

# Rapports PSS N° 11

Production Soudano-Sahélienne (PSS)  
Exploitation optimale des éléments nutritifs en élevage

Projet de coopération scientifique

## Les modèles de simulation de la croissance végétale comme outils de recherche développement

Compte rendu d'un séminaire tenu à Bamako, Mali, du 7 au 8 novembre 1994

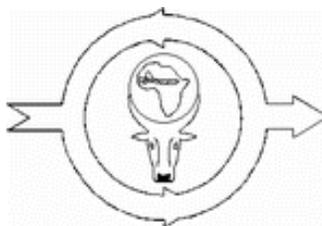
Rédacteurs : J.J.R. Groot<sup>1)</sup> & A.Coulibaly<sup>2)</sup>

Adresse :

1) AB-DLO, B.P. 14, 6700 AA Wageningen, les Pays-Bas

2) Institut d'Economie Rurale (IER), B.P. 258, Bamako, Rép. du Mali

IER, Bamako  
AB-DLO, Wageningen, Haren  
DAN-UAW, Wageningen



P S S

Rapports PSS N° 11

Wageningen, 1995

## Table des matières

- [Préface](#)
  - [1. Le rôle des modèles dans la recherche, dans l'enseignement et dans la planification](#)
    - [Résumé](#)
    - [1.1. Introduction](#)
    - [1.2. Les principaux concepts](#)
      - [1.2.1. Les systèmes](#)
      - [1.2.2. Les modèles de simulation](#)
      - [1.2.3. Exploitation des modèles](#)
      - [1.2.4. Evaluation des modèles](#)
      - [1.2.5. Quelques exemples de modèles de simulation](#)
    - [1.3. Evolution de la modélisation agricole](#)
      - [1.3.1. Les Systèmes d'Information Géographique \(SIG\)](#)
      - [1.3.2. La Programmation Linéaire à Buts Multiples \(PLBM\)](#)
      - [1.3.3. La Télédétection](#)
      - [1.3.4. Convivialité des logiciels](#)
      - [1.3.5. Formation des utilisateurs](#)
    - [1.4. Références](#)

- [2. Développement des paramètres pour des modèles de simulation ; cas des cultures annuelles, pérennes et ligneuses](#)
  - [Résumé](#)
  - [2.1. Introduction](#)
  - [2.2. Structure des modèles de simulation](#)
  - [2.3. Expérimentation](#)
    - [2.3.1. Agroforestérie](#)
    - [2.3.2. Légumineuse pérenne \*Stylosanthes hamata\*](#)
    - [2.3.3. Graminée pérenne \*Andropogon gayanus\*](#)
  - [2.4. Application des modèles](#)
  - [2.5. Bibliographie](#)
- [3. Les modèles de simulation de la croissance végétale comme outil de recherche développement : le cas du développement du sorgho](#)
  - [Résumé](#)
  - [3.1. Introduction](#)
  - [3.2. Photopériodisme et élaboration de modèles](#)
  - [3.3. Photoperiodisme et adaptation au climat](#)
  - [3.4. Conséquences pour les programmes de recherche](#)
  - [3.5. Bibliographie](#)
- [4. Evaluation du modèle de simulation de la croissance et du développement d'\*Andropogon gayanus\*, en zone soudano-sahélienne](#)
  - [Résumé](#)
  - [4.1. Introduction](#)
  - [4.2. Matériels et méthode](#)
    - [4.2.1. Comportement du modèle](#)
    - [4.2.2. Analyse de sensibilité](#)
    - [4.2.3. Validation du modèle](#)
    - [4.2.4. Application du Modèle PGWA](#)
  - [4.3. Résultats et discussion](#)
    - [4.3.1. Comportement du modèle dans trois zones agro-climatiques](#)
    - [4.3.2. Sensibilité du modèle PGWA](#)
    - [4.3.3. Validation : comparaison de données observées et simulées](#)
    - [4.3.4. Estimation pluriannuelle du potentiel productif de l'\*Andropogon\*](#)
    - [4.3.5. Conclusions](#)
  - [4.4. Bibliographie](#)
- [5. Les modèles de simulation comme outils de gestion des sols et de développement agricole : exemple du modèle « Cultures Pluviales du Burkina Faso »](#)
  - [Résumé](#)
  - [5.1. Introduction](#)
  - [5.2. Matériels et méthodes](#)
    - [5.2.1. Modèle](#)
    - [5.2.2. Expérimentation](#)
  - [5.3. Résultats](#)
    - [5.3.1. Calibration](#)
    - [5.3.2. Validation](#)
    - [5.3.3. Illustrations](#)
  - [5.4. Discussion et conclusions](#)
  - [5.5. Remerciements](#)

- [5.6. Références](#)
- [6. Réponse à la photopériode de trois variétés de sorgho au Mali](#)
  - [Résumé](#)
  - [6.1. Introduction](#)
  - [6.3. Matériel et méthode](#)
    - [6.3.1. Dispositif expérimental](#)
    - [6.3.2. Suivi de la phénologie](#)
  - [6.4. Résultats](#)
  - [6.5. Discussion](#)
  - [6.6. Bibliographie](#)
- [7. Les modèles de simulation comme outils pour le zonage agro-climatologique : cas de la production de Sorgho au Mali](#)
  - [7.1. Introduction](#)
  - [7.2. Matériels et méthodes](#)
    - [7.2.1. Le modèle](#)
    - [7.2.2. Les données météorologiques](#)
    - [7.2.3. La description des sols choisis](#)
    - [7.2.4. Les caractéristiques variétales : durée du cycle de croissance](#)
    - [7.2.5. Les techniques culturales : stratégie de semis](#)
    - [7.2.6. Le critère de classement](#)
  - [7.3. Résultats](#)
    - [7.3.1. Stratégie de semis optimal](#)
    - [7.3.2. Durée optimale du cycle de croissance](#)
    - [7.3.3. Le zonage agro-climatologique](#)
    - [7.3.4. Observations sur les résultats de la simulation](#)
  - [7.4. Bibliographie](#)

Rapports du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS)

---

Numéro 11

« The research for this publication was financed by the Netherlands' Minister for Development Co-operation. Citation is encouraged. Short excerpts may be translated and/or reproduced without prior permission, on the condition that the source is indicated. For translation and/or reproduction in whole the Section DST/SO of the aforementioned Minister should be notified in advance (P.O. Box 20061, 2500 EB The Hague). Responsibility for the contents and for the opinions expressed rests solely with the authors; publication does not constitute an endorsement by the Netherlands' Minister for Development Co-operation ».

## Préface

En 1993, du 3 au 15 Mai, un séminaire sur la modélisation et la simulation a été organisé par le projet PSS à Niono. L'objectif de ce séminaire était de former les chercheurs du projet et ceux d'autres institutions à l'utilisation des modèles de croissance des différentes cultures, afin de mieux exploiter les données des essais agronomiques et d'extrapoler les résultats de recherche à des conditions autres que celles des essais. Pendant ce séminaire, 4 groupes de travail ont été constitués. Chaque groupe devait exécuter une étude de cas (adapter et utiliser des modèles de simulation dans le cadre de leur propre recherche).

L'atelier tenue à Bamako du 7 au 8 novembre 1994 était la poursuite du séminaire de Mai 1993. L'objectif de l'atelier était de faire connaître aux collègues chercheurs, les différents modèles de simulation pour plusieurs raisons :

- la méconnaissance des différents modèles disponibles pour les chercheurs ;

- la non prise en compte des préoccupations des chercheurs dans la conception des modèles ;
- la difficulté de compréhension des résultats de simulation et surtout ;
- les bases théoriques de celle-ci.

Pour aboutir à cet objectif, les principes des modèles de simulation et quelques exemples de leur utilisation ont été présentés. Ensuite les représentants de plusieurs organismes internationaux ont présentés l'emploi des modèles dans leur recherche. Les résultats des études de cas formulés en 1993 ont été présentés pour démontrer l'utilité des modèles dans les situations réelles.

Enfin, pour approfondir les connaissances sur les modèles, les participants à l'atelier de Mai 1993 ont été invités à Niono pour la poursuite de leur formation pratique.

## 1. Le rôle des modèles dans la recherche, dans l'enseignement et dans la planification

F.W.T. Penning de Vries<sup>1)</sup> et R. Rabbinge<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> C.T. de Wit Graduate School Production Ecology et DLO-Institut de Biologie Agronomique et de Fertilité du Sol, Wageningen

<sup>2)</sup> C.T. De Wit Graduate School Production Ecology et Département d'Ecologie de Production Théorique

### Résumé

Les modèles sont des outils qui intègrent les connaissances acquises sur les systèmes agricoles. Ils sont utilisés pour étudier les systèmes cultureux, biologiques et écologiques, pour prédire leur évolution, et pour explorer leur comportement.

Les modèles explicatifs connaissent trois phases de développement : modèles préliminaires, compréhensifs et sommaires. Les importances données à ces phases diffèrent considérablement selon qu'il s'agit des applications pratiques, de l'enseignement ou de la recherche scientifique. La nature des modèles exploratoires et prédictifs est différente de celle des modèles d'analyse et de recherche disciplinaires.

La modélisation a su s'imposer partout comme outil de recherche. Elle a aussi sa place dans les programmes d'enseignement et les décisions stratégiques s'appuient de plus en plus sur elle. Cette étude présente des modèles utilisés dans la recherche (définition des priorités, développement scientifique), dans l'enseignement, ainsi que pour des études exploratoires (évaluation quantitative des terres, par exemple).

Les modèles de simulation agricoles continuent d'évoluer. Cependant, la tendance est toujours de les combiner avec d'autres techniques quantitatives modernes. Par exemple, une exploitation combinée de modèles et de techniques des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de Programmation Linéaire (PL) détient un grand potentiel en matière de planification stratégique. Les limites actuelles de ces outils sont cependant généralement minimisées. Des « shells » conviviaux offrent actuellement d'innombrables possibilités de simulation et d'analyse, et le nombre d'applications pourrait par conséquent s'accroître considérablement.

Les contraintes entravant l'application des modèles à grande échelle ont été définies : rareté des données de base, absence de données pour l'évaluation des modèles, manque d'ordinateurs adéquats et nombre insuffisant de scientifiques formés. Le facteur limitant est variable selon les pays. La pénurie de données de base et de personnel formé est le problème le plus fréquemment rencontré, notamment dans les pays en voie de développement.

### 1.1. Introduction

La conception de modèles est un moyen d'intégrer les connaissances disponibles et de les diffuser pour servir à la réalisation

d'objectifs différents. Le processus de modélisation et le produit final sont d'une grande importance, car il s'agit en effet :

- de définir et de catégoriser l'état des connaissances sur le sujet traité ;
- de contribuer à la détermination des priorités de recherche, en aidant à localiser les lacunes dans les connaissances et en stimulant une collaboration scientifique multidisciplinaire, tant sur le plan de la recherche fondamentale qu'appliquée ;
- de stimuler la diffusion des connaissances ;
- de disposer d'un outil qui rend le « savoir » opérationnel et permet d'élaborer des stratégies et de gérer des ressources.

Ce chapitre résume les principaux concepts de la modélisation. Il catégorise en outre les différents modèles en fonction de leurs champs d'application, et délimite ainsi le cadre des chapitres suivants.

Ce n'est pas par hasard que les thèmes abordés sont examinés à la fois dans une optique expérimentale et dans celle de la modélisation. La modélisation est un outil de recherche mondialement reconnu. A l'heure actuelle, son application ne se limite plus à la seule recherche. La modélisation a conquis les programmes d'enseignement et s'est imposée auprès des décideurs. Nous présenterons quelques modèles typiques utilisés dans la recherche, pour la détermination des priorités et le développement des connaissances scientifiques, dans l'enseignement et dans des études exploratoires, pour l'évaluation quantitative des terres, par exemple.

Finalement, nous présenterons brièvement les nouvelles perspectives de liaison des modèles agricoles avec les Systèmes d'Information Géographique (SIG), la Programmation linéaire (PL) et la Télédétection (TD). Les limites d'une application des modèles à grande échelle seront également discutées, les plus contraignantes en particulier, c'est-à-dire la rareté des données de base et le nombre insuffisant de scientifiques capables de modéliser et d'exploiter les outils disponibles.

## 1.2. Les principaux concepts

### 1.2.1. Les systèmes

« Un moyen d'étudier le monde réel est de le diviser en systèmes. La description fonctionnelle d'un système est une fraction de réalité contenant des éléments fortement interactifs mais agissant peu sur son environnement. Quelle fraction du monde réel doit être isolée en système dépend en premier lieu des objectifs visés. Cependant, certains éléments d'un système interagissent plus que d'autres et co-déterminent la forme d'un système. Par conséquent, lorsqu'on délimite un système, on doit tenir compte de ses contours naturels et intégrer toutes ses parties essentielles » (Penning de Vries, 1983). Les frontières délimitant un système ne sont pas fixes, mais dépendant de l'objectif visé. Dans une situation idéale, les frontières sont délimitées de sorte que l'environnement influence les processus du système, sans que le système puisse influencer son environnement.

Une délimitation théorique des systèmes agricoles relative à la croissance des cultures labourées a été proposée par De Wit (dans : de Wit & Penning de Vries, 1982). De Wit distingue quatre niveaux de production et systèmes correspondants (pour les diagrammes de référence, cf Penning de Vries *et al.*, 1989) :

*Niveau de production 1* : croissance dans des conditions non-limitatives. Suffisamment d'eau et d'éléments nutritifs. Les conditions climatiques peuvent influencer le taux de croissance et le limiter. Celui-ci peut varier de 100 à 350 kg ha<sup>-1</sup> j<sup>-1</sup>. Cette situation est parfois réalisée dans les meilleures exploitations agricoles et dans les serres.

*Niveau de production 2* : croissance limitée par le manque d'eau pendant une partie de la saison de végétation. Cette situation s'applique aux sols correctement fertilisés des régions semi-arides et des climats tempérés. Elle n'est pas courante dans les écosystèmes naturels.

*Niveau de production 3* : production limitée par un manque d'éléments nutritifs et parfois d'eau. Cette situation est fréquente dans les systèmes agricoles utilisant peu de fertilisants et dans les écosystèmes naturels.

*Niveau de production 4* : production limitée par la disponibilité en phosphore. Le taux de croissance oscille entre 10 et 50 kg ha<sup>-1</sup> j<sup>-1</sup> pendant une courte saison de végétation. Cette situation est caractéristique des régions intensivement exploitée, sans épandage de fertilisants.

En pratique, plusieurs contraintes peuvent limiter la croissance des cultures pendant la saison de végétation et des attaques parasitaires peuvent se produire à tout moment. Il n'est donc pas toujours économique de chercher à atteindre des rendements potentiels. Rabbinge (1993) a élaboré une distinction (Fig. 1.1) :

*Figure 1.1. La relation entre la production potentielle, réalisable et réelle et les facteurs de croissance déterminants, limitants et réducteurs (Source Rabbinge, 1993).*

*Rendement potentiel* : même définition que celle du Niveau de production 1 de De Wit. Les facteurs susceptibles d'influencer le rendement sont les variables météorologiques, y compris le niveau de CO<sub>2</sub>, ainsi que les caractéristiques des espèces. La modélisation d'un rendement potentiel requiert, en particulier, des connaissances d'agrométéorologie et de physiologie des plantes cultivées.

*Rendement réalisable* : inférieur de 50 à 20 % environ au rendement potentiel. Cette baisse est due à des facteurs limitants tels que l'eau, l'azote ou le phosphore. Ces contraintes peuvent être en grande partie levées par des mesures d'accroissement du rendement (fertilisation, irrigation). Ce niveau de rendement est atteint par les meilleures exploitations agricoles. Outre la physiologie des cultures et l'agrométéorologie, la modélisation du rendement réalisable requiert des connaissances de physique et de chimie du sol. Le « rendement réalisable » comprend les niveaux de production 2, 3 et 4 de De Wit.

*Rendement réel* : inférieur de 50 à 0% environ au rendement réalisable, du fait de facteurs réducteurs tels que les mauvaises herbes, les parasites et les polluants. Une baisse de rendement peut être évitée par des mesures de protection des cultures, par exemple de lutte antiparasitaire intégrée. Cette situation est valable pour un grand nombre de cultures dans le monde entier.

Les systèmes de production agricole peuvent aussi être catégorisés par niveaux hiérarchiques. Il est typique de constater qu'aux niveaux supérieurs, la dimension physique (« taille »), l'échelle des temps dans lesquels les processus clés réagissent et progressent (« coefficient de temps ») et la complexité du système (nombre de disciplines impliquées) s'accroissent. La Fig. 1.2 présente les niveaux couramment appliqués dans la recherche agricole. Des principaux niveaux hiérarchiques sont les suivants :

*Figure 1.2. Les échelles temporelle et spatiale des unités d'analyse dans l'écologie de production. (Source : Graduate School Production Ecology, Wageningen).*

*Niveau essai* : le système couvre une superficie de plusieurs mètres carrés ; les processus s'accompagnent de coefficients de temps caractéristiques, exprimés en secondes ou en heures. Plusieurs études de simulation portent sur les processus de base, tels que le transport dans le sol ; l'interception, l'absorption, la compétition et la photosynthèse au niveau de la plante ; les variations temporelles des parasites, etc.

*Niveau champ* : le système couvre une superficie d'un hectare environ ; les processus s'accompagnent de coefficients de temps caractéristiques, exprimés en heures ou en jours ; les études portent sur l'intégration des processus de base au niveau du champ, tels que la photosynthèse de la canopie, l'évaporation au champ, la percolation des éléments nutritifs, etc.

*Niveau exploitation agricole* : le système intègre plusieurs champs dans une unité de gestion ; l'horizon de temps s'étend sur plusieurs années et les coefficients de temps caractéristiques s'expriment en jours et en semaines. Outre les processus au niveau du champ, l'aspect socio-économique doit être pris en compte ainsi que la gestion des machines, des stocks, du personnel et des liquidités.

*Niveau régional* : le système comprend toutes les terres d'une région relativement uniforme d'une superficie de plusieurs milliers d'hectares ; le coefficient de temps se mesure en mois ou en années ; l'aspect socio-économique est pris en compte ainsi que les limites relatives aux ressources naturelles (par exemple l'eau) de la région ; les possibilités et les limites sont étudiées et les mécanismes des changements analysés.

## 1.2.2. Les modèles de simulation

Le *modèle* est la représentation schématique d'une conception de système. Dans le monde réel, l'apparence des systèmes biologiques se modifie et leurs modèles sont souvent appelés « dynamiques ». Le changement le plus caractéristique marquant un système de production agricole est la « croissance ». Pour pouvoir analyser des systèmes dynamiques, on part du principe que l'état du système, à un moment donné, peut être décrit quantitativement et que les mutations qu'il subit peuvent être exprimées en termes mathématiques (de Wit & Goudriaan, 1974). On en arrive ainsi à formuler des modèles de simulation à variables distinctes : variables d'état, variables dirigéantes, variables de vitesse et variables auxiliaires. Les variables d'état caractérisent et quantifient l'état du système à un moment donné, par exemple, la quantité de biomasse, la surface des feuilles, la teneur en azote d'une partie du système, etc. Ces valeurs varient selon les principes gérant les processus biochimiques, physiques et physiologiques fondamentaux. Les variables dirigéantes, les variables météorologiques par exemple, expriment l'interférence de l'environnement. Les relations existant entre toutes les variables est définie comme étant la « structure » d'un modèle et l'ensemble des modifications subies par les valeurs numériques des variables en cours de simulation représente le « comportement » du modèle. Pour de plus amples informations sur l'analyse et la modélisation de systèmes, voir Penning de Vries *et al.* (1989), Leffelaar (1993) et Goudriaan & Van Laar (1994).

La *simulation* est l'activité scientifique qui consiste à construire et à exploiter des modèles explicatifs. On appelle « explicatifs », les modèles dont le comportement est basé sur une connaissance des processus à un niveau hiérarchique inférieur. A l'opposé, on appelle modèles « démonstratifs » ceux dont l'apparence rappelle celle d'un système réel mais dont le comportement est géré par des règles tout à fait différentes. Par exemple, les images d'un film peuvent ressembler au monde réel ; elles ne sont en fait qu'un modèle démonstratif. Les modèles explicatifs et démonstratifs revêtent plusieurs formes : modèles mathématiques dynamiques, modèles d'échelle, modèles graphiques, modèles d'analogie électrique. Chacune de ces formes s'accompagnent d'avantages et d'inconvénients spécifiques. Nous nous concentrerons sur l'étude des modèles mathématiques dynamiques ; ils sont flexibles et détiennent un plus grand potentiel d'application et de développement.

Le processus de *développement d'un modèle* s'engage par la conception du modèle, suivie de son élaboration et se termine par son évaluation et son application. Les compétences ainsi que les exigences informatiques et techniques diffèrent selon la phase de développement dans laquelle on se trouve. Dix étapes (Tableau 1.1) jalonnent ce processus et il est typique que les modélisateurs avancent et reculent plusieurs fois entre ces étapes, avant même l'achèvement définitif de chaque phase. Dans ce processus minutieux en effet, toute étape terminée est un jalon posé sur le long chemin menant au but final. La première phase, la conception du modèle, est souvent la plus difficile.

*Tableau 1.1. Les étapes de la recherche sur les systèmes (d'après Rabbinge & De Wit, 1989).*

---

#### *Conception*

1. Formulation des objectifs
2. Définition des frontières du système
3. Conceptualisation du système

#### *Modélisation compréhensive*

4. Quantification des relations
5. Elaboration du modèle
6. Vérification du modèle

#### *Evaluation et application*

7. Validation du modèle
  8. Analyse de sensibilité
  9. Simplification : modèles sommaires, règles décisionnelles
  10. Etudes de scénarios et de faisabilité
- 

### **1.2.3. Exploitation des modèles**

Les automobiles sont très utiles si leur type correspond à l'usage qui en est fait, par exemple, les autobus pour le transport des personnes, les camions pour celui des marchandises et la Formule 1 pour la course. Il en est de même des modèles. Un modèle n'est utile que dans la mesure où il est adapté à la tâche spécifique à laquelle il est destiné. Il est donc très important de sélectionner le modèle approprié.

Les modèles peuvent être utilisés pour le développement des sciences, pour des prédictions ou pour l'enseignement, mais ils ne peuvent pas servir tous ces buts à la fois. Les modèles intéressants d'un point de vue scientifique sont souvent trop détaillés pour l'application, tandis que les modèles de prédiction ou de gestion sont souvent trop grossiers ou trop superficiels pour relever les défis scientifiques. Ainsi, on attribue trois « valeurs » aux modèles (Tableau 1.2) :

Tableau 1.2. *Qualité relative de certains aspects des modèles au cours des différentes phases de leur développement (source : Penning de Vries, 1983).*

	Valeur prédictive	Valeur scientifique	Valeur d'enseignement	Simplicité
Modèle préliminaire	+	+++	++	++
Modèle compréhensif	++	+++	+	+
Modèle sommaire	+++	+	+++	++

#### 1.2.4. Evaluation des modèles

L'évaluation est un terme général qui décrit l'action de juger la valeur d'un modèle. Elle comprend l'analyse de sa consistance intrinsèque, de sa dimension dans les programmes informatiques et de son utilité pratique, mais aussi la comparaison des résultats et bilans obtenus avec ceux observés dans le monde réel. En principe, le comportement du modèle doit être « conforme » aux expériences réalisées, à l'exception d'un ou deux aspects qui seront « corrigés » en optimisant la valeur d'un ou deux paramètres. Ce processus d'ajustement, appelé « calibration » ou « étalonnage », doit être évité dans la mesure du possible. Il est néanmoins couramment appliqué pour lier les résultats de la simulation aux observations de référence (*e.g.* Stol *et al.*, 1992).

L'évaluation d'un modèle est souvent limitée si la base de données est restreinte. Certains modèles ne sont « évalués » qu'en contrôlant la bonne relation entre les résultats « prédis » et « observés », ces mêmes résultats observés ayant servi à dériver les constantes du modèle. La nature explicative du modèle risque de s'en trouver rapidement altérée. Il est indispensable d'accompagner la modélisation par une solide expérimentation au niveau explicable pour l'évaluation et au niveau explicatif pour des améliorations ultérieures.

Un motif de préoccupation est, dans beaucoup de cas, la concision ou l'inexistence de manuels décrivant dans le détail et en profondeur les modèles et leurs programmes. Trop souvent, on demande à un utilisateur de croire un auteur sans lui offrir la possibilité de vérifier ses données. Certains avantages de la modélisation sont ainsi perdus. Si la documentation accompagnant un modèle n'est pas précise et complète, il y a lieu de croire que son évaluation n'a pas été conduite avec toute la rigueur nécessaire. La modélisation doit être obligatoirement soumise à des normes de qualité.

#### 1.2.5. Quelques exemples de modèles de simulation

##### *Modèles pour la recherche*

Les modèles de simulation explicatifs font partie intégrante de la recherche agricole et biologique. Ce sont habituellement des modèles préliminaires et compréhensifs. Le but est de disposer d'un outil permettant d'expliquer le comportement d'un système. Pour leur développement, on part souvent de modèles génériques, tel que SUCROS87 (Spitters *et al.*, 1989). Pour expliquer certains processus (par exemple le tallage dans la riziculture) ou pour orienter les modèles vers des objectifs spécifiques (par exemple la compréhension de la dynamique de formation des tubercules de la pomme de terre), il faut des modèles taillés sur mesure pour répondre à des besoins et à des conditions spécifiques. La procédure présentée au Tableau 1.1 convient parfaitement au développement de modèles de recherche. Des exemples de tels modèles sont WHEAT pour le blé de printemps (van Keulen &

Seligman, 1986) et INTERCOM pour les interactions cultures-adventices (Kropff & Van Laar, 1993). L'intégration des disciplines conduit à l'élaboration de principes homogènes. Un exemple est la distinction établie, sur la base de mécanismes physiologiques, entre un nombre limité de catégories de dégâts que les innombrables espèces d'insectes et maladies peuvent causer aux cultures (Tableau 1.3).

Tableau 1.3. Catégories de dommages causés par les parasites. Sources : Rabbinge (1983), Boote et al. (1983)

Catégorie	Processus	Exemple
pucerons suceurs	dessèche par succion	aphidés
consommateur de tissu	attaque les tissus	insectes
réducteur de peuplement	attaque la tige	foreur de tige
réducteur du taux de photosynthèse	endommage les chloroplastes	maladies
accélérateur de sénescence des feuilles	chute prématurée des feuilles	<i>Cercospora</i>
suppresseur de lumière	donne de l'ombre	adventices
réducteur de turgescence	modifie le transfert de l'eau	nématodes

Un autre exemple est l'emploi de la modélisation pour définir des priorités de recherche et pour structurer les activités correspondantes. A cet égard, des modèles simples peuvent déjà permettre de tirer des conclusions générales, des modèles compréhensifs d'analyser des hypothèses spécifiques ou d'identifier les lacunes dans les connaissances. Pour citer un exemple : grâce à la modélisation, et pour créer de meilleurs modèles prédictifs (Spitters & Van Keulen, 1990), il a été possible d'identifier la nécessité d'approfondir les connaissances sur le développement morphologique des cultures et la respiration de maintien. Ces lacunes ont cependant été difficile à combler. Dans un autre cas, le succès a été plus évident. Les études de simulation ont suggéré en effet qu'une teneur suboptimale d'azote dans les feuilles après la floraison était susceptible d'engendrer une production suboptimale de riz (Penning de Vries *et al.*, 1991, Kropff *et al.*, 1992). Une indication inattendue étant donné que les expérimentations exhaustives conduites deux décennies auparavant avaient posé les bases du régime de fertilisation couramment appliqué ! Et pourtant : en améliorant le statut post-floraison de l'azote, il a été effectivement possible de relever considérablement le niveau de rendement (Kropff *et al.*, 1992). La raison a également pu être identifiée : un environnement de sol différent où le régime fertilisant, optimal à l'origine, était devenu suboptimal. A l'heure actuelle, encouragé par ces résultats, l'Institut international de recherches rizicoles, IRRI, a mis en oeuvre plusieurs études par modélisation (Penning de Vries *et al.*, 1991), et de nombreuses autres recherches sont menées dans le cadre de programmes essentiellement basés sur la modélisation (Kropff *et al.*, 1994).

Un troisième exemple est l'étude des causes de variabilité et des risques de perte de rendements en relation avec une infestation par les pucerons (Rossing *et al.*, 1994). Une analyse mathématique et statistique soigneuse des données de laboratoire et de terrain a révélé une certaine incertitude quant au seuil de pulvérisation d'insecticides. La conclusion a été qu'une amélioration des méthodes d'observations de terrain est bien plus importante que de meilleurs modèles ou d'autres types d'informations.

#### Modèles pour l'enseignement

Pour l'enseignement, il faut des modèles simples, et les modèles sommaires sont plus appropriés que les modèles préliminaires. Outre le contenu, il est souhaitable que ces modèles soient présentés sous une forme attrayante et conviviale. Peu de produits sont cependant disponibles, probablement parce que la dérivation de modèles sommaires est peu intéressante pour les scientifiques et que, pour les programmeurs, ces modèles représentent malgré tout un gros travail pour une valeur commerciale relativement peu élevée.

Les modèles conçus dans le langage de simulation CSMP et accompagnés de manuels et de cahiers d'exercice exhaustifs sont de bons modèles d'enseignement (*e.g.* de Wit & Goudriaan, 1974 ; Penning de Vries *et al.*, 1989). Une foule de modèles abordant des thèmes et poursuivant des objectifs différents revêtent la même forme. Le CSMP a été abandonné par son auteur (IBM), mais un « traducteur » a été développé (van Kraalingen, 1994) qui permet d'exploiter les modèles de format CSMP dans un environnement de simulation FORTRAN flexible (van Kraalingen, 1993). Un logiciel d'enseignement aidé par ordinateur est maintenant disponible pour la simulation agricole.

### *Modèles pour la prédiction*

La « prédiction » revêt plusieurs formes, y compris la prévision directe ou en temps réel du rendement de la récolte finale pendant une saison de végétation (*e.g.* de Koning *et al.*, 1993), l'exploration des conséquences d'interventions hypothétiques sur la gestion (*e.g.* Keating, 1993), de l'impact des changements climatiques (*e.g.* Rozenzweig, 1993) et l'évaluation de nouveaux idéotypes cultureux (*e.g.* Dingkuhn *et al.*, 1993). Une attention particulière doit être apportée à la cohérence des modèles et des objectifs, à la disponibilité des données et à l'évaluation de certains résultats.

Les modèles prédictifs peuvent être utilisés, par exemple, pour l'évaluation de l'utilisation quantitative des terres. Ces modèles nécessitent cependant l'intégration d'une grande quantité de données géographiques référencées sur les sols, le climat, parfois même sur l'utilisation des terres. Typique pour ces modèles, l'intrant (l'eau, les engrais chimiques) et l'extrait (la production agricole) sont calculés par unité sol-climat pour une ou plusieurs cultures et allures météorologiques, les résultats étant représentés sur des cartes comme moyennes ou probabilités.

Un bon exemple est l'étude de simulation effectuée pour l'Inde (Fig. 1.3). Cet immense pays a en effet besoin de lignes directrices consistantes pour pouvoir déterminer les meilleures régions de culture du blé, les dates optimales de semis et la quantité d'eau nécessaire à l'irrigation dans un système de production intensive (Aggarwal, 1993). Une étude de suivi a permis par la suite de quantifier les conséquences résultant d'imprécisions dans les données de base (ou de l'absence de données de base) (Aggarwal, 1994), identifiant ainsi les paramètres du sol (et dans une moindre mesure des cultures) dont la mesure au champ serait susceptible d'améliorer l'exactitude des prévisions de production. La simulation a été d'une grande utilité pour les planificateurs agricoles et les services de recherche, et leur a permis de mieux orienter leurs efforts et travaux.

La « variabilité » étant bien plus difficile à mesurer qu'à simuler, les modèles jouent là encore un rôle considérable. Grâce à eux, il est possible de quantifier la variabilité au niveau de la récolte, du système cultural et de la région (Penning de Vries, 1994).

*Figure 1.3. Les zones de iso-rendement de blé de l'Inde, basées de la productivité potentielle et limitée par d'eau. Les aires blanches n'étaient pas simulées (Source : Aggarwal, 1993).*

Il n'en demeure pas moins que les modèles agricoles présentent encore certaines faiblesses, notamment lorsqu'il s'agit de formuler des conseils solidement fondés à l'intention des décideurs. Il appartient aux scientifiques d'y remédier. Ces points faibles sont notamment :

- *Un contrôle de qualité insuffisant.* Le contrôle de qualité des modèles est insatisfaisant, en particulier en ce qui concerne leur application pratique. Il s'ensuit que les résultats peuvent être erronés ou irréproductibles et une extrapolation peut s'avérer problématique. Il est donc nécessaire d'élaborer des lignes directrices pour la description (y compris la marge de validité), l'évaluation, la documentation (scientifique, technique), l'entretien et la distribution.
- *Un degré de précision inconnu.* Les conséquences de l'inexactitude des données de base et des incertitudes relatives à la structure du modèle ne sont pas toujours connues, de sorte que le degré de précision des résultats de la simulation est indéterminé.
- *Une trop grande simplification.* Les plantes cultivées, les populations de parasites et les sols ne sont pas réparties dans l'espace d'une manière homogène. Or, il est rarement tenu compte de ces inégalités au niveau de la parcelle, du champ ou de la région. Il est nécessaire d'en évaluer les conséquences. Il a été prouvé qu'une trop grande simplification des données météorologiques (par l'adoption de moyennes) peut générer des déviations considérables dans les rendements simulés (Nonhebel, 1993).

## **1.3. Evolution de la modélisation agricole**

### **1.3.1. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG)**

Il existe une forte demande de modèles prédictifs à référence spatiale : pour le zonage agroécologique (Aggarwal, 1994), pour quantifier les impacts des changements climatiques, pour prédire les rendements régionaux (de Koning *et al.*, 1993), pour analyser la faisabilité de l'utilisation des terres et pour des études de scénarios (WRR, 1992). La combinaison du SIG - qui enregistre les caractéristiques pédologiques et leur répartition dans l'espace - avec des bases de données météorologiques et des modèles agricoles représente un outil d'analyse très puissant. En fonction de l'objectif, les informations de base sur le sol ainsi que les données météorologiques et culturelles revêtent la forme de valeurs observées, lorsqu'une explication est recherchée, ou de

valeurs hypothétiques, lorsqu'il s'agit de définir de nouvelles options. Ainsi, la combinaison SIG-modèles peut s'avérer un outil d'exploration idéal dans le domaine de l'utilisation des terres et de la planification.

Un avertissement est cependant nécessaire. Il ne faut pas perdre de vue en effet que :

- *les données de base* de format approprié sont généralement peu nombreuses. Pour les études à grande échelle, on utilise, en général, des données approximatives. En ce qui concerne les données météorologiques, les séries complètes d'informations météorologiques quotidiennes remontant suffisamment loin dans le temps, sont plutôt rares ; parfois elles ne sont disponibles que dans le commerce. Pour ce qui est des données de sols, le problème de la standardisation internationale se pose encore (Bouma, 1993). Une base de données pédologiques quantitatives, de niveau international, est encore loin d'être au point (Oldeman, 1994). Pour les espèces et variétés cultivées, il existe bien des petites bases de données, mais elles sont très dispersées. Les collections les plus importantes sont les modèles agricoles du « Decision Support System for Agrotechnology Transfer, DSSAT » (Uehara, 1993) et WOFOST (Boons *et al.*, 1994).
- *l'agrégation* au niveau régional des résultats d'une simulation effectuée au niveau de l'essai ou du champ est encore problématique ; trop de questions sont encore sans réponses, par exemple : comment traiter les intrants variables dans le temps et dans l'espace (*e.g.* les différentes dates de semis à travers une région) et les facteurs d'incertitude (Bouman *et al.*, 1993).
- *l'évaluation* des résultats simulés n'est généralement pas réalisable par les méthodes traditionnelles (comparaison des résultats simulés avec les données expérimentales), tout simplement parce que ces expériences ne peuvent pas être faites et que les observations effectuées peuvent s'avérer inadéquates. Par exemple, dans une étude récente de prédiction des rendements des cultures pouvant être obtenus au niveau régional aux Pays-Bas, nous avons planifié une comparaison des rendements nationaux simulés avec les statistiques officielles. Or, nous avons appris que les statistiques officielles sont basées sur des estimations visuelles et présentent une incertitude relative tout au moins aussi grande que la meilleure des simulations (5 % environ, de Koning *et al.*, 1993). Outre l'expérimentation du plus grand nombre de composants de modèles possible, il convient donc de développer de nouveaux outils d'évaluation des modèles éco-régionaux. Une simulation qui n'est pas accompagnée d'une évaluation solide ne sert les objectifs visés que de manière limitée.

### 1.3.2. La Programmation Linéaire à Buts Multiples (PLBM)

Les agriculteurs tirent leur alimentation et leurs revenus de leurs exploitations. Une telle exploitation peut créer des emplois mais aussi polluer l'air et les eaux souterraines. Ces « extrants » volontaires et involontaires peuvent être considérés comme des variables-objectifs. Le degré de contribution de la production agricole à réalisation de ces objectifs peut être quantifié au moyen de *coefficients techniques*. Les systèmes de cultures biologiques et les pratiques de gestion de l'exploitation agricole réalisent ces objectifs à différents degrés ; les coefficients techniques lient quantitativement chaque pratique avec chaque variable-objectif correspondante.

