

TH- EB ~~13~~ 14

INA P-G :  
Institut National Agronomique  
Paris-Grignon

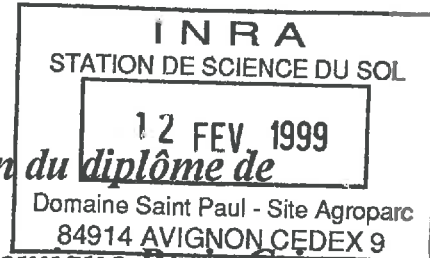
Institut National de la  
Recherche Agronomique :  
Unité d'Agronomie INRA INA P-G  
Unité de Bioclimatologie Grignon

ITCF :  
Institut Technique  
des Céréales  
et des Fourrages

**THÈSE**

*présentée en vue de l'obtention du diplôme de*

*Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon*



*par*

**Nouraya AKKAL**

**PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTÉE DU BLÉ D'HIVER  
SUR LA BASE D'UNE ÉVALUATION PRÉCOCE DE LA RÉFLECTANCE  
RADIOMÉTRIQUE OU DU TAUX DE COUVERTURE DU SOL,  
EN VUE D'UNE APPLICATION À L'AGRICULTURE DE PRÉCISION**

*Soutenue le mercredi 8 juillet 1998, devant le jury composé de :*

**TH - EB14**

<b>B. Ney</b>	<b>Professeur, INA P-G</b>	<b>Président</b>
<b>G. Lemaire</b>	<b>Directeur de Recherches, INRA Lusignan</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Ph. Zwaenepoel</b>	<b>Directeur de Recherches, CEMAGREF Montoldre</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>J.P. Coquerez</b>	<b>Professeur, Université de Cergy-Pontoise</b>	<b>Examineur</b>
<b>J. Massé</b>	<b>ITCF, Boigneville</b>	<b>Examineur</b>
<b>P. Boissard</b>	<b>Chargé de Recherche, INRA Grignon</b>	<b>Examineur</b>
<b>J.M. Meynard</b>	<b>Directeur de Recherche, INRA Grignon</b>	<b>Examineur</b>

*A mes amis et à tous ceux qui m'ont aidée  
de leur sympathie et de leur amitié !*

## Remerciements

*Le travail exposé dans ce mémoire, dont le financement a été assuré conjointement par l'ITCF et l'INRA, a été réalisé au sein des unités INRA d'Agronomie et de Bioclimatologie de Grignon.*

*Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma gratitude et mes remerciements les plus profonds à Jean-Marc Meynard pour l'aide qu'il m'a prodiguée dans les moments, ô combien difficiles, que traverse mon pays. Il a cru en moi et m'a ouvert les portes afin que je puisse poursuivre mon chemin, portes que d'autres.... m'avaient fermées avec brutalité !.*

*Ma reconnaissance et mon respect n'ont fait que grandir lorsqu'il m'a confié une très lourde charge en me remettant ce sujet de thèse, dont il a assuré la direction. Ses encouragements, sa patience, sa disponibilité et sa rigueur scientifique ont fait que, tout au long de ce travail, je me suis sentie entièrement en confiance. Cependant, malgré son leitmotiv "N'hésite pas à venir me voir afin qu'on puisse discuter", j'avais toujours la crainte de prendre de son temps sans pouvoir donner en retour un travail à la hauteur de son attente : j'espère ne pas l'avoir déçu !*

*Je remercie de même Paul Boissard qui a accepté également de diriger ce travail, en me transmettant ses compétences dans le domaine physique et plus particulièrement le "3D". Grâce à lui, au temps qu'il m'a consacré, aux conseils et surtout aux encouragements qui m'ont permis de progresser, j'ai bénéficié des moyens indispensables à l'élaboration d'un tel mémoire.*

*Je remercie les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de le lire, de l'étudier et de l'évaluer :*

- Monsieur B. Ney, professeur à l'INA P-G, qui en a assuré la présidence.*
- Messieurs G. Lemaire et P. Zwaenepoel, directeurs de recherche respectivement à l'INRA et au CEMAGREF, qui ont accepté d'être rapporteurs de cette thèse.*
- Monsieur Jack Massé de l'ITCF qui, en tant que membre de mon comité de thèse, a suivi avec attention l'évolution de mon travail et accepté de l'examiner une fois terminé. Qu'il soit aussi remercié pour la "rallonge financière" qu'il m'a accordée, me permettant ainsi de terminer dans de bonnes conditions.*
- Monsieur Jean-Pierre Coquerez, professeur à l'Université de Cergy-Pontoise, qui a bien voulu examiner ce mémoire.*

*Je tiens à exprimer ma vive gratitude à Marie-Hélène Jeuffroy pour sa contribution en continu dans la réalisation de cette thèse ; je la remercie d'avoir toujours répondu à mes nombreuses questions, et de n'avoir économisé ni ses conseils précieux, ni son temps.*

*J'adresse également toute ma gratitude et mes plus vifs remerciements à :*

*Geneviève Baudran, à laquelle je dis toute mon affection. Merci du soutien amical qu'elle m'a apporté, de la place qu'elle m'a toujours réservée au sein de sa famille, du temps consacré aux corrections et à la mise en page de ce mémoire pour le rendre plus agréable à lire !*

*Pierre Valéry qui a participé, et avec quelle minutie, à la mise au point du dispositif de mesure et de traitements de données photogrammétriques ; je le remercie vivement de m'avoir avec tant de patience transmis une partie de ses connaissances en informatique (utilisation des logiciels de traitements d'images, programmation, UNIX, réseau....), et surtout pour sa gentillesse, sa disponibilité et toutes les marques de sympathie qu'il m'a témoignées à de si nombreuses reprises.*

*Josiane Jean-Jacques qui a suivi avec beaucoup de minutie et de précision l'ensemble des mesures expérimentales sur le terrain et au laboratoire, ainsi qu'au dépouillement des échantillons et au traitement des données.*

*Jérôme Héibert pour son aide et ses précieux conseils en informatique. Je n'oublie pas non plus un collaborateur du London College, Philippe Lewis, qui a participé à l'amélioration du logiciel BPMS adapté à notre modèle.*

*Jacques Troizier et toute son équipe pour avoir réalisé la mise en place des essais expérimentaux.*

*Pierre Belluomo qui a contribué au suivi de saisie des images sur le terrain.*

*Claire Chabanet et Cristelle Hennequet, du laboratoire de Biométrie de Jouy-en-Josas, pour leur aide dans la programmation des modèles et leurs conseils en statistique, et qui m'ont initiée à l'utilisation de Splus.*

*C'est également du fond du cœur que j'exprime mes remerciements les plus sincères à tous les chercheurs et agents des Unités d'Agronomie et de Bioclimatologie de l'INRA Paris-Grignon, pour leur accueil et la contribution qu'ils ont apportée, à différents titres, à la bonne réalisation de ce travail.*

# SOMMAIRE

	<i>Pages</i>
<b>INTRODUCTION</b>	1
<b>PREMIÈRE PARTIE :</b>	
<b>PROBLÉMATIQUE, BIBLIOGRAPHIE ET MÉTHODES D'ETUDE</b>	
<b>CHAPITRE 1. ÉLÉMENTS DE BIBLIOGRAPHIE</b>	5
<b>1/ LE CONTEXTE : RAISONNEMENT ACTUEL DE LA FERTILISATION AZOTÉE DU BLÉ EN FRANCE</b>	7
<b>1.1. Équations de calcul de la dose totale d'engrais</b>	7
<i>1.1.1. L'équation du bilan</i>	7
<i>1.1.2. L'équation d'efficience d'utilisation de l'engrais</i>	8
<b>1.2. Méthodes actuelles d'estimation prévisionnelle des besoins en azote du blé d'hiver</b>	8
<i>1.2.1. Les potentialités agricoles : une référence pour estimer les objectifs</i>	9
<i>1.2.2. Révision des rendements objectifs en cours de culture</i>	10
<b>1.3. Fractionnement de l'azote</b>	12
<b>1.4. Conclusion partielle</b>	14
<b>2/ PRINCIPE DE L'ESTIMATION DES BESOINS EN AZOTE SUR LA BASE DE LA CONNAISSANCE DE L'INDICE FOLIAIRE</b>	14
<b>2.1. Structure générale et cahier des charges du modèle</b>	14
<b>2.2. Modélisation de la croissance potentielle d'un peuplement de blé d'hiver</b>	15
<i>2.2.1. Estimation de l'efficience d'interception de la lumière <math>\epsilon_i</math></i>	15
<i>2.2.2. Estimation de l'efficience de conversion de l'énergie <math>\epsilon_b</math></i>	16
<i>2.2.3. Modélisation de l'indice foliaire</i>	17
<b>2.3. Modélisation des besoins en azote : courbe de teneur en azote critique</b>	19
<b>2.4. Conclusion partielle</b>	19
<b>3/ ESTIMATION DE L'INDICE FOLIAIRE EN SORTIE HIVER À PARTIR D'INDICATEURS RELEVÉS AU CHAMP</b>	20
<b>3.1. Présentation des indicateurs</b>	20
<i>3.1.1. Rappel des critères de choix des indicateurs</i>	20
<i>3.1.2. Relations entre l'indice foliaire et le taux de couverture du sol (TC %)</i>	20
<i>3.1.3. Relation entre le LAI et la réflectance radiométrique</i>	21
<b>3.2. Facteurs de variation des relations "indicateurs-LAI"</b>	23
<i>3.2.1. Conditions externes pour les mesures de proxi-détection</i>	23
<i>3.2.2. Effets de la structure du couvert sur l'estimation de l'indice foliaire à partir des indicateurs</i>	23
<i>3.2.3. Conditions du sol</i>	25
<i>3.2.4. Choix de l'indice de végétation</i>	25
<i>3.2.5. Conclusion partielle</i>	26

<b>3.3. Modèles d'échanges radiatifs</b>	26
3.3.1. <i>Types de modèles disponibles</i>	26
3.3.2. <i>Choix du modèle 3D et objectifs attendus</i>	28
3.3.3. <i>Méthodologie de la modélisation tridimensionnelle du couvert du blé d'hiver</i>	29
<b>CHAPITRE 2. DÉMARCHE ADOPTÉE</b>	33
<b>A. ESTIMATION DE L'INDICE FOLIAIRE À LA SORTIE DE L'HIVER, À PARTIR DE LA MESURE D'INDICATEURS : TAUX DE COUVERTURE (TC) ET RÉFLECTANCE RADIOMÉTRIQUE (TSAVI)</b>	35
1. Paramétrisation du modèle de structure 3D	35
2. Analyse de l'influence des techniques culturales sur les paramètres de la structure	36
3. Validation des sorties de la maquette 3D	36
<b>B. MODÉLISATION DYNAMIQUE DES BESOINS EN AZOTE À PARTIR DE LA CONNAISSANCE D'UNE SEULE VALEUR DE L'INDICE FOLIAIRE, PEU APRÈS LA SORTIE DE L'HIVER</b>	37
Discussion générale	38
<b>CHAPITRE 3. MATÉRIEL ET MÉTHODES</b>	39
<b>1/ DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL</b>	41
1.1. Caractéristiques du site expérimental	41
1.2. Description du dispositif expérimental	42
1.3. Traitements expérimentaux	42
1.3.1. <i>Variétés</i>	42
1.3.2. <i>Densités</i>	43
1.3.3. <i>Dates de semis</i>	43
1.3.4. <i>Nomenclature des traitements</i>	43
1.4. Conduite des essais	43
1.4.1. <i>Irrigation</i>	43
1.4.2. <i>Fertilisation azotée</i>	43
1.4.3. <i>Traitements phytosanitaires</i>	45
<b>2/ MESURES DU TAUX DE COUVERTURE ET DE LA RÉFLECTANCE</b>	45
2.1. Dates de mesure et mode d'échantillonnage	45
2.1.1. <i>Dates de mesure</i>	45
2.1.2. <i>Relations entre les mesures de proxi-détection et les mesures d'indice foliaire</i>	46
2.2. Mesure du Taux de Couverture (TC %)	46
2.2.1. <i>Saisie par photographie du couvert de blé</i>	46
2.2.2. <i>Estimation du Taux de Couverture par l'analyse d'image</i>	48
2.3. Mesure de la réflectance radiométrique	48
2.3.1. <i>Étalonnage par mesure de surfaces de référence</i>	48
2.3.2. <i>Mesure de la réflectance du couvert végétal</i>	49
2.3.3. <i>Mesure de la réflectance du sol</i>	49
2.3.4. <i>L'indice de végétation utilisé : le TSAVI</i>	49

<b>3/ MESURE DE L'INDICE FOLIAIRE ET DE LA BIOMASSE AÉRIENNE</b>	<b>49</b>
3.1. Mode d'échantillonnage des placettes	49
3.2. Mesure de la surface foliaire par planimétrie	51
3.2.1. Dépouillement des placettes et méthode d'échantillonnage	51
3.2.2. Mesure des surfaces foliaires	51
3.3. Mesure de la biomasse aérienne	51
3.4. Calcul de l'indice foliaire	51
3.5. Méthodes statistiques utilisées	52
3.5.1. Cas des modèles non linéaires	52
3.5.2. Cas des modèles linéaires	52
<b>4/ CARACTÉRISATION DU TALLAGE ET DES STADES DE DÉVELOPPEMENT</b>	<b>53</b>
4.1. Mesure du nombre de talles	53
4.2. Suivi du nombre de feuilles	53
4.3. Observation des stades	53
<b>5/ ÉVALUATION DE <math>\epsilon_i</math> et <math>\epsilon_b</math></b>	<b>54</b>
5.1. Mesure du rayonnement incident et transmis ( $\epsilon_i$ )	54
5.1.1. Matériel de mesure du rayonnement	54
5.1.2. Protocole de mesures des essais 1995 et 1996	54
5.2. Méthode de calcul de l'efficacité d'interception de la lumière $\epsilon_i$	55
5.3. Méthode de calcul de l'efficacité de conversion de l'énergie en biomasse $\epsilon_b$	55
<b>6/ ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE 3D</b>	<b>55</b>
6.1. Création du fichier des paramètres angulaires	55
6.1.1. Échantillonnage et prélèvement des plantes	56
6.1.2. Principe de la stéréovision	56
6.1.3. Dispositif de mesure en stéréovision	56
6.1.4. Saisie de photographies en stéréovision	56
6.1.5. Traitement des images numériques saisies en stéréovision	58
6.1.6. Extraction des paramètres de structure	58
6.2. Création du fichier des paramètres botaniques	62
6.3. Simulation des peuplements de blé d'hiver	62

## DEUXIÈME PARTIE : RÉSULTATS

<b>CHAPITRE 1. ESTIMATION DE L'INDICE FOLIAIRE À LA SORTIE DE L'HIVER À PARTIR DU TAUX DE COUVERTURE OU DE LA RÉFLECTANCE RADIOMÉTRIQUE</b>	<b>67</b>
<b>1/ RELATION ENTRE L'INDICE FOLIAIRE À LA SORTIE DE L'HIVER ET LES INDICATEURS DU COUVERT DE BLÉ</b>	<b>69</b>
<b>1.1. Mise en place du couvert de blé de la sortie hiver jusqu'au début de la montaison</b>	<b>69</b>
1.1.1. <i>Évolution de la variable "Taux de Couverture du sol"</i>	69
1.1.2. <i>Évolution de la variable "Réflectance radiométrique"</i>	71
<b>1.2. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver à partir des indicateurs</b>	<b>71</b>
1.2.1. <i>Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver à partir du taux de couverture du sol (TC %)</i>	71
1.2.2. <i>Estimation de l'indice foliaire à partir de l'indice de végétation TSAVI</i>	75
<b>1.3. Discussion et Conclusion partielle</b>	<b>83</b>
1.3.1. <i>La relation entre le LAI<sub>SH</sub> et les indicateurs du couvert n'est pas unique</i>	83
1.3.2. <i>Effets conjugués des stades et des conditions extérieures sur la qualité de mesure des indicateurs</i>	84
1.3.3. <i>Variation des relations entre le LAI<sub>SH</sub> et les indicateurs en fonction des facteurs agronomiques</i>	85
1.3.4. <i>Effets des facteurs agronomiques sur la distribution angulaire des feuilles</i>	87
<b>Conclusion partielle</b>	<b>88</b>
<b>2/ MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE (3D) DU BLÉ D'HIVER</b>	<b>89</b>
<b>2.1. Démarche de l'analyse des données</b>	<b>89</b>
<b>2.2. Forme des feuilles dans l'espace 3D et hypothèses simplificatrices</b>	<b>91</b>
<b>2.3. Simulation de peuplements de blé</b>	<b>91</b>
2.3.1. <i>Analyse du squelette 3D</i>	91
2.3.2. <i>Estimation des angles foliaires</i>	95
2.3.3. <i>Paramétrisation de la forme des feuilles</i>	97
2.3.4. <i>Longueur et rayon des tiges</i>	99
<b>2.4. Validation du modèle 3D</b>	<b>99</b>
2.4.1. <i>Simulation de plantes individuelles</i>	99
2.4.2. <i>Simulation de peuplements (images)</i>	101
<b>2.5. Validation du modèle 3D en ce qui concerne le LAI et les indicateurs TC et TSAVI</b>	<b>101</b>
2.5.1. <i>Abaque Soissons densité 150</i>	103
2.5.2. <i>Etude de la sensibilité du modèle 3D</i>	107
2.5.3. <i>Simulation des abaques pour les variétés Thésée et Pernel</i>	111
<b>2.6. Discussion et Conclusion partielle sur le modèle tridimensionnel</b>	<b>112</b>



<b>CHAPITRE 2. ESTIMATION DES BESOINS EN AZOTE À PARTIR DE L'INDICE FOLIAIRE À LA SORTIE DE L'HIVER</b>	<b>115</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>117</b>
<b>1/ MODÉLISATION DE LA CINÉTIQUE D'ÉVOLUTION DU LAI JUSQU'À LA FLORAISON : MODÈLE LAI<sub>t</sub></b>	<b>118</b>
1.1. Conditions imposées au modèle LAI <sub>t</sub>	118
1.2. Description du modèle LAI <sub>t</sub>	118
1.2.1. Modélisation de l'espérance	118
1.2.2. Modélisation de la variance	121
1.3. Estimation des paramètres de la logistique sur les peuplements de l'année 1996	121
1.3.1. Confrontation des courbes ajustées et des valeurs observées	121
1.3.2. Valeurs des paramètres selon les pratiques culturales	122
1.4. Modélisation de la valeur des paramètres du modèle LAI <sub>t</sub>	125
1.4.1. Variables utilisées pour la prévision des paramètres du modèle LAI <sub>t</sub>	125
1.4.2. Constitution de la base de données	126
1.4.3. Formes générales des modèles d'estimation des paramètres de la logistique	127
1.5. Discussion partielle : Effet des pratiques culturales et prévision précoce des paramètres de la logistique	133
1.5.1. Valeurs biologiques des paramètres du modèle LAI <sub>t</sub> (LAI <sub>ep</sub> , m, b et n) selon les pratiques culturales et les conditions de croissance	133
1.5.2. Prédiction des valeurs des paramètres	134
1.6. Validation du modèle LAI <sub>t</sub>	135
1.6.1. Constitution de couples (LAI <sub>SH</sub> , X <sub>SH</sub> ) sur l'essai 1995	135
1.6.2. Simulation du LAI en utilisant la première méthode d'estimation de "m"	136
1.6.3. Simulation du LAI en utilisant la deuxième méthode d'estimation de "m"	136
1.6.4. Discussion partielle sur la validation du modèle LAI <sub>t</sub>	141
<b>Conclusion partielle</b>	<b>145</b>
<b>2/ MODÉLISATION DE L'INTERCEPTION DE LA LUMIÈRE SOUS DIFFÉRENTES CONDITIONS CULTURALES</b>	<b>147</b>
2.1. Évolution de l'efficience d'interception de la lumière sur les traitements expérimentaux des deux années 1995 et 1996	147
2.2. Modélisation de $\epsilon_i$	147
2.3. Validation du modèle d'interception de la lumière	152
2.4. Discussion partielle	153
<b>3/ MODÉLISATION DE LA CONVERSION DU "PAR" EN BIOMASSE</b>	<b>154</b>
3.1. Estimation de la valeur du coefficient de conversion du PAR en biomasse ( $\epsilon_b$ )	155
3.2. Validation de $\epsilon_b$ sur les peuplements de 1995	157
3.3. Discussion partielle	157
3.3.1. Variations du coefficient de conversion de la lumière en biomasse au cours du cycle	157
3.3.2. Variations de la valeur du coefficient de conversion de la lumière en biomasse entre années	159
3.3.3. Stabilité de la valeur du coefficient de conversion de la lumière en biomasse selon les techniques culturales	159
3.4. Conclusion partielle sur la modélisation de la biomasse potentielle	160

<b>CHAPITRE 3. ÉLÉMENTS DE VALIDATION ET ANALYSE DE SENSIBILITÉ DU MODÈLE DE PRÉDICTION DES BESOINS EN AZOTE</b>	<b>161</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>163</b>
<b>1/ COURBES DE RÉFÉRENCE</b>	<b>163</b>
1.1. Estimation des besoins en azote à partir des données observées sur les peuplements 1995	163
1.2. Choix des traitements	163
<b>2/ SENSIBILITÉ DU MODÈLE À LA VARIATION DES DATES D'OBSERVATION (X<sub>SH</sub>)</b>	<b>165</b>
2.1. Démarche adoptée pour les simulations de la dynamique des besoins en azote	165
2.2. Simulation des besoins en azote	165
2.3. Discussion partielle	171
<b>TROISIÈME PARTIE : DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION</b>	<b>177</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	
<b>ANNEXES</b>	

*Introduction*

# INTRODUCTION

## *Introduction*

- *Le premier indicateur est spontanément utilisé par les agriculteurs au cours de leurs tours de plaine au printemps.* On peut envisager de leur fournir une échelle visuelle, sous forme de photographies ou de simulations de peuplements de référence à différents taux de couverture pour les aider à quantifier leurs observations. Des grilles similaires sont utilisées pour l'estimation du taux d'infection par les maladies.
- *Le deuxième indicateur est automatisable et peut être utilisé dans le cadre de l'agriculture de précision pour ajuster la fertilisation à la variabilité intraparcellaire des besoins en azote.* Le développement de la technologie de mesure par capteurs et de l'électronique embarquée nous permet aujourd'hui d'envisager de mesurer automatiquement, en continu et en temps réel, des variables agronomiques pertinentes qui permettent d'appréhender la variabilité de l'état de la culture au sein de la parcelle. Acock & Pachepsky (1997) rapportent que les prescriptions de fertilisation ne seront efficaces que si elles se font en cours de croissance ; il faut alors associer des outils de mesure des caractéristiques des cultures, des outils de localisation spatiale des informations (GPS, SIG) et des modèles de croissance qui intègrent l'action du milieu (rayonnement, températures) et les effets des facteurs culturaux (variété, densité et date de semis).

**B/ En second lieu, que l'on établisse des relations quantitatives stables entre les indicateurs et les besoins en azote.** Ces relations devront être prédictives et ne demander que des variables d'entrée en nombre réduit et facilement accessibles en conditions agricoles. Elles devront également être utilisables pour une large gamme de stades du blé : en fonction des années, de la date de semis et des variétés, la date des principaux stades est variable. Il est matériellement impossible à un agriculteur, soumis aux aléas climatiques et à un calendrier de travail chargé, de réaliser des mesures à un stade précis. Pour cela, notre but est de n'utiliser qu'une seule mesure acquise à n'importe quel moment entre la sortie de l'hiver (fin février) et le début de la montaison. Enfin, ces relations devront être robustes, c'est-à-dire adaptées à une large gamme de variétés, de densités de peuplement et de dates de semis.

*Ce mémoire présente les éléments de modélisation nécessaires à la mise au point de ces indicateurs et de ces relations prédictives et tente de préciser les perspectives offertes par ces types d'indicateurs pour un meilleur ajustement de la fertilisation azotée, entre parcelles agricoles ou à l'intérieur d'une parcelle.*

## Introduction

Dans le double but d'accroître la compétitivité des productions céréalières et de sauvegarder l'environnement, les recherches se sont intensifiées, ces dernières années, sur la gestion de l'azote dans les systèmes de culture. L'un des volets les plus importants est le raisonnement de la fertilisation azotée, fondée en France sur la méthode du bilan prévisionnel, proposée par Hébert et Rémy (1977) et améliorée depuis par différents travaux, cités par Meynard *et al.* (1997).

Dans le bilan prévisionnel, les besoins du blé d'hiver sont estimés sur la base d'un objectif de rendement et de la norme proposée par Coïc (1956) et, depuis, validée par de nombreux auteurs, de 3 kg N/quintal de grains. L'objectif de rendement reste cependant difficile à estimer par les agriculteurs (Cerf & Meynard, 1988). Un choix erroné d'objectif est la source d'erreurs la plus fréquente dans la mise en œuvre du bilan prévisionnel (Meynard *et al.*, 1981 ; Taureau, 1987). Plusieurs difficultés se présentent en effet :

- ✓ L'incertitude quant au climat après l'apport d'engrais. L'importance du déficit hydrique, par exemple, conditionne directement dans certains milieux le potentiel de rendement (Brisson *et al.* (1996) ; Limaux 1990).
- ✓ La connaissance des potentialités réelles des cultures. La productivité potentielle des peuplements de densité normale peut être estimée à partir de références régionales ou de modèles de fonctionnement de cultures de plus en plus souvent disponibles (Lorgeou *et al.*, 1996). Dans une même région, le rendement potentiel du blé peut varier de plus de 20 q/ha, sous le seul effet des caractéristiques du sol (Limaux, 1996). Dans le cas de peuplements clairs (peuplements dont le nombre de pieds a été fortement réduit ou qui ont mal tallé en hiver), la prédiction des potentialités reste par contre très difficile.

Or, dans les régions du Nord et de l'Est de la France, le taux de perte de pieds de blé peut varier de 5 à 50 % selon les dates de semis et la préparation du sol, et parfois plus dans le cas d'un gel hivernal (Limaux, 1990). Ces situations engendrent des variations de rendement non seulement entre parcelles et entre années, mais aussi au sein d'une même parcelle. Ces blés clairs ont la caractéristique de présenter un faible indice foliaire ( $LAI < 1.5$ ) en début de montaison, réduisant ainsi l'interception et l'énergie lumineuse incidente par rapport à un blé de densité normale (Meynard, 1983b). Ce retard dans la mise en place de la surface foliaire induit une réduction de l'interception du rayonnement solaire au printemps. La croissance, la productivité de la culture et ses besoins en azote en sont, par contrecoup, diminués.

Pour ajuster au plus près la fertilisation azotée sur ces blés clairs, il est nécessaire de disposer d'une méthode opérationnelle d'estimation des besoins en azote au cours du cycle en fonction des caractéristiques de la culture en sortie d'hiver ou au début du printemps. L'objectif de ce travail est de jeter les bases scientifiques d'une telle méthode. Sa mise au point suppose :

**A/ En premier lieu que l'on identifie un ou des indicateurs de l'état de la culture, mesurables antérieurement aux dates d'apport d'engrais et permettant de différencier des peuplements ayant des potentialités de production et des besoins en azote différents.**

Pour différentes raisons théoriques, qui seront présentées en détail plus loin, nous avons choisi pour indicateurs d'état du peuplement mesurables entre la fin de l'hiver et le début de la montaison, **le taux de couverture du sol et la réflectance radiométrique** dans les bandes du visible (vert, rouge et proche infrarouge).

**PREMIÈRE PARTIE :**

**PROBLÉMATIQUE, BIBLIOGRAPHIE**

**ET MÉTHODES D'ÉTUDE**

**CHAPITRE 1.**

**ÉLÉMENTS DE BIBLIOGRAPHIE**

## 1/ LE CONTEXTE : RAISONNEMENT ACTUEL DE LA FERTILISATION AZOTÉE DU BLÉ EN FRANCE

Dès le début des années 80, la recherche s'est investie dans la mise en place d'outils de développement de la fertilisation qui répondent à des objectifs d'amélioration de la compétitivité, de la qualité et de préservation de l'environnement.

### 1.1. Equations de calcul de la dose totale d'engrais

Le raisonnement de la fertilisation azotée du blé est fondé, depuis 20 ans en France, sur la méthode du bilan prévisionnel (COMIFER, 1996). Celle-ci consiste à équilibrer les besoins prévisibles des cultures avec les fournitures d'azote quelle que soit leur origine.

#### 1.1.1. L'équation du bilan

L'ouverture du bilan se situe en fin d'hiver, alors que le lessivage des ions nitrate devient négligeable ; sa fermeture a lieu à la récolte. L'équation du bilan est présentée par Meynard *et al.* (1997) sous la forme suivante :

$$\text{Etat final} - \text{Etat initial} = \text{Entrées} - \text{Sorties}$$

$$R_f - R_i = (M_n + X) - (P_f - P_i + L) \quad \text{Équation 1}$$

avec :

- $R_f$  Quantité d'azote minéral du sol à la fermeture du bilan (récolte)
- $R_i$  Quantité d'azote minéral du sol à l'ouverture du bilan (fin d'hiver pour les cultures d'hiver)
- $M_n$  Minéralisation nette d'azote par le sol estimée par la somme de plusieurs termes : minéralisation nette de l'azote humifié du sol " $M_h$ ", minéralisation nette de l'azote des résidus de récolte " $M_r$ ", minéralisation nette de l'azote des produits organiques " $M_a$ "
- $X$  Quantité d'azote minéral apporté par l'engrais
- $P_f$  Quantité d'azote absorbé par le peuplement jusqu'à la fermeture du bilan
- $P_i$  Quantité d'azote contenu dans le peuplement à l'ouverture du bilan
- $L$  Lessivage d'azote nitrique au-delà de la profondeur " $z$ " considérée comme accessible par les racines de la culture, entre l'ouverture et la fermeture du bilan.

La dose d'azote apporté par l'engrais s'écrit donc :

$$X = (\text{Besoins de la culture}) - (\text{Fourniture du sol})$$

$$X = (P_f - P_i) - (M_n + R_i - L - R_f) \quad \text{Équation 2}$$



### 1.1.2. L'équation d'efficience d'utilisation de l'engrais

Mis à part le terme "R<sub>i</sub>" qui est mesuré, les autres termes de l'Équation 1 sont modélisés ou estimés à partir d'abaques basés sur des résultats expérimentaux et validés par région. Cependant, la mesure du terme "R<sub>i</sub>" n'est pas toujours possible (exemple des sols de rendzine sur calcaire dur). Pour s'affranchir des mesures d'azote minéral dans les sols et favoriser la prise en compte de conditions du milieu telles que la structure du sol ou l'excès d'eau, une nouvelle écriture du calcul des doses d'engrais a été proposée au début des années 90 (Meynard *et al.*, 1997) :

$$\text{Besoins de la culture} = P_x - P_0 = (\text{CAU})(X) \quad \text{Équation 3}$$

avec :

- P<sub>x</sub> Quantité totale d'azote absorbé par le peuplement végétal jusqu'à la récolte pour une dose d'engrais X. P<sub>x</sub> est équivalent au terme P<sub>f</sub> de l'Équation 1
- P<sub>0</sub> Quantité totale d'azote absorbé par le peuplement végétal en l'absence d'apport d'engrais
- CAU Coefficient apparent d'utilisation de l'engrais
- X Dose d'azote apporté par l'engrais

P<sub>0</sub> et CAU sont estimés à partir de modèles et de références régionales ; ils dépendent des caractéristiques des sols et du climat, du précédent cultural, de la structure de la couche arable et, pour le CAU, des dates d'apport d'engrais (Plas *et al.*, 1994 ; Meynard *et al.*, 1997).

### 1.2. Méthodes actuelles d'estimation prévisionnelle des besoins en azote du blé d'hiver

Notre travail va porter sur l'amélioration de l'estimation des postes P<sub>f</sub> de l'Equation 1 et P<sub>x</sub> de l'Équation 3 ; ces postes sont communément appelés "Besoins en azote". Ceux-ci correspondent à la quantité d'azote nécessaire pour atteindre un objectif de production permis par le milieu et l'itinéraire technique.

Actuellement, l'estimation des besoins en azote du blé est fondée sur la fixation d'un objectif de rendement :

$$\text{Besoins} = (b)(\text{Objectif}) \quad \text{Équation 4}$$

avec :

- b Quantité d'azote nécessaire pour produire 1 quintal de grains (kg N/q). Pour le blé tendre, le coefficient "b" est fixé à 3 kg N/q depuis les travaux de Coïc (1956).

L'estimation de l'objectif de rendement peut se faire dès le semis en fonction des potentialités du milieu, et être éventuellement révisée au cours du cycle - comme on le verra plus loin -, notamment à la sortie de l'hiver.

Devant les difficultés à estimer un objectif de rendement adapté aux conditions de la parcelle et de l'année, les agriculteurs tendent à surestimer celui-ci et appliquent des doses d'engrais fréquemment excédentaires (Cerf & Meynard, 1988 ; Meynard & Papy, 1993).

### *1.2.1. Les potentialités agricoles : une référence pour estimer les objectifs*

L'objectif de rendement est un compromis entre une valeur supérieure imposée, le potentiel de rendement (pour un milieu et une culture donnés), et un choix technico-économique de l'agriculteur (Robert, 1996). D'après Boiffin *et al.* (1982), cités par Robert (1996), "*le potentiel de rendement est défini par les potentialités agricoles, qui correspondent pour un système de culture et un milieu donnés, au meilleur emploi des facteurs de production disponibles. Ces potentialités agricoles sont supérieures ou égales au rendement que peut espérer l'agriculteur. Elles doivent donc correspondre à la borne supérieure de son objectif de rendement.*"

D'après cette définition, le potentiel de rendement est donc conditionné, d'une part par le milieu, d'autre part par les systèmes de culture (successions culturales et itinéraires techniques).

#### *a) Influence du milieu sur les potentiels de rendement*

En absence de facteur limitant parasitaire ou de contrainte hydrique ou minérale, la productivité d'une culture est limitée par l'interception de l'énergie lumineuse et sa conversion en biomasse. Le modèle de Monteith, qui sera présenté en détail plus loin, propose une représentation simple et largement utilisée de ces mécanismes (*Équation 9*). Ce modèle permet d'estimer la productivité d'une culture en fonction du rayonnement incident pendant le cycle cultural. Pour un blé en région parisienne, Gosse *et al.* (1986) estiment ce potentiel à environ 23,5 tonnes de matière sèche aérienne, soit pour un indice de récolte de 55 % (rapport Grain/Matière sèche aérienne) un rendement en grains secs de 129 q/ha (152 q/ha à 15 % d'humidité).

Ce potentiel de rendement est accru dans les régions où le remplissage des grains se fait en conditions de températures peu élevées (zones océaniques), favorables à un allongement du cycle (Spiertz, 1977).

Les potentialités agricoles n'atteignent pas toujours ces niveaux : en effet, le blé étant rarement irrigué (quand l'eau d'irrigation est disponible, la rentabilisation de celle-ci par le blé est souvent inférieure à celle d'autres cultures), le déficit hydrique réduit alors le rendement potentiel. Limaux (1990) établit, pour les principaux types de sols de la Lorraine, des relations empiriques entre le rendement du blé et le déficit climatique "ETP - P" au printemps. Il estime sur cette base la distribution fréquentielle des rendements potentiels, pour chaque type de sol et montre que les objectifs de rendements souhaitables sont voisins de la médiane de ces distributions.

#### *b) Influence des techniques culturales sur les potentiels de rendement*

Les variétés diffèrent par leurs caractéristiques morphologiques et physiologiques : capacité de tallage (Masle, 1980), aptitude à produire des grains et à les remplir (Gate, 1987), mise en place et port des surfaces foliaires, indice de récolte... Elles se distinguent également, par leur capacité à remobiliser l'azote en fin de cycle, qui influe sur la teneur en protéines des grains

(Chevalier-Gérard, 1993), critère de qualité dans l'industrie alimentaire. En général, les variétés tardives, qui valorisent plus longtemps le rayonnement incident, ont un potentiel de production plus élevé que les variétés précoces, mais en situation de fort déficit hydrique, ce classement peut être inversé.

Tous ces caractères ont un effet sur le potentiel de rendement, en constante progression depuis les débuts de la sélection, mais aussi sur les besoins en azote par quintal qui, d'après Gate (1998) varient de 2.8 à 3.7 kg N/q, corrélativement à la teneur en protéines. La prise en compte de l'ensemble de ces variabilités rend difficile la gestion des apports (on considère qu'un agriculteur utilise en moyenne de quatre à six variétés par saison).

Le blé étant photopériodique, un avancement de la date de semis augmente la durée du cycle. La date de semis influe ainsi sur le niveau de croissance à un même stade. À densité de peuplement identique, le potentiel de production en biomasse d'un semis précoce est plus important que celui d'un tardif (Meynard, 1985). Cela se traduit par des demandes différentes en azote. La différence de potentiel de rendement entre semis précoce et semis tardif peut être accentuée sur les sols hydromorphes.

À l'échelle d'une région ou d'une exploitation, les dates de semis sont souvent échelonnées dans le temps, avec une différence de un à deux mois, selon les récoltes des cultures précédentes. Dans les semis tardifs, les agriculteurs utilisent des variétés adaptées à la période et augmentent la densité de semis pour limiter les pertes de rendement qui lui sont liées. La pratique de diversifier simultanément les variétés et les dates de semis engendre des variabilités de potentiels.

*Le potentiel de production apparaît comme le produit de fonctions complexes du climat, du sol, du cultivar et des techniques culturales (Pachepsky & Acock, 1997). La variation de ces facteurs implique une variation interannuelle et spatiale du potentiel, corrélée à une variation des besoins en azote, qu'il est important de mieux connaître afin d'adapter la fertilisation.*

### ***1.2.2. Révision des rendements objectifs en cours de culture***

Il est reconnu que le calcul des besoins sur la base d'objectifs de rendement fixés dès le début du cycle en fonction des seules potentialités agricoles n'est pas fiable régulièrement. Pour adapter au mieux les apports en azote, il est souhaitable de pouvoir réactualiser l'estimation des besoins en cours de cycle. Le potentiel de rendement peut être limité par la structure du peuplement (densité, tallage herbacé) et ce, dès la levée.

La densité de peuplement, en particulier, peut être réduite pour diverses raisons liées aux conditions climatiques : gel, déchaussement de plantes, mauvaise germination ou levée, faible développement des racines (Jensen, 1971 ; Blacklow, 1972 ; Fenech & Papy, 1977 ; Fleury, 1972 ; Bicker, 1983 ; Schneider & Gupta, 1985 ; Bouaziz, 1987). L'interception du rayonnement lumineux est alors diminuée, particulièrement en début de cycle. Les expérimentations "densité de semis" montrent cependant que le potentiel de rendement est très peu affecté entre 100 et 400 plantes/m<sup>2</sup>. Ceci est dû aux fortes capacités de compensation des céréales par le tallage, mais aussi probablement au fait que les périodes, où les densités faibles

interceptent moins bien le rayonnement que les densités élevées, sont marquées par des températures froides, très limitantes pour la croissance.

Cependant, au sein d'une parcelle, les variations de microclimat et de caractéristiques du sol induisent des taux de pertes de plantes très variables : une densité moyenne de peuplement de 100 plantes/m<sup>2</sup> suite à un gel recouvre des variations locales, s'étalant entre 20 plantes/m<sup>2</sup> en certains endroits et 200 en d'autres ; la relation entre densité et rendement étant fortement convexe, le rendement moyen de la parcelle est alors très inférieur à ce qu'il serait si les plantes étaient régulièrement réparties.

Dans d'autres cas, la réduction du potentiel est due à une réduction du tallage herbacé et de l'indice foliaire. Ainsi, sur des plantes semées profondément, les premières talles n'apparaissent pas, et le nombre de plantes sans aucune talle peut parfois atteindre plus de 30 % (Masle, 1980). Les températures gélives peuvent entraîner des arrêts temporaires du tallage, de même que des excès d'eau (Meynard, Com. pers.). Meynard & Aubry (1988) montrent que l'excès d'eau réduit la biomasse aérienne du peuplement au début de la montaison et le potentiel de rendement.

Il existe un certain nombre d'indicateurs de fonctionnement qui permettent d'estimer en cours de croissance le rendement potentiel ; ils ont été proposés pour tenter d'améliorer la fixation des objectifs de rendement en cours de culture.

#### *1.2.2.1. La biomasse aérienne au stade "Épi 1 cm"*

Meynard (1983b) propose d'estimer le potentiel de rendement des blés clairs sur la base de la mesure de leur biomasse aérienne au stade "épi 1 cm" (BA1). Cette estimation s'appuie successivement :

- Sur le modèle de prévision du nombre d'épis (NE) en situation de compétition pour la lumière (Masle, 1980) :

$$NE = BA1^d$$

Équation 5

- Sur une relation empirique, ajustée à une droite, entre nombre d'épis potentiel et nombre de grains/m<sup>2</sup> potentiel,
- Sur la proportionnalité mise en évidence par Meynard *et al.* (1981, 1983) entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> potentiel et la quantité d'azote absorbé à l'optimum de la courbe de réponse à l'engrais.

Tous les paramètres de ces relations sont variétaux, et certains varient de manière sensible en fonction des régions, sans doute en liaison avec le rapport Rayonnement/Température pendant les grandes phases de l'élaboration du rendement.

Devant la difficulté à mesurer directement, pour un agriculteur, la biomasse aérienne du blé, Meynard (1985) propose de l'estimer de la façon suivante : pour les biomasses inférieures à 60 g/m<sup>2</sup> (pas de compétition pour la lumière entre les plantes) :

$$BA1 = \alpha NP$$

Équation 6

Après instauration de la compétition pour la lumière :

$$BA1 = NP / (a + bNP) \text{ (Modèle de Shinozaki et Kira) } \quad \text{Equation 7}$$

avec :

- BA1 Biomasse aérienne au stade "épi 1 cm"
- a, b dépendent, selon une fonction exponentielle, de la somme de degrés-jours Levée-Début montaison et de la variété
- NP Nombre de plantes par m<sup>2</sup>

#### *1.2.2.2. Le nombre de talles*

Un autre indicateur proposé est le nombre de talles de plus de 3 feuilles au début de la montaison, dont Michaud (1992) et Gate (1995) montrent qu'il est un bon prédicteur du nombre d'épis. On peut aussi relier cette variable au nombre de grains d'après Michaud (1992), cité par Robert (1996), et donc aux besoins en azote (voir *supra*). En effet, le nombre de feuilles d'une talle définit le nombre de capteurs capables d'intercepter la lumière, son degré d'autonomie pour l'alimentation azotée vis-à-vis du brin-maître. Ce nombre traduit aussi l'âge de la talle, donc sa productivité potentielle : le nombre total d'épillets est d'autant plus élevé que la talle est âgée (Gate, 1995).

Un groupe de travail régional, mis en place dans le cadre de l'Agora du blé de Beauvais (1985), a également proposé d'utiliser le nombre de talles par plante en sortie d'hiver (fin février) : si celui-ci est supérieur à 2, le tallage ne limite pas le rendement ; cependant ce dernier indicateur ne résout pas le problème de l'estimation des besoins en azote des blés clairs.

#### *1.2.2.3. Problèmes pratiques posés par ces indicateurs*

Ces deux indicateurs (Biomasse et Nombre de talles) présentent plusieurs inconvénients :

- ils ne sont pas commodes à mesurer ; la biomasse demande même des manipulations et un séchage d'échantillons difficiles à réaliser par des agriculteurs ;
- ils posent d'incontestables problèmes d'échantillonnage pour intégrer la variabilité intraparcellaire du peuplement végétal. Cet échantillonnage est particulièrement difficile dans le cas des parcelles à peuplements clairs ;
- ils doivent être mesurés à un stade précis, ce qui complique encore la tâche de l'agriculteur, qui peut avoir d'autres activités urgentes à la même époque (semis de cultures de printemps, traitements sur blé ou colza...).

### **1.3. Fractionnement de l'azote**

La cinétique des besoins en azote du blé d'hiver varie en fonction des stades de développement et de croissance :

- Dans la phase automnale, les besoins en azote sont très faibles et généralement satisfaits par la minéralisation du sol, cette dernière étant favorisée par les conditions climatiques. En

hiver, la croissance est faible en raison des températures limitantes, et les besoins en azote restent très réduits.

- Après l'hiver, la température de l'air permet la reprise de la croissance de la végétation. En revanche, les températures du sol demeurent basses, ce qui n'est pas favorable à la minéralisation. L'offre du sol ne couvre généralement pas les besoins du peuplement : il faut donc faire un apport d'engrais. Jusqu'au stade "épi 1 cm", les besoins ne dépassent pas 60 à 80 kg N/ha (Meynard, 1985 ; Taureau, 1987), en fonction des températures antérieures et de la densité de peuplement. Les besoins instantanés sont les plus intenses à partir du début de la montaison, jusqu'au déploiement de la dernière feuille.
- À la floraison, 80 % de l'azote est déjà absorbé, et l'azote assimilé à partir de cette date provient principalement de la minéralisation. Le poids de 1000 grains est peu affecté par l'absorption d'azote post-floraison, mais la teneur en protéines des grains peut l'être beaucoup (nombreux auteurs cités par Girard, 1997).

- **DATES D'APPORT D'ENGRAIS**

Le fractionnement de l'azote est adapté à la dynamique des besoins du blé et de l'offre du sol, mais il faut éviter les risques de lessivage de l'engrais. Au mois de février, les risques de perte de l'engrais azoté par lessivage restent importants ; de plus, même en absence de lessivage, le coefficient d'utilisation des apports aussi précoces est faible. Cependant, il faut veiller à satisfaire les besoins du peuplement en azote, étant donné que l'offre du sol est très réduite.

- Un premier apport d'engrais est donc réalisé en février, pendant le tallage ; il doit être limité à la stricte satisfaction des besoins. Sortie d'hiver-Stade "épi 1 cm". Meynard et Limaux (1987) montrent que les besoins en azote que doit satisfaire le premier apport d'engrais sont directement liés à la biomasse du peuplement au stade "épi 1 cm" (BA1). Les besoins se calculent comme suit :

$$\text{Besoins en azote jusqu'au stade "épi 1 cm"} = (\text{BA1})(4.5/100)(1.3) \quad \text{Équation 8}$$

Comme la biomasse aérienne dépend du nombre de plantes, les peuplements de densité faible ont des besoins en azote plus faibles.

- Un deuxième apport est conseillé autour du stade "épi 1 cm", qui marque le début de la période de besoins intenses. C'est à cette époque que la plus forte dose est apportée (par exemple 80 à 130 kg/ha sur des blés de potentiel 80 q/ha, selon la fourniture du sol). Un retard de cet apport est néfaste pour le nombre de grains/m<sup>2</sup> (Meynard, 1985).

- Un dernier apport (40 kg/ha environ) peut être fait courant montaison (jusqu'au stade "Apparition de la dernière feuille"). Il est surtout pratiqué dans le but d'accroître le taux de protéines.

Plus l'engrais est apporté à un moment où les besoins du peuplement sont élevés, mieux il est utilisé par la culture (Recous *et al.*, 1997). Les apports trop précoces face aux besoins favorisent l'organisation microbienne de l'engrais et les pertes gazeuses (Recous & Machet, 1998).

Ainsi, pour satisfaire les besoins en azote des cultures, tout en limitant les risques de perte par lessivage ou voie gazeuse, les modalités d'apports (dates et fractionnements) de l'engrais

jouent-elles un rôle essentiel. Pour optimiser ces apports sur un blé clair, la procédure d'estimation des besoins en azote à mettre en place doit être :

- précoce, afin de calculer la première dose d'azote à apporter,
- capable d'estimer les dynamiques de croissance et d'absorption afin de permettre de déterminer les doses et dates d'apport les mieux adaptées.

#### 1.4. Conclusion partielle

*Il n'existe donc actuellement aucune procédure satisfaisante d'estimation des besoins en azote qui permette d'adapter la fertilisation à la diversité des états du blé en sortie d'hiver ou au début du printemps. Notre hypothèse est que l'état actuel de la modélisation de la croissance et des relations Croissance-Azote permet de jeter les bases d'une estimation de la cinétique des besoins qui puisse aisément être initialisée par des indicateurs corrélés à l'indice foliaire.*

Le chapitre suivant présente l'état des connaissances sur cette modélisation.

## 2/ PRINCIPE DE L'ESTIMATION DES BESOINS EN AZOTE SUR LA BASE DE LA CONNAISSANCE DE L'INDICE FOLIAIRE

### 2.1. Structure générale et cahier des charges du modèle

Dans son principe, le modèle que nous proposons est très proche de la plupart des modèles dynamiques de fonctionnement du blé : l'estimation des besoins en azote est fondée sur la modélisation de la croissance journalière, considérée comme le résultat de la photosynthèse nette ; celle-ci est calculée à partir du rayonnement intercepté par l'indice foliaire lui-même généré, le plus souvent, en fonction des températures (Sinclair & Amir, 1992 ; Porter, 1984, 1993; Garry *et al.*, 1996 ; Belmans & De Wijnngaert, 1985). Tout en nous fondant sur ces acquis, nous avons proposé une modélisation spécifique, dans le but de prendre en considération les spécificités de notre objectif (très large gamme de densités, initialisation par un indicateur précoce, objectif de prévision). On supposera que les facteurs limitants nutritionnels (azote, phosphore, potassium et eau) et parasitaires sont bien maîtrisés. Cette hypothèse est raisonnable pour le blé dans la moitié nord de la France ; les sols sont riches en P et K, le déficit hydrique et le parasitisme ne s'extériorisent généralement sur la croissance que vers la fin de la montaison, c'est-à-dire alors que la majorité de l'azote est déjà absorbé. Quant à l'azote, c'est bien notre objectif d'apporter la quantité d'engrais nécessaire pour que cet élément ne soit pas limitant. Si ces facteurs sont bien maîtrisés, alors la croissance de la végétation ne sera limitée que par le Rayonnement Photosynthétiquement Actif (PAR) intercepté. La différenciation du PAR intercepté selon les peuplements étant principalement liée à l'indice foliaire, nous avons opté pour une modélisation dynamique en trois étapes :

- ✓ Un modèle d'évolution de l'indice foliaire en fonction du temps
- ✓ Un modèle d'interception du rayonnement et de croissance en fonction de l'indice foliaire

- ✓ Un modèle d'estimation des besoins en azote se fondant sur la croissance de la biomasse

Si l'on veut estimer précocement les besoins en azote de la culture, en différenciant les potentialités des peuplements selon la variété, la densité et la date de semis, les différents modèles doivent répondre respectivement aux contraintes du cahier des charges suivantes :

- ✓ **Le modèle d'évolution de l'indice foliaire en fonction du temps doit :**
  - Faire appel à des variables d'entrée faciles et rapides à mesurer, ce qui exclut en particulier la densité du peuplement, variable longue à acquérir, surtout sur une parcelle de densité irrégulière.
  - Être utilisable à un stade précoce. La majeure partie de l'engrais devant être apportée avant le début de la montaison, notre objectif est de pouvoir initialiser le modèle à n'importe quel moment entre la fin de l'hiver et le début de la montaison.
  - Être utilisable sur une large gamme de variétés, dates de semis et densités.
- ✓ Les deux autres modèles doivent également être utilisables sur une large gamme de variétés, dates de semis et densités, et être prédictifs, c'est-à-dire permettre une estimation des besoins quel que soit le climat ultérieur.

## 2.2. Modélisation de la croissance potentielle d'un peuplement de blé d'hiver

Selon le formalisme de Monteith (1972), la croissance en biomasse est fonction du rayonnement utile à la photosynthèse (PAR : *Photosynthetical Active Radiation*, entre 400 et 750 nm), de l'efficacité d'interception  $\epsilon_i$  et de l'efficacité de conversion de l'énergie ( $\epsilon_b$  ou Radiation Use Efficiency : RUE) :

$$\Delta BM_{\text{aérienne}} = \sum_t \epsilon_b \cdot \epsilon_i \cdot PAR_{\text{incident}} \quad \text{Équation 9}$$

où

$\Delta BM_{\text{aérienne}}$	représente le gain de la matière sèche aérienne ( $\text{g.m}^{-2}$ ), pendant le pas de temps donné, par exemple journalier
$PAR_{\text{incident}}$	est le PAR incident pendant le pas de temps précédent ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )
$\epsilon_b$	Efficacité de conversion de l'énergie en biomasse ( $\text{g.MJ}^{-1}$ )

### 2.2.1. Estimation de l'efficacité d'interception de la lumière $\epsilon_i$

L'efficacité d'interception de la lumière est le rapport entre le PAR incident et le PAR intercepté par le couvert végétal :

$$PAR_{\text{intercepté}} = (\epsilon_i)(PAR_{\text{incident}}) \quad \text{Équation 10}$$

Les travaux de Varlet-Grancher *et al.* (1982, 1989) permettent le calcul du rayonnement incident à partir du rayonnement global ( $RG_0$ ) :



$$\text{PAR}_{\text{incident}} = 0,48 \times \text{RG}_0$$

Équation 11

L'estimation de  $\varepsilon_i$  se fonde sur la connaissance de l'indice foliaire, selon l'équation de Beer (Amir & Sinclair, 1991 ; De Wit, 1965) :

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i \text{ max}} [1 - \exp (- K \cdot \text{LAI})]$$

Équation 12

où

$\varepsilon_{i \text{ max}}$  Interception maximale de la lumière ; sa valeur est généralement considérée comme étant constante et égale à 0,95 (Bonhomme, 1989 ; Varlet-Grancher, 1989)

K Coefficient d'extinction de la lumière

Le coefficient d'extinction de la lumière "K" dépend de la structure géométrique et optique de la végétation. Celle-ci peut être affectée par les pratiques culturales (cultivar, densité et date de semis). Cependant, Rosenthal *et al.* (1993) montrent que pour le sorgho, K est constant pour différentes densités et variétés ; Yunusa *et al.* (1993) ne trouvent pas de différence significative pour la valeur de K entre variétés étudiées sur la culture de blé de printemps. Le même résultat est trouvé par Hipps *et al.* (1983) sur la culture de blé d'hiver où K est constant à travers les variétés et densités.

### 2.2.2. Estimation de l'efficacité de conversion de l'énergie $\varepsilon_b$

Le coefficient  $\varepsilon_b$  représente le rapport entre la biomasse formée pendant un intervalle de temps et la somme du PAR intercepté pendant ce même temps. Dans la bibliographie, les valeurs de  $\varepsilon_b$  pour la culture de blé sont variables ; la gamme varie de 1.8 à 3.82 (Biscoe *et al.*, 1977 ; Monteith, 1977 ; Aase, 1978, *in* Kiniry *et al.*, 1989 ; Gallagher & Biscoe, 1978 ; Staper *et al.*, 1980 ; Howell & Musick, 1985 ; Steinmetz *et al.*, 1990 ; Maas, 1993a).

Le principal facteur de variation de  $\varepsilon_b$  est la température, ce qui induit un changement de  $\varepsilon_b$  au cours du cycle cultural (Garcia *et al.*, 1988 ; Steinmetz *et al.*, 1990) :  $\varepsilon_b$  est plus faible en hiver et atteint ses valeurs les plus élevées au début de l'été, avant de baisser sous l'effet de la sénescence (Girard, 1997). Les stress hydriques et carences azotées font également baisser la valeur de  $\varepsilon_b$  (Green, 1987 ; Steinmetz *et al.*, 1990).

Plusieurs études sur diverses espèces rapportent que  $\varepsilon_b$  est indépendant de la variété, de la densité et de la date de semis (Gallo *et al.*, 1985 ; Howell & Musick, 1985 ; Garcia *et al.*, 1988 ; Giauffret *et al.*, 1991 ; Board & Harville, 1992 ; Rosenthal *et al.*, 1993 ; Dorvillez *et al.*, 1991).

Lorsqu'on analyse la majorité des études réalisées sur la modélisation de l'interception du PAR et de sa conversion en biomasse, on constate cependant pour la culture de blé que la majorité de la bibliographie traite surtout des blés à densité homogène et relativement élevée (> 150 plantes/m<sup>2</sup>). Pour une utilisation en parcelles à densité hétérogène (blés clairs), il est impératif d'estimer les paramètres des modèles  $\varepsilon_i$  et  $\varepsilon_b$  en fonction de la densité pour diverses variétés.

### 2.2.3. Modélisation de l'indice foliaire

#### 2.2.3.1. Choix de la forme du modèle

L'indice foliaire constitue la première variable d'entrée du modèle de croissance de la biomasse, il est le facteur le plus important de l'interception de la lumière (Biscoe & Gallagher, 1977). L'évolution de l'indice foliaire est conditionnée par plusieurs paramètres : date de levée, rythme d'apparition des feuilles, nombre et taille des feuilles, durée de fonctionnement et géométrie. L'ensemble de ces paramètres est dépendant du génotype et des variables extrinsèques (température, rayonnement, éléments trophiques, densités...)(Gigby & Fimm, 1985 ; Hammer *et al.*, 1993).

Dans la plupart des modèles simples de fonctionnement du blé présentés dans la bibliographie, la modélisation du LAI se fonde sur des variables climatiques combinées le plus souvent aux variables Nombre de feuilles, Nombre de talles et Nombre de plantes (Arkin *et al.*, 1991 ; Amir *et al.*, 1993 ; Sinclair *et al.*, 1991, Sinclair & Amir, 1992 ; Porter *et al.*, 1992 ; Bouman, 1992). Les variables d'entrée de ces modèles telles que la densité de plantes, le nombre de talles, demeurent très lourdes à acquérir en parcelle. Ces modèles sont donc inutilisables pour notre objectif.

Les modèles les plus utilisés en biométrie pour simuler la courbe de croissance des plantes en fonction du temps sont les équations de Gompertz (Winsor, 1932 ; Koller *et al.*, 1970 ; Baker *et al.*, 1975 in Dale *et al.*, 1980), ainsi que les équations logistiques (Vehagen, 1960 ; Nelder, 1961 ; Grossman, 1969 in Dale *et al.*, 1980 ; Ratkowsky, 1983 ; Dwyer & Stewart, 1986). Nous avons adopté ce formalisme.

L'allure sigmoïdale des courbes représentant le LAI en fonction de la somme des degrés-jours peut être ajustée à une fonction de régression de type logistique généralisée, soit :

- de la forme asymétrique à 5 paramètres :

$$f = n + \frac{d - n}{[1 + \exp(-b * (dj - m)^\alpha)]}$$

Équation 13

où

n	Asymptote inférieure
d	Asymptote supérieure
m	Abscisse du point d'inflexion
b	Paramètre lié à la pente
$\alpha$	Coefficient d'asymétrie
dj	Somme de degrés-jours

- de la forme symétrique à 4 paramètres ( $\alpha = 1$ ) :

$$f = n + \frac{d - n}{[1 + \exp(-b * (dj - m))]}$$

Équation 14



### 2.3. Modélisation des besoins en azote : courbe de teneur en azote critique

La teneur en azote critique est définie comme la teneur en azote minimum permettant d'obtenir une croissance maximale de la biomasse, elle est reliée à la biomasse aérienne ( $t \cdot ha^{-1}$ ) au cours de la croissance végétative de la culture par une relation simple (Lemaire & Salette, 1984a ; Lemaire *et al.*, 1985, 1997 ; Greenwood *et al.*, 1991) :

$$Nc \% = a (BM_{\text{aérienne}})^{-b} \quad \text{Équation 16}$$

avec :

Nc %	Teneur en azote critique des parties aériennes
BM <sub>aérienne</sub>	Biomasse aérienne totale accumulée en $t \cdot ha^{-1}$
a	Coefficient de teneur potentielle en azote
b	Coefficient de dilution

Les paramètres de cette relation ont été établis sur blé par Justes *et al.* (1994), pour des peuplements allant du stade tallage jusqu'à la floraison ;

$$Nc \% = 5.35 (BM_{\text{aérienne}})^{-0.442} \quad \text{Équation 17}$$

Cette relation est valable pour des biomasses comprises entre 1.5 et 14.5 tonnes. $ha^{-1}$  ; elle a été validée sur de nombreuses variétés, dans des conditions pédoclimatiques très contrastées (bien qu'essentiellement françaises) et pour une large gamme de densités et dates de semis.

La connaissance de la dynamique de croissance de la biomasse (modèles précédents) permet d'estimer, à chaque instant, à partir du modèle de teneur en azote critique, les quantités d'azote absorbé nécessaires pour atteindre cette biomasse dans les conditions non limitantes. On peut ainsi disposer d'une cinétique d'évolution des besoins en azote du blé jusqu'à la floraison, c'est-à-dire pour la période pendant laquelle les apports d'engrais sont les plus nécessaires.

### 2.4. Conclusion partielle

*À partir de la connaissance de l'indice foliaire à la sortie de l'hiver, de mesures de certaines variables climatiques (températures, rayonnement) et en se fondant sur une paramétrisation des modèles intégrant les covariables agronomiques qui conditionnent la biomasse potentielle, nous pouvons modéliser la dynamique des besoins en azote du peuplement considéré.*

*Les connaissances de base sont disponibles, mais il reste un gros travail à faire sur l'étude des paramètres (stabilité et causes éventuelles de variation) pour pouvoir utiliser les modèles de manière prédictive.*

### **3/ ESTIMATION DE L'INDICE FOLIAIRE EN SORTIE HIVER À PARTIR D'INDICATEURS RELEVÉS AU CHAMP**

L'utilisation de modèles de fonctionnement, même très simples, à l'échelle de la parcelle, et encore plus à celle de la région, peut être entravée par la difficulté de mesurer les variables biophysiques d'entrée nécessaires à la modélisation. La télédétection est un moyen privilégié pour introduire en instantané des informations sur l'état de la culture par l'intermédiaire de ces variables biophysiques (LAI, taux de couverture et réflectance) qui peuvent être introduites dans les modèles de croissance (Clevers, 1988b ; Guyot & Baret, 1989 ; Ducker, 1997).

#### **3.1. Présentation des indicateurs**

##### **3.1.1. Rappel des critères de choix des indicateurs**

Nous recherchons des indicateurs qui permettent une estimation précoce, la plus précise possible, de l'indice foliaire et susceptibles d'être acquis par voie automatique. Nous avons choisi le *taux de couverture* et la *réflectance radiométrique*. Le taux de couverture est un indicateur de la parcelle connu de l'agriculteur, mais à l'heure actuelle sa mesure ne peut pas être embarquée facilement sur une machine agricole ; en revanche, la réflectance, issue directement d'un signal mesurable en continu et de façon automatisée, peut être utilisée sur un engin mobile.

Les travaux présentés dans des colloques récents tels que ceux de "Illinois" (1991), de "Minneapolis" (Minnesota, 1996) et de "Warwick" (1997), consacrés à l'agriculture de précision, font état de l'utilisation du taux de couverture et de la réflectance radiométrique. Les aspects concernés sont :

- Les techniques et outils d'acquisition des informations
- Les techniques et méthodes d'interprétation de ces informations
- Le machinisme

Ces indicateurs sont utilisés dans la majorité des cas pour réaliser des cartes de variabilité de l'offre du sol (éléments minéraux et eau) (Thomsen *et al.*, 1997), de variation des conditions de croissance à l'intérieur de la parcelle dans le but d'ajuster les traitements pesticides en fonction de l'infestation (Biller *et al.*, 1997 ; Christensen *et al.*, 1997) et de mesurer la quantité d'eau dans le sol (Whalley & Stafford, 1992).

##### **3.1.2. Relations entre l'indice foliaire et le taux de couverture du sol (TC %)**

###### **3.1.2.1. Définition de l'indicateur "Taux de couverture"**

Le taux de couverture du sol est défini comme la projection verticale des surfaces des feuilles visibles sur le sol supposé horizontal, rapportée à la surface du sol considérée (Boissard *et al.*, 1992). Par conséquent, le taux de couverture du sol dépend étroitement de la structure architecturale des feuilles et des tiges.

### *3.1.2.2. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver à partir du taux de couverture du sol*

La méthode de mesure du TC retenue dans cette étude repose sur la numérisation des photographies présentée dans la partie "*Matériel et Méthode*". Cependant, cette mesure ne peut être réalisée qu'en différé (après traitement d'images). Actuellement, on tente d'automatiser la méthode à partir de mesures par caméra numérique (Seltman *et al.*, 1997).

Selon certains auteurs, la méthode la plus rapide pour estimer le taux de couverture du sol passe par la réflectance radiométrique en raison de l'existence de corrélations étroites entre ces deux variables (Ahlrichs & Bauer, 1983 ; Malthus *et al.*, 1991 ; Bouman, 1992 ; Boissard *et al.*, 1992). Le taux de couverture est également corrélé à la biomasse (Uenk *et al.*, 1992). Mais les études sur l'estimation de l'indice foliaire à partir du taux de couverture sont très rares. On peut supposer que, avant le début de la montaison, le couvert étant en partie couvrant (la majorité des feuilles sont visibles), le taux de couverture sera un indicateur discriminant de l'indice foliaire.

### *3.1.3. Relation entre le LAI et la réflectance radiométrique*

#### *3.1.3.1. Définition de l'indicateur réflectance radiométrique*

La réflectance spectrale de la végétation est la combinaison de la réflectance des composantes des spectres du sol et de la plante, conditionnés par les propriétés optiques de ces éléments et par les échanges de photons à travers le couvert (Rondeau *et al.*, 1996).

#### *3.1.3.2. Estimation de l'indice foliaire à partir de la réflectance radiométrique*

Les études sur l'extraction d'informations sur le développement et la croissance de la culture à partir de la signature spectrale temporelle sont nombreuses. Les fortes corrélations entre la réflectance de la culture et les variables agronomiques (le LAI, la biomasse) ont conduit un nombre considérable de chercheurs à utiliser les données spectrales dans la prédiction des rendements (Pearson & Miller, 1972 ; Ashley & Ray, 1975 ; Richardson & Weigand, 1977 ; Weigand *et al.*, 1979 ; Tucker *et al.*, 1980 ; Richardson *et al.*, 1982 ; Hatfield, 1981, 1983 ; Rudorff & Batistat, 1990, et d'autres, cités par Maas (1988), Hatfield (1984) et Rudorff & Batista, 1990). D'après l'ensemble de ces travaux, la relation entre le LAI et les indices de végétation (combinaisons des réponses dans plusieurs bandes spectrales) est de type exponentiel (*Figure I-1.1*).

Ahlrichs & Bauer (1983), Price (1992) et Maas (1989) montrent que pour de faibles recouvrements de sol, l'indice foliaire est mesuré avec précision par la réflectance. Petersen (1989) sur culture d'orge, montre que pour des LAI inférieures à 3, la relation entre le LAI et l'indice de végétation (XS3/XS2) est linéaire. XS1, XS2, XS3 représentent les bandes spectrales du vert, du rouge et du proche infrarouge utilisées par les satellites SPOT.

De nombreux travaux suggéreraient de se servir de la réflectance pour estimer directement l'efficacité d'interception du rayonnement : selon Holben et Tucker (1980), Asrar *et al.* (1985), Hatfield (1984), Daughtry (1988), pour le blé ; Bégué (1993) pour le millet, Casanova *et al.* (1998) pour le riz, la relation entre l'interception du PAR et la réflectance radiométrique est de type linéaire (*Figure I-1.2*) :

$$\epsilon_i = a \text{ (indice de végétation) } + b$$

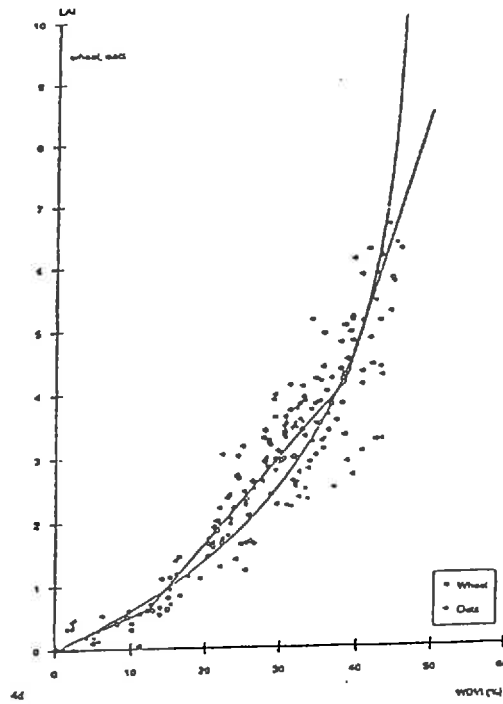


Figure I-1.1. Estimation de l'indice foliaire en fonction de l'indice de végétation (WDVI)  
(Source : Bouman et al., 1992)

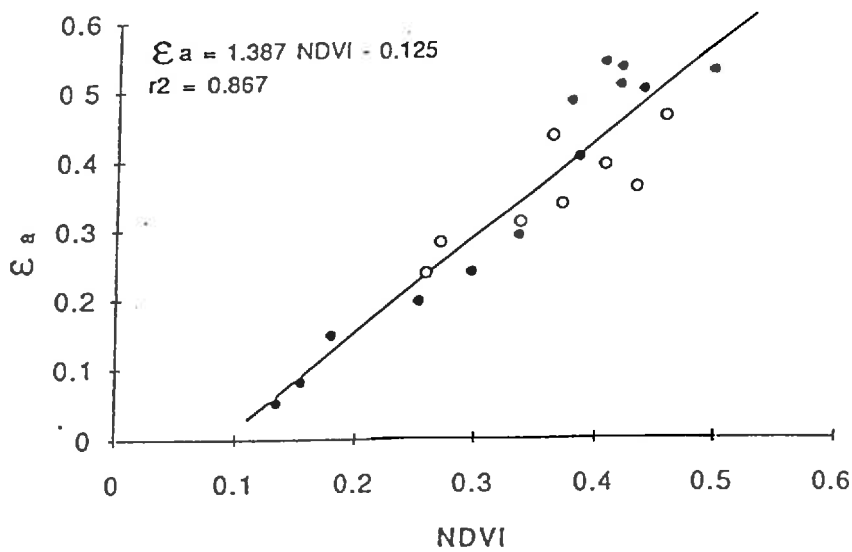


Figure I-1.2. Estimation de l'interception de la lumière en fonction de l'indice de végétation (NDVI) (Source : Bégué, 1993)

Cependant, Hatfield (1984) montre que la relation diffère selon le stade de développement ; il retient deux relations linéaires différentes : l'une pour le stade préfloraison, l'autre en post-floraison. Bégué (1993) conclut d'autre part que la pente de la relation entre le " $\epsilon_i$ " et l'indice de végétation (réflectance) est d'autant plus sensible que le couvert végétal est hétérogène, ce qui est le cas pour ce qui concerne notre étude. Au stade précoce du cycle du blé, avant le début montaison, le blé d'hiver présente un faible indice foliaire ( $LAI < 1.5$  à  $2$ ) et sa structure est encore fortement marquée par le semis en ligne. À cet effet se rajoute l'importance des phénomènes de parois pour l'interception des rayonnements obliques. Ceci pourrait expliquer que la relation "Réflectance- $\epsilon_i$ " est plus sensible à l'influence du sol et à la géométrie du couvert que n'est la relation "Réflectance-Indice foliaire" <sup>(1)</sup>. Cette instabilité, et le fait que la grande majorité des modèles d'évolution d' $\epsilon_i$  dans le temps sont fondés sur une modélisation préalable de l'évolution du LAI, nous ont conduite à garder le LAI comme variable intermédiaire.

### **3.2. Facteurs de variation des relations "Indicateurs - LAI"**

Divers facteurs font varier les paramètres des relations entre l'indice foliaire mesuré et les indicateurs. Ces variations sont liées aux techniques culturales et à l'environnement (date de semis, variété, densité de plantes, nature du sol, humidité...) (Daughtry *et al.*, 1980). Nous distinguons les paramètres externes et ceux liés au couvert végétal (Ahrlich & Bauer, 1983).

#### **3.2.1. Conditions externes pour les mesures de proxi-détection**

Dans le domaine de la télédétection *satellitaire* ou *aérienne* (par avion), les conditions externes sont définies par les conditions de mesures : résolution spatiale (détermine la taille du plus petit objet vu), bandes spectrales, angles de visée, altitude de prise de vue et accessibilité temporelle qui peut rendre difficiles les mesures à la période voulue. Dans le cas de la télédétection à courte distance (proxi-détection), on cherchera à simplifier et à standardiser au maximum les conditions de mesure (Boissard *et al.*, 1992) : conditions de rayonnement diffus (limitation des ombres portées), visée verticale et hauteur du radiomètre fixée.

#### **3.2.2. Effets de la structure du couvert sur l'estimation de l'indice foliaire à partir des indicateurs**

Pour interpréter en terme d'indice foliaire les données de télédétection obtenues au-dessus de couverts végétaux, il faut tenir compte de la structure géométrique et des propriétés optiques des composantes (Duncan, 1971 ; Trembath & Angus, 1975 ; Kollenkark *et al.*, 1982a ; Jackson & Pinter, 1986 ; Guyot, 1989 ; Boumane & Kasteren, 1989). Pour un angle de visée déterminé, les radiations reçues par un radiomètre (réflectance) ou les surfaces foliaires projetées par photographies (taux de couverture) varient fortement en fonction de la structure du couvert. Dans les conditions optimales d'alimentation de la culture, et selon Jackson & Pinter (1986), la réponse spectrale du couvert dépend beaucoup de l'arrangement géométrique des feuilles (distribution des angles). Entre février et avril pour le climat du Bassin Parisien, le peuplement végétal passe par les phases tallage et début montaison. Durant cette période, la

---

<sup>(1)</sup> Baret *et al.* (1989) ont tenté d'améliorer la stabilité de la relation par l'introduction des propriétés optiques du sol, pour tenter de diminuer la variabilité de la relation "Réflectance -  $\epsilon_i$ ".



variation de la structure géométrique est très intense et probablement dominante par rapport à celle des propriétés optiques du couvert.

### *3.2.2.1. Facteurs de variation des propriétés optiques*

Au stade tallage, les feuilles de blé sont quasiment les seuls objets observés de la plante (la tige reste court-nouée). Dans le visible (400-700 nm), les feuilles manifestent une forte absorption de l'énergie, particulièrement dans le bleu et le rouge, due à la composition des pigments foliaires dominée par les chlorophylles "a" et "b". Par contre, la réflectance et la transmittance sont faibles. En revanche, dans le proche infrarouge (700-1300 nm), nous observons une forte transmittance et réflectance (Baret, 1991).

Les propriétés optiques des feuilles sont influencées par l'état physiologique et les conditions de croissance de la culture. Ainsi, on connaît l'influence sur les propriétés optiques des feuilles des stress causés par une attaque parasitaire (Guyot, 1989), une variation des conditions d'alimentation hydrique et minérale (Guérif *et al.*, 1996). Mais, durant la période étudiée (de la fin de l'hiver au début de la montaison), ces facteurs limitants sont rares en France, particulièrement sur les blés clairs dont les besoins en azote sont faibles et aisément couverts par les réserves du sol et les apports d'engrais précoces. L'âge des feuilles est un facteur qui entraîne également la variation des propriétés optiques des feuilles, mais pour le stade tallage-début montaison, le jaunissement des feuilles dû à la sénescence reste très limité en proportion de la surface foliaire. On notera cependant que les caractéristiques spectrales des feuilles (couleur, pilosité, épaisseur) dépendent de la variété.

### *3.2.2.2. Facteurs de variation de l'architecture du couvert*

Pour la période d'observation considérée, la géométrie du peuplement végétal (port des feuilles, début d'élongation) connaît une variation importante, ce qui a des conséquences sur l'estimation de l'indice foliaire à partir des indicateurs. La géométrie est définie au moyen de divers paramètres, dont les plus importants sont : les angles de ports (Pinter, 1983 ; Kimes, 1984 ; Cross *et al.*, 1988) et les dimensions des feuilles (forme, longueur, largeur).

La variation de la structure du couvert est particulièrement liée à différents choix techniques : variété, densité de plantes et date de semis.

- **VARIÉTÉ**

La variété est reconnue comme le premier facteur responsable de la variation de l'architecture d'un couvert végétal (Ledent, 1976 ; Kollenkark *et al.*, 1982 ; Pinter *et al.*, 1983 ; Jackson *et al.*, 1986 ; Bouman, 1990). Pour le blé d'hiver, la variation est due à des différences de port des feuilles (Malet, 1996), de port des talles et de taille de feuilles. La variabilité de la géométrie fait qu'à une même valeur de LAI peuvent correspondre des valeurs très différentes de taux de couverture ou de réflectance selon les variétés (Jackson & Pinter., 1986).

- **DENSITÉ**

La variation de la densité de plantes au sein de la parcelle peut influencer principalement le port des feuilles et des talles (les plantes de faibles densités ont plus d'espace que celles des fortes densités, elles ont donc tendance à s'étaler pour occuper l'espace disponible). L'élongation de la

tige (stade "épi 1 cm") est un peu plus précoce pour les densités fortes (Masle, 1980). L'arrêt du tallage, enfin, est nettement plus précoce en densité forte : au même stade, un peuplement de densité forte sera constitué de brins-maîtres et de talles âgées, alors qu'un peuplement de densité faible comprendra également des jeunes talles.

- **DATE DE SEMIS**

La date de semis est l'un des premiers facteurs agronomiques qui affectent la réflectance du blé de printemps (Daughtry *et al.*, 1980) ; elle influe sur la vitesse de mise en place des feuilles et des talles ainsi que sur leur nombre (Daughtry *et al.*, 1980), et sur la réalisation des stades de développement. Les semis précoces présentent, à un stade donné, un indice foliaire plus important ; celui-ci joue un rôle dans la compétition pour la lumière et induit un réarrangement des feuilles. Chez le blé, ce phénomène est accentué par le tallage. Le début de la montaison, caractérisé par un allongement des premiers entre-nœuds, correspond à un changement de port : parfois le stade "épi 1 cm" est assimilé à un "stade redressement", perceptible au changement de port de la plante.

### **3.2.3. Conditions du sol**

Les propriétés de réflexion du sol dépendent de sa composition organique, minérale, de sa texture, de son humidité et de sa rugosité (Guyot, 1993). La rugosité est l'un des facteurs les plus importants qui influencent la réflectance directionnelle d'un sol (Jacquemoud *et al.*, 1991). Aux stades de faible recouvrement, la réflectance du sol contribue fortement aux caractéristiques globales de la réflectance "sol-couvert" dans les différentes bandes spectrales.

### **3.2.4. Choix de l'indice de végétation**

Pour atténuer les effets des facteurs parasites, liés à l'atmosphère et au sol, et améliorer ainsi les relations entre réflectance et caractéristiques du couvert, plusieurs indices de végétation combinant, pour la plupart, les bandes spectrales du rouge et du proche infrarouge ont été proposés (Clevers, 1988a ; Baret, 1991). Le NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*, Rouse *et al.*, 1974) demeure le plus largement utilisé pour sa formalisation simple, malgré l'introduction de nouveaux indices : PVI (*Perpendicular Vegetation Index*, Richardson & Wiegand, 1977) ; SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*, Huete, 1988) ; TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*, Baret & Guyot, 1991), WDV ( *Weighted Difference Vegetation Index*, Clevers, 1989).

Aux dates auxquelles nous prévoyons de faire les mesures radiométriques (sortie de l'hiver), la culture est très hétérogène. Le choix de l'indice de végétation doit donc se faire de façon à tenir compte des effets des propriétés optiques du sol nu. Pour cela, nous avons choisi de retenir trois indices de végétation :

- ✓ Le NDVI, pour sa formulation simple, mais qui ne tient pas compte du sol

$$\text{NDVI} = (\text{XS3} - \text{XS2}) / (\text{XS3} + \text{XS2}) \qquad \text{Équation 18}$$

- ✓ Le TSAVI, qui s'appuie sur la connaissance des paramètres de la droite radiométrique du sol (ou droite du sol)

$$\text{TSAVI} = a (\text{XS3} - a\text{XS2} - b) / [(\text{XS2} + a (\text{XS3} - b) + 0.08 (1 + a^2)] \quad \text{Équation 19}$$

✓ Le WDV, qui nécessite la mesure de la réflectance du sol nu

$$\text{WDNI} = \text{XS3} - [(\text{XS3s} / \text{XS2s}).(\text{XS2})] \quad \text{Équation 20}$$

avec :

- XS3 Réflectance dans le proche infrarouge (750-950 nm)
- XS2 Réflectance dans le rouge (600-700 nm)
- XS3s Réflectance dans le proche infrarouge du sol nu
- XS2s Réflectance dans le rouge du sol nu
- a Pente de la droite du sol <sup>(1)</sup> dans le repère XS2 = Abscisse, XS3 = Ordonnée
- b Ordonnée à l'origine de la droite du sol
- 0.08 Coefficient ajusté pour minimiser l'effet du sol

Il ressort des équations des indices de végétation (IV) que les termes qui les composent sont les mêmes, ou extraits à partir des mêmes composantes.

Si l'on retient trois indices très utilisés : NDVI, TSAVI et WDV, on s'aperçoit que seuls le TSAVI et le WDV tiennent compte des propriétés de réflectance du sol nu. *A priori*, le TSAVI semble le plus intéressant car il n'exige pas d'effectuer des mesures de réflectance du sol nu. Seule l'équation de la droite du sol dans le repère Rouge-Infrarouge proche est nécessaire.

### 3.2.5. Conclusion partielle

*La variabilité des relations entre le LAI et les indicateurs, liée à la variabilité de la structure, est très gênante pour une utilisation en aide à la décision. Il est, en effet, nécessaire de disposer de relations stables quand on change de variété, de densité et de date de semis. Il convient donc d'identifier les paramètres de structure impliqués dans les variations des relations pour les inclure dans la modélisation, ce qui nécessite une approche mécaniste des relations entre le LAI et les indicateurs.*

## 3.3. Modèles d'échanges radiatifs

### 3.3.1. Types de modèles disponibles

Pour mieux interpréter les mesures de télédétection, de nombreux modèles d'échanges radiatifs ont été développés ces dernières années ; ils permettent de simuler la distribution directionnelle, spectrale et la polarisation des rayonnements réfléchis ou émis par les surfaces naturelles. Ils nécessitent tous une description de la structure du couvert (España-Boquera, 1997).

---

<sup>(1)</sup> *a et b (droite du sol) : concept utilisé en télédétection pour caractériser la réponse radiométrique du sol de façon simple dans un repère XS2, XS3. En effet en première approximation, la réponse radiométrique du sol, mesurée sur plusieurs journées, se déplace sur une droite en fonction de l'humidité de surface et de la rugosité. La droite du sol est attachée à un lieu géographique. Si l'on change de type de sol, les coefficients a et b changent car ils dépendent des propriétés optiques des matériaux.*

Les modèles d'échanges radiatifs sont répertoriés et classés en cinq catégories (Lemeur & Blad, 1974 ; Goel, 1988 ; Bégué, 1991 ; Ivanov, 1994 ; España-Boquera, 1997). Ils diffèrent principalement par la manière dont la structure du couvert est décrite.

✓ *Modèles en milieu diffusant*

Ce sont des modèles qui s'appuient sur l'hypothèse d'homogénéité du couvert, dont le support est infiniment étendu et sur une répartition aléatoire des surfaces foliaires. Les feuilles sont lambertiennes et de propriétés optiques identiques.

*Les modèles en milieu diffusant présentent l'avantage d'être simples et inversibles, mais ils sont limités aux applications en milieu homogène uniquement.*

✓ *Modèles statistiques ou de milieu dits "turbides"*

La végétation est décrite au moyen de distributions statistiques des différents éléments dans l'espace (Verhoef, 1984 ; Kuusk, 1994). Les feuilles, éléments prépondérants du couvert, sont assimilées à de petites particules qui transmettent ou absorbent le rayonnement ; elles sont supposées opaques. La position des particules est décrite par des fonctions statistiques. D'une manière générale, ces modèles se fondent sur la notion de fréquence de trous.

*Les modèles statistiques sont très coûteux en temps de calcul ; pour une description correcte de la structure du couvert, ils demandent un nombre considérable de paramètres, dont certains sont difficiles à mesurer directement sur le couvert, car ils sont issus de simplifications nombreuses qui rendent leur signification physique délicate. Ce sont donc des paramètres qu'il faut essayer d'ajuster au mieux : tels que les paramètres de hot-spot, d'agrégation ou de dispersion, ou encore l'angle moyen d'inclinaison (España-Boquera, 1997).*

✓ *Modèles géométriques*

Dans ces modèles, la plante est un objet de forme géométrique (cylindre, sphère...) et on représente son enveloppe le long du rang par une fonction simple. Les plantes sont formées d'un ensemble d'éléments opaques. Ces modèles permettent de générer des peuplements et de simuler l'interception du rayonnement. Le rayonnement est intercepté, diffusé ou réfléchi par un milieu dont on a prédéfini et homogénéisé la structure. De plus le rayonnement reçu par le couvert ne contient pas de rayonnement diffusé par les objets constituant le peuplement.

*Les modèles géométriques décrivent relativement bien la structure à l'aide d'un ensemble d'objets géométriques simples ; mais leur défaut réside dans la difficulté de caractériser les propriétés optiques de ces objets, en particulier la transmittance. Un modèle géométrique créé pour un peuplement donné ne peut être adapté à un autre peuplement végétal, sauf si l'on reconsidère l'ensemble des équations de calcul pour les simulations. Enfin, ils ne permettent pas d'étudier finement les échanges radiatifs à l'intérieur du couvert.*

✓ *Modèles hybrides*

Le couvert est représenté par des enveloppes géométriques (cylindre, sphère...) ; les lois d'échanges radiatifs en milieu diffusant sont appliquées à l'ensemble du couvert, mais en revanche, les diffusions multiples à l'intérieur du couvert sont prises en compte.

*Les modèles hybrides considèrent le couvert comme un milieu turbide formé d'objets géométriques simples ; ils sont très lourds et nécessitent un grand nombre de paramètres dont certains sont difficiles à obtenir.*

✓ *Modèles tridimensionnels*

Ce sont les plus complexes, mais potentiellement les plus précis (Prévoit *et al.*, 1991). Maquettes informatiques, ils servent à étudier comment le rayonnement incident interagit avec la structure, sur la base d'algorithmes fondés sur la méthode de lancer de rayons (exemple ARARAT, Lewis & Muller, 1990), ou la méthode des radiosités (Chelle, 1997). Ils nécessitent obligatoirement une représentation en 3D du couvert. Ils sont fondés sur une géométrie explicite et réaliste.

La simulation fait appel à plusieurs disciplines : botanique, agronomie, mathématiques et informatique. À partir de règles de croissance des plantes, ces maquettes informatiques permettent de construire des couverts ayant une structure très proche de la réalité : l'orientation des organes des plantes, leur forme, leur arrangement sont décrits de manière réaliste. L'avantage de ces maquettes est de pouvoir générer rapidement des peuplements végétaux de différentes complexités et de simuler l'interaction Végétation-Rayonnement incident. La maquette 3D permet d'estimer des variables difficiles à obtenir directement tels que l'indice foliaire, l'orientation des feuilles, les fractions de trous (Chen *et al.*, 1993, 1994, *in* España-Boquera, 1997), le taux de couverture du sol et la réflectance (Lewis, 1996).

*La construction de maquettes informatiques nécessite beaucoup de variables d'entrée, issues de mesures sur les plantes réelles. La partie programmation informatique est lourde. Cependant la méthode du lancer de rayons est considérée comme une méthode de référence pour le calcul de la réflectance.*

### *3.3.2. Choix du modèle 3D et objectifs attendus*

Dans les paragraphes qui suivent on appellera "*structure du couvert*" l'ensemble des paramètres qui définissent :

- La forme et la dimension des organes (feuilles, tiges),
- L'arrangement des organes dans l'espace,
- Les propriétés optiques.

Les modèles de transfert radiatifs se fondent sur un ensemble d'hypothèses faites implicitement ou explicitement sur la structure du couvert végétal. Ils fournissent généralement de bonnes estimations des flux quand ces hypothèses sont vérifiées. Mais en dehors de ces hypothèses, les réponses des modèles peuvent être très différentes des flux radiatifs réels (España-Boquera, 1997).

Dans le cas du blé d'hiver, l'utilisation d'hypothèses générales sur la structure du couvert quelles que soient les phases de développement et les conditions de culture ne peut donner de bonnes estimations de flux des échanges radiatifs. En effet, comme nous l'avons signalé au § 3.2., la structure du couvert de blé d'hiver connaît une évolution importante au cours du développement de la culture et des variations dues à la diversité des techniques culturales.

Il serait, par conséquent, difficile de bien estimer les relations entre le LAI, le taux de couverture et les indices de végétation à partir de modèles basés sur des hypothèses fortes en ce qui concerne la structure géométrique, laquelle conditionne les échanges radiatifs. Or, la structure est en continuelle transformation, principalement au voisinage du stade "épi 1 cm".

