiser les paramètres selon leur poids dans le modèle et bien identifier les fonctions sur lesquelles interviennent ces paramètres (accumulation de biomasse, facteurs de stress à l'excès d'eau et au déficit hydrique et fonctions de stress). Nous devons également définir un critère permettant d'estimer la qualité des simulations ainsi que des seuils d'acceptabilité ou de tolérance sur les sorties du modèle. Nous devons enfin définir sur quelles sorties du modèle l'étude de sensibilité doit être réalisée (variations des facteurs de stress à l'excès d'eau ou au déficit hydrique, accumulation de biomasse, rendement).

## **2. APPLICATIONS ET INTERETS DU MODELE**

Le modèle BLEX présente la particularité de décrire la réponse de la plante à deux contraintes majeures pouvant intervenir au cours de son cycle de développement : excès d'eau et déficit hydrique. Cette particularité procure au modèle des perspectives d'application intéressantes. Dans le cadre de l'évaluation des potentialités agricoles à l'échelle d'une petite région ou à une échelle plus grande (parcellaire), il peut être un outil d'aide à la décision quant à l'orientation des pratiques culturales ou la mise en place d'ouvrages hydrauliques permettant de lever les contraintes hydriques. Il peut être utile aux études préalables au drainage ou à la mise en place d'un réseau d'irrigation. Les étapes à franchir pour parvenir à cette fin sont encore nombreuses notamment concernant la validation et l'étude de sensibilité des paramètres du modèle. Néanmoins nous avons mené deux études théoriques permettant d'entrevoir les possibilités offertes par ce modèle.

Nous avons analysé, à l'aide du modèle, l'effet de différents écartements de drains sur les chutes de rendement. Ensuite, avec pour objectif de se raccrocher à des approches de description de l'effet d'un excès d'eau sur la croissance de la plante déjà utilisées, nous avons appliqué le modèle à l'étude et à la détermination de facteurs de sensibilité de la plante selon son stade de développement.

### **2.1 Influence de l'écartement des drains sur le rendement**

A partir des données climatiques des campagnes 74-75, 75-76, 80-81, 82-83 et 93-94, nous avons analysé l'effet de l'écartement des drains sur le rendement moyen de la parcelle. Nous avons éliminé de cette étude la campagne 77-78 car les prédictions du modèle différaient trop par rapport aux observations notamment pour des écartement de drains supérieurs à 10 mètres.

Pour l'ensemble des campagnes la densité de semis est identique (230 plantes m<sup>-2</sup>). Nous avons estimé le rendement potentiel parcellaire ainsi que le rendement moyen parcellaire pour des écartements de drains variant de 5, 10, 15, 20 et 25 m. Pour une même campagne le rendement potentiel parcellaire est identique quel que soit l'écartement des drains (Tableau 2.1). Pour chaque simulation nous calculons le rapport entre le rendement moyen et le rendement potentiel parcellaire (Figure 2.1).

Densité semis (plantes m <sup>-2</sup> )	74-75	75-76	80-81	82-83	93-94
230	62.2	32.4	61.8	76.4	62.5

Tableau 2.1 : Rendement potentiel parcellaire en Qtx ha<sup>-1</sup>, site expérimental d'Arrou

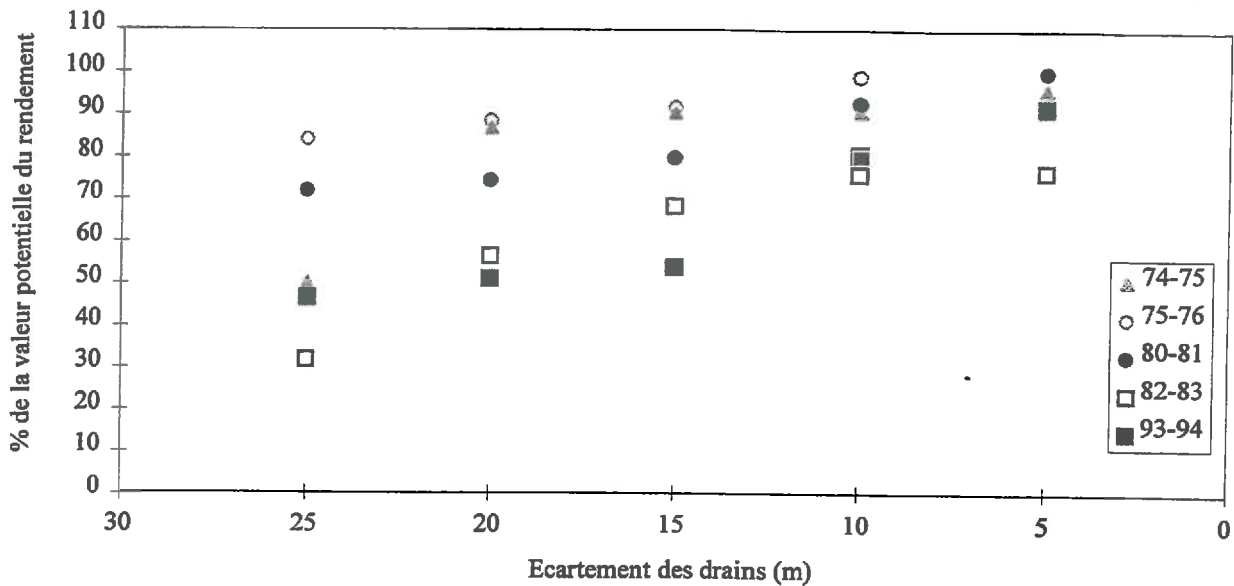


Figure 2.1 : Valeur relative du rendement pour différents écartements de drains et différentes campagnes climatiques

Nous observons une grande variabilité de l'effet de l'écartement des drains sur le rendement selon les années climatiques. Cette variabilité s'explique assez bien lorsque l'on considère le caractère contraignant en terme d'excès d'eau de chacune des campagnes. Ce dernier peut être estimé en considérant la durée de la saison de drainage intense et sa position dans le calendrier (voir annexe 4.1). Plus la durée de la SDI est grande, plus elle est tardive et plus les différences entre rendements moyens parcellaires sont grandes.

Pour la campagne 75-76, la SDI est de courte durée, le modèle prédit peu de différences sur les rendements selon les écartements de drains. En revanche pour la campagne 82-83 la SDI est longue (104 jours) et se poursuit tard dans le calendrier (mi-mai), le modèle prédit alors une réduction importante du rendement lorsque l'écartement des drains augmente.

Ainsi pour certaines campagnes le drainage avec un écartement de 10 mètres ne se justifiait pas, en revanche pour d'autres campagnes il a pu montrer son efficacité. Globalement plus l'écartement entre les drains augmente plus les chutes de rendement sont importantes (Figure 2.2).

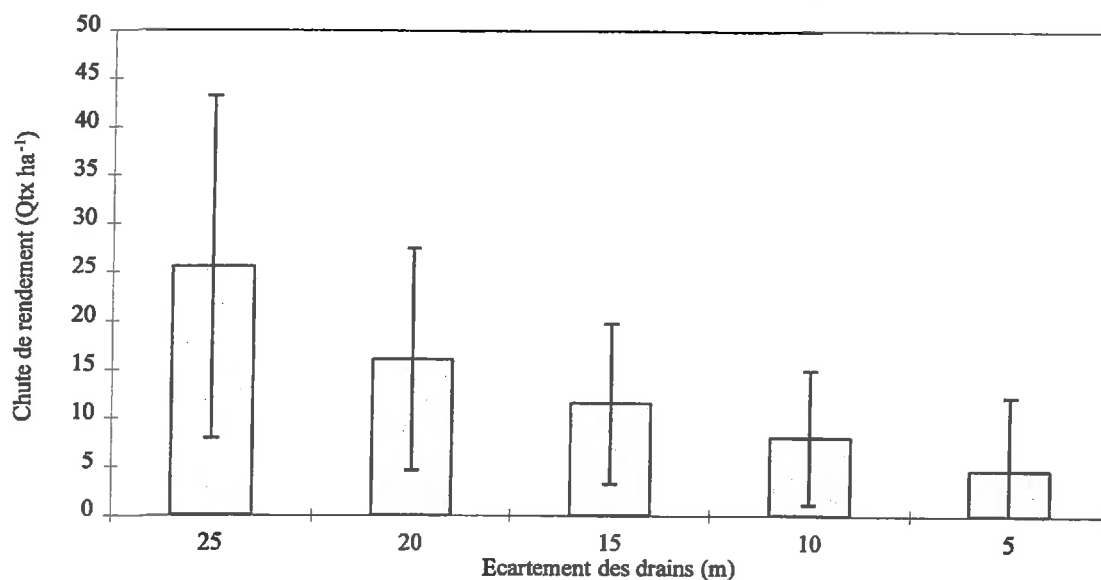


Figure 2.2 : Effet de l'écartement des drains sur les chutes de rendement par rapport à la situation potentielle de la parcelle

Les résultats présentés ci dessus montrent l'intérêt du modèle pour l'orientation des dispositions constructives relatives au drainage. En considérant le gain de rendement moyen possible sur plusieurs années, selon les options d'aménagement retenues, il reste alors à établir les scénarios économiques ou financiers pour chacune des options afin d'orienter les choix de l'aménageur.

## 2.2 Effet de hauteur de nappe constante sur le rendement

La plupart des auteurs mettent en relation les chutes de rendements dues à un excès d'eau avec la profondeur de nappe. Dans des conditions non contrôlées ces auteurs estiment une profondeur de nappe moyenne "hivernale" (Van Horn, 1958 ; Pons, 1988). Dans des conditions contrôlées, la contrainte est imposée à des périodes variables selon les stades de développement de la plante (Belford, 1981 ; Davies et Hillman, 1988 ; Evans et *al*, 1991). Afin d'analyser le comportement du modèle dans des conditions de régime permanent, à partir de l'année climatique 93-94, nous avons imposé des apports pluviométriques constants depuis le semis jusqu'à la fin de la saison de drainage. Il s'établit un régime permanent, la profondeur de nappe est alors constante sur toute la durée de la période. Nous mesurons l'impact des profondeurs de nappe correspondant à chacun des régimes permanents sur le rendement à l'inter-drain.

Dans le modèle BLEX, le régime permanent sur les termes du bilan hydrique s'établit instantanément (teneur en eau de la zone non saturée, débit au drain et profondeur de nappe). La stabilisation de SEE(%) est variable selon le régime permanent. Plus la nappe est haute plus le régime permanent est atteint rapidement sur la variable de stress (Figure 2.3).

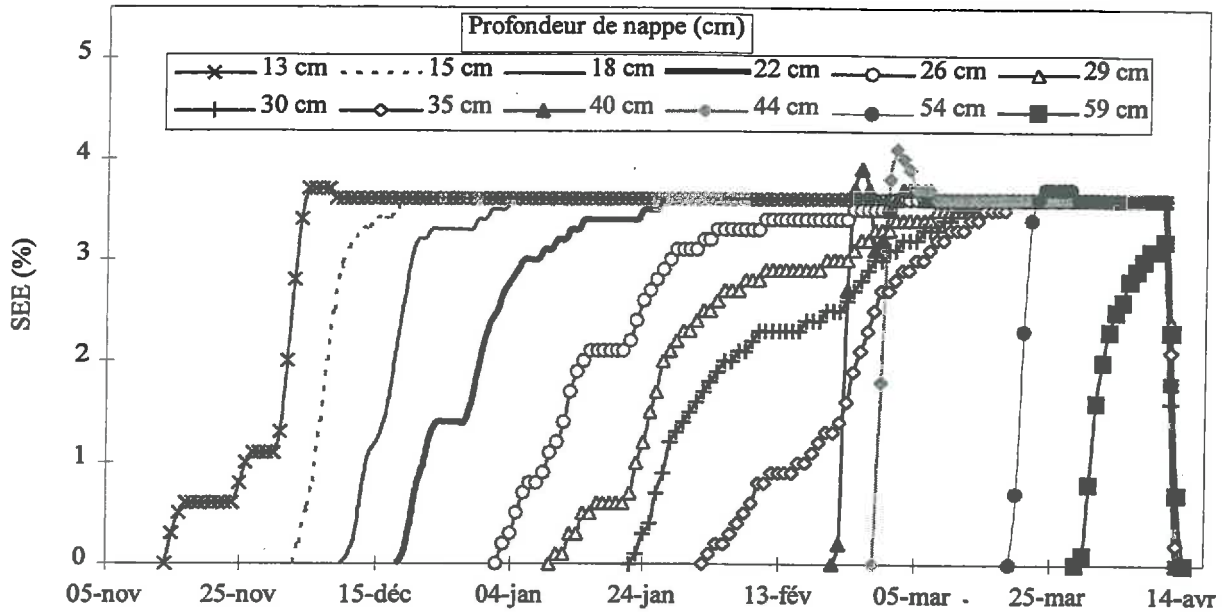


Figure 2.3 : Etablissement du régime permanent sur la variable de stress pour différentes profondeurs de nappe

Ce régime permanent s'établit pour une valeur de SEE(%) constante quelle que soit la profondeur de la nappe. Elle correspond à la valeur pour laquelle la croissance racinaire est nulle (soit en vertu de l'éq. 3.7 de la page 100 pour  $SEE(\%) = 3.642$ ). On peut en conclure que cette valeur, ou plutôt le paramétrage conduisant à cette valeur a un poids important sur l'estimation de la réponse de la plante à la variable de stress. Globalement, les résultats montrent que plus la nappe est proche de la surface du sol, plus les réductions de rendement sont importantes (Figure 2.4).

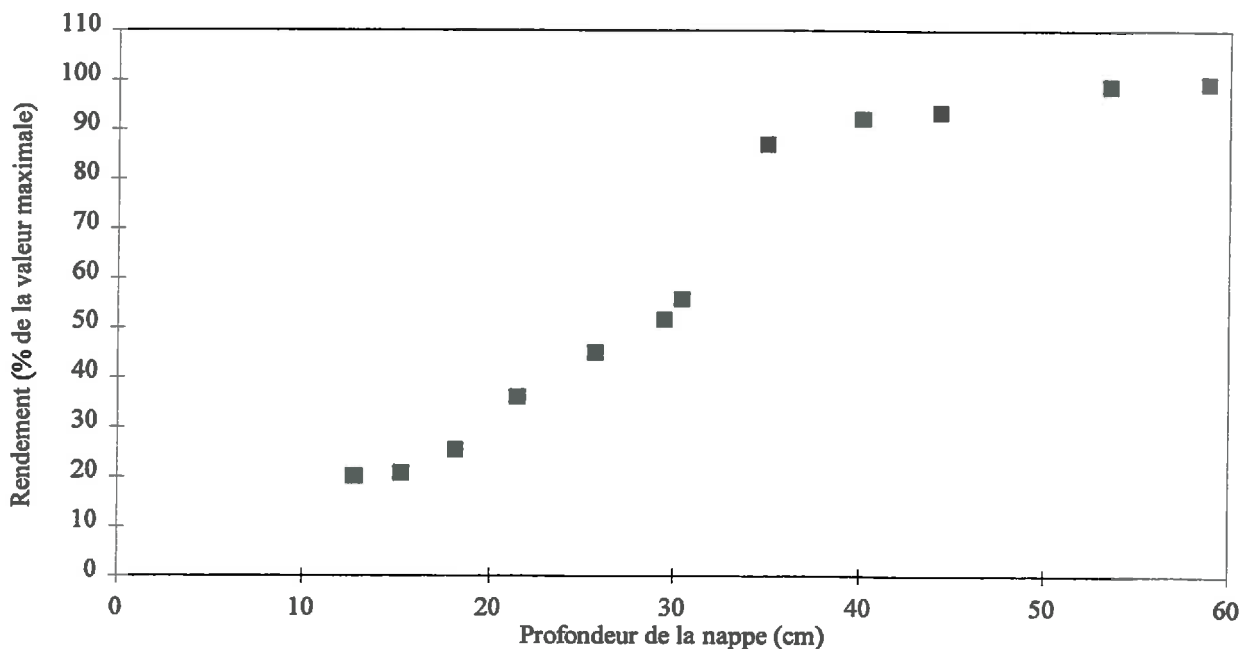


Figure 2.4 : Effet de la profondeur de la nappe sur le rendement à l'inter-drain

Les chutes de rendement les plus importantes sont estimées lorsque la nappe se rapproche de la base de la couche labourée. On rejoint ici un des critères à la base du dimensionnement d'un réseau de drainage permettant de calculer l'écartement entre les drains. Ce critère correspond à une limitation des temps de présence de la nappe dans la couche labourée. Ce résultat permet également de justifier une des hypothèses à la base de la prise en compte des effets de hauteurs de nappe variables sur le rendement des cultures. Cette intégration repose sur le concept de  $SEW_{30}$  introduit par Sieben (1964). La profondeur de 30 cm est supposée être la profondeur de nappe critique à partir de laquelle on mesure des chutes de rendement significatives. Cette valeur est utilisée pour des cultures de soja et de maïs (Kanvar et al, 1988 ; Evans et al, 1991 ; Ahmad et al, 1992). On retrouve une certaine cohérence entre la démarche de ces auteurs et les résultats obtenus avec notre modèle. En effet nos résultats montrent qu'il existe un effet seuil de la profondeur de la nappe sur le rendement (Figure 2.4). Ce seuil, pour les conditions d'application du modèle présentées, se situe entre 30 et 35 cm.

### 2.3 Sensibilité de la plante et période d'excès d'eau

Les auteurs précédemment cités ont défini des facteurs de sensibilité (Crop Susceptibility) à l'excès d'eau selon les stades de développement de la plante. Ces facteurs sont estimés pour un seuil critique de profondeur de nappe donnée en l'occurrence 30 cm. En imposant une profondeur de nappe constante égale à 30 cm sur une durée limitée dans le temps et à des périodes variables selon les stades de développement de la plante, le modèle BLEX peut être un outil permettant d'accéder à ces facteurs de sensibilité.

A partir des données climatiques de la campagne 93-94, nous avons imposé une profondeur de nappe constante de 30 cm pendant une durée de 1 mois à différentes périodes du cycle de la plante. La sensibilité de la plante est estimée en calculant pour chaque période de contrainte le rapport entre le rendement calculé à l'inter-drain et le rendement potentiel de la parcelle. Nous disposons ainsi mois par mois de la sensibilité de la plante selon les périodes d'occurrence de l'excès d'eau. Les résultats sont présentés sur la Figure 2.5.

Au cours de la période hivernale, les effets d'un excès d'eau sont moindres, la plante est alors en phase de croissance lente. C'est au cours de la phase de croissance rapide que les conséquences sont les plus importantes. Une nappe maintenue à une profondeur de 30 cm pendant un mois au cours de cette phase peut conduire à une réduction du rendement de 20 à 80%. Nous rejoignons



les résultats présentés par de nombreux auteurs (voir chapitre II) montrant que la plante est d'autant plus sensible à un excès d'eau qu'elle est en phase de croissance rapide (montaison). Le modèle reste cohérent avec ces résultats.

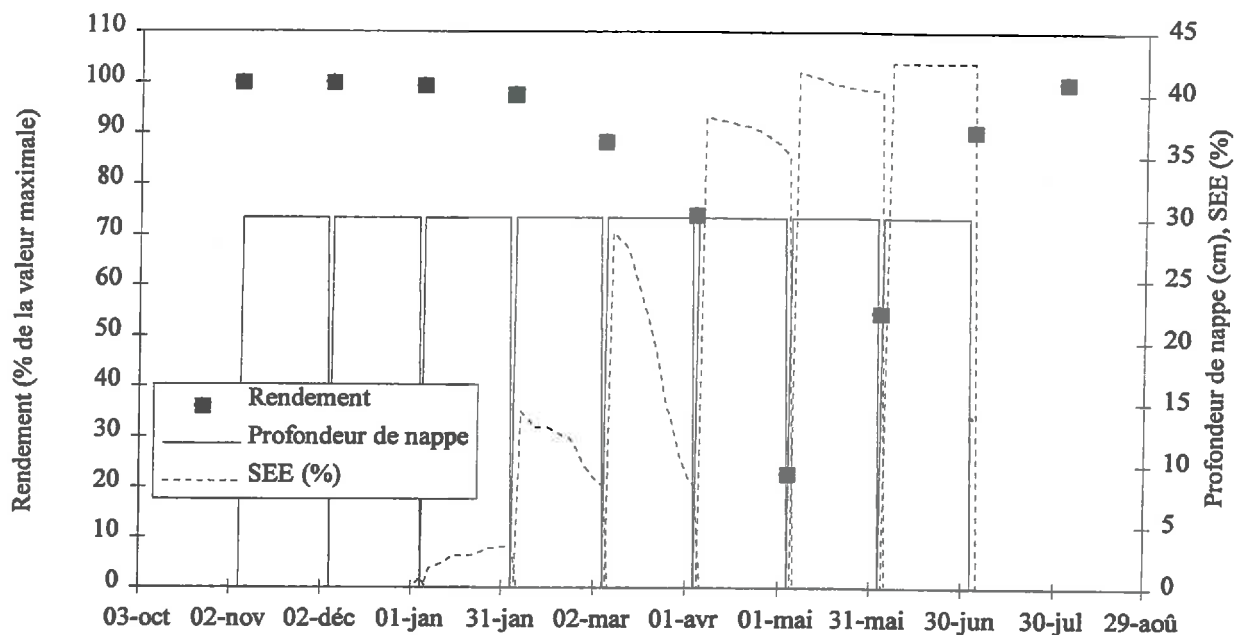


Figure 2.5 : Effet d'une profondeur de nappe constante sur le rendement d'une culture de blé d'hiver pour différentes périodes du cycle de développement

Nous avons croisé ces résultats avec les repères du cycle de développement de la plante afin de référencer les facteurs de sensibilité aux stades de développement (Tableau 2.2).

Stades de développement	Facteur de sensibilité (intervalle)
Levée	0.0
1 feuille	0.0
3 feuille	0.0
Plein tallage	[ 0.11 - 0.02 ]
Epi 1 cm	[ 0.26 - 0.11 ]
LAI <sub>max</sub>	[ 0.77 - 0.45 ]
Floraison	[ 0.45 - 0.10 ]
Maturité	[ 0.10 - 0.00 ]
Récolte	0.0

Tableau 2.2 : Stade de développement et facteurs de sensibilité à l'excès d'eau pour une culture de blé d'hiver, résultats du modèle BLE2, site expérimental d'Arrou, campagne 93-94

Dans la littérature nous n'avons pas trouvé les valeurs des facteurs de sensibilité pour une culture de blé. Elles ont été établies uniquement pour des cultures de maïs et de soja (Evans et al, 1991).