Les acteurs impliqués (agriculteurs, conseils régionaux, gouvernements) souhaitent maximiser ou minimiser ces buts, souvent antagonistes. Il s'agit donc de rechercher un compromis et la modélisation peut représenter un bon instrument « d'aide à la négociation ». Au cours des dernières années, une technique a été développée - baptisée « programmation linéaires à buts multiples » (de Wit *et al.*, 1989) - qui permet d'optimiser le système de production et de déterminer les valeurs d'échange entre les variables-objectifs. Grâce à cette technique, il est possible de sélectionner, parmi les nombreux systèmes culturaux et pratiques de gestion existants, celui ou celle à même de combiner de manière optimale, un revenu maximum, une pollution minimum des eaux souterraines et un rendement efficace des efforts investis. Il est très important d'associer les sciences socio-économiques à l'application de cette technique. Dans une vaste étude prospective de politique agricole et d'utilisation des terres conduite à l'échelle régionale, des options ont pu être déterminées et quantifiées pour de nombreuses régions des 12 pays de l'Union européenne (WRR, 1992). Une optimisation des objectifs principaux des acteurs clés de l'agriculture européenne, a démontré le potentiel de cette technique dans le domaine des décisions tactiques et stratégiques (Fig. 1.4) et l'aide qu'elle peut apporter aux technocrates.

*Figure 1.4. Les différences entre l'utilisation des terres entre quatre scénarios :*

*A : commerce libre ; B : développement régional ; C : nature et paysage ;*

*D : protection environnementale (Source : WRR, 1992).*

Cette technique d'optimisation requiert typiquement l'intégration d'un grand nombre de coefficients techniques. Ces données sont souvent collectées par le biais de la simulation, les essais réels étant trop coûteux et trop lents. [Veeneklaas \*et al.\* \(1990\)](#), par

exemple, ont étudié les possibilités d'utilisation des terres dans une région pauvre du Mali central. Des modèles de simulation ont fourni les rendements du mil, sorgho et des pâturages de régions inaccessibles, dans des situations impossibles à tester sur le terrain (*e.g.* fertilisation). Des experts ont jugé que le comportement de ces modèles était acceptable. Cette étude de planification des terres n'aurait pu être menée à bien sans modèles de simulation.

Dans un autre exemple, cependant, il est apparu impossible d'obtenir des coefficients techniques par le biais de modèles. Dans ce cas particulier - une étude d'exploitation agricole aux Pays-Bas - un coefficient pour exprimer la variabilité du rendement rapportée à la culture et à la gestion était nécessaire. Le modèle générique utilisé a bien fourni des valeurs raisonnables quantifiant la variabilité du rendement pour certaines cultures mais pas pour d'autres (Fig. 1.5). Cela pouvait être dû à un manque de précision du modèle (une partie seulement des paramètres de récolte et de sol avaient été mesurés sur place), mais aussi à de sérieuses inexactitudes dans les « rendements observés ». Etant donné cependant que cette variabilité était déjà approximativement connue et que la simulation n'était pas en mesure d'améliorer sa qualité ou de fournir des données additionnelles, cette étude d'optimisation s'est finalement appuyée sur les coefficients tirés des essais de terrain et sur le jugement des experts (Schans & Habekotte, 1995).

La programmation linéaire est une technique très efficace, mais elle a aussi ses limites. Ce sont en partie les mêmes que nous avons vu précédemment : absence de données de base et de moyens d'évaluation des résultats de l'optimisation. Une limite spécifique est l'absence de procédure permettant de traduire, dans les résultats finaux, l'incertitude inhérentes aux données de base. En particulier, lors d'une utilisation combinée des modèles agricoles, du SIG et de la PL, les limites mentionnées peuvent très bien s'exprimer simultanément et les marges d'erreur excéder 100 %.

*Figure 1.5. Les rendements expérimentaux (noir), la production potentielle simulée (carrés ouverts) et la production limitée par manque d'eau simulée (circles ouvertes) des racines de betteraves à sucre (a) et des tubercules de pommes de terre (b) (Source : Habekotté, 1994).*

### 1.3.3. La Télédétection

Un autre développement est l'utilisation des modèles agricoles pour interpréter les données collectées par la Télédétection. Certains ratios de longueurs d'ondes spécifiques, par pixel, peuvent être interprétés en termes de surface des feuilles et de structure de la canopie. Ces valeurs servent à contrôler l'état d'une culture dans une région, ou comme intrants dans un modèle agricole pour prédire le rendement saisonnier final (Bouman, 1992). Dans un proche avenir, la Télédétection permettra aussi, en vue de simuler la croissance des cultures, d'en déceler la nature et le lieu, et fournira des données sur la région cultivée ainsi que des estimations sur la « biomasse initiale ».

### 1.3.4. Convivialité des logiciels

Au cours de la dernière décennie, certains modèles sont devenus très volumineux et très complexes. De ce fait, leur intégration dans d'autres systèmes informatiques et leur application par d'autres utilisateurs peut s'avérer difficile sinon impossible. Pour résoudre le problème, des interpréteurs de commandes interactifs, des « shells », ont été introduits. Ils facilitent l'interchangeabilité du logiciel et son exploitation par des utilisateurs ne détenant pas forcément l'expertise technique nécessaire. Le projet IBSNAT (Uehara, 1993) a été le premier à développer un « shell » pour ses modèles de simulation utilisés en agriculture, baptisé « Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) ». La version 3.0 vient de sortir. Elle offre un environnement convivial pour la sélection des modèles et des données pédologiques, culturelles et météorologiques, ainsi que pour spécifier les techniques de gestion et conduire les simulations. DSSAT connaît un grand succès (Tsuiji & Bals, 1993). L'ASPIM - Agricultural Production System Simulator (McCown *et al.*, 1995) est un « shell » moderne, en phase de développement final. Il intègre plusieurs modèles agricoles et pédologiques dont la structure est spécialement adaptée à la recherche de systèmes de production. Ces modèles sont accessibles aux utilisateurs. Une première version de « SHARP-shell » vient d'être lancée (par le projet « Simulation and System Analysis for Rice Production », ten Berge, 1993) pour un groupe de modèles portant sur la recherche de systèmes de production rizicole. Les utilisateurs peuvent sélectionner, de manière très simple, des modules de cultures biologiques et de sols ainsi que les données correspondantes. Ils peuvent aussi modifier à leur gré toutes les données et les modèles, passer d'une simulation de variables d'état à une autre ou changer les valeurs. L'analyse des incertitudes est par ailleurs grandement facilitée.

Les « shells » fournissent également des interfaces comprenant un nombre accru d'outils pour les intrants et les extrants : génération de données météorologiques, SIG, instruments statistiques, analyse des incertitudes, compléments d'analyses économiques, etc. Le développement du logiciel est en pleine expansion.

### 1.3.5. Formation des utilisateurs

L'une des contraintes à l'implémentation des modèles est le petit nombre de modélisateurs qualifiés. Cette pénurie ne saurait être compensée par des programmes plus conviviaux. Pour faire fonctionner un modèle, il faut détenir un certain nombre de compétences techniques. Le fait d'améliorer la convivialité d'un modèle, des bases de données ou d'un autre logiciel rabaisse certes le niveau de compétence technique exigé. Il n'en demeure pas moins qu'une exploitation efficace de ces outils requiert des scientifiques formés à la sélection du modèle convenant le mieux aux objectifs poursuivis, à l'identification des données de base appropriées et complètes et à l'interprétation des résultats souvent complexes. Si donc un outil convivial permet de mettre la modélisation à la portée d'un plus grand nombre de scientifiques, il existe aussi un besoin accru en modélisateurs qualifiés capables de guider et de conseiller les utilisateurs. L'un des rares endroits où une telle formation peut être acquise est le « Graduate School Production Ecology ». Un autre endroit est l' « Asian Institute of Technology ». SARP (Penning de Vries *et al.*, 1988) et IBSNAT (Uehara, 1993) assurent bien une formation efficace, mais leurs cours ont encore besoin d'être institutionnalisés (Singh *et al.*, 1994). C'est la raison pour laquelle plusieurs groupes sont actuellement engagés dans des actions concertées.

La grande majorité des modèles sont développés dans des groupes multidisciplinaires composés de 4 à 6 scientifiques (*cf.* Penning de Vries, 1983). En effet, la conception de modèles efficaces de production agricole exige une « masse critique » de 4 à 6 scientifiques de disciplines différentes mais néanmoins complémentaires, qui travailleront étroitement ensemble pendant une période assez longue. Cette approche a été confirmée dans le cadre d'un récent projet de formation et recherche mis en oeuvre en Asie, où plus de 18 équipes de modélisation ont été formées et ont prouvé leur productivité.

## 1.4. Références

- Aggarwal, P.K., 1993. Agroecological zoning using crop growth simulation models: characterization of wheat environments of India. Dans : F.W.T. Penning de Vries, P.S. Teng & K. Metselaar (Eds), *Systems Approaches for Sustainable Agriculture*. Kluwer, Dordrecht, p. 97-109.
- Aggarwal, P.K., 1994. Uncertainties in plant, soil and weather inputs used in crop growth models: implications for simulated outputs and their applications. *Agricultural Systems* (in press).
- Berge, H.F.M. ten, 1993. Building capacity for systems research at national agricultural research centres: SARP's experience. In: F.W.T. Penning de Vries, P.S. Teng & K. Metselaar (eds), *Systems Approaches for Sustainable Agriculture*. Kluwer, Dordrecht. p. 515-538.
- Boons, E.R., G.H.J. de Koning, C.A. van Diepen & F.W.T. Penning de Vries, 1993. Crop-specific simulation parameters for yield forecasting across the European Community. *Simulation Report CABO-TT 32*, CABO, Wageningen.
- Boote, K.J., J.W. Jones, J.W. Mishoe & R.D. Berger, 1983. Coupling pests to crop growth simulators to predict yield reductions. *Phytopathology* 73, 1581-1587.
- Bouma, J., M.C.S. Wopereis, J.H.M. Wösten & A. Stein, 1993. Soil data for crop-soil models. In: F.W.T. Penning de Vries, P.S. Teng & K. Metselaar (eds), *Systems Approaches for Sustainable Agriculture*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 207-220.
- Bouman, B.A.M., 1992. Linking physical remote sensing models with crop growth simulation models, applied for sugar beet. *Int. J. Remote Sensing* 13, 2565-2581.
- Bouman, B.A.M. & M.J.W. Jansen, 1993. RIGAUS. Random Input Generator for the Analysis of Uncertainty in Simulation.

Simulation Reports CABO-TT 34, CABO-DLO, Wageningen.

Dingkuhn, M., F.W.T. Penning de Vries & K.M. Miezán, 1993. Improvement of rice plant type concepts: systems research enables interaction of physiology and breedings. In: F.W.T. Penning de Vries, P.S. Teng & K. Metselaar (eds), *Systems Approaches for Sustainable Agriculture*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. p. 19-36.

Goudriaan, J. & H.H. van Laar, 1994. Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. *Current Issues in Production Ecology*, Vol. 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 238 pp.

Habekotté, B., 1994. Evaluatie van een gewasgroeimodel voor opbrengstberekening van verschillende gewassen. Simulation Reports CABO-TT 36, AB-DLO, Wageningen. 24 pp.

Leffelaar, P.A. (ed.), 1993. On systems analysis and simulation of ecological processes. *Current issues in production ecology*, Vol. 1., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 294 pp.

Keulen, H. van & N.G. Seligman. 1987. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen.

Keating, B.A., R.L. McCown & B.M. Wafula, 1993. Adjustment of nitrogen inputs in response to a seasonal forecasts in a region of high climatic risk. In: F.W.T. Penning de Vries, P.S. Teng & K. Metselaar (eds), *Systems Approaches for Sustainable Agriculture*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 233-252.

Koning, G.H.J., M.J.W. Jansen, E.R. Boons-Prins, C.A. van Diepen & F.W.T. Penning de Vries, 1993. Crop growth simulation and statistical validation for regional yield forecasting across the European Community. Simulation Report CABO-TT 31, CABO-DLO, Wageningen.

Kraalingen, D.W.G. van, 1993. The FSE system for crop simulation, version 2.0. CABO-TPE Simulation Report 23, CABO-DLO, Wageningen.

Kraalingen, D.W.G. van, C. Rappoldt & H.H. van Laar, 1994. The FORTRAN Simulation Translator (FST), a simulation language. In: J. Goudriaan & H.H. van Laar (eds), *Simulation of crop growth processes*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Kropff, M.J. & H.H. van Laar (eds), 1994. *Modelling crop-weed interactions*. CAB-international, Wallingford.

Kropff, M.J., K.G. Cassman, F.W.T. Penning de Vries & H.H. van Laar, 1993. Increasing the yield plateau in rice and the role of global climate change. *J. Agri. Met.* 48, 795-798.

Kropff, M.J., F.W.T. Penning de Vries & P.S. Teng, 1994. Capacity building and human resource development for applying systems analysis in rice research. In: P. Goldsworthy & F.W.T. Penning de Vries (eds), *Opportunities, use and transfer of systems research methods in agriculture to developing countries*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 323-340.

McCown, R.L., G.L. Hammer, J.N.G. Hargreaves, D.P. Holzworth & D.M. Freebairn, 1995. APSIM, a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agric. Systems* (in press)

Nonhebel, S., 1993. The importance of weather data in crop growth simulation models and assessment of climate change effects. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, 140 pp.

Oldeman, L.R., 1994. Issues of development and management of databases. In: P. Goldsworthy & F.W.T. Penning de Vries (eds), *Opportunities, use and transfer of systems research methods in agriculture to developing countries*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 323-340.

- Penning de Vries, F.W.T., 1983. Modeling of growth and production. In: O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond & H. Ziegler (eds). *New Encyclopedia of Plant Physiology, New Series*. Springer Verlag, Berlin. p 118-150.
- Penning de Vries, F.W.T., R. Rabbinge, D.M. Jansen & A. Bakema, 1988. Transfer of systems analysis and simulation in agriculture to developing countries. *Agricultural Administration and Extension* 29, 85-96.
- Penning de Vries, F.W.T., D.M. Jansen, H.F.M. ten Berge & A.H. Bakema, 1989. Ecophysiological processes in several annual crops. *Simulation Monograph* 29, Pudoc, Wageningen, and IRRI, Los Baños.
- Penning de Vries, F.W.T., M.J. Kropff, P.S. Teng & G.J.D. Kirk (eds). 1991. *Systems simulation at IRRI*. IRRI Research Paper Series, 151, Los Baños.
- Penning de Vries, F.W.T., 1994. Computers, climate and risk. In: *Fifth International Congress for Computer Technology in Agriculture. Enabling technologies for land use and resource management*. Royal Agricultural Society of England, Warwickshire, p. 27-32.
- Rabbinge, R. 1983. How to use combination models in crop protection? In: M.J. Jeger (ed). *The development of models for practical crop protection*. Bulletin IOBL/WPRS New Series VI, 2, p. 31-45.
- Rabbinge, R., 1993. The ecological background of food production. In: *Crop protection and sustainable agriculture*. John Wiley & Sons, New York, p 2-29.
- Rabbinge, R. & C.T. de Wit, 1989. Systems, models and simulation. In: R. Rabbinge, S.A. Ward & H.H. van Laar (eds.). *Simulation and systems management in crop protection*. Pudoc, Wageningen, p. 3-15.
- Rosenzweig, C., 1994. Recent global assessments of crop responses to climate change. *International Crop Science* 1, 265-272.
- Rossing, W.A.H., R.A. Daamen & M.J.W. Jansen, 1994. Undertainty analysis applied to supervised control of aphids and brown rust in winter wheat. II. Relative importance of different components of uncertainty. *Agricultural Systems* 44, 449-460.
- Schans, J. & B. Habekotté, 1995. Optimization of cropping systems at the farm level (in prep.).
- Singh G., B.K. Pathak & F.W.T. Penning de Vries, 1994. Requirements for systems research in agricultural and environmental sciences. In: P. Goldsworthy & F.W.T. Penning de Vries (eds), *Opportunities, use and transfer of systems research methods in agriculture to developing countries*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, p. 255-266.
- Spitters, C.J.T., H. van Keulen & D.W.G. van Kraalingen, 1989. In: R. Rabbinge, S.A. Ward & H.H. van Laar (eds), *Simulation and systems management in crop protection*. Pudoc, Wageningen, Netherlands, p 147-177.
- Spitters, C.J.T. & H. van Keulen, 1990. Toepassing van simulatie en systeemanalyse: stand van zaken en knelpunten. CABO-verslag 128, Centrum Agrobiologisch Onderzoek, Wageningen, 34 pp.
- Stol, W., D.I. Rouse, D.W.G. van Kraalingen & O. Klepper, 1992. FSEOPT, a FORTRAN program for calibration and uncertainty analysis of simulation models. *Simulation Report CABO-TT 24*. CABO-DLO, Wageningen.
- Tsuji, G.Y. & S. Balas, 1993. *The IBSNAT Decade*. Dept. Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University Hawaii, Honolulu, USA.
- Uehara, G. & G.Y. Tsuji, 1993. The IBSNAT project. In: F.W.T. Penning de Vries, P.S. Teng & K. Metselaar (eds), *Systems Approaches for Sustainable Agriculture*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. p. 505-514.

Veeneklaas, F.R., S. Cissé, P.A. Gosseye, N. van Duivenbooden & H. van Keulen, (1990). [Competition for limited resources. \(Vol 4\)](#) Centre for Agrobiological Research, Wageningen. 179 pp.

Wit, C.T. de & J. Goudriaan, 1974. Simulation of ecological processes. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen.

Wit, C.T. de & F.W.T. Penning de Vries, 1982. In: [F.W.T. Penning de Vries & M.A. Djitéye \(eds\)](#). La productivité des pâturages sahéliens. Agricultural Research Report 918. Pudoc, Wageningen, Netherlands. p. 23-27.

Wit, C.T. de, H. van Keulen, N.G. Seligman & I. Spharim, 1988. Application of interactive multiple goal programming techniques for analysis and planning of regional agricultural development. Agricultural Systems 26, 211-230.

WRR, 1992. Ground for Choices, four perspectives for the rural areas in the European Community. Netherlands Scientific Council for Government Policy, SDU-publisher, The Hague, Netherlands.

## 2. Développement des paramètres pour des modèles de simulation ; cas des cultures annuelles, pérennes et ligneuses

J.J.R. Groot

Projet PSS-Niono / AB-DLO, B.P. 14, 6700 AA Wageningen, les Pays-Bas

### Résumé

*Cette contribution présente la structure des modèles de simulation employés par le projet PSS, et montre quelques résultats des essais d'agroforestérie, des graminées pérennes et des légumineuses, afin de démontrer la liaison entre la recherche sur le terrain et l'utilisation des données comme paramètres dans les modèles de simulation. Enfin, les possibilités d'application sont présentés.*

### 2.1. Introduction

Le projet « Production Soudano-Sahélienne » (PSS) constitue une coopération scientifique et technique entre l'Institut d'Economie Rurale (IER) au Mali et plusieurs institutions de recherche aux Pays-Bas. Le but du projet est d'apporter une contribution au développement des systèmes agro-pastoraux durables dans les pays sahéliens, et en particulier dans la zone de transition entre le Sahel et la savane. Le projet vise surtout l'exploitation optimale des éléments nutritifs dans l'élevage. Dans la partie sud du Sahel et dans la zone soudanienne, l'élevage réclame les mêmes ressources naturelles que celles exigées par l'agriculture. Etant donné que les carences en éléments nutritifs du sol représentent le facteur le plus limitatif à l'égard de la production dans la zone de l'étude, l'amélioration de la disponibilité en éléments nutritifs constitue un élément-clef en ce qui concerne la durabilité des systèmes de production agro-pastoraux ( [Penning de Vries & Djitéye, 1991](#) ; van Keulen & Breman, 1990). Le Projet PSS se concentre sur la recherche de l'efficacité maximale des engrais phosphatés et azotés, ceci en utilisant des éléments de l'agriculture écologique pour un usage optimale de ces engrais. Dans ce cadre il est important de profiter de la plus-value des espèces légumineuses, des graminées pérennes et l'agroforestérie. La recherche en soi est centralisée sur les processus liés à la disponibilité en éléments nutritifs dans le sol, l'utilisation optimale des éléments nutritifs dans la production primaire et l'utilisation optimale de cette production par le bétail. En ce que concerne la disponibilité en éléments nutritifs dans le sol, une attention particulière est donnée aux aspects tels que la distribution et la qualité de la matière organique, le régime hydrique, la fixation de l'azote et l'effet et rendement des engrais.

Les essais agronomiques du Projet PSS sont conduits sur 3 sites de recherche (Niono, pluviométrie 450 mm ; Cinzana, 700 mm ; N'Tarla, 900 mm) et 3 différents types de sol par site d'expérimentation. L'identification des essais et le traitement des résultats de recherche se font suivant l'approche de l'analyse de système, en appliquant des modèles de simulation. Ceci permet également d'extrapoler les résultats de recherche obtenus sur les sites d'expérimentation, vers d'autres conditions que celles des essais et dans

## l'ensemble des régions étudiées

Cette contribution présente la structure des modèles de simulation employés par le Projet PSS, et montre quelques résultats des essais d'agroforestrie, des graminées pérennes et des légumineuses, afin de démontrer la liaison entre la recherche sur le terrain et l'utilisation des données dans les modèles de simulation.

## 2.2. Structure des modèles de simulation

En général les modèles de simulation employés par le PSS sont composés de trois sous-modèles (Groot & de Willigen, 1991) : *i.* un sous-modèle du bilan hydrique, *ii.* un sous-modèle du bilan d'éléments nutritifs et *iii.* un sous-modèle de croissance végétale (Fig. 2.1). Le sous-modèle du bilan hydrique calcule la disponibilité d'eau dans les différentes couches du sol en suivant le flux d'input (infiltration de l'eau : la pluviométrie journalière plus le « run-on » et moins le « run-off ») et celui d'output (évaporation, transpiration, drainage vertical) et repose sur le principe des « seaux débordants » (« Tipping bucket »). Le sous-modèle du bilan d'azote minéral décrit la variation du stock d'azote minéral dans les différentes couches du sol basée sur les quantités d'azote minéral provenant des engrais, de la minéralisation de la matière organique et de la pluie, et les pertes d'azote par lixiviation (van Keulen & Seligman, 1987). La minéralisation et l'immobilisation de la matière organique du sol et celles des résidus des cultures (racines, litière) sont décrits suivant Verberne *et al.* (1990). Le sous-modèle de la croissance de la culture décrit quantitativement la résultante du métabolisme physiologique de la culture en se basant sur la vitesse d'assimilation photosynthétique qui est fonction des caractéristiques photosynthétiques foliaires, de la durée et de l'intensité d'insolation journalière (Spitters *et al.*, 1989). Dans le modèle la densité racinaire diminue en fonction de la profondeur d'un façon négatif exponentiel. Aussi bien que l'absorption d'eau, l'absorption des éléments nutritifs est étroitement liée à la densité racinaire (de Willigen & van Noordwijk, 1987).

L'environnement du modèle est constitué des caractéristiques climatiques journalières (pluviométrie, température minimale et maximale, humidité de l'air, insolation) et des caractéristiques physiques du sol (texture, nombre d'horizons, profondeur maximale d'enracinement, capacité de rétention en eau).

*Figure 2.1. Représentation schématique du modèle de simulation d'une culture.*

## 2.3. Expérimentation

### 2.3.1. Agroforestrie

Afin de simuler la production dans les systèmes d'associations d'agroforestières et la compétition entre une culture (ou une strate herbacée) et les ligneux, une bonne connaissance du système racinaire des ligneux et de la strate herbacée est primordiale. La superficie exploitée par les arbres est déterminée par l'extension de leurs racines principales ; la connaissance de cette superficie exploitée permet de quantifier la disponibilité en eau et en éléments nutritifs. La compétitivité de la strate herbacée par rapport aux arbres est fonction de la distribution des racines fines des deux espèces. L'étude « Structure spatiale du système racinaire de deux arbres du Sahel : *Acacia seyal* et *Sclerocarya birrea* » (Soumaré *et al.*, 1994) avait comme objectif de décrire les racines primaires et secondaires (> 2 mm) des deux espèces ligneuses du Sahel et de quantifier la distribution des racines fines (< 2 mm) des arbres et des herbacées à différentes distances du tronc, pour pouvoir paramétriser le modèle de simulation d'agroforestrie (Conijn, en prép.).

La Fig. 2.2 donne la distribution des racines primaires et secondaires pour les deux espèces sur le ranch de Niono. L'*Acacia seyal* est caractérisé par une racine pivotante mince et profonde atteignant une profondeur de 6m ou plus, avec une concentration des racines traçantes dans la couche 0-40 cm du sol. La longueur maximale des racines traçantes est de 25,7 m, ce qui correspond à 7 fois le rayon du houppier. Quant au *Sclerocarya birrea*, il a une racine pivotante grosse et courte, pouvant atteindre une profondeur de 2,4 m. Les racines traçantes se ramifient à partir de la racine pivotante entre 0-100 cm de profondeur et remontent vers les couches superficielles en s'éloignant du tronc pour être concentrées dans la couche 0-60 cm ce qui correspond à 10,2 fois le rayon du houppier. Sur la base de ces observations, il est possible de dériver les caractéristiques qualitatives qui décrivent le système racinaire pour un arbre isolé comme utilisé dans le modèle d'agroforestrie (Fig. 2.3a). Pour pouvoir simuler un système d'agroforestrie constitué de plusieurs arbres isolés, référence doit être fait à la Fig. 2.3b.

[Figure 2.2.](#) Distribution des racines primaires et secondaires dans une fosse racinaire pour *Acacia seyal* (a) et *Sclerocarya birrea* (b).

[Figure 2.3.](#) Représentation schématique du système racinaire d'un arbre isolé comme utilisé dans le modèle d'agroforestrie ( [Conijn, en prép.](#) ) (a) et extrapolation vers des conditions du champ (b).

L'étude de la distribution des racines fines a montré que la densité des racines fines d'*Acacia seyal* était forte à la limite du houppier et diminue en s'éloignant du tronc (Fig. 2.4). Par contre, celle de la strate herbacée augmente en s'éloignant de l'arbre. Pour le *Sclerocarya birrea*, la plus grande biomasse racinaire a été observée à une distance égale à 2 fois le rayon du houppier. Cependant, à une distance égale à 3 fois le rayon du houppier, de fines racines de l'arbre étaient absentes. Pour les deux espèces, la biomasse racinaire totale (arbre + strate herbacée) est plus élevée sous l'arbre que hors de l'arbre.

La plupart des racines fines des arbres est localisée en dessous de celles des graminées. En utilisant un modèle de simulation de l'agroforestrie ( [Conijn, en prép.](#) ), les données permettent de vérifier l'hypothèse que les arbres arrivent à capter les éléments nutritifs qui devraient être lessivés normalement en cas de leur absence.

Les biomasses des racines fines mesurées peuvent être considérées comme des apports en matière organique au sol, parce que la majorité des racines fines meurent au cours de la saison sèche. Par conséquent, la biomasse des racines fines est un paramètre important pour le sous-modèle du bilan des éléments nutritifs.

[Figure 2.4.](#) Distribution des racines fines pour *Acacia seyal* à partir des positions indiquées.

### 2.3.2. Légumineuse pérenne *Stylosanthes hamata*

Une étude sur le système racinaire de la légumineuse fourragère *Stylosanthes hamata* a été entreprise à la fin de l'hivernage 1992, suivant la méthode de monolithe ou de planche à clous ( [Groot et al., 1995](#) ). Fig. 2.5a montre que les racines fines de *Stylosanthes hamata* descendent à une profondeur de 140 cm (le niveau de la cuirasse) et que la biomasse racinaire diminue en fonction de la profondeur d'une façon exponentielle négative. On constate des densités racinaires élevées dans les couches supérieures et la diminution de la densité avec la profondeur est moins prononcée que pour la biomasse racinaire (Fig. 2.5b). Cela implique une forte augmentation de la longueur spécifique (mètres des racines par gramme des racines) en allant vers les couches plus profondes.

[Figure 2.5.](#) Distribution de la biomasse racinaire (a) et de la densité racinaire (b) de *Stylosanthes hamata* vers la fin de l'hivernage à Cinzana (pluviométrie 700 mm an<sup>-1</sup>).

Une augmentation de la longueur spécifique des racines signifie que leur diamètre devient plus fin et que la superficie du système racinaire augmente. Ce n'est pas la biomasse racinaire mais surtout la densité d'enracinement (cm de racines par cm<sup>3</sup> du sol) et la superficie du système racinaire qui sont des paramètres importants dans la simulation de l'absorption d'eau et des éléments nutritifs (de Willigen & van Noordwijk, 1987). Ce sont les racines fines qui jouent un rôle prépondérant, et plus les diamètres des racines sont fines, plus grande est leur surface spécifique (mètres de racine par gramme biomasse) et leur capacité d'adsorption. En jouant sur leur diamètre, le *Stylosanthes hamata* arrive à mieux exploiter les couches profondes et de compenser la diminution de la biomasse racinaire en fonction de la profondeur.

L'apport de biomasse racinaire par la légumineuse *Stylosanthes hamata* est d'une autre nature que celle des ligneux ou de graminées pérennes, à cause de sa capacité de fixer l'azote. La minéralisation des racines peut contribuer d'une façon considérable à la disponibilité de l'azote dans le sol. Dans une étude avec l'objectif de déterminer les caractéristiques de la minéralisation des différents résidus de récolte, on a constaté que la teneur en azote des racines fines de *Stylosanthes hamata* est de 1,53 % (résultats non publiés). Cela implique que la quantité d'azote dans le système racinaire de *Stylosanthes hamata* se trouve dans l'ordre de 60 kg ha<sup>-1</sup>. La plupart de l'azote incorporé dans les racines devient disponible au cours de la décomposition, et est lié aux arrière effets considérables. Comme pour les autres cultures, la biomasse des racines fines et leur teneur en azote sont des

paramètres importants pour le sous-modèle du bilan d'éléments nutritifs dans le sol.

### 2.3.3. Graminée pérenne *Andropogon gayanus*

Dans le cadre du Projet PSS, un modèle de simulation pour la croissance du graminée pérenne *Andropogon gayanus* a été développé (Bonachella, 1993 ; en prép.). L'objectif principale de ce modèle est d'expliquer la plus-value des graminées pérennes par rapport aux graminées annuelles, en ce qui concerne leur productivité et leur capacité de maintenir ou augmenter la teneur en matière organique dans le sol. En plus, le modèle peut être utilisé pour indiquer les zones agro-écologiques les plus aptes sur le plan technique et économique pour l'introduction et production d' *Andropogon gayanus*. Pour obtenir les paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle, plusieurs études ont été réalisées. Une étude sur le système racinaire a été entreprise à la fin de saison de croissance 1992, (Groot *et al.*, 1995) afin d'obtenir les caractéristiques du système racinaire comme la profondeur d'enracinement, la distribution de la biomasse racinaire et la densité racinaire en fonction de la profondeur. L'étude sur les caractéristiques de la système racinaire d'une population installé depuis 1951 à N'Tarla, montre que la biomasse des racines fines (< 2 mm) est beaucoup plus importante que celle des grosses racines (> 2 mm) et que les grosses racines se limitent à la couche de 0-20 cm. La majorité des racines se trouvent dans les couches superficielles et 98% des racines se trouvent dans le couche 0-60 cm. Les racines descendent jusqu'à 180 cm, mais les quantités en profondeur sont faibles.

La distribution et la densité du système racinaire sont importantes pour obtenir des paramètres caractéristiques de la culture. Pour valider un modèle de simulation c'est surtout la dynamique dans le temps qui est importante. Fig. 2.6 montre l'évolution de la biomasse racinaire d'*Andropogon gayanus* à N'Tarla pendant la saison sèche. On constate qu'au cours de cette période, 70 % des racines sont décomposées (Traoré, en prép.).

*Figure 2.6. Suivi de biomasse racinaire d'Andropogon gayanus à N'Tarla au cours de la saison sèche 1992-1993.*

Les paramètres principaux pour le développement et la validation des modèles de simulation de la croissance des cultures sont : la distribution de la matière sèche entre les différents organes et la dynamique de la surface foliaire au cours de la saison. Fig. 2.7a est un exemple de la courbe de croissance pour les différentes parties d'*Andropogon gayanus* sous conditions de production potentiel (sans limitation d'eau et des éléments nutritifs). La Fig. 2.7b montre la dynamique de la surface foliaire pour le traitement sans limitation des éléments nutritifs et pour le témoin (Traoré, en prép.). Les données présentées si-dessous ont été utilisés par Coulibaly *et al.* dans leur validation du modèle d'*Andropogon* (voir Chapitre 4).

*Figure 2.7. Courbe de croissance des différentes parties d'Andropogon gayanus sous conditions de production potentiel à N'Tarla, 1993 (a) et dynamique de la surface foliaire pour le traitement sans limitation des éléments nutritifs (N4P4) et pour le témoin à N'Tarla 1993.*

## 2.4. Application des modèles

Comme déjà mentionné dans l'introduction, dans le cadre du projet les modèles de simulation seront utilisés pour l'extrapolation des données vers des conditions autres que celles des essais. Après une validation satisfaisante (voir Coulibaly *et al.*, Chapitre 4), le modèle permet d'estimer la production des cultures et des systèmes d'agroforestérie pour différentes zones pluviométriques et différents types de sol (voir Bazi *et al.*, Chapitre 5). En faisant des simulations pour différentes zones agro-climatiques pour des longues séries d'années, il est possible de faire des analyses de risque, et de calculer la chance de réussite d'une culture sous des conditions spécifiques (voir Bakker *et al.*, Chapitre 7).

Finalement les modèles de simulation permettent de calculer les effets à long terme de certaines techniques culturales et permettent de s'exprimer sur la possibilité d'améliorer les systèmes de production d'une telle façon qu'ils soient durables en termes de productivité du sol et de teneur en matière organique.

## 2.5. Bibliographie

Bonachella, S., 1993. [A model of perennial grasses under water limited conditions \(PGWL-FSE\). Description and user guide](#) .

Rappports PSS 2. IER, Bamako/AB-DLO, Wageningen.

Bonachella, S., (en prép.). A model of perennial grass (*Andropogon gayanus*) for West Africa (PGWA) : description and user guide. Rappports PSS. IER, Bamako/AB-DLO, Wageningen.

Conijn, S., (en prép.). [RECAFS : a model for resource competition and cycling in an agroforestry system](#). Rappports PSS, IER, Bamako/AB-DLO, Wageningen.

Groot, J.J.R. & P. de Willigen, 1991. Simulation of the nitrogen balance in the soil and a winter wheat crop. *Fertilizer Research* 27, 261-272.

Groot, J.J.R., D. Koné, M. Traoré & N. Kamissoko, 1995. [Description du système racinaire de l'\*Andropogon gayanus\*, du \*Vigna unguiculata\* et du \*Stylosanthes hamata\* en zone soudano-sahélienne](#). Rappports PSS 8, IER Bamako/AB-DLO, Wageningen.

Keulen, H. van & H. Breman, 1990. Agricultural development in the West African Sahelian region; a cure against land hunger? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 32, 177-197.

Keulen, H. van & N.G. Seligman, 1987. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen, 310 pp.

Penning de Vries, F.W.T. & M.A. Djitéye (eds), 1991. [La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle](#). Agric. Res. Rep. 918, Pudoc Wageningen, 525 pp. (réimpression de la version de 1982).

Soumaré, A., J.J.R. Groot, D. Koné, & S. Radersma, 1994. [Structure spatiale du système racinaire de deux arbres du Sahel : \*Acacia seyal\* et \*Sclerocarya birrea\*](#). Rappports PSS 5, IER Bamako/AB-DLO Wageningen, 36 pp.

Spitters, C.J.T., H. van Keulen & D.W.G. van Kraalingen, 1989. A simple and universal crop growth simulator : SUCROS87. In : Rabbinge, R., S.A. Ward, & H.H. van Laar, (eds.) *Simulation and Systems Management in Crop Production*. *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen, p. 147-181.

Traoré, M., (en prép.). [Utilisation des éléments nutritifs par une graminée pérenne : \*Andropogon gayanus\*](#). Thèse de doctorat, ISFRA, Bamako.

Verberne, E.L.J., J. Hassink, P. de Willigen, J.J.R. Groot, & J.A. van Veen, 1990. Modelling organic matter dynamics in different soils. *Neth. J. Agric. Sci.* 38, 221-238.

Willigen, P. de & M. van Noordwijk, M., 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. PhD-Thesis Agricultural University Wageningen, 282 pp.

### **3. Les modèles de simulation de la croissance végétale comme outil de recherche développement : le cas du développement du sorgho**

M.Vaksmann<sup>1)</sup>, S. Traoré<sup>2)</sup> & O. Niangado<sup>2)</sup>

1) CIRAD-CA, BP 1813, Bamako, Mali

2) Institut d'Economie Rurale (IER), BP 238, Bamako, Mali

## Résumé

Face aux incertitudes climatiques et à la variabilité des conditions de culture, les sorghos africains ont développé des capacités d'adaptations remarquables. En effet, de nombreux paramètres qui sont généralement considérés comme constant deviennent largement variables en Afrique. Il s'agit principalement de la durée du cycle qui peut varier de 90 à 200 jours suivant la date de semis. La démarche utilisée par l'IER est présentée succinctement à travers trois principaux axes de recherche :

1. l'établissement de modèles fiables de prévision du comportement des variétés africaines en fonction des conditions de culture ;
2. l'étude des conséquences en terme d'adaptation au climat, on montre comment cette variabilité contribue à la diminution des risques climatiques ;
3. l'élaboration de nouvelles orientations pour les programmes de recherche en Afrique en conciliant les aspects de productivité et de stabilité.

### 3.1. Introduction

Depuis près d'un demi-siècle, les programmes de sélection se sont orientés vers la création de variétés productives, adaptées à un environnement bien maîtrisé et non limitant. Il s'agissait de préparer la révolution verte qui devait toucher l'Afrique après avoir permis une amélioration considérable de la production agricole en Asie. *A posteriori*, on constate que les variétés obtenues sont peu adaptées aux systèmes de production extensifs d'Afrique de l'Ouest et que le taux d'adoption des variétés de sorgho améliorées issues de la recherche est très faible (Stoop *et al.*, 1982).