La seule manière exhaustive de prendre en compte toutes les causes de variabilité de la structure du couvert est de construire un modèle de couvert qui rende compte des degrés de liberté de la géométrie à l'échelle de la plante individuelle. En particulier, il s'agit de rendre compte de l'insertion des feuilles sur les tiges et de la position des talles et du maître-brin dans l'espace. Ainsi, il devrait être possible de prendre en compte les caractéristiques variétales et de tester le rôle que jouent les différents paramètres, ce qui suppose qu'on puisse disposer d'un système de mesure des caractéristiques géométriques bien adapté au cas du blé. Le défi réside dans le fait de construire un modèle 3D réaliste avec un nombre réduit de paramètres mesurés directement sur des échantillons de plantes.

Pour pouvoir estimer les échanges radiatifs à différentes dates d'observation du stade début tallage jusqu'au début de la montaison, dans des conditions culturales très variées, nous avons préféré utiliser un modèle informatique tridimensionnel 3D, malgré la complexité de la réalisation d'un tel modèle. En effet, la modélisation 3D part de données réelles, c'est-à-dire que la description de la structure géométrique, qui est un élément majeur dans la variation des relations LAI/Indicateurs, est décrite non pas par des formes géométriques simples prédéfinies, mais à partir d'une description réelle de la plante. La maquette 3D permet la simulation des couverts hétérogènes, ce qui est important pour une estimation du LAI de couverts peu denses ou jeunes. Elle permet d'identifier les paramètres de structure influencés par la variété, la densité, la date de semis et la date d'observation (stades).

*L'utilisation d'un modèle d'échange radiatif qui s'appuie sur une représentation réaliste de la structure du couvert de blé d'hiver (maquette 3D) à différents stades de développement, permet d'établir des relations entre les caractéristiques du couvert et leur réponse radiométrique, en fonction de la variation de la structure du couvert. En particulier, pour l'estimation du LAI à partir d'un indicateur, on souhaite pouvoir construire des abaques des relations LAI/Indicateurs, sous différentes conditions agronomiques : densité, variété et date de semis.*

### **3.3.3. Méthodologie de la modélisation tridimensionnelle du couvert du blé d'hiver**

La modélisation des couverts végétaux nécessite trois étapes : la caractérisation géométrique du couvert, la modélisation du développement et de la biomasse et le choix de la représentation des surfaces (feuilles) et des volumes (tiges). Les principales difficultés résident surtout dans la première étape.

#### **3.3.3.1. Méthodes de caractérisation géométrique de la structure**

La modélisation des caractéristiques géométriques du couvert doit s'appuyer sur une description précise de celles-ci. Il existe différentes méthodes de description du couvert végétal.

##### **✓ Les méthodes directes**

Elles consistent à faire des mesures sur la plante elle-même. Pour l'estimation de la surface foliaire, on dispose de méthodes classiques telles que la planimétrie, la pesée d'éléments préalablement déshydratés... En ce qui concerne les mesures d'orientation des feuilles, on fait appel au clinomètre et à la boussole (azimut). Il s'agit là de mesures très fastidieuses. Il existe aussi des méthodes plus globales qui combinent la longueur, la surface et la position des organes. Citons :

- La méthode des silhouettes (maïs)(Bonhomme & Varlet-Grancher, 1978)
- La digitalisation 3D (Lang, 1973)
- La photogrammétrie, proposée initialement pour décrire le couvert de maïs (Boissard, 1985 ; Ivanov *et al.*, 1994, 1995)

✓ *Les méthodes indirectes*

Elles proposent une description indirecte de la structure à partir de la mesure de caractéristiques globales du couvert. Andrieu & Baret (1993) ont écrit une synthèse sur ces méthodes. La mesure de la fréquence des contacts entre une sonde et les éléments du couvert permet d'estimer l'indice foliaire et la distribution angulaire des feuilles (Méthode des Points Quadrats, Warren-Wilson, 1960). Des hypothèses sur la distribution des angles d'inclinaison des feuilles sont fréquemment faites (par exemple : distributions sphérique ou conique). La mesure de la fraction de trous dans le couvert à partir de la photographie est plus simple à réaliser que la mesure de la fréquence des contacts. Cependant, l'hypothèse de l'homogénéité horizontale des strates est nécessaire pour l'interprétation des résultats. Enfin la mesure de la réflectance est un moyen commode d'acquérir des données sur le couvert. Mais l'extraction de paramètres de structure à partir des données pose le problème de l'inversion du modèle direct de la réflectance, ce qui n'est pas résolu dans le cas général. Ces méthodes ne considérant pas l'architecture détaillée du couvert, elles ne fournissent, par conséquent, pas une description proche de la réalité. Leur utilisation ne permet d'obtenir qu'une information globale sur la structure du couvert et ne répondent donc pas à nos objectifs.

3.3.3.2. *Modèle de description de la structure*

Il existe différents modèles 3D qui décrivent la culture de maïs (Prévot *et al.*, 1991 ; Fournier & Andrieu, 1997). Par contre, il n'existe pas de modèles pour décrire la structure du blé. Pour simuler la croissance et le développement de la culture, plusieurs modèles dynamiques ont été proposés et peuvent être couplés avec les modèles de description de la structure (Goel, 1991) : citons la méthode des L-Systèmes (Lindenmayer) qui s'appuie sur une description des étapes botaniques de la plante (Fournier & Andrieu, 1997). Cette approche est utilisée dans le modèle de P. Lewis (Lewis & Muller, 1990 ; Lewis, 1996) sur lequel se fonde en partie le modèle de blé que nous avons mis en oeuvre. Le principe consiste à écrire, sous une forme mathématique, la génération des organes de la plante ainsi que les embranchements des tiges et des feuilles. Pour modéliser la structure du blé d'hiver, on peut se baser sur le modèle botanique décrivant l'apparition des feuilles et des talles, que l'on peut réécrire sous forme d'axiomes (Helbert, 1996 ; Lewis, 1996). L'apparition des feuilles et des talles (Masle *et al.*, 1989) est liée au phyllochrone (somme de degrés-jours entre deux feuilles successives).

Le modèle de simulation de blé en 3D, qui sera utilisé dans ce mémoire, a été développé parallèlement à ce travail de thèse par Boissard *et al.* (1998) (INRA), en collaboration avec P. Lewis (University College London, Remote Sensing Unit). Les données de structure nécessaires au modèle 3D de blé ont été obtenues à partir de la méthode photogrammétrique développée en collaboration avec M. Chapron (École Nationale Supérieure de l'Électronique et de ses Applications, ENSEA/ETIS, Cergy). Cette approche a été testée sur maïs (Boissard, 1985 ; Ivanov *et al.*, 1994-95) et sur millet et betterave (Lewis, 1996). L'application de la photogrammétrie a été généralisée au cas du blé et a fait l'objet d'une publication (Valéry *et al.*, 1998). Nous nous sommes appuyée principalement sur les algorithmes des modèles de

## *Problématique et Méthodes*

description de la structure développés sur maïs (Ivanov, 1994) et sur millet et betterave (Lewis, 1996).

Le modèle décrit d'une façon dynamique la géométrie de la culture du stade tallage jusqu'au stade début montaison. Couplé au *Botanical Plant Modelling System* (BPMS) (Lewis, 1996), il permet de calculer le taux de couverture et la réflectance multibandes pour un indice foliaire donné.



## **CHAPITRE 2.**

### **DÉMARCHE ADOPTÉE**

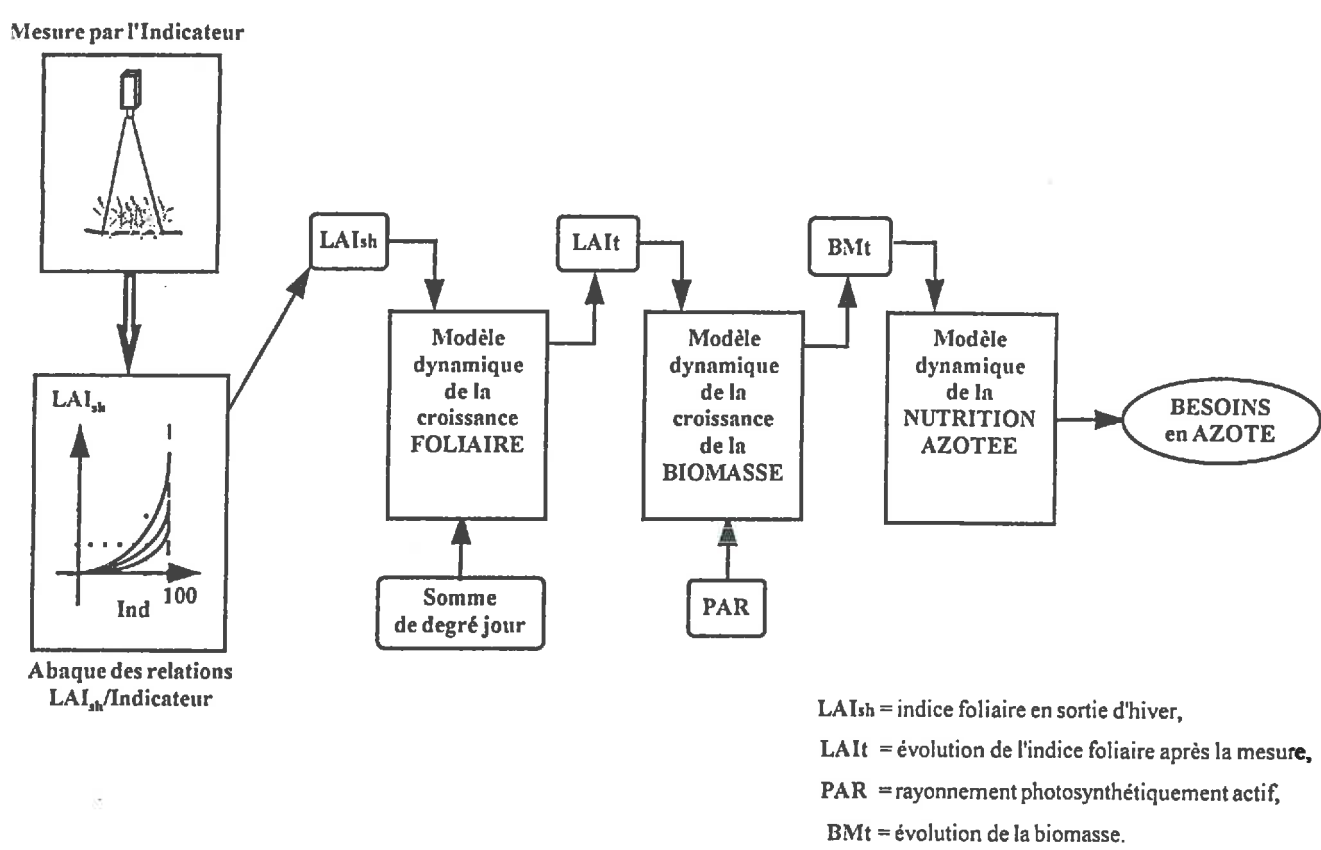


Figure I-2.1. Organigramme du modèle d'estimation des besoins en azote

La procédure d'estimation des besoins en azote d'un peuplement de blé, résumée dans l'Organigramme de la *Figure I-2.1*, comprend deux temps :

- 1) *L'estimation de l'indice foliaire formé à la sortie de l'hiver à partir de la mesure du recouvrement du sol ou de la réflectance de la végétation*
- 2) *La prévision de la croissance potentielle à partir de la connaissance du LAI initialement formé à la sortie de l'hiver ; la donnée de cette croissance permet d'estimer les besoins en azote nécessaires à son obtention.*

La mise au point des modèles relatifs à chacun des deux temps de cette procédure constitue les deux chapitres de la partie "*Résultats*" de ce mémoire.

## **A. ESTIMATION DE L'INDICE FOLIAIRE À LA SORTIE DE L'HIVER, À PARTIR DE LA MESURE D'INDICATEURS : TAUX DE COUVERTURE (TC) ET RÉFLECTANCE RADIOMÉTRIQUE (TSAVI)**

Pour estimer le LAI à partir de ces deux indicateurs, pour différentes techniques culturales, il nous a semblé nécessaire de passer par une **caractérisation tridimensionnelle du couvert du blé au stade tallage**.

L'objectif attendu de la modélisation en 3D du couvert de blé est de pouvoir construire des abaques des relations LAI-Indicateurs sous différentes conditions culturales. Pour élargir les relations à de nouvelles techniques culturales (par exemple, nouvelles variétés), le nombre de paramètres nécessaires à la modélisation 3D du peuplement de blé doit être limité. Il faut donc déterminer les paramètres de la structure les plus pertinents pour les relations.

Le modèle 3D étant issu d'un travail d'équipe, dans lequel notre contribution est restée mineure, notre recherche personnelle a été centrée sur trois points :

- 1) La paramétrisation du modèle de description de la structure pour différentes variétés, densités et dates de semis.
- 2) Une analyse de l'influence de ces techniques sur les paramètres de la structure.
- 3) Une validation des sorties de la maquette 3D : estimation des variables LAI et indicateurs pour différents peuplements.

### **1. Paramétrisation du modèle de structure 3D**

La construction de la maquette s'est faite en trois temps.

- ✓ Premier temps. On recherche quels sont les **principaux paramètres géométriques** qui permettent de décrire un plant de blé : c'est la *phase de caractérisation statique du peuplement de blé*. Elle consiste à paramétrer la géométrie du blé, dans le but d'extraire les principaux paramètres qui permettent de décrire le plant de blé. *Cette phase sera établie sur une variété (Soissons), une densité (150 pl/m<sup>2</sup>) et une date de semis (précoce).*

- ✓ Deuxième temps. Nous avons cherché à comprendre comment évoluent ces paramètres de structure au cours du temps : c'est la *phase de caractérisation dynamique du peuplement*, de façon à modéliser les fonctions d'évolution et en déduire des lois.  
*L'étude porte sur une seule variété (Soissons), une densité (150 pl/m<sup>2</sup>) et une date de semis (précoce), sur plusieurs dates d'observations au cours du temps. Une fois les modèles et les lois d'évolution établies, nous les appliquerons à d'autres variétés, densités et dates de semis.*
- ✓ Troisième temps. On cherche à reconstituer un peuplement de blé à partir d'un ensemble de plantes individuelles : c'est la *phase de reconstruction d'un peuplement de blé*.  
*À partir de ce peuplement nous simulerons les variables de sortie du modèle 3D : taux de couverture, réflectance et LAI.*

## 2. Analyse de l'influence des techniques culturales sur les paramètres de la structure

Une fois définis les paramètres de structure ainsi que les lois qui décrivent leur évolution au cours du temps, on cherche à savoir quel est l'effet des techniques culturales sur ces paramètres. Le but est de comprendre de quels facteurs agronomiques (variété, densité et date de semis) dépend réellement la structure. En d'autres termes : *les paramètres de structure varient-ils d'une manière significative quand on change l'un des facteurs agronomiques cités ci-dessus ?*

Pour analyser l'effet des techniques culturales sur les paramètres, nous avons étudié comment varient les paramètres d'un génotype à l'autre (trois variétés à une densité, une date d'observation), selon les densités de plantes au mètre carré (trois densités, une variété et une date d'observation) et selon les dates de semis (une variété et une densité en précoce et tardif).

## 3. Validation des sorties de la maquette 3D

On vérifie si la maquette 3D simule correctement les variables LAI et indicateurs pour l'ensemble des variétés, en densité 150 pl/m<sup>2</sup>, semis précoce, et à différentes dates d'observation en sortie d'hiver. Cela consiste à simuler les variables LAI sortie hiver, taux de couverture et TSAVI, puis à les confronter à des données mesurées. Enfin, on établira à titre d'exemple, des abaques d'estimation du LAI à partir des indicateurs et on les validera à partir des données mesurées correspondantes.

## **B. MODÉLISATION DYNAMIQUE DES BESOINS EN AZOTE À PARTIR DE LA CONNAISSANCE D'UNE SEULE VALEUR DE L'INDICE FOLIAIRE, PEU APRÈS LA SORTIE DE L'HIVER**

L'estimation des besoins en azote à partir d'une seule valeur d'indice foliaire se fait en deux étapes.

### ✓ *Étape 1 : Modélisation de la biomasse potentielle à partir d'une seule valeur de l'indice foliaire*

Le modèle doit être capable de prédire la dynamique de croissance de la biomasse potentielle permise par le rayonnement, les températures et l'état initial du couvert, quelles que soient la densité, la variété, les dates de semis et d'observation de l'état initial (avant le début de la montaison). Comme la modélisation se fonde sur le formalisme de Monteith (1972, 1977) (Équation 9), ceci nous conduira à examiner successivement :

#### *a) L'évolution de l'indice foliaire*

On cherchera à modéliser la cinétique d'évolution de l'indice foliaire jusqu'à la floraison, à partir de la connaissance d'une seule mesure de LAI sortie hiver, estimée comme on l'a dit dans la première partie. L'étude reposera sur l'ajustement d'une équation logistique (Cf. *supra*) à un jeu de données d'évolution d'indice foliaire, obtenues sur différentes variétés, densités et dates de semis. Les paramètres de la logistique seront ensuite modélisés en fonction d'informations potentiellement disponibles sur la culture : date des deux stades, variété et LAI mesuré en sortie d'hiver. Les prévisions d'évolution du LAI résultant de cette modélisation des paramètres seront évaluées sur un jeu de données indépendant.

#### *b) La modélisation de l'interception et transformation de la lumière en biomasse*

Concernant les modèles d'estimation de l'efficacité d'interception et le modèle d'estimation de la biomasse, dont les valeurs des paramètres sont fournies par la bibliographie et le plus souvent considérées comme stables ; on essaiera de vérifier si nos résultats sont conformes pour des densités faibles, étant donné l'objectif de raisonner la fertilisation des blés clairs.

### ✓ *Étape 2 : Estimation des besoins en azote à partir de la courbe critique de Justes et al (1994)*

Il n'a pas paru utile d'établir de références supplémentaires sur la courbe critique de la teneur en azote du blé, qui permet d'estimer les besoins en azote à partir de la connaissance de la biomasse.

À partir de l'étude de sensibilité du modèle global d'estimation des besoins en azote, on pourra juger des domaines de validité des différents modèles. On analysera la répercussion sur l'estimation des besoins en azote des différentes erreurs d'estimation faites sur les modèles successifs, principalement :

- Erreurs sur l'estimation de l'évolution de l'indice foliaire jusqu'à la floraison pour différentes dates d'observation.
- Erreurs sur l'estimation de la variable LAI fournie par le modèle 3D du blé.

### **Discussion générale**

*Nous discuterons pour terminer les principaux objectifs que nous avons atteints dans le cadre de cette thèse, les apports et les limites de notre travail, et son intérêt dans le cadre de l'agriculture de précision. Nous mettrons l'accent sur les perspectives ouvertes et sur les études qui restent nécessaires pour parvenir à un outil opérationnel.*

**CHAPITRE 3.**

**MATÉRIEL ET MÉTHODES**

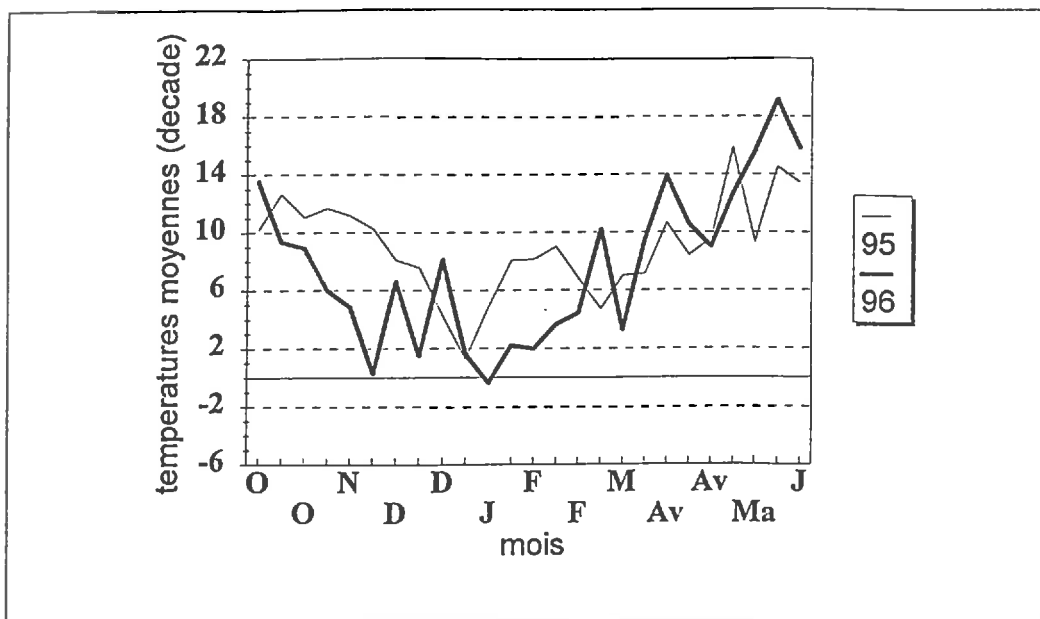


Figure I-3.1. Évolution des températures moyennes décadaires au cours des années 1995 et 1996

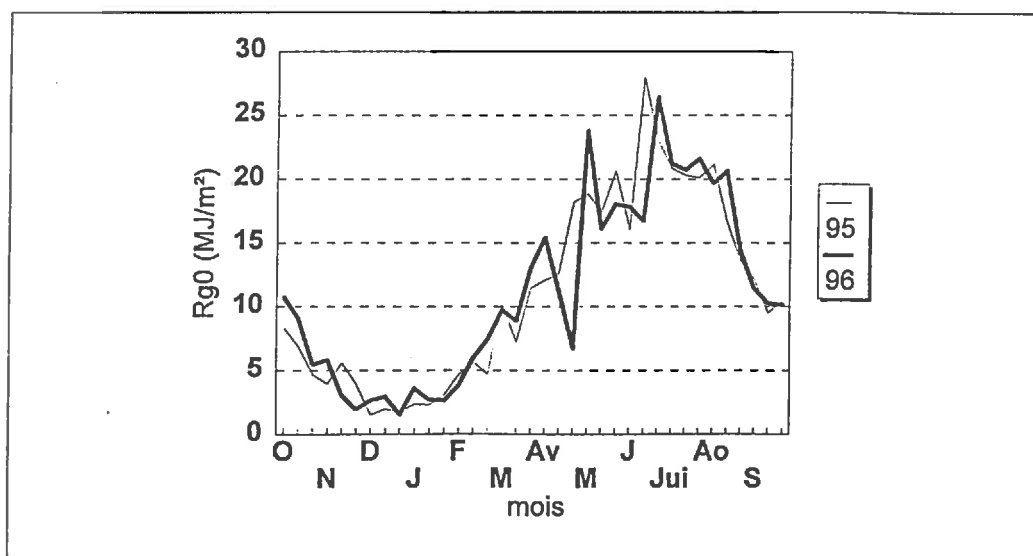


Figure I-3.2. Évolution des moyennes décadaires du rayonnement incident journalier au cours des années 1995 et 1996



Dans cette partie, seront présentées :

- **La description du dispositif expérimental (1)** qui a servi de base aux deux parties du mémoire.
- **L'estimation du LAI en sortie d'hiver à partir de l'évaluation précoce du Taux de Couverture (TC) ou de la réflectance radiométrique (TSAVI).** Les mesures spécifiques à cette première partie seront présentées en (2).
- **La méthodologie de description du couvert de blé en trois dimensions en (4).**
- **L'estimation de l'évolution de la biomasse potentielle au cours du cycle, à partir d'une seule observation du LAI en sortie d'hiver.** Les mesures spécifiques à cette deuxième partie sont en (3).

Successivement dans chaque chapitre, on détaille les protocoles de mesures et leurs variations entre les deux années d'essais, l'une consacrée à l'estimation des paramètres des modèles et l'autre à leur validation. Pour modéliser les relations entre le LAI en sortie d'hiver et les deux indicateurs TC et TSAVI respectivement, nous avons utilisé les données de 1995. L'essai de 1996 a servi à étudier la validation des relations. Pour la modélisation de la biomasse potentielle à partir de l'estimation du LAI en sortie d'hiver, l'essai 1996 a servi à l'élaboration du modèle et celui de 1995 à sa validation <sup>(1)</sup>.

## **1/ DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL**

### **1.1. Caractéristiques du site expérimental**

Les essais des années 1995 et 1996 ont été conduits à la station expérimentale de l'INRA à Grignon, qui se caractérise par un sol limono-argileux profond (sol lessivé sur limon loessique) et un climat de type tempéré océanique ; le précédent cultural était un maïs. Les données climatiques (température et rayonnement) utilisées sont issues de la station météorologique INRA de Grignon (station n° 7885002 sur le réseau "stefclim") :

Les deux années expérimentales ont été marquées par une nette différence des températures moyennes hivernales (*Figure I-3.1*), qui a eu une influence sur la mise en place du couvert et l'apparition des stades pour des dates de semis identiques. En 1995, les températures entre novembre et début février ont été beaucoup plus douces, ce qui a favorisé l'accroissement des surfaces foliaires ; le blé étant photopériodique, les dates de réalisation des stades de développement ont été peu influencées, mais à même stade de développement, le peuplement

---

<sup>(1)</sup> Pour obtenir une maquette 3D du couvert, le traitement des données de l'essai 1995 a demandé près de deux années de mise au point des programmes et des processus. Par manque de temps, nous avons choisi un lot de données représentatif des effets à mettre en évidence : effets de la variété, de la densité, de la date de semis. Ainsi en 1998, une petite partie des données images stéréoscopiques est exploitée (ce qui représente 120 plantes, soit 480 images), mais l'essentiel des paramètres de description du couvert a été obtenu. Les données 1996 sont disponibles pour une validation d'un effet année. Pour la modélisation dynamique de la biomasse potentielle, le dispositif et le protocole de mesure ont été améliorés la 2<sup>ème</sup> année, ce qui nous a conduit à utiliser les données de cette deuxième année, plus fiables pour l'élaboration des modèles.

avait subi une somme de températures beaucoup plus importante en 1995, et couvrait beaucoup plus le sol qu'en 1996.

Par contre, le rayonnement moyen incident en MJ.m<sup>2</sup> (nécessaire au calcul de l'Équation 11), entre les deux années d'essais ne montre pas de différence significative (Figure I-3.2).

## 1.2. Description du dispositif expérimental

Chaque traitement est conduit sur une parcelle de 30 m de long et sur une largeur composée par 9 rangs de semis espacés de 0.175 m. Des parcelles de garde sont ménagées en bordure des essais. Les traitements sont menés avec 3 blocs répétitions.

En 1995, à chaque traitement correspondent deux parcelles (deux trains de semoir) : l'une réservée aux prélèvements d'échantillons, l'autre aux mesures non destructives (télé-détection) et à la mesure du rendement. En 1996, toutes les mesures sont effectuées sur une seule parcelle, en gardant un tiers de la longueur des parcelles pour la mesure du rendement et de certaines de ses composantes (Annexe I-3.1).

Les suivis expérimentaux ont été effectués du stade 3 à 4 feuilles (1995) ou plein tallage (1996) jusqu'à la floraison.

## 1.3. Traitements expérimentaux

Pour les deux années d'essais, nous avons appliqué les mêmes traitements correspondant aux techniques culturales majeures qui conditionnent le potentiel de production de la biomasse et la structure du couvert.

### 1.3.1. Variétés

Le matériel végétal se compose de trois variétés : Soissons, Thésée et Pernel. Le choix des cultivars se base notamment sur la diversité des caractéristiques morphologiques qui influent sur la structure géométrique de la plante : forme, longueur, largeur, angle de port des feuilles et des talles, potentiel d'émission des talles .... Le Tableau I-3.1 récapitule les principales caractéristiques de structure des variétés utilisées.

*Tableau I-3.1 : Quelques caractéristiques affectant la vitesse de recouvrement du sol et l'architecture des variétés avant le stade début montaison (d'après nos observations sur le terrain et les bulletins de l'INRA-GEVES)*

<i>Variété</i>	<i>Forme et couleur des feuilles</i>	<i>Port des feuilles</i>	<i>Tallage</i>	<i>Recouvrement du sol</i>
Soissons	Fines et vert jaunâtre	½ dressé à ½ étalé	Fort	Moyennement couvrant
Thésée	Larges et vert foncé	½ dressé à ½ étalé	Moyen	Couvrant
Pernel	Petites, fines et vert pâle	Étalé	Moyen	Peu couvrant

### **1.3.2. Densités**

Pour couvrir une large gamme de densités et de taux de couverture du sol, chaque variété est semée à trois densités de peuplement au semoir de précision :

- deux densités faibles 70 et 150 plantes.m<sup>-2</sup> qui représentent des parcelles de blés clairs. Ces densités sont très inférieures à celles recherchées par les agriculteurs.
- une densité normale 350 plantes.m<sup>-2</sup> pour le semis précoce et 450 plantes.m<sup>-2</sup> en semis tardif.

### **1.3.3. Dates de semis**

Les traitements variété-densité sont conduits à deux dates de semis :

- un semis précoce (17 et 18 octobre en 1995 et en 1996 respectivement)
- un semis tardif (18 et 19 novembre en 1995 et en 1996 respectivement).

### **1.3.4. Nomenclature des traitements**

Les traitements expérimentaux seront désignés dans la suite du mémoire par l'association "Variété (Soissons, Thésée, Pernel) ; Densité (70, 150, 350) ; Date de semis (précoce ou tardif)". Par exemple : "*Soissons 150 précoce*".

## **1.4. Conduite des essais**

Dans le but de paramétrer l'ensemble des modèles dans des conditions nutritionnelles et parasitaires non limitantes, des précautions ont été prises pour éviter tout stress pouvant dépendre d'autres facteurs non étudiés dans le cadre de notre travail.

### **1.4.1. Irrigation**

Pour éviter les effets d'un stress hydrique sur l'expression des potentiels des peuplements de blé étudiés, un réseau d'irrigation par goutte à goutte a été mis en place dès la fin du mois de mars. Le déclenchement de l'irrigation est commandé par une série de tensiomètres situés à 40 cm de profondeur du sol (apport de 18 à 20 mm chaque fois que le potentiel hydrique est descendu au-dessous de - 30 centibars).

### **1.4.2. Fertilisation azotée**

#### **1.4.2.1. Analyse des reliquats en sortie d'hiver**

Pour calculer la dose d'azote à apporter, sur la base de la méthode du bilan prévisionnel, nous avons effectué des mesures des reliquats en sortie d'hiver (au mois de février). Quatre échantillons sont prélevés aléatoirement dans chaque bloc sur trois profondeurs (0-30, 30-60, 60-90 cm) et mélangés avant extraction au KCl normal. Les ions NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et NH<sub>4</sub><sup>+</sup> sont analysés par colorimétrie. La moyenne des reliquats azotés sur 90 cm est de 33 kg.ha<sup>-1</sup>, en 1995 et de 26 kg.ha<sup>-1</sup> en 1996.

1.4.2.2. Apports d'engrais

Pour éviter une carence, même temporaire, en azote sur l'ensemble des traitements, nous en avons apporté une quantité suffisamment importante. Les doses sont calculées pour un objectif de rendement de X q/ha et fractionnées en deux apports : un premier apport (60 Kg/ha) au début du mois de mars et un second (le restant de la dose) au stade "épi 1 cm". Un suivi de l'indice de nutrition azotée (non illustré) a permis de vérifier que l'azote n'était pas limitant sur l'essai.

Date calendaire	Semis	Stade	Traitements Prélevés	
			Protocole multidates	Protocole monodate
09/12/94 23/01/95 17/02/95 06/03/95 29/03/95	<i>Précoce</i>	3 à 4 feuilles 1 à 2 talles Reprise du tallage Plein tallage Alentours "épi 1 cm"	Soissons 150 p.m <sup>-2</sup> <i>idem</i> <i>idem</i> <i>idem</i>	Tous les traitements
19/12/94 30/01/95 27/02/95 13/03/95 04/04/95	<i>Tardif</i>	3 à 4 feuilles 1 à 2 talles Reprise du tallage Plein tallage Alentours "épi 1 cm"	Soissons 150 p.m <sup>-2</sup> <i>idem</i> <i>idem</i> <i>idem</i>	Tous les traitements

Tableau I-3.2-a. Date des prélèvements monodate et multidates utilisés pour la construction de la maquette 3D, et la mesure de l'indice foliaire jusqu'au début montaison (expérimentation de 1995)

Date calendaire	Semis	Stade	Traitements prélevés Protocole monodate
11/03/96	Précoce	Plein tallage	Tous les traitements
18/03/96	Tardif	Plein tallage	Tous les traitements

Tableau I-3.2-b. Date des prélèvements monodate et multidates utilisés pour la construction de la maquette 3D, et la mesure de l'indice foliaire jusqu'au début montaison (expérimentation de 1996)

### **1.4.3. Traitements phytosanitaires**

Pour éviter tout risque d'infestation, pouvant altérer l'expression du potentiel de production de la biomasse, on a conduit les essais en traitements systématiques tout au long du cycle. Des traitements herbicides et insecticides ont été réalisés dès l'apparition des ennemis des cultures. Les traitements fongicides ont été réalisés préventivement avec des produits polyvalents. Les observations en cours de cycle ont permis de vérifier que les maladies, parasites et mauvaises herbes étaient bien contrôlés.

## **2/ MESURES DU TAUX DE COUVERTURE ET DE LA RÉFLECTANCE**

### **2.1. Dates de mesure et mode d'échantillonnage**

Pendant la période sortie d'hiver-stade "épi 1 cm", les mesures de la réflectance et du taux de couverture ont été réalisées parallèlement à des mesures d'indices foliaires (Cf. Matériels et Méthodes, §. 3) et des photographies stéréoscopiques (Matériel et Méthodes, §. 6). Ce paragraphe présente les modalités de choix des dates et placettes pour ces différentes mesures pendant cette période.

#### **2.1.1. Dates de mesure**

Plutôt que de suivre au cours du temps la totalité des traitements, nous avons choisi de combiner deux stratégies de prélèvements et de mesures :

- des prélèvements à différentes dates effectués sur une variété et une densité de chaque date de semis,
- des prélèvements à une date unique effectués sur les autres variétés et densités.

##### **2.1.1.1. Échantillonnages multidates sur les essais 1995 et 1996**

Les prélèvements faits à différents stades de développement, appelés **prélèvements multidates**, ont permis de suivre l'évolution, au cours du temps, des variables de recouvrement du sol, réflectance radiométrique du couvert, de leurs relations avec le LAI en sortie d'hiver et de la variation de la structure au cours du temps. Ils ont été réalisés sur les traitements "Soissons 150 précoce et tardif" avec une fréquence de prélèvement de 200 degrés-jours environ (fonction des conditions climatiques) à partir du stade 3 à 4 feuilles en 1995 et plein tallage en 1996 jusqu'au début montaison (*Tableau I-3.2 a et b*).

Sur l'essai 1996, pour mieux observer l'effet des variétés sur l'estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver, les mesures multidates de recouvrement du sol et de radiométrie ont été étendues aux traitements "Thésée 150 et Pernel 150" (précoce et tardif).

##### **2.1.1.2. Échantillonnage monodate sur les essais 1995 et 1996**

Le prélèvement monodate a été réalisé au stade plein tallage, dans le but de mesurer :

- les paramètres qui décrivent la structure et la biomasse,
- l'indice foliaire ; des mesures de taux de couverture et de réflectance ont été réalisées aux mêmes dates.

### **2.1.2. Relations entre les mesures de proxidtection et les mesures d'indice foliaire**

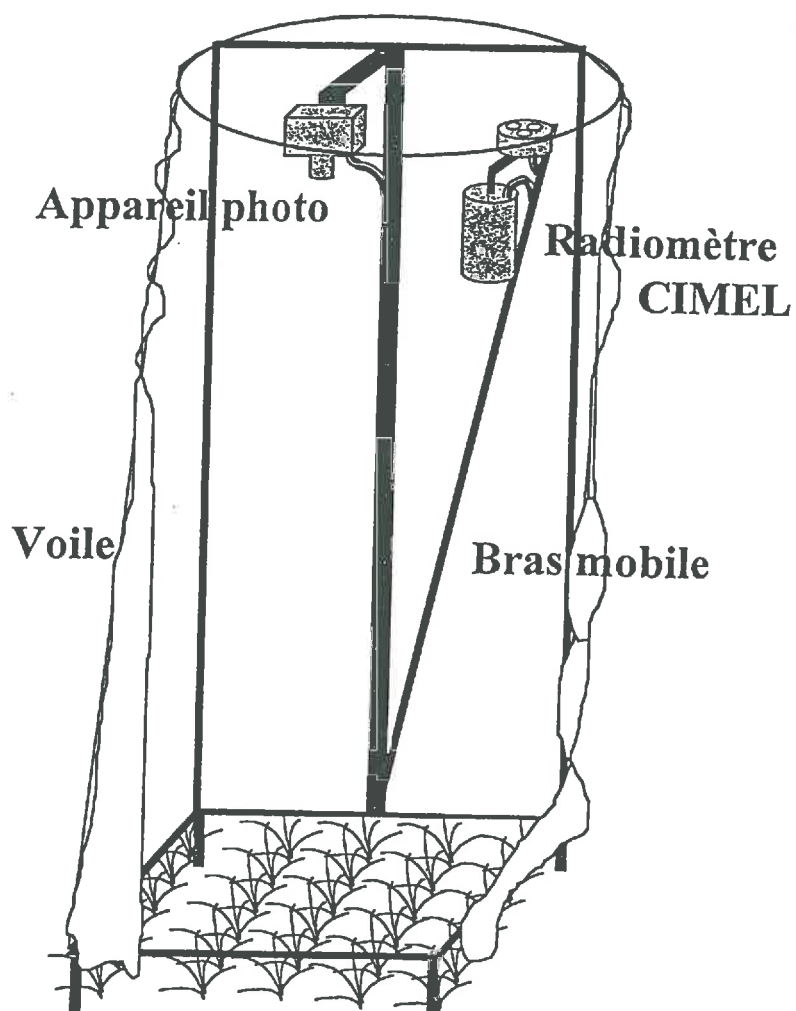
Le protocole d'échantillonnage diffère entre les deux années expérimentales. En 1995, les mesures de taux de couverture et de réflectance d'une part, et d'indice foliaire (LAI) d'autre part, sont faites sur des placettes différentes. Dès le début de l'expérimentation, nous avons défini trois placettes par placette élémentaire pour les saisies de l'ensemble des photographies et des mesures radiométriques, tandis que les prélèvements destructifs pour les mesures de LAI sont effectués sur d'autres placettes. Ce protocole peut être une source de discordance entre les mesures de LAI effectuées au planimètre et celles de Taux de Couverture du sol et de réflectance radiométrique.

En 1996, pour éviter ce problème, les trois variables (Taux de Couverture, réflectance radiométrique et LAI) sont estimées sur la même placette, pour un prélèvement donné. Les mesures de LAI étant destructives, une nouvelle placette a été le support de ces trois mesures à chaque date.

## **2.2. Mesure du Taux de Couverture (TC %)**

### **2.2.1. Saisie par photographie du couvert de blé**

La saisie des photographies du couvert de blé a été faite à la verticale, à 2 m au-dessus de la végétation à l'aide d'un appareil motorisé muni d'un zoom de 50 à 100 mm de focale. Les photographies sont réalisées sur des placettes de 0.75 m x 0.50 m, délimitées par un cadre métallique coloré, permettant de saisir 4 rangs de 0.5 m de longueur. Pour éviter le problème que pose l'ombre portée sur le sol, nous avons entouré le dispositif de mesure d'un voile diffusant (*Figure I-3.3*).



*Figure I-3.3. Dispositif de saisie de photographies pour la mesure du Taux de Couverture du sol et saisie radiométrique de la réflectance*

### 2.2.2. Estimation du Taux de Couverture par l'analyse d'image

Le Taux de Couverture, exprimé en pourcentage, est le rapport de la surface de la végétation sur la surface de sol. Il est calculé par la méthode de numérisation des diapositives de l'unité de traitement d'image de la Station de Bioclimatologie INRA de Grignon (MATRA CAP SYSTEME-MICROPERICOLOR 3400) équipée d'une caméra de numérisation (SONY - XC007P) trichrome munie de filtres standard (KODAK) dont la résolution permet un format de 512 x 350 pixels. On utilise l'histogramme à deux dimensions avec le canal rouge en "axe x" et le canal vert en "axe y". Cette procédure nous donne un nuage de points qui doit être séparé visuellement en deux entités, l'une nous donne la classe du sol et la seconde la classe de la végétation.

### 2.3. Mesure de la réflectance radiométrique

Parallèlement aux mesures de taux de couverture, nous avons fait sur les mêmes placettes et aux mêmes dates d'observation des mesures de réflectance avec un radiomètre <sup>(1)</sup> SPOT (Guyot *et al.*, 1983) placé à 2 m à la verticale au-dessus de la végétation. Pour éviter le problème d'ombrage sur le sol et le couvert, nous avons travaillé en condition de rayonnement diffus (même dispositif que pour la photographie, *Figure I-3.3*). Les mesures sont toujours faites aux alentours du midi solaire. La surface couverte par la mesure, compte tenu de l'angle d'ouverture de 12° des objectifs, représente environ un cercle de 0.45 m de diamètre au sol, donc légèrement plus petit que la photographie numérisée. Les trois canaux sont ceux utilisés par SPOT, dont les longueurs d'ondes sont : pour XS1, 500 - 600 nm ; XS2, 600 - 700 nm ; XS3, 750 - 950 nm. Ce radiomètre est constitué de deux têtes (luminance et éclaircissement). La lecture est faite sur un boîtier électronique fournissant directement la valeur de réflectance (rapport des deux signaux : luminance/éclaircissement) présentée sur une échelle numérique 0 - 1999. Ces mesures sont enregistrées sur une centrale d'acquisition de données (CAMPBELL).

#### 2.3.1. Étalonnage par mesure de surfaces de référence

La méthodologie consiste à mesurer la réponse du radiomètre dans trois cas:

- un signal nul 0 % obtenu par l'obturation de la tête de luminance (offset de l'électronique de mesure),
- une surface blanche (NEXTEL <sup>(2)</sup>) : XS1 = 83.9 %, XS2 = 83.5 %, XS3 = 78.7 %,
- une surface grise (SAVAGE <sup>(3)</sup>): XS1 = 23.0 %, XS2 = 23.5 %, XS3 = 38.7 % .

Ces deux dernières surfaces sont des cibles dont on connaît la réflectance exacte pour chacun des canaux (réflectance mesurée par spectrophotométrie). Elles ont été utilisées pour étalonner le radiomètre. Pour déterminer la relation d'étalonnage permettant de passer de la lecture du cadran pour un canal à la valeur de réflectance correspondante, on utilise une approximation linéaire entre les trois points de réflectance ci-dessus mentionnés. On établit l'équation des trois droites d'étalonnage et on estime l'incertitude sur les coefficients.

---

<sup>(1)</sup> Radiomètre CIMEL simulant SPOT dans les longueurs d'ondes du Vert, Rouge et du Proche Infrarouge (PIR)

<sup>(2)</sup> NEXTEL : peinture blanche à réflectance lambertienne

<sup>(3)</sup> SAVAGE Paper Product : THUNDERGRAY (papier cartonné gris moyen)



### **2.3.2. Mesure de la réflectance du couvert végétal**

La surface couverte par la mesure représente environ trois rangs de blé. Le nombre de mesures sur la même placette varie de 3 à 5 selon la stabilité des valeurs affichées.

### **2.3.3. Mesure de la réflectance du sol**

Pour tracer la droite du sol, nous avons fait des mesures sur sol nu. Le protocole est réalisé à l'aide de deux placettes traitées au désherbant : l'une rugueuse laissée à l'état de labour, l'autre tassée et aplanie. Ces placettes sont clôturées pour éviter tout piétinement. Les mesures sont faites à la même date que celles du couvert et selon les mêmes modalités.

### **2.3.4. L'indice de végétation utilisé : le TSAVI**

Pour atténuer l'effet du sol sur la réponse spectrale du système sol-couvert, nous avons choisi le TSAVI comme indice de végétation parmi les indices existants. Effectivement, dans le domaine où le LAI est inférieur à 4, cet indice est le moins sensible à l'effet du sol (Baret & Guyot, 1991).

## **3/ MESURE DE L'INDICE FOLIAIRE ET DE LA BIOMASSE AÉRIENNE**

### **3.1. Mode d'échantillonnage des placettes**

Pour les deux années d'essais, les prélèvements en vue de la mesure des surfaces foliaires ont été effectués sur deux placettes de 0.175 m<sup>2</sup> (0.5 m de long sur deux rangs d'interligne de 0.175 m) pour chaque bloc. Le suivi de la cinétique d'évolution de l'indice foliaire a été poursuivi jusqu'au stade floraison – voir *infra*).

Au cours de la première année (1995), les placettes successives ont été prélevées en avançant dans la parcelle, deux prélèvements étant séparés par une distance de 0.5 m. Au début du cycle, le nombre de prélèvements différait selon les traitements (Cf. § 1). À partir du début montaison, les prélèvements s'effectuent toutes les semaines pour les traitements Soissons 350 et 70 p.m<sup>2</sup>, et tous les quinze jours pour les autres traitements. Ce protocole a conduit à une mauvaise répartition des points expérimentaux en fonction du temps (parfois il manquait des points dans les zones de courbure de la sigmoïde), ce qui a induit pour certains traitements une non-convergence du modèle d'évolution du LAI. De plus, pour un traitement donné, la densité de peuplement était très hétérogène d'une placette à l'autre, ce qui a engendré un bruit dans l'estimation des paramètres du LAI.

Ces défauts ont été corrigés en 1996. Les placettes à prélever ont été préalablement sélectionnées : suite à un comptage de plantes en sortie d'hiver sur des placettes délimitées, on a éliminé toutes celles qui présentaient un nombre de plantes éloignées de la moyenne (placettes à densité trop forte ou trop faible). Les prélèvements (*Figure I-3.4*) ont été répartis ainsi :

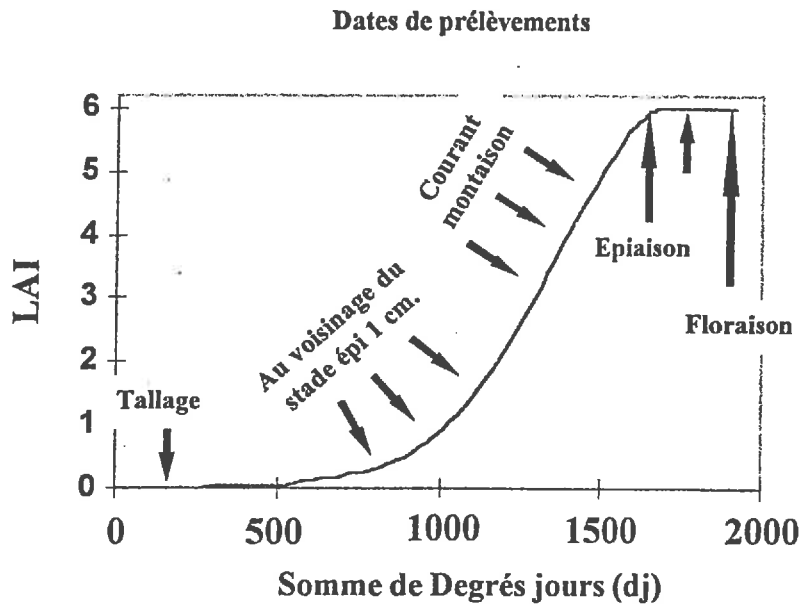


Figure I-3.4. Répartition des dates de mesure du LAI en 1996

Tableau I-3.3 Dates de prélèvement de l'indice foliaire et de la biomasse (expérimentation de 1996)

<i>Dates de semis</i>	<i>Dates calendaires</i>	<i>Degrés-Jours</i>
<i>Précoce</i>	04/03/96	522
	11/03/96	554
	27/03/96	681
	09/04/96	746
	22/04/96	907
	06/05/96	1059
	19/05/96	1187
	29/05/96	1316
	03/06/96	1397
	07/06/96	1484
<i>Tardif</i>	18/03/96	318
	02/04/96	423
	15/04/96	528
	29/04/96	714
	13/05/96	847
	27/05/96	1010
	03/06/96	1120
	07/06/96	1207

- 1 prélèvement au stade tallage
- 2 aux alentours du stade "épi 1 cm" (première zone de courbure)
- 4 en plein montaison (3 pour le semis tardif)
- 1 à l'épiaison (deuxième zone de courbure)
- 1 entre l'épiaison et la floraison (en semis précoce uniquement)
- 1 à la floraison

Les dates de prélèvement sont résumées dans le *Tableau I-3.3*.

### 3.2. Mesure de la surface foliaire par planimétrie

#### 3.2.1. Dépouillement des placettes et méthode d'échantillonnage

À chaque prélèvement et pour chaque traitement, l'ensemble des plantes de la placette a été classé suivant le nombre de tiges. On a constitué un sous-échantillon de plantes, tirées au hasard dans les lots des différentes classes de la placette proportionnellement à l'importance des lots ; le nombre de plantes de ce sous-échantillon a varié selon les dates et les traitements expérimentaux de manière à correspondre à environ quinze tiges (tiges et brins-mâtres), qui sont lavées, séparées de leurs racines et défoliées, en séparant les feuilles sèches et vertes.

#### 3.2.2. Mesure des surfaces foliaires

La surface des feuilles vertes est mesurée au planimètre optique <sup>(1)</sup>. Le cumul des surfaces foliaires est enregistré automatiquement à la fin de chaque échantillon. La surface foliaire obtenue est rapportée à la dimension de la placette en  $m^2 \cdot m^{-2}$ .

### 3.3. Mesure de la biomasse aérienne

L'ensemble des feuilles vertes, sèches, les 15 tiges et le restant de la placette sont enfermés séparément dans des sacs, puis séchés à 80 °C, pendant 48 heures. Par la suite, ces différents organes sont pesés isolément.

### 3.4. Calcul de l'indice foliaire

Le calcul de l'indice foliaire est basé sur le principe de la masse surfacique, qui consiste à rapporter la biomasse totale de la placette en  $g \cdot m^{-2}$  à la surface du sous-échantillon en  $m^2$ . Le calcul du LAI est fait comme suit :

- *Calcul de la masse surfacique sur le sous-échantillon composé de 15 tiges :*

$$M_{surf} (g \cdot cm^{-2}) = \Sigma MS(FS + FV + Tiges) / SF$$

avec :

MS	Matière sèche
FV	Feuilles vertes
FS	Feuilles sèches
SF	Cumul des surfaces des feuilles vertes

---

<sup>(1)</sup> Hitachi Denshi.ltd

- Calcul de la matière sèche totale sur l'ensemble de la placette :

$$\text{MST (g)} = \Sigma \text{ des MS [( des FS+ FV+Tiges)_{\text{des 15 tiges}} + \text{le reste de la placette}]$$

- Calcul de la matière sèche rapportée à la dimension en  $\text{m}^2$  de la placette prélevée :

$$\text{MS (g.m}^{-2}\text{)} = \text{MST} / 0.175$$

$$\text{LAI (m}^2 \cdot \text{m}^{-2}\text{)} = \text{MS (g} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} / \text{M}_{\text{surf}} \times 10^{-4}$$

### 3.5. Méthodes statistiques utilisées

#### 3.5.1. Cas des modèles non linéaires

Des ajustements non linéaires ont été réalisés pour la modélisation de l'évolution de l'indice foliaire. On a utilisé la méthode du rapport du maximum de vraisemblance (test ratio, Splus, option nls2) (Huet, 1992, 1995) pour déterminer les valeurs des paramètres par ajustement non-linéaire (Bouvier *et al.*, 1985) du modèle logistique. Le critère de la maximisation de la fonction de vraisemblance nous permet de comparer statistiquement les ajustements en confrontant le rapport de leur maximum de vraisemblance à une loi de  $\chi^2$ . Il s'agit d'estimer les paramètres :

- sous l'hypothèse  $H_0$  globale, où l'on considère l'égalité des paramètres du modèle,
- sous l'hypothèse  $H$ , où les paramètres du modèle sont différents,
- sous l'hypothèse  $H_1$ , où seul l'un des paramètres est identique pour tous les traitements.

Pour la comparaison des différentes courbes des traitements, le test du rapport de vraisemblance (SI) est alors comparé au  $\chi^2$ . Si le test ratio est supérieur au  $\chi^2$ , alors on conclut qu'il y a égalité des traitements.

#### 3.5.2. Cas des modèles linéaires

Des ajustements linéaires ont été réalisés pour la modélisation des valeurs des paramètres de l'évolution du LAI en fonction du LAI initial et des techniques culturales.

- **Choix des régresseurs**

Le principe consiste, à partir d'un modèle complet ( $M_0$ ) avec tous les termes et les interactions, à faire une analyse de la variance (Anova, Splus) sur ce modèle  $M_0$ , où l'on élimine le terme le moins significatif. On crée ainsi, un sous-modèle  $M_1$ . Celui-ci est testé par rapport à  $M_0$ , pour vérifier l'hypothèse d'égalité des deux modèles par la statistique de Fisher. Le test de l'hypothèse  $H_0$  (équivalence des deux modèles) est fondé sur le calcul suivant :

$$F = \frac{SCRM_1 - SCRM_0}{ddlM_1 - ddlM_0} / \frac{SCRM_0}{ddlM_0}$$

avec :

SCRM <sub>0</sub> :	Somme des carrés résiduels du modèle complet M <sub>0</sub> ,
SCRM <sub>1</sub> :	Somme des carrés résiduels du sous-modèle M <sub>1</sub> ,
ddlM <sub>0</sub> :	Degrés de liberté du modèle général M <sub>0</sub> ,
ddlM <sub>1</sub> :	Degrés de liberté du sous-modèle M <sub>1</sub> .

L'élimination des régresseurs se poursuit sur le même principe. On crée d'autres sous-modèles M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>, ... jusqu'à ce qu'il ne reste plus que des régresseurs significatifs pour les paramètres à expliquer.

#### 4/ CARACTÉRISATION DU TALLAGE ET DES STADES DE DÉVELOPPEMENT

##### 4.1. Mesure du nombre de talles

Le classement des plantes en fonction du nombre de tiges est important pour la simulation par clonage (maquette 3D) de l'hétérogénéité des peuplements de blé. Pour cela, les plantes des placettes récoltées pour la mesure des surfaces foliaires (§ 3.2), sont classées en fonction du nombre de tiges (talles + maîtres-brins). On détermine ainsi l'histogramme des nombres de tiges du peuplement.

##### 4.2. Suivi du nombre de feuilles

Le suivi a été fait sur dix plantes par traitement, repérées et numérotées de 1 à 10. Le comptage du nombre de feuilles (notation décimale de Hann, 1973) est fait uniquement sur le brin-maître, tous les 15 jours. On repère la dernière feuille apparue avec un marqueur blanc, on compte le nombre de feuilles apparues depuis le dernier marquage.

##### 4.3. Observation des stades

On a également repéré tout au long du cycle les stades suivants :

- **Arrêt de tallage**, par comptage du nombre de feuilles au-dessus de la dernière talle primaire apparue ; cette notation est faite sur tous les traitements expérimentaux, sur dix plantes au début de la montaison.

- **Longueur tige + épi = 1 cm**, dix plantes sont prélevées au hasard dans la parcelle, le brin-maître de chaque plante est coupé transversalement, puis posé sur une feuille de papier millimétré et observé sous la loupe binoculaire pour mesurer la distance entre la base du plateau de tallage (point d'insertion de la feuille la plus basse) et le sommet de l'épi. Le calcul de la longueur résulte d'une moyenne sur dix plantes. Plusieurs observations successives sont nécessaires pour encadrer le stade "épi 1 cm".

- Au cours de la **montaison** nous avons noté les stades 1 nœud, 2 nœuds, 3 nœuds (nombre de nœuds sensibles au toucher sur les brins-maîtres).

- **L'épiaison** est observée sur le terrain. On considère que le stade épiaison est atteint, lorsque 50 % des épis sont visibles au-dessus de la ligule de la dernière feuille.

- **Floraison** : ce stade est atteint lorsque 50 % des épis de la parcelle ont au moins une étamine sortie.

Tous les stades sont positionnés dans le cycle sur une échelle de degrés-jours sommés à partir de la levée.

## 5/ EVALUATION DE $\epsilon_i$ et $\epsilon_b$

### 5.1. Mesure du rayonnement incident et transmis ( $\epsilon_i$ )

#### 5.1.1. Matériel de mesure du rayonnement

Les cellules de silicium amorphe dénommées Slam (Chartier *et al.*, 1989 ; Bégué, 1991) sont utilisées pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif PAR (400-700 nm). Celles-ci sont montées en séries de 5 sur des barres de 1 m de long. L'étalonnage des barres a été fait par ciel ensoleillé et dégagé avec un capteur de type *quantum sensor* comme référence, avant et après la campagne de mesures. Ceci a permis d'affecter un coefficient de correction à chacune des barres utilisées.

#### 5.1.2. Protocole de mesures des essais 1995 et 1996

Sur l'essai 1995, les mesures du LAI et du rayonnement sont effectuées sur des placettes différentes. Pour ce dernier, les mesures sont faites dans des endroits fixes, choisis dès la mise en place du dispositif. En 1996, pour améliorer la correspondance entre le rayonnement intercepté et le LAI, ces deux grandeurs sont mesurées sur la même placette. Les barres de capteurs sont soigneusement déplacées, après chaque prélèvement, vers la placette qui fera l'objet du prélèvement suivant. Les mesures ont débuté environ 15 jours avant le stade début montaison (23 mars) ; antérieurement à ce stade le couvert était très hétérogène et le matériel de mesure utilisé aurait donné des résultats très peu fiables.

Pour les deux années d'essais le PAR est mesuré pour chaque traitement expérimental.

- ✓ **Le rayonnement transmis au sol** ( $PAR_t$ ) est mesuré par des cellules réparties sur deux barres posées sous la végétation perpendiculairement aux rangs de semis. La position des deux barres permet de représenter correctement les rangs et les inter-rangs.
- ✓ **Le rayonnement incident** pour l'ensemble des traitements est mesuré avec deux barres disposées à 1 m au-dessus de la végétation au niveau du bloc II du dispositif expérimental. L'ensemble des capteurs est relié à une centrale d'acquisition de données CAMPBELL, munie d'un multiplexeur. Le temps de scrutation est de 3 secondes. La mesure est intégrée sur un pas de temps de 15 mn, 24 heures sur 24. Le recueil des données est fait chaque semaine. Les boues et les poussières qui se déposent sur les cellules par temps pluvieux sont régulièrement nettoyées, afin d'éviter l'atténuation du rayonnement mesuré ; nous veillons également à ce que les barres soient toujours horizontales.
- ✓ **Le rayonnement global** est acquis au niveau de la station météorologique de l'Unité de Recherche de Bioclimatologie à Grignon.

## 5.2. Méthode de calcul de l'efficacité d'interception de la lumière $\epsilon_i$

Le calcul de l'efficacité d'interception  $\epsilon_i$  est fait à partir de la relation suivante :

$$\epsilon_i = (\text{PAR}_i - \text{PAR}_t) / \text{PAR}_i \quad \text{Équation 21}$$

avec :

- PAR<sub>i</sub> Rayonnement incident utile à la photosynthèse,
- PAR<sub>t</sub> Rayonnement transmis au sol.

L'ajustement sur les données expérimentales de la relation entre  $\epsilon_i$  et LAI (Équation 12) permet d'obtenir les valeurs de  $\epsilon_{i\max}$  et K. La méthode statistique utilisée est la même que celle décrite dans le § 3.5.1 (Cas des modèles non linéaires).

## 5.3. Méthode de calcul de l'efficacité de conversion de l'énergie en biomasse $\epsilon_b$

Le coefficient  $\epsilon_b$  est obtenu par ajustement linéaire entre la biomasse accumulée (depuis le premier prélèvement) et le PAR intercepté cumulé depuis cette date. Le PAR intercepté n'ayant pas été mesuré pendant les premières semaines du suivi de la biomasse et du LAI (voir *supra*), l'extrapolation des valeurs de PAR intercepté a été réalisée sur la base des mesures de LAI et des paramètres de la relation (Équation 10), K et  $\epsilon_{i\max}$  estimés pour le reste du cycle.

L'analyse de variance est faite avec le logiciel Splus (Anova) sur la biomasse en fonction du LAI, de la variété et de la densité. La méthode statistique pour l'analyse des données est décrite dans le § 3.5.2 (Cas des modèles linéaires).

## 6/ ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE 3D

La réalisation de la maquette informatique en 3D, nécessite la création de deux fichiers principaux :

- fichier des paramètres angulaires,
- fichier botanique.

La fusion de ces deux fichiers constitue une base de données pour la simulation de plantes à l'aide du logiciel SimBlé (Helbert, 1996) interfacé avec BPMS (Lewis, 1996).

### 6.1. Création du fichier des paramètres angulaires

Ce fichier contient les principaux paramètres angulaires qui permettent de décrire la structure d'un plant de blé. Pour les mesurer, nous avons utilisé les images en stéréovision, traitées par un ensemble de logiciels mis au point par P. Boissard et son équipe (P. Valéry et P. Belluomo) tout au long du déroulement de ce travail de thèse (Valéry *et al.*, 1998).

### **6.1.1. Échantillonnage et prélèvement des plantes**

Le choix des plantes sur le terrain a été fait par un échantillonnage stratifié en fonction du nombre de tiges. L'histogramme du nombre de tiges/plante est connu à partir du prélèvement précédent (placettes LAI). Les plantes prélevées pour les photographies stéréo sont choisies de manière à représenter proportionnellement les différentes classes.

En 1995, le nombre total de plantes échantillonnées est de quinze par traitement à raison de cinq par bloc. En 1996, le nombre total de plantes a été réduit à dix, prélevées aléatoirement sur les trois blocs selon les classes les plus représentatives.

Les plantes sont soigneusement déterrées à l'aide d'un plantoir, puis délicatement mises en pot et immédiatement acheminées au laboratoire où elles sont saisies par stéréophotographie ; elles sont ensuite dépouillées et leurs différents éléments mesurés (Cf. § 6.2.).

### **6.1.2. Principe de la stéréovision**

La méthodologie de ce travail se fonde sur celle élaborée par Ivanov (1994). Bâtie sur le principe général de la vision binoculaire humaine et à partir de deux scènes acquises simultanément (image gauche et image droite), la stéréovision localise des objets, en l'occurrence des feuilles de blé, dans l'espace tridimensionnel.

### **6.1.3. Dispositif de mesure en stéréovision**

Le dispositif de saisie de photos stéréo mis en place à l'INRA se compose de deux appareils photonumériques montés sur un cadre, reposant sur une plateforme circulaire, ce qui permet de tourner autour de la plante et, à une distance de 1.5 m, d'effectuer des visées sous plusieurs angles aussi bien en oblique qu'à la verticale. Au centre de la plateforme, on pose le pot contenant la plante. Celle-ci est entourée d'un ensemble de quatre cibles garnies de damiers constituant respectivement le plancher, les limites droite et gauche et le fond (*Figure I-3.5*) (Valéry *et al.*, 1998).

### **6.1.4. Saisie de photographies en stéréovision**

À chaque montage des deux appareils photonumériques, on procède à la photographie des cibles uniquement (sans la plante) pour étalonner le système. La capacité de chaque appareil est de cinquante images. Les prises de vue terminées, on transfère les images vers un micro-ordinateur où elles sont archivées.

#### **6.1.4.1. Mesures des cibles, étalonnage**

L'objectif est de définir le volume 3D du système objet-caméra afin de calculer la position réelle de chaque élément de la plante. Pour cela on a construit une cible volumique, constituée de quatre cibles planes à damiers noirs et blancs : la cible plancher comprend des carrés de 10 cm de côté et les cibles gauche, droite et fond, des carrés de 5 cm de côté.



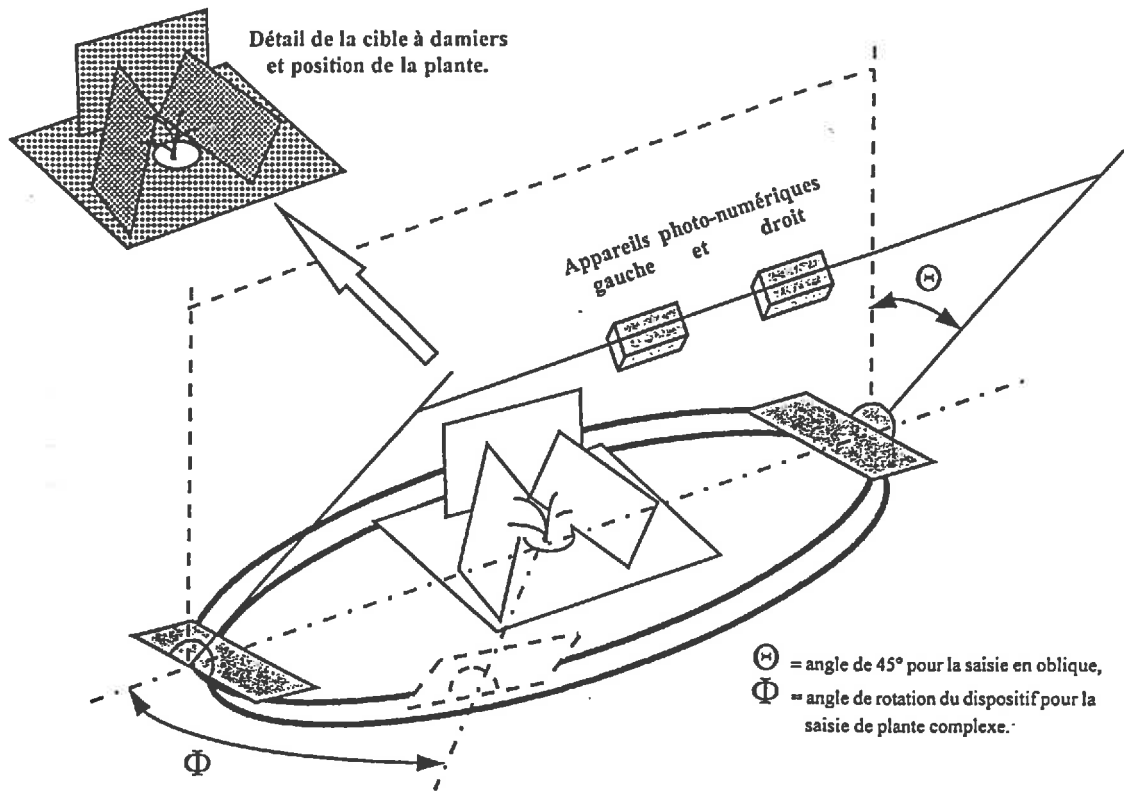


Figure I-3.5. Dispositif pour la saisie des plantes en stéréo

La description réelle des cibles consiste à mesurer à plat les coordonnées réelles de tous les points du damier de chaque cible ; celles-ci une fois assemblées, constituent une cible réelle volumique : la cible plancher nous donne l'horizon zéro, les cibles gauche et droite sont montées à 43° par rapport à l'horizontale et la cible fond est appuyée sur ces dernières. Dans le but de créer un espace plus ou moins important autour de la plante (dépendant du volume de la plante), les cibles gauche et droite ont un point d'attache et de rotation. La mesure de l'angle qu'elles forment est utilisée comme paramètre d'entrée du logiciel d'élaboration du fichier de données en 3D de la cible volumique réelle.

La saisie en stéréovision se fait à partir de deux points de vues : à la verticale et en oblique à 45 degrés ( $\theta$  sur la *Figure I-3.5*). Des exemples de photos sont donnés en *Annexe I-3.2*.

#### *6.1.4.2. Saisie des plantes au dessus de la végétation*

La saisie se fait sur une plante individuelle de la même façon que pour les cibles. Lorsque le nombre de tiges est très élevé (structure complexe), nous avons tourné autour de la plante pour tenter de saisir tous ses organes (la rotation est figurée par l'angle  $\Phi$  sur la *Figure I-3.5*).

#### *6.1.5. Traitement des images numériques saisies en stéréovision*

Il s'agit de mesurer les points homologues des images gauche et droite (Ivanov *et al.*, 1994). On saisit deux types de points : les cibles et les squelettes des plantes.

##### *6.1.5.1. Saisie des cibles sur unité de traitement d'image*

L'objectif est d'obtenir des fichiers de coordonnées des points homologues des cibles en vue d'un étalonnage. Associées aux coordonnées réelles de la cible, ces données permettent d'étalonner le système.

##### *6.1.5.2. Saisie des points des squelettes des plantes sur image*

L'objectif est d'obtenir des fichiers de coordonnées des points homologues situés sur la plante. On numérise " le squelette " de la plante (*Figure I-3.6*), c'est-à-dire qu'on se limite à la ligne médiane des tiges et des feuilles. Il serait en effet trop compliqué de saisir les bords externes de la feuille. Ultérieurement le modèle 3D "habillera le squelette" d'un limbe.

#### *6.1.6. Extraction des paramètres de structure*

On distinguera deux phases pour l'extraction des paramètres de structure.

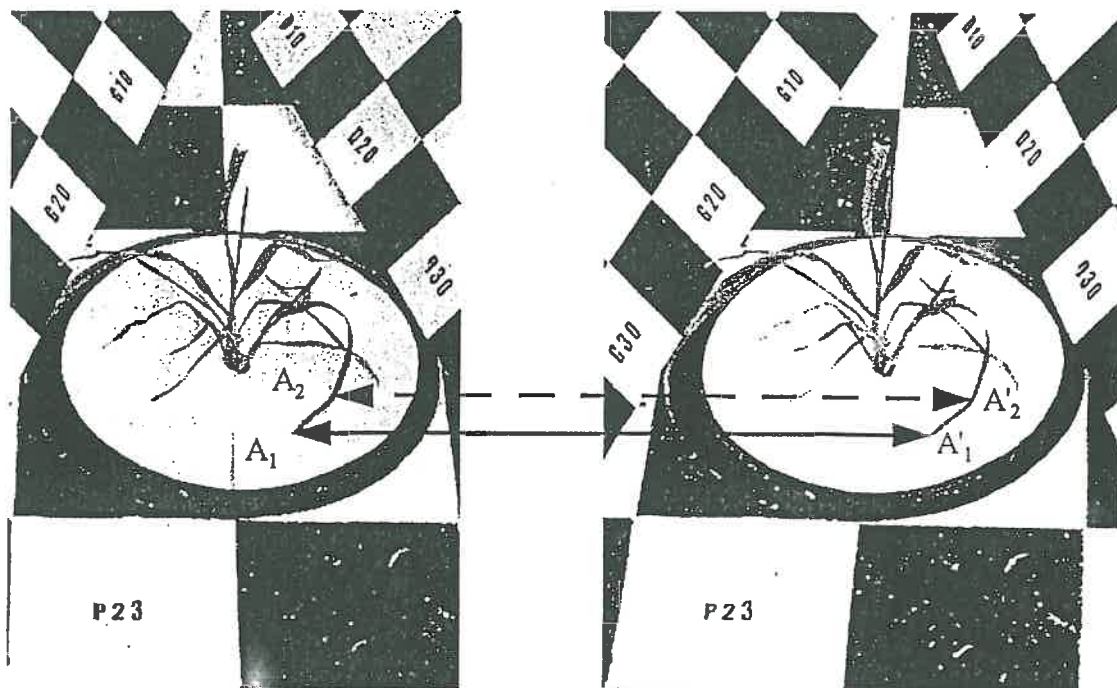
##### *6.1.6.1. Reconstruction 3D du squelette d'un plant de blé*

Un ensemble de logiciels utilisant, d'une part les fichiers "squelette", d'autre part les fichiers de calibration a été mis au point pour :

- vérifier l'homogénéité des données (présence des objets homologues),
- calculer les coordonnées 3D du squelette (méthode photogrammétrique),
- visualiser le squelette en 3D,
- valider l'image 3D par comparaison avec l'image de la vision stéréo.

*Matériel et Méthodes*

Cette procédure nous fournit un fichier 3D pour chaque plante étudiée. À partir de ce fichier, un certain nombre de calculs sont effectués afin d'extraire les paramètres pertinents.



*Figure I-3.6. Identification de points homologues, sur vues obliques : relevé des coordonnées des points appariés sur les images stéréo gauche (Points A) et droite (Points A')*

6.1.6.2. Extraction des paramètres décrivant la structure

Le choix des paramètres de description de la structure du blé a été orienté vers des grandeurs aisément mesurables (Figure I-3.7). Cette description géométrique du blé se satisfait de onze paramètres (Helbert, 1996). Une procédure a été mise au point pour extraire automatiquement un certain nombre de ces paramètres à partir du fichier 3D des plantes. Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des paramètres géométrique retenus, ainsi que les variables décrivant leur évolution au cours du temps.

Type de paramètres	Paramètre Symbole	Définition	Source
3 D	L et l	Longueur et largeur de feuille	Fichier botanique
	$\theta_0$	Angle au point d'insertion	Fichier 3D
	$\theta_1$	Angle au bout de feuille	Fichier 3D
	S $\Psi$	Abscisse curviligne du début de torsion de la feuille	Observation
	$\Psi$	Angle de torsion de la feuille	Observation
	r	Rayon de la tige	Fichier botanique
	L <sub>bm</sub>	Longueur du brin maître	Fichier 3D
	L <sub>t</sub>	Longueur de la talle	
	$\varphi$	Angle d'azimut au point d'insertion de la feuille	Fichier 3D
	$\theta$	Angle d'inclinaison du brin maître et des talles par rapport à la normale	Fichier 3D
2 D	a et b	Paramètres de la relation largeur-abscisse curviligne	Fichier 2D (image)
1 D	v	Vitesse de croissance feuilles et tiges	Ajustement
Modèle Dynamique	$\theta_0$ max	Valeur asymptotique de l'angle d'inclinaison à l'insertion	Ajustement
	$\theta_1$ max	Valeur asymptotique de l'angle d'inclinaison à l'extrémité de la feuille	Ajustement
	$\tau_0$	Temps caractéristique associé à $\theta_0$	Ajustement
	$\tau_1$	Temps caractéristique associé à $\theta_1$	Ajustement

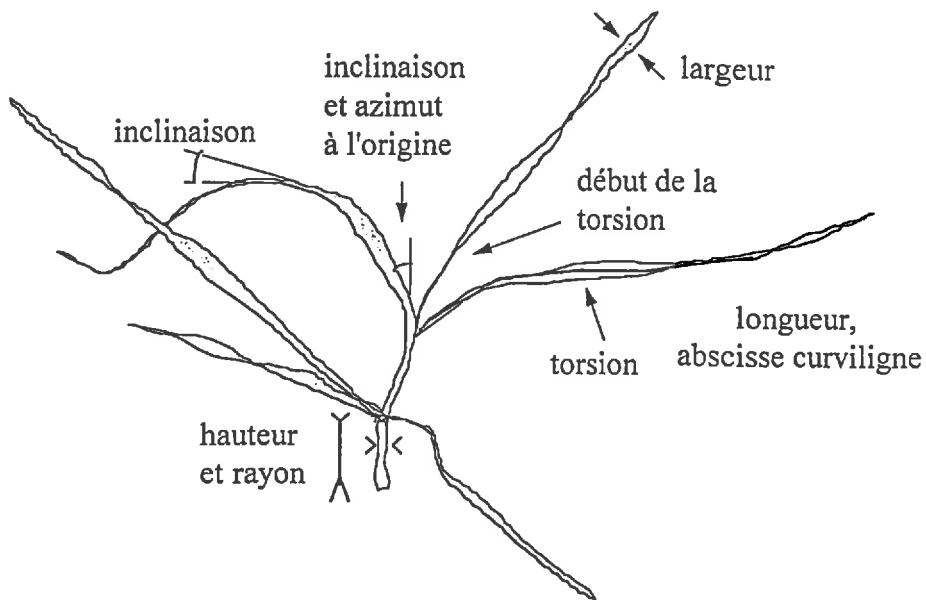


Figure I-3.7. Paramètres utilisés pour quantifier la structure 3D du blé, au stade tallage

## 6.2. Création du fichier des paramètres botaniques

Le fichier botanique contient des informations qui permettent de :

- positionner les feuilles sur la plante (hauteur du point d'insertion des feuilles),
- positionner les talles et les feuilles sur les talles,
- positionner tous ces éléments les uns par rapport aux autres,
- reconstituer les dimensions réelles des feuilles.

### Dépouillement des plantes saisies en stéréovision

- *Saisie du schéma botanique des plantes*

Une fois la saisie stéréo terminée, on schématise les plantes en utilisant le même point de vue que la photographie. On repère ainsi l'ensemble des éléments de la plante. Le schéma nous servira de guide pour reconnaître sans ambiguïté les éléments sur les images.

- *Mesure des hauteurs d'insertion des feuilles et du diamètre des tiges*

À l'aide d'un pied à coulisse, on mesure la distance des points d'insertion des feuilles par rapport au plateau de tallage (repéré au marqueur, pour garder toujours la même base). Les diamètres des tiges sont mesurés en plusieurs points le long de la tige. Le diamètre moyen d'une tige est calculé à partir de la moyenne des points mesurés.

- *Mesure des longueurs-largeurs des feuilles*

Chaque plante est défoliée par tige et par étage foliaire. Les feuilles ainsi repérées sont posées sur une table à numériser qui permet de saisir la longueur maximale et les largeurs tous les centimètres. Ces données servent à établir la loi d'évolution de la largeur en fonction de l'abscisse longitudinale de la feuille.

## 6.3. Simulation des peuplements de blé d'hiver

### Interfaces de simulation du blé *Simblé* /BPMS

Les fichiers "Botanique" et "Paramètres 3D" sont fusionnés pour constituer la Base de Données de travail pour le logiciel *SimBlé* interfacé avec BPMS (*Figure I-3.8*).

La simulation d'un peuplement de blé passe par différentes phases :

- *Phase de simulation de plantes individuelles* : elle se fait à l'aide du logiciel *SimBlé* (Simulation du Blé : logiciel de simulation du couvert de blé), développé par Helbert (1996).
- Les variables d'entrée de ce logiciel sont les paramètres de structure (Base de Données) et le phyllochrone de la variété considérée (pour une date de semis) (*Annexe I-3.3*). La mise en place des organes végétatifs se fonde sur le modèle d'apparition des feuilles et des talles de Masle (1980). Pour un jeu de paramètres donné, le modèle peut reconstituer la structure de plantes plus ou moins âgées (c'est-à-dire ayant plus ou moins de feuilles et de talles). La reconstitution de la plante n'est donc pas limitée à la date à laquelle a été prise la photo,

mais la validité des simulations faites à d'autres dates (d'autres sommes de degrés-jours) est subordonnée à une certaine constance des paramètres de structure.

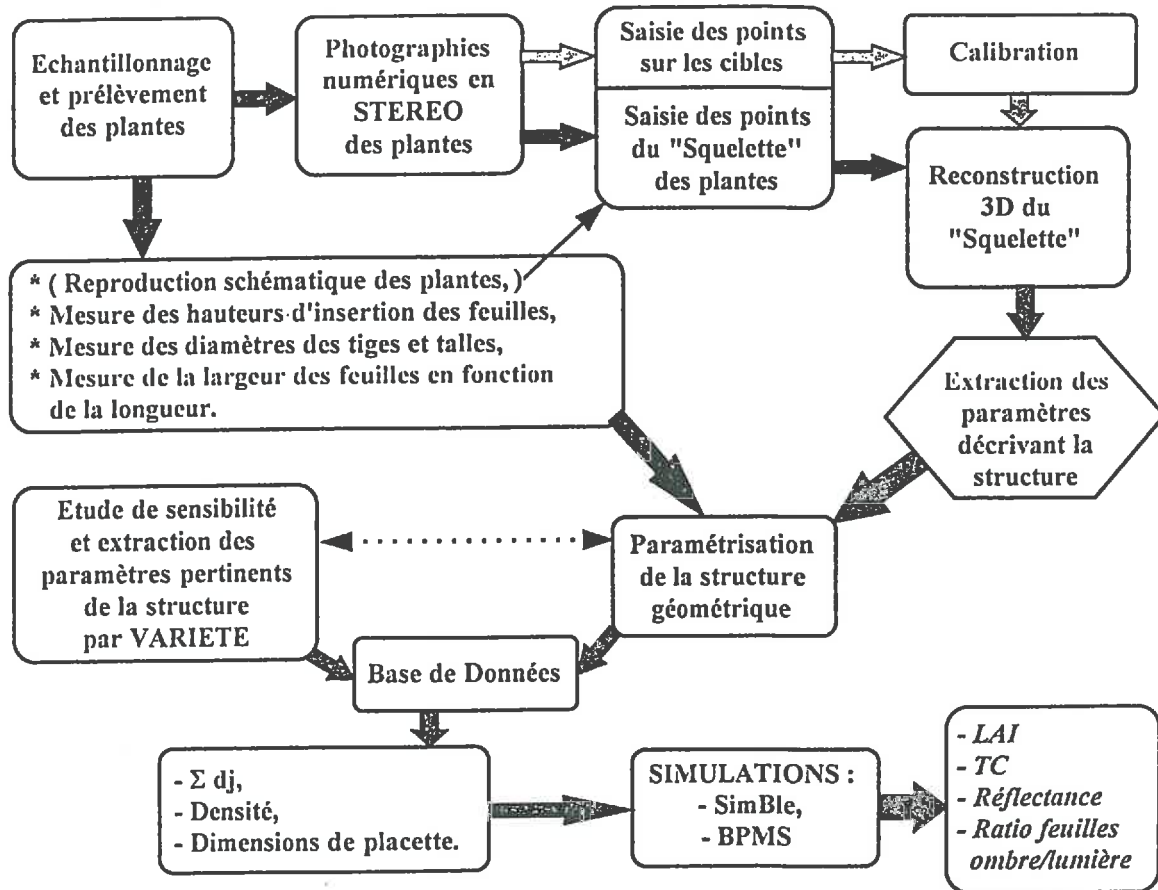


Figure I-3.8. Démarche d'acquisition et de simulation de cultures en 3D

- Phase de génération d'un couvert de blé :** le peuplement de blé est recréé grâce à l'option *Generate-Field* du logiciel BPMS (Lewis, 1996). Les variables d'entrée de ce logiciel sont des simulations de différentes plantes individuelles, la densité de peuplement, l'écartement entre rangs et les dimensions de la placette à simuler (Figure I-3.9). On choisit la taille de l'image à générer pour un contrôle visuel. On peut réaliser des dizaines de simulations de peuplements en faisant varier la somme de degrés-jours. Pour chaque simulation, *Generate-Field* calcule le LAI de la placette.

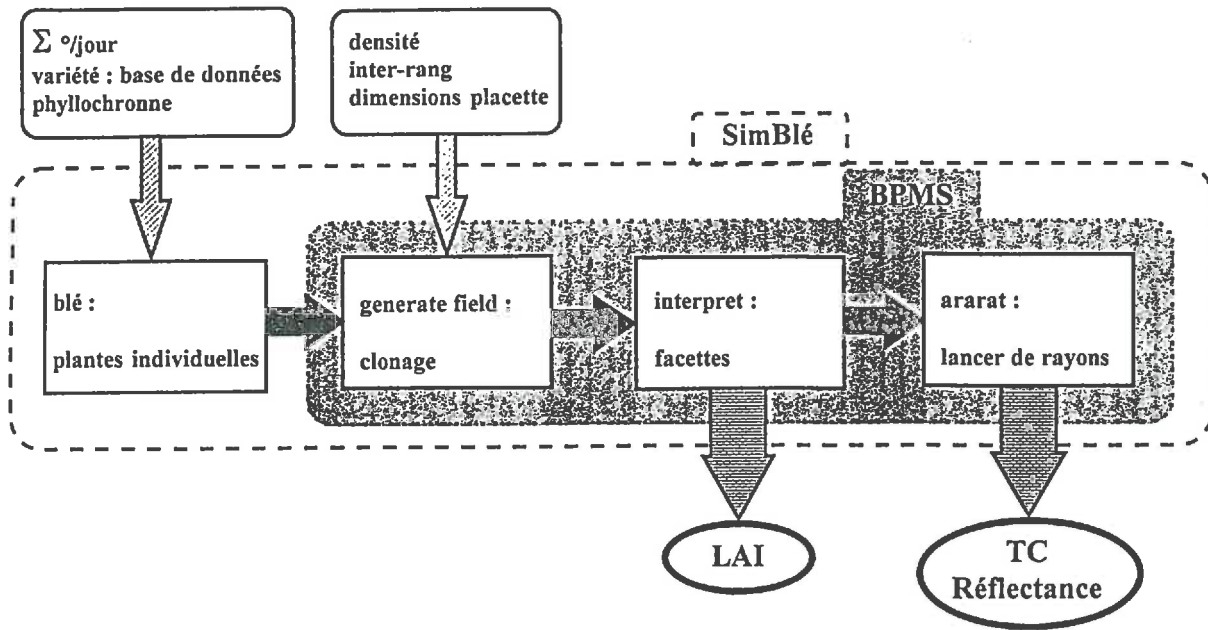


Figure I-3.9. Articulation de SimBlé et de BPMS

- Phase d'estimation des variables agronomiques :** la procédure du lancer de rayons du logiciel ARARAT (Lewis, 1996) permet de simuler l'interaction du rayonnement incident avec le couvert. Pour des conditions de ciel données (hauteur du soleil, rapport direct/diffus), on peut ainsi calculer le taux de couverture et la réflectance radiométrique dans le visible et le proche infrarouge correspondant au peuplement précédemment simulé.



**DEUXIÈME PARTIE :**

**RÉSULTATS**

## **CHAPITRE 1.**

# **ESTIMATION DE L'INDICE FOLIAIRE À LA SORTIE DE L'HIVER À PARTIR DU TAUX DE COUVERTURE OU DE LA RÉFLECTANCE RADIOMÉTRIQUE**

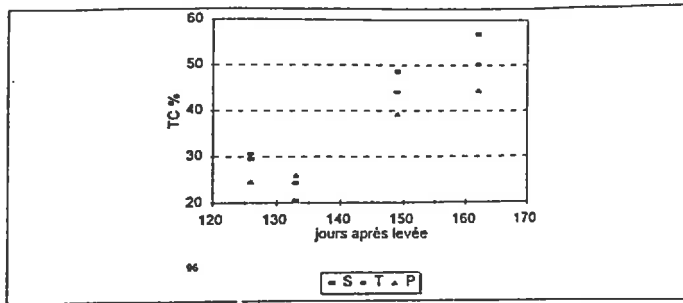


Figure II-1.1. Evolution du taux de couverture du sol (Variétés Soissons (S), Thésée (T), Pernel (P) ; densité 150 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce ; essai 1996)

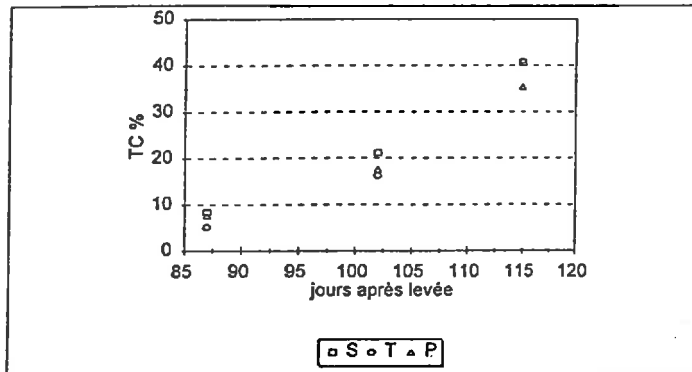


Figure II-1.2. Evolution du taux de couverture du sol (Variétés Soissons (S), Thésée (T), Pernel (P) ; densité 150 p/m<sup>2</sup> ; semis tardif ; essai 1996)

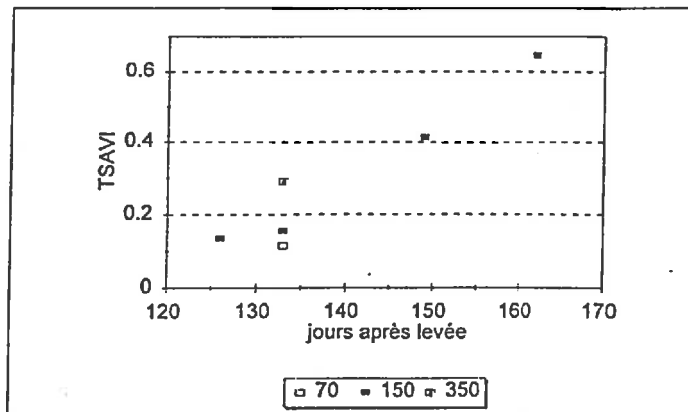


Figure II-1.3. Evolution du TSAVI (Variété Soissons ; densités 70, 150, 350 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce ; essai 1996)

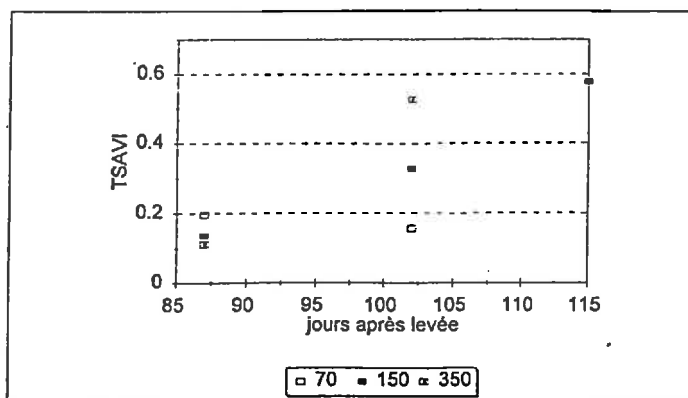


Figure II-1.4. Evolution du TSAVI (Variété Soissons ; densités 70, 150, 350 p/m<sup>2</sup> ; semis tardif ; essai 1996)

## 1/ RELATION ENTRE L'INDICE FOLIAIRE À LA SORTIE DE L'HIVER ET LES INDICATEURS DU COUVERT DE BLÉ

Estimer le LAI consiste à définir le type de relation reliant le LAI à la sortie de l'hiver ( $LAI_{SH}$ ) aux deux indicateurs (taux de couverture et réflectance) et à analyser les variations qui se produisent au cours de la période étudiée (de la sortie d'hiver jusqu'au début de la montaison) sous l'influence des pratiques culturales (variété, densité et dates de semis).