## CONCLUSION

La validation du modèle BLEX, en raison des difficultés liées à sa mise en oeuvre, reste sommaire. Néanmoins sur le cas du site expérimental d'Arrou, le modèle permet de simuler correctement le rendement potentiel de la parcelle. L'application du modèle à l'estimation du rendement pour différents écartements de drains permet de restituer avec une précision limitée les chutes de rendement entre le drain et l'inter-drain (des différences pouvant aller jusqu'à 16 Qtx ha<sup>-1</sup> entre observations et prédictions sont observées). Globalement, il apparaît que le modèle surestime les effets d'un excès d'eau sur la croissance de la plante.

Dans le cadre d'une validation à plus grande échelle où seul le rendement moyen parcellaire est mesuré, le modèle permet d'estimer avec une bonne précision ce rendement en estimant une contrainte moyenne parcellaire. Cette validation nécessitera l'acquisition de paramètres dont les plus importants sont :

- pour les transferts d'eau : les coefficients de forme de la nappe, la conductivité hydraulique à saturation et les humidités volumiques caractéristiques ;
- pour l'absorption d'eau : la profondeur limite d'enracinement et la pente de la fonction d'extraction racinaire ;
- pour la croissance de la plante : la vitesse de mise en place du LAI au démarrage de la phase de croissance rapide, l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse et l'indice de récolte.

L'étude de sensibilité du modèle à la variable de stress montre qu'une bonne prédiction de cette dernière est primordiale sur la qualité des sorties du modèle. Les sorties du modèle ne sont pas très sensibles aux paramètres permettant de prédire les dates de fonctionnement du réseau de drainage. Une estimation de ces paramètres avec une précision d'une à deux semaines paraît suffisante. Dans l'état actuel, l'étude de sensibilité est incomplète et devra être menée sur le modèle pris dans son intégralité.

Les études particulières menées à partir de BLEX ont permis de démontrer son utilité tant pour évaluer l'opportunité du drainage et raisonner de manière plus fine l'écartement des drains. L'application du modèle à l'étude de la sensibilité de la plante a permis de montrer sa cohérence lors de confrontations avec d'autres démarches de prise en compte de l'effet d'un excès d'eau. Il a permis de justifier le choix d'une profondeur de nappe critique dans ces démarches et de déterminer des facteurs de sensibilité de la plante à l'excès d'eau.

## CONCLUSION GENERALE

## *Conclusion générale*

L'étude de l'effet d'un excès d'eau sur la croissance et le développement d'une culture de blé d'hiver a fait l'objet de nombreuses recherches. Bien que riches d'enseignements, les résultats obtenus sont encore très fragmentaires. Il s'avère alors difficile de construire des outils analytiques permettant d'appréhender la réponse de la plante en terme de croissance et de développement à un excès d'eau tels qu'ils existent en sol sain. L'objectif fixé dans le cadre de cette étude a été de construire des fonctions permettant de simuler la réponse de la plante à un excès d'eau en vue de leur intégration dans un modèle de croissance et développement de culture. Cet objectif nous a conduit à faire des choix notamment en modélisation et nous a amené à nous interroger sur :

*1 - Qu'est ce qu'un excès d'eau pour la plante et comment le quantifier ?*

*2 - Comment mesurer la réponse de la plante et comment la décrire ?*

Afin de répondre à ces interrogations nous avons mis en place des expérimentations spécifiques en conditions contrôlées et en plein champ. Les principaux résultats obtenus sont commentés ci-dessous.

Dans le cas d'une contrainte imposée en régime permanent, les mesures réalisées sur la pression en eau du sol, la profondeur de la nappe et la concentration en oxygène de la solution du sol ont permis de mettre en évidence la présence d'un état contraignant pour la croissance racinaire lorsque le sol était saturé. Nous avons retenu la proportion de racines "ennoyées" comme indicateur de l'intensité de la contrainte. Cette proportion sert de base au calcul de la variable de stress. Dans des conditions de plein champ, contrainte en régime transitoire, l'étude de la réponse de la plante à des stress transitoires nous a conduit à intégrer la variable de stress sur une durée de 2 jours.

A partir des résultats expérimentaux obtenus en conditions contrôlées, nous avons construit et paramétré des fonctions de stress décrivant la réponse de la plante à un excès d'eau. Ces fonctions décrivent la croissance racinaire en profondeur et en densité, l'expansion foliaire et le niveau maximal d'activité photosynthétique. L'application de ces fonctions stress aux résultats expérimentaux obtenus dans des conditions de plein champ nous a amenés à un nouveau paramétrage obtenu par optimisation. Nous avons introduit ces fonctions dans un modèle de croissance et développement de la plante.

Le modèle de croissance et de développement de la plante est le résultat du couplage de modèles existants :

**Modèle de bilan hydrique**

BYM établit le bilan hydrique dans les couches de sol non saturées ; il est adapté aux modèles de croissance de culture.

SIDRA gère les transferts d'eau en conditions saturées ; il est adapté à la simulation des transferts d'eau sur parcelle drainée.

Ces deux modèles sont véritablement couplés au cours de la saison de drainage définie comme la période de fonctionnement du drainage. Le couplage et le découplage sont établis par l'intermédiaire de paramètres permettant de prédire le démarrage et la fin de cette période.

**Modèle de croissance de la culture**

GOA décrit la croissance et le développement de la plante ; il est adapté à l'évaluation des potentialités agricoles à une échelle régionale. Initialement au pas de temps décadaire, nous l'avons adapté à un pas de temps journalier.

Le modèle de bilan hydrique permet d'estimer les facteurs de stress au déficit hydrique et à l'excès d'eau. Les fonctions stress établissent le couplage entre le modèle de bilan hydrique et le modèle de culture. Seules les contraintes dues à un déficit hydrique étaient initialement prises en compte. L'introduction de l'effet d'un excès d'eau a nécessité une adaptation des fonctions stress obtenues expérimentalement au fonctionnement du modèle. Trois fonctions stress ont été intégrées dans le modèle. Elles permettent de décrire :

***1 - l'effet d'un excès d'eau sur la croissance racinaire :***

$$F_1 (SEE) = \alpha e^{-\beta SEE(\%)} + C \quad (\text{rappel de l'éq. 3.7, page 100})$$

***2 - l'effet d'un excès d'eau sur l'expansion foliaire :***

$$F_2 (SEE) = e^{-c SEE(\%)} \quad (\text{rappel de l'éq. 4.10, page 116})$$

***3 - l'effet d'un excès d'eau sur l'accumulation de biomasse aérienne :***

$$F_3 (SEE) = \left[ 1 - \frac{1}{1 + e^{\eta (X_1 - SEE(\%))}} \right] \quad (\text{rappel de l'éq. 2.21, page 153})$$

Le modèle ainsi obtenu a été baptisé **BLEX**. Il permet d'estimer un grand nombre de variables décrivant l'état du système dont la teneur en eau sur la zone non saturée, la profondeur de nappe, le débit à la sortie du réseau de drainage, la profondeur racinaire, l'absorption d'eau par la plante,

## Conclusion générale

la surface foliaire et l'accumulation de biomasse aérienne. Il permet *in fine* de calculer le rendement ponctuel au niveau du drain (*potentiel parcellaire*), de l'inter-drain, à une abscisse quelconque du drain et le *rendement moyen parcellaire*.

Le travail réalisé peut être résumé comme décrit sur la Figure 1.1.

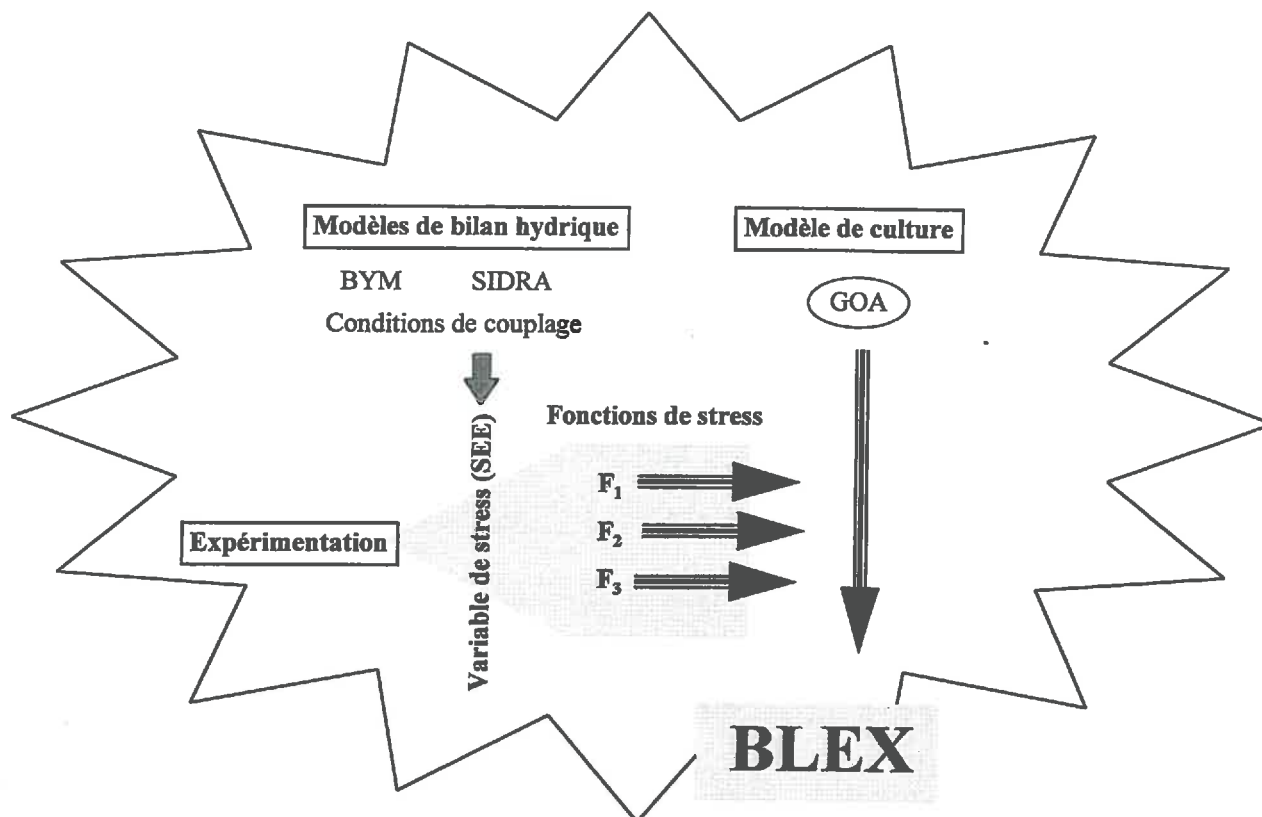


Figure 1.1 : Schématisation des points clés du travail de thèse

La vérification du modèle BLEX montre que celui-ci décrit correctement la croissance de la plante en situation potentielle (sans excès d'eau). Le modèle estime avec une bonne précision les périodes d'occurrence ainsi que les valeurs de la variable de stress. Il décrit fidèlement la réduction de croissance de la plante en conditions d'excès d'eau et permet de restituer l'effet global d'un excès d'eau sur le rendement.

La validation du modèle bien que sommaire a permis de mettre en évidence la robustesse du modèle. Néanmoins, même si nous pouvons envisager une telle conceptualisation pour décrire la réponse de la plante à un excès d'eau, il apparaît d'ores et déjà nécessaire de conduire une validation de plus grande envergure (validation multi-locale). Cette validation devra notamment porter sur l'enracinement qui est finalement la variable clé pour le calcul des facteurs de stress à l'excès d'eau et au déficit hydrique. La conceptualisation retenue pour estimer l'enracinement est particulièrement bien adaptée aux sols argilo-limoneux, une validation s'impose pour des

conditions pédologiques variées. Une étude plus fine du fonctionnement du modèle doit être réalisée notamment sur les conséquences en fin de cycle d'un excès d'eau hivernal. En effet la réduction de l'enracinement due à un excès d'eau peut être un facteur aggravant de l'effet de période de déficit hydrique intervenant en fin de cycle. Cette étude peut intéresser des régions où les conditions pédologiques ne permettent pas un bon enracinement (sol caillouteux) et pour lesquelles le déficit hydrique comme l'excès d'eau peut constituer un facteur limitant de la production. L'analyse de sensibilité des résultats du modèle aux paramètres et la validation du modèle BLEX sont des priorités à donner dans la suite de ce travail.

### **Intérêt et limites du travail**

#### **➤ Intérêt**

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence que la profondeur de nappe était une variable nécessaire mais pas suffisante pour quantifier la contrainte imposée à la plante. Par ailleurs, le modèle BLEX a permis de montrer que, sur un système drainant, il n'existait pas de relation linéaire entre la réponse de la plante à un excès d'eau et la profondeur de la nappe. Ce résultat doit nous conduire à porter un regard critique sur les relations construites entre la profondeur de nappe et le rendement. Ces relations ont un sens limité même si parfois elles se justifient pour des contextes pédologiques et climatiques donnés. Dans la majorité des cas, en raison de l'hétérogénéité des résultats, les auteurs définissent des courbes enveloppes. Cette démarche tend d'ailleurs à montrer que la profondeur de nappe n'a pas un caractère explicatif absolu.

Le modèle BLEX repose sur des bases plutôt physiques tant pour la modélisation des transferts que pour la croissance et le développement de la plante. Cette approche modélisatrice s'avère utile lorsqu'on cherche à expliquer un phénomène, valider un mécanisme observé ou une hypothèse et valider d'autres approches plus simples. C'est le cas par exemple pour la détermination des facteurs de sensibilité de la plante à l'excès d'eau ou encore pour la recherche d'un seuil de profondeur de nappe critique afin d'estimer la contrainte pour des approches simplifiées.

#### **➤ Limites**

En raison du grand nombre de paramètres, l'application du modèle est difficile à mettre en oeuvre. Ceci est d'autant plus vrai qu'à l'échelle d'un périmètre expérimental le modèle a permis de montrer que la variabilité des conditions pédologiques entre parcelles est un facteur important.

### *Conclusion générale*

Nous avons occulté de notre étude les effets variétaux qui pourraient s'avérer être importants. Enfin la vérification du modèle a permis de mettre en évidence que la contrainte n'était pas correctement estimée par la variable de stress au démarrage de la saison de drainage. Ceci montre que le mode de calcul de la contrainte est inadapté dans ce cas. Le suivi de l'état de saturation de la couche labourée au cours de cette période pourrait être une piste de travail à explorer.

Le bilan présenté ci-dessus montre que notre travail a permis d'apporter des éléments nouveaux pour la compréhension de la réponse de la plante à un excès d'eau. En raison d'une démarche qui peut sembler parfois opportuniste, il reste beaucoup d'interrogations et de zones d'ombre sur la validité de l'approche expérimentale et sur l'approche modélisatrice des mécanismes proposée. Ces interrogations font du modèle BLEX un outil perfectible dont l'évolution vers un outil opérationnel nécessite de franchir encore de nombreuses étapes qui peuvent se résumer à la confirmation et la validation.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## INTRODUCTION & CHAPITRE I

- Ahmad N., Kanwar R.S., Kaspar T.C. et Bailey T.B., 1992. Effect of soil surface submergence and a water table on vegetative growth and nutrient uptake of corn. *Transactions of the ASAE*, **35**, 1173-1177.
- Anaya M.G. et Stolzy L.H., 1972. Wheat response to different soil water-aeration conditions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **36**, 485-489.
- Baumont M., 1967. Le blé. *Que sais-je*, **103**, 128pp.
- Belford R.K., 1981. Response of winter wheat to prolonged waterlogging under outdoor conditions. *Journal of Agricultural Science*, **97**, 557-568.
- Böhm W., 1979. Methods for studying root systems. *Ecological Studies*, **33**, Springer Verlag, Berlin, New-York, 188pp.
- Bousqué I., 1992. Etude de la respiration racinaire, conséquences de l'asphyxie racinaire sur la culture de blé. Thèse Institut National Polytechnique de Toulouse, 139p.
- Brisson N., 1989. Modèle de simulation de culture de soja et de son fonctionnement hydrique. Estimation agrométéorologique des potentialités de production. Elaboration d'un bilan hydrique pour les modèles de simulations de cultures. Thèse Institut National Agronomique Paris-Grignon, 52-69.
- Brisson N. et Delécolle R., 1991. Développement et modèles de simulation de culture. *Agronomie*, **12**, 253-263.
- Brisson N., et Perrier A., 1991. A semi-empirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. *Water Resources Research*, **27**, 719-727.
- Brisson N., Seguin B. et Bertuzzi P., 1992. Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology*, **59**, 267-287.
- Brisson N., Gate P., Ripoche D. et Clastre P., 1995. Le module GOA blé, description et application à l'estimation des potentialités agroclimatiques dans la Communauté Européenne. *Rapport DPE*, 14pp.
- Brisson N., Ozier-Lafontaine H., Améglio T., 1996. Les potentialités agricoles. Commission agrométéorologique de l'INRA - Le Croisic.
- Cannell R.Q., Belford R.K., Gales K., Denis C.W. et Prew R.D., 1980. Effects of waterlogging at different stages of development on the growth and yield of winter wheat. *J. Sci. Food Agric.*, **31**, 117-132.
- Cannell R.Q., 1984. Effects of waterlogging and drought on winter wheat and winter barley grown on clay and sandy loam soil. 1. Crop growth and yield. *Plant and soil*, **80**, 53-66.
- Cannell et al., 1985. Effects of waterlogging on soil aeration and on root and shoot growth and yield of winter oats (*Avena sativa* L.). *Plant and Soil*, **85**, 361-373.
- Carrier M., 1972. *Hydraulique générale et appliquée*. Ed. Eyrolles, 7-20.
- Cavazza L. et Rossi Pisa P., 1988. Effect of water-table depth on crop yield. *Agricultural Water Management*, **14**, 29-34.
- Collas P. et Tiercelin J.R., 1988. Quantification des effets de l'excès d'eau en termes de jours disponibles. *Perspectives Agricoles*, 126.
- Davies M.S. et Hillman G.C., 1988. Effects of soil flooding on growth and grain yield of a population of tetraploid species wheat. *Annals of Botany Company*, **62**, 597-604.

## *Références bibliographiques*

- Denmead O.T., 1970. Relative significance of soil flooding on growth and grain yield evapotranspiration. Plant response to climatic factors. Proc. Uppsala Symp., Ecology and conservation, 5, 505-511.
- Evans R.O., Skaggs R.W et Sneed R.E., 1991. Stress day index models to predict corn and soybean relative yield under high water-table conditions. Amer. Soc. of Agric. Eng., 34, 1997-2005.
- Favrot J.C., 1988. Critère de caractérisation des excès d'eau par le pédologue. Perspectives agricoles, 126, 17-21.
- Flühler H., Stolzy L.H. et Ardakani M.S., 1976. A statistical approach to define soil aeration in respect to denitrification. Soil Sci., 122, 115-123.
- Gillham R.W., 1984. The capillary fringe and its effect on water-table response. Journal of Hydrology, 67, 307-324.
- Guyon G., 1983. Le périmètre expérimental de drainage d'Arrou. Aspects hydrauliques. Etudes du Cemagref, 5, 45pp.
- Guyon G., Lesaffre B., Bouye J.M., Dumitriu A. et Mamecier A., 1984. Courbes de tarissement du drainage en sols limoneux lessivés hydromorphes battants peu perméables soumis à un travail du sol profond. 12<sup>ième</sup> congrès de la Commission Internationale des Irrigations et du Drainage, 181-199.
- Hallaire M., 1964. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. L'eau et la production végétale, INRA, 27-62.
- Hamblin A., Tennant D. et Perry M.W., 1990. The cost of stress : dry matter partitioning changes with seasonal supply of water and nitrogen to dryland wheat. Plant and Soil, 122, 47-58.
- Hervé J.J., 1988. Conduites des céréales en conditions d'excès d'eau : critères de caractérisation des excès d'eau. Perspectives Agricoles, 126, 15-16.
- James E. et Box JR., 1991. The effects of waterlogging on rooting of soft red winter wheat. Plants roots and their environment, proceedings of an ISRR-symposium, Elsevier Science publishers, 418-430.
- Jannot P., 1988. Conduites des céréales en conditions d'excès d'eau : les enjeux économiques. Perspectives Agricoles, 126, 12-14.
- Kanvar R.S., Baker J.L. et Mukhtar S., 1988. Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. Amer. Soc. of Agric. Eng., 31, 1, 133-141.
- Lesaffre B., 1988. Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : modélisation hydraulique saturée du fonctionnement du drainage souterrain. Thèse Paris VI, 141-252.
- Lesaffre B. et Zimmer D., 1991. Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage en sols à excès d'eau temporaire. Informations techniques du Cemagref, 82, 1-8.
- L'héritier H., 1992. Validation d'un modèle simple d'estimation des potentialités de production de maïs : GOA. Mémoire de DEA, Université d'Orsay (Paris XI), INA PG.
- Maertens C., 1988. Intérêt de l'endoscopie pour l'étude de l'influence de l'enracinement d'un couvert végétal sur l'utilisation de l'eau du sol. Etudes sur les transferts d'eau dans le système Sol-Plante-Atmosphère. Edt Calvet, 214-224.
- Massé J. et Capy Y., 1988. Diagnostic des effets des excès d'eau, hiérarchisation à l'échelle de la région. Perspectives Agricoles, 126, 37-47.
- Massé J., Colenne C., Tardieu F. et Crosson P., 1988. Système racinaire du blé et état structural du sol. Perspectives Agricoles, 128, 31-37.
- M'Barek Ben Naceur M., 1987. Effet de l'excès d'eau sur la culture d'orge et de fétuque. Annales de l'INRA de Tunisie, 5, 8, 24p.