Tout en exprimant un potentiel de rendement élevé, les nouvelles variétés se comportent mal lorsqu'elles se trouvent dans les conditions difficiles du milieu paysan. Ce constat nous amène à orienter les programmes de recherche plus sur *la stabilité du rendement* et la *résistance aux stress* climatiques et de fertilité que sur le potentiel de rendement à un niveau d'aménagement élevé (Matlon, 1985).

Face aux incertitudes climatiques et à la variabilité des conditions de culture, les variétés locales de sorgho ont développé des capacités d'adaptations remarquables qui ont, jusqu'à présent, été peu étudiées. C'est ainsi que de nombreux paramètres qui, pour une même variété, sont généralement considérés comme constant sont largement variables en Afrique. Il s'agit, par exemple, de la durée du cycle (de 90 à 200 jours), du nombre de feuilles développées (de 16 à 40), de la hauteur des tiges (de 1 à 5 mètres), de la vitesse d'apparition et de la dimension des feuilles, etc. Plus particulièrement, la variabilité de la durée des phases phénologiques rend difficile la prévision du comportement de la culture (date de floraison, production de paille, etc.). En l'absence d'une bonne connaissance du cycle de la culture il est difficile de monter des programmes de recherche agronomiques cohérents et *a fortiori* de donner des conseils précis. C'est pourquoi, des études, menées conjointement par l'IER, le CIRAD et l'ICRISAT, sont en cours pour clarifier les connaissances sur le photopériodisme des variétés locales de sorghos et ses conséquences agronomiques. Notre démarche expérimentale possède trois principaux axes de recherche :

1. Etudier et mesurer cette variabilité afin d'établir des modèles fiables de prévision du comportement des variétés africaines en fonction des conditions de culture.
2. Aborder les conséquences en terme d'adaptation au climat. Montrer comment cette variabilité contribue à la diminution des risques climatiques.
3. En déduire de nouvelles orientations pour les programmes de recherche en Afrique en conciliant les aspects de productivité et de stabilité.

### 3.2. Photopériodisme et élaboration de modèles

Une particularité remarquable des sorghos africains est la variabilité de la durée de leur cycle de végétation en fonction de la date de semis. A l'exception des variétés dites « de soudure » que l'on cherche à récolter très tôt, les céréales africaines rallongent généralement leur cycle lorsque le semis est précoce. La Fig 3.1. illustre ce phénomène pour une variété locale dans la région de Bamako. Ce comportement découle de la forte sensibilité à la photopériode des variétés locales de sorgho. Le sorgho est une plante de jours court qui a tendance à fleurir plus rapidement lorsque la durée du jour décroît (du lever au coucher du soleil). Ce phénomène joue un rôle important dans la croissance et le développement des plantes et permet surtout la *synchronisation de leurs comportements avec les saisons* (induction de la floraison, dormance des bourgeons, allongement des entre-noeuds, abscission des feuilles, etc.) (Salisbury & Ross, 1985 ; Heller, 1985).

L'étude de la réponse à la photopériode d'une plante donne des informations importantes sur son écosystème naturel et permet de prévoir son comportement. Malgré l'importance de ce phénomène, relativement peu d'études ont été menées sur ce sujet. La durée du cycle et l'évolution phénologique de la plupart des variétés cultivées sont connues de façon superficielle. Il s'agit pourtant d'informations essentielles pour ajuster le cycle de développement des cultures aux conditions du milieu agricole, particulièrement en Afrique soudano-sahélienne où la durée de la saison de culture est très variable et ne laisse qu'une faible marge de manœuvre aux agriculteurs. Deux modèles sont principalement utilisés pour décrire la réaction des plantes de jour court à la photopériode. Dans le premier cas, la durée de la période végétative DT (de la levée à l'initiation de la panicule dans le bourgeon terminal), exprimée en somme de degrés jour, diminue linéairement avec la durée du jour (Ritchie & Alagarswamy, 1989). Ce modèle a été initialement décrit pour le riz (Vergara & Chang, 1976) puis a été étendu à d'autres plantes dont le sorgho (Major, 1980). Dans ce modèle, la durée de la période végétative varie peu avec la photopériode. Dans le second modèle, l'équation est une hyperbole (Franquin, 1974 ; Hadley *et al.*, 1983). La vitesse de développement, définie comme l'inverse de la durée de la période végétative, est proportionnelle à la photopériode P.

*Figure 3.1. Variation de la durée du cycle d'une variété locale de sorgho (CSM 388) lorsque la date de semis varie (région de Bamako).*

La durée de la phase végétative s'accroît alors très rapidement lorsque P augmente, jusqu'à rendre impossible la floraison en jour trop long. On a :

$$EMPI = \frac{1}{a - b \cdot P}$$

Le second modèle, présenté en Fig. 3.2 pour une variété de sorgho ouest-africaine, reflète bien le comportement des sorghos africains dont la durée du cycle varie dans des proportions considérables lorsqu'ils sont semés hors saison ou en des lieux différents de leur zone d'origine, sous des photopériodes trop longues.

### 3.3. Photoperiodisme et adaptation au climat

En Afrique soudano-sahélienne, la saison des pluies peut se découper en trois grandes phases (Fig. 3.3) :

- Une première période (de mai à juillet) de pluviométrie erratique correspond au début de l'hivernage. C'est généralement la période de semis.
- La seconde période est très humide et la pluviométrie régulière. Cette période correspond à la pleine végétation du sorgho de mi-juillet à début septembre.
- La troisième période correspond à la fin de la saison des pluies, le stock d'eau dans le sol diminue régulièrement. C'est la période de maturation du grain.

*Figure 3.2. Relation entre la photopériode et la durée de la période végétative exprimée en degrés jours (base 8).*

*Figure 3.3. Evolution du stock hydrique et détermination schématique des phases caractéristiques de l'année pluviométrique en Afrique soudano-sahélienne.*

En climat soudano-sahélien, la durée de la saison des pluies dépend étroitement de la date d'arrivée des pluies, très variable d'une année sur l'autre (Sivakumar, 1988). Les semis s'étalent sur une période assez longue, de mai à juillet car la possibilité de semis dépend à la fois du climat et des itinéraires techniques utilisés (travail du sol, etc.). Chez les mils et sorghos africains, le photoperiodisme conduit souvent à une floraison groupée à la fin de la seconde période, la plus humide. Cette particularité est essentielle car le rendement et la qualité du grain dépendent étroitement de la date de floraison. Le grain des variétés qui fleurissent trop précocement est altéré par les moisissures, les oiseaux et les insectes, tandis que les variétés qui fleurissent trop tardivement épuisent la réserve en eau du sol avant que le remplissage des grains ne soit terminé (Curtis, 1968 ; Andrews, 1973 ; Franquin, 1984).

Si, entre les années, le semis peut varier de mai à juillet, en un même endroit, la date moyenne de fin des pluies est moins variable et l'ensemble du Mali peut se partager en 3 à 4 zones homogènes (Fig. 3.4).

Le photopériodisme des variétés locales de sorgho procure, ainsi, aux systèmes traditionnels de culture une certaine souplesse d'adaptation et stabilise les rendements. La connaissance précise de ce phénomène est donc essentielle pour mettre en place une vulgarisation raisonnée des variétés. Il s'agit de caractériser, pour chaque variété, l'écart entre sa date de floraison et la fin moyenne de la saison des pluies. Un zonage peut utiliser cet écart comme *critère d'adaptation au milieu*.

*Figure 3.4. Date moyenne de fin des principales pluies au Mali. La fin de la saison est déterminée par le moment où l'évapotranspiration des cultures excède la pluviométrie.*

### 3.4. Conséquences pour les programmes de recherche

Il est rare, pour une plante de grande culture, de présenter une interaction aussi importante entre le génotype et l'environnement. Cette caractéristique particulière des sorghos africains a intrigué les agronomes, même avant la découverte du photopériodisme (Duchêne, 1903). Un certain nombre d'études a porté sur les conséquences agronomiques du photopériodisme mais les résultats restent fragmentaires (Bezot, 1963 ; Cochemé & Franquin, 1967 ; Kassam & Andrews, 1975 ; Vaksman & Traoré, 1991).

Dans les années soixante, les sélectionneurs ont entrepris de nombreux croisements à partir de matériel exogène. Ils reprochaient aux variétés locales leur tendance à produire trop de pailles par rapport aux grains (Jacquinot, 1972). Ces variétés ne pouvaient pas valoriser des techniques intensives de production. La sélection a donc privilégié l'introduction de variétés de taille et de cycle court. Cette tendance s'est encore accrue avec la sécheresse qui a sévi au Sahel : les variétés au développement plus rapide ont été préférées aux variétés locales car elles devaient mieux s'adapter à des hivernages courts (Lambert, 1983).

Etant donné les incidences considérables du photopériodisme sur le choix de la *date* et de la *densité du semis*, sur *l'efficacité des engrais*, du *travail du sol* et du *désherbage*, la recherche agronomique doit intégrer ce phénomène dans une approche pluridisciplinaire pour aboutir à la définition de critères d'adaptation des variétés aux différentes situations agricoles d'Afrique de l'Ouest.

En raison de l'importance des interactions génotype x milieu chez des céréales africaines, le seul rendement est un critère de sélection trop empirique qui ne reflète pas les potentialités de la culture en milieu réel. **Face à la complexité des facteurs à prendre en compte, les modèles de simulation sont des supports de raisonnement nécessaires** : Ils intègrent les réponses de la plante aux différentes conditions du milieu physique et aux systèmes de cultures. Cette démarche facilite l'élaboration des protocoles expérimentaux en permettant *l'identification et l'analyse des contraintes et leurs interactions*. Ce qui permettra de *diminuer le délai* entre l'identification du problème et les solutions proposées au développement.

Un certain nombre d'opérations de recherche découlent naturellement de ces observations. En matière de sélection variétale, on peut envisager la démarche suivante :

1. Mise au point de modèles opérationnels permettant de prévoir simplement l'évolution phénologique de la variété en fonction des conditions de culture.
2. Mise au point de protocoles expérimentaux simples permettant de cribler un grand nombre de variété vis-à-vis du photopériodisme.
3. Evaluation de l'ensemble des populations locales et du matériel en cours de sélection vis-à-vis du photopériodisme.
4. Etude de la génétique du photopériodisme et de la possibilité de sélectionner à la fois sur des critères de *productivité* et de *stabilité du rendement*.

Sur le plan agronomique, étant donné le caractère variable de la durée du cycle et donc de la production de paille, on doit envisager :

1. Etude de la variation de l'indice de récolte et de son optimisation en fonction des conditions du milieu.
2. Etude des facteurs d'adaptation aux stress de fertilité (efficacité des fertilisants).
3. Détermination pour chaque variété des *zones d'adaptation* et des dates optimales de semis en tenant compte de la variabilité de

l'indice de récolte, de la satisfaction des besoins en eau et des conditions climatiques au moment de la maturation.

Un certain nombre de caractères du sorgho dépendent étroitement du photopériodisme et doivent être réévalués sur ce plan :

1. Etude du tallage (densité de peuplement).
2. Etude de la montaison (formation de la tige).
3. Etude de la mise en place de la surface foliaire qui conditionne aussi bien la formation des assimilats que les besoins en eau de la plante.

Cette liste est loin d'être exhaustive, en matière de protection des végétaux on peut considérer le groupement des floraisons par le photopériodisme des variétés locales est un facteur d'évitement des attaques d'oiseaux, des moisissures du grain et de nombreux insectes.

On peut aussi penser que la prise en compte du photopériodisme et des autres caractéristiques particulières des variétés locales permettra d'éclairer les chercheurs dans l'analyse des pratiques traditionnelles et la justification du choix des paysans par rapport aux contraintes du milieu.

### 3.5. Bibliographie

Andrews, D.J., 1973. Effects of date of sowing on photosensitive Nigerian Sorghums. *Expl. Agric.* 9, 337.

Bezot, P., 1963. L'amélioration des Sorghos au Tchad. *L'Agronomie Tropicale* 18, 985-1007.

Cochemé, J. & P. Franquin, 1967. A study of the agroclimatology of the semiarid area south of the Sahara in West Africa. *FAO/UNESCO*, 325 pp.

Curtis, D.L., 1968. The relation between yield and date of heading in Nigerian sorghums. *Expl. Agric.* 4.

Duchêne, 1903. Note sur la culture de l'Ampemby et sur l'influence de la nature du terrain sur la végétation de cette plante. *Bulletin du jardin colonial*. p. 100-103.

Franquin, P., 1974. Formulation des phénomènes apparents de photothermopériodisme en conditions naturelles. *Principes de base. Cah. ORSTOM, sér. Biol.* 23, 31-43.

Franquin, P., 1984. Adaptation des mils et sorghos à la photopériode, au parasitisme et à la capacité hydrique du sol. *ICRISAT, Agrometeorology of sorghum and millet in the semi-arid tropics. Proceedings of the International Symposium*. p. 191-203.

Hadley, P., E.H. Roberts & R.J. Summerfield, 1983. A quantitative model of reproductive development in Cowpea [*Vigna unguiculata* (L) Walp.] a relation to photoperiod and temperature and implications for screening germplasm. *Ann. Bot.* 51, 531-543.

Heller, R., 1985. *Physiologie végétale. 2. Développement*. MASSON, 215 pp.

Jacquinet, L., 1972. Résultats et perspectives des recherches effectuées au Sénégal sur la potentialité du mil céréalier (*Pennisetum typhoides*). *Agron. Trop.* 17, 815-821.

Kassam, A.H. & D.J. Andrews, 1975. Effects of sowing date on growth, development and yield of photosensitive sorghum at Samaru, Northern Nigeria. *Expl. Agric.* 11, 227-240.

Lambert, C., 1983. Influence de la précocité sur le développement du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubbard). *Agron. Trop.* 38, 7-25.

- Major, D.J., 1980. Photoperiod response characteristics controlling flowering of nine crop species. *Can. J. Plant Sci.* 60, 777-784.
- Matlon, P.J., 1985. Analyse critique des objectifs, méthodes et progrès accomplis à ce jour dans l'amélioration du sorgho et du mil : une étude de cas de l'ICRISAT/Burkina Faso. Dans : Technologies appropriées pour les paysans des zones semi-arides de l'Afrique de l'ouest. Université de Purdue, p. 181-211.
- Ritchie, J.T. & G. Alagarswamy, 1989. Simulation of sorghum and pearl millet phenology in modeling the growth and development of sorghum and pearl millet. *ICRISAT Res. Bull.* 12, 24-29.
- Salisbury, F.B. & C.W. Ross, 1985. *Plant physiology*, third Edition. Wadsworth biology series. Wadsworth, Belmont. p. 426-446.
- Sivakumar, M.V.K., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian Climatic Zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology* 42, 295-305.
- Stoop, W.A., C.M. Pattanayak, P.J. Matlon & W.R. Root, 1982. A strategy to raise the productivity of subsistence farming systems in the west African semi-arid tropics. Dans : Proceedings, sorghum in the Eighties ICRISAT 2-7 November 1981, Patancheru, India, p. 519-526.
- Vaksmann, M. & S.B. Traoré, 1991. Adéquation entre risque climatique et choix variétal du mil. Dans : Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. John Libbey Eurotext. Paris, p. 113-123.
- Vergara, B.S. & T.T. Chang, 1976. The flowering response of the rice plant to photoperiod. A review of the literature. IRRI, Los Baños.

## 4. Evaluation du modèle de simulation de la croissance et du développement d'*Andropogon gayanus*, en zone soudano-sahélienne

A. Coulibaly<sup>1)</sup>, M. Traoré<sup>1)</sup>, et P.W.J. Uithol<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Institut d'Economie Rurale (IER), B.P. 258, Bamako, Mali

<sup>2)</sup> Institut de la Biologie Agronomique et de la Fertilité du Sol (AB- DLO), B.P. 14, 6700 AA Wageningen, les Pays-Bas.

### Résumé

*Le modèle de la croissance et du développement de la graminée pérenne *Andropogon gayanus* en zone soudano-sahélienne, a été évalué pour :*

- 1) son comportement sur trois sites agro-climatiques dans la zone soudano-sahélienne ;*
- 2) sa sensibilité à quelques paramètres ;*
- 3) la validité des données simulées ;*
- 4) l'aspect pratique de son utilisation.*

*Le comportement du modèle PGWA dans les zones agro-climatiques de N'Tarla et de Niono au Mali et de Thiès au Sénégal est assez similaire aux observations effectuées en milieu réel. L'analyse de sensibilité du modèle aux paramètres a permis de déceler l'inconsistance du modèle dans la simulation de la biomasse racinaire et des réserves d'hydrates de carbone. Au niveau de la validation, les variables biotiques simulées avant et après la floraison de l'*Andropogon* sont comparables à celles observées à N'Tarla en 1993. Le modèle peut simuler la croissance et le développement de l'*Andropogon gayanus* et de surcroît estimer le potentiel productif de la culture dans la sous-région.*

### 4.1. Introduction

Les modèles de croissance et du développement des cultures constituent un moyen efficace permettant de dégager la productivité des systèmes (plante - environnement climatique et technique). Cependant, la réussite d'une telle activité à travers les modèles de simulation dépend de la précision des données simulées, qui décrivent le système et ses éléments par rapport à la réalité. Une des préoccupations des utilisateurs des modèles est leur capacité à résoudre des questions spécifiques des systèmes de production (agriculture-élevage).

Le modèle PGWA (« Perennial Grass for West African conditions », Bonachela, 1995) simule la croissance et le développement d'*Andropogon gayanus* avec ou sans limitation d'eau et d'azote dans les régions soudano-sahéliennes. L'accumulation quotidienne de la biomasse est calculée à partir de la radiation journalière, de la disponibilité en eau (pluie et dynamique de l'eau du sol) et de la concentration d'azote de la biomasse aérienne. Ce faisant, le modèle simule le développement phénologique et le régime pérenne de la plante à travers les saisons. Les réserves d'hydrates de carbone qui constituent les ressources de la culture en saison sèche, sont estimées à partir de la biomasse racinaire. Le modèle tient compte des effets réducteurs de la croissance dus aux différents stress (hydriques, thermiques, azotés) du système. L'utilisation des différentes concentrations d'azote dans la biomasse aérienne permet de simuler les performances de la culture selon les niveaux de fertilité du système.

Cependant, la présente version du PGWA n'a fait l'objet d'aucun test de sa capacité de représenter la réalité de la croissance et du développement phénologique de la culture. Selon Dent & Blackie (1979), la vérification et la validation sont des tests essentiels à l'évaluation des résultats de simulation afin d'établir l'adéquation du modèle. La vérification permet de dégager la logique du comportement du modèle dans la simulation des différentes variables du système. En outre, elle détermine la sensibilité du modèle à certains paramètres critiques pour la simulation. Enfin, elle définit les limites d'usage du modèle. Quant à la validation, elle consiste en une comparaison entre le modèle et la réalité perçue par une série de résultats expérimentaux. Les objectifs de la présente évaluation sont essentiellement orientés vers quatre aspects du modèle :

- 1) son comportement dans trois zones agro-climatiques de la région soudano-sahélienne ;
- 2) la sensibilité du modèle à quelques paramètres clés ;
- 3) la validité des données simulées par rapport aux observations effectuées sur trois sites ;
- 4) enfin, son importance pratique comme outil d'estimation du potentiel productif de la culture.

## 4.2. Matériels et méthode

### 4.2.1. Comportement du modèle

Les données utilisées dans le modèle PGWA sont des caractéristiques de la plante, les variables météorologiques (radiation, températures, pluie, humidité de l'air et vitesse du vent) et des caractéristiques physiques du sol (pF, profondeur du profil, vitesse d'infiltration, etc.) de trois sites de la zone soudano-sahélienne : N'Tarla et Niono au Mali et Thiès au Sénégal. Les sols utilisés étaient du type limoneux sur les trois sites. Les données climatiques des années suivantes : 1992-1993 pour N'Tarla, 1982-1983 pour Niono, 1988-1989 pour Thiès et les coordonnées géographiques de chaque site ont été insérées dans le modèle.

L'évaluation du comportement du modèle a porté sur les valeurs maximales des variables simulées : la biomasse totale, la biomasse aérienne, la biomasse racinaire, la transpiration, l'évaporation et le drainage. Ces valeurs simulées ont été appréciées selon les performances maximales observées de l'*Andropogon gayanus* sur les différents sites (Breman, 1982 ; Dieng *et al.*, 1991 ; Traoré, 1995).

### 4.2.2. Analyse de sensibilité

Cette analyse du modèle permet de définir le poids relatif des paramètres sur les résultats de simulation. Elle a porté sur des valeurs croissantes et décroissantes de trois paramètres clés du modèle (Tableau 4.1). Premièrement, il s'agit du coefficient d'utilisation de l'azote par la biomasse aérienne,  $p$  (g matière sèche par g d'azote de la biomasse aérienne par jour). Le modèle calcule l'accumulation maximale de la matière sèche à partir du paramètre  $p$  et de la radiation globale journalière selon l'équation

de ten Berge *et al.*, 1994.

$$G = pN_L [1 - e^{-\epsilon R / (pN_L)}]$$

D'où  $G$  est le taux maximal de la croissance ( $\text{g m}^{-2} \text{j}^{-1}$ ),  $p$ , le coefficient d'utilisation de l'azote par la biomasse aérienne ( $\text{g M.S. g}^{-1} \text{N j}^{-1}$ ),  $N_L$ , la concentration en azote de la biomasse aérienne ( $\text{g N m}^{-2}$ ),  $\epsilon$ , le coefficient d'utilisation de la radiation ( $\text{g M.S. MJ}^{-1}$ ),  $f_R$ , le facteur de réduction de la biomasse à des niveaux élevés de radiation, et  $R$ , la radiation globale incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$ ). Dans l'analyse de sensibilité, la valeur initiale de  $p$  ( $6,25 \text{ g M.S. g}^{-1} \text{N j}^{-1}$ ) a été variée de +/- 5 et 10 %. Deuxièmement, le paramètre date de 50 % floraison, ( $FDRS$ ) qui détermine la durée de la phase végétative, a été varié de +/- 5 et 10 jours par rapport à la date initiale qui est le 15 Octobre à N'Tarla soit le 285<sup>ème</sup> jour du calendrier julien. Enfin, la sensibilité pour des changements dans le coefficient d'utilisation de l'eau,  $WUEC$  (Pa), a été évaluée. En valeur absolue, ce coefficient influence le rapport entre l'accumulation quotidienne de la biomasse et la transpiration selon l'équation de Tanner & Sinclair (1983) :

$$MTRANS = DMP * VPD / WUEC$$

d'où  $MTRANS$  est la transpiration maximale de la culture ( $\text{mm j}^{-1}$ ),  $DMP$ , l'accumulation quotidienne de la biomasse ( $\text{g m}^{-2} \text{j}^{-1}$ ),  $VPD$  (Pa), le déficit journalier de la pression de vapeur d'eau et  $WUEC$ , le coefficient d'utilisation de l'eau par la plante (Pa). Des valeurs de 5,8 pour le blé (culture  $C_3$ ), 11,8 pour le sorgho (culture  $C_4$ ) et 8,8, une valeur intermédiaire ont été utilisées.

Tableau 4.1. Récapitulatif des valeurs des paramètres utilisés dans l'analyse de sensibilité : le coefficient d'utilisation d'azote  $p$  ( $\text{g M.S. g}^{-1} \text{N j}^{-1}$ ), la date de 50 % de floraison  $FDRS$  (j) et le coefficient d'utilisation d'eau  $WUEC$  (Pa).

Paramètre	valeurs utilisées				
$p$	5,0 (-20 %)	5,62 (-10 %)	6,25 <sup>1</sup>	6,87 (+10 %)	7,5 (+20 %)
$FDRS$	275 (-10 j)	280 (-5 j)	285 <sup>1</sup>	290 (+5 j)	295 (+10 j)
$WUEC$ <sup>2</sup>	5,8 <sup>1</sup>	8,8	11,8	-	-

<sup>1</sup> Valeur actuelle incluse dans le modèle ;

<sup>2</sup> Adapté de Tanner & Sinclair (1983).

La croissance et le développement de l'*Andropogon gayanus* ont été simulés dans des conditions de production avec et sans fertilisation azotée à N'Tarla en 1993. La sensibilité relative du modèle a été calculée à partir des résultats de la simulation. Celle-ci constitue le pourcentage de changement par rapport à la condition initiale de simulation, lorsque aucun autre paramètre ne varie.

Pour les différents tests, l'étude des résultats de simulation a porté essentiellement sur deux groupes de variables : les *variables biotiques*, (biomasse totale, biomasse aérienne, biomasse racinaire et les réserves d'hydrates de carbone) et les *variables abiotiques* du système (transpiration, évaporation et drainage).

#### 4.2.3. Validation du modèle

Dans le cadre de la validation, des résultats de la saison 1993 provenant des travaux d'expérimentation à la station de N'Tarla (Traoré, 1995) ont été comparés aux données simulées. Cette comparaison portait sur les performances de la culture dans la condition de production avec et sans fertilisation azotée sur sol limoneux. Une première comparaison consistait à constater sur graphiques les écarts arithmétiques entre les données observées et simulées sur la courbe de croissance au cours du développement phénologique de la plante. La deuxième prévoyait une série d'analyses de régression linéaire entre les variables simulées et celles observées. Ces analyses permettent de dégager la signification de la relation entre les variables à comparer (Dent & Blackie, 1979).

#### 4.2.4. Application du Modèle PGWA

Le test d'application du modèle subordonné aux précédents (comportement et validation), vise simplement une estimation pluriannuelle fiable du potentiel productif de l' *Andropogon gayanus* dans la zone soudano-sahélienne de Ségou. Les données du climat, de la plante et du sol afférentes au site ont été incorporées dans la simulation du potentiel productif de la culture. Les données climatiques variaient de 1961 à 1983.

### 4.3. Résultats et discussion

#### 4.3.1. Comportement du modèle dans trois zones agro-climatiques

Les résultats de simulation des valeurs maximales des variables biotiques et abiotiques caractérisant la croissance de la plante sont consignés au Tableau 4.2. Parmi les variables biotiques, les valeurs maximales de la biomasse totale et celles de la biomasse aérienne sont les plus élevées à N'Tarla et à Thiès et plus basses à Niono. Cet état est essentiellement lié à la différence pluviométrique des années choisies dépendant de la situation agro-climatique des sites. Le niveau élevé des réserves d'hydrates de carbone à Thiès comparativement à celui de N'Tarla et de Niono est attribuable à une production importante de biomasse racinaire sur ce site. Dans le modèle, les réserves sont proportionnellement estimées de la biomasse racinaire existante au stade de 50 % floraison du développement phénologique de la plante. A travers les variables abiotiques, l'accroissement de la transpiration est relatif aux différents niveaux de rendements (biomasse totale, aérienne et racinaire). Quant à l'évaporation de l'eau à la surface du sol, elle demeure liée à la quantité de biomasse produite et à la variabilité climatique des sites.

Tableau 4.2. Valeurs maximales simulées des variables biotiques et abiotiques de la croissance de l'*Andropogon gayanus* sur sol sablonneux à N'Tarla, Niono (Mali) et à Thiès (Sénégal).

	N'Tarla		Niono		Thiès	
Variables	1992	1993	1982	1983	1988	1989
<b>Biotique</b>	kg ha <sup>-1</sup>					
Biomasse totale	17695 <sup>a</sup>	15071 <sup>a</sup>	7942 <sup>a</sup>	5302 <sup>a</sup>	13071 <sup>a</sup>	15149 <sup>a</sup>
Biomasse aérienne	11840	11633	6221	4254	9739	10557
Biomasse racinaire	5860	4070	3130	1427	4484	6283
Réserves	704	469	169	330	1035	1450
<b>Abiotique</b>	(mm)					
Transpiration	435	390	165	124	313	363
Evaporation	161	110	81	75	99	99
Pluviométrie*	848	576	321	304	405	528

<sup>a</sup> valeur maximale ne représentant pas un total.

\* cumul de la période de croissance de la culture.

L'évolution des variables biotiques (biomasse totale, aérienne et réserves) en fonction du temps est décrite par les courbes de croissance (Fig. 4.1a, b et c). Le modèle décrit une évolution consistante de la croissance à travers la biomasse totale, la biomasse aérienne, racinaire et les réserves d'hydrates de carbone de la plante. Ces rendements atteignent leurs maxima à la floraison et diminuent face à la sénescence de la biomasse et à la formation des réserves. La croissance en saison sèche dépend du niveau des réserves d'hydrates de carbone et de l'humidité résiduelle. Celle-ci est remarquée au niveau de la différence de production de biomasse aérienne entre N'Tarla (Fig. 4.1b) d'une part et Thiès et Niono (Fig. 4.1a et c) d'autre part. Au regard des observations effectuées *in situ* par Breman *et al.* (1982) à Niono ; Dieng *et al.* (1991) à Thiès et Traoré (1995) à N'Tarla, les données simulées sont comparables aux réalités de croissance et du développement de l'*Andropogon gayanus* dans la région.

#### 4.3.2. Sensibilité du modèle PGWA

### Effets du coefficient d'utilisation de l'azote par la biomasse aérienne

En condition de production limitée par l'azote, les résultats de simulation des variables biotiques et abiotiques dégagent une sensibilité consistante du modèle à travers les valeurs décroissantes et croissantes du coefficient  $p$ , Tableau 4.3. Au niveau des variations décroissantes, -10 % de la valeur initiale de  $p$  provoque une diminution quantitative de 4 à 12 % des variables biotiques (biomasse totale, aérienne, racinaire, réserves d'hydrates de carbone) et 3 % de la transpiration. Quant à l'évaporation de l'eau à la surface du sol et le drainage de l'eau de la zone racinaire, on observe des valeurs excédentaires de 4 et 13 % de la valeur initiale. Quant à l'effet de -20 %, il apparaît une baisse de 9 à 24 % des variables biotiques et un accroissement de 8 à 27 % des variables abiotiques. Ces augmentations au niveau des variables sont simplement liées à la baisse enregistrée dans la production de biomasse qui affecte le couvert végétal et le développement des racines vers les couches profondes.

**Figure 4.1.** Evolution pondérale des rendements simulés (biomasse totale, biomasse aérienne et réserves d'hydrates) de *l'Andropogon gayanus* à Niono, 1982 et 1983 (a) ; à N'Tarla, 1992 et 1993 (b), et à Thiès, 1988 et 1989 (c).

Par contre, au niveau des variations croissantes (+10 et +20 %), une tendance contraire se dégage. Les niveaux de rendement des variables biotiques (biomasse totale, aérienne, racinaire) et de la transpiration accusent un accroissement de plus de 100 % de ceux de la condition initiale. La diminution de l'évaporation et du drainage est une des conséquences de ces augmentations.

En conditions de production avec fertilisation azotée, les niveaux de production sont beaucoup plus élevés (plus de 19 tonnes par hectare de biomasse, avec la valeur initiale du coefficient  $p$ ). Cependant, la sensibilité du modèle à différentes valeurs (décroissantes ou croissantes) de  $p$  présente les mêmes allures que celle de la condition sans fertilisation azotée. L'absence d'eau de drainage est attribuable au développement important de la biomasse.

**Tableau 4.3.** Sensibilité du modèle PGWA à différentes valeurs du coefficient d'utilisation de l'azote par la biomasse aérienne  $p$  ( $g (ms) g (N)^{-1} j^{-1}$ ), pour les conditions de production avec et sans fertilisation azotée à N'Tarla, 1993.

p	Sans fertilisation					Avec fertilisation				
	-20 %	-10 %	6,25	+10 %	+20 %	-20 %	-10 %	6,25	+10 %	+20 %
BT	0,91	0,96	15703	1,03	1,05	0,94	0,97	19730	1,02	1,03
BA	0,96	0,98	11633	1,01	1,01	0,95	0,98	16042	1,01	1,01
BR	0,76	0,88	4070	1,08	1,08	0,96	0,99	4307	1,04	1,07
RES	0,78	0,88	469	1,08	1,08	0,96	0,99	994	1,04	1,07
TRAN	0,93	0,97	390	1,01	1,01	0,96	0,99	509	1,01	1,01
EVAP	1,08	1,04	110	0,97	0,93	1,11	1,05	86	0,97	0,95
DRAIN	1,27	1,13	75	0,92	0,83	0	0	0	0	0

BT = biomasse totale, BA = b. aérienne, BR = b. racinaire, Res = réserves, Trans = transpiration, Evap = Evaporation, Drain = Drainage.

### Effets de la date de floraison

En condition de production sans fertilisation azotée, les rendements des variables biotiques et la quantité d'eau transpirée diminuent, lorsque le nombre de jours du début de la croissance à la floraison (durée de la croissance végétative) décroît. Cette baisse dans la production de biomasse est récupérée par l'augmentation de la quantité d'eau évaporée ou drainée de la zone racinaire. Quant à l'effet des nombres croissants de jours à la floraison, il dégage 2 % de plus de la production de biomasse totale, plus de 8 % de la biomasse racinaire et plus de 10 % des réserves d'hydrates de carbone. Il n'a aucun effet notable sur la biomasse aérienne. Les mêmes tendances sont remarquables au niveau de la transpiration. D'autre part, l'évaporation et le drainage ont diminué par rapport à la condition initiale (Tableau 4.4).

**Tableau 4.4.** Sensibilité du modèle PGWA à différentes dates de floraisons de *l'Andropogon gayanus*, condition de production avec et sans fertilisation azotée à N'Tarla, 1993.

date	Sans fertilisation					Avec fertilisation				
	-20j	-5j	285j	+5j	+20j	-20j	-5j	285j	+5j	+20j
BT	0,94	0,95	15703	1,02	1,02	0,98	0,99	19730	1,00	1,01
BA	0,94	0,98	11633	1,00	0,99	0,95	0,98	16042	1,01	1,02
BR	0,93	0,88	4070	1,08	1,12	1,21	1,09	4307	0,94	0,97
RES	1,85	0,87	469	1,10	1,15	1,21	1,09	994	0,87	0,65
TRANS	0,92	0,94	390	1,03	1,05	0,98	0,99	509	1,01	1,01
EVAPO	1,08	1,05	110	0,97	0,94	1,08	1,05	86	0,98	0,95
DRAIN	1,42	1,12	75	0,96	0,96	0	0	0	0	0

BT = biomasse totale, BA = b. aérienne, BR = b. racinaire, Res = réserves, Trans = transpiration, Evap = Evaporation, Drain = Drainage.

En condition de production avec fertilisation azotée, la biomasse aérienne produite augmente avec l'accroissement du nombre de jours à la floraison. Par contre, les tendances contraires que dégagent les biomasses racinaires et les réserves indiquent une inconsistance du modèle. En effet, les quantités de biomasse racinaire et de réserves d'hydrates de carbone augmentent lorsque la durée de la période végétative diminue. Cela semble contradictoire aux principes physiologiques relatifs au rapport entre le rendement et le cycle de croissance.

#### *Effets du coefficient d'utilisation de l'eau*

En condition de production limitée par l'azote aucune sensibilité notable du modèle ne se dégage au niveau des variables biotiques (Tableau 4.5). Les différentes valeurs du coefficient WUEC (5,8, 8,8 et 11,8) présentent presque des effets similaires. Cette équivalence est évidente au niveau de l'évaporation. Les tendances dégagées par la transpiration et le drainage ne semblent pas logiques.

En condition de production avec fertilisation azotée, les variables biotiques augmentent avec l'accroissement de la valeur du coefficient WUEC. Par contre, au niveau des variables abiotiques, la simulation du drainage apparaît inconsistante (Tableau 4.5). Dans ce cas spécifique, le modèle devait constater de faibles quantités d'eau drainées face à l'accroissement de la biomasse racinaire.

*Tableau 4.5. Sensibilité du modèle à différentes valeurs du coefficient d'utilisation de l'eau WUEC en condition de production avec et sans fertilisation azotée à N'Tarla, 1993.*

WUEC	Sans fertilisation			Avec fertilisation		
	5,8	8,8	11,8	5,8	8,8	11,8
BT*	15703	15610	15610	19730	23208	24992
BA	11633	11690	11690	16042	17792	17823
BR	4070	3921	3921	4307	7040	10712
RES	469	448	448	994	1523	2046
TRANS	390	259	194	509	423	348
EVAP	110	110	110	86	80	74
DRAIN	75	190	251	0	68	137

BT = biomasse totale, BA = b. aérienne, BR = b. racinaire, Res = réserves, Trans = transpiration, Evap = Evaporation, Drain = Drainage.

#### **4.3.3. Validation : comparaison de données observées et simulées**

Les résultats de la comparaison des données simulées et observées en condition de production avec et sans apport d'azote à N'Tarla sont illustrés dans la Fig. 4.2. En condition de production sans application d'azote, les rendements des variables (biomasse

totale, aérienne et racinaire) observées et simulées apparaissent en harmonie au cours du développement phénologique de la culture (Fig. 4.2a). L'analyse de la variance de la régression entre ces variables observées et simulées signale une relation linéaire significative, ( $p < 0,01$ ,  $r^2 > 0,60$  ; à cause du nombre restreint de données (5 points), l'analyse se limite seulement à la signification de la relation entre les performances observées et simulées. Ce qui permet de conclure que les données simulées et observées évoluent étroitement et positivement dans le même sens. Par contre, en condition de production avec engrais azoté sur sols sablonneux et limoneux, l'harmonie est perturbée après la floraison (Fig. 4.2b). Cette perturbation est due d'une part à l'apport fractionné tardif de l'azote en condition réelle que le modèle ne perçoit pas et d'autre part à la valeur de 11,8 Pa du coefficient d'utilisation de l'eau qui ne semble pas adéquat quant à la description de ce sous système. Ce coefficient à la valeur de 11,8 Pa augmente les niveaux des rendements biotiques simulés après la floraison par rapport à ceux des rendements observés. Par ailleurs, des données indépendantes obtenues dans les conditions sahéliennes de Niono (Bremas, 1982) et de Thiès (Dieng *et al.*, 1991) sont adéquatement représentées par le modèle PWGA (WUEC = 5,8 Pa ; Fig. 4.3a et b). Ceci permet d'entrevoir une capacité accrue du modèle à simuler le potentiel productif de l'*Andropogon* dans la sous-région.