### *Démarche d'analyse des données*

Durant les deux années d'expérimentation, l'ensemble des traitements n'a pas été suivi de manière identique de la sortie d'hiver jusqu'au début montaison. Avec le suivi multirate nous avons réalisé un état régulier de l'évolution des indicateurs et du  $LAI_{SH}$  ; avec le suivi monorate on a fait une mesure unique des variables en question (Cf. Matériel et Méthodes). Dans ce dernier cas, nous n'avons pas assez de données pour faire les ajustements du modèle reliant le  $LAI_{SH}$  aux indicateurs. Il manque également des données pour réaliser des analyses statistiques permettant d'étudier l'effet conjugué des facteurs : variété, densité et date de semis. En conséquence, les traitements statistiques ne seront faits que sur les variétés Soissons, Thésée et Pernel, en densité 150 p.m<sup>2</sup> en semis précoce pour 1996. On notera que les calculs effectués sur les semis tardifs n'ont pas convergé (valeurs faibles par rapport à la forme du modèle).

Sur les traitements monodates, on réalisera une analyse graphique en introduisant les mesures des densités 70 et 350 ou 450 avec celles des 150 p.m<sup>2</sup>, des essais 1995 et 1996.

Par ailleurs, afin d'augmenter le nombre important de mesures indépendantes pour l'établissement des modèles reliant le  $LAI_{SH}$  aux indicateurs du couvert, nous avons utilisé les données blocs comme des répétitions, et non pas pour introduire l'effet bloc.

### 1.1. Mise en place du couvert de blé de la sortie hiver jusqu'au début de la montaison

#### *1.1.1. Évolution de la variable "Taux de Couverture du sol"*

Sur la densité 150 p.m<sup>2</sup> des trois variétés Soissons, Thésée et Pernel, en semis précoce et tardif, l'évolution du taux de couverture du sol, TC %, est linéaire; le recouvrement du sol est d'environ 60 % (*Figure II-1.1*). Pour les observations très précoces, alors que le TC % est inférieur à 40 %, les différences de recouvrement entre les trois variétés étudiées ne sont pas importantes. Par contre, au-delà de cette valeur, le taux de recouvrement du sol se différencie à mesure que le TC % augmente et l'écart entre les variétés devient de plus en plus grand (*Figure II-1.1*). Cette période (observation > 160 jours après la levée) correspond à la phase de fin de tallage-début de redressement du blé d'hiver. Sur ce même graphique, dans la plupart des cas, le suivi des trois variétés en densité 150 p.m<sup>2</sup> montre que Soissons recouvre plus vite le sol que Thésée et Pernel. En semis tardif, les écarts des TC entre variétés n'est pas important (*Figure II-1.2*). Au stade proche de "épi 1 cm", la végétation du semis tardif en densité 150 n'est pas assez développée (TC = 40 % uniquement) pour que la différence entre traitements soit remarquable. Lorsqu'on introduit les autres densités (70 et 350 ou 450) à la date d'observation 133 et 126 jours après levée respectivement en précoce et en tardif, on note que plus la densité est élevée, plus le TC % est grand (*Annexes II-1.1 et II-1.2*).

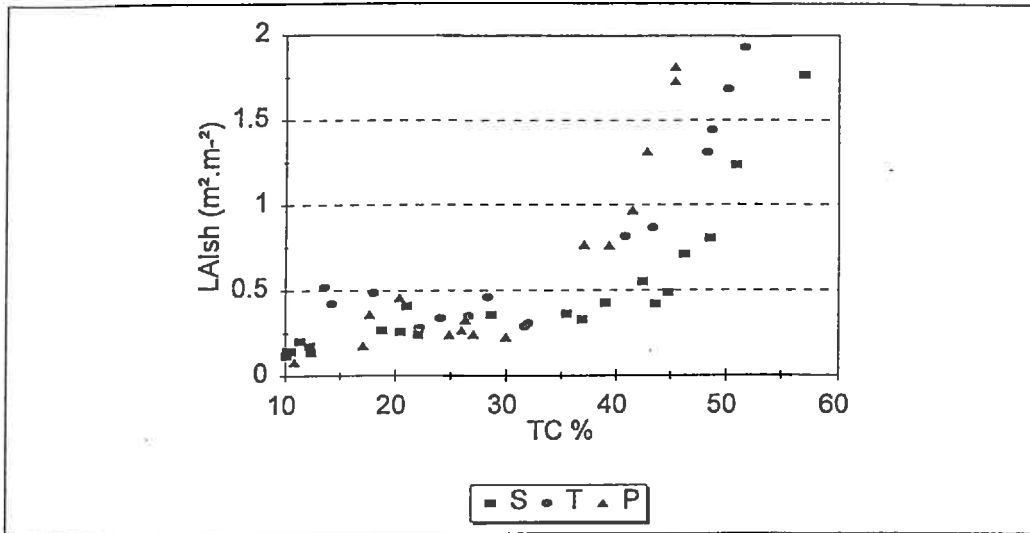


Figure II-1.5. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{SH}$ ) en fonction du taux de couverture (TC %) des variétés Soissons (S), Thésée (T) et Pernel (P) (densité  $150 \text{ p.m}^{-2}$ , semis précoce des essais 1995 et 1996)

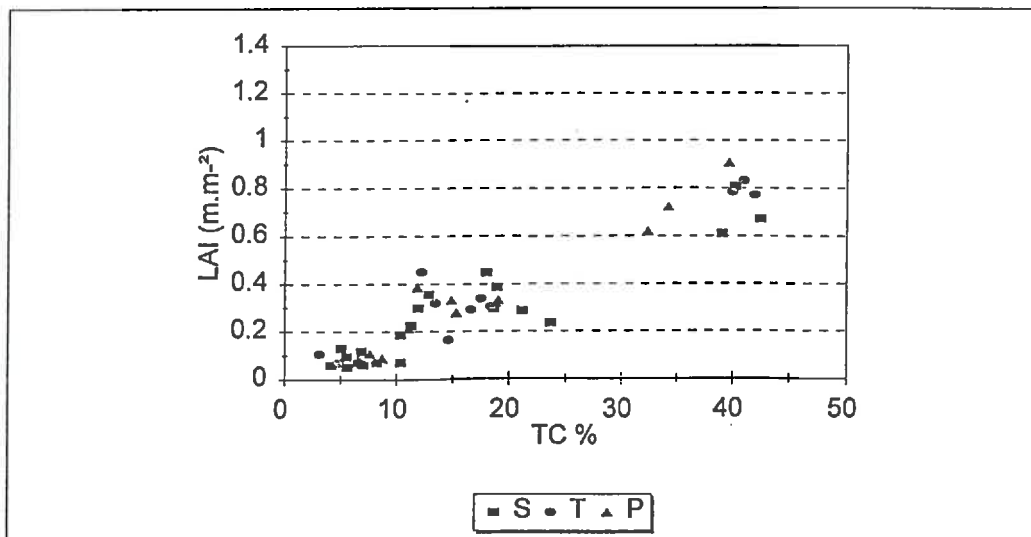


Figure II-1.6. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{SH}$ ) en fonction du taux de couverture (TC %) des variétés Soissons (S), Thésée (T) et Pernel (P) (densité  $150 \text{ p.m}^{-2}$ , semis tardif des essais 1995 et 1996)

### 1.1.2. Évolution de la variable réflectance radiométrique

Lorsque les valeurs de TSAVI sont inférieures à 0.6, l'évolution de cet indice est linéaire pour les trois variétés (*Figures II-1.3 et II-1.4*). Le classement des valeurs du TSAVI entre les trois variétés n'est pas évident notamment en observation très précoce (nombre de jours après la levée < 150), pour laquelle la variabilité est plus prononcée entre les mesures qu'entre les traitements. Parmi les trois variétés, le TSAVI de Thésée est le plus fluctuant aux dates d'observation. Au stade "épi 1cm" (160 jours après la levée), on retrouve le même classement établi pour l'indicateur TC : Soissons a l'indice le plus élevé, suivi de Thésée et, à moindre degré, de Pernel. La variabilité des mesures de réflectance rend très difficile le classement de la réponse spectrale directe des variétés. D'après les figures (*Annexes II-1.3 et II-1.4*), l'indicateur TSAVI évolue dans le même sens que la variable LAI<sub>SH</sub>.

*L'évolution de la réponse spectrale (TSAVI) et celle du recouvrement du sol (TC %), varie en fonction du temps (stades du cycle), de façon linéaire. Ils sont également corrélés aux pratiques culturales : leurs réponses sont plus élevées respectivement pour les fortes densités et les semis précoces, que pour les faibles densités et les semis tardifs.*

## 1.2. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver à partir des indicateurs

### 1.2.1 Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver à partir du taux de couverture du sol (TC %)

L'observation des graphiques présentant l'indice foliaire en fonction du taux de couverture du sol en semis précoce (*Figure II-1.5*) montre que la relation qui relie le LAI<sub>SH</sub> au TC n'est pas unique. À même densité (150 p.m<sup>2</sup>) et à même TC, le LAI<sub>SH</sub> estimé diffère selon la variété (Soissons, Thésée et Pernel). Lorsque les LAI sont inférieurs à 1, correspondant à des recouvrements inférieurs à 35 ou 40 %, la relation a une tendance plutôt linéaire, comme sur l'exemple du semis tardif des essais 95 et 96 (*Figure II-1.6*). Sur les traitements où les LAI dépassent la valeur 1, le modèle prend une forme logarithmique (*Figure II-1.5*).

À partir d'un taux de couverture de 30 % (*Figure II-1.5*), les variétés se différencient nettement en trois courbes distinctes. Soissons atteint des TC plus élevés avant de passer à la phase asymptotique ; Thésée a un comportement assez proche de Soissons tandis que Pernel passe à la phase asymptotique pour des valeurs plus faibles de TC.

À des observations très précoces, quand les TC sont très faibles, inférieurs à 10 % (*Figures II-1.5 et II-1.6*), la différence entre les variétés est pratiquement inexistante. Puis à mesure que le TC augmente, les trois variétés se distinguent de plus en plus nettement, notamment quand le TC atteint 35 à 40 % et que le LAI est supérieur à 1 (*Figure II-1.5*). Sur cette dernière figure, on constate qu'à pour une valeur unique de TC peuvent correspondre plusieurs valeurs de LAI<sub>SH</sub>. Les différences entre les valeurs de LAI<sub>SH</sub> sont de plus en plus importantes, au fur et à mesure que le TC augmente. Pour une mesure de TC de 40 %, Soissons a un LAI<sub>SH</sub> de 0.5 alors que celui de Pernel est de 1. Il faut noter que, au moment où la courbe passe à la phase ascendante, le blé est au stade fin tallage-début de redressement pour les densités 150 et 350 p.m<sup>2</sup>. Sur les semis tardifs, au stade "épi 1cm", les peuplements 150 p.m<sup>2</sup> n'ont pas encore atteint leur phase asymptotique.

Résultats

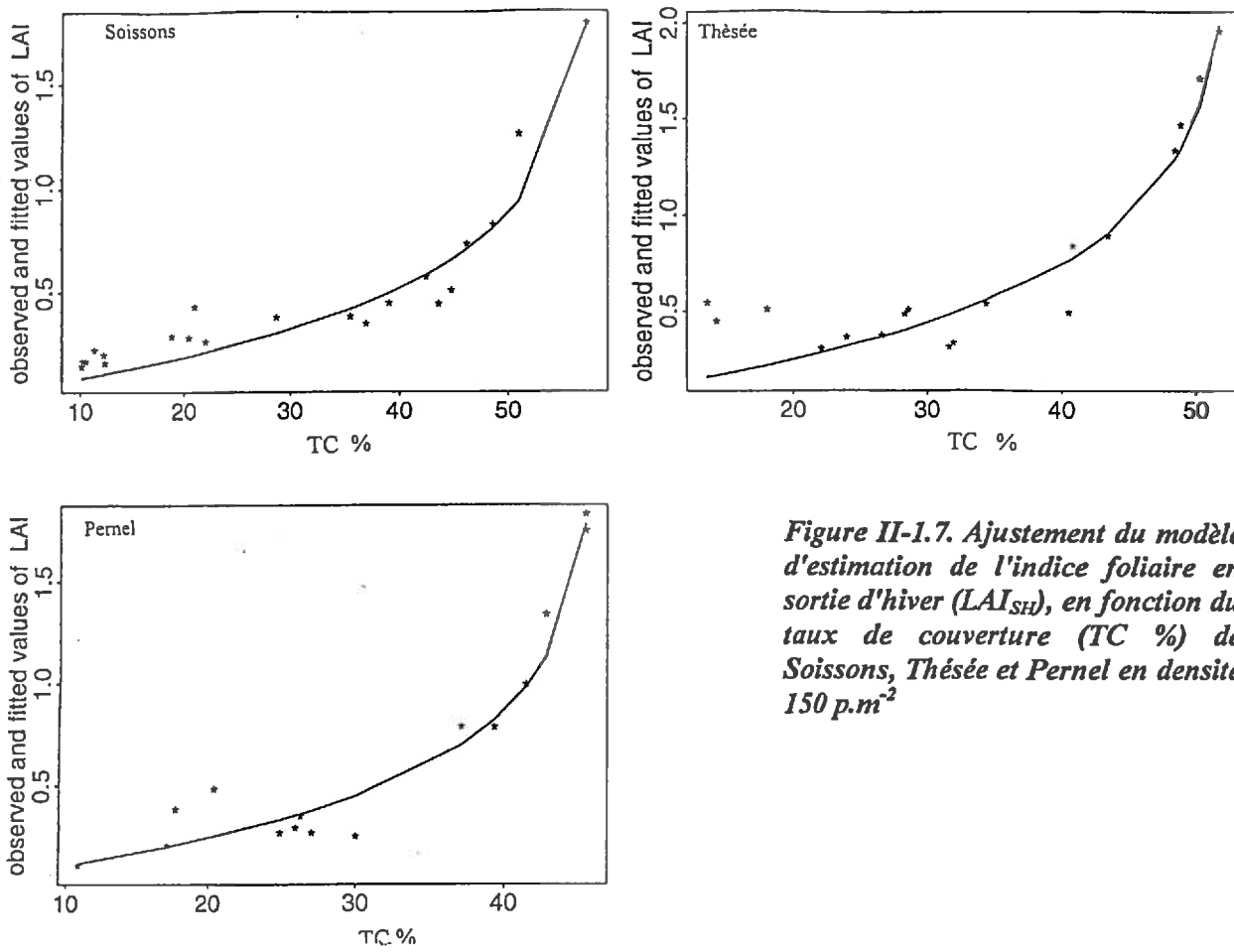


Figure II-1.7. Ajustement du modèle d'estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{SH}$ ), en fonction du taux de couverture (TC %) de Soissons, Thésée et Pernel en densité  $150 \text{ p.m}^2$

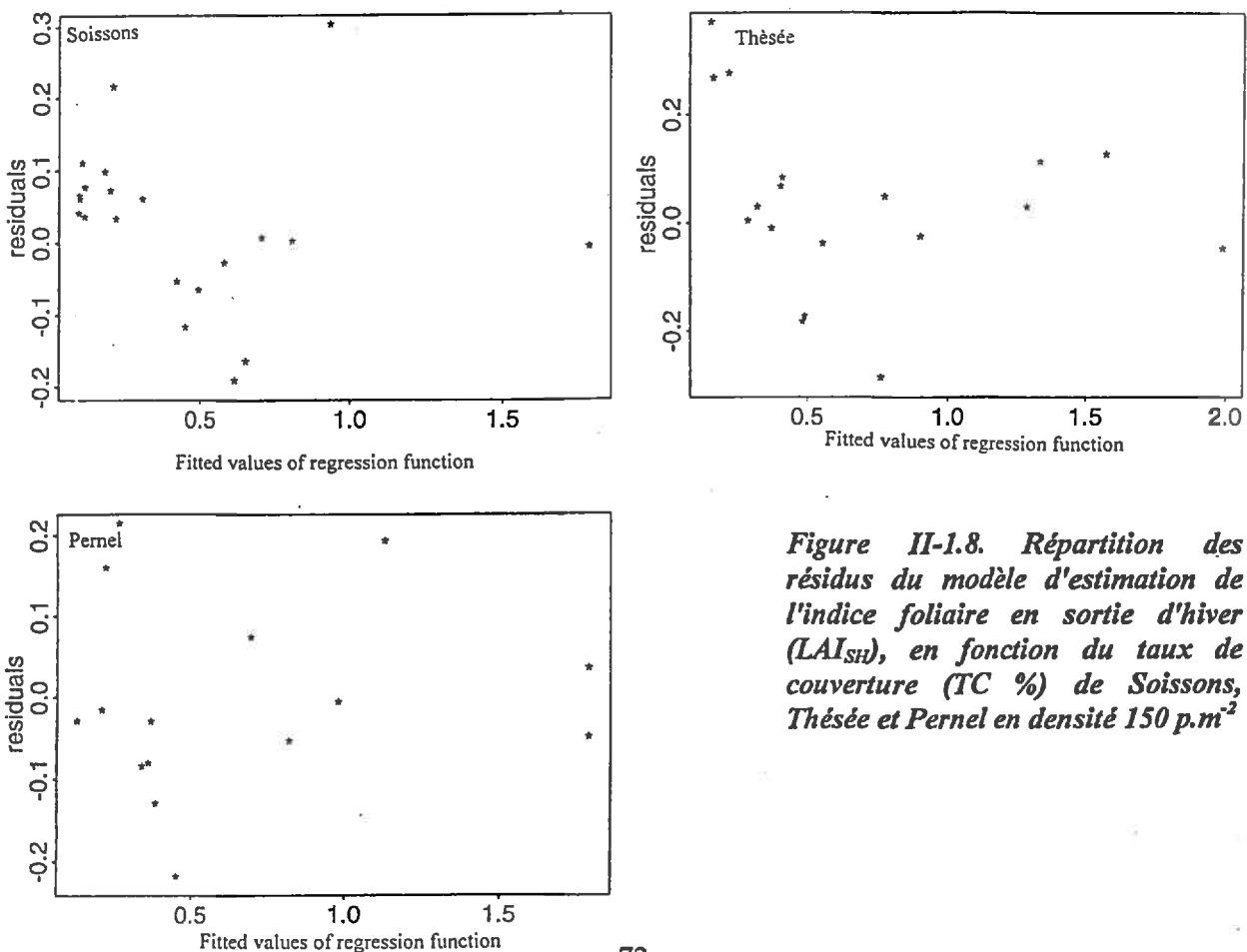


Figure II-1.8. Répartition des résidus du modèle d'estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{SH}$ ), en fonction du taux de couverture (TC %) de Soissons, Thésée et Pernel en densité  $150 \text{ p.m}^2$

## Résultats

### 1.2.1.1. Ajustement des données

L'observation des données montre que la relation entre le LAI<sub>SH</sub> et le TC est non linéaire. Pour ajuster les données, nous avons adopté le modèle de forme logarithmique à deux paramètres, qui s'écrit de la façon suivante :

$$\text{LAI}_{\text{SH}} = (-1/a) \cdot \log(1 - b \cdot \text{TC}) \quad \text{Équation 22}$$

avec :

- a : la vitesse d'occupation du sol
- b : 1/b valeur asymptotique de TC

### 1.2.1.2. Analyse statistique

La comparaison des courbes des trois variétés en densité 150 p.m<sup>2</sup> a été réalisée à l'aide du test du rapport de vraisemblance (test de *likelihood ratio*, Cf. Matériel et Méthodes). Pour améliorer la qualité des ajustements du modèle, nous avons éliminé les points qui ont des résidus très grands.

- *Effet de la variété*

Le but était de montrer si, pour une valeur identique de la mesure du TC, les LAI<sub>SH</sub> étaient différents selon les variétés.

Les résultats du test du rapport de vraisemblance montrent que les paramètres de l'Équation 22 sont différents entre Soissons, Thésée et Pernel. Les mêmes résultats (Tableau II-1.1) sont obtenus sur l'ensemble des données des trois variétés en densités 150 p.m<sup>2</sup>, des essais 95-96. Pour des valeurs différentes des paramètres "a" et "b" de l'Équation 22, le modèle s'ajuste bien aux données observées (Figure II-1.7) ; on trouve alors des valeurs des paramètres "a" et "b" propres à chaque variété. La répartition aléatoire des résidus appuie la validité du modèle représenté par l'Équation 22 (Figure II-1.8).

Paramètre	Variété	Valeur	Erreur Standard	Valeur de "t"
b	Soissons	0.017	0.0001	111.327
a		2.246	0.182	12.334
b	Thésée	0.019	0.0001	99.394
a		1.89	0.135	13.961
b	Pernel	0.022	0.0001	146.832
a		2.347	0.194	12.045

Tableau II-1.1. Valeurs des paramètres obtenues par ajustement des données



Résultats

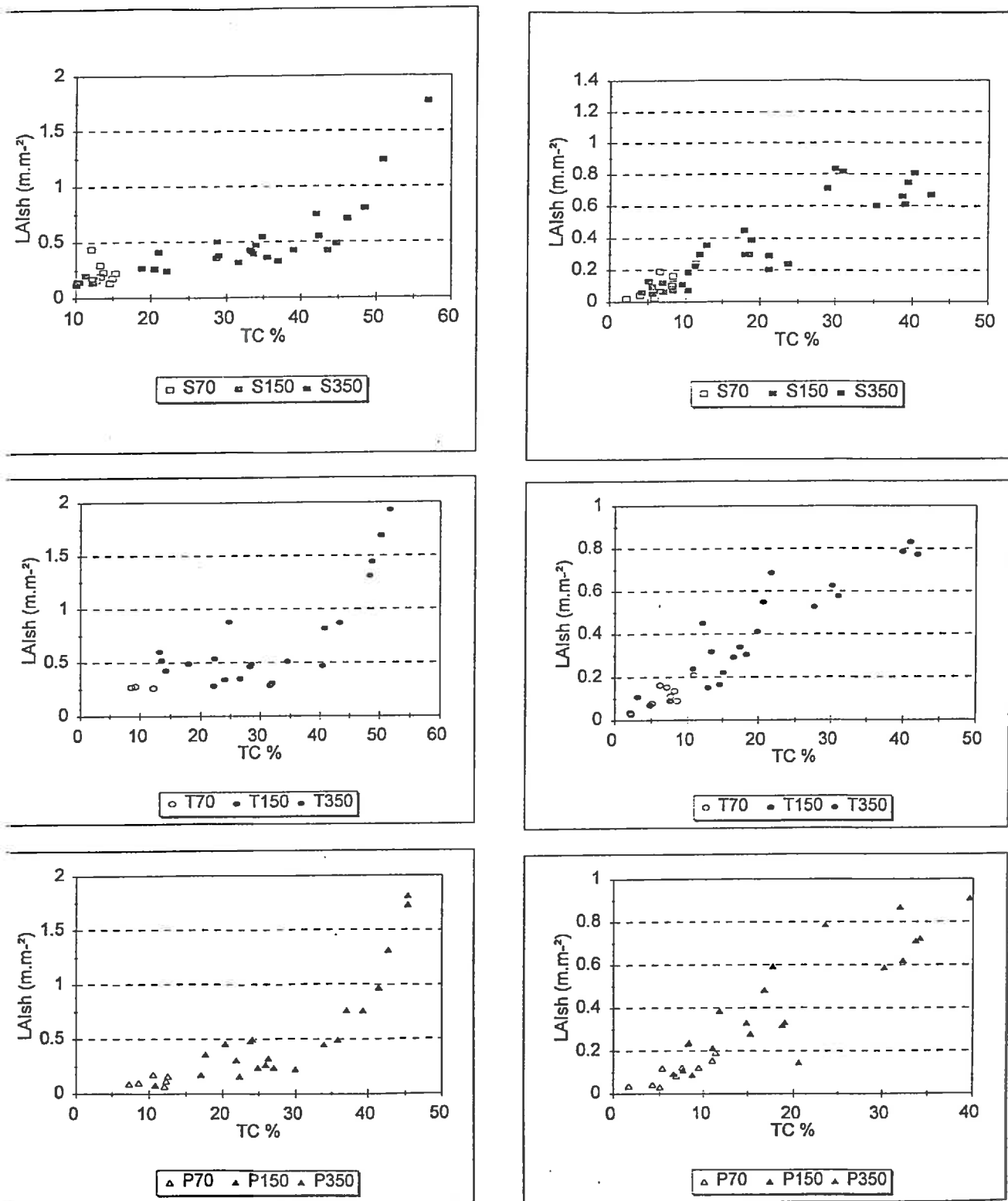


Figure II-1.9. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{SH}$ ) en fonction du taux de couverture (TC %) de Soissons (S), Thésée (T) et Pernel (P) en densités 70, 150, 350 p.m<sup>-2</sup>. (à gauche, en semis précoce de l'essai 1996 : à droite en semis tardif des essais 1995 et 1996)

### 1.2.1.3. Analyse graphique des données

- *Effet de la densité*

À variété donnée, on observe que la variation du LAI<sub>SH</sub> en fonction de la densité (70, 150 et 350) reste très faible, inférieure à 0.25 (*Figure II-1.9*) notamment sur Soissons et Thésée (à l'exception de certains points comme c'est le cas pour Thésée 350 p.m<sup>2</sup>, probablement dû à une mauvaise estimation d'une des variables TC et LAI<sub>SH</sub>). Les densités ont tendance à élargir la gamme des TC plutôt que celle des LAI<sub>SH</sub>, comme c'est le cas pour les variétés étudiées. On constate également, que les variations qui existent sur ces graphiques sont très irrégulières principalement sur les tardifs, et ne permettent pas vraiment de nous prononcer sur l'effet de la densité sur la modélisation du LAI<sub>SH</sub> par le TC.

Les données présentées ont été observées à une seule date. On ne constate pas de loi générale reliant le LAI<sub>SH</sub> et TC pour une densité donnée. Signalons également un élément important, nous n'avons pas fait de suivi régulier à différents stades de la sortie de l'hiver jusqu'au début montaison sur les variables LAI<sub>SH</sub> et TC pour les densités 70 et 350 (monodate). Or, des changements peuvent apparaître au cours de certaines phases du cycle, comme c'est le cas pour nos trois variétés.

- *Effet de la date de semis*

Dans le cas de la date de semis, le suivi est réalisé à différentes dates du cycle (de la sortie d'hiver au début de la montaison). Le nombre de données dont on dispose en semis tardif ne permet pas la convergence du modèle de l'Équation 22 (*Figure II-1.10*) ; de ce fait, il n'est pas possible de faire une analyse statistique sur l'effet de la date de semis sur l'estimation du LAI<sub>SH</sub> à l'aide de TC. On se contentera donc d'une étude graphique. L'observation de la *Figure II-1.10*, montre que l'écart entre les valeurs de LAI<sub>SH</sub> obtenues pour les deux dates de semis n'est pas très marqué. En général, les points des semis tardifs et des précoces appartiennent à la même courbe, avec des valeurs plus faibles pour les tardifs, décalés dans le temps comme on l'a montré sur la *Figure II-1.2* et l'*Annexe II-1.1*. Contrairement à l'effet densité, les résultats obtenus nous permettent de conclure que l'estimation du LAI<sub>SH</sub> n'est pas affectée par la date de semis.

### 1.2.2. Estimation de l'indice foliaire à partir de l'indice de végétation TSAVI

Une analyse similaire est réalisée sur le modèle d'estimation du LAI<sub>SH</sub> à partir de l'indice de végétation TSAVI dont la formule est décrite dans la bibliographie (*Équation 19*).

#### 1.2.2.1. Ajustement des données

La relation entre le LAI<sub>SH</sub> et l'indice TSAVI est de même nature que celle qui relie le LAI<sub>SH</sub> au TC : c'est un modèle logarithmique (*Figure II-1.11*).

$$\text{LAI}_{\text{SH}} = (-1/a) \cdot \text{Log}(1 - b \cdot \text{TSAVI})$$

Équation 23

avec :

- a : la vitesse d'occupation du sol
- b : 1/b valeur asymptotique de TSAVI

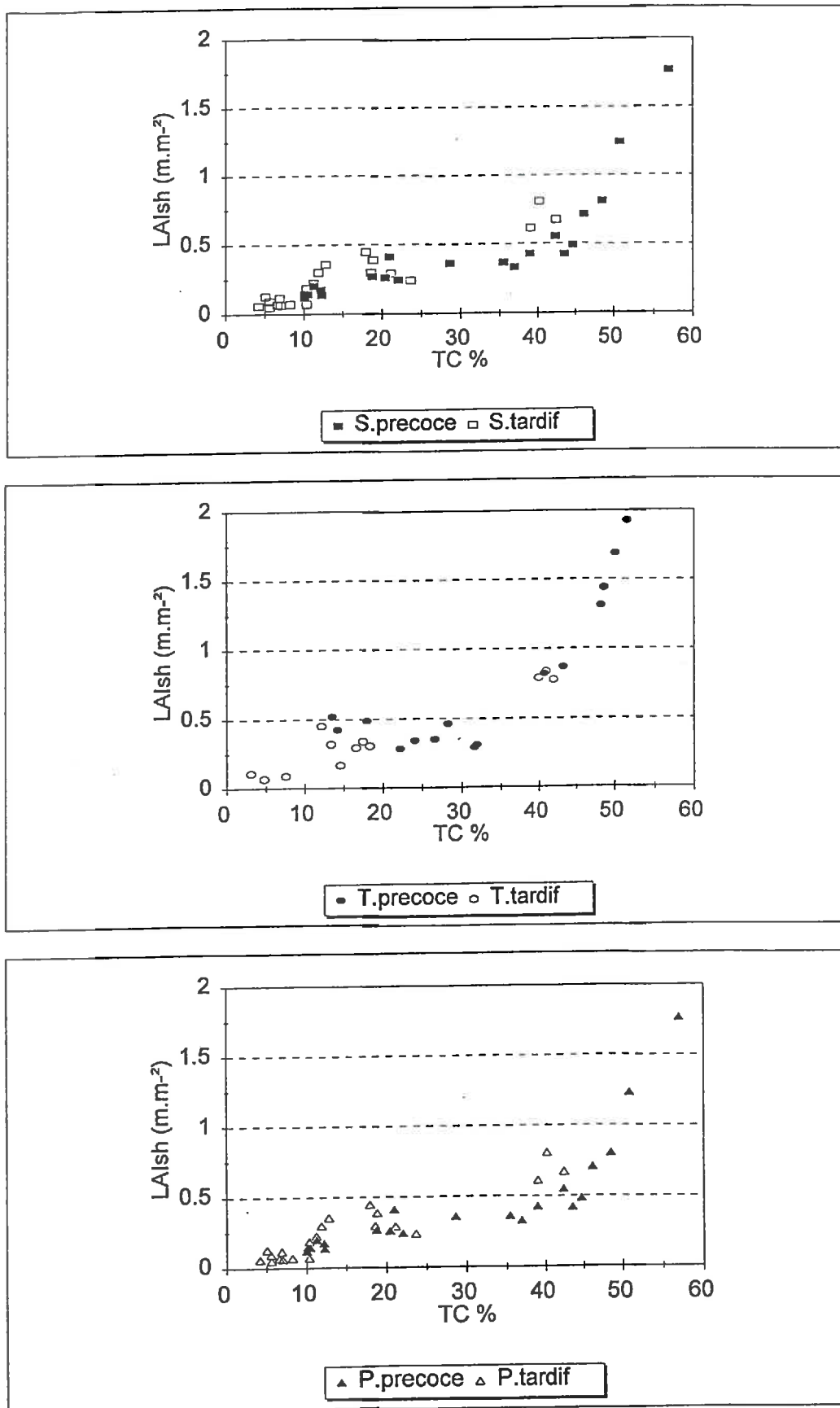


Fig. II-1.10. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{SH}$ ) en fonction du taux de couverture (TC %) de Soissons (S), Thésée (T) et Pernel (P) en densité  $150 p.m^{-2}$  (Semis précoce et tardif; essais 1995 et 1996)

Résultats

Sur la représentation graphique des trois variétés à la densité 150 p.m<sup>2</sup> en semis précoce et tardif (Figures II-1.11 et II-1.12), on constate que les relations entre LAI<sub>SH</sub> et TSAVI ont la même allure que celles entre LAI<sub>SH</sub> et TC. En effet, sur la Figure II-1.11, chacune des variétés étudiées suit une courbe distincte au-delà d'une valeur de TSAVI égale à 0.40 - 0.45.

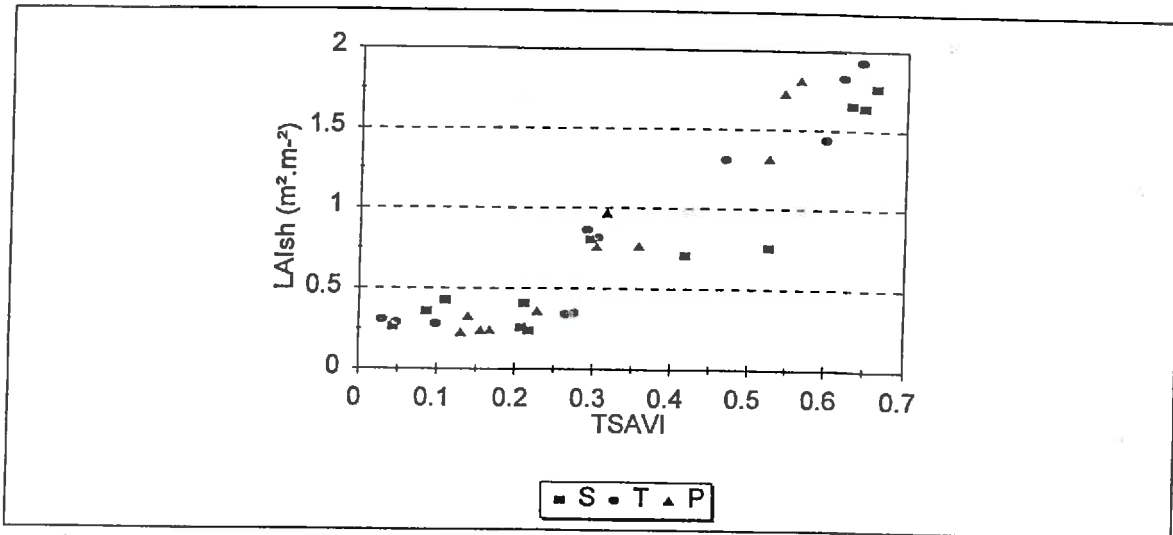


Fig. II-1.11. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver (LAI<sub>SH</sub>) en fonction du TSAVI de Soissons (S), Thésée (T) et Pernel (P) en densité 150 p.m<sup>2</sup> (Semis précoce ; essai 1996)

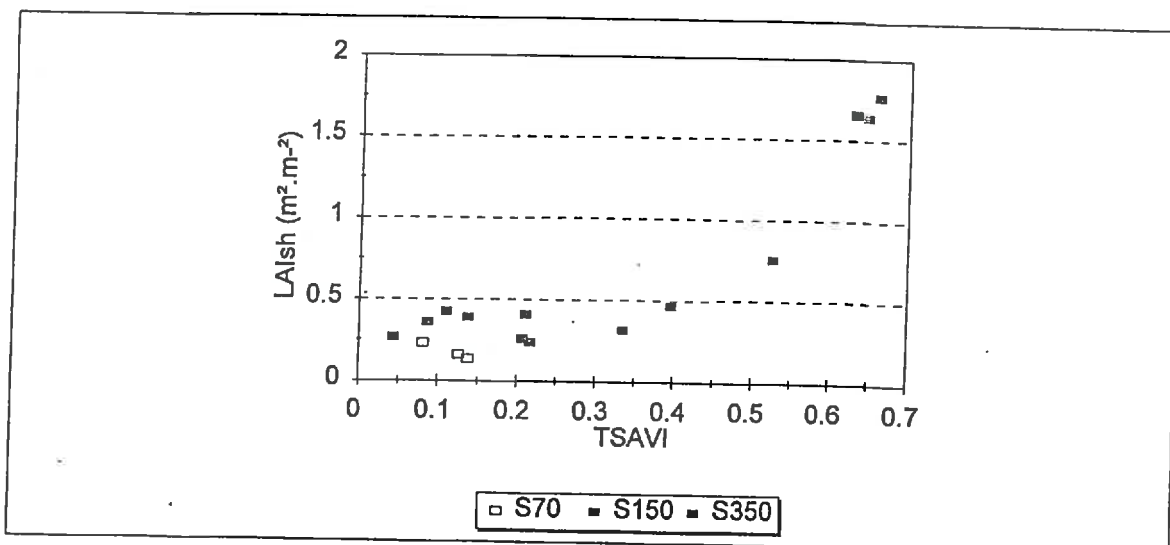


Fig. II-1.12. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver (LAI<sub>SH</sub>) en fonction du TSAVI de Soissons (S) en densités 70, 150 et 350 p.m<sup>2</sup> (Semis précoce ; essai 1996)

Résultats

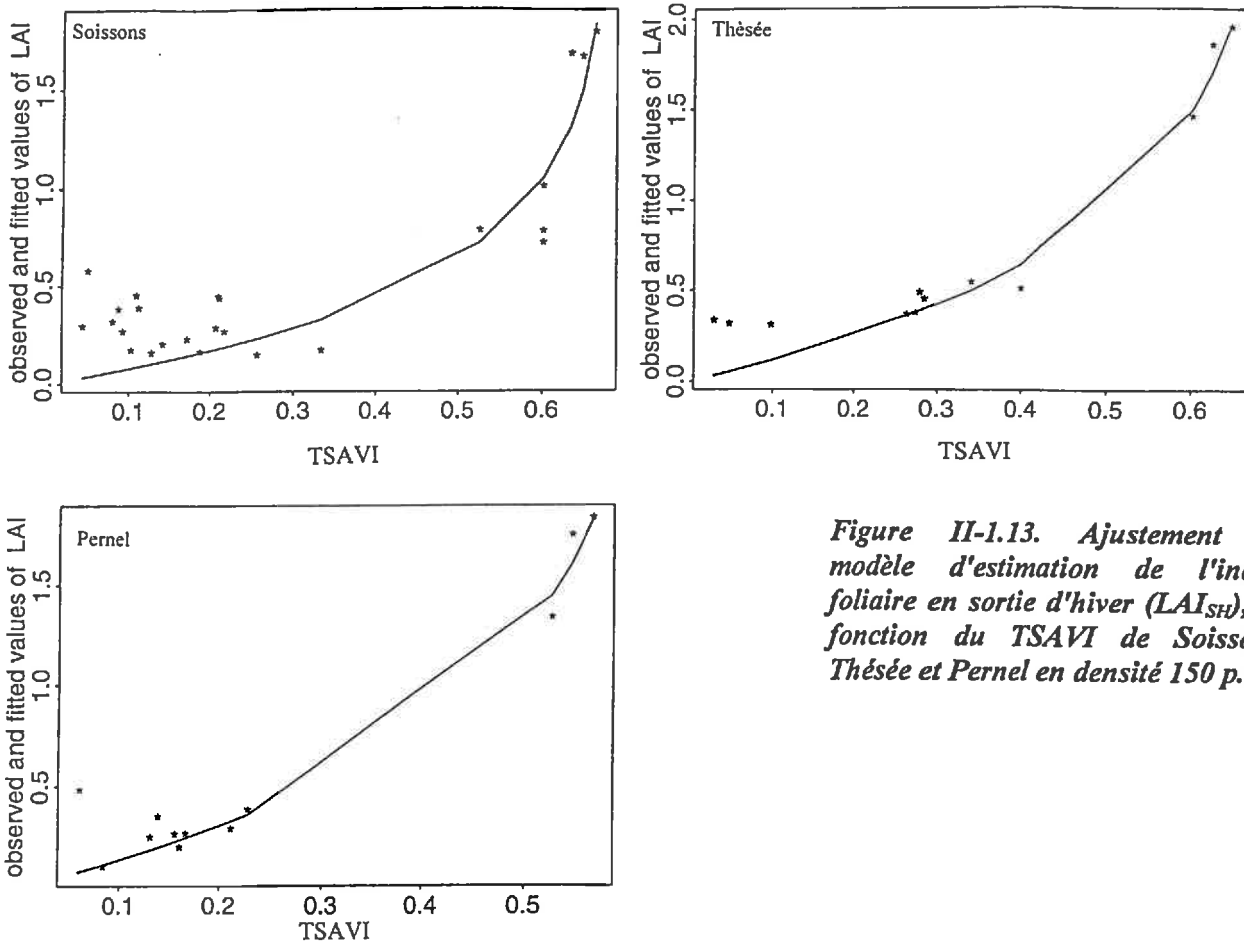


Figure II-1.13. Ajustement du modèle d'estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{SH}$ ), en fonction du TSAVI de Soissons, Thésée et Pernel en densité  $150 \text{ p.m}^{-2}$

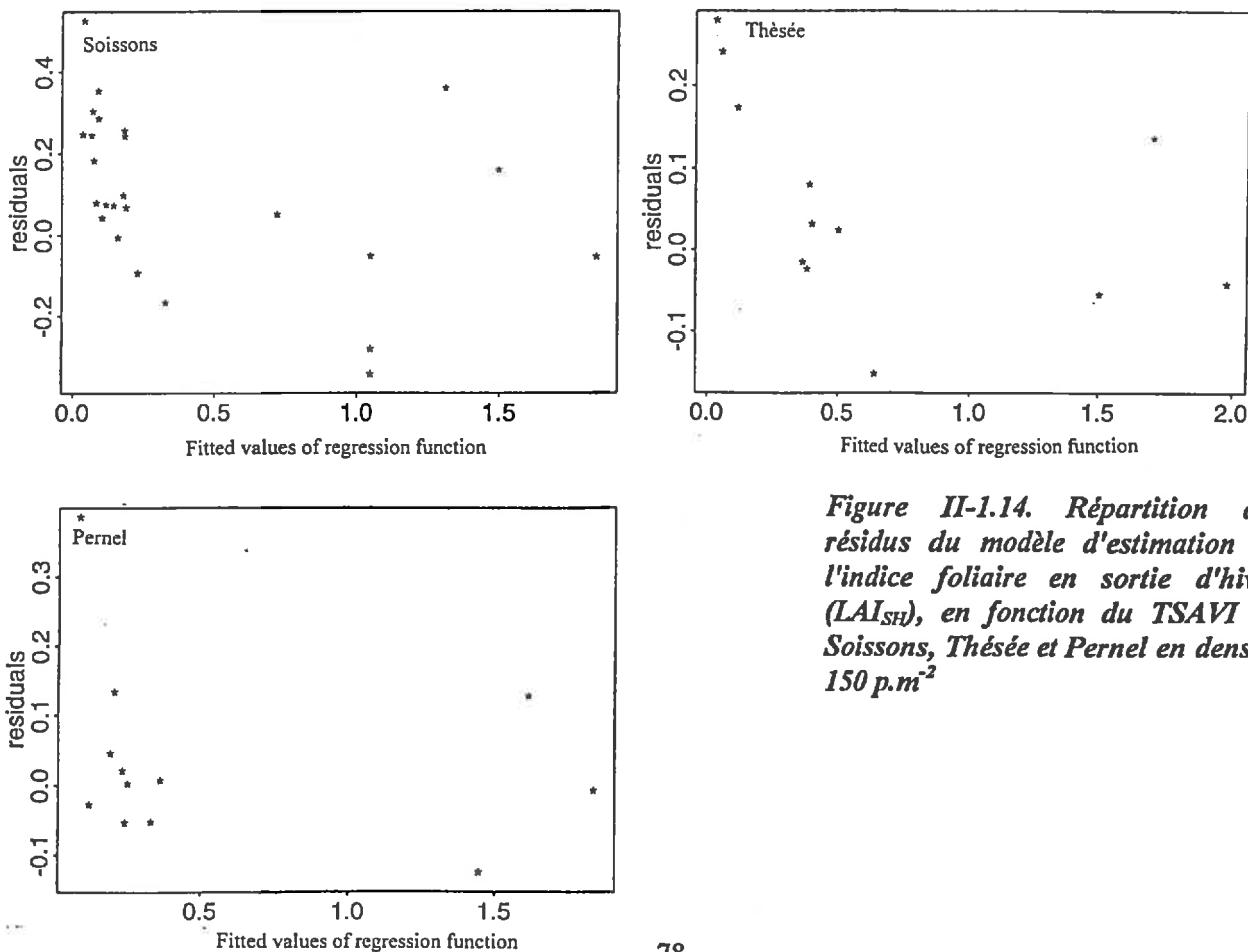


Figure II-1.14. Répartition des résidus du modèle d'estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{SH}$ ), en fonction du TSAVI de Soissons, Thésée et Pernel en densité  $150 \text{ p.m}^{-2}$

## Résultats

- *Valeurs de TSAVI inférieures à 0.4 - 0.45*

Elles correspondent aux stades d'observation précoce. Pour une même valeur de TSAVI, la gamme de variation du LAI<sub>SH</sub>, se situe entre 0.1 et 0.5, ce qui constitue une variation relativement importante pour des valeurs d'indice foliaire à ces stades.

- *Valeurs de TSAVI supérieures à 0.4 - 0.45*

Lorsque le TSAVI atteint ces valeurs, le blé entre dans la phase fin du tallage et le début du redressement. L'allure de la relation devient asymptotique. À TSAVI fixé, on constate que LAI<sub>SH</sub> accroît sa gamme de variation et se situe entre 0.5 et 2.

### 1.2.2.2. Analyse statistique

- *Effet variétal*

Pour les mêmes raisons que celles invoquées ci-dessus, la comparaison des courbes des variétés Soissons, Thésée et Pernel, par le test de vraisemblance, est réalisée uniquement sur la densité 150 p.m<sup>2</sup>. D'après les résultats obtenus, les variétés étudiées sont différentes : les LAI<sub>SH</sub> correspondant à une valeur identique de TSAVI diffèrent selon la variété (*Tableau II-1.2*).

On obtient un bon ajustement du modèle (*Figure II-1.13*) sur les valeurs observées, avec une distribution aléatoires des résidus (*Figure II-1.14*).

Paramètre	Variété	Valeur	Erreur Standard	Valeur de "t"
B	Soissons	1.478	0.022	66.013
A		2.094	0.243	8.597
B	Thésée	1.441	0.073	19.600
A		1.251	0.268	4.952
B	Pernel	1.590	0.149	10.606
A		1.590	0.392	3.188

Tableau II-1.2. Valeurs des paramètres de l'Équation 23

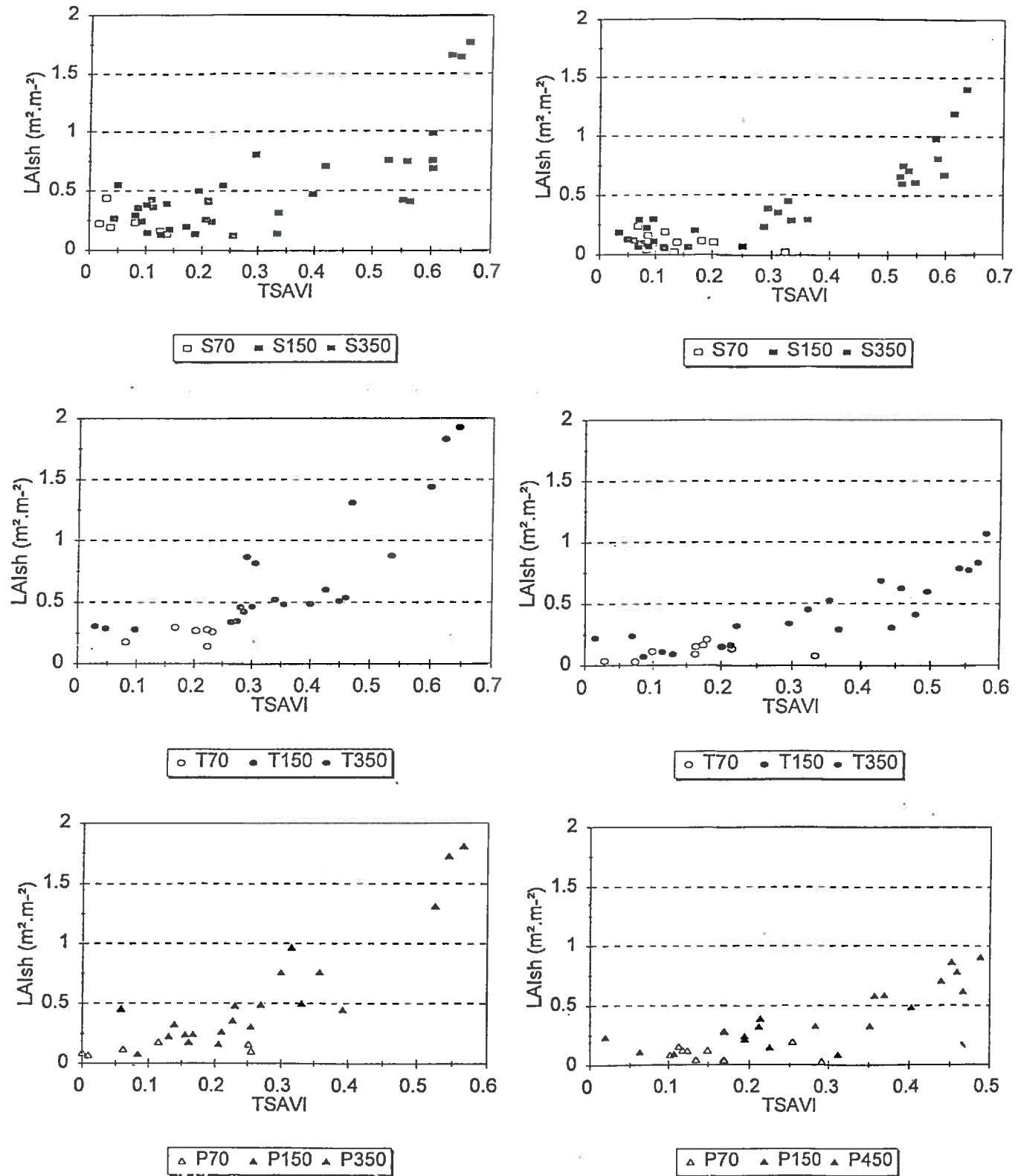


Fig. II-1.15. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{sh}$ ) en fonction du TSAVI de Soissons (S), Thésée (T) et Pernel (P) en densité 70, 150 et 350 p.m<sup>2</sup> (à gauche, en semis précoce des essais 1995 et 1996 ; à droite en semis tardif)

## Résultats

### 1.2.2.3. Analyse graphique

- *Comparaison des densités*

En semis précoce, sur les graphiques des variétés Thésée et Pernel (Figure II-1.15), les réponses des trois densités varient peu. Les valeurs des densités 70 et 350 sont très proches de celles de la densité 150 et se retrouvent sur la même courbe dans le cas de Thésée. Sur Soissons, seules les densités 70 et 150 sont très proches (Figure II-1.15). La densité 350 donne des points anormalement alignés parallèlement à l'axe des TSAVI, c'est-à-dire ayant une même valeur de LAI<sub>SH</sub>. Si l'on fait la comparaison des densités 70, 150 et 350 uniquement pour l'essai 1996 (Figure II-1.16), on s'aperçoit que les LAI<sub>SH</sub> en densité 350 sont alignés avec les 150 à même TSAVI. Le protocole de mesure adopté en 1995 (Cf. Matériel et Méthode) pourrait être à l'origine des variations de réponse en fonction des densités. En effet, contrairement à 1996, les mesures des variables réflectance et LAI ont été réalisées sur des placettes différentes, ce qui pourrait être à l'origine d'un biais entre les réflectances et les LAI réellement mis en place.

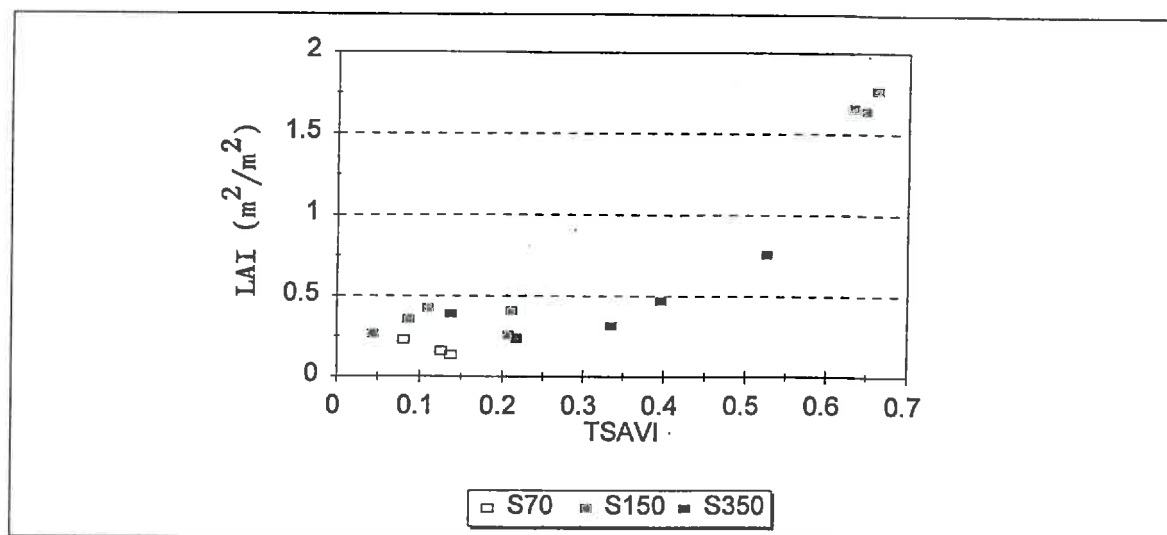


Figure II-1.16. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver (LAI<sub>SH</sub>) en fonction du TSAVI de Soissons (S), en densités 70, 150 et 350 p.m-2 (semis précoce ; essai 1996)



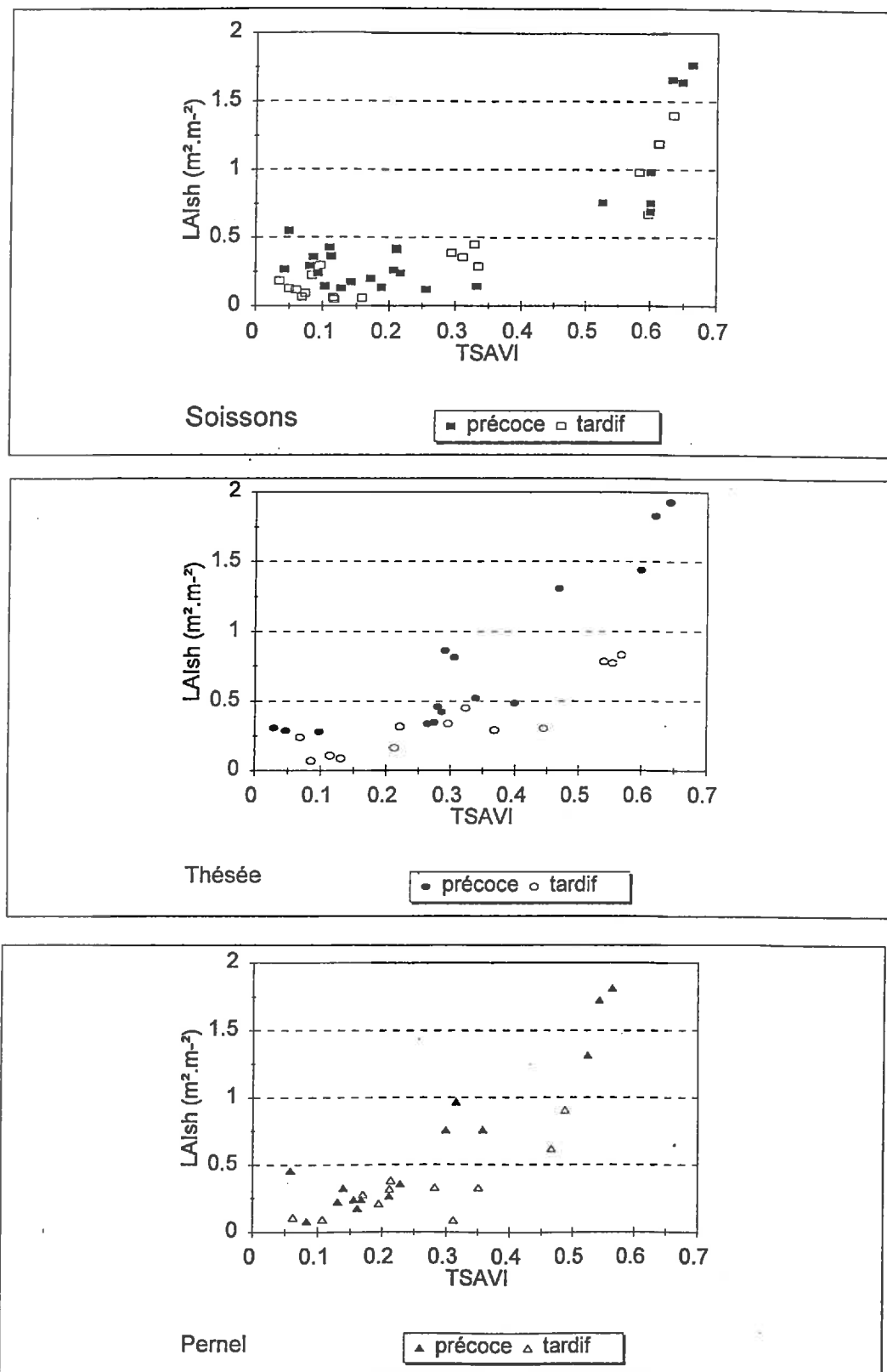


Figure II-1.17. Estimation de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{SH}$ ) en fonction du TSAVI de Soissons (S), Thésée (T) et Pernel (P) en densité 150 p.m-2 (semis précoce et tardif ; essais 1995 et 1996)

## Résultats

*En semis tardif*, sur Soissons et Thésée les différentes densités sont confondues (*Figure II-1.17*). La dispersion que l'on observe sur Pernel est surtout marquée pour les différentes observations de la densité 150 et pourrait s'expliquer par le cumul d'erreurs de mesure du LAI et de la réflectance.

- *Comparaison dates de semis*

Les valeurs de la relation du LAI<sub>SH</sub> en fonction du TSAVI sont beaucoup plus dispersées (*Figure II-1.17*) que celles reliant le LAI<sub>SH</sub> au TC (*Figure II-1.10*). Sur Soissons, pour des valeurs de TSAVI supérieures à 0.1, la différence entre les deux dates n'est pas évidente. Sur Pernel et Thésée, la différence entre les deux dates n'apparaît que pour quelques points et est liée probablement à des erreurs de mesure, auxquelles nous sommes plus exposés dans le cas des mesures de la réflectance que dans celui des mesures de TC. Mais pour nos variétés, dans la phase ascendante de la relation LAI<sub>SH</sub>/TSAVI, la différence entre dates est quasiment absente. Au vu de ces résultats on aurait plutôt tendance à rejeter l'effet de la date de semis sur la modélisation du LAI<sub>SH</sub> en fonction du TSAVI.

### 1.3. Discussion et Conclusion partielle

#### 1.3.1. La relation entre le LAI<sub>SH</sub> et les indicateurs du couvert n'est pas unique

D'après nos résultats, les deux indicateurs TC et TSAVI sont reliés au LAI<sub>SH</sub> par une relation de type exponentiel. Les réponses spectrales et les recouvrements du sol varient en fonction de l'évolution du LAI<sub>SH</sub> et, lorsque les valeurs de TC approchent les 60 %, on peut considérer que le couvert atteint un maximum du Taux de Couverture. En effet, dans la pratique, le couvert de blé n'atteint jamais les 100 % de couverture, ce qui a été montré sur d'autres cultures (Delhay, 1986).

Nous avons largement montré dans l'étude bibliographique, que le type de cultivar, les pratiques culturales et les conditions externes ont une influence sur les relations liant le LAI<sub>SH</sub> au TC et aux indices de végétation. D'après les résultats obtenus, l'intensité de ces effets dépend du stade de développement.

##### 1.3.1.1. Variation des relations selon les stades de développement

La période allant de la sortie de l'hiver jusqu'au stade début montaison correspond à la partie du cycle durant laquelle on peut faire les mesures du TC et de la réflectance du couvert. Durant toute cette période le couvert est en continuelle évolution physiologique en raison de la combinaison des modifications liées au développement et à la croissance.

##### 1.3.1.2. Le développement

- *Le tallage*

Au cours du processus de tallage, qui reste dominant durant une bonne partie de la période considérée, il y a augmentation du nombre de talles et de feuilles, créant ainsi des variations au sein des différents éléments de la plante et conduisant à des réorientations, des changements d'angles de port des feuilles et des talles. Il y a aussi des changements liés à la proximité entre

les différentes plantes du peuplement. Plus on avance dans le temps, plus le volume spatial occupé par le couvert est dense : il y a apparition d'un phénomène de gêne physique. On constate généralement que les plantes gèrent leur espace de façon à s'éviter le plus possible. Cette gestion de l'espace par les différentes plantes du peuplement provoque forcément un remaniement de la structure du couvert.

- *Arrêt du tallage et redressement*

À la fin du tallage, il y a arrêt de l'émission des talles et, simultanément, on observe le redressement des talles. Les phénomènes d'arrêt du tallage et de redressement des talles se répercutent sur le TC et la réflectance radiométrique. Pour un traitement déterminé, par exemple dans le cas de la variété Soissons à la densité 150, les valeurs des indicateurs (TC et TSAVI) augmentent très vite au départ, puis ralentissent à partir des valeurs 35 à 40 % pour le TC et 0.4 à 0.5 pour le TSAVI ; par contre, pour le LAI<sub>SH</sub>, c'est plutôt l'inverse : il augmente faiblement au début puis d'une manière importante. En effet, pour les stades précoces (phase plein tallage), le processus de tallage est dominant, favorisant donc le recouvrement du sol. Lorsqu'on arrive au stade arrêt du tallage et au début du redressement, la croissance du recouvrement, qui était favorisée par le tallage, ralentit (mais ne s'arrête pas) et tend vers une valeur asymptotique qui diffère selon les variétés. À ce stade c'est la croissance des feuilles qui est dominante.

Parmi les variétés que nous avons étudiées, Pernel constitue l'exemple le plus frappant de changement de port des talles. En effet, au stade précoce, cette variété est complètement étalée sur le sol, sous forme d'une rosette. Au début cette plante à feuilles petites et fines, mais à port étalé, occupe autant le sol que Thésée et Soissons à feuilles plus grandes et plus larges. Lorsque le nombre de talles augmente et que le taux de couverture commence à être relativement important, les talles de Pernel sont semi-dressées (d'après les observations sur le terrain). À ce même stade de couverture, les talles de Thésée et Soissons sont moins dressées.

- *La croissance*

Pour la période du cycle étudiée, seule la croissance des feuilles est considérée, celle des tiges n'étant pas importante. Pour des observations très précoces, la surface foliaire (longueurs et largeurs) est plutôt négligeable. Au fur et à mesure que l'on avance dans le cycle, les feuilles ligulées (ayant terminé leur croissance) ont des surfaces plus grandes. Les changements dans la réflectance du couvert (Daughtry *et al.*, 1980) et dans la surface foliaire projetée représentée par le TC sont attribués à la différence des stades et du LAI. Cependant, il faut également considérer que les erreurs de mesure de la réflectance (Price & Bausch, 1995) et du LAI, sont des causes de perturbations des relations.

### *1.3.2. Effets conjugués des stades et des conditions extérieures sur la qualité de mesure des indicateurs*

Sur les graphiques montrant les relations entre le LAI<sub>SH</sub> et les indicateurs (*Figures II-1.5 et II-1.11*), on note qu'il y a une variabilité plus marquée lorsque le recouvrement du sol est faible (inférieur à 20 %). En effet, en observation très précoce, pour des valeurs faibles des indicateurs, la variation du LAI<sub>SH</sub> pour une valeur identique de TC ou de TSAVI fluctue dans une gamme relativement large. On peut avancer des explications suivantes.

## Résultats

### 1.3.2.1. Fluctuations de la relation $LAI_{SH}$ -TC en situation de faible recouvrement

Etant donné la faible résolution que présente le matériel de traitement d'image (résolution insuffisante en pixels de la caméra (512 x 512, Cf. Matériel et Méthode), pour l'estimation du TC, il est très difficile de distinguer la limite entre le sol et la végétation, lorsque celle-ci est aussi faible.

### 1.3.2.2. Fluctuations de la relation $LAI_{SH}$ -TSAVI en situation de faible recouvrement

Les fluctuations de la relation sont encore plus marquées pour l'indicateur TSAVI. Dans ce cas c'est principalement la sensibilité au sol quasiment dominant qui pourrait être la source de variation. L'utilisation d'un indice de végétation (TSAVI) qui tient compte de l'effet sol n'atténue pas totalement le bruit apporté par le sol aux mesures.

D'autres conditions externes sont à ajouter à l'effet propre du sol. Dans notre expérimentation, il s'agit notamment des ombres portées qui nous ont beaucoup gênés pour le traitement des images de l'essai 1995. C'est la raison pour laquelle, lors de la campagne de mesures 1996, on a utilisé un dispositif de diffusion de la lumière ambiante au moyen d'un voile translucide (Cf. Matériel et Méthode, partie 2).

Finalement les effets conjugués des stades et des conditions extérieures ne sont pas sans incidence sur l'interprétation des résultats, ce qui pose problème pour l'élaboration des conclusions.

### 1.3.3. Variation des relations entre le $LAI_{SH}$ et les indicateurs en fonction des facteurs agronomiques

Les techniques culturales (densités, variétés et dates de semis) conduisent à des changements de valeur de la variable agronomique LAI, changements qui, à leur tour, se manifestent à travers la réflectance et le TC. D'après nos résultats, la variété a un effet significatif sur l'estimation du  $LAI_{SH}$  en fonction du TC et du TSAVI. Aux stades précoces, les variétés Soissons, Pernel et Thésée ne se distinguent pas de façon significative : elles ont presque le même  $LAI_{SH}$  pour un TC donné ; par la suite, elles se différencient. En effet aux stades très précoces, lorsque les recouvrements sont faibles, Pernel a un port très étalé (en rosette) comparativement aux deux autres variétés. Puis lorsqu'on se rapproche des stades fin tallage et "épi 1cm", Pernel se redresse (observations sur le terrain) de façon beaucoup plus visible que Soissons et Thésée qui ont cependant des port dressés à semi-dressés (Cf. *Tableau I-3-1* de "Description des variétés" dans Matériel et Méthodes). Le redressement conduit Pernel à recouvrir moins vite le sol que Soissons et Thésée. Cette variation de port se manifeste à travers les paramètres "a" et "b", des *Équations 22 et 23* et, selon Kollenkark *et al.* (1982b), elle est déterminée par les caractéristiques des cultivars (port, largeur et longueur des feuilles, ombre portée, vitesse à recouvrir le sol ...).

D'autres travaux négligent cette variation de l'installation du LAI en début de cycle. Ainsi, Bouman *et al.* (1992a) et Bouman (1992) attribuent les variations autour de la courbe ajustée, non pas aux traitements (variétés) mais à des erreurs faites sur les mesures uniquement. Cependant on soulignera que ces auteurs ont étudié l'ensemble du cycle du blé. Dans ce contexte les variations, observées en début de cycle autour de l'ajustement moyen, sont

négligeables par rapport à l'ensemble du cycle. En revanche dans notre cas, les variations du LAI<sub>SH</sub> peuvent influencer sur l'estimation des besoins en azote. Par conséquent, la gamme dans laquelle le modèle reste insensible à la variation du LAI<sub>SH</sub> doit obligatoirement être définie ultérieurement.

Dans la majorité des études qui traitent de l'utilisation de l'estimation de l'indice foliaire (Clever, 1988b ; Bouman, 1992, 1992a), l'objectif est, soit d'avoir un indicateur représentatif de la production potentielle, soit d'utiliser cet indicateur pour estimer l'interception puis la biomasse, en réalisant plusieurs mesures de réflectance (la réflectance étant la plus utilisée dans la quasi totalité des études). Dans le contexte, une erreur d'estimation du LAI à une date donnée peut être corrigée lors de la mesure suivante. Par contre, étant donné notre objectif, il est impératif d'estimer avec précision l'indice foliaire formé à la date d'observation, car cette mesure est unique et une erreur se répercuterait sur la prédiction des besoins en azote.

Nos résultats montrent que les valeurs des paramètres "a" et "b" de l'Équation 23, sont différentes de celles que l'on rencontre dans la littérature (Clever, 1988b, 1989, 1994 ; Bouman, 1993....). En effet, on s'est limité à la première partie du cycle de blé. Durant toute cette période, le couvert n'est pas complètement fermé et, en particulier, il n'y a pas encore de saturation de la réponse dans les bandes du visible (Gilabert *et al.*, 1996). En revanche, si l'on considère les jeux de données couvrant le cycle entier (Bouman *et al.*, 1990), l'allure logarithmique de la courbe (Équation 22) écrase les valeurs de LAI<sub>SH</sub> et, par conséquent, rend l'indice de végétation peu discriminant.

Pour toutes ces raisons, il n'est évidemment pas envisageable que la courbe de régression de différentes cultures ou variétés (Équations 22 et 23) puisse être facilement transférable à d'autres, ou qu'une régression établie sur une année puisse être facilement utilisable l'année suivante (Clevers, 1989).

Nos résultats rapportent également un effet non significatif de la date de semis sur l'estimation du LAI à partir de TC ou de TSAVI. Si l'on s'en tient aux indices de végétation, ce résultat est en désaccord avec de nombreux travaux sur diverses espèces. Ainsi, sur blé de printemps, Daughtry *et al.* (1980) montrent que la date de semis est le facteur primaire qui affecte la réflectance du couvert depuis le tallage jusqu'à la maturité. Sur orge Clevers (1988a), et sur soja Kollenkark *et al.* (1982a) et Asrar *et al.* (1985) rapportent que la date de semis a un effet significatif sur l'estimation du LAI à partir de la réflectance, de même qu'il y a aussi un effet significatif de l'interaction entre la teneur en azote et la date. Kollenkark *et al.* (1982a) et Asrar (1985) sur soja, montrent que c'est au stade précoce que la date de semis constitue un facteur important de la variation de la réponse spectrale. Effectivement, la différence de dates de semis conduit à une variation de la mise en place du couvert végétal. À même stade, en semis tardif, la surface foliaire du couvert est plus faible qu'en précoce, ce qui se traduit par des réponses différentes des indices TC et TSAVI et de la variable LAI.

Nous pouvons avancer l'explication suivante : que ces auteurs se sont intéressés à la variation de la réponse spectrale au cours du temps (jours calendaires ou degrés-jours après levée) ; mais si l'on porte le LAI en fonction des indicateurs, on n'observe pas de différence significative entre les dates de semis.

## Résultats

Compte tenu, d'une part du faible nombre de données, d'autre part des risques d'erreurs de mesure sur les indicateurs et le LAI, il ne nous est pas possible de conclure sur la dépendance de la relation LAI-indicateurs vis-à-vis de la densité.

Cependant, Kollenkark *et al.* (1982a) sur soja, pour un LAI égal à 3, rapportent que les valeurs de l'indice *greenness* sont plus fortes sur les densités élevées. De même, Bouman *et al.* (1990) mettent en cause la densité sur plusieurs céréales pour expliquer la variabilité de la réponse spectrale de la réflectance. Nous proposons l'explication suivante tirée de nos observations : les couverts, semés à densité plus forte, ont une vitesse de couverture plus élevée, ce qui se traduit par une valeur plus élevée de la réflectance dans l'IR proche et plus faible dans le visible (absorption).

Lors de cette discussion, nous avons mis en cause les stades de développement et les pratiques culturales comme étant les sources de variation de la relation LAI<sub>SH</sub>-indicateurs ; nous avons également mentionné les erreurs de mesure et les conditions externes. C'est la combinaison de ces différentes causes qui produit la variabilité. Il y a un problème de confusion d'effet de ces facteurs. Il est donc difficile d'extraire la part et l'intensité de l'influence de chacun d'eux sur la relation étudiée. En fait, il ressort de la discussion précédente que les conditions agronomiques influent directement sur la structure du couvert, au sens large.

Nous allons préciser ci-dessous, au travers de la bibliographie, l'état des connaissances dans ce domaine.

### *1.3.4. Effets des facteurs agronomiques sur la distribution angulaire des feuilles*

Nous avons mis en évidence, dans nos résultats, que les cultivars diffèrent par leur géométrie au cours du temps et particulièrement par le port des feuilles et des tiges. Cette géométrie est affectée par un ensemble de facteurs : espacements des rangs, conditions atmosphériques (vent, pluies...)(Bouman *et al.*, 1990). Ces facteurs conditionnent l'arrangement des feuilles dans le couvert et, par voie de conséquence, le LAI et la réflectance (Jackson & Pinter, 1986). Chez le blé d'hiver les feuilles, lorsqu'elles sortent, sont verticales. Au fur et à mesure de sa croissance, l'angle d'insertion de la feuille par rapport à la tige qui la porte, augmente comme le mentionnent Clevers *et al.* (1994). La distribution angulaire des feuilles est un des principaux facteurs qui influent sur la relation entre le LAI et l'indice de végétation (WDVI). Par conséquent, une bonne estimation de la distribution angulaire des feuilles et des tiges apparaît comme un point clé de notre étude.

#### *1.3.4.1. Effet de la densité sur la distribution spatiale des éléments du couvert*

La densité influe sur la distribution spatiale des éléments du couvert. En densité élevée, le couvert est relativement homogène et fermé sur le rang. L'inter-rang est bien marqué. Mais sur une parcelle où le blé est clair, la végétation est extrêmement hétérogène, avec des espacements entre plantes très différents. Quand on parcourt une telle parcelle, la structure est en continuel changement, avec des variations plus ou moins fortes.

#### 1.3.4.2. Influence de la variété sur la structure

Les caractéristiques variétales concernent la morphologie, les organes et leur géométrie angulaire, la vitesse de recouvrement du sol, et font varier la structure du couvert d'une façon significative (lorsqu'elles sont très différentes)(Jackson & Pinter, 1986 ; Malet, 1996).

L'ensemble de ces facteurs, combinés à la variabilité des stades de développement et aux facteurs externes, fait varier la structure du couvert et, par conséquent, les propriétés globales de réflexion, d'absorption et de transmission du rayonnement incident dans les différentes bandes spectrales (Bouman *et al.*, 1990 ; Jackson & Pinter, 1986 ; Malet, 1996).

#### Conclusion partielle

*La combinaison des effets des conditions externes du milieu et des pratiques culturales influe directement sur la structure qui se traduit à son tour sur la valeur du taux de couverture et de la réflectance.*

*La structure peut conduire à une variation, parfois considérable, de l'estimation de l'indice foliaire. Comme l'indice foliaire constitue une variable d'entrée clé du modèle de la prédiction des besoins en azote, il est primordial de pouvoir l'estimer avec une bonne précision au voisinage du début de la montaison. Pour cela il est nécessaire d'acquérir des connaissances sur les facteurs qui font varier la structure. Cependant leur nombre et leurs interactions rendent leur étude très difficile à maîtriser. Une analyse détaillée permettant de comprendre les lois sous-jacentes doit être réalisée. La modélisation en 3D est l'outil le plus complet qui nous permet, a priori, de comprendre comment se met en place l'appareil foliaire et de comprendre les règles d'arrangement des feuilles et des talles au cours du temps.*

*Cette étude doit conduire à paramétrer les relations " $LAI_{SH} - TC$ " et " $LAI_{SH} - Réflectance$ " pour différentes conditions de variété, de densité, auxquelles on a vu qu'elles étaient sensibles. Les paramètres de géométrie 3D retenus devront être accessibles par la mesure, et leur évolution au cours du temps devra être précisée. Cela pourrait aboutir à une typologie des variétés, puisque le facteur variétal semble particulièrement important. La suite de ce chapitre présente cette approche 3D.*

## 2 /MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE (3D) DU BLÉ D'HIVER

### 2.1. Démarche de l'analyse des données

L'objectif est de construire par simulation des abaques des relation LAI/TC et LAI/TSAVI à partir de la maquette 3D du couvert. Ces abaques doivent permettre de lire la valeur du LAI correspondant à n'importe quelle valeur de TC ou de TSAVI mesurée et ce, quelles que soient soit la variété, la densité et la date de semis. Pour cela, on doit déterminer les variables d'entrée réellement nécessaires à la reconstruction de la maquette, c'est-à-dire définir les paramètres de structure qui influent sur les relations LAI/TC et LAI/TSAVI. Il faut :

- 1) Réaliser une paramétrisation du modèle du blé. Il s'agit, dans une première phase, d'extraire les paramètres qui permettent de décrire un plant de blé d'hiver ; dans une seconde phase, de paramétrer les modèles décrivant les formes des différents objets de la plante
- 2) Valider les variables de sortie de la maquette
- 3) Etudier la sensibilité des relations aux paramètres de structure

C'est à partir du squelette 3D qu'on extrait les paramètres angulaires et des longueurs des tiges. Cette étude a été réalisée tout d'abord sur la variété Soissons 150. Pour la validation et l'étude de sensibilité, nous avons étendu les résultats à d'autres variétés (Thésée et Pernel).

⇒ **Analyse des paramètres  $\theta_0$  et  $\theta_1$** . Nous avons constaté pour tous les prélèvements une hétérogénéité du jeu de donnée, du fait du décalage dans le développement des plantes (Mc Master, 1997), qui se manifeste particulièrement en densité faibles (*Annexe II-1.5*). Pour résoudre ce problème, il a fallu synchroniser les plantes. L'analyse consiste à positionner la dernière feuille sortie à la même date sur l'échelle de temps. Exemple : deux plantes avec 4 et 5 feuilles, la 5ème et la 4ème feuilles de chaque plante sont translatées sur l'échelle de temps, et on recale le temps par rapport à la dernière feuille sortie, c'est-à-dire la 4ème.

⇒ **Analyse de l'inclinaison des tiges  $\theta$** . Les mesures des angles de port des talles par rapport au brin-maître sont faites sur la moyenne de 15 plantes sur image stéréovision.

⇒ **Analyse des longueurs et largeurs des feuilles ( $L$ ,  $l$ )**. Elle représente la moyenne des longueurs et des largeurs des feuilles par étage foliaire sur les 15 plantes.

⇒ **Analyse des angles d'azimuts**. Ils représentent la moyenne par étage foliaire des 15 plantes.

⇒ **Analyse de  $S_\Psi$  et de  $\Psi$** . Les données représentent la moyenne des mesures réalisées sur 10 plantes.

⇒ **Analyse des autres paramètres ( $r$ ,  $L_{bm}$ ,  $L_t$ )**. Ils sont obtenus sur une moyenne de 15 plantes.

En raison de la complexité de la structure de la plante de blé d'hiver en cours de tallage et du nombre élevé de degrés de liberté, il a été nécessaire de faire trois hypothèses simplificatrices principales.



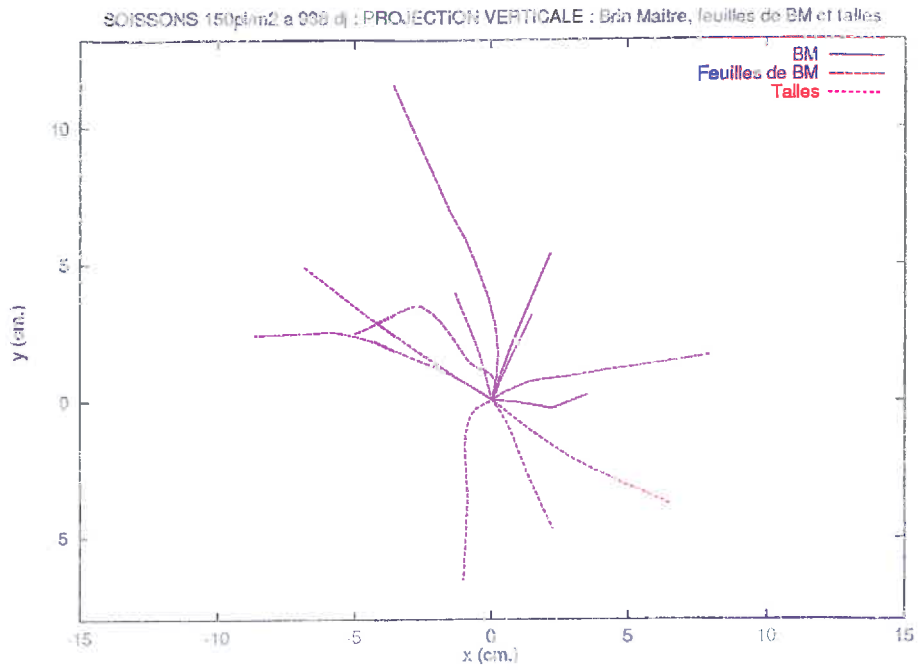


Figure II-1.18a. Comparaison d'azimuts. Soissons, 150 pl/m<sup>2</sup>

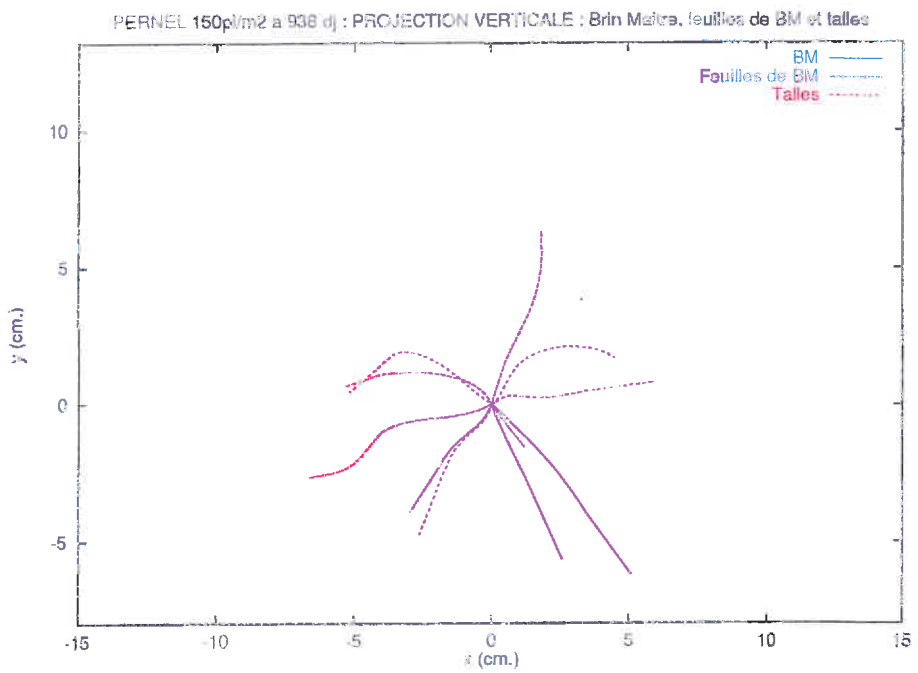


Figure II-1.18b. Comparaison d'azimuts. Pernel, 150 pl/m<sup>2</sup>

## 2.2. Forme des feuilles dans l'espace 3D et hypothèses simplificatrices

Tout au long de la période d'étude "Sortie hiver-Début montaison", par comparaison aux tiges les feuilles constituent l'objet prédominant par rapport à la surface occupée. Leur forme est élémentaire dans l'espace 3D : elle est totalement décrite par l'ensemble des positions d'un trièdre élémentaire "oxyz" (Annexe II-1.6) dont les axes sont respectivement :

- ox direction normale du limbe
- oy direction définie par la ligne centrale, vers l'extrémité
- oz direction perpendiculaire à ox oy, respectant le fait que le trièdre est direct.

Les origines successives du trièdre sont données en fonction de l'abscisse curviligne adimensionnée ( $s$ ) :  $s = 0$  à l'insertion et  $s = 1$  à l'extrémité. Les changements d'orientation des trois axes sont donnés par les coordonnées relatives des variations de :

- $\delta \Psi$  angle de torsion autour de oz
- $\delta \varphi$  angle d'azimut autour de ox
- $\delta \theta$  angle d'inclinaison autour de oy

### • Hypothèse 1

La forme de la feuille dans l'espace 3D est complètement définie dès lors que l'on se donne des fonction  $\Psi (s)$  et  $\theta (s)$ . En fait, une variation  $\delta \varphi$  ne s'observe pas sur les plantes réelles et correspondrait à une déchirure du limbe.

### • Hypothèse 2

Les variables angulaires qui décrivent la feuille ( $\Psi (s)$  et  $\theta (s)$ ), de même que les variables décrivant l'insertion de la feuille sur la tige  $\theta$  (feuille),  $\theta$  (tige),  $\varphi$  (tige), sont considérées comme indépendantes. On impose en outre à la feuille d'être contenue entièrement dans un plan vertical (analogie avec les feuilles du modèle maïs).

## 2.3. Simulation de peuplements de blé

Nous avons développé dans "Matériel et Méthodes" les différentes phases de simulation du blé d'hiver. Dans cette partie, nous exposerons les principaux résultats sur la variation des paramètres au cours du temps.

### 2.3.1. Analyse du squelette 3D

On a quantifié l'influence que les conditions agronomiques exercent sur les paramètres structuraux et principalement sur l'azimut et l'inclinaison des tiges (talles et brin-maître). Les squelettes 3D sont présentés sous deux formes distinctes pour faciliter leur lecture :

- projection horizontale pour donner accès aux azimuts,
- profil donnant les inclinaison ou les pentes.

#### 2.3.1.1. Azimuts des directions du brin-maître et des talles

Les Figures II-1.18 a et b montrent clairement que les talles se développent dans le demi-espace du plan horizontal opposé au brin-maître. Cette allure, généralement observée, démontre l'aptitude de la plante à coloniser l'espace et à couvrir le sol de façon isotrope. Cela montre qu'il n'y a pas d'azimut privilégié lors de l'émission d'une tige. Par analogie, on a considéré que la première feuille émise n'avait pas d'azimut privilégié. On prendra une distribution uniforme des azimuts lors de la construction de la maquette.