## Références bibliographiques

- Meynard J.M., Boiffin J., Caneill J. et Sébillotte M., 1981. Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse. II - Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie*, **1**, 795-806.
- Meynard J.M., 1985. Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon.
- Meynard J.M. et Aubry C., 1988. Itinéraire technique du blé en conditions d'excès d'eau. *Perspectives agricoles*, **126**, 80-89.
- Meyer W.S et Barrs H.D., 1988. Response of wheat to single, short-term waterlogging during and after stem elongation. *Australian Journal Agricultural Research*, **39**, 11-20.
- Penel M., 1988. Conduites des céréales en conditions d'excès d'eau : l'hydraulicien et l'excès d'eau. *Perspectives Agricoles*, **126**, 22-30.
- Penning de Vries F.W.T., Jansen D.M., Ten Berge H.F.M. et Bakema A., 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Pudoc Wageningen, 1-115.
- Papy F., 1988. Problèmes de praticabilité dus à l'excès d'eau : conséquences sur la conduite des cultures de blé et de maïs. *Perspectives Agricoles*, **126**, 48-54.
- Patwardhan J.M., Nierber J.L. et Moore I.D., 1988. Oxygen, carbon dioxide and water transfer in soils : mechanisms and crop response. *Transactions of the ASAE*, **31**, 1383-1395.
- Pereira L.S., Van den Broek B.J., Kabat P. et Allen R.G., 1995. Crop water simulation models in practice. 2<sup>nd</sup> workshop on crop water models ICID, 338pp.
- Pons Y., 1988. Incidence de l'abaissement du niveau d'eau hivernal sur le rendement du blé d'hiver dans les marais de l'ouest. Conditions et effets des excès d'eau en agriculture. Séminaire, commission d'agrométéorologie, 405-414.
- Rebière B., 1992. Modélisation de la croissance du blé d'hiver en conditions d'excès d'eau, couplage de modèles de gestion de nappe et de bilan hydrique. Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur de Strasbourg, ENGEES, ENSAIS, 47pp.
- Ritchie J.T., 1972. Model for predicting evaporation from row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.*, **8**, 1204-1413.
- Ritchie J.T., 1981. Soil water availability. *Plant and Soil*, **58**, 327-328.
- Robert Q. et al, 1980. A lysimeter system to study the effect of transient waterlogging on crop growth and yield. *J. Sci. Food. Agric.*, **31**, 105-116.
- Saglio P., 1985. L'excès d'eau et l'alimentation en oxygène des systèmes racinaires. "Conditions et effets des excès d'eau d'eau en agriculture". INRA, commission d'agrométéorologie, 123-130.
- Sappe G. et al, 1992. Les mesures d'échanges gazeux. Compte rendu de l'expérimentation blé 1992. Note interne, Station Bioclimatologie, INRA Avignon, 31-34.
- Sojka R.E et Stolzy L.E., 1980. Soil-oxygen effects on stomatal response. *Soil Sc.*, **130**, 350-358.
- Tardieu F., 1983. Alimentation hydrique et minérale des plantes. *Cultivar*, **162**, 28-29.
- Tardieu F., 1988. Comment juger l'efficacité du système racinaire comme capteur d'eau. *Perspectives Agricoles*, **128**, 21-25.
- Thomson C.J., Atwell B.J. et Greenway H., 1989. Response of wheat seedlings to low O<sub>2</sub> concentrations in nutrient solution. I.- Growth, O<sub>2</sub> uptake and synthesis of fermentive end-products by root segments. *Journal of Experimental Botany*, **40**, 218, 985-991.

## *Références bibliographiques*

- Trought M.C.T. et Drew M.C., 1982. Effect of waterlogging on young wheats plants and on soils solutes at different soil temperatures. *Plant and soil*, **69**, 311-326.
- Van Keulen H. et Seligman N. G., 1987. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. *Simulation Monographs*, PUDOC, Wageningen. 310p.
- Van Noordwijk M. et Floris J., 1979. Loss of dry weight during washing and storage of roots samples. *Plant and soil* **53**, 239-243.
- Varlet-Grancher C. et Bonhomme R., 1982. Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Oecologia Plantarum*, **3**, 3-26.
- Varlet-Grancher C., Gosse G., Chartier M., Sinoquet H., Bonhomme R. et Allirand J.M., 1989. Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 419-439.
- Weir A.H., Bragg P.L., Porter J.R., et Rayner J.H., 1984. A winter wheat simulation model without water nor nutrient limitations. *J. Agric. Sci. Camb*, **102**, 371-382.
- Williamson R.E. et Kriz G.J., 1970. Response of agricultural crops to flooding, depth of water table and soil gaseous composition. *Transactions of the ASAE*, 216-220.
- Zimmer D., 1988. Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés : fonctionnement hydrologique et bilans hydriques des parcelles du champ d'Arrou. Thèse Paris VI, 157-196.
- Zimmer D. et Lorre E., 1993. Parameter sentivity and field evaluation of SIDRA model. Workshop on subsurface drainage simulations models, 15th congress on irrigation and drainage, 25-40.

## CHAPITRE II

- Alliot B., 1979. Résultats de l'enquête drainage. *Chambre d'Agriculture de l'Eure et Loir*, 12p.
- Amthor J.S., 1994. Scaling CO<sub>2</sub> photosynthesis relationships from the leaf canopy. *Photosynthesis Research*, **39**, 321-350.
- Baldy Ch., 1973. Progrés récents concernant l'étude du système racinaire du blé (*Triticum sp.*). *Ann. Agro.*, **24**, 241-276.
- Baret F., 1986. Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. Thèse de l'Université de Paris Sud, Orsay, 183pp.
- Baret F., Olioso A. et Luciani J.L., 1992. Root biomass as a function of growth degree days in weath. *Plant and soil*, **140**, 137-144.
- Barraclough P.B., Weir A.H. et Kuhlmann H., 1991. Factors affecting the growth and distribution of winter wheat roots under UK conditions. *Plants roots and their environment, proceedings of an ISRR-symposium*, Elsevier Science publishers, 410-417.
- Belford R.K., 1981. Response of winter wheat to prolonged waterlogging under outdoor conditions. *J. Agri. Sci. Camb.*, **97**, 557-568.
- Biscoe P.V., Scott R.K. et Monteith J.L., 1975. Barley and its environment. III. Carbon budget of the stand. *J. Appl. Ecol.*, **12**, 269-293.
- Biscoe P.V. et Gallagher J.N., 1977. Weather, dry matter production and yield. *Environmental effects on crop physiology*, New Academic Press, 75-100.
- Bousqué I., 1992. Etude de la respiration racinaire, conséquences de l'asphyxie racinaire sur la culture de blé. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 139p.

## Références bibliographiques

- Brisson N., Seguin B. et Bertuzzi P., 1992. Agrometeorology soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology*, **59**, 267-287.
- Brown K.W., 1969. A model of the photosynthesizing leaf. *Physiol. Plant.*, **22**, 620-637.
- Cannell R.Q. et Belford R.K., 1977. Effect of prolonged waterlogging under outdoor conditions on the growth of winter wheat. *Letcombe Laboratory Annual Report* 59-61.
- Cannell R.Q., Belford R.K., Gales K., Denis C.W. et Prew R.D., 1980. Effects of waterlogging at different stages of development on the growth and yield of winter wheat. *J. Sci. Food Agric.*, **31**, 117-132.
- Cannell R.Q. et Belford R.K., 1982. Crop growth after transient waterlogging. *Advances in drainage*. 163-170.
- Cannell R.Q., 1984. Effects of waterlogging and drought on winter wheat and winter barley grown on clay and sandy loam soil. 1. Crop growth and yield *Plant and soil*, **80**, 53-66.
- Cannell et al., 1985. Effects of waterlogging on soil aeration and on root and shoot growth and yield of winter oats (*Avena sativa* L.). *Plant and Soil*, **85**, 361-373.
- Callot G., Chamayou H., Maertens C. et Salsac L., 1982. Les interactions sol-racines ; incidence sur la nutrition minérale. INRA Edition, pp 325.
- Carter C.E. et Camp. C.R., 1994. Drain spacing effects on water table control and cane sugar yields. *Am. Soc. of Agri. Eng.*, **37**, 1509-1513.
- Cavazza L. et Rossi Pisa P., 1988. Effect of water table depth on crop yield. *Agricultural Water Management*, **14**, 29-34.
- Charles-Edwards D.A., Doley D. et Rimmington G.M., 1986. Modelling plant growth and development. Academic Press, 235pp.
- Colenne C., Massé J. et Crosson P., 1988. Rythme d'apparition des racines primaires du blé. *Perspectives Agricoles*, **128**, 16-20.
- Davies M.S. et Hillman G.C., 1988. Effects of soil flooding on growth and grain yield of populations of tetraploid and hexaploid species of wheat. *Annales of Botany*, **62**, 597-604.
- Drew M.C., 1992. Soil aeration and plant root metabolism. *Soil Science*, **154**, 4, 259-268.
- Duru M., Bousqué I., Justes E. et Langlet A., 1991. Effet d'une asphyxie temporaire sur la croissance de quelques graminées fourragères cultivées selon différents niveaux de nutrition minérale. *C.R. Acad. Agri. Fr.*, **77**, 37-45.
- Duthion C., 1976. Variations des teneurs en acides organiques des racines de plantes soumises à un excès d'eau. *Ann. Agro.*, **27**, 207-220.
- Duthion C. et Mingeau M., 1976. Les réactions des plantes aux excès d'eau et leurs conséquences. *Ann. Agro.*, **27**, 221-246.
- Evans N.T.S. et Erbert M., 1960. Radioactive oxygen in the study of gas transport down the root of *Vicia faba*. *J. Exp. Bot.*, **2**, 246pp.
- Evans R.O., Skaggs R.W. et Sneed R.E., 1990. Normalized crop susceptibility factors for corn and soybean to excess water stress. *Amer. Soc. of Agric. Eng.*, **33**, 4, 1153-1161.
- Feddes R.A., Kowalik P.J., Malinka K.K. et Zaradny H., 1976. Simulation of field water uptake by plants using a soil water depend root extraction function. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, **31**, 13-26.
- Flühler H., Stolzy L.H. et Ardakani M.S., 1976. A statistical approach to define soil aeration in respect to denitrification. *Soil Sci.*, **122**, 115-123.

## *Références bibliographiques*

- Fouere A. et Picard D., 1988. Pour observer la croissance des racines : le rhizoscope. *Perspectives Agricoles*, 122, 23-24.
- Fulton J.M. et Erickson A.E., 1964. Relation between soil aeration and ethyl alcohol accumulation in xylem exudate of tomatoes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, 610-614.
- Gillham R.W., 1984. The capillary fringe and its effect on water-table response. *Journal of Hydrology*, 67, 307-324.
- Girardin Ph., Trendel R., Jacquey S., Casarin M., Goss M. et Fouere A., 1991. Comparison of in situ root observations with rhizoscope, video recording and endoscope. *Plants roots and their environment, proceedings of an ISRR-sympsimu*, Elsevier Science publishers
- Grable A.R. et Siemer E.G., 1968. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentiel, and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 180-186.
- Hallaire M. et Katerji N., 1985. Effets positifs des nappes superficielles sur l'alimentation hydrique des cultures. Conditions et effets des excès d'eau en agriculture. INRA, commission d'agrométéorologie, 113-122.
- Hamblin A., Tennant D. et Perry M.W., 1990. The cost of stress : dry matter partitioning changes with seasonal supply of water and nitrogen to dryland wheat. *Plant and Soil*, 122, 47-58.
- Hansen G.K., Jensen C.R., 1977. Growth and maintenance respiration in whole plants, tops and roots of *Lolium multiflorum*!; *Physiol. Plant.*, 39, 155-164.
- Hiler E.A., 1969. Quantitative evaluation of crop-drainage requirements. *Transactions of the ASAE*, 12, 499-505.
- Hirose T., 1988. Nitrogen availability, optimal shoot/root ratios and plant growth. *Plant form and vegetation structure*, SPB Academic Publishing, 135-145.
- James E. et Box JR., 1991. The effects of waterlogging on rooting of soft red winter wheat. *Plants roots and their environment, proceedings of an ISRR-symposium*, Elsevier Science publishers, 418-430.
- Jones C.A., Bland W.L., Ritchie J.T. et Williams J.R., 1991. Simulation of root growth. *Modeling plant and soil systems*, American Society of Agronomy publisher, 91-123.
- Kanvar R.S., Baker J.L. et Mukhtar S., 1988. Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. *Amer. Soc. of Agric. Eng.*, 31, 1, 133-141.
- Kendall W.A. et Leath K.T., 1991. A plant growth system to facilitate root observations and treatments. *Plants roots and their environment, proceedings of an ISRR-symposium* Elsevier Science publishers, 597-602.
- Keppler B.L., Belford R.K. et Rickman R.W., 1984. Root and shoot development in winter wheat. *Agronomy Journal*, 76, 117-122.
- Longchamp J.Y., 1983. Blé tendre d'hiver, bien choisir sa variété. *Cultivar*, 162, p137.
- Luxmoore R.J. et Stolzy L.H., 1972. Oxygen consumption rates predicted from respiration, permeability and porosity measurements on excised root segments. *Crop Sci*, 12, 442-445.
- Maertens C., 1988. Intérêt de l'endoscopie pour l'étude de l'influence de l'enracinement d'un couvert végétal sur l'utilisation de l'eau du sol. *Etudes sur les transferts d'eau dans le système Sol-Plante-Atmosphère*. Edt Calvet, 214-224.
- Masle-Meynard J., 1981. Elaboration du nombre dépis d'un peuplement de blé d'hiver en situation de compétition pour l'azote. I. Mise en évidence d'un stade critique pour la montée d'une talle. *Agronomie*, 1, 8, 623-632.
- Massé J. et Capy Y., 1988. Diagnostic des effets des excès d'eau, hiérarchisation à l'échelle de la région. *Perspectives Agricoles*, 126, 37-47.
- Massé J., Colnenne C., Tardieu F. et Crosson P., 1988. Système racinaire du blé et état structural du sol. *Perspectives Agricoles*, 128, 31-37.

## Références bibliographiques

- Massé J., Tardieu F. et Colnenne C., 1991. Rooting depth and spatial arrangement of roots in winter wheat. Plants roots and their environment, proceedings of an ISRR-symposium, Elsevier Science publishers, 480-486.
- M'Barek Ben Naceur M., 1987. Effet de l'excès d'eau sur la culture d'orge et de fétuque. Annales de l'INRA de Tunisie, 5, 8, 24p.
- McCree K.J., 1970. An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled conditions. Predictions and measurement of photosynthetic productivity, Pudoc Wageningen, 221-229.
- Meynard J.M., 1985. Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon.
- Meynard J.M., 1987. L'analyse de l'élaboration du rendement sur des essais de fertilisation azotée. Perspectives Agricoles, 115, 76-83.
- Meynard J.M. et Aubry C., 1988. Itinéraire technique du blé en conditions d'excès d'eau. Perspectives agricoles, 126, 80-89.
- Oosterhuis D.M., Scott H.D., Hampton R.E. et Wullschlegel S.D., 1990. Physiological responses of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars to short-term flooding. Env. Exp. Bot., 30, 85-92.
- Paillard C., Massé J., Robert D. et Crosson P., 1992. Modélisation de la progression racinaire. Perspectives Agricoles, 175, 112-115.
- Penning de Vries F.W.T., 1974. Substrate utilization and respiration in relation to growth and maintenance in higher plants. Neth. J. Agric. Sci., 22, 40-44.
- Penning de Vries F.W.T., Jansen D.M., Ten Berge H.F.M. et Bakema A., 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Pudoc Wageningen, 1-115.
- Périgaud S., 1967. Effet du manque d'oxygène et de l'excès d'eau au niveau des racines sur la croissance et la nutrition globale de la plante. Ann. Agr., 18, 485-506.
- Pons Y., 1988a. Incidence de l'abaissement du niveau d'eau hivernal sur le rendement du blé d'hiver dans les marais de l'ouest. Conditions et effets des excès d'eau en agriculture. Séminaire, commission d'agrométéorologie, 405-414.
- Pons Y., 1988a. Evolution de la profondeur d'enracinement du blé dans les sols des marais de l'ouest. Conditions et effets des excès d'eau en agriculture. INRA, commission d'agrométéorologie, 405-414.
- Rasiah V., Carlson G.C. et Kohl R.A., 1992. Assessment of functions and parameter estimation methods in root water uptake simulation. Soil Sci. Am. J., 56, 1267-1271.
- Richards R.A. et Passioura J.B., 1981. Seminal root morphology and water use of wheat, I : environmental effects. Crop Science, 21, 249-252.
- Rickman R.W., Waldman S.E. et Klepper B.L., 1992. Calculating daily root length density profiles by applying elastic theory to agricultural soils. Journal of plant nutrition, 15, 661-675.
- Robson M.J., 1973. The growth and development of simulated swards of perennial ryegrass. II. Carbon assimilation and respiration in a seedling sward. Ann. Bot., 37, 501-518.
- Ruget f., 1981. Respiration de croissance et respiration d'entretien : méthodes de mesure, comparaison des résultats. Agronomie, 1, 601-609.
- Ryle G.J.A., Cobby J.M. et Powell C.E., 1976. Synthetic and maintenance respiratory losses of <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> in unicum barley and maize. Ann. Bot., 40, 571-586.
- Saugier B., 1983. Aspects écologiques de la photosynthèse. Bull. Soc. Bot. Fr., 130, Actual. Bot., 1, 113-128.



## Références bibliographiques

- Schmidhalter U., Selim H.M. et Oertli J.J., 1994. Measuring and modeling root water uptake based on <sup>36</sup>chloride discrimination in a silt loam soil affected by groundwater. *Soil Sc.*, 158, 2, 97-105.
- Sieben W.H., 1964. Het verband tussen ontwatering en opbrengst bij de jonge zavelgronden in de Noordoostpolder Van zee tot land. Tjeenk Willink V, Zwolle, The Netherlands, 40.
- Silvestre J., 1992. Etude des conséquences de l'asphyxie racinaire sur la croissance et le développement chez le colza d'hiver. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Sojka R.E et Stolzy L.E., 1980. Soil-oxygen effects on stomatal response. *Soil Sc.*, 130, 350-358.
- Sojka R.E., 1992. Stomatal closure in oxygen-stressed plants, *Soil Science*, 154, 269-280.
- 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. *Agronomie*, 6, 415-425.
- Tardieu F., 1988a Etat structral de la couche labourée et enracinement. *Perspectives Agricoles*, 128, 26-30.
- Tardieu F., 1988b. Cartographie in situ du système racinaire. *Perspectives Agricoles*, 122, 19-22.
- Tardieu F., 1988c. Comment juger de l'efficacité du système racinaire comme capteur d'eau. *Perspectives agricoles*, 128, 21-25.
- Taylor H.M. et Gardner H.R., 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strenght of soil. *Soil Science*, 96, 153-156.
- Taylor H.M., Upchurch D.R., Brown J.M. et Rogers H.H., 1991. Some methods of root investigations. *Plants roots and their environment, proceedings of an ISRR-symposium*, Elsevier Science publishers, 553-564.
- Thomson C.J., Atwell, B.J. et Greenway H., 1989. Response of wheat seedlings to low O<sub>2</sub> concentrations in nutrient solution. I.- Growth, O<sub>2</sub> uptake and synthesis of fermentive end-products by root segments. *J. of Exp. Bot.*, 40, 218, 985-991.
- Trought M.C.T., Drew M.C., 1980. The development of waterlogging damage in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). II.- Accumulation and redistribution of nutrients by the shoot. *Plant and soil*, 56, 187-199.
- Trought M.C.T. et Drew M.C., 1982. Effect of waterlogging on young wheats plants and on soils solutes at different soil temperatures. *Plant and soil*, 69, 311-326.
- Van Keulen H. et Seligman N. G., 1987. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. *Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen*. 310p.
- Weir A.H., Bragg P.L., Porter J.R., et Rayner J.H., 1984. A winter wheat simulation model without water nor nutrient limitations. *J. Agric. Sci. Camb*, 102, 371-382.
- Williamson R.E. et Kriz G.J, 1970. Response of agricultural crops to flooding, depth of water table and soil gaseous composition. *Transactions of the ASAE*, 216-220.
- Yamaguchi J., 1978. Respiration and the growth efficiency in relation to crop productivity. *J. Fac. Agric., Hokkaido Univ., Sapporo*, 59, 59-129.

## CHAPITRE III

Aldanondo J.C., 1981. Etudes du fonctionnement du drainage agricole à Arrou. *Etudes du Cemagref*, 1, 1-24.

Appriou J.L., 1987. Contribution à l'étude du fonctionnement hydrologique du drainage ; apport des bilans hydriques à la compréhension de la saison de drainage intense. Rapport de fin d'étude ENITRIS, 110pp.

## *Références bibliographiques*

- Armstrong A.C., Matthews A.M. et Castle D.A., 1993. Drainage models to predict soil water regimes in drained soils. Workshop on subsurface drainage simulations models, 15th congress on irrigation and drainage, 95-106.
- Brisson N., Olioso A. et Clastre P., 1993. Daily transpiration of field soybeans as related to hydraulic conductance, root distribution, soil potential and midday leaf potential. *Plant and soil*, **154**, 227-237.
- Callot G., Chamayou H., Maertens C. et Salsac L., 1982. Mieux comprendre les interactions sol-racine ; incidence sur la nutrition minérale. INRA edition, 325pp.
- Campbell G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, **117**, 311-314.
- Cannell R.Q. et Belford R.K., 1977. Effect of prolonged waterlogging under outdoor conditions on the growth of winter wheat. *Letcombe Laboratory Annual Report* 59-61.
- Gardner W.R., 1964. Relation of root distribution of water uptake and availability. *Agronomy Journal*, **56**, 41-45.
- Guérin T., 1983. Diagnostic de risques de lessivage d'azote en fin de campagne culturale ; comparaison d'une parcelle drainée et d'une parcelle témoin non drainée. Rapport de fin d'étude INAPG, 79pp.
- Guyon G., 1983. Le périmètre expérimental de drainage d'Arrou. Aspects hydrauliques. *Etudes du Cemagref*, **5**, 45pp.
- Guyon G. et Lesaffre B., 1986. Mesures expérimentales au champ utilisées pour caractériser le fonctionnement hydraulique d'un réseau de drainé en sol à pseudo-gley. *Zeszyty problemowe postepow nauk rolniczych*, **312**, 187-215.
- INRA et CTGREF, 1974. Périmètre de drainage d'Arrou, campagne 1973-1974, résultats des mesures d'humidités et de densités, 35pp.
- INRA et CTGREF, 1975. Périmètre de drainage d'Arrou, campagne 1974-1975, résultats des mesures d'humidités, 35pp.
- Jones C.A., Bland W.L., Ritchie J.T. et Williams J.R., 1981. Simulation of root growth. *Modeling plant and soil systems*. American Society of Agronomy publisher, 91-123.
- Lesaffre B., 1988. Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : modélisation hydraulique saturée du fonctionnement du drainage souterrain. Thèse Paris VI, 141-252.
- Maertens C., 1964. La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. *Ann. Agron.*, **15**, 539-554.
- Maertens C., Blanchet R. et Puech J., 1974. Influence des différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les cultures. I. Régimes hydriques, systèmes racinaires et modalités d'alimentation en eau. *Ann. Agron.*, **25**, 575-586.
- Massad C., 1979. Rôle de l'extraction racinaire dans les modalités d'utilisation de l'eau du sol par les cultures. Thèse d'Ingénieur de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 159p.
- Robelin M., 1969. Evaporation réelle de différents couvert végétaux bien alimentés en eau et évapotranspiration potentielle. Détermination expérimentale. *Ann. Agr.*, **13**, 493-522.
- Tardieu F. 1983. Alimentation hydrique et minérale des plantes. *Cultivar*, **162**, 28-29.
- Tardieu F., 1988. Etat structral de la couche labourée et enracinement. *Perspectives Agricoles*, **128**, 26-30.
- Taylor H.M. et Gardner H.R., 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strenght of soil. *Soil Science*, **96**, 153-156.
- Van Hoorn J.W., 1958. Results of a groundwater level experimental field with arable crops on clay soils. *Neth. J. of Agric.*, **6**, 1-10.