**Figure 4.2.** Comparaison des performances de l'*Andropogon gayanus* : données mesurées et simulées dans des conditions de production sans engrais (a) et avec engrais (b) pour différentes valeurs du coefficient d'utilisation de l'eau à N'Tarla, 1992-1993 (Mali).

#### 4.3.4. Estimation pluriannuelle du potentiel productif de l'*Andropogon*

Les résultats des tests de comportement et de la validation du modèle PGWA permettent d'entreprendre un sondage de sa capacité de reconstituer l'historique de la productivité de la culture à travers les ans. Ainsi, la simulation pluriannuelle de la biomasse totale (aérienne plus racinaire) de 1961 à 1983 signale une évolution en dents de scie du potentiel productif de l'*Andropogon* à Ségou. Le modèle estime une production totale de biomasse variant de 13.500 à 17.500 kg ha<sup>-1</sup> en saison humide et de 1000 à plus de 2000 kg ha<sup>-1</sup> en saison sèche (Fig. 4.4). Ces variations témoignent historiquement l'existence d'années avec ou sans contraintes climatiques à la culture de l'*Andropogon* dans la région de Ségou.

**Figure 4.3.** Productions de biomasse aérienne d'*Andropogon gayanus* simulées et observées à Niono, 1977 (observations de Bremas, 1982) (a) et à Thiès, 1989 (observations de Dieng *et al.*, 1991) (b).

**Figure 4.4.** Simulation de la production pluriannuelle de la biomasse aérienne d'*Andropogon gayanus*, en utilisant les données météorologiques de Ségou, 1961-1983.

#### 4.3.5. Conclusions

Le comportement du modèle PGWA à travers les zones agro-climatiques de N'Tarla, de Niono et de Thiès est assez similaire aux résultats de recherche obtenus en milieu réel (sur les mêmes sites). Les tests de sensibilité en condition de production avec et sans fertilisation azotée ont permis de déceler l'inconsistance du modèle dans la simulation de la biomasse racinaire et des réserves d'hydrates de carbone lorsque la durée de la période végétative diminue ou augmente. Au niveau de la validation, il est remarqué une bonne performance du modèle en condition de production sans apport d'azote : les variables biotiques simulées avant et après la floraison de l'*Andropogon gayanus* sont comparables à celles observées. Cependant, en condition de production avec apport d'azote, des écarts se dégagent entre les variables simulées et observées après la floraison.

Le modèle peut simuler la croissance et le développement de l'*Andropogon gayanus* et de surcroît estimer le potentiel productif de la culture dans la sous région. L'implication pratique de cette évaluation met en évidence l'importance du rôle fondamental d'un modèle de simulation : la représentation simplifiée d'un système.

## 4.4. Bibliographie

Berge, ten H.F.M., M.C.S. Wopereis, J.J.M. Riethoven, T.M. Thiyagarajan & R. Sivasamy, 1994. The Oryza\_O model applied to optimize nitrogen use in rice. Dans : H.F.M. ten Berge, M.C.S. Wopereis, & J.C. Shin (Eds), Nitrogen economy of irrigated rice: field and simulated studies. SARP Research Proceedings, 1993, p. 235-253.

Bonachela, S. 1995. A model of perennial grasses under water limited conditions (PGWAL-FSE), Rappports PSS 2, IER, Bamako, Mali et AB-DLO, Wageningen, les Pays-Bas.

Breman, H., 1982. La production actuelle des pâturages naturels en relation avec des facteurs naturels et des facteurs anthropiques. Dans: [Penning de Vries, F.W.T. & M.A. Djitéye \(eds.\)](#). La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. Agric. Res. Rep. 918, Pudoc Wageningen, p. 284-295.

Dent, J. B. & M. J. Blackie. 1979. System simulation in agriculture. Applied Science Publishers, Ltd. London. p 99-108.

Dieng, A., A. Buldgen & R. Compère. 1991. La culture fourragère temporaire d'*Andropogon gayanus* Kunth var. *bisquamulatus* en zone soudano-sahélienne sénégalaise: 1. Systématique, morphologique, dispersion et biologie de la variété cultivée. Bull. Rech. Agron. (Gembloux) 26, 279-296.

Tanner, C.B. & T.R. Sinclair, 1983. Efficient water use in crop production: Research or research? Dans : H.M. Taylor, W.R. Jordan & T.R. Sinclair (Eds), Limitations to efficient water use in crop production. ASA. Madison, WI.

Traoré, M., 1995. Utilisation des éléments nutritifs par une graminée pérenne: *Andropogon gayanus*. Thèse de doctorat (en prép.), ISFRA - IER, Bamako, Mali.

## 5. Les modèles de simulation comme outils de gestion des sols et de développement agricole : exemple du modèle « Cultures Pluviales du Burkina Faso »

M.H. Bazi<sup>1)</sup>, E.L.J. Verberne<sup>3)</sup>, M. Bonzi<sup>2)</sup>, G.H. Dijksterhuis<sup>3)</sup>, & A.A. Sanou<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Bureau National des Sols (BU.NA.SOLS), Ouagadougou, Burkina Faso

<sup>2)</sup> Institut d'Etudes et de Recherche Agricole (IN.E.R.A.), Ouagadougou, Burkina Faso

<sup>3)</sup> Institut de la Biologie Agronomique et de la Fertilité du Sol (AB-DLO), Haren, les Pays-Bas

### Résumé

*L'interprétation des données d'un système aussi complexe que le sol avec l'intégration des différentes interactions existantes implique l'emploi des modèles de simulation. Dans le cadre d'une étude de cas réalisée au Burkina Faso sur la modélisation et la simulation, avec la collaboration étroite du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS) à Niono (République du Mali), il est fait usage du modèle de croissance de cultures céréalières dénommé « Cultures Pluviales - Burkina Faso, version 3 » (CP-BKF3).*

*Les résultats d'expérimentation agronomique effectuée à Saria en 1992 par l'Institut d'Etudes et de Recherche Agricole (IN.E.R.A.) selon le programme du projet Appui au Service de Mise en Valeur des Sols (A.S.M.V.S) du BUNASOLS, ont été utilisés pour la calibration du modèle avec l'utilisation de la variété ICSV 1049 de sorgho et 4 niveaux de fertilisation azotée (0, 15, 45, 90 kg N ha<sup>-1</sup>) sur deux types de sols (sableux peu profond et argileux profond).*

*Sur la base des interactions entre les doses d'azote, l'eau et l'accumulation de la matière sèche des feuilles, tiges et grains, les courbes de réponse de la culture à la dose optimale de 90 kg N ha<sup>-1</sup> établies en fonction du temps pour la calibration montrent une relative correspondance des valeurs simulées avec celles mesurées de l'ensemble des organes (surtout des grains) sur sol profond. Les courbes de variation du bilan hydrique en fonction du temps indiquent une tendance similaire entre les deux types de valeurs avec la particularité que le modèle simule un très faible assèchement du sol en fin de saison des pluies surtout sur le sol sableux peu profond.*

*Les résultats obtenus sur une série de douze ans toujours à Saria par l'INERA, dans le cadre de son programme d'essais pluriannuel de fertilisation de sorgho en monoculture, sont destinés à valider le modèle. Les résultats de validation obtenus avec la simulation présentent une tendance conforme à ceux mesurés.*

Enfin, la manière dont le modèle peut être intégré comme outil de gestion des sols et de développement agricole est illustrée.

## 5.1. Introduction

Au Burkina Faso, les productions végétales sont en baisse itérative et souvent ne parviennent pas souvent à satisfaire les besoins alimentaires de la population sans cesse croissante. Pour juguler cette situation, des choix de solutions techniques s'imposent parmi lesquelles nous retenons l'élaboration d'un système national d'interprétation des données de sols qui est un support indispensable permettant de définir des modules techniques d'intensification agricole, et de faire des recommandations concrètes quant à l'utilisation rationnelle des sols pour une agriculture rentable et durable. La mise au point de ce système est assignée au BUNASOLS en collaboration étroite avec ses partenaires de la recherche en l'occurrence l'INERA. Elle bénéficie du soutien financier de la Direction Générale de la Coopération Internationale du Ministère des Affaires Etrangères des Pays-Bas (DGIS) et du support technique et scientifique de l'AB-DLO à Haren aux Pays-Bas à travers le projet ASMVS.

La réalisation du système sollicite, entre autres outils méthodologiques, l'utilisation d'un modèle mathématique dont la connaissance et les techniques doivent être acquises par les cadres des deux institutions burkinabè sus-citées. Pour satisfaire à cette condition des cours de formation sur la modélisation et la simulation ont été organisés, avec la collaboration étroite du projet Production Soudano-Sahélienne (P.S.S.) à Niono (République du Mali), en trois étapes : une première étape au BUNASOLS du 25 au 28 janvier 1993, une deuxième à Niono du 3 au 14 mai 1993 suivie d'une étude de cas dont les résultats ont fait l'objet d'un atelier en troisième étape à Bamako et à Niono du 7 au 11 novembre 1994.

De nombreux programmes de recherche sont mis en oeuvre depuis plusieurs décennies et les résultats obtenus révèlent que la disponibilité en éléments nutritifs, particulièrement l'azote et le phosphore (Charreau, 1972 ; Pichot *et al.*, 1981 ; Sedogo, 1981) et en eau détermine de façon prépondérante la production végétale. Ces résultats ont été confirmés par van Keulen (1975) et [Penning de Vries & Djitéye \(1982\)](#) au moyen de modèles mathématiques de simulation des productions végétales, validés et vérifiés par des expérimentations sur le terrain. Aussi la modélisation permet-elle aux spécialistes de la production végétale : (i) d'une part, d'appréhender les relations entre le sol et les rendements des cultures en milieu réel, et d'expliquer et extrapoler ces rendements obtenus ; (ii) d'autre part, de concevoir des méthodes et techniques nécessaires à la mise en valeur rationnelle des sols et à l'accroissement de leurs aptitudes culturales, et d'économiser du temps dans le processus de production en évitant les longues durées et les grands nombres d'expérimentations.

## 5.2. Matériels et méthodes

### 5.2.1. Modèle

Pour réaliser l'étude de cas, il est fait usage d'un modèle mathématique décrivant les conditions climatiques, les paramètres du sol et aussi les caractéristiques physiologiques du sorgho (vitesse de croissance et de développement, distribution de la matière sèche, production de biomasse). Le modèle de simulation utilisé est une adaptation basée sur les modèles de van Kraalingen & Van Keulen (1988), van Duivenbooden & Cissé (1989) et Erenstein (1990) ; une description technique et détaillée du modèle se trouve dans une Note Technique du projet ASMVS (en prép.).

L'environnement du modèle est constitué des éléments suivants utilisés comme données dans le cadre de cette étude de cas :

- les caractéristiques climatiques : pluviométrie journalière, température (journalière maximale et minimale), tension de vapeur, vitesse du vent, rayonnement journalier ;
- Les caractéristiques pédologiques : texture et nombre d'horizons, profondeur maximale du sol, capacité de rétention en eau (courbes de pF), le carbone et l'azote total du sol ;
- Les paramètres culturaux : date de semis, profondeur du semis, cycle (période de croissance) de la variété, profondeur racinaire initiale, profondeur maximale d'enracinement.

Le modèle permet de simuler la production déterminée par l'eau et l'azote pour trois cultures pluviales : sorgho, mil et maïs. Il est dénommé CP-BKF3 (Cultures Pluviales du Burkina Faso, version 3), et est composé de quatre sous-modèles (Fig. 5.1) :

i. Le sous-modèle de la croissance de la culture : décrit quantitativement la résultante du métabolisme physiologique de la plante depuis l'émergence jusqu'à la maturité en se basant sur la vitesse d'assimilation chlorophyllienne qui est fonction des caractéristiques photosynthétiques foliaires, de la durée et de l'intensité d'insolation journalière (Erenstein, 1990). Le développement du système racinaire est décrit par une relation exponentielle ; la densité racinaire diminue en fonction de la profondeur. Aussi bien que l'absorption d'eau, l'absorption d'azote est étroitement liée à la densité racinaire (Dijksterhuis, en prép.).

ii. Le sous-modèle de l'humidité du sol (de Willigen & Van Noordwijk, 1987). Afin de simuler la disponibilité d'eau pour les plantes, les horizons pédologiques du sol sont divisés en plusieurs couches. Ce sous-modèle calcule le bilan d'eau du sol en suivant le flux d'input (infiltration de l'eau : la pluviométrie journalière plus le « run-on » et moins le « run-off ») et celui d'output (évaporation, transpiration, drainage vertical sans toutefois tenir compte de l'écoulement latéral de l'eau) et repose sur le principe de « Tipping bucket » (seaux débordants). Le ruissellement (« run-off ») de l'eau dépend de la méthode de la conservation d'eau ; le modèle offre le choix entre culture sans diguettes, avec diguettes simples ou croisées, une terre dégradée, une surface moyenne rugueuse (5 cm) et celle très rugueuse (10 cm). Ce sous-modèle tient aussi compte de la remontée capillaire due à une différence de pression dans les couches du sol.

iii. Le sous-modèle du bilan d'azote minéral (de Willigen & Van Noordwijk, 1987) : décrit la variation du stock d'azote minéral dans les couches de sol en se basant sur les quantités d'azote minéral provenant des engrais et de la pluie, et les pertes d'azote par lixiviation. Les pertes d'azote par drainage latéral ne sont pas instruites dans le modèle.

iv. Le sous-modèle de la matière organique du sol (Verberne *et al.*, 1990) : décrit la minéralisation et l'immobilisation de la matière organique du sol et celles des résidus. La matière organique du sol est subdivisée en deux fractions (labile et stable) et les résidus en trois fractions (décomposable, structurale et résistante) ; toutes les transformations sont considérées comme des réactions de premier ordre.

[Figure 5.1.](#) Représentation schématique de la structure du modèle CP-BKF3.

## 5.2.2. Expérimentation

Les résultats de l'expérimentation agronomique exécutée par l'INERA à la station agricole de Saria en 1992 dans le cadre du projet ASMVS du BUNASOLS sont utilisés comme matériel de « étalonnage » du modèle. L'objectif initial du programme était d'étudier le rendement du sorgho sur une toposéquence en fonction des différentes doses d'azote et phosphore. Malheureusement il nous revient que seules deux parcelles situées en bas de pente offrent des résultats statistiquement exploitables, avec 4 traitements de fertilisation azotée (urée) : 0, 15, 45, 90 kg N ha<sup>-1</sup>. Les parcelles sont dénommées BA et BC, et affichent les principales caractéristiques pédologiques suivantes :

Parcelle BA : le profil, peu profond (32 cm) et peu graveleux, présente deux horizons distincts avec une structure faiblement développée sur carapace ferrugineuse poreuse ; il est limono-sableux sur tout le profil.

Parcelle BC : le profil, profond (90 cm) et très peu graveleux, comporte quatre horizons pédologiques distincts sur carapace ferrugineuse. La structure est faiblement développée ; il est limoneux en surface, argilo-sableux à argileux en profondeur.

Le Tableau 5.1 présente les valeurs de la densité apparente (g cm<sup>-3</sup>) et des humidités volumiques (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) aux pF 2,5 ; 3,0 et 4,2 pour les différents horizons des deux types de sol.

Tableau 5.1. La densité apparente (g cm<sup>-3</sup>) et les humidités volumiques (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) aux pF 2,5 ; 3,0 et 4,2 pour les différents horizons des deux types de sols.

Parcelle	Horizon (cm)	Densité apparente	Humidité volumique (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )		
			pF 2,5	pF 3,0	pF 4,2

B A	0-11	1,52	0,24	0,11	0,09
	11-32	1,51	0,18	0,10	0,07
B C	0-25	1,45	0,20	0,18	0,08
	25-47	1,46	0,32	0,28	0,18
	47-66	1,39	0,33	0,26	0,17
	66-90	1,39	0,32	0,26	0,17

La variété de sorgho (ICSV 1049) considérée accuse une légère sensibilité à la longueur du jour en condition de saison des pluies au Burkina Faso. En considérant les stades de développement, le cycle de la variété se présente comme suit : semis - levée : 5 jours, levée - floraison : 70 jours et floraison - maturité : 35 jours. Le prélèvement des échantillons et l'analyse des paramètres retenus étant effectués en s'inspirant des méthodes normalisées par la FAO. Les mesures d'expérimentation ont concerné les paramètres édaphiques et culturaux. Elles ont porté exclusivement sur les rendements et les concentrations d'azote des organes, l'évolution des teneurs en eau et en azote minéral du sol. Le semis a eu lieu le 8 Juillet 1992 (190<sup>ème</sup> jour de l'année (JA)). Les dates du suivi de la croissance de la culture sont 6 août (219<sup>ème</sup> JA), 2 septembre (246<sup>ème</sup> JA), 29 septembre (273<sup>ème</sup> JA) et 3 novembre (308<sup>ème</sup> JA). La détermination de l'humidité du sol a été réalisée par la méthode gravimétrique. Les dates de prélèvements du sol sont les mêmes que celles du suivi de la croissance de la culture. L'échantillonnage est réalisé à l'aide de tarières dans différentes couches du sol tout en prenant en compte sa profondeur effective : 0-10 cm, 10-30 cm, 30-50 cm, 50-80 cm et 80-120 cm.

Les données climatiques utilisées sont fournies par la station agrométéorologique de Saria pour la pluviométrie et par la Direction Nationale de la Météorologie pour les autres éléments. Au regard de la pluviométrie de la station agroclimatique de Saria, la saison considérée accuse une installation tardive des pluies avec une répartition temporelle assez irrégulière (deux périodes de sécheresse ont été observées en août respectivement du 2 au 7 et du 17 au 21) et une intensité aussi très variable avec une pointe de 109 mm de pluie tombée le 13 juillet (195<sup>ème</sup> JA) soit 5 jours environ après semis induisant de fait un ruissellement assez important.

Une fois calibrée, le modèle a été validé avec les résultats de rendements en grains de l'essai pluriannuel de fertilisation de sorgho en monoculture réalisé par l'INERA à Saria (Sedogo, 1991). Initialement, il était prévu l'utilisation d'une série de 20 données ; mais, faute de connaissance précise des dates de semis aux 7 premières années, seules les données de 13 années (1978-1990) ayant des dates précises de semis ont été prises en compte. Dans le cadre de cette étude, trois traitements ont été utilisés : (i) témoin : sans engrais, (ii) fmo : fumure minérale faible (37 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) et 5 tonnes fumier ha<sup>-1</sup> chaque 2 ans, et (iii) FMO : fumure minérale forte (60 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) et 40 tonnes fumier ha<sup>-1</sup> chaque 2 ans. Les résultats de simulation sont comparés avec ceux observés.

## 5.3. Résultats

### 5.3.1. Calibration

La calibration du modèle, c'est-à-dire l'ajustement des valeurs des paramètres pour que les sorties du modèle correspondent aux valeurs expérimentales obtenues, a été faite pour l'expérimentation sur les sols BC et BA. Les valeurs des paramètres retenues sont celles écrites dans la Note Technique du projet ASMVS (en prép.). Le seul processus ayant fait l'objet de calibration est le ruissellement « run-off » pour le sol BA. Dans le modèle, l'infiltration maximale d'une pluie dépend, entre autre, de la capacité d'absorption d'eau. Une diminution de ce paramètre diminue l'infiltration et augmente le ruissellement. La valeur du paramètre était initialement fixée à 4,6 mm min<sup>-1/2</sup>, la valeur actuellement retenue est de 2 mm min<sup>-1/2</sup> ; par voie de conséquence, le ruissellement augmente de 20%.

Les Figures 5.2a et b montrent les résultats mesurés et simulés au niveau du sol BC et du sol BA avec une application d'urée de 90 kg N ha<sup>-1</sup> (soit 60 kg N ha<sup>-1</sup> au 10 août (223<sup>ème</sup> JA) et 30 kg N ha<sup>-1</sup> au 16 septembre (260<sup>ème</sup> JA)). Les Figs 5.2a et b présentent l'évolution des poids de matière sèche, en fonction du temps (ndeg. du jour de l'année du calendrier julien), respectivement des feuilles, des tiges et des graines au niveau du sol BC (Fig. 5.2b) et du sol BA (Fig. 5.2b). Elles montrent que les poids de matière sèche de tous les organes du sorgho, excepté les graines, augmentent progressivement jusqu'à atteindre leur

maximum autour du 270<sup>ème</sup> jour de l'année, période à partir de laquelle ils diminuent relativement. Ce phénomène est la traduction du processus de migration des produits d'assimilation vers les organes d'accumulation que sont les graines. Pour le sol argileux profond (BC, Fig. 5.2a), le poids de matière sèche des tiges au 246<sup>ème</sup> JA, en valeur simulée, est plus élevé que celui de l'expérimentation avec une déviation standard évaluée à 70 kg ha<sup>-1</sup> ; les poids de matière sèche des feuilles et des tiges au 273<sup>ème</sup> JA, également en valeur simulée, sont bas par rapport aux valeurs mesurées dont les déviations standards sont respectivement de 164 et 545 kg ha<sup>-1</sup> ; le poids de matière sèche simulé des grains est de 3 % (soit 88 kg ha<sup>-1</sup>) plus élevé que celui mesuré pour une déviation standard de 548 kg ha<sup>-1</sup>. Pour le sol sableux peu profond (BA, Fig. 5.2b), le poids de matière sèche des tiges au 273<sup>ème</sup> JA en valeur simulée, est relativement plus bas que celui de l'expérimentation (déviation standard : 695 kg ha<sup>-1</sup>) ; de même que celui des feuilles aux 246<sup>ème</sup> JA avec une déviation standard de 79 kg ha<sup>-1</sup>. Le poids de matière sèche simulé des grains est de 763 kg ha<sup>-1</sup> (soit 35 %) plus élevé que celui mesuré avec une déviation standard de 362 kg ha<sup>-1</sup>.

**Figure 5.2.** Courbes d'évolution des poids de matière sèche des feuilles (mesuré : s, simulé : --), des tiges (mesuré : l, simulé : --) et des graines (mesuré : n, simulé : ...) avec leurs déviations standards (---) en fonction du calendrier julien, au niveau du sol BC (a) et du sol BA (b) avec une application de 90 kg N ha<sup>-1</sup>.

**Figure 5.3.** Courbes d'évolution de l'humidité volumique (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) aux profondeurs de 0-10 cm (mesuré : s, simulé : ---), 10-30 cm (mesuré : l, simulé : --) et 30-50 cm (mesuré : n, simulé : ...) en fonction du calendrier julien, au niveau du sol BC (a) et du sol BA (b) avec une application de 90 kg N ha<sup>-1</sup>.

Les Figs 5.3a et b présentent les courbes d'évolution de l'humidité mesurée et simulée dans le sol BC (aux profondeurs de 0-10 cm, 10-30 cm et 30-50 cm) et dans le sol BA (0-10 cm et 10-30 cm). Pour les deux sols, les résultats de simulation de l'humidité aux 219<sup>ème</sup> et 246<sup>ème</sup> JA apparaissent raisonnables. Au contraire, les résultats de mesure de l'humidité aux 273<sup>ème</sup> et 308<sup>ème</sup> JA sont inférieurs à celles simulées et apparaissent aberrants eu égard aux valeurs inférieures à celles au point de flétrissement (pF 4,2). Dans le sol argileux profond (BC), l'observation de l'état physique des plantes n'a pas traduit cette situation d'extrême sécheresse. Les résultats de simulation indiquent un léger déficit hydrique en période de floraison de la culture dans les deux premières couches du sol (0-10 et 10-30 cm). Ce déficit s'est installé de nouveau après le 285<sup>ème</sup> JA jusqu'à la récolte dans le deuxième horizon particulièrement où l'humidité se situe aux environs du point de flétrissement. Au niveau du sol peu profond (BA), les résultats de mesure seuls traduisent tous une situation de déficit hydrique à partir du 273<sup>ème</sup> JA dans les deux horizons, et l'observation de l'état physique des plantes traduit cette situation d'extrême sécheresse.

La Fig. 5.4 présente les courbes de réponse à l'azote mesurées et simulées pour les deux types de sols. Le niveau de réponse du sorgho sur sol argileux profond (sol BC) est plus élevé que celui sur sol sableux peu profond (sol BA) à partir de 15 kg N ha<sup>-1</sup>. Le poids de matière sèche des grains simulé est, sur le sol BC, plus faible aux doses de 0 et 15 kg N ha<sup>-1</sup> que celui mesuré ; par contre, il est plus élevé à 45 kg N ha<sup>-1</sup> et presque identique à celui mesuré à la dose de 90 kg N ha<sup>-1</sup>. Dans le sol BA, la situation décrite par le modèle et les observations expriment un déficit hydrique ; les résultats mesurés ne montrent aucune réponse à l'azote, et ceux simulés une faible réponse à l'azote.

**Figure 5.4.** Courbes de réponse à l'azote (axe des X : unités azote et axe des Y : rendement en grains) au niveau du sol BC (mesuré : --, simulé : n, déviation standard : et du sol BA (mesuré : --, simulé : l, déviation standard : --).

### 5.3.2. Validation

Le programme de l'essai est également mis en oeuvre dans des conditions pédoclimatiques quasi identiques à celles du sol du type BC. En supposant que l'effet des engrais et du fumier s'est établi surtout au niveau de la matière organique, les niveaux du taux d'équilibre de matière organique utilisés pour les trois traitements sont : témoin 0,26 %, FMO 0,34 % et FMO 0,78 % de carbone dans les couches supérieures (Sedogo, 1991). Le fumier utilisé pour le traitement fmo et FMO provient de Saria. Sa composition est variable, et une moyenne a été prise : 40 % de matière sèche avec des teneurs en carbone et azote totaux respectivement 22 et 1,37 % (rapport carbone sur azote de 16) (Sedogo, 1991).

Les résultats d'expérimentation et de validation sont consignés à la Fig. 5.5 avec en axe des X, les rendements mesurés et en axe des Y, les rendements simulés. Les résultats de validation obtenus présentent une tendance conforme à ceux mesurés, et les

simulations se trouvent près de la ligne 1:1. Les rendements en grains du traitement FMO sont légèrement sous-simulés (10 sur 13 ans), ceux du traitement fmo sur-simulés (10 sur 13 ans) ; par contre les simulations du traitement témoin sont satisfaisantes.

*Figure 5.5. Validation du modèle (axe des X : rendements mesurés et axe des Y : rendements simulés) pour trois traitements : témoin (s), fmo (l) et FMO (n).*

### 5.3.3. Illustrations

Une fois calibrée et validée, le modèle est apte à analyser des combinaisons et des interactions entre, par exemple, la région agro-climatique, la méthode de la conservation d'eau, l'année (la variabilité du climat). Les deux exemples suivants de simulation montrent les utilisations possibles du modèle comme outil de gestion des sols et de développement agricole.

La Fig. 5.6 montre l'effet des diguettes dans différentes zones climatiques du Burkina Faso. La production déterminée par l'eau sur le sol BC a été simulée pour trois types de gestion de l'eau du sol (sans diguettes, avec diguettes simples et avec diguettes croisées) sur 30 ans (1960-1990) et pour 3 zones climatiques. Il s'agit (i) de la zone sud sahélienne utilisant la station synoptique de Dori (pluviométrie 300-500 mm), (ii) de la zone nord soudanienne avec la station synoptique de Ouagadougou (pluviométrie : 700-800 mm) et (iii) de la zone centre soudanienne utilisant la station synoptique de Bobo-Dioulasso (pluviométrie : 1000-1200 mm). La Fig. 5.6 présente la probabilité cumulative sur l'axe des X, et le rendement simulé en grains sur l'axe des Y. Les résultats indiquent que les diguettes peuvent être très utiles dans le nord du Burkina et elles peuvent aussi servir dans la zone nord soudanienne en années sèches. Les diguettes sont moins efficaces dans le sud du Burkina où l'eau n'est pas un facteur limitant.

*Figure 5.6. Les fonctions de probabilité cumulative (%) pour les rendements en grains simulés ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en réponse à trois types de gestion de l'eau dans le sol (sans diguettes : --, diguettes simples : ----, diguettes croisées : ..) pour trois zones au Burkina Faso (sahélien sud, soudanien nord et soudanien central).*

Une deuxième illustration (Fig. 5.7) concerne la production déterminée par l'azote sur le sol BC à Saria pour les années 1978-1992 avec un apport d'engrais de 0, 15, 45 et 90  $\text{kg N ha}^{-1}$ . Les probabilités cumulatives (%) sont portées sur l'axe des X, et les rendements en grains sur l'axe des Y. Cette figure montre que le risque relatif d'utilisation de ces différentes doses d'engrais reste constant mais la productivité absolue augmente avec l'azote et la dose économique optimale d'engrais pour le sol BC à Saria est probablement de 45  $\text{kg N ha}^{-1}$ .

*Figure 5.7. Les fonctions de probabilité cumulative (%) pour les rendements en grains simulés ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en réponse à l'apport d'engrais sur sol argileux profond à Saria pour les années 1978-1990 avec un apport d'engrais de 0, 15, 45 et 90  $\text{kg N ha}^{-1}$ .*

## 5.4. Discussion et conclusions

Les deux sols utilisés, sol argileux profond (sol BC) et sol sableux peu profond (sol BA), se comportent différemment. La calibration avec une application d'urée de 90  $\text{kg N ha}^{-1}$  sur le sol profond BC est satisfaisante ; par contre, le modèle sur-estime le rendement sur le sol peu profond BA (Fig. 5.2b). Une comparaison du bilan hydrique mesuré et simulé montre que les mesures donnent une situation d'extrême sécheresse aboutissant à un rendement bas et que les résultats simulés montrent une sécheresse légère induisant un rendement plus élevé. Probablement dans le sol peu profond BA, il existe un écoulement latéral interne de l'eau que le modèle ne prend pas en compte. Pour redresser cette situation, le ruissellement sur le sol BA a été augmenté, sans tenir compte des pertes en nutriments par drainage latéral. Le déficit hydrique à la fin de la saison accroît mais le bilan d'azote ne change pas. Les bas rendements observés sur le sol BA avec les applications d'azote élevées peuvent être aussi attribués au déficit des nutriments autres que l'azote.

Les résultats de la validation du modèle sont acceptables, surtout vu le fait que plusieurs aspects de l'expérimentation pluriannuelle ne sont pas tenus en compte ; par exemple : les modifications liées aux formules d'engrais et de fumier, les chaulages en 1978 et 1988, l'effet de la monoculture sur la fertilité du sol (Sedogo, 1991). Les seules différences entre les années, incorporées dans la simulation, sont : le cycle de la variété, la date de semis, les données climatologiques et le taux d'équilibre de la matière organique du sol pour les trois traitements. Aussi le rôle de la matière organique sur autres éléments du sol est négligé ;

par exemple, une augmentation du taux de matière organique du sol peut changer favorablement la capacité de rétention en eau du sol. Ce phénomène peut justifier les sous-simulations des rendements en grains du traitement FMO.

Dans l'avenir, le modèle, dans une forme interactive et facile d'emploi, sera utilisé pour l'interprétation des données du sol du BUNASOLS en relation étroite avec les rendements des cultures au Burkina Faso. Il servira au niveau local (village) (i) à simuler les rendements de culture sous différentes conditions environnementales (pluviométrie, position sur la toposéquence, paramètres physiques et chimiques du sol, etc) et (ii) à formuler des recommandations sur l'exploitation des cultures et la gestion de l'eau (dates de semis, variété à utiliser et les quantités d'engrais à appliquer, aménagement) pour un rendement optimum dans un système de production durable. Aussi, aux niveaux régional et national, il pourra servir (i) à estimer la production selon les surfaces emblavées, les paramètres environnementaux dans le cadre de l'auto-suffisance alimentaire, (ii) à déterminer, à court et long terme, les quantités d'engrais azotés pour un rendement optimum et (iii) à conseiller les exploitants en matière de gestion de sol afin d'éviter la dégradation des sols.

## 5.5. Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce à la collaboration précieuse de l'Institut de la Biologie Agronomique et de la Fertilité du Sol (AB-DLO) à Haren aux Pays-Bas où le modèle a été développé, du Bureau National des Sols (BUNASOLS) qui est le siège de l'équipe Modélisation du Projet ASMVS et qui a fourni les inputs du sol, l'Institut d'Etudes et de Recherche Agricole (INERA) par lequel les inputs de la culture de sorgho ont été obtenus, et la Direction Nationale de la Météorologie qui a fourni les données climatiques des différentes stations synoptiques. Les auteurs remercient toutes ces institutions pour leurs contributions hautement appréciables. Le projet ASMVS bénéficie du soutien financier de la Direction Générale de la Coopération Internationale du Ministère des Affaires Etrangères des Pays-Bas (DGIS).

## 5.6. Références

- Charreau, C., 1972. Problème posé par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles. *L'Agron. Trop.* 27: 905-929.
- Duivenbooden N. van & L. Cissé, 1989. L'amélioration de l'alimentation hydrique par des techniques culturales liées à l'interaction eau/fertilisation azotée. Rapport final N° TS2-0010-NL(GDF), CABO Rapport N° 117, 106p+annexes.
- Erenstein, O., 1990. Simulation of water-limited yields of sorghum, millet and cowpea for the 5th region of Mali in the framework of quantitative land evaluation. CABO-DLO rapport, Wageningen.
- Keulen, H. van, 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Thèse. Simulation Monograph Series. Pudoc Wageningen. 184 pp.
- Kraalingen, D.W.G. van & H. van Keulen, 1988. Model development and application for the 'Projet pilote en agrométéorologie'. Report prepared for submission to World Meteorological Organisation. TPE/CABO, Wageningen. 167 pp.
- Penning de Vries, F.W.T. & M.A. Djitèye, 1991. [La productivité des pâturages sahéliens: une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle](#). Agricultural Research reports 918, Pudoc, Wageningen, 525 pp.
- Pichot, J., M.P. Sedogo, J.F. Poulan & J. Arrivets, 1981. Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence des fumures minérales et organiques. *L'Agron. Trop.* 36: 12-133.
- Sedogo, M.P., 1981. Contribution à l'étude de la valorisation des résidus culturaux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride. Matière organique du sol, nutrition azotée des cultures. Thèse Docteur Ingénieur, INPL NANCY, 135 pp.
- Sedogo, M.P., 1991. Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture: indice des modes de gestion sur la fertilité. Thèse Docteur Es-Sciences, l'Université Nationale de Côte d'Ivoire, 345 pp.

Verberne, E.L.J., J. Hassink, P. de Willigen, J.J.R. Groot & J.A. van Veen, 1990. Modelling organic matter dynamics in different soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 38: 221-238.

Willigen, P. de & M. van Noordwijk, 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. PhD-Thesis Agricultural University Wageningen, 282 pp.

## 6. Réponse à la photopériode de trois variétés de sorgho au Mali

S.B. Traoré<sup>1)</sup>, M. Vaksman<sup>2)</sup>, O. Niangado<sup>1)</sup> & M. Ouattara<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Institut d'Economie Rurale (IER), BP 238, Bamako, Mali

<sup>2)</sup> CIRAD-CA, BP 1813, Bamako, Mali

### Résumé

*Un essai comportant six dates de semis a été mis en place pour étudier l'effet de la photopériode sur la durée de la phase végétative du sorgho. Sur les trois variétés testées, deux d'entre elles ont une sensibilité marquée : leur phase végétative s'allonge de 55 jours pour une augmentation de 20 minutes de la durée du jour. Cette approche en conditions naturelles présente l'avantage de bien cerner l'effet de petites variations de la photopériode. L'ajustement du taux de développement en fonction de la photopériode suit un modèle linéaire. Du point de vue agronomique, cette caractéristique permet aux variétés photopériodiques de mieux valoriser la totalité de la saison des pluies tout en bénéficiant de bonnes conditions de maturation du grain. Une caractérisation systématique des différentes variétés de sorgho sur ce critère apparaît nécessaire pour délimiter leurs zones optimales d'adaptation.*

### 6.1. Introduction

La connaissance de la phénologie d'une plante est nécessaire à l'étude de son adaptation au milieu. Pour le sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench), le développement dépend essentiellement de la température et de la photopériode. Le sorgho est une plante photopériodique de jour court, il a tendance à fleurir d'autant plus vite que les nuits sont longues. Le photopériodisme est généralement reconnu comme une adaptation naturelle aux phénomènes saisonniers (Salisbury & Ross, 1985). Ainsi, sous les latitudes du Mali, on observe une diminution progressive de la durée du cycle avec le retard de semis, ce qui conduit à une floraison groupée à la fin de la saison des pluies (Cochemé & Franquin, 1967).

Cette particularité est essentielle car le rendement et la qualité du grain dépendent étroitement de la date de floraison. Chez les variétés qui fleurissent trop précocement, le grain est altéré par les moisissures, les oiseaux et les insectes, tandis que celles qui fleurissent trop tardivement épuisent la réserve en eau du sol avant la fin du remplissage des grains (Curtis, 1968 ; Andrews, 1973 ; Kassam & Andrews, 1975 ; Franquin, 1984). Malgré l'importance de ce phénomène, relativement peu d'études lui ont été consacrées. La durée du cycle de la plupart des variétés de sorgho cultivées est connue de façon superficielle et il est difficile de prévoir leur évolution phénologique.

L'objectif de cette étude est de quantifier l'influence de la photopériode sur la durée de la phase végétative de trois variétés de sorgho.