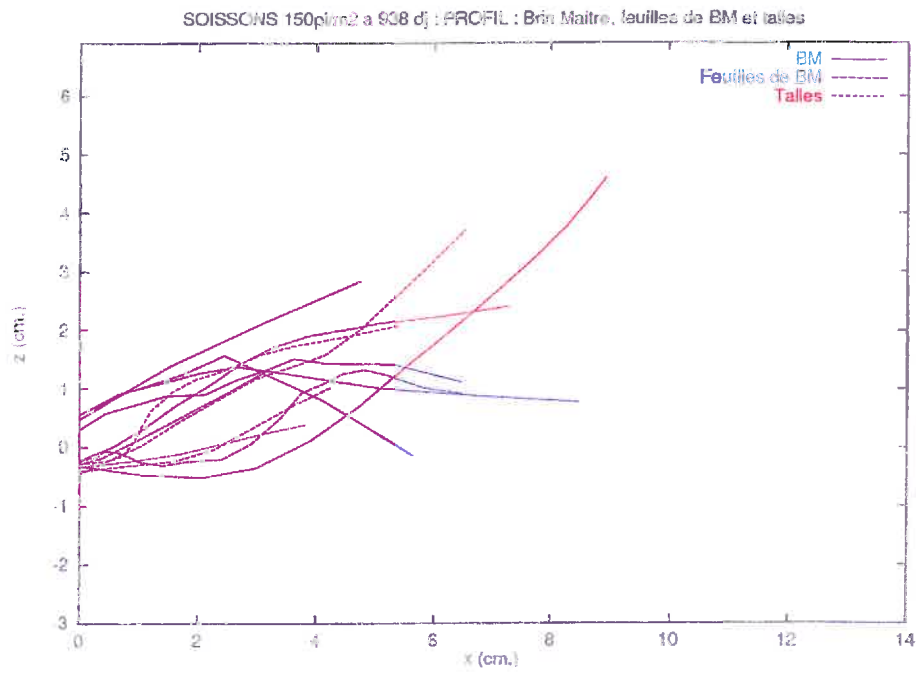


Figure II-1.19a. Comparaison de profils. Soissons, 150 pl/m<sup>2</sup>

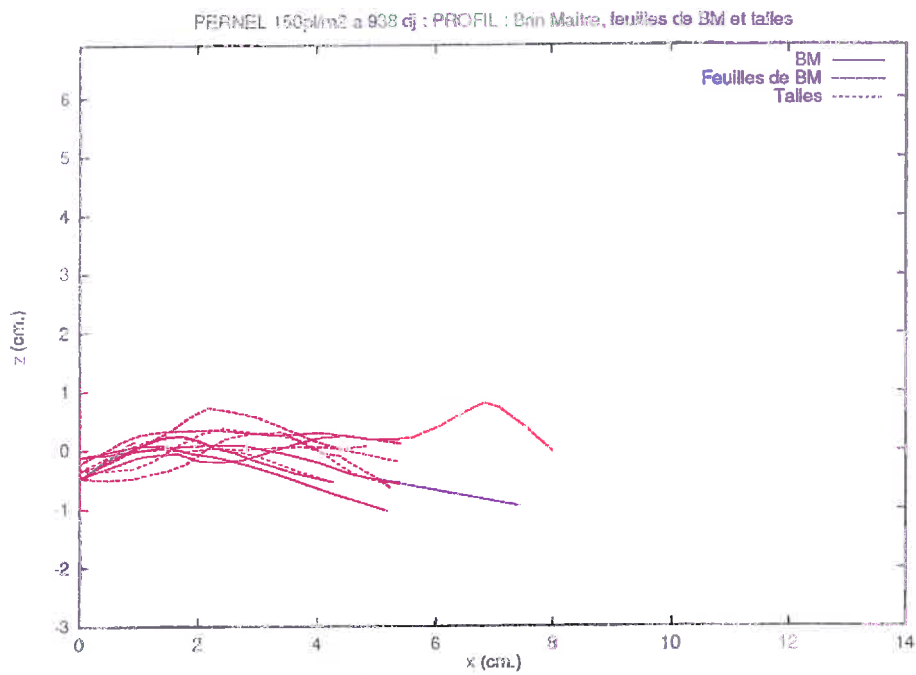


Figure II-1.19b. Comparaison des profils. Pernel, 150 pl/m<sup>2</sup>

2.3.1.2. Inclinaison du brin-maître et des talles

- Effet variétal

Les Figures II-1.19 a et b montrent l'allure du profil du brin-maître et des talles pour deux variétés de ports différents. La variété Soissons (Figure II-1.19 a) présente une allure nettement plus redressée que la variété Pernel (Figure II-1.19 b) lors du prélèvement réalisé au stade "épi 1cm" en monodate précoce.

Sur le Tableau II-1.3 sont reportés les angles moyens des brins-maîtres et des talles par rapport à la verticale, ce qui confirme que le paramètre  $\theta_i$  est caractéristique du port d'une variété donnée.

Variété	$\theta_{bm}$	$\theta_{talles}$
Soissons	80°	65°
Pernel	55°	85°

Tableau II-1.3. Comparaison des angles moyens d'inclinaison du brin-maître  $\theta_{bm}$  et des talles  $\theta_{talles}$  pour 2 variétés à densité 150 p.m<sup>2</sup>

- Effet de la densité

À partir des profils calculés sur les densités 70 (Figure II-1.20 a), 150 (Figure II-1.19 a) et 350 (Figure II-1.20 b) sur Soissons, on constate que plus la densité est élevée, plus le profil du brin-maître et des talles est redressé (Tableau II-1.4).

Le facteur densité joue directement sur la structure, ce qui est probablement dû aux réagencements des objets de la plante en fonction de l'espace disponible.

Densité (p.m <sup>2</sup> )	$\theta_{bm}$	$\theta_{talles}$
70	65°	75°
350	50°	55°

Tableau II-1.4. Comparaison des angles moyens d'inclinaison du brin-maître  $\theta_{bm}$  et des talles  $\theta_{talles}$  à deux densités pour la variété Soissons

2.3.1.3. Longueur du brin-maître (L<sub>bm</sub>) et hauteur d'insertion des talles (L<sub>t</sub>)

Les paramètres L<sub>bm</sub> et L<sub>t</sub> ont été utilisés pour caractériser les distances séparant l'origine des différentes talles. En fait, on verra que ces deux paramètres seront considérés par la suite comme une seule et même grandeur synthétique permettant à la structure créée d'occuper plus ou moins de volume et d'éviter les superpositions foliaires à courte distance (phénomène d'agrégation).

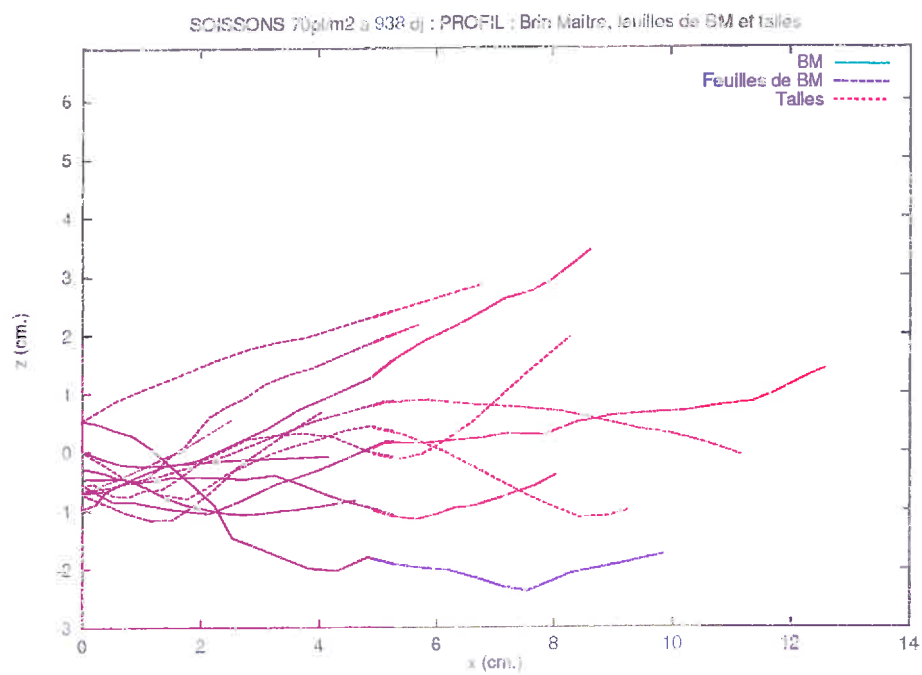


Figure II-1.20a. Comparaison de profils. Soissons, 70 pl/m<sup>2</sup>

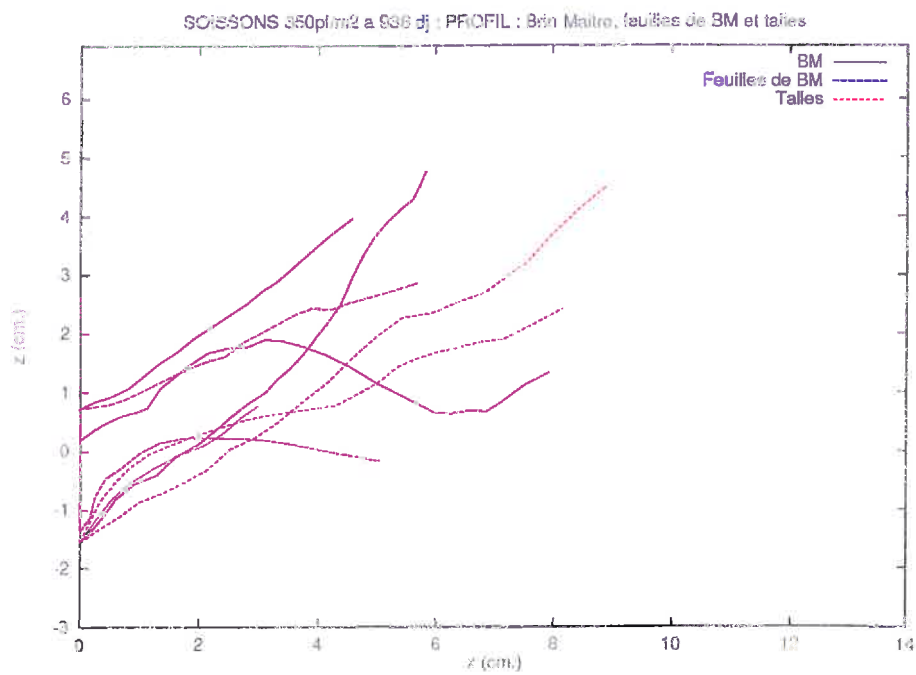


Figure II-1.20b. Comparaison des profils. Soissons, 350 pl/m<sup>2</sup>

## Résultats

### 2.3.2. Estimation des angles foliaires

#### 2.3.2.1. Règle d'émission des talles et des feuilles

Le modèle ne comporte pas de régulation de l'émission des talles. Toutes les talles potentielles sont émises ; il y a cependant une limite maximale de neuf feuilles sur le brin-maître, ce qui permet d'aller un peu au-delà du stade début montaison. Le schéma adopté est celui résultant des travaux de Klepper (1982) et Masle & Sebillotte (1981) sur le modèle d'apparition des feuilles et des talles du blé. La durée du phyllochrone (temps thermique nécessaire à deux feuilles successives sur la même tige pour atteindre le même stade de développement) est paramétrisable (Gate 1995 ; Mc Master, 1997). La valeur de 100 degrés-jours a été adoptée pour les trois variétés et dates de semis. Selon Mc Master (1997), les phyllochrones sont tous similaires, quelles que soient les tiges (brin-maître et talles).

#### 2.3.2.2. Insertion des feuilles sur les tiges (brin-maître et talles)

L'estimation des angles foliaires  $\theta_0$  (Figure II-1.21 a) et  $\theta_1$  (Figure II-1.21 b) à l'insertion et à l'extrémité du limbe a été réalisée (Cf. Matériel et Méthodes) par calcul à partir du squelette 3D de la plante établi par photogrammétrie (Tableau II-1.5).

Les Figures II-1.21 a ( $\theta_0$ ), et II-1.21 b ( $\theta_1$ ) représentent le jeu de données des valeurs  $\theta_0$  et  $\theta_1$  en fonction du temps thermique, ainsi que l'ajustement d'une fonction exponentielle de la forme :  $\theta(t) = \theta_{\max} e^{-t/\tau}$

Les valeurs suivantes ont été prises pour calculer les ajustements exponentiels dans le cas de Soissons 150 et ont servi de base pour la construction de l'abaque correspondante :

$$\theta_{0 \max} = 68^\circ ; \tau_0 = 18$$

$$\theta_{1 \max} = 119^\circ ; \tau_1 = 29$$

La Figure II-1.21 a montre la grande hétérogénéité des jeux de données qui peut avoir pour cause le mélange de 15 plantes de développement différent (Cf. Démarche). On constate que les angles d'insertion et de bout de feuilles augmentent en fonction du temps jusqu'à une valeur asymptotique, atteinte rapidement après 100 degrés-jours environ (de l'ordre d'un phyllochrone). On n'a pas observé de relation de dépendance de  $\theta_0$  vis-à-vis de la densité du peuplement sur le facteur variétal. La même conclusion peut être faite pour l'angle  $\theta_1$ .

Paramètres	SOISSONS 70	SOISSONS 150	SOISSONS 350	THÉSÉE 150	PERNEL 150
$\theta_{0 \max}$	77	77	74	70	87
$\tau_0$	18	25	36	22	20
$\theta_{1 \max}$	103	109	113	111	102
$\tau_1$	39	32	44	47	14

Tableau II-1.5. Valeurs des paramètres contrôlant la forme en 3D du limbe.

$\theta_{\max}$  a été mesuré par photogrammétrie et  $\tau$  a été obtenu par ajustement

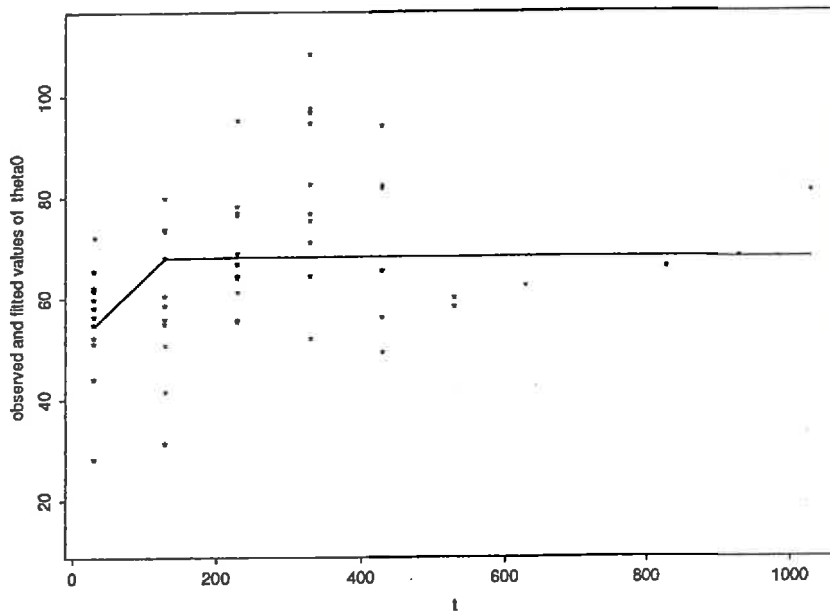


Figure II-1.21a. Valeurs de  $\theta_0$  observées (\*) et calculées (-). Soissons, 150 pl/m<sup>2</sup>

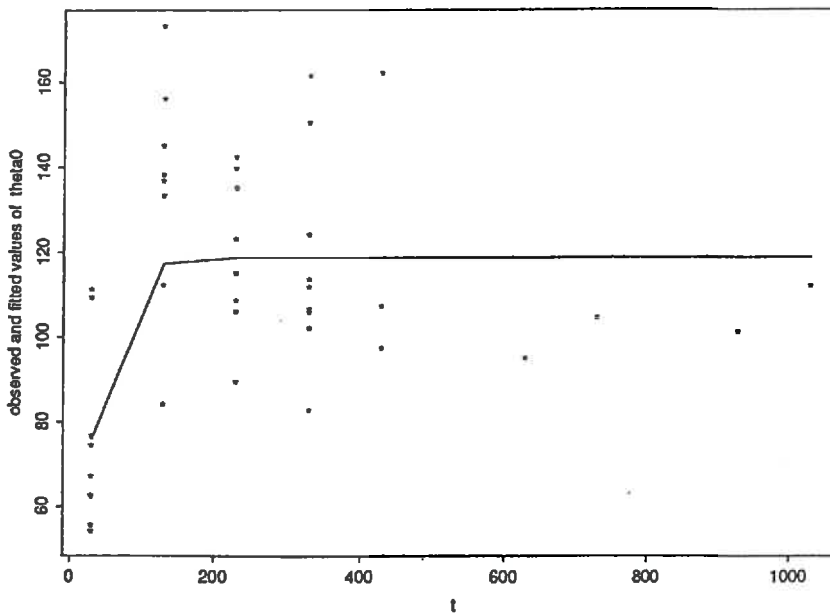


Figure II-1.21b. Valeurs de  $\theta_1$  observées (\*) et calculées (-). Soissons, 150 pl/m<sup>2</sup>

## Résultats

On a vu que le limbe présente un angle d'inclinaison  $\theta_0$  par rapport à la tige qui le porte. Cette tige est, soit verticale par hypothèse pour le brin-maître, soit inclinée d'un angle  $\theta_{talle}$  si c'est une talle.

- Hypothèse 3

Il n'y a pas de relation entre l'azimut de la première feuille émise et l'azimut de direction de la talle qui la porte.

En revanche, on a mesuré les écarts d'azimut que présentent entre elles les feuilles successives sur une même tige. D'une façon générale, on trouve une série alternée, par exemple, pour la variété Soissons, depuis la feuille de rang "n+1" par rapport à la feuille de rang "n" :

Feuilles successives du brin-maître	Azimut entre les feuilles successives	Ecart-type
1 - 2	- 134	28
2 - 3	165	18
3 - 4	- 179	30
4 - 5	158	30

Tableau II-1.6. Angles d'azimut et écarts-types mesurés entre feuilles successives du brin-maître

### 2.3.3. Paramétrisation de la forme des feuilles

Les fonctions angulaires  $\theta(t)$  et  $\Psi(t)$ , où  $t$  est le temps thermique exprimé en degrés-jours, sont de la forme :  $\theta(t) = \theta_{\max} e^{-t/\tau}$

$\tau$  temps caractéristique  
 $\theta_{\max}$  valeur asymptotique de  $\theta$

Le modèle utilise en fait une forme de feuille parabolique avec raccordement à la direction horizontale lorsque la feuille repose sur le sol (feuille les plus âgées). La parabole est paramétrée en fonction des angles  $\theta_0$  et  $\theta_1$  correspondant à l'insertion et à l'extrémité de la feuille (*Annexe II-1.7*). La longueur de la feuille obéit à une loi du troisième degré établie entre les variables adimensionnées  $s / L_{\max}$  et  $l(s) / l_{\max}$ , où "s" représente l'abscisse curviligne. La *Figure II-1.22* donne les variations de  $L_{\max}$  et  $l_{\max}$  pour les trois variétés du rang de talles émises. La longueur  $L$  de la feuille est aussi une fonction de "t". L'arrangement de la feuille suit une loi de la forme :  $q(t) = a(1 - e^{-t/b})$ , où  $L_{\max}$  est la longueur maximale, mesurée pour chaque rang de feuille, rang de talle et variété.

#### 2.3.3.1. Effet de la variété

D'après la *Figure II-1.22*, on constate que les paramètres longueur et largeur dépendent de la variété et de la densité. Thésée a la longueur la plus grande et Pernel la plus faible. Ceci est également valable pour les largeurs et en accord avec les caractéristiques des variétés résumées dans le *Tableau I-3.1* (Cf : Matériel et Méthodes).



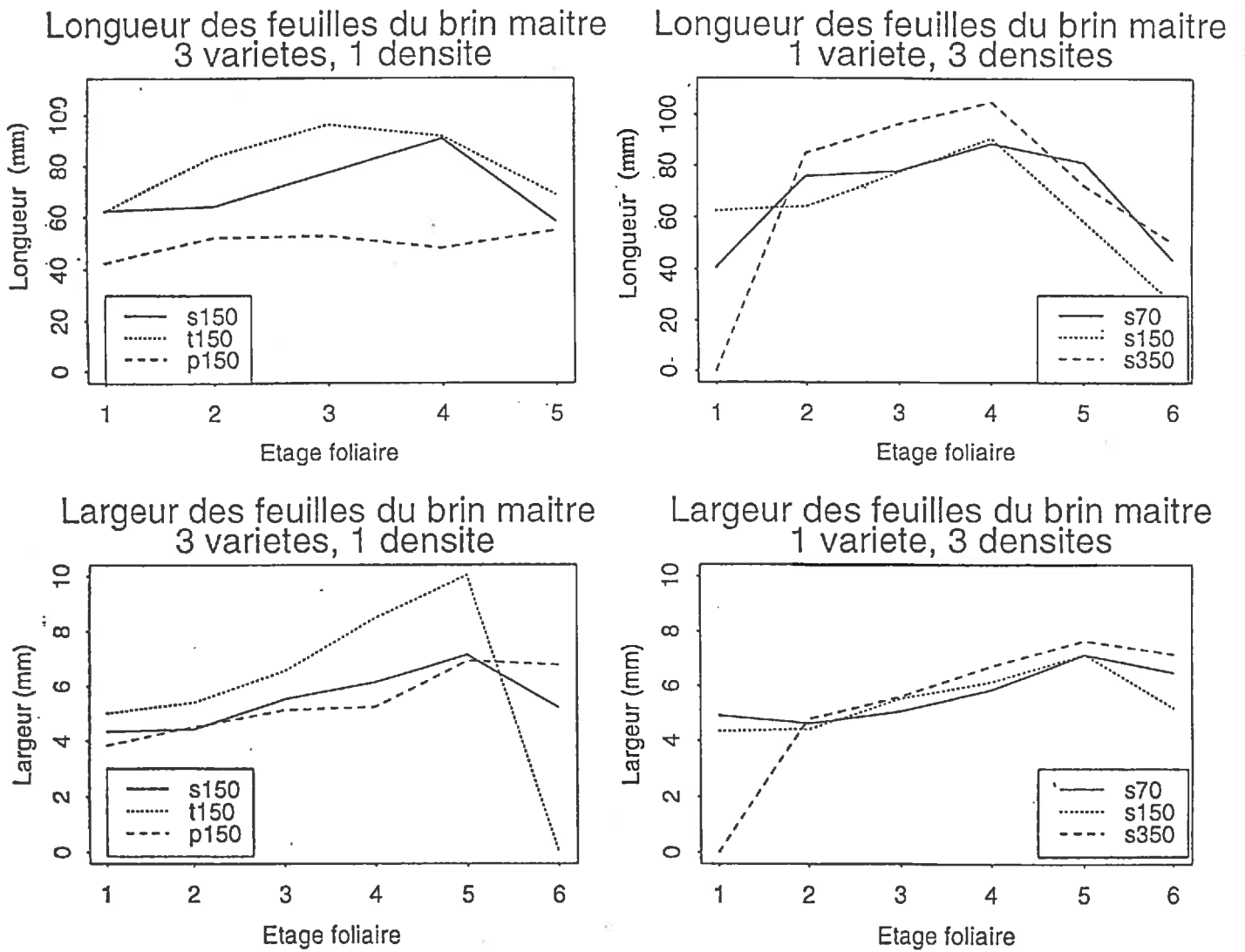


Figure II-1.22. Variations de la longueur et de la largeur des feuilles du brin-maitre en fonction de l'étage foliaire

## Résultats

### 2.3.3.2. Effet de la densité

La longueur de la feuille en densité forte est plus importante qu'en densité faible. Par contre, pour les largeurs, la densité n'a pas d'effet significatif.

Sur l'ensemble des graphiques de la *Figure II-1.22*, il ne faut pas tenir compte de la chute de fin de courbe, due au développement partiel du dernier étage foliaire (la feuille n'est pas complètement sortie).

Pour la construction des abaques relatives aux trois variétés, on a tenu compte de ces variations de longueur et de largeur. Des coefficients de variation relatifs de la longueur et de la largeur ont été calculés pour Thésée et Pernel par rapport à Soissons (*Tableau II-1.7*).

Pourcentage de variation	Longueur	Largeur
Thésée/Soissons	113 %	131 %
Pernel/Soissons	65 %	91 %

*Tableau II-1.7. Pourcentage de variation de la longueur et de la largeur pour les variétés Thésée et Pernel par rapport à Soissons*

### 2.3.4. Longueur et rayon des tiges

Les paramètres longueur et rayon des tiges ne varient pas sensiblement d'une variété ou d'une densité à l'autre. Cela est dû au fait que la phase montaison n'a pas encore débuté. On verra plus loin que nous avons fait jouer les paramètres longueur du brin-mâitre et des talles, comme paramètres d'ajustement du modèle, car ils permettent de contrôler les fréquences des superpositions foliaires et des agrégations.

## 2.4. Validation du modèle 3D

### 2.4.1. Simulation de plantes individuelles

La *Figure II-1.23* présente des exemples de plantes créés par le modèle 3D à différentes dates sur l'échelle du temps thermique. Ces exemples montrent la génération des feuilles et des talles ainsi que certains détails concernant la forme des limbes :

- allure parabolique couplée à un raccordement souple lorsque la feuille repose sur le sol,
- torsion du limbe dans le sens longitudinal.

La *Figure II-1-24* montre l'effet d'un changement du temps caractéristique qui contrôle l'évolution de la forme du limbe. En fait trois paramètres agissent sur le port global de la plante, ce sont :

- pour la forme du limbe :
  - les angles aux extrémités
  - le temps caractéristique
- pour les talles :
  - l'angle de la talle par rapport à la verticale

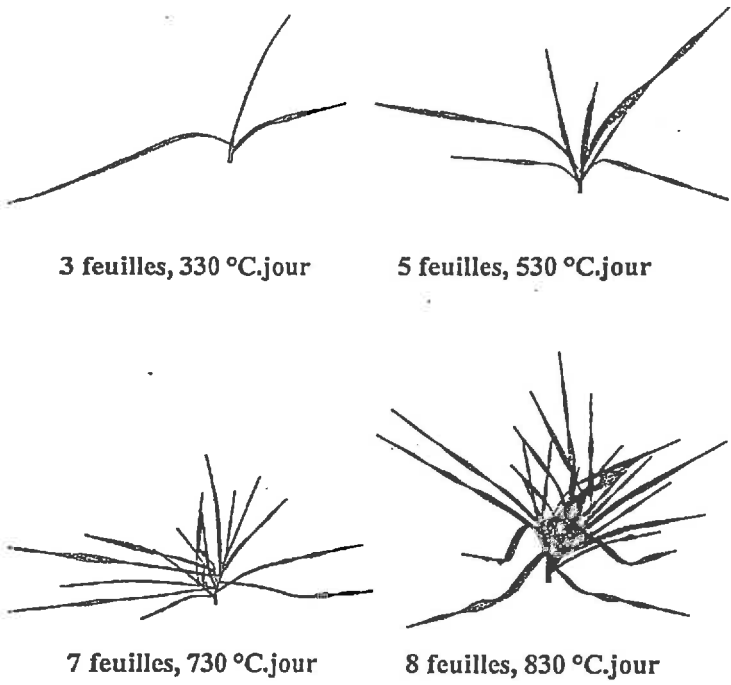


Figure II-1.23. Visualisation de la simulation de plantes d'âges différents et de ports identiques

$\tau$ : durée en °C.jour pour que  $\theta_i = \theta_{i,max} (1-1/e)$

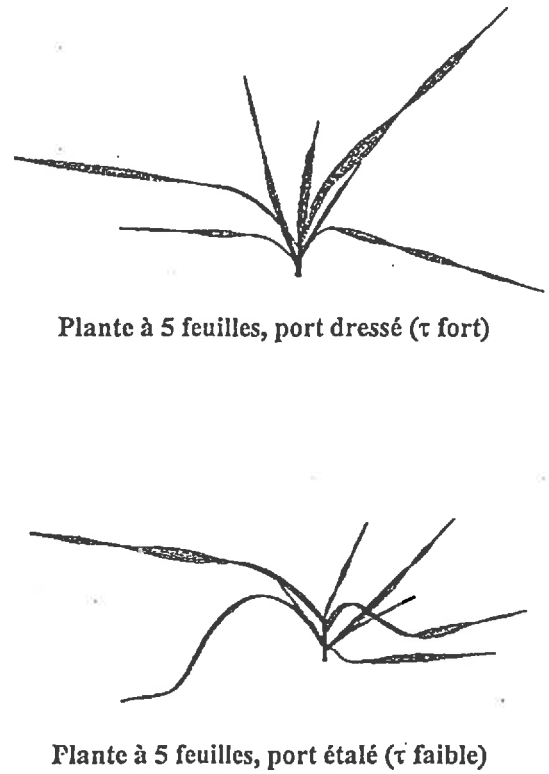


Figure II-1.24. Visualisation de la simulation de plantes d'âge identique et de ports différents

2.4.2. Simulation de peuplements (images)

Le module de lancer de rayons ARARAT (BPMS) permet de simuler l'image d'un peuplement de blé telle qu'elle serait obtenue à l'aide d'un appareil photographique situé au-dessus du couvert à une hauteur de 2 m.

Les Figures II-1.25 a et b (au verso) permettent de comparer les aspects des variétés Soissons et Thésée à la densité 150 p.m<sup>2</sup> dans des conditions de couverture moyenne :

- Soissons à 830 dj (Figure II-1.25 a) ; LAI = 1,22 ; TC = 0,50
- Thésée à 780 dj (Figure II-1.25 b) ; LAI = 1,00 ; TC = 0,39

2.5. Validation du modèle 3D en ce qui concerne le LAI et les indicateurs TC et TSAVI

La Figure II-1.26 montre les points observés et estimés pour les grandeurs LAI, TC et TSAVI dans le cas de la variété Soissons à la densité 150 p.m<sup>2</sup>. On notera la tendance du modèle à surestimer l'indice TSAVI. En revanche il ne semble pas y avoir de biais systématique dans le cas du LAI et de TC.

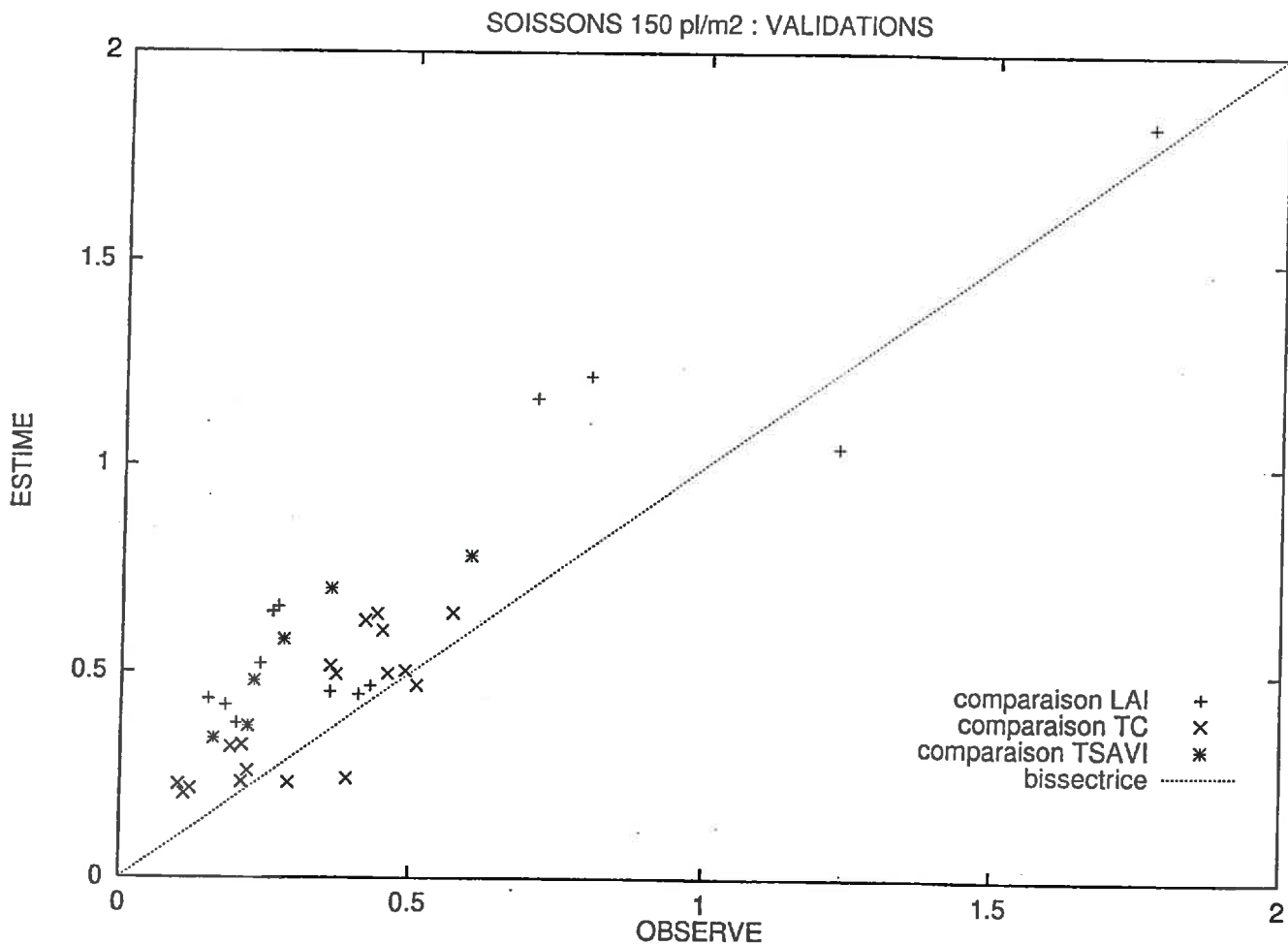
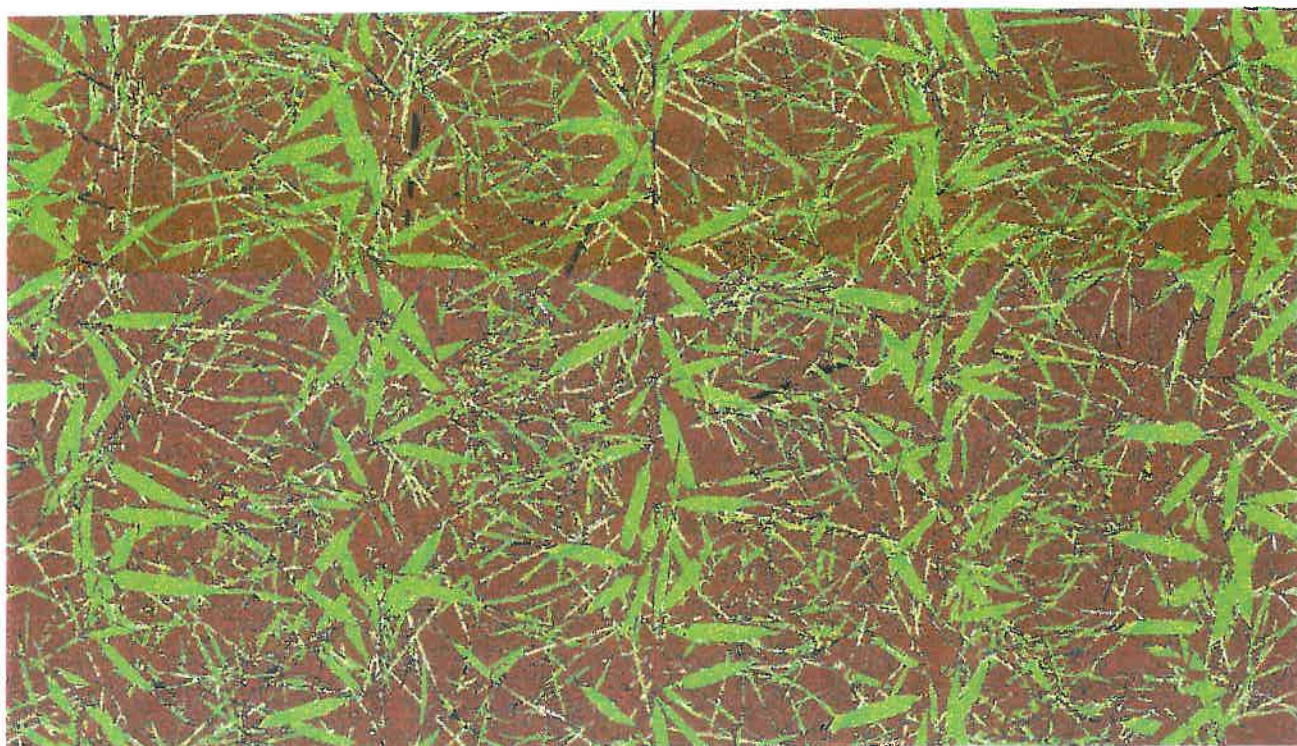


Figure II-1.26. Validation du modèle 3D : comparaison des valeurs de LAI, TC, TSAVI observées (peuplements de 1995) et simulées



*Figure II-1.25. Simulation d'un peuplement de blé vu à la verticale :  
a) En haut : Soissons, densité 150 pl/m<sup>2</sup> ; b) En bas : Thésée, densité 150 pl/m<sup>2</sup>*

### 2.5.1. Abaque Soissons densité 150

#### 2.5.1.1. Estimation de l'indice foliaire en fonction du taux de couverture

Dans un premier temps, nous avons cherché à construire par simulation l'abaque LAI<sub>SH</sub> en fonction du temps, pour la variété Soissons à la densité 150. Comme nous l'avons déjà signalé, nous disposons pour cette variété du jeu de données le plus complet qui a servi à la construction du modèle 3D de 1995.

La *Figure II-1.27* montre l'abaque obtenu. On constate qu'il y a une bonne adéquation avec les points expérimentaux. Pour cette abaque, on a utilisé les paramètres Lbm et Lt. Pour Soissons on a, à partir des données de 1995, déterminé les données suivantes :

**Lbm, modèle = 10 Lbm**

**Lt, modèle = 10 Lt**

En effet dans le cas de la variété Soissons, on a constaté que le modèle sous-estime systématiquement le TC pour un LAI<sub>SH</sub> donné, si l'on donne à Lbm et Lt leurs valeurs mesurées. Cette sous-estimation est due à une simplification utilisée pour la construction des feuilles, qui ne tient pas compte de l'orientation de la tige. En d'autres termes, pour une tige d'inclinaison donnée, il y a équiprobabilité de l'azimut des feuilles qui la porte. Il en résulte une mauvaise utilisation de la surface foliaire pour couvrir le sol, due à la fréquence trop élevée des agrégations foliaires ou superpositions. Pour pallier ce défaut on a utilisé la longueur des tiges (brin-maître et talles) comme paramètre d'ajustement. En choisissant d'augmenter ce paramètre on diminue la fréquence des agrégations d'une manière très simple et significative. On obtient ainsi un peuplement dont le taux de couverture et l'indice foliaire sont en bonne adéquation avec les points expérimentaux de ces variables en 1996. On trouvera dans le *Tableau II-1.8* les valeurs des paramètres utilisés pour Soissons.

L'abaque couvre une période allant de zéro degré-jour (levée) à 990 degrés-jours (stade 9 feuilles sur le brin-maître). Pour l'ensemble de la simulation les autres paramètres sont ceux qui ont été mesurés à 730 degrés-jours (prélèvement multitudes n°9451). En particulier l'angle  $\theta_{\text{talle}}$  que fait l'ensemble des talles émises avec le brin-maître est considéré comme constant et égal à 74 degrés en moyenne.

Le stade "épi 1cm" se situe à un taux de couverture égal à 50 % environ. On constate que l'abaque a tendance à légèrement sous-estimer le TC jusqu'à 40 % de recouvrement, puisqu'il y a une bonne adéquation avec les points expérimentaux au-delà de cette valeur. En particulier les points autour du stade "épi 1cm" sont bien restitués.

#### 2.5.1.2. Estimation de l'indice foliaire en fonction du TSAVI

En utilisant le logiciel de lancer de rayons ARARAT (BPMS), on a simulé la réflectance des placettes construites à partir du modèle 3D. Les propriétés optiques des feuilles, des tiges et du sol ont été mesurées en laboratoire au spectrophotomètre Perkin Elmer. En ce qui concerne l'éclairage de la scène, on a utilisé le modèle de ciel de Zibordi & Voos (1989), proposé pour le système BPMS. Les calculs ont été faits pour la journée du 29 mars à 12 heures TU, avec les coordonnées géographiques suivantes (site de Grignon) : latitude Nord 48° 48 et longitude Est 2° 02.

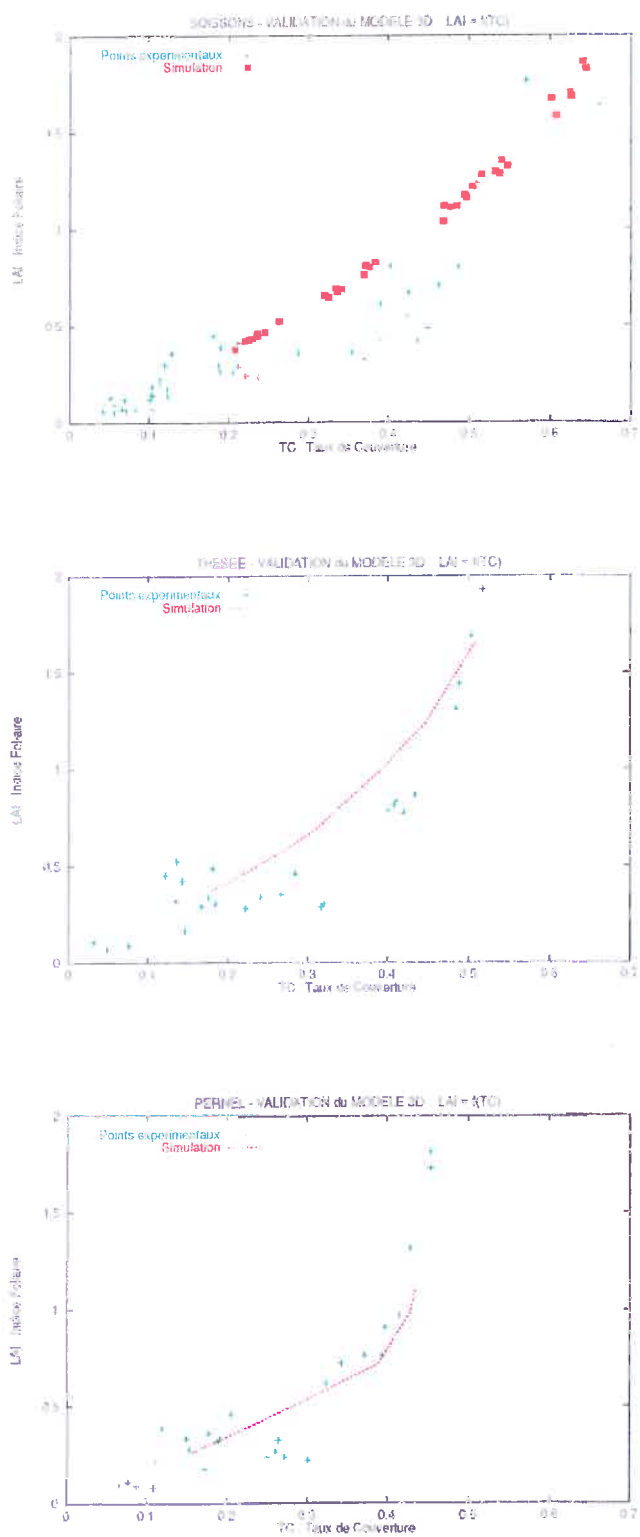


Figure II-2.27. Validations du modèle 3D pour le taux de couverture

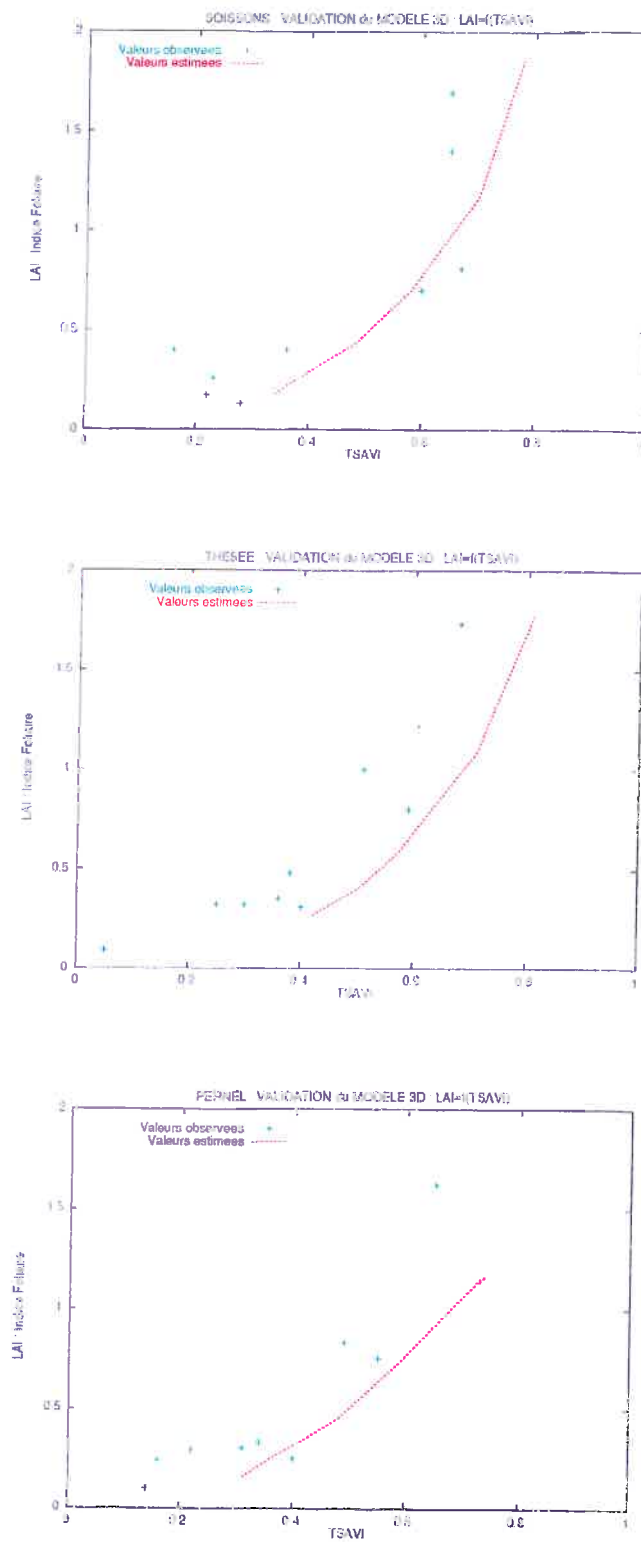


Figure II-2.28. Validations du modèle 3D pour le TSAVI

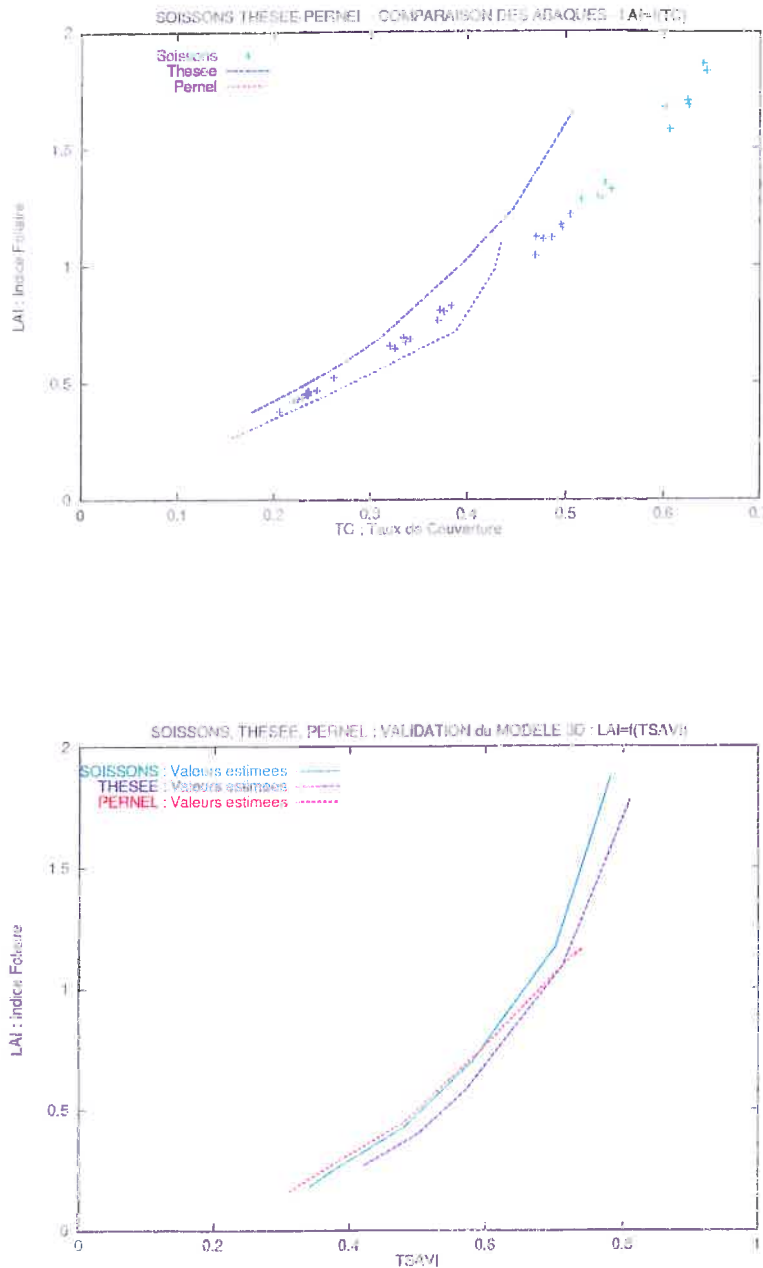


## Résultats

Les données de réflectance obtenues dans les bandes des satellites SPOT 1, 2, 3 (vert, rouge et infrarouge proche) ont été converties en indice de végétation.

L'abaque LAI<sub>SH</sub> TSAVI, calculé pour Soissons, Thésée et Pernel à la densité 150, permet de valider le calcul des réflectances, lui-même appliqué à la maquette 3D de la placette (*Figure II-1.28*).

La *Figure II-1.29* montre le jeu d'abaques obtenu pour TC. On constate sur cette figure que les trois variétés ont un tracé exponentiel et sont hiérarchisées dans le même ordre que les valeurs observées (*Figure II-1.6*). Pour le TSAVI la distinction entre les trois variétés n'est pas aussi remarquable, comme nous l'avons constaté sur la *Figure II-1.11*.



**Figure II-1.29. Jeu d'abaques établis pour l'estimation du LAI à partir du taux de couverture (en haut) et du TSAVI (en bas)**

### 2.5.2. Etude de la sensibilité du modèle 3D

Pour l'étude de la sensibilité du modèle de structure, on se réfère à la variété Soissons en densité 150. Chaque paramètre de structure subit individuellement une variation et on mesure l'effet sur l'abaque résultante. Concrètement les écarts donnés aux paramètres permettent de couvrir la gamme de variation observée sur l'ensemble des mesures effectuées pour les différentes situations. Les simulations sont faites autour du point moyen  $TC = 33 \%$ ,  $LAI_{SH} = 0.69$ , obtenu pour 730 degrés-jours. On calcule les abaques résultant d'une modification des paramètres en se basant sur les dates 630, 730 et 830 degrés-jours.

#### ⇒ Effet des paramètres liés aux dimensions des feuilles : Longueurs (Figure II-1.30) et largeurs (Figure II-1.31) ( $L_{max}$ et $l_{max}$ )

On a appliqué une variation de plus ou moins 20 % à  $L_{max}$  et  $l_{max}$  pour simuler un changement de la variété. En effet, on a vu que les variétés Thésée et Pernel diffèrent de Soissons sur ce point. On constate que les écarts imposés à  $L_{max}$  et  $l_{max}$  produisent sensiblement le même effet et dans le même sens. C'est la variation de plus ou moins 20 % sur la largeur qui produit l'effet le plus marqué sur TC, atteignant une valeur de plus ou moins 0.023 pour  $TC = 40 \%$ ; soit une variation de l'ordre de plus ou moins 6 %.

On notera en revanche que  $L_{max}$  est le paramètre qui joue le plus sur la vitesse de parcours de l'abaque. Toutes choses égales, ce sont les variétés aux feuilles les plus longues qui couvriront le plus vite l'espace de l'inter-rang. On n'a pas effectué d'étude de sensibilité sur les paramètres décrivant la forme en 2D du limbe (relations largeurs-abscisse curviligne), parce qu'on a considéré qu'ils avaient une action de second ordre par rapport à celles de  $L_{max}$  et  $l_{max}$ .

#### ⇒ Effet des paramètres liés à la forme tridimensionnelle du limbe au cours du temps

On a appliqué une variation aux paramètres  $\theta_{0\ max}$ ,  $\theta_{1\ max}$ ,  $\tau_0$ , et  $\tau_1$  qui contrôlent la forme 3D du limbe en fonction du temps.

Respectivement,  $\theta_0$  (68 °) a varié dans une gamme de -10 % à +30 %,  $\theta_1$  (119°) dans une gamme de -15 % à +15 % et  $\tau_0$ ,  $\tau_1$  dans une gamme de 18 à 107 degrés-jours pour couvrir l'étendue des valeurs obtenues par ajustement sur l'ensemble des traitements étudiés.

Le résultat des simulations montre que ces variations n'entraînent pas de modification de l'abaque. L'effet constaté sur le point moyen est un déplacement non significatif le long de l'abaque ( $\Delta TC = 0.03$ ).

En revanche, il y a une sensibilité évidente du facteur de torsion du limbe, qui entraîne une diminution de TC à indice foliaire égal (Cf. España-Boquera, 1997).

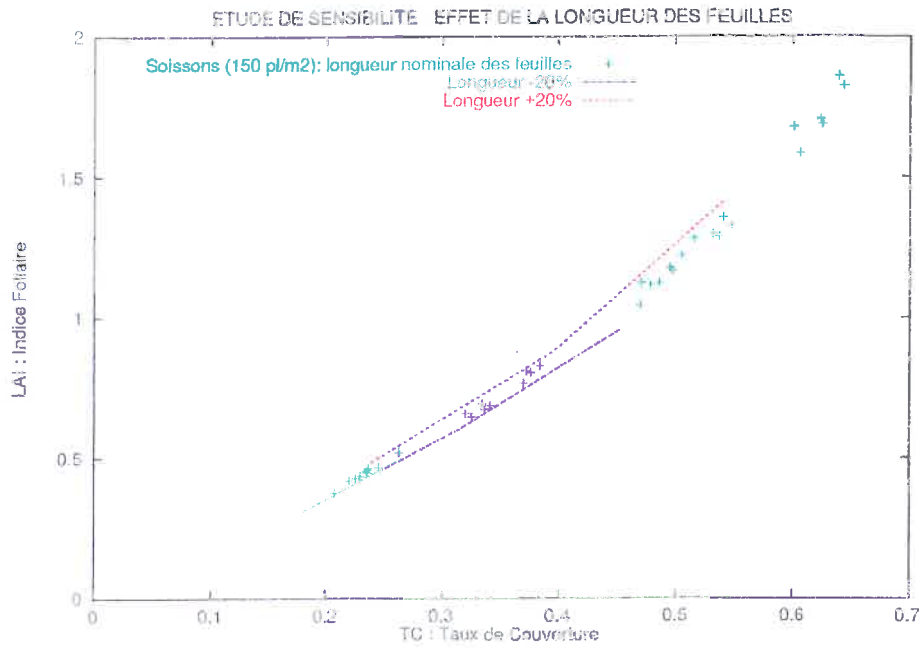


Figure II-1.30. Etude de sensibilité : effet de la longueur des feuilles

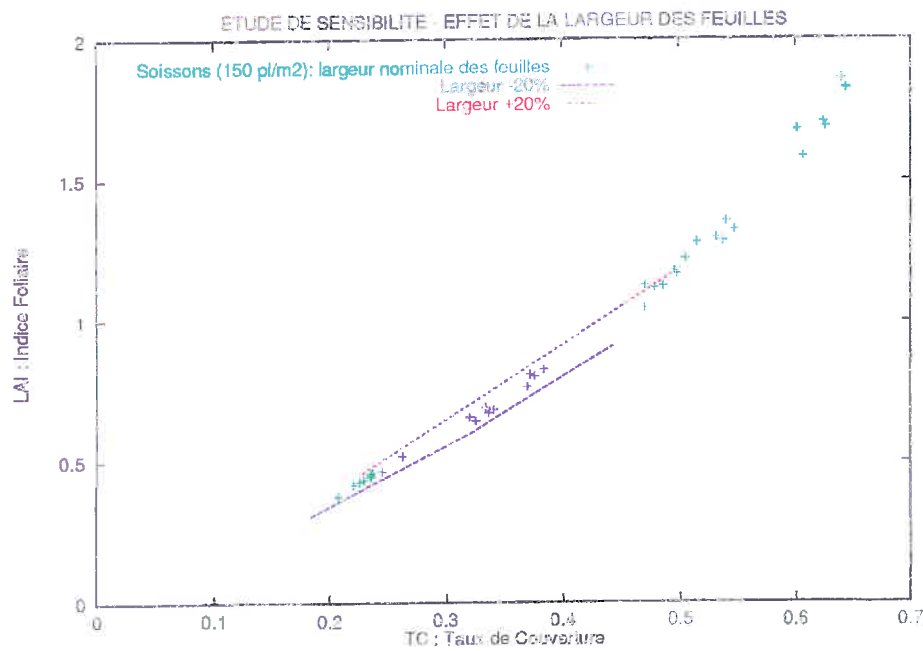


Figure II-1.31. Etude de sensibilité : effet de la largeur des feuilles

⇒ Effet des paramètres liés aux tiges

- Effet de l'inclinaison des talles

On a cherché à faire varier le paramètre  $\theta_{\text{talle}}$  d'inclinaison des talles afin de rendre compte du phénomène de redressement de la plante constaté aux alentours du stade "épi 1 cm".

La *Figure II-1-32* montre 2 abaques obtenues pour  $\theta_{\text{talle}} = 20^\circ$  et  $\theta_{\text{talle}} = 10^\circ$  tandis que l'abaque de référence est construite avec  $\theta_{\text{talle}} = 74^\circ$ .

En fait, on constate que pour une large plage de variation ( $74^\circ - 30^\circ$ ), il n'y a pratiquement aucun effet sur l'abaque. En revanche pour les valeurs faibles ( $20^\circ - 0^\circ$ ), il y a un effet marqué :  $\Delta TC = - 0,05$  quand  $\theta_{\text{talle}}$  passe de  $74^\circ$  à  $10^\circ$ , soit une variation relative de TC égale à 14 %, pour un point moyen situé à  $TC = 0,4$ .

Comme pour le paramètre "longueur de tiges", on explique la sensibilité du modèle à  $\theta_{\text{talle}}$  en considérant les phénomènes d'agrégation et de superposition. Quand  $\theta_{\text{talle}}$  a une valeur supérieure au seuil de  $30^\circ$ , les feuilles des talles sont éloignées de celles portées par le brin-maître, considéré comme vertical dans le modèle. Au fur et à mesure que  $\theta_{\text{talle}}$  diminue, le port de la plante se redresse et les feuilles des talles se rapprochent du brin-maître, jusqu'à passer au-dessous des feuilles du brin-maître qui constituent la strate dominante. À ce stade la variable TC commence à diminuer de façon significative pour un  $LAI_{\text{SH}}$  donné.

- Effet de la longueur des tiges

On a vu que les paramètres  $L_{\text{bm}}$  et  $L_{\text{t}}$ , respectivement longueur du brin-maître et longueur des talles, sont utilisés comme un paramètre d'ajustement du modèle à cause de leur effet sur l'agrégation des feuilles et sur l'effet de superposition résultant pour un observateur placé au-dessus du couvert. Il est intéressant d'analyser la sensibilité du modèle à une variation de ces deux paramètres.

La *Figure II-1.33* montre trois abaques construits à partir des valeurs :  $L_{\text{bm}}$  et  $L_{\text{t}} = 5$  ;  $L_{\text{bm}} = 5$  et  $L_{\text{t}} = 10$  ;  $L_{\text{bm}}$  et  $L_{\text{t}} = 10$ . Plus la valeur des paramètres est faible et plus le TC diminue, pour un  $LAI_{\text{SH}}$  donné. La variation absolue extrême qui en résulte est :  $\Delta TC = 0.09$  pour  $TC = 40$  %, soit une variation égale à 23 %.

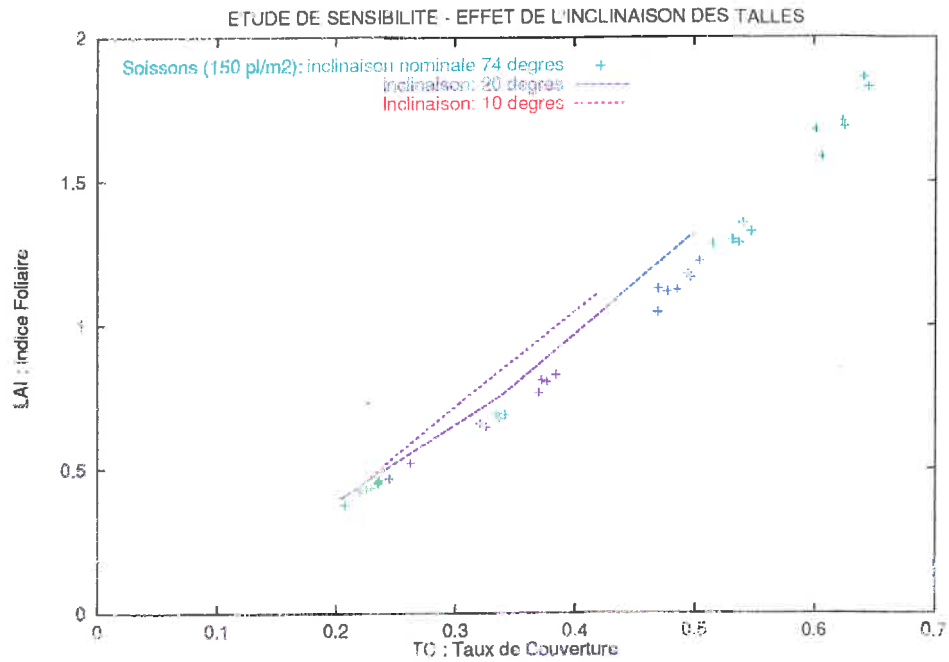


Figure II-1.32. Etude de sensibilité : effet de l'inclinaison des talles

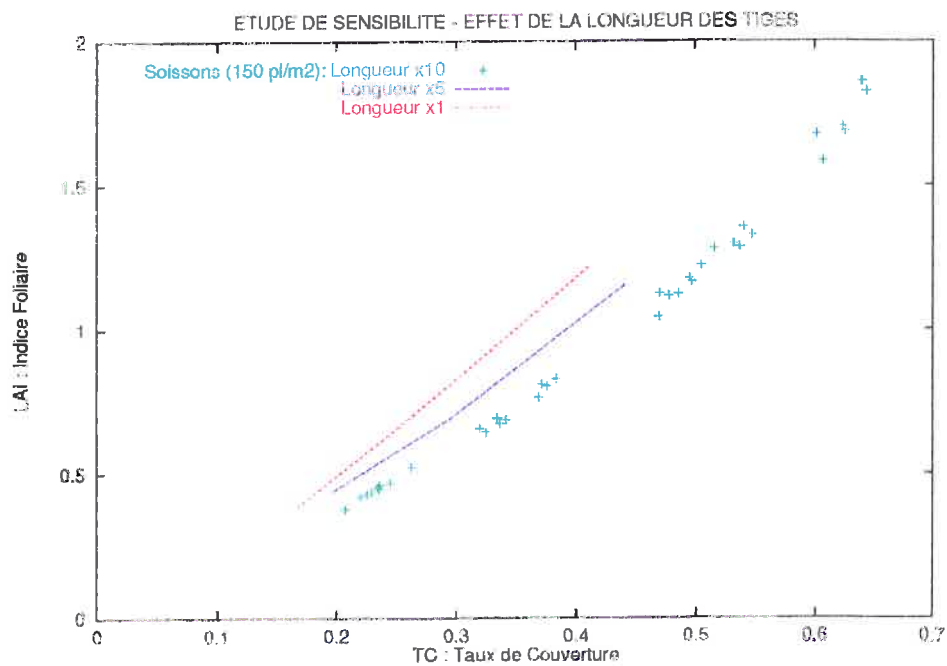


Figure II-1.33. Etude de sensibilité : effet de la longueur des tiges

L'étude de sensibilité a mis en lumière deux points importants :

- La forme des limbes des feuilles (inclinaison en fonction de l'abscisse curviligne) a peu d'incidence sur la construction des abaques et le temps caractéristique reste, quant à lui, dans une gamme de variation où il a peu d'effet et n'est donc pas un paramètre sensible ;
- Les paramètres liés aux tiges (longueur, largeur, orientation) ont un rôle éminent parce qu'ils conditionnent les phénomènes d'agrégation des feuilles et de superposition en fonction d'un point de vue donné.

On pourra rapprocher le premier point des conclusions obtenues par España-Boquera (1997) où il apparaît qu'il est inutile de raffiner les maquettes des feuilles de maïs pour les rendre trop réalistes, car cela n'a pas de poids dans le calcul de la réflectance visible et proche infrarouge.

Le modèle proposé repose sur des choix de simplifications au niveau de la structure de la plante et du couvert, rendus nécessaires par la complexité du phénomène étudié (tallage).

### 2.5.3. Simulation des abaques pour les variétés Thésée et Pernel

L'acquisition des données de structure 3D n'a été réalisée qu'à une seule date, antérieure au stade "épi 1 cm", auquel se produit le redressement de la plante. Il n'a donc pas été possible de simuler et valider les abaques comme pour Soissons. On a cependant voulu vérifier que les paramètres qui contrôlent le redressement des talles et le phénomène de superposition des feuilles, permettent d'adapter le modèle à d'autres variétés.

La Figure II-1.29 montre les abaques obtenus pour les variétés Soissons, Thésée et Pernel. Le Tableau II-1.8 donne les valeurs trouvées pour les paramètres ainsi que les estimations des dates de changement de port.

Pour suivre la tendance des points expérimentaux, les abaques doivent présenter un fort changement de pente qui correspond au changement des paramètres  $\theta$  et  $L_{bm}$ ,  $L_t$ . En particulier le changement d'angle des talles montre que le port se redresse. Il est même possible de préciser la date de ce changement. Les résultats montrent que la variété Thésée a un redressement plus précoce que Pernel avec un décalage de 100 degrés-jours.

Variétés	Coefficients de $L_{bm}$	Coefficients de $L_t$	$\theta_{talles}$	$\theta_{talles}$
Soissons	630 à 930 x10	630 à 930 x10	630 à 930 ~ 70°	630 à 930 ~ 70°
Thésée	530 à 730 x10	780 à 830 x1	530 à 730 ~ 70°	780 à 830 10°
Pernel	630 à 830 x10	930 à 999 x10	630 à 830 ~ 70°	930 à 999 20° à 15°

Tableau II-1.8. Valeurs des paramètres utilisés pour la construction des abaques Soissons, Thésée, Pernel (densité 150 p/m<sup>2</sup>)

## 2.6. Discussion et conclusion partielle sur le modèle tridimensionnel

L'approche 3D pour étudier la structure du blé a été utilisée afin d'analyser la variabilité des relations entre l'indice foliaire d'une part, les indicateurs tels que le taux de couverture ou la réflectance d'autre part. On attendrait de cette étude d'améliorer l'estimation précoce de l'indice foliaire en tenant compte de plusieurs facteurs agronomiques déterminants : variété, date de semis et densité.

Le modèle Simblé, qui a été construit, a plusieurs caractéristiques pouvant se résumer en cinq points :

- ⇒ Il permet d'obtenir une géométrie explicite et réaliste de la plante tout au long du tallage ; en particulier il rend compte de l'émission des talles d'ordre successif ; la surface foliaire est généralement en 3D sous la forme d'une maquette ; les feuilles et les tiges sont décomposées en triangles élémentaires qui traduisent leur forme en 3D.
- ⇒ Le modèle utilise un jeu minimal de paramètres, choisis en fonction de la possibilité de les mesurer commodément.
- ⇒ En ce qui concerne les paramètres "clés" qui décrivent les angles des feuilles et des tiges, une méthodologie, dérivée de la photogrammétrie, développée parallèlement à ce travail, a été mise en oeuvre. Elle permet d'acquérir rapidement la géométrie en 3D de plantes individuelles prélevées au champ (15 plantes en 2 heures environ).
- ⇒ Des lois d'évolution au cours du temps des différents paramètres ont été proposées, ce qui rend le modèle utilisable de la levée jusqu'au stade début montaison.
- ⇒ Le modèle est couplé au logiciel BPMS (*Botanical Plant Modelling System*, P Lewis, 1996) (*Figure I-3.1*, Matériel et Méthode) qui permet de construire une population (Images : *Figures II-1.25 a et b*) à partir des maquettes de plusieurs plantes individuelles (*Figures II-1.23 et II-1.24*) et de calculer : le taux de couverture (TC) (*Figures II-1.27 et II-1.29*), et la réflectance (TSAVI) (*Figures II-1.28 et II-1.29*).
- ⇒ La validation des abaques a été faite sur le jeu de données **Soissons 150** qui couvre l'ensemble de la période tallage - début montaison. Cette validation permet d'évaluer l'erreur commise sur le LAI :

$\Delta \text{LAI} = \pm 0.4$ , si on utilise le taux de couverture comme indicateur

$\Delta \text{LAI} = \pm 0.4$ , si on utilise le TSAVI

Les incertitudes pourraient impliquer des conséquences sur le modèle dynamique de LAI et donc sur l'estimation des besoins en azote.

Le modèle utilise des hypothèses de base sur la structure 3D relatives à la forme des limbes et au modèle d'insertion des feuilles sur les tiges. Le choix de travail en variables angulaires "feuilles" et "tiges" indépendantes produit un type de structure en début de cycle. On constate que le modèle tend à sous-estimer le taux de couverture en début de cycle pour un indice foliaire donné. Cette sous-estimation est attribuée au phénomène d'agrégation des feuilles qui génère des superpositions et donc une perte d'efficacité pour l'interception de la lumière. En

particulier certaines directions de feuilles sont créées bien qu'elles soient efficaces en terme d'interception.

Afin de corriger cette tendance, on a introduit un paramètre d'ajustement qui contrôle l'agrégation foliaire en jouant sur les longueurs des tiges (brin-maître et talles). Les valeurs de ce paramètre ont été données pour les trois variétés.

L'étude de sensibilité a permis d'apprécier l'erreur commise sur le LAI lorsqu'on fait varier séparément les paramètres de structure. On distinguera les paramètres sensibles des autres paramètres.

- **Paramètres sensibles**

- ⇒ La longueur et la largeur des feuilles jouent sur la vitesse de couverture du sol, la valeur asymptotique du TC maximal ainsi que sur la superposition foliaire. Une variation de  $\pm 20\%$  de ces paramètres a un effet significatif.

- ⇒ La longueur des tiges, utilisée comme paramètre d'ajustement pour contrôler l'agrégation foliaire, a un effet important sur la relation  $LAI_{SH} / TC$  dans une gamme de 1 à 10 fois.

- ⇒ L'inclinaison des talles est également un paramètre sensible, mais dans une gamme de 0 à 30° seulement. Au-delà, pour des valeurs comprises entre 30 et 80°, il est sans effet sur l'abaque, probablement à cause du mode d'insertion des feuilles sur les tiges, indépendant de l'angle d'inclinaison de la tige. Ce paramètre permet de contrôler le redressement de la plante en fin de tallage. À ce stade, le redressement des talles a pour effet de rapprocher les feuilles des talles de celles du brin-maître, ce dernier constituant toujours la strate dominante. Il en résulte une nette diminution du TC, pour un LAI donné. C'est ce paramètre qu'il faudra suivre étroitement pour juger du comportement d'une variété au moment du redressement.

- **Autres paramètres**

- ⇒ Les paramètres qui contrôlent la forme du limbe en 3D (valeur asymptotique de l'angle d'inclinaison pour les feuilles ligulées, temps caractéristique de la loi d'évolution de l'inclinaison à l'insertion et en bout de feuille) ont un effet très marginal sur la relation LAI / TC.

Pour l'indicateur TSAVI, les abaques LAI / TSAVI simulés pour les deux autres variétés, Thésée et Pernel, n'apparaissent pas différentes de l'abaque Soissons. Ceci est probablement dû au fait que les conditions d'éclairement et d'orientation des rangs, utilisées pour les simulations radiométriques, ont favorisé à l'extrême les ombres portées. En comparant les valeurs de réflectance ainsi obtenues avec celles publiées par Boissard *et al.* (1992), on constate que ces conditions sont peu favorables à une bonne discrimination du recouvrement du sol ou du LAI.

Concernant la sensibilité à la densité de plantes, on n'a pas généré d'abaques correspondant spécifiquement aux densités 70 et 350 p.m<sup>2</sup>. Cependant, on a extrait les profils d'inclinaison des talles pour ces densités et pour la variété Soissons.



Les mesures angulaires réalisées par la méthode photogrammétrique montrent clairement un effet de la densité sur le port foliaire.

En définitive, le modèle 3D a permis de situer le niveau de précision sur le LAI que l'on est en droit d'attendre des mesures automatisées au champ, d'indicateurs tels que le TC et la réflectance.

Il a aussi permis, et ce point est essentiel, de comprendre l'effet des différents paramètres contrôlant la structure 3D et de hiérarchiser ces paramètres.

Enfin, on a montré la pertinence des hypothèses simplificatrices de départ qui ont permis d'aboutir à un jeu de paramètres assez limité (*Tableau I-3.4* des paramètres dans *Matériel et Méthodes*).

## **CHAPITRE 2.**

### **ESTIMATION DES BESOINS EN AZOTE À PARTIR DE L'INDICE FOLIAIRE À LA SORTIE DE L'HIVER**

## INTRODUCTION

Dans ce deuxième chapitre de la partie "Résultats", nous allons étudier comment utiliser l'indice foliaire évalué entre la sortie d'hiver et le début de la montaison ( $LAI_{SH}$ ) pour estimer la croissance potentielle du peuplement et ses besoins en azote jusqu'à la floraison.

Rappelons que l'estimation des besoins en azote est fondée sur les concepts de croissance potentielle en fonction du rayonnement intercepté (Monteith, 1977), et de teneur en azote critique de la biomasse (Lemaire & Salette, 1984 ; Justes *et al.*, 1994). Elle passe par les étapes suivantes.

### ✓ *Modélisation de l'évolution du LAI*

Nous devons pour cela :

- Choisir le modèle mathématique le mieux adapté pour décrire la dynamique d'évolution du LAI entre la sortie d'hiver et la floraison,
- Estimer les valeurs des paramètres du modèle en fonction de  $LAI_{SH}$  et des techniques culturales facilement accessibles (variété et date de semis).

### ✓ *Modélisation de l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif et de sa conversion en biomasse*

Sur la base des modèles choisis d'après la bibliographie, nous devons étudier la stabilité de leurs paramètres, suivant les variétés et les densités, principalement en faibles densités qui ont fait l'objet de peu d'études dans la bibliographie.

### ✓ *Utilisation du modèle d'évolution de la teneur critique en azote de la biomasse*

Ce modèle servira à estimer les besoins en azote à partir de la cinétique de croissance de la biomasse.

## 1/ MODÉLISATION DE LA CINÉTIQUE D'ÉVOLUTION DU LAI JUSQU'À LA FLORAISON : MODÈLE LAI<sub>t</sub>

### 1.1. Conditions imposées au modèle LAI<sub>t</sub>

Ce modèle doit être en mesure d'estimer la cinétique d'évolution du LAI depuis la sortie de l'hiver jusqu'à la floraison :

- avec des variables d'entrée d'accès aisé : données climatiques standard (en l'occurrence les températures moyennes journalières), variétés, dates de semis et, bien sûr, le LAI<sub>SH</sub> ;
- pour une large gamme de valeurs et de dates d'observation du LAI<sub>SH</sub>. Sur le plan pratique, imposer un stade ou une date précise d'observation serait une contrainte gênante quant à l'organisation du travail au niveau de l'exploitation agricole.

Pour caler cette cinétique, nous utiliserons les dates de réalisation de deux stades-clés : le stade "épi 1 cm" (début de la montaison, correspondant au moment où le sommet de l'apex est à 10 mm de la base du plateau de tallage sur 50 % des brins-mâitres) et le stade "épiaison" (50 % des épis de la parcelle sont visibles). Les dates de ces stades sont maintenant bien modélisées en fonction du climat (températures, durée du jour), de la variété et de la date de semis (Gate, 1995) ; leur estimation préalable à la simulation de l'évolution de l'indice foliaire n'est donc pas contradictoire avec notre cahier des charges.

### 1.2. Description du modèle LAI<sub>t</sub>

La construction du modèle qui décrit l'évolution du LAI en fonction du temps a été réalisée sur la base des données de l'essai 1996. Un ajustement a été réalisé sur chaque bloc, en utilisant comme répétition les deux placettes prélevées à une même date.

#### 1.2.1. Modélisation de l'espérance

Comme nous l'avons signalé dans la bibliographie, les courbes d'évolution du LAI en fonction de la somme de degrés-jours sont généralement ajustées à des fonctions de type logistique asymétrique à 5 paramètres, de la forme de l'Équation 13 qui s'écrit:

$$LAI_t = n + \frac{d - n}{[1 + \exp(-b * (dj - m)^\alpha)]} \quad \text{Équation 13}$$

avec :

- LAI<sub>t</sub> Indice foliaire à un temps "t"
- n Asymptote inférieure
- d Asymptote supérieure
- m Abscisse du point d'inflexion (point où la vitesse de croissance est maximale)
- b Paramètre lié à la pente
- α Paramètre de dissymétrie
- dj Variable explicative (en somme de degrés-jours)

L'estimation des paramètres a été réalisée par la procédure "nls2" du logiciel Splus. Lors de l'estimation des paramètres avec une logistique asymétrique, l'hypothèse  $\alpha = 1$  a été acceptée par le test du maximum de vraisemblance. De ce fait, on retient comme équation de régression une logistique symétrique à 4 paramètres :

$$LAI_t = n + \frac{d - n}{[1 + \exp(-b * (dj - m))]} \quad \text{Équation 14}$$

Cette équation n'a cependant été ajustée aux données que jusqu'à l'épiaison ; après ce stade, on impose la contrainte : indice foliaire maximal et, par la suite, constant. À la levée, LAI = 0, soit :

$$LAI = 0 = n + \frac{d - n}{[1 + \exp(bm)]}$$

d'où l'on tire :

$$-n[1 + \exp(bm)] = d - n$$

Soit :

$$n = \frac{-d}{\exp(bm)} \quad \text{Équation 24}$$

Le plafond de LAI est égal à :

$$LAI_{\text{Epiasion}} = n + \frac{d - n}{1 + \exp[-b(Ep - m)]} \quad \text{Équation 25}$$

avec :

Ep Somme de degrés-jours entre la levée et l'épiaison.

Soit, en conjuguant les équations 24 et 25 :

$$LAI_{\text{Epiasion}} = -d \exp(-bm) + \frac{d + d \exp(-bm)}{1 + \exp[-b(Ep - m)]}$$

$$LAI_{\text{Epiasion}} [1 + \exp(-b(Ep - m))] = [-d \exp(-bm) \cdot (1 + \exp(-b(Ep - m))) + d + d \cdot \exp(-bm)]$$

$$LAI_{\text{Epiasion}} [1 + \exp(-b(Ep - m))] = d[-\exp(-bm)(1 + \exp(-b(Ep - m))) + 1 + \exp(-bm)]$$

$$d = \frac{LAI_{\text{Epiasion}} [1 + \exp(-b(Ep - m))]}{1 - \exp(-bm) \exp(-b(Ep - m))}$$

$$d = \frac{LAI_{\text{Epiasion}} [1 + \exp(-b(Ep - m))]}{1 - \exp(-b \cdot Ep)} \quad \text{Équation 26}$$

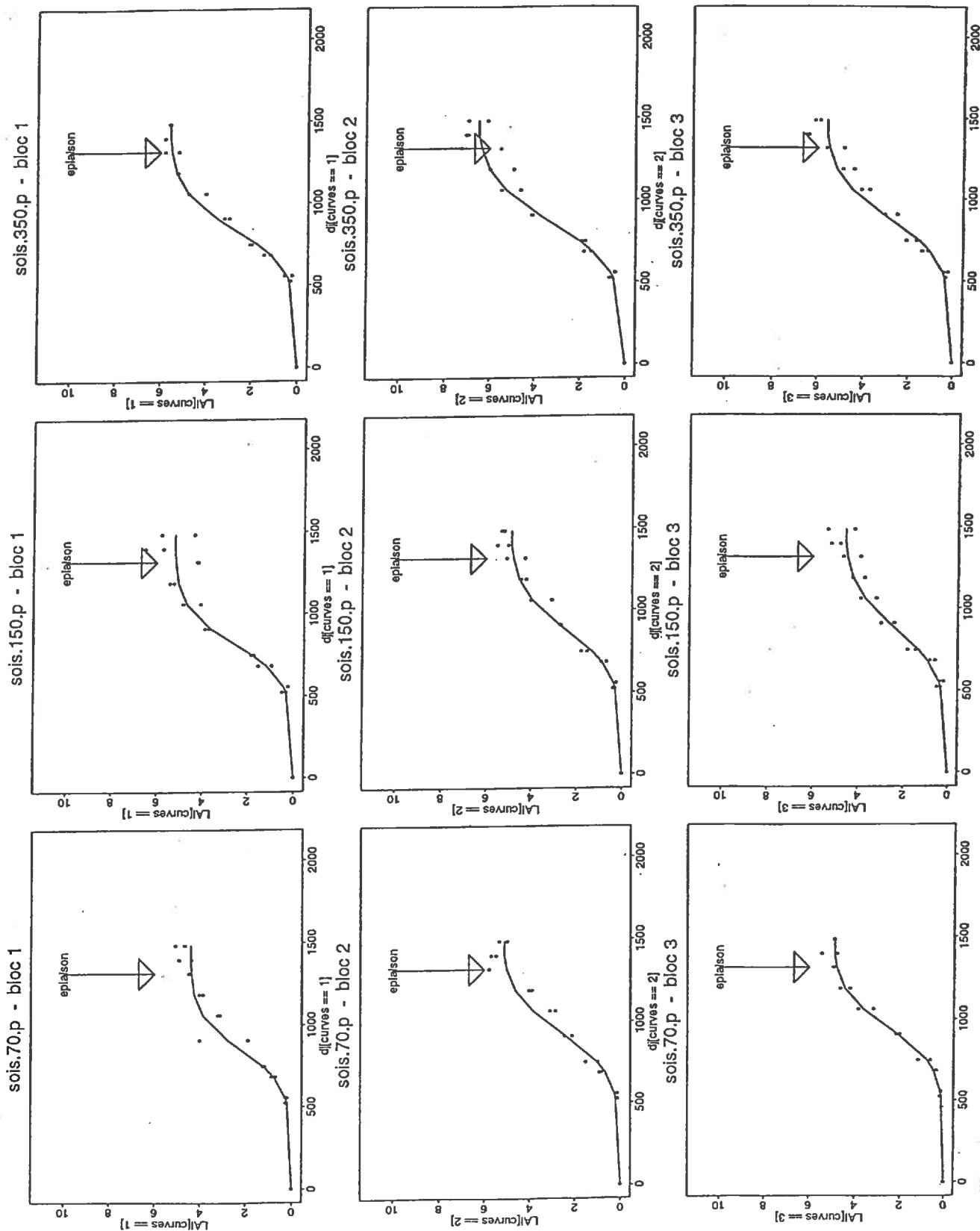


Figure II-2.11. Evolution de l'indice foliaire (LAI) en fonction de la somme de degrés-jours (d).  
Confrontation des courbes ajustées et des valeurs observées : exemple de Soissons en semis précoce

L'Équation 26 montre que l'asymptote supérieure (paramètre d) dépend des deux autres paramètres de la logistique (m, b), de la date d'épiaison (ep) et du LAI à cette date ( $LAI_{ep}$ ). C'est d'ailleurs grâce à cette contrainte que la courbe d'évolution du LAI, naturellement dissymétrique, a pu être ajustée à une logistique symétrique. Ceci nous exempte de l'estimation du paramètre  $\alpha$  qui diminuerait la précision de l'estimation des autres paramètres.

### 1.2.2. Modélisation de la variance

En régression non linéaire, l'hypothèse de l'équidistribution des erreurs - c'est-à-dire d'une variance des erreurs identiques -, quelle que soit la valeur de la variable indépendante, est irréaliste (Huet *et al.*, 1992). L'étude des graphiques d'évolution du LAI, observé en fonction de la somme de degrés-jours (*Figure II-2.1*), montre que la variabilité des mesures de LAI tend à augmenter lorsque croît l'espérance. Cette variabilité des mesures de la variable dépendante nous a conduits à le traduire dans le modèle.

Pour compléter le modèle de régression, on doit ainsi admettre qu'il existe une variance. Dans le cas de notre essai où nous avons deux observations (2 placettes), pour une abscisse fixée (somme de degrés-jours), la variance est hétérogène. L'équation de la régression s'écrira :

$$Y_{ij} = f(x_{ij}, \theta) + \text{erreur}_{ij}$$

$$\text{Var}(E_i) = \sigma_j^2$$

L'observation de l'allure de l'évolution de la variance de l'erreur en fonction de la somme de degrés-jours et de l'espérance (*Annexe II-2.1*), nous a conduite à adopter le modèle de puissance 1.5 suivant :

$$\text{Var}(E_i) = LAI^{1.5}$$

Équation 27

## 1.3. Estimation des paramètres de la logistique sur les peuplements de l'année 1996

L'estimation consiste à choisir le meilleur vecteur des paramètres qui minimise la distance entre la fonction de régression et la valeur observée (Huet *et al.*, 1992). Le choix de la méthode d'estimation est une étape importante dans la modélisation, car de la précision avec laquelle sont estimés les paramètres et les valeurs de l'espérance dépend la qualité de la validation. Etant donné qu'on connaît la loi des erreurs, nous avons utilisé la méthode du maximum de vraisemblance pour estimer simultanément les paramètres communs à l'espérance et à la variance, ainsi que ceux propres à la variance.

### 1.3.1 Confrontation des courbes ajustées et des valeurs observées

L'examen de la *Figure II-2.1* (Soissons 150), montre que tout au long du cycle du blé, le modèle s'ajuste bien aux données observées.

Les *Annexes II-2.3 à II-2.7* confirment ce fait pour toutes les variétés, les densités et les dates de semis. L'évaluation statistique du modèle par l'indicateur d'efficacité du modèle (EF), plus

adapté à la comparaison de données simulées et observées dans les modèles non linéaires (Loague & Green, 1991 in Néel, 1996) :

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Équation 28}$$

EF est un critère relatif dont la valeur oscille entre -1 et +1, dans les modèles de régression non linéaire. Plus EF est proche de 1, meilleur est le modèle. Selon Mayer *et al.* (1992), pour un  $EF \geq 0.5$ , on considère que le modèle est globalement correct. Sur le *Tableau II-2.1*, on note que, pour l'ensemble des traitements, EF est supérieur à 0.92, le modèle est donc très bon, ce qui confirme les résultats de l'évaluation graphique (*Figure II-2.1 + Annexes II-2.3 à II-2.7*).

Cependant, sur la *Figure II-2.1*, on note au niveau du plateau (LAI maximal) des écarts entre les courbes de simulation et les données mesurées. Ceci est dû au fait qu'à la date d'épiaison le LAI simulé est plafonné, alors qu'en réalité il continue à augmenter un peu, mais la différence des LAI entre l'épiaison et la floraison n'est pas très importante. L'analyse du modèle global d'estimation des besoins en azote, que nous aborderons à la fin de cette partie, permettra de dégager l'incidence du plafonnement du LAI à l'épiaison sur le calcul des besoins en azote de la culture.

L'examen des résidus montre que ceux-ci sont indépendants de la valeur des LAI ajustés, ce qui confirme la qualité du modèle (*Annexes II-2.8 à II-2.12*)

### 1.3.2. Valeurs des paramètres selon les pratiques culturales

Sur le *Tableau II-2.2* qui récapitule les valeurs des 4 paramètres de la logistique (valeurs obtenues à partir de la moyenne de trois blocs), on constate que pour les trois variétés (Soissons, Thésée et Pernel), les valeurs des paramètres sont peu variables. Par contre, la comparaison, pour une variété donnée, des paramètres entre dates de semis (précoce et tardive) et densités (faibles et fortes) montre l'existence d'une variation parfois importante pour "LAI<sub>ep</sub>", "m" et "n". Le paramètre "b" à l'opposé semble être assez constant, quelles que soient la variété, la densité et la date de semis.