Zimmer D., 1988. Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés : fonctionnement hydrologique et bilans hydriques des parcelles du champ d'Arrou. Thèse Paris VI, 157-196.

Zimmer D. et Lorre E., 1993. Parameter sensitivity and field evaluation of SIDRA model. Workshop on subsurface drainage simulations models, 15th congress on irrigation and drainage, 25-40.

## CHAPITRE IV

Ahmad N., Kanwar R.S., Kaspar T.C. et Bailey T.B., 1992. Effect of soil surface submergence and a water table on vegetative growth and nutrient uptake of corn. Transactions of the ASAE, **35**, 1173-1177.

Belford R.K., 1981. Response of winter wheat to prolonged waterlogging under outdoor conditions. J. Agri. Sci. Camb., **97**, 557-568.

Brisson N., Seguin B. et Bertuzzi P., 1992. Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. Agricultural and Forest Meteorology, **59**, 267-287.

Davies M.S. et Hillman G.C., 1988. Effects of soil flooding on growth and grain yield of a population of tetraploid species wheat. Annals of Botany Company, **62**, 597-604.

Evans R.O., Skaggs R.W et Sneed R.E., 1990. Normalized crop susceptibility factors for corn and soybean to excess water stress. Amer. Soc. of Agric. Eng., **33**, 4, 1153-1161.

Evans R.O., Skaggs R.W et Sneed R.E., 1991. Stress day index models to predict corn and soybean relative yield under high water-table conditions. Amer. Soc. of Agric. Eng., **34**, 1997-2005.

Kanwar R.S., Baker J.L. et Mukhtar S., 1988. Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. Amer. Soc. of Agric. Eng., **31**, 1, 133-141.

Lesaffre B., 1988. Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : modélisation hydraulique saturée du fonctionnement du drainage souterrain. Thèse Paris VI, 25-43.

L'héritier H., 1992. Validation d'un modèle simple d'estimation des potentialités de production de maïs : GOA. Mémoire de DEA, Université d'Orsay (Paris XI), INA PG.

Nash J.E et Sutcliffe J.V., 1970. Rive flow forecasting through conceptual models. Journal of Hydrology, **10**, 282-290.

Pons Y., 1988. Incidence de l'abaissement du niveau d'eau hivernal sur le rendement du blé d'hiver dans les marais de l'ouest. Conditions et effets des excès d'eau en agriculture. Séminaire, commission d'agrométéorologie, 405-414.

Sieben W.H., 1964. Het verband tussen ontwatering en opbrengst bij de jonge zavelgronden in de Noordoostpolder. Van zee tot land. Tjeenk Willink V, Zwolle, The Netherlands, 40.

Van Horn J.W., 1958. Results of a groundwater level experimental field with arable crops on clay soils. Neth. J. of Agric., **6**, 1-10.

Zimmer D. et Lorre E., 1993. Parameter sensitivity and field evaluation of SIDRA model. Workshop on subsurface drainage simulations models, 15th congress on irrigation and drainage, 25-40.

Zimmer D., 1988. Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés : fonctionnement hydrologique et bilans hydriques des parcelles du champ d'Arrou. Thèse Paris VI, 157-196.

## NOTATIONS

Figurent dans cette liste les notations les plus souvent rencontrées dans le document. Il existe des doublons. Dans ce cas nous avons pris garde à les utiliser uniquement pour des notations ponctuelles.

$A = B/C$	troisième coefficient de forme de nappe
AD	amorce de drainage
$\alpha$	penne initiale de la réponse de la photosynthèse à l'éclairement
$\alpha_a$	coefficient de répartition de la biomasse vers les parties aériennes
$\alpha_r$	coefficient de répartition de la biomasse vers les parties racinaires
b	paramètre intervenant dans le calcul de la transpiration
B	deuxième coefficient de forme de nappe
BD	densité apparente sèche du sol
BDO	densité apparente sèche optimale du sol pour la pénétration des racines
BDX	densité apparente sèche maximale du sol pour la pénétration des racines
BH	bilan hydrique climatique
C	premier coefficient de forme de nappe
d(z)	densité racinaire par couche de sol d'une épaisseur de 2 cm
d(h)	densité racinaire pour un horizon de sol d'une épaisseur de 10 cm
D	lame d'eau drainée du compartiment racinaire vers le réservoir sous-jacent ou lame d'eau transmise à la nappe
Drain2	lame d'eau drainée depuis le réservoir sous le compartiment racinaire vers le sous-sol ou lame d'eau transmise à la nappe
$D_k$	lame d'eau nécessaire pour la fin de la saison de drainage, découplage
$\delta_{(es)}$	facteur d'extinction, calcul de l'évaporation
$\varepsilon_{bmax}$	valeur maximale de l'efficacité de transformation du rayonnement intercepté en matière sèche
ES	évaporation réelle à la surface du sol
$ES_0$	évaporation potentielle à la surface du sol

## Notations

ETP	évapotranspiration potentielle (donnée climatique)
ETP <sub>0</sub>	évapotranspiration potentielle de la culture
$\varepsilon_{\max}$	valeur maximale de l'efficacité climatique
$f_a$	fraction de biomasse aérienne
$f_r$	fraction de biomasse racinaire
FD	fin de la saison de drainage
F(z)	fonction d'extraction racinaire
h	hauteur de nappe à une abscisse quelconque
H	hauteur de la nappe à l'inter-drain
HI	indice de récolte
I <sub>d</sub>	rapport des accroissements racinaires en densité sur la profondeur d'enracinement maximale entre le traitement et le témoin
I <sub>d</sub> (h)	rapport des accroissements racinaires en densité entre le traitement et le témoin pour un horizon de sol d'une épaisseur de 10 cm
I <sub>d</sub> (z)	rapport des accroissements racinaires en densité entre le traitement et le témoin pour un horizon de sol d'une épaisseur de 2 cm
I <sub>LAI</sub>	rapport des accroissements de LAI entre le traitement et le témoin
I <sub>z</sub>	rapport des accroissements racinaires en profondeur entre le traitement et le témoin
k	coefficient d'interception journalier pour le calcul du rayonnement intercepté
k <sub>c</sub>	coefficient cultural
$\tilde{K}(H)$	conductivité hydraulique horizontale équivalente
K <sub>lab</sub>	conductivité hydraulique dans la couche labourée
L	demi écartement entre deux files de drains
LAI	indice foliaire
LAI <sub>max</sub>	valeur maximale du LAI
l <sub>F</sub>	pente de la fonction F(z)
L <sub>k</sub>	lame d'eau nécessaire pour le démarrage de la saison de drainage, couplage
m = 2p	coefficient d'hétérogénéité verticale de la conductivité hydraulique
MS <sub>a</sub>	matière sèche aérienne
MS <sub>r</sub>	matière sèche racinaire

## Notations

$MS_t$	matière sèche totale
$\mu(H)$	porosité de drainage à la base de la couche labourée
$\mu_{lab}$	porosité de drainage dans la couche labourée
$p$	coefficient d'hétérogénéité verticale de la porosité de drainage
$P$	précipitations
$PAR$	rayonnement incident
$PAR_t$	rayonnement intercepté
$P_g$	photosynthèse brute
$P_m$	réponse photosynthétique maximale du couvert végétal à un éclairage saturant
$P_n$	photosynthèse nette
$PZ$	profondeur de la nappe
$Q$	débit au drain
$\theta_{cc}$	humidité à la capacité au champ
$\theta_{pf}$	humidité au point de flétrissement
$\theta_r$	humidité résiduelle
$\theta_{sat}$	humidité à saturation
$\bar{\theta}$	teneur en eau moyenne sur le réservoir situé sous le compartiment racinaire
$R_e$	respiration d'entretien
$R_c$	respiration de croissance
$Rn$	recharge nette
$ro(z)$	profil d'humidité sur le réservoir situé sous le compartiment racinaire
$R_{sol}$	respiration du sol
$RU$	réserve utile
$RU_{max}$	pourcentage maximal d'utilisation de la réserve utile, valeur maximale de $F(z)$
$SBD$	facteur de réduction de l'accroissement racinaire en profondeur avec la densité apparente sèche du sol
$SDI$	saison de drainage intense
$SEE(\%)$	pourcentage du système racinaire ennoyé
$SEE(\%)_{moy}$	pourcentage moyen du système racinaire ennoyé à l'échelle de la parcelle
$SEW$	somme des hauteurs de nappe supérieures à un seuil

## *Notations*

$T$	température moyenne
$T_b$	température de base pour le calcul de la somme de degrés-jours
$T_{max}$	température maximale
$T_{min}$	température minimale
$TP$	transpiration réelle de la plante
$TP_0$	transpiration maximale de la plante
$T_{opt}$	température optimale pour $\varepsilon_{bmax}$
$ULAI$	unité de croissance pour le calcul du LAI
$v$	vitesse d'approfondissement du système racinaire
$W_{av}$	réserve en eau réellement disponible pour la plante
$W_b$	réserve en eau biologique
$W_t$	réserve en eau totale sur le réservoir racinaire
$x_m$	profondeur du mulch
$z_{drain}$	profondeur de pose des drains
$z_{lab}$	profondeur de la couche labourée
$z_{max}$	profondeur maximale d'enracinement
$z_{rac}$	profondeur racinaire

---

# **Effet d'un excès d'eau sur la croissance d'une culture de blé d'hiver**

---

Identification d'une variable de stress et analyse de la réponse de la culture

## **A N N E X E S**



# ANNEXE 1.1

## CONCEPTION DES MICRO-ELECTRODES ET SYSTEME D'ACQUISITION DE DONNEES

---

### Sommaire

---

1.1 Principe de fonctionnement .....	1
<i>Conception des micro-électrodes</i> .....	3
<i>Appareillage de mesure</i> .....	3
1.2 Etude du signal des micro-électrodes.....	4
<i>Protection des micro-électrodes</i> .....	4
<i>Temps de réponse</i> .....	5
<i>Consommation de la micro-électrode</i> .....	7
<i>Etalonnage</i> .....	10
1.3 Conclusion .....	14
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	15

Le suivi de la concentration en oxygène étant original, nous présentons le principe et la conception des capteurs utilisés ainsi que le système d'acquisition de données. Nous analysons le signal obtenu avec pour objectifs de connaître la fiabilité du principe de mesure, de mesurer la sensibilité à la température puis d'établir un étalonnage des micro-électrodes.

## 1.1 Principe de fonctionnement

Les micro-électrodes utilisées sont inspirées de celles conçues par Clark (Clark, 1953). La mesure de la concentration en oxygène est basée sur le principe de la polarographie. La polarographie est une méthode d'analyse électrochimique découverte en 1922 par Heyrovsky. L'augmentation de la différence de potentiel entre deux électrodes conduit à la réduction des espèces chimiques. Pour le cas de la réduction de l'oxygène, l'anode est constituée par une électrode de platine. Les électrons sont cédés par l'anode, il en résulte un courant électrique. Pour que cette réaction ait lieu, il faut que les espèces chimiques migrent vers l'anode. Il existe deux grands types de mécanismes induisant le mouvement de particules : la convection et la diffusion. En polarographie, l'addition à la solution électrolytique d'un électrolyte indifférent élimine les phénomènes de convection de l'espèce à doser. Ce sont les ions de l'électrolyte qui assurent la totalité du courant par migration. Le transport de l'espèce à doser vers l'électrode se fait par diffusion. Le courant électrique mesuré est proportionnel à la vitesse de réduction de l'O<sub>2</sub>. Cette dernière est limitée par le taux de diffusion de l'espèce chimique vers l'anode. La vitesse de diffusion est proportionnelle au gradient de concentration s'établissant entre la solution électrolytique et la solution au voisinage de l'anode. Si l'électrolyse est rapide la concentration de l'espèce dans la solution électrolytique est nulle et le gradient de concentration devient maximal. Si la vitesse de diffusion est maximale, le courant issu de l'électrolyse tend vers une limite que l'on appelle « courant limite de diffusion ». Ce courant est alors proportionnel à la concentration dans le milieu de l'espèce chimique dosée. Il est souhaitable d'obtenir un courant limite le plus faible possible afin d'assurer une consommation par l'électrolyse de l'espèce à doser négligeable par rapport à sa concentration dans le milieu. On obtient pour chaque espèce chimique une courbe intensité-potentiel (Figure 1.1). L'ordonnée limite ( $i_d$ ) est proportionnelle à la concentration de l'ion électrolysé. Sa position dans l'échelle des potentiels caractérisée par le potentiel pour lequel l'intensité vaut  $i_d/2$  (potentiel de demi-vague  $E_{1/2}$ ), est caractéristique de l'ion électrolysé. Dans le cas du dosage de l'oxygène, l'application d'une différence de potentiel de 0.6 à 0.8V (en pratique 0,75V) permet la réduction spécifique de cette espèce. Le courant

d'équilibre ( $i_d$ ) est relié au taux de diffusion de l'ion réduit vers l'électrode selon l'équation de Faraday (Armstrong, 1994) :

$$I_t = n F A \phi_t \quad (\text{éq. 1.1})$$

où  $I_t$  est l'intensité du courant d'électrolyse au temps d'équilibre  $t$ ,  $n$  est le nombre d'électrons nécessaire pour la réduction d'une molécule,  $A$  est la section utile de la micro-électrode,  $F$  est la constante de Faraday ( $96\,500 \text{ A s}^{-1}$ ) et  $\phi_t$  est le flux d'oxygène vers la surface de l'électrode au temps  $t$ .

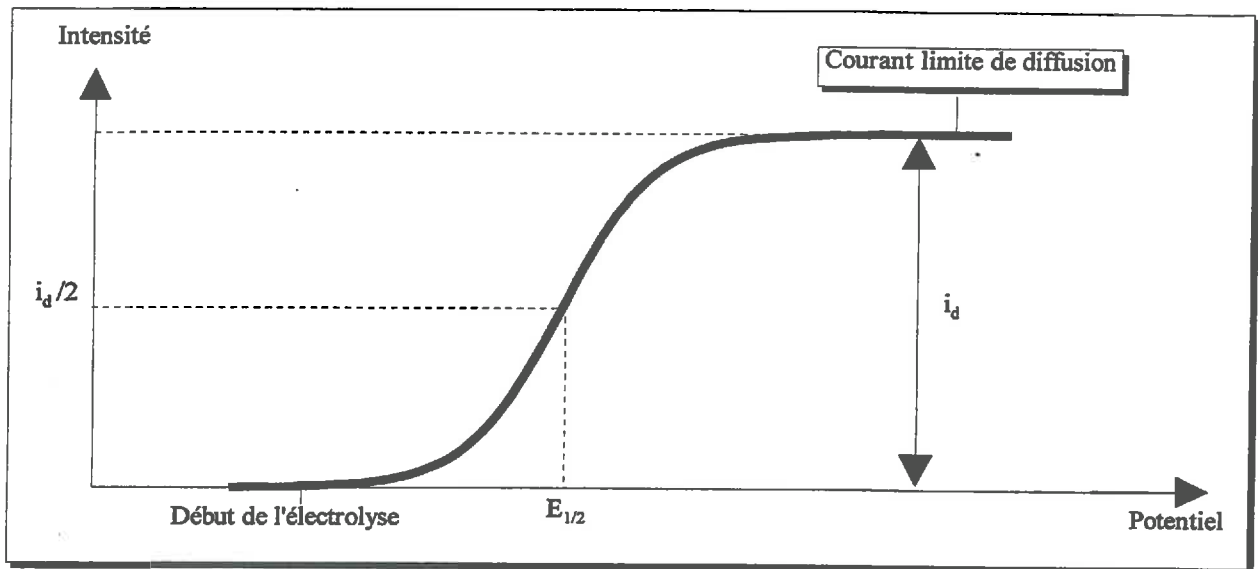
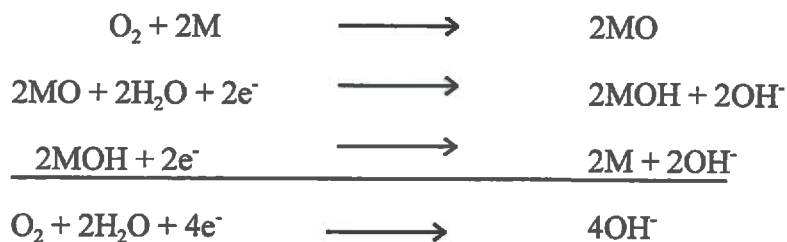


Figure 1.1 : Courbe intensité-potential pour une solution contenant un seul cation

Le flux d'oxygène (traditionnellement mais incorrectement appelé ODR pour Oxygen Diffusion Rate) peut alors être déterminé en mesurant le courant  $I_t$  obtenu après le temps d'équilibre.

$$\phi_t = \frac{I_t}{n F A} \quad (\text{éq. 1.2})$$

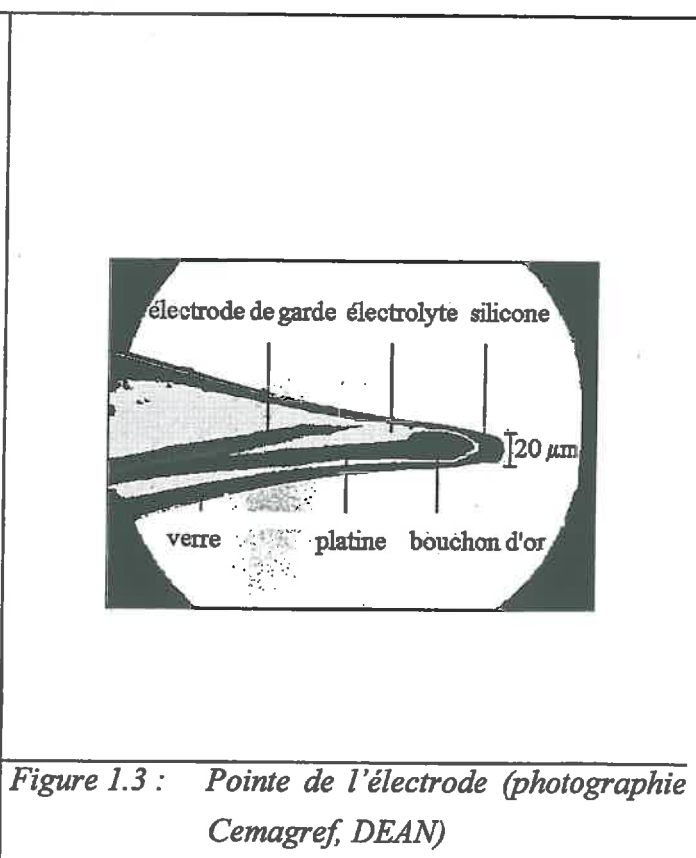
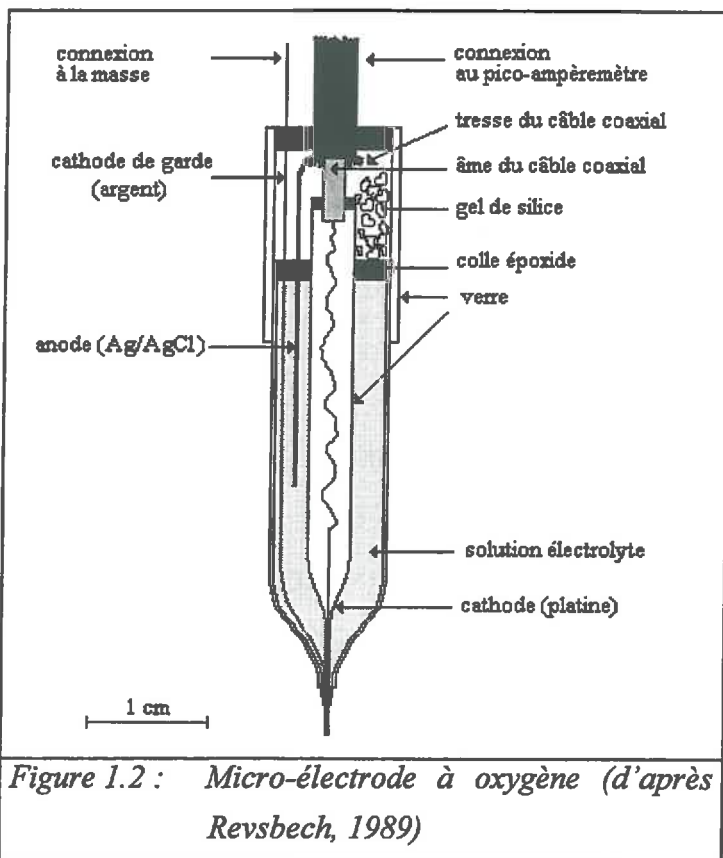
L'électro-réduction, réalisée au niveau de l'électrode de platine, conduit à la formation d'oxydes de façon transitoire. La réaction bilan peut être écrite sous cette forme :



La réduction d'une molécule d'oxygène nécessite 4 électrons. Théoriquement la relation entre le courant mesuré et la concentration en oxygène dans le milieu est linéaire. Il peut exister plusieurs conditions où cette relation n'est plus linéaire (McIntyre, 1970).

### • Conception des micro-électrodes

Depuis les premières micro-électrodes conçues par Clark (1953), plusieurs améliorations ont été apportées. Elles concernent la miniaturisation de l'électrode, l'ajout d'un électrolyte et l'introduction d'une cathode de référence Ag-AgCl. L'introduction d'une électrode de garde permet de réduire le bruit de fond et de stabiliser le signal (Revsbech, 1989). L'ajout d'un "bouchon" d'or (catalyseur de la réaction) au bout de l'électrode de platine permet de limiter les risques de contamination par certains cations. L'ensemble, électrode avec bouchon d'or, cathode et électrode de garde, est plongé dans une solution électrolytique (Figure 1.2 et Figure 1.3). Les échanges entre la solution et le milieu à doser sont assurés par l'intermédiaire d'une mince membrane de silicone. Ces micro-électrodes ont été fabriquées dans le laboratoire des sciences du sol de l'INRA d'Avignon.