### 6.3. Matériel et méthode

#### 6.3.1. Dispositif expérimental

L'expérimentation s'est déroulée en 1992, au Mali, à la Station de Recherche Agronomique de Cinzana (13deg. 18' N, 5deg. 56' O). Trois variétés de sorgho ont été étudiées. La variété ICSV 401, de race *Caudatum* a été sélectionnée par l'ICRISAT, la longueur de son cycle est d'environ 100 jours. Les variétés CSM 219 et CSM 388 sont de race *Guinea* et proviennent de la

collection de sorghos locaux du Mali. La variété CSM219 est originaire de la région de Kayes (pluviométrie moyenne de 650 mm) et présente un cycle moyen de 110 jours. La variété CSM 388 est originaire de la région de Koutiala (pluviométrie moyenne de 950 mm), son cycle moyen est de 130 jours.

Pour tester nos variétés sous différentes longueurs de jour nous avons procédé à des semis échelonnés. Cette méthode est limitée aux durées naturelles du jour qui évoluent peu en milieu tropical. Toutefois, cela ne compromet pas l'étude des sorghos africains très sensibles à de faibles variations de photopériode.

Les semis ont été réalisés à 6 dates : 15 mai, 1 juin, 15 juin, 10 juillet, 25 juillet et 5 août. Les trois premiers semis ont été irrigués. La durée du jour à la date du premier semis est de 12,64 h. La journée la plus longue est de 12,78 h le 21 juin. A partir de cette date, la durée du jour diminue régulièrement jusqu'à 11,73 h le 10 octobre, date de l'épiaison la plus tardive.

Le dispositif expérimental est un split-plot à 2 répétitions. Le semis est réalisé avec une densité de 60.000 plants à l'hectare. Le suivi de la phénologie et du rythme d'apparition des feuilles est effectué sur le brin maître de 120 poquets par variété et par date de semis.

### 6.3.2. Suivi de la phénologie

Le stade sensible à la photopériode est l'initiation de la panicule. Au champ, sa mesure est à la fois difficile et destructive. Ritchie & Alagarswamy (1989), en se fondant sur les résultats de Scheaffer (1980), utilisent une relation linéaire entre le temps thermique nécessaire à l'initiation paniculaire, DTTPI, et à l'apparition de la feuille drapeau DTTFL (fin de l'expansion foliaire). Sur les trois variétés de sorghos étudiés, l'initiation paniculaire a été contrôlée sur les plants de bordure.

A partir des valeurs journalières des températures minimales et maximales ( $T_n$  et  $T_x$ ), le temps thermique depuis la levée est calculé pour chaque semis en utilisant la méthode décrite par Jones & Kiniry (1986) qui considèrent que le taux de développement croît linéairement d'une température de base ( $T_b$ ) jusqu'à un optimum ( $T_{opt}$ ) puis diminue linéairement jusqu'à un maximum ( $T_{max}$ ) au delà duquel il y a arrêt du développement.

Lorsque  $T_n$  est supérieure à  $T_b$  et que  $T_x$  est inférieure à  $T_{opt}$ , le temps thermique DTT est calculé par la formule :

$$DTT = \frac{(T_n + T_x)}{2} - T_b$$

En dehors de cette plage de température, DTT est calculé à l'aide d'algorithmes qui partagent chaque jour en 8 périodes de 3 heures. Nous prenons une température de base de 8 deg.C, un optimum de 34 deg.C et un maximum de 44 deg.C comme le proposent, pour le sorgho, Ritchie & Alagarswamy (1989).

Les feuilles du sorgho sont initiées régulièrement près de l'apex entre la levée et l'initiation paniculaire. En admettant la constance du phyllochrone (intervalle de temps thermique entre l'apparition de deux feuilles successives), le nombre de feuilles développées (TLN) peut aussi être considéré, pour une variété, comme une mesure de la durée de la phase végétative.

Deux types de modèles sont fréquemment utilisés pour expliquer la réponse du sorgho à la durée du jour. Si la sensibilité est faible, on utilise un modèle linéaire initialement décrit pour le riz (Vergara & Chang, 1976) puis généralisé pour différentes plantes de jour court ou longs (Major, 1980). Ce modèle considère que la durée de la phase végétative augmente linéairement avec la durée du jour, à partir d'une photopériode limite.

La forte sensibilité de certaines variétés provoque une augmentation considérable de la période végétative pour de faibles augmentations de la durée du jour. Dans ce cas, on utilise plutôt un ajustement hyperbolique (Franquin, 1974 ; Hadley *et al.*, 1983 ; Hammer *et al.*, 1989). On considère alors qu'il existe une relation linéaire entre la photopériode et le taux moyen de développement défini comme l'inverse de la durée de la période végétative (EMPI). En raison de la forte photosensibilité des

variétés locales de sorgho, ce dernier modèle a été retenu pour cette étude, il est de la forme :

$$EMFL = \frac{1}{a - b \cdot P} \quad (6.1)$$

Où  $a$  et  $b$  sont des constantes qui caractérisent la variété et  $P$  la photopériode. Dans ce travail, la durée du jour utilisée est la durée astronomique du jour définie comme le temps écoulé entre l'apparition du disque solaire et sa disparition à l'horizon (Durand & Legros, 1981). Nous ne prenons pas en compte la lumière à l'aube et au crépuscule.

## 6.4. Résultats

Pour les variétés *CSM388* et *CSM219*, la durée de la phase levée-feuille drapeau (EMFL) décroît linéairement avec la date de semis (Fig. 6.1). On a respectivement un raccourcissement de 7,8 et 6,8 jours pour 10 jours de retard de semis. En revanche, la variété *ICSV401*, semble peu sensible.

La comparaison des temps thermiques pour l'initiation paniculaire et l'apparition de la feuille drapeau nous donne la relation 6.2 avec un coefficient de détermination  $r^2 = 0,88$ . Il n'y a pas de différences significatives entre les variétés.

$$DTTPI = \frac{DTTFL - 330}{1,143} \quad (6.2)$$

Cette relation est utilisée pour déduire DTTPI de la mesure de DTTFL et par conséquent les dates et photopériodes correspondantes à l'initiation paniculaire (Tableau 6.1).

Tableau 6.1. Durée en jours (EMFL) et en somme de températures (DTTFL) de la levée à la feuille drapeau, somme de température de la levée à l'initiation paniculaire (DTTPI), photopériode au moment de l'initiation paniculaire (P) et nombre total de feuilles développées (TLN) pour les trois variétés de sorgho et les six dates de semis.

Semis	CSM 388			P (h)	CSM 219			P (h)	ICSV 401			P (h)	TLN		
	EMFL (j)	DTTFL (deg. C)	DTTPI (deg. C)		TLN	EMFL (j)	DTTFL (deg. C)		DTTPI (deg. C)	TLN	EMFL (j)			DTTFL (deg. C)	DTTPI (deg. C)
15/05/1994	118	2026	1484	12,45	29	101	1715	1212	12,60	28	72	1215	774	12,75	20
01/06/1994	101	1784	1272	12,39	28	85	1489	1014	12,56	28	60	1050	630	12,72	20
15/06/1994	92	1641	1147	12,33	28	76	1355	897	12,49	25	54	969	559	12,67	19
10/07/1994	69	1239	795	12,27	21	54	973	563	12,42	18	56	1010	595	12,39	18
25/07/1994	61	1081	657	12,17	20	52	939	533	12,27	17	53	955	547	12,26	17
05/08/1994	54	956	548	12,12	18	44	796	408	12,23	15	62	1083	659	12,06	16

Figure 6.1. Durée en jours de la phase levée - feuille drapeau (EMFL) en fonction de la date de semis pour les trois variétés de sorgho.

On peut ainsi établir la relation entre la durée de la phase végétative et la photopériode à l'aide de la relation 6.1. Que l'on exprime cette durée en temps thermique (DTTPI, Fig. 6.2) ou en nombre de feuilles développées (TLN, Fig. 6.3), l'ajustement de forme hyperbolique donne de bons résultats.

[Figure 6.2.](#) Influence de la photopériode sur la durée thermique de la période végétative (DTTPI).

[Figure 6.3.](#) Influence de la photopériode sur le nombre total de feuilles développées (TLN.)

Le Tableau 6.2 indique, pour chaque variété, les valeurs des constantes ainsi que le coefficient de détermination  $r^2$  des ajustements obtenus (méthode des moindres carrés).

On constate que les deux variétés locales sont très photosensibles. Pour un écart de semis de 82 jours (du 15 mai au 5 août), leur floraison se produit de façon groupée sur 18 jours pour CSM 388 et sur 25 jours pour CSM 219. Pour la variété ICSV 401, peu photosensible, la floraison s'étale sur 72 jours.

Tableau 6.2. Ajustements des taux de développements en fonction de la photopériode ( $P$ ). L'inverse de la durée de la période végétative (EMPI) est exprimée en degrés jours (DTTPI) et en nombre de feuilles développées (TLN). L'ajustement est de la forme :

$$EMPI = \frac{1}{a - b \cdot P}$$

	a	b	$r^2$
Somme des températures (DTTPI)			
CSM 388	0,045	0,0035	0,965
CSM 219	0,050	0,0039	0,915
ICSV 401	DTTPI = constante = 627 deg.C.jours		
Nombre de feuilles (TLN)			
CSM 388	0,870	0,0674	0,903
CSM 219	1,096	0,0843	0,923
ICSV 401	0,275	0,0173	0,980

Le cycle plus court de CSM219, observé sur le terrain, provient de son aptitude à fleurir sous des photopériodes plus grandes donc plus tôt dans la saison.

Pour la variété ICSV 401, en exprimant les durées en jours ou en somme de températures, on ne note pas de sensibilité marquée. En revanche, en considérant le nombre de feuilles développées, on obtient un bon ajustement ( $r^2 = 0,98$ ). La sensibilité de cette variété est plus faible que celle des 2 autres. Ce résultat montre que le nombre total de feuilles est une mesure précise de la durée de la période végétative.

Etant donné la forte sensibilité à la durée du jour des variétés locales, la méthode des semis échelonnés s'est révélée bien adaptée pour montrer l'influence de la photopériode sur leur développement. Un suivi en conditions contrôlées ou sous lumière artificielle serait difficile à mettre en oeuvre à cause de la très haute taille des plants (plus de 4 mètres) et d'une gamme de photopériode à explorer très réduite (40 minutes).

## 6.5. Discussion

Il serait intéressant de vérifier le modèle présenté sur une plus grande gamme de températures et de photopériodes. Toutefois, ces résultats suffisent pour prévoir l'évolution phénologique des 3 variétés de sorgho testées au cours de la saison des pluies dans les conditions de photopériode du Mali.

Ainsi, la relation 6.1 permet de calculer le temps thermique nécessaire à l'initiation paniculaire suivant la photopériode. Pour ce calcul, on considère que l'initiation paniculaire se produit le jour où la somme de température égale ou dépasse DTTPI. Il est ensuite possible de déduire la date d'apparition de la feuille drapeau à l'aide de la relation 6.2.

Il est important d'insister sur les conséquences agronomiques du photopériodisme. En Afrique soudano-sahélienne, on sait que la durée de la saison des pluies dépend étroitement de la date d'arrivée des pluies qui est très variable d'une année sur l'autre (Sivakumar, 1988). Aussi, suivant le mode de préparation du sol, les semis s'étalent sur une période assez longue, de mai à juillet.

Malgré cette variabilité du semis, il est important que la floraison se produise de façon à optimiser l'alimentation hydrique tout en évitant les dégâts liés aux moisissures et aux oiseaux.

C'est pourquoi, la capacité d'adaptation du sorgho à des dates de semis variable est une caractéristique agronomique importante. Nos résultats indiquent que les deux écotypes maliens la possèdent. Lorsque la date de semis varie, la date de floraison des variétés maliennes est groupée autour d'une valeur qui correspond, en général, à la date moyenne de fin des pluies de leur zone d'origine. Le remplissage du grain se fait alors essentiellement sur l'eau stockée dans le sol et sur les dernières petites pluies.

Pour la variété *ICSV 401*, peu photopériodique, un retard de semis provoque un décalage sensiblement identique de la date de floraison. Si le semis est trop précoce, la maturation se fait dans une ambiance trop humide, défavorable à la qualité du grain et à sa capacité germinative (Luce, 1994). En cas de semis trop tardif, le risque de sécheresse post-florale est accru. La vulgarisation de cette variété posera donc des problèmes en raison de *la gamme réduite des dates de semis possibles*.

Afin d'intensifier la production, les programmes d'amélioration des plantes ont souvent pour objectif d'éliminer le photopériodisme. Il s'agit, soit :

- de raccourcir la longueur des cycles culturels, diminuer la taille des plants et la production de biomasse pour mieux valoriser les engrais ou l'irrigation.
- de rendre le matériel végétal plus apte à être cultivé dans d'autres conditions de durée du jour notamment en contre saison.

Cette approche sous-estime la souplesse que procure le photopériodisme dans le calage des cycles culturels. Dans des conditions de faible intensification, une des principales qualités des sorghos locaux est de s'adapter à la variabilité climatique de façon à valoriser la totalité de la saison des pluies et optimiser les conditions de maturation du grain.

L'échec relatif des programmes d'amélioration dans ces régions peut ainsi s'expliquer par le fait qu'ils n'ont pas répondu à l'exigence d'adaptation aux variations du milieu (Stoop *et al.*, 1982 ; Matlon, 1985 ; Vaksman & Traoré, 1991).

Ces résultats montrent l'intérêt d'avoir un matériel photosensible dont les seuils d'induction florale s'adaptent aux dates d'arrêt des pluies des différentes zones agroclimatiques. Un criblage systématique des variétés existantes ou en voie de pré-vulgarisation s'impose donc, afin de déterminer leur comportement phénologique et de prévoir leur cycle par rapport aux caractéristiques de la saison des pluies.

Sous les latitudes du Mali, deux semis réalisés les 10 juin et 10 juillet, de part et d'autre du solstice (20 juin) permettraient de cribler rapidement la sensibilité des variétés à la durée du jour.

Cette variabilité de la longueur du cycle a des conséquences importantes sur de nombreuses caractéristiques agronomiques (Indice de récolte, surface foliaire, nombre d'entre noeuds, tallage) dont l'étude reste à approfondir.

Il s'agit, à terme, de fournir aux programmes d'agronomie et d'amélioration des plantes, des outils de prévision du comportement des variétés suivant les zones agroclimatiques et les contraintes techniques rencontrées.

## 6.6. Bibliographie

Andrews, D.J., 1973. Effects of date of sowing on photosensitive Nigerian Sorghums. *Expl. Agric.* 9: 337.

- Curtis, D.L., 1968. The relation between yield and date of heading in Nigerian sorghums. *Expl. Agric.* 4: .
- Durand, R. & J.P. Legros, 1981. Cartographie automatique de l'énergie solaire en fonction du relief. *Agronomie* 1: 31-39.
- Franquin, P., 1974. Formulation des phénomènes apparents de photothermopériodisme en conditions naturelles. Principes de base, *Cah. ORSTOM, sér. Biol.* 23: 31-43.
- Franquin, P., 1984. Adaptation des mils et sorghos à la photopériode, au parasitisme et à la capacité hydrique du sol. ICRISAT, *Agrometeorology of Sorghum and Millet in the Semi-Arid tropics. Proceedings of an International Symposium.* p. 191-203.
- Hadley, P., E.H. Roberts, R.J. Summerfield & F.R. Minchin, 1983. A quantitative model of reproductive development in Cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.], a relation to photoperiod and temperature and implications for screening germplasm. *Ann. Bot.* 51: 531-543.
- Hammer, G.L., R.L. Vanderlip, G. Gibson, L.J. Wade, R.G. Henzell, D.R. Younger, J. Warren & A.B. Dale, 1989. Genotype by environment interaction in grain sorghum. II. Effects of temperature and photoperiod on Ontogeny. *Crop Science* 29: 376-384.
- Jones, C.A. & J.R. Kiniry, 1986. CERES-Maize : A simulation model of maize growth and development., Texas A&M University Press, College Station, Texas, 194 pp.
- Kassam, A.H. & D.J. Andrews, 1975. Effects of sowing date on growth, development and yield of photosensitive sorghum at Samaru, Northern Nigeria. *Expl. Agric.* 11: 227-240.
- Luce, C., 1994., Influence des conditions de production des semences de sorgho sur la levée au champ. *Agriculture et développement* 1: 43-46.
- Major, D.J., 1980. Photoperiod response characteristics controlling flowering of nine crop species. *Can. J. Plant Sci.* 60: 777-784.
- Ritchie, J.T. & G. Alagarswamy, 1989. Simulation of sorghum and pearl millet phenology in modeling the growth and development of sorghum and pearl millet. *ICRISAT Res. Bull.* 12: 24-29.
- Salisbury, F.B. & C.W. Ross, 1985. *Plant physiology*, third Edition, p. 426-446.
- Schaeffer, J.A., 1980. The effect of planting date and environment on the phenology and modeling of grain sorghum *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Ph.D. thesis, Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- Sivakumar, M.V.K., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian Climatic Zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology* 42: 295-305.
- Stoop, W.A., C.M. Pattanayak, P.J. Matlon & W.R. Root, 1982. Stratégie pour augmenter la productivité de l'agriculture de subsistance dans les zones tropicales semi-arides de l'Afrique de l'Ouest. ICRISAT, Haute Volta, Article occasionnel n° 1.
- Vaksmann, M. & S.B. Traore, 1991. Adéquation entre risque climatique et choix variétal du mil. In *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*. Ed. John Libbey Eurotext. Paris 1994: p. 113-123.
- Vergara, B.S. & T.T. Chang, 1976. The flowering response of the rice plant to photoperiod. A review of the literature. IRRI. Los Baños.

## **7. Les modèles de simulation comme outils pour le zonage agro-climatologique : cas de la production de Sorgho au Mali**

E.J. Bakker &amp; W. Quak

Projet PSS-Niono / AB-DLO, B.P. 14, 6700 AA Wageningen, les Pays-Bas

## 7.1. Introduction

L'Equipe Modélisation des Systèmes du projet PSS utilise des relations simples pour arriver à des estimations de rendements potentiels de différentes cultures dans différentes conditions agro-climatologiques. Le terme « rendement potentiel » dénote dans cette étude le rendement limité par la disponibilité en eau. Un moyen de vérification de ces estimations est l'utilisation des modèles de simulation de croissance. Dans cette contribution les résultats d'un tel modèle pour la culture de sorgho sont présentés. L'objectif principal est la caractérisation du potentiel et du risque lié à la production du grain de sorgho pour différentes conditions agro-climatologiques, c'est-à-dire établir un zonage agro-climatologique. Le rendement potentiel et le risque d'un bas rendement dépendent non seulement des conditions agro-climatologiques, mais aussi des caractéristiques variétales et des techniques culturales employés. Un élément de chacun de ces deux aspects a été inclus dans les analyses : la durée du cycle de croissance de sorgho comme caractéristique variétale et la stratégie de semis comme élément de la technique culturale. Un objectif secondaire est la présentation assez détaillée des données de différentes stations météorologiques et des caractéristiques des types de sol utilisés dans la simulation.

## 7.2. Matériels et méthodes

### 7.2.1. Le modèle

Le modèle de simulation utilisé est le modèle PSSCA (PSS, cultures annuelles) qui est une adaptation légère du modèle présenté par Erenstein (1990). Le changement le plus important est l'inclusion d'une module décrivant le processus du ruissellement d'après de Ridder *et al.* (1991), qui à son tour est basé sur Stroosnijder & Hoogmoed (1984). Le modèle ne contient pas de bilan d'azote. Le modèle de simulation permet de simuler la production d'une culture, *in casu* le sorgho, en fonction des conditions climatologiques, des caractéristiques du sol, des caractéristiques variétales et des techniques culturales. Les résultats présentés sont basés sur environ 30.000 simulations (9 stations météorologiques x 6 types de sol x 5 durées de cycle de croissance x 4 stratégies de semis x le nombre d'années de données de pluviométrie par station, qui varie de 23 à 30).

### 7.2.2. Les données météorologiques

Le projet PSS a pu constituer une base de données météorologiques grâce à la courtoisie de la Direction Nationale de la Météorologie du Mali. A la base des données sont des observations aux différentes stations météorologiques. Deux types de station sont à distinguer : la station pluviométrique où seulement la pluviométrie quotidienne est mesurée, et la station synoptique où aussi l'insolation, la vitesse du vent, la température et l'humidité sont mesurées. La base contient des données sur une trentaine d'années pour une trentaine de stations météorologiques, dont treize sont des stations synoptiques.

Dans la présente étude les données sur les années de 1961-1990 ont été utilisées. A la base de leur pluviosité annuelle moyenne, 9 stations ont été choisies, représentant aussi bien que possible, les niveaux de 300, 400, ..., 1100 mm an<sup>-1</sup> (voir Tableau 7.1). Les données de base sont les observations quotidiennes. Pour donner une indication de la variabilité de la pluviosité, la pluviosité annuelle par station est donné avec sa moyenne, son écart type et son coefficient de variation dans le Tableau 7.2.

Tableau 7.1. Par station météorologique : nom, latitude (degrés), nombre d'années d'observation de pluviométrie (NA), durée minimale du cycle de croissance simulée (dur, en jours), pluviosité moyenne mensuelle (mars à novembre) et annuelle (mm).

Station	lat.	NA	dur	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Annuel
Hombori	15,28	29	70	0,6	2,9	8,7	37,8	103,2	109,5	57	12,9	0	333
Sokolo <sup>11</sup>	14,74	27	80	1,2	2,5	7,9	41	114,1	156	68,4	12,7	0,9	406

Niono <sup>21</sup>	14,25	23	80	0,9	5,8	25,4	58,9	130,8	183,9	78,7	17,6	0,1	509
Bankass <sup>12</sup>	14,09	30	80	2,1	7,9	22,3	62,6	147,3	167,1	90,9	21,5	2,6	525
Cinzana <sup>13</sup>	13,25	25	90	1,5	14,5	31,1	97,6	165,6	194,1	114,1	30,3	1,4	651
Kolokani <sup>22</sup>	13,56	28	90	2,1	9,5	31,6	91,6	178,3	222,4	142,4	41,1	3,2	723
Koutiala	12,40	30	100	4,1	23	65,1	125,8	218	241,4	165,2	45,7	4,2	896
Kita	13,05	26	100	0,5	12,1	40,5	141,4	205	282,6	188,2	64	5,1	941
Bougouni	11,41	30	110	8,9	45	100,6	146,8	246	283,9	206,2	72,1	6,5	1118

11 Station synoptique : Nara

12 Station synoptique : Mopti

13 Station synoptique : Ségou

21 Stations synoptiques : Nara et Ségou

22 Stations synoptiques : Kita et Ségou

Tableau 7.2. Pluiosité totale annuelle par station (mm) sa moyenne ( $\mu$ ), son écart-type ( $s$ ) et son coefficient de variation ( $cv$ ).

	Hombori	Sokolo	Niono	Bankass	Kolokani	Cinzana	Kita	Koutiala	Bougouni
1961	347	418	662	393	850		1043	1341	1204
1962	428		559	690	946		1302	1065	1487
1963	395		594	548	783	886	871	913	1334
1964	398	666	242	544	757	842	1106	1281	1449
1965	374	660	819	638	941	793	1067	1023	953
1966	392	400	394	587	908	289	1079	703	1327
1967	428	679	676	627	902	255	1192	1111	1045
1968	408	238	487	490	588	522	1030	906	883
1969	379	471	522	630	737	663	958	893	1164
1970	349	409	642	442	540		859	938	1152
1971	363	286		651	860	486	902	919	1103
1972	300	370	455	508	746	554	825	828	908
1973	319	226	317	413	564	561	947	667	842
1974	305	302	382	600	800	820	954	1124	1049
1975	522	530	567	368	625	796	964	836	1122
1976	329	554	631	516	462	992	1142	1016	1238
1977	332	383	505	735	631	652	937	810	1007
1978	461	626	627	519	1002	913	857	806	1218
1979	302	519	548	577	584	637	793	884	1184
1980		346		574	626	758	779	755	1127
1981	409	301	379	468	703	561	835	859	1181
1982	223	383	419	492	764	577	947	848	1188
1983	277	267	303	476	548	593		794	986
1984	152	174	406	458	512	553	776	516	848
1985	210	245		387	605	522	747	800	893

1986	204	368		678	871	615	866	897	1140
1987	216	318	411	271	540		660	703	924
1988	287	443		651	823	788		902	951
1989	256	365		325				666	1356
1990	270			461		618		1057	1240
$\mu$	332	405	502	524	722	650	940	895	1117
s	86	142	141	114	153	179	149	178	175
cv(%)	26	35	28	22	21	28	16	20	16

Les simulations demandent, en plus de la pluviosité, d'autres données météorologiques. Pour chaque station non-synoptique, une ou deux stations synoptiques ont été choisies pour fournir ces autres données (voir Tableau 7.1). Pour ces autres données météorologiques on dispose seulement des moyennes mensuelles pour les différentes années. Les données disponibles ne sont pas tout à fait en accord avec les besoins du modèle de simulation, qui sont les suivantes :

- *radiation* ( $\text{kJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$ ). La radiation est calculée à l'aide de l'insolation (en heures par jour) selon van Keulen & Wolf (1986, p. 65 et 66) ;
- *température minimale et maximale* (deg.C) ;
- *pression vapeur du matin* (kPa). La pression vapeur du matin est calculée à l'aide des données de base sur l'humidité relative maximale et la température minimale, selon la méthode de calcul de van Keulen & Wolf (1986, p. 209-210) ;
- *vitesse de vent* ( $\text{m s}^{-1}$ ). Il s'agit de la vitesse de vent à 2 mètres au dessus du sol, qui est dérivée des données sur la vitesse de vent mesurée à 10 m mètres selon van Keulen & Wolf (1986, p. 210) ;
- *pluviométrie* (mm). Pour les années utilisées les données sont complètes.

Pour la simulation d'une année donnée, toutes les valeurs d'une variable climatologique pour tous les jours d'un mois sont identiques, sauf pour la pluviométrie. En cas de données manquantes (1 % des cas), les moyennes pluriannuelles ont été utilisées. Les données utilisées dans le modèle, autres que celles des Tableaux 7.1 et 7.2, sont résumées dans le Tableau 7.3.

Tableau 7.3. *Insolation (ins, heures/jour), température minimale et maximale (tmn et tmx, deg.C), pression vapeur du matin (pvm, kPA), vitesse de vent à 2 m (ven,  $\text{m s}^{-1}$ ) : moyennes mensuelles par station. Pour 3 stations : données de la pluviométrie (pluv, mm).*

	Jan	Feb	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Annuel
<i>Hombori</i>													
ins	8,7	9,0	8,3	8,2	8,5	7,7	7,8	8,1	8,1	8,6	9,2	8,3	
tmn	16,8	19,2	22,7	26,1	28,8	27,6	25,2	24,3	24,7	24,3	20,7	17,2	
tmx	31,5	35,0	38,1	40,9	42,2	40,6	36,9	35,3	37,0	39,0	36,1	32,2	
pvm	5,9	6,2	7,4	10,1	16,7	21,7	24,1	24,8	23,8	15,6	8,4	6,9	
ven	1,5	1,7	1,7	1,7	2,2	2,9	2,8	2,3	2,1	1,4	1,3	1,3	
<i>Nara</i>													
pluv	0,3	0,1	0,7	3,4	9,2	43,9	113,6	139,8	65	11,3	3,4	0,1	390,8
ins	8,6	8,9	9,0	8,9	8,6	8,2	7,9	8,0	8,3	8,5	8,7	8,2	
tmn	13,5	16,3	19,4	23,2	26,4	26,2	24,0	22,8	22,8	21,9	17,8	14,2	
tmx	31,3	34,6	37,3	39,8	41,1	39,4	34,8	32,9	34,8	37,5	35,6	31,8	
pvm	6,3	6,3	7,1	9,7	15,5	23,2	26,2	26,6	26,0	19,1	10,0	7,0	
ven	1,9	2,1	2,4	2,4	2,4	2,8	2,7	2,0	1,6	1,4	1,5	1,7	

<i>Mopti</i>													
pluv	0	0,1	0,4	4,3	23,5	56,2	127	155,8	80,1	18,5	0,3	0,7	466,9
ins	9,1	9,4	9,0	8,5	8,7	8,1	7,9	7,9	8,3	9,0	9,4	8,6	
tmn	15,0	17,8	21,3	25,0	26,7	25,8	24,0	23,4	23,7	23,6	19,8	16,0	
tmx	31,9	35,0	37,8	39,9	40,6	38,2	34,8	32,9	33,6	35,8	35,2	31,6	
pvm	8,0	7,9	8,9	12,3	19,5	24,3	25,7	26,5	26,5	22,8	13,6	9,8	
ven	2,0	2,1	2,3	2,2	2,2	2,6	2,4	1,8	1,5	1,3	1,6	1,8	
<i>Ségou</i>													
pluv	0,3	0,1	2,7	11,9	32,9	71,9	160,7	210,2	116,1	25,7	1,4	1	634,9
ins	9,1	9,4	8,9	8,5	8,5	8,5	7,9	7,5	8,1	8,8	9,2	8,7	
tmn	16,4	19,1	23,3	25,2	26,4	25,0	23,1	22,5	22,4	22,1	19,4	16,8	
tmx	31,9	35,2	37,9	39,1	39,2	36,3	32,7	31,1	32,3	35,3	35,2	32,1	
pvm	9,3	9,6	13,3	16,5	23,1	25,5	25,9	26,1	25,6	22,8	14,8	10,9	
ven	1,8	1,8	1,7	1,5	1,5	1,7	1,4	1,0	0,8	0,8	1,3	1,6	
<i>Koutiala</i>													
ins	9,3	9,4	8,6	8,3	8,8	8,7	7,9	7,2	8,0	8,7	9,4	9,2	
tmn	13,8	16,8	21,0	24,7	25,2	23,3	22,0	21,7	21,6	21,5	17,4	14,3	
tmx	32,4	35,4	37,4	38,0	36,8	33,8	31,0	30,4	31,2	34,1	34,5	32,3	
pvm	8,9	9,4	11,5	18,2	24,0	24,5	24,6	24,8	24,6	22,7	14,7	10,5	
ven	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1	1,9	1,6	1,3	1,1	1,0	1,0	1,1	
<i>Kita</i>													
ins	9,1	9,4	9,0	8,8	8,5	8,1	7,0	6,3	7,4	8,2	9,0	9,2	
tmn	17,9	20,7	23,6	25,5	25,9	23,6	22,3	21,6	21,4	21,1	18,5	14,3	
tmx	33,1	36,1	38,3	39,5	38,8	34,5	31,1	30,1	31,3	33,7	34,9	32,3	
pvm	7,8	8,1	9,7	14,7	22,1	25,1	25,5	25,0	24,7	23,4	15,1	10,5	
ven	1,6	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,2	1,0	0,8	0,9	1,1	
<i>Bougouni</i>													
ins	8,8	8,7	8,1	7,8	8,0	7,9	6,8	6,3	7,1	8,1	8,6	8,4	
tmn	16,0	19,1	22,4	24,7	24,2	22,5	21,7	21,4	21,3	21,4	18,2	15,5	
tmx	33,4	35,9	37,4	37,3	35,5	32,7	30,5	29,6	30,7	33,0	34,3	33,0	
pvm	8,8	10,0	14,1	21,5	25,0	24,9	24,6	24,5	24,3	23,8	17,4	10,9	
ven	1,1	1,0	1,1	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,7	0,9	

### 7.2.3. La description des sols choisis

Le modèle tient compte des caractéristiques du sol à travers un nombre de paramètres dont les plus importants sont présentés dans le Tableau 7.4 avec les valeurs pour les sols utilisés dans les simulations. Ces sols constituent un regroupement partiel des sols au Mali selon la caractérisation du Projet Inventaire des Ressources Terrestres (PIRT, 1983). Leur nomenclature est basée premièrement sur la texture du sous-sol. Pour quelques groupes texturaux, une subdivision est faite en fonction de la texture de la couche supérieure et en fonction des caractéristiques secondaires comme la présence des gravillons, des sols superficiels et des sols à couche supérieure fine ou grossière. D'autres paramètres utilisés dans le modèle sont le nombre de couches et leur épaisseur, la teneur en eau au début de la simulation, la profondeur d'enracinement maximale et des paramètres qui décrivent la

vitesse d'infiltration d'eau et le ruissellement.

Tableau 7.4. Données sur les sols comme utilisées dans la simulation de la croissance.

Substrat	Unité	GR	LIAR	LILI	LISA_f	LISA_g	SALI
<i>Profondeur</i>	cm	46	200	200	200	200	200
<i>Texture</i>							
couche supérieure							
gravillon	%	9	0	0	0	0	0
sable	%	60	60	40	63	80	80
limon	%	30	29	42	27	13	13
argile	%	11	11	18	10	8	8
sous -sol							
gravillon	%	54	0	0	0	0	0
sable	%	42	35	12	58	63	80
limon	%	35	37	58	17	28	13
argile	%	24	29	30	25	10	8
<i>Caractéristiques hydriques</i>							
couche supérieure							
capacité d'absorption	mm min <sup>-0,5</sup>	1,0	1,0	1,0	1,0	2,5	2,5
capacité de stockage	mm min <sup>-0,5</sup>	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0
teneur en eau à:	mm m <sup>-1</sup>						
saturation		423	465	500	465	350	350
capacité au champ		204	224	322	209	126	126
point de flétrissement		65	71	110	66	55	52
sous -sol							
teneur en eau à:	mm m <sup>-1</sup>						
saturation		230	450	475	430	465	350
capacité au champ		138	348	461	231	211	126
point de flétrissement		58	167	174	145	64	52

GR	sol gravillonaire	LISA_f	limon sableux à couche supérieure fine
LIAR	limon argileux	LISA_g	limon sableux à couche supérieure grossière
LILI	limon limoneux	SALI	sable limoneux

#### 7.2.4. Les caractéristiques variétales : durée du cycle de croissance

La variété dont la croissance est simulée est caractérisée dans le modèle par un nombre de paramètres, comme la vitesse de croissance et de développement, la répartition de la matière sèche entre les différentes parties de plante, et la durée du cycle de croissance. Dans la présente étude on a varié la durée du cycle de croissance. Elle permet de se prononcer sur la durée optimale en fonction des conditions climatologiques et du type de sol.

Pour chaque station météorologique, une durée minimale a été dérivée à l'aide de quelques simulations préliminaires, voir le Tableau 7.1. Quatre autres durées sont ensuite spécifiées, qui sont de 10, 20, 30 et 40 jours plus longues. La durée optimale est déterminée en fonction des conditions agro-climatologiques, c'est-à-dire pour chaque combinaison station-sol.

### 7.2.5. Les techniques culturales : stratégie de semis

Les principales techniques culturales que le modèle peut prendre en compte sont le type de labour qui influence le ruissellement et la stratégie de semis, qui est inclus dans le modèle en forme des conditions de germination. Une première condition est que l'humidité relative de la couche superficielle du sol doit surpasser un certain seuil. Deux seuils sont utilisés : 0,25 et 0,50. Une deuxième condition est la durée pendant laquelle cette humidité relative est exigée. Pour cette condition aussi deux niveaux ont été retenus : 1 jour et 2 jours. En total, quatre critères de germination sont employés, qui sont désignés par « 0,25 - 1 », « 0,50 - 1 », « 0,25 - 2 », et « 0,50 - 2 ». La stratégie de semis optimale est dérivée en fonction des conditions agro-climatologiques et de la durée du cycle de croissance.

### 7.2.6. Le critère de classement

Pour pouvoir ordonner les stratégies de semis ou les durées du cycle de croissance, il est nécessaire de spécifier un critère de classement ou d'optimalité. Le critère employé doit incorporer le souci d'avoir un rendement moyen maximal couplé à une fréquence basse de rendements très bas. Comme les rendements bas diminuent aussi le rendement moyen ( $\mu$ ), les deux critères ne sont pas en conflit dans beaucoup de cas. Néanmoins il y a de cas où ce conflit existe. Pour quantifier l'aspect de risque le vingtième percentile ( $p_{20}$ ) est employé. Le critère de classement composé employé est

$$\mu + 2 * p_{20}$$

Pour les cas où un conflit entre  $p_{20}$  et  $\mu$  existe, une diminution d'un kg de  $p_{20}$  doit être accompagné par une augmentation de  $\mu$  d'au moins 2 kg pour que la stratégie de semis avec le  $p_{20}$  plus bas soit la stratégie préférée.

## 7.3. Résultats

### 7.3.1. Stratégie de semis optimal

Pour les 54 combinaisons station-sol, la date de germination moyenne des années simulées a été calculée pour chaque critère de semis. Après avoir constaté que pour une station donnée les moyennes ne diffèrent pas fortement entre les types de sol, la date de germination moyenne a été calculée par station. Fig. 7.1 montre cette date moyenne pour chacune des 4 stratégies de semis. La différence en date de germination entre les deux niveaux d'humidité exigés (0,25 et 0,5) n'est pas très grande, surtout dans le cas où un jour de cette humidité suffit. Si 2 jours d'humidité sont exigés, il y a une différence d'environ une semaine. La différence entre 1 et 2 jours d'humidité est considérable. Cette différence diminue de 40 jours à 15 ou 20 jours au fur et à mesure que la pluviométrie augmente. Apparemment la première pluie qui produit une humidité de 25 % dans la couche superficielle suffit dans beaucoup de cas pour aussi avoir une humidité de 50 %. Mais pour avoir un niveau d'humidité pendant 2 jours on a besoin de beaucoup plus de pluie que pour le cas où 1 jour de ce niveau d'humidité est exigé.

*Figure 7.1. Date moyenne de germination pour quatre critères de germination en fonction de la pluviométrie annuelle.*

La stratégie optimale a été calculée pour chaque combinaison station-sol-durée. Les résultats montrent que pour une station donnée la condition pour la germination doit être moins exigeante (et donc la date de semis doit avancer) au fur et à mesure que la durée de croissance augmente. Par exemple, à Bankass sur le sol LISA-f la stratégie de semis « 0,5 - 2 » est optimale si la durée est de 80, 90 ou 100 jours, « 0,25 - 2 » pour 110 jours et « 0,50 - 1 » pour 120 jours. Dans le choix de la stratégie de semis les risques d'avoir de problèmes au début de la croissance doivent être balancés contre celles à la fin.