L'analyse de variance sur chaque paramètre en fonction des techniques culturales (variété, densité et date de semis) montre que le paramètre "LAI<sub>ep</sub>" est dépendant de la densité et de la date de semis ( $r^2$  de 77 %) et "m" dépend de la densité et l'interaction densité-date ( $r^2$  de 69 %). Le paramètre "n" dépend de l'interaction entre la densité et la date de semis ( $r^2$  de 80 %). Les variations du paramètre "b" ne sont pas significatives. Pour l'ensemble de ces paramètres, l'analyse de variance ne montre aucune différence significative entre Soissons, Thésée et Pernel.

Ces résultats sont cohérents avec ce que l'on peut observer de l'évolution du LAI en fonction de la somme de degrés-jours (*Figures II-2.2 et II-2.3*). La comparaison des trois densités (70, 150 et 350 p.m<sup>2</sup>) sur la variété Soissons, montre un effet de la densité sur la croissance de l'indice foliaire (*Figure II-2.2*). Il en est de même pour la date de semis ; selon que le semis est précoce ou tardif, pour une densité et une variété fixées (exemple : Soissons 150), l'évolution de la croissance du LAI est différente. Par contre, pour les trois variétés (*Figure II-2.3*) à même densité (exemple : 150 p.m<sup>2</sup>), les différences d'évolution du LAI restent minimales tout au long du cycle.



Tableau II-2.1. Efficience du modèles d'estimation du LAI

Variété	Densité	Date de semis	Efficience du modèle (EF)
<i>Pernel</i>	70	Précoce	0.97
	70	Tardif	0.96
	150	Précoce	0.97
	150	Tardif	0.92
	350	Précoce	0.94
	450	Tardif	0.92
<i>Soissons</i>	70	Précoce	0.97
	70	Tardif	0.95
	150	Précoce	0.98
	150	Tardif	0.97
	350	Précoce	0.98
	450	Tardif	0.98
<i>Thésée</i>	70	Précoce	0.96
	70	Tardif	0.93
	150	Précoce	0.98
	150	Tardif	0.96
	350	Précoce	0.97
	450	Tardif	0.97

Tableau II-2.2. Récapitulatif des paramètres de la courbe logistique d'évolution de l'indice foliaire en fonction de la somme de degrés-jours (valeurs issues de la moyenne des trois blocs)

Variété	Densité	Date de semis	LAIep	b	m	n
<i>Pernel</i>	150	Précoce	4.93	0.0080	877	- 0.0039
	150	Tardif	5.06	0.0067	872	- 0.0218
	350	Précoce	5.73	0.0079	842	- 0.0079
	450	Tardif	5.40	0.0079	689	- 0.0233
	70	Précoce	4.36	0.0096	871	- 0.0008
	70	Tardif	4.11	0.0088	828	- 0.0029
<i>Soissons</i>	150	Précoce	4.84	0.0080	857	- 0.0053
	150	Tardif	4.60	0.0084	782	- 0.0094
	350	Précoce	5.82	0.0075	864	- 0.0095
	450	Tardif	5.65	0.0080	699	- 0.0084
	70	Précoce	4.76	0.0084	910	- 0.0020
	70	Tardif	4.07	0.0090	821	- 0.0023
<i>Thésée</i>	150	Précoce	5.34	0.0079	871	- 0.0050
	150	Tardif	4.66	0.0083	760	- 0.0088
	350	Précoce	6.35	0.0071	867	- 0.0142
	450	Tardif	5.37	0.0083	672	- 0.0209
	70	Précoce	4.62	0.0085	895	- 0.0021
	70	Tardif	3.92	0.0087	839	- 0.0060

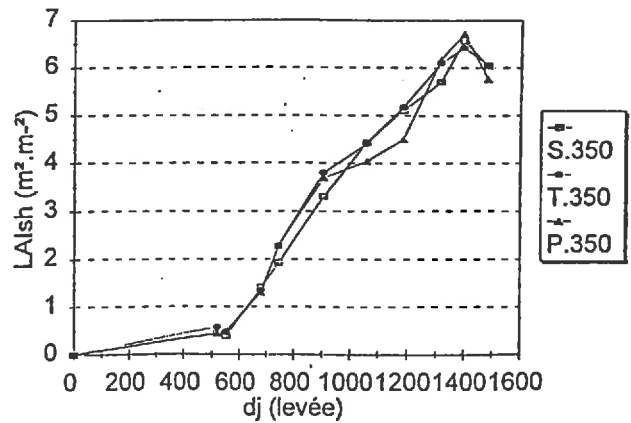
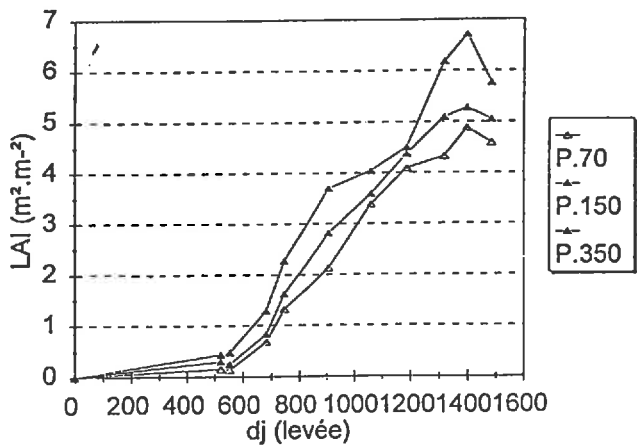
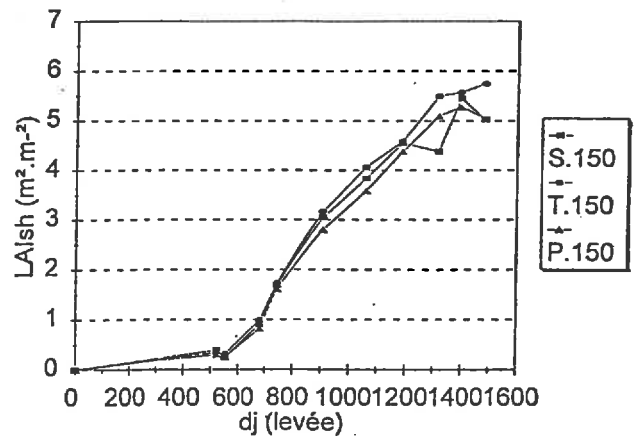
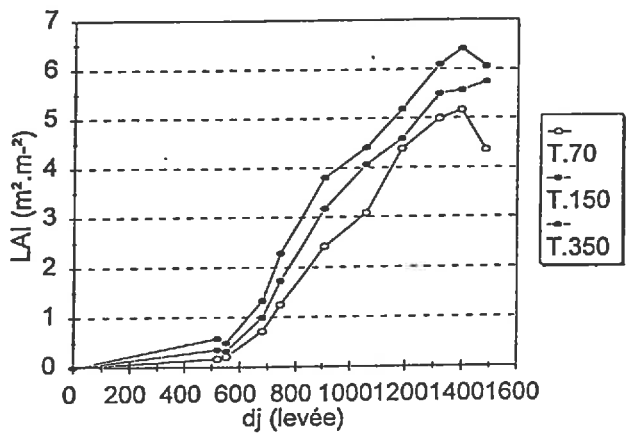
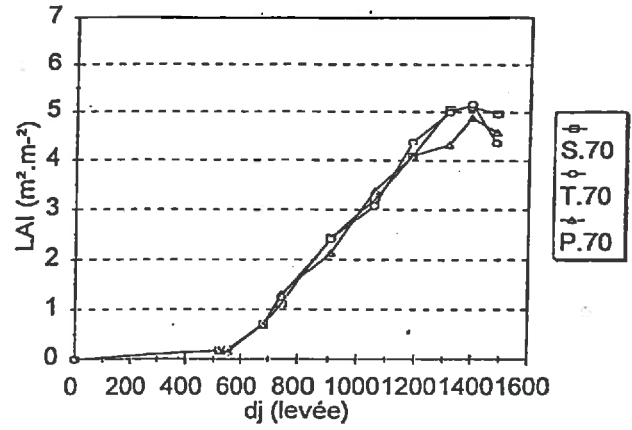
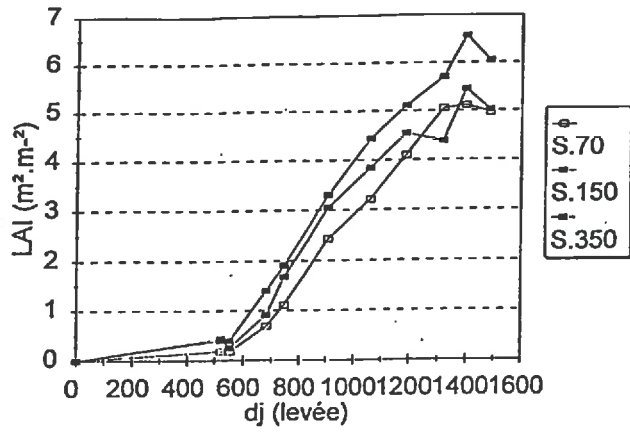


Figure II-2.2. Evolution de l'indice foliaire de la levée à la floraison : comparaison des trois densités (70, 150 et 350 p/m<sup>2</sup>) pour Soissons (S), Thésée (T) et Pernel (P)

Figure II-2.3. Evolution de l'indice foliaire de la levée à la floraison : comparaison des trois variétés Soissons (S), Thésée (T) et Pernel (P) pour chaque densité (70, 150 et 350 p/m<sup>2</sup>)

#### 1.4. Modélisation de la valeur des paramètres du modèle $LAI_t$

Le modèle choisi comporte quatre paramètres qui varient selon les situations culturales. Pour pouvoir l'utiliser en prédictif en conditions agricoles, il faut mettre au point des procédures de prévision de ces paramètres.

##### 1.4.1. Variables utilisées pour la prévision des paramètres du modèle $LAI_t$

Pour atteindre l'objectif d'opérationnalité du modèle, on ne doit utiliser que des variables d'entrée pertinentes et facilement mesurables. Pour cette raison, nous avons volontairement écarté les variables suivantes :

- **Densité de peuplement.** Notre objectif étant d'estimer les besoins en azote de peuplements de blés clairs - c'est-à-dire de densité hétérogène -, les informations sur la densité de plantes par unité de surface du sol ont été considérées comme très difficiles à acquérir.
- **Date de semis.** Selon les régions, les années, une même date de semis n'a pas du tout les mêmes conséquences sur la croissance et le développement de la culture. En fin d'hiver, l'effet date de semis sur le LAI pourrait être approché par des variables telles que le nombre de feuilles, de talles... dont le recueil n'est pas automatisable. Nous n'avons donc utilisé dans la prévision des paramètres ni la date de semis (pas pertinente), ni ses variables de substitution (considérées comme non disponibles).

Nous avons fait l'hypothèse que les variables  $LAI_{SH}$  et  $X_{SH}$  condensaient l'information pertinente contenue dans la date de semis et la densité de peuplement. Les variables utilisées pour la prévision des paramètres sont en définitive au nombre de trois :

- **La variété.** Bien que ce ne soit pas le cas pour nos données, l'évolution de l'indice foliaire peut être affectée par la variété (Hammer *et al.*, 1993).
- **L'indice foliaire entre la sortie d'hiver et le stade "épi 1 cm" ( $LAI_{SH}$ ).** Cette variable est estimée, comme nous l'avons montré dans la première partie, à partir de la mesure du taux de couverture du sol ou de la réflectance radiométrique. Dans nos données,  $LAI_{SH}$  varie entre 0.2 et 2.
- **La date d'observation ( $X_{SH}$ ) de  $LAI_{SH}$ .** La variable date d'observation est exprimée en somme de degrés-jours, comptés non pas à partir de la date de semis ou de levée, mais de la date d'épiaison.  $X_{SH}$  représente la somme de degrés-jours qui sépare la date d'observation du  $LAI_{SH}$  de l'épiaison. Ce choix s'explique par le fait que la date d'épiaison est plus stable entre années que les dates de semis ou de levée, mais surtout que  $X_{SH}$  permet de situer la date d'observation par rapport au moment où l'indice foliaire atteint son maximum, ce qui aide à caler la courbe d'évolution de l'indice foliaire par rapport à la réalité de l'année en cours. La date d'épiaison est considérée comme une variable aisément disponible dès la sortie de l'hiver (prévisible par le modèle de Gate, 1995). Dans le cadre de ce travail, nous avons estimé les stades de développement à partir des observations sur le terrain (Cf. Matériel et Méthodes).

1.4.2. Constitution de la base de données

Pour chaque traitement de l'essai 1996, on identifie quatre couples en précoce et trois en tardif ( $LAI_{SH}$ ,  $X_{SH}$ ) qui correspondent aux mesures réalisées entre le stade tallage (sortie hiver) et le début montaison (Tableau II-2.3).  $X_{SH} = 794$  représente la date d'observation du  $LAI_{SH}$  la plus précoce à la sortie de l'hiver (début mars), elle est donc la plus éloignée de l'épiaison (la plus grande valeur).  $X_{SH} = 634$  est la date d'observation proche du stade "épi 1 cm" ; elle représente la date limite où l'on peut effectuer des observations sur les parcelles pour calculer la dose du deuxième apport en azote (début avril, avec une variation d'une semaine dépendant de la densité et de la variété).

La base de données comprend donc les quatre paramètres de la logistique ( $LAI_{ep}$ , b, m et n) et les variables agronomiques explicatives (variété,  $LAI_{SH}$ ,  $X_{SH}$ ) pour "18 traitements expérimentaux x 3 blocs x 4 dates d'observation" de  $LAI_{SH}$ .

Tableau II-2.3. Dates d'observation et valeurs prises par la variable  $X_{SH}$  (expérimentation de 1996)  
Valeurs pour toutes les variétés, en densités 70, 150 et 350 pl/m<sup>2</sup>

Date de semis	dj	$X_{SH}$	Date calendaire
<i>PRÉCOCE</i>	522	794	04/03/96
	554	762	11/03/96
	681	634	27/03/96
	746	570	09/04/96
<i>TARDIF</i>	318	794	18/03/96
	423	762	02/04/96
	528	635	15/04/96

### 1.4.3. Formes générales des modèles d'estimation des paramètres de la logistique

L'Annexe II-2.13 montre que les paramètres sont très peu corrélés entre eux ; les relations entre paramètres ( $LAI_{ep}$ ,  $b$ ,  $m$  et  $n$ ) et les  $LAI_0$  sont de tendance linéaire et plutôt lâches. Les différents paramètres ont donc été ajustés à des modèles additifs du type :

$$Y_{ir} = \mu + \alpha_i \text{variété} + \beta LAI_{SH_{ir}} + \gamma X_{SH_{ir}} + \varphi_{ir} + E_{ir} \quad \text{Équation 29}$$

avec :

$Y_{ir}$	Paramètre de la logistique sur $r$ répétitions
$\mu$	Moyenne générale
$\alpha_i$	Ecart entre la variété et la moyenne générale
$\beta$	Pente de la régression entre $Y$ et $LAI_{SH}$
$\gamma$	Pente de la régression entre $Y$ et $X_{SH}$
$\varphi_{ir}$	Interactions entre les différents termes du modèles
$E_{ir}$	Erreurs indépendantes d'espérance nulle, telles que $\text{var}(\varepsilon) = \sigma^2$

L'écriture et l'analyse statistique des modèles de prédiction des quatre paramètres de la logistique se fait en plusieurs étapes.

1. La première étape consiste en une analyse statistique (analyse de variance) des données du modèle complet (modèle avec l'ensemble de ces termes : Cf. Matériel et Méthode). Les résultats de cette analyse permettent de tracer des graphiques pour vérifier le postulat d'homogénéité des variances et de répartition aléatoire des résidus, de normalité des résidus. Cette analyse graphique permet de dire si le modèle est valide : on rejette l'hypothèse de nullité de l'ensemble des coefficients, c'est-à-dire que les régresseurs, dans leur ensemble, apportent une explication significative au paramètre à estimer.
2. L'étape suivante est analogue à la première, mais elle permet de ne retenir dans le modèle (Cf. Matériel et Méthode : Construction de sous-modèles) que les termes qui ont un effet significatif sur le paramètre à estimer (choix des régresseurs). Une analyse graphique permet, là aussi, de vérifier la qualité du sous-modèle.

Nous ne détaillerons ces différentes étapes que pour le  $LAI_{ep}$  ; pour les autres paramètres, nous donnerons uniquement les principaux résultats des analyses de variance des sous-modèles retenus.

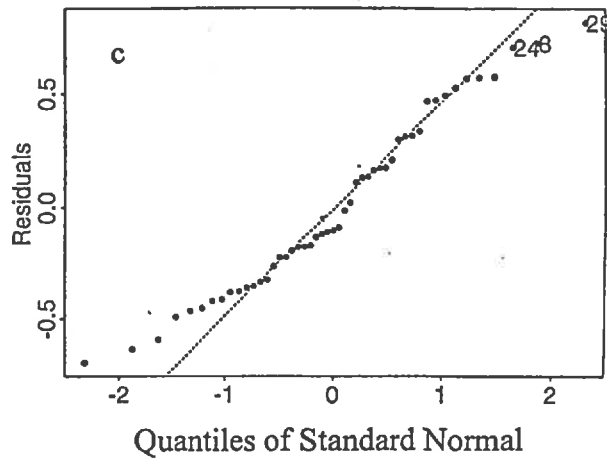
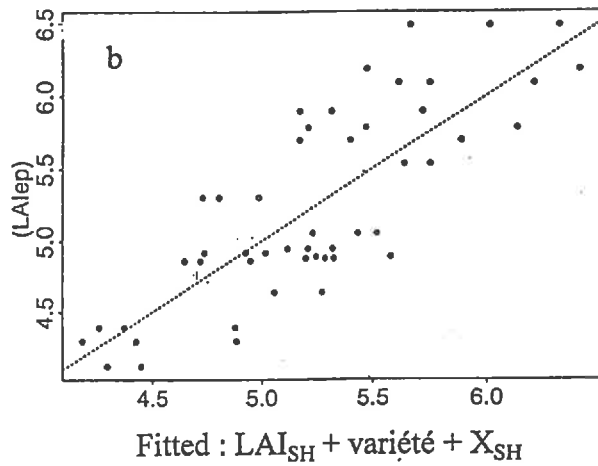
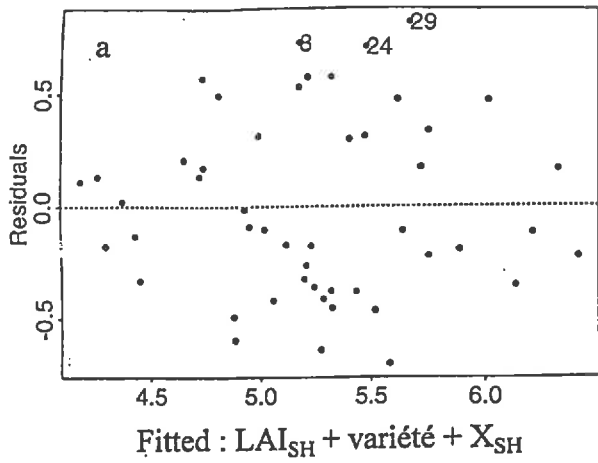


Figure II-2.4. Résidus du modèle d'estimation du paramètre LAI<sub>ep</sub>:

- a) Valeur absolue des résidus en fonction des valeurs ajustées par le modèle complet
- b) Valeurs observées en fonction des valeurs ajustées du modèle
- c) Quantiles empiriques des résidus en fonction des quantiles théoriques de la loi normale centrée réduite

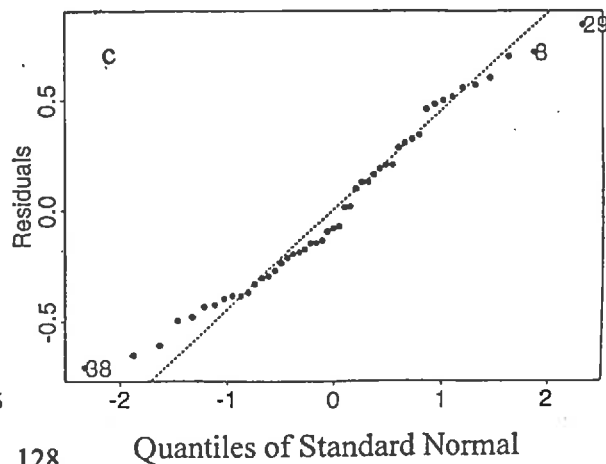
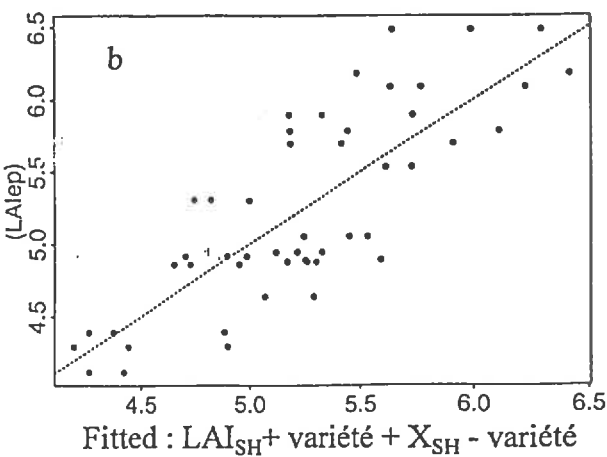
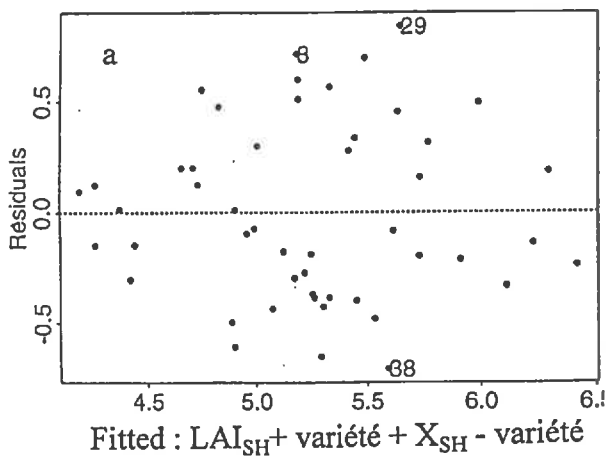


Figure II-2.5. Résidus du sous-modèle d'estimation du paramètre LAI<sub>ep</sub>:

- a) Valeur absolue des résidus en fonction des valeurs ajustées par le modèle complet
- b) Valeurs observées en fonction des valeurs ajustées du modèle
- c) Quantiles empiriques des résidus en fonction des quantiles théoriques de la loi normale centrée réduite

1.4.3.1. Estimation du paramètre LAI maximal à l'épiaison ( $LAI_{ep}$ )

• **Résultats graphiques du modèle complet**

La modélisation du  $LAI_{ep}$  s'écrit comme l'Équation 29. Les résultats numériques du modèle complet, permettent de tracer les graphiques (Figures II-2.4, a, b et c).

La Figure II-2.4 a représente la valeur absolue des résidus, en fonction des valeurs ajustées par le modèle complet, il permet de vérifier le postulat d'homogénéité de la variance des erreurs (la variance ne dépend pas des valeurs ajustées). La Figure II-2.4 b représente les valeurs observées en fonction des valeurs ajustées du modèle. Les points sont répartis aléatoirement de part et d'autre de la droite, ce qui vérifie le postulat de répartition aléatoire des résidus. La Figure II-2.4 c représente les quantiles empiriques des résidus en fonction des quantiles théoriques de la loi normale centrée réduite ; les points oscillent de part et d'autre de la droite, ce qui permet de conclure que les résidus sont distribués suivant une loi normale. On vérifie donc le postulat de normalité des résidus.

Une fois ces postulats vérifiés, nous considérons que le modèle est adéquat.

• **Choix des régresseurs : construction du sous-modèle**

La méthode du choix des régresseurs est expliquée en détail dans le § Matériel et Méthode (Partie I-3.5). Après avoir choisi les régresseurs par la méthode de sélection descendante, les résultats de l'analyse de variance montrent que la variété n'a pas d'effet significatif sur le  $LAI_{ep}$ , qui dépend uniquement des variables  $LAI_{SH}$  et  $X_{SH}$ .

- Le sous-modèle de prédiction du  $LAI_{ep}$  vérifie également le postulat d'homogénéité des erreurs (Figure II-2.5 a), de la répartition aléatoire des résidus (Figure II-2.5 b) et de la normalité des résidus (Figure II-2.5 c). La part de la variance expliquée par le modèle est  $R^2 = 64 \%$ .

Le modèle d'estimation du paramètre  $LAI_{ep}$  retenu s'écrit de la façon suivante :

$LAI_{ep} = -0.313 + 1.69 (LAI_{SH}) + 0.0061 (X_{SH})$	<b>Équation 30</b>
---	--------------------

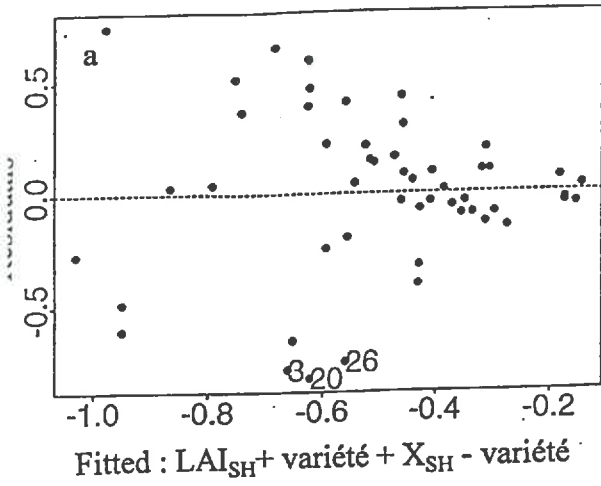


Figure II-2.6. Résidus du modèle d'estimation du paramètre "n" :

- a) Valeur absolue des résidus en fonction des valeurs ajustées par le modèle complet
- b) Valeurs observées en fonction des valeurs ajustées du modèle
- c) Quantiles empiriques des résidus en fonction des quantiles théoriques de la loi normale centrée réduite

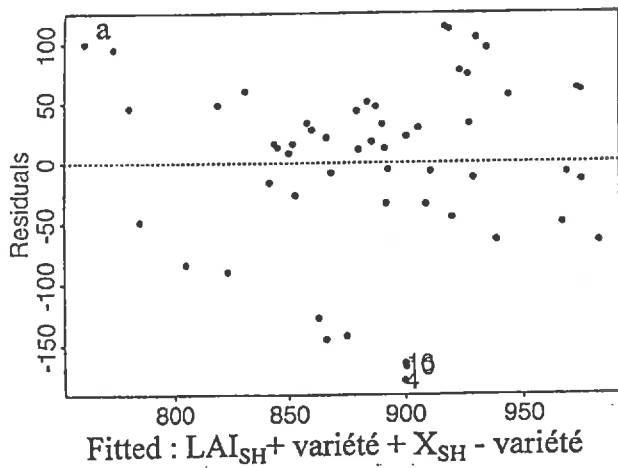
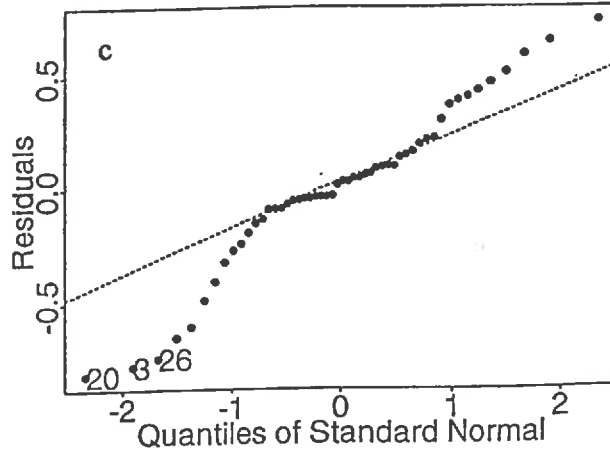
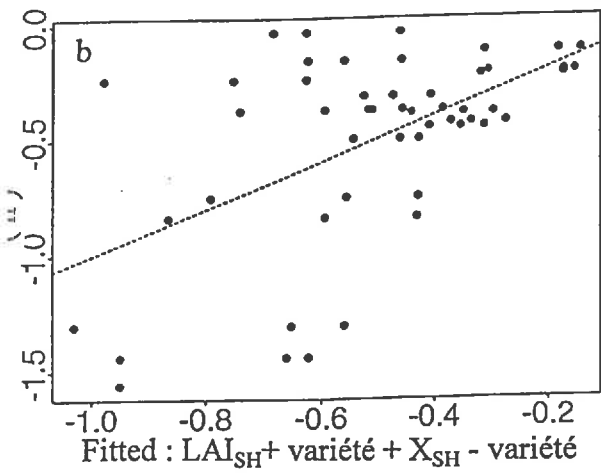
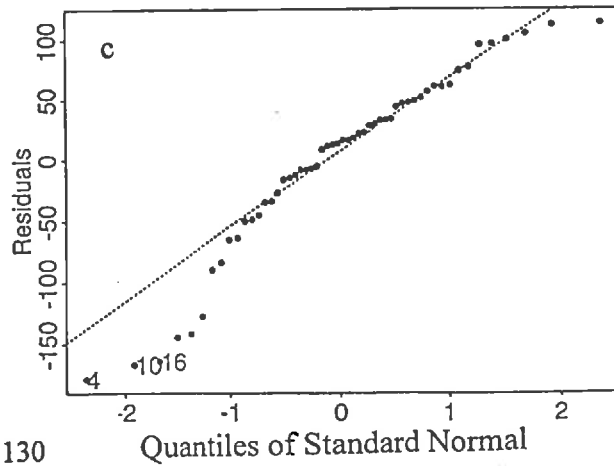
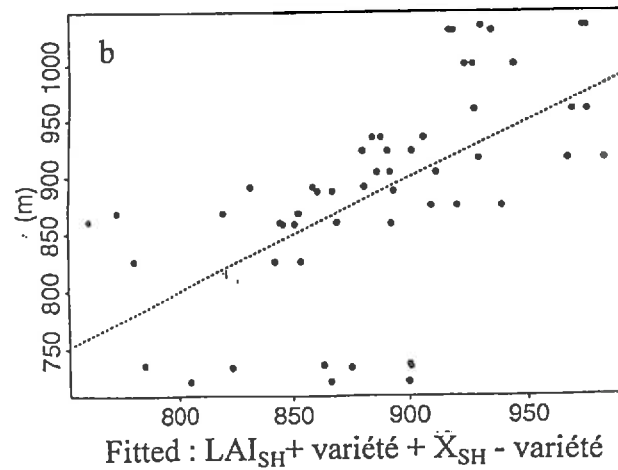


Figure II-2.7. Résidus du sous-modèle d'estimation du paramètre "m" :

- a) Valeur absolue des résidus en fonction des valeurs ajustées par le modèle complet
- b) Valeurs observées en fonction des valeurs ajustées du modèle
- c) Quantiles empiriques des résidus en fonction des quantiles théoriques de la loi normale centrée réduite





### 1.4.3.2. Paramètre lié à la pente "b"

Le même modèle (Équation 29) est appliqué pour estimer le paramètre lié à la pente "b". De l'analyse de variance, il ressort que le modèle n'apporte aucune explication significative. Le paramètre "b" ne dépend pas des variables explicatives LAI<sub>SH</sub>, X<sub>SH</sub> ni de la variété. La statistique de Fisher F = 0.1 observée est inférieure à F théorique = 2.56 pour un risque d'erreur de 0.05. Ce résultat permet de considérer le paramètre "b" comme constant. Les résultats graphiques sont représentés par la figure *Annexe II-2.14*

$$b = 0.0056$$

### 1.4.3.3. Paramètre asymptote inférieure "n"

Le paramètre "n" est estimé avec les mêmes variables explicatives. Le modèle s'écrit comme dans l'Équation 29.

Le modèle satisfait au postulat d'homogénéité de la variance, de la répartition aléatoire des résidus et de la normalité des résidus (*Figure II-2.6*). Les résultats de l'analyse de variance du modèle montrent que l'asymptote inférieure dépend comme pour le LAI<sub>ep</sub>, des variables LAI<sub>SH</sub> et de X<sub>SH</sub>. Le modèle explique 43 % de la variabilité totale.

Le modèle d'estimation du paramètre "n" retenu s'écrit de la façon suivante :

$$n = 0.062 - 0.018 (\text{LAI}_{\text{SH}}) - 8.28 \cdot 10^{-05} (\text{X}_{\text{SH}}) \quad \text{Équation 31}$$

### 1.4.3.4. Paramètre d'abscisse du point d'inflexion "m"

#### a) Première méthode : Modélisation de "m" par la régression multiple

Le modèle de régression multiple utilisé pour l'estimation de l'abscisse du point d'inflexion s'écrit également en fonction de l'indice foliaire sortie hiver, de la date d'observation et de la variété (Équation 32).

$$m = -174.484 (\text{LAI}_{\text{SH}}) - 0.534 (\text{X}_{\text{SH}}) \quad \text{Équation 32}$$

Le modèle satisfait aux hypothèses d'homogénéité de la variance, de la répartition aléatoire des résidus et de la normalité des résidus (*Figure II-2.7*). L'analyse statistique montre que le paramètre "m" est expliqué par le LAI<sub>SH</sub> et le X<sub>SH</sub>, le modèle explique 34 % de la variabilité.

Cependant lors de la validation du modèle d'estimation de l'évolution du LAI (§ A.6) sur les données de 1995, nous noterons que l'utilisation des valeurs du paramètre "m", données par le

modèle de l'Équation 34, ont induit un décalage, le long de l'abscisse somme de degrés-jours, entre les valeurs simulées et observées. Les variables LAI<sub>SH</sub> et X<sub>SH</sub>, qui ont un effet significatif sur l'estimation de "m", ne suffisent pas à elles seules à bien estimer ce paramètre. L'effet année qui s'exprime par le décalage des stades a un impact très important sur le paramètre "m". Ceci nous a conduits à rechercher une autre manière de modéliser le paramètre "m".

**b) Deuxième méthode :**

**Modélisation du paramètre "m" par la connaissance des stades de développement**

Le paramètre "m" représente la somme de degrés-jours depuis la levée (dj) où l'indice foliaire atteint la moitié du LAI maximal (Hammer *et al.*, 1993). Elle se situe courant montaison, entre les stades "épi 1 cm" et épiaison. Selon les années, pour une même date de semis, la date de réalisation en somme de degrés-jours des stades de développement ("épi 1 cm" et épiaison) peuvent être différents (Gate, 1995), ce qui conduit à un déplacement de l'abscisse du point d'inflexion entre années climatiques contrastées. Pour tenir compte de l'effet année, nous avons posé l'hypothèse que l'abscisse du point d'inflexion est située à mi-distance entre le stade "épi 1 cm" et l'épiaison, dont on sait modéliser actuellement les dates.

On écrit le modèle de la façon suivante :

$$m = (dj_{\text{epiaison}} + dj_{\text{épi=1}}) / 2$$

Équation 33

avec :

$dj_{\text{epiaison}}$  la date d'épiaison  
 $dj_{\text{épi=1}}$  la date du stade "épi 1 cm"

Pour vérifier notre hypothèse, nous avons utilisé les données d'évolution du LAI de notre essai 1996, ainsi que de celui de M.H. Jeuffroy obtenues à Grignon en 1992, sur la variété Soissons en densité 350 p.m<sup>2</sup> <sup>(1)</sup>. Avec l'ensemble des ces données, nous avons estimé le paramètre "m" :

- d'une part avec le modèle LAI<sub>t</sub> (Équation 14) ;
- d'autre part, en le positionnant à mi-distance entre les stades "épi 1cm" et épiaison.

La comparaison des valeurs du paramètre "m", estimées par l'ajustement de l'évolution du LAI, à la logistique plafonnée (Modèle LAI<sub>t</sub>) et celles estimées par l'Équation 33 sont représentées par la Figure II-2.8. Sur celle-ci, on voit que les valeurs du paramètre "m" estimées par la méthode fondée sur les stades de développement, sont légèrement plus élevées que celles du point d'inflexion de la logistique ; les écarts sont cependant très variables.

L'importance de l'impact de l'erreur effectuée sur l'estimation de "m" ne sera connue que lorsque nous aurons validé le modèle LAI<sub>t</sub>.

<sup>(1)</sup> Protocole de recueil de données analogue au nôtre, présenté dans Jeuffroy et Recous, 1998 (soumis).

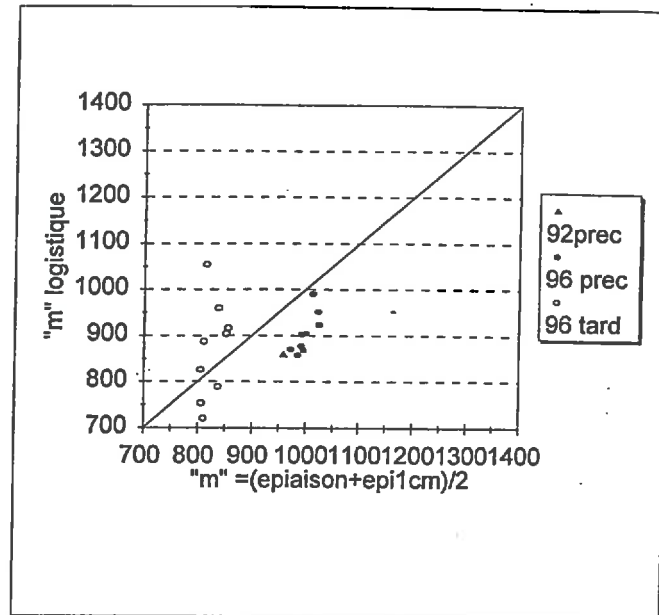


Figure II-2.8. Paramètre "m" simulé par la logistique (en ordonnée) et estimé comme la moyenne des sommes de degrés-jours nécessaires pour l'épiaison et le stade "épi 1 cm" (épiaison + épi 1 cm/2, en abscisse)

### 1.5. Discussion partielle : Effet des pratiques culturales et prévision précoce des paramètres de la logistique

#### 1.5.1. Valeurs biologiques des paramètres du modèle LAI, ( $LAI_{ep}$ , $m$ , $b$ et $n$ ), selon les pratiques culturales et les conditions de croissance

Le bon ajustement du modèle  $LAI_t$  sur l'ensemble des variétés, densités et dates de semis montre l'intérêt d'un modèle logistique symétrique plafonné à l'épiaison pour rendre compte de la courbe essentiellement dissymétrique d'évolution du LAI en fonction de la somme de degrés-jours. Ce résultat est original, la plupart des auteurs adoptant des ajustements logistiques dissymétriques à cinq paramètres, soit un de plus que nous, ce qui complique et diminue la précision des procédures d'estimation. L'analyse de variance montre que l'indice foliaire maximal ( $LAI_{ep}$ ), l'abscisse du point d'inflexion ( $m$ ) et l'asymptote inférieure ( $n$ ) varient en fonction de la densité et de la date de semis, mais pas de la variété. En modélisant le LAI par une logistique sur plusieurs hybrides de sorgho, qui diffèrent par le nombre total de feuilles, Hammer *et al.* (1993) rapportent qu'il n'y a pas d'effet de la différence des hybrides sur les paramètres " $m$ " et " $b$ ". Les trois variétés que nous avons utilisées (Soissons, Thésée et Pernel) ont été choisies notamment pour leurs différences de structure géométrique très importante pour l'étude de la relation entre l'indice foliaire sortie hiver et les indicateurs du couvert. Pour une date et une densité déterminées, les variétés ne présentent pas de différence de croissance de LAI, ce qui est contraire à ce que rapportent certains travaux (Digby & Fimm, 1985), où le génotype semble être un facteur important dans la dynamique de l'indice foliaire. Il serait prudent de vérifier cela sur d'autres variétés ayant des potentialités de production et des précocités différentes.

### 1.5.2. Prédiction des valeurs des paramètres

#### 1.5.2.1. Le $LAI_{ep}$

Nous avons montré qu'à date  $X_{SH}$  fixée, plus le  $LAI_{SH}$  est fort plus le LAI maximal ( $LAI_{ep}$ ) est élevé. Cette relation intègre le fait que le  $LAI_{ep}$  des semis précoces est plus élevé que celui des semis tardifs, et le  $LAI_{ep}$  des densités fortes plus élevé que celui des densités faibles. Sur Sorgho, Maas (1993b) considère que l'effet de la densité sur la dynamique du LAI est bien pris en compte par la seule initialisation du modèle à une date précoce, sans modification des autres paramètres. Selon Gosse *et al.* (1983), l'état initial du peuplement conditionne le LAI potentiel. De même, Dwyer & Stewart (1986) ont montré, sous différentes conditions de cultures, que la surface de n'importe quelle feuille d'un plant de maïs est fortement influencée par la surface de celles qui la précèdent : autrement dit, la surface foliaire initiale conditionne la suite. Masle *et al.* (1985) rapportent qu'en conditions de croissance non limitantes, le  $LAI_{SH}$  du blé est conditionné par la densité, la variété et la date de semis. Nos résultats sont donc cohérents avec ceux de la bibliographie.

#### 1.5.2.2. La position de l'asymptote inférieure

Elle dépend du départ de la courbe (première courbure de la logistique - phase ascendante), définie par le  $LAI_{SH}$  et la  $X_{SH}$ . Plus la date d'observation se rapproche du stade début montaison, plus le  $LAI_{SH}$  est élevé. Par conséquent, la position de l'asymptote inférieure dépend du  $LAI_{SH}$  et de  $X_{SH}$ .

*Les résultats obtenus de la modélisation de la prédiction de " $LAI_{ep}$ ", " $b$ " et " $n$ " par les variables  $LAI_{SH}$  et  $X_{SH}$ , démontrent que ces deux variables se substituent bien à la densité et à la date de semis, variables explicatives que nous avons rejetées au § 1.4.1.*

#### 1.5.2.3. L'abscisse du point d'inflexion

Il représente la somme de degrés-jours pour laquelle la croissance de l'indice foliaire atteint sa vitesse maximale ; " $m$ " diminue pour les semis tardifs et pour les densités fortes. Ces résultats ne sont pas surprenants : le semis tardif raccourcissant la phase levée-épiaison, l'installation des surfaces foliaires se fait sur une période plus courte en somme de degrés-jours. La densité forte accélère la croissance foliaire en début de cycle, et la vitesse maximale d'accroissement du LAI est atteinte plus rapidement (Masle, 1985). La variété n'a pas d'influence sur " $m$ " ; cependant, la différence de précocité à l'épiaison entre les trois variétés choisies est très faible et on peut penser qu'il en serait autrement entre variétés de précocité différente. Notons cependant que sur Sorgho, Hammer *et al.* (1993) montrent que le paramètre " $m$ " ne diffère pas, sur une collection d'hybrides qui se distinguent par le nombre total de feuilles et la durée de la période végétative. Le résultat de l'Équation 32 n'est pas étonnant, car pour un  $X_{SH}$  fixé, plus le  $LAI_{SH}$  est élevé plus la vitesse de croissance maximale sera vite atteinte.

Le deuxième modèle d'estimation de " $m$ " prend en compte les dates de réalisation de deux stades-clés de la culture au printemps. La prévision de ces stades nécessite des données de températures ; elle est faite en sortie d'hiver ou peu après (à la date d'observation de  $LAI_{SH}$ ), les températures hivernales réelles sont disponibles et conduisent à différencier l'estimation de " $m$ " selon les années ; pour les températures postérieures à l'observation, on peut proposer de retenir les normales saisonnières. Contrairement au premier modèle, celui-ci prend donc en

compte un effet "Année", mais aussi un effet "Variété" ("m" sera d'autant plus élevé que la variété sera tardive). Il intègre aussi un effet "Date de semis" ("m" sera plus faible pour les semis tardifs puisque les sommes de degrés-jours "Levée-Epi 1 cm" et "Levée-Epiaison" sont plus courtes pour ceux-ci, Masle *et al.*, 1988). Pour ces raisons, ce modèle sera probablement plus robuste que le premier. Cependant, il ne prend pas en compte l'effet "Densité" mis en évidence sur nos données, et la première évaluation que nous en avons faite montre qu'il mériterait d'être affiné.

Les résultats montrent que ces différents modèles intermédiaires d'estimation des paramètres du modèle d'évolution du LAI<sub>t</sub>, présentent des R<sup>2</sup> faibles. Mais on ne pourra porter de jugement sur la qualité de ces modèles qu'en fonction de leur validation sur un autre jeu de données, et d'une estimation des conséquences d'erreurs éventuelles sur la prévision des besoins.

## 1.6. Validation du modèle LAI<sub>t</sub>

### 1.6.1. Constitution de couples (LAI<sub>SH</sub>, X<sub>SH</sub>) sur l'essai 1995

La validation du modèle LAI<sub>t</sub> est faite à partir d'un jeu de données, acquis en 1995, indépendant de celui qui a servi à estimer les paramètres pour plusieurs valeurs observées de LAI<sub>SH</sub> sur une gamme de dates d'observation X<sub>SH</sub> allant du début mars (stade tallage) jusqu'au stade début montaison (Tableau II.2.4)<sup>(1)</sup>. À partir des modèles des Équations 30 à 33, nous avons réalisé la prévision des différents paramètres de la logistique, à chacune des dates X<sub>SH</sub> où nous avons observé le LAI<sub>SH</sub>.

Afin de vérifier si le modèle permet d'estimer la cinétique d'évolution du LAI dans différentes conditions agricoles, nous avons réalisé des simulations pour plusieurs densités de peuplements, variétés, dates de semis et dates d'observations (X<sub>SH</sub>).

---

<sup>(1)</sup> Pour Soissons 450, en semis tardif, n'ayant pas de données du 29/03, nous avons utilisé celles du 24/03/1995. En semis précoce, Pernel a une date d'épiaison différente de celle des densités 150 et 350 l/m<sup>2</sup>, ce qui entraîne des valeurs de X<sub>SH</sub> différentes sur les graphiques de validation

**Tableau II-2.4. Dates d'observation et valeurs prises par la variable " $X_{SH}$ " (expérimentation de 1995)**

Densité	Date de semis	Date calendaire	dj	$X_{SH}$
70	Précoce	06/03/95	938	721
	Précoce	23/03/95	1048	611
	Précoce	03/04/95	1141	518
	Tardif	13/03/95	542	673
	Tardif	29/03/95	649	566
	Tardif	03/04/95	708	507
150	Précoce	06/03/95	938	721
	Précoce	23/03/95	1048	611
	Précoce	03/04/95	1141	518
	Tardif	13/03/95	542	673
	Tardif	29/03/95	649	566
	Tardif	03/04/95	708	507
350	Précoce	06/03/95	938	721
	Précoce	23/03/95	1048	611
	Précoce	03/04/95	1141	518
	Tardif	13/03/95	542	673
	Tardif	24/03/95	614	601
	Tardif	03/04/95	708	507

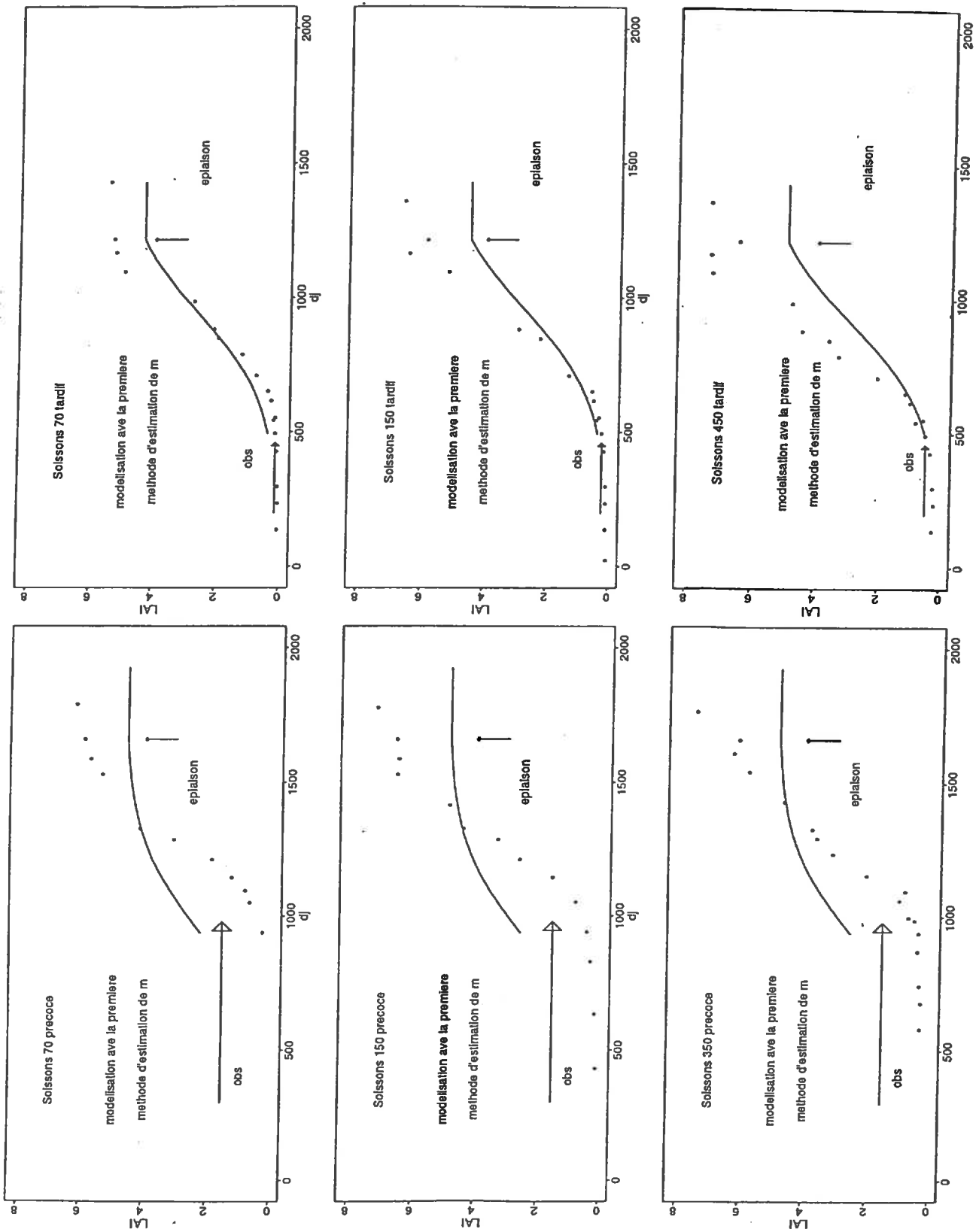
**1.6.2. Simulation du LAI en utilisant la première méthode d'estimation de "m"**

En semis précoce, pour tous les traitements, la modélisation de l'évolution du LAI en utilisant le paramètre "m" estimé par l'Équation 32, montre un décalage systématique sur l'axe du temps (Figure II-2.9). Le décalage est en moyenne de 500 degrés-jours. Par contre, en semis tardif, le décalage est nettement plus faible.

**1.6.3. Simulation du LAI en utilisant la deuxième méthode d'estimation de "m"**

Pour les valeurs de  $X_{SH}$  les plus précoces (début mars, soit environ 200 degrés-jours avant le stade "épi 1 cm"), quelles que soient les variétés et les densités, la différence entre LAI observé à l'épiaison et LAI simulé à la même date est supérieure ou égale à 2 (Figures II-2.10 et II-2.11, et Annexes II-2.15 à II-2.18). Cet écart se réduit pour les observations tardives.

Pour une date d'observation proche du stade "épi 1 cm" ( $X_{SH} = 518$  degrés-jours en semis précoce, 507 en semis tardif), la courbe d'évolution du LAI est bien simulée en densité forte (350 et 450). En densité faible (150 et 70), il faut attendre des observations postérieures au stade "épi 1 cm" ( $X_{SH} = 449$  et 427, Figure II-2.11 bis) pour que le LAI soit généralement bien estimé.



**Figure II-2.9. Simulation de l'indice foliaire (LAI en ordonnée, dj en abscisse) de 1995 avec les paramètres estimés (première méthode d'estimation de "m").**  
**Comparaison avec les observations**  
*(Variété Soissons en semis précoce et tardif, densités 70, 150 et 350 ou 450 p/m<sup>2</sup>)*

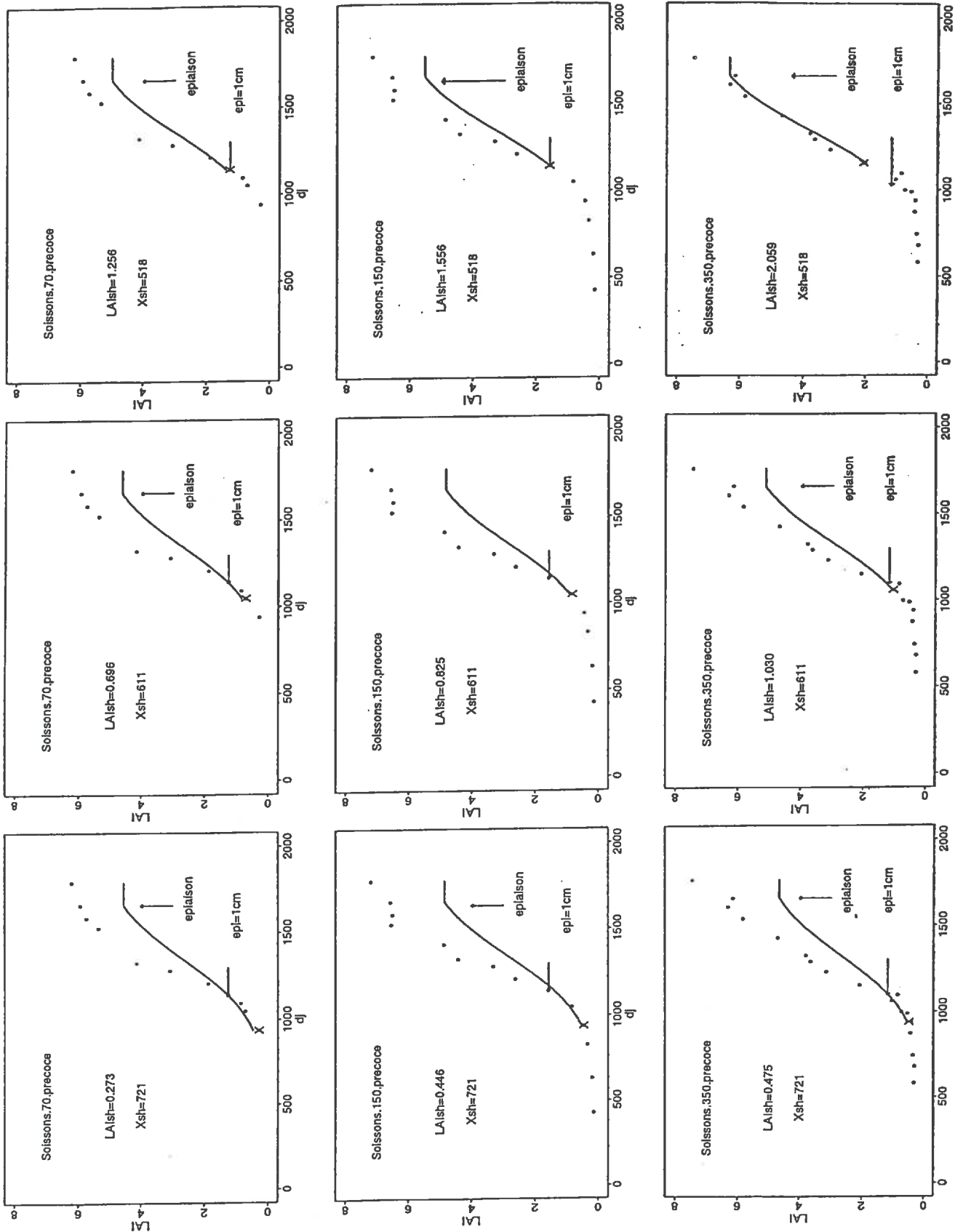


Figure II-2.10. Simulation de l'indice foliaire (LAI en ordonnée, dj en abscisse) de 1995 avec les paramètres estimés (deuxième méthode d'estimation de "m") pour différentes dates de mesure du LAI sortie d'hiver. (Variété Soissons en semis précoce, densités 70, 150 et 350p.m<sup>2</sup> (en ligne), dates d'observation en colonne)



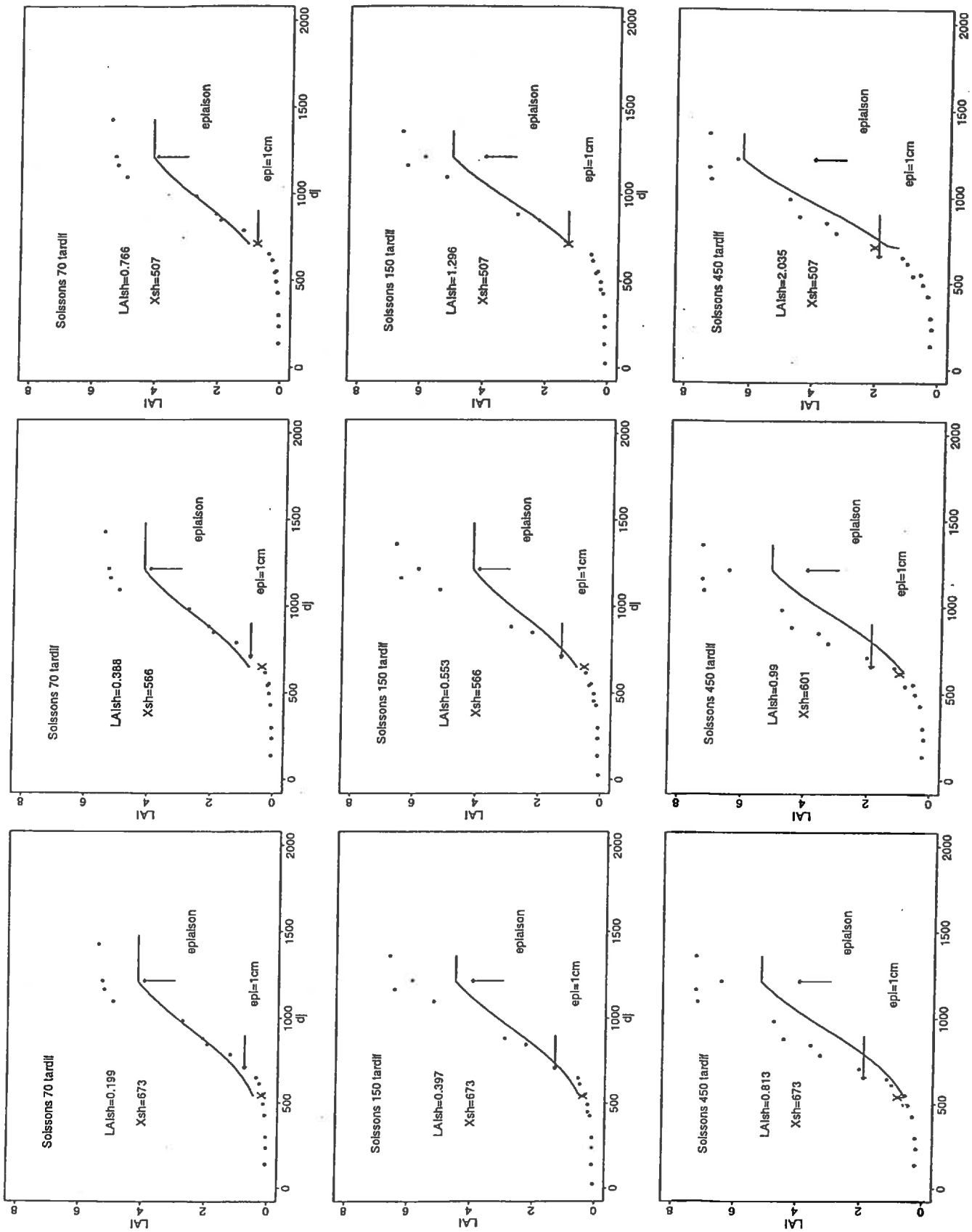


Figure II-2.11. Simulation de l'indice foliaire (LAI en ordonnée, dj en abscisse) de 1995 avec les paramètres estimés (deuxième méthode d'estimation de "m") pour différentes dates de mesure du LAI sortie d'hiver. (Variété Solissons en semis tardif, densités 70, 150 et 350 p/m<sup>2</sup> (en ligne), dates d'observation en colonne)

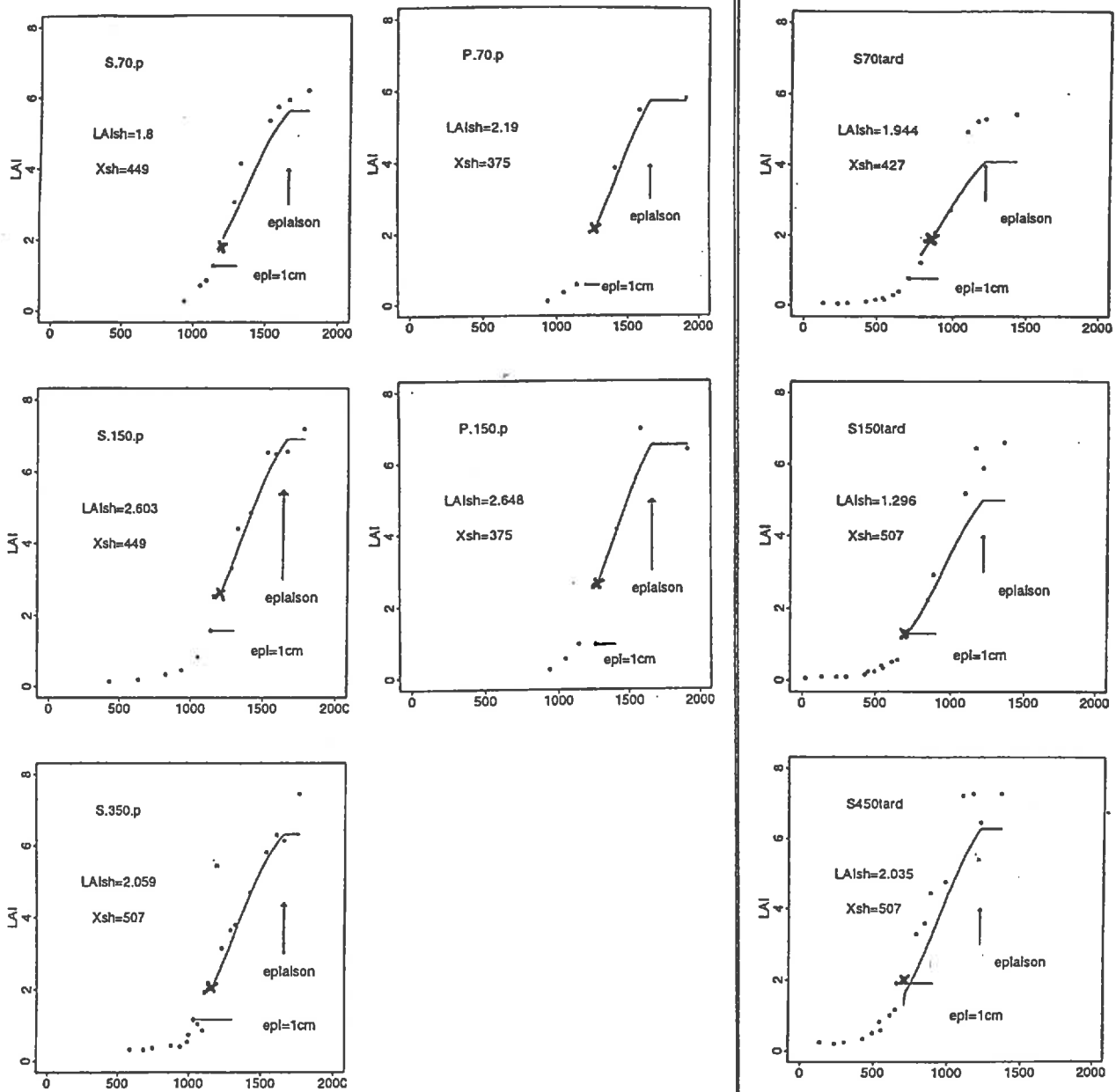


Figure II-2.11 bis. Simulation de l'indice foliaire (LAI en ordonnée, dj en abscisse) de 1995 avec les paramètres estimés (deuxième méthode d'estimation de "m") pour les dates de mesure du LAI postérieures au stade "épi 1 cm". (Variétés Soissons, Thésée et Pernel en semis précoce et tardif, densités 70, 150 et 350 p/m² (en ligne), dates d'observation en colonne)

#### 1.6.4. Discussion partielle sur la validation du modèle LAI<sub>t</sub>

##### 1.6.4.1. Effet année sur le modèle LAI<sub>t</sub>

La validation de la croissance de l'indice foliaire, utilisant le paramètre "m" prédit en fonction uniquement du LAI<sub>SH</sub> et du X<sub>SH</sub>, pour tous les traitements, est marquée par un décalage systématique entre le modèle et les données observées. La prédiction du paramètre "m" par les variables LAI<sub>SH</sub> et du X<sub>SH</sub> n'est pas suffisante pour bien estimer l'évolution du LAI (*Figure II-2.9*), malgré une estimation acceptable du LAI maximal et du début de courbe. Amir & Sinclair (1991), en validant leur modèle d'estimation du LAI sur un jeu de données d'une autre année climatique que celle qui a servi à construire leur modèle, ont été confrontés au même problème de décalage le long du cycle. Ils ont conclu que cela était dû à une différence de développement entre les années, qui ont eu un cumul de températures différent. Il semble bien que nous soyons dans le même cas. En effet, si l'on compare les indices foliaires observés entre les années 95 et 96, on montre un décalage d'environ 500 degrés-jours (*Figure II-2.12*) pour les mêmes densité, variété et date de semis (exemple de Soissons précoce 350 p.m<sup>2</sup>). Un effet de la vernalisation semble à exclure, compte tenu des dates de semis pratiquées dans nos essais (Masle *et al.*, 1989). La comparaison de la croissance de l'indice foliaire des semis tardifs des essais 95 et 96 (*Figure II-2.13*) est une preuve supplémentaire pour infirmer l'hypothèse de l'effet de la vernalisation.

Effectivement, si tel était le cas, le retard dans l'accumulation des températures vernalisantes aurait plus d'effet sur le semis tardif de 95 que sur le semis précoce. L'effet des rayonnements incidents ne peut pas, non plus, expliquer ce décalage, car il n'existe pratiquement pas de différence entre les années, comme nous le montrons dans la *Figure I-3.2* (Rayonnement : Matériel et Methodes).

Nous expliquons, en fait, ce décalage le long de l'abscisse somme de degrés-jours par une simple accumulation des températures plus douces après le semis en automne durant octobre et novembre 1995 comme le montre la *Figure I-3.1* (Matériel et Méthodes). Comme Soissons, Thésée et Pernel sont des variétés photopériodiques, la culture a accumulé une somme de températures supérieure à celle de 1996, pour atteindre le même stade de développement. Le stade "épi 1 cm" est acquis aux alentours de 1000 degrés-jours en 1995, alors qu'il n'est que de 500 degrés-jours en 1996, soit une différence de 500 degrés-jours qui correspond au décalage entre les courbes simulées et observées (*Figure II-2.9*). Les résultats de la prédiction du paramètre "m", avec l'*Équation 10*, sur les trois années 92, 95 et 96 (*Figure II-2.14*), montrent que la modélisation par les stades de développement prend en compte l'effet "Année".

L'estimation du paramètre "m", par le modèle basé sur la connaissance des stades de développement, "épi 1cm" et épiaison, calculés en somme de degrés-jours, améliore nettement la simulation du LAI. En effet, lorsque le paramètre "m" est modélisé en fonction du LAI<sub>SH</sub> et du X<sub>SH</sub>, l'effet "Année" lié aux températures hivernales (antérieures à la date d'observation) n'est pas pris en charge par la variable X<sub>SH</sub>.

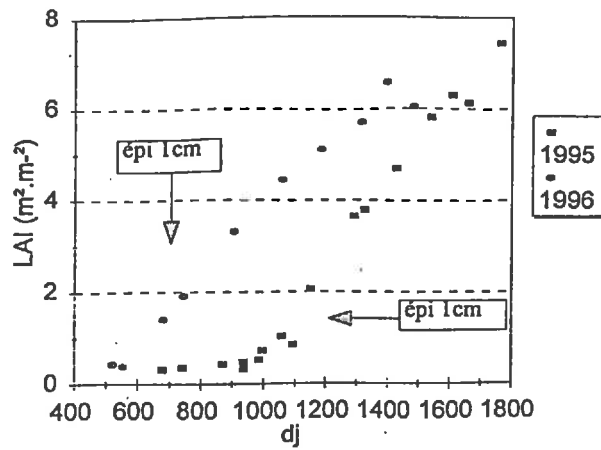


Figure II-2.12. Comparaison de l'évolution des LAI entre 1995 et 1996 pour les semis précoces (Cas des peuplements Soissons 350 p/m<sup>2</sup>)

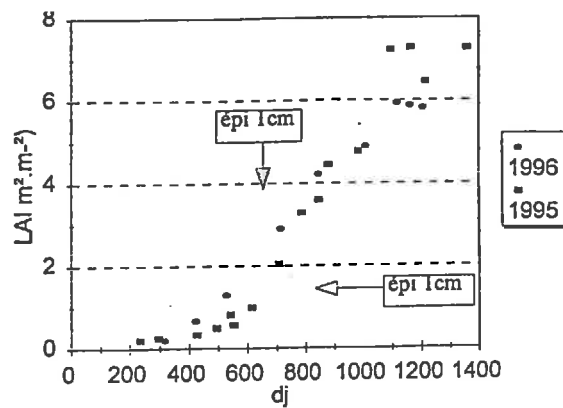


Figure II-2.13. Comparaison de l'évolution des LAI entre 1995 et 1996 pour les semis tardifs (cas des peuplements Soissons 450 p/m<sup>2</sup>)

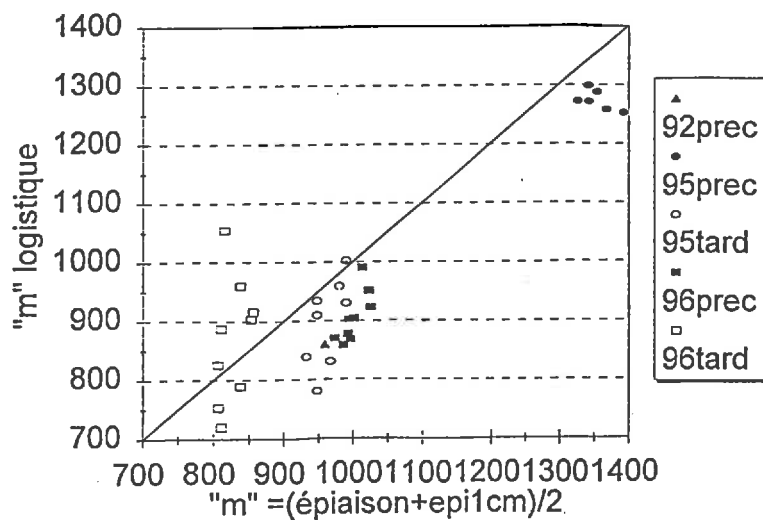


Figure II-2.14. Paramètre "m" simulé par la logistique (en ordonnée), estimé comme la moyenne des sommes de degrés-jours nécessaires pour l'épiaison et le stade "épi 1 cm" (en abscisse). (Expérimentations de 1992, 1995 et 1996, semis précoce et tardif)

#### 1.6.4.2. Estimation de la dynamique de l'indice foliaire à partir des données réelles de la parcelle

##### a) Estimation du LAI en fonction de la connaissance du $LAI_{SH}$ et de deux stades

- Connaissance des variables  $LAI_{SH}$

La simulation de l'indice foliaire, à partir de l'initialisation du modèle  $LAI_t$  avec les variables d'entrées  $LAI_{SH}$  et  $X_{SH}$  a permis de le rendre performant pour l'année 1995, au vu des résultats des simulations pour chacune des variétés, densités et dates de semis. Un résultat similaire a été obtenu par Maas (1993b) sur le maïs. Cet auteur, en comparant des maïs conduits sous différentes conditions d'irrigation, a montré que l'on peut rendre compte de l'effet des conditions hydriques sur la modélisation de la cinétique d'évolution de l'indice foliaire de la culture de maïs en utilisant une valeur de LAI à une date postérieure au début du stress hydrique : la différence d'évolution de l'indice foliaire entre un maïs non irrigué et un maïs irrigué a été bien simulée, le premier ayant un LAI à l'initialisation plus faible que le second.

Mais, lorsque les  $LAI_{SH}$  sont très faibles, le modèle d'estimation du LAI évalue mal l'indice foliaire en début de cycle comme c'est le cas pour Pernel en densité 70, en semis précoce et plus particulièrement en semis tardif.

La sous-estimation du LAI maximal, pour les faibles densités, est en moyenne de l'ordre de 1, et, pour les fortes densités, de 1.5 à 2. Avant de chercher à corriger cette erreur, il faudra analyser son incidence sur la prévision de la croissance, qui pourrait être assez faible du fait de la forme asymptotique de la loi d'interception du rayonnement (Loi de Beer, *Équation 12*). D'après Jamieson *et al.* (1995), à des valeurs de LAI supérieures à 5, une erreur d'estimation du LAI a peu d'impact sur le calcul de l'interception de la lumière : pour un LAI = 5, une erreur de 20 % conduit à 5 % d'erreur seulement sur l'interception de la lumière ; pour un LAI = 8, l'erreur est réduite à 3 %. Mais dans le cas des blés clairs, où le LAI maximum peut s'établir à 3, l'impact d'une erreur peut ne pas être négligeable. Cette question fera l'objet de discussions lors de l'étude de la sensibilité du modèle d'estimation des besoins en azote.

- Connaissance des stades épiaison et "épi 1 cm"

Les résultats de la validation du modèle  $LAI_t$  montrent bien l'intérêt d'utiliser les stades de développement dans le modèle  $LAI_t$ . Ils permettent de caler le modèle en deux points :

- *La date d'épiaison*, qui varie en fonction des années, des régions, des variétés et des dates de semis, permet de caler le modèle sur l'abscisse lorsque le LAI atteint le maximum. Mais, comme nous l'avons montré dans § 1.6.2, l'utilisation conjointe du stade épiaison, des variables  $LAI_{SH}$  et  $X_{SH}$  ne permet pas de bien estimer le LAI dans des conditions de variations annuelles des températures. C'est pourquoi, nous avons introduit le stade "épi 1 cm" dans la modélisation de l'indice foliaire (prédiction du paramètre "m"). Ce stade permet de caler le point de départ de la phase ascendante de la courbe de LAI, qui diffère entre dates de semis, années et, à degré moindre, entre densités et variétés.

***b) L'état initial des peuplements est fortement influencé par la densité, la date de semis et par les stades de développement***

La validation du modèle  $LAI_t$  quelles que soient les pratiques culturales (variété, densité et date de semis), s'améliore lorsque les observations  $X_{SH}$  sont faites à des dates avancées dans le cycle de la culture. C'est essentiellement la modélisation de la prédiction du paramètre  $LAI_{ep}$  (Équation 30) qui est influencé par la valeurs du  $LAI_{SH}$ . Car, de la précision de ce paramètre va dépendre celle du paramètre "d" : une sous-estimation de  $LAI_{ep}$  se répercute obligatoirement sur l'estimation de "d" qui, une fois utilisée dans la logistique, conduit à des écarts de la courbe simulée par rapport aux données observées.

La précision de l'estimation de l'indice foliaire courant montaison jusqu'à l'épiaison ( $LAI$  maximal), est étroitement liée à la valeur  $LAI_{SH}$ , elle-même dépendante du stade de développement et des conditions de croissance.

- **Influence de la densité sur le  $LAI_{SH}$**

Les courbes de LAI des fortes densités, qui ont le plus grand  $LAI_{SH}$ , pour une date d'observation donnée, se situent au-dessus de celles des faibles densités dont le  $LAI_{SH}$  est plus petit (Figure II-2.2). L'état initial du peuplement ( $LAI_{SH}$ ) est fortement influencé par la variable densité : il varie dans le même sens, ce qui nous a permis de substituer la densité au  $LAI_{SH}$ .

Cependant, d'après les résultats de la validation (Figures II-2.10, II-2.11 et II-2.11 bis + Annexes II-2.15 à II-2.16), le modèle  $LAI_t$  sous-estime, sur une large gamme de dates d'observation  $X_{SH}$ , l'évolution des LAI des densités élevées pendant la montaison. Ceci pourrait avoir des conséquences sur l'estimation des besoins en azote des peuplements de densités hétérogènes.

- **Influence de la date de semis sur le  $LAI_{SH}$**

La date de semis est un des principaux facteurs de la variation du  $LAI_{SH}$ . À même stade de développement et, *a fortiori* à même date, le  $LAI_{SH}$  est plus élevé pour les semis précoces que pour les semis tardifs. On n'observe pas de différence de qualité du modèle selon la date de semis.

- **Influence du stade d'observation**

Une des raisons qui peut expliquer pourquoi, en observation très précoce, le LAI courant montaison est mal estimé, est que lorsqu'on avance dans le cycle, les  $LAI_{SH}$  augmentent et que l'effet de la densité et de la date de semis sur le  $LAI_{SH}$  s'exprime plus nettement. Ceci est, sans doute, dû à notre protocole de recueil de données qui entraîne des coefficients de variation plus élevés pour les valeurs de LAI très faibles. La méthode d'estimation du  $LAI_{SH}$  par la réflectance ou par le taux de couverture étant, au contraire, assez sensible pour les valeurs faibles de LAI, cet effet pourrait être réduit lors de la jonction des deux modèles.

## Conclusion partielle

*L'influence des pratiques culturales et du climat semble être convenablement prise en compte dans le modèle, en donnant des valeurs différentes aux paramètres du modèle d'estimation du LAI. Celles-ci :  $LAI_{SH}$ ,  $X_{SH}$ , stades "épi 1 cm" et épiaison, traduisent la réalité de la variabilité temporelle et spatiale existant au sein d'une parcelle, entre parcelles et entre années, et affectant la dynamique du LAI.*

*Dans la gamme des densités étudiées sur les deux années 95 et 96, les LAI varient de 4 à 7. On peut donc considérer que le domaine de validité du modèle couvre une fourchette assez large de LAI. Cependant, dans les conditions agricoles, les conditions météorologiques (gel, excès d'eau) qui conduisent à un éclaircissement des peuplements de blé, entraînent souvent une réduction du tallage et de la croissance, qui n'ont pas existé dans nos expérimentations. Dans de tels cas, le LAI maximal que nous pouvons espérer peut être inférieur à 3. Il serait donc important d'inclure dans la gamme du modèle des LAI inférieurs à 4. Malgré les différences de morphologie et de cinétique d'évolution de l'indice foliaire entre variétés, le modèle LAI, estime bien la croissance du LAI pour les trois variétés. Malgré tout, la représentativité des trois variétés (Soissons, Thésée et Pernel), comparée au nombre considérable de variétés existantes et aux différences de comportement qu'elles peuvent avoir, ne peut être considérée comme suffisamment crédible, pour généraliser la robustesse du modèle sur l'ensemble des variétés. Il faudrait, par conséquent, le vérifier sur une panoplie plus vaste de variétés différant en particulier par la précocité. Les erreurs d'estimation du LAI seront jugées à travers l'analyse de sensibilité du modèle complet d'estimation des besoins en azote.*

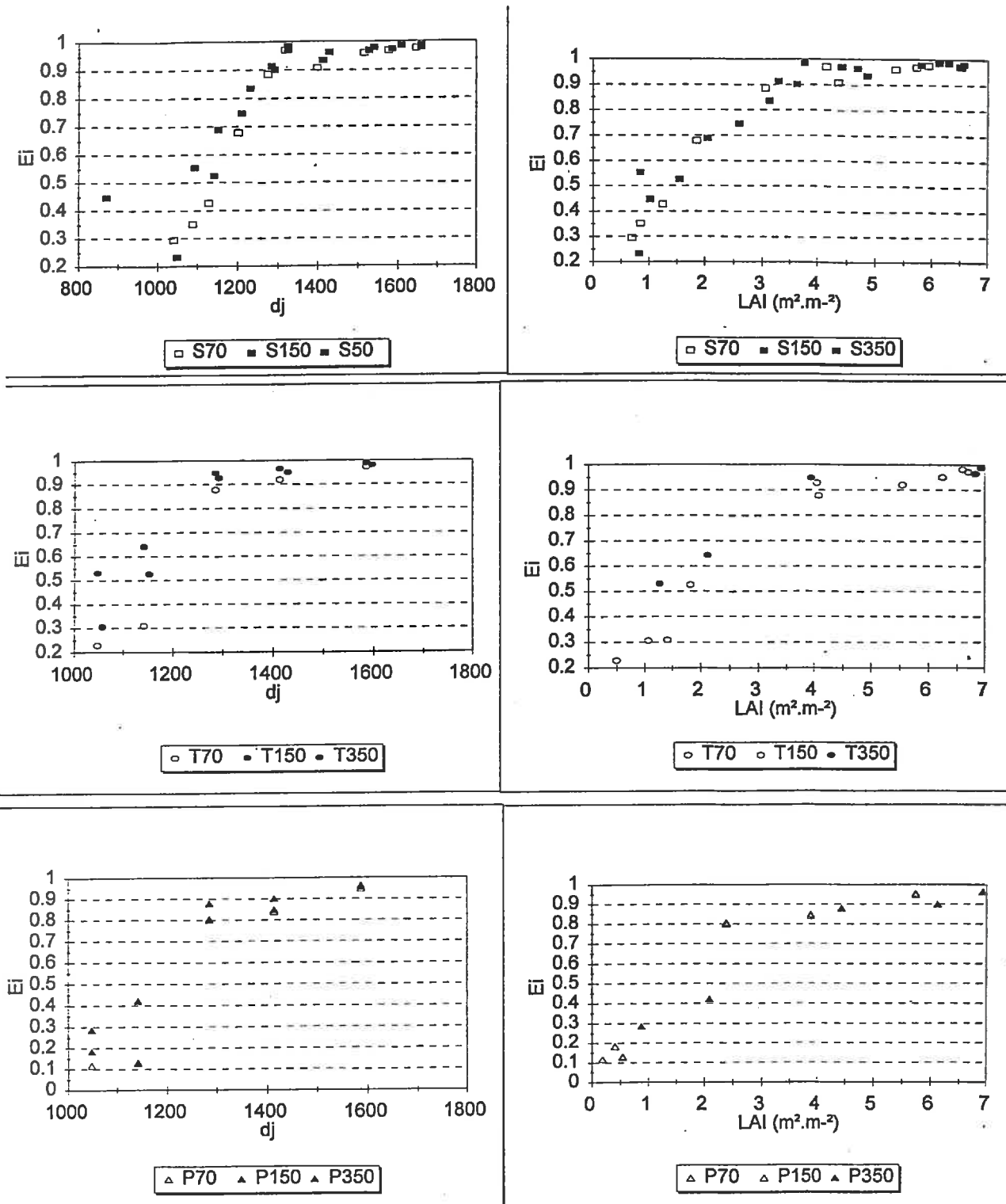


Figure II-2.15. Relation entre le LAI et l'efficacité d'interception ( $\epsilon_i$ ) pour les trois variétés et les trois densités, en semis précoce sur l'essai 1995 (à droite)  
 Evolution de l'efficacité d'interception ( $\epsilon_i$ ) du stade proche de "épi 1 cm" jusqu'à la floraison (à gauche)



## 2/ MODÉLISATION DE L'INTERCEPTION DE LA LUMIÈRE SOUS DIFFÉRENTES CONDITIONS CULTURALES

Pour la modélisation de l'interception de la lumière et de la croissance en biomasse, nous utiliserons dans un premier temps, les données de chacune des deux années d'essais, pour estimer et analyser la variation des paramètres entre les traitements ; dans un second temps, nous réaliserons la validation des paramètres estimés en 1996 sur les données de 1995.

### 2.1 Évolution de l'efficacité d'interception de la lumière sur les traitements expérimentaux des deux années 1995 et 1996

Dans ce paragraphe, nous étudions l'évolution de l'efficacité d'interception au cours du cycle : de la sortie hiver jusqu'à la floraison, dans le but de connaître à quels stades, par variété, les différentes densités (70, 150 et 350 p.m<sup>2</sup>) interceptent au moins 50 % de la lumière. Ce qui pourrait traduire à quel moment du cycle commence à s'estomper l'hétérogénéité du peuplement, notamment en densité faible.

Le suivi de l'interception de la lumière est étudié uniquement sur les semis précoces, le modèle n'étant pas affecté par la date de semis.

Les *Figures II-2.15 et II-2.16 (colonne de gauche)* montrent que la part du PAR<sub>intercepté</sub> varie dans le temps, suivant les densités et les variétés. Néanmoins, pour l'ensemble des traitements, pour les deux années, 50 % du PAR est largement intercepté au stade début montaison (tige + épi = 1 cm). À ce stade, la culture intercepte environ 70 % du rayonnement incident, pour les densités fortes, et plus de 50 % pour la densité faible. Pour les densités 350 et 150 des variétés Soissons et Thésée, au stade 2 noeuds, 90 % du PAR est déjà intercepté, alors que Pernel 150 et 70 n'atteignent cette valeur que plus tard. Mais à la floraison, toutes les variétés et densités, y compris les 70 p.m<sup>2</sup> arrivent à intercepter plus de 90 % de rayonnement incident ( $\epsilon_i$  max supérieur à 90 %).

L'analyse des *Figures II-2.15 et II-2.16* permet de faire ressortir les points suivants :

À des stades identiques, le PAR intercepté varie selon :

- **la densité.** Les densités 350 p.m<sup>2</sup> présentent jusqu'à la mi-montaison une efficacité d'interception du PAR supérieure aux densités faibles, ce qui est pénalisant pour la biomasse potentielle ;
- **la variété.** À même stade et densité, Soissons et Thésée interceptent plus de PAR que Pernel.

### 2.2. Modélisation de $\epsilon_i$

Après avoir étudié l'évolution de  $\epsilon_i$  au cours du temps, nous allons estimer  $\epsilon_i$  par le modèle de Beer de la sortie hiver jusqu'à la floraison, sur plusieurs variétés et densités. L'objectif est d'étudier si les paramètres du modèle d'estimation de l'interception de la lumière sont stables à travers la variation des techniques culturales.