### • Appareillage de mesure

Le courant issu de l'électrolyse est de l'ordre du pico ou du nano-ampère selon la taille de la pointe de la micro-électrode. Le circuit de mesure est présenté sur la Figure 1.4. Le courant associé est mesuré à l'aide d'un pico-ampèremètre (Keithley 485). Le circuit comprend une alimentation stabilisée fournissant une tension réglée de 0.75 V. Les connexions électriques

entre l'alimentation stabilisée, la micro-électrode et le picoampèremètre sont assurées par des connecteurs type BNC. Le câblage est réalisé avec des câbles coaxiaux graphités (Keithley SC9).

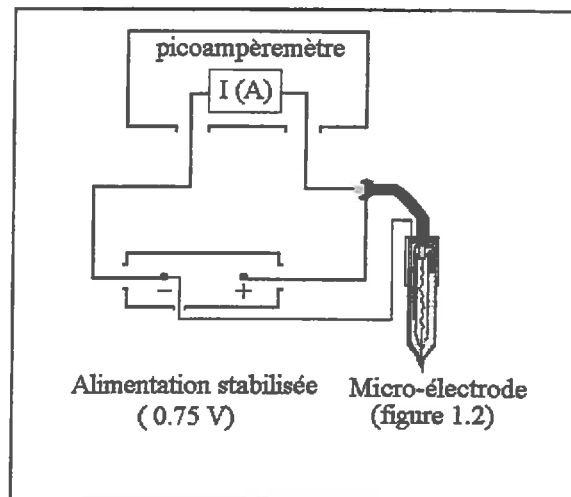


Figure 1.4 : Schématisation du suivi de la concentration en oxygène

Le circuit décrit ci-dessus est celui utilisé au laboratoire pour l'étude du signal et l'étalonnage des micro-électrodes. Un second circuit a été conçu pour leur alimentation. Nous distinguerons d'ores et déjà le circuit "*lecture*", permettant l'alimentation en continu et la lecture du signal d'une seule micro-électrode, du circuit "*alimentation*" permettant l'alimentation de l'ensemble des micro-électrodes sans lecture du signal.

## 1.2 Etude du signal des micro-électrodes

Au vue de la fragilité de la pointe de la micro-électrode, il n'est pas concevable de l'implanter directement dans le sol. Une capsule de protection est disposée autour de la micro-électrode. L'étude du signal est réalisée sur des micro-électrodes sans protection et ensuite sur ces mêmes micro-électrodes protégées. L'étalonnage est réalisé à partir des micro-électrodes protégées connectées au circuit servant à la lecture.

- *Protection des micro-électrodes*

Tout en protégeant la pointe de la micro-électrode, le support de l'électrode devra respecter un contact le plus intime possible avec l'atmosphère du sol. Il permettra également d'étanchéifier le circuit électrique au niveau des connections avec l'anode, la cathode et l'électrode de garde. La partie assurant la protection de la pointe de la micro-électrode est constituée par capuchon en

inox. Ce capuchon perforé assure le contact avec la matrice poreuse. La pointe de la micro-électrode n'est pas directement en contact avec le sol mais est entourée par une chambre assimilable à un macropore. La partie protégeant les connexions est en PVC. Elle est étanche et fixée sur le support en inox de l'électrode (Figure 1.5).

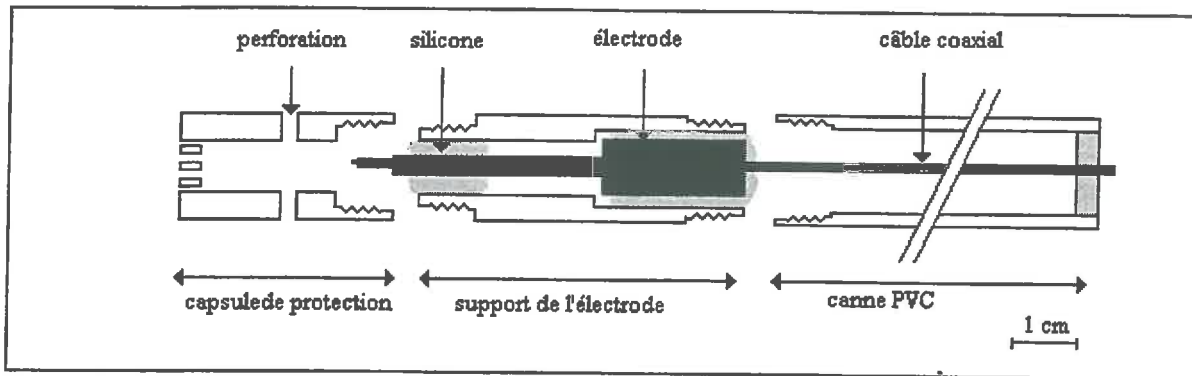


Figure 1.5 : Schématisation de la protection de la micro-électrode

- **Temps de réponse**

Le temps de réponse d'une micro-électrode est le temps nécessaire pour atteindre un signal stable. Il dépend du type de micro-électrodes (dimensions) et des conditions du milieu (teneur en eau et température). Il permet de connaître la fréquence limite de variation du signal que la micro-électrode peut mesurer lorsque celle-ci est alimentée.

Afin de mesurer le temps de réponse des électrodes, nous avons imposé des diracs de concentrations en oxygène. Au démarrage de l'expérience les micro-électrodes sont mises dans de l'eau dépourvue d'oxygène. Puis nous les mettons dans des milieux dont la teneur en oxygène est en équilibre avec la teneur en oxygène de l'air. Trois types de traitements ont été appliqués correspondant chacun à des substratums différents, eau, air et sol saturé en eau (sable de Champlan). L'expérience est menée sur 7 micro-électrodes, sans protection puis protégées, dans des conditions de températures contrôlées (17°C). L'enregistrement du signal est réalisé à 5, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360 secondes (Figure 1.6).

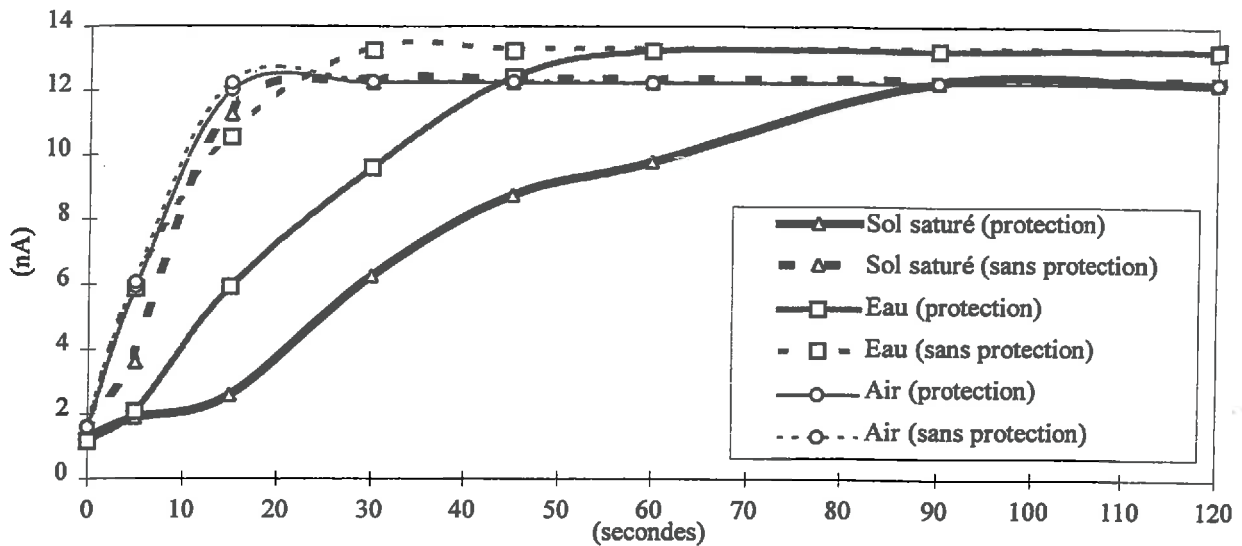


Figure 1.6 : Vitesse de stabilisation du signal pour la micro-électrode 1 en fonction du traitement

Les résultats obtenus sur l'ensemble des micro-électrodes sont présentés dans le Tableau 1.1.

	Eau		Air		Sol saturé	
	non protégée	protégée	non protégée	protégée	non protégée	protégée
Temps de réponse moyen (s)	23.57	55.71	17.14	21.43	23.57	75.00
Ecart type (s)	7.42	7.72	5.25	7.42	7.42	10.49
Valeur moyenne du signal (nA)	11.98	11.98	12.23	12.24	11.32	11.32

Tableau 1.1 : Temps de réponse des micro-électrodes (pour chaque traitement le nombre d'observation est de 21)

Dans le cas où la mesure est réalisée dans l'atmosphère, le temps de réponse entre micro-électrodes protégées et non protégées n'est pas significativement différent. En revanche, il est plus grand pour une micro-électrode protégée dans le cas où le milieu est saturé en eau. L'explication avancée est le temps nécessaire à la diffusion de l'oxygène dans la chambre formée par la protection. L'écart type calculé est important, il est lié à la fabrication "artisanale" des micro-électrodes. En effet, la distance de l'anode à l'orifice de contact avec le milieu extérieur (membrane de silicone) varie d'une micro-électrode à l'autre. Cette distance joue sur le temps de transfert de l'oxygène vers la pointe de l'anode et donc sur le temps de réponse. Au regard de la vitesse de variation du signal à mesurer (de l'ordre de l'heure) le temps de réponse de la micro-électrode peut-être qualifié de court (de l'ordre de la minute).

### • Consommation de la micro-électrode

Nous avons vu que le courant limite de diffusion devait être le plus faible possible afin que la consommation liée à l'électrolyse soit négligeable et ne modifie pas la concentration de l'élément à doser. Habituellement les valeurs d'intensité mesurées pour ce type d'électrodes sont de l'ordre de 100 pico-ampère. Or, dans notre cas, la valeur des signaux enregistrés est grande (de l'ordre de 10nA) et varie d'une micro-électrode à l'autre (écart-type de 7nA). Nous devons vérifier que de telles consommations n'influent pas sur la mesure et estimer les valeurs acceptables d'intensité afin de connaître la validité du signal mesuré. Pour cela, à l'aide d'un modèle de diffusion d'oxygène, nous avons simulé l'effet de la consommation de la micro-électrode sur la concentration de l'oxygène au voisinage de la pointe de la micro-électrode.

#### ➤ Bases théoriques du modèle

La diffusion est souvent considérée comme le processus principal responsable du transfert des gaz dans le sol (Rolston, 1986). Elle est généralement décrite par la loi de Fick :

$$\phi_i = -D_s \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad (\text{éq. 1.3})$$

où  $\Phi_i$  est le flux du gaz  $i$ ,  $D_s$  est le coefficient de diffusion du gaz  $i$  dans le sol et  $C_i$  sa concentration.

La distribution des concentrations en  $O_2$  dans l'espace poral est donnée par la solution à l'équation suivante (Renault et al, 1994) :

$$\varepsilon_{ia}(z) \frac{\partial C(O_2)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ia}(z) \frac{\partial C(O_2)}{\partial z} \right) - K'(z) \quad (\text{éq. 1.4})$$

où  $\varepsilon_{ia}$  est la porosité inter-agrégats libre à l'air ( $m^3 m^{-3}$ ),  $C(O_2)$  est la concentration en  $O_2$  en équilibre avec l'air ( $mol m^{-3}$ ),  $D_{ia}$  est le coefficient de diffusion inter-agrégats ( $m^2 s^{-1}$ ),  $K'(z)$  correspond à la respiration globale des agrégats rapportée au volume de sol ( $mol m^{-3} s^{-1}$ ) et  $t$  est le temps (s).

L'équation 1.4 est résolue au moyen de la méthode des éléments finis. Cette résolution permet de connaître la distribution spatiale des concentrations en oxygène en un point quelconque de l'espace poral et de suivre son évolution dans le temps (Renault et al, 1994). Le domaine est représenté par un cube de dimensions fixées sur lequel on réalise un maillage cubique.



Une fois les conditions initiales et les conditions aux limites du domaine imposées, l'énoncé du problème est complet. Au centre de ce cube, une consommation en oxygène constante est imposée. Elle représente la consommation en oxygène de la micro-électrode liée au dosage de cette espèce. A la périphérie du domaine, la concentration en oxygène prend une valeur constante. Elle représente la concentration en oxygène de la solution du sol, concentration qu'expérimentalement nous souhaitons mesurer le plus fidèlement possible. Nous n'avons considéré aucune condition de flux limite.

La consommation de la micro-électrode mesurée est exprimée en nano-ampère. Les conditions imposées aux limites dans le modèle sont exprimées en moles d'oxygène par seconde. Sachant qu'un nano-ampère correspond à  $1.04 \cdot 10^{-14}$  moles d'électrons par seconde et que la réaction d'oxydation d'une mole d'oxygène nécessite 4 électrons, un nano-ampère vaut donc  $2.6 \cdot 10^{-15}$  moles d'oxygène par seconde. En faisant varier d'une part, la concentration externe et la consommation au centre du domaine et, d'autre part, la taille du domaine et le coefficient de diffusion, nous recherchons dans quelles limites de consommation de la micro-électrode le dosage de l'oxygène est fiable. Nous suivons l'évolution de la concentration en oxygène sur les noeuds décrivant un transept depuis le centre du domaine jusqu'à sa périphérie.

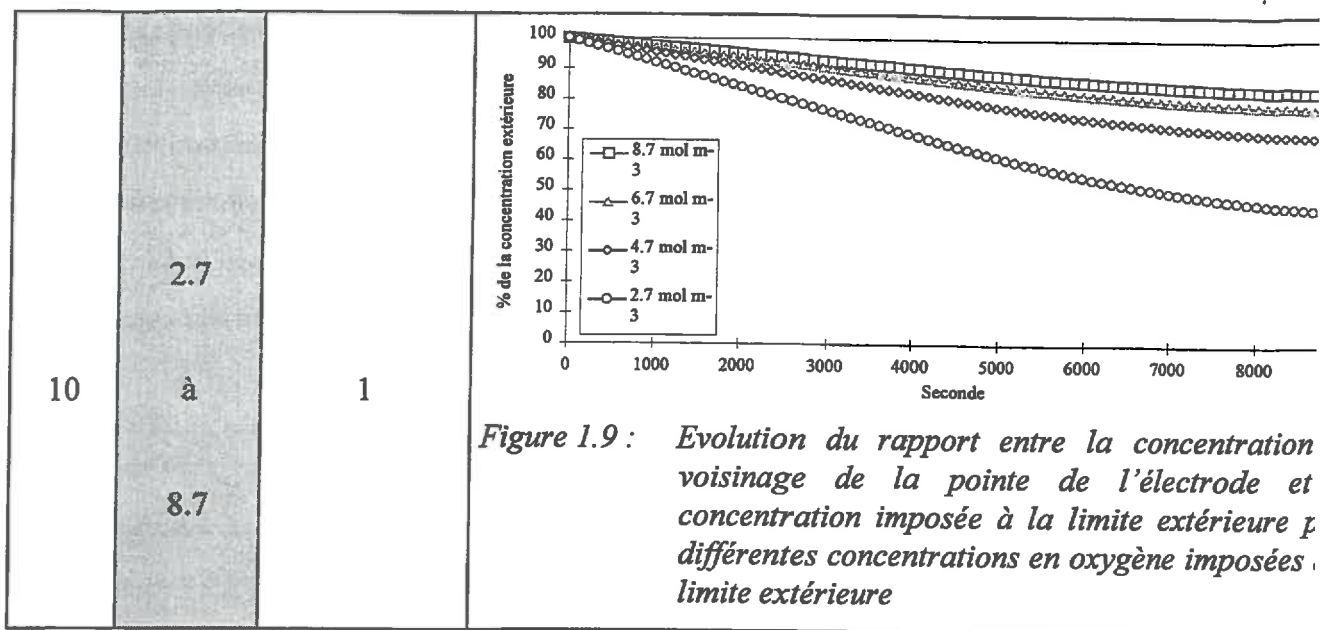
### ➤ Résultats

L'ensemble des simulations est réalisé dans le cas le plus défavorable, c'est à dire pour un domaine saturé en eau. Le coefficient de diffusion apparent de l'oxygène vaut  $3.3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  et la solubilité de l'oxygène dans l'eau vaut 0.03. L'ensemble des résultats est présenté comme le rapport, exprimé en pourcentage, entre la concentration au voisinage du point de consommation et la concentration à la périphérie du domaine. La consommation est imposée au centre du cube situé au centre du domaine. La concentration au voisinage du point de consommation correspond aux valeurs calculées sur les noeuds de ce cube. Plus la valeur du rapport s'éloigne de 100% plus l'influence de la consommation sur la mesure est grande. Le Tableau 1.2 synthétise les résultats des différentes simulations.

Pour une consommation de 1nA, lorsque le temps de mesures augmente la fiabilité de la mesure est réduite (Figure 1.7). Les simulations ont été réalisées pour un temps de mesure permettant d'observer une stabilisation des mesures sur le transept. En pratique la mesure de la concentration en oxygène ne dure pas plus de 1000 secondes, temps de mise en route des

électrodes compris. Lorsque le temps de mesure augmente, la consommation modifie sensiblement la concentration en oxygène au voisinage du point où celle-ci est imposée (Figure 1.8). Pour une consommation de 10 nA, la fiabilité de la mesure dépend fortement de la concentration extérieure. La concentration au voisinage du point de consommation décroît avec la condition à la limite extérieure du domaine (Figure 1.9). L'importance de cette relation doit être relativisée par le fait que lorsque la teneur en oxygène du milieu à doser diminue la consommation de la micro-électrode est réduite.

$K'(z)$ (nA)	$C(O_2)$ (mol m <sup>-3</sup> )	longueur du domaine (cm)	Figures
1	8.7	1	<p>Figure 1.7 : Evolution du rapport entre la concentration en un point du maillage et la concentration imposée à la limite extérieure pour différentes distances par rapport à la pointe de l'électrode</p>
$K'(z)$ (nA)	$O_2$ (mol m <sup>-3</sup> )	longueur du domaine (cm)	Figures
1 à 10	8.7	1	<p>Figure 1.8 : Evolution du rapport entre la concentration au voisinage de la pointe de l'électrode et la concentration imposée à la limite extérieure pour différentes conditions de consommation imposée au centre du domaine</p>



*Tableau 1.2 : Evolution de la consommation de la micro-électrode selon les conditions imposées*

De cette étude on peut conclure que pour une concentration nulle du milieu en oxygène, de l'intensité du courant résiduel dépendra la fiabilité de la mesure. Pour l'ensemble de nos micro-électrodes cette intensité ne dépasse jamais 2 nA.

### • Etalonnage

L'étalonnage est réalisé au laboratoire dans des conditions de températures et d'humidités contrôlées et maintenues constantes au cours d'une même manipulation. Le même protocole est conduit pour les sept micro-électrodes montées et connectées au circuit de lecture. Trois températures du milieu (14, 17, 23°C) sont testées. Les mesures sont réalisées dans deux types de milieu, air et eau, pour une gamme de teneur en oxygène évoluant de 0 à 12 mg l<sup>-1</sup> (0, 0.7, 3.9, 5.2, 6.9, 11.1, 11.6). Les concentrations en oxygène sont maintenues constantes à l'aide d'un bulleur. La concentration ainsi que la température sont mesurées avec un oxymètre, type ISY 57. Les capteurs oxymétriques électrolytiques répondent uniquement à la pression partielle d'oxygène. Ils ne donnent aucune information directe sur la quantité dissoute qui dépend du coefficient de solubilité de l'oxygène. L'étalonnage des oxymètres permet de relier la pression partielle du gaz à la quantité d'oxygène dissoute pour l'eau douce. L'oxymètre a été préalablement étalonné au laboratoire de qualités des eaux du Cemagref d'Antony.

Les micro-électrodes sont étalonnées en position horizontale, position dans laquelle elles seront implantées sur les cuves lysimétriques. Cette position présente l'avantage d'éviter les tensions liées à la courbure des câbles coaxiaux et limite le risque de dépôt d'impuretés (oxyde ou hydroxyde) venant colmater la membrane de silicone et limiter la diffusion de l'oxygène. Le détail de la chambre d'étalonnage est présenté sur la Figure 1.10.

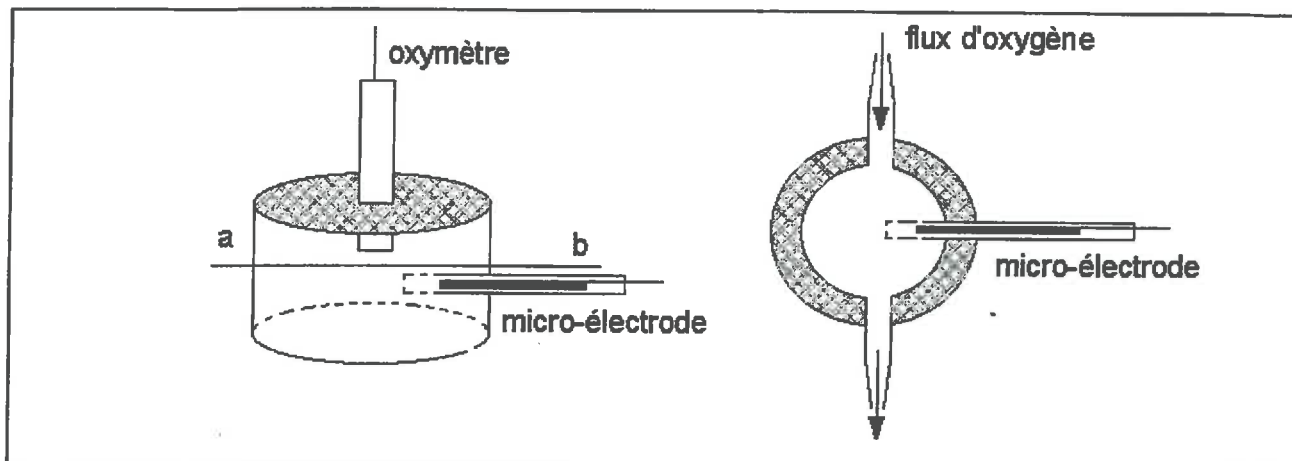


Figure 1.10 : Détail de la chambre d'étalonnage

La relation entre la concentration en oxygène du milieu et le signal de la micro-électrode est linéaire (Figure 1.11).

$$C_{\text{ox}} = a I_{\text{ox}} + b \quad (\text{éq. 1.5})$$

où  $I_{\text{ox}}$  est l'intensité du courant mesuré exprimée en nA,  $C_{\text{ox}}$  est la concentration en oxygène du milieu exprimée en  $\text{mg l}^{-1}$ ,  $a$  est la pente de la droite, elle représente la sensibilité de la micro-électrode et  $b$  est l'ordonnée à l'origine, le rapport «  $-b/a$  » correspond au courant résiduel pour une concentration en oxygène nulle.