Finalement la moyenne de la date de semis selon le critère de semis optimal (exprimé en jour du calendrier julien) a été régressé

sur la durée de croissance et sur la pluviométrie moyenne de la station considérée. Le carré du coefficient de corrélation est de 0,74. Les valeurs estimées des coefficients de régression pour les deux variables sont respectivement -0,52 et -0,034, avec des erreurs standard de 0,041 et 0,0034. Cela veut dire d'abord que la date optimale de germination est avancée d'une demie journée (0,52) si la durée du cycle de croissance augmente d'un jour, et donc que la fin de la croissance est reculée de à peu près une demie journée (0,48). Deuxièmement, la date de semis optimale change en fonction de la pluviométrie totale annuelle. Chaque 300 mm de plus avance cette date de 10 jours. Le constant dans l'équation de régression est estimé à 257 (erreur standard 3,5). Pour donner un point de référence, une pluviométrie de 600 mm et une durée de 100 jours mène au jour julien optimal estimé de 185, ce qui correspond au quatre Juillet. L'erreur standard résiduel, qui est de 10 jours, indique qu'il y a toujours une grande incertitude dans l'estimation : elle peut être plus tôt ou plus tard d'environ 20 jours (fidélité de 95 %). Cela s'explique pour une bonne partie déjà par la mauvaise répartition des 4 dates de germination pour les stations d'une basse pluviométrie (Fig. 7.1). Il est probable que pour ces stations l'estimation selon la formule de régression serait souvent plus proche à la vraie date de semis optimale que la date calculée.

### 7.3.2. Durée optimale du cycle de croissance

La durée optimale est dérivé pour le critère de semis optimal par combinaison station-sol-durée. Par combinaison station-sol l'optimum des 5 durées de croissance est présenté dans le Tableau 7.5. Avant de les discuter il est à noter que fréquemment l'optimum n'est pas très nettement définie, car le critère choisi en fonction de la durée optimale est bimodale. Ceci est une conséquence du fait que pour chaque durée seulement les résultats pour le critère de semis optimal sont considérés. Le cas de la station de Sokolo avec le type de sol LIAR, présenté dans la Fig. 7.2, peut servir comme exemple. Pour les durées de cycle de croissance de rendement de 80 et 90 jours, c'est le critère de germination « 0,50 - 2 » qui est optimal, pour les durées de 100, 110 et 120 jours c'est le critère « 0,50 - 1 ». L'emploi du maximum des 4 critères mène à une fonction bimodale, avec des maxima pour 90 et 110 jours. La figure illustre aussi qu'il est bien possible que le vrai maximum n'est pas trouvé à cause du fait que la durée est augmenté par étape de 10 jours. L'optimum dans le cas du critère « 0,50 - 2 », peut être atteint partout entre 80 et 100 jours. Il serait possible que le vrai optimum aurait une valeur plus élevée que celle pour le critère de semis « 0,50 - 1 ». De la prudence dans l'interprétation des résultats est donc à conseiller.

Les résultats du Tableau 7.5 semblent confirmer l'hypothèse d'une augmentation de la durée optimale avec une augmentation de pluviométrie, mais pas fortement. La moyenne pour la station de Sokolo (406 mm) par exemple est plus élevée que pour les stations de Niono et de Bankass (509 et 525 mm), tandis que pour la station de Bougouni, elle est moins élevée que pour les quatres stations d'une pluviométrie entre 650 et 950 mm. Ce dernier résultat est inattendue et est discuté après.

*Figure 7.2. Le phénomène de biomodalité dans la critère de classement en fonction de la durée du cycle de croissance : cas de Sokolo, sol LImon-ARgileux.*

Tableau 7.5. Durée de la saison de croissance optimale par combinaison sol-station ; moyennes par type de sol et par station.

	Hombori	Sokolo	Niono	Bankass	Cinzana	Kolokani	Koutiala	Kita	Bougouni
pluviométrie (mm) sol	333	406	509	525	651	723	896	941	1118
GR	70	100	80	120	130	110	100	110	110
LIAR	80	110	100	100	110	130	120	120	110
LILI	80	110	110	90	130	120	120	130	120
LISA_f	80	110	110	100	110	130	110	120	110
LISA_g	100	100	100	100	120	110	130	120	110
SALI	90	90	90	90	120	100	120	110	110
moyenne	83	103	98	100	120	117	117	118	112

Ce qui est illustré finalement est qu'il est mieux de parler d'une fourchette de durées optimales que d'une seule durée optimale.

Pour quantifier cet aspect, pour chaque combinaison station-sol, les valeurs du critère de classement ( $\mu + 2 * p_{20}$ ) ont été comparées pour les deux durées optimales. Dans le cas illustré en Fig. 7.2, il s'agit donc des durées de 110 et 90 jours. Ensuite, il est calculé de combien l'optimum est plus élevé que la valeur pour le critère qui vient en deuxième position. Dans le cas illustré en Fig. 7.2, le critère  $\mu + 2 * p_{20}$  a les valeurs 3437 et 3251 pour la durée de 110 et 90 jours, respectivement. La valeur pour 110 jours est donc 5,7 % plus élevée que la valeur pour 90 jours. Les différences relatives entre les valeurs du critère de classement pour la durée optimale et la durée classée comme deuxième, exprimées en %, sont présentés pour l'ensemble des combinaisons station-sol dans le Tableau 7.6. Pour la plupart des cas, ces différences sont petites en comparaison avec l'imprécision du modèle même (Penning de Vries & Spitters, 1991).

Tableau 7.6. Moyenne et distribution des différences relatives entre les valeurs du critère de classement des 2 durées optimales pour les 54 combinaisons station-type de sol.

Moyenne	Distribution					
	0-2 %	2-5 %	5-10 %	10-15 %	> 15 %	Total
6,70 %						
	14	14	15	7	4	54

### 7.3.3. Le zonage agro-climatologique

Le Tableau 7.7 représente le rendement en grain par type de sol et par station avec la 20ème percentile et le coefficient de variation. Le rendement augmente en fonction de la pluviométrie annuelle moyenne de telle façon qu'on peut dire que 1 mm de pluie correspond à 5 kg de grain. Pour une pluviométrie basse, les différences entre les types de sol sont considérables. Pour les stations d'une pluviométrie en dessus de 800 mm, ces différences sont relativement petites, sauf pour le limon-limoneux qui a un rendement qui est plus bas de 700 à 1100 kg ha<sup>-1</sup>. Les résultats pour LISA-f sont très pareils à ceux pour LIAR, mais avec LISA-f constamment un peu plus élevé. Le sol LISA-g a des résultats pareils au type de sol SALI, sauf pour la station de Hombori.

Les sols SALI et LISA-g ont les meilleurs rendements sur tout le trajet de pluviométrie considérée. Les sols GR, LIAR et LISA-f ont des rendements plus bas aux stations d'une faible pluviométrie, mais des rendements pareils aux stations d'une pluviométrie de plus de 800 mm. C'est le sol LILI qui a un rendement qui est constamment plus bas que les autres types de sol.

Concernant l'aspect risque (Tableau 7.7) le raisonnement est pareil. Le risque d'une forte réduction en rendement par rapport à la moyenne est le plus bas pour les sols SALI et LISA-g. A partir d'une pluviométrie de 525 (Bankass) les risques sont petits. Pour les sols GR, LIAR et LISA-f c'est à partir de 651 mm (Cinzana). Pour le sol LILI une pluviométrie de plus de 800 mm est exigée pour que l'aspect risque cesse d'être important. Il est à noter que ces conclusions sont valides pour la distribution des pluies aux stations considérées. Pour des sites avec une pareille pluviométrie annuelle, mais une autre distribution, les conclusion pourraient changer.

Tableau 7.7. Moyenne ( $\mu$ ) et 20-ème percentile ( $p_{20}$ ) du rendement en grain (kg ha<sup>-1</sup>) et le coefficient de variation (CV, en %) par station et par type de sol.

		Hombori	Sokolo	Niono	Bankass	Cinzana	Kolokani	Koutiala	Kita	Bougouni
pluviométrie (mm)		333	406	509	525	651	723	896	941	1118
sol										
GR	$\mu$	832	2231	2043	2404	4318	4977	5996	5977	6529
	$p_{20}$	456	437	1328	833	3570	4311	5463	5708	6303
	CV	59	86	49	71	32	24	19	16	6
LIAR	$\mu$	630	2333	2693	2612	4691	4595	5821	5739	6298

	p20	152	552	1071	1097	4100	3941	5727	5572	6170
	CV	99	84	60	60	31	21	19	16	12
LILI	$\mu$	257	1562	1682	1596	3382	3784	5051	5062	5685
	p20	10	9	231	335	2222	2158	4571	4650	5419
	CV	169	120	90	82	48	44	33	25	20
LISA_f	$\mu$	799	2495	2960	2654	4727	5090	6050	5760	6392
	p20	238	832	1250	1226	3849	4824	5721	5599	6160
	CV	85	79	56	58	33	23	19	16	8
LISA_g	$\mu$	1678	3289	3797	3891	5094	5578	5844	5863	6569
	p20	364	1797	2244	3226	4453	5211	5521	5913	6336
	CV	68	52	43	28	25	10	9	18	5
SALI	$\mu$	2209	3283	3787	3813	5148	5742	6050	6110	6481
	p20	949	1927	2903	3094	4862	5390	5698	5908	6410
	CV	60	49	40	28	23	10	10	11	14
moyenne	$\mu$	1068	2532	2827	2828	4560	4961	5802	5752	6326

### 7.3.4. Observations sur les résultats de la simulation

Premièrement il est à remarquer que les indices de récolte simulés ont une valeur élevée par rapport aux valeurs observés normalement pour le sorgho. En générale on trouve 0,20 à 0,30 tandis que les simulations peuvent donner des valeurs au dessus de 0,6 (Tableau 7.8).

Deuxièmement le phénomène inattendu se présente que souvent le rendement en biomasse aérienne continue à augmenter en fonction de la durée du cycle de croissance tandis que le rendement en graines baisse à partir d'une certaine durée, même dans des situations où le disponibilité en eau est optimal. Prenons le cas d'un sol limon-sableux avec une couche supérieure assez fin pour l'année 1982 à Koutiala. L'année 1982 était une année normale pour Koutiala avec une pluviométrie de 840 mm. Les quatre critères de semis résultent en 2 jours de semis, le 26 mai et le 4 juin. Pour trois durées de croissance (90, 110 et 130 jours) et les deux dates de début de croissance les rendements en graines et en biomasse aérienne sont présentés dans Tableau 7.8. Pour les deux dates de semis le rendement en biomasse aérienne augmente avec la durée du cycle de croissance. Ceci est valide aussi pour le rendement en graines pour le semis du 26 mai. Pour la date du 4 juin, on observe que les rendements en graines pour le semis du 4 juin sont plus élevés pour les variétés de 90 et 110 jours par rapport à ceux de 26 mai, mais que le rendement en graines de la variété de 130 jours est plus basse que celui de la date de semis précoce. Il est même plus bas que le rendement en graines de la variété d'une durée du cycle de 110 jours.

Tableau 7.8. Rendements en grain et biomasse d'une culture de sorgho sous condition de production limitée par la disponibilité en eau sur un sol limon-sableux pour une année typique à Koutiala (1982, 820 mm) en fonction de la date de germination qui est déterminée par des conditions de germination.

Condition de germination						
Nombre de jours avec sol humide	Teneur en eau relative	Jour de germination	Durée de croissance (jour)	Rendement grain (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendement biomasse aérienne (kg ha <sup>-1</sup> )	Indice de récolte
1	0,25-0,50	26-May	90	1.941	2.939	0,66
			110	5.119	8.570	0,60

			130	5.993	12.623	0,47
2	0,25-0,50	4-Jun	90	4.121	6.446	0,64
			110	6.327	11.819	0,54
			130	5.295	13.432	0,39

Cette dernière observation s'explique comme suit. Il est à remarquer qu'en même temps la photosynthèse de la variété de 130 jours est toujours plus élevée que celle de la variété de 110 jours, comme le montre la Fig. 7.4. Pendant son cycle végétatif plus long il développe une surface foliaire plus grande, ce qui est illustré dans la Fig. 7.3. La même figure montre que dans la première partie le développement du rendement en graines pour les deux variétés est pareil : les premiers 3000 kg de grain sont produits en environ 15 jours. Dans la deuxième partie de la courbe qu'il y a une inflexion plus prononcée dans le cas d'une durée de 130 jours, qui est expliqué principalement par une respiration de maintien plus élevée. Dans la Fig. 7.4 on peut voir que bien que la photosynthèse totale pendant la période de remplissage des graines de la variété de 130 jours soit plus élevée (presque 1200 kg ha<sup>-1</sup> de glucose), après soustraction du besoin de la respiration de maintien il restent moins des assimilats pour la croissance (environ 1900 kg ha<sup>-1</sup> de moins). L'augmentation de la respiration de maintien de 3100 kg ha<sup>-1</sup> de glucose est causée partiellement par la durée de vie plus longue (600 kg ha<sup>-1</sup> de glucose), mais surtout par la plus grande quantité de biomasse à maintenir (2500 kg ha<sup>-1</sup> de glucose). On voit dans la deuxième graphe de la Fig. 7.4 que les derniers 7 jours toutes les produits de la photosynthèse sont utilisés pour le maintien de la biomasse.

*Figures 7.3. Développement des poids des parties des plantes d'une culture de sorgho d'une durée de croissance de 110 et 130 jours, sur un sol limon-sableux, sous une pluviométrie de 840 mm (Koutiala, 1982).*

*Figures 7.4. Destin des produits de la photosynthèse (bpgr= production brute des graines, phot= photosynthèse brute, main= respiration de maintien) d'une culture de sorgho d'une durée de croissance de 110 et 130 jours, sur un sol limon-sableux, sous une pluviométrie de 840 mm (Koutiala, 1982).*

La deuxième aspect à expliquer est le rendement en grain de la variété de 130 jours semé le 26 mai, qui est plus bas que pour le cas d'un semis du 4 juin, tandis que ce phénomène n'est pas observé pour les variétés de 90 et 110 jours. Remarquons d'abord que le rendement plus bas des variétés de 90 et 110 jours pour le semis précoce est causé par un manque d'eau pendant les premiers 7 jours après germination. Par cela la formation d'une surface photosynthétique est retardée de même que la production de biomasse. Au fur et à mesure que la variété est d'une durée plus courte il est moins de temps de récupérer la photosynthèse perdue. Cela se voit dans le Tableau 7.8 en comparant les augmentations de rendements graines causées par le semis 9 jours plus tard. Pour une variété de 90 jours elle est plus que doublé (1940 versus 4121). Pour la variété de 110 jours elle monte 1200 kg ha<sup>-1</sup> de 5100 à 6300 kg ha<sup>-1</sup>, ce qui est une augmentation plus limitée. Pour la variété de 130 jours l'effet de la sécheresse semble même être positif.

La raison pour laquelle le rendement en graines de la variété de 130 jours semée le 4 juin est plus bas que celle du même variété du semis de 26 mai est lié à celle qui explique la différence entre les rendements entre les deux variétés de 110 et 130 jours en cas d'une date de semis de 4 juin. Les jeunes plantes du semis précoce souffrent d'une période de sécheresse ce qui met la formation des feuilles et tiges en retard par lequel l'indice surface foliaire ne peut plus atteindre son niveau optimal pour l'utilisation de la lumière. Ceci fait que la photosynthèse pendant la période de remplissage des graines est 250 kg ha<sup>-1</sup> de glucose plus bas pour le semis de 26 mai par rapport à celui de 4 juin. Cependant, la biomasse formé doit aussi être maintenue, ce qui coûte pendant la période de remplissage des graines 10.100 kg ha<sup>-1</sup> pour la culture semée tardivement et 8600 kg pour la culture semée plus tôt. L'augmentation de 1500 kg ha<sup>-1</sup> pour la maintien de la culture semée tardivement dépasse alors largement le gain en photosynthèse.

Des raisonnements pareils expliquent aussi la courte durée du cycle de croissance optimale à Bougouni par rapport à, par exemple, celle de Cinzana. A Bougouni, avec un pluviométrie élevée, la croissance n'est souvent plus limitée par la disponibilité en eau, ce qui cause que les variétés d'un cycle long ont trop de biomasse à maintenir pendant la période de remplissage de grains.

## 7.4. Bibliographie

Breman, H. & N. de Ridder (Eds.), 1991. [Manuel sur les pâturages des pays sahéliens](#), Karthala et ACCT Paris, CTA, Wageningen, 485 pp.

Erenstein O., 1990. Simulation of water-limited yields of sorghum, millet and cowpea for the 5th région of Mali in the framework of quantitative land evaluation. CABO-DLO rapport, Wageningen.

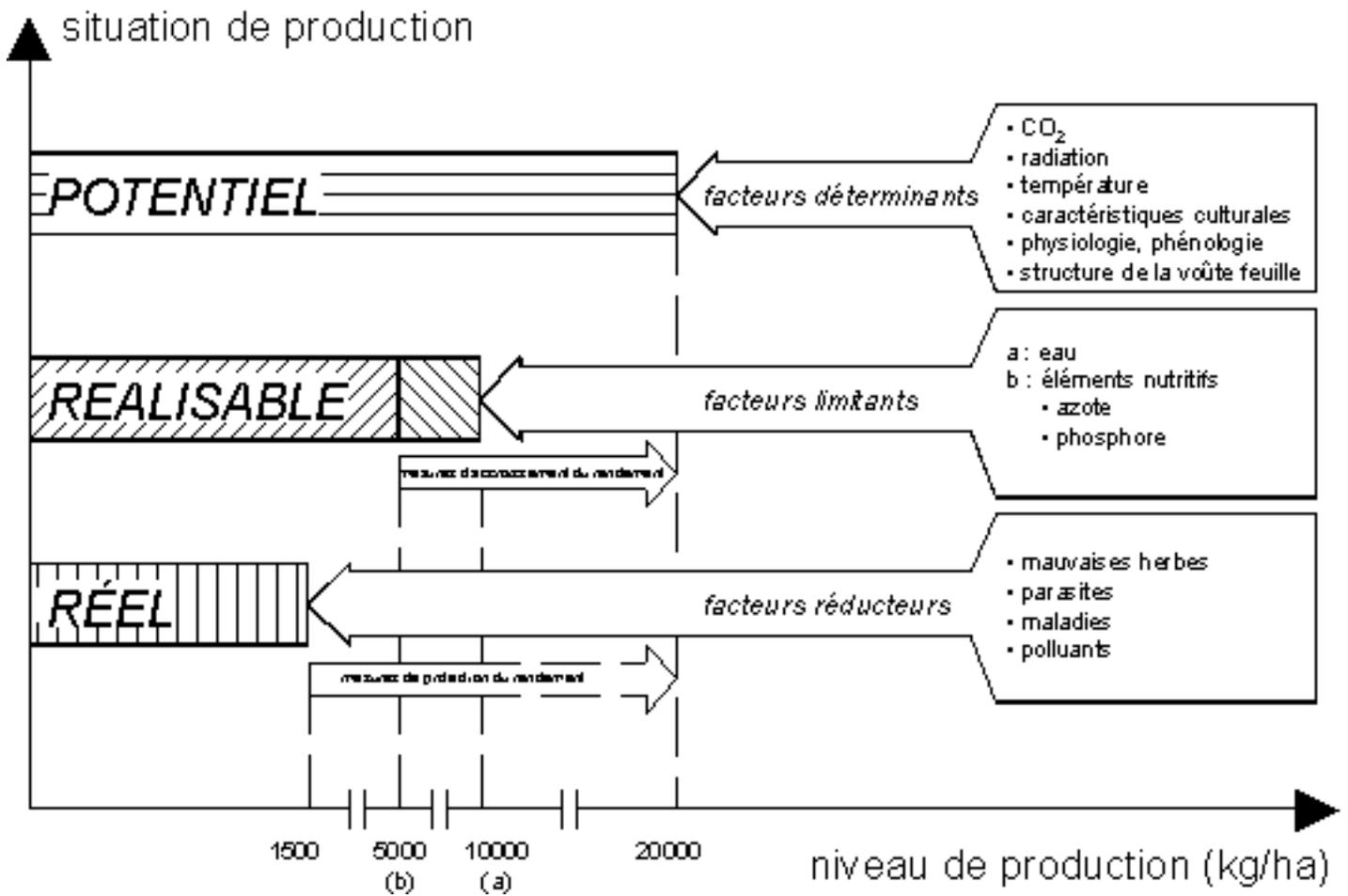
Keulen, H. van & J. Wolf (Eds.), 1986. Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Simulation monograph series, PUDOC, Wageningen.

Penning de Vries, F.W.T & C.J.T Spitters, 1991. The potential for improvement in crop yield simulation, in Muchow, R.C. et J.A. Bellamy (Eds.). Climatic risk in crop production: models and management for the semi-arid tropics and sub tropics. Proceedings of the International Symposium held in Brisbane, Australia, 2-6 July, 1990.

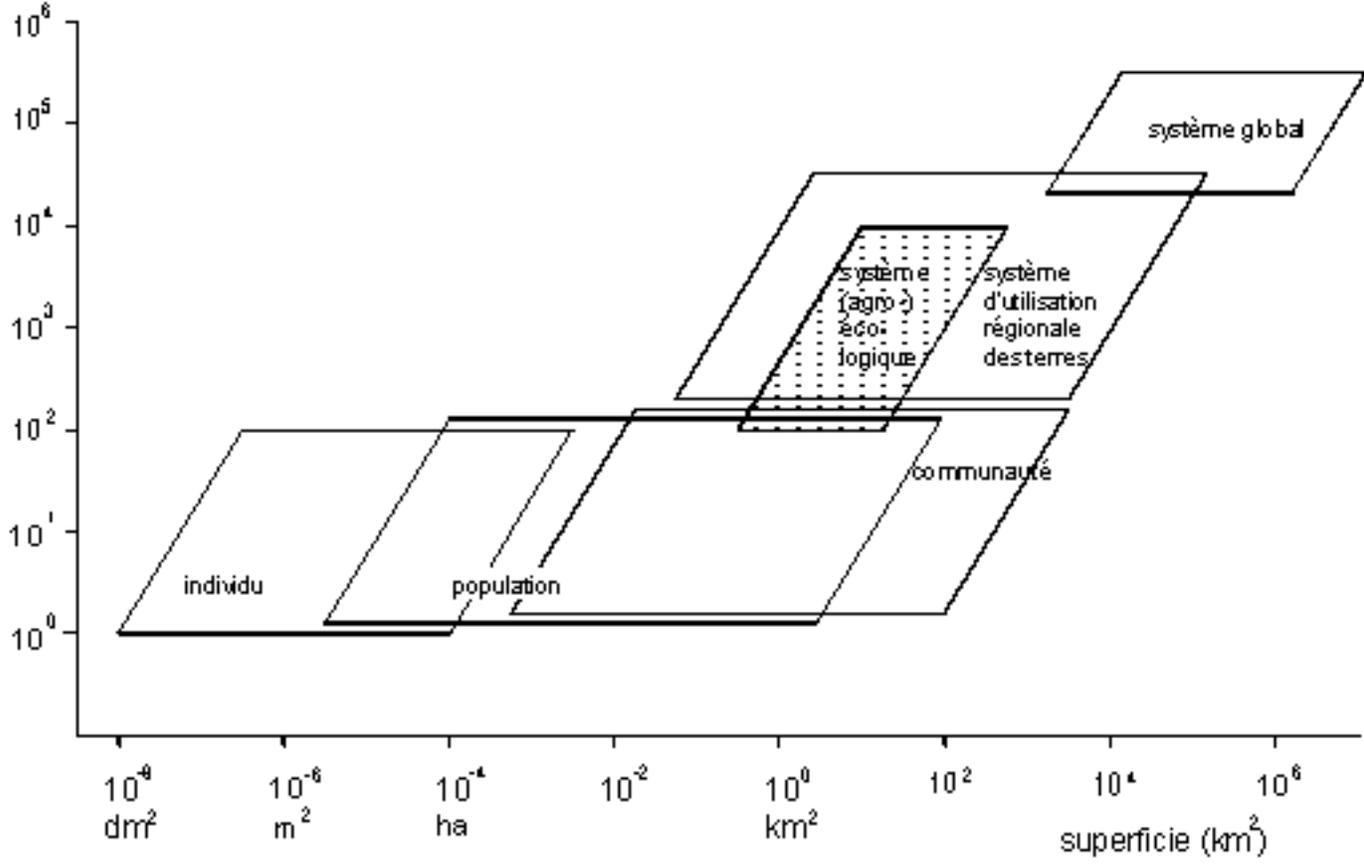
PIRT, 1983. Les ressources terrestres au Mali, Vol. II. Rapport technique. Projet Inventaire des Ressources Terrestres au Mali. Mali/USAID, Bamako, Mali, TAMS, New York, 486 p.

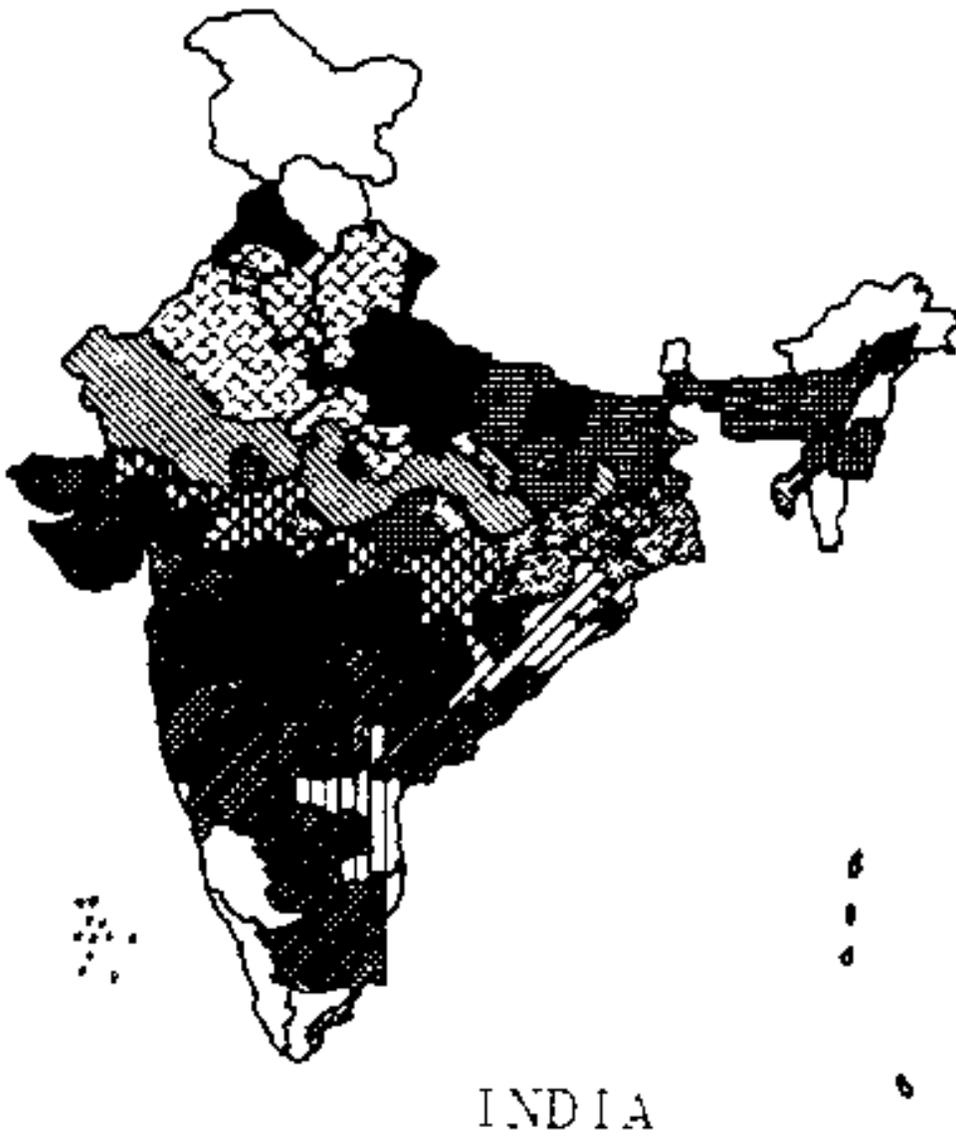
Ridder, N. de, H. van Keulen, H. Breman & P.W.J. Uithol, 1991. La production végétale. III.2 dans [Breman & de Ridder](#).

Stroosnijder, L. et W.B. Hoogmoed, 1984. Crust formation on sandy soils in the Sahel. II. Tillage and its effect on the water balance. Soil and Tillage Research 4, 321-337.



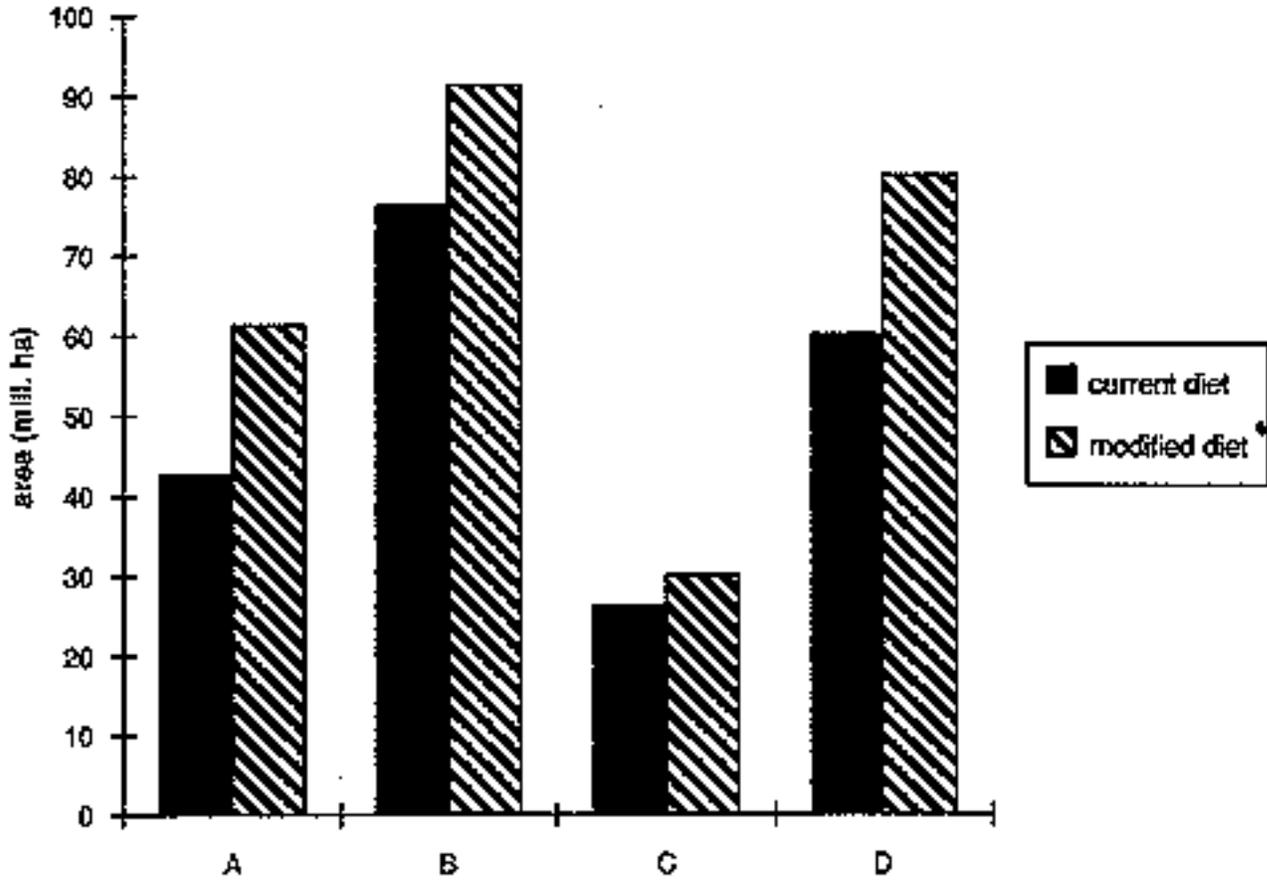
temps (ans)





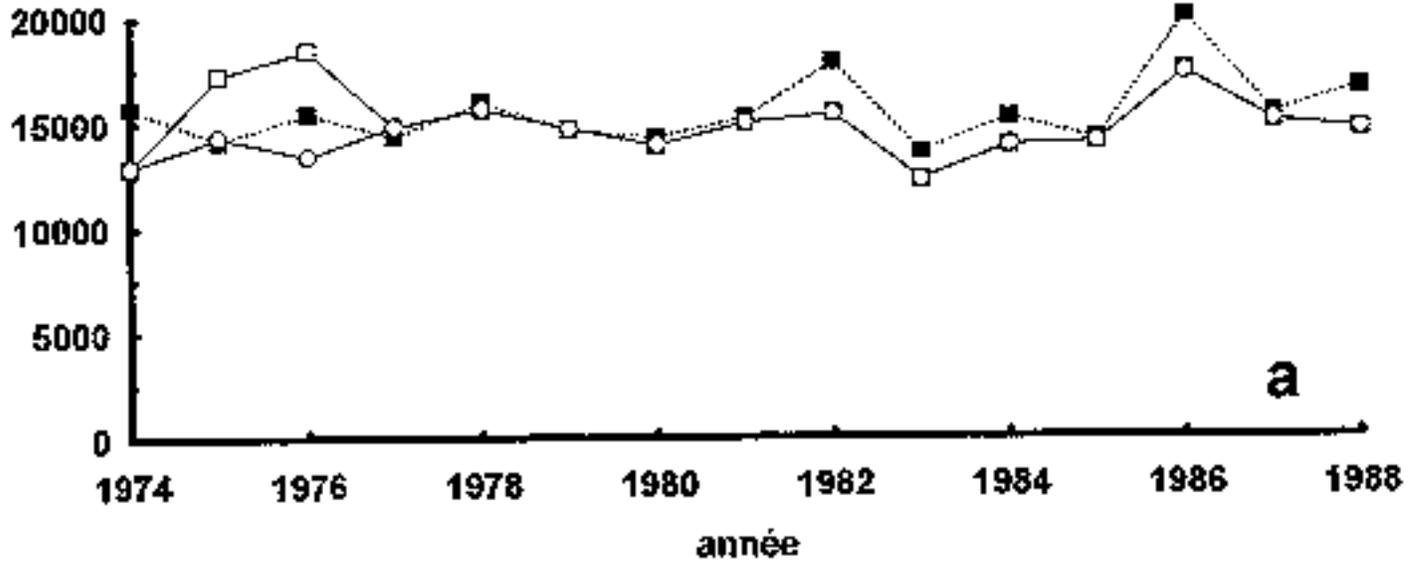
Grain Yield Potential Water-limited		Zone
(t/ha)	(% of Pot)	
3 - 4	< 50	10
3 - 4	≥ 50	9
4 - 5	< 50	8
4 - 5	≥ 50	7
5 - 6	< 50	6
5 - 6	≥ 50	5
6 - 7	< 50	4
6 - 7	≥ 50	3
7 - 8	< 50	2
7 - 8	≥ 50	1