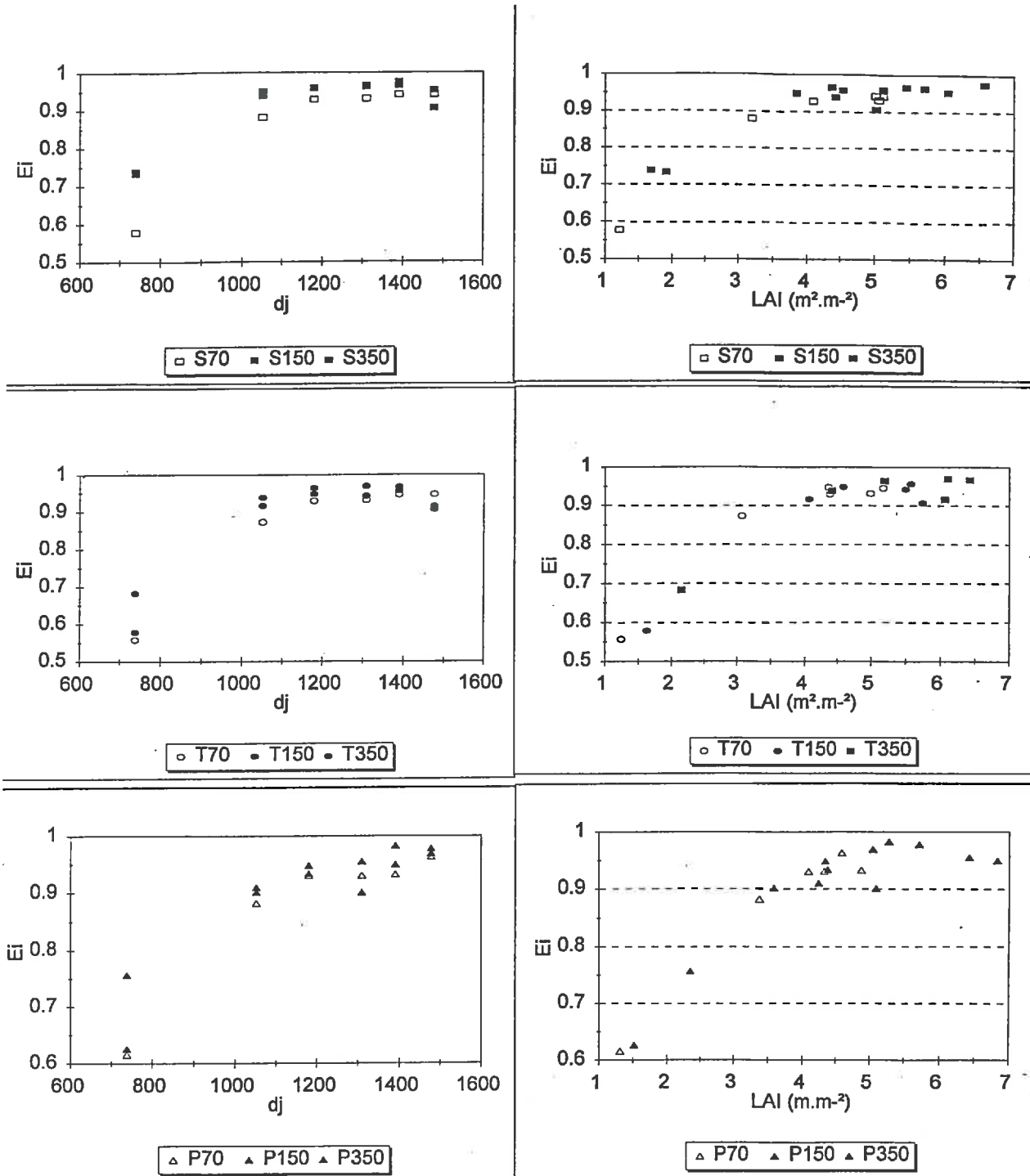


Figure II-2.16. Relation entre le LAI et l'efficacité d'interception ( $\epsilon_i$ ) pour les trois variétés et les trois densités, en semis précoce sur l'essai 1996 (à droite)  
 Evolution de l'efficacité d'interception ( $\epsilon_i$ ) du stade proche de "épi 1 cm" jusqu'à la floraison (à gauche)

L'évolution de l'efficacité d'interception  $\epsilon_i$  en fonction du LAI jusqu'à l'épiaison et la floraison pour les années 95 et 96 est représentée respectivement par les *Figures II-2.15 et II-2.16 (colonne de droite)* qui montrent que, pour les deux années,  $\epsilon_{i\max}$  est atteint pour des LAI  $\geq 4$ . Suivant les variétés et les densités cette valeur est atteinte à des stades différents.

Nous avons déterminé pour chaque traitement les valeurs des paramètres par un ajustement non linéaire (Bouvier *et al.*, 1985 ; Huet *et al.*, 1995) du modèle de Beer (*Équation 12*, bibliographie). La comparaison des modèles emboîtés (courbes des différents traitements) se fait par le test du rapport du maximum de vraisemblance (test ratio) (Huet *et al.*, 1995). Ce critère permet de comparer statistiquement les ajustements par confrontation de leur rapports de vraisemblance à la loi de  $\chi^2$  (Cf. Matériel et Méthode pour plus de détail). Nous avons pu tester l'effet des densités et des variétés sur les deux paramètres. Lors des traitements statistiques des données de l'essai de 1995, nous avons retiré certains points dont les résidus étaient anormalement élevés.

Les résultats de ces tests montrent que les variétés et densités n'ont pas d'effet significatif sur les paramètres  $\epsilon_{i\max}$  et  $K$  : l'efficacité d'interception ne dépend que du LAI. Ce résultat permet l'utilisation d'un  $\epsilon_{i\max}$  et d'un  $K$ , tous deux uniques, pour différentes variétés et densités. L'ajustement de  $\epsilon_i$  en fonction du LAI pour les années 95 et 96 est représenté dans les *Figures II-2.17 et II-2.18*. La répartition aléatoire des résidus montre que le modèle est normal (*Figures II.2.19 et II.2.20*). L'écart-type des estimateurs des paramètres est plus faible en 1996, ce qui est sans doute dû au protocole plus rigoureux de recueil des données (à une même date, LAI et PAR intercepté ont été mesurés sur la même placette).

Les résultats des régressions faites sur les données des essais 1995 et 1996 sont résumés dans le *Tableau II-2.5*.

*Tableau II-2.5. Valeurs estimées des paramètres  $\epsilon_{i\max}$  et  $K$  pour les essais 1995 et 1996*

1995	Valeur	Erreur standard	Valeur de "t"
$\epsilon_{i\max}$	0.98	0.009	107.76
$K$	0.63	0.029	21.67
1996			
$\epsilon_{i\max}$	0.97	0.005	169.53
$K$	0.67	0.019	34.52

La différence des valeurs estimées entre les deux années pourrait être attribuée à la même cause (Cf. Matériel et Méthode).

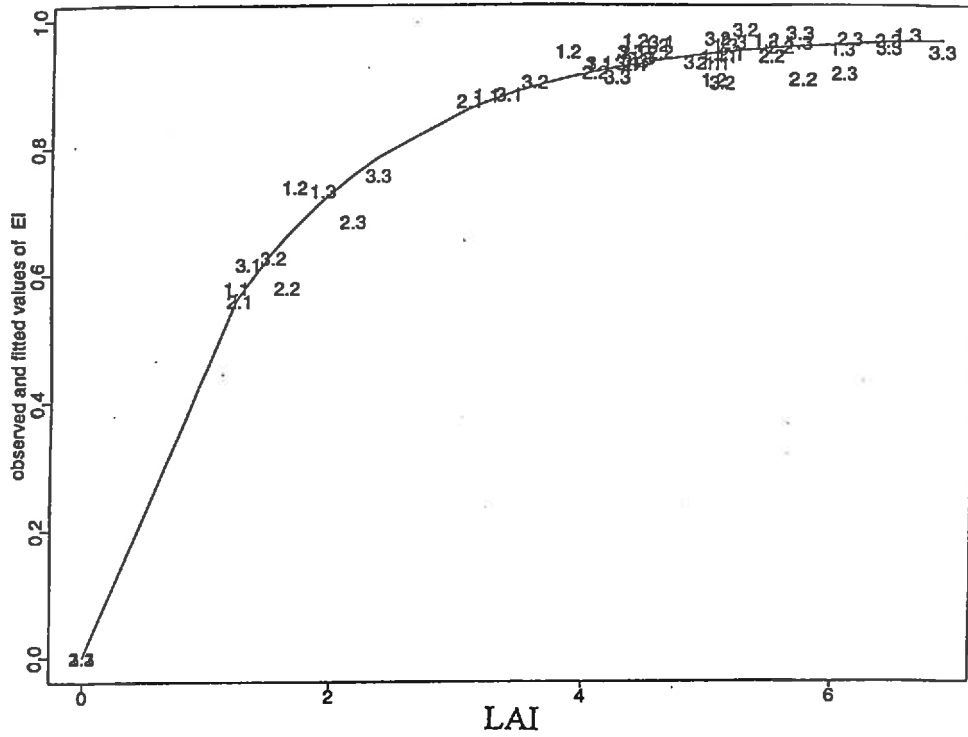


Figure II-2.17. Efficacité d'interception en fonction du LAI sur Soissons, Thésée et Pernel (densités 70, 150 et 350 ; 1996, essai précoce)

- |                      |                       |                     |
|----------------------|-----------------------|---------------------|
| 1.1 : Soissons, 70 ; | 1.2 : Soissons, 150 ; | 1.3 : Soissons, 350 |
| 2.1 : Thésée, 70 ;   | 2.2 : Thésée, 150 ;   | 2.3 : Thésée, 350   |
| 3.1 : Pernel, 70 ;   | 3.2 : Pernel, 150 ;   | 3.3 : Pernel, 350   |

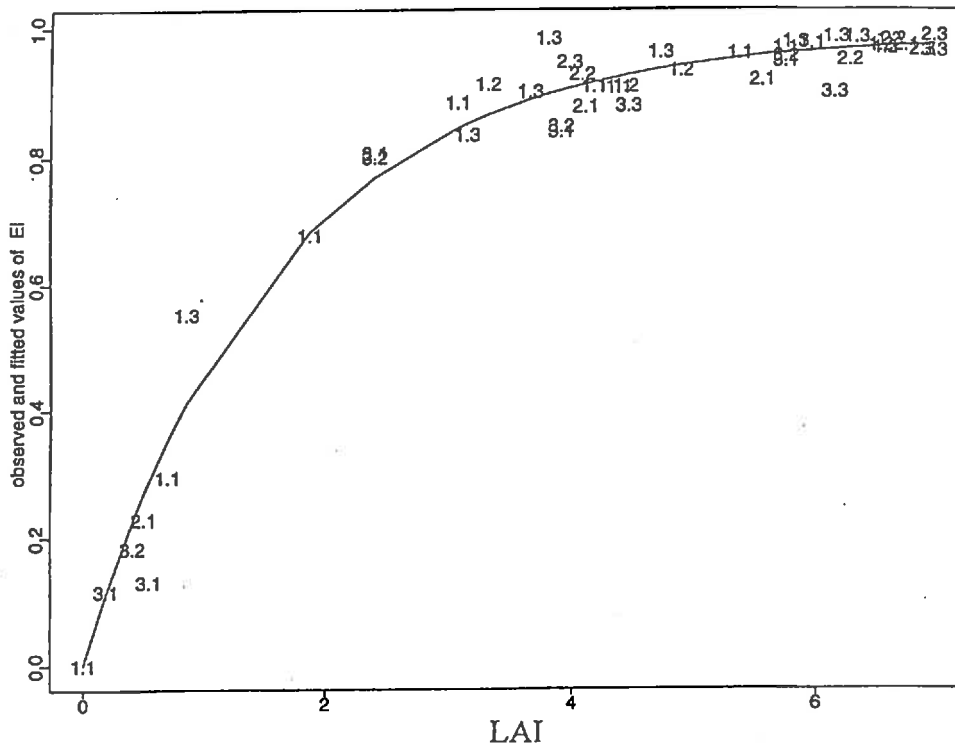


Figure II-2.18. Efficacité d'interception en fonction du LAI sur Soissons, Thésée et Pernel (densités 70, 150 et 350 ; 1995, essai précoce)

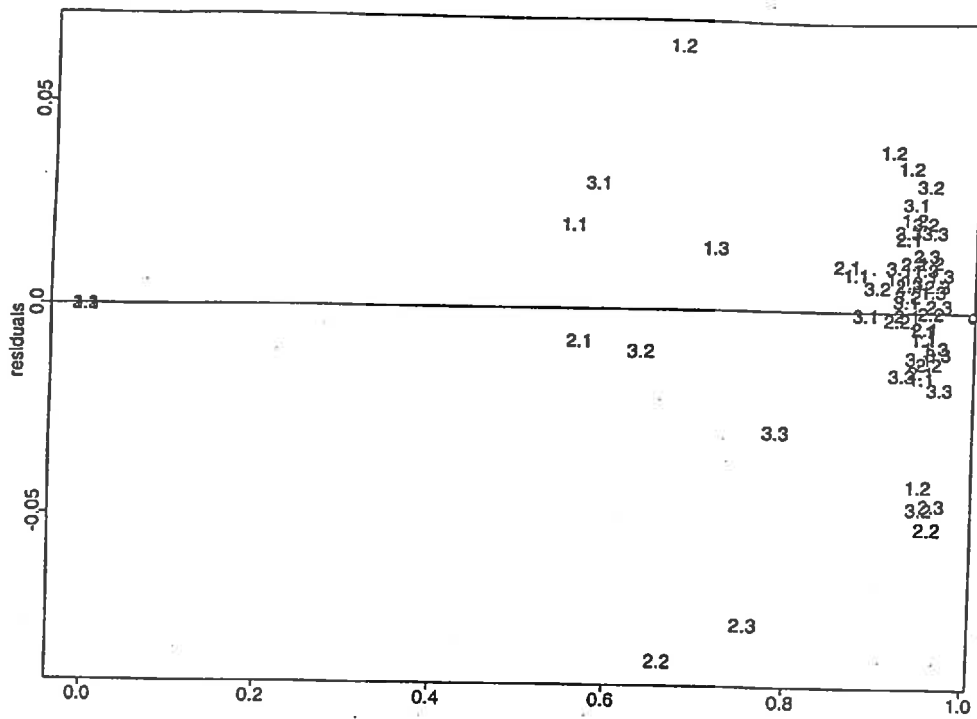


Figure II-2.19. Résidus en fonction des valeurs estimées par la régression de l'efficience d'interception en fonction du LAI (Essai 1996)

- |                      |                       |                     |
|----------------------|-----------------------|---------------------|
| 1.1 : Soissons, 70 ; | 1.2 : Soissons, 150 ; | 1.3 : Soissons, 350 |
| 2.1 : Thésée, 70 ;   | 2.2 : Thésée, 150 ;   | 2.3 : Thésée, 350   |
| 3.1 : Pernel, 70 ;   | 3.2 : Pernel, 150 ;   | 3.3 : Pernel, 350   |

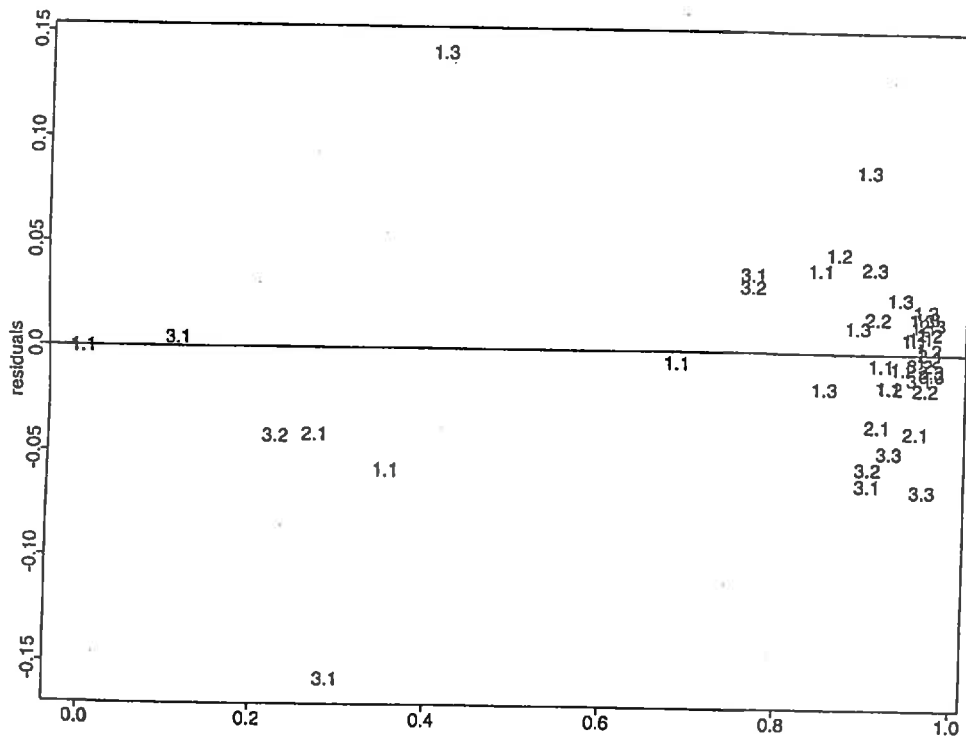


Figure II-2.20. Résidus en fonction des valeurs estimées par la régression de l'efficience d'interception en fonction du LAI (Essai 1995)

### 2.3. Validation du modèle d'interception de la lumière

Avec les paramètres estimés en 1996, nous avons validé l'évolution de l'interception de la lumière sur l'essai de 1995. En gros, le modèle estime bien l'interception de la lumière pour l'ensemble des traitements (*Figure II-2.21*). Cependant pour des LAI  $\leq 1$ , il a tendance à surestimer de 0.1 la lumière interceptée en densité 350 et 150 sur les trois variétés, alors que pour les densités faibles il n'y a pratiquement pas de différence entre le modèle et les données observées.

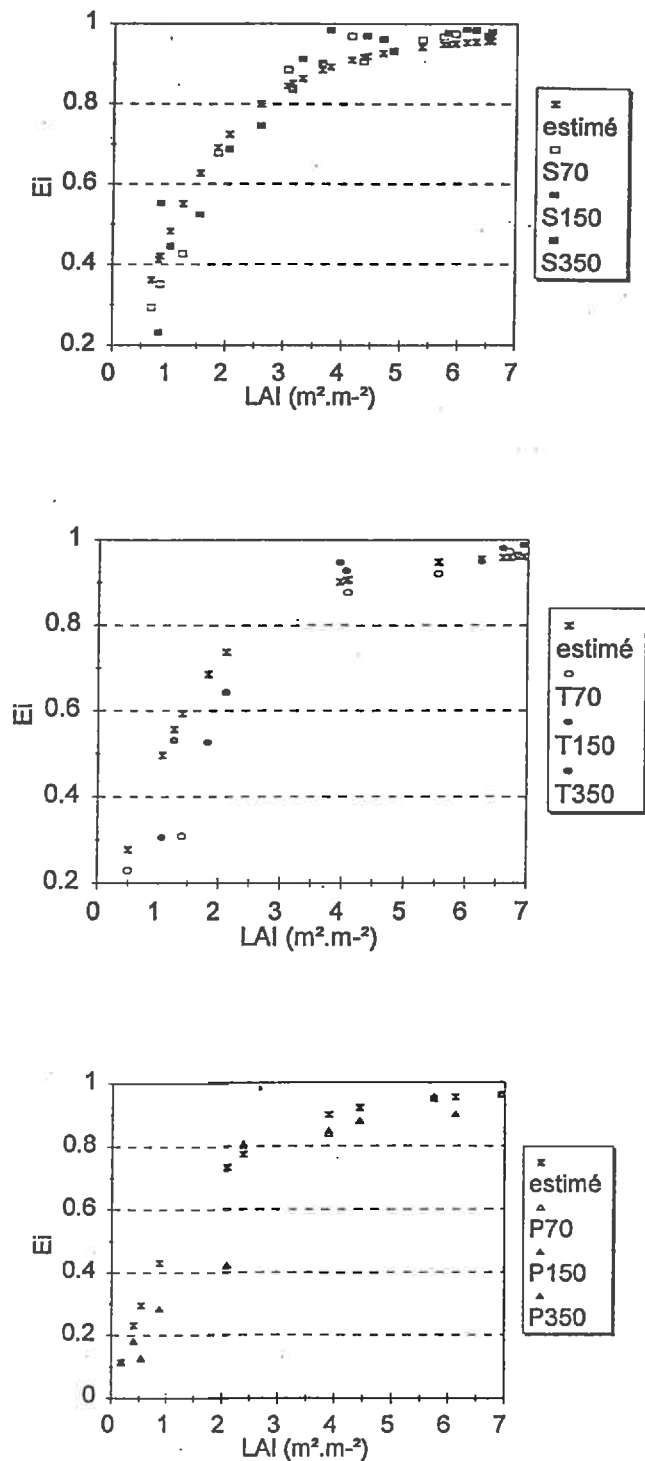


Figure II-2.21. Modélisation de l'interception du rayonnement de l'essai 1995 (Semis précoce sur les trois variétés, densités 70, 150 et 305 p/m<sup>2</sup>)

## 2.4. Discussion partielle

Depuis plus de 15 jours avant le stade "épi 1cm" (Cf. Matériel et Méthodes), jusqu'à l'épiaison, pour les deux années étudiées, aucune différence significative n'est observée pour le coefficient d'extinction  $K$  et l'interception maximale  $\varepsilon_{i \max}$  entre les différentes variétés et densités considérées : l'efficacité d'interception  $\varepsilon_i$  ne dépend que du LAI. Courant montaison, le blé couvre très vite le sol, même pour les peuplements ayant des densités peu élevées, ce qui explique l'atténuation de l'effet de la structure du couvert, très marqué lorsque la culture est hétérogène (cas du blé avant le stade montaison). En conditions non limitantes en azote, les faibles densités ont de grandes capacités à taller, ce qui compense inévitablement le nombre de pieds par  $m^2$  limité. Board & Harville (1992) rapportent que  $K$  est instable seulement pour des LAI  $< 2$ . Nos résultats montrent que même pour des LAI proches de 2 dans le cas des densités faibles, la stabilité des paramètres reste valable.

Les résultats de notre étude ont démontré que pour la période plein tallage, les paramètres  $K$  et  $\varepsilon_{i \max}$  sont stables à travers les différentes gammes de densités et de variétés. Des résultats assez proches sont rapportés, pour la période végétative, par la littérature (Hodges & Kanemasu, 1977 ; Yunusa *et al.*, 1993 ; Kiniry *et al.*, 1989 ; Hipps, 1993 ; Calderini *et al.*, 1997). Par contre, Asrar *et al.* (1984) rapportent que  $K$  est indépendant de la variété, mais varie en fonction de la densité. Probablement existe-t-il une densité-seuil pour laquelle cette constance de  $K$  n'est plus valable. Nous pouvons également expliquer cette constance des paramètres, même pour les densités faibles ( $70 \text{ p.m}^{-2}$ ), par le fait que celles-ci sont obtenues par des semis très réguliers (réalisés au semoir de précision). Or dans les conditions agricoles, la situation est différente. Pour des blés clairs, liés à une battance ou à un gel, l'hétérogénéité du peuplement est souvent importante : zones de densités très variables, trous sur la ligne de semis de taille supérieure à 10 ou 20 cm. Dans ce cas, la constance du paramètre  $K$  est peut-être à remettre en cause. C'est une des limites de ce travail, et la robustesse du modèle dans de telles situations devra être testée.

Dans la limite des conditions de variabilité du peuplement que nous avons étudiées, on peut considérer que le modèle de Beer, qui utilise une valeur unique, reste valide pour différentes variétés et densités. Néanmoins il est important de rappeler que les mesures de rayonnement n'ont débuté qu'une semaine avant le stade "épi 1 cm" ; à ce stade, comme le montrent les *Figures II-2.17 et II-2.18*, les LAI sont tous supérieurs à 0.5 (excepté un seul point en 1995). Or, les observations du couvert de blé peuvent s'opérer à n'importe quelle date - de la sortie de l'hiver jusqu'à la fermeture complète du couvert (début montaison) - ; durant cette période, les LAI peuvent avoir des valeurs inférieures à 0.5. Cependant, la gamme des LAI dans laquelle nous avons estimé les paramètres  $\varepsilon_{i \max}$  et  $K$  exclut pour des raisons météorologiques (voir Matériels et Méthodes) les valeurs inférieures à 0.5. L'utilisation de la valeur de  $K$  pour des LAI inférieurs à 0.5 peut être une source d'erreur pour l'estimation des besoins en azote à la sortie de l'hiver.

Cette gamme des LAI peut également expliquer pourquoi la variété Pernel, au port très étalé (en rosette) par rapport à celui de Soissons et de Thésée, ne présente pas de différence significative pour le paramètre  $K$ . En effet, lorsque nous avons débuté les mesures du PAR intercepté, cette variété était déjà en phase de redressement.

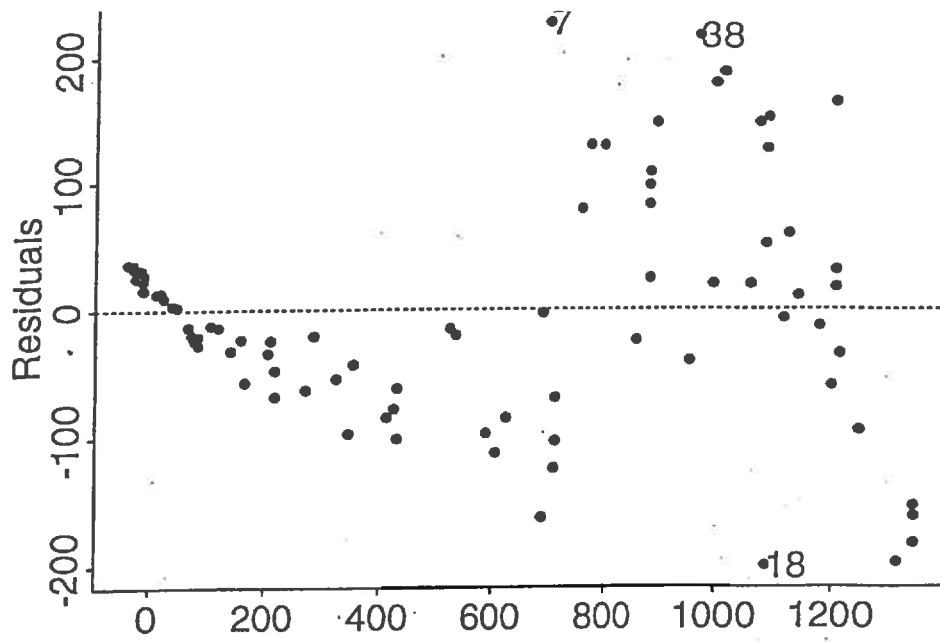


Figure II-2.22. Résidus en fonction des valeurs estimées par la régression linéaire de la biomasse en fonction du rayonnement intercepté sur l'ensemble du cycle (Essai 1996)

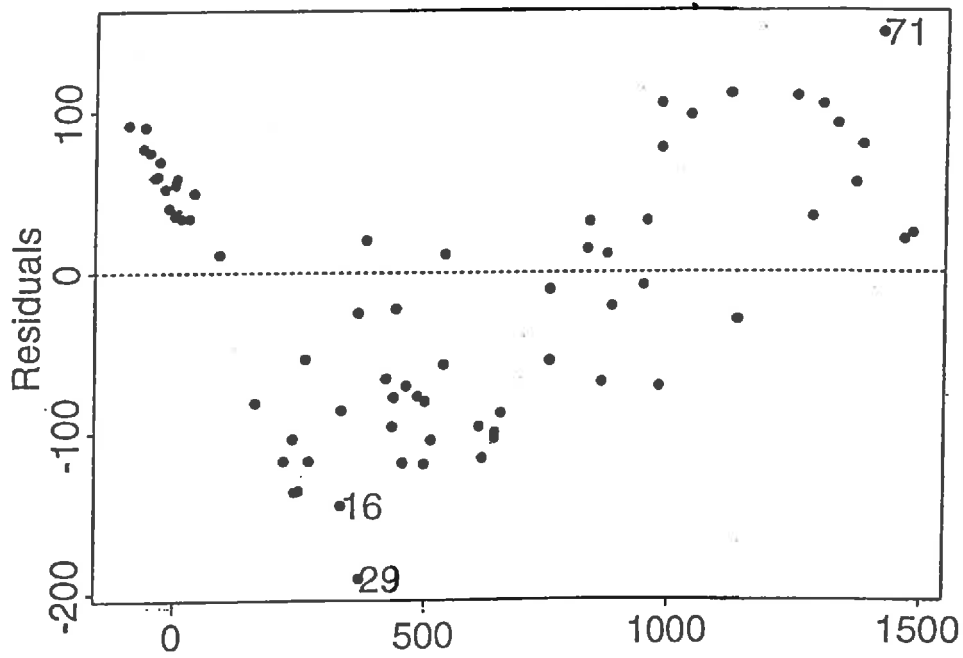


Figure II-2.23. Résidus en fonction des valeurs estimées par la régression linéaire de la biomasse en fonction du rayonnement intercepté sur l'ensemble du cycle (Essai 1995)



### 3/ MODÉLISATION DE LA CONVERSION DU "PAR" EN BIOMASSE

#### 3.1. Estimation de la valeur du coefficient de conversion du PAR en biomasse ( $\epsilon_b$ )

À partir de la connaissance du  $PAR_{intercepté}$  et de la biomasse aérienne, on peut déterminer le coefficient de conversion biologique du modèle de Monteith. Le coefficient  $\epsilon_b$  est obtenu par ajustement linéaire entre la biomasse accumulée en  $g.m^2$  et le  $PAR_{intercepté}$  en  $MJ.m^2$  cumulé. Il est exprimé en grammes de matière sèche par MJ intercepté.

Sur chaque année, nous avons réalisé la régression linéaire entre la biomasse et le  $PAR_{intercepté}$  ; pour la période sortie hiver-floraison, cet ajustement conduit à une mauvaise répartition des résidus (*Figures II-2.22 et II-2.23*). En effet, sur ces figures les résidus dessinent une structure autour de la droite 0, le modèle ne vérifie pas le postulat de répartition aléatoire et de normalité des résidus. Le modèle n'est pas valide (*Figure II-2.24*). Plenet (1995), sur le maïs, montre que  $\epsilon_b$  varie au cours du cycle ; cette variation est d'autant plus marquée que l'intervalle de temps sur lequel est fait le calcul de  $\epsilon_b$  est court. Afin d'améliorer la qualité du modèle, et de prendre en compte les variations les plus importantes de  $\epsilon_b$  selon les phases du cycle du blé, nous avons procédé à des ajustements sur deux phases principales :

- sortie hiver - début montaison;
- début montaison - floraison.

La relation entre la biomasse et le  $PAR_{intercepté}$  est de type linéaire (*Figure II-2.25*), et la division du cycle en deux périodes a permis d'améliorer la répartition des résidus.

Pour analyser la variation de  $\epsilon_b$  en fonction des techniques culturales, les ajustements sont faits sur l'ensemble des traitements, variétés et densités confondus.

L'ensemble des valeurs de  $\epsilon_b$  est résumé dans le *Tableau II-2.6*.

*Tableau II-2.26. Valeurs estimées du paramètre  $\epsilon_b$  pour les essais 1995 et 1996*

Période	Paramètre	1995	1996
Cycle	$\epsilon_b$	2.77	2.47
	$R^2$	0.97	0.96
Sortie hiver- "épi 1cm"	$\epsilon_b$	1.00	1.56
	$R^2$	0.93	0.98
"Epi 1 cm" - épiaison	$\epsilon_b$	2.88	2.49
	$R^2$	0.97	0.98

Les valeurs de  $\epsilon_b$  sont plus élevées durant la phase "épi 1 cm" - épiaison, que pour l'ensemble du cycle, ce qui pourrait être attribué à l'influence exercée par les faibles valeurs de  $\epsilon_b$  durant la phase d'installation du couvert, dont les valeurs avoisinent 1. On remarque également qu'il y a une différence (mais non significative à 5 %) des valeurs de  $\epsilon_b$  entre les deux années.

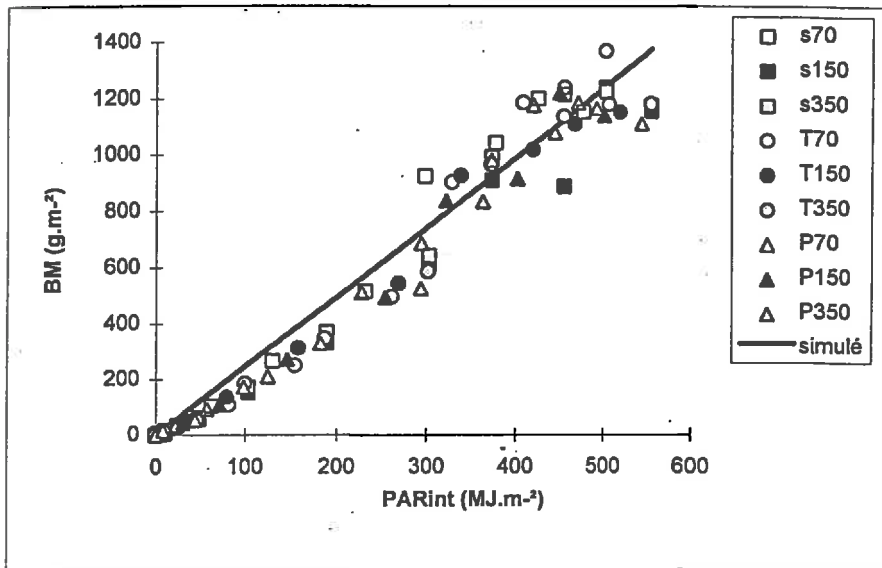


Figure II-2.24. Modélisation de la biomasse en utilisant une valeur unique sur l'ensemble du cycle de l'efficacité de conversion du PAR intercepté sur les trois variétés et les trois densités (Essai 1996)

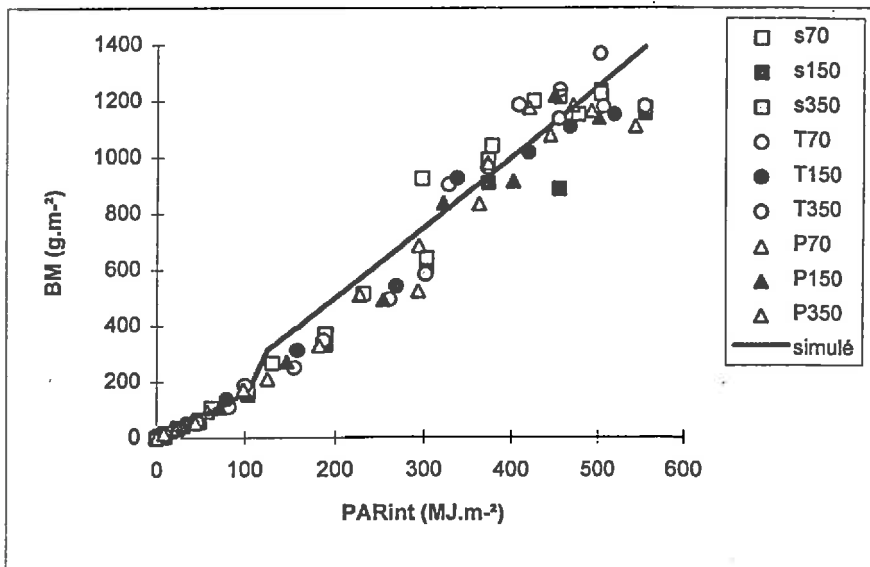


Figure II-2.25. Modélisation de la biomasse en utilisant des valeurs de l'efficacité de conversion du PAR intercepté sur les trois variétés et les trois densités (Essai 1996)

L'analyse de variance montre que pour les deux années, et pour chaque période considérée, les valeurs de  $\varepsilon_b$  ne diffèrent pas significativement entre les variétés et les densités dans la gamme de variétés et de densités étudiées.

### 3.2. Validation de $\varepsilon_b$ sur les peuplements de 1995

Pour tester l'influence, sur l'estimation de la biomasse, des différences interannuelles de valeur de  $\varepsilon_b$ , nous avons estimé la biomasse des peuplements de 1995 à l'aide du paramètre  $\varepsilon_b$  de 1996. L'observation des *Figures II-2.26 et II-2.27* confirme l'intérêt de distinguer les pentes avant et après "épi 1 cm" (PAR interceptés < 100). Pour la première période (sortie hiver - "épi 1 cm"), la différence entre les simulés et les observés n'est pas très importante. Sur la phase "épi 1 cm" - floraison, la simulation reste correcte jusqu'au stade épiaison (2-3 noeuds)(PAR intercepté = 300), pour tous les traitements. Par contre à partir de cette date, correspondant à la phase épiaison-floraison, le modèle sous-estime la biomasse sur tous les traitements, avec une différence moyenne de 200 g.m<sup>2</sup>. Les résultats de la validation montrent que l'unicité du paramètre  $\varepsilon_b$ , quelles que soient la variété et la densité, n'est pas remise en cause. Mais la courbe des simulations de la biomasse se positionne au-dessous de l'ensemble des points représentant les divers traitements.

### 3.3. Discussion partielle

#### 3.3.1. Variation du coefficient de conversion de la lumière en biomasse au cours du cycle

D'après nos résultats  $\varepsilon_b$  prend différentes valeurs au cours du cycle : sortie hiver - "épi 1 cm", "épi 1 cm" - floraison, ce qui correspond aux travaux de plusieurs auteurs qui s'accordent sur l'existence de la variation de  $\varepsilon_b$  au cours du cycle du blé (Garcia *et al.*, 1988 ; Steinmetz *et al.*, 1990 ; Girard, 1997) et, dans le cas d'autres espèces comme le maïs (Tollenaar & Bruulsema, 1988 ; Giauffret, 1991 ; Plenet, 1995). Dans les conditions de croissance non limitantes, c'est le changement de température au cours du cycle qui est le plus souvent cité comme cause de la variation de  $\varepsilon_b$  entre les différentes périodes de la culture (Garcia *et al.*, 1988 ; Steinmetz *et al.*, 1990). La variabilité de  $\varepsilon_b$  au cours du cycle peut être également attribuée aux erreurs de mesure de la biomasse et du PAR intercepté. Mais celle-ci est minime par comparaison avec les variations de  $\varepsilon_b$  dues à l'élévation des températures au cours du cycle.

Durant la première période du cycle (sortie hiver - "épi 1 cm"), la comparaison graphique des biomasses simulées avec une valeur de unique de  $\varepsilon_b$  pour tout le cycle ( $\varepsilon_b = 2.47$ ), et des biomasses observées ne montre pas de différence très importante entre les biomasses : elles sont inférieures à 50 g.m<sup>2</sup>. Etant donné ce résultat, on est tenté d'estimer la biomasse aérienne avec une seule valeur du paramètre  $\varepsilon_b$  pour tout le cycle, dans l'objectif de simplifier la modélisation des besoins en azote. Mais, durant cette période, la biomasse cumulée est faible (inférieure à 200 g.m<sup>2</sup>), et une erreur d'estimation de l'ordre de 50 g.m<sup>2</sup> pourrait causer des erreurs importantes dans l'évaluation des besoins en azote. Seule une étude de sensibilité du modèle global d'estimation des besoins en azote à la variation de  $\varepsilon_b$  peut nous permettre de confirmer s'il est possible d'utiliser une valeur unique de  $\varepsilon_b$ .

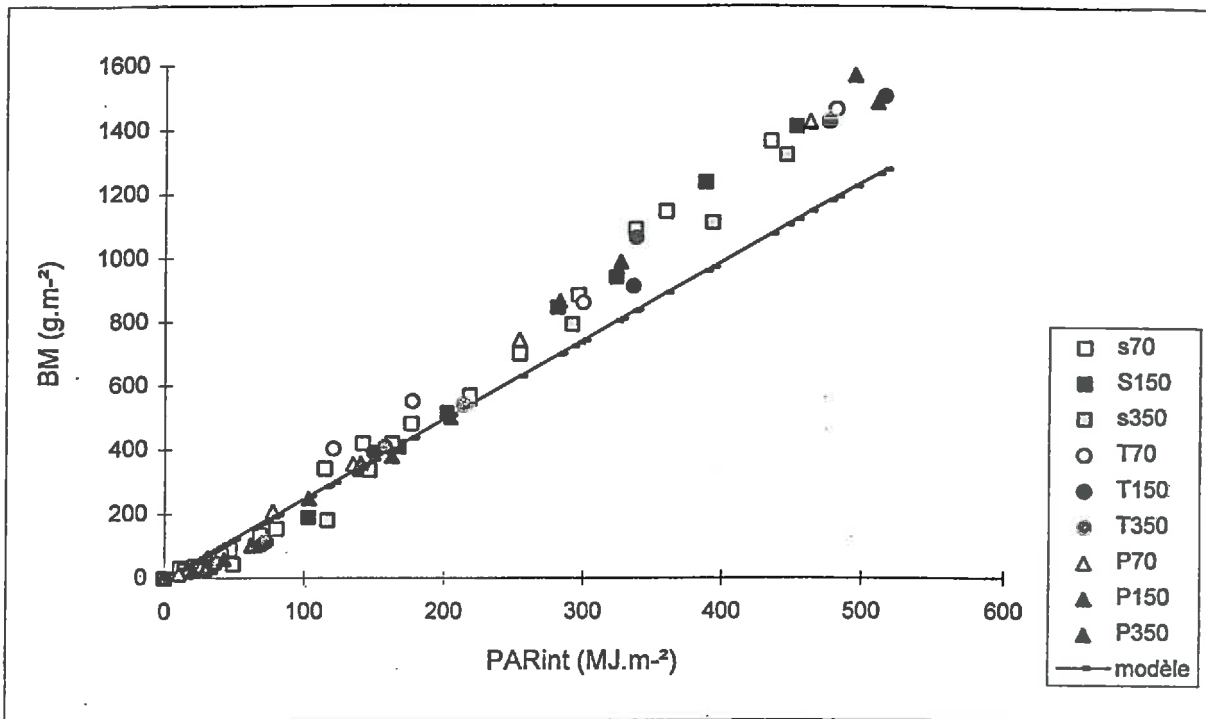


Figure II-2.26. Validation du modèle d'estimation de la biomasse sur l'essai 1995 en utilisant le paramètre  $\epsilon_b$  estimé en 1996 (Valeur unique de  $\epsilon_b$  pour tout le cycle)

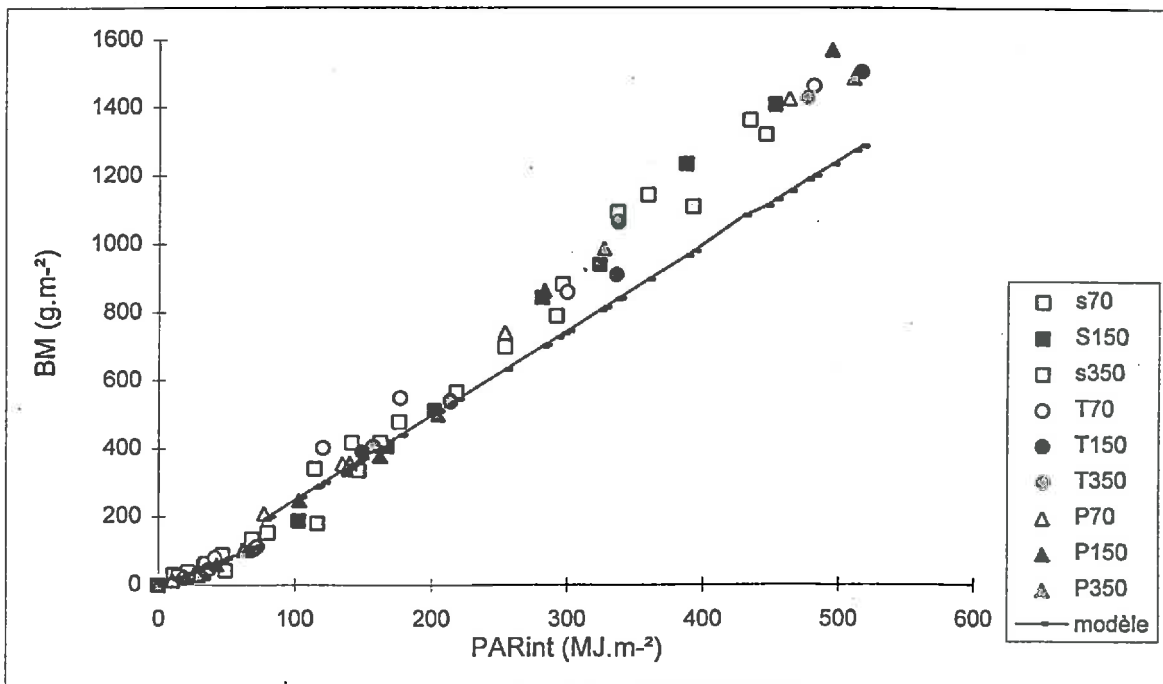


Figure II-2.27. Validation du modèle d'estimation de la biomasse sur l'essai 1995 en utilisant le paramètre  $\epsilon_b$  estimé en 1996 (Valeurs différentes de  $\epsilon_b$  par stade)

### 3.3.2. Variations de la valeur du coefficient de conversion de la lumière en biomasse entre années

La gamme des valeurs de  $\epsilon_b$  pour le blé, citée par la bibliographie, est très large. Elle varie de 1.8 à 3.82 (Biscoe *et al.*, 1977 ; Monteith, 1977 ; Aase, 1978 ; Staper *et al.*, 1980 ; Gallagher *et al.*, 1978 ; Gosse *et al.*, 1986 ; Howell *et al.*, 1985, in Kiniry *et al.*, 1989 ; Steinmetz *et al.*, 1990). Nos résultats s'insèrent bien dans cette gamme. Pour une période déterminée du cycle, les différences des valeurs de  $\epsilon_b$  observées entre années peuvent être liées à des différences, non identifiées, de conditions de milieu, mais peut-être en partie également dues aux changements des techniques d'acquisition du PAR (Gallo *et al.*, 1993). En effet, entre les deux années d'essais, nous avons changé le protocole de mesure du PAR intercepté. En 1996, le PAR intercepté et la biomasse ont été mesurés sur des placettes identiques, contrairement à 1995, ce qui pourrait être à l'origine d'une différence entre la biomasse formée et le rayonnement réellement intercepté. Ces raisons conduisent à un élargissement de l'intervalle des valeurs de  $\epsilon_b$  qui rend difficile la comparaison entre elles.

### 3.3.3. Stabilité de la valeur du coefficient de conversion de la lumière en biomasse selon les techniques culturales

Sur les deux périodes du cycle définies, les coefficients de conversion du PAR intercepté en biomasse ( $\epsilon_b$ ) sont indépendants de la variation des variétés et des densités. Des résultats similaires pour l'ensemble du cycle ou pour certaines phases sont donnés par Garcia *et al.* (1988), Calderini (1997), Hipps *et al.* (1983), Green (1987).

Plusieurs études sur d'autres espèces rapportent que, pour un stade considéré,  $\epsilon_b$  est constant, et indépendant du génotype, de la densité de peuplement et de la date de semis. Sur la culture de maïs, des résultats similaires sont obtenus par Dorvillez *et al.* (1990), qui ne trouvent aucune différence de  $\epsilon_b$  entre variétés et densités ; Giauffret (1991), Gallo *et al.* (1985) n'observent pas d'effet densité sur  $\epsilon_b$ . Sur sorgho, Rosenthal (1993) trouve que le  $\epsilon_b$  est stable entre les dates de semis, les densités et les cultivars (Howell *et al.*, 1985). Néanmoins, d'autres auteurs contredisent ces résultats : sur maïs, Tollenaar & Bruulsema (1988) trouvent que  $\epsilon_b$  est affecté par la densité.

### 3.4. Conclusion partielle sur la modélisation de la biomasse potentielle

*Le modèle de croissance intègre trois modèles :*

⇒ *Le modèle d'évolution du LAI*

*Ce modèle permet d'estimer le LAI à partir de la mesure du LAI<sub>SH</sub> et de X<sub>observé</sub> :*

*À des dates d'observation du peuplement de blé très précoces, stade plein tallage, l'évolution du LAI en début de croissance (aux alentours du stade "épi 1cm", c'est-à-dire début de la phase ascendante sur la courbe) est bien estimée, mais l'évolution ultérieure peut être très mal prévue, en particulier en raison d'erreurs sur le LAI épiaison.*

*À des dates d'observation du peuplement de blé proches du stade "épi 1 cm", la phase de pleine croissance jusqu'à la floraison est nettement mieux simulée. Ainsi, à partir de deux dates d'observation du LAI<sub>SH</sub>, le modèle est capable de modéliser le LAI sur l'ensemble du cycle végétatif.*

⇒ *Le modèle d'interception du PAR*

*La modélisation de l'efficacité d'interception du PAR dépend uniquement du LAI. Les paramètres  $K$  et  $\varepsilon_{i \max}$  sont constants à travers la variété et la densité. Nos résultats sont valables pour la période végétative allant du stade plein tallage à la floraison.*

⇒ *La modélisation de l'efficacité de conversion du PAR en biomasse*

*Pour la phase végétative, les résultats conduisent à deux coefficients de conversion  $\varepsilon_b$ , sur deux périodes du cycle : levée - stade "épi 1 cm" et stade "épi 1 cm" - floraison. Dans chaque phase, le  $\varepsilon_b$  est stable à travers les variétés et les densités.*

*Par la connaissance du LAI<sub>SH</sub>, des températures et du rayonnement incident, le modèle de croissance permet d'estimer la biomasse à tout instant du cycle, du stade plein tallage jusqu'à la floraison.*

*À partir de la connaissance de l'évolution de la biomasse potentielle, le modèle de dilution permet d'estimer la dynamique des besoins en azote en fonction de la biomasse réellement mise en place sur la parcelle.*

## **CHAPITRE 3.**

### **ÉLÉMENTS DE VALIDATION ET ANALYSE DE SENSIBILITÉ DU MODÈLE DE PRÉDICTION DES BESOINS EN AZOTE**

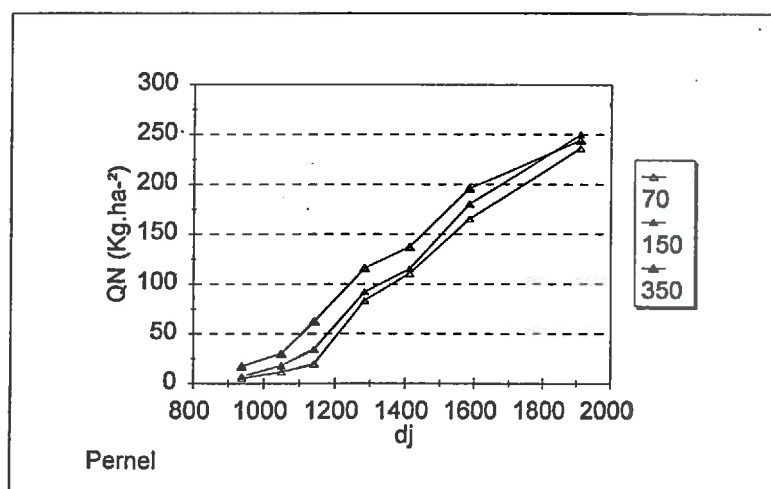
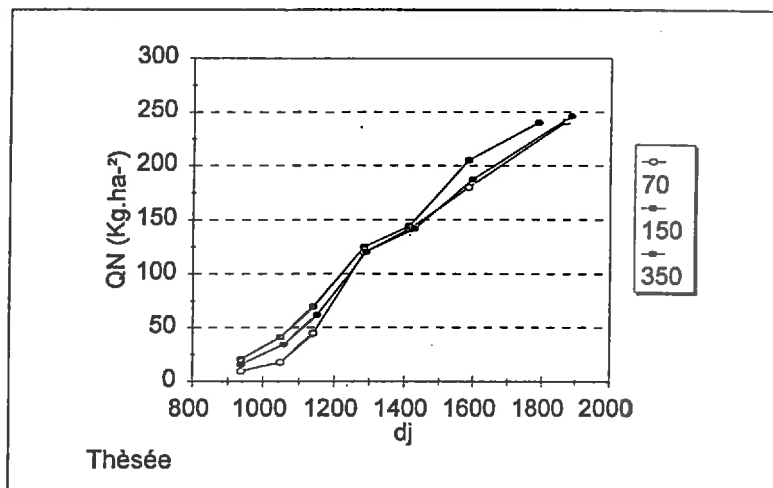
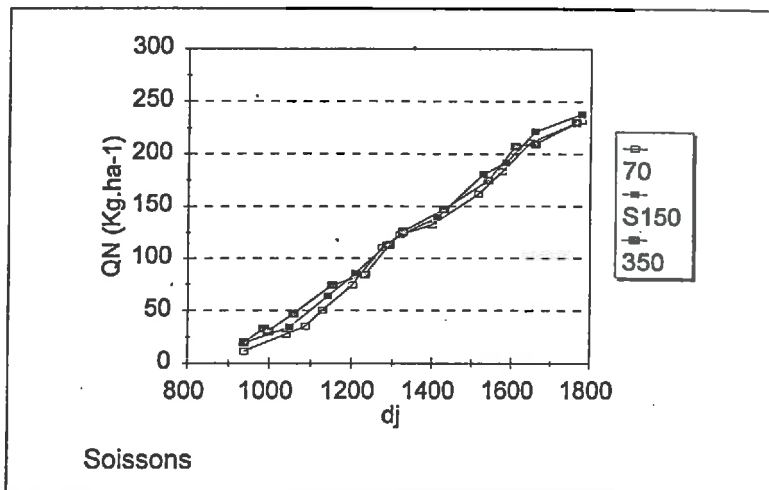


Figure II-3.1. Comparaison de la cinétique des besoins en azote (Trois densités : 70, 150 et 350 p/m<sup>2</sup> pour chaque variété ; semis précoce)



## Introduction

Dans cette partie, nous étudions la sensibilité du modèle d'estimation des besoins en azote :

- a) à la variation des dates d'observation du peuplement de blé (différents moments du cycle de la sortie de l'hiver jusqu'au stade début montaison) ;
- b) à la variation du paramètre  $\varepsilon_b$ .

## 1/ COURBES DE RÉFÉRENCE

### 1.1. Estimation des besoins en azote à partir des données observées sur les peuplements 1995

Les besoins en azote (QN) sont estimés par le modèle de Justes *et al.* (1994), représenté par l'Équation 17, et la connaissance de la biomasse aérienne. Les dynamiques des besoins en azote, estimées à partir des données des biomasses mesurées en 1995, serviront de courbes de référence pour valider les simulations par le modèle pour les différents traitements étudiés.

L'analyse des graphiques, représentant l'évolution des QN au cours du cycle jusqu'à la floraison (Figure II-3.1), montre qu'en semis précoce, les besoins en azote des variétés Soissons et Thésée ne sont pas différents entre les trois densités, sauf en début du cycle (somme de degrés-jours inférieure à 1200), où les écarts des QN entre les 70 et les 350 sont de l'ordre de 20 kg. Par contre, Pernel (Figure II-3.1) a des QN variés, notamment entre les densités 70 et 350 p.m<sup>2</sup>. Ces différences de QN ont tendance à s'estomper lorsqu'on se rapproche de la floraison (somme de degrés-jours supérieure à 1800 selon les densités). En semis tardif, sur les trois variétés, les besoins en azote diffèrent selon les densités (Annexe II-3.1). Sur Soissons, les écarts entre les densités 70 et 350 sont de l'ordre de 50 kg/ha. Sur les mêmes figures on remarque que, pour toutes les variétés étudiées, les QN de la densité 150 restent intermédiaires.

À densités identiques, la comparaison des QN des trois variétés (Annexe II-3.2) montre qu'en faibles densités (70 et 150 p.m<sup>2</sup>), Pernel a des besoins plus faibles que Soissons et Thésée ; mais en 350, les QN sont pratiquement identiques. Des résultats similaires sont obtenus lorsque nous comparons les QN d'une même densité et variété entre les deux dates de semis. En densités faibles, les semis précoces ont des besoins plus élevés que les semis tardifs. Par contre, en densité élevée, les QN sont identiques (Figure II-3.2).

### 1.2. Choix des traitements

Nous nous sommes appuyée sur ces résultats pour le choix des traitements pour les simulations des besoins en azote à partir de la connaissance du LAI<sub>SH</sub>. Nous avons donc choisi :

- *Les variétés Soissons et Pernel*

Pernel, parce qu'elle est la seule qui présente des QN variables en fonction des densités simultanément en semis précoce et tardif ; Soissons, parce qu'elle représente un nombre important de données observées tout au long du cycle, notamment de la sortie de l'hiver jusqu'au début montaison. Ce qui nous permet de faire plusieurs simulations pour différentes dates d'observation pendant cette période.

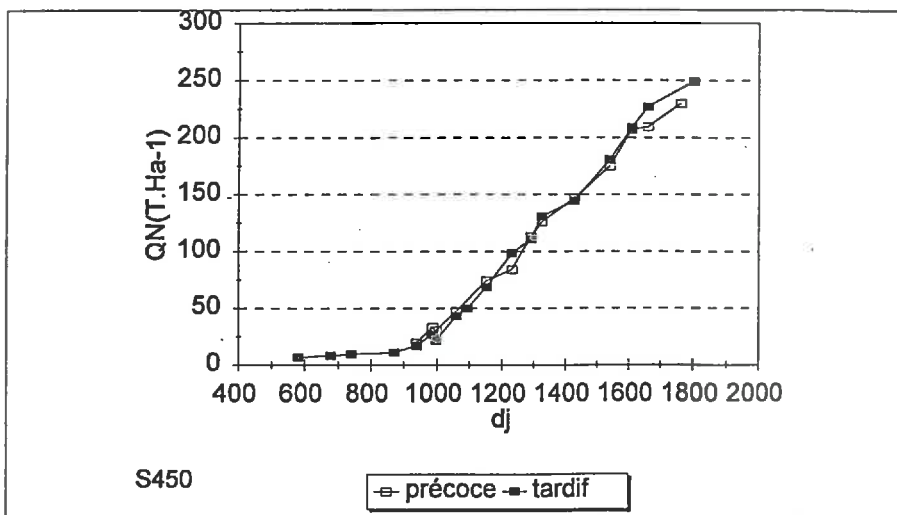
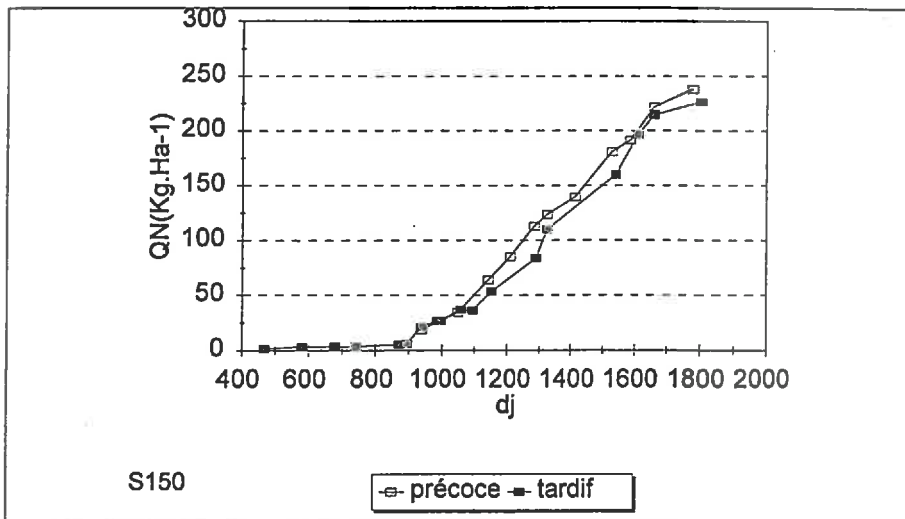
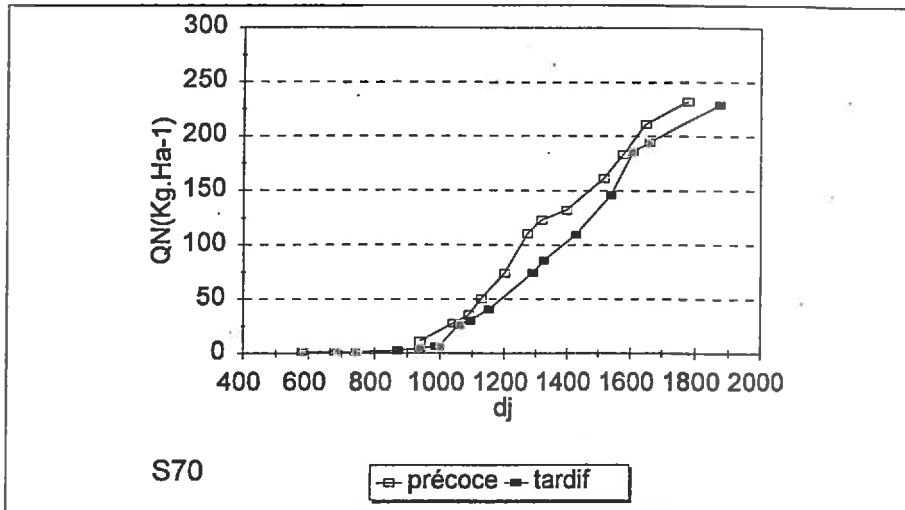


Figure II-3.2. Cinétique des besoins en azote.  
(Variété Soissons ; densités 70, 150, 450 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce et tardif)

- **Les densités 70, 150 et 350**

Les deux premières étant représentatives des blés clairs (ce qui est un point important de notre thèse), nous avons préféré faire plus de simulations d'estimation des besoins en azote dans les basses densités. La variabilité de QN entre les densités 70 et 150 n'étant pas importante, nous avons aussi étudié les densités élevées, ce qui nous permettra également de contrôler si le modèle peut estimer les QN de peuplements de blé dans une parcelle de densité hétérogène (c'est-à-dire à faibles et fortes densités).

- **Les semis précoce et tardif**

L'utilisation des deux dates de semis permet aussi d'élargir la gamme plus large des conditions de croissance et de développement. On étudiera la variété Pernel en semis précoce et tardif.

## **2/ SENSIBILITÉ DU MODÈLE À LA VARIATION DES DATES D'OBSERVATIONS ( $X_{SH}$ )**

### **2.1. Démarche adoptée pour les simulation de la dynamique des besoins en azote**

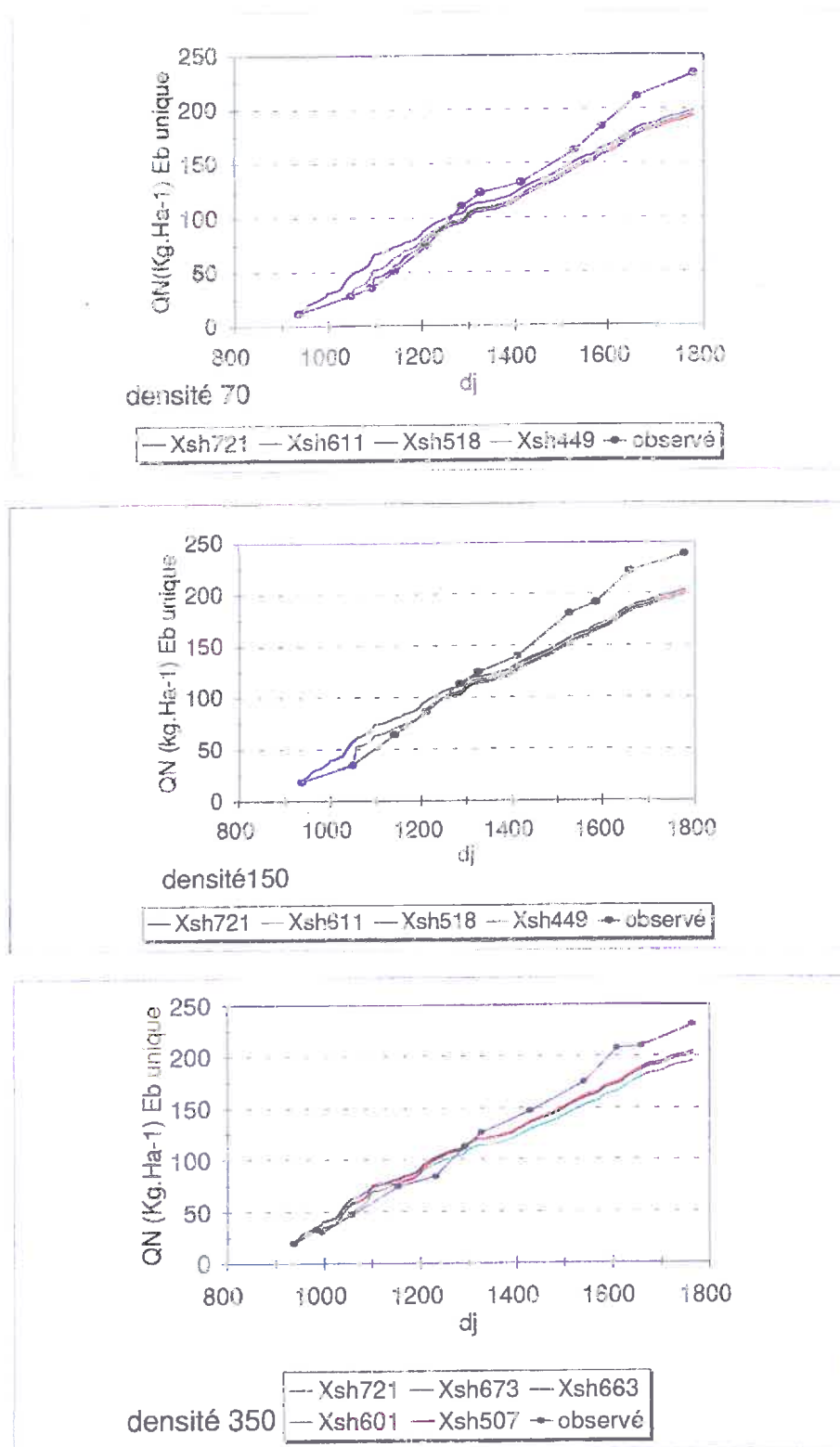
La démarche consiste à simuler l'évolution de l'indice foliaire, par le modèle LAI, à différentes dates d'observations ( $X_{SH}$ ) de la sortie hiver jusqu'au stade début montaison. Les simulations des dynamiques des indices foliaires seront introduites dans le modèle de Beer, pour estimer l'évolution journalière de l'interception de la lumière. Le modèle de Monteith permet d'estimer la biomasse correspondante produite. Le cumul de cette biomasse est utilisé pour estimer la dynamique des besoins en azote journaliers des différents peuplements de blé considérés. Tous les paramètres adoptés dans ces simulations sont issus des résultats de l'année 1996. Les données climatiques et les couples  $X_{SH}$ ,  $LAI_{SH}$  utilisés sont ceux de 1995. Comme les simulations sont toutes réalisées à des dates ultérieures à la levée et pour tenir compte des biomasses produites antérieurement à la date d'observation  $X_{SH}$ , nous avons ajouté pour chaque simulation de biomasse la valeur de la biomasse mesurée pour la date antérieure à la date d'observation. Selon Aase (1978, cité dans Meynard, 1985), il existe une relation linéaire entre les biomasses et les indices foliaires avant le stade début montaison.

### **2.2. Simulation des besoins en azote**

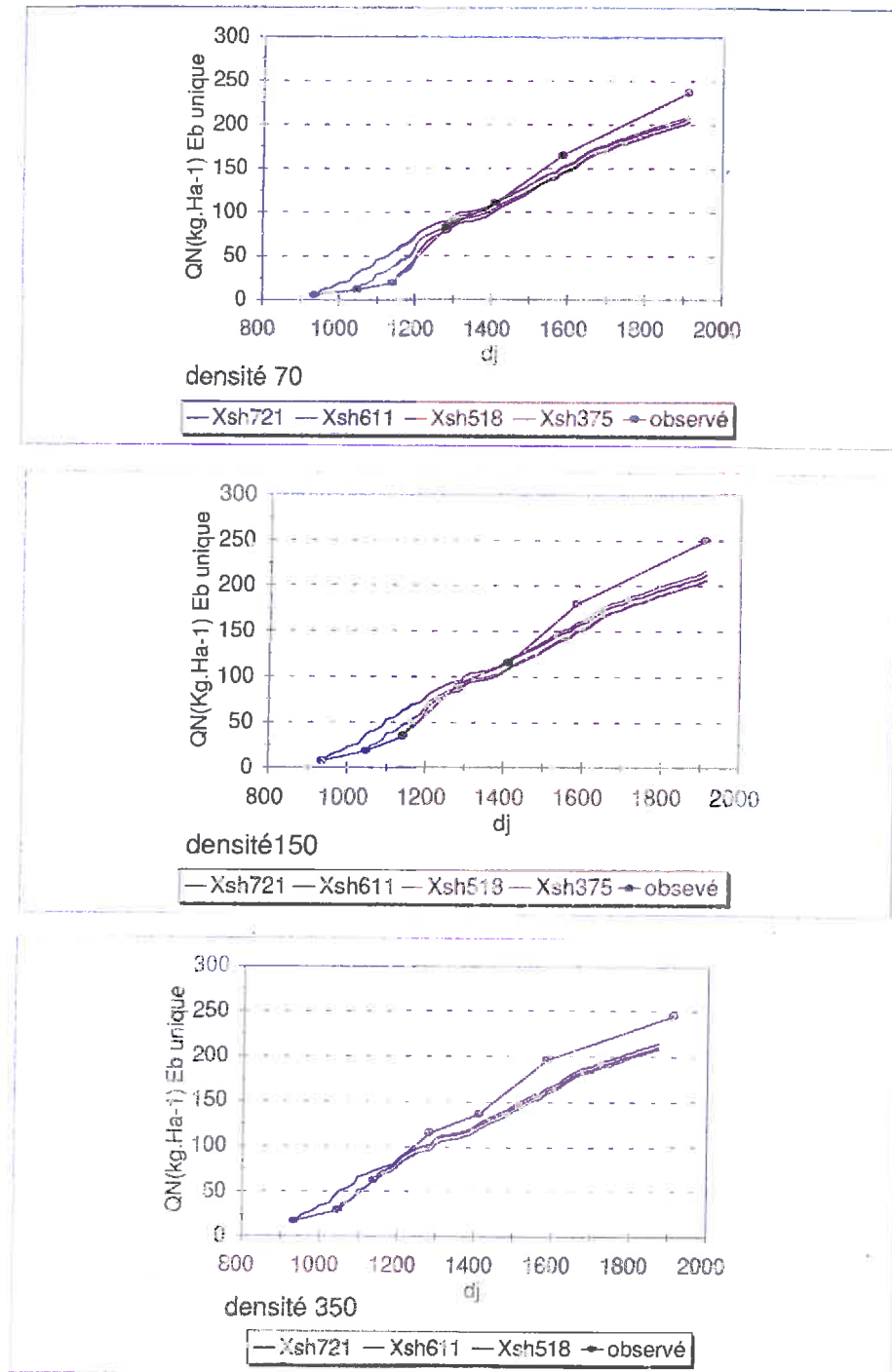
Nous avons montré dans le paragraphe 1.6 (chapitre 2 de la troisième partie) que la dynamique simulée du LAI était dépendante, en partie, de la date d'observation du blé. Dans cette analyse, nous étudions la sensibilité du modèle à cette date d'observation.

Nous avons montré dans le § 3.1 (chapitre 2 de la troisième partie) que le paramètre  $\epsilon_b$  du modèle d'estimation de la biomasse variait au cours du cycle de la culture. Pour analyser la sensibilité du modèle à la variation de  $\epsilon_b$  nous avons estimé la biomasse, d'une part avec une valeur constante du paramètre  $\epsilon_b$  pour tout le cycle, d'autre part avec des valeurs différentes selon les stades.

Les dates d'observations ( $X_{SH}$ ) retenues varient dans la même gamme que celles utilisées dans la validation du modèle (Tableau II-2.4).



**Fig. II-3.3. Modélisation de la cinétique des besoins en azote à différentes dates d'observation ( $X_{Stt}$ ), en utilisant une valeur unique de l'efficacité de conversion ( $\epsilon_b$ ) pour tout le cycle (Variété Soissons ; densités 70, 150 et 350 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce)**



**Fig. II-3.4. Modélisation de la cinétique des besoins en azote à différentes dates d'observation ( $X_{SH}$ ), en utilisant une valeur unique de l'efficacité de conversion ( $\epsilon_b$ ) pour tout le cycle (Variété Pernel ; densités 70, 150 et 350 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce)**

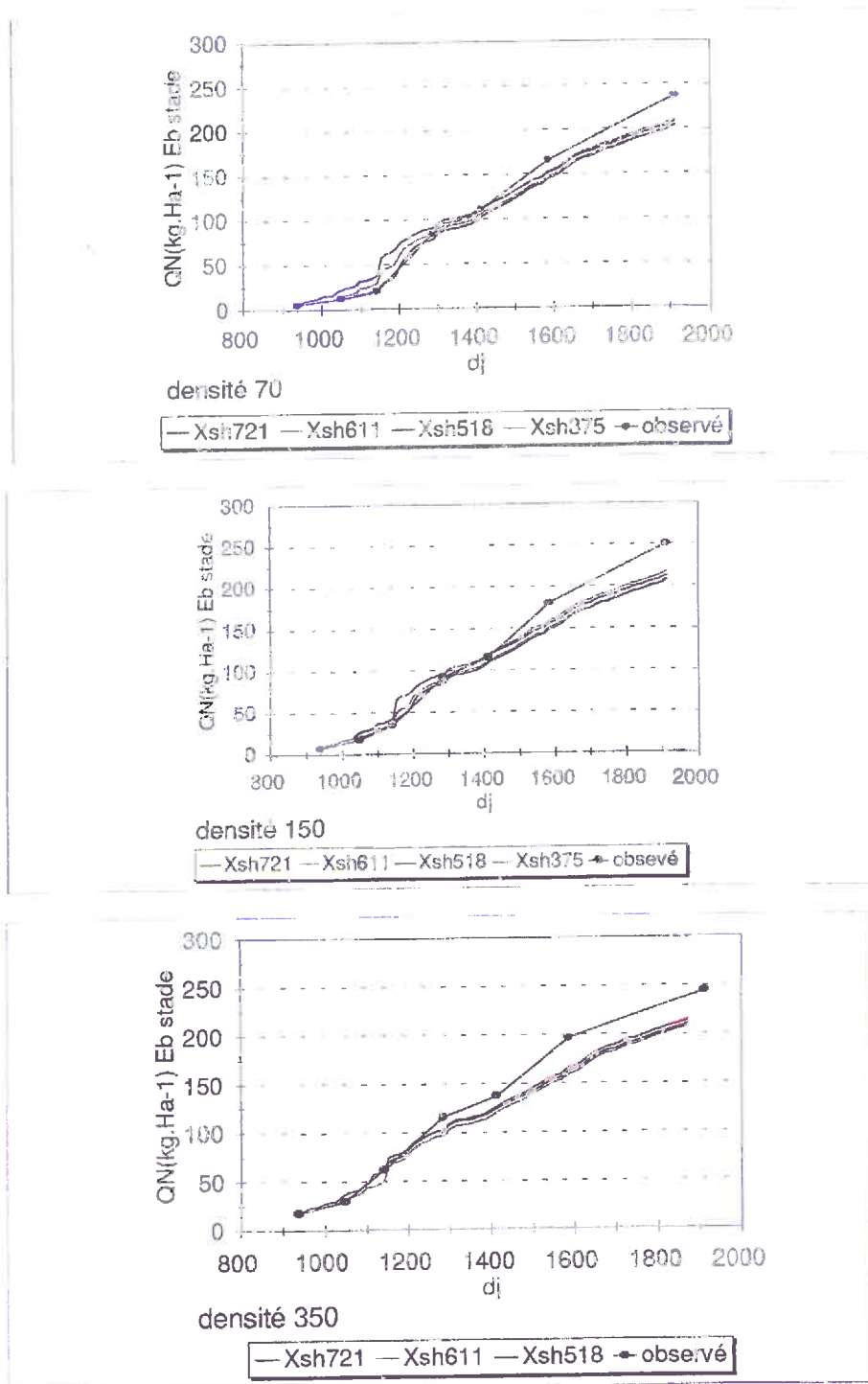


Fig. II-3.5. Modélisation de la cinétique des besoins en azote à différentes dates d'observation ( $X_{SH}$ ), en utilisant une valeur unique de l'efficacité de conversion ( $\epsilon_b$ ) estimée pour chaque stade (Variété Pernel ; densités 70, 150 et 350 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce)

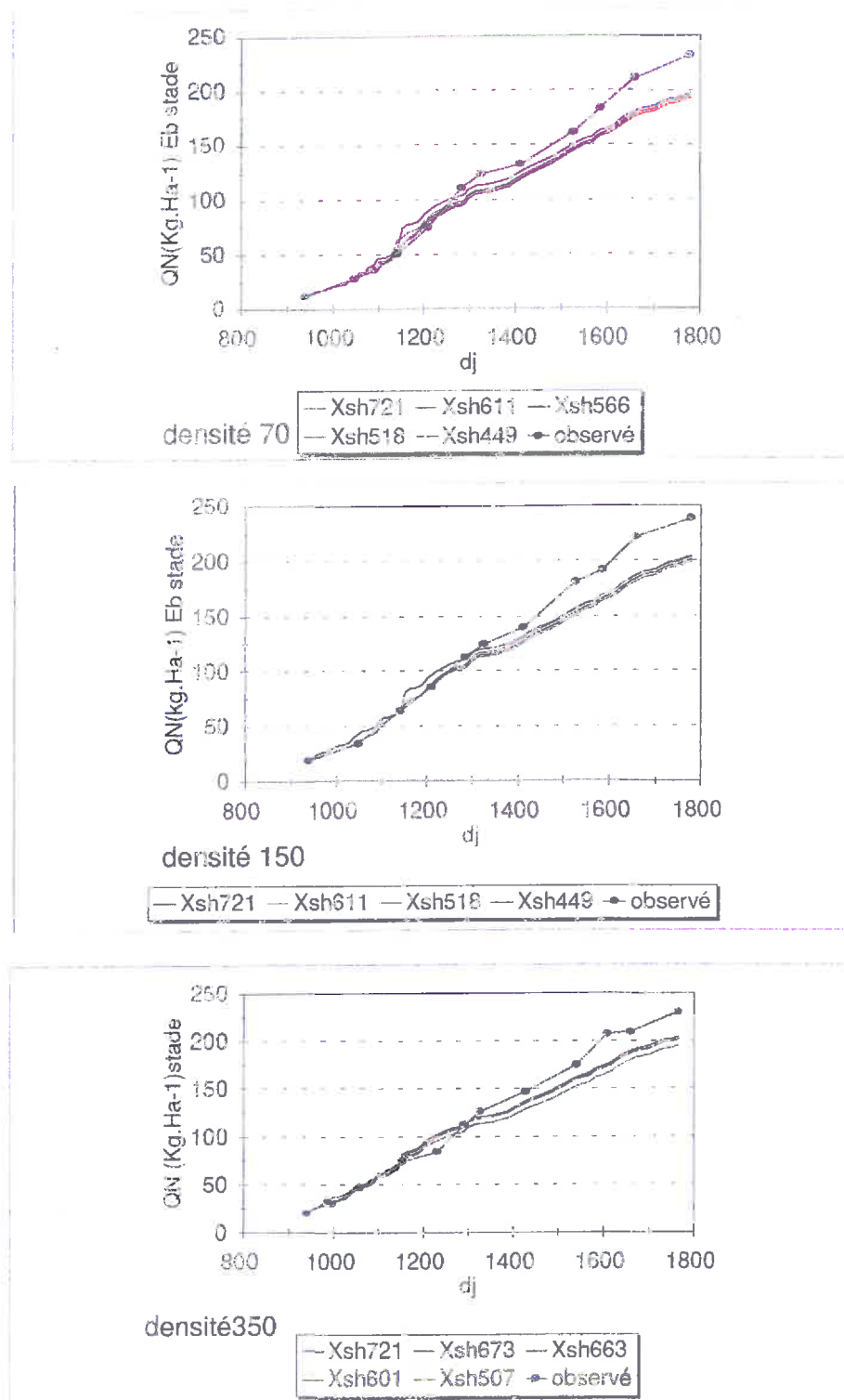
- **Estimation des QN avec  $\varepsilon_b$  unique**

Sur tous les traitements étudiés (*Figures II-3.3, II-3.4 et Annexe II-3.3*), nous distinguons deux phases : l'une antérieure, l'autre postérieure à la somme de degrés-jours 1300 (semis précoce) ou 1100 (semis tardif). Durant la première période, on observe une surestimation des QN d'autant plus importante que la date d'observation est précoce et que la densité est faible. Sur Pernel densité 70, semis tardif et précoce, les simulations issues de la première date d'observation sont particulièrement surévaluées. Après 1300 (semis précoce) et 1100 (semis tardif) degrés-jours, les QN sont systématiquement sous-estimés pour l'ensemble des traitements, avec un écart croissant le long du cycle ; cet écart est particulièrement important lorsque les densités sont élevées. Quelle que soit la date d'observation, sur les densités élevées, l'écart dépasse 30 kg/ha ; sur les densités faibles, il reste inférieur à 30 kg/ha. Sur cette même période, la différence est très faible entre les courbes de QN simulées à partir des LAI<sub>SH</sub> observés à différentes dates

- **Estimation des QN avec des valeurs variable de  $\varepsilon_b$**

Pour tenter d'atténuer les surestimations des QN observées notamment en densités faibles (70 et 150), nous avons estimé le cumul de la biomasse par des valeurs différentes de  $\varepsilon_b$ . Sur les *Figures II-3.5, II-3.6 et Annexe II-3.4*, on observe une meilleure estimation des QN, dont les courbes se confondent avec celles des QN mesurées, sauf pour la variété Pernel, densité 70 semis tardif, où la valeur de QN simulée à partir de la date d'observation la plus précoce (13/03) reste trop élevée de 50 kg/ha, ce qui représente un écart important pour la période étudiée. Par contre, la sous-estimation de QN pendant la deuxième partie de la montaison reste inchangée.

En densités faibles (par exemple 70, *Figure II-3.4*), sur les différentes figures représentant les simulations des QN, on constate que les courbes simulées en dates d'observation très précoces :  $X_{SH} = 721$  en précoce, et 673 en tardif, se situent au-dessus de celles issues des  $X_{SH}$  plus tardifs. Mais ce n'est pas le cas en densités élevées : pour celles-ci, les simulations des dates les plus tardives ( $X_{SH} = 375$  en précoce et 449 en tardif) sont au-dessus des observations antérieures. Mais les QN simulés restent très proches quelle que soit la date d'observation.



**Fig. II-3.6. Modélisation de la cinétique des besoins en azote à différentes dates d'observation ( $X_{SN}$ ), en utilisant l'efficacité de conversion ( $\epsilon_b$ ) estimée pour chaque stade (Variété Soissons ; densités 70, 150 et 350 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce)**



### 2.3. Discussions partielle

La discussion des résultats de la sensibilité du modèle d'estimation des besoins en azote portera sur deux points essentiels : l'effet des erreurs d'évaluation du LAI à différentes périodes du cycle du blé, ainsi que l'effet de la valeur de  $\varepsilon_b$  estimée sur le peuplement de 1996.

- *Sensibilité du modèle QN à l'estimation de la dynamique du LAI*

- a) Période Sortie d'hiver-Début montaison*

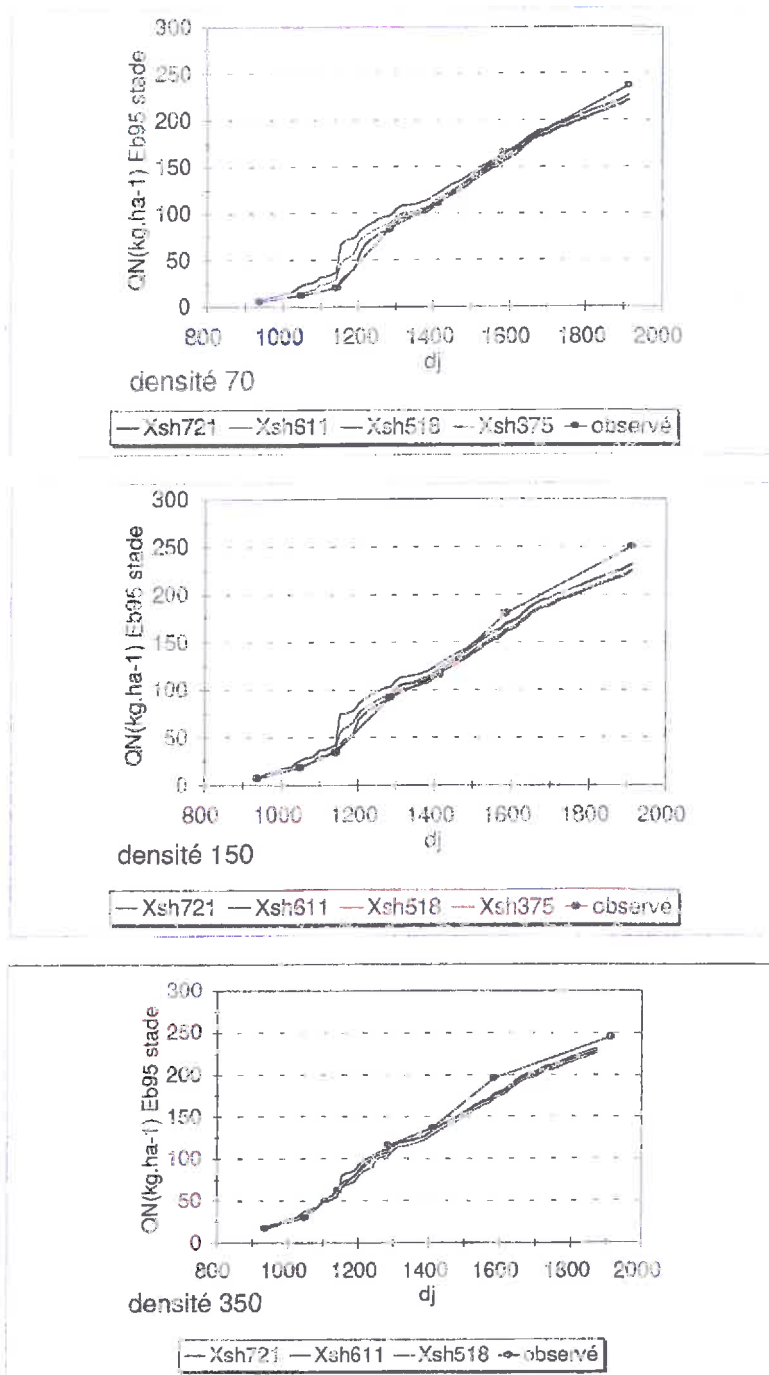
Afin d'éviter la confusion d'effets, la discussion des résultats sur la sensibilité du modèle d'estimation des besoins en azote au modèle LAI<sub>t</sub>, nous utiliserons, dans un premier temps, uniquement les simulations réalisées avec une différenciation de  $\varepsilon_b$  selon les phases de la montaison.

Lorsque nous avons utilisé la biomasse simulée avec le paramètre  $\varepsilon_b$  par stade, les estimations des besoins en azote sur la période sortie hiver - début montaison se sont beaucoup améliorées sur toutes les densités de la variété Soissons : les écarts sont inférieurs à 20 kg. Des résultats similaires sont obtenus avec Pernel en 150 et 350. Mais les besoins de la densité 70 chez Pernel restent très surévalués : l'erreur, de l'ordre de 50 kg/ha pour les deux dates de semis, est très importante pour la période considérée. Dans ces derniers cas, l'utilisation de  $\varepsilon_b$  par stade n'a pas vraiment réduit les écarts. Pour tenter d'expliquer cela, nous avons examiné la modélisation du LAI. Sur les figures (*Annexes II-3.15 et II-3.17*), on observe que la variété Pernel en densité 70 montre une surévaluation de l'indice foliaire, avant la partie ascendante de la courbe, pour toutes les dates d'observation du LAI<sub>SH</sub>.

*On peut retenir de ce résultat qu'en densité faible, le modèle d'estimation des besoins en azote est sensible aux erreurs d'estimation des LAI pendant la période antérieure au stade "épi 1 cm". Comme le calcul des QN se fonde sur le cumul des biomasses, le fait de surestimer le LAI conduit facilement à un cumul de biomasse plus grand que les valeurs réelles en densité 70 (Figures II-3.5 et Annexes II-3.4). En densités 150 et 350, le LAI étant mieux simulé précocement, les besoins en azote sont mieux estimés (erreur inférieure à 20 kg/ha).*

*Une amélioration de la modélisation du LAI en début de cycle pour les densités faibles en observation précoce est impérative pour éviter des erreurs d'estimation des besoins en azote, à une période où les risques de lessivage sont encore importants.*

*Comme nous l'avons déjà mentionné, la modélisation de  $\varepsilon_i$  à des dates très précoces avec la valeur du paramètre K, estimée sur des dates plus tardives, pourrait être une cause supplémentaire de la surestimation des QN aux dates très précoces alors que la végétation est encore extrêmement hétérogène. Ce qui est d'ailleurs le cas dans les parcelles de blés clairs, où l'hétérogénéité est nettement plus marquée (la végétation est beaucoup plus éparse que dans le cas de notre expérimentation où les densités faibles représentant les blés clairs ont été semés en lignes).*



**Fig. II-3.7. Modélisation de la cinétique des besoins en azote en utilisant le coefficient de conversion ( $\epsilon_b$ ) estimé en 1995 (Variété Pernel ; semis précoce)**

b) Montaison-Floraison

Sur tous les traitements, à partir de 1300 degrés-jours (mi-montaison), les courbes d'estimation des QN, qui se trouvaient auparavant en général proches des données observées, passent systématiquement au-dessous de celles-ci. Ce biais systématique peut avoir deux origines :

- une mauvaise estimation des LAI pendant la phase ascendante (*Figures II-2.10 et II-2.11*) ;
- une valeur sous-estimée de  $\varepsilon_b$  à partir du peuplement 1996.

Pour vérifier la sensibilité du modèle d'estimation des besoins en azote, à l'évaluation du LAI dans la phase pleine montaison - floraison, nous avons retenu uniquement les couples ( $X_{SH}$ ,  $LAI_{SH}$ ), avec lesquels nous obtenons les meilleurs validations du LAI.