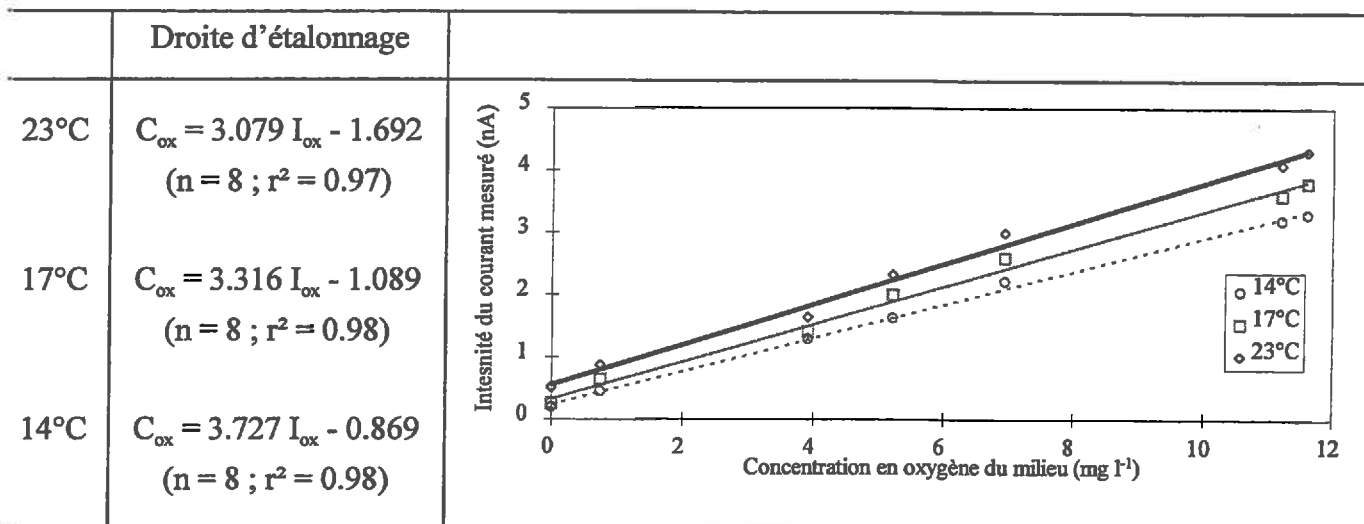


Figure 1.11 : Relation entre concentration du milieu en oxygène et intensité du signal ( $n$  est le nombre d'observations et  $r^2$  est le coefficient de détermination)

Le courant de base, non nul, est de faible intensité de l'ordre de 2 nA. Les paramètres de la droite d'étalonnage varient d'une micro-électrode à l'autre. Chacune des électrodes devra faire l'objet d'un étalonnage individuel. En raison du principe de fonctionnement de l'oxymètre, les mesures de pressions partielles en oxygène, qu'elles soient réalisées dans l'atmosphère ou dans l'eau, sont reliées à une quantité d'oxygène dissoute pour l'eau douce. Les paramètres ne varient pas significativement lorsque l'étalonnage des micro-électrodes est réalisé dans l'eau ou l'atmosphère et ce quelle que soit la température ou la sensibilité de la micro-électrode (Figure 1.12).

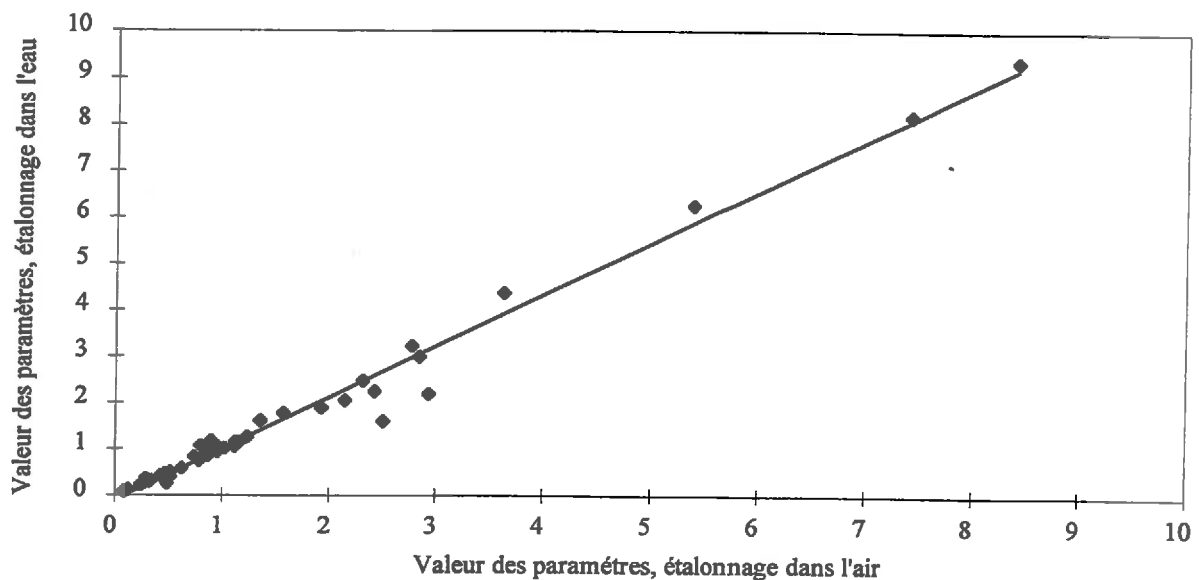


Figure 1.12 : Comparaison des paramètres de la droite d'étalonnage des micro-électrodes dans l'eau et l'atmosphère (nombre d'observation = 42, coefficient de détermination = 0.98, erreur standard = 0.248)

Nous utiliserons donc la même droite d'étalonnage pour des mesures réalisées dans un milieu non saturé ou saturé en eau.

La température ne modifie pas l'allure de la réponse de la micro-électrode. En revanche, la valeur des paramètres de la régression dépend de la température. Nous devons donc étudier la relation qui existe entre la valeur des paramètres de la droite d'étalonnage et la température. La sensibilité des micro-électrodes ainsi que le courant de base augmentent avec la température suivant une loi de type logarithmique pour chacune des micro-électrodes.

$$a = a' \ln T + b' \quad (\text{éq. 1.6})$$

$$b = a'' \ln T + b'' \quad (\text{éq. 1.7})$$

La corrélation moyenne entre les paramètres (a) puis (b) et la température est respectivement de 0.97 et 0.96 ( $r^2$ ). Soit  $C_{\text{ox}}$ , la concentration en oxygène en  $\text{mg l}^{-1}$ ,  $I_{\text{ox}}$ , la valeur du signal brut

donné par la micro-électrode en nA et T, la température au moment de la mesure en °C, la droite d'étalonnage s'écrit :

$$C_{\text{Ox}} = \frac{I_{\text{Ox}} - (a'' \ln T + b'')}{a' \ln T + b'} \quad (\text{éq. 1.8})$$

A posteriori, cette relation est validée sur un jeu de données test à partir de mesures réalisées au cours de l'expérimentation à l'aide l'oxymètre (Figure 1.13).

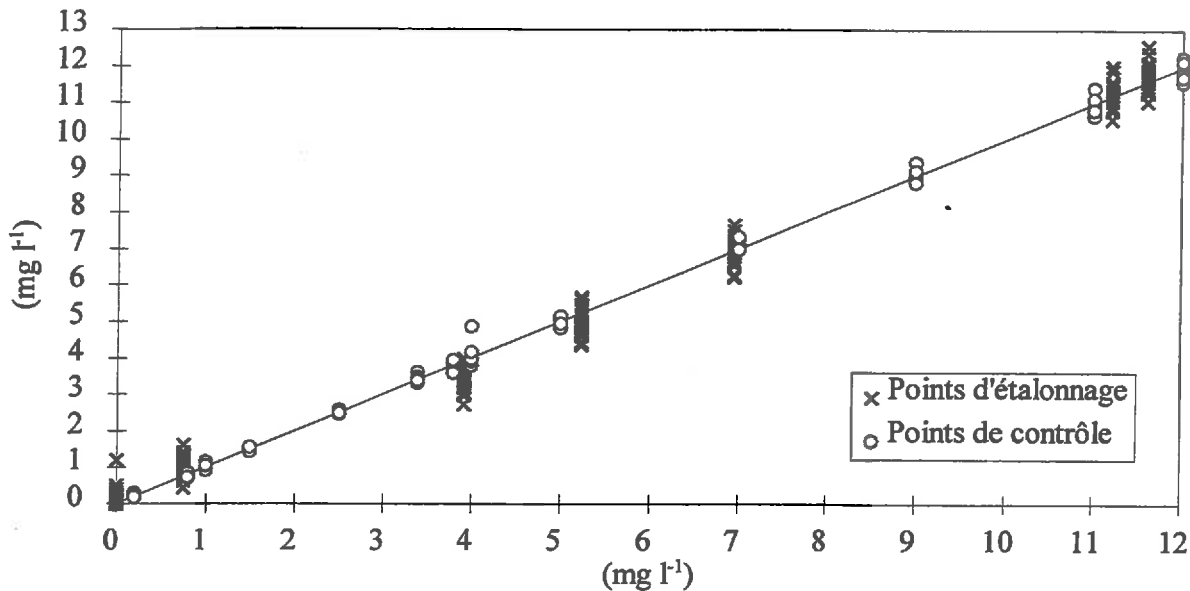


Figure 1.13 : Validation de l'étalonnage des micro-électrodes ( $n = 272$ ,  $r^2 = 0.99$ , erreur standard = 0.325)

En fin d'expérimentation (2 mois après le premier étalonnage), un nouvel étalonnage est réalisé dans les mêmes conditions que celles précédemment décrites. Cette précaution permet de vérifier s'il existe une dérive du signal au cours de l'expérimentation. Une faible dérive est mise en évidence pour les micro-électrodes ayant un signal élevé. En revanche, pour celles dont l'intensité maximale du signal ne dépasse pas 10 nA (6 sur les 7 micro-électrodes) aucune dérive significative n'est observée (Figure 1.14).

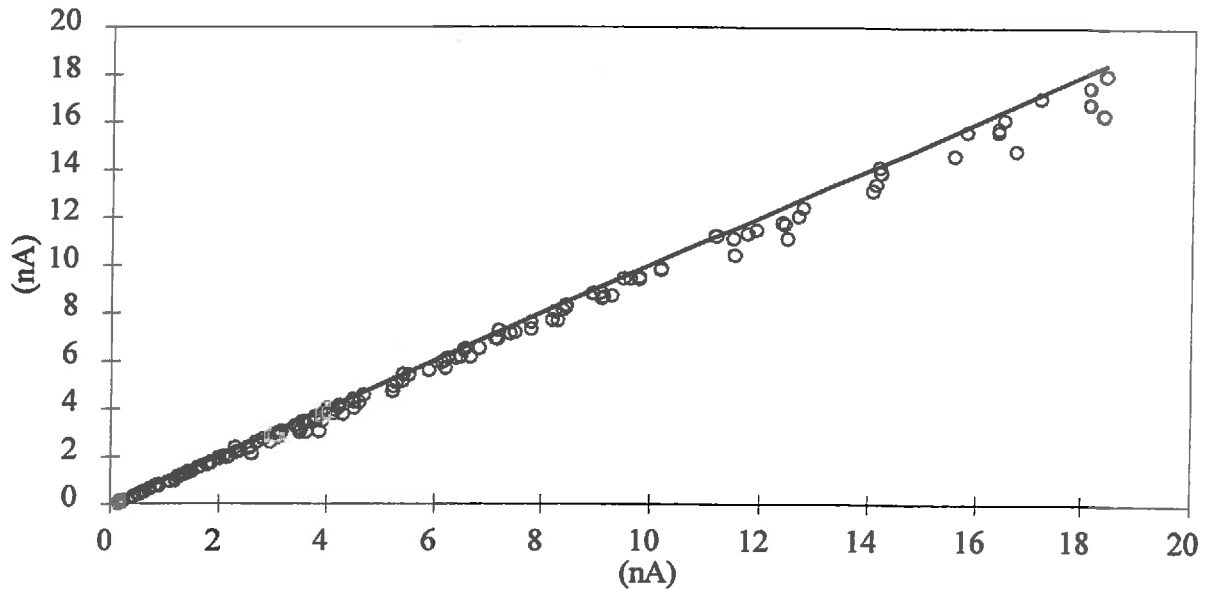


Figure 1.14 : Comparaison du signal des électrodes entre le début et la fin de l'expérimentation pour des concentrations en oxygène variables ( $n = 147$ ,  $r^2 = 0.96$ , erreur standard = 0.334)

### 1.3 Conclusion

Pour chaque électrode, une courbe d'étalonnage unique fonction de la température est établie. Elle permet d'établir la relation entre le signal et la concentration du milieu en oxygène. Au regard des résultats obtenus avec le modèle de transferts d'oxygène et des niveaux de consommation des électrodes observées, les mesures réalisées semblent être fiables. L'absence de dérive significative nous permet d'utiliser la même courbe d'étalonnage pour toute la durée de l'expérimentation.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Armstrong W, 1994. Polarographic oxygen electrodes and their used in plant aeration studies. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, **102b**, 511-527.

Clark C., 1953. Continuous recording of blood oxygen tensions by polarography. American heart association and the US Public Health Service, 189-193.

McIntyre D.S., 1970. The platinum microelectrode method for soil aeration measurement. Advances in agronomy, **22**, 235-283.

Renault P., Sierra J. et Stengel P., 1994. Transfert d'oxygène et anoxie dans les sols agrégés : contribution à l'étude de la dénitrification. Agronomie, **14**, 395-409.

Revsbech N.P., 1989. An oxygen microelectrode with a guard cathode. Limnol. Oceanogr., **34**, 474-478.

Rolston D.E., 1986. Gas diffusivity. Methods of soil analysis. I.- Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph, **9**, ASA-SSSA, Madison.



# ANNEXE 1.2

## SITE EXPERIMENTAL D'ARROU

1.1 - Description du site expérimental

1.2 - Données disponibles, hydrométriques et  
agronomiques

1.3 - Etalonnage de la sonde neutronique

1.1 - Description du site expérimental d'Arrou

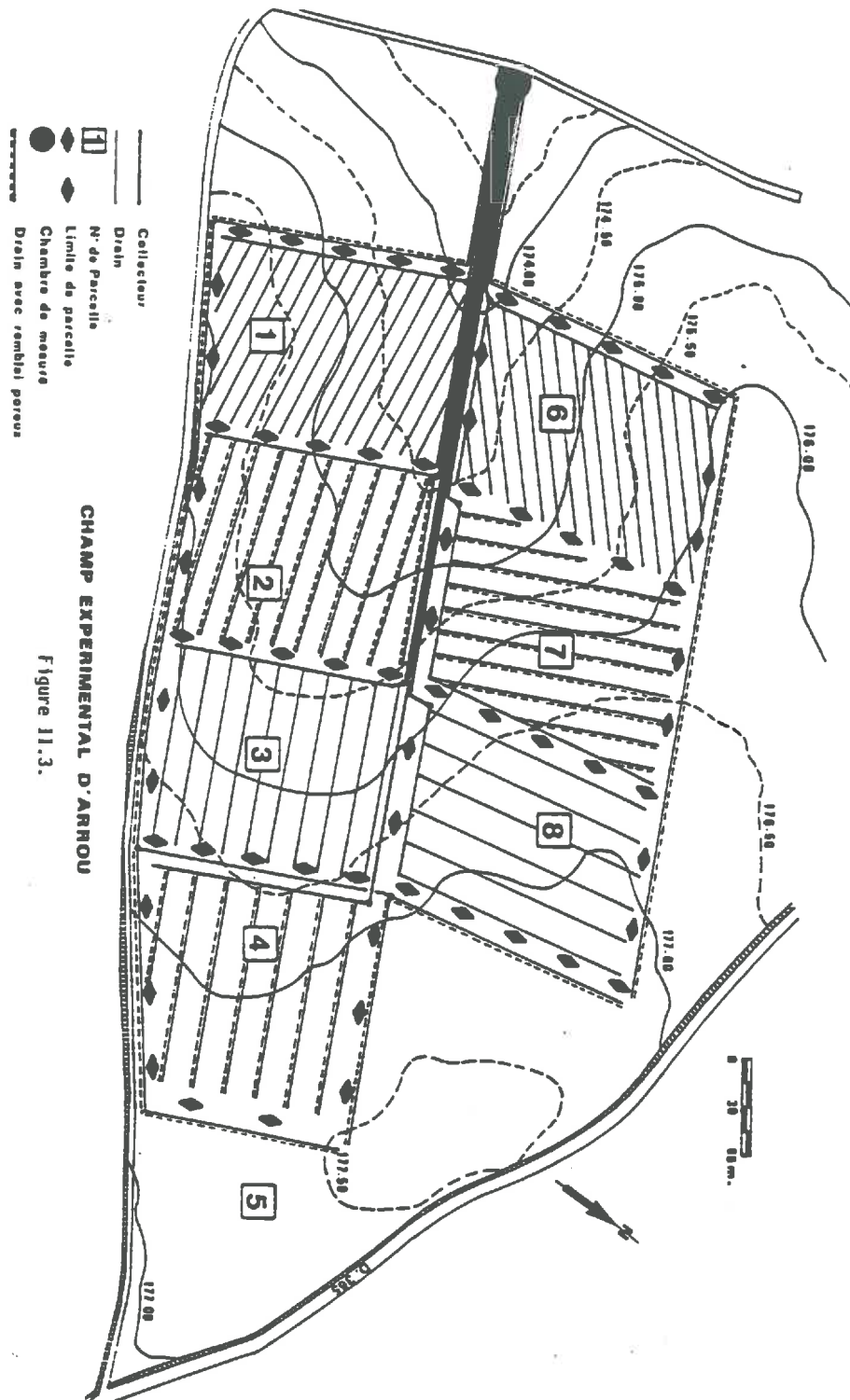


Figure 1.1 : Champ expérimental d'Arrou

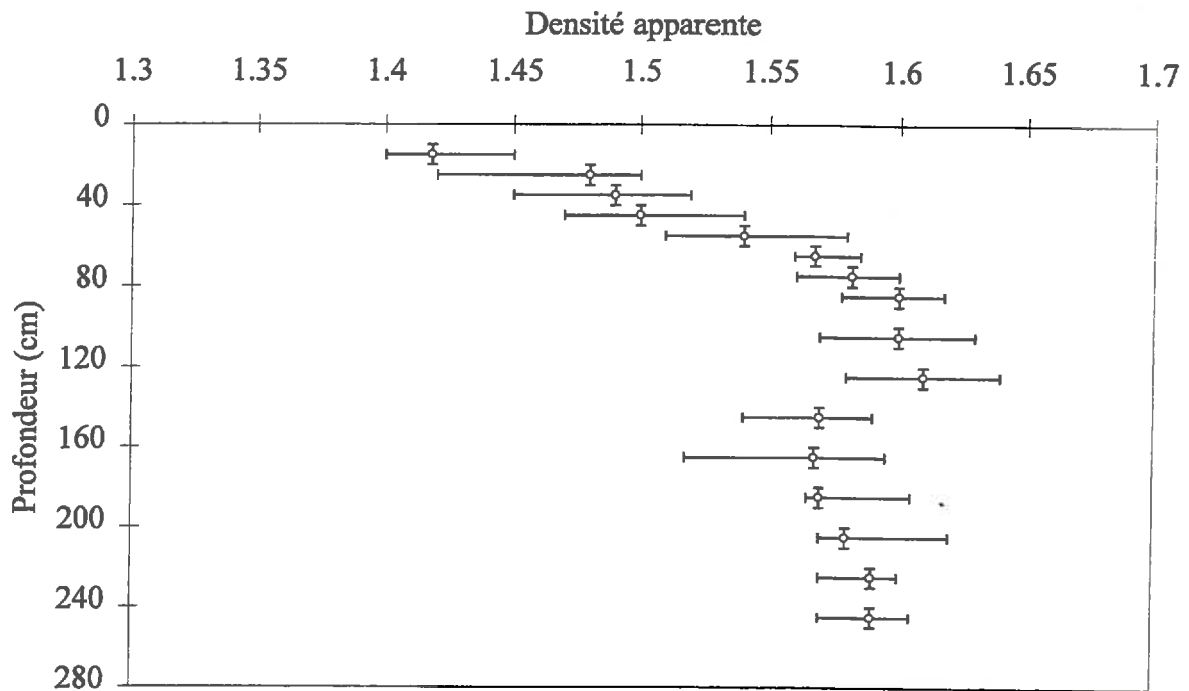


Figure 1.2 : Profil moyen de densité sèche apparente (moyenne sur les parcelles 1, 3 et 4)

Profondeur (cm)	Éléments grossiers 2 - 20 mm (%)	Granulométrie ( $\mu\text{m}$ )					Texture GEPPA
		Argile (%)		Limons (%)		Sables (%)	
		0 - 2	2 - 20	20 - 50	50 - 200	200 - 2000	
0 - 10	0	24.2	30.1	39.5	2.4	2.8	La
10 - 20		23.2	32.3	37.9	3.1	3.5	La
20 - 30		29.3	31.3	32.3	3.6	3.5	Al
30 - 40		35.3	30.2	27.3	3.9	3.4	A
40 - 50		32.2	31.3	30.8	3.3	2.4	A
50 - 60		37.8	26.6	30.7	2.9	2.0	A
60 - 70		34.5	29.1	31.7	3.0	1.5	A
70 - 80		28.5	37.8	29.5	2.9	1.4	Al
80 - 90		33.9	29.9	31.9	2.7	1.7	Al
90 - 100	5	31.8	32.3	31.3	2.8	1.8	Al
100 - 110		34.1	31.0	29.9	2.8	2.2	Al
110 - 120		31.2	35.9	27.6	2.9	2.4	Al