### LAND USE



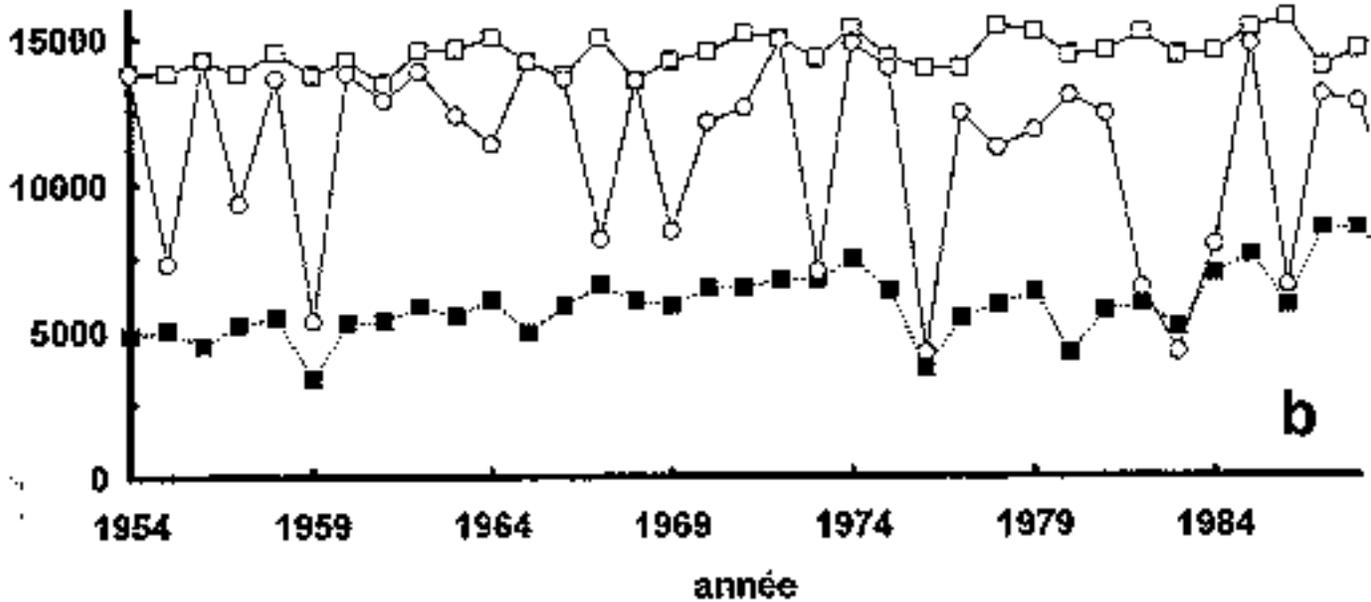
### production de racines

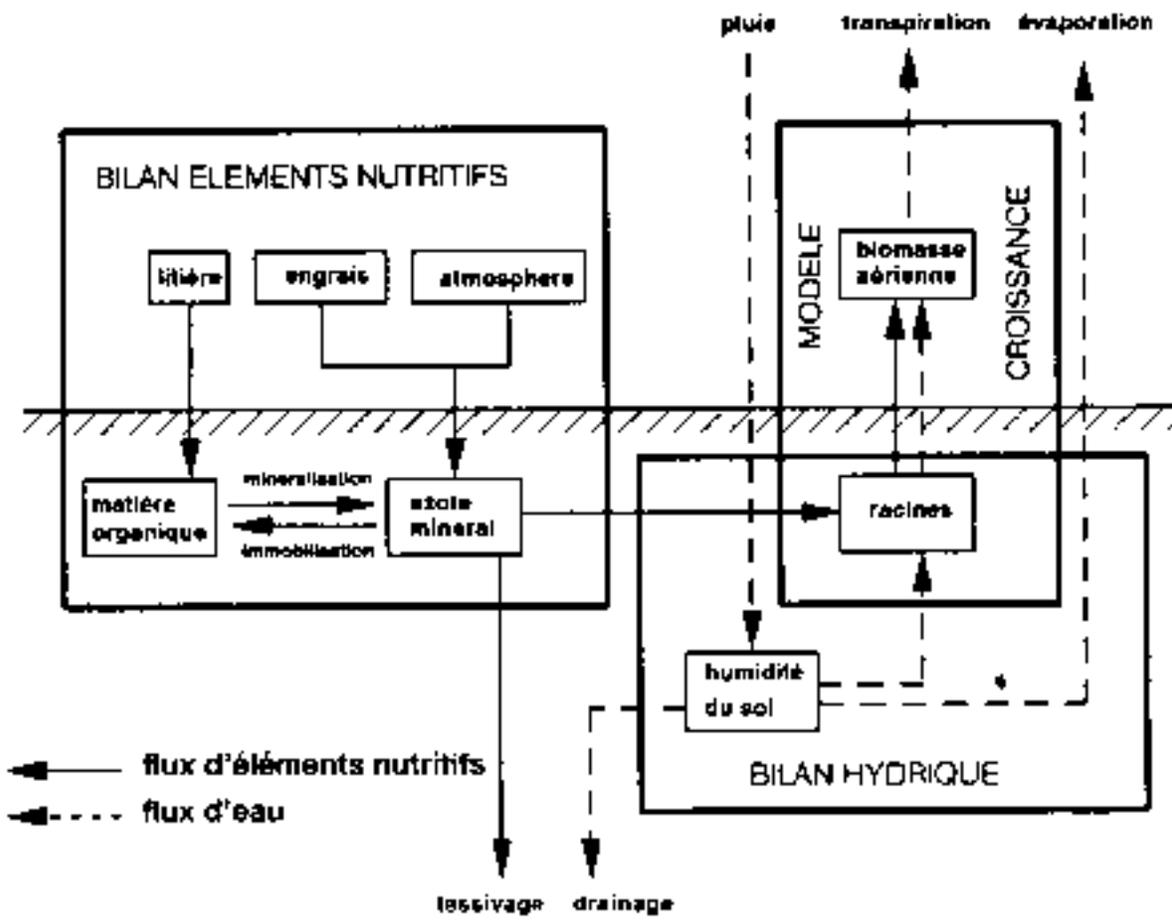
(kg/ha)

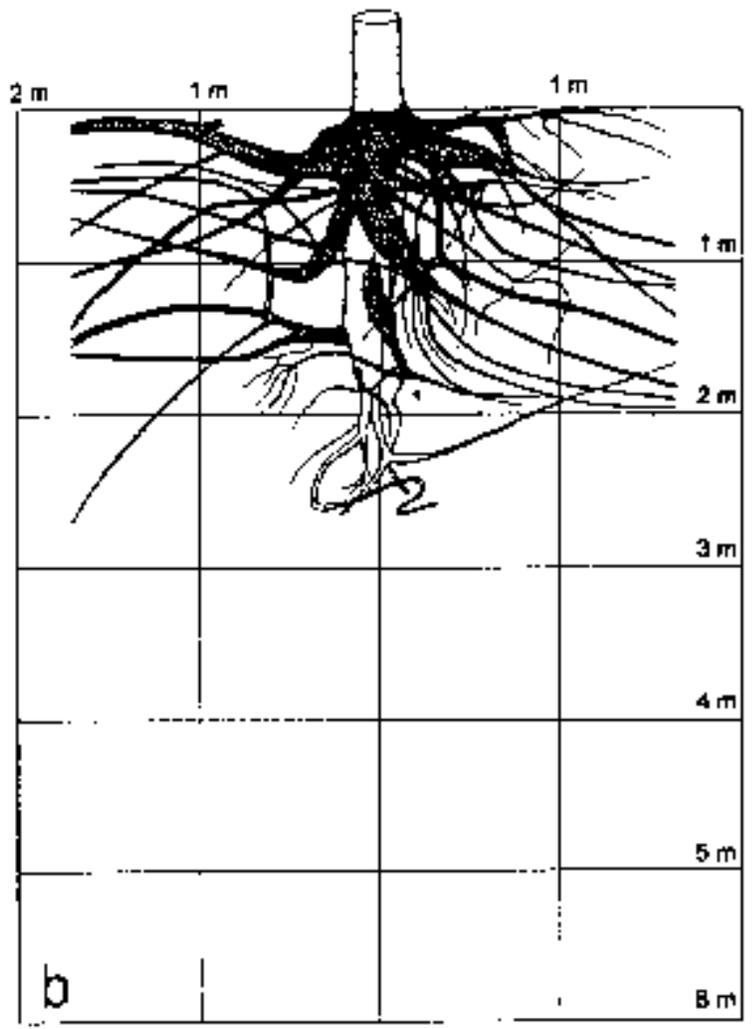
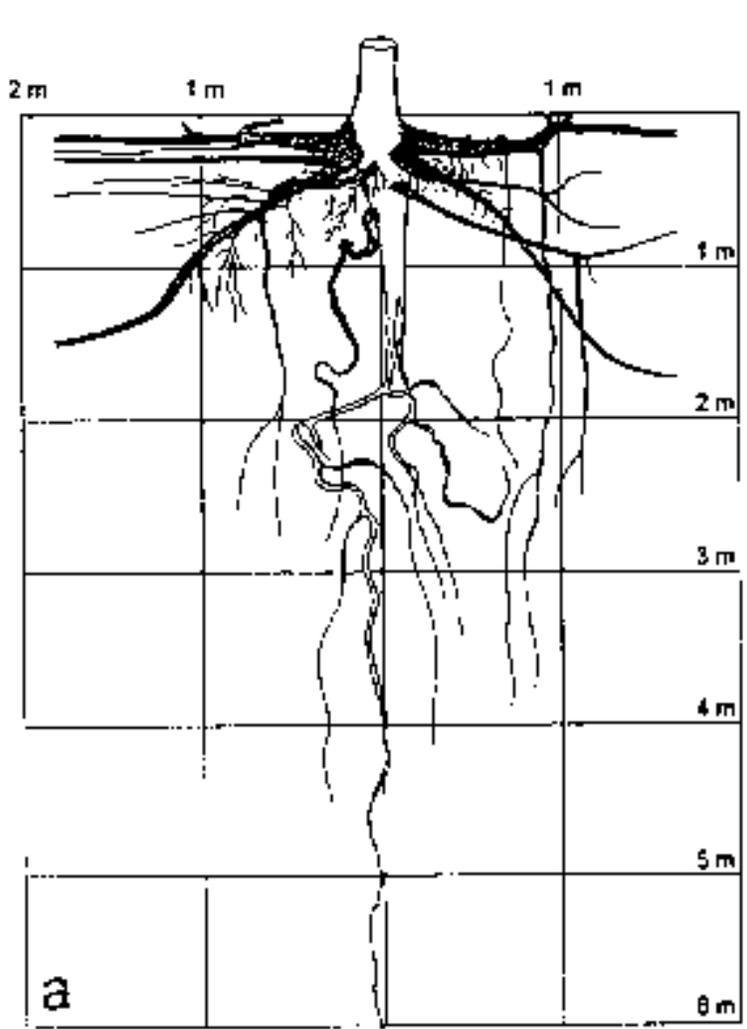


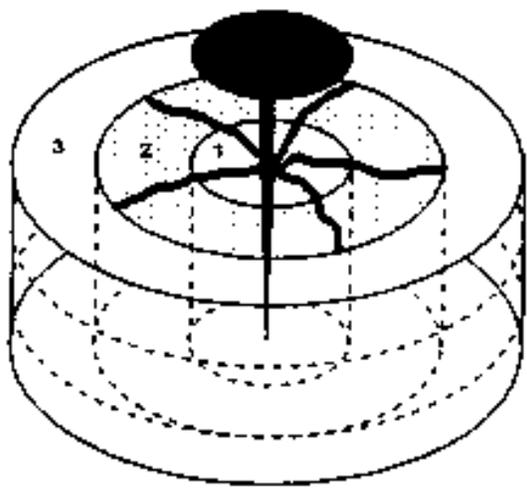
### production de tubercules

(kg/ha)

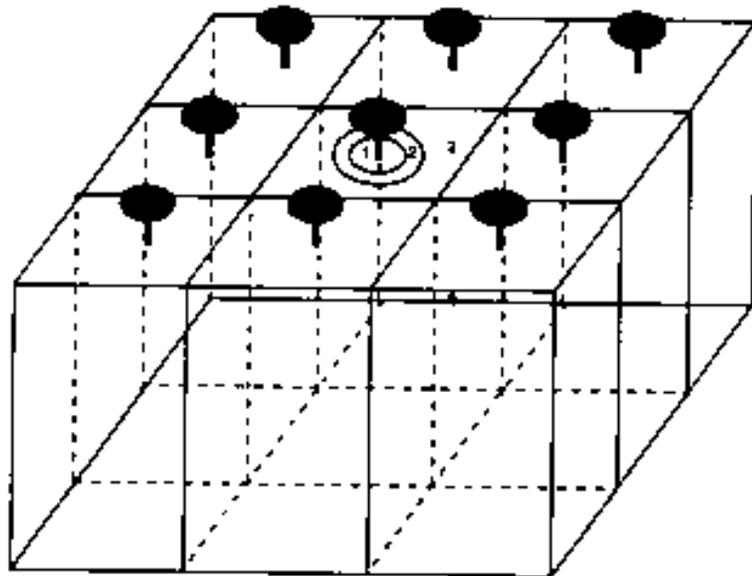




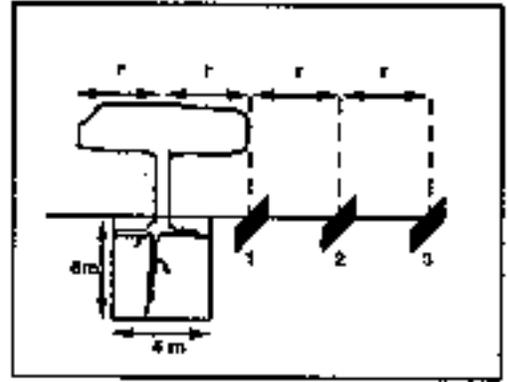




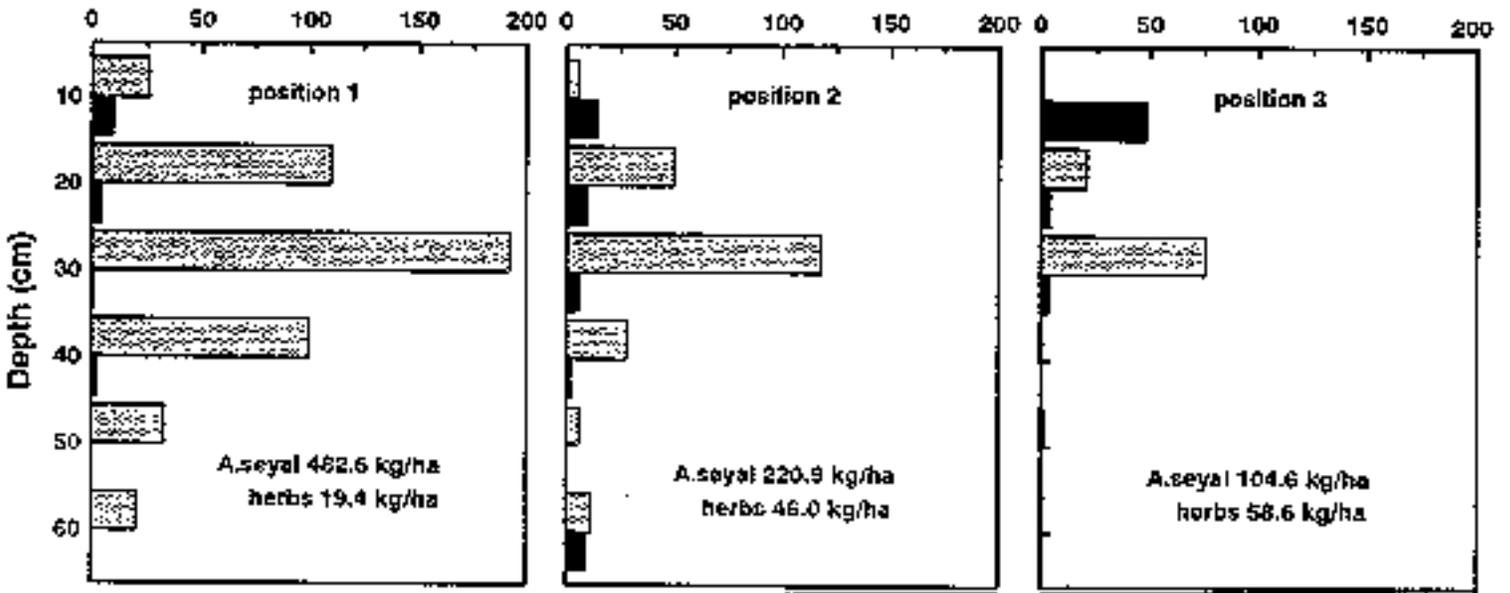
**a**



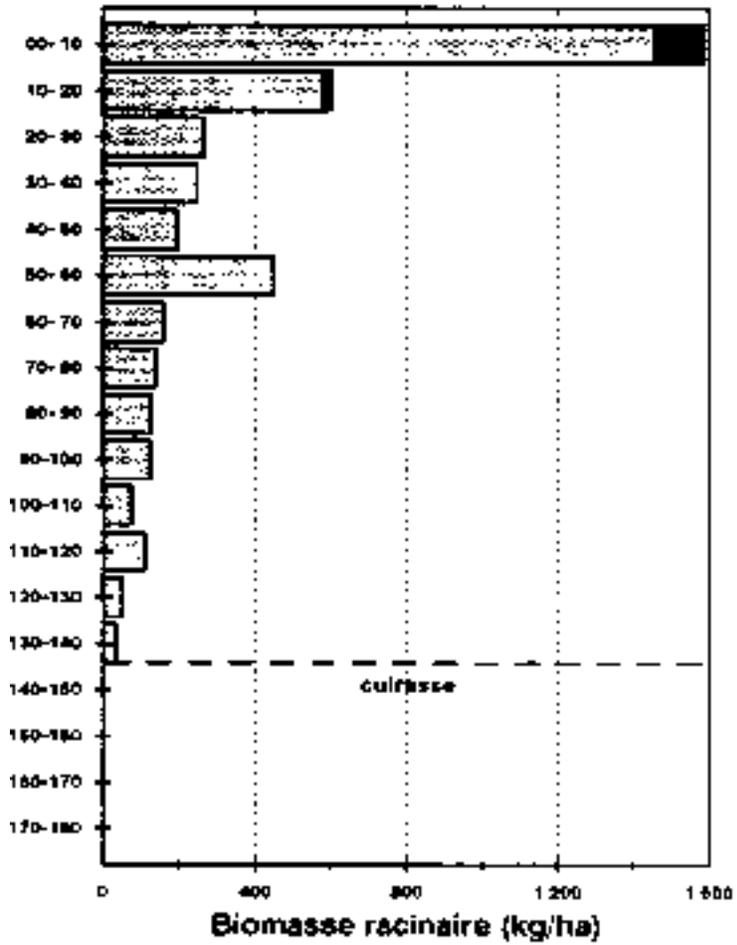
**b**



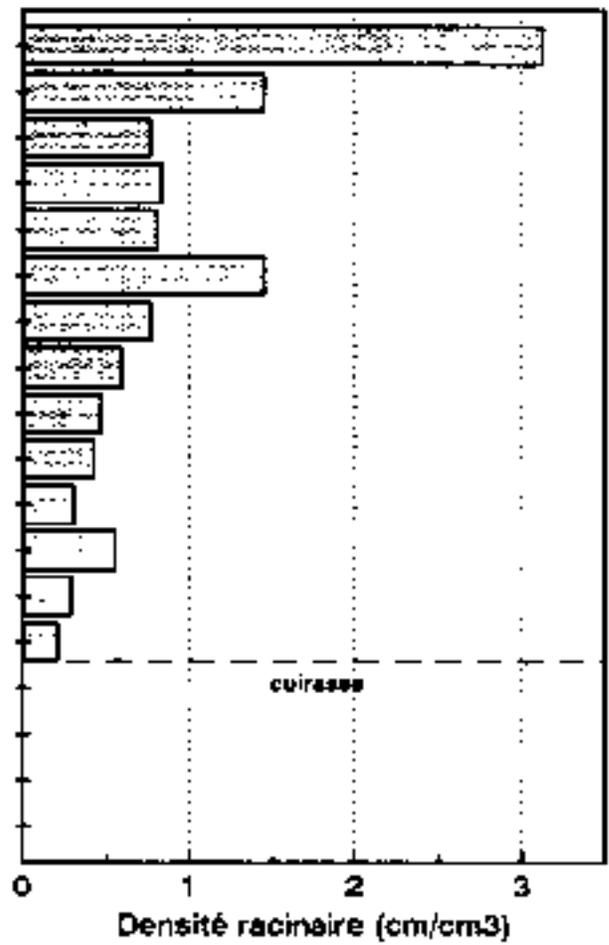
**Biomasse racinaire (kg/ha)**

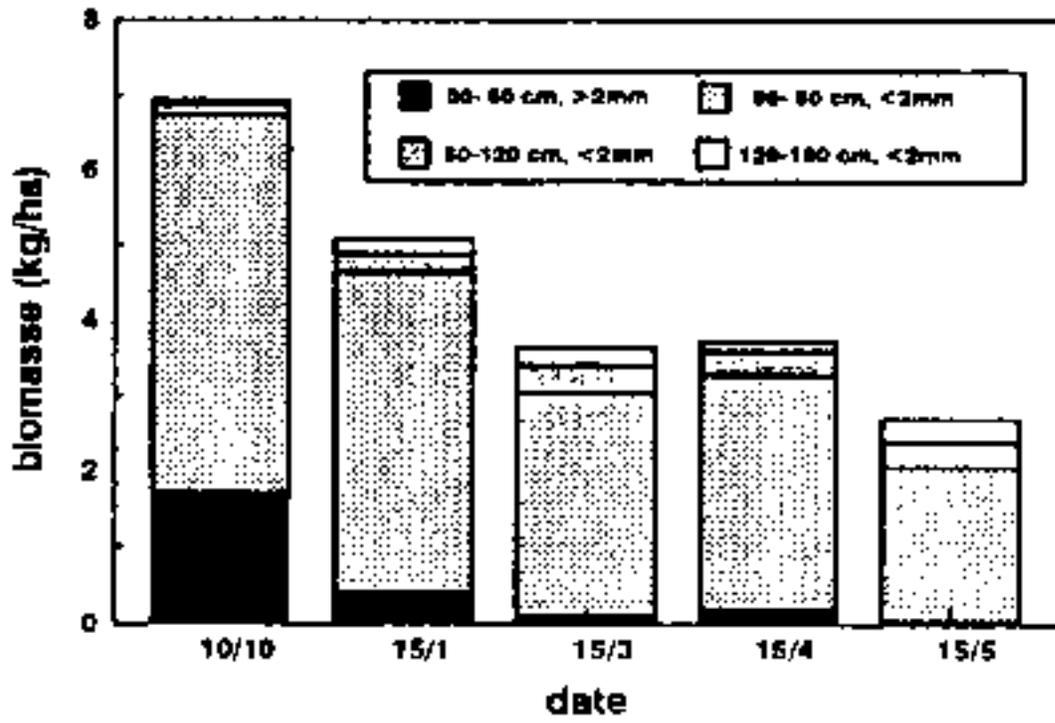


**a**

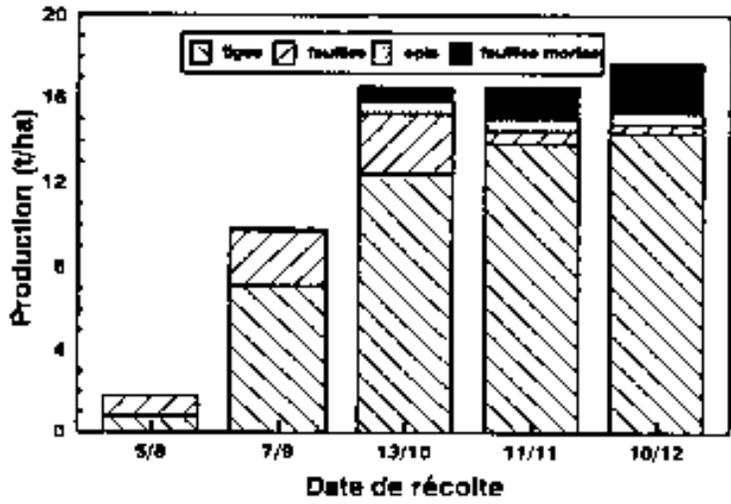


**b**

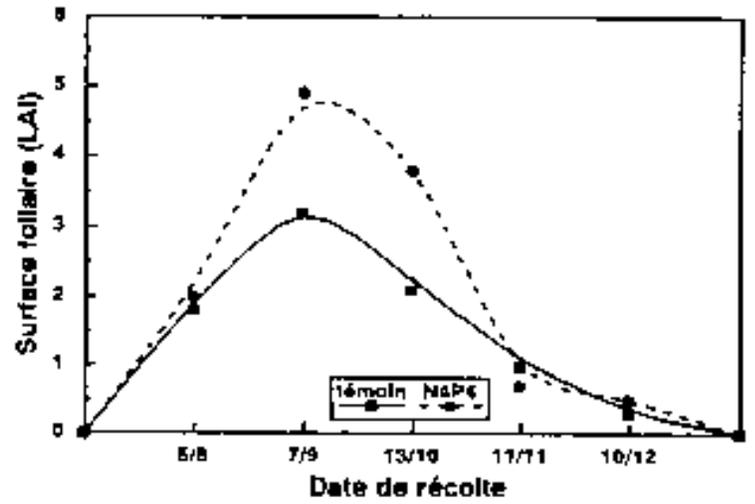




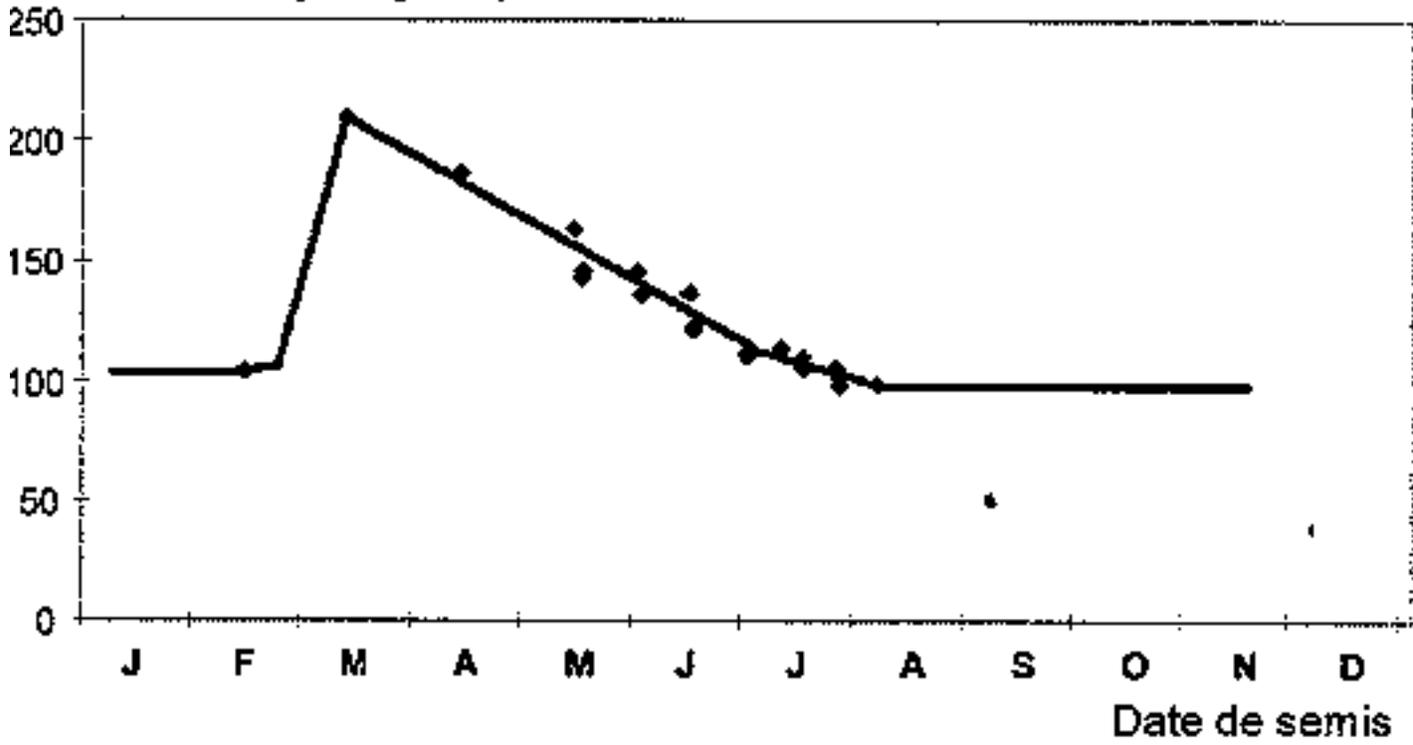
a

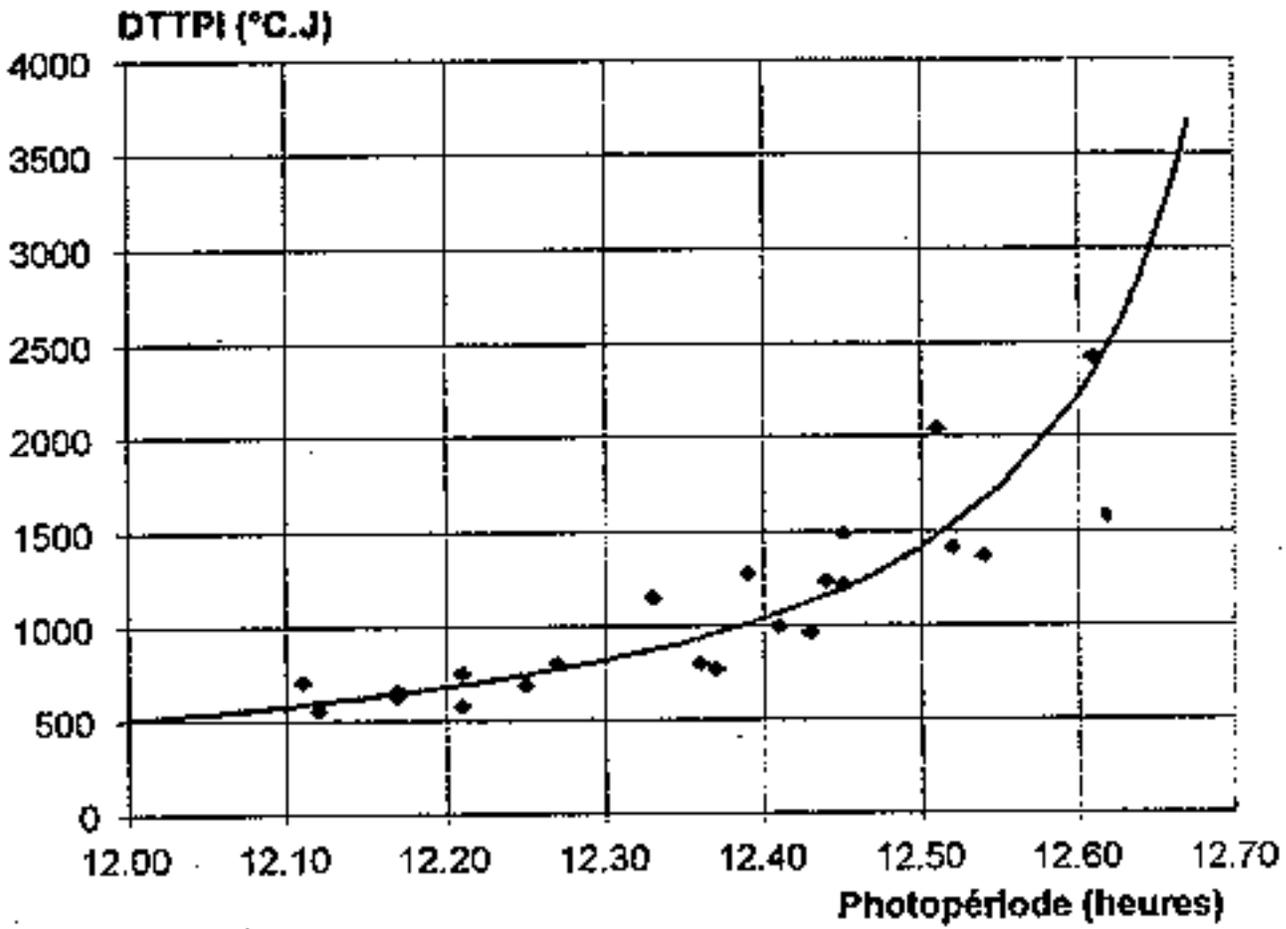


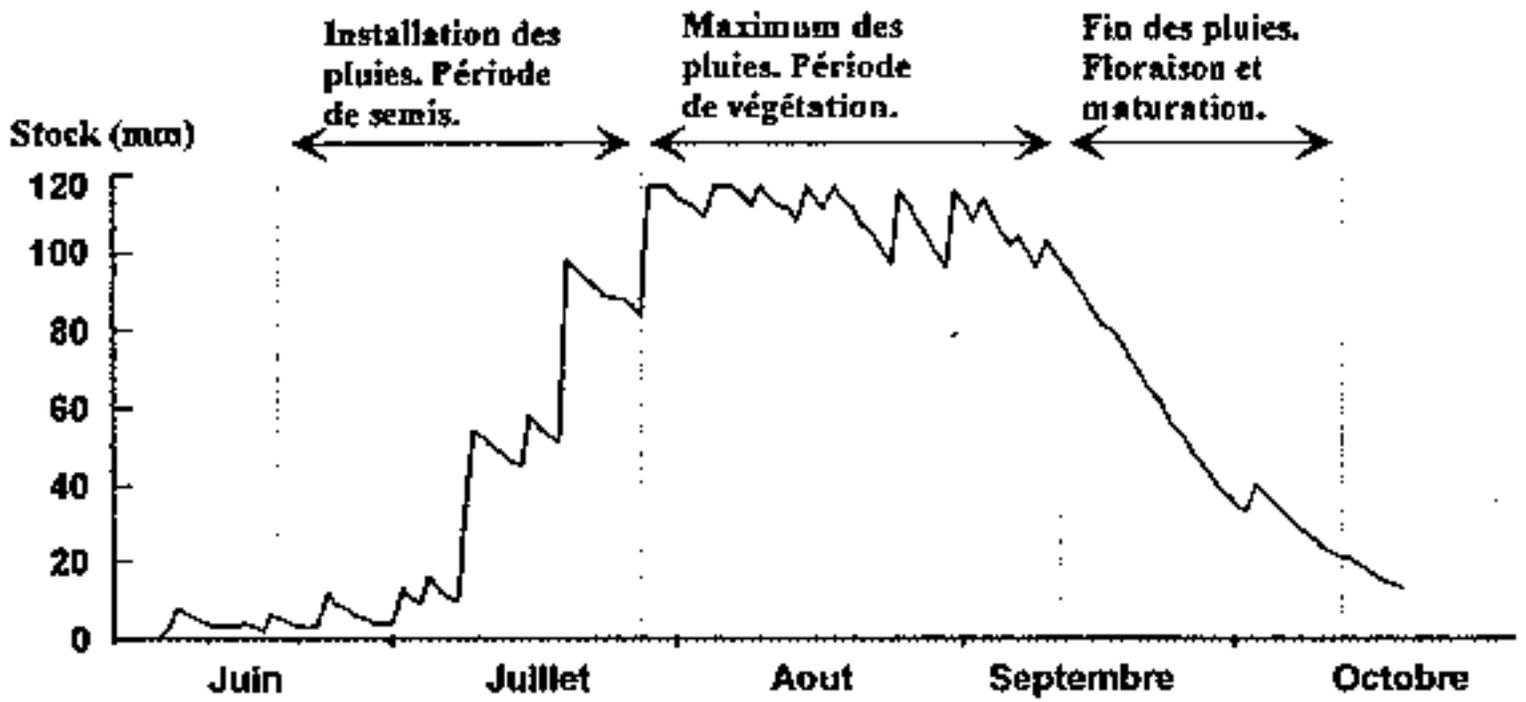
b

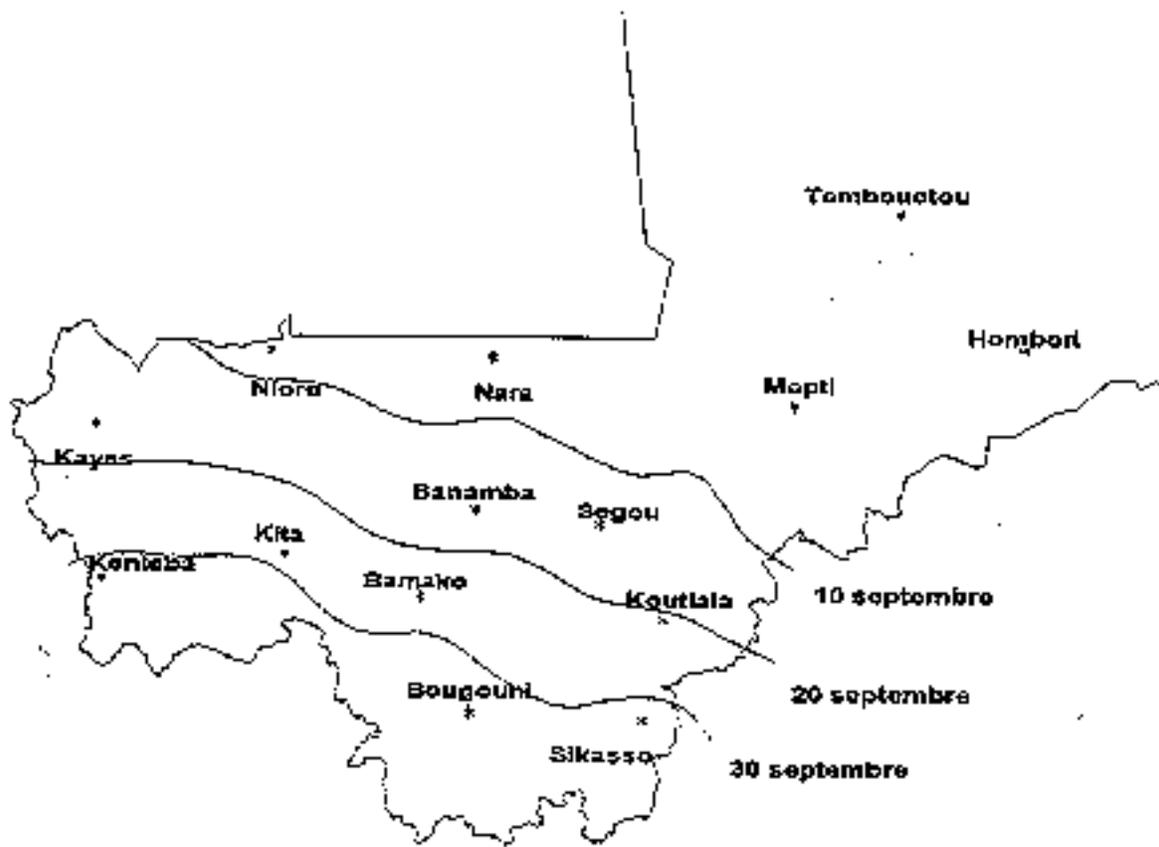


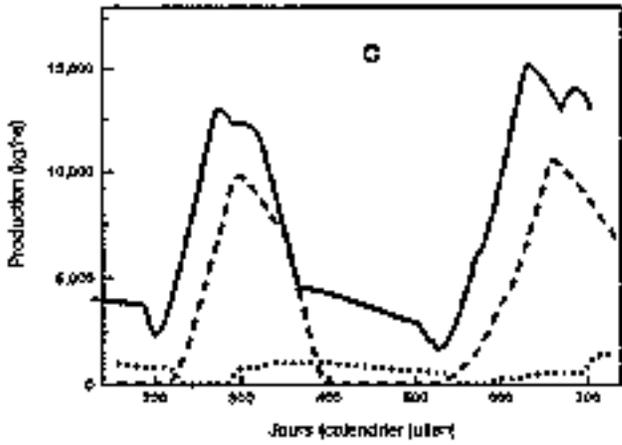
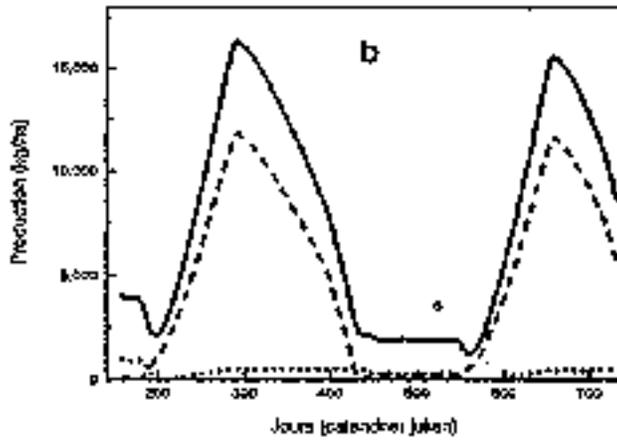
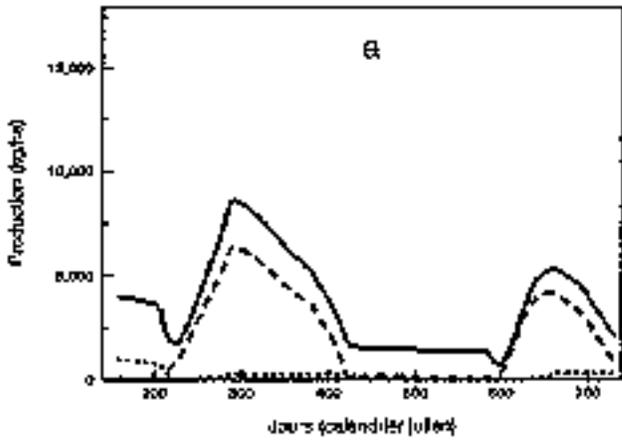
### Durée du cycle (jours)