Sur l'ensemble des traitements étudiés, ces courbes ( $X_{SH} = 518$  ou  $375$ ) ne se différencient pas de celles qui ont une mauvaise estimation du LAI, d'une façon significative. Elles sous-estiment également le QN malgré une bonne estimation du LAI. Toutefois, sur le traitement Pernel 350 précoce, l'écart entre observé et simulé atteint 50 kg/ha, alors qu'il est voisin de 30 kg/ha pour les autres traitements. L'analyse de la modélisation du LAI de ce traitement montre que pendant la phase ascendante, le LAI est sous-estimé d'une façon assez importante même pour les observations les plus tardives. Ce qui a peut-être accentué l'effet de cette sous-estimation sur le QN, est qu'elle est particulièrement forte en début de montaison, pour des LAI inférieurs à 4 qui n'autorisent pas une interception complète de rayonnement.

*En tout état de cause, pour les densités 150 et 330 des autres variétés, où le LAI est compris entre 4 et 7, dès la mi-montaison, la sous-estimation des QN ne peut être due aux erreurs sur le LAI. Pour les densités 70, bien que le LAI atteigne 4 un peu plus tardivement, le biais reste du même ordre. Tous ces éléments conduisent à supposer que l'erreur systématique provient plutôt de l'effet année sur la valeur de  $\varepsilon_b$ .*

c) Sensibilité du modèle QN à  $\varepsilon_b$

Le modèle apparaît très sensible à  $\varepsilon_b$ , puisque si l'on applique aux simulations la valeur de  $\varepsilon_b$  estimée en 1995 ( $\varepsilon_b = 2.88$ ) pour la phase de montaison, au lieu de la valeur de 1996 ( $\varepsilon_b = 2.49$ ) utilisée jusqu'ici, toutes les simulations s'organisent autour de la courbe de référence (*Figure II-3.7*). Il apparaît qu'un problème majeur de l'estimation des besoins en azote est la variabilité interannuelle d'un paramètre que la bibliographie nous avait amenée à considérer comme stable. L'effet de la densité de plantes dans la gamme considérée est faible, mais l'effet année est important. Les différences de températures entre les deux années restant assez faibles pendant la montaison (seule différence importante : sept jours de températures maximale supérieure à 25° en 1996 dans la période épiaison - floraison), les alimentations hydrique et azotée ayant été bien contrôlées, les conditions de milieu expliquent mal cette variation. Il faudrait cependant éclaircir la part de cette différence entre années, liée à la différence de protocole de mesure (Cf. *supra*).

La différenciation de  $\varepsilon_b$  selon les phases du cycle apparaît, quant à elle tout à fait justifiée, en particulier pour l'estimation des besoins précoces.

**TROISIÈME PARTIE :**

**DISCUSSION GÉNÉRALE**

**ET CONCLUSION**

Notre travail ouvre la voie à une nouvelle procédure d'estimation des besoins en azote du blé, actuellement calculés globalement sur l'ensemble du cycle en référence à un objectif de rendement, parfois malaisé à fixer. Les modèles étudiés dans ce mémoire constituent la base d'une estimation de la cinétique des besoins, en fonction d'informations objectives concernant l'état de la culture avant fertilisation.

**Disposer d'une cinétique des besoins en azote** constitue un atout pour un ajustement précis des apports d'engrais. Comme le montrent en particulier Meynard (1985) et Recous *et al.* (1997), des apports trop précoces par rapport aux possibilités d'absorption des peuplements diminuent l'utilisation et l'efficacité des engrais. Inversement, des apports trop tardifs induisent des carences azotées défavorables à la production. Si la proposition de stades-repères pour les apports (ITCF, 1978) a constitué un grand progrès, l'accroissement des contraintes d'organisation du travail rend nécessaire de proposer aux agriculteurs des formules de fractionnement de l'azote beaucoup plus souples, fondées sur une confrontation dynamique des besoins en azote et des fournitures du sol (Jeuffroy & Recous, 1998). Les modèles étudiés ont pour vocation de participer à cette démarche, dans la limite de leur domaine de validité : jusqu'à la floraison, pour des blés ne souffrant pas de déficit hydrique ou de carence minérale. Le raisonnement de la fertilisation du blé devant intégrer des objectifs de qualité (taux de protéines en particulier), il faudra raccorder ces modèles à une modélisation du remplissage du grain, en azote et en amidon. Le modèle récemment proposé par Girard (1997) devrait convenir pour cet usage car ses principales variables d'entrée (LAI, biomasse, N absorbé) constituent des variables de sortie de notre modélisation.

Cette prévision des besoins en azote fonctionne sur la base d'une **évaluation précoce de l'indice foliaire**. La grande variabilité de l'indice foliaire du blé en fin d'hiver, due tant à des pertes de plantes qu'à des semis tardifs ou à des excès d'eau hivernaux, rendait nécessaire la mise au point d'une procédure d'estimation de ses conséquences sur le rendement et les besoins en azote (Meynard, 1983b). L'estimation de la croissance pendant la montaison constitue un élément clef d'une prévision du rendement (Masle, 1985) ; là encore, un raccordement avec un modèle de remplissage des grains sera nécessaire pour que l'indice foliaire de sortie d'hiver puisse servir de base à une décision de maintien ou de destruction d'une culture à faible indice foliaire. Une estimation précise des besoins induits par l'état de la culture en fin d'hiver permet **d'adapter les doses d'engrais azoté à des différences inter- ou intraparcellaires**.

**L'ajustement interparcellaire** est potentiellement praticable par n'importe quel agriculteur, sans instrumentation spécifique, en s'appuyant sur l'évaluation du taux de couverture du sol. Un atout de la procédure proposée est qu'elle est praticable sur une assez longue période, entre la fin d'hiver et le début de la montaison, même si, comme nous l'avons montré, sa précision s'accroît quand on se rapproche du stade "épi 1 cm".

**L'ajustement intraparcellaire** est d'autant plus justifié que les processus qui conduisent à des pertes de plantes s'extériorisent généralement de manière très irrégulière au sein des parcelles. On entre là dans le domaine de **l'agriculture de précision**. Des ajustements intraparcellaires de fertilisation (*site specific management*) ne sont envisageables que si l'on dispose à la fois d'outils de modulation des épandages par différenciation de débit, et d'outils automatiques permettant de saisir les informations spatialisées pertinentes. La réflectance du couvert, base d'estimation de l'indice foliaire pendant la période sortie d'hiver - début montaison, constitue une telle information, à la fois pertinente et de recueil automatisable. Nous avons fixé, au début de ce mémoire, que la procédure de prévision des besoins ne devait reposer que sur une date

de prise de données. La validation du modèle de prévision de l'indice foliaire a bien montré les limites d'un tel pari. Si la cartographie de la réflectance est automatisable (capteurs sur une rampe d'épandage, couplés avec un SIG et un GPS), on peut imaginer de faire reposer la prévision de l'indice foliaire sur plusieurs mesures de réflectance, par exemple au moment du désherbage de printemps et du premier apport d'engrais azoté pour gérer une modulation de dose réalisée sur le second apport d'engrais azoté. Étant donné la perte de précision liée à des mesures trop précoces, on peut également souhaiter gérer en temps réel la mesure de la réflectance et sa traduction immédiate en dose d'engrais épandue lors du même passage de tracteur. Tout ceci devra s'exécuter dans des temps compatibles avec la vitesse d'avancement du tracteur. Enfin, la cartographie parcellaire de la réflectance en sortie d'hiver pourrait être extrêmement utile pour affiner l'analyse des cartes de rendement, d'ores et déjà disponibles dans certaines exploitations.

**Il est clair qu'à l'issue de notre travail, nous sommes encore loin d'atteindre l'opérationalité d'une telle procédure.** Ceci est en partie dû aux simplifications adoptées, légitimes dans une phase de "*débroussaillage*" du sujet : nous n'avons travaillé que sur trois variétés, sans prendre en compte l'existence de facteurs limitants du rendement autres que l'interception de l'énergie lumineuse ; nous n'avons pas travaillé sur des peuplements rendus accidentellement clairs par un événement climatique, mais sur des peuplements semés clairs.

- **L'extrapolation du modèle à différentes variétés a été l'un de nos soucis constants, tout au long de la démarche.** En choisissant Pernel, Thésée et Soissons, nous avons privilégié des différences de port et de vitesse de couverture du sol afin d'identifier les paramètres variétaux auxquels les relations Taux de couverture-LAI et Réflectance-LAI sont sensibles. Ces trois variétés sont de même précocité, mais en calant le modèle d'évolution de l'indice foliaire sur des stades de développement (épiaison, "épi 1 cm"), nous l'avons préparé à rester pertinent sur des variétés de précocité différente. Il n'en reste pas moins qu'une validation de la démarche sur d'autres variétés sera une priorité.
- **La modélisation repose sur l'hypothèse d'une absence de facteur limitant nutritionnel ou parasitaire pendant les phases de tallage et de montaison.** Dans la moitié Nord de la France et sur des blés clairs, cette hypothèse est souvent vérifiée (Meynard, 1983) ; mais pour accroître le domaine de validité de la procédure (étape obligatoire avant sa diffusion), il serait nécessaire de borner les besoins en relation avec les risques de déficit hydrique et d'intégrer dans l'évaluation des doses à apporter l'existence, toujours possible, de stress azotés au moment de l'apport. L'estimation du statut azoté des couverts au moyen de mesures radiométriques, telle qu'elle est proposée par Baret & Fourty (1997), pourrait constituer un complément très pertinent à la procédure que nous proposons : il faudrait alors rajouter aux besoins estimés sur la base du LAI la quantité d'azote nécessaire pour ramener le peuplement à une nutrition azotée non limitante.
- **Les peuplements clairs sur lesquels nous avons travaillé avaient une densité très faible (70 pieds/m<sup>2</sup>),** mais pour permettre un suivi de la végétation sur la base d'un échantillonnage destructif, ils avaient été semés au semoir de précision. Ces peuplements, malgré leur faible densité, ont atteint les deux années des indices foliaires de 4, suffisants pour intercepter 95 % du rayonnement incident, et ont obtenu des rendements très proches de ceux des peuplements de densité normale, semés à des densités plus de cinq fois supérieures. Ces résultats pourront paraître curieux aux praticiens de la culture du blé, aucun ne conservant, après un gel, un blé n'ayant que 70 plantes au mètre carré. En fait, il y a deux différences

entre nos peuplements et des blés gelés : d'une part, une répartition beaucoup plus régulière des plantes sur la ligne (qui peut affecter les valeurs de  $K$  et de  $\varepsilon_{i \max}$  de l'Équation 12) ; d'autre part, la plus forte vitesse de croissance hivernale. Meynard (1983b) a montré que la biomasse par plante d'un blé gelé était très inférieure à celle d'un blé non gelé, semé à la même date. Il est probable que la prise en compte de peuplements réellement gelés conduise à modifier certains paramètres (voir *supra*) et à accroître la sensibilité du modèle à la qualité de l'estimation du LAI (blés à plus faible indice foliaire final). Avant diffusion de la procédure de gestion de la fertilisation, l'étude du comportement du modèle dans ces situations est une nécessité.

L'élaboration de cette procédure d'estimation des besoins repose sur un travail de modélisation important. À côté de l'utilisation de modèles classiques (courbe critique de dilution, modèle de Monteith), nous avons mis au point, dans le cadre de ce programme de recherche, deux modèles dont l'intérêt théorique et les applications potentielles dépassent largement le cadre strict de l'estimation de besoins en azote : le modèle de structure 3D du couvert et le modèle d'évolution de l'indice foliaire.

### *1/ Le modèle de structure 3D (Boissard et al., 1998b et c)*

L'estimation précise de l'indice foliaire à partir du taux de couverture ou de la réflectance a nécessité d'approfondir l'étude de la structure de la plante et du peuplement en cours de tallage en relation avec les facteurs agronomiques. Le modèle 3D qui a été créé répond à cet objectif. Malgré la complexité de la structure géométrique du blé au cours du tallage, nous avons réussi à modéliser l'architecture du couvert en utilisant un nombre limité de paramètres. Les principaux degrés de liberté de la géométrie et les grandeurs liées à la croissance ont été pris en compte. Citons par exemple :

#### *Géométrie :*

- Angles d'insertion de feuilles, loi de variation temporelle
- Angles des talles
- Dimensions des feuilles, loi de variation temporelle
- Torsion longitudinale des feuilles
- ...

#### *Croissance :*

- Vitesse d'accroissement de la longueur
- Rythme d'apparition des feuilles et des talles
- Durée de vie de la feuille
- ...

La mise au point du modèle a nécessité d'innover au niveau de la saisie des données 3D. Nous avons proposé une nouvelle méthode pour mesurer les paramètres de structure tels que les angles foliaires dont l'accès est très difficile chez le blé. Cette méthode est fondée sur la photogrammétrie numérique et permet d'acquérir rapidement le squelette en 3D de plantes prélevées au champ (Valéry *et al.*, 1998). En ce sens, elle complète la méthode développée par Ivanov *et al.* (1994, 1995) sur la mesure de paramètres de structure du maïs au champ.

On a retenu une approche dynamique (un modèle unique avec des lois paramétriques fonction du temps) pour deux raisons principales :

- Le BPMS (*Botanical Plant Modelling System*), conçu par Lewis (1997) pour simuler la réflectance multibande des cultures, constituait un outil général de modélisation en 3D de la culture auquel il était commode de se rattacher. Il utilise une approche L-system paramétrique qui permet de faire dépendre du temps les paramètres ; par exemple, cela nous a permis de décrire l'angle d'insertion des feuilles sur la tige comme une fonction exponentielle du temps thermique.
- Pour des raisons de nombre de données à traiter, on a choisi de ne faire un suivi en continu que d'une partie du dispositif expérimental. La mise en oeuvre d'un modèle dynamique a permis de simuler plusieurs variétés sans nécessairement les suivre toutes en continu.

Grâce à la modélisation en 3D, nous avons pu simuler la variation de la structure de plusieurs variétés et confirmer l'effet de cette variation sur la relation établie entre l'indice foliaire et le taux de couverture. La validation du modèle, y compris le calcul de réflectance, a été réalisée en utilisant le jeu de données Soissons à 150 pl/m<sup>2</sup>, acquises tout au long du tallage, ce qui représente une grande variété de conditions de mesure. En particulier, on a pu préciser l'incertitude sur l'estimation du LAI comme conséquence de l'erreur commise sur les paramètres de structure ou, plus globalement, sur les indicateurs TC et indice de végétation. Cette étude a permis de hiérarchiser les variétés sur le plan de l'aptitude à couvrir le sol pour une surface foliaire donnée. On a compris comment varient les paramètres et quels sont ceux qui contrôlent le redressement au début de la montaison.

L'étude de sensibilité a démontré que le modèle pouvait simuler les différentes conditions agronomiques à partir d'un jeu réduit de paramètres "*sensibles*" (dimensions maximales des feuilles, angles d'inclinaison des talles, agrégation des feuilles). Il a fallu introduire un paramètre d'agrégation des feuilles dont la valeur a été ajustée pour les trois variétés étudiées. Ce paramètre corrige l'effet des simplifications découlant des hypothèses sur les angles qui contrôlent l'insertion des feuilles sur le brin-maître et les talles. Le choix d'utiliser une représentation en 3D simplifiée de la feuille de blé par analogie avec le modèle mécanique de la feuille de maïs : poutre et voile (Moulià, 1993) a été validé. Il consiste à "habiller" le squelette par un limbe de largeur et longueur maximales données, auquel on ajoute des propriétés de torsion. Cette approche débouche sur une méthodologie assez simple de reconstruction de plantes à partir de la saisie en 3D du squelette seul et ouvre des perspectives pour la simulation d'autres espèces végétales analogues au blé ou considérées *a priori* comme "*difficiles*". Rappelons que España-Boquera (1997) avait montré l'insensibilité de la réflectance au raffinement géométrique de la forme des limbes sur des maquettes de maïs adulte.

Dans le cadre de cette thèse on a exploré le domaine des faibles densités, où il est bien connu que l'hétérogénéité s'accroît. On notera que le modèle 3D de la plante individuelle prend en compte la variabilité des échantillons puisque les paramètres, la structure et les lois d'évolution sont assorties d'un écart-type. Les maquettes issues de ce jeu de données sont élaborées en tirant les valeurs des paramètres selon la procédure de Monte-Carlo. Le module "*generate-field*" du BPMS permet de créer une population de plantes à partir des maquettes individuelles en procédant par clonage informatique. Il permet, en particulier, de prendre en compte explicitement l'hétérogénéité de la distribution spatiale des plantes (irrégularités le long de la ligne de semis et en travers, coefficient de variation des dimensions des maquettes, probabilité associée aux maquettes...).

L'intégration à cet ensemble d'un module de lancer de rayons sur les placettes et de calcul de la réflectance multibande permet d'effectuer toutes sortes de simulations et, notamment, de faire



varier les conditions de mesure. Ce point est particulièrement important car il permet de dépasser les limitations des jeux de données réelles et de généraliser les abaques réflectance-taux de couverture (ou réflectance-LAI) proposés par Boissard *et al.* (1992) à différentes variétés, densités et types de sols, dans un souci opérationnel.

Le point de vue de l'utilisateur ou de l'expérimentateur désireux d'utiliser le modèle 3D et d'étendre son application à d'autres variétés de blé, a été pris en compte. Citons plusieurs aspects :

- Les paramètres de structure 3D ont été choisis en fonction de la possibilité de les mesurer de façon commode et non ambiguë.
- Si l'on s'intéresse à une nouvelle variété, les mesures seront limitées aux paramètres importants de façon à faire entrer la variété dans la typologie existante.
- On pourra utiliser les capacités de projection de la surface foliaire pour créer un jeu de planches par variété/densité représentant la gamme des taux de couverture ; ce jeu de planches servira à caler les observations visuelles et permettra aussi une mise en oeuvre simple de l'estimation de l'indice foliaire.

Pour ce qui concerne l'utilisation du modèle dans le cadre de la télédétection (aéroportée, satellitaire) il devrait permettre de réduire l'incertitude sur l'inversion des données de réflectance pour deux raisons :

- prise en compte de la variété, information annexe généralement connue au sol, voire la densité de semis,
- possibilité de générer, pour une gamme étendue d'angles de visée, des abaques LAI/réflectance fournis d'ores et déjà par les satellites de la nouvelle génération (Instrument "Végétation" sur SPOT 4, 1998).

Bien sûr, le travail présenté a eu ses propres limitations : le modèle 3D lui-même est fondé sur une hypothèse simplificatrice forte : l'indépendance des paramètres angulaires relatifs à la feuille et à la tige et contrôlant l'insertion des feuilles sur les tiges. Cela conduit à un modèle plus simple, qui pourrait être amélioré dans l'avenir dans le souci de "coller" à la réalité des variétés.

Par ailleurs, en forte densité, notre modèle se heurtera au fait que l'encombrement physique des éléments de la population simulée n'est pas explicitement géré. Si l'on souhaite étendre la gamme d'utilisation du modèle, il faudra traiter ce problème. Une comparaison avec d'autres modèles tels que SAIL, utilisé en calcul de la réflectance, devra être réalisée. On s'attachera, en particulier, à mesurer en quoi diffère la distribution angulaire des éléments de notre modèle par rapport à une distribution standard de type sphérique, communément utilisée.

Au niveau des perspectives, on soulignera que l'approche 3D développée offre une puissance d'analyse et de simulation qui dépasse le cadre de la recherche d'indicateurs de l'indice foliaire ou de la mise au point d'un "indice foliaire 3D". Le modèle 3D pourra être utilisé pour étudier les couverts bispécifiques et, particulièrement, la compétition pour la lumière entre une plante et une adventice, par exemple. Il pourra également favoriser le développement de nouveaux indicateurs automatisables tels que la température de surface (Boissard *et al.*, 1990) ou le contenu en eau du couvert (Féchant, 1996).

## 2/ Le modèle d'évolution de l'indice foliaire

Ce modèle présente plusieurs innovations par rapport à la plupart des modèles équivalents évoqués en bibliographie :

- Il est calé sur la date de deux stades phénologiques (épiaison et début montaison), ce qui lui permet de simuler les différences interannuelles et intervariétales de cinétique.
- Il est constitué par l'association d'une logistique symétrique et d'un plateau, alors que la dissymétrie de l'évolution de l'indice foliaire conduit généralement à l'ajuster à une logistique dissymétrique ; l'intérêt d'une telle formule est de faciliter l'estimation des paramètres de la logistique et d'éviter de simuler une augmentation, non conforme à la réalité, de l'indice foliaire au-delà de la floraison. Nous avons montré que le paramètre "b" (pente au point d'inflexion) était constant dans nos conditions. Ce point mériterait d'être vérifié car si "b" est fixé et "m" essentiellement dépendant du développement, d'autres procédures, potentiellement plus précises que celle que nous avons adoptée, d'estimation de  $LAI_{ep}$  et "n" pourraient être proposées, en particulier le forçage de la courbe par deux points de mesure du LAI.

En tout état de cause, nous avons constaté que l'estimation des besoins en azote s'est révélée, dans la gamme explorée, assez peu sensible aux erreurs faites par le modèle d'estimation du LAI. En l'état, la précision de ce modèle semble donc acceptable. Il en va tout autrement de la précision de la connaissance de  $\varepsilon_b$ , qui semble fort variable entre années. Ce paramètre essentiel induit des variations très gênantes de l'estimation de besoins en azote et un affinement de l'influence des conditions de milieu, sur ce paramètre, serait nécessaire.

*En définitive, ce travail constitue une illustration de ce que la perspective d'une utilisation opérationnelle peut apporter à des modèles de fonctionnement de culture : d'une part une nouvelle perception de la hiérarchie de leurs points faibles, d'autre part certaines innovations liées au souci d'en faciliter l'utilisation et la maintenance. Ainsi, la possibilité de saisir par photogrammétrie les paramètres de la structure des plantes a été développée en relation, entre autres, avec l'objectif de pouvoir aisément adapter le modèle 3D à de nouvelles variétés. De même, le calage de la courbe d'indice foliaire sur les stades de développement est un moyen d'en faciliter la prévision et l'adaptation à différentes variétés.*

*Un modèle utile pour l'aide à la décision n'est pas obligatoirement un modèle simple : c'est un modèle dont les variables d'entrée sont aisément disponibles et les paramètres aisément estimables (Meynard, 1997). Le point faible de la mise au point de procédures d'ajustement intraparcellaire de la fertilisation réside dans la faible disponibilité de tels modèles (Robert, 1996), ou plus précisément, dans le hiatus qui existe encore entre les modèles bâtis dans une optique de connaissance sans prise en compte des contraintes d'opérationnalité, trop complexes à mettre en oeuvre, et les modèles d'ores et déjà opérationnels, telle la méthode des bilans, trop simplifiés pour être raccordables de manière aisée aux indicateurs automatisables. Nous avons tenté ici d'intégrer complètement le cahier des charges de l'utilisation pratique dans la conception des modèles. Mais nous sommes encore bien loin de pouvoir proposer des règles opérationnelles pour la conduite des blés clairs : l'élargissement à des peuplements plus contrastés (variétés, densités hétérogènes) devra être suivi d'une phase de validation expérimentale des règles de décision fondées sur nos indicateurs.*

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

A

---

- Aase J.K., 1978. Relationship between leaf area and dry matter in winter wheat. *Agron. J.*, **70**, 563-565.
- Acock B., Pachepsky Y.A., 1997. Holes in precision farming: Mechanistic crop models. In *Precision Agriculture '97. Vol. I: Spatial variability in soil and crop*. 1<sup>st</sup> European Conf. on Precision Agriculture, 07-10/09/1997, Warwick (UK), Stafford J.V. (Ed.), SCI, London, pp. 397-404.
- Ahlich J.S., Bauer M.E., 1983 Relation of agronomic and multispectral reflectance characteristics of spring wheat. *Agron. J.*, **75**, 988-991.
- American Society of Agricultural Engineers, 1991. Automated agriculture for the 21<sup>st</sup> Century. *Proc. of the 1991 Symposium*, 16-17/12/1991, Chicago, Illinois (USA), ASAE, St Joseph, Michigan, 540 pp.
- Amir J., Sinclair T.R. 1991. A model of the temperature and solar-radiation effects on spring wheat growth and yield. *Field Crops Res.*, **28**, 47-58.
- Andrieu B., Baret F., 1993. Indirect methods of estimating crop structure from optical measurements. In *Crop structure and light microclimate. Characterization and applications*. Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H. (Eds.), INRA Editions, Paris, pp. 284-322.
- Arkin G.F., Maas S.J., Richardson C.W., 1980. Forecasting grain sorghum yields using simulated weather data and updating techniques. *Trans. ASAE*, **23**, 676-680.
- Asrar G., Hipps L.E., Kanemasu E.T., 1984. Assessing solar energy and water use efficiencies in winter wheat : a case study. *Agric. For. Meteorol.*, **31**, 47-58.
- Asrar G., Kanemasu E.T., Yoshida M., 1985. Estimates of leaf area index spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote Sensing Environ.*, **17**, 1-11.

B

---

- Baret F., 1991. Vegetation canopy reflectance: Factors of variation and application for agriculture. In *Remote sensing and Geographical Information Systems for resource management in developing countries*, Belward A.S., Valenzuela C.R. (Eds.), CEE, Bruxelles, pp.145-167.
- Baret F., Fourty T., 1997. Radiometric estimates of nitrogen status of leaves and canopies. In *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Lemaire G. (Ed.), Springer-Verlag, pp.201-227.
- Baret F., Guyot G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR estimation. *Remote Sensing Environ.*, **35**, 161-173.
- Bégué A., 1991. *Estimation de la production primaire en zone Sahélienne à partir de données radiométriques. Cas d'un couvert discontinu: le mil*. Thèse de Docteur de l'Université Paris VII, 139 pp.
- Bégué A., 1993. Leaf area index, intercepted photosynthetically active radiation, and spectral vegetation indices : a sensitivity analysis for regular-clumped canopies. *Remote Sensing Environ.*, **46**, 45-59.

- Belmans C., De Wijngaert K., 1985. Modelling the growth of winter wheat to improve nitrogen fertilizer recommendations. In *Wheat growth and modelling*, Day W., Atkin R.K. (Eds.), Plenum Press, New York, pp. 333-355.
- Biller R.H., Hollstein A., Sommer C., 1997. Precision application of herbicides by use of optoelectronic sensors. In *Precision Agriculture '97. Vol. II: Technology, IT and management*. 1<sup>st</sup> Eur. Conf. on Precision Agriculture, 07-10/09/1997, Warwick (UK), Stafford J.V. (Ed.), SCI, London, pp. 451-458.
- Biscoe P.V., Gallagher J.N., 1977. Soil temperature and its association with maize variations on the highlands of Kenya. *J. Agric. Sci. (Cambridge)*, 89, 355-363.
- Biscoe P.V., Gallagher J.N., 1977. Weather, dry matter production and yield. In *Environmental effects on crop physiology*, Landsberg J.J., Cutting C.V. (Eds.), Academic Press, London, pp.75-100.
- Blacklow W.M., 1972. Influence of temperature on germination and elongation of the radicle and shoot of corn (*Zea mays* L.). *Crop Sci.*, 12, 647-650.
- Board J.E., Harville B.G., 1992. Explanations for greater light interception in narrow- vs wide-row soybean. *Crop Sci.*, 32, 198-202.
- Boissard P., 1985. Description de la géométrie d'une culture avec restriction aux parties vues. In *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, 3<sup>rd</sup> Int. Colloquium, ESA/INRA/CNES, les Arcs (France), 16-20/12/1985, European Space Agency, Paris, ESA SP- 247, pp. 209-212.
- Boissard P., Guérif M., Pointel J.G., Guinot J.P., 1989. Application of SPOT data to wheat yield estimation. *Adv. Space Res.*, 9, 143-154.
- Boissard P., Helbert J., Akkal N., Lewis P., Valéry P., 1998b. Paramétrization of 3D wheat model designed to simulate growth at early stage. *Soumis pour publication à Agronomie*.
- Boissard P., Pointel J.G., Gate P., 1992. Suivi de l'état des culture par radiométrie rapprochée. *Perspect. agric.*, 171, 43- 45.
- Boissard P., Pointel J.G., Leterme P., Buisson O., 1988. Estimation à un stade précoce et par radiométrie du nombre potentiel d'épis du blé tendre en grande culture. In *Signatures spectrales d'objets en télédétection*, 4<sup>ème</sup> Colloque International, CNES-INRA-ESA-CNRS, 18-22 Jan. 1988, Aussois (France), European Space Agency, Paris, pp. 121-124.
- Boissard P., Pointel J.G., Tranchefort J., 1992. Estimation of the ground cover ratio of a wheat canopy using radiometry. *Int. J. Remote Sensing*, 13, 1681-1692.
- Bonhomme R., Varlet-Grancher C., 1978. Estimation of the gramineous crop geometry by plant profiles including leaf width variations. *Photosynthetica*, 12, 193-196.
- Bouaziz A., 1987. *Implantation d'un peuplement de blé tendre en conditions sèches. Analyse physique et modélisation*. Thèse de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.
- Bouman B.A.M., 1992. Growth models to simulate crop growth, optical reflectance and radar backscatter of sugar beet and winter wheat, calibrated for Flevoland. *Centre for Agrobiological Research, Wageningen, The Netherlands*, CABO-DLO, Report 163, 61 pp. + annexes.
- Bouman B.A.M., Van Kasteren H.W.J., 1989. Ground based X-band radar backscatter measurements of wheat, barley and oats 1975-1981. *Centre for Agrobiological Research. Wageningen, The Netherlands*, CABO-DLO, Report 119, 150 pp.

Bouman B.A.M., Van Kasteren H.W.J., 1990. Ground-based X-band (3-cm wave) radar backscattering of agricultural crops. II. Wheat, barley, and oats; the impact of canopy structure. *Remote Sensing Environ.*, 34, 107-118.

Bouman B.A.M., Van Kasteren H.W.J., Uenk D., 1992. Standard relation to estimate ground cover and LAI of agricultural crop from reflectance measurements. *Eur. J. Agron.*, 1, 219-202.

Bouvier A., Gelis F., Huet S., Messean A., Neveu P., 1985. *Notice détaillée de l'utilisation du logiciel d'ajustement non linéaire*. INRA Laboratoire de Biométrie, Jouy-en-Josas.

Brisson N., Mary B., King D., Ruget F., Nicoullaud B., Devienne F., Gate P., Antonioletti R., Jeuffroy M.H., Recous S., 1996. *Modèles de simulation des cultures: bilan hydrique - bilan azoté. Version 1.0*. INRA Station de Bioclimatologie d'Avignon, 120 pp.

## C

---

Calderini D.F., Dreccer M.F., Slafer G.A., 1997. Consequences of breeding on biomass, radiation interception and radiation-use efficiency in wheat. *Field Crops Res.*, 52, 271-281.

Casanova D., Epema G.F., Goudriaan J., 1998. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. *Field Crops Res.*, 55, 83-92.

Cerf M., Meynard J.M., 1988. Enquête sur la mise en oeuvre des méthodes de fertilisation raisonnée. In *La Fertilisation Raisonnée*, 3<sup>ème</sup> Colloque National de Nancy, 22-23/06/1988, COMIFER Ed., pp 5-12.

Chartier M., Bonchrétien P., Allirand J.M., Gosse G., 1989. Utilisation des cellules au silicium amorphe pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm). *Agronomie*, 9, 281-284.

Chelle M., 1997. *Développement d'un modèle de radiosité mixte pour simuler la distribution du rayonnement dans les couverts végétaux*. Thèse de Docteur de l'Université Rennes I, Institut de Formation Supérieure en Informatique et Communication, 154 pp.

Chevalier-Gérard C., 1994. *Modélisation de la perte de rendement due aux maladies cryptogamiques sur blé tendre d'hiver. Application à la conception d'itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants à l'aide du simulateur "Déciblé"*. Thèse de Docteur de l'INA P-G, Sciences Agronomiques, 123 pp.

Christensen S., Heisel T., Secher B.J.M., Jensen A., Haahr V., 1997. Spatial variation of pesticide doses adjusted to varying canopy density in cereals. In *Precision Agriculture '97, Vol. I: Spatial variability in soil and crop*. 1<sup>st</sup> European Conf. on Precision Agriculture, 07-10/09/1997, Warwick (UK), Stafford J.V. (ed.), SCI, London, pp. 211-218.

Clevers J.G.W., 1988a. Multispectral aerial photography as a supplemental technique in agricultural research. *Neth. J. Agric. Sci.*, 36, 75-90.

Clevers J.G.W., 1988b. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. *Remote Sensing Environ.*, 25, 53-69.

Clevers J.G.W., 1989. The application of a weighed infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing Environ.*, 29, 25-37.

Clevers J.G.W., Bùker C., Leeuwen H.J.C., Bouman B.A.M., 1994. A framework for monitoring crop growth by combining directional and spectral remote sensing information. *Remote Sensing Environ.*, 50, 161-170.

Coïc Y., 1956. La nutrition et la fertilisation azotées du blé d'hiver. I. Les besoins en azote du blé d'hiver. Conséquences agronomiques. *Ann. agron.*, 7, 115-131.

COMIFER, 1996. Calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. *Groupe "azote" du COMIFER*, Gitton C., Laurent F., Machet J.M., Plas D., Taureau J.C. (Eds.), 59 pp.

## D

---

Dale R.F., Coelho D.T., Gallo K.P., 1980. Prediction of daily green leaf area index for corn. *Agron. J.*, 72, 999-1005.

Daughtry C.S.T., Beaur M.E., Crecelius D.W., Hixson M.M., 1980. Effect of management practices on reflectance of spring wheat canopies. *Agron. J.*, 72, 1055-1060.

Delhaye R.J., 1986. Evolution du couvert du sol sous cultures divers, en relation avec leur développement. *Rev. Agric.*, 39, 379-385.

De Wit C.T., 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Agricultural Research Reports*, 663, Pudoc, Wageningen, 57 pp.

Digby J., Firm R.D., 1985. Growth substances and leaf growth. *In Control of leaf growth*, Baker N.R., Davies W.J., Ong C.K. (Eds.), Cambridge University Press, pp.57-76.

Dorvillez D., Giauffret C., Derieux M., Bonhomme R., 1991. Interaction précocité x densité sur l'interception du rayonnement et la production de matière sèche en conditions Nord de la France. *In Physiologie et production du Maïs*, Colloque INRA, 13-15/11/1990, Pau. Picard D. (Ed.), INRA Editions, Paris, pp.329-334.

Ducke C., 1997. *Assimilation de données de réflectance dans le modèle de fonctionnement de la Betterave sucrière en vue de la prévision des rendements à l'échelle régionale*. Thèse de Docteur de l'INA P-G, 130 pp. + annexes.

Duncan W.G., 1971. Leaf angles, leaf area and canopy photosynthesis. *Crop Sci.*, 11, 482-485.

Dwyer L.M., Stewart D.W., 1986. Leaf area development in field-grown maize. *Agron. J.*, 78, 334-343.

## E

---

España-Boquera M.L., 1997. *Simulation de la variation temporelle, directionnelle et spectrale de la réflectance de cultures de maïs à partir d'un modèle dynamique de la structure 3D du couvert*. Thèse de Docteur de l'Université de Marne-la-Vallée, Sciences de l'Information géographique, 240 pp.

## F

---

Féchant C., 1996. *Réalisation d'un quadripôle de mesure in situ de la permittivité diélectrique des végétaux. Première application à la détermination du contenu en eau des épis de blé*. Thèse de Docteur de l'Université Paris VI, Applications de la physique-Instrumentation, 190 pp.

Fenech J., Papy F., 1977. Conditions de réussite de la levée en climat méditerranéen. Cas des cultures de céréales en sec au nord du Maroc. *Ann. agron.*, 28, 599-635.

Fournier C., Andrieu B., 1997. A 3D architectural and process-based model of maize development. *Ann. Bot.*, 81, 233-250.

## G

---

Gallagher J.N., Biscoe P.V., 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Sci. (Cambridge)*, 91, 47-60.

Gallo K.P., Daughtry C.S.T., Bauer M.E., 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Remote Sensing Environ.*, 17, 221-232.

Gallo K.P., Daughtry C.S., Wiegand C.L., 1993. Errors in measuring absorbed radiation and computing crop radiation use efficiency. *Agron. J.*, 85, 1222-1228.

Garcia R., Kanemasu E.T., Blad B.L., Bauer A., Hatfield J.L., Major D.J., Reginato R.J., Hubbard K.G., 1988. Interception and use efficiency of light in winter wheat under different nitrogen regimes. *Agric. For. Meteorol.*, 44, 175-186

Garry J., O'Leary, David J., Connor 1996. A simulation model of the wheat crop in response to water and nitrogen supply : I. Model construction. *Agric. Systems*, 52, 1-29.

Gate P., 1987. Mieux comprendre l'élaboration du nombre de grains par épis chez le blé. *Perspect. agric.*, 114, 38-51.

Gate P., 1995. *Ecophysiologie du blé: de la plante à la culture*. Lavoisier, Paris, 429 pp.

Gate P., 1998. Variétés des céréales 1997. Une offre riche. *Perspect. agric.*, 235, 25-26.

Giauffret C., Bonhomme R., Dorvillez D., Derieux M., 1991. Conversion of intercepted radiation into aerial dry biomass for three maize genotypes : influence of plant density. *Maydica*, 36, 25-27.

Gilabert M.A., Gandia S., Melia J., 1996. Analyse of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing Environ.*, 55, 11-20.

Girard M.L., 1997. *Modélisation de l'accumulation de biomasse et d'azote dans les grains de blé tendre d'hiver (Triticum aestivum L.) : simulation de leur teneur en protéines à la récolte*. Thèse de Docteur de l'INA P-G, 96 pp.

Goel N., 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Rev.*, 4, 1-212.

Gosse G., Chartier M., Lemaire G., 1984. Mise au point d'un modèle de prévision de production pour une culture de luzerne. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sér. III*, 298, 541-544.



Gosse G., Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Chartier M., Allirand J-M., Lemaire G., 1986. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 6, 47-56.

Green C.F., 1987. Nitrogen nutrition and wheat growth in relation to absorbed solar radiation. *Agric. For. Meteorol.*, 41, 207-248.

Greenwood D.J., Gastal F., Lemaire G., Draycott A., Millard P., Neeteson J.J., 1991. Growth rate and % N of field grown crops : theory and experiments. *Ann. Bot.*, 67, 181-190.

Guérif M, Bloser B., Atzberger C., Clastre P., Guinot J.-P., Delécolle R., 1996. Identification de parcelles agricoles à partir de la forme de leur évolution radiométrique au cours de la saison de culture. *Photo-Interprétation*, 1, 12-22, 35-42.

Guyot G., 1989. *Signatures spectrales des surfaces naturelles*. Paradigme, Caen, 178 pp.

Guyot G., 1993. Bases physiques de la télédétection. Signatures spectrales des surfaces naturelles. In *Université d'été internationale d'observation de la Terre*, CNES, Marseille, 1992, Cépadues-Editions, Toulouse, pp. 67-125.

Guyot G., Baret F., 1989. La haute résolution spectrale. Déterminisme des déformations spectrales entre le rouge et le proche infrarouge. In *Télédétection et Gestion des Ressources. Vol. VI*, Bernier, Bonn et Gagnon (Eds.), Association Québécoise de Télédétection, Montréal, pp.197-209.

## H

---

Hammer G.L., Carberry P.S., Muchow R.C., 1993. Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum. I. Whole plant level. *Field Crops Res.*, 33, 293-310.

Hansen H.E., Jensen N.E., Svendsen H., 1991. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using Danish simulation model DAISY. *Field Crops Res.*, 27, 245-259.

Hatfield J.L., 1981. Spectral behavior of wheat yield variety trials. *Photogramm. Engin. Remote Sensing*, 47, 1487-1491.

Hatfield J.L., 1983. Remote sensing estimators of potential and actual crop yield. *Remote Sensing Environ.*, 13, 301-311.

Hatfield J.L., 1984. Interception photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. *Remote Sensing Environ.*, 14, 65-75.

Helbert J., 1996. *Simulation du blé en 3D dans le but d'estimer l'interception du rayonnement*. Mémoire de Maîtrise de physique de l'Université de Versailles, 39 pp.

Hipps L.E., Asrar G., Kanemasu E.T., 1983. Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat. *Agric. Meteorol.*, 28, 253-259.

Hodge T., Kanemasu E.T., 1977. Modeling daily dry matter production of winter wheat. *Agron. J.*, 69, 974-978.

Holben B. N., Tucker C. J., 1980. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. *Photogramm. Engin. Remote Sensing*, 46, 651-656.

Howell T.A., Musick J.T., 1985. Relationship of dry matter production of field crops to water consumption. In *Les besoins en eau des cultures*, Conf. Internationale, 11-14/09/1984, Paris, Perrier A., Riou C. (Eds.), INRA Editions, Paris, pp. 247-269.

Huete A.R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing Environ.*, **25**, 295-309.

Huet S., Bouvier A., Gruet M.A., Jolivet E., 1995. *Practical use of tools for parametric nonlinear regression models*. INRA Laboratoire de Biométrie, Jouy-en-Josas.

Huet S., Jolivet E., Messeean A., 1992. *La régression non linéaire, méthodes et applications en biologie*. INRA Editions, Paris, 256 pp.

## I

---

Ivanov N., 1994. *Estimation de paramètres de structure du couvert végétal par stéréo-vision. Application du rayonnement*. Thèse de l'Université Paris VII, 73 pp.

Ivanov N., Boissard P., Chapron M., Andrieu B., 1995. Computer stereo plotting for 3D reconstruction of a maize canopy. *Agric. For. Meteorol.*, **75**, 85-102.

Ivanov N., Boissard P., Chapron M., Valéry P., 1994. Estimation of the height and angles of orientation of the upper leaves in the maize canopy using stereovision. *Agronomie*, **2**, 183-194.

## J

---

Jackson R.D., Paul J., Pinter J.R., 1986. Spectral response of architecturally different wheat canopies. *Remote Sensing Environ.*, **20**, 43-56 .

Jacquemoud S., Baret F., Hanocq J.F., 1991. Validation d'un modèle de réflectance spectrale et directionnelle de sol. In *Mesures physiques et Signatures spectrales en télédétection*, Proc. of the 5<sup>th</sup> International Colloquium, Courchevel, France, 14-18/01/1991, ESA, Paris, pp. 427-430.

Jamieson P.D., Brooking I.R., Porter J.R., Wilson D.R., 1995. Prediction of leaf area in wheat: a question of temperature. *Field Crops Res.*, **41**, 35-44.

Jaquet E., 1988. *Test d'un itinéraire technique économique, adapté à des situations à faibles potentiels pour le blé d'hiver*. Mémoire de DAA de l'INA P-G, 99 pp.

Jensen R.D., 1971. Effects of soil water tension on the emergence and growth of cotton seedling. *Agron. J.*, **44**, 107-109.

Jeuffroy M.H., Recous S., 1998. Azodyn : a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilisation. *Soumis pour publication à Eur. J. Agron.*

Justes E., Mary B., Meynard J.M., Théliier-Huchel L., 1994. Determination of critical nitrogen dilution curve for wheat crops. *Ann. Bot.*, **74**, 397-407.

## K

---

Kimes D.S., 1984. Modelling the directional reflectance from complete homogeneous vegetation canopies with various leaf-orientation distributions. *J. Opt. Soc. Am.*, A1, 725-737.

Kiniry J.R., Jones C.A., O'Toole J.C., Blanchet R., Calbегuenne M., Spanel D.A., 1989. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. *Field Crops Res.*, 20, 51-64.

Klepper B., Rickman R.W., Peterson C.M., 1982. Quantitative characterisation of vegetative development in small cereal grains. *Agron. J.*, 75, 85-102.

Kollenkark J.C., Daughtry C.S.T., Bauer M.E., Housley T.L., 1982. Effects of cultural practices on agronomic reflectance characteristics of soybean. *Agron. J.*, 74, 751-758.

Kollenkark J.C., Venderbilt V.C., Daughtry C.S.T., Bauer M.E., 1982. Influence of solar illumination angle on soybean canopy reflectance. *Appl. Opt.*, 21, 1179-1184.

Kuusk A., 1994. A multispectral canopy reflectance model. *Remote Sensing Environ.*, 50, 75-82.

## L

---

Lang A.R.G., 1973. Leaf orientation of a cotton plant. *Agric. For. Meteorol.*, 11, 37-51.

Ledent J.F., 1976. Anatomical aspects of leaf angle changes during growth of wheat. *Phytomorphol.*, September, pp. 309-315.

Lemaire G., Cruz P., Gosse G., Chartier M., 1985. Etude des relations entre la dynamique de prélèvement d'azote et la dynamique de croissance en matière sèche d'un peuplement de luzerne (*Medicago sativa* L.) *Agronomie*, 5, 685-692.

Lemaire G., Gastal F., Plénet D., Lebot J., 1997. Le prélèvement d'azote par les peuplements végétaux et la production des cultures. In *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Lemaire G., Nicolardot B. (Eds.), Colloque INRA, 19-20/11/1996, Reims, INRA Editions, Paris, pp.121-139.

Lemaire G., Salette J., 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Etude de l'effet du milieu. *Agronomie*, 4, 423-430.

Lewis P., 1996. *A botanical plant modelling system for remote sensing simulation studies*. M. Phil. PhD. Thesis, Transfer, University College, London, 349 pp.

Lewis P., Boissard P., 1997. The use of 3D plant modelling and measurement in remote sensing. In *Physical Measurement and Signature in Remote Sensing*, 7<sup>th</sup> International. Symposium, INRA/ESA/CNES, Courchevel, 07-11/04/1997, Balkema, I, 319-326.

Lewis P., Muller J.P., 1990. Botanical plant modelling system for remote sensing simulation studies. *Proc. IGARSS 90*, 21-24/05/1990, Washington DC (USA), 3, 1739-1742.

Limaux F., 1990. Elaboration du rendement du blé d'hiver en Lorraine. *Journée agronomique Lorraine du 6 avril 1990*.

Lorgeou J., Limaux F., Koller R., 1996. Construction d'itinéraires techniques. Première étape: estimer les potentialités pour fixer les objectifs de rendement. *Comité potentialités ACTA/DERF*, 10/01/1996, pp.27-49.

## M

---

Maas S.J., 1988. Using satellite data to improve model estimates of crop yield. *Agron. J.*, **80**, 655-662.

Maas S.J., 1993a. Parametrized model of gramineous crop growth: I. Leaf area and dry mass simulation. *Agron. J.*, **85**, 348-353.

Maas S.J., 1993b. Parametrized model of gramineous crop growth: II Within-season simulation calibration. *Agron. J.*, **85**, 354-358.

Maas S.J., Jackson R.D., Idso S.B., Pinter P.J. Jr., Reginato R.J., 1989. Incorporation of remotely-sensed indicators of water stress in a crop growth simulation model. In *Preprint volume, 19<sup>th</sup> Conf. on Agricultural and Forest Meteorology*, 7-10/03/1989, Charleston, SC (USA), Am. Meteorol. Soc., Boston, pp. 228-231.

Malet P., 1996. Classifying the geometry of canopies from time variation of red and near-infrared reflectance. *Remote Sensing Environ.*, **56**, 164-171.

Malthus T.J., Andrieu B., Baret F., Clark J.A., Danson F.M., Jaggard K.W., Madeira A.C., Steven M.D., 1991. Candidate high spectral resolution derivative indices for the prediction of the crop cover. In *Mesures physiques et Signatures spectrales en télédétection*, Proc. of the 5<sup>th</sup> International Colloquium, Courchevel, France, 14-18/01/1991, ESA, Paris, pp. 205-208.

Masle J., 1980. *L'élaboration du nombre d'épis chez le blé d'hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière*. Thèse de l'INA P-G, 264 pp.

Masle J.G., Doussinault G., Farquhar G.D., Sun B., 1989. Foliar state in wheat correlates better to photothermal time than thermal time. *Plant Cell Environ.*, **12**, 235-247.

Masle J., Passioura J.B., 1987. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Aust. J. Plant Physiol.*, **14**, 643-656.

Masle-Meynard J., Sebillotte M., 1981. Etude de l'hétérogénéité d'un peuplement de blé d'hiver. I. Notion de structure de peuplement. *Agronomie*, **1**, 207-216.

Mayer D.G., Butler D.G., 1993. Statistical validation. *Ecol. Modelling*, **68**, 21-32.

McMaster G. 1997. Phenology, Development, and growth of the wheat (*Triticum aestivum* L.) shoot apex: a review. *Adv. Agron.*, **59**, 63-118.

Meynard J.M., 1983a. Le raisonnement de la fumure azotée du blé d'hiver par le bilan prévisionnel - Perspectives et limites d'application. *Agro*, **II**, 17-33.

Meynard J.M., 1983b. Perspectives pour la conduite des blés clairs. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **49**, 830-839.

Meynard J.M., 1985. Les besoins en azote du blé d'hiver jusqu'au début de la montaison. *Agronomie*, **5**, 579-589.

Meynard J.M., Aubry C., 1988. Itinéraires techniques du blé en conditions d'excès d'eau. *Persect. agric.*, 126, 80-89.

Meynard J.M., Limaux F., 1987. Prévision des rendements et conduite de la fertilisation azotée - Cas du blé d'hiver. *C.R Acad. Agric. Fr.*, 73, 117-132.

Meynard J.M., Papy F., 1993. Quels changements dans les systèmes de grande culture dus à la nouvelle Politique Agricole Commune ? *In Réforme de la Politique Agricole Commune et Systèmes de Production*, Blanchet J., Carles R. (Eds.), INRA-ESR, Actes et Communications, 10, 169-192.

Meynard J.M., Boiffin J., Caneill J., Sebillotte M., 1981. Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse. II. Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie*, 1, 795-806.

Meynard J.M., Justes E., Machet J.M. et Recous S., 1996. Fertilisation azotée des cultures annuelles en plein champ. *In Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Lemaire G., Nicolardot B. (Eds.), Colloque INRA, 19-20/11/1996, Reims, INRA Editions, Paris, pp.1-10.

Meynard J.M., Aubry C., Justes E., Le Bail M., 1997. Nitrogen diagnosis and decision support. *In Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Lemaire G. (Ed.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 147-161.

Monteith J.L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. appl. Ecol.*, 9, 747-766.

Monteith J.L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R Soc. London B.*, 281, 277-294.

Moulia B., 1993. *Etude mécanique du port foliaire du maïs (Zea mays L.)*. Thèse de Docteur de l'Université de Bordeaux I, UFR de Physique, 123 pp. + annexes.

Moulia B., Sinoquet H., 1993. Three-dimensional digitizing systems for plant canopy geometrical structure : a review. *In Crop structure and light microclimate. Characterization and applications*. Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H. (Eds.), INRA Editions, Paris, pp.183-193.

## N

---

Néel C., 1996. *Modélisation couplée du transfert et des transformations de l'azote: paramétrisation et évaluation d'un modèle en sol nu*. Thèse de Docteur de l'Université de Paris VI, Sciences de la Terre, 254 pp. + annexes.

## O

---

O'Leary G.J., Connor D.J., 1996. A simulation model of wheat crop in response to water and nitrogen supply: I. Model construction. *Agric. Systems*, 52, 1-29.

## P

---

Pachepsky Y.A., Acock B., 1997. Holes in precision farming: Spatial variability of essential soil properties. *In Precision Agriculture '97, Vol. I: Spatial variability in soil and crop*. 1<sup>st</sup> European Conf. on Precision Agriculture, 07-10/09/1997, Warwick (UK), Stafford J.V. (ed.), SCI, London, pp. 163-170.

- Pearson R.L., Miller L.D., 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass Prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. *Proc. of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment*, ERIM, Ann Arbor, Mi (USA), pp. 1357-1381.
- Petersen C., 1989. A spectral reflectance index of developing crop largely independent of cloud cover and soil surface wetness. *Acta Agric. Scand.*, 39, 465-476.
- Plas D., Meynard J.M., Delphin A., Taureau J.C., Bouthier A., 1994. Terres de Groie: un raisonnement original de la fertilisation azotée. *Perspect. agric.*, 97, 73-77.
- Porter J.R., 1984. A model of canopy development in winter wheat. *J. agric. Sci. (Cambridge)*, 102, 383-392.
- Porter J.R., 1985. Models and mechanisms in the growth and development of wheat. *Outlook Agric.*, 14, 190-196.
- Porter J.R., 1993. AFRCWHEAT2: a model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *Eur. J. Agron.*, 2, 69-82.
- Porter J.R., Jamieson P.D., Wilson D.R., 1993. Comparison of the wheat simulation models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat and SWHEAT for non-limiting conditions of crop growth. *Field Crops Res.*, 33, 131-157.
- Prévot L., Aries F., Monestiez P., 1991. Modélisation de la structure géométrique du maïs. *Agronomie*, 11, 491-503.
- Price J.C., 1992. Estimating vegetation amount from visible and near infrared reflectances. *Remote Sensing Environ.*, 41, 29-34.
- Price J.C., Bausch W.C., 1995. Leaf area index estimation from visible and near infrared reflectance data. *Remote Sensing Environ.*, 52, 55-65.

## R

---

- Recous S., Jeuffroy M.-H., Mary B., Meynard J.M., 1996. *Gestion de l'azote en zone d'agriculture intensive*. Rapport de synthèse, 37 pp.
- Recous S., Loiseau P., Machet J.M., Mary B., 1997. Transformation et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies. In *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Colloque INRA, Reims, 19-20/11/1996, Lemaire G., Nicolardot B. (Eds.), INRA Editions, Paris, pp. 105-120.
- Richardson A.J., Wiegand C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Engin. Remote Sensing*, 43, 1541-1552.
- Richardson A.J., Wiegand C.L., Arkin G.F., Nixon P.R., Gebermann A.H., 1982. Remotely-sensed spectral indicators of sorghum development and their use in growth modeling. *Agric. Meteorol.*, 26, 11-23.
- Robert M., 1996. *Modulation des conduites culturales à partir des hétérogénéités intra-parcellaires. Cas de la fertilisation azotée des céréales à paille dans le Bassin Parisien*. Thèse de l'INA P-G, 164 pp + annexes.

Robert P.C., Rust R.H., Larson W.E. (Eds.), 1996. Precision agriculture. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Conf.*, 23-26/06/1996, Minneapolis, Minnesota (USA), American Society of Agronomy, Madison, 1222 pp.

Rosenthal W.D., Gerik T.J., Wade L.J., 1993. Radiation use efficiency among grain sorghum cultivars and plant densities. *Agron. J.*, **85**, 703-705.

Rouse J.W., Haas R.H., Schelle J.A., Deering D.W., Harlan J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. In *NASA/GSFC, Type III, Final Report*, Greenbelt, Md. (USA), 371 pp.

Rudorff B.F.T., Batista G.T., 1990. Spectral response of wheat and its relationship to agronomical variables in tropical region. *Remote sensing Environ.*, **31**, 53-63.

## S

---

Schneider E.C., Gupta S.C., 1985. Corn emergence as influenced by soil temperature, matric potential and aggregate size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49**, 415-422.

Sebillotte M., 1985. Rôles de l'azote dans le comportement d'un peuplement de céréales. Réflexions sur les approches de l'agronome. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **71**, 292-301.

Sinclair TR., Amir J., 1992. A model to assess nitrogen limitations on the growth and yield of spring wheat. *Field Crops Res.*, **30**, 63-78.

Sinoquet H., Andrieu B., 1993. The geometrical structure of plant canopies : characterization and direct measurement methods. In *Crop structure and light microclimate. Characterization and applications*. Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H. (Eds.), INRA Editions, Paris, pp.131-158.

Spiertz J.H.J., 1977. The influence of temperature and light intensity on grain growth in relation to the carbohydrate and nitrogen economy of the wheat plant. *Neth. J. Agric. Sci.*, **25**, 182-197.

Stafford J.V. (Ed.), 1997. *Precision Agriculture '97. Volume 1: Spatial variability in soil and crop*. 1<sup>st</sup> European Conf. on Precision Agriculture, 07-10/09/1997, Warwick (UK), SCI, London, Vol. 1, 447 pp.

Stafford J.V. (Ed.), 1997. *Precision Agriculture '97. Volume 2: Technology, IT and management*. 1<sup>st</sup> European Conf. on Precision Agriculture, 07-10/09/1997, Warwick (UK), SCI, London, Vol. 2, 997 pp.

Steinmetz S., Guerif M., Delecolle R., Baret F., 1990. Spectral estimates of absorbed photosynthetically active radiation and light-use efficiency of a winter wheat crop subject to nitrogen and water deficiencies. *Int. J. Remote Sensing*, **11**, 1797-1808.

## T

---

Taureau J.C., 1987. Fournitures du sol mesurées et calculées: conséquences. *Perspect. agric.*, **115**, 59-69.

Thomsen A., Schelde K., Heidmann T., Hougaard H., 1997. Mapping of field variability in crop development and water balance within a field with highly variable soil conditions. In *Precision Agriculture '97, Vol. I: Spatial variability in soil and crop*. 1<sup>st</sup> European Conf. on Precision Agriculture, 07-10/09/1997, Warwick (UK), Stafford J.V. (ed.), SCI, London, pp. 189-196.

Tollenaar M., Bruulsema T.W., 1988. Efficiency of maize dry matter production during periods of leaf area expansion. *Agron. J.*, 80, 580-585.

Trenbath B.R., Angus J.F., 1975. Leaf inclination and crop production. *Field Crop Abstr.*, 28, 231-234.

Tucker C.J., Holben B.N., Elgin J.H., McMurtey J.E., III, (???) 1980. Relationship of spectral data to grain yield variation. *Photogramm. Engin. Remote Sensing*, 46, 657-666.

## U

---

Uenk D., Bouman B.A.M., Kasteren H.W.J., 1992. *Reflectiemetingen aan landbouwgewassen*. CABO-DLO, Wageningen, The Netherlands, 56 pp.

## V

---

Valéry P., Boissard P., Akkal N., Belluomo P., 1998. Developing a close range photogrammetric approach to estimate 3D structure parameters of wheat and corn. Soumis pour publication à *Photogramm. Engin. Remote Sensing*.

Varlet-Granchet C., Bonhomme R., Chartier M., Gosse G., Artis P., 1982. Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Oecol. Plant.*, 3, 3-26.

Varlet-Granchet C., Gosse G., Chartier M., Sinoquet H., Bonhomme R., Allirand J.M., 1989. Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 9, 419-439.

Verhoef W., 1984. Earth scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling : the SAIL model. *Remote Sensing Environ.*, 16, 125-141.

## W

---

Warren-Wilson J., 1960. Inclined point quadrat. *New Phytol.*, 58, 92-101.

Weigand C.L., Richardson A.J., Kanemasu E.T., 1979. Leaf area estimates for wheat from Landsat and their implications for evapotranspiration and crop modeling. *Agron. J.*, 71, 336-342 .

Weixing C., Dale N., Moss., 1989. Temperature effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Sci.*, 29, 1018-1021.

Whalley W.R., Stafford J.V., 1992. Real-time sensing of soil content from mobile machinery: Option for sensor design. *Comput. Electron. Agric.*, 7, 269-284.

Wilhelm W.W., McMaster G.S., 1995. Importance of the phyllochron in studying development and growth in grasses. *Crop Sci.*, 35, 1-3.



Williams J.R., Jones C.A., Kiniry J.R., Spanel D.A., 1989. The EPIC crop growth model. *Trans. ASAE*, 32, 497-511.

**Y**

---

Yunusa I.A.M., Siddique K.H.M., Belford R.K., Karimi M.M., 1993. Effect of canopy structure on efficiency of radiation interception and use in spring wheat cultivars during pre-anthesis period in a mediterranean-type environment. *Field Crops Res.*, 35, 113-122.

**Z**

---

Zibordi G., Voss K.J., 1989. Geometrical and spectral sky radiance: comparison between simulations and field measurements. *Remote Sensing Environ.*, 27, 343-358.

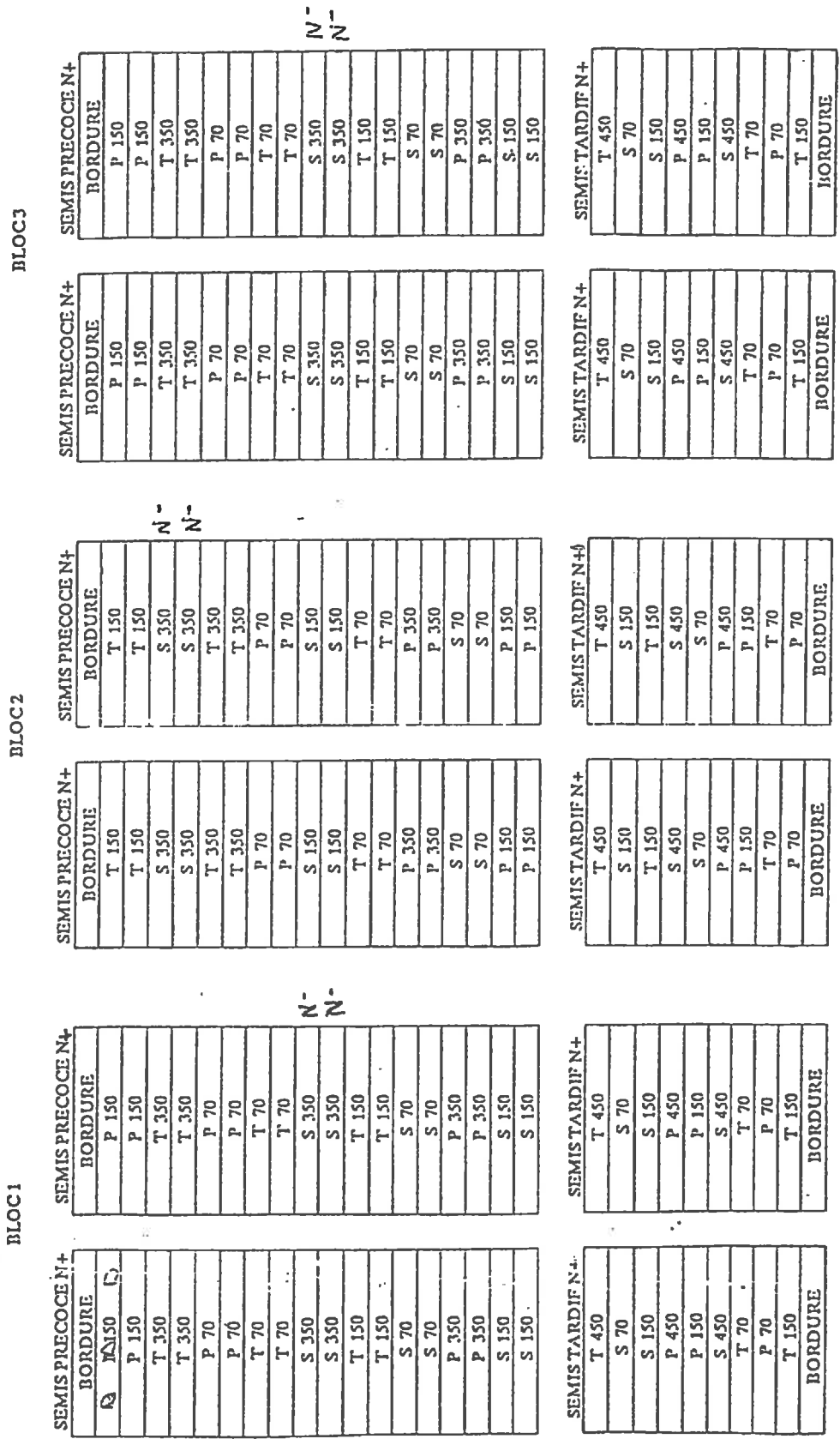
**ANNEXES**

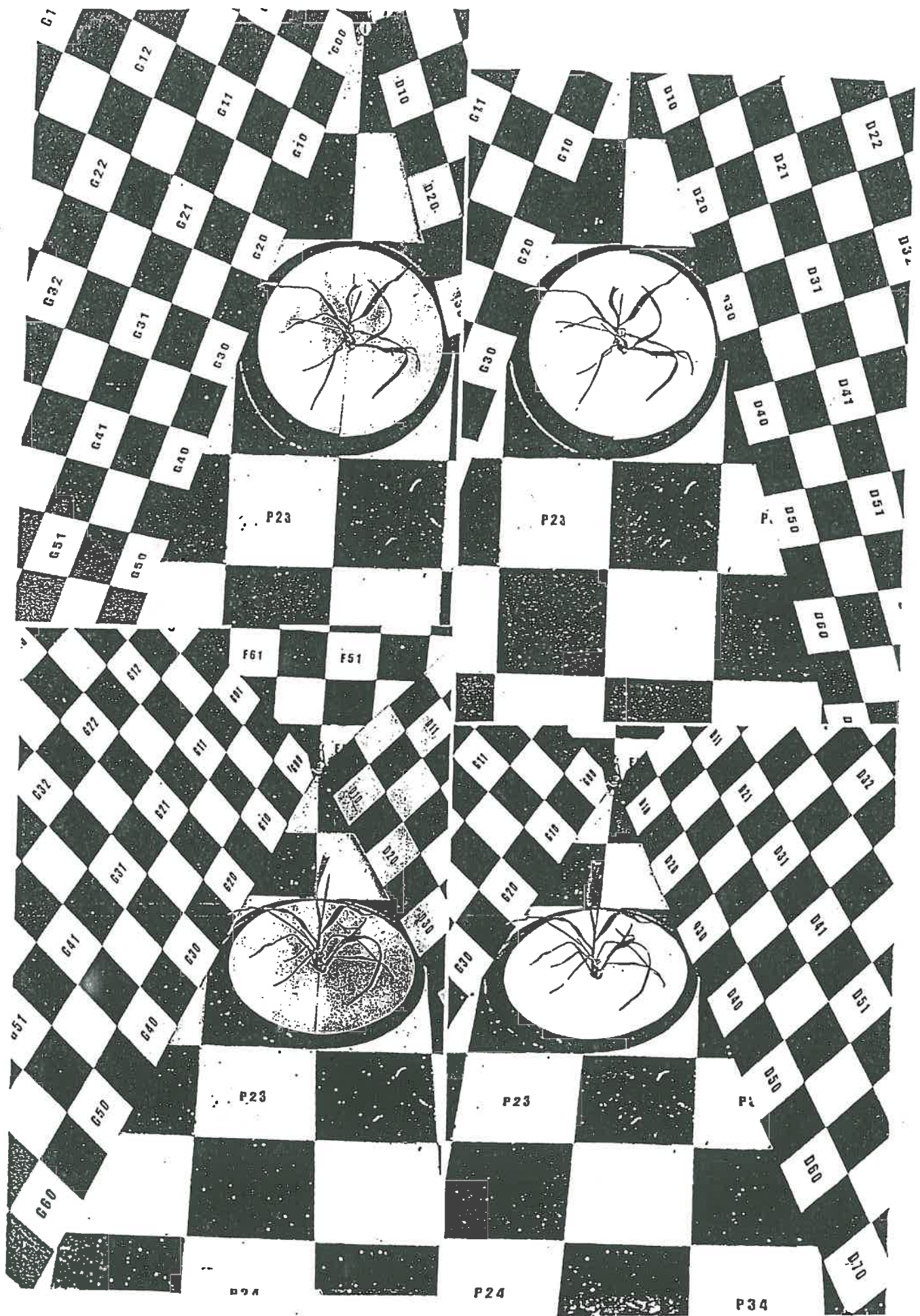
**PREMIÈRE PARTIE :**

**ANNEXES CHAPITRE 3**

### Annexe I-3.1. Dispositif expérimental de 1995

Densité de peuplement : 70, 150, 350, semis précoce ; 450, semis tardif ; P : Pernel – S : Soissons – T : Thésée  
 N+ : Sans carence – N- : Zéro apport au tallage, avec levée de la carence au stade (T + E) = 1 cm  
 En semis précoce, un train sur deux est destiné à la récolte (mi-octobre) ; en semis tardif, un sous-bloc est destiné à la récolte (mi à fin novembre)



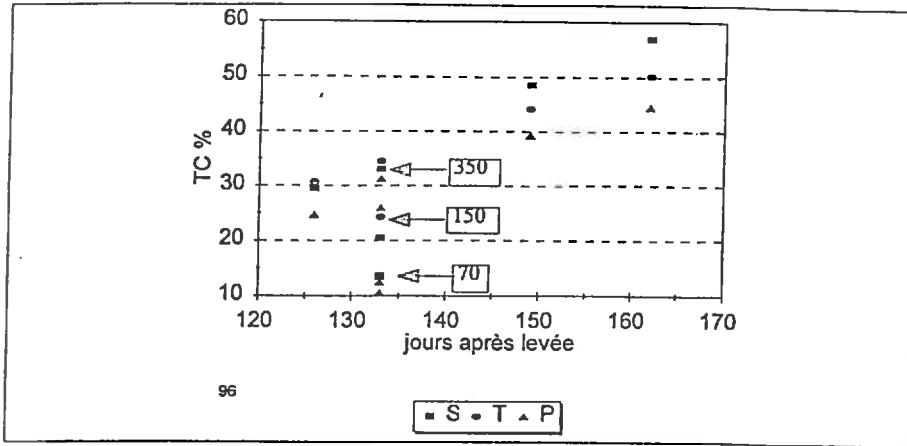


*Annexe I-3.2. Vues stéréo (gauche et droite) de la même plante  
(à la verticale, en haut ; à l'oblique, en bas)*

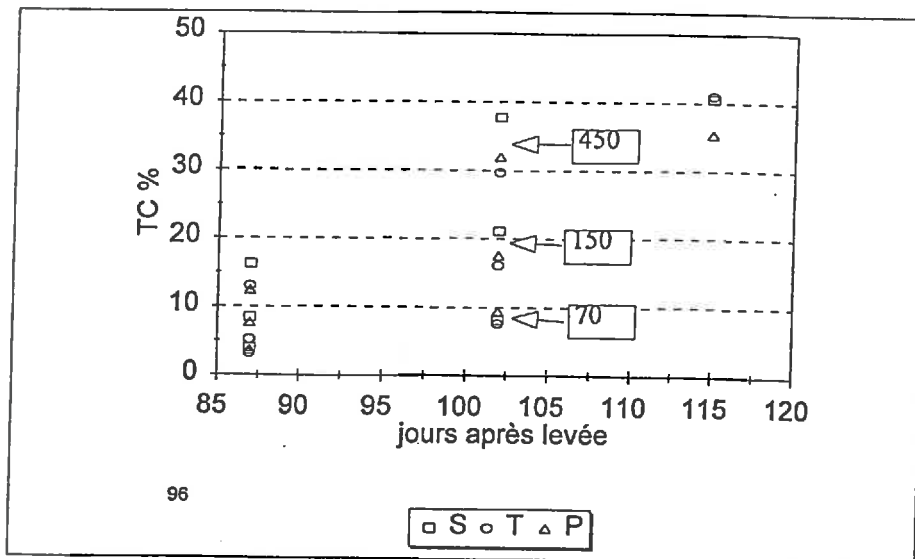


**DEUXIÈME PARTIE :**

**ANNEXES CHAPITRE 1**

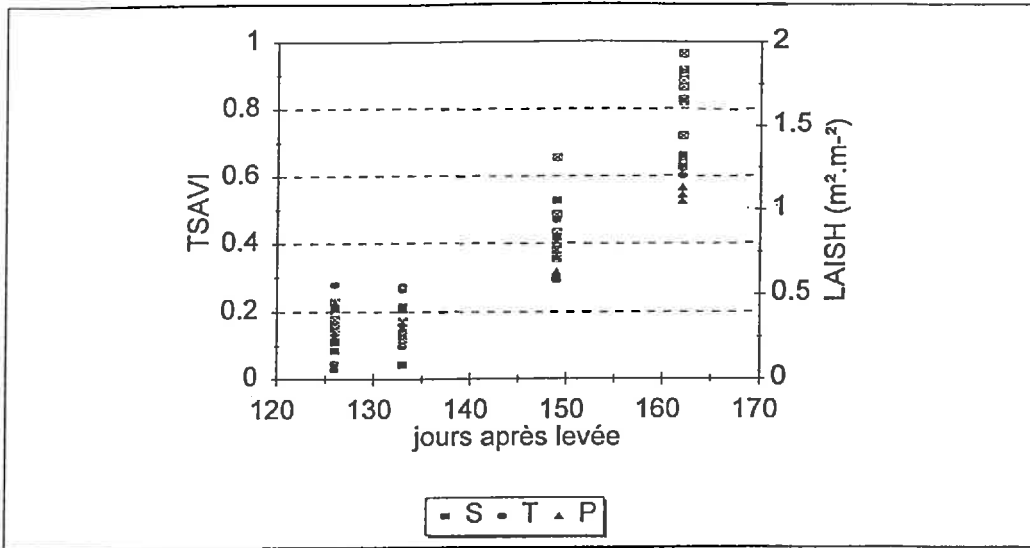


*Annexe II-1.1. Evolution du taux de couverture du sol des 3 variétés (Soissons (S), Thésée (T), Pernel (P) ; densités 70, 150, 350 p/m² ; semis précoce ; essai 1996)*

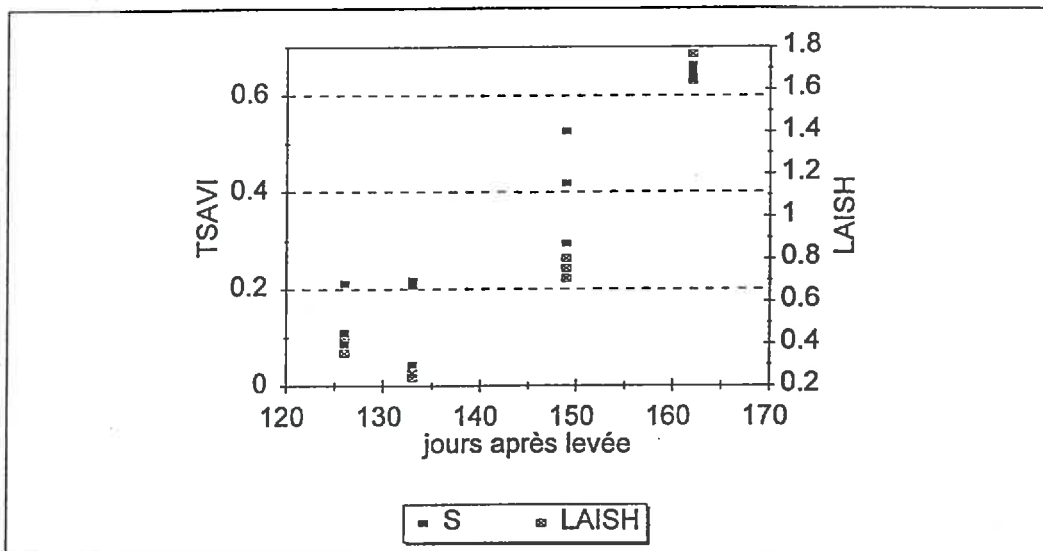


*Annexe II-1.2. Evolution du taux de couverture du sol des 3 variétés (Soissons (S), Thésée (T), Pernel (P) ; densités 70, 150, 350 p/m² ; semis tardif ; essai 1996)*



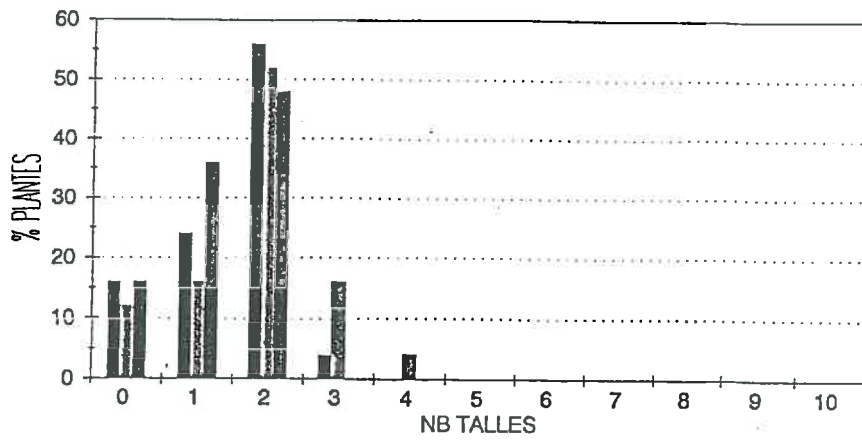


Annexe II-1.3. Evolution du TSAVI et de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{SH}$ ) des 3 variétés (Soissons (S), Thésée (T), Pernel (P) ; densités 70, 150, 350 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce ; essai 1996)

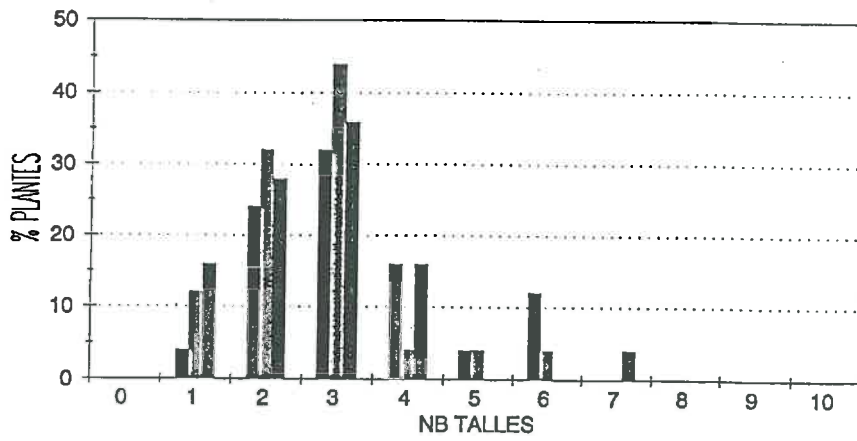


Annexe II-1.4. Evolution du TSAVI et de l'indice foliaire en sortie d'hiver ( $LAI_{SH}$ ) de Soissons (S) (densité 150 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce ; essai 1996)

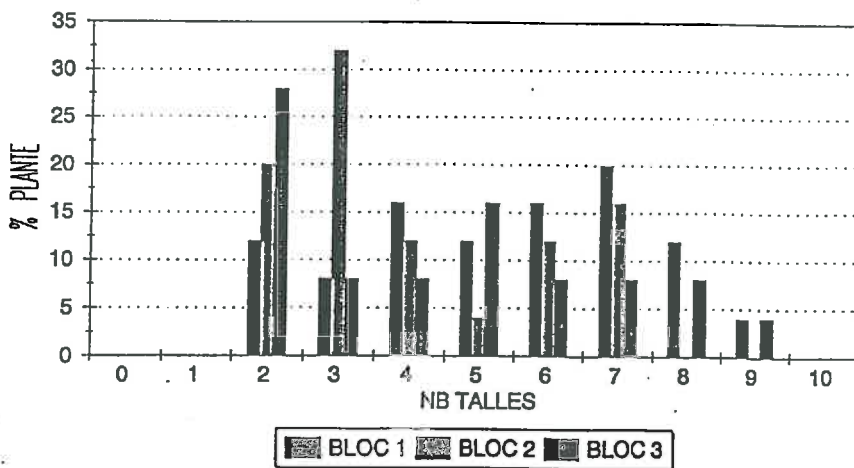
P350



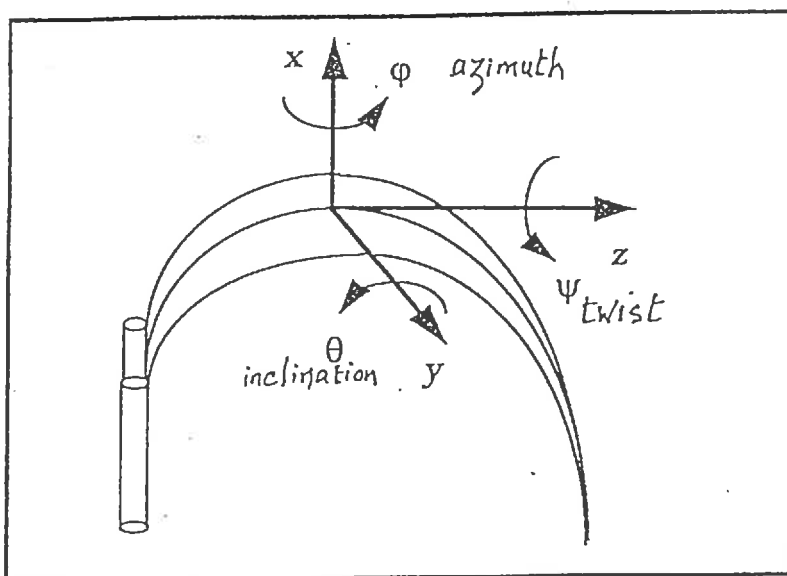
P150



PERNEL 70

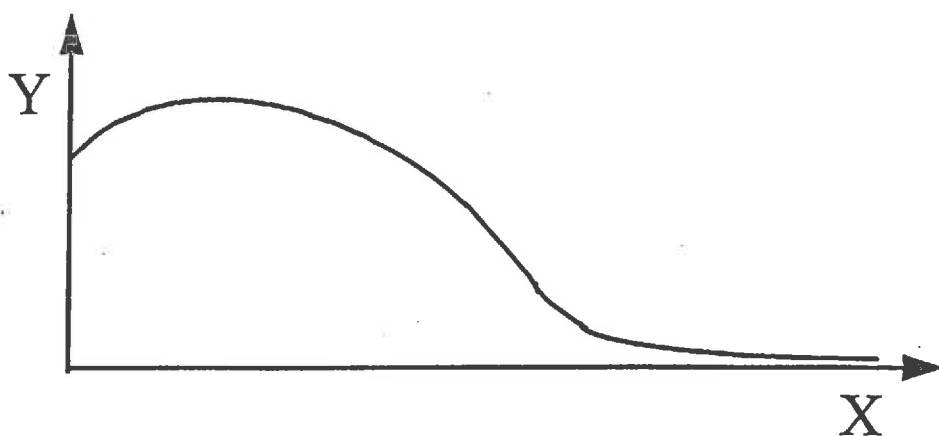


Annexe II-1.5. Histogrammes de la population de plantes en fonction du nombre de talles (Pernel (P) ; densités 70, 150, 350 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce ; essai 1995)



**Annexe II-1.6. Repère local utilisé par le BPMS :**

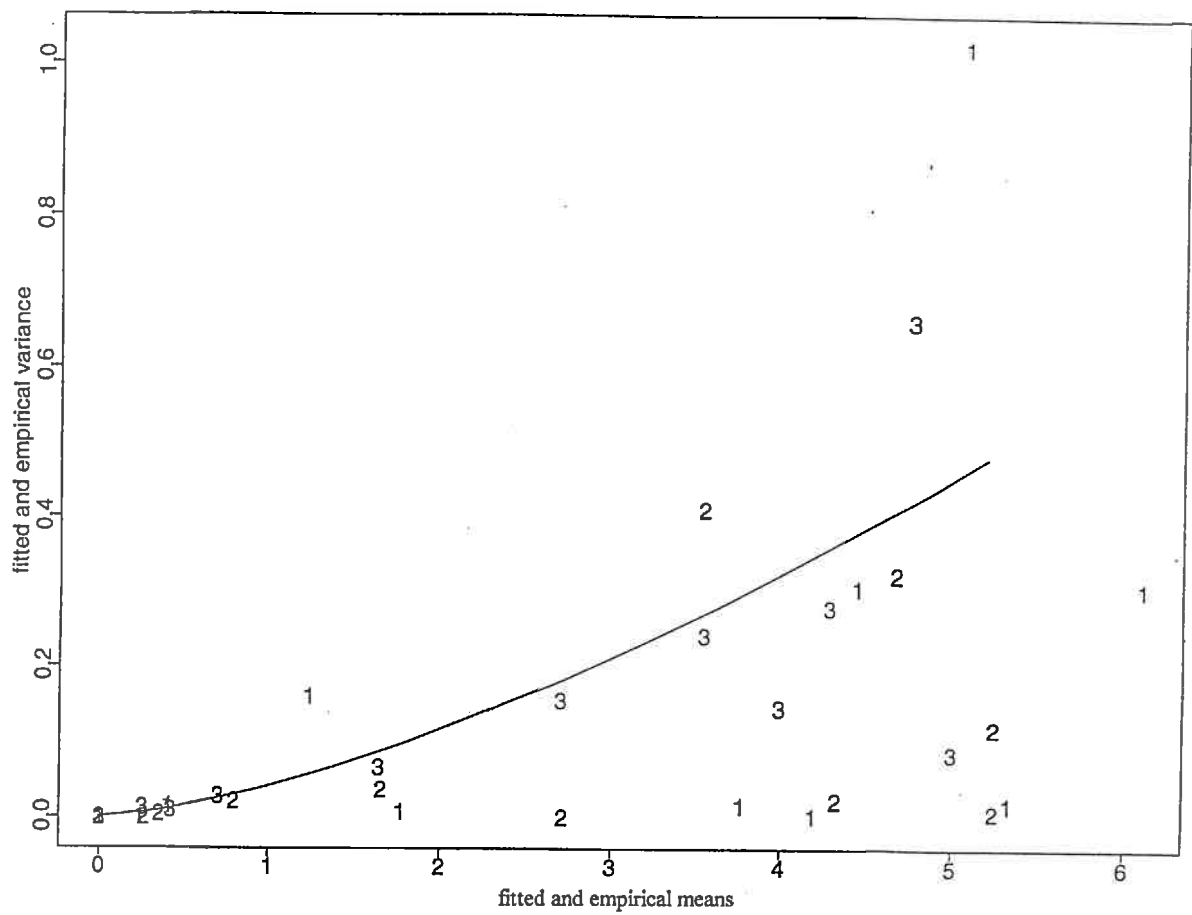
*L'axe "z" est l'axe de croissance principal. Une rotation autour de celui-ci est appelée "Torsion" (Twist).  
 Une rotation autour de l'axe "x", normale à la feuille, est une "Variation d'azimut".  
 Une variation d'inclinaison est, quant à elle, une rotation autour de l'axe "y"*



**Annexe II-1.7. Modélisation de la forme du limbe tenant compte du contact avec le sol :  
 raccordement d'un arc parabolique et d'un arc de cercle**

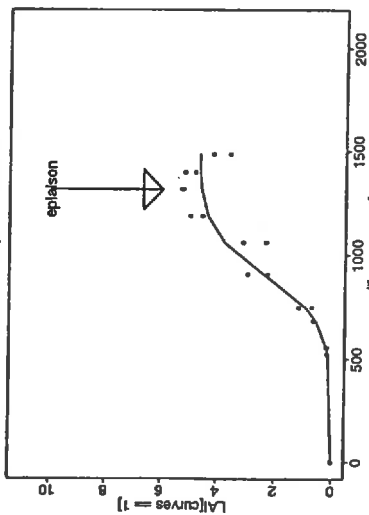
**DEUXIÈME PARTIE :**

**ANNEXES CHAPITRE 2**

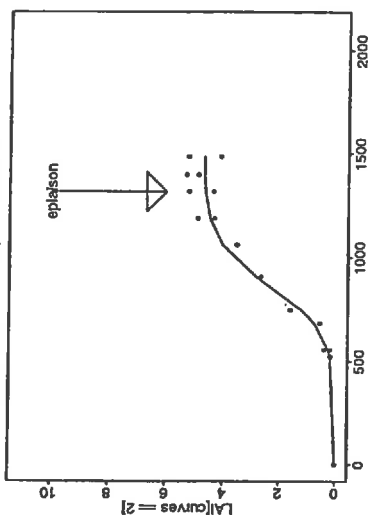


*Annexe II-2.1. Variance estimée et empirique en fonction de la moyenne estimée et empirique*