Tableau 1.1°: Analyses granulométriques du champ d'Arrou

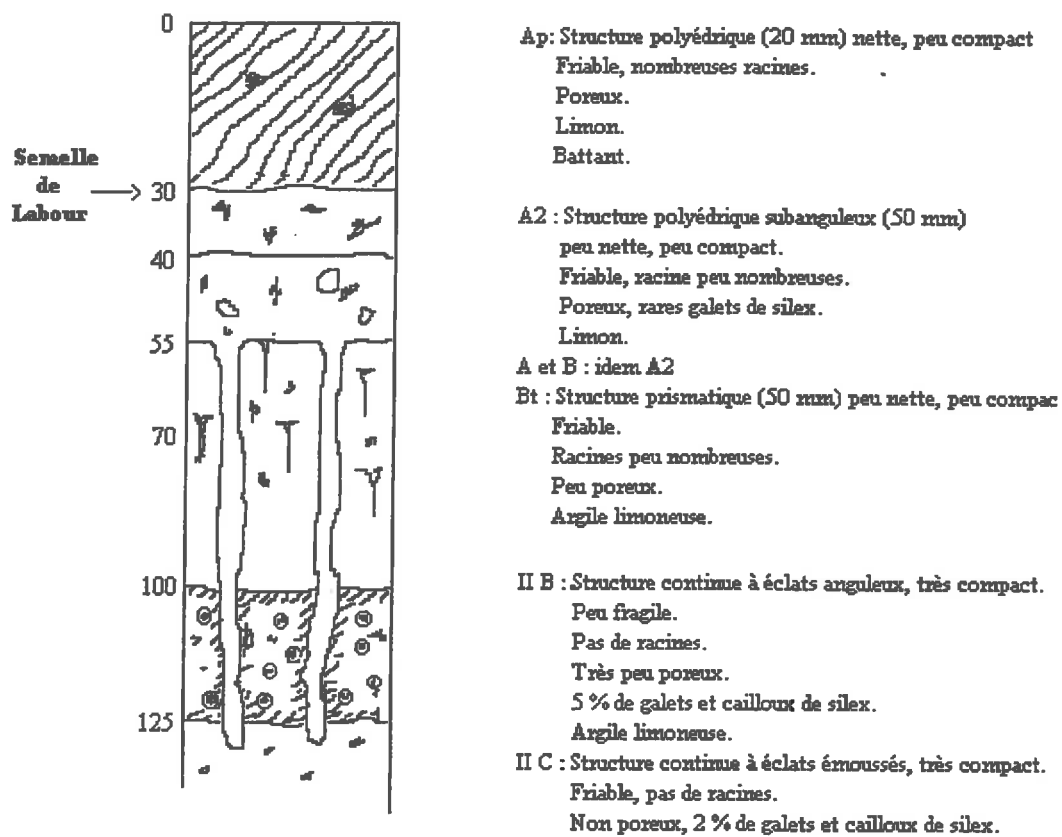


Figure 1.3 : Profil pédologique de la parcelle 1 (d'après Cestre et Vincent, non publié)

## 1.2 - Données expérimentales disponibles sur le site d'Arrou

Campagne	Numéro de parcelle drainée							Parcelle témoin	Débit
	1	2	3	4	6	7	8		
1974-1975 (M)	0 <sup>1</sup>  0.5 <sup>3</sup>  1.5 <sup>1</sup>  2.5 <sup>1</sup>  5	-	-	0 <sup>1</sup>  1 <sup>1</sup>  2.5 <sup>1</sup>  4 <sup>1</sup>  6.5 <sup>1</sup>  10	-	-	-	-	o
1975-1976 (M)	0 <sup>1</sup>  0.5 <sup>1</sup>  2.5 <sup>1</sup>  5	-	1.5 <sup>3</sup>  4.5 <sup>1</sup>  7.5	0.5 <sup>1</sup>  2.5 <sup>1</sup>  5 <sup>1</sup>  10	-	-	-	oui	o
1976-1977 (M)	0.5 <sup>1</sup>  2.5 <sup>1</sup>  5	-	1.5 <sup>3</sup>  4.5 <sup>1</sup>  7.5	0.5 <sup>1</sup>  2.5 <sup>1</sup>  5 <sup>1</sup>  10	-	-	-	oui	o
1977-1978 (M)	0.5 <sup>1</sup>  0.5 <sup>1</sup>  5	-	1.5 <sup>3</sup>  4.5 <sup>1</sup>  7.5	0.5 <sup>1</sup>  2.5 <sup>1</sup>  5 <sup>1</sup>  10 <sup>2</sup>	-	-	-	oui	o
1978-1979	0 <sup>s</sup>  0 <sup>1</sup>  0.5 <sup>1</sup>  2.5 <sup>1</sup>  5 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-	oui	o
1979-1980	0 <sup>1</sup>  0.5 <sup>1</sup>  2 <sup>1</sup>  5 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-	oui	o
1980-1981	0 <sup>1</sup>  0.5 <sup>1</sup>  2 <sup>1</sup>  5 <sup>1</sup>	-	0 7.5	0 10	-	-	-	oui	o
1981-1982	0 <sup>1</sup>  0.2 <sup>1</sup>  0.5 <sup>1</sup>  5 <sup>1</sup>  5 <sup>s2</sup>	-	-	0 <sup>2</sup>	5	-	10 <sup>s</sup>	oui	o
1982-1983	0 <sup>1</sup>  0.5 <sup>1</sup>  5 <sup>1</sup>  5 <sup>s3</sup>	-	-	-	5 5 <sup>s</sup>	-	10 10 <sup>s</sup>	oui	oui
1983-1984	5 <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	oui	oui
1984-1985	0 0.1 <sup>1</sup>  5 <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	oui
1985-1986	0 <sup>s</sup>  0 <sup>3</sup>  0.5 <sup>3</sup>  1.5 <sup>1</sup>  5 <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	o
1986-1987	0 <sup>s1</sup>  0 <sup>4</sup>	-	-	-	-	-	-	-	o
1987-1988	-	-	-	-	-	-	-	-	o
1988-1989	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1989-1990	-	-	-	-	-	-	-	-	o
1990-1991	-	-	-	-	-	-	-	-	o
1991-1992	-	-	-	-	-	-	-	-	o
1992-1993	-	-	-	-	-	-	-	-	o
1993-1994	0 5	-	-	-	-	-	-	-	o
1994-1995	-	-	-	-	-	-	-	-	o

(\*) : Donnée manquantes : 1982-83, parcelles 3 et 7 ; 1983-84, parcelle 3 et 1984-85 parcelles 2,3,4 et 7

Tableau 1.2 : Données piézométriques et débitométriques disponibles sur le site expérimental (Les chiffres représentent la distance de la mesure par rapport au drain, le débit est mesuré pour toutes les parcelles, (M) : mesures manuelles, <sup>s</sup> : piézomètres de surface, <sup>1</sup> : nombre de répétitions)

Les données sont disponibles, en moyenne, sur une période s'étalant entre le mois de novembre et de mai. Le pas de temps de mesures, lorsque les mesures sont réalisées de façon automatique, est horaire.

Campagne	Date de début	Date de fin	Périodes ou dates de données manquantes
1974-1975	11 nov. 1974	22 juin 1975	complet
1975-1976	10 nov. 1975	12 avr. 1976	complet
1976-1977	13 déc. 1976	22 mai 1977	complet
1977-1978	31 oct. 1977	07 juin 1978	complet
1978-1979	11 déc. 1978	29 juin 1979	complet
1979-1980	19 nov. 1979	21 mai 1980	complet
1980-1981	11 nov. 1980	31 mai 1981	complet
1981-1982	16 nov. 1981	30 mai 1982	complet
1982-1983	01 nov. 1982	05 juin 1983	complet
1983-1984	02 nov. 1983	07 juin 1984	le 30 mars 1984 ; du 14 au 24 avr. 1984 ; du 03 au 11 mai 1984
1984-1985	13 nov. 1984	25 jui. 1985	complet
1985-1986	04 déc. 1985	23 juin 1986	du 06 au 07 mai 1986
1986-1987	19 nov. 1986	16 avr. 1987	complet
1987-1988	30 nov. 1987	27 mai 1988	complet
1988-1989	-	-	
1989-1990	10 janv. 1990	02 mai 1990	complet
1990-1991	17 oct. 1990	04 jui. 1991	complet
1991-1992	11 oct. 1991	20 déc. 1991	du 20 nov. au 16 déc. 1991
1992-1993	19 nov. 1992	29 juin 1993	manque du 07 déc. 1992 au 29 juin 1993
1993-1994	06 oct. 1993	23 juin 1994	du 13 nov. 1993 au 04 janv. 1994 ; du 21 fév. au 23 juin 1994
1994-1995	-	-	

Tableau 1.3 : Campagnes de données pluviométriques disponibles

Campagne	Rendement			Peuplement				Biomasse et composantes de rendement	Cartographie racinaire	Notations maladies
	P	D	ID	levée		récolte				
				D	ID	D	ID			
1974-1975		TP		TP				-	-	TP
1975-1976		TP		TP				-	-	-
1976-1977		TP		TP				-	-	-
1977-1978		TP		TP				-	-	TP
1978-1979		-		-				-	-	-
1979-1980		-		-				-	-	-
1980-1981	-	TP	TP	6, 7 et 8				-	-	-
1981-1982		-		-				-	-	-
1982-1983		1 et 5		1 et 5				1 et 5	1 et 5	1 et 5
1983-1984		-		-				-	-	-
1984-1985		-		-				-	-	-
1985-1986		-		-				-	-	-
1986-1987		-		-				-	-	-
1987-1988		-		-				-	-	-
1988-1989		-		-				-	-	-
1989-1990		-		-				-	-	-
1990-1991		-		-				-	-	-
1991-1992		-		-				-	-	-
1992-1993		-		-				-	-	-
1993-1994		1		1				1	1	1
1994-1995		-		-				-	-	-

Tableau 1.4 : Données agronomiques disponibles sur le site expérimental (P : Parcelle, D : Drain, ID : Inter-drain, TP : Toutes Parcelles)

Tableau 1.5 : Données agronomiques disponibles pour la culture de blé d'hiver, la densité levée est exprimée en nombre de plantes par m<sup>2</sup>, la masse de 1000 grains (PMG) en gramme, le rendement en quintaux par hectare

**Campagne 74-75**

Apport Tallage 24/03/1975 67 unités sous forme de complet en couverture  
 Montaison 28/04/1975 73 unités sous forme d'ammonitrate

Parcelle	Ecartement	Variétés	Semis	Densité levée	Epis/m <sup>2</sup>	Rendement	
						Drain	Inter-drain
8	20	Hardi	05/11/1974	280	530-690	57	55
4	20	Hardi	05/11/1974	245	620-660	53	49
3	15	Hardi	05/11/1974	275	575-690	56	55
7	15	Talent	24/11/1974	265	520-620	49	41
2	15	Talent	24/11/1974	265	520-550	51	49
6	10	Hardi	05/12/1974	230	460-490	57	57
1	10	Hardi	05/12/1974	230	460	48	49
5		Hardi	05/12/1974	240	345-515		

**Campagne 75-76**

Apport Au total : 150 unités d'azote en deux apports

Parcelle	Ecartement	Variétés	Semis	Densité levée	Epis/m <sup>2</sup>	Rendement	
						Drain	Inter-drain
8	20	Durtal	fin octobre	190	425	32	31
7	15	Durtal	fin octobre	190	425	29	29
6	10	Durtal	fin octobre	190	425	29	29



Campagne 77-78

Apport Non drainé 03/05/1978 50 unités d'azote  
 Drainé 19/03/1978 88 unités d'azote  
 09/05/1978 99 unités d'azote

Parcelle	Ecartement	Variétés	Semis	Densité levée	Epis/m <sup>2</sup>	Rendement	Drain	Inter-drain
8	20	Talent	07/11/1977	287	720		76	66
4	20	Talent	07/11/1977	287	720		72	69
3	15	Talent	07/11/1977	287	720		74	71
7	15	Talent	07/11/1977	287	700		75	73
2	15	Talent	07/11/1977	287	780		76	74
6	10	Talent	07/11/1977	287	530		76	74
1	10	Talent	07/11/1977	287	600		75	76
5		Talent	07/11/1977	287	480		36	

Campagne 80-81

Apport 24/02/1981 92 unités d'azote ammonitrate  
 27/03/1981 90 unités d'azote

Parcelle	Ecartement	Variétés	Semis	Densité levée	Epis/m <sup>2</sup>	PMG	Rendement	
8	20	Hardi	22/11/1980	190	Parcelle	37	48	
					Drain		516	53
					Inter-drain		384	44
7	15	Hardi	22/11/1980	190	Parcelle	35	57	
					Drain		645	59
					Inter-drain		525	54
6	10	Hardi	22/11/1980	190	Parcelle	37	57	
					Drain		591	60
					Inter-drain		558	54

### Campagne 82-83

Apport

03/03/1983 Au total : 189 unité d'azote au total, non drainé  
14/04/1983  
25/02/1983 Au total : 170 unité d'azote au total, drainé  
07/04/1983

Parcelle	Ecartement	Variétés	Semis	Densité levée	Epis/m <sup>2</sup>	grains/épis	PMG	Rendement
5		Talent	30/10/1982	226				60
1	10	Talent	30/10/1982	249	498	37,8	24,5	77
					420	37,8	23,7	67
					Inter-drain			

### Campagne 93-94

Apport

08/03/1994 61 unités d'azote (Ammonitrate)  
18/03/1994 118 unités d'azote (NO<sub>3</sub> liquide)

Parcelle	Ecartement	Variétés	Semis	Plante /m <sup>2</sup>	Epis/m <sup>2</sup>	grains/épis	PMG	Rendement
1	10	Soisson	30/10/1982	320	477	35,6	39	57
					404	35,1	39	66
					Inter-drain			56

### 1.3 - Etalonnage de la sonde neutronique

Les mesures d'humidité volumique sont effectuées à l'aide du système Solo 40. Il utilise le phénomène de diffusion élastique des neutrons dans la matière. La sonde neutronique est équipée d'une source radioactive d'Amercium-Berilium émettrice de neutrons rapides dont l'énergie moyenne est 5 MeV. Les neutrons rapides sont ralentis (thermalisés) par chocs successifs sur les atomes du milieu. Les noyaux d'hydrogène sont ceux qui ont l'effet le plus thermalisant, leur masse est comparable à celles des neutrons. Dans les sols agricoles la majeure partie des atomes d'hydrogène est incluse dans les molécules d'eau, si bien que le ralentissement des neutrons rapides est proportionnel au pourcentage d'humidité du sol.

Une courbe d'étalonnage du sol appropriée permet de déterminer l'humidité volumique à partir de la vitesse de comptages des neutrons thermalisés. La méthode d'étalonnage utilisée est la méthode gravimétrique. Celle-ci consiste en une série de prélèvements de sol à des teneurs en eau pondérale le plus variables possibles. L'humidité pondérale est déterminée par pesage des échantillons avant et après séchage dans une étuve à 105°C pendant 48h. Le calcul de l'humidité volumique nécessite la connaissance de la densité sèche apparente du sol.

La courbe d'étalonnage est la fonction décrivant la relation entre la teneur en eau volumique du sol et le nombre de comptage neutronique correspondant. Son expression est :

$$C_n = a * H_v + b$$

où  $H_v$  est l'humidité volumique du sol,  $C_n$  est le nombre de neutrons thermalisés par seconde  $a$  et  $b$  sont des paramètres calés sur une série de données expérimentales.

Les mesures sont réalisées à différentes profondeurs dans le sol. Les données ne permettent pas de mettre en évidence des différences significatives entre les paramètres de la droite d'étalonnage par horizon. Une seule droite d'étalonnage est donc utilisée (Figure 1.4). Les résultats du calage sont présentés dans le Tableau 1.6. La répartition des résidus est relativement homogène et ne met pas en évidence de divergence pour les faibles et fortes valeurs d'humidité (Figure 1.5).

a	Erreur standard	b	Erreur standard	n	Estimation de l'écart-type résiduel	
0.1435*	0.01	-25.78**	4.59	43	2.25	0.

Tableau 1.6 : Résultat de la droite d'étalonnage de la sonde neutronique,  $n$  est le nombre d'observation,  $r^2$  est le coefficient de détermination, \* et \*\* significatif à 5 et 1%

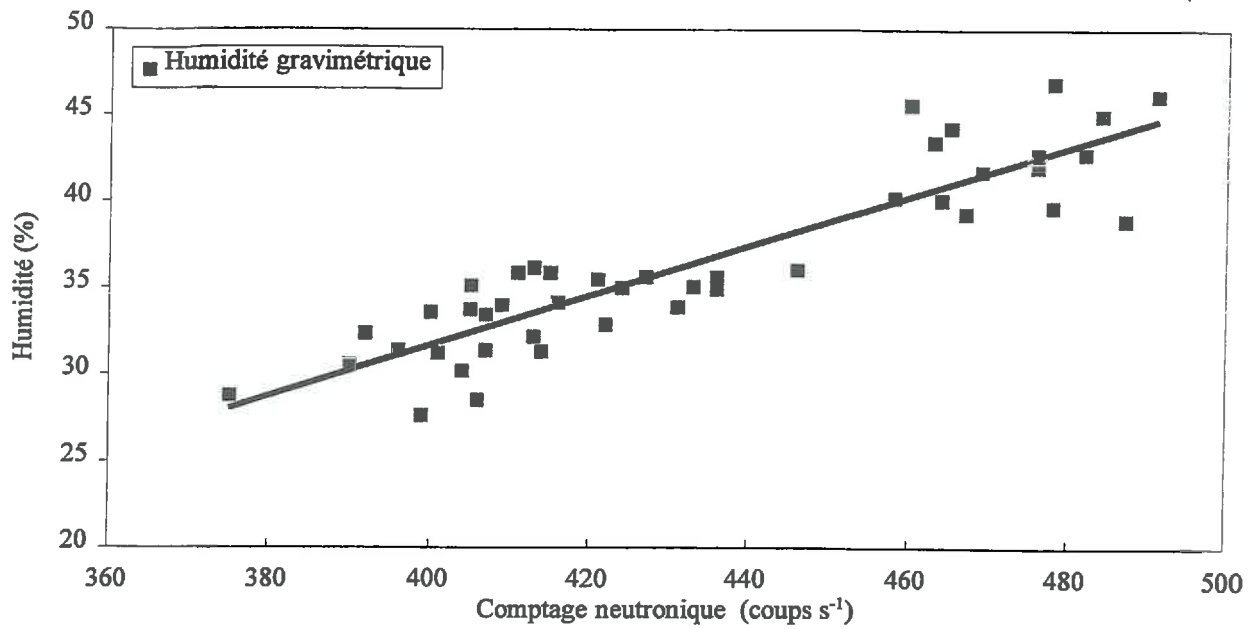


Figure 1.4 : Droite d'étalonnage de la sonde neutronique, site expérimental d'Arrou, campagne 1993-1994