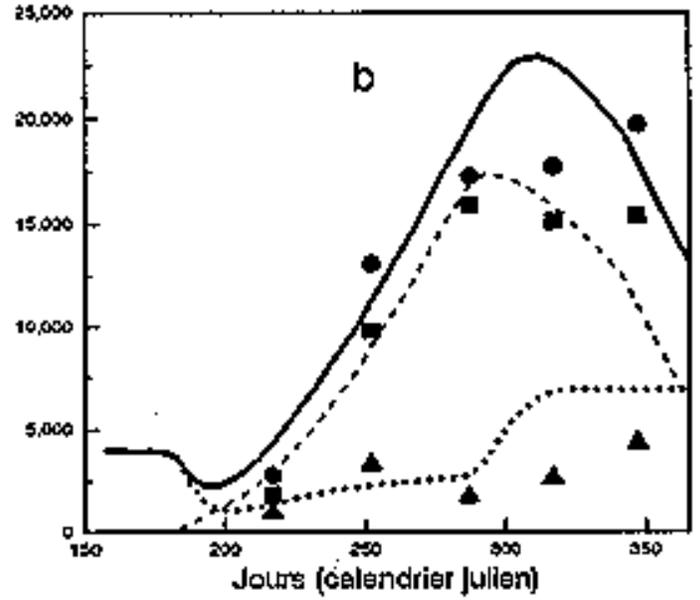
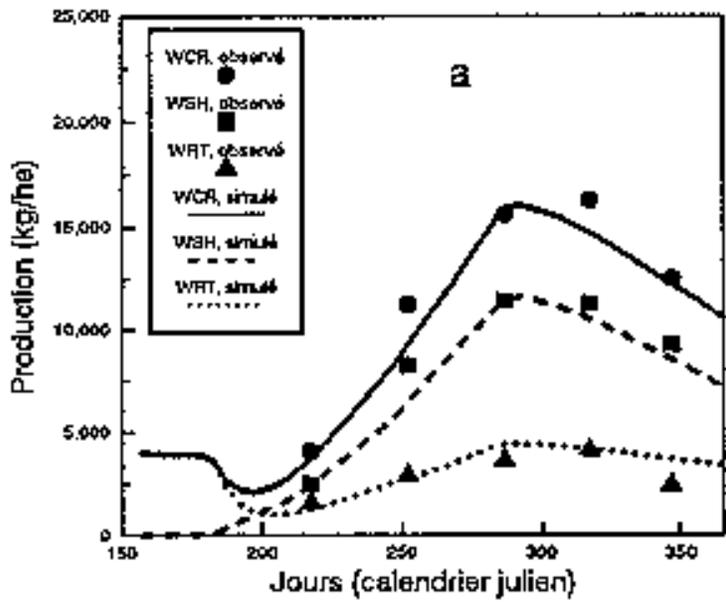


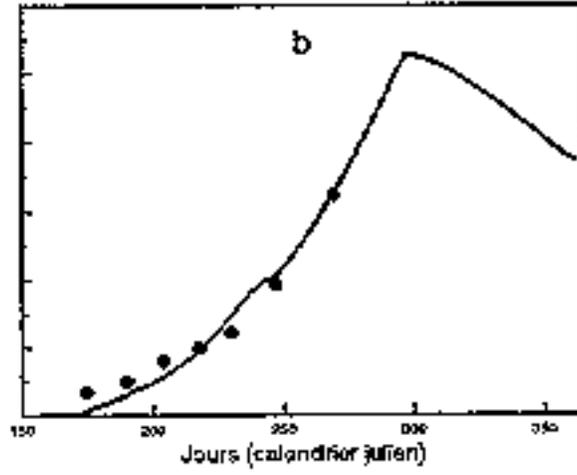
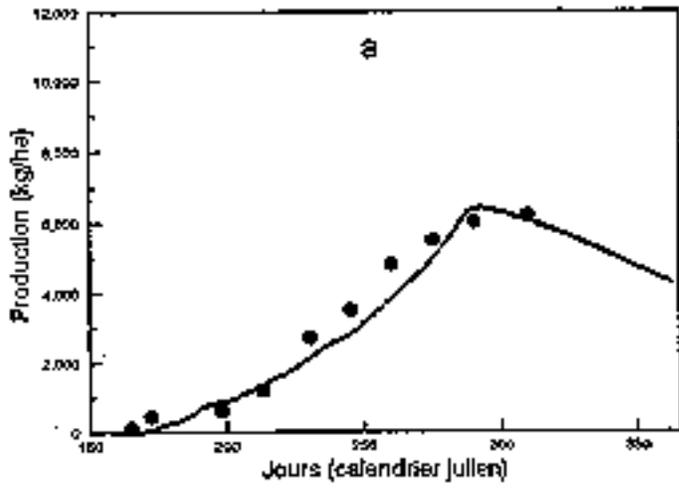


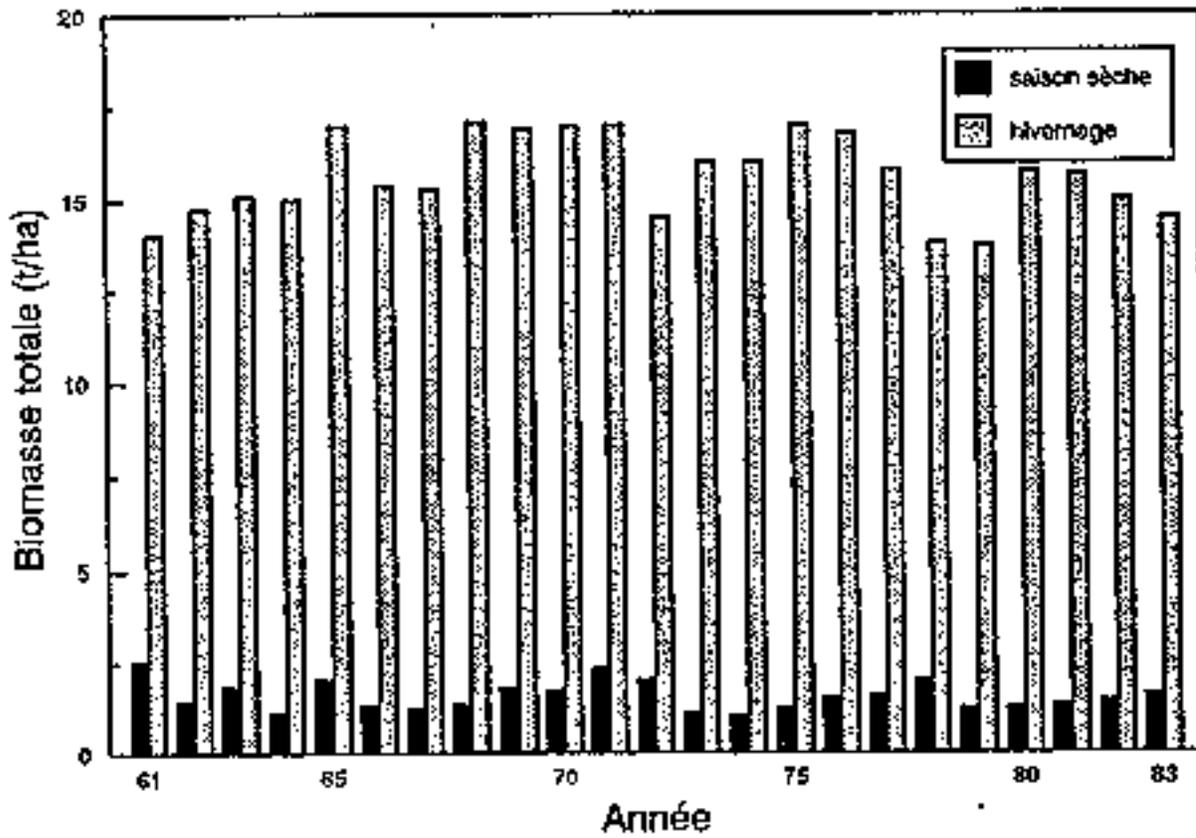


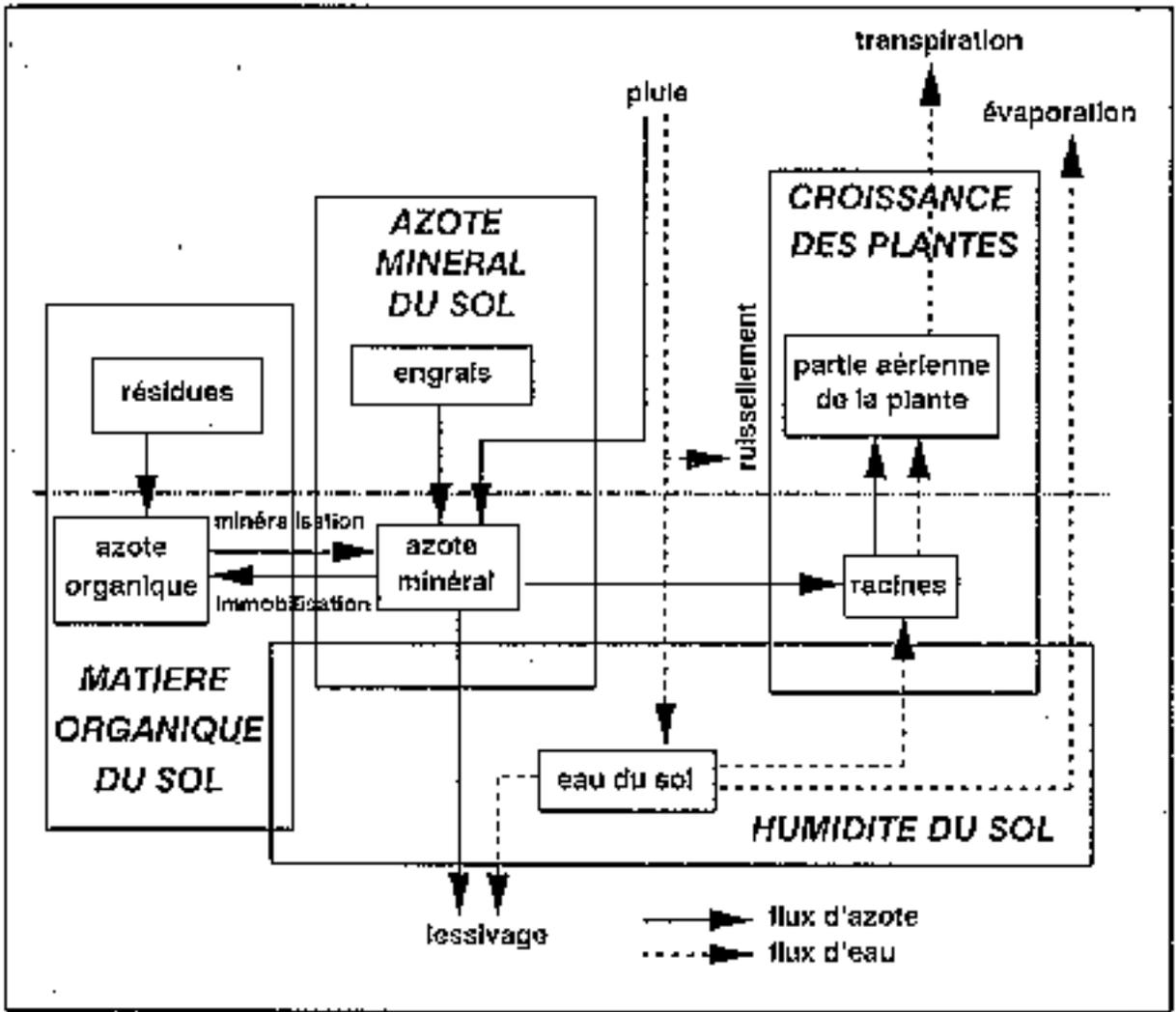


Biomasse totale Biomasse aérienne Fougères









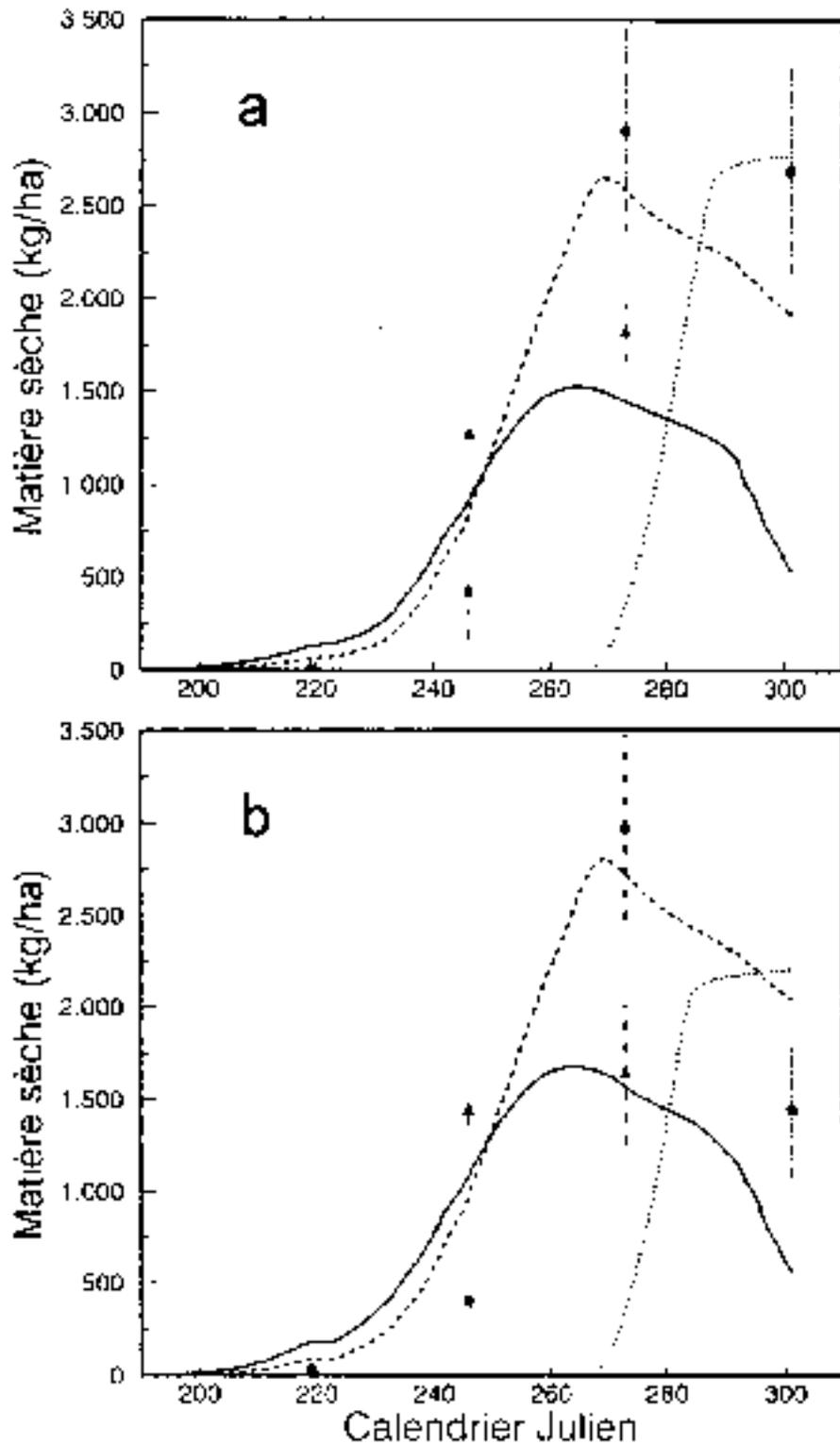


Figure 3.2. Courbes d'évolution des poids de matière sèche des feuilles (mesuré :  $\blacktriangle$ , simulé : —), des tiges (mesuré :  $\bullet$ , simulé : - -) et des graines (mesuré :  $\blacksquare$ , simulé :  $\cdots$ ) avec leurs déviations standards (- · - ·) en fonction du calendrier julien, au niveau du sol BC (a) et du sol BA (b) avec une application de 90 kg N ha<sup>-1</sup>.

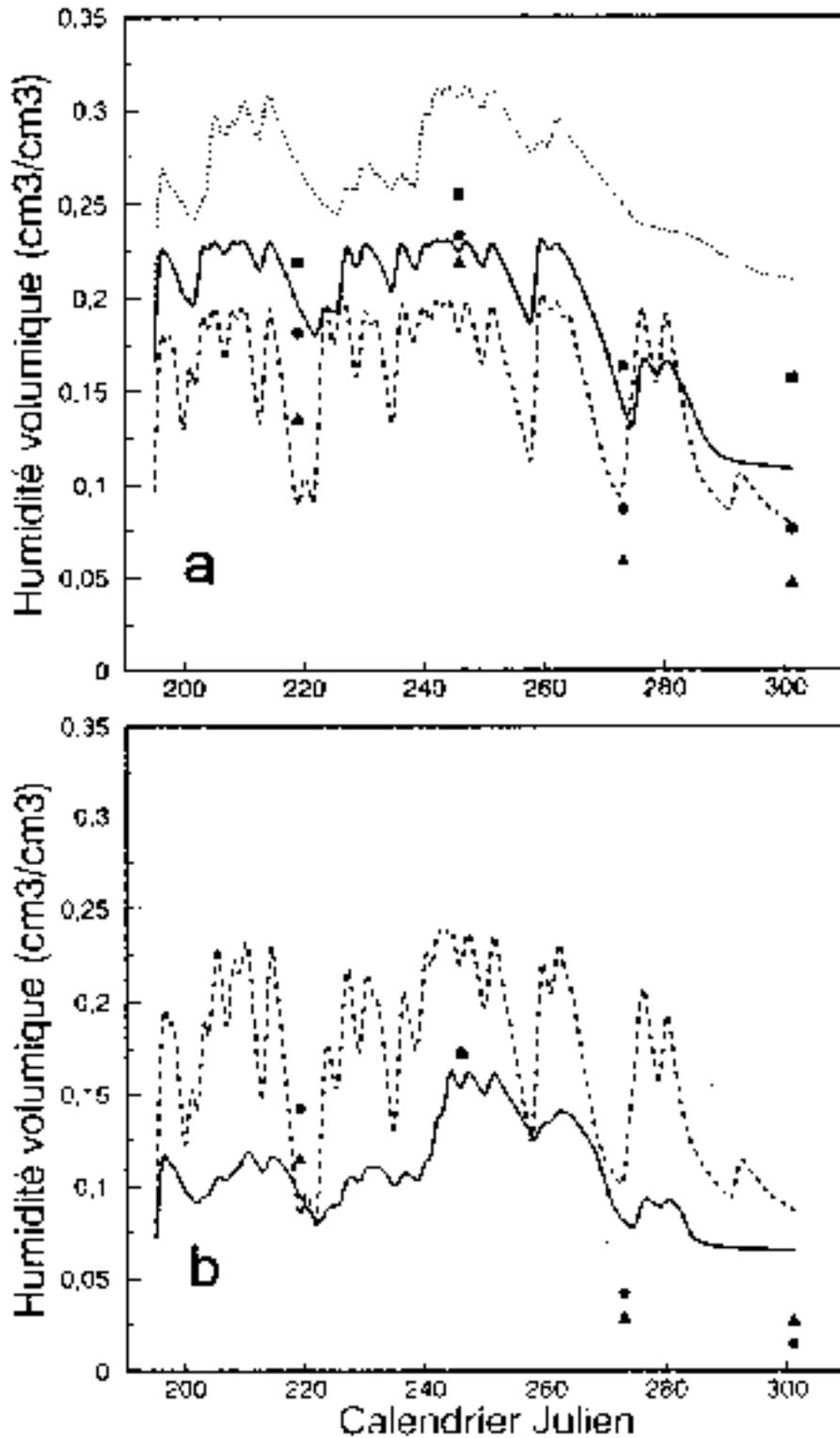


Figure 5.3. Courbes d'évolution de l'humidité volumique ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) aux profondeurs de 0-10 cm (mesuré :  $\blacktriangle$ , simulé : —), 10-30 cm (mesuré :  $\bullet$ , simulé : - -) et 30-50 cm (mesuré :  $\blacksquare$ , simulé :  $\cdots$ ) en fonction du calendrier julien, au niveau du sol BC (a) et du sol BA (b) avec une application de  $90 \text{ kg N ha}^{-1}$ .

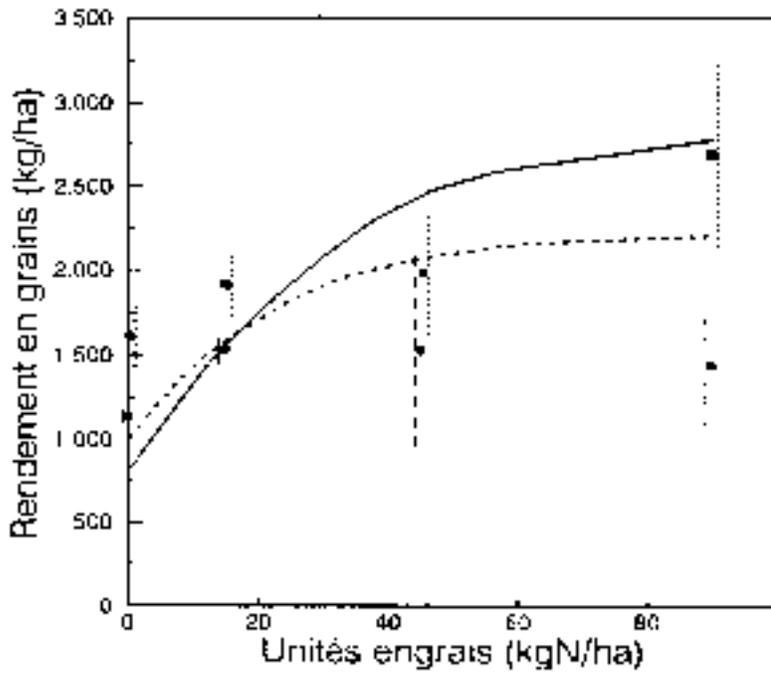


Figure 5.4. Courbes de réponse à l'azote (axe des X : unités azote et axe des Y : rendement en grains) au niveau du sol BC (mesuré : - , simulé : ■, déviation standard : ···) et du sol BA (mesuré : - , simulé : ■, déviation standard : ···).

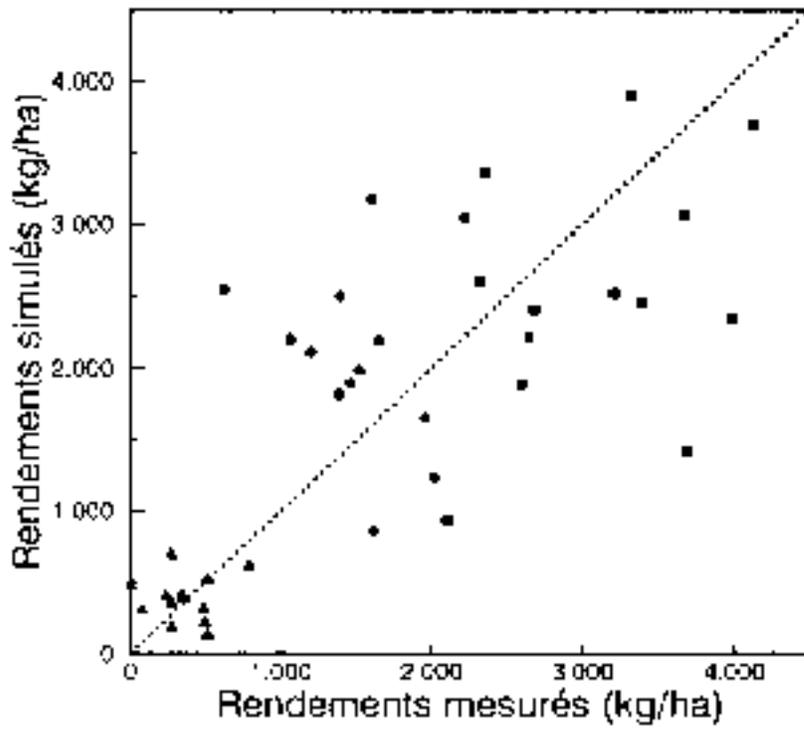


Figure 5.5. Validation du modèle (axe des X : rendements mesurés et axe des Y : rendements simulés) pour trois traitements : témoin (○), fmo (●) et FMO (■).

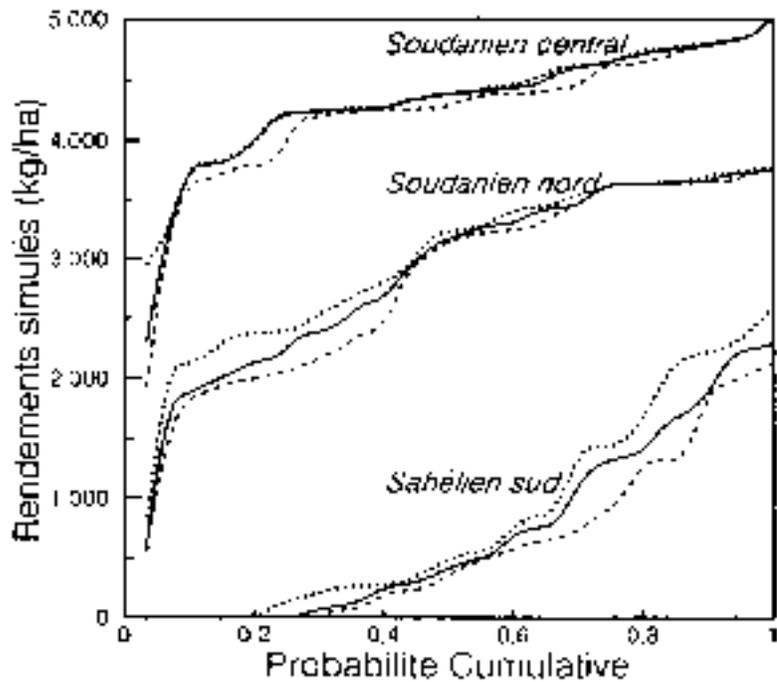
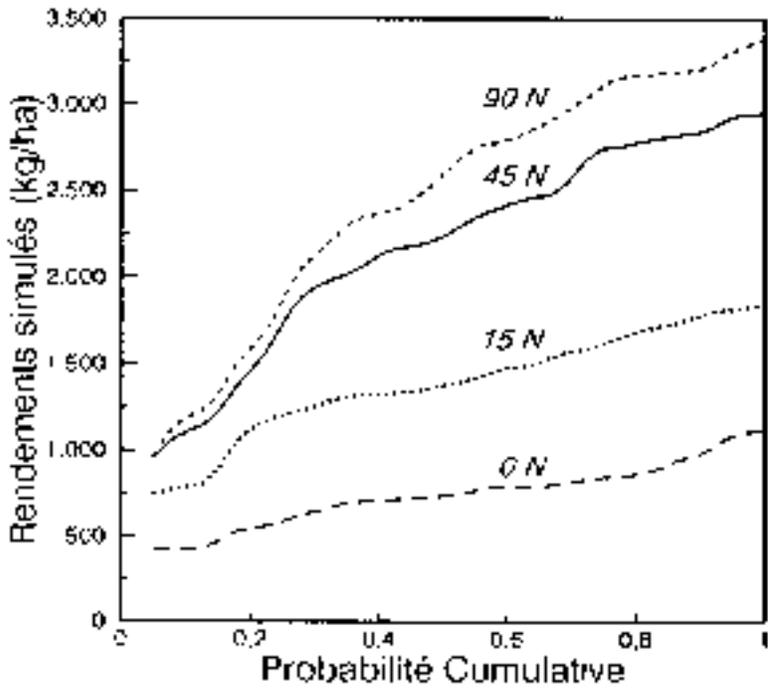
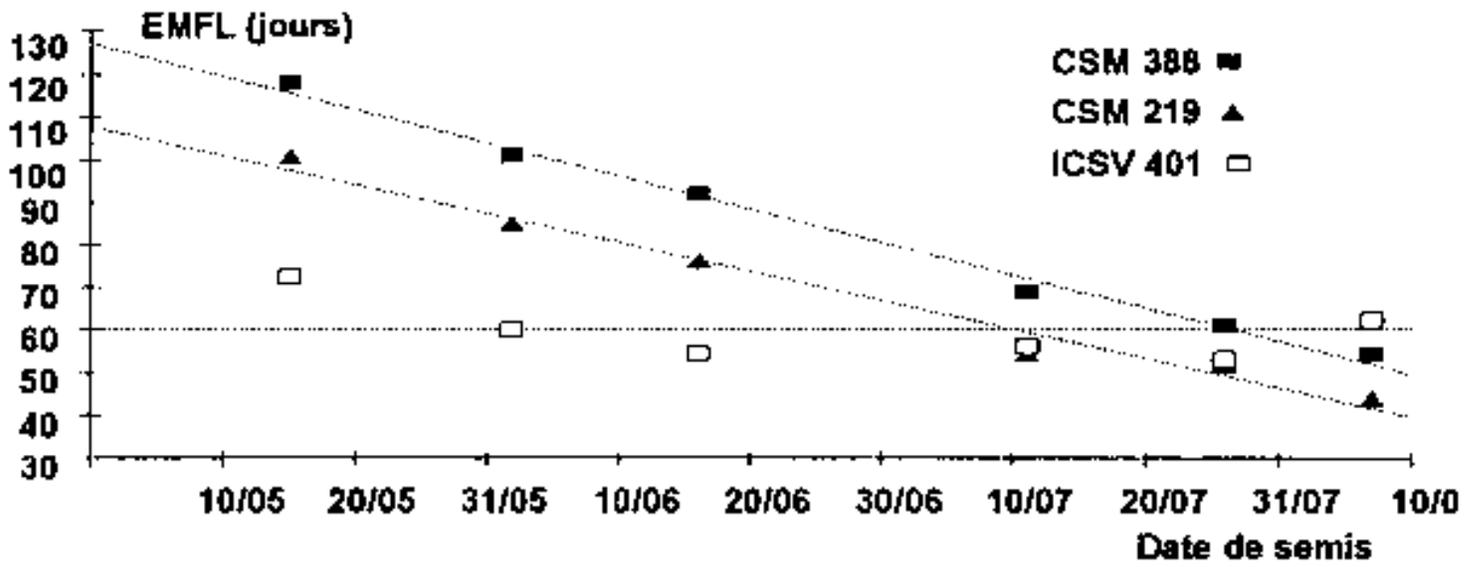
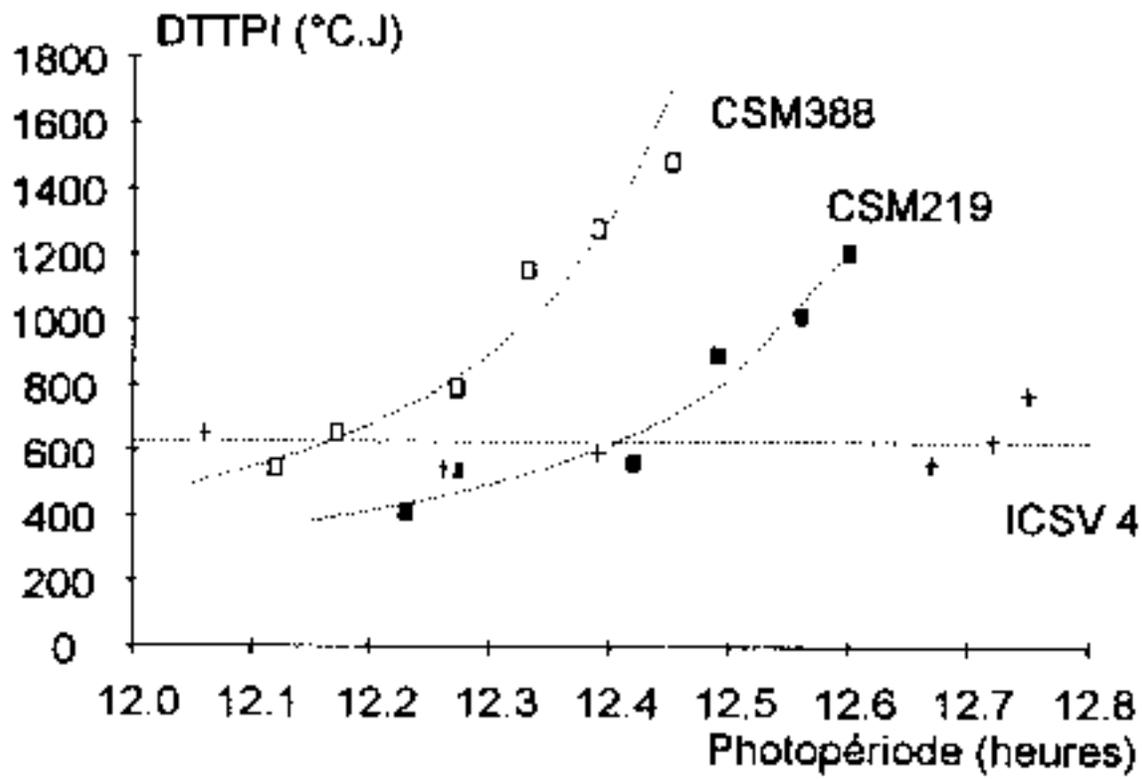
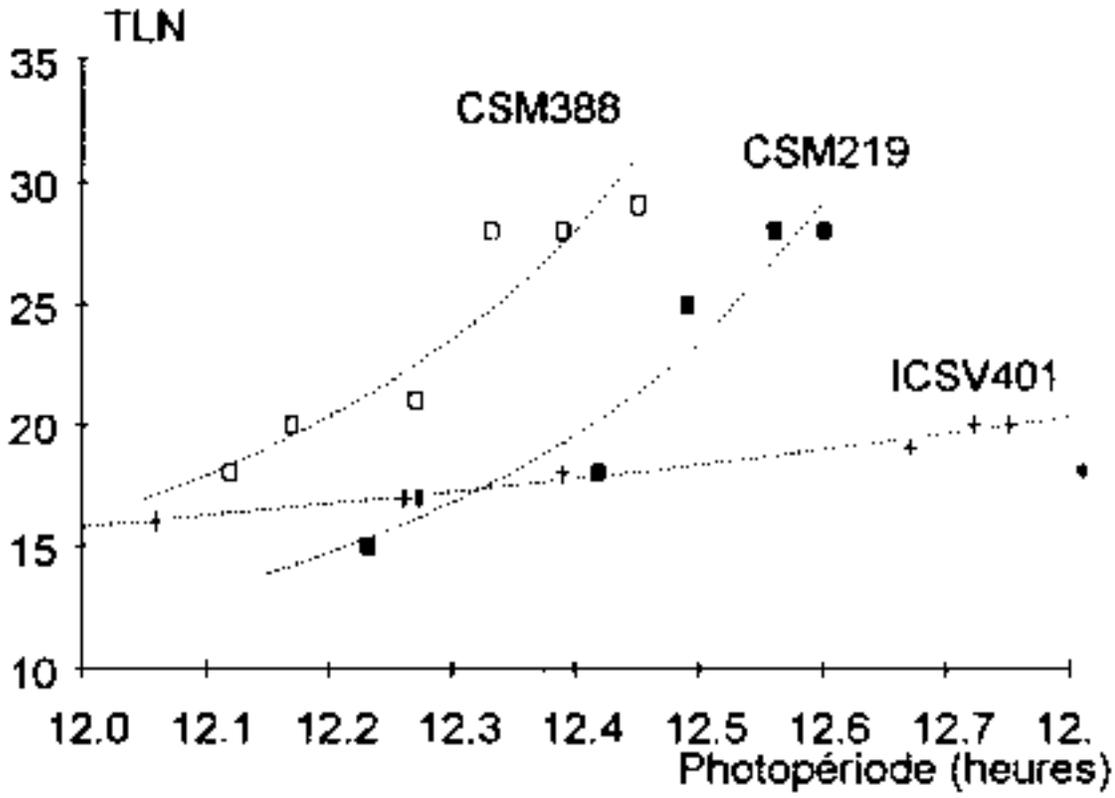


Figure 5.6. Les fonctions de probabilité cumulative (%) pour les rendements en grains simulés ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en réponse à trois types de gestion de l'eau dans le sol (sans diguettes : —, diguettes simples : —, diguettes croisées : ···) pour trois zones au Burkina Faso (sahélien sud, soudanien nord et soudanien central).









### Date de germination

Critères de germination