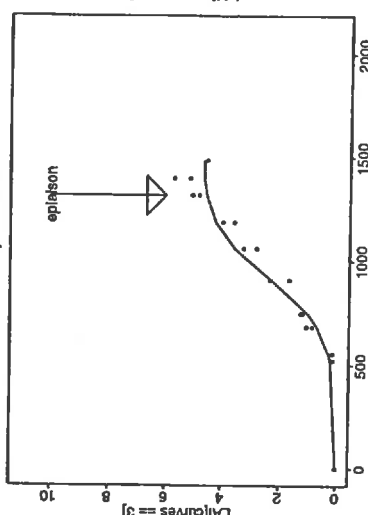
thesee.70.p - bloc 1



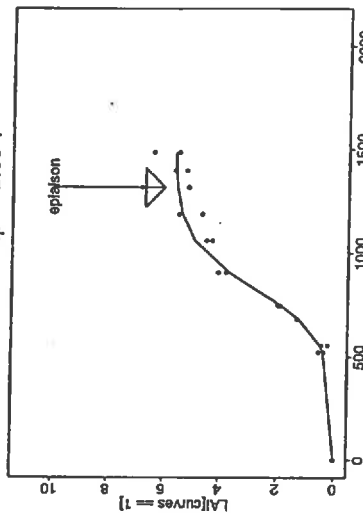
thesee.70.p - bloc 2



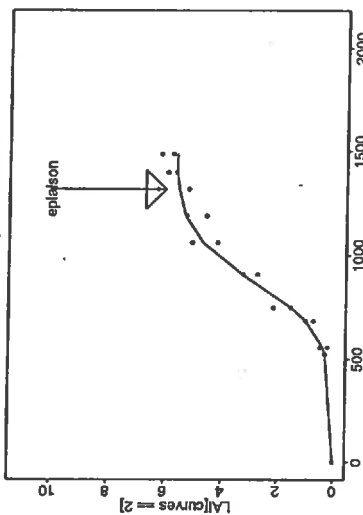
thesee.70.p - bloc 3



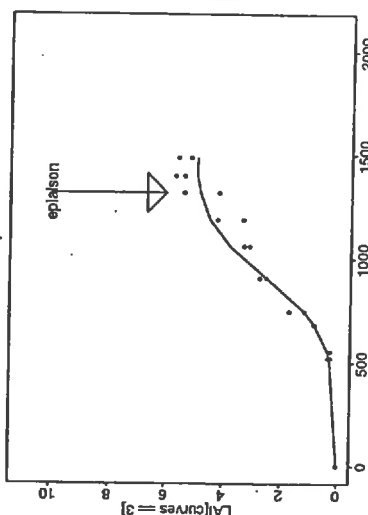
thesee.150.p - bloc 1



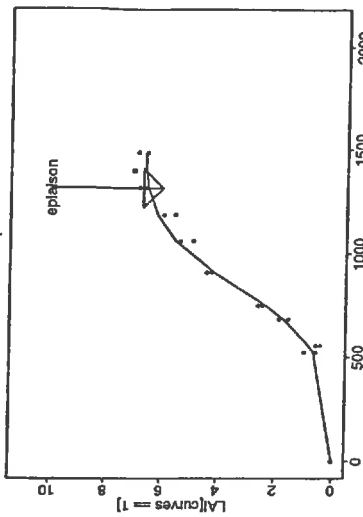
thesee.150.p - bloc 2



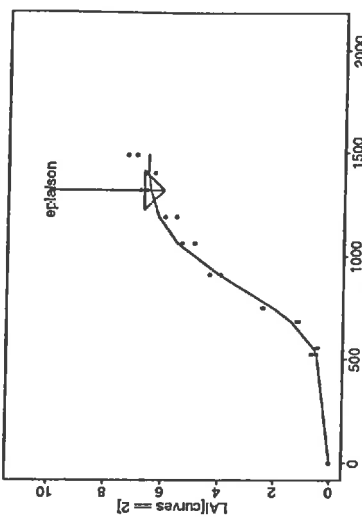
thesee.150.p - bloc 3



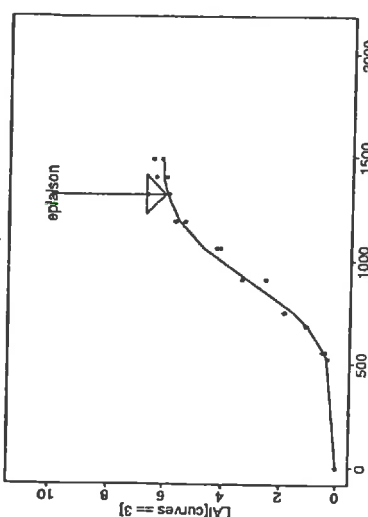
thesee.350.p - bloc 1



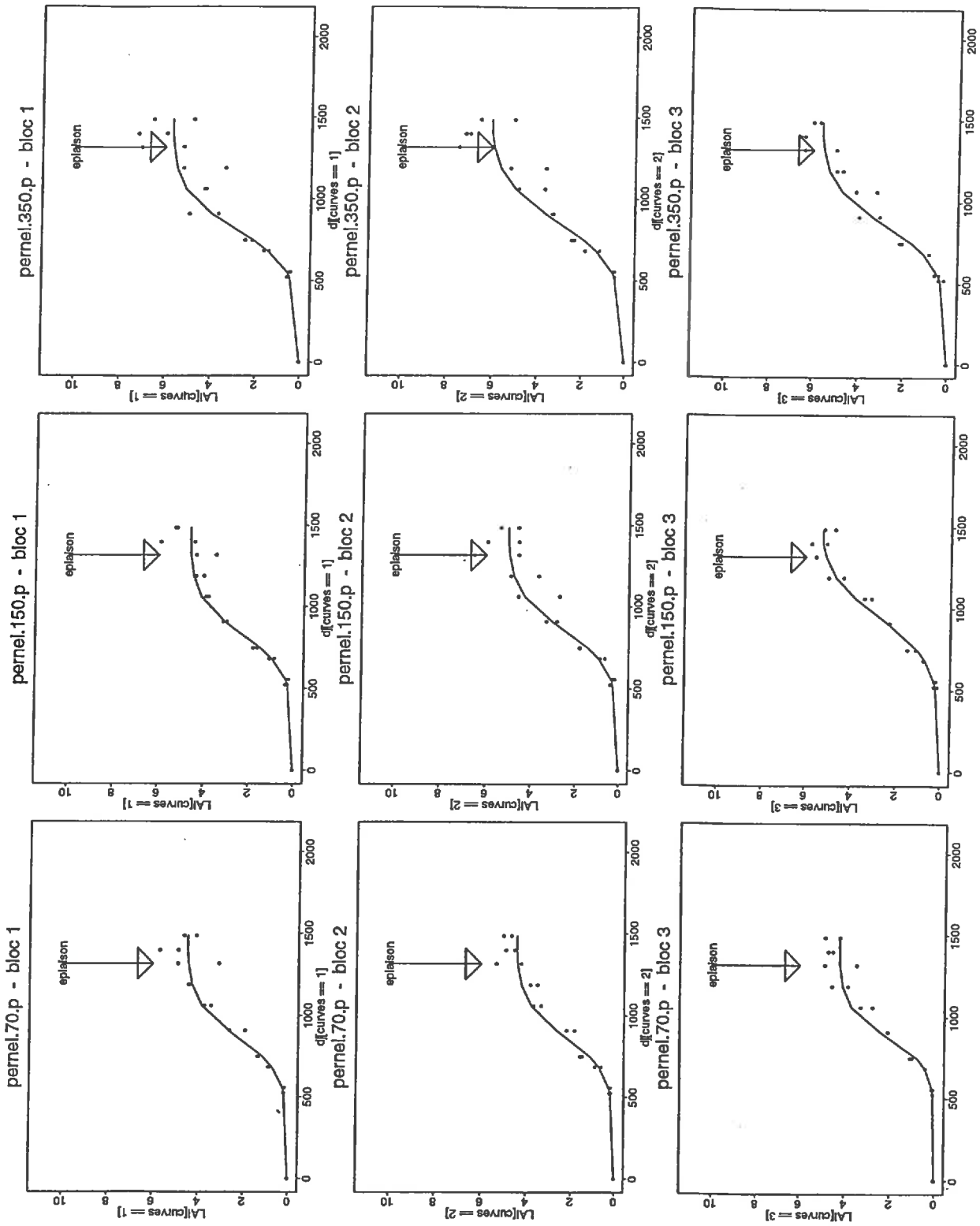
thesee.350.p - bloc 2



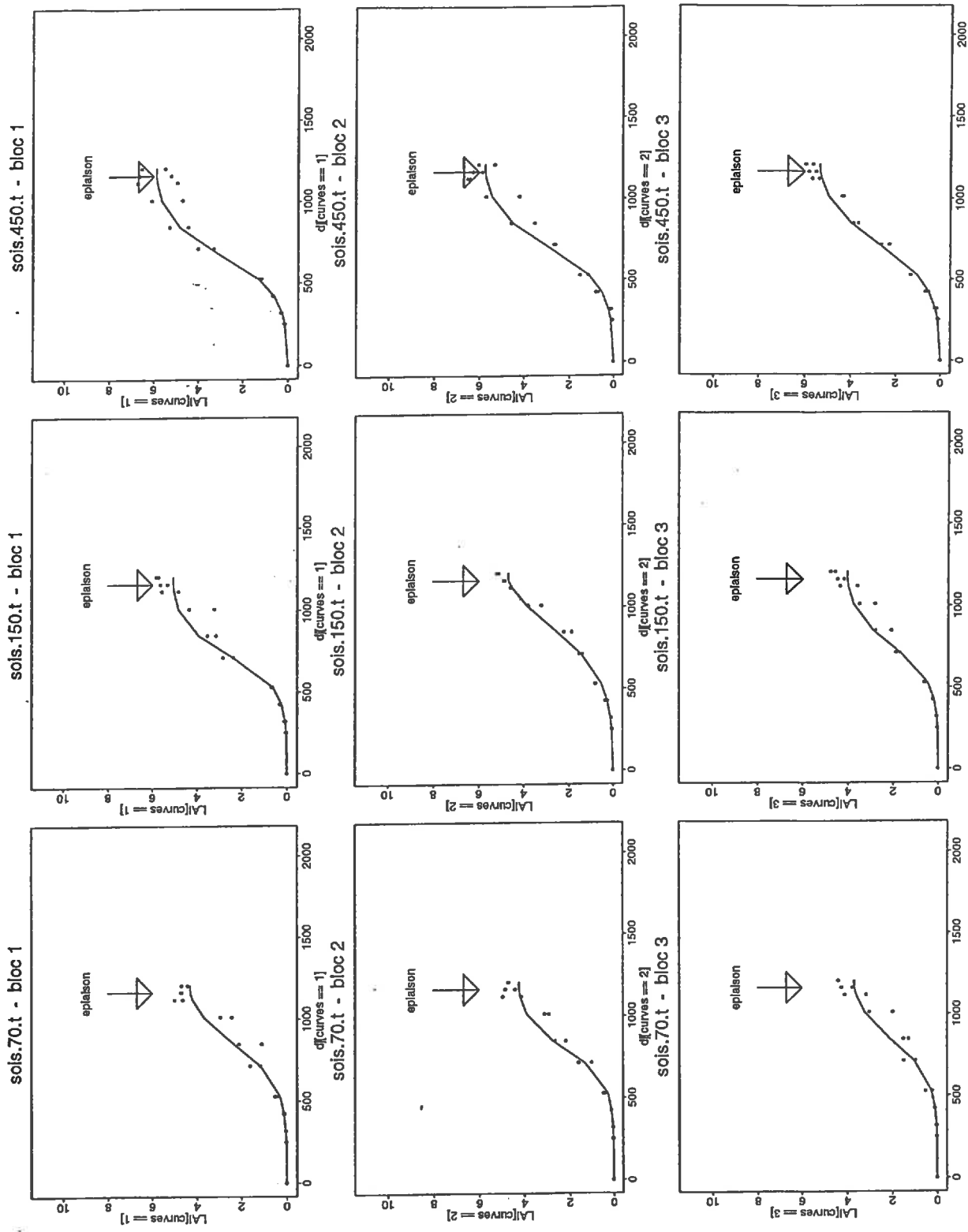
thesee.350.p - bloc 3



**Annexe II-2.3. Confrontation entre les courbes ajustées et les valeurs observées  
(Thésée ; densités 70, 150, 350 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce ; essai 1996)**

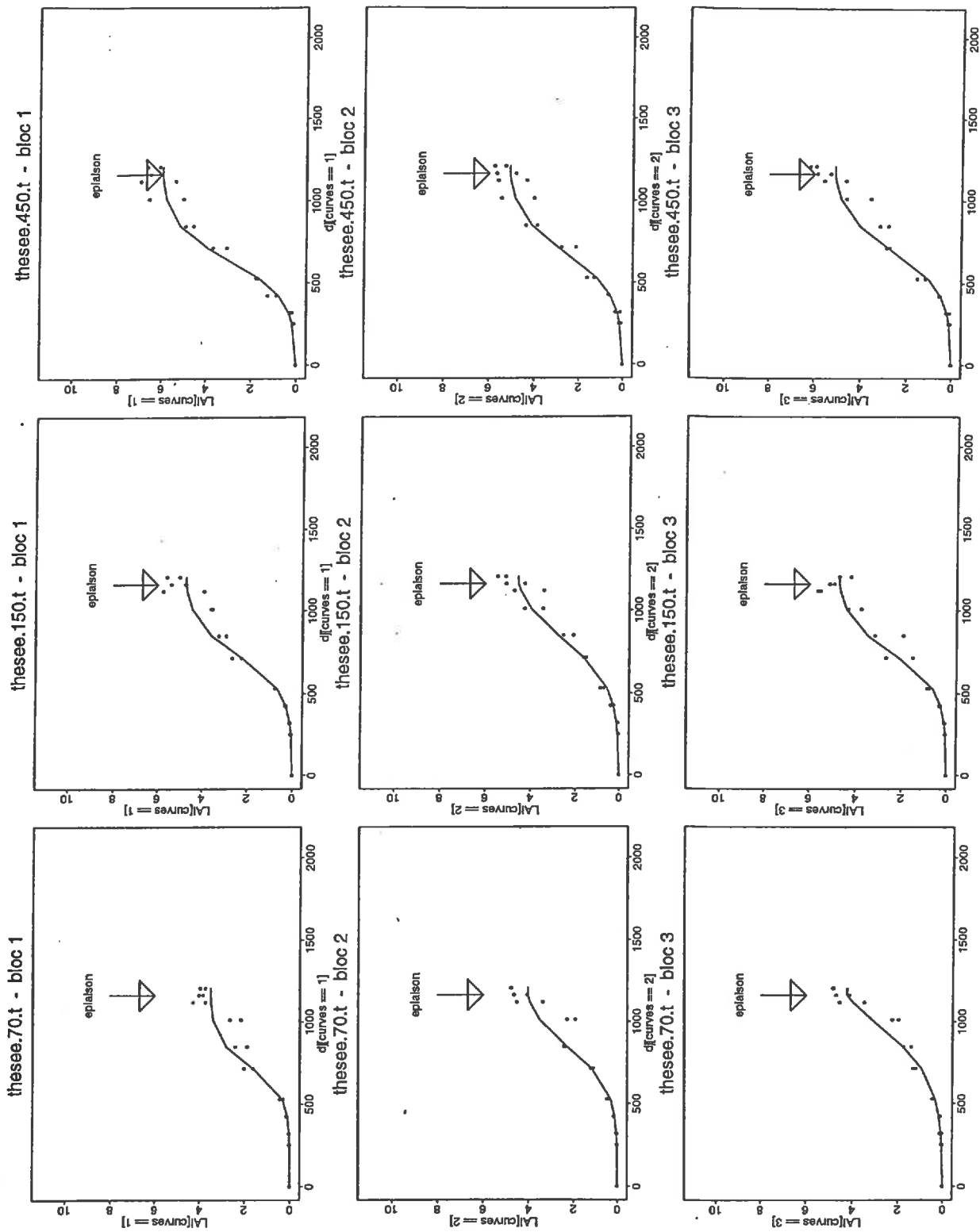


*Annexe II-2.4. Confrontation entre les courbes ajustées et les valeurs observées  
(Pernel ; densités 70, 150, 350 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce ; essai 1996)*

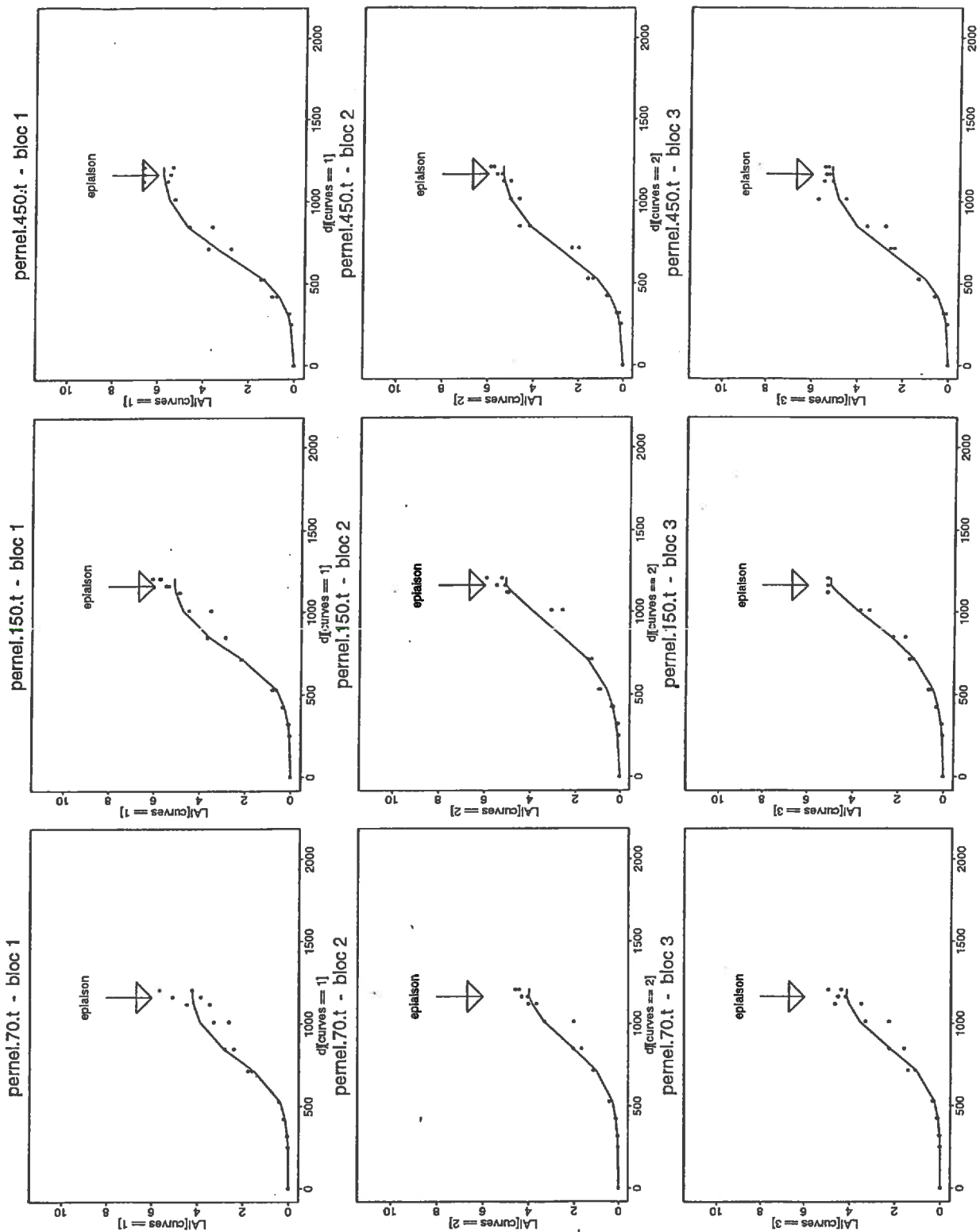


*Annexe II-2.5. Confrontation entre les courbes ajustées et les valeurs observées  
(Soissons ; densités 70, 150, 450 p/m<sup>2</sup> ; semis tardif ; essai 1996)*

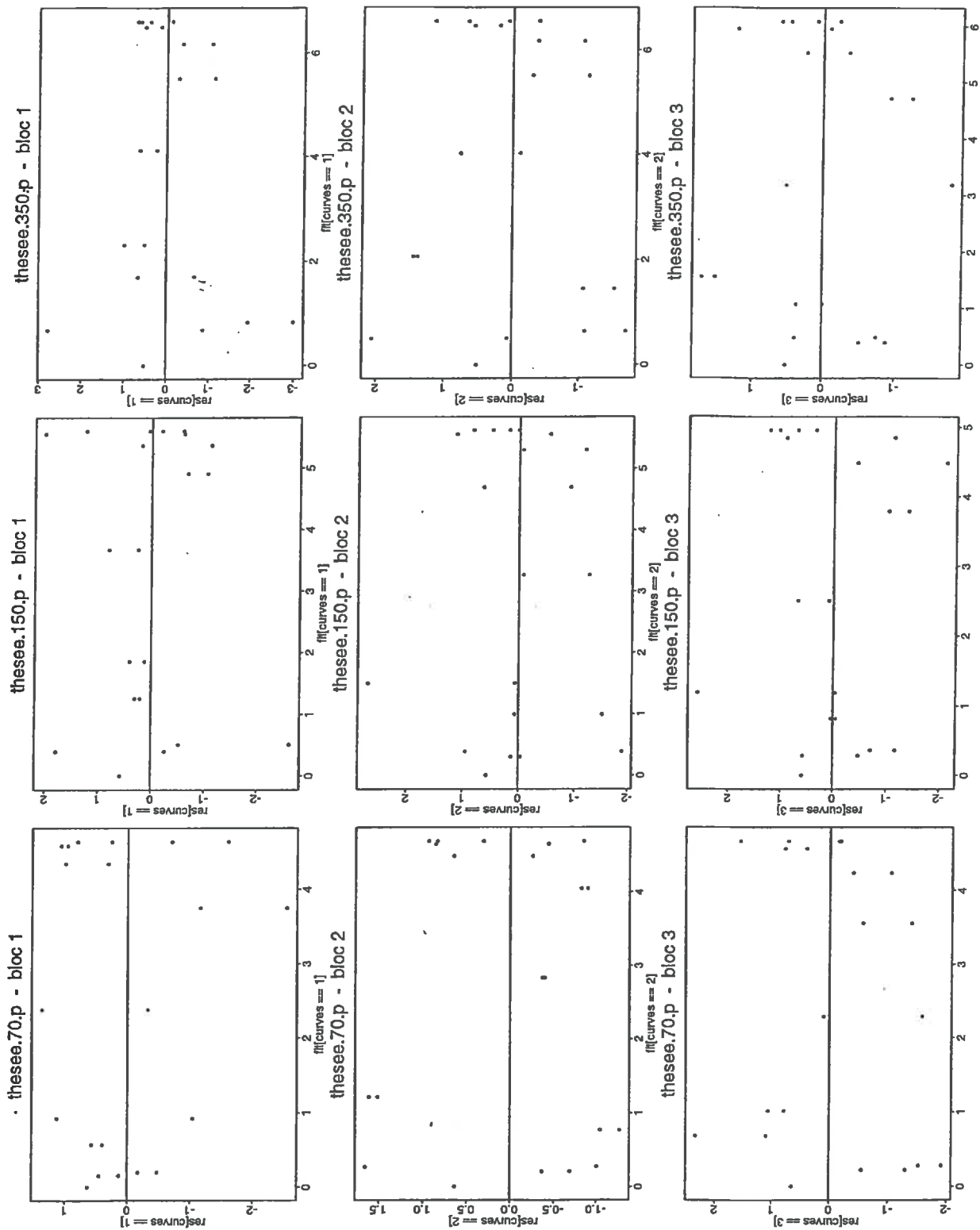




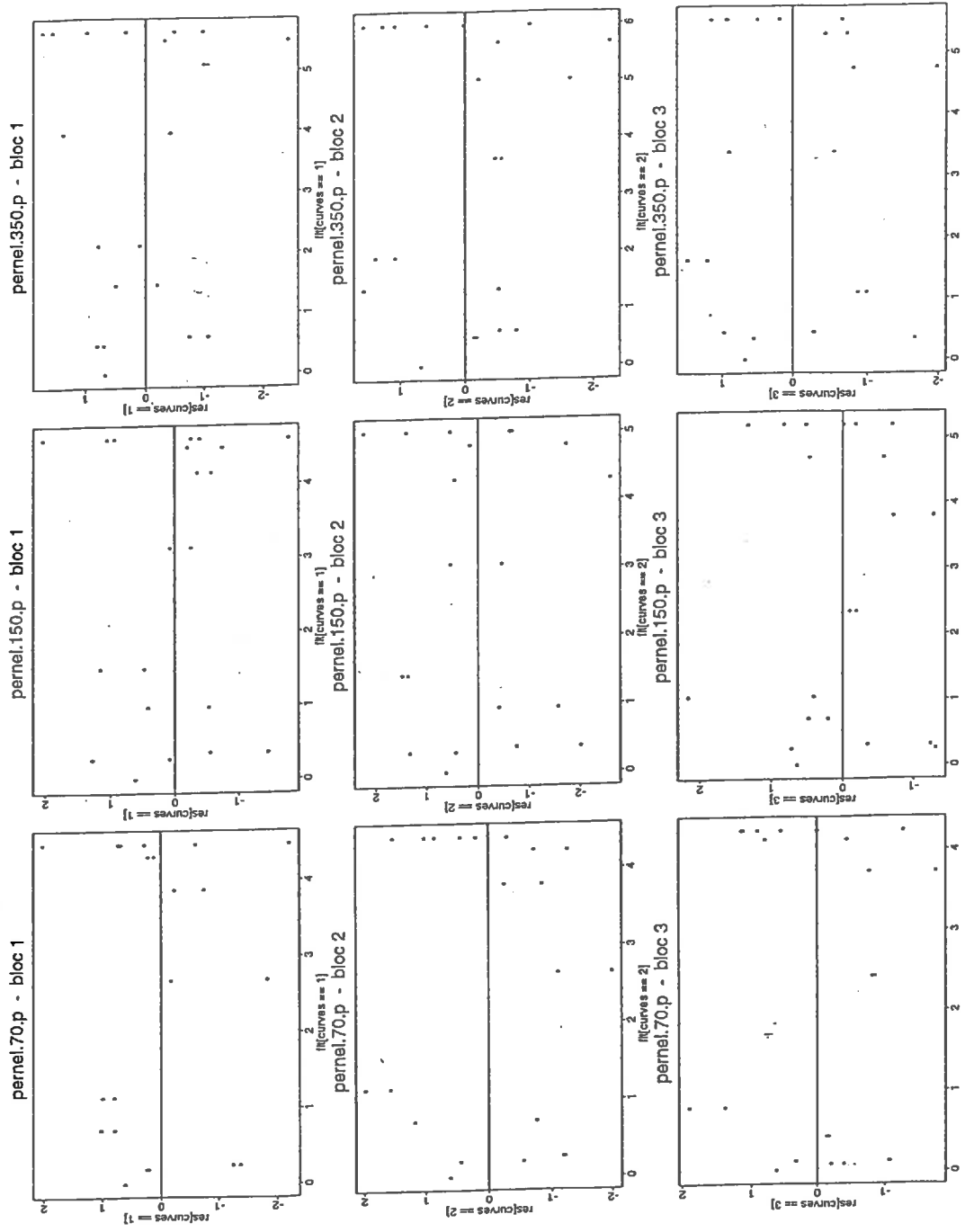
*Annexe II-2.6. Confrontation entre les courbes ajustées et les valeurs observées (Thésée ; densités 70, 150, 450 p/m<sup>2</sup> ; semis tardif ; essai 1996)*



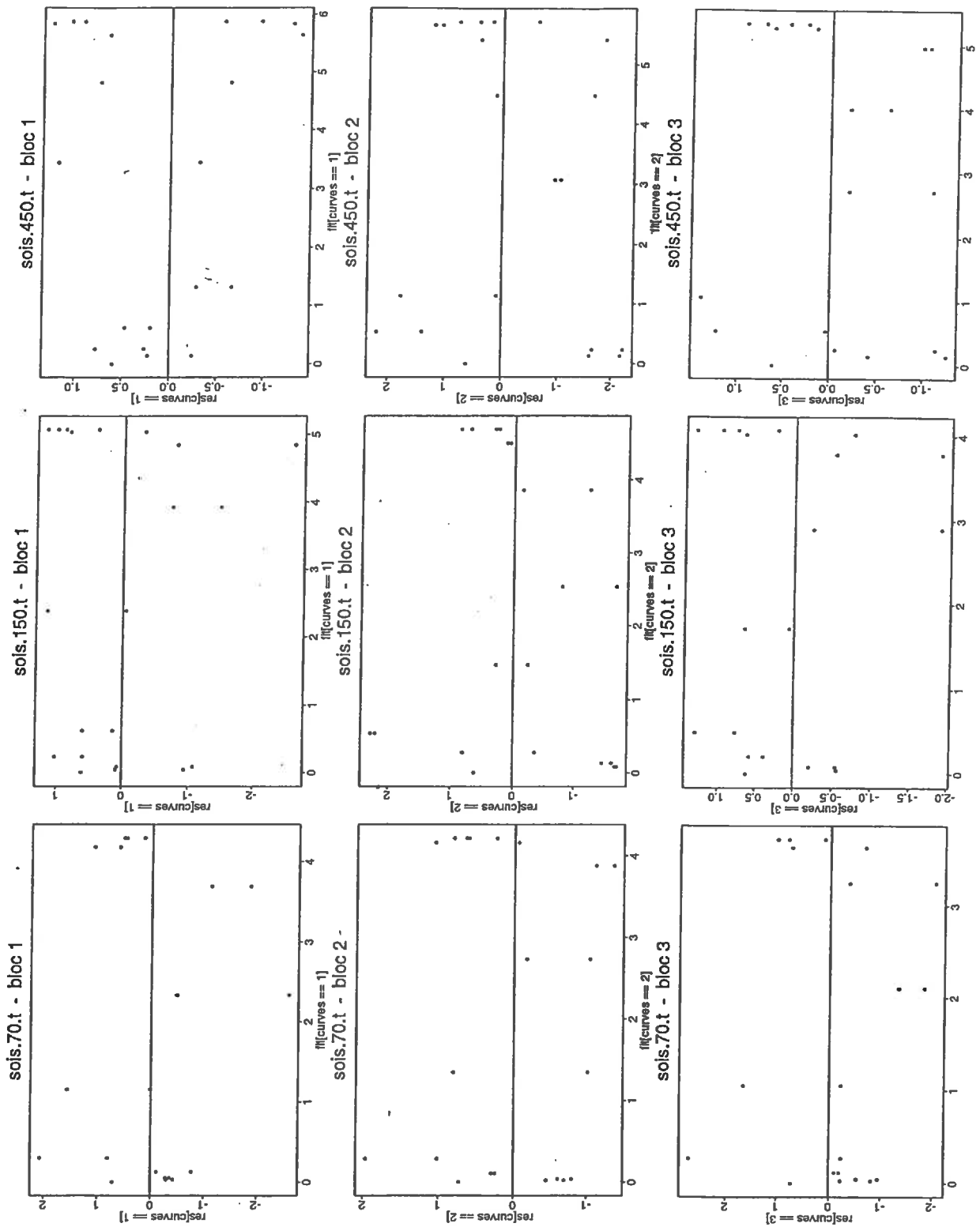
*Annexe II-2.7. Confrontation entre les courbes ajustées et les valeurs observées (Pernel ; densités 70, 150, 450 p/m<sup>2</sup> ; semis tardif ; essai 1996)*



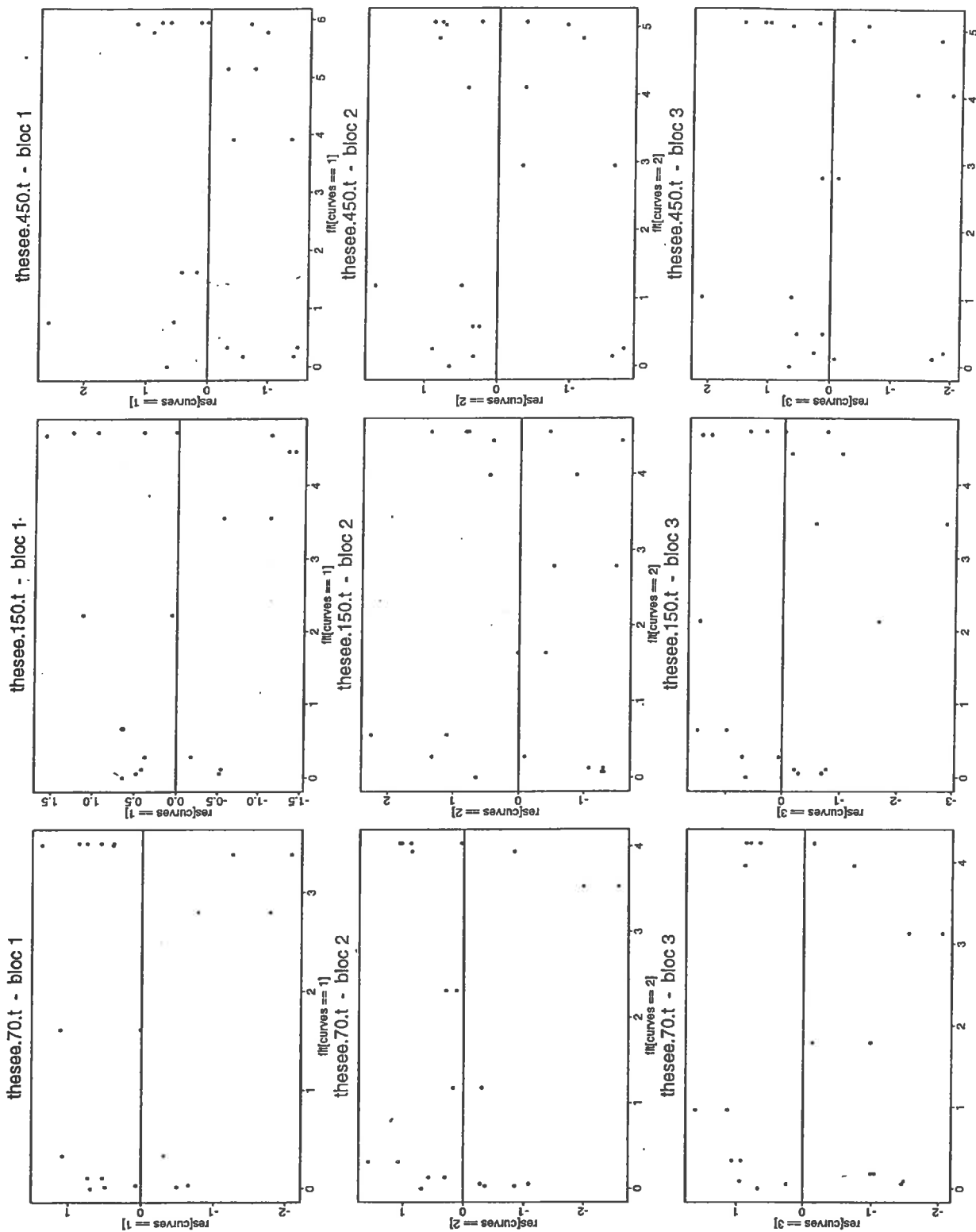
*Annexe II-2.8. Résidus du modèle d'estimation du LAI, en fonction des estimés (Thésée ; densités 70, 150, 350 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce ; essai 1996)*



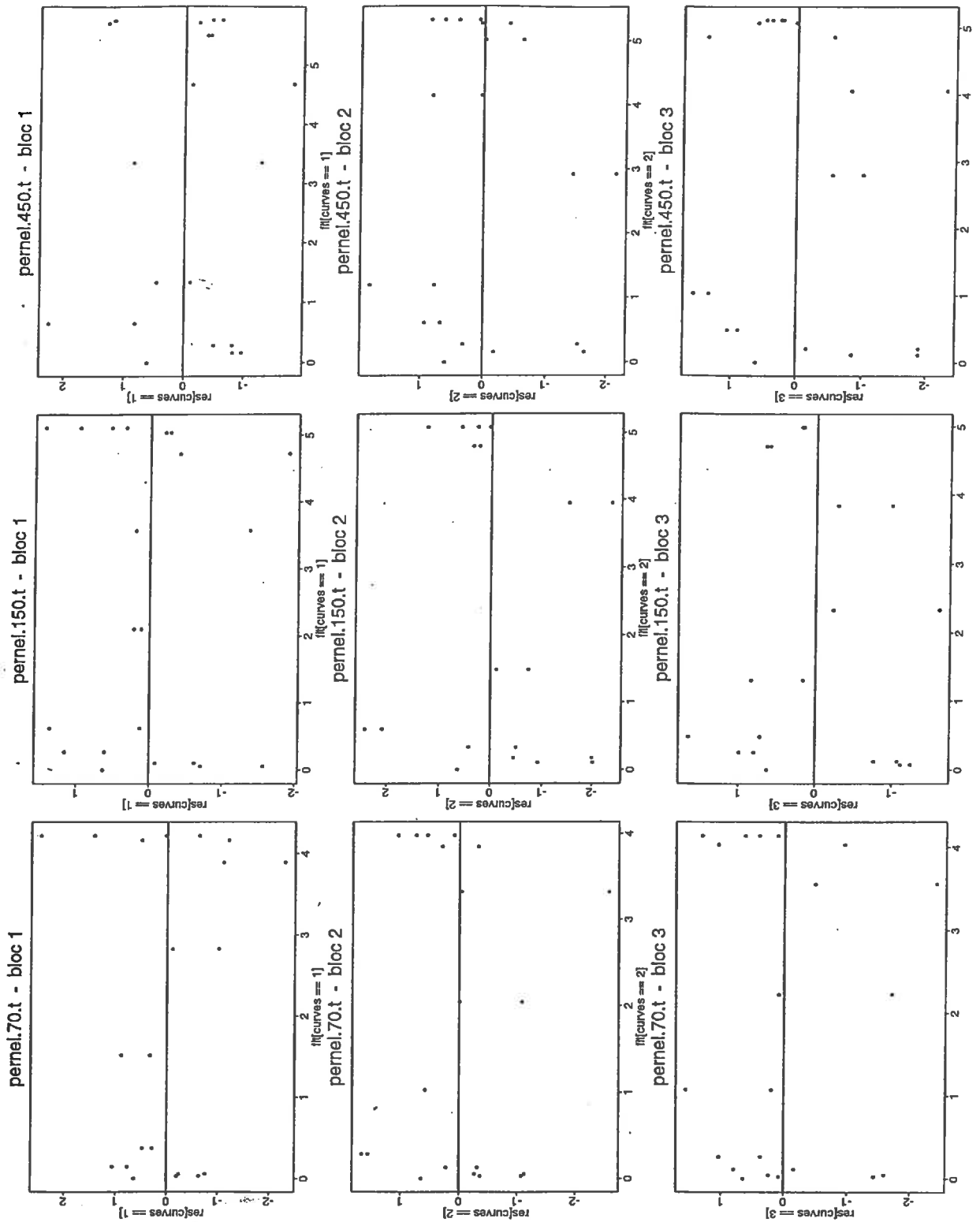
**Annexe II-2.9. Résidus du modèle d'estimation du LAI<sub>b</sub> en fonction des estimés (Pernel ; densités 70, 150, 350 p/m<sup>2</sup> ; semis précoce ; essai 1996)**



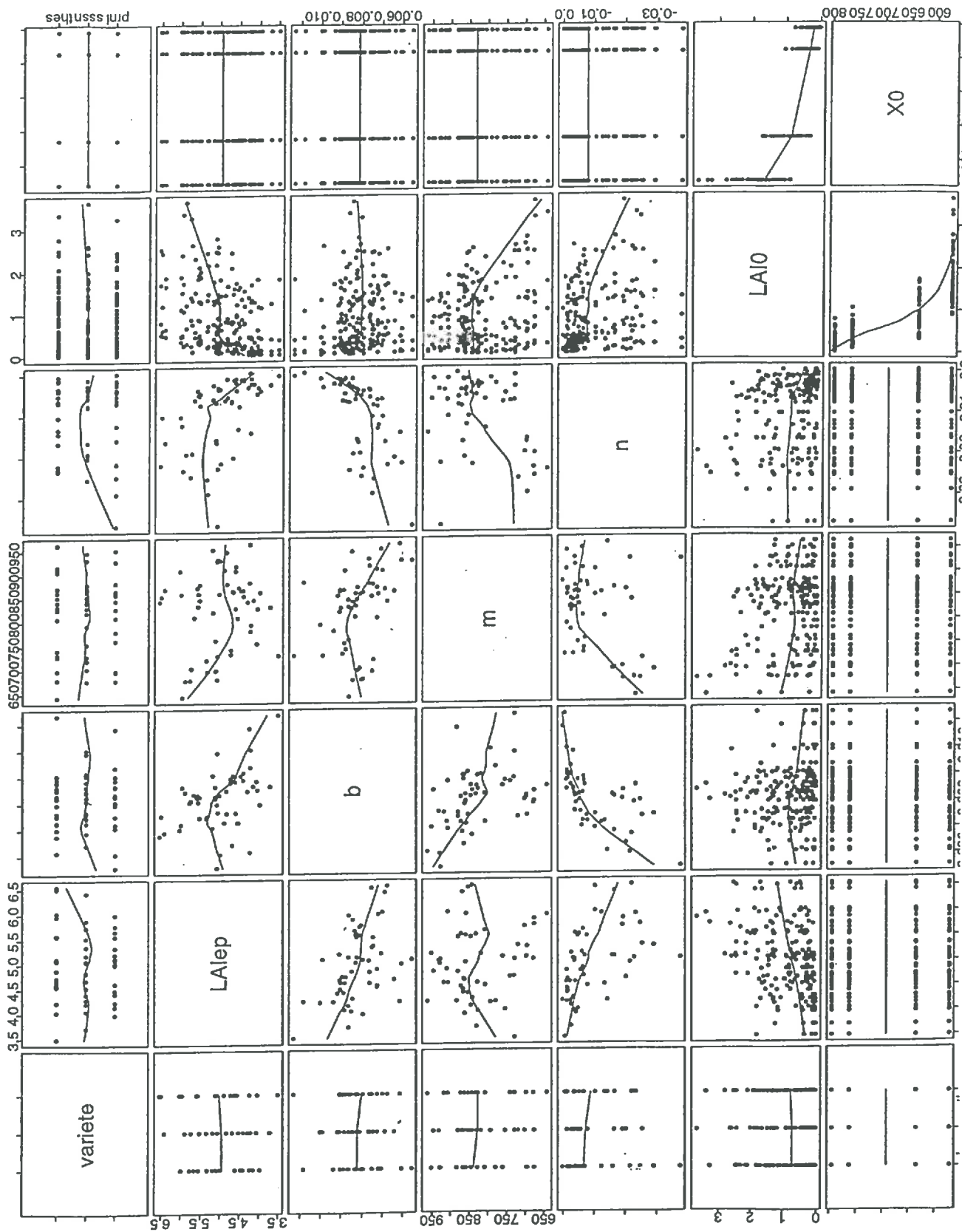
*Annexe II-2.10. Résidus du modèle d'estimation du LAI<sub>e</sub> en fonction des estimés (Soissons ; densités 70, 150, 450 p/m<sup>2</sup> ; semis tardif ; essai 1996)*



*Annexe II-2.11. Résidus du modèle d'estimation du LAI<sub>0</sub> en fonction des estimés (Thésée ; densités 70, 150, 450 p/m<sup>2</sup> ; semis tardif ; essai 1996)*

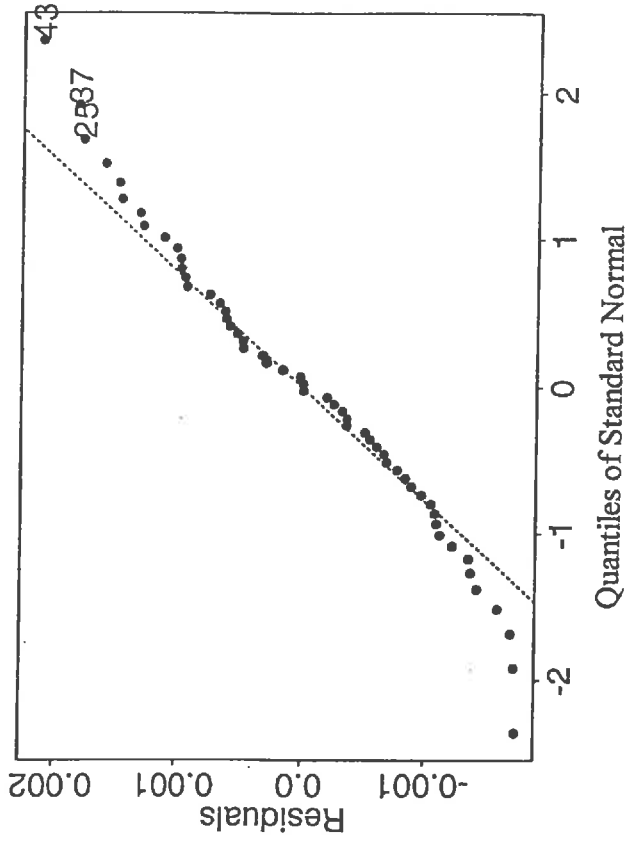
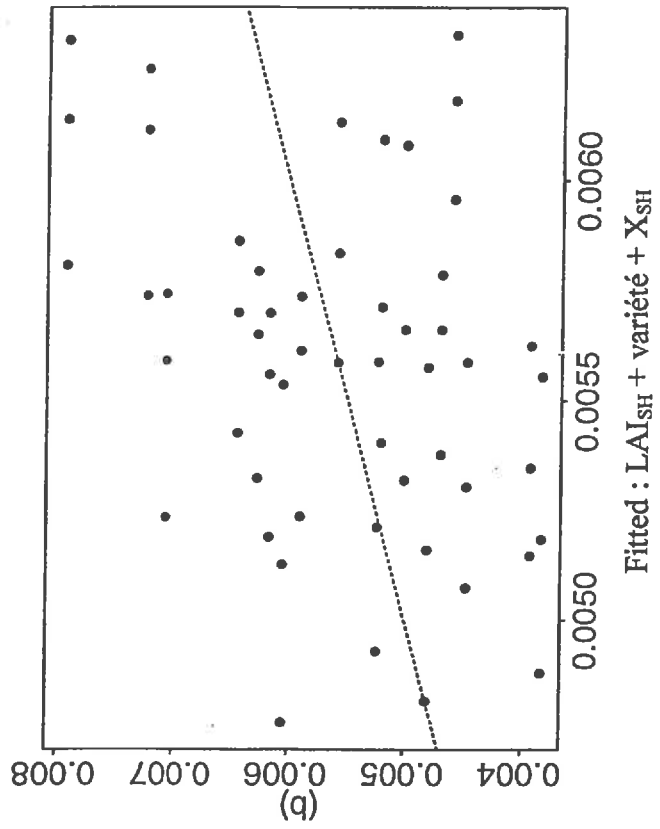
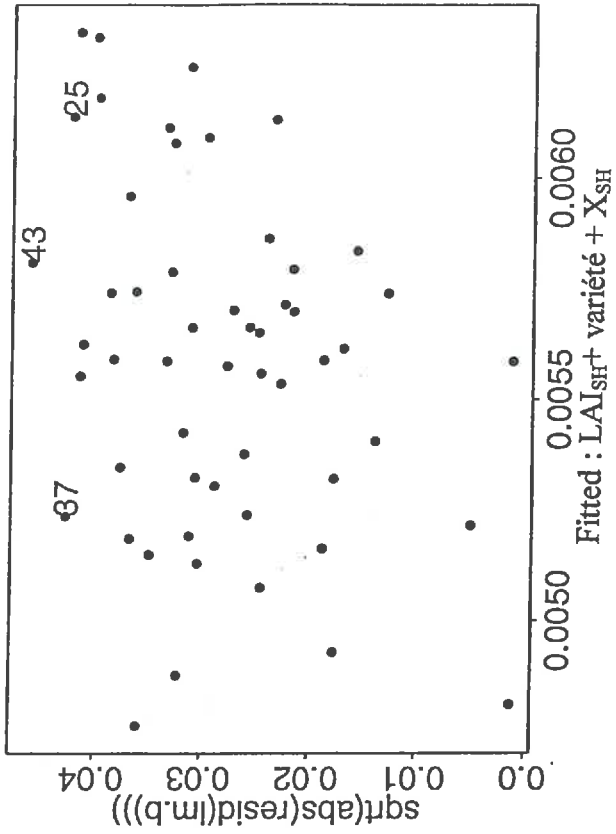
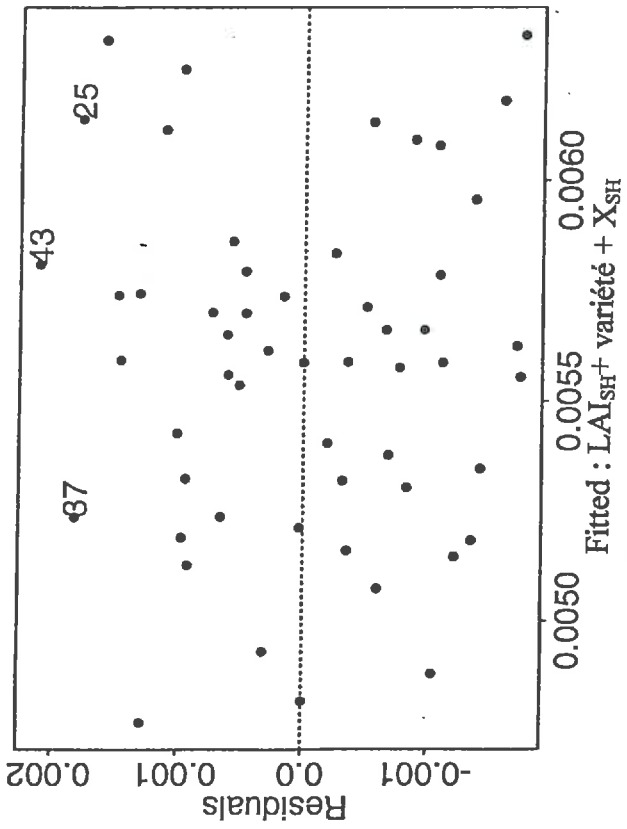


*Annexe II-2.12. Résidus du modèle d'estimation du LAI<sub>b</sub> en fonction des estimés (Pernel ; densités 70, 150, 450 p/m<sup>2</sup> ; semis tardif ; essai 1996)*

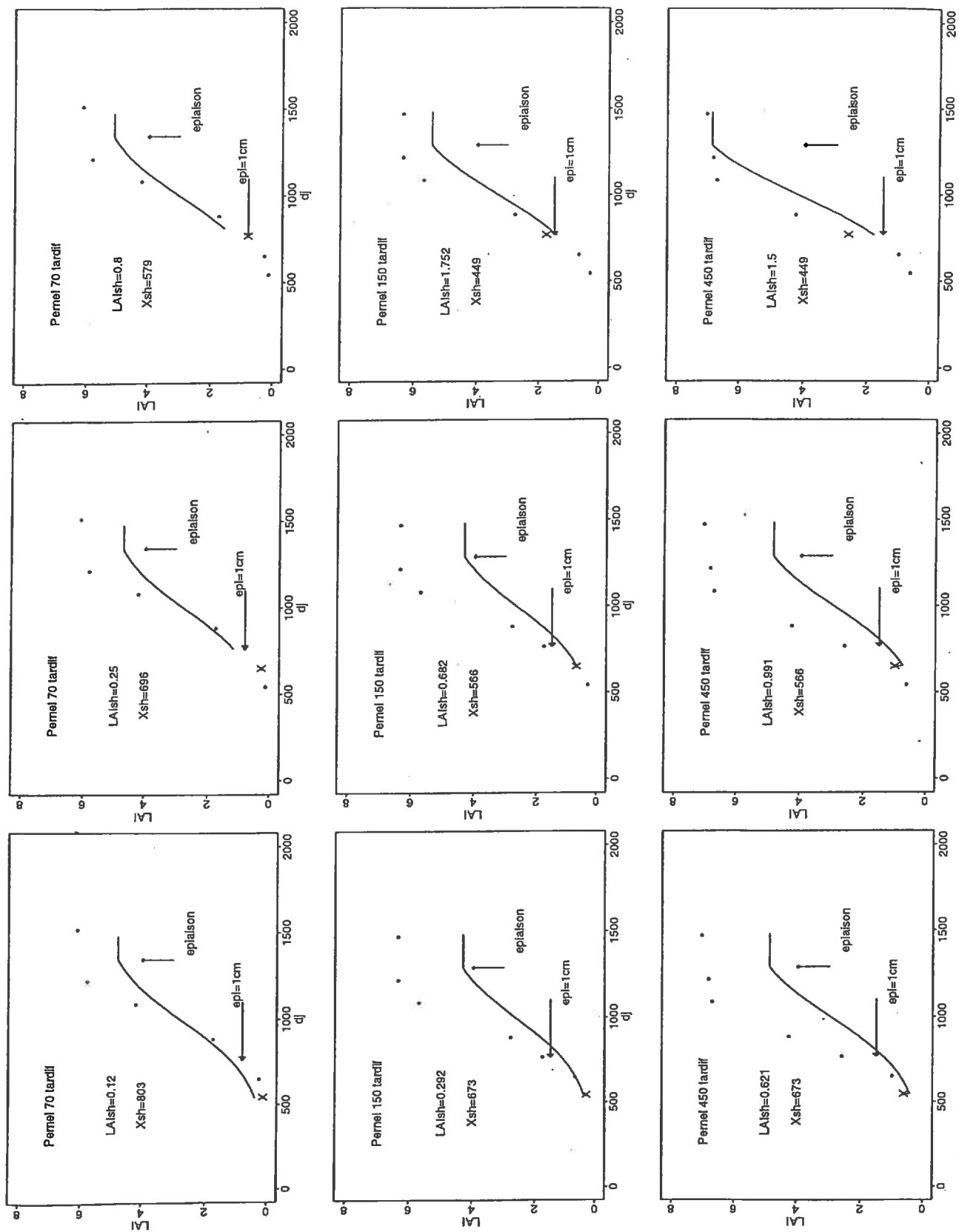


Annexe II-2.13. Relation entre les paramètres  $LAI_{ep}$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $n$  et les  $LAI_{SH}$  et le  $X_{SH}$  (en indice)

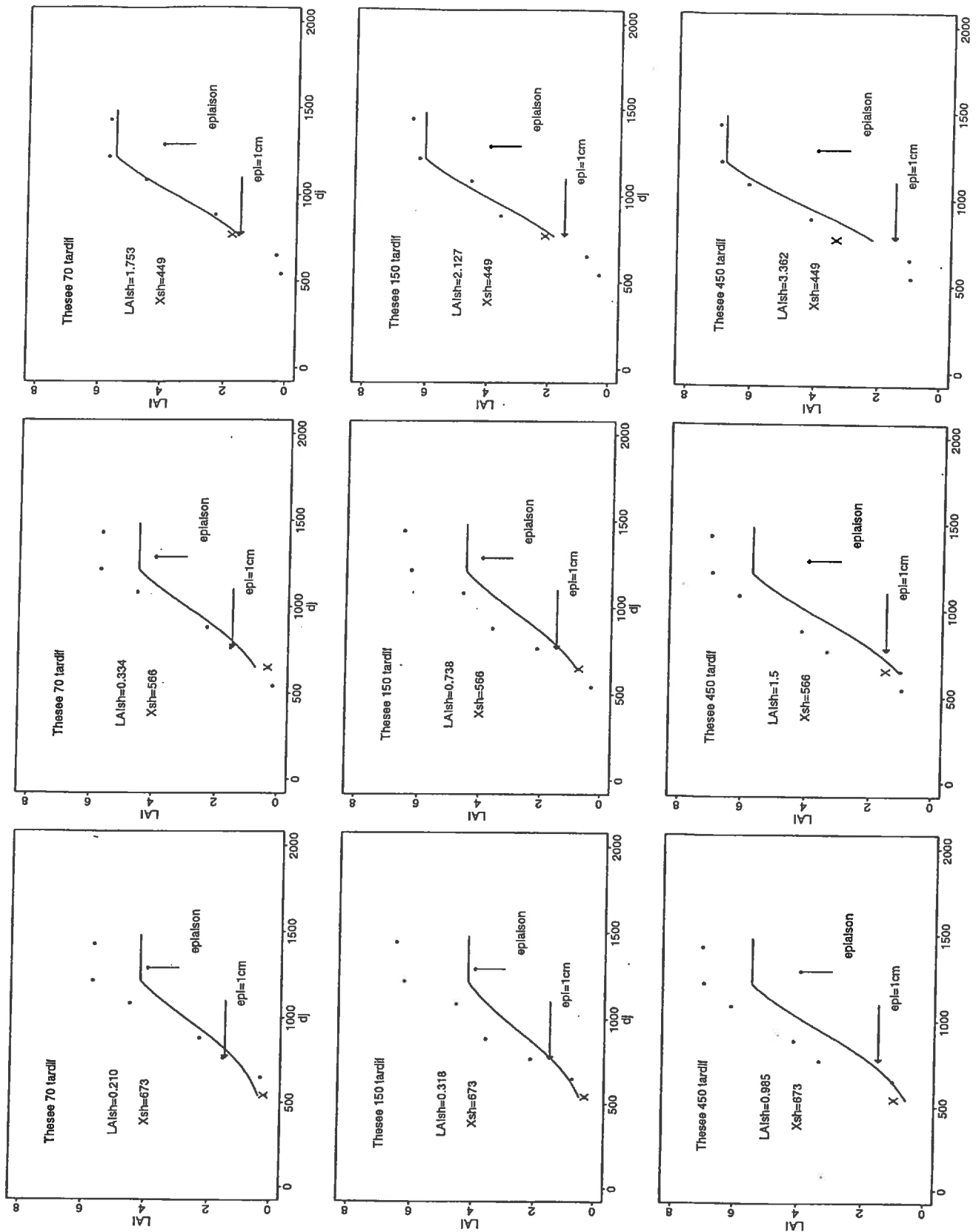




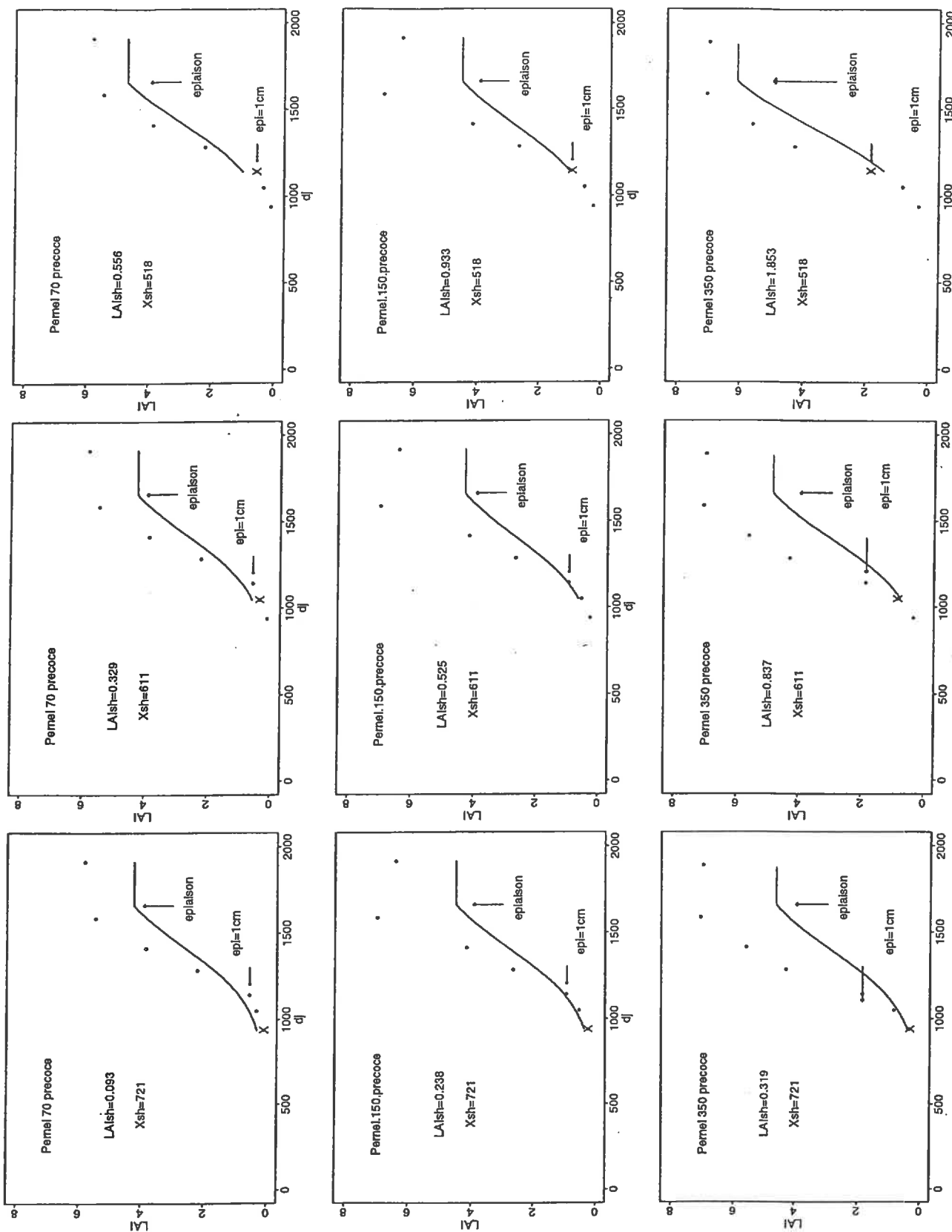
Annexe II-2.14. Résidus du modèle d'estimation du paramètre "b"



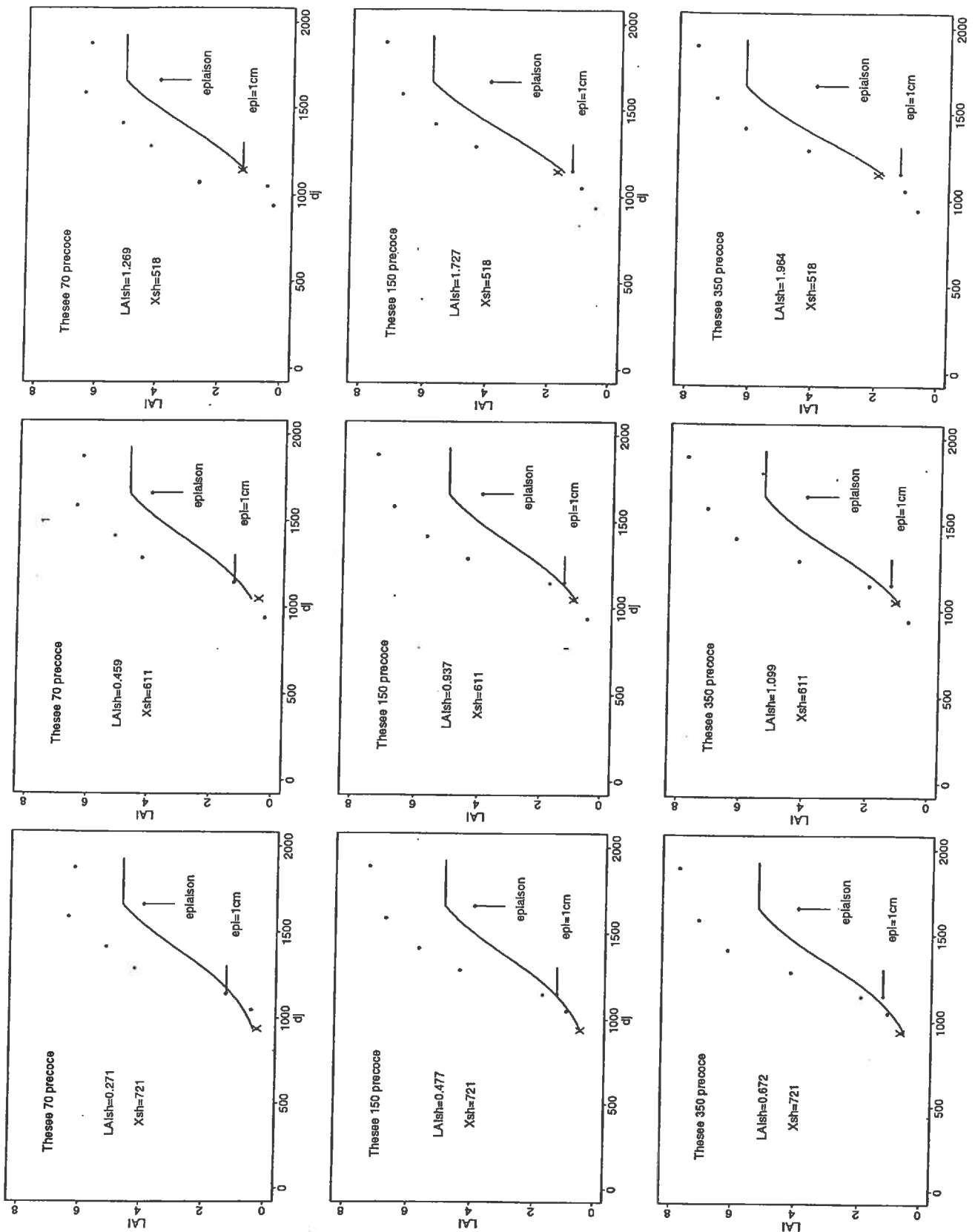
**Annexe II-2.15. Simulation de l'indice foliaire (LAI en ordonnée, dj en abscisse) de 1995 avec les paramètres estimés (deuxième méthode d'estimation de "m") pour différentes dates de mesure du LAI<sub>SH</sub> (Pernel, densités 70, 150, 450 ; semis tardif (les 3 densités sont en ligne et les dates d'observation en colonne)**



Annexe II-2.16. Simulation de l'indice foliaire (LAI en ordonnée, dj en abscisse) de 1995 avec les paramètres estimés (deuxième méthode d'estimation de "m") pour différentes dates de mesure du LAI<sub>SH</sub> (Thésée, densités 70, 150, 450 ; semis tardif (les 3 densités sont en ligne et les dates d'observation en colonne)



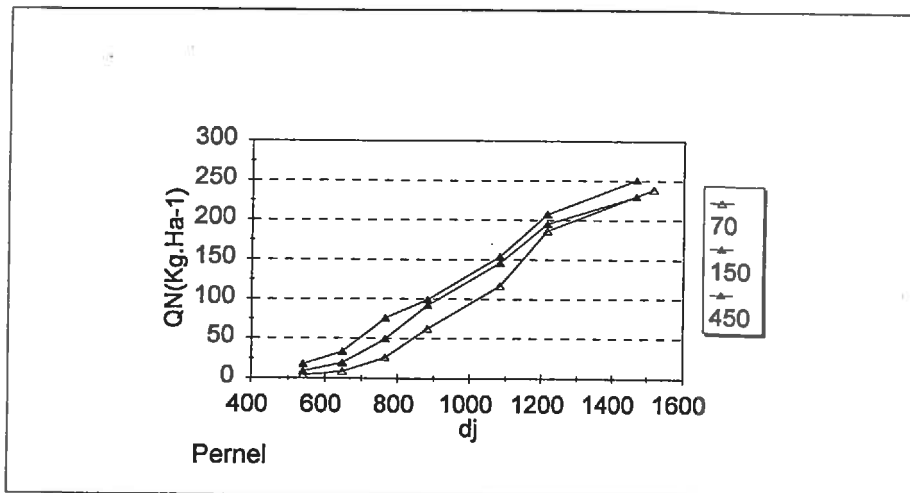
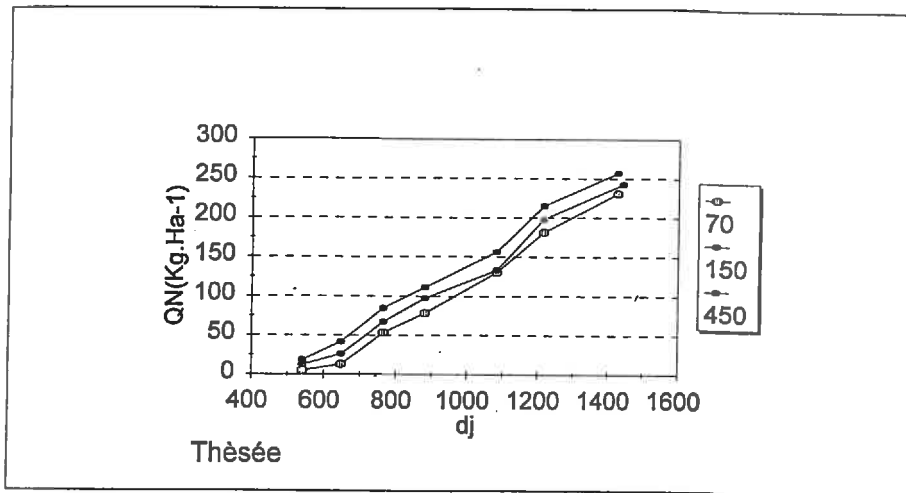
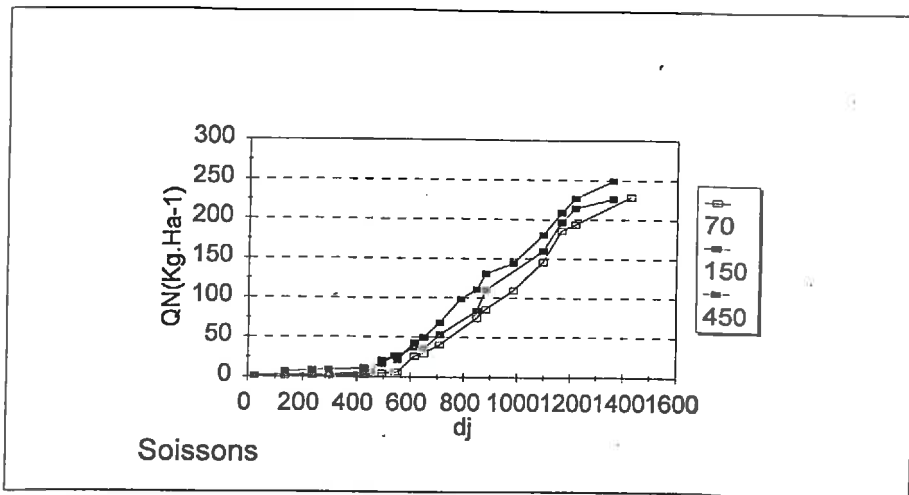
Annexe II-2.17. Simulation de l'indice foliaire (LAI en ordonnée, dj en abscisse) de 1995 avec les paramètres estimés (deuxième méthode d'estimation de "m") pour différentes dates de mesure du LAI<sub>SH</sub> (Pernel, densités 70, 150, 350 ; semis précoces (les 3 densités sont en ligne et les dates d'observation en colonne))



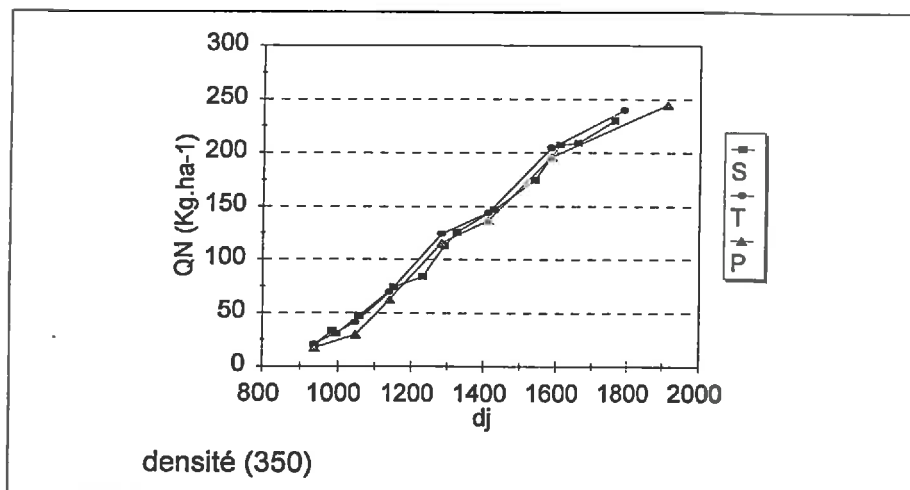
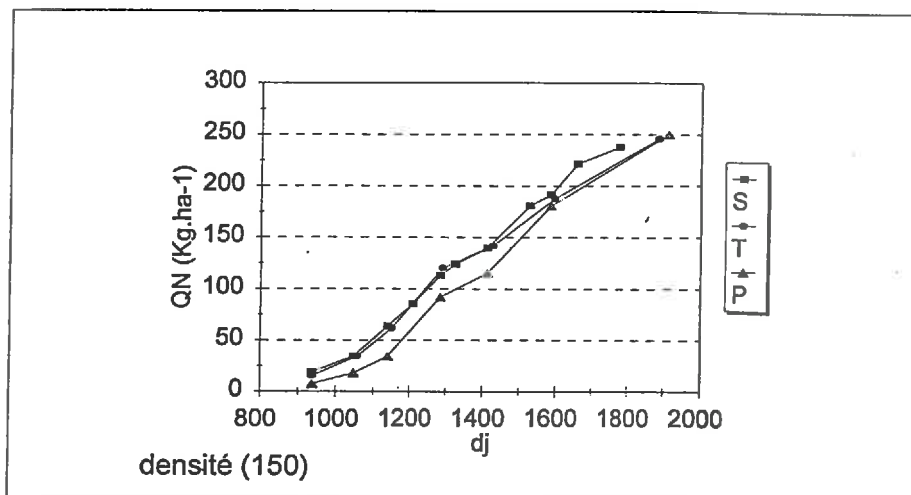
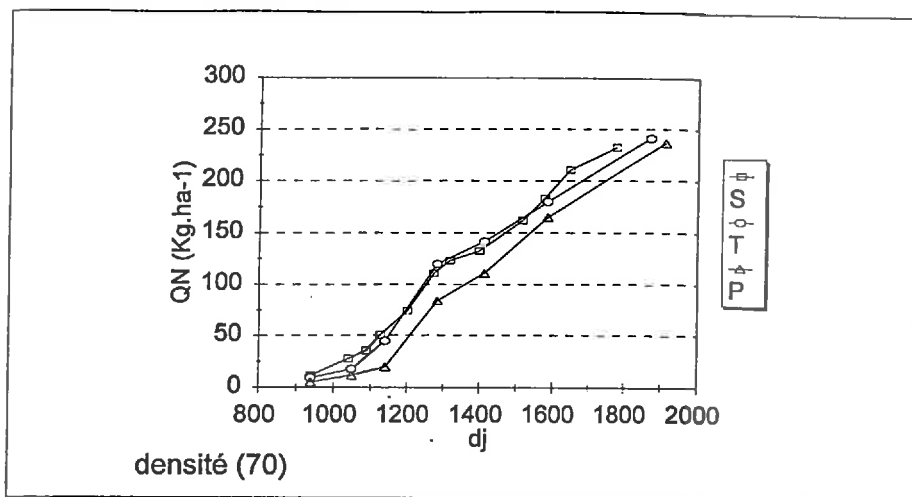
Annexe II-2.18. Simulation de l'indice foliaire (LAI en ordonnée, dj en abscisse) de 1995 avec les paramètres estimés (deuxième méthode d'estimation de "m") pour différentes dates de mesure du LAISH (Thésée, densités 70, 150, 350 ; semis précoce (les 3 densités sont en ligne et les dates d'observation en colonne)

**DEUXIÈME PARTIE :**

**ANNEXES CHAPITRE 3**

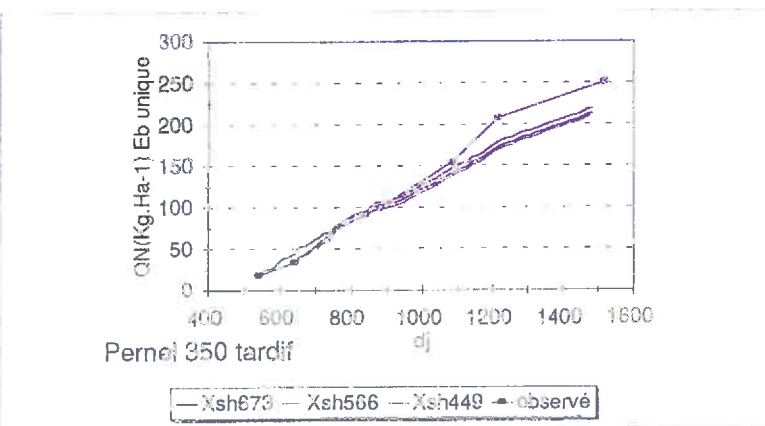
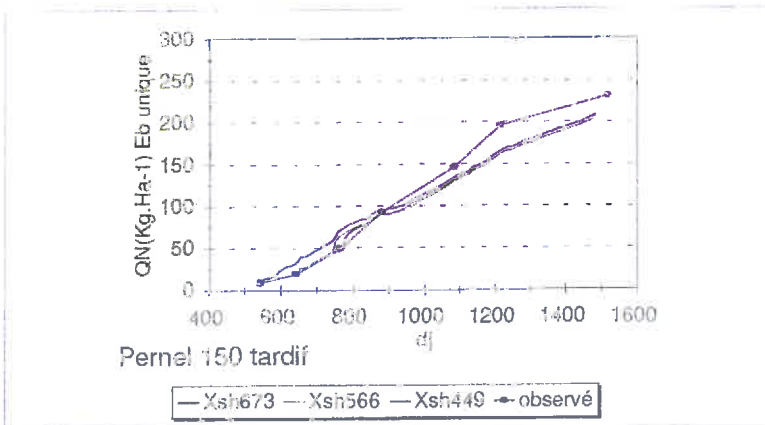
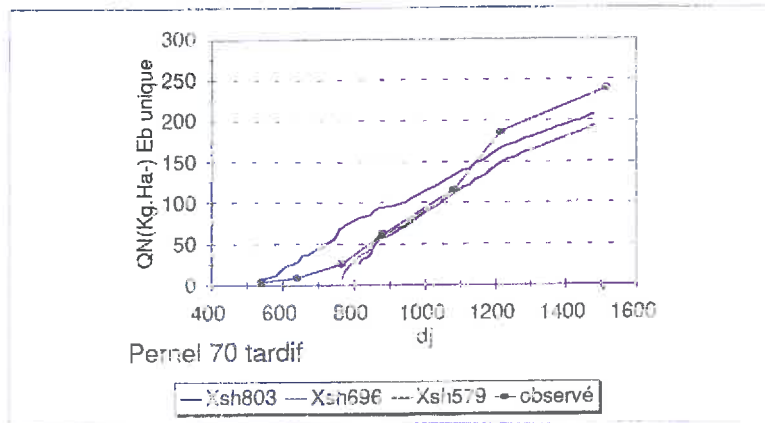


**Annexe II-3.1. Comparaison de la cinétique des besoins en azote pour les 3 variétés (Soissons (S), Thésée (T), Pernel (P) pour chaque densité (70, 150, 450 p/m<sup>2</sup>) ; semis tardif)**

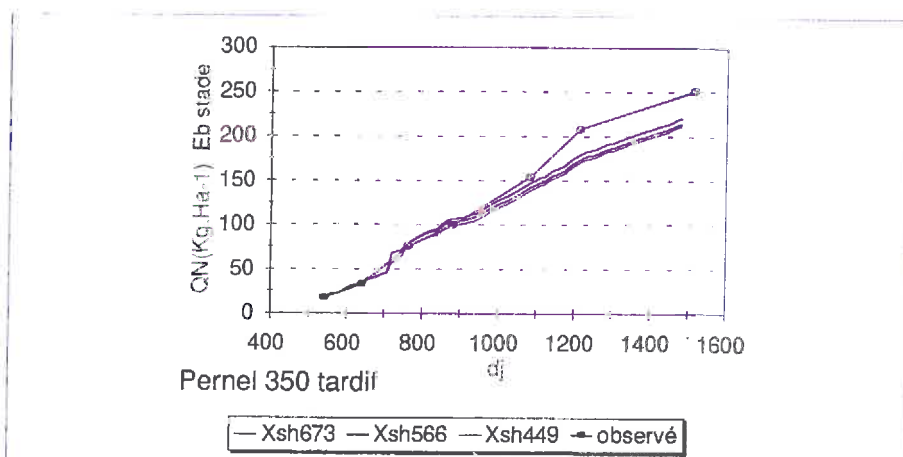
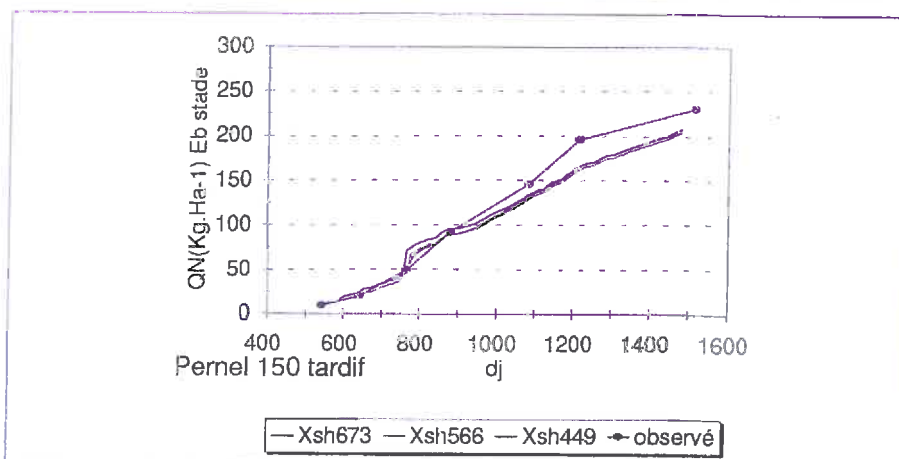
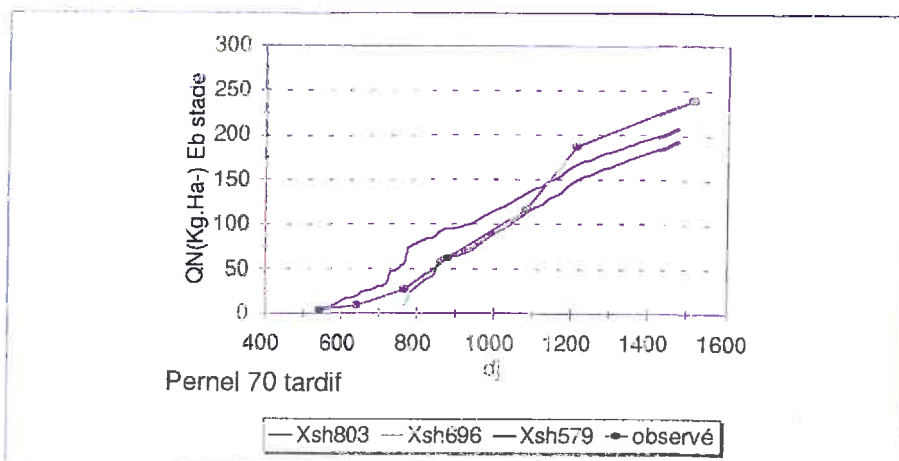


**Annexe II-3.2. Comparaison de la cinétique des besoins en azote pour les 3 variétés (Soissons (S), Thésée (T), Pernel (P) pour chaque densité (70, 150, 350 p/m<sup>2</sup>) ; semis précoce)**





**Annexe II-3.3. Besoins en azote de Pernel simulés à différentes dates d'observation de  $X_{SH}$  (pour chaque densité (70, 150, 450 p/m<sup>2</sup>) ; semis tardif)  
Coefficient de conversion du PAR intercepté ( $\epsilon\beta$ ) unique pour tout le cycle**



**Annexe II-3.4. Besoins en azote de Pernel simulés à différentes dates d'observation de  $X_{SH}$  (pour chaque densité (70, 150, 450 p/m<sup>2</sup>) ; semis tardif)**  
**Coefficient de conversion du PAR intercepté ( $\epsilon\beta$ ) estimé pour chaque stade**

## Abstract

The goal of our study is to define the scientific bases of an operational procedure that allows to estimate early in the season in an early stage the daily nitrogen requirements of winter wheat from the end of winter until the anthesis, for a large range of cultivars. Our research seeks the possible site specific management of nitrogen supply, in a perspective of reducing the negative impacts of agriculture on the environment.

In order to archive this objective, we have created a predictive model of the leaf area index (LAI) evolution based on the early estimation of LAI (initial value). The parameters of this model were defined by the development stage and the variety. A particular attention was paid to the quality of the robustness of the relationships found: a complete set of data allowed us to cross 3 cultivars (*Soissons*, *Thésée* and *Pernel*), 3 densities and 2 sowing dates over 2 years.

The LAI model was compared to classical models of dynamic growth of biomass (Monheit 1977), and the dilution curve model (Lemaire and Salette, 1984). In order to test whether the model of nitrogen requirements was operational, we studied the sensitivity of the model from an operational point of view. The initial value of LAI was not directly measured but was estimated from the following indicators of wheat status:

- Cover Ratio (CR %) usually used by farmers
- Radiometric Reflectance in the Red and Near Infrared bands which is converted into vegetation index (exemple TSAVI).

However the relation between LAI and these indicators was not steady but depended on vegetation structure, and this, changed with variety and density.

In order to obtain steady analytical relationships between LAI and CR or LAI and TSAVI for given agronomic conditions, a tridimensionnal model (3D) of wheat structure was developed simultaneously with our work. This model can represent the growing stages of wheat and particularly the freedom degrees of structure. It further takes into account leaf shape and its orientation, and also optical characteristics. It allows to simulate a canopy, even an heterogeneous one, and to calculate the reflectance for given illumination condition.

Using the 3D model we have constructed the abacus LAI-CR and LAI-TSAVI for the 3 varieties mentioned. A sensitivity analysis of the 3D model allowed to classify the parameters which are responsible for the variation of the relation between LAI, the CR or the TSAVI indicators. To be able to use the 3D model for other cultivars and other agronomic conditions, we have developed adequate techniques to measure easily the plant parameters using photogrammetry.

**Keys words :** *Winter wheat, dynamic nitrogen requirements, management of inputs, growth model, cultural practices, cultivar, density, precision agriculture, canopy structure, leaf area index, biomass, indicators, cover ratio, radiometry, reflectance, photogrammetry, stereovision.*

## Résumé

Notre objectif est de définir les bases scientifiques d'une procédure opérationnelle qui permette d'estimer précocément les besoins en azote du blé sur une base journalière depuis la sortie de l'hiver jusqu'à la floraison et pour une large gamme de variétés. Notre recherche vise à rendre possible la modulation des apports d'azote, dans une perspective de réduction des impacts négatifs de l'agriculture sur l'environnement (eaux souterraines, etc.).

Pour répondre à cet objectif, on a créé un modèle prédictif de l'évolution de l'indice foliaire sur la base d'une estimation précoce d'une valeur initiale. Les paramètres entrant dans le modèle sont eux-mêmes déterminés en fonction du stade d'observation de cette valeur initiale et de la variété. La qualité de robustesse des relations trouvées a fait l'objet d'une attention particulière : un jeu de données très complet a permis de croiser, sur deux ans, trois variétés (Soissons, Thésée, Pernel), trois densités et deux dates de semis.

Le modèle d'indice foliaire a été à son tour combiné avec une modélisation classique de la dynamique de croissance de la biomasse potentielle (formalisme de Monteith) et des besoins en azote (travaux de Lemaire et Salette). La sensibilité du modèle d'estimation des besoins en azote à différentes dates d'observation du LAI sortie hiver ( $LAI_{SH}$ ), a été réalisée dans le but de tester le caractère opérationnel de la méthode.

L'indice foliaire repose notamment sur la mesure d'un indicateur de l'état de la culture, duquel on tire une estimation initiale. Nous proposons, après les avoir testés, les deux indicateurs suivants :

- Le taux de couverture (TC %) que les agriculteurs utilisent spontanément lorsqu'ils font leur "tour de plaine" ;
- La réflectance radiométrique dans les bandes du rouge et du proche infrarouge, ou encore une combinaison de ces bandes sous la forme d'un indice de végétation (TSAVI), que l'on peut aisément mesurer en continu grâce aux techniques de l'agriculture de précision (capteurs embarqués, positionnement GPS).

Malheureusement la relation entre indicateurs et indice foliaire n'est pas unique : elle dépend des facteurs agronomiques (variété, densité).

Le passage des indicateurs à l'indice foliaire a été réalisé grâce à la mise en oeuvre d'un modèle de structure du blé en 3D, développé parallèlement à notre travail. Ce modèle rend compte de la croissance de la plante au cours du tallage et, particulièrement, des degrés de liberté de la structure, du port foliaire et des propriétés optiques. Il permet de simuler un peuplement, même hétérogène, et calcule la réflectance dans des conditions données d'éclairement.

Grâce à cet outil, nous avons construit des abaques "indice foliaire-TC %" et "indice foliaire-TSAVI" pour les trois variétés sélectionnées. Une étude de sensibilité du modèle 3D a permis de hiérarchiser les paramètres et de proposer à l'utilisateur une caractérisation de la structure du blé par des grandeurs non-ambiguës, dans le souci d'étendre la démarche à d'autres variétés et dans d'autres conditions agronomiques.

**Mots-clés :** Blé d'hiver, dynamique des besoins en azote, gestion des intrants, modèle de croissance, techniques culturales, variété, densité, agriculture de précision, structure du couvert, indice foliaire, biomasse, indicateurs, taux de couverture du sol, radiométrie, réflectance, photogrammétrie, stéréovision.