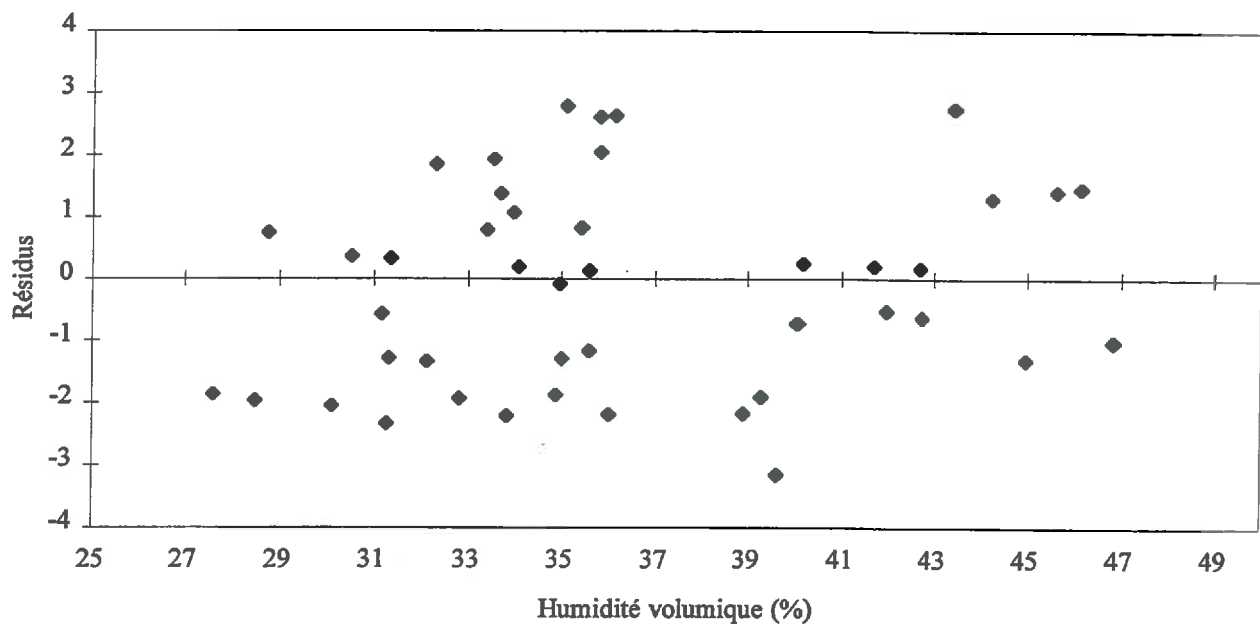


Figure 1.5 : Répartition des résidus

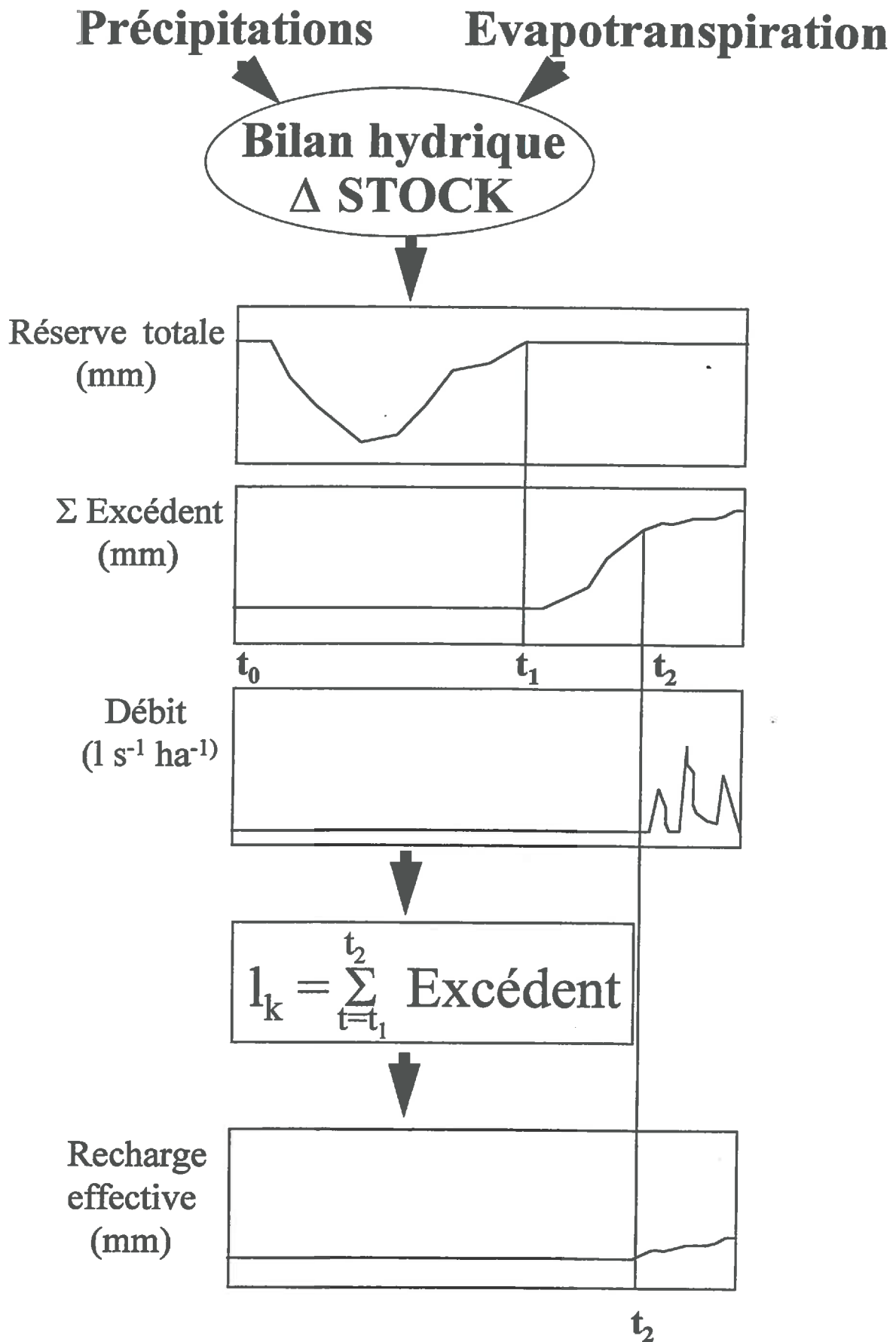
## ANNEXE 3.1

CARACTERISTIQUES DES CAMPAGNES  
HYDROMETRIQUES,  
SITE EXPERIMENTAL D'ARROU  
PARCELLE 1, 1974-1994

### 3.1 - Caractéristiques des campagnes hydrométriques, site expérimental d'Arrou, parcelle 1, 1974-1994

Campagne	Dates						Campagne						Saison de drainage intense						
	Maximum de déficit hydrique	Amorce de drainage	Début SDI	Fin SDI	Fin de la saison de drainage		P (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Durée (j)	CR (Débit/P) (%)	CR (%)	ETP (mm)	P (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Durée (j)	CR (Débit/P) (%)	CR (%)
74-75	29-août	15-nov	15-jan	21-avr	18-mai		630	742	75	96	54		159	75	85	96	54	102	
75-76	31-août	02-déc	11-fév	16-fév	09-mar		421	877	3	5	66		24	3	16	5	66	77	
76-77	08-sep	10-jan	24-jan	08-avr	15-avr		971	622	77	74	61		218	77	132	74	61	94	
77-78	26-oct	22-déc	10-jan	31-mar	07-avr		595	637	54	80	87		226	54	197	80	87	115	
78-79	30-nov	29-déc	19-jan	10-avr	08-mai		641	688	58	81	74		221	58	163	81	74	100	
79-80	20-sep	08-déc	09-déc	01-avr	16-avr		754	672	77	114	65		314	77	205	114	65	86	
80-81	18-sep	15-déc	20-déc	28-mar	25-mai		667	643	55	98	70		182	55	127	98	70	100	
81-82	23-sep	01-déc	15-déc	21-jan	01-avr		709	754	8	37	84		124	8	104	37	84	90	
82-83	20-sep	25-nov	06-déc	14-mai	10-jun		856	730	159	159	57		383	159	217	159	57	97	
83-84	23-nov	14-jan	17-jan	06-fév	20-fév		820	916	15	20	77		58	15	45	20	77	104	
84-85	03-sep	06-oct	14-nov	18-avr	08-jun		683	712	121	155	49		305	121	150	155	49	82	
85-86	01-nov	21-jan	24-fév	27-avr	06-mai		442	751	81	62	41		122	81	50	62	41	122	
86-87	15-oct	18-déc	01-jan	07-avr	15-avr		656	667	69	96	25		115	69	29	96	25	64	
87-88	04-oct	30-nov	06-déc	14-fév	26-avr		775	709	26	70	65		267	26	174	70	65	72	
88-89	05-oct						544	835											
89-90	27-oct	24-jan			08-mar		629	993											
90-91	25-oct						476	699											
91-92	21-sep						446	749											
92-93	20-sep	16-nov	02-déc	25-jan	04-mar		548	793	29	54	40		110	29	44	54	40	55	
93-94	06-sep	12-déc	19-déc	03-mar	25-avr		774	644	35	74	78		193	35	151	74	78	96	

## 3.2 - Illustration de la méthode de calcul du paramètre de couplage



## ANNEXE 3.2

### CALAGE DES PARAMETRES

### HYDRODYNAMIQUES

1.1 - Méthode de calage

1.2 - Mise en oeuvre et illustration



## 1.1 Méthode de calage des paramètres hydrodynamique

Le calage des paramètres hydrodynamiques, conductivité hydraulique et porosité de drainage, repose sur l'exploitation de données débitométriques et piézométriques mesurées sur une parcelle drainée. Le cas des sols de Erkin avec les drains sont posés sur l'imperméable constitue un cas particulier. Le fonctionnement du système en régime de tarissement non influencé est alors décrit par une loi en  $\beta$ . Dans un premier temps, nous décrivons les équations du tarissement du débit et de la nappe nécessaires au calage.

- *Lois de tarissement pour les drains posés sur l'imperméable*

➤ *Tarissement de la nappe*

L'expression de la variation de la hauteur de nappe en régime transitoire est :

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{1}{C\mu(H)} [ Rn(t) - J(H) ] \quad (\text{éq. 1.1})$$

$$J(H) = \tilde{K}(H) \frac{H^2}{L^2} \quad (\text{éq. 1.2})$$

En absence de précipitations, nous avons  $Rn(t) = 0$  ; la combinaison des équations 1.1 et 1.2 conduit à :

$$\frac{\tilde{K}(H) H^2}{L^2} = -\mu(H) C \frac{dH(t)}{dt} \quad (\text{éq. 1.3})$$

Après séparation des variables, cette équation est intégrée sur l'intervalle de temps  $[0,t]$ , la hauteur de nappe initiale  $H(0)$  étant notée  $H_0$ . Utilisant les propriétés particulières des sols de Erkin, on écrit :

$$\tilde{K}(H) = \tilde{K}(H_0) \left( \frac{H}{H_0} \right)^m \quad (\text{éq. 1.4})$$

$$\mu(H) = \mu(H_0) \left( \frac{H}{H_0} \right)^p \quad (\text{éq. 1.5})$$

L'expression (3.3) devient, après réarrangement des termes :

$$\frac{\tilde{K}(H_0)}{\mu(H_0)} \frac{1}{C L^2} \frac{1}{H_0^{m-p}} dt = -\frac{dH}{H^{2+m-p}} \quad (\text{éq. 1.6})$$

L'intégration entre les bornes  $t = 0$  et  $t$  conduit à l'expression suivante :

$$(1+m-p) \frac{\tilde{K}(H_0)}{\mu(H_0)} \frac{1}{C L^2} \frac{1}{H_0^{m-p}} t = \frac{1}{H^{1+m-p}} - \frac{1}{H_0^{1+m-p}} \quad (\text{éq. 1.7})$$

Après réarrangement des termes, il vient

$$\boxed{H(t) = \frac{H_0}{(1 + \beta t)^{\frac{1}{1+m-p}}}} \quad (\text{éq. 1.8})$$

avec

$$\beta = (1 + m - p) \frac{\tilde{K}(H_0) H_0}{\mu(H_0) C L^2} \quad (\text{éq. 1.9})$$

### ➤ *Tarissement des débits*

Le débit surfacique est donné par l'équation suivante

$$Q(t) = A \frac{\tilde{K}(H) H^2}{L^2} \quad (\text{éq. 1.10})$$

En utilisant les propriétés des sols de Erkin, il vient

$$Q(t) = Q_0 \left( \frac{H}{H_0} \right)^{2+m} \quad (\text{éq. 1.11})$$

où  $Q_0$  désigne le débit surfacique à l'instant  $t = 0$ .

Cette expression combinée avec l'équation (3.8) conduit à la loi de tarissement des débits, soit :

$$\boxed{Q(t) = \frac{Q_0}{(1 + \beta t)^2}} \quad (\text{éq. 1.12})$$

Cette loi de tarissement de la nappe et du débit, quand les drains reposent sur l'horizon imperméable, est qualifiée de loi en  $\beta$ . Ce paramètre unique de description du tarissement en fonction du temps peut être déterminé par un ajustement statistique sur une courbe de variation des débits non influencés, en fonction du temps. La méthode consiste à effectuer une régression linéaire sur la relation  $Y=f(X)$  où  $X$  désigne le temps  $t$  et  $Y$ , la variable  $\frac{1}{\sqrt{Q(t)}}$ . La pente de la

droite de régression correspond à  $\frac{\beta}{\sqrt{Q_0}}$ , l'ordonnée à l'origine,  $\frac{1}{\sqrt{Q_0}}$ .

## 1.2 Mise en oeuvre et illustration de la méthode

Le calage est réalisé à partir d'un épisode de tarissement, débitmétrique et piézométrique non influencé par la pluie et l'ETP (Figure 1.1).

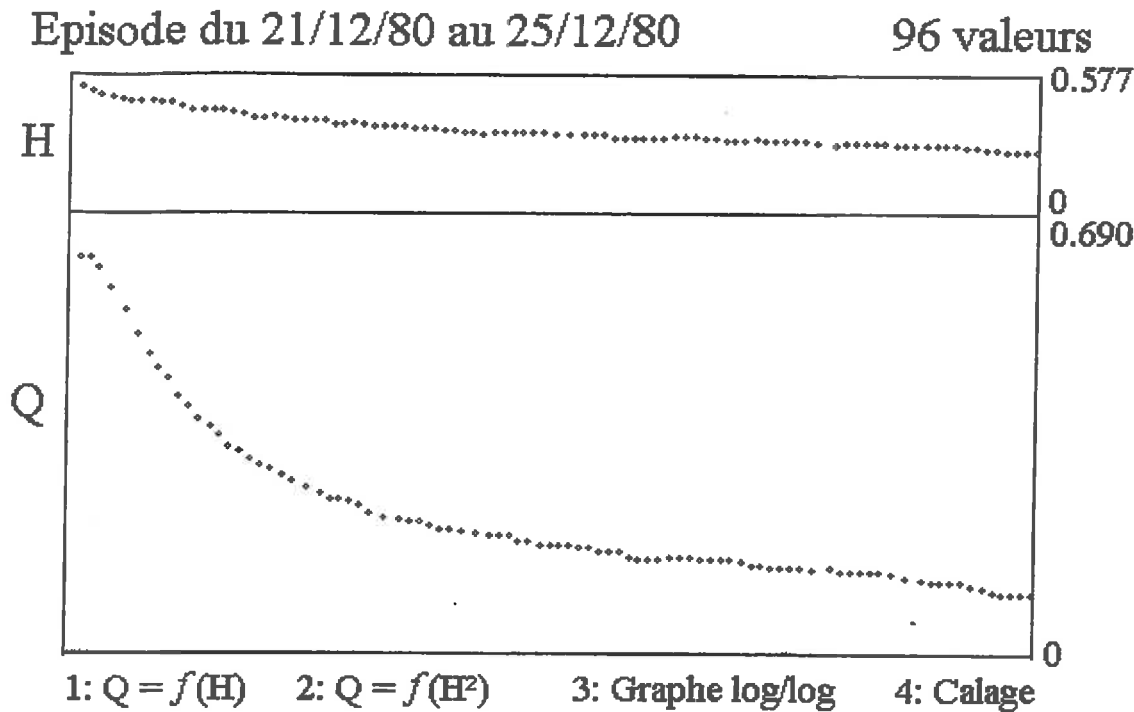


Figure 1.1 : Episode de tarissement non influencé,  $H$  est la hauteur de la nappe et  $Q$  le débit à la sortie du réseau de drainage

Le choix de l'épisode de drainage obéit à quelques règles qui permettent de s'assurer de la fiabilité du calage effectué et d'obtenir une bonne représentativité des paramètres. Nous ne considérons que les courbes de tarissements purs à savoir non influencé par la pluie ni par l'évapotranspiration. Les épisodes sont sélectionnés en période hivernale lorsque l'ETP est négligeable. Dans de telles conditions, elle ne participe pas au rabattement de la nappe. La vitesse de rabattement de la nappe est alors due aux propriétés hydrodynamiques du sol. En raison du travail du sol, les propriétés hydrodynamiques de la couche labourée sont radicalement différentes du reste du profil. Sur cet horizon, on suppose qu'elles sont homogènes. Le calage est donc réalisé sur la partie de l'épisode correspondant au rabattement de la nappe au dessous de la couche labourée. Les équations utilisées sont les suivantes :

$$Q = \frac{Q_0}{(1 + \beta t)^2} \quad (\text{éq. 1.13})$$

d'où :

$$\frac{1}{\sqrt{Q}} = \frac{1}{\sqrt{Q_0}} + \frac{1}{\sqrt{Q_0}} \beta t \quad (\text{éq. 1.14})$$

$$\text{où } \beta = \frac{1}{C L^2} \frac{\tilde{K}(H_0)}{m(H_0)}$$

Dans une première étape, l'équation (1.14) est ajustée par régression linéaire aux points  $Q(t)$  l'ajustement donne les valeurs de  $Q_0$ , et de  $\beta$  (Figure 1.2a).

En utilisant les propriétés des sols de ERKIN, la combinaison des équations (1.4) et (1.10) conduit à :

$$Q(t) = \frac{A \tilde{K}(H_0)(H_0)}{L^2} \frac{H(t)^{2+m}}{(H_0)^m} \quad (\text{éq. 1.15})$$

$$\log Q(t) = (2+m) \log H(t) + \log \lambda \quad (\text{éq. 1.16})$$

$$\text{où } \lambda = \frac{A \tilde{K}(H_0)}{4 L^2 (H_0)^m}$$

L'ajustement par régression linéaire de l'équation (1.16) aux points  $Q(H)$  conduit à la valeur de l'ordonnée à l'origine,  $\log \lambda$ , et permet de calculer la valeur de  $\lambda$ . La pente de la droite correspondant au terme  $(m+2)$  permet de calculer la valeur du coefficient d'hétérogénéité verticale,  $m$  (Figure 1.2b). La valeur de  $H_0$  est obtenue par résolution de l'équation (3.16) avec  $Q = Q_0$ .  $\tilde{K}(H_0)$  et  $\mu(H_0)$  sont respectivement déduits des valeurs de  $\lambda$  et de  $\beta$ .

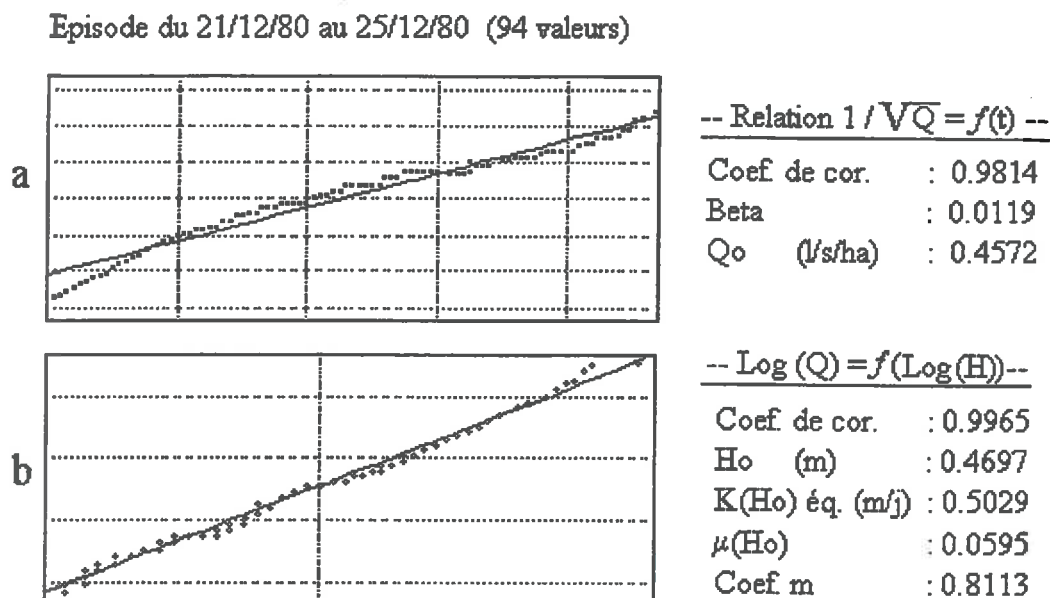


Figure 1.2 : Droites d'ajustement linéaires des équations 1.14 et 1.16

Le modèle "RELAQH" développé à la division drainage du Cemagref, permet de réaliser le calage des paramètres hydrodynamiques suivant la démarche présentée ci-dessus. Il permet en outre de sélectionner différents épisodes de tarissement grâce à une interface graphique et de visualiser les différents ajustements.

## ANNEXE 4.1

CARACTERISATION DES PERIODES DE  
FONCTIONNEMENT DU DRAINAGE POUR  
L'ENSEMBLE DE PARCELLES DU SITE  
EXPERIMENTAL D'ARROU

Parcelle 1 (10 m)							
Campagne	Date d'amorce de drainage	Date début SDI	Date fin SDI	Date fin de drainage	Durée de la SDI (j)	Coefficient de restitution (%)	Pluie sur la SDI (mm)
1974-1975	15/11	15/01	21/04	18/05	96	50	170
1975-1976	02/12	11/02	16/02	09/03	6	67	23
1977-1978	22/12	23/01	31/03	15/04	75	82	232
1980-1981	15/12	15/12	28/03	25/05	115	66	233
1982-1983	25/11	06/12	14/05	10/06	104	58	373
1993-1994	12/12	19/12	03/03	25/04	74	78	193

Parcelle 2 (15 m)							
Campagne	Date d'amorce de drainage	Date début SDI	Date fin SDI	Date fin de drainage	Durée de la SDI (j)	Coefficient de restitution (%)	Pluie sur la SDI (mm)
1974-1975	16/11	15/01	21/04	18/05	96	68	170
1975-1976	02/12	09/02	16/02	08/03	8	74	29
1977-1978	22/12	23/01	31/03	13/04	68	87	232
1980-1981	15/12	15/12	28/03	26/05	115	63	233
1982-1983	24/11	06/12	14/05	08/06	160	53	373
1993-1994	11/12			21/04			

Parcelle 3 (15 m)							
Campagne	Date d'amorce de drainage	Date début SDI	Date fin SDI	Date fin de drainage	Durée de la SDI (j)	Coefficient de restitution (%)	Pluie sur la SDI (mm)
1974-1975	16/11	15/01	19/04	13/05	94	47	170
1975-1976	28/11	12/02	15/02	01/03	4	61	20
1977-1978	27/12	23/01	26/03	-	63	61	225
1980-1981	-	18/12	04/03	24/05	77	23	157
1982-1983	-	-	-	-	-	-	-
1993-1994	15/12			13/04			

Parcelle 4 (20 m)							
Campagne	Date d'amorce de drainage	Date début SDI	Date fin SDI	Date fin de drainage	Durée de la SDI	Coefficient de restitution (%)	Pluie sur la SDI (mm)
1974-1975	16/11	15/01	19/04	13/05	94	32	170
1975-1976	02/12	12/02	14/02	24/02	3	19	20
1977-1978	-	23/01	26/03	11/04	63	60	225
1980-1981	-	17/01	17/03	25/05	91	26	106
1982-1983	-	16/12	11/04	04/06	117	32	250
1993-1994	20/12			13/04			

Parcelle 6 (10)							
Campagne	Date d'amorce de drainage	Date début SDI	Date fin SDI	Date fin de drainage	Durée de la SDI (j)	Coefficient de restitution (%)	Pluie sur la SDI (mm)
1974-1975	16/11	19/04	19/04	15/05	94	52	170
1975-1976	02/12	25/02	25/02	07/03	17	58	38
1977-1978	18/01	23/01	31/03	11/04	68	91	232
1980-1981	15/12	18/12	03/04	26/05	107	74	217
1982-1983	13/11	06/12	14/05	08/06	160	63	373
1993-1994	09/12			20/04			

Parcelle 7 (15 m)							
Campagne	Date d'amorce de drainage	Date début SDI	Date fin SDI	Date fin de drainage	Durée de la SDI (j)	Coefficient de restitution (%)	Pluie sur la SDI (mm)
1974-1975	16/11	15/01	19/04	17/05	94	49	170
1975-1976	27/11	09/02	25/02	05/03	17	65	38
1977-1978	22/12	23/01	31/03	-	82	92	222
1980-1981	15/12	18/12	03/04	26/05	107	56	217
1982-1983	-	-	-	-	-	-	-
1993-1994	11/12			18/04			

Parcelle 8 (20 m)							
Campagne	Date d'amorce de drainage	Date début SDI	Date fin SDI	Date fin de drainage	Durée de la SDI (j)	Coefficient de restitution (%)	Pluie sur la SDI (mm)
1974-1975	16/11	15/01	21/04	17/05	96	26	170
1975-1976	27/11	11/02	15/02	02/03	5	38	23
1977-1978	23/12	23/01	31/03	-	68	60	232
1980-1981	18/12	18/12	31/03	25/05	104	23	217
1982-1983	08/11	06/12	11/04	28/03	127	41	280
1993-1994	11/12			24/04			

Tableau 1.1 : Périodes de fonctionnement du réseau de drainage et saisons de drainage intense du champ expérimental d'Arrou (adapté d'après Lesaffre, 1988